Marcin Braun
Krzysztof Byczuk
Agnieszka Seweryn-Byczuk
Elżbieta Wójtowicz

Zrozumieć fizykę 3

dla liceum ogólnokształcącego i technikum

Zakres rozszerzony

nowa era
Twoje mocne strony

Zrozumieć fizykę

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

Zakres kształcenia: rozszerzony
Etap edukacyjny: III
Typ szkoły: ponadpodstawowa (liceum ogólnokształcące i technikum)
Rok dopuszczenia: 2021

Numer ewidencyjny w wykazie MEiN: 1002/3/2021

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

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

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

Wykorzystywanie treści niniejszego Utworu, w jakiejkolwiek formie lub w jakimkolwiek procesie, do celów eksploracji tekstu i danych, uczenia maszynowego, rozwoju i/lub szkolenia i/lub wzbogacania sztucznej inteligencji jakiegokolwiek rodzaju jest surowo zabronione.

nowa era

© Copyright by Nowa Era Sp. z o.o. 2024
ISBN 978-83-267-5074-8

Autorstwo zadań: Joanna Borgensztajn – zad. 1 i 2 s. 273, zad. 3, 4 i 5 s. 274, zad. 1 i 2 s. 339, Dorota Jeziorek-Knioła – zad. 1 i 2 s. 143, zad. 3 i 4 s. 144, zad. 1 s. 218, zad. 2 i 3 s. 219.

Konsultacje merytoryczne: Jacek Hirsch, Michał Matraszek. **Opracowanie redakcyjne i redakcja merytoryczna:** dr Agnieszka Grzelińska. **Współpraca redakcyjna:** Dorota Brzozowiec-Dek, Miłosz Budzyński. **Redakcja językowa:** Dorota Rzeszewska. **Korekta:** Joanna Sawicka. **Fotoedycja:** Katarzyna Iwan-Maławska. **Nadzór artystyczny:** Kaia Pichler. **Opieka graficzna:** Ewa Kaletyn. **Projekt graficzny:** Klaudia Jarocka. **Projekt okładki:** Maciej Galiński, wykorzystano elementy autorstwa Wojtka Urbanka. **Opracowanie graficzne:** Klaudia Jarocka-Ciok, Ewa Kaletyn, Maciej Galiński, Agata Muszalska. **Ilustratorzy:** Andrzej Dukata, Joanna Ptak, Ewelina Baran, Ewa Sowulewska, Paulina Podolska, Elżbieta Buczkowska, Zuzanna Dudzic, Laura Maziewska, Paulina Jarmusik, Agata Knajdek, Rafał Buczkowski. **Realizacja projektu graficznego:** Adam Poczciwek.

W rozdziale 11. wykorzystano teksty Weroniki Śliwy z podręcznika „Odkryć fizykę".
Podręcznik „Zrozumieć fizykę" cz. 3 został napisany z wykorzystaniem fragmentów podręcznika do fizyki w zakresie rozszerzonym autorstwa S. Bajtlika, A. i K. Byczuków, S. i Z. Suwaldów, E. Wójtowicz.

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

Druk i oprawa: Opolgraf SA www.opolgraf.com.pl

Spis treści

O czym jest podręcznik 4

11. Grawitacja i elementy astronomii

11.1. Gwiazdy i planety 6
11.2. Układ Słoneczny 14
11.3. Księżyc widziany z Ziemi 21
11.4. Prawo powszechnego ciążenia 28
11.5. Pierwsze i drugie prawo Keplera 37
11.6. Trzecie prawo Keplera 45
11.7. Energia potencjalna grawitacji 49
11.8. Siły pływowe – temat dodatkowy 55
Analiza tekstu. Rok na Czerwonej Planecie . . 60
Wiesz, umiesz, zdasz 62

12. Pole elektryczne

12.1. Ładunki elektryczne i ich oddziaływanie . . 70
12.2. Prawo Coulomba 79
12.3. Pole elektryczne 86
12.4. Pole elektryczne wielu źrodeł 94
12.5. Energia potencjalna, potencjał i napięcie 99
12.6. Ładunki w przewodniku 107
12.7. Ruch naładowanej cząstki w polu elektrycznym 117
12.8. Kondensatory 122
Projekt. Generator Kelvina 133
Wiesz, umiesz, zdasz 135

13. Prąd stały

13.1. Prąd elektryczny i jego natężenie 146
13.2. Obwody elektryczne 155
13.3. Połączenia szeregowe i równoległe . . . 162
13.4. Napięcie a natężenie. Prawo Ohma . . . 171
13.5. Łączenie oporników 178
13.6. Od czego zależy opór elektryczny 182
13.7. Praca i moc prądu elektrycznego 191
13.8. Siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny 196
13.9. Drugie prawo Kirchhoffa 203
Analiza tekstu. Energia na czarną godzinę . 210
Wiesz, umiesz, zdasz 212

14. Pole magnetyczne

14.1. Źródła pola magnetycznego 222
14.2. Linie pola magnetycznego wytwarzanego przez ruch ładunków . . 231
14.3. Siła Lorentza. Wektor indukcji magnetycznej 236
14.4. Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym 244
14.5. Siła elektrodynamiczna 254
14.6. Indukcja magnetyczna pola wokół przewodnika z prądem 258
Projekt. Kierunek linii ziemskiego pola magnetycznego 264
Wiesz, umiesz, zdasz 265

15. Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

15.1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej. 276
15.2. Prawo indukcji Faradaya 284
15.3. Prąd przemienny 289
15.4. Domowa sieć elektryczna 295
15.5. Silniki elektryczne i prądnice 302
15.6. Indukcja wzajemna i samoindukcja . . . 309
15.7. Dioda i prostowanie prądu 319
15.8. Tranzystor 324
Analiza tekstu. Dynamo we wnętrzu Ziemi . . 331
Wiesz, umiesz, zdasz 333

Tabele 341
Spis doświadczeń obowiązkowych 347
Spis infografik 347
Odpowiedzi i wskazówki do wybranych zadań 348
Indeks 355
Literatura 358
Spis rozdziałów w pozostałych częściach 359

O czym jest podręcznik

W podręczniku *Zrozumieć fizykę 3* znajdziesz ważne i ciekawe informacje dotyczące grawitacji, pola elektrycznego, pola magnetycznego i prądu elektrycznego. Dzięki tym wiadomościom zrozumiesz wiele zjawisk z otaczającego cię świata i sprawnie przejdziesz do kolejnych działów fizyki.



Czemu służą poszczególne elementy podręcznika

Przypomnij sobie

Łatwo się zorientujesz, co powinieneś wiedzieć z wcześniejszej edukacji.

Po tej lekcji powinieneś

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

$$g = G\frac{M}{R^2}$$

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

Obszar wokół gwiazd...

Komentarze ułatwią ci zrozumienie informacji z tekstu głównego.

Przykład

Przykłady umożliwią ci prześledzenie toku rozumowania podczas rozwiązywania zadań.

Pytania i zadania

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

A to ciekawe

Dzięki ciekawostkom dowiesz się interesujących faktów związanych z lekcją.

Doświadczenie 1

Doświadczenie obowiązkowe

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

Pole grawitacyjne nie jest tworem...

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

WIESZ, UMIESZ, ZDASZ

Podsumowanie

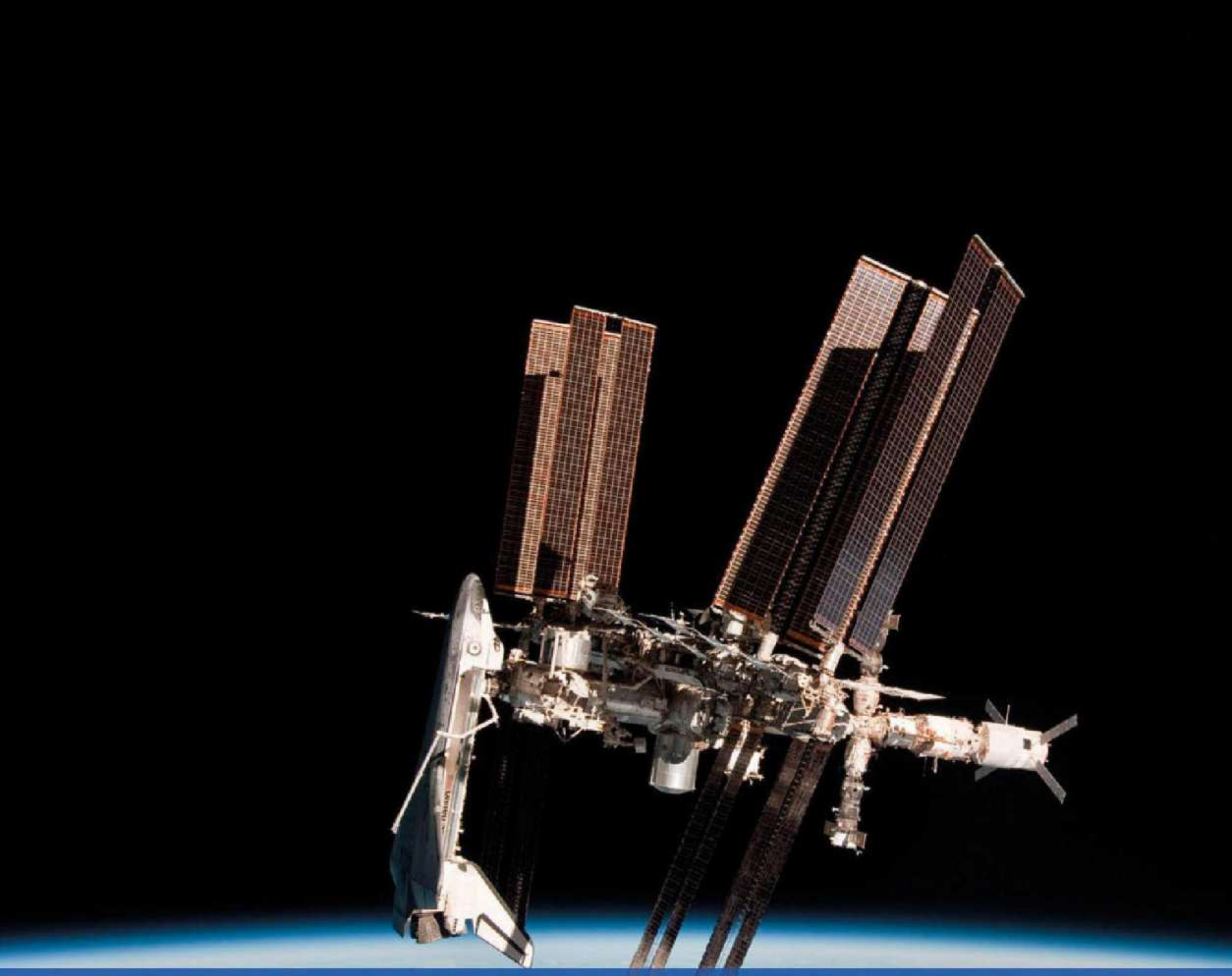
Na tych stronach znajdziesz najważniejsze wiadomości z danego działu.

Sposób na zadanie

Wskazówki i podpowiedzi ułatwią ci rozwiązywanie różnych typów zadań.

Zadania powtórzeniowe

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



11 Grawitacja i elementy astronomii

1. Gwiazdy i planety
2. Układ Słoneczny
3. Księżyc widziany z Ziemi
4. Prawo powszechnego ciążenia
5. Pierwsze i drugie prawo Keplera
6. Trzecie prawo Keplera
7. Energia potencjalna grawitacji
8. Siły pływowe – temat dodatkowy

11.1. Gwiazdy i planety

Przypomnij sobie

- Ziemia obraca się wokół własnej osi oraz krąży wokół Słońca. Następstwo dnia i nocy wynika z ruchu Ziemi wokół własnej osi.
- Na każde ciało w pobliżu powierzchni Ziemi działa siła ciężkości.
- Aby ciało poruszało się ruchem jednostajnym po okręgu, musi na nie działać siła skierowana do środka tego okręgu. Nazywamy ją siłą dośrodkową.



Rys. **11.1.** Księżyc i Wenus widziane z Ziemi

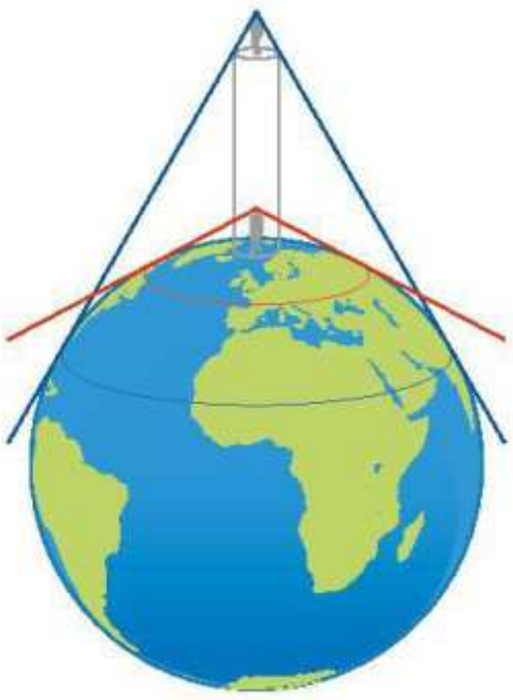
W tym rozdziale zajmiemy się oddziaływaniami grawitacyjnymi. Odpowiadają one nie tylko za spadanie ciał i ich nacisk na podłoże, lecz także za wiele zjawisk w skali kosmicznej – ruch planet wokół Słońca i ruch Księżyca wokół Ziemi, a nawet powstawanie gwiazd i galaktyk. Dlatego w tym samym rozdziale znajdą się jednocześnie wiadomości z grawitacji i z astronomii.

Co już wiesz o kosmosie

Z pewnością wiesz, że Ziemia jest jedną z ośmiu planet krążących wokół Słońca. Planety są znacznie mniejsze i lżejsze od niego i nie świecą własnym światłem, ale odbijają światło Słońca. Ziemię z kolei obiega Księżyc, który także jedynie odbija światło słoneczne. Słońce jest tylko jedną z gwiazd. Nie jest ona ani szczególnie duża, ani jasna, jednak znajduje się znacznie bliżej Ziemi niż inne. Pozostałe gwiazdy są rozrzucone w przestrzeni w najróżniejszych odległościach od naszej planety.

Przemiany jądrowe omówimy w cz. 4 podręcznika.

Gwiazdy, do których należy Słońce, świecą własnym światłem dzięki zachodzącym w nich przemianom jądrowym. Planety są znacznie mniejsze od gwiazd, krążą wokół nich i tylko odbijają ich światło.



Rys. **11.2.** Na kulistej Ziemi horyzont się poszerza, gdy się wznosimy. Gdyby Ziemia była płaska, nie byłoby takiego efektu

Ziemia wiruje także wokół własnej osi – stąd właśnie wynika następstwo dnia i nocy. To wszystko wiemy z książek, filmów czy internetu. Jeśli jednak sami patrzymy w niebo, świat wydaje się zupełnie inny.

Co widzimy na niebie

Uważne przyjrzenie się powierzchni Ziemi pozwoli nam zauważyć, że horyzont ma kształt okręgu, którego promień jest tym większy, im wyżej się znajdujemy. Możemy z tego wnioskować, że Ziemia może mieć kształt kuli, a na pewno – że nie jest płaska (rys. 11.2). Zakrzywienie powierzchni Ziemi to jednak jedyne podobieństwo między wynikami codziennych obserwacji a wiedzą naukową.

Gdy popatrzymy w górę, wyda się nam, że Ziemia jest otoczona znacznie większą sferą, którą oglądamy od środka. Nazywamy ją **sferą niebieską** (od słowa *niebo*, a nie od koloru). W pogodny dzień jest ona błękitna, a w nocy niemal czarna. Na tle tej sfery znajdują się Słońce i Księżyc, a także gwiazdy. Jej wygląd sugeruje, że wszystkie ciała niebieskie znajdują się w tej samej odległości od Ziemi.

Sfera to powierzchnia kuli.

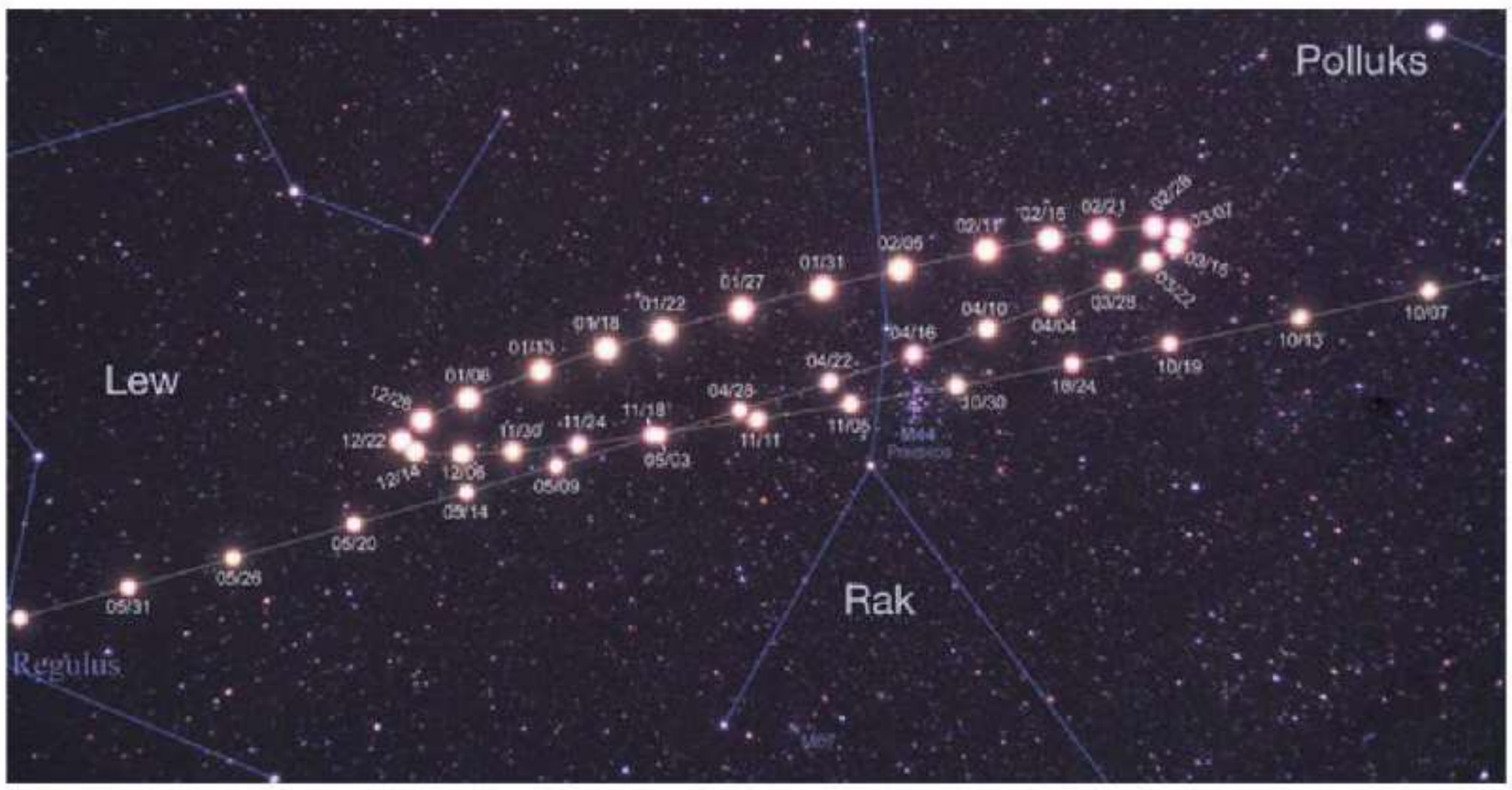
Gdy w nocy obserwujemy, jak w ciągu kilku godzin zmienia się widok nieba, zauważamy, że gwiazdy wschodzą i zachodzą, ale nie zmieniają wzajemnego położenia. Wydaje nam się, że cała sfera niebieska obraca się wokół Ziemi. Tylko Gwiazda Polarna, położona na osi obrotu sfery niebieskiej, pozostaje w spoczynku (patrz rys. 11.3).



Rys. **11.3.** Ślady ruchu gwiazd na niebie, widoczne na zdjęciu o długim czasie naświetlania

Jeszcze dokładniejsze obserwacje nieba, prowadzone przez kilka miesięcy, pozwolą znaleźć na nim obiekty, które oprócz tego, że biorą udział w zwykłym ruchu sfery niebieskiej, czyli wschodzą i zachodzą, dodatkowo powoli poruszają się wśród gwiazd. Starożytni Grecy nazwali je planetami, czyli „gwiazdami błądzącymi".

Na mapie nieba na rys. 11.4 widzimy fragment toru Marsa na tle gwiazd.



Rys. **11.4.** Pętla zakreślana na niebie przez Marsa od października 2009 r. do czerwca 2010 r.

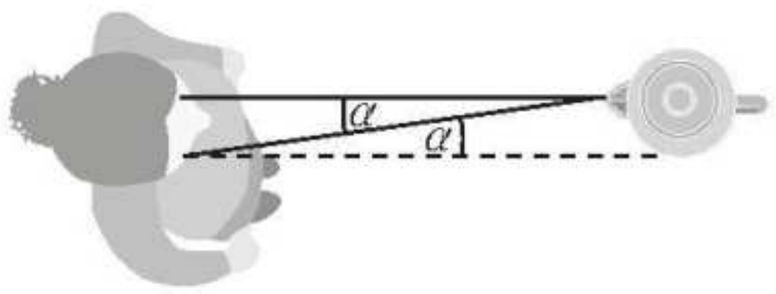
Planety poruszają się po sferze niebieskiej po skomplikowanych torach z wieloma pętlami.

Słońce i Księżyc także poruszają się względem gwiazd po sferze niebieskiej, dlatego starożytni uznawali je za planety.

Od tego, co wiemy, do tego, co widzimy

Skąd tak ogromne różnice między tym, co widzimy na niebie, a tym, co wiemy z astronomii?

Wynikają one z dwóch przyczyn: niedoskonałości naszego wzroku oraz faktu, że swoich obserwacji dokonujemy z powierzchni Ziemi, która porusza się wokół Słońca i wiruje wokół własnej osi.
Nasz mózg ma dwa podstawowe sposoby oceny odległości. Po pierwsze, gdy patrzymy na bliski przedmiot, nasze oczy widzą go w nieco odmiennych kierunkach (rys. 11.5). Po drugie, porównujemy pozorną wielkość obiektu ze znaną nam z innej sytuacji wielkością rzeczywistą. Wiemy na przykład, jak duży jest autobus, więc kiedy wydaje się krótszy od palca, wyciągamy stąd wniosek, że jest daleko.



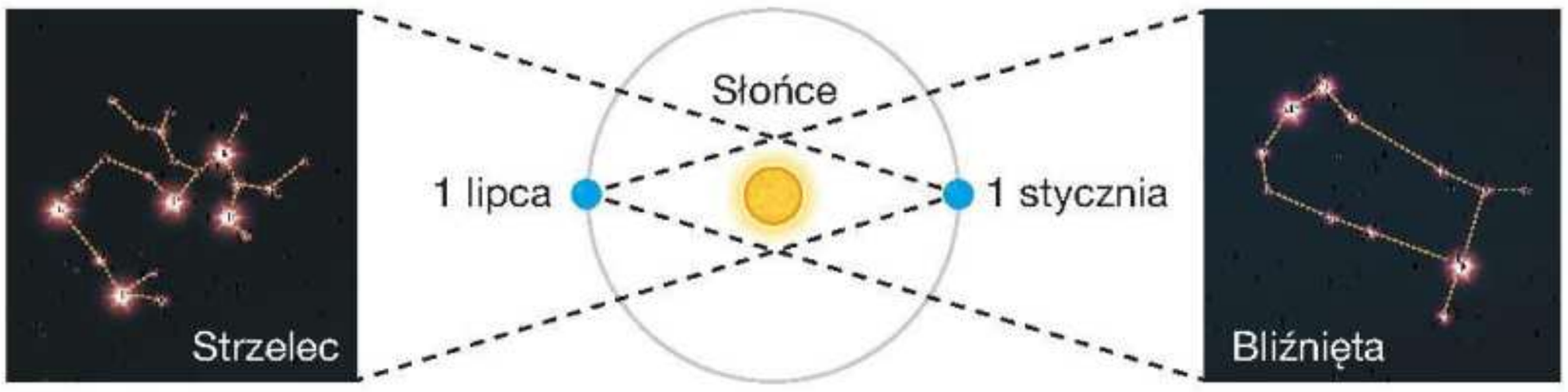
Rys. **11.5.** Im dalej znajduje się czajniczek, tym mniejszy jest kąt α

Sfera niebieska
nie istnieje fizycznie, ale jest pomocnym pojęciem także we współczesnej astronomii.

Obie te metody zawodzą w przypadku ciał niebieskich. Znajdują się one na tyle daleko, że oboje oczu widzi ten sam obraz, a do tego nie znamy z naszego życiowego doświadczenia rzeczywistych wielkości gwiazd i planet. Bez takich wskazówek mózg traktuje wszystkie kosmiczne obiekty, jakby znajdowały się w tej samej odległości. Stąd złudzenie istnienia sfery niebieskiej.
A dlaczego mamy wrażenie, że sfera niebieska się obraca?

> Pozorny obrót sfery niebieskiej wynika z ruchu obrotowego Ziemi wokół własnej osi.

Wraz z całą sferą niebieską porusza się pozornie także Słońce. A dlaczego porusza się ono również względem gwiazd? To z kolei wynika z ruchu Ziemi wokół Słońca (patrz rys. 11.6).
Natomiast skomplikowany ruch planet po sferze niebieskiej jest spowodowany tym, że zarówno obserwowana planeta, jak i Ziemia, z której na nią patrzymy, krążą wokół Słońca. Podobnie złożony może być ruch pasażera karuzeli w układzie odniesienia osoby na drugiej karuzeli.



Rys. **11.6.** Pozorny ruch Słońca wśród gwiazd na sferze niebieskiej wynika z ruchu Ziemi wokół Słońca. W lipcu znajduje się ono na tle gwiazdozbioru Bliźniąt, a w styczniu na tle gwiazdozbioru Strzelca

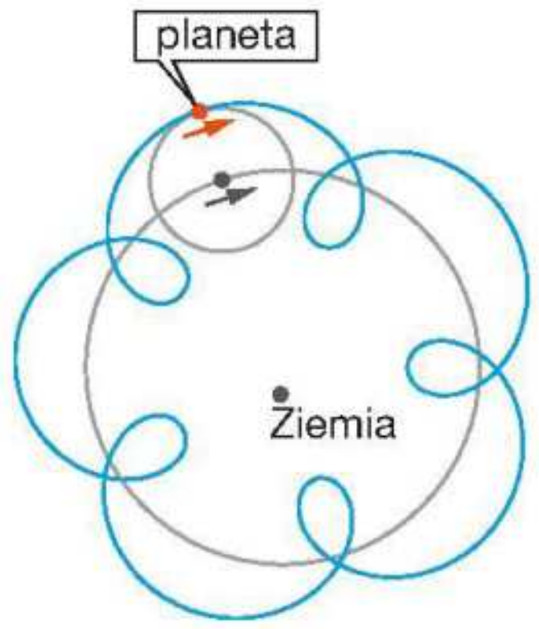
Od tego, co widzimy, do tego, co wiemy

Łatwo dziś wyjaśnić wyniki obserwacji na podstawie wiedzy astronomicznej. Jednak droga w drugą stronę – od obserwacji do dzisiejszej wiedzy – była znacznie trudniejsza i zajęła ludzkości kilka tysięcy lat.

Już w starożytności wiedziano, że Ziemia jest kulista, ale uważano, że jest nieruchoma, a ciała niebieskie krążą wokół niej. Niezwykle trudno było zgodnie z tymi założeniami wyjaśnić ruch planet na podstawie obserwacji, które już wówczas były precyzyjne. Spójną teorię stworzył **Klaudiusz Ptolemeusz** w II w. n.e. Nazywamy ją **teorią geocentryczną**. Uczony opisał ruch innej planety wokół Ziemi jako złożenie kilku ruchów po okręgu. Zgodnie z tą teorią wokół Ziemi krąży nie sama planeta, ale środek mniejszego okręgu, po którym porusza się planeta. Jak widać na rysunku 11.7, takie założenie pozwala wyjaśnić ruch planety po pętli, czyli taki, jaki jest widoczny na ziemskim niebie.

Jeśli dwa okręgi nie wystarczały, można było przyjąć, że po drugim z nich porusza się środek trzeciego okręgu, a dopiero po nim – planeta. Sposobem zwiększenia dokładności było też założenie, że środek największego okręgu nie musi pokrywać się ze środkiem Ziemi.

Teorią Ptolemeusza posługiwano się przez kilkanaście wieków. Pozwalała na wykonywanie precyzyjnych obliczeń, m.in. w nawigacji. Była imponującym dziełem myśli ludzkiej.



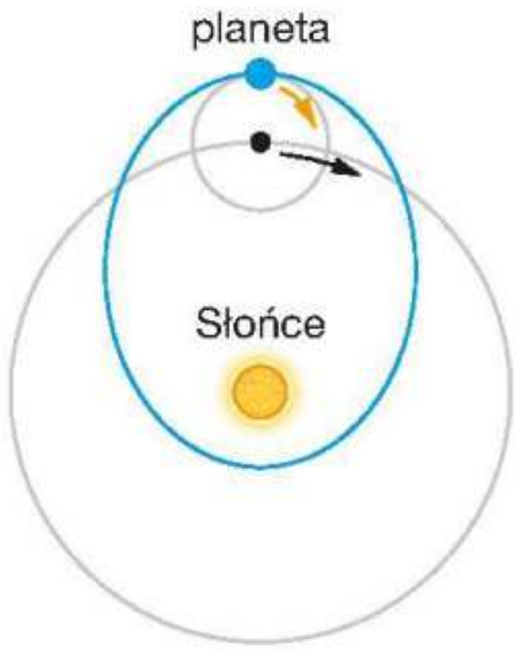
Rys. **11.7.** Tor ruchu planety wokół Ziemi w teorii Ptolemeusza

Kolejne okręgi, po których porusza się planeta, nazywano **epicyklami**.

Kopernik, który umieścił Słońce w środku

Dopiero w XVI w. pojawiła się dla hipotezy Ptolemeusza realna konkurencja. Polski astronom Mikołaj Kopernik sformułował teorię, zgodnie z którą Ziemia to jedna z planet krążących wokół Słońca.

Sam pomysł był rewolucyjny, jednak w szczegółach **teoria heliocentryczna** Kopernika była bliższa poglądom Ptolemeusza niż dzisiejszej wiedzy naukowej. Ruch planet miał odbywać się zgodnie ze starym pomysłem: „po okręgu porusza się środek następnego okręgu" (rys. 11.8).



Rys. **11.8.** Tor ruchu planety wokół Słońca w teorii Kopernika

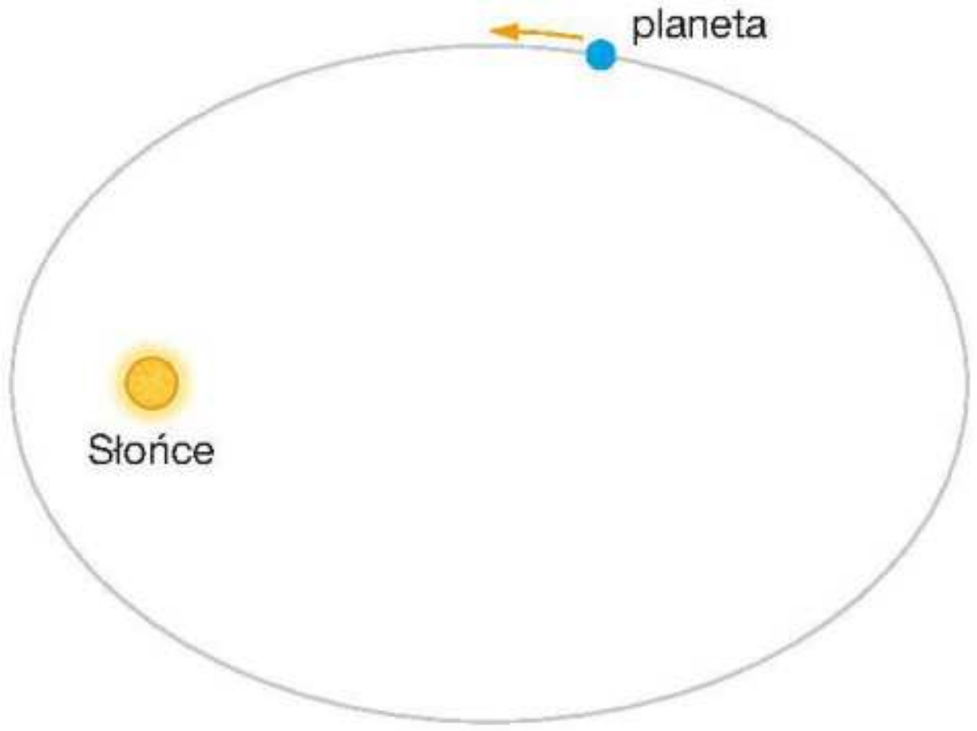
Od Kopernika do Newtona

Początkowo do koncepcji Kopernika podchodzono sceptycznie. Jednego z argumentów podnoszonych przeciw niej dostarczał ruch Księżyca, który krążył wokół Ziemi, a nie wokół Słońca, jak inne planety i gwiazdy. Uważano to za niekonsekwencję.

W tej sytuacji wielkie znaczenie miało odkrycie księżyców Jowisza przez włoskiego uczonego Galileo Galilei, zwanego **Galileuszem**. Okazało się, że sytuacja naszego Księżyca nie jest wyjątkiem i istnieje co najmniej jeszcze jedna planeta z księżycami: Jowisz (dziś wiemy, że księżyce krążą wokół większości planet). Astronomowie powoli przyzwyczajali się do systemu kopernikańskiego.

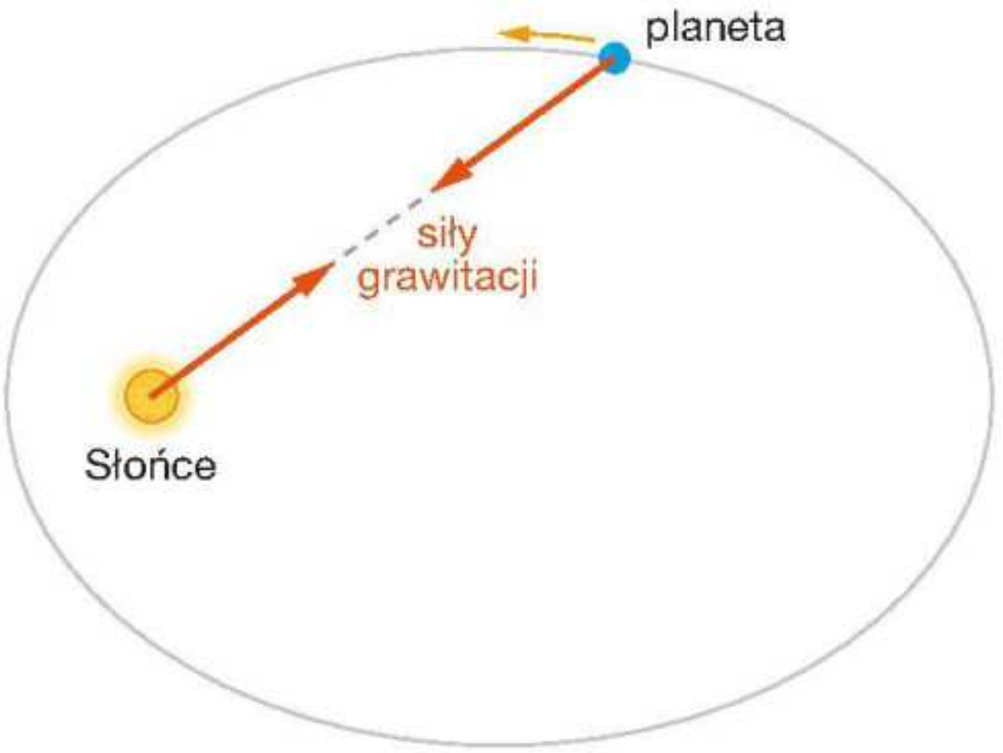
Zwróć uwagę na ortografię w zdaniu: Jest wiele księżyców, ale księżyc Ziemi nazywa się Księżyc.

Kolejny wielki krok w astronomii zrobił **Jan Kepler**. Odkrył, że każda z planet porusza się wokół Słońca po elipsie, czyli krzywej wyglądającej jak spłaszczony okrąg (rys. 11.9). Co prawda elipsa (jeśli nie jest okręgiem, czyli jej szczególnym przypadkiem) jest od niego bardziej skomplikowana, ale za to jedna taka krzywa wystarczy, aby opisać ruch planety.



Rys. **11.9.** Eliptyczna orbita planety wokół Słońca według Keplera. Dla ułatwienia analizy rysunku elipsa jest przedstawiona jako znacznie bardziej spłaszczona niż w rzeczywistości

Co ważne, Kepler opisał ruch planet za pomocą ogólnych ilościowych praw, które omówimy szczegółowo w lekcjach 11.5 i 11.6.
Druga zasadnicza różnica między teoriami Kopernika i Keplera była związana z rolą przypisywaną przez nich Słońcu. Dla polskiego astronoma było ono tylko „latarnią świata", podczas gdy Kepler uznał, że to właśnie obecność gwiazdy powoduje ruch planet po elipsach.
Przypuszczenia te w naukową teorię rozwinął Izaak Newton. Wielki uczony odkrył, że ruch planet zgodny z prawami Keplera można wyjaśnić, jeśli się założy, że Słońce przyciąga planetę siłą o wartości odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi. Tę siłę nazwał **siłą grawitacji** (patrz rys. 11.10). Stwierdził ponadto, że ta sama siła powoduje spadanie ciał na Ziemi.



Rys. **11.10.** Newton opisywał ruch planet tak samo jak Kepler, ale umiał wyjaśnić, dlaczego poruszają się one po elipsach

Siła dośrodkowa, cz. I s. 159

Siła grawitacji powoduje zakrzywienie toru ruchu planety, pełni więc funkcję siły dośrodkowej.

Amatorskie obserwacje astronomiczne

Obserwacje astronomiczne mogą prowadzić nie tylko zawodowi astronomowie, lecz także amatorzy. Wystarczy do tego niewielka luneta albo lornetka, a nawet – gołe oko. Najlepiej prowadzić je z dala od sztucznych świateł, np. w czasie wycieczki za miasto.

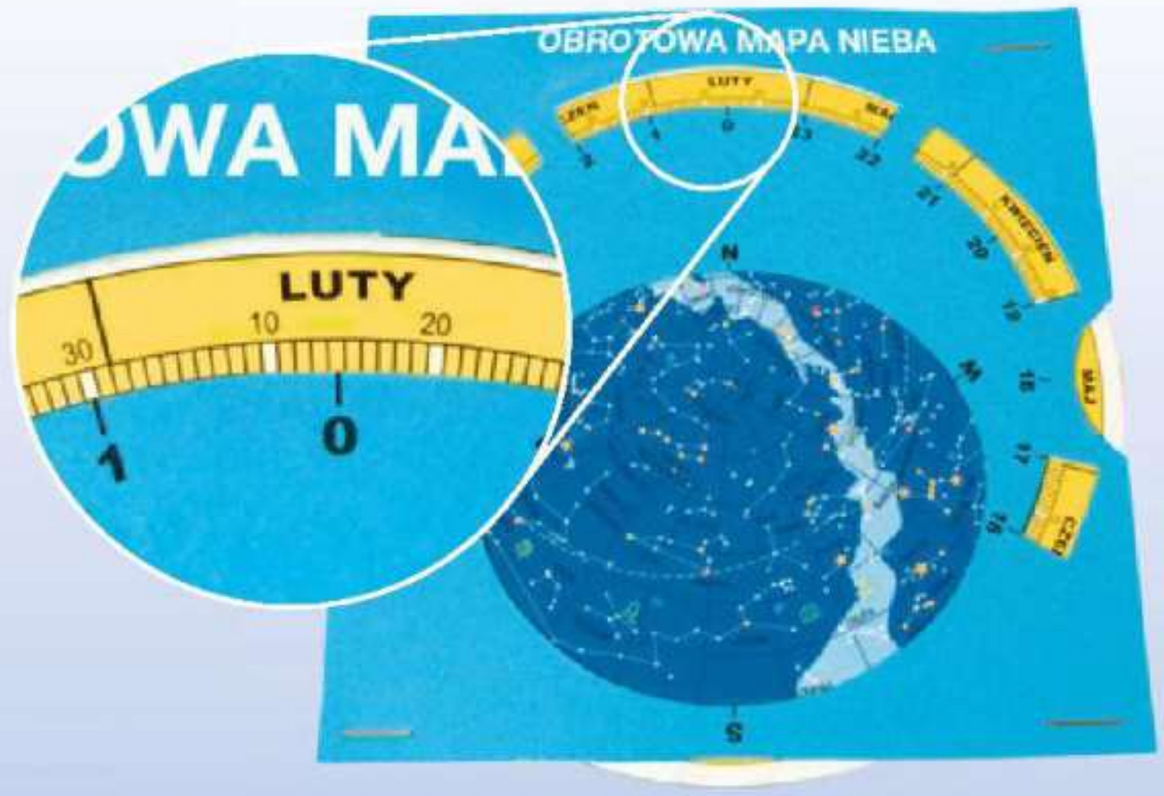
Jeśli zainteresujesz się astronomią, możesz włączyć się w prace jednej z organizacji, takich jak Polskie Towarzystwo Miłośników Astronomii lub Klub Astronomiczny Almukantarat. Pozwoli ci to poszerzać wiedzę, wymieniać doświadczenia, korzystać z lepszego sprzętu, a także poznać przyjaciół o podobnych zainteresowaniach.

⚠ UWAGA

Obserwowanie słońca jest niebezpieczne, nigdy nie rób tego bez specjalnych filtrów. Grozi to utratą wzroku.

Do obserwacji niezbędna jest mapa nieba. Tradycyjna, papierowa mapa składa się z tarczy z mapą oraz nakładki. Tarczę obraca się względem nakładki i ustawia mapę na planowaną datę i godzinę obserwacji z uwzględnieniem różnicy między czasem urzędowy a lokalnym. Taka mapa nie uwzględnia planet.

Można także wydrukować mapę nieba na czas planowanych obserwacji, np. z darmowego programu Stellarium albo strony **www.heavens-above.com**.



Najprostszym sposobem identyfikowania obiektów na niebie jest skorzystanie z darmowej aplikacji na smartfona, np. **SkyView Free**, **Night Sky**, **Star Chart**, **Star Walk 2** oraz **Sky Map**. Gdy kierujemy telefon ku niebu, na jego ekranie pojawiają się gwiazdy i planety widoczne za nim, ale podpisane.



Od Keplera do Newtona czy od Newtona do Keplera?

Jan Kepler odkrył swoje prawa dzięki analizie wyników obserwacji. Jego prace posłużyły Newtonowi do opisania siły grawitacji.
Taka była historyczna kolejność zdarzeń. Okazuje się jednak, że łatwiej rozpocząć naukę od zrozumienia prawa rządzącego grawitacją i dopiero na jego podstawie wyjaśnić prawa Keplera. Tak będziemy postępować w tym rozdziale.

Po tej lekcji powinieneś

- wiedzieć, czym różni się planeta od gwiazdy;
- opisywać ruch planet na sferze niebieskiej i ich rzeczywisty ruch wokół Słońca;
- wyjaśniać ruch planet wokół Słońca działaniem siły grawitacji, pełniącej funkcję siły dośrodkowej.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Do każdego odkrycia astronomicznego A–E dopasuj jedno nazwisko z ramki I–IV.

I. Galileusz	**III.** Kopernik
II. Kepler	**IV.** Newton

A. Planety krążą wokół Słońca.

B. Ziemia jest planetą.

C. Słońce przyciąga planety siłą grawitacji.

D. Planety krążą wokół Słońca po elipsach.

E. Wokół Jowisza krążą księżyce.

2. Przerysuj do zeszytu poniższą tabelę i ją uzupełnij.

Jak jest?	Co widać z Ziemi?	Skąd bierze się różnica?
Ziemia kręci się wokół własnej osi.	Sfera niebieska kręci się wokół Ziemi.	Nie odczuwamy ruchu wirowego Ziemi.
	Planety zataczają pętle wśród gwiazd.	Patrzymy na planety z Ziemi, która także krąży wokół Słońca.
Gwiazdy są w bardzo różnych odległościach od Ziemi.		
Słońce jest znacznie większe od Księżyca, ale znajduje się znacznie dalej od Ziemi niż on.		
	Słońce jest znacznie jaśniejsze od wszystkich innych gwiazd.	

3. Ziemia porusza się po orbicie wokół Słońca, ponieważ jest przez nie przyciągana pewną siłą. Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki Ziemia również przyciąga Słońce siłą o takiej samej wartości. Dlaczego zatem nie obserwujemy ruchu Słońca wokół Ziemi?

Wskazówka. Oblicz, ile razy masa Słońca jest większa od masy Ziemi – dane znajdziesz w tabeli na końcu książki.

4. Określ, w którą stronę powinieneś spojrzeć, aby zobaczyć Gwiazdę Polarną, jeśli jesteś:

a) w Polsce,

b) na biegunie północnym.

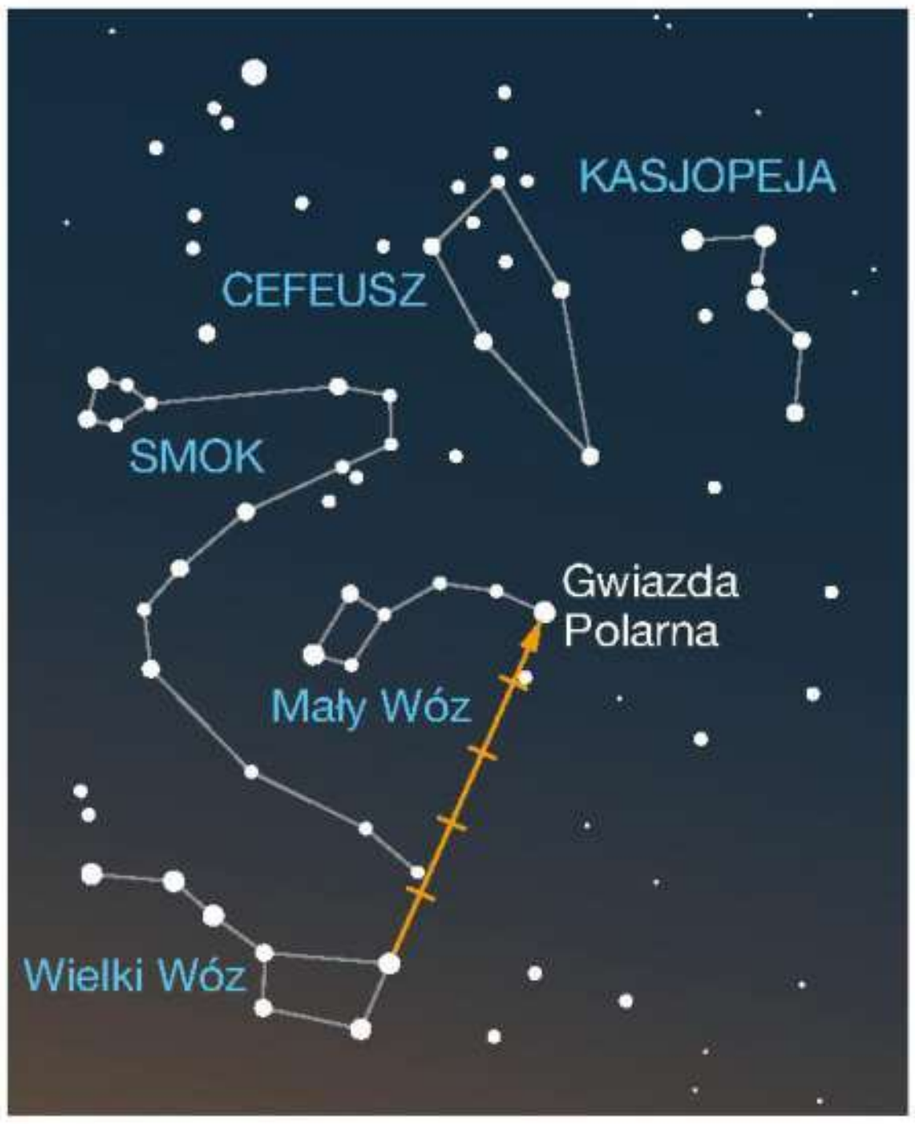
c) w Egipcie,

5. Przeprowadź obserwację Gwiazdy Polarnej według poniższego opisu.

a) Znajdź na niebie Wielki Wóz.

Uwaga. Gwiazdozbiór, w którego skład wchodzi Wielki Wóz, jest nazywany przez astronomów Wielką Niedźwiedzicą.

b) Spójrz na dwie gwiazdy z tyłu Wielkiego Wozu. Jeśli łączący je odcinek pięciokrotnie przedłużysz do góry wozu, odnajdziesz niezbyt jasny, ale bardzo ważny punkt – Gwiazdę Polarną (patrz rysunek). Wskaż ją palcem. Później opuść rękę tak, aby znalazła się na linii horyzontu. Twoja ręka pokaże dokładnie kierunek północny.



c) Stań twarzą ku północy i pokaż pozostałe strony świata.

d) Obserwuj przez godzinę, co się dzieje z gwiazdami. Czy położenie gwiazd unoszących się nisko nad horyzontem na wschodzie się zmienia? Co się stało z gwiazdami, które wcześniej znajdowały się nisko na zachodzie?

e) Sprawdź, czy Gwiazda Polarna nadal wskazuje ten sam kierunek – znajdź ją ponownie w sposób opisany wyżej.

6. Poszukaj gwiazdozbiorów według poniższego opisu.

a) Weź mapę nieba (jeśli jest to mapa obrotowa, ustaw ją na właściwą godzinę).

b) Stań na otwartej przestrzeni twarzą ku południu. Unieś mapę nad sobą tak, aby jej dół wskazywał południe, a góra znajdowała się za tobą, czyli była skierowana na północ.

c) Spróbuj odnaleźć na niebie najjaśniejsze gwiazdy, które widzisz na mapie. Dzięki temu zorientujesz się, gdzie szukać kolejnych, słabiej świecących gwiazd.

d) Poszukaj gwiazdozbiorów. Wielką i Małą Niedźwiedzicę odnajdziesz na niebie każdej pogodnej nocy, podobnie – bardzo charakterystyczny gwiazdozbiór Kasjopei. Wiele gwiazdozbiorów obserwujemy na niebie tylko przez część roku. Zimą warto poszukać Oriona, latem – Herkulesa i Wolarza.

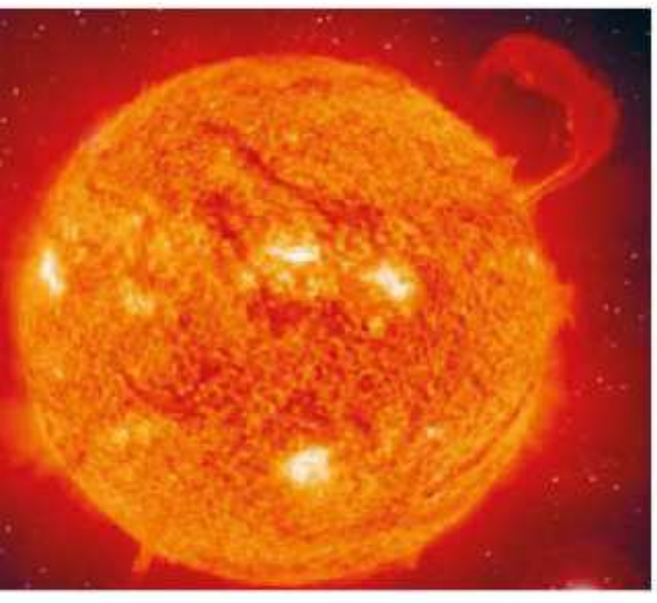
Uwaga. Poniżej mapa ukazująca różnice między czasem urzędowym zimowym a lokalnym. Np. poprawka dla Warszawy to ok. 24 min. Aby ustalić, jak będzie wyglądało niebo nad Warszawą o 23:00 czasu zimowego, należy ustawić obrotową mapę nieba (s. 11) na 23:24, a czasu letniego – na 22.24.



11.2. Układ Słoneczny

Przypomnij sobie

- W Słońcu zachodzą reakcje jądrowe, dzięki czemu świeci ono własnym światłem. Planety odbijają światło słoneczne.
- Planety krążą wokół Słońca dzięki sile grawitacji działającej między nimi a Słońcem.



Rys. **11.11.** Słońce skupia większą część masy Układu Słonecznego

Masa w Układzie Słonecznym

Omówienie budowy Układu Słonecznego zacznijmy od porównania mas ciał wchodzących w jego skład. Słońce ma ponad 300 000 razy większą masę od masy Ziemi i ponad 1000 razy większą od masy Jowisza – największej planety układu Słonecznego (rys. 11.11). Aby wyobrazić sobie proporcje między nimi, możemy porównać Słońce do sarny, Jowisza do wróbla, a Ziemię do pszczoły.

> Słońce skupia ponad 99% masy całego Układu Słonecznego.

Cała reszta, w tym ogromna z naszego punktu widzenia masa Ziemi, to drobne pozostałości po formowaniu się naszej gwiazdy.

Planety Układu Słonecznego

Największe spośród ciał krążących wokół Słońca nazywamy planetami.

> Wokół Słońca krąży osiem planet.

Cztery planety najbliższe Słońca: Merkury, Wenus, Ziemia i Mars, są stosunkowo małe – średnica każdej z nich wynosi od kilku do kilkunastu tysięcy kilometrów. Mają zbliżoną budowę: metaliczne jądro we wnętrzu, skały bliżej powierzchni, a ponad powierzchnią – cienką atmosferę.

> Planety najbliższe Słońcu są zbudowane ze skał i metali. Mają cienką atmosferę.

Dwie następne planety, Jowisz i Saturn, to **gazowe olbrzymy**. Ta nazwa wyjaśnia zarówno ich budowę, jak i rozmiar. Obie planety są kulami gazu, choć we wnętrzu mogą zawierać także metale i skały. Ich średnice przekraczają 100 tys. km.

Ostatnie dwie planety, Uran i Neptun, to **lodowe olbrzymy**. Każda z nich ma w środku skalisto-metaliczne jądro, a nad nim płyn złożony z wody i innych związków chemicznych wodoru, tlenu i węgla. Wszystko

otacza potężna atmosfera. Nazwa nie opisuje budowy tych planet, a nawiązuje do pochodzenia substancji stanowiących ich zewnętrzną warstwę, które dotarły na obrzeża Układu Słonecznego w postaci lodu lub gazu uwięzionego w lodzie.

> Planety położone dalej od Słońca są bardzo duże i nie mają stałej powierzchni.

Podstawowe informacje o planetach Układu Słonecznego przedstawiliśmy na infografice „Układ Słoneczny" s. 16–17.

Mniejsze obiekty Układu Słonecznego

Pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza znajduje się obszar, w którym wokół Słońca krążą niewielkie ciała niebieskie, zwane **planetoidami**. Wśród nich znajduje się Ceres – zbyt mała na planetę, jest dzisiaj uważana za planetę karłowatą.

Podobny pas drobnych ciał niebieskich znajduje się za orbitą Neptuna. Krąży tam kilka planet karłowatych, m.in. Pluton i Eris, a także wiele mniejszych obiektów.

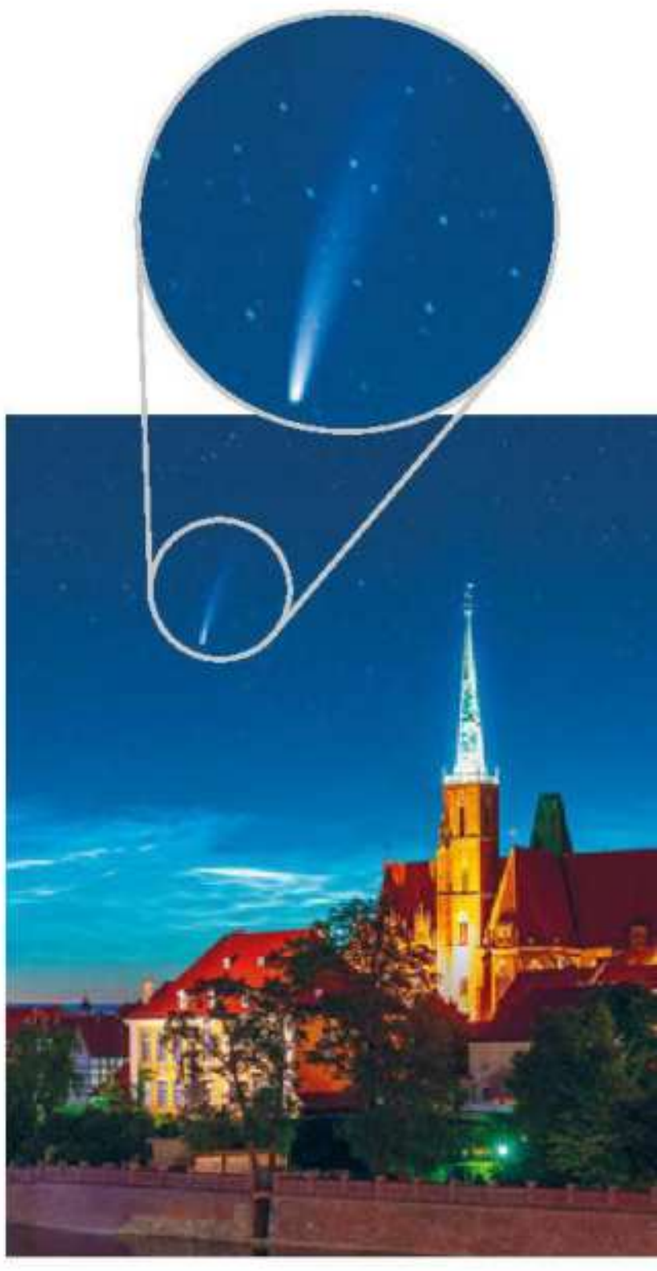
Większość planet, a także część planet karłowatych i planetoid, ma swoje księżyce. Ziemia ma tylko jeden, o nazwie Księżyc, ale wokół wielkich planet krąży ich znacznie więcej.

Każdy z księżyców jest znacznie lżejszy od swojej planety, ale duże księżyce planet olbrzymów mają masę podobną do Merkurego i większą niż planety karłowate. Są księżycami nie z powodu małej masy, ale dlatego, że obiegają Słońce wraz z planetami, wokół których krążą.

Do ciał Układu Słonecznego należą także **komety**. Niektóre z nich krążą po bardzo wydłużonych elipsach i pojawiają się w pobliżu Słońca i Ziemi co kilkadziesiąt lub kilkaset lat. Na przykład kometa Halleya pojawia się na naszym niebie cyklicznie co ok. 75 lat. Inne mijają Słońce tylko raz i odlatują w dalsze rejony kosmosu. Czasem komety można zaobserwować gołym okiem (rys. 11.12).

Do najmniejszych ciał w Układzie Słonecznym zaliczamy **meteoroidy** (od ok. 0,1 mm do 10 m) oraz pył międzyplanetarny.

Do 2006 r. Pluton był uważany za pełnoprawną planetę, więc w starych książkach znajdziesz jeszcze informację, że wokół Słońca krąży dziewięć planet.



Rys. **11.12.** Kometa NEOWISE widziana nad Wrocławiem, lato 2020 r.

Siła grawitacji jako siła dośrodkowa

W lekcji 11.1 wspomnieliśmy, że Izaak Newton wyjaśnił ruch planet za pomocą siły grawitacji. Zajmiemy się teraz nieco dokładniej tym zagadnieniem. Zastanawiać nas może w szczególności, dlaczego siła powodująca spadek jabłka nie powoduje (na szczęście!) spadku Księżyca na Ziemię, a jedynie – jego ruch po elipsie (ponieważ orbita Księżyca jest bardzo zbliżona do okręgu, będziemy ją dalej traktować jako okrąg).

Fizyka wokół nas

Układ Słoneczny

Układ Słoneczny to Słońce, planety, planety karłowate, księżyce oraz liczne mniejsze ciała niebieskie.

Merkury

- 0,38R_z
- 0,39 au (58 mln km)
- 88 dni

Najmniejsza planeta Układu Słonecznego.

Wenus

- 0,95R_z
- 0,72 au (108 mln km)
- 225 dni

Najgorętsza planeta – średnia temperatura to ok. 465°C.

Ziemia

- R_z
- 1 au (150 mln km)
- 365 dni

Nasza planeta.

Mars

- 0,53R_z
- 1,52 au (228 mln km)
- 687 dni

Planeta potencjalnie możliwa do skolonizowania.

1 au

5 au

10 au

Proporcje między Słońcem i planetami.

Na osi przedstawiono w skali odległości planet od Słońca.

Informacje podane przy planetach:

- wielkość planety wyrażona jako krotność promienia Ziemi
- odległość planety od Słońca
- okres obiegu planety dookoła Słońca

Jowisz

- $11{,}2R_z$
- 5,20 au (778 mln km)
- 12 lat

Największa planeta – 318 razy masywniejsza od Ziemi.

Saturn

- $9{,}45R_z$
- 9,54 au (1427 mln km)
- 29 lat

Saturn ma gęstość mniejszą niż woda – 687 $\frac{kg}{m^3}$.

Uran

- $4{,}01R_z$
- 19,19 au (2871 mln km)
- 84 lata

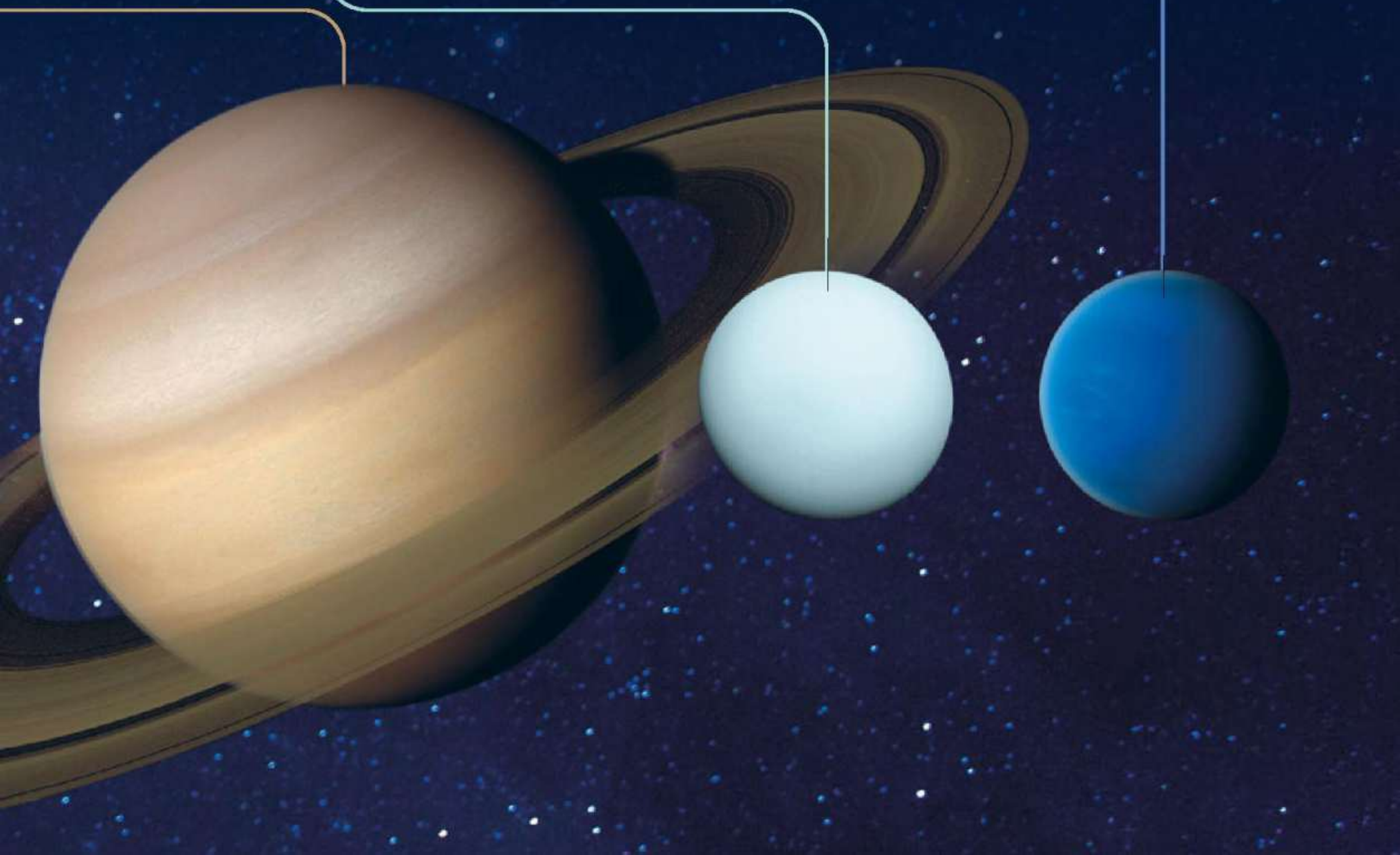
Uran „leży na boku” – oś obrotu planety leży niemal w płaszczyźnie orbity.

Neptun

- $3{,}88R_z$
- 30,07 au (4498 mln km)
- 165 lat

Na Neptunie wieją najsilniejsze wiatry – prędkość wiatru dochodzi tam do 2000 $\frac{km}{h}$.

15 au 20 au 25 au 30 au



Jak wiemy z pierwszej części podręcznika, ruch jednostajny po okręgu zawsze odbywa się pod wpływem siły skierowanej do środka okręgu, zwanej siłą dośrodkową. W ruchu Księżyca wokół Ziemi, a także w ruchu innych księżyców wokół planet i planet wokół Słońca, tę rolę odgrywa siła grawitacji.

> **Siła grawitacji jest siłą dośrodkową powodującą ruch planet wokół Słońca i księżyców wokół planet.**

Gdyby Księżyc zatrzymał się w ruchu wokół Ziemi, grawitacja spowodowałaby jego spadek na Ziemię. Ponieważ jednak porusza się on po okręgu, siła grawitacji jedynie zakrzywia jego tor i zapobiega oddalaniu się Księżyca od Ziemi.

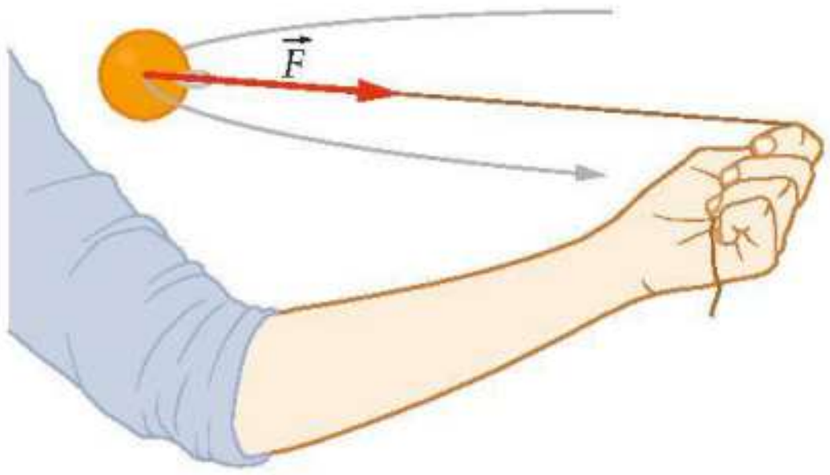
Jednostka astronomiczna

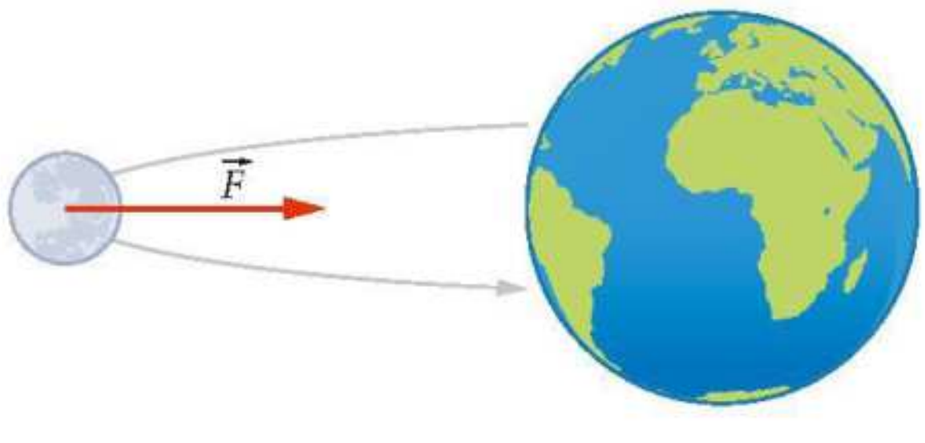
Odległości w Układzie Słonecznym są tak duże, że wyrażanie ich w metrach, a nawet w kilometrach jest niewygodne. Dlatego przyjęto inną jednostkę odległości: **jednostkę astronomiczną**, oznaczaną skrótem au od ang. *astronomical unit.*

> **Jednostka astronomiczna to średnia odległość Ziemi od Słońca:**
> **1 au ≈ 149,6 mln km ≈ 150 mln km**

Siła grawitacji a siła sprężystości

Siła grawitacji powodująca krążenie Księżyca wokół Ziemi pełni taką samą funkcję jak siła sprężystości nici powodująca krążenie piłeczki po okręgu. Różna jest natomiast fizyczna natura tych sił. Grawitacja to jedno z fundamentalnych oddziaływań, a siła sprężystości nici wynika z oddziaływań elektromagnetycznych między jej cząsteczkami.





- Aby kręcić piłeczką na sznurku, musisz ciągnąć ją pewną siłą.
- Siła, którą ciągniesz piłeczkę, sprawia, że krąży ona po zakrzywionym torze – siła ta pełni funkcję siły dośrodkowej.
- Gdyby sznurek się zerwał, piłeczka oddaliłaby się od ciebie.

- Ziemia przyciąga Księżyc – nie za pomocą sznurka, ale siłą grawitacji.
- Siła grawitacji działająca na Księżyc powoduje zakrzywienie toru jego ruchu – pełni ona funkcję siły dośrodkowej.
- Gdyby znikła siła grawitacji, Księżyc oddaliłby się od Ziemi.

Planety pozasłoneczne

Astronomowie od dawna przypuszczali, że skoro Słońce jest jedną z wielu gwiazd, to być może także wokół innych gwiazd krążą planety. Jednak dopiero w 1992 r. planety pozasłoneczne jako pierwszy odkrył polski astronom Aleksander Wolszczan. Były one odległe o 1000 lat świetlnych od Ziemi i obiegały pulsar – gwiazdę zbliżoną masą do Słońca, ale o promieniu zaledwie kilkunastu kilometrów. Pierwszej obserwacji planet obiegających gwiazdę podobną do Słońca dokonał w 1995 r. amerykańsko-szwajcarski zespół badaczy, nagrodzony za to w 2019 r. nagrodą Nobla.

Inna nazwa planety pozasłonecznej to **egzoplaneta**.

Do 2020 r. odkryto już kilka tysięcy planet pozasłonecznych, a z badań astronomów wynika, że w naszej Galaktyce są ich miliony, jeśli nawet nie miliardy.



Rys. **11.13.** Planeta krążąca wokół Proximy Centauri – wizja artysty

Najbliższa znana nam planeta pozasłoneczna, Proxima Centauri b (rys. 11.13), krąży wokół gwiazdy położonej najbliższej Słońca – Proximy Centauri – zaledwie ok. 4 lata świetlne od nas, co jak na kosmiczną skalę jest niezwykle małą odległością. Do tego panujące na niej warunki termiczne sprawiają, że mogłaby tam występować ciekła woda. To zwiększałoby prawdopodobieństwo powstania życia, choć oczywiście nie na każdej planecie z wodą musiało ono powstać.

Obszar wokół gwiazdy, w którym na powierzchni znajdującej się tam planety może występować woda w stanie ciekłym, nazywa się **strefą życia** (ekosferą).

Poszukiwania życia pozaziemskiego

Życia pozaziemskiego astronomowie poszukują przede wszystkim w Układzie Słonecznym. Jeśli miałoby to być życie chociaż trochę podobne do ziemskiego, może się pojawić tylko na planecie lub księżycu, na których występuje ciekła woda.

Planetą, z którą badacze wiążą największe – choć i tak małe – nadzieje na znalezienie organizmów żywych, jest Mars. W 2020 r. pojawiły się również doniesienia wskazujące na możliwość życia na Wenus.

Niewykluczone jest także, że życie organiczne w prymitywnych formach rozwinęło się na jednym z księżyców wielkich planet: Saturna lub Jowisza.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać rodzaje ciał niebieskich w Układzie Słonecznym: Słońce, planety, planety karłowate, księżyce, planetoidy, komety;
- omawiać budowę poszczególnych rodzajów planet Układu Słonecznego;
- posługiwać się jednostką astronomiczną.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Porównaj największą planetę Układu Słonecznego z najmniejszą. Skorzystaj z tablic na końcu książki.

a) Oblicz stosunek ich mas.

b) Oblicz stosunek ich średnic.

c) Która z nich ma większą gęstość? Ile razy?

2. Rok świetlny to odległość, jaką przebywa światło w ciągu roku. Analogicznie można zdefiniować sekundę świetlną, minutę świetlną itd.

a) Oblicz, ile jednostek astronomicznych ma rok świetlny.

b) Oblicz, ile minut świetlnych ma jednostka astronomiczna.

3. Pluton porusza się wokół Słońca po orbicie, będącej bardziej spłaszczoną elipsą niż orbita Ziemi. Najmniejsza odległość tej planety karłowatej od Słońca to 29,7 au, a największa to 49,3 au.

a) Przelicz te wielkości na kilometry.

b) Oblicz czas, w jakim światło pokonuje te odległości.

4. Wyobraźmy sobie model Układu Słonecznego w skali 1 m – 1 au. Oblicz, jaką wielkość będzie miała w tej skali:

a) odległość między Słońcem a najbliższą planetą – Merkurym,

b) odległość między Słońcem a najdalszą planetą – Neptunem,

c) odległość Plutona do Słońca,

d) średnica Słońca,

e) średnica Ziemi.

5. a) Popatrz na Jowisza i za pomocą lunety lub lornetki spróbuj odnaleźć obok niego jego cztery najjaśniejsze księżyce. Można je zobaczyć jako jasne punkty położone blisko planety.

b) Ponów obserwację za dwie, trzy godziny. Czy księżyce zmieniły swoje położenie?

c) Napisz krótko, jakie znaczenie miało odkrycie księżyców Jowisza przez Galileusza.

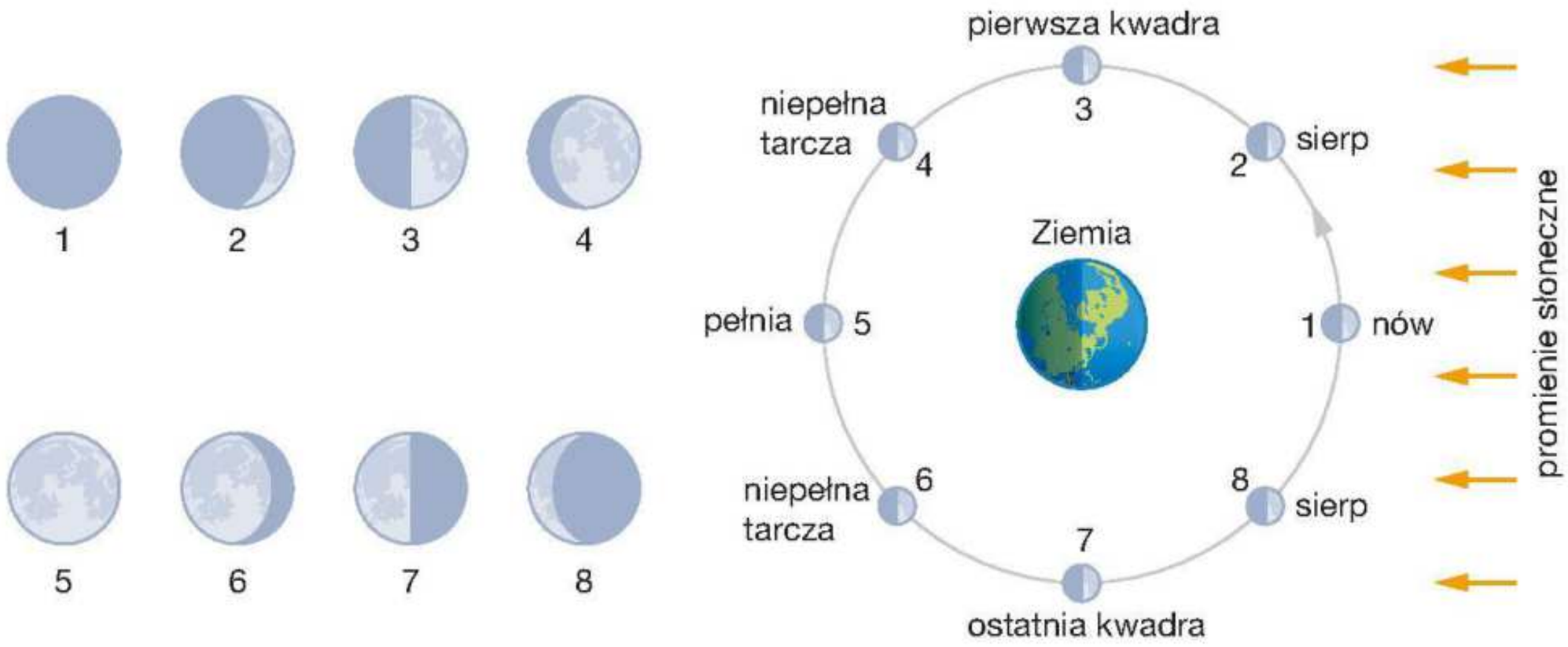
11.3. Księżyc widziany z Ziemi

Przypomnij sobie

- Księżyc krąży wokół Ziemi.
- Księżyc nie świeci własnym światłem, ale odbija światło słoneczne.

Fazy Księżyca

Jak wiesz, Księżyc nie świeci własnym światłem, ale odbija światło słoneczne. Z Ziemi widać więc tylko tę jego część, na którą pada światło Słońca. Jej wielkość i kształt zależą od wzajemnego położenia Ziemi, Słońca i Księżyca, które zmienia się z powodu ruchu tych ciał niebieskich. Czasami widzimy całą tarczę Księżyca, czasami jej połowę albo tylko sierp. Są to **fazy Księżyca** (rys. 11.14).



Rys. **11.14.** Przyczyna występowania faz Księżyca (ilustracja dla półkuli północnej)

- Jeśli Słońce znajduje się z tej samej strony Ziemi co Księżyc (ale oczywiście znacznie dalej), oświetla tylko tę jego połowę, której z Ziemi nie widać. Nasza strona Księżyca pozostaje ciemna, dlatego nie możemy jej zobaczyć. Taką fazę Księżyca nazywamy **nowiem**.
- Później Słońce oświetla Księżyc „z boku" i widzimy coraz większą część jego tarczy. Gdy widoczna staje się już połowa tarczy Księżyca, mówimy, że jest on **w pierwszej kwadrze**.
- Gdy Słońce i Księżyc znajdują się po przeciwnych stronach Ziemi, możemy zobaczyć oświetloną całą tarczę Księżyca. Mówimy wówczas, że jest **pełnia**.
- Po pełni z Ziemi obserwujemy coraz mniejszą część tarczy Księżyca. Gdy widać jej połowę, Księżyc jest **w ostatniej kwadrze**.

Cały cykl faz Księżyca trwa 29,5 dnia, czyli nieco ponad 4 tygodnie. Z tego wynika, że poszczególne fazy następują w odstępach nieco dłuższych niż tydzień.

Mechanizm powstawania zmian faz Księżyca można pokazać na prostym modelu. Do wykonania doświadczenia będzie potrzebny model Księżyca (np. globus lub piłka), jasno świecąca lampka i zaciemnione pomieszczenie.



Doświadczenie 1

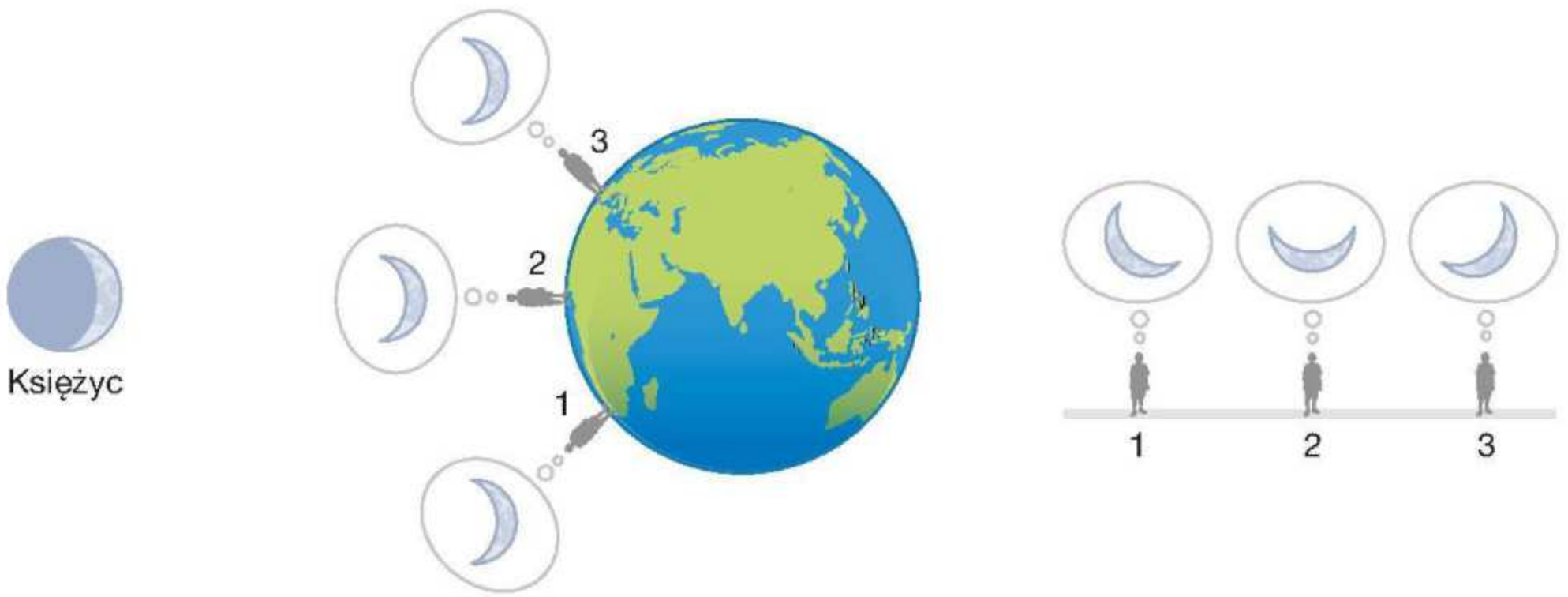
1. Ustaw lampkę tak, aby z pewnej odległości oświetlała globus (model Księżyca).
2. Stań między lampką a globusem tak, aby nie zasłaniać światła lampki. Jaki kształt ma oświetlona część globusa? Jakiej fazie Księżyca odpowiada ta sytuacja?
3. Stań teraz w takim miejscu, aby między globusem, tobą i lampką powstał kąt prosty. Jaką fazę Księżyca obserwujesz?
4. Stań teraz po drugiej stronie globusa niż lampka, ale tak, by globus nie zasłaniał żarówki. Czy widzisz oświetloną część?



To doświadczenie pozwala zrozumieć, skąd bierze się widoczny kształt Księżyca podczas pełni i kwadry, i dlaczego kiedy indziej obserwujemy jego sierp.

Fazy Księżyca z różnych szerokości geograficznych

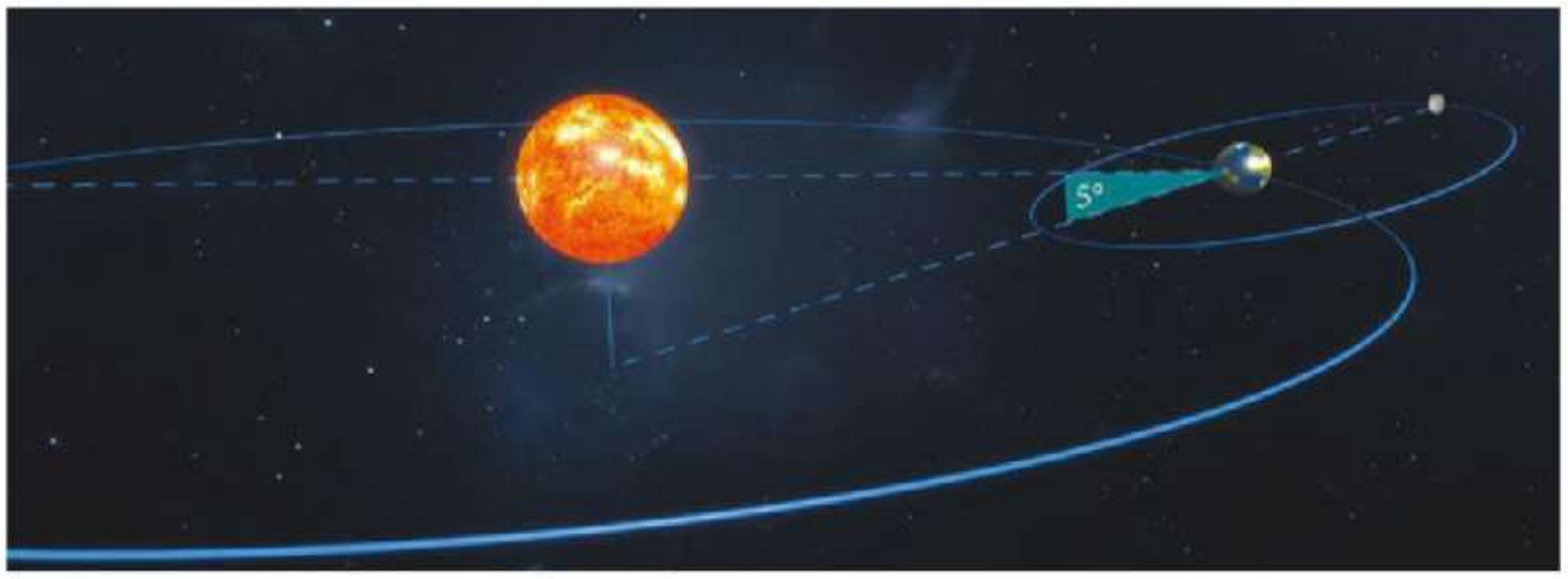
Na rysunku 11.14 na s. 21 przedstawiliśmy Księżyc w poszczególnych fazach, tak jak go widać z Polski i ogólnie – z umiarkowanych szerokości geograficznych na półkuli północnej. W Australii czy Afryce Południowej fazy wyglądają przeciwnie. Natomiast w okolicach równika Księżyc ma kształt sierpa z rogami do góry lub na dół. Dlaczego? Wyjaśnienie przedstawiono na rysunku 11.15. Aby zobaczyć, co widzi każdy z obserwatorów, obróć książkę tak, aby ustawić obserwatora głową do góry.



Rys. **11.15.** Zachodzący Księżyc wkrótce po nowiu, widziany na różnych szerokościach geograficznych

Zaćmienie Księżyca

W czasie pełni Ziemia znajduje się między Słońcem a Księżycem, jednak na ogół nie zasłania naszego satelity, gdyż płaszczyzna orbity Księżyca jest nachylona względem płaszczyzny orbity Ziemi pod kątem ok. 5° (rys. 11.16).



Rys. **11.16.** Nachylenie orbity Księżyca względem orbity Ziemi, położenie Księżyca w pełni

Jednak przeciętnie dwa razy do roku Księżyc wchodzi w cień Ziemi. Obserwujemy wówczas **zaćmienie Księżyca**.

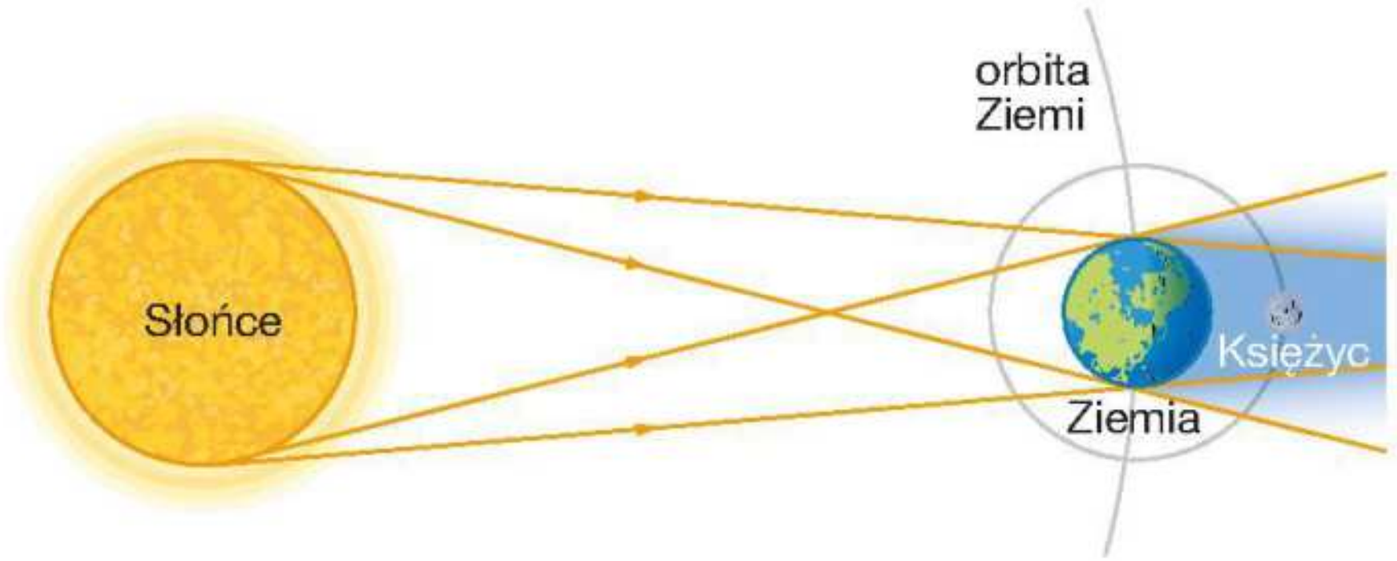
Podczas zaćmienia Księżyca jest on słabo widoczny, ponieważ Ziemia zasłania Księżycowi światło Słońca.

A to ciekawe

W lipcu 2018 r. mogliśmy obserwować całkowite zaćmienie Księżyca. Ponieważ nasz satelita znajdował się w minimalnej odległości od Ziemi, był szczególnie dobrze widoczny. Następna taka okazja zdarzy się dopiero w 2033 r. Na zwykłe zaćmienie Księżyca poczekamy krócej: do 16 maja 2022 r. Kolejna data to 14 marca 2025 r.



Dlaczego Księżyc w trakcie zaćmienia w ogóle jest widoczny? Otóż oświetla go światło przechodzące przez ziemską atmosferę. Jego część załamuje się w atmosferze i pada na Księżyc.
Oczywiście zaćmienie Księżyca zdarza się w czasie, w którym powinna być pełnia (rys. 11.17).



Rys. **11.17.** Ustawienie Słońca, Ziemi i Księżyca podczas zaćmienia Księżyca



Rys. **11.18.** Częściowe zaćmienie Księżyca widziane z Polski w 2017 r.

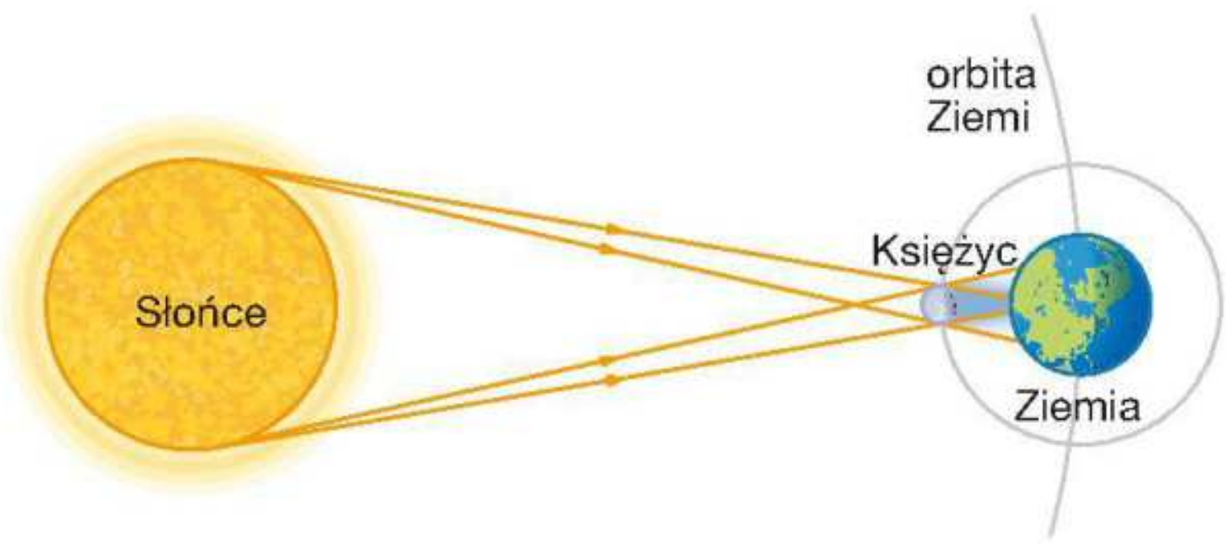
Zaćmienie całkowite i częściowe

Zaćmienie może być całkowite, jeśli w cieniu Ziemi znajdzie się cały Księżyc, albo częściowe, gdy tylko jego część zostanie zasłonięta przez Ziemię przed światłem słonecznym.
W drugim przypadku widoczny jest fragment tarczy (rys. 11.18). Przypomina ona nieco Księżyc w innej fazie niż pełnia, choć może być inaczej ułożony na niebie (np. rogami do góry).

Zaćmienie Słońca

Czy jest możliwa sytuacja odwrotna, tzn. czy Ziemia może wejść w cień Księżyca? Czasem się to zdarza. Jednak cień Księżyca jest o wiele mniejszy od Ziemi i przykrywa tylko niewielką część jej powierzchni. Na tym obszarze Ziemi obserwujemy wówczas **zaćmienie Słońca** (rys. 11.19). Jak myślisz, w jakiej fazie jest wtedy Księżyc?

> Podczas zaćmienia Słońca jest ono niewidoczne, ponieważ zasłania je Księżyc.



Rys. **11.19.** Ustawienie Słońca, Ziemi i Księżyca podczas zaćmienia Słońca

Widoczna i niewidoczna strona Księżyca

Z Ziemi stale widzimy tylko jedną stronę Księżyca. Jest tak dlatego, że Księżyc wykonuje obrót dookoła własnej osi w takim samym czasie, w jakim obiega Ziemię.

Aby lepiej wyobrazić sobie ruch Księżyca wokół Ziemi, możesz ustawić na środku pokoju krzesło i obchodzić je, cały czas patrząc w jego stronę. Zauważ, że chociaż przez cały czas jesteś zwrócony tą samą stroną do krzesła, to obracasz się wokół swojej osi – możesz zobaczyć kolejno wszystkie ściany pokoju (rys. 11.20).

Chociaż tylko jedną stronę Księżyca możemy obserwować z Ziemi, drugą znamy ze zdjęć wykonanych przez sondy kosmiczne oraz obserwacji załóg misji Apollo (rys. 11.21).



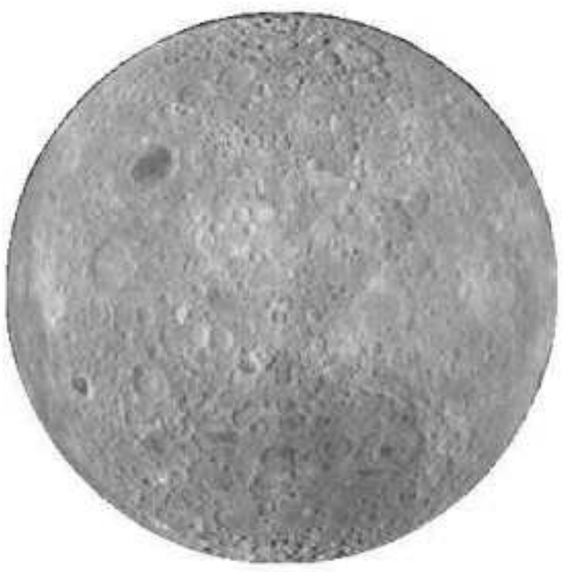
Rys. **11.20.** Chodzenie naokoło krzesła – model ruchu Księżyca wokół Ziemi

Godziny wschodu i zachodu Księżyca

Wiele osób sądzi, że Księżyc wschodzi wieczorem, a zachodzi rano. Tak jest jednak tylko wtedy, gdy Księżyc jest w pełni.

W nowiu jest odwrotnie – Księżyc wschodzi rano, porusza się po niebie niedaleko od Słońca i zachodzi wieczorem. Jest na niebie przez cały dzień, a nie widzimy go tylko dlatego, że strona zwrócona ku Ziemi jest nieoświetlona.

Gdy wkrótce po nowiu Księżyc przyjmuje kształt sierpa, nadal znajduje się na niebie niedaleko Słońca. Wschodzi i zachodzi wówczas wkrótce po Słońcu (rys. 11.22).



Rys. **11.21.** Niewidoczna z Ziemi strona Księżyca

Rys. **11.22.** Słońce i Księżyc wkrótce po nowiu: a) rano, b) w południe, c) wieczorem. Litery E, S, W oznaczają strony świata

W pierwszej kwadrze Księżyc wschodzi około południa i zachodzi około północy, w pełni – wschodzi wieczorem a zachodzi rano, a w ostatniej kwadrze – wschodzi około północy, a zachodzi około południa.
Jak widzisz, godziny wschodu i zachodu Księżyca się przesuwają: codziennie wypadają nieco później. Przez znaczną część cyklu faz Księżyc można zobaczyć na niebie jednocześnie ze Słońcem. Godziny te zależą także od pory roku, podobnie jak wschodu i zachodu Słońca.
Również wysokość Księżyca nad horyzontem zmienia się w ciągu roku. Dlatego być może pamiętasz Księżyc w pełni unoszący się latem nisko nad horyzontem albo zimą – wysoko nad nim.

Powierzchnia Księżyca

Jak wygląda powierzchnia Księżyca? Nawet gołym okiem dostrzeżemy na niej dwa rodzaje obszarów: jasne fragmenty skorupy zakrzepłej niedługo po powstaniu naturalnego satelity Ziemi i ciemniejsze obszary, zwane morzami – pamiątki jego burzliwych dziejów.
Skalisty, pozbawiony atmosfery Księżyc stanowi swoiste świadectwo historii kosmosu. Przed trzema, czterema miliardami lat, gdy Układ Słoneczny był jeszcze młody, wokół Słońca krążyły miliony drobnych ciał niebieskich, będących pozostałościami po procesach formowania się planet. Z czasem większość z nich zderzyła się ze Słońcem, jedną z planet bądź z samym Księżycem. Widoczne na Księżycu kratery to ślady po takich uderzeniach.
W wyniku najpotężniejszych kosmicznych kolizji jasna księżycowa skorupa została przebita i wylały się spod niej potoki gorącej lawy, tworzące ciemniejsze obszary, które określamy jako **księżycowe morza**.
Do obserwacji kraterów może posłużyć lornetka. Księżycowe kratery są najlepiej widoczne, gdy rzucane przez nie cienie są długie. Ich wygląd zmienia się w czasie ruchu Księżyca i podczas jego kolejnych faz. Dlatego obserwacje warto prowadzić codziennie lub przynajmniej co dwa, trzy dni. Każdego dnia będziemy mogli wówczas zobaczyć dokładniej inne kratery.



Rys. **11.23.** Ślad buta astronauty pozostanie na Księżycu na zawsze, bo nie ma tam wody ani powietrza, które by go zatarły

Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać przyczynę powstawania faz Księżyca;
- tłumaczyć mechanizm zaćmień Księżyca i Słońca;
- rozumieć, dlaczego z Ziemi jest widoczna tylko jedna strona Księżyca, i wyjaśniać to za pomocą opisu ruchu obrotowego i obiegowego Księżyca;
- wiedzieć, że Księżyc nie ma atmosfery, i umieć podać wynikające z tego konsekwencje.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Odpowiedz na pytania.

a) Czy widok połowy tarczy Księżyca na niebie pozwala ustalić, w której kwadrze się on znajduje? W jaki sposób?

b) Czy następnego dnia po zaćmieniu Księżyca może nastąpić zaćmienie Słońca?

c) Wyobraź sobie, że dzisiejszej nocy przypada pełnia Księżyca. Po jakim czasie będziemy go oglądać w pierwszej kwadrze?

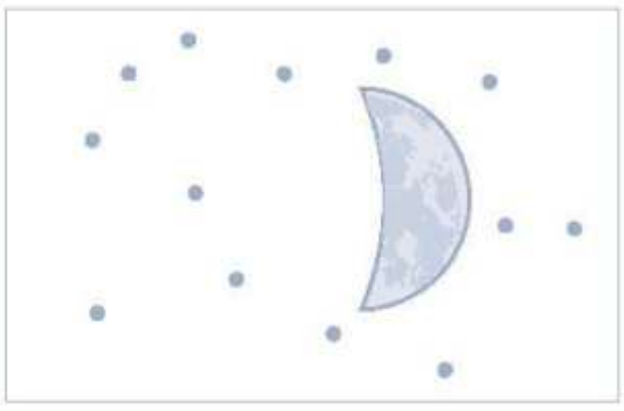
d) Księżyc w nowiu wędruje po niebie w ciągu dnia, tylko jest nieoświetlony przez Słońce. Kiedy można się o tym bezpośrednio przekonać?

e) Skoro Księżyc w nowiu, nieoświetlony przez Słońce, znajduje się na niebie w dzień, to dlaczego nie widzimy czarnej tarczy na tle błękitnego nieba?

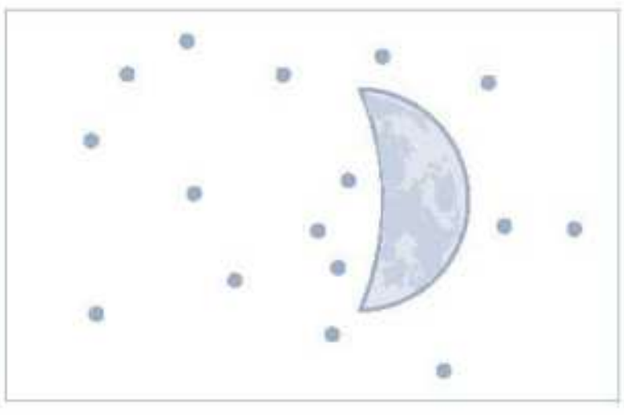
2. Pewnego dnia Księżyc w kwadrze wszedł ok. 14.30, a zaszedł ok. 22.00. Wskaż, w której był wtedy kwadrze: w pierwszej czy ostatniej. Naszkicuj, jak wyglądał widziany z Polski.

3. Każdy z rysunków miał przedstawiać Księżyc na tle rozgwieżdżonego nieba, ale na jednym z nich popełniono błąd. Na którym? Opisz, jaki to błąd.

a)



b)



4. a) Zastanów się, jak wygląda Ziemia oglądana z powierzchni Księżyca. Czy wschodzi i zachodzi?

b) Opisz, jak wygląda wzajemny ruch Ziemi i Słońca obserwowany na niebie przez astronautów stojących na Księżycu. Czy mogą obserwować zaćmienia Słońca? A czy mogą obserwować zaćmienia Ziemi?

c) Zastanów się, czy stojący na Księżycu astronauci mogą obserwować zmieniające się fazy Ziemi. Podaj argumenty.

5. Do wykonania tego zadania potrzebna jest lornetka lub teleskop.

a) Spójrz przez lornetkę lub teleskop na Wenus niedługo po zachodzie Słońca lub przed jego wschodem. Zanotuj w zeszycie dokładną datę obserwacji oraz naszkicuj kształt tarczy planety.

b) Przeprowadź cztery obserwacje tarczy Wenus w miesięcznych odstępach. Zapisz daty swoich obserwacji. Za każdym razem naszkicuj kształt obserwowanej planety.

c) Jak zmienia się wygląd tarczy Wenus? Zanotuj swoje spostrzeżenia.

Uwagi

• Nie prowadź obserwacji, gdy na niebie jest widoczne Słońce, aby na nie przypadkiem nie spojrzeć. **Skończyłoby się to utratą wzroku!**

• Wenus jest bardzo jasną planetą i można ją obserwować nawet z dużego miasta.

• Wenus jest widoczna albo po zachodzie Słońca, albo przed jego wschodem. Zanim wykonasz zadanie, musisz więc sprawdzić, np. za pomocą komputerowej mapy nieba, kiedy dokładnie będzie można ją zobaczyć w dniach twoich obserwacji.

11.4. Prawo powszechnego ciążenia

Przypomnij sobie

- Na każde ciało na Ziemi działa siła ciężkości, której wartość jest proporcjonalna do masy ciała: $F_g = mg$, gdzie $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$ jest przyspieszeniem grawitacyjnym (przyspieszeniem ziemskim).
- Ciało spadające swobodnie nad powierzchnią ziemi porusza się z przyspieszeniem równym g.
- Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki oddziaływania ciał są wzajemne.



Rys. **11.24.** Galaktyki nie rozpadają się na pojedyncze gwiazdy dzięki sile grawitacji

Siła grawitacji

Wiesz już, że Ziemia przyciąga wszystkie ciała siłą grawitacji. Także inne planety i księżyce przyciągają każde ciało znajdujące się na ich powierzchni. Siła ciężkości jest proporcjonalna do masy przyciąganego ciała i można ją obliczyć ze wzoru $F_g = mg$. Jednak współczynnik g, zwany **przyspieszeniem grawitacyjnym**, może mieć różną wartość.
Na Ziemi przyspieszenie grawitacyjne (w tym przypadku zwane także przyspieszeniem ziemskim) wynosi $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2} \approx 10\ \frac{m}{s^2}$, ale na Księżycu – tylko $g_K \approx 1{,}6\ \frac{m}{s^2}$, czyli około $\frac{1}{6}$ wartości przyspieszenia ziemskiego. Oznacza to, że Księżyc przy swojej powierzchni przyciąga ciała siłą 6 razy mniejszą niż Ziemia przy swojej. Innymi słowy, aby podnieść ciało na Księżycu, jest potrzebna siła 6 razy mniejsza niż na Ziemi. Jeśli na Ziemi podniesiesz 20-kilogramowy plecak, to na Księżycu włożysz tyle samo siły, aby podnieść ciało o masie ok. 120 kg. W obu przypadkach będzie do tego potrzebna siła ok. 200 N:

$$F_Z = 20\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{m}{s^2} \approx 200\,\text{N}$$
$$F_K = 120\,\text{kg} \cdot 1{,}6\,\frac{m}{s^2} \approx 200\,\text{N}$$

Na współczynnik g pewien wpływ ma także siła odśrodkowa związana z ruchem Ziemi wokół własnej osi. Powiemy o tym więcej pod koniec tej lekcji. Na ogół ten wpływ można pominąć jako nieznaczący.

Spadek swobodny

Ze wzoru $F_g = mg$ wynika ważny wniosek. Jeśli siła ciężkości jest jedyną siłą działającą na ciało, to spada ono z przyspieszeniem:

$$a = \frac{F_g}{m} = \frac{mg}{m} = g$$

W próżni wszystkie ciała, niezależnie od masy, spadają na ziemię z takim samym przyspieszeniem g. Obserwowane na co dzień różnice w szybkości spadania np. piórka i odważnika wynikają tylko z oporu powietrza.

Zwróćmy uwagę, że taki sam wniosek odnosi się do spadania ciał na Księżycu. Bez względu na masę i kształt spadają one z jednakowym przyspieszeniem, tyle że 6 razy mniejszym niż na Ziemi. Ze względu na brak atmosfery nie ma nawet różnic wynikających z oporu powietrza.

Prawo powszechnego ciążenia

Na wcześniejszych lekcjach powiedzieliśmy, że grawitacja odpowiada zarówno za spadanie ciał na Ziemi, jak i za tory ruchu ciał niebieskich. Okazuje się jednak, że siła grawitacji działa pomiędzy dowolnymi dwoma ciałami, np. kubkiem a czajnikiem. Ponieważ w przypadku ciał o niewielkiej masie siła tego oddziaływania jest bardzo mała, nie obserwujemy skutków jej działania. Wynika to jednak tylko z ograniczonych możliwości pomiaru, a nie z natury samej siły grawitacji.

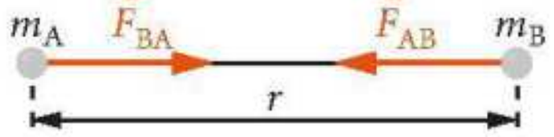
> Siła grawitacji działa między dowolnymi dwoma ciałami.

Ze względu na powszechność siły grawitacji prawo opisujące jej działanie nazywamy **prawem powszechnego ciążenia**. Jak już wiesz, odkrył je Izaak Newton.

> Dwa punkty materialne przyciągają się siłami grawitacji działającymi wzdłuż prostej łączącej te punkty, a wartość każdej z tych sił jest wprost proporcjonalna do mas tych punktów i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi.
>
> $$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

gdzie: F – wartość siły grawitacji,
r – odległość między punktami materialnymi,
m_1, m_2 – masy punktów materialnych,
G – stała proporcjonalności nazywana **stałą grawitacji** (jest to stała uniwersalna, czyli taka sama w całym Wszechświecie i niezmienna w czasie); $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$.
Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki siły grawitacji działające między dwoma ciałami mają tę samą wartość i ten sam kierunek, ale przeciwne zwroty (rys. 11.25).

$$F_{AB} = F_{BA}$$



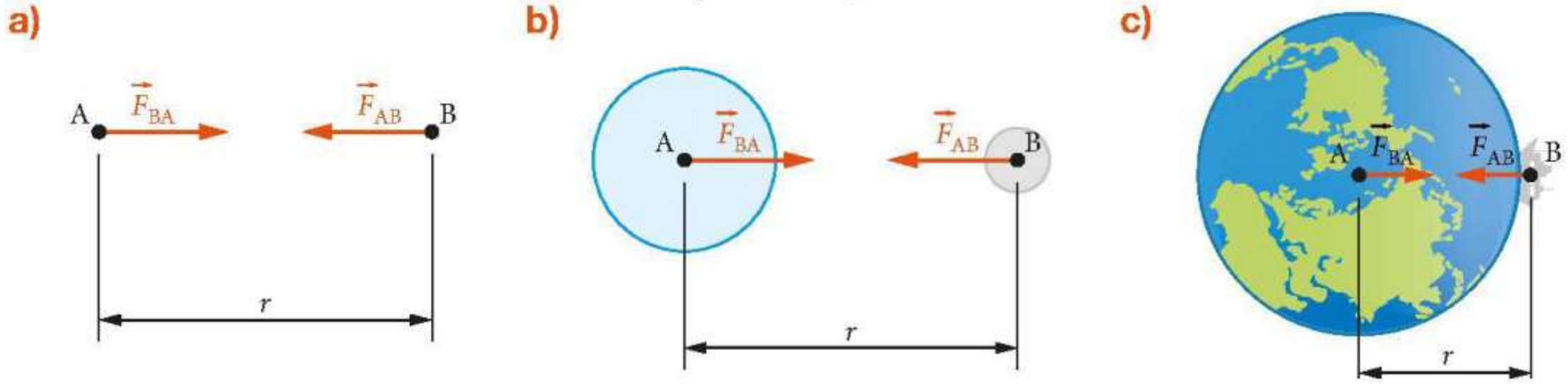
Rys. **11.25.** Siły grawitacji, jakimi wzajemnie oddziałują na siebie punkty materialne, mają ten sam kierunek, przeciwne zwroty i tę samą wartość

Kiedy można stosować wzór na siłę grawitacji

Wzór na siłę grawitacji można stosować m.in. do opisu oddziaływania między:

- dwoma punktami materialnymi (ten model ma zastosowanie także w przypadku ciał niebieskich, które są niewielkie w stosunku do dzielących je odległości – rys. 11.26a s. 30),

- dwiema jednorodnymi kulami (wówczas r oznacza odległość między środkami kul – rys. 11.26b),
- jednorodną kulą a ciałem o dowolnym kształcie i rozmiarach znacznie mniejszych od niej (wówczas r jest równe odległości między środkiem kuli a ciałem – rys. 11.26c).



Rys. **11.26.** Wzór na siłę grawitacji ma zastosowanie do: a) punktów materialnych, b) jednorodnych kul, c) jednorodnej kuli i ciała znacznie mniejszego od niej

Ostatni przypadek obejmuje w szczególności oddziaływanie między Ziemią a ciałami na jej powierzchni i w jej pobliżu. Pamiętaj, że r oznacza odległość od **środka** ciała, czyli dla Ziemi jest to jej promień, równy ok. 6370 km, a nie odległość od powierzchni.

Wzór $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$ można także stosować w innych przypadkach niż podane wyżej. Wynik będzie wtedy przybliżony, a przybliżenie tym mniej dokładne, im większe będą odstępstwa od podanych założeń.

Na przykład dla dwóch samochodów stojących na końcach parkingu (rys. 11.27a) uzyskamy wynik w miarę zbliżony do rzeczywistej wartości siły, jednak już dla dwóch autobusów stojących obok siebie wzór da wynik wielokrotnie odbiegający od rzeczywistości (rys. 11.27b).



Rys. **11.27.** Gdy wymiary ciał są niewielkie w stosunku do odległości między nimi (a), wzór Newtona da znacznie dokładniejszy wynik niż w przypadku podłużnych ciał, które dzieli niewielka odległość (b)

Przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni planety

Na początku lekcji mówiliśmy o przyspieszeniu grawitacyjnym. Zobaczymy teraz, jak można wyznaczać jego wartość dla różnych ciał niebieskich.

Planeta (lub inne ciało niebieskie) o masie M i promieniu R przyciąga ciało o masie m znajdujące się w pobliżu jej powierzchni siłą o wartości:

$$F = G\frac{M}{R^2} \cdot m$$

Wielkość $G\frac{M}{R^2}$ jest dla danej planety stała, zatem siła grawitacji działająca na ciało na jej powierzchni jest wprost proporcjonalna do masy tego ciała ($F \sim m$).

Jeżeli na ciało działa tylko siła grawitacji planety, to zgodnie z drugą zasadą dynamiki porusza się ono z przyspieszeniem:

$$a = \frac{F}{m} = G\frac{M}{R^2}$$

Wyznaczone przyspieszenie a to po prostu przyspieszenie grawitacyjne:

$$g = G\frac{M}{R^2}$$

W przypadku Ziemi nosi ono nazwę **przyspieszenia ziemskiego**.
Wyprowadzony wzór pozwala nie tylko obliczyć przyspieszenia grawitacyjne dla różnych planet, lecz także wyznaczyć ich masy. To właśnie dzięki niemu po raz pierwszy „zważono Ziemię", czyli wyznaczono jej masę:

$$M_Z = \frac{gR_Z^2}{G}$$

M_Z – masa Ziemi,
R_Z – promień Ziemi,
g – przyspieszenie ziemskie

Aby obliczyć masę Ziemi zgodnie z tym wzorem, należy znać trzy wielkości: g, R_Z i G. Przyspieszenie ziemskie można łatwo zmierzyć za pomocą wahadła, promień Ziemi wyznacza się za pomocą pomiarów geodezyjnych (z dość dużą dokładnością zrobiono to już w starożytności). Jednak dopiero wyznaczenie stałej grawitacji pozwoliło z powyższego wzoru obliczyć masę Ziemi.

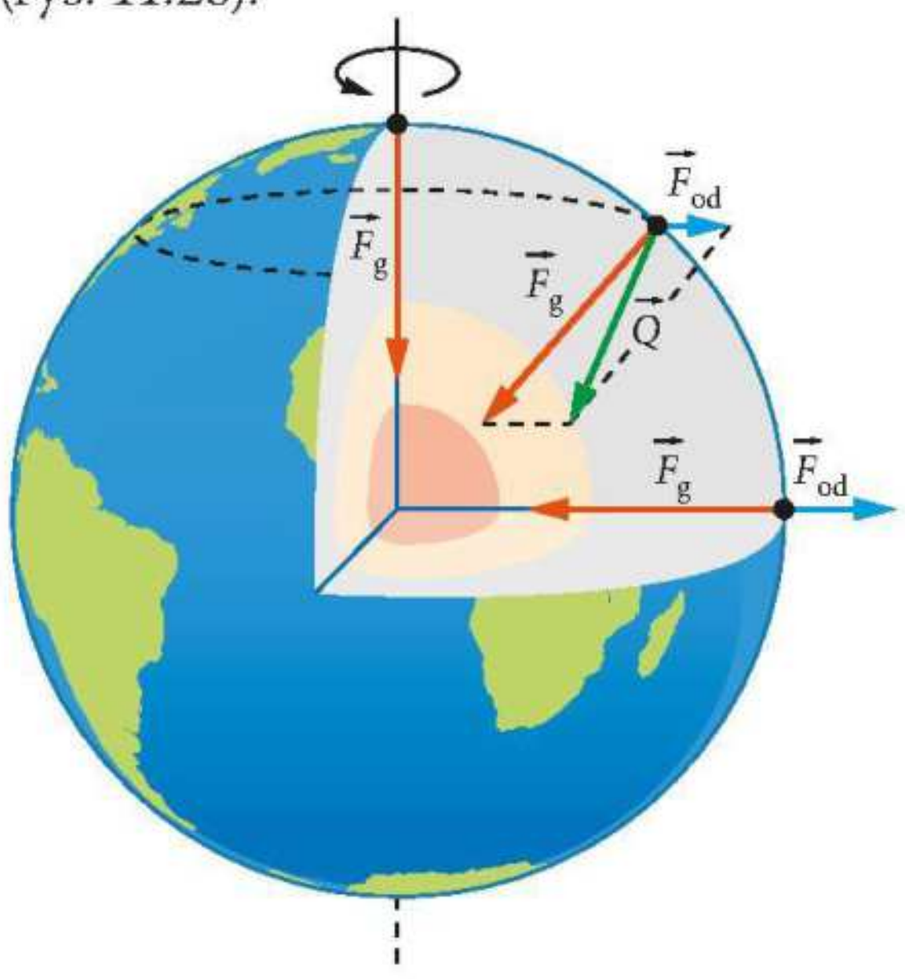
Wyznaczanie g za pomocą wahadła, cz. II s. 176

Czynniki wpływające na ciężar ciała

W powyższych obliczeniach przyjęliśmy założenie, że Ziemia jest kulą. Pominęliśmy:

- niesymetryczny rozkład masy wewnątrz Ziemi (znaczenie ma nie to, że wraz z odległością od jej powierzchni do środka zmienia się gęstość, ale to, że dla każdego punktu na Ziemi zmiana ta ma inny przebieg),
- spłaszczenie Ziemi (promień biegunowy jest nieco mniejszy od równikowego).

Oba te czynniki mają wpływ na przyspieszenie grawitacyjne. Jeśli interesuje nas rzeczywiste przyspieszenie, z jakim ciała spadają na Ziemię, musimy jeszcze wziąć pod uwagę ruch obrotowy Ziemi i związaną z nim siłę odśrodkową (rys. 11.28).



Rys. **11.28.** Wektory siły ciężkości i siły grawitacji leżą na tej samej prostej tylko na równiku, gdzie siła grawitacji jest skierowana prostopadle do osi obrotu Ziemi. Na biegunie siła bezwładności nie występuje. Proporcje wektorów nie zostały zachowane

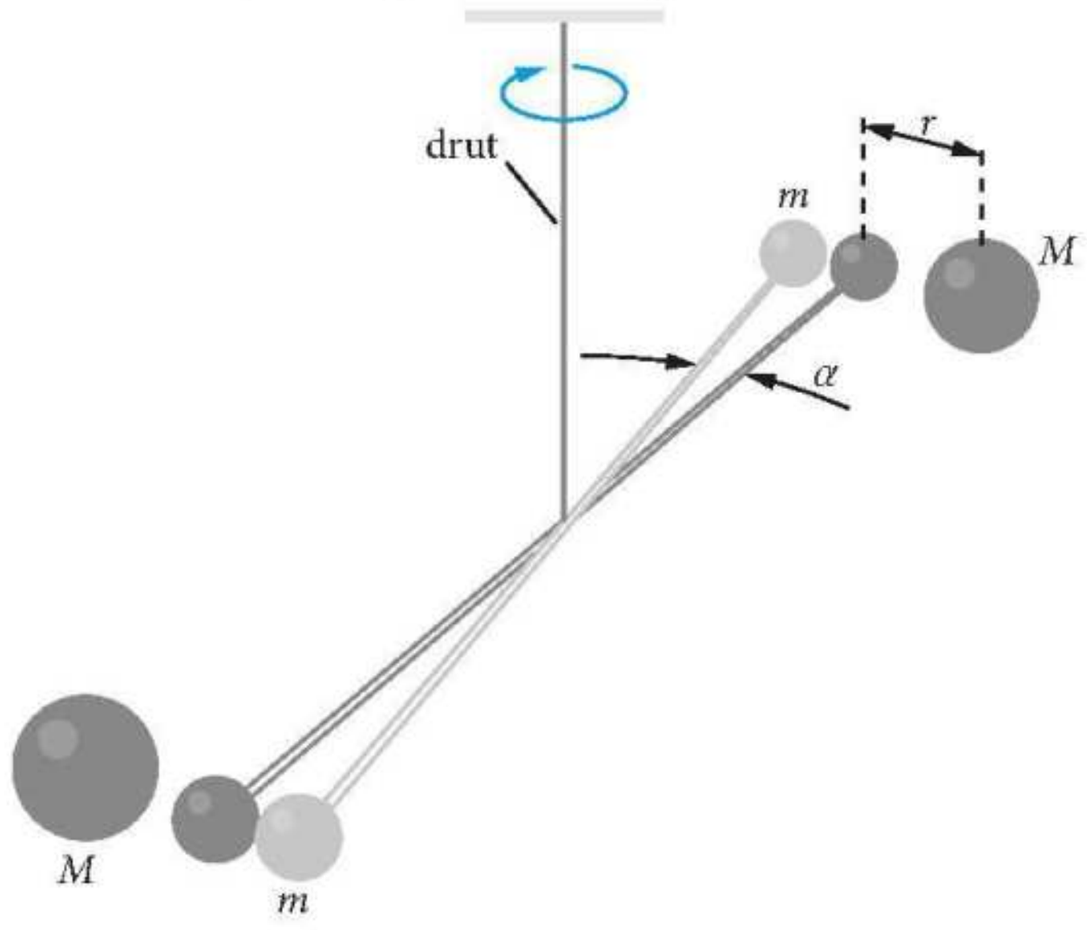
Ciężar $\vec{Q}$ ciał na Ziemi jest wypadkową siły grawitacji $\vec{F}_g$ i siły odśrodkowej $\vec{F}_{od}$, wynikającej z ruchu obrotowego Ziemi:

$$\vec{Q} = \vec{F}_g + \vec{F}_{od}$$

Kiedy przeanalizujemy rysunek 11.28 ze s. 31, zauważymy, że siła $\vec{F}_{od}$ jest skierowana nie od środka Ziemi, ale od środka równoleżnika, na którym znajduje się ciało. Kierunki siły grawitacji i siły odśrodkowej są więc różne (poza równikiem), a kierunek wypadkowej tych sił nie pokrywa się z kierunkiem żadnej z nich.
Wszystkie opisane czynniki mają jednak niewielki wpływ na ciężar ciała, przy czym najistotniejsze jest spłaszczenie Ziemi. Przyspieszenie ziemskie mierzone na poziomie morza zmienia się od 9,78 $\frac{m}{s^2}$ na równiku do 9,83 $\frac{m}{s^2}$ w okolicach bieguna. Z dokładnością do dwóch cyfr znaczących jest to zawsze 9,8 $\frac{m}{s^2}$, a rzadko potrzebujemy bardziej precyzyjnych danych.

Wyznaczanie stałej grawitacji

Aby wyznaczyć stałą grawitacji G, należało zmierzyć siłę grawitacji działającą między dwoma ciałami o znanych masach. Ponieważ w przypadku ciał z naszego otoczenia siła grawitacji jest niewielka, jej zmierzenie nadal jest bardzo trudne, a masy Ziemi wówczas nie znano.
Takiego pomiaru dokonał po raz pierwszy w 1798 r. **Henry Cavendish** (czyt. kawendysz). Jako wynik swoich doświadczeń podał średnią gęstość Ziemi. Ponieważ jednak na podstawie tej wielkości można obliczyć masę Ziemi, a następnie stałą G, dziś używa się skrótu myślowego i mówi, że Cavendish wyznaczył stałą grawitacji lub nawet – bardziej potocznym językiem – że zważył Ziemię. Cavendish wykorzystał urządzenie pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 11.29.



Rys. **11.29.** Schemat pomiaru stałej grawitacji w doświadczeniu Cavendisha

A to ciekawe

W 1966 r. fizyk Lawrence M. Stephenson (czyt. stiwenson) przeanalizował bardzo dokładne pomiary wykonane przez Narodowe Biuro Standaryzacji w Waszyngtonie (na zdjęciu) i stwierdził, że wartość stałej grawitacji G wydaje się zależeć od pory roku: maleje jesienią, a rośnie wiosną. Różnice były na tyle duże, że nie można ich było przypisać założonej niepewności pomiarowej.

Zagadka została rozwiązana, gdy okazało się, że różnice wynikały ze zmian gęstości gleby, która podczas jesiennych ulew nasiąkała wodą, co w znaczący sposób wpływało na wynik pomiaru. Stała grawitacji przez cały czas pozostawała niezmienna.



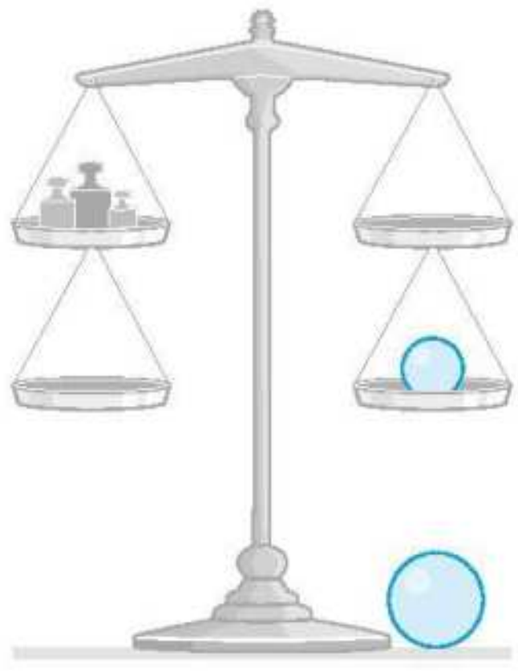
W swoim doświadczeniu Cavendish umieścił dwie kulki o jednakowych masach m na końcach lekkiego pręta, który był zawieszony na sprężystym drucie. Następnie do małych kulek na pręcie zbliżył dwie duże kule z ołowiu o jednakowych masach M. Pod wpływem przyciągania do ołowianych kul kulki zamocowane na pręcie przesunęły się w ich stronę, co spowodowało skręcenie drutu. Na podstawie kąta tego skręcenia (na rysunku 11.29 na stronie wcześniej jest to kąt α) można obliczyć moment sił skręcających drut, a stąd wyznaczyć także siłę grawitacji między masami m i M.

Cavendish wykonał doświadczenie niezmiernie starannie. Sprawdzał, czy wpływ na wynik ma różnica temperatury kulek i powietrza, potencjalnie mogąca powodować konwekcyjny ruch powietrza. Brał poprawki na oddziaływanie małej kulki z drugą, dalszą dużą kulą oraz z obudową skrzyni, w której znajdował się układ doświadczalny.

Niepewność względną pomiaru badacz oszacował ostrożnie na 7%, jednak od dzisiejszych pomiarów wyznaczona przez niego wielkość różni się o niecały 1%.

Doświadczenie Cavendisha zapoczątkowało eksperymentalny kierunek badań nad oddziaływaniami grawitacyjnymi. Za pomocą różnych ciał, np. kul ołowianych, stalowych lub marmurowych o jednakowych masach, można stwierdzić, że **siła grawitacji nie zależy od rodzaju substancji, z jakiej są zbudowane ciała**.

Stała grawitacji jest wielkością, którą możemy poznać dokładniej tylko poprzez wykonywanie coraz dokładniejszych doświadczeń. Od czasów Cavendisha zaproponowano różne metody jej pomiaru, np. w 1880 r. zastosowano wagę z podwójnymi szalkami (rys. 11.30), a w 2007 r. tzw. interferometrię atomową.



Rys. **11.30.** Inną metodę pomiaru stałej grawitacji zastosował w 1880 r. Philipp von Jolly – użył wagi z podwójnymi szalkami

Pole grawitacyjne

Z codziennych obserwacji możemy wysnuć wniosek, że większość ciał oddziałuje ze sobą jedynie wtedy, gdy są w bezpośrednim kontakcie.



Rys. **11.31.** Siła magnetyczna, podobnie jak siła grawitacji, jest siłą działającą na odległość. Innym przykładem takiej siły jest siła elektrostatyczna. Oddziaływania elektrostatyczne również będziemy opisywać za pomocą pól

Nie można na przykład kopnąć piłki bez dotykania jej nogą. Znacznie trudniej zrozumieć mechanizm wzajemnego oddziaływania ciał, które nie tylko się nie dotykają, lecz wręcz znajdują się od siebie w bardzo dużej odległości. Księżyc nie styka się z Ziemią, a Ziemia ani żadna inna planeta nie styka się ze Słońcem, a przecież ze sobą oddziałują. Obecnie zjawiska grawitacyjne wyjaśniamy nie za pomocą sił działających na odległość, ale przy użyciu pojęcia pola grawitacyjnego.

Zamiast mówić, że ciała (np. Słońce i Ziemia) oddziałują na odległość siłami grawitacji, posługujemy się pojęciem **pola grawitacyjnego**. Mówimy, że Słońce wytwarza pole grawitacyjne, w którym na wszystkie ciała znajdujące się w nim (a więc również na Ziemię) działają siły grawitacji. Oczywiście także Ziemia wytwarza pole grawitacyjne.

> Wokół każdego ciała o masie M istnieje pole grawitacyjne. Jeśli w tym polu znajduje się inne ciało o masie m, będzie na nie działać siła grawitacji.

W następnych rozdziałach zobaczysz, że także inne oddziaływania: elektryczne i magnetyczne, możemy opisywać za pomocą pola.

Po tej lekcji powinieneś

- stosować wzór na siłę grawitacji, wynikający z prawa powszechnego ciążenia, i znać zakres jego stosowalności;
- wyprowadzać wzór na przyspieszenie grawitacyjne planety w zależności od jej promienia i masy;
- umieć obliczać ciężar ciała na dowolnej planecie i wiedzieć, co wpływa na wartość tej wielkości.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Wyprowadź wzór opisujący zależność przyspieszenia grawitacyjnego na planecie od promienia R tej planety. Przyjmij gęstość planety równą $d = 5510\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$, co odpowiada w przybliżeniu średniej gęstości Ziemi. Przedstaw otrzymaną zależność za pomocą wykresu i nazwij ten rodzaj zależności.

Rozwiązanie

Niech R, V, M, g oznaczają odpowiednie wielkości dla badanej planety.
Wzór na objętość kuli to:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

Po wyznaczeniu M z definicji gęstości $d = \frac{M}{V}$ i podstawieniu wzoru na objętość kuli mamy:

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3 d$$

Wykorzystajmy tę zależność we wzorze na przyspieszenie grawitacyjne:

$$g = \frac{GM}{R^2} = \frac{G \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 d}{R^2} = \frac{4}{3}\pi dG \cdot R = \alpha R$$

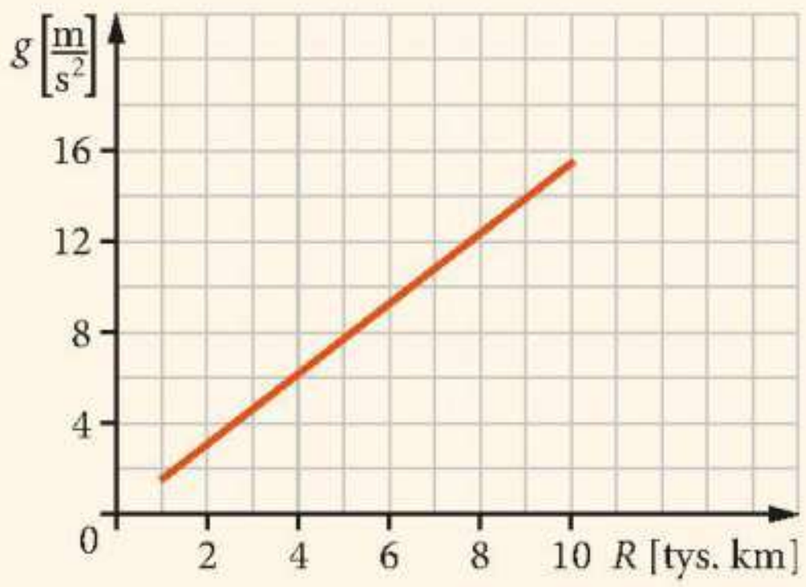
gdzie g jest wyrażone w $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$, a R w metrach. Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$\alpha \approx 1{,}54 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\mathrm{s}^2}$$

$$[\alpha] = \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m} \cdot \mathrm{kg}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}{\mathrm{m} \cdot \mathrm{kg}} = \frac{1}{\mathrm{s}^2}$$

Zauważmy, że aby obliczyć przyspieszenie, równie dobrze można pomnożyć 1,54 przez promień wyrażony w tysiącach kilometrów (bo 1 tys. km $= 1 \cdot 10^6$ m). Na przykład dla Ziemi: $6{,}371 \cdot 1{,}54 = 9{,}81$ – jest to wynik zgodny z naszą wiedzą.

Zależność $g(R)$ jest proporcjonalnością prostą. Przedstawimy ją za pomocą wykresu:



Uwaga. Wyprowadzony wzór obowiązuje także dla małych wartości R, ale ciała o promieniu mniejszym od 1000 km nie nazywamy planetą.

Odpowiedź: Zależność g od R jest proporcjonalnością prostą opisaną wzorem $g = \alpha R$, gdzie $\alpha \approx 1{,}54 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\mathrm{s}^2}$, g i R są wyrażone w jednostkach układu SI.

Uwaga. Im większy promień planety, tym większa jej masa, ale jednocześnie tym dalej od środka znajduje się ciało będące na powierzchni. Te dwie zależności się jednak nie redukują: na planecie o promieniu trzy razy większym licznik ułamka $\frac{GM}{R^2}$ zwiększa się 3^3 razy ($M \sim R^3$), a mianownik tylko 3^2 razy, dlatego g jest proporcjonalne do R.

Uwaga. Podczas rozwiązywania zadań dotyczących ciał niebieskich możesz korzystać z tablic na końcu podręcznika.

1. Siły oddziaływania grawitacyjnego planet zależą od odległości między nimi, która zmienia się w miarę ich ruchu wokół Słońca. Słońce, Ziemia, Mars i Jowisz znalazły się w jednej linii (w podanej kolejności) 25 lutego 1980 r. Która z planet przyciągała wówczas Ziemię większą siłą: Mars czy Jowisz? Wykonaj odpowiednie obliczenia i podaj stosunek tych sił.

Postaraj się, aby działania na liczbach były jak najprostsze.

2. W jakiej odległości od powierzchni Ziemi powinien znaleźć się 10-kilogramowy odważnik, aby Ziemia przyciągała go siłą 1 N?

3. Dwie jednakowe ołowiane kule o promieniu R stykają się ze sobą. Dla jakiej wartości R siła oddziaływania grawitacyjnego kul ma wartość 1 N? Gęstość ołowiu wynosi $d = 11\,340\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

4. Oblicz wartość przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni Merkurego.

5. Białe karły są gwiazdami na końcowym etapie ewolucji gwiazd. Biały karzeł J2056 ma masę 0,56 masy Słońca i promień 10 000 km.

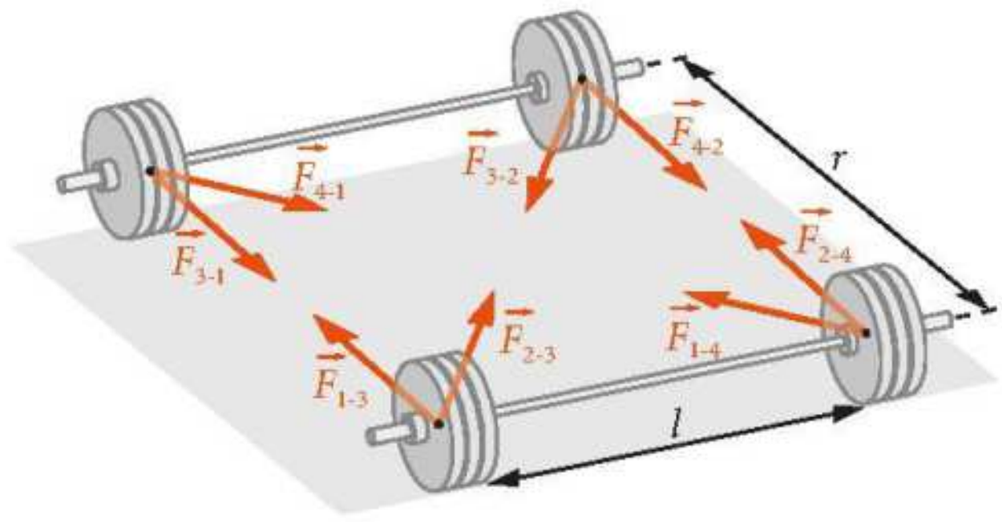
a) Oblicz, jaki ciężar miałoby ciało o masie 1 kg leżące na powierzchni białego karła J2056, gdyby się on nie obracał.

b) Jeśli wokół białego karła krąży inna gwiazda, może on uzyskać bardzo dużą prędkość kątową wskutek pochłaniania materii tej gwiazdy. Tak właśnie jest z białym karłem J2056. Obraca się on z prędkością kątową 0,21 $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Oblicz, jaki będzie ciężar ciała o masie 1 kg leżącego na jego równiku, jeśli uwzględni się obrót gwiazdy.

6. Na podłodze w odległości $r = 80$ cm od siebie leżą dwie sztangi o długości $l = 120$ cm. Na ich końcach znajdują się obciążniki o masie $m = 50$ kg. Porównaj siłę grawitacji między sztangami obliczoną na dwa sposoby:

a) bezpośrednio ze wzoru Newtona, przy założeniu, że sztangi są punktami materialnymi o masie $2m$, znajdującymi się w odległości r od siebie,

b) przy założeniu, że każda ze sztang składa się z dwóch punktów materialnych (ciężarków na końcach).



Wyjaśnij, który ze sposobów daje wynik bardziej zbliżony do rzeczywistej wartości siły.

7. Oblicz, ile musiałby wynosić okres obrotu Ziemi wokół własnej osi, aby ciężar ciał znajdujących się na równiku był równy zero, czyli aby siła odśrodkowa równoważyła siłę grawitacji.

11.5. Pierwsze i drugie prawo Keplera

Przypomnij sobie

- Siła grawitacji pełni w ruchu ciał niebieskich funkcję siły dośrodkowej.
- Planety wokół Słońca i satelity wokół planet krążą po orbitach eliptycznych.

Jak wiesz z pierwszej lekcji, ruch planet wokół Słońca, a także księżyców i innych obiektów obiegających planety, podlega prawom nazwanym – od nazwiska ich odkrywcy – prawami Keplera.

Niemiecki astronom **Jan Kepler** opracował je na podstawie analizy dużej liczby danych obserwacyjnych, które zebrał jego duński mistrz **Tycho Brahe**. Prawa sformułowane przez Keplera pozwoliły skorygować założenie przyjęte przez Mikołaja Kopernika w teorii heliocentrycznej, że planety krążą wokół Słońca po orbitach kołowych. Stanowiły także podstawę stworzonych przez Izaaka Newtona zasad dynamiki i prawa powszechnego ciążenia.



Rys. **11.32.** Jan Kepler (1571–1630)

Być może zaskoczyła cię informacja, że prawa fizyki odkryto najpierw w odniesieniu do ciał niebieskich, a nie do ciał bezpośrednio dostępnych na Ziemi. Jednak jeżeli weźmiemy pod uwagę, że biegu ciał niebieskich nie zakłócają opory ruchu, od których tak trudno się uwolnić na co dzień, wszystko staje się zrozumiałe.

Przeprowadźmy rozumowanie odwrotne do tego, które miało miejsce w przeszłości. Wyjaśnijmy ruch ciał niebieskich na podstawie wiedzy zdobytej dotychczas na lekcjach fizyki: praw mechaniki oraz prawa powszechnego ciążenia.

Prawo powszechnego ciążenia s. 29

Ruch ciała pod wpływem siły grawitacji

Przeanalizujmy oddziaływania grawitacyjne dwóch ciał, z których jedno ma masę znacznie większą od drugiego, np. układ Słońce – Ziemia albo Ziemia – sztuczny satelita. W takich sytuacjach ruch cięższego ciała można pominąć i rozważać oddziaływania w inercjalnym układzie odniesienia związanym z tym ciałem. Ponadto układ tych dwóch ciał musi być izolowany, co oznacza, że wpływ oddziaływań grawitacyjnych pochodzących od innych ciał jest pomijalnie mały.

Układ inercjalny, cz. I s. 168

Układ izolowany, cz. I s. 201

Układ, w którym ciała mogą oddziaływać między sobą, ale nie oddziałują z ciałami spoza tego układu.

Można udowodnić, choć wykracza to poza zakres szkolnej matematyki, że jedynym zamkniętym torem orbity lżejszego ciała jest w takim przypadku **elipsa**, a w jednym z jej ognisk znajduje się cięższe ciało (patrz ramka na następnej stronie).

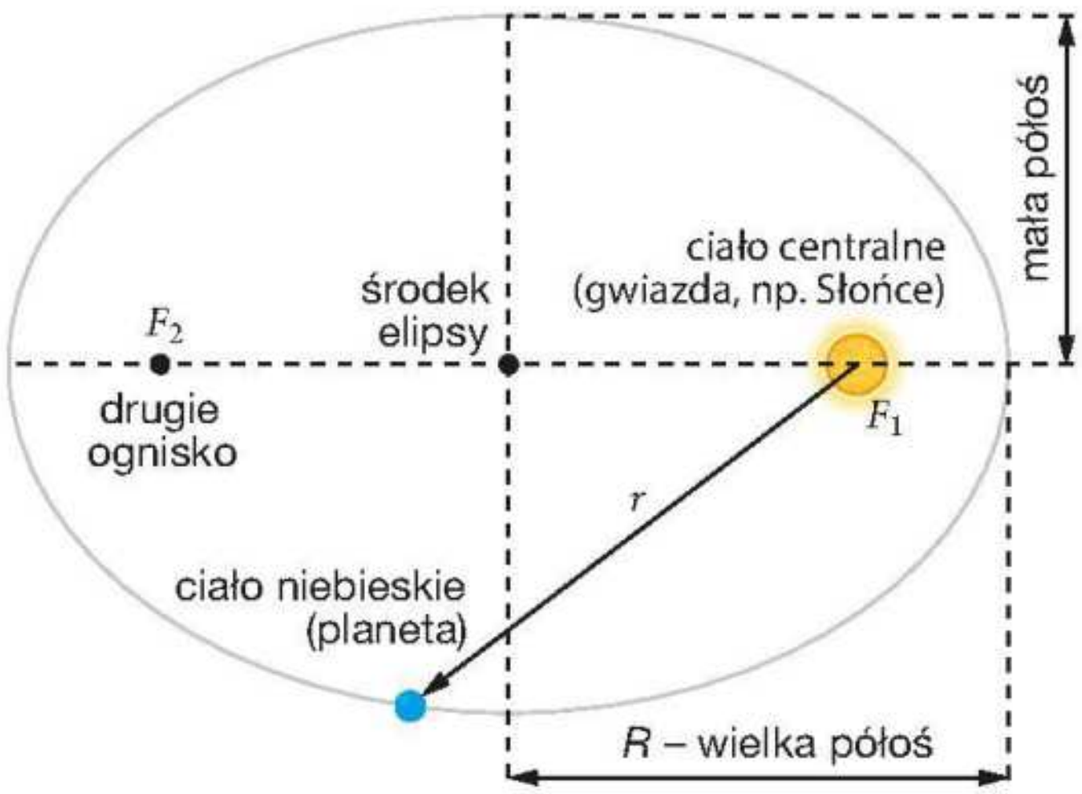
Elipsa – jedyny zamknięty tor małego ciała wokół dużego

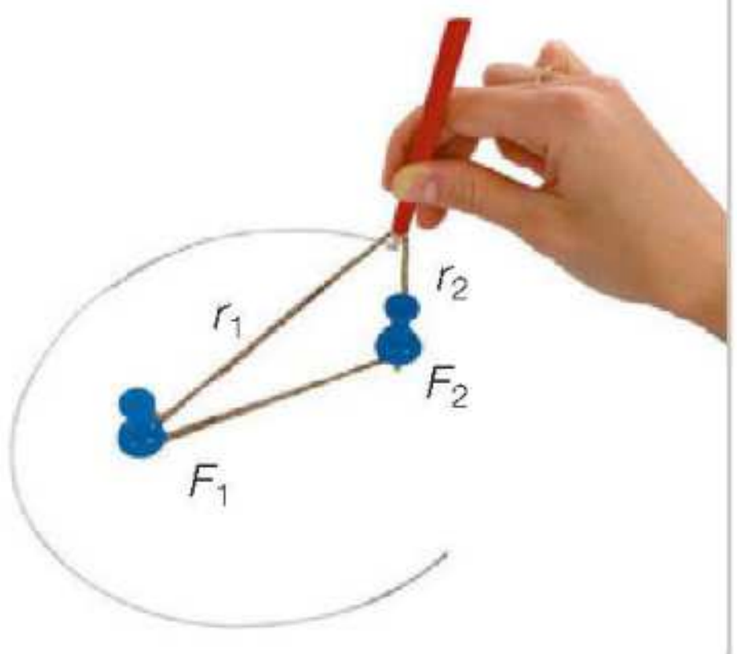
Elipsa to krzywa zamknięta, utworzona w ten sposób, że suma odległości od każdego jej punktu do dwóch wyróżnionych punktów F_1 i F_2 (ognisk elipsy) jest stała:

$$r_1 + r_2 = 2R$$

gdzie R to wielka półoś elipsy.

Szczególnym przypadkiem elipsy, której oba ogniska się pokrywają, jest okrąg.





Pierwsze prawo Keplera brzmi:

> Torem ruchu każdej planety jest elipsa. W jednym z ognisk tej elipsy znajduje się Słońce.

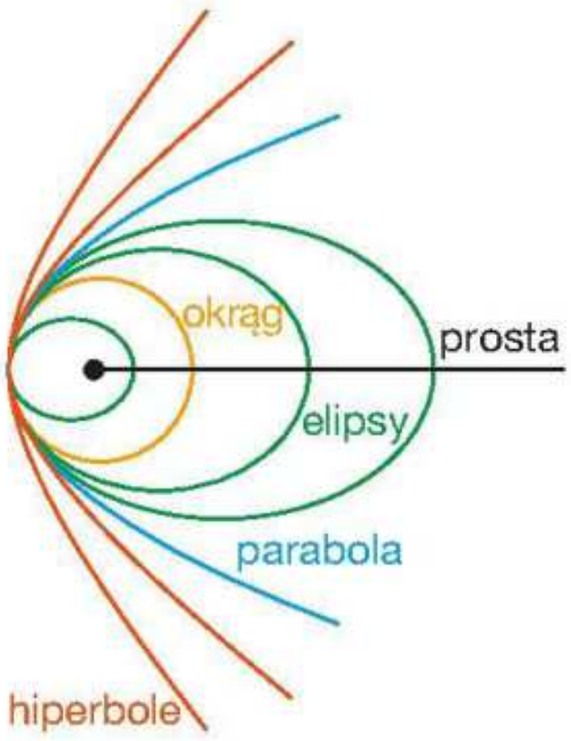
To prawo można sformułować analogicznie dla naturalnych i sztucznych satelitów planet, a także planet krążących wokół innych gwiazd.

Inne tory ciała pod wpływem siły grawitacji

Wiemy, że jedynym torem zamkniętym, po którym może poruszać się lżejsze ciało pod wpływem siły grawitacji ciała znacznie cięższego, jest elipsa. Jednak zgodnie z prawem powszechnego ciążenia ciało takie może poruszać się jeszcze po krzywych, które nie są zamknięte. Są trzy takie krzywe: **hiperbola** i **parabola** oraz **linia prosta**. Przykładem ruchu po prostej jest ruch ciała upuszczonego na źródło siły grawitacji bez prędkości początkowej.

Wszystkie krzywe obrazujące tory ruchu ciał pod wpływem siły grawitacji przedstawiono na rysunku 11.33.

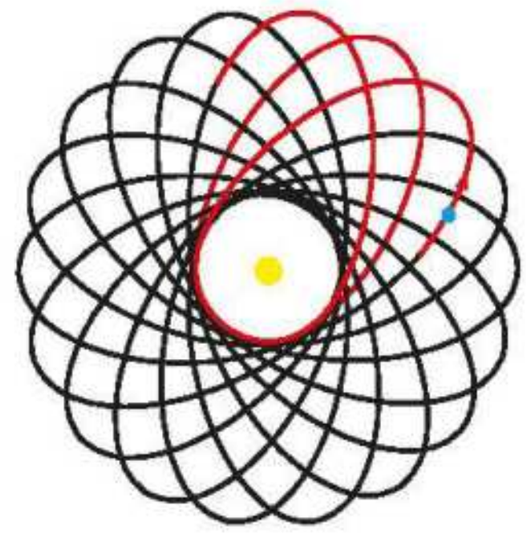
Jeżeli ciało porusza się po hiperboli lub paraboli, czyli po krzywych, które nie są zamknięte, zbliży się ono do cięższego ciała tylko raz, a potem będzie się od niego stale oddalać. Po takich krzywych poruszają się pod wpływem grawitacji Słońca komety nieokresowe (rys. 11.34 s. 39).



Rys. **11.33.** Tory ruchu ciał pod wpływem siły grawitacji

A to ciekawe

Bardzo dokładne obserwacje astronomiczne pozwalają stwierdzić, że planety nie poruszają się dokładnie po elipsach, ale po liniach zbliżonych do rozet (patrz rysunek). Ten efekt jest spowodowany przede wszystkim przyciąganiem grawitacyjnym planet nie tylko przez Słońce, lecz także przez inne planety. Największe zmiany obserwuje się dla orbity Merkurego: oś elipsy tej orbity obraca się o kąt ok. 1,5° na 100 lat. Okazuje się, że prawo grawitacji Newtona nie pozwala prawidłowo przewidzieć wartości tego kąta. Jest to możliwe dopiero na gruncie ogólnej teorii względności Einsteina.



Albert Einstein ogłosił ogólną teorię względności w 1916 r. Zgodnie z nią oddziaływanie grawitacyjne polega na zakrzywieniu czasoprzestrzeni, czyli przestrzeni, w której oprócz trzech wymiarów przestrzennych istnieje jeszcze czwarty wymiar – czas. Obrazowym modelem grawitacji jako zakrzywienia czasoprzestrzeni jest napięta gumowa membrana. Gdy położymy na niej dwie stalowe kulki, membrana się ugnie, a kulki ruszą w swoim kierunku, jakby się przyciągały (patrz zdjęcie obok). Teoria Einsteina umożliwia opisanie zarówno ruchu Merkurego, jak i zachowania ciał w pobliżu bardzo dużych mas (np. czarnych dziur). Dzięki niej lepiej rozumiemy historię i ewolucję Wszechświata. Znajduje też wykorzystanie praktycznie, np. dzięki poprawkom z niej wynikającym system GPS podaje prawidłowe współrzędne geograficzne.



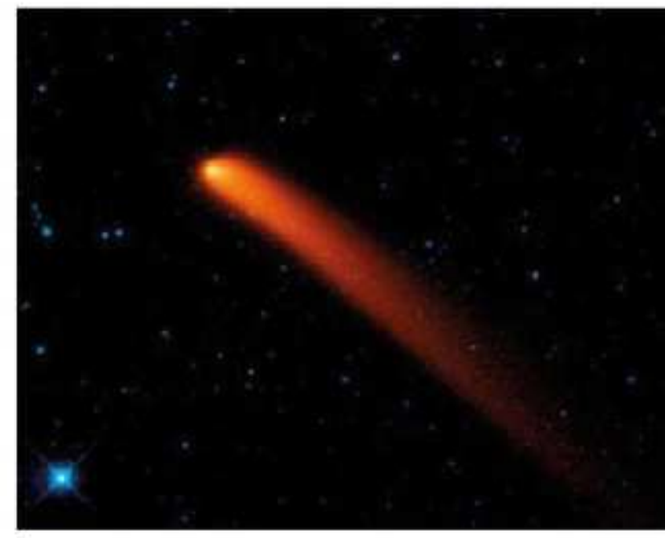
Siła grawitacji a ruch po elipsie

Często ruch planety traktujemy jak ruch jednostajny po okręgu. Wówczas siła grawitacji to po prostu siła dośrodkowa. Jest prostopadła do wektora prędkości i powoduje zmianę kierunku ruchu planety.

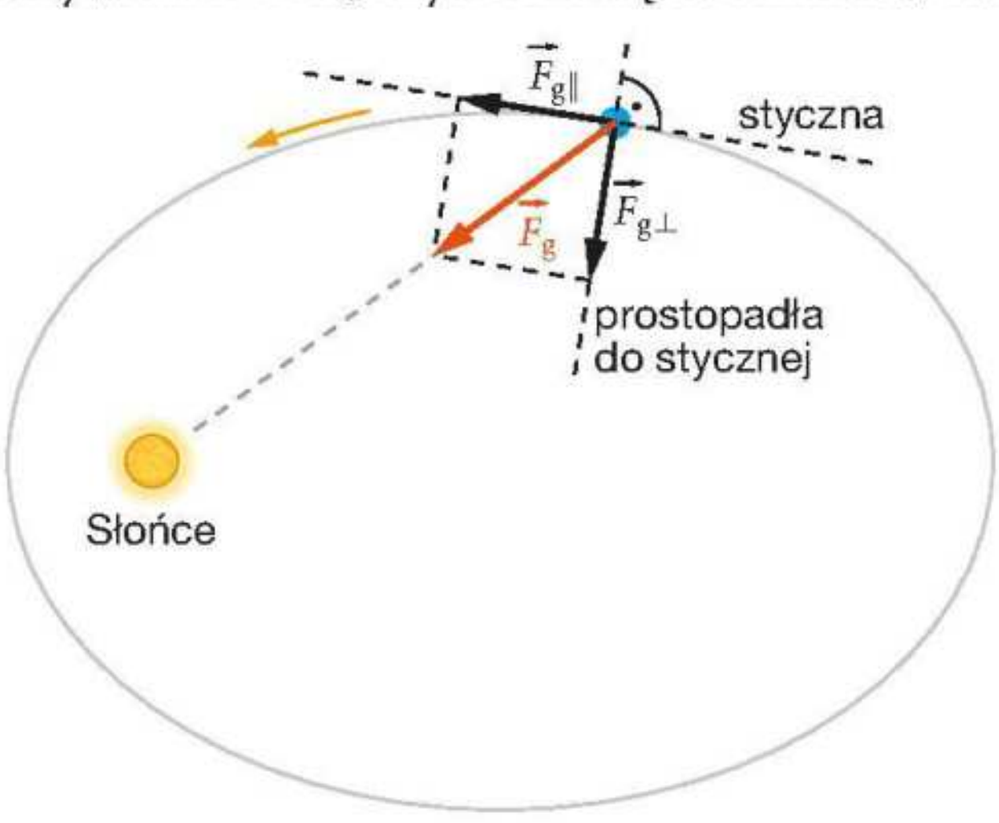
Przeanalizujmy teraz wpływ siły grawitacji działającej na planetę w przypadku jej ruchu po orbicie eliptycznej. Rozłóżmy siłę grawitacji $\vec{F}_g$ na składowe (rys. 11.35):

- $\vec{F}_{g\parallel}$ o kierunku równoległym do stycznej,
- $\vec{F}_{g\perp}$ o kierunku prostopadłym do stycznej.

Pierwsza z tych sił powoduje zmianę wartości prędkości: w sytuacji przedstawionej na rysunku 11.35 – jej zwiększenie. Natomiast druga siła powoduje zakrzywienie toru, czyli zmianę kierunku wektora prędkości.



Rys. **11.34.** Kometa C/2007Q3 zwana Siding Spring pojawiła się w pobliżu Słońca i Ziemi w 2007 r. Jest to kometa nieokresowa poruszająca się po hiperboli. Także dla komet nieokresowych spełnione jest drugie prawo Keplera



Rys. **11.35.** Siła grawitacji w ruchu po orbicie eliptycznej

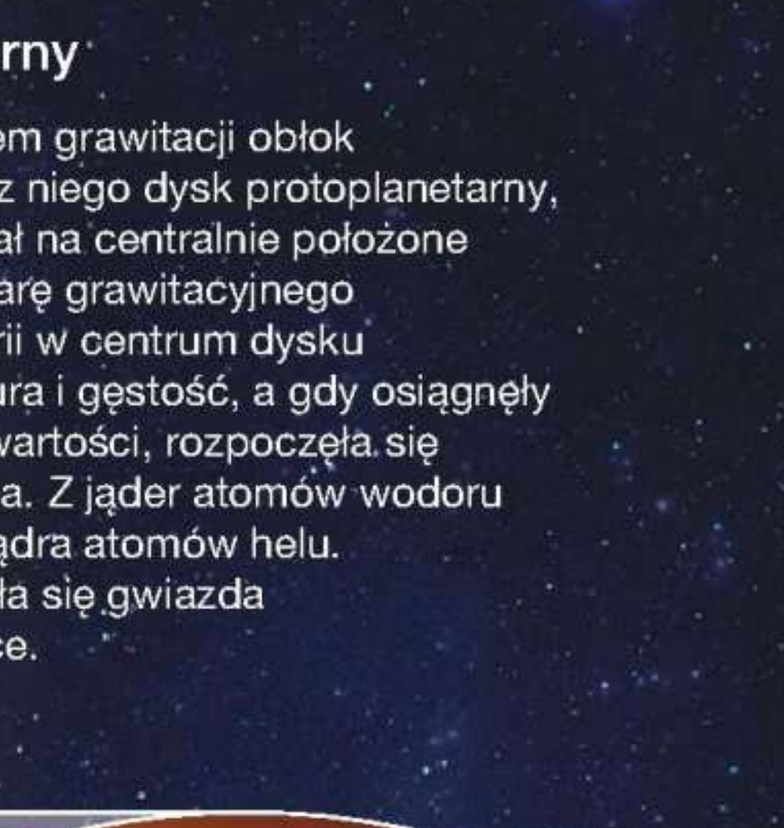
Powstawanie Układu Słonecznego

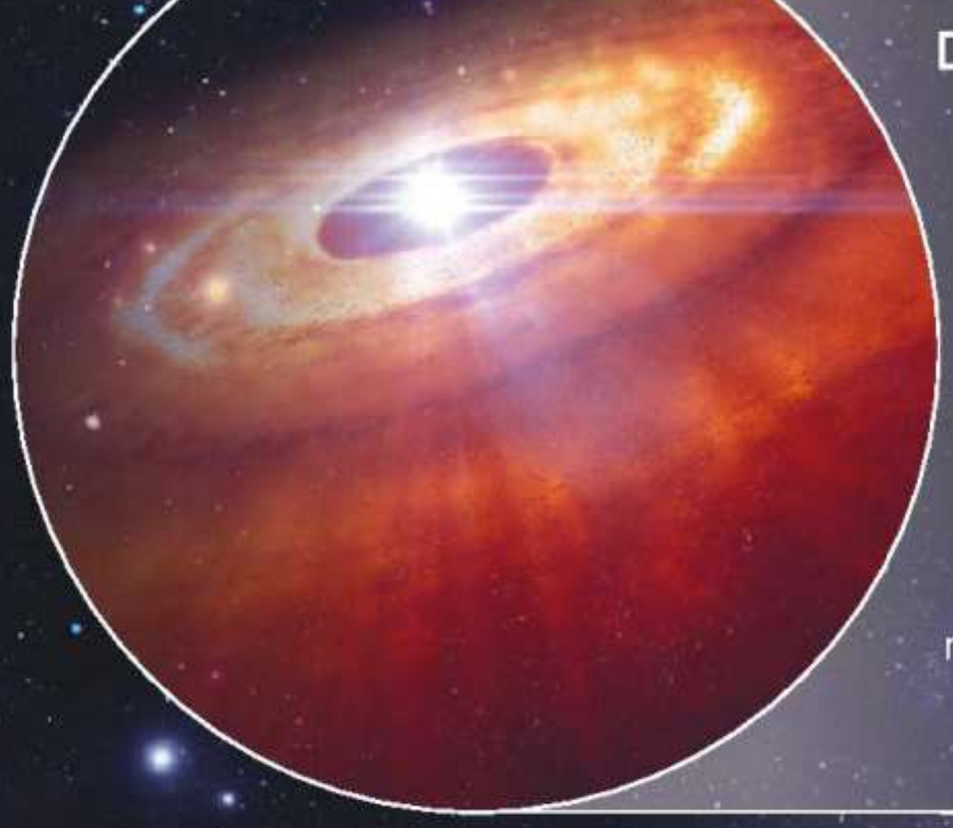
Oddziaływania grawitacyjne – jeden z czterech rodzajów oddziaływań fundamentalnych – odpowiadają za kształt Wszechświata. Dzięki siłom grawitacji z gazowego obłoku uformowały się Słońce, okrążające je planety i inne ciała niebieskie.

Obłok molekularny

Proces formowania Układu Słonecznego rozpoczął się ok. 5 miliardów lat temu w jednym z obłoków molekularnych Galaktyki.

Składał się on głównie z cząsteczek wodoru H_2, ale znajdowały się w nim również wszystkie inne pierwiastki przyszłego Układu Słonecznego.





Dysk protoplanetarny

Z czasem pod wpływem grawitacji obłok kurczył się i powstał z niego dysk protoplanetarny, z którego gaz spływał na centralnie położone zagęszczenie. W miarę grawitacyjnego zapadania się materii w centrum dysku wzrastały temperatura i gęstość, a gdy osiągnęły odpowiednio duże wartości, rozpoczęła się reakcja termojądrowa. Z jąder atomów wodoru zaczęły powstawać jądra atomów helu. W ten sposób narodziła się gwiazda naszego układu – Słońce.

Układ Słoneczny

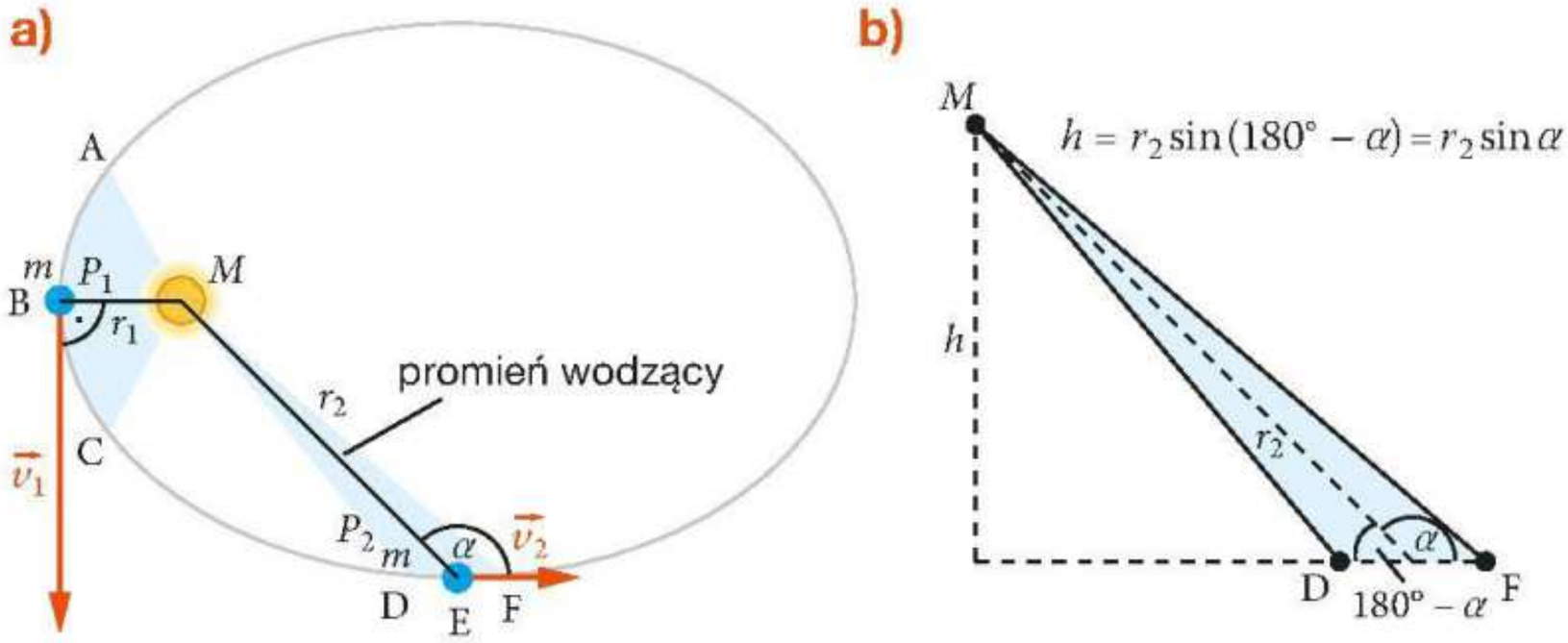
Z drobnych zagęszczeń w dysku otaczającym Słońce stopniowo powstały planety, księżyce i pozostałe ciała Układu Słonecznego.



Drugie prawo Keplera

Jak powiedzieliśmy wcześniej w tej lekcji, planety krążą wokół Słońca po elipsach. Z rysunku 11.35 na s. 39 wynika, że gdy planeta zbliża się do Słońca, porusza się coraz szybciej. Analogicznie – gdy się od niego oddala, porusza się coraz wolniej. Czyli im bliżej Słońca, tym większa jest prędkość planety. Dokładniejszy opis tych zmian zawiera drugie prawo Keplera.

Posłużymy się rysunkiem 11.36a, na którym pokazano planetę w dwóch położeniach: B i E. W każdym z nich narysowaliśmy **promień wodzący**, czyli odcinek łączący Słońce i planetę (r_1 i r_2).



Rys. **11.36.** Pola zakreślonych obszarów są równe. Dwa fragmenty elipsy między punktami A i C oraz D i F planeta pokonuje w jednakowych przedziałach czasu. Prędkość planety między punktami A i C jest większa niż między punktami D i F ($v_1 > v_2$)

Na początku lekcji założyliśmy, że na nasz układ nie działają siły zewnętrzne. Zatem aby ustalić, jak zmienia się prędkość planet poruszających się po elipsie, możemy skorzystać z zasady zachowania momentu pędu. Gdy planeta znajduje się w punkcie B (w minimalnej odległości r_1 od Słońca), wektor jej prędkości jest prostopadły do promienia wodzącego i ma wartość v_1. Moment pędu planety możemy zapisać następująco:

Zasada zachowania momentu pędu, cz. I s. 272

Jeśli na układ fizyczny nie działa wypadkowy moment siły, to całkowity moment pędu układu się nie zmienia.

$$L_1 = mv_1r_1$$

Dla punktu E moment pędu przybiera postać (rys. 11.36b):

$$L_2 = mv_2r_2 \sin\alpha$$

Ponieważ moment pędu jest zachowany, czyli $L_1 = L_2$, możemy zapisać:

$$v_1r_1 = v_2r_2 \sin\alpha$$

Pomnóżmy tę równość stronami przez czas Δt (na tyle krótki, aby można było pominąć zmianę promienia wodzącego, a więc krótszy niż to przedstawiono na rysunku) oraz liczbę $\frac{1}{2}$, a otrzymamy pola trójkątów zakreślanych przez promień wodzący planety:

$$\tfrac{1}{2}(v_1\Delta t)r_1 = \tfrac{1}{2}(v_2\Delta t)r_2 \sin\alpha$$

$$P_1 = P_2$$

W ten sposób otrzymaliśmy **drugie prawo Keplera**:

> W trakcie ruchu każdej planety promień wodzący, czyli odcinek łączący Słońce i planetę, zakreśla w równych odstępach czasu równe pola.

Oczywiście drugie prawo Keplera obowiązuje także dla satelitów planet i dowolnych ciał poruszających się po elipsie wokół innego ciała.

Obliczanie prędkości satelity

Orbita Księżyca i wielu sztucznych satelitów wokół Ziemi, a także wielu księżyców innych planet, jest zbliżona do okręgu. Dlatego dla uproszczenia dalej zajmiemy się przypadkiem, gdy orbita ma kształt okręgu.
Aby ciało poruszało się po takiej orbicie z prędkością v, musi działać na nie siła dośrodkowa równa co do wartości:

$$F_{do} = m\frac{v^2}{R}$$

m – masa satelity,
v – prędkość satelity,
R – promień orbity,
M – masa ciała, wokół którego porusza się satelita

Funkcję siły dośrodkowej pełni w tym przypadku siła grawitacji. Dlatego możemy zapisać:

$$G\frac{Mm}{R^2} = m\frac{v^2}{R}$$

Po wyznaczeniu prędkości otrzymujemy wzór

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

Powyższa zależność pozwala obliczyć prędkość satelity poruszającego się po kołowej orbicie wokół planety albo prędkość planety obiegającej gwiazdę. Zwróć uwagę, że jedyną siłą działającą na satelitę jest siła grawitacji. Satelita nie potrzebuje napędu, aby poruszać się wokół planety, podobnie jak Ziemia nie potrzebuje napędu, aby poruszać się wokół Słońca.
Prędkość satelity krążącego nad planetą po okręgu na wysokości niewielkiej w stosunku do promienia planety nazywamy **pierwszą prędkością kosmiczną** i oznaczamy v_I.

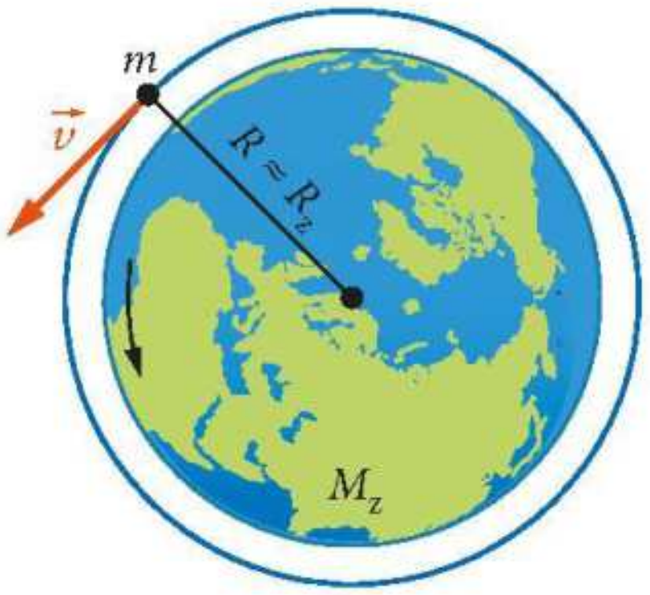
> Pierwsza prędkość kosmiczna to prędkość satelity okrążającego planetę na niewielkiej wysokości.

Wysokość, na jakiej krąży satelita Ziemi, nie może być dowolnie mała, gdyż atmosfera naszej planety spowodowałaby jego zatrzymanie. Jednak na wysokości kilkuset kilometrów praktycznie nie ma już atmosfery, a odległość od środka Ziemi jest tylko o kilka procent większa niż na jej powierzchni. Prędkość satelity na takiej orbicie różni się tylko nieznacznie od pierwszej prędkości kosmicznej (patrz przykład po lekcji).

Obliczmy pierwszą prędkość kosmiczną dla Ziemi. Satelita znajduje się niezbyt wysoko, zatem jego odległość od środka Ziemi jest w przybliżeniu równa promieniowi Ziemi $R_Z = 6370\,\text{km}$ (rys. 11.37). Po podstawieniu tej wartości oraz masy Ziemi $M_Z = 6 \cdot 10^{24}\,\text{kg}$ do wyprowadzonego wcześniej wzoru i wykonaniu obliczeń otrzymujemy:

$$v \approx 7900\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Zatem pierwsza prędkość kosmiczna dla Ziemi wynosi $v_\text{I} = 7{,}9\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$.



Rys. **11.37.** Odległość satelity poruszającego się na niewielkiej wysokości nad powierzchnią Ziemi jest w przybliżeniu równa promieniowi Ziemi

Po tej lekcji powinieneś

- znać i stosować pierwsze prawo Keplera;
- znać i interpretować drugie prawo Keplera;
- obliczać prędkość satelity obiegającego planetę;
- obliczać pierwszą prędkość kosmiczną dla różnych ciał niebieskich.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Międzynarodowa Stacja Kosmiczna okrąża Ziemię na wysokości $h = 415$ km nad jej powierzchnią. Oblicz okres obiegu tej stacji wokół Ziemi.



Rozwiązanie

Stacja znajduje się na wysokości $h = 415$ km, czyli promień okręgu, po którym się porusza, wynosi:

$$R = 6370\,\text{km} + 415\,\text{km} = 6785\,\text{km}$$

Do wzoru $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ podstawiamy za M masę Ziemi, a za R otrzymaną odległość stacji od środka Ziemi i otrzymujemy prędkość stacji na orbicie okołoziemskiej:

$$v \approx 7{,}68\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Ponieważ orbita takiego satelity jest okręgiem, więc jej długość to:

$$s = 2\pi R = 42\,630\,\text{km}$$

Stacja przebywa ją w czasie jednego okresu:

$$T = \frac{s}{v} = 5551\,\text{s} \approx 93\,\text{min}$$

Odpowiedź: Okres obiegu tej stacji wokół Ziemi wynosi ok. 93 min.

Uwaga. Zauważmy, że otrzymana prędkość satelity różni się tylko o niecałe 3% od pierwszej prędkości kosmicznej dla Ziemi.

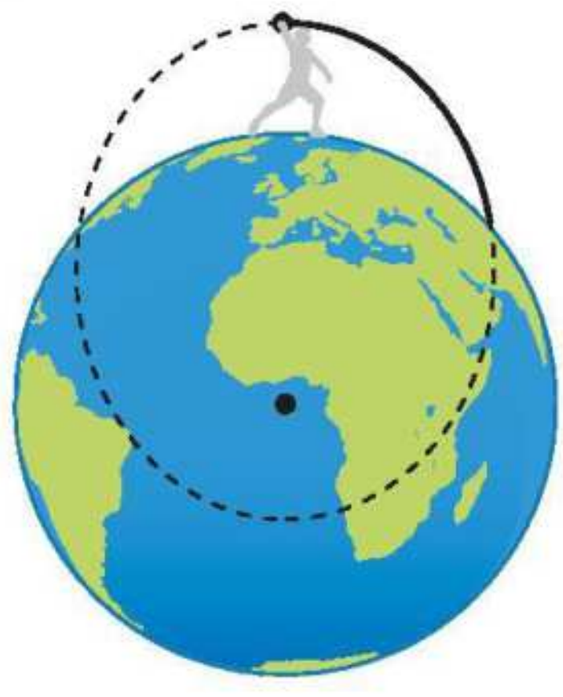
Zadania s. 44

Pytania i zadania

1. Oblicz prędkość i okres obiegu satelity okrążającego Ziemię na wysokości równej jej promieniowi. Porównaj tę prędkość z pierwszą prędkością kosmiczną dla Ziemi.
2. Przedstaw na wykresach w zeszycie:
   a) zależność $v(h)$ między prędkością satelity a wysokością, na jakiej się on znajduje,
   b) zależność $T(h)$ między okresem obiegu tego satelity a wysokością, na jakiej się on znajduje.
3. Oblicz pierwszą prędkość kosmiczną dla Księżyca.
4. Zbadaj zależność między pierwszą prędkością kosmiczną planety a jej promieniem przy założeniu, że gęstość tej planety jest stała i równa gęstości Ziemi. Przedstaw wynik swoich rozważań w postaci wzoru oraz wykresu wykonanego w zeszycie.
5. Wykaż za pomocą obliczeń, że Słońce ponad dwa razy silniej przyciąga Księżyc niż Ziemia. Przekształć wzory tak, aby działania na liczbach były jak najprostsze.

   Jak pogodzić ten wynik z faktem, że Księżyc krąży wokół Ziemi?
6. Gdy Ziemia znajduje się najbliżej Słońca, w odległości 147,09 mln km, porusza się z prędkością 30,29 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Oblicz prędkość, z jaką porusza się Ziemia w największej odległości od Słońca, wynoszącej 152,10 mln km.

   Wskazówka. Rozpocznij od uzasadnienia, że w obu tych położeniach prędkość Ziemi jest prostopadła do promienia wodzącego.
7. Rozważmy ruch ciała rzuconego poziomo z niewielkiej wysokości nad powierzchnią ziemi (pomijamy opór powietrza). Zgodnie z pierwszym prawem Keplera porusza się ono po elipsie, w której ognisku znajduje się środek Ziemi, a ściślej mówiąc: po fragmencie tej elipsy do punktu jej przecięcia z powierzchnią ziemi (jak na rysunku). Jednak w pierwszej części podręcznika uzasadniliśmy, że rzucone w ten sposób ciało porusza się po paraboli. Przy jakich założeniach można ten tor traktować jak parabolę, a kiedy jak elipsę?



11.6. Trzecie prawo Keplera

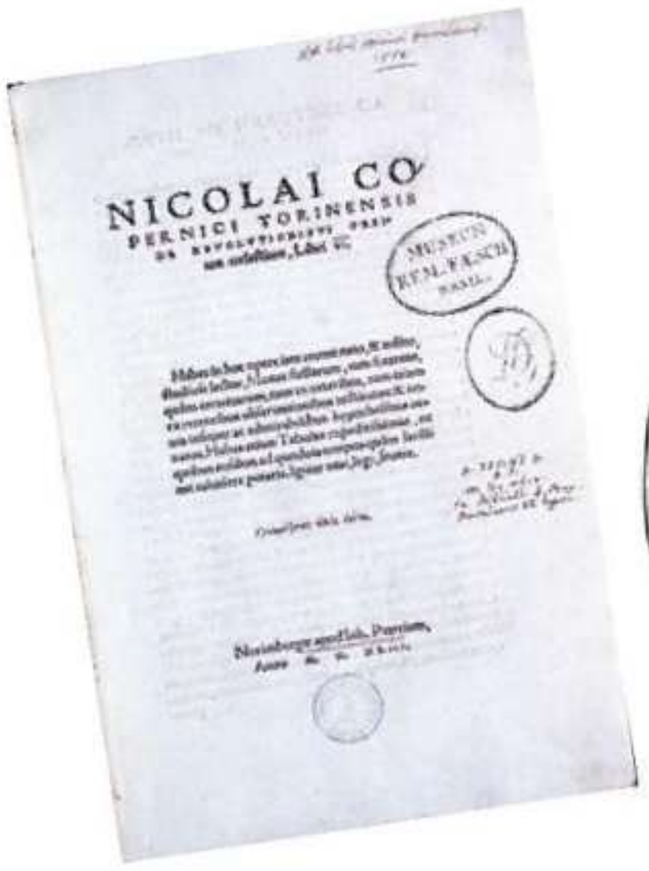
Przypomnij sobie

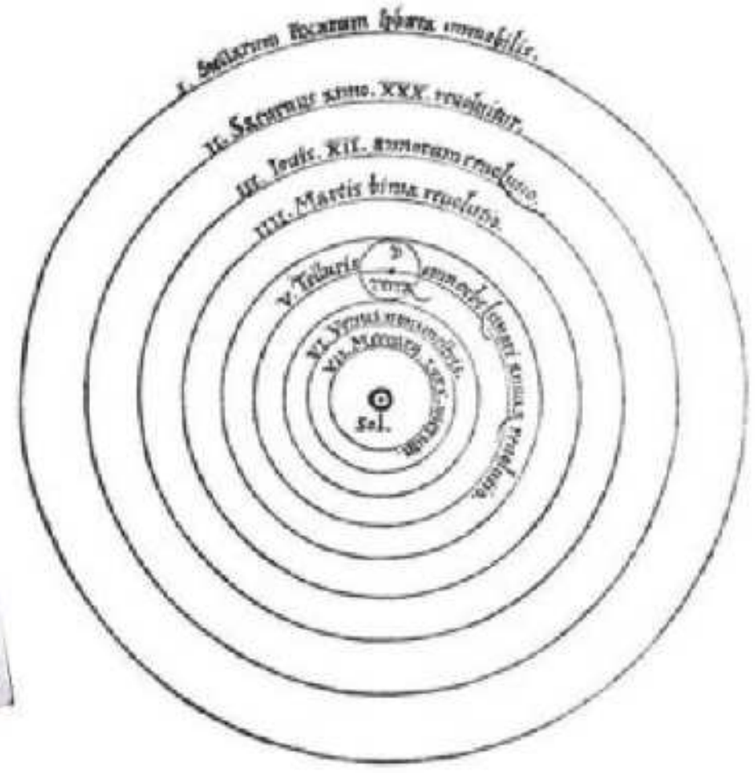
- Każda z planet krąży wokół Słońca po elipsie, w której w jednym z ognisk znajduje się Słońce (pierwsze prawo Keplera).
- Satelita okrążający planetę o masie M w odległości R od jej środka porusza się z prędkością $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$, gdzie G – stała grawitacji.
- Jednostka astronomiczna (1 au) to średnia odległość Ziemi od Słońca, równa w przybliżeniu 150 mln km.



Rys. **11.38.** Mikołaj Kopernik (1473–1543)

Gdy **Mikołaj Kopernik** tworzył swój model świata, posłużył się następującym argumentem: planety położone dalej od Słońca obiegają je w dłuższym czasie (rys. 11.39). We wcześniejszym modelu świata, z Ziemią w jego środku, nie można było znaleźć podobnej regularności.





Rys. **11.39.** Rycina z dzieła Kopernika *O obrotach sfer niebieskich*. Przy orbitach kolejnych planet podano ich okres obiegu (tłumaczenie znajduje się obok ilustracji)

I. Nieruchoma sfera gwiazd stałych
II. Saturn obiegający [Słońce] w ciągu 30 lat
III. Obieg Jowisza trwa 12 lat
IIII. Obieg Marsa trwa dwa lata
V. Obieg Ziemi z orbitą Księżyca trwa rok
VI. Wenus dziewięć miesięcy
VII. Merkury 80 dni
Słońce

Niemal sto lat później **Jan Kepler** zauważył, że zależność odkryta przez Kopernika podlega ściśle określonemu prawu. Aby zrozumieć jego treść, przyjrzyjmy się danym z tabeli 11.1 z parametrami ruchu planet Układu Słonecznego. Szczególną uwagę zwraca ostatni wiersz tabeli, w którym liczby są niemal identyczne.

Tabela 11.1. Parametry ruchu planet

	Merkury	Wenus	Ziemia	Mars	Jowisz	Saturn	Uran	Neptun
Wielka półoś orbity w au, R	0,387	0,723	1	1,524	5,203	9,555	19,218	30,110
Czas obiegu wokół Słońca w latach, T	0,241	0,615	1	1,881	11,86	29,47	84,02	164,79
$\frac{T^2}{R^3}$	1,002	1,001	1,000	0,999	0,999	0,995	0,995	0,995

T_1, R_1 – okres obiegu planety i wielka półoś jej orbity,
T_2, R_2 – analogiczne wielkości dla drugiej planety

Trzecie prawo Keplera brzmi:

> Stosunek kwadratów okresów obiegu planet wokół Słońca do sześcianów wielkich półosi ich orbit jest stały:
>
> $$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3} = \text{const}$$

Wielka półoś elipsy jest równa średniej arytmetycznej największej i najmniejszej odległości planety od Słońca. Odległość tę – choć nie do końca poprawnie – nazywamy czasem średnią odległością od Słońca.

Trzecie prawo Keplera dla ruchu po okręgu

Elipsy, po których poruszają się planety, są zbliżone do okręgów.

Trzecie prawo Keplera dotyczy orbit eliptycznych, ale dla uproszczenia uzasadnimy je w odniesieniu do okręgów. Załóżmy, że ciało o masie m porusza się pod wpływem siły grawitacji wokół ciała o masie M po okręgu o promieniu R.
Na poprzedniej lekcji pokazaliśmy, że satelita okrążający w odległości R ciało niebieskie o masie M porusza się z prędkością:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

Prędkość satelity, s. 42

Analogiczna zależność dotyczy planety krążącej w odległości R wokół gwiazdy o masie M. Jak wiemy, w ruchu jednostajnym po okręgu prędkość wynosi: $v = \frac{2\pi R}{T}$. Gdy porównamy powyższe wzory, będziemy mogli zapisać:

$$\frac{GM}{R} = \frac{4\pi^2 R^2}{T^2}$$

Po przeniesieniu R i T na jedną stronę otrzymujemy:

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

Wielkość po prawej stronie równania nie zależy od żadnych właściwości planety, a jedynie od masy gwiazdy, wokół której się ona porusza. W takim razie również iloraz po lewej stronie musi być taki sam dla wszystkich ciał krążących wokół danej gwiazdy. Dlatego też trzecie prawo Keplera, wynikające z prawa powszechnego ciążenia, jest spełnione w dowolnym układzie planetarnym.
Prawo to ma zastosowanie także w przypadku satelitów (sztucznych i naturalnych) tej samej planety. Pamiętaj jednak, że dla planet krążących wokół różnych gwiazd, a także dla satelitów różnych planet, masy M są różne, a co za tym idzie – różne są wartości stałej $\frac{4\pi^2}{GM}$.
Zauważmy, że jeśli znamy T i R dowolnej planety okrążającej gwiazdę, możemy wyznaczyć **masę** tej **gwiazdy**:

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$$

Dzięki temu obliczamy masy odległych gwiazd (patrz przykład po lekcji). Z kolei znajomość T i R dowolnego satelity planety pozwala wyznaczyć masę tej planety. Ponieważ T i R nawet dla odległych planet i ich księżyców możemy wyznaczyć na podstawie obserwacji prowadzonych z Ziemi, ten sposób jest często wykorzystywany do wyznaczania mas ciał niebieskich.

Po tej lekcji powinieneś

- stosować trzecie prawo Keplera do obliczania okresów obiegu i odległości planet od Słońca;
- obliczać masę ciała niebieskiego na podstawie parametrów opisujących ruch jego satelity.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

W 1995 r. odkryto planetę 51 Pegasi b, obiegającą gwiazdę 51 Pegasi, która znajduje się w odległości 50 lat świetlnych od Słońca. Średnia odległość planety od jej gwiazdy wynosi $R = 0{,}0527$ au, natomiast jej obieg trwa $T = 4{,}23$ dnia. Oblicz masę gwiazdy i porównaj ją z masą Słońca.

Rozwiązanie

Wyznaczmy masę gwiazdy (z wyprowadzonego wcześniej wzoru): $M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$.
Podstawmy dane liczbowe (1 au = 149,6 mln km):

$$R = 0{,}0527 \text{ au} = 0{,}0527 \cdot 149{,}6 \text{ mln km} = 7{,}884 \cdot 10^9 \text{ m}$$

Przeliczmy czas na sekundy:

$$T = 4{,}23 \text{ dnia} = 4{,}23 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 365\,472 \text{ s}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$M = 2{,}17 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Odpowiedź: Masa gwiazdy 51 Pegasi wynosi ok. $2 \cdot 10^{30}$ kg. Jest to masa zbliżona do masy Słońca.

1. Na podstawie informacji zawartych w tabeli z danymi o ruchu planet Układu Słonecznego (patrz s. 45) wyznacz masę Słońca.
2. Satelita geostacjonarny to satelita, który stale znajduje się nad tym samym punktem naszego globu. Okres jego obiegu wokół Ziemi wynosi 23 h 56 min, czyli jest równy okresowi obrotu Ziemi wokół własnej osi. Oblicz wysokość, na jakiej umieszcza się satelity geostacjonarne. Rozwiąż to zadanie dwoma sposobami: skorzystaj ze wzoru na prędkość satelity na określonej orbicie oraz z III prawa Keplera i I prędkości kosmicznej.

Uwaga. Jeśli nie wiesz, dlaczego okres obrotu Ziemi jest krótszy niż 24 h, dowiedz się, co to jest doba gwiazdowa.

3. Na podstawie rysunku elipsy (s. 38) uzasadnij, że wielka półoś orbity planety jest równa średniej arytmetycznej największej i najmniejszej odległości od Słońca, w jakiej znajdzie się ta planeta.

4. Przez miesiąc codziennie obserwuj Księżyc. Obserwacje zacznij, gdy będzie dobrze widoczny w nocy na tle gwiazd. Postaraj się zauważyć, po jakim czasie zobaczysz go na tle tego samego gwiazdozbioru (niekoniecznie w tej samej fazie!). Ten odstęp czasu to okres obiegu Księżyca wokół Ziemi. Wyznacz masę Ziemi. Przyjmij średnią odległość od Ziemi 384 400 km. Jak myślisz, co ma największy wpływ na błąd w wyznaczeniu masy Ziemi?

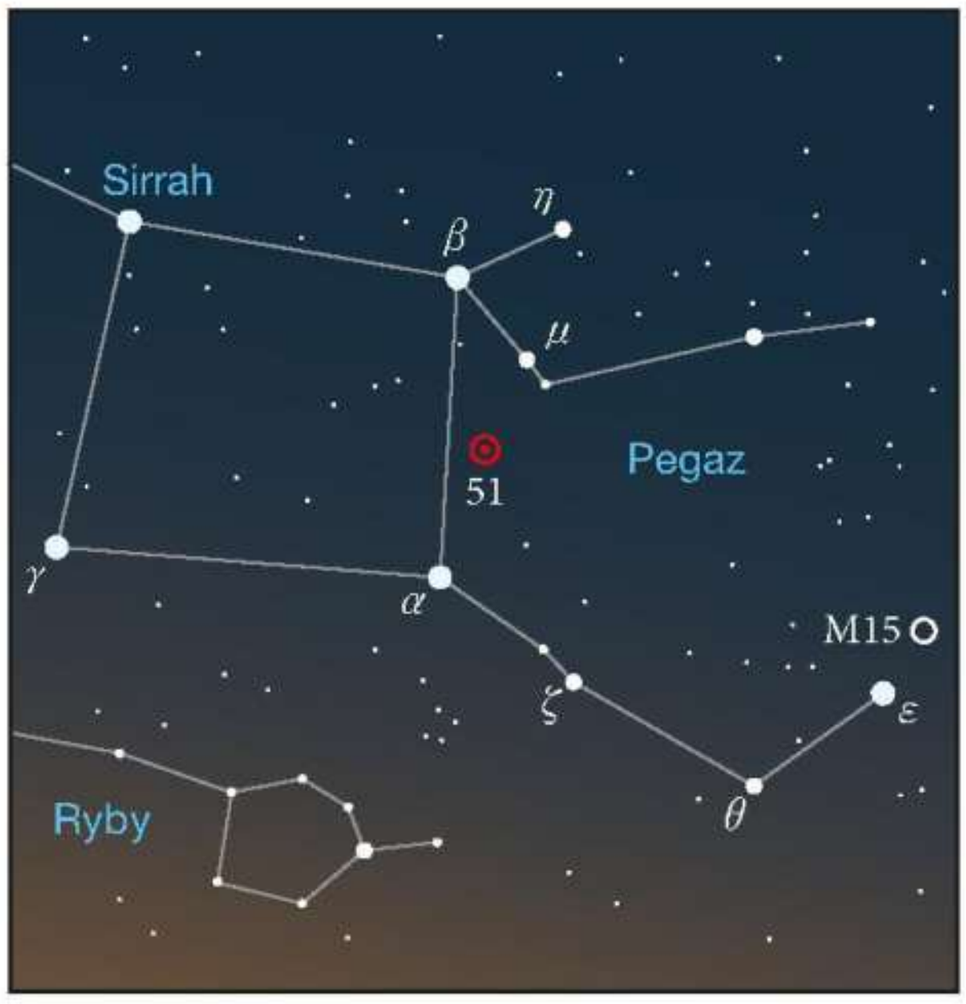
5. Jedną z najbardziej znanych komet okresowych jest kometa Halleya (patrz zdjęcie obok). Jej nazwa pochodzi od nazwiska angielskiego astronoma Edmonda Halleya (czyt. haleja, 1656–1742), który przewidział powrót tej komety w 1758 r. Okres obiegu komety Halleya wokół Słońca wynosi 75,3 roku. Jej orbita jest bardzo wydłużoną elipsą. Na podstawie praw Keplera oblicz długą półoś orbity komety Halleya.

Porównaj swój wynik z danymi z tablic astronomicznych.



6. Przeczytaj informacje w ramce i przeprowadź obserwację gwiazdy 51 Pegasi. Skorzystaj z mapy nieba.

W 1992 r. polski astronom Aleksander Wolszczan odkrył pierwsze planety pozasłoneczne. Poruszały się one wokół pulsara, gwiazdy w końcowym etapie życia. Kilka lat później zlokalizowano pierwszą planetę pozasłoneczną obiegającą gwiazdę podobną do Słońca. Była nią 51 Pegasi b. Jest ona dwukrotnie lżejsza od Jowisza, jednak porusza się bardzo blisko gwiazdy – siedem razy bliżej niż wynosi odległość między Słońcem a Merkurym. Nic dziwnego, że temperaturę 51 Pegasi b szacuje się na 1570 K. Gwiazda 51 Pegasi jest najlepiej widoczna na niebie wieczorem od września do lutego. Gwiazdozbiór Pegaza, w którym się znajduje, jest wówczas widoczny wysoko na niebie. Do znalezienia gwiazdy posłuż się mapą zamieszczoną obok i lornetką. Przy dobrej pogodzie 51 Pegasi można też dostrzec gołym okiem.



11.7. Energia potencjalna grawitacji

Przypomnij sobie

- Energia potencjalna ciała o masie m znajdującego się na wysokości h ponad poziomem wybranym jako poziom odniesienia jest równa $E_p = mgh$.
- Siła grawitacji maleje z odległością. Jednak gdy rozważamy ciała w pobliżu powierzchni ziemi, ten wpływ jest znikomy i można go pominąć.
- Podczas wykonywania pracy nad ciałem zwiększamy jego energię. Gdy ciało wykonuje pracę, jego energia się zmniejsza.



Rys. **11.40.** Dźwig wykonuje pracę, zwiększając energię potencjalną ładunku

Z dotychczasowej nauki wiesz, że kiedy podnosimy ciało z powierzchni ziemi, wykonujemy pewną dodatnią pracę. Gdy natomiast opuszczamy ciało z większej wysokości na mniejszą, wykonujemy pracę ujemną – możemy też powiedzieć, że to siła ziemskiej grawitacji wykonuje pracę nad ciałem.

Z położeniem ciała jest więc związana pewna forma energii, zwana **energią potencjalną grawitacji.** Mówiliśmy o niej w pierwszej części podręcznika. Ograniczyliśmy się wtedy do sytuacji, w której wartość siły grawitacji była stała.

Energia potencjalna grawitacji, cz. I s. 195

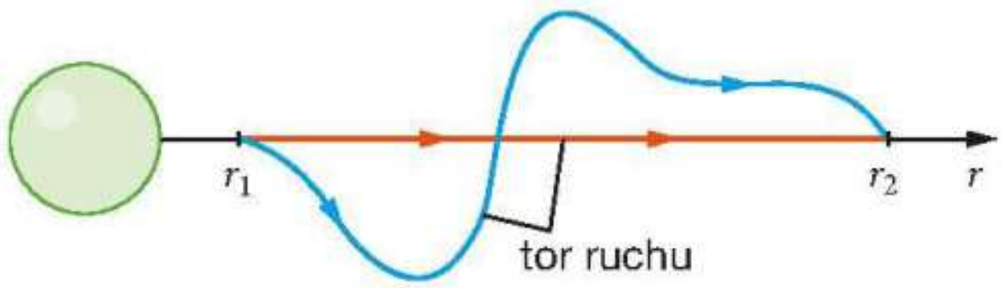
Jest to bardzo dobre przybliżenie, gdy interesuje nas energia ciała podnoszonego przez dźwig (rys. 11.40), a nawet samolotu wznoszącego się na wysokość 10 km, która stanowi zaledwie ok. 0,16% jego odległości od środka Ziemi.

Jednak w przypadku satelity krążącego kilka tysięcy kilometrów nad powierzchnią Ziemi, a tym bardziej komety, której odległość od Słońca zmienia się nawet kilkaset razy, musimy wziąć pod uwagę, że siła grawitacji zmienia się z odległością. Teraz zajmiemy się takim ogólniejszym przypadkiem.

Praca

Rozważmy pracę wykonywaną przy przemieszczaniu ciała o masie m przyciąganego siłą grawitacji przez ciało o masie M. Okazuje się, że w przypadku braku oporów ruchu nie musimy znać drogi, jaką ono pokona (rys. 11.41 na następnej stronie).

> Praca wykonana podczas przemieszczenia ciała, na które działa siła grawitacji, zależy nie od kształtu toru ruchu, ale wyłącznie od początkowego i końcowego położenia tego ciała.



Rys. **11.41.** Praca wykonana przez siły zewnętrzne podczas przenoszenia ciała, na które działa siła grawitacji, nie zależy od jego toru ruchu

Ograniczmy się do sytuacji, gdy ciało na początku i na końcu ruchu spoczywa albo porusza się z taką samą prędkością. Wówczas praca wykonana przez siły zewnętrzne jest równa:

$$W = GMm\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

gdzie: r_1 – początkowa, a r_2 – końcowa odległość od źródła siły grawitacji.

Uzasadnienie powyższego wzoru pominiemy, ponieważ znacznie wykracza poza zakres matematyki w szkole średniej.

Energia potencjalna grawitacji

Kiedy odsuwamy ciało od źródła siły grawitacji, wykonujemy pewną pracę – zwiększamy energię tego ciała. Jak wiemy, zmiana energii jest równa wykonanej pracy: $\Delta E = W$.

Aby określić ilościowo energię potencjalną ciała, musimy ustalić poziom odniesienia, na jakim jest ona równa zeru (poziom, od którego mierzymy jej zmianę). Ustalenie tego poziomu jest sprawą umowną. Dla ciał na powierzchni Ziemi wybieraliśmy czasami wysokość gruntu, czasami poziom podłogi w pokoju itd.

Poziom odniesienia, cz. I s. 195

Gdy badamy ruch ciał w kosmosie, nie mamy żadnego gruntu ani podłogi, względem których moglibyśmy mierzyć wysokość. Dlatego zwykle przyjmujemy pewną wygodną umowę.

> **Energia potencjalna jest równa zeru w nieskończonej odległości od źródła siły grawitacji.**

Dzięki takiemu ujęciu możemy przyjąć, że energia ta wynosi zero, gdy ciała ze sobą nie oddziałują, co wydaje się naturalnym założeniem. Konsekwencją przyjęcia takiego założenia jest to, że **energia potencjalna grawitacji jest zawsze ujemna**. Przecież kiedy oddalamy ciało od źródła siły grawitacji, zwiększamy jego energię potencjalną, a dopiero w nieskończonej odległości osiąga ona wartość zerową.

W odległości r_2 od źródła siły grawitacji energia potencjalna grawitacji ciała jest równa pracy, jaką trzeba wykonać, aby przenieść to ciało z punktu znajdującego się w nieskończonej (czyli bardzo dużej) odległości r_1 od źródła siły grawitacji do punktu znajdującego się w odległości r_2 od tego źródła. Wobec tego:

$$\Delta E_p = GMm\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Gdy odległość r_1 jest bardzo duża, jej odwrotność jest tak mała, że można ją pominąć. Otrzymujemy więc:

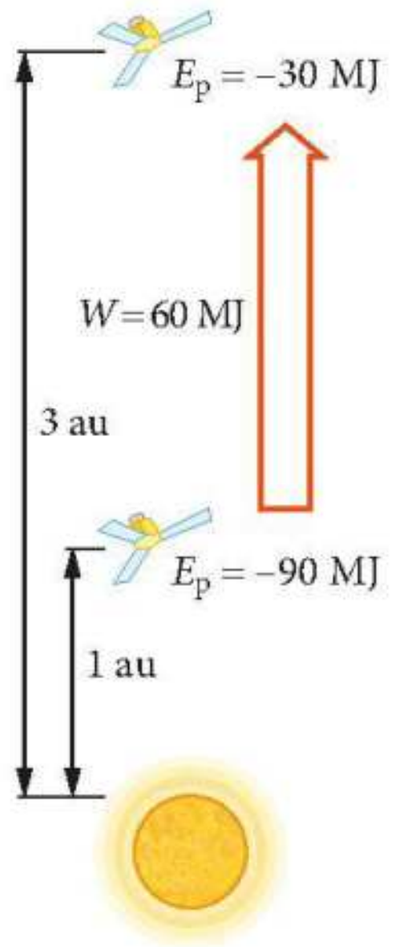
$$\Delta E_p = GMm\left(0 - \frac{1}{r_2}\right) = -\frac{GMm}{r_2}$$

Rozważmy teraz przykład sondy o masie 100 kg spoczywającej w odległości 1 au od Słońca (rys. 11.42). Jej energia potencjalna wynosi ok. –90 MJ. Aby przenieść ją w miejsce odległe o 3 au od Słońca, trzeba wykonać pracę 60 MJ. Energia potencjalna sondy rośnie wówczas o 60 MJ i uzyskuje wartość –30 MJ. Kosztem kolejnych 30 MJ energii można powiększyć jej energię potencjalną do zera, co oznacza, że sonda może się oddalić na dowolnie dużą odległość od Słońca.

Skoro we wzorze na energię potencjalną mamy jedną odległość, możemy ją zapisać ogólnie jako r. Ostatecznie otrzymamy wzór:

$$E_p = -\frac{GMm}{r}$$

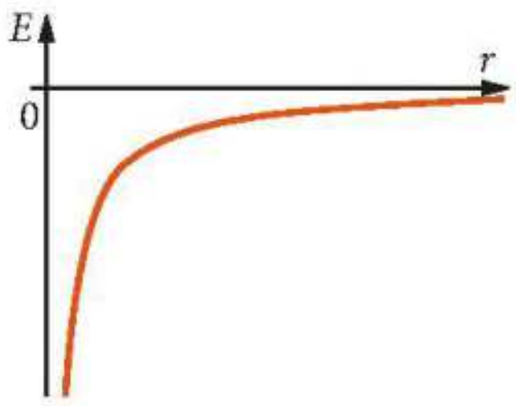
Na podstawie wzoru możemy wykonać wykres zależności energii potencjalnej ciała od jego odległości od źródła siły grawitacji (rys. 11.43).



Rys. **11.42.** Energia potencjalna sondy rośnie, gdy oddala się ona od Słońca (w przypadku zmiany orbity sondy okrążającej Słońce należałoby wziąć pod uwagę także jej energię kinetyczną)

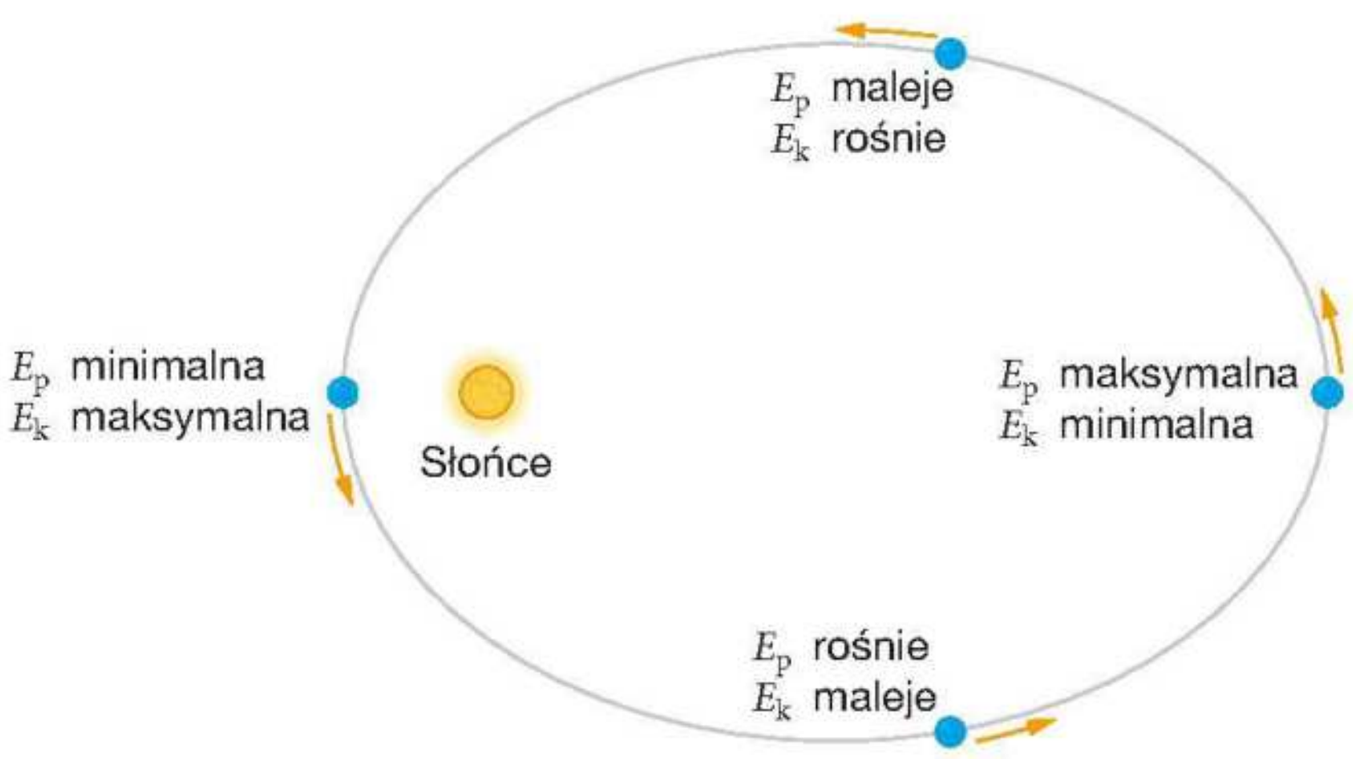
Energia w ruchu orbitalnym

Zależność energii potencjalnej grawitacji od odległości można wykorzystać także do opisu ruchu ciał niebieskich po orbitach. W takim ruchu – jak w każdym zjawisku fizycznym – obowiązuje zasada zachowania energii. Ponieważ jednak w kosmosie nie ma oporów ruchu, wystarczy rozważać dwie formy energii: kinetyczną i potencjalną. W ruchu orbitalnym ich suma jest stała:



Rys. **11.43.** Wykres zależności energii potencjalnej ciała od odległości. Przyjmujemy, że wynosi ona zero w nieskończoności

$$E_k + E_p = \text{const}$$



Rys. **11.44.** Zmiany energii potencjalnej i kinetycznej w ruchu planety po orbicie eliptycznej. Na rysunku orbita jest znacznie bardziej spłaszczona niż w rzeczywistości

W przypadku orbity kołowej równość jest oczywista, ponieważ stała jest każda z tych form energii z osobna: zarówno E_k, jak i E_p. Bardziej intersujący jest opis dla orbity eliptycznej, np. planety poruszającej się wokół Słońca (rys. 11.44). Gdy planeta zbliża się do Słońca, maleje jej energia

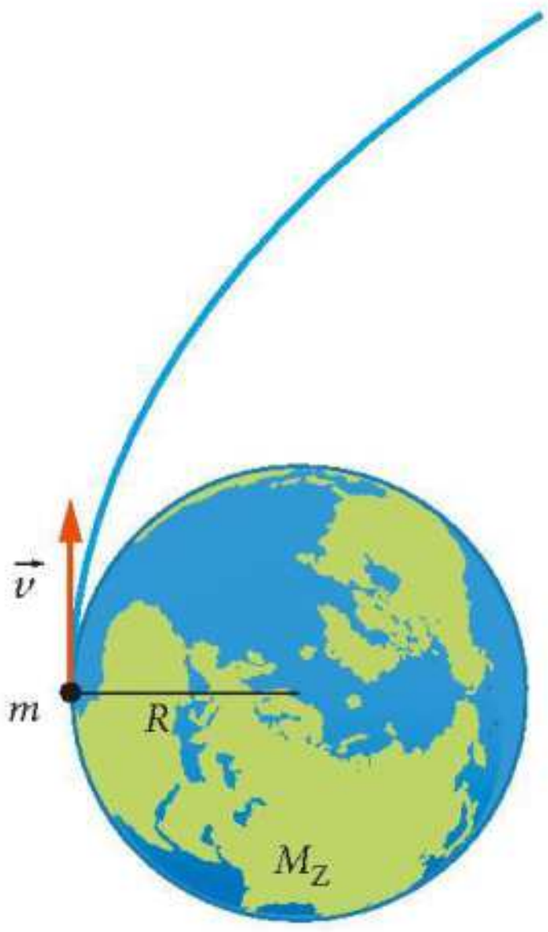
potencjalna. Energia potencjalna zmienia się w kinetyczną, a więc planeta się rozpędza. Natomiast podczas oddalania się od Słońca energia kinetyczna zmienia się w potencjalną, a więc planeta zwalnia.

Drugie prawo Keplera s. 42

Ten wniosek jest oczywiście zgodny z drugim prawem Keplera oraz z naszymi rozważaniami dotyczącymi sił działających na ciało podczas ruchu po orbicie (s. 39).

Druga prędkość kosmiczna

Zastanówmy się, jaką prędkość należy nadać statkowi kosmicznemu, aby oddalił się on od Ziemi na dużą odległość. Teoretycznie może się oddalać nawet z bardzo małą prędkością, jednak w tym celu musiałby mieć stale włączony silnik – to nieopłacalne ze względu na ogromną ilość paliwa zużywanego przez statki kosmiczne. Dlatego w praktyce statek rozpędza się już w pobliżu Ziemi do prędkości, która pozwala mu lecieć dalej z rozpędu, bez włączonych silników.



Rys. **11.45.** Całkowita energia ciała wyrzuconego z Ziemi z drugą prędkością kosmiczną jest podczas ruchu stała i równa zero

Prędkość potrzebną do oddalenia się bez napędu na dowolnie dużą odległość od ciała niebieskiego nazywamy drugą prędkością kosmiczną (prędkością ucieczki).

Gdy ciało oddala się od planety, jego energia kinetyczna zmienia się w energię potencjalną i maleje. Kiedy energia kinetyczna osiągnie wartość zero, ciało zatrzyma się i pod wpływem sił grawitacji zacznie poruszać się w przeciwną stronę (ku planecie). Przy drugiej prędkości kosmicznej początkowa energia kinetyczna ciała wystarcza do oddalenia się na dowolną odległość. W punkcie bardzo dalekim od Ziemi (nieskończenie dalekim) energia kinetyczna tego ciała jest więc równa zeru. Wiemy, że energia potencjalna w takiej odległości od źródła siły grawitacji również wynosi zero, co oznacza, że **całkowita energia mechaniczna ciała jest równa zero** (rys. 11.45).



A to ciekawe

Prędkość światła jest największą możliwą do osiągnięcia prędkością we Wszechświecie. Jeśli więc druga prędkość kosmiczna dla jakiegoś ciała niebieskiego jest większa od prędkości światła, to oznacza, że nawet światło nie może go opuścić. Ciało takie nazywamy **czarną dziurą**.

Do opisu oddziaływań grawitacyjnych w pobliżu czarnych dziur nie wystarcza prawo powszechnego ciążenia. Należy korzystać z ogólnej teorii względności. Okazuje się jednak, że choć zależność $\sqrt{\frac{2GM}{R}} = c$ została wyprowadzona z prawa Newtona, jest spełniona także w teorii względności Einsteina.

Czarne dziury najczęściej obserwujemy pośrednio, poprzez obserwację ich oddziaływania na inne ciała niebieskie. Astronomowie często odnajdują je, gdy śledzą zjawiska, jakim podlega rozgrzana materia opadająca na czarną dziurę. Ilustracja przedstawia czarną dziurę w galaktyce MCG-6-30-15.

Zgodnie z zasadą zachowania energii całkowita energia ciała musi być równa zero również na początku ruchu, tyle że wtedy energia kinetyczna jest dodatnia, a potencjalna ujemna:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R} = 0$$

Przekształcamy powyższe równanie i wyprowadzamy wzór na **drugą prędkość kosmiczną**:

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Po podstawieniu danych liczbowych dla Ziemi otrzymujemy ok. $11\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$, co oznacza, że tyle wynosi wartość drugiej prędkości kosmicznej dla naszej planety. Wartości pierwszej i drugiej prędkości dla kilku ciał niebieskich podano w tabeli 11.2.

Tabela 11.2. Prędkości kosmiczne

Ciało niebieskie	v_I $\left[\frac{\text{km}}{\text{s}}\right]$	v_{II} $\left[\frac{\text{km}}{\text{s}}\right]$
Ziemia	7,91	11,2
Merkury	3,04	4,3
Mars	3,54	5,0
Jowisz	42,1	59,5
Księżyc	1,68	2,38

Po tej lekcji powinieneś

- stosować wzór na energię potencjalną grawitacji;
- stosować zasadę zachowania energii do ruchu ciał po orbitach eliptycznych;
- stosować pojęcie drugiej prędkości kosmicznej i obliczać jej wartość dla różnych ciał niebieskich.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Oszacuj, ile energii wyzwoliłoby się w procesie zderzenia z Ziemią meteorytu podobnego do tego, który rozpadł się w 2013 r. nad Czelabińskiem (jego masę szacuje się na $m = 10\,000$ ton). Przyjmij, że meteoryt nadlatywał z nieskończoności z niewielką prędkością początkową i rozpędzał się dzięki oddziaływaniu grawitacyjnemu ze Słońcem i Ziemią.



Rozwiązanie

Początkowa energia meteorytu była równa zeru. Gdy zbliżył się on do Słońca na odległość $r_1 = 150$ mln km, a do Ziemi na odległość równą promieniowi Ziemi ($r_2 = 6370$ km), jego całkowita energia nadal była równa zeru:

$$E_{p1} + E_{p2} + E_k = 0$$

gdzie: E_{p1} – energia potencjalna wynikająca z oddziaływania ze Słońcem, E_{p2} – energia potencjalna wynikająca z oddziaływania z Ziemią, E_k – energia kinetyczna.

Po podstawieniu odpowiednich wzorów otrzymujemy:

$$-\frac{GM_S m}{r_1}-\frac{GM_Z m}{r_2}+E_k=0$$

$$E_k=\frac{GM_S m}{r_1}+\frac{GM_Z m}{r_2}$$

Podstawiamy dane liczbowe, w tym masę Słońca $M_S = 2 \cdot 10^{30}$ kg oraz masę Ziemi $M_Z = 6 \cdot 10^{24}$ kg, i otrzymujemy:

$$E_k \approx 9 \cdot 10^{15}\,\text{J} + 6 \cdot 10^{14}\,\text{J} \approx 10^{16}\,\text{J}$$

Zauważmy, że praktycznie cała energia meteorytu pochodzi z oddziaływania ze Słońcem, a nie z Ziemią. Stąd wniosek, że prędkość meteorytu przed zderzeniem skierowana była ku Słońcu, prostopadle do orbity Ziemi. Z dobrym przybliżeniem możemy więc przyjąć, że energia wyzwolona podczas zderzenia meteorytu z Ziemią jest równa jego energii kinetycznej w chwili zderzenia. Gdyby meteoryt zderzył się z Ziemią zgodnie z kierunkiem jej ruchu, musielibyśmy uwzględniać składanie prędkości.

Odpowiedź: W zderzeniu wyzwoliłoby się ok. 10^{16} J energii.

1. Oblicz energię potencjalną Księżyca wynikającą z oddziaływania grawitacyjnego z Ziemią, kiedy Księżyc:

a) znajduje się najbliżej Ziemi, czyli w odległości 366 tys. km,

b) jest najbardziej oddalony od Ziemi, czyli w odległości 406 tys. km.

2. Wyszukaj potrzebne dane i oblicz drugą prędkość kosmiczną dla Saturna.

3. Porównaj wzory na pierwszą i drugą prędkość kosmiczną. Co zauważasz? Sprawdź, czy twój wniosek zgadza się z danymi z tabeli 11.2 na poprzedniej stronie.

4. Udowodnij, że gdy ciało porusza się pod wpływem siły grawitacji po orbicie kołowej, jest spełniony warunek $E_k = -\frac{1}{2}E_p$.

5. Oblicz objętość, do jakiej należałoby ścisnąć Ziemię, aby stała się czarną dziurą.

Wskazówka. Skorzystaj z informacji zamieszczonej w ciekawostce na s. 52.

6. Jedna z najbardziej znanych komet – kometa Halleya porusza się wokół Słońca po mocno wydłużonej elipsie. W pobliże Słońca i Ziemi wraca co 76 lat. Ostatnio widzieliśmy to ciało niebieskie w 1986 r., a kolejny raz pojawi się w okolicy Ziemi w 2061 r. Jej minimalna odległość od Słońca wynosi 87,7 mln km, a maksymalna 5248 mln km. W maksymalnej odległości od Słońca kometa porusza się z prędkością 920 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Oblicz, z jaką prędkością kometa Halleya porusza się:

a) w minimalnej odległości od Słońca,

b) gdy przecina orbitę Neptuna.



Temat dodatkowy

11.8. Siły pływowe

Przypomnij sobie

- Każde dwa ciała oddziałują siłą grawitacji.
- Siła grawitacji maleje wraz z odległością od źródła siły grawitacji.
- W statku kosmicznym na orbicie wokół Ziemi panuje stan nieważkości. W układzie nieinercjalnym, jakim jest statek kosmiczny, wyjaśniamy to równoważeniem siły grawitacji ziemskiej przez siłę odśrodkową w ruchu satelity wokół Ziemi.

Przypływy i odpływy morskie

Do tej pory planetę obiegającą Słońce lub Księżyc obiegający Ziemię traktowaliśmy jako punkty materialne krążące wokół nieruchomego źródła siły grawitacji. Model punktu materialnego wystarcza do wyjaśnienia ruchu ciał niebieskich.

Istnieją jednak zjawiska grawitacyjne, do których wyjaśnienia jest on niewystarczający. Należą do nich pływy morskie (przypływy i odpływy), czyli zjawisko podnoszenia się i opadania poziomu mórz (rys. 11.46). Pływy morskie trudno dostrzec nad Bałtykiem, ale już nad Morzem Śródziemnym łatwo zauważyć okresowe zmiany szerokości suchej części plaży. Jeszcze większym wahaniom podlega poziom oceanów. Okres tych zmian jest nieco dłuższy niż połowa doby. Dokładniej – jest on równy połowie okresu ruchu Księżyca po ziemskim niebie (wynikającego zarówno z ruchu obrotowego Ziemi, jak i ruchu obiegowego Księżyca wokół naszej planety).

Zależności pomiędzy pływami oraz ruchem Księżyca po ziemskim niebie domyślano się już w starożytności. Szekspir także określa go mianem księcia przypływów. Jednak do czasu odkrycia prawa powszechnego ciążenia ludzie nie znali mechanizmu sprawiającego, że nasz satelita porusza ziemskie oceany.



Rys. **11.46.** Największa różnica poziomu wody między przypływem i odpływem została zanotowana w Zatoce Fundy w Kanadzie i wynosiła blisko 20 m

Aby wyjaśnić powstawanie sił pływowych, przypomnijmy, że oddziaływanie ciał jest wzajemne, a więc nie tylko Ziemia przyciąga Księżyc, lecz także Księżyc przyciąga Ziemię. Na skutek tego przyciągania oba ciała krążą wokół wspólnego środka masy. Znajduje się on wewnątrz Ziemi, dlatego też zazwyczaj zakładamy, że Księżyc krąży wokół Ziemi.

Środek masy, cz. I s. 238

Środek masy to punkt poruszający się tak, jak poruszałby się punkt materialny skupiający całą masę bryły.

Podczas bardziej szczegółowej analizy tych oddziaływań należy jednak uwzględnić fakt, że również Ziemia porusza się z pewnym przyspieszeniem dośrodkowym skierowanym w stronę Księżyca. Z tym przyspieszeniem są związane w układzie odniesienia Ziemi **siły bezwładności** (siły odśrodkowe). To właśnie one wraz z siłą grawitacji księżycowej działającej na ciała na Ziemi powodują przypływy i odpływy.



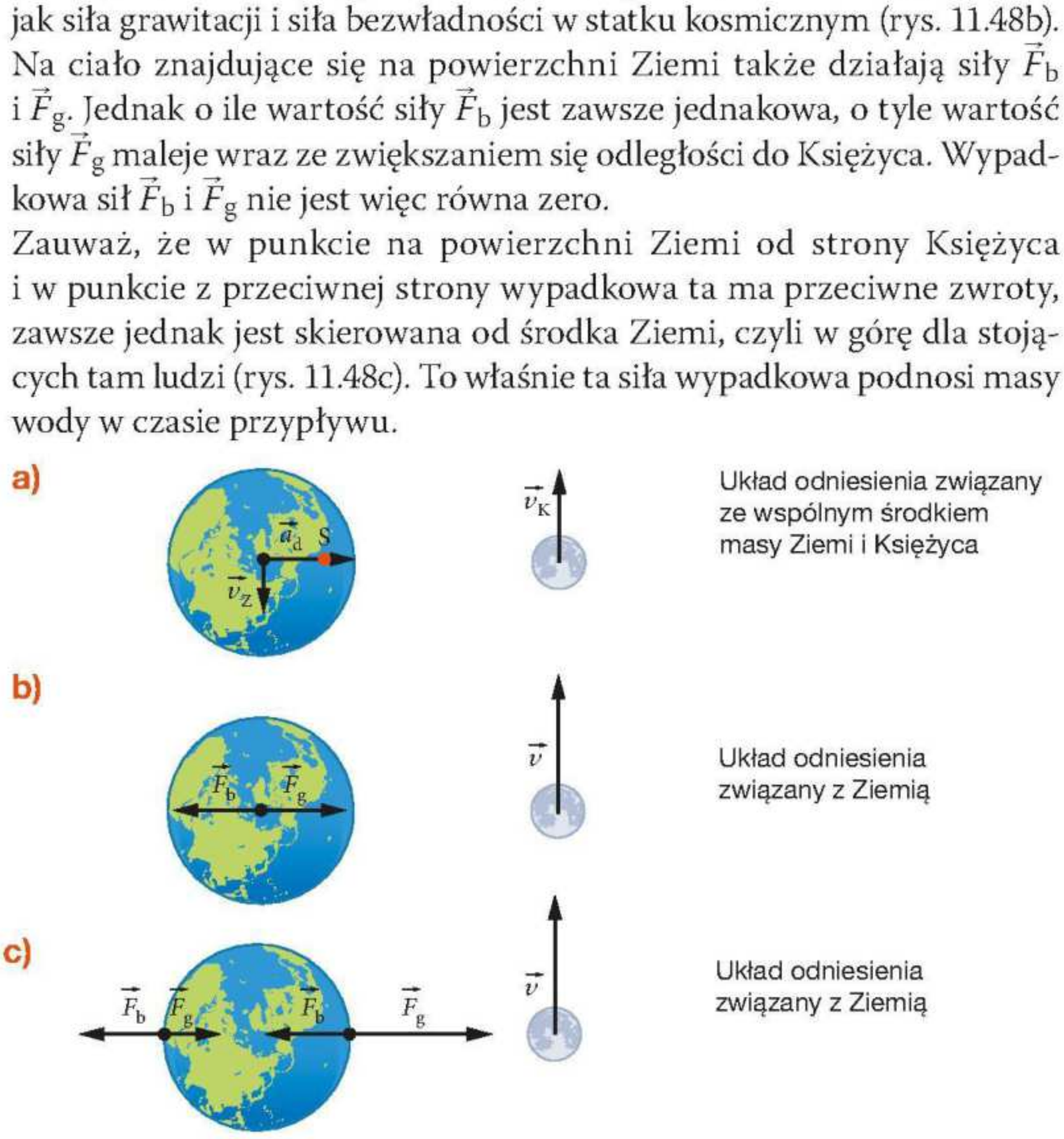
Rys. **11.47.** W czasie przypływu na Arguari w Amazonii i na wielu innych rzekach powstają duże fale przemieszczające się w górę rzeki

Powstawanie sił pływowych

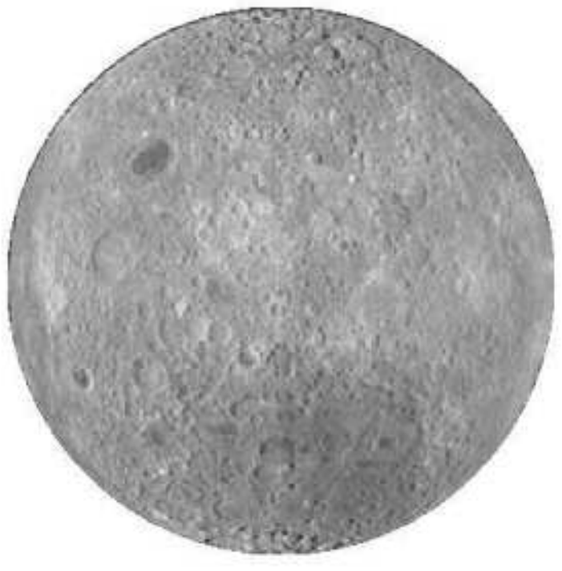
Ziemia, przyciągana przez Księżyc, porusza się z przyspieszeniem dośrodkowym wokół środka masy S układu Ziemia–Księżyc (rys. 11.48a). Powoduje to powstawanie sił bezwładności w układzie odniesienia, który związany jest z Ziemią, ale nie obraca się wraz z nią, a jego osie skierowane są stale w stronę odległych gwiazd (rys. 11.48b). Z tego układu odniesienia będziemy korzystać do końca rozważań w tej lekcji.

Na ciało znajdujące się w środku masy Ziemi działają siła przyciągania księżycowego $\vec{F}_g$ i siła bezwładności $\vec{F}_b$ związana z ruchem Ziemi wywołanym przez przyciąganie Księżyca. Siły te się równoważą, podobnie jak siła grawitacji i siła bezwładności w statku kosmicznym (rys. 11.48b). Na ciało znajdujące się na powierzchni Ziemi także działają siły $\vec{F}_b$ i $\vec{F}_g$. Jednak o ile wartość siły $\vec{F}_b$ jest zawsze jednakowa, o tyle wartość siły $\vec{F}_g$ maleje wraz ze zwiększaniem się odległości do Księżyca. Wypadkowa sił $\vec{F}_b$ i $\vec{F}_g$ nie jest więc równa zero.

Zauważ, że w punkcie na powierzchni Ziemi od strony Księżyca i w punkcie z przeciwnej strony wypadkowa ta ma przeciwne zwroty, zawsze jednak jest skierowana od środka Ziemi, czyli w górę dla stojących tam ludzi (rys. 11.48c). To właśnie ta siła wypadkowa podnosi masy wody w czasie przypływu.



Rys. **11.48.** Powstawanie sił pływowych



Rys. **11.49.** Niewidoczna z Ziemi strona Księżyca

Skutki sił pływowych

Ruch oceanów nie jest jedynym skutkiem sił pływowych. Zawdzięczamy im także to, że Księżyc jest stale zwrócony do Ziemi jedną stroną, co oznacza, że jednej strony Księżyca z Ziemi nigdy nie widzimy (rys. 11.49). Przed kilkoma miliardami lat Księżyc obracał się znacznie szybciej niż obecnie. Wówczas siły pływowe powodowały wypiętrzanie jego

skorupy podobnie do ziemskich pływów. Do powstania wypiętrzenia pod wpływem sił pływowych potrzebny był jednak czas, dlatego maksymalne wypiętrzenie nie leżało dokładnie na linii łączącej środki Księżyca i Ziemi. Jednocześnie wypadkowa sił działających na Księżyc powodowała spowalnianie jego obrotu, aż w końcu zaczął się on obracać tylko raz na miesiąc, dlatego pozostaje stale zwrócony do Ziemi tą samą stroną.

Także Ziemia pod wpływem sił pływowych obraca się coraz wolniej. W ciągu kilku miliardów lat doba wydłużyła się z kilku do ok. 24 godzin. Gdyby wystarczyło czasu, w końcu i Ziemia zwolniłaby na tyle swój obrót, aby ustawić się do Księżyca jedną stroną.

Dochodzenie do tego stanu trwałoby jednak kilkanaście miliardów lat, a zanim ten czas upłynie, nasza planeta zostanie pochłonięta przez powiększające się Słońce.



Rys. **11.50.** Pływy morskie powodują powstawanie ogromnych wirów w cieśninie Naruto w Japonii

Przykład planety (karłowatej) i jej księżyca, które są stale zwrócone ku sobie tymi samymi stronami, możemy znaleźć w naszym Układzie Słonecznym. To Pluton i jego duży księżyc, Charon. Po trwającej miliardy lat ewolucji oba ciała krążą zwrócone ku sobie nieustannie tymi samymi półkulami, jak dwie kule połączone prętem. Na jednej z półkul Plutona Charon jest więc stale niewidoczny, a na drugiej unosi się w jednym miejscu, kilkakrotnie większy od Księżyca na ziemskim niebie.

Środek masy Pluton–Charon, cz. I s. 239

Pływy wywołane przez Słońce

Słońce jest położone zaledwie niecałe 400 razy dalej od Ziemi niż Księżyc, a jego masa jest ponad 27 mln razy większa niż masa Księżyca. Ponieważ $400^2 < 27\,000\,000$, Słońce przyciąga Ziemię znacznie silniej niż Księżyc. Mogłoby się więc wydawać, że również siły pływowe wywoływane oddziaływaniem Słońca na Ziemię są silniejsze niż w przypadku oddziaływania Księżyca. Jest jednak inaczej, gdyż ważna jest tutaj nie sama siła grawitacji, ale różnice sił grawitacji działające na różne części Ziemi. Możemy to sprawdzić odpowiednimi obliczeniami.

Środek masy układu Ziemia–Słońce, cz. I s. 241

Przyjmijmy oznaczenia: d – odległość Ziemi od Słońca, R – promień Ziemi, M – masa Słońca.

Na masę m umieszczoną w środku Ziemi działa siła grawitacji słonecznej równa:

$$F_{g1} = \frac{GMm}{d^2}$$

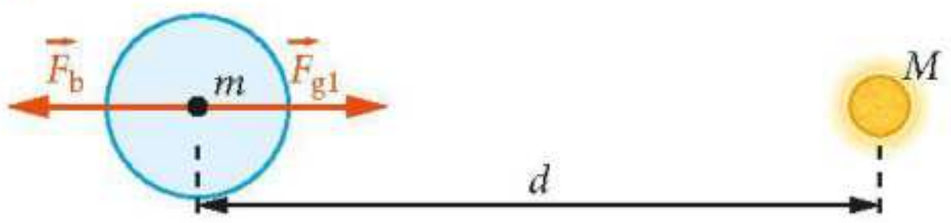
Pod wpływem tej siły masa m krąży razem z całą Ziemią wokół Słońca. W układzie odniesienia związanym z Ziemią ta siła jest równoważona przez siłę bezwładności o identycznej wartości:

$$F_b = \frac{GMm}{d^2}$$

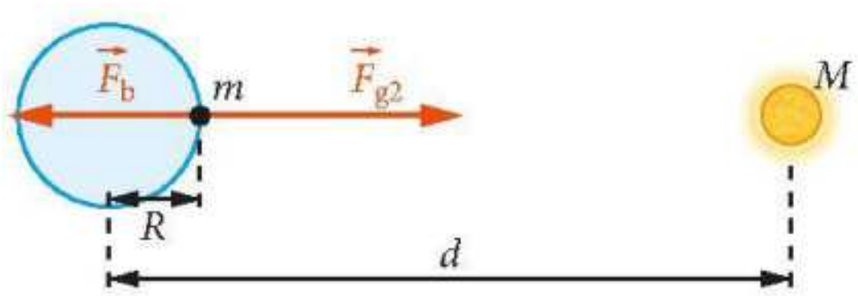
Siły pływowe

Na masę próbną w środku Ziemi (rys. a) oraz na jej powierzchni (rys. b) działają siła grawitacji i siła bezwładności. Gdy masa nie znajduje się w środku Ziemi, siły $\vec{F}_g$ i $\vec{F}_b$ się nie równoważą. Ich wypadkowa to siła pływowa działająca na ciało.

a)



b)



Taka sama siła bezwładności działa na ciało znajdujące się na powierzchni Ziemi od strony Słońca (rys. b w ramce powyżej). Oprócz tego działa na nie siła grawitacji:

$$F_{g2} = \frac{GMm}{(d-R)^2}$$

Wypadkowa opisanych sił, czyli siła pływowa, w układzie związanym z Ziemią ma wartość:

$$F_p = \frac{GMm}{(d-R)^2} - \frac{GMm}{d^2} = \frac{GMm\left[d^2-(d-R)^2\right]}{(d-R)^2 \cdot d^2}$$

Po uproszczeniu otrzymujemy:

$$F_p = GMm\frac{2dR-R^2}{(d-R)^2 \cdot d^2} = GMm\frac{dR\left(2-\frac{R}{d}\right)}{d^4\left(1-\frac{2R}{d}-\frac{R^2}{d^2}\right)}$$

Ponieważ R jest znacznie mniejsze od d, możemy przyjąć, że:

$$2-\frac{R}{d} \approx 2 \text{ oraz } 1-\frac{2R}{d}-\frac{R^2}{d^2} \approx 1$$

Otrzymujemy znacznie prostszy wzór:

$$F_p = GMm\frac{2dR}{d^4}$$

czyli:

$$F_p = 2GMm\frac{R}{d^3}$$

Ze wzoru możemy odczytać, że choć same siły grawitacji maleją z kwadratem odległości d, to siły pływowe maleją z jej sześcianem. Ponieważ $400^3 > 27\,000\,000$, Księżyc działa na nas większą siłą pływową niż Słońce.

Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać przyczynę powstawania sił pływowych pochodzących od Księżyca i od Słońca;
- obliczać wartość sił pływowych.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Nieostrożny astronauta wpada do czarnej dziury o masie $M = 10^{32}$ kg. Oszacuj odpowiednie wielkości i oblicz wartość siły pływowej działającej na jego głowę w układzie środka masy astronauty w chwili, gdy znajduje się on $d = 200$ km od środka czarnej dziury.

Rozwiązanie

Głowa ma masę ok. $m = 3$ kg. Przyjmijmy, że znajduje się ona ok. $R \approx 1$ m od środka masy ciała.

Skorzystajmy z wyprowadzonego wcześniej wzoru na siłę pływową:

$$F_p = 2GMm\frac{R}{d^3}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$F_p \approx 5 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Odpowiedź: Wartość siły pływowej wyniesie w tej sytuacji $5 \cdot 10^6$ N.

Uwaga. Obliczona wartość siły pływowej odpowiada na Ziemi ciężarowi ciała o masie 500 t. Astronauta nie miałby zatem szans na przeżycie. Już w znacznie większej odległości od czarnej dziury ciała zostają rozciągnięte przez siły pływowe. Ten efekt nazywamy spaghettifikacją.

1. Oblicz siłę pływową wypiętrzającą 1 kg wody w oceanie w trakcie pełni Księżyca.

   Wskazówka. Uwzględnij oddziaływanie pływowe Słońca. Przedstaw na rysunku pomocniczym wzajemne ustawienie Ziemi, Słońca i Księżyca w czasie pełni.

2. Oszacuj wartość siły pływowej, jaką Księżyc odciąga twoją głowę od tułowia.

3. Oblicz maksymalną wartość siły pływowej wynikającej z przyciągania przez Jowisza ciała o masie 1 kg leżącego na powierzchni Ziemi.

4. Na końcach lekkiego sznurka o długości 1 m przywiązano odważniki o masie 100 g. Sznurek ten spada pionowo na czarną dziurę o masie równej 100 masom Słońca. W jakiej odległości od środka czarnej dziury sznurek ulegnie zerwaniu, jeśli potrzebna jest do tego siła 1000 N?

5. Ile razy większa jest siła pływowa na Ziemi wywołana przez Księżyc niż przez Słońce? Przyjmij średnie odległości tych ciał niebieskich od Ziemi.

6. W jakich fazach Księżyca pływy wywołane przez Księżyc i Słońce się sumują, a w jakich – częściowo się równoważą?

Analiza tekstu

Rok na Czerwonej Planecie

Przyszły odpowiednik „poradnika obserwatora" dla Marsjan mógłby się zaczynać na przykład tak: Tej nocy jako pierwsza wzejdzie Ziemia, po niej Wenus i Jowisz. Jeden z księżyców jest właśnie w kwadrze i widać go słabo, drugi zobaczymy w pełni – wypatrujmy niewielkiego, dobrze oświetlonego obiektu w kształcie kartofla.



Jakie jeszcze zjawiska dostrzeżemy na rudoszarym niebie? Spójrzmy na nie nocą. Gwiazdozbiory wyglądają tak samo jak na Ziemi – nasza odległość od tworzących je gwiazd jest zbyt wielka, by krótka podróż na Marsa zrobiła jakąkolwiek dostrzegalną różnicę. Poszukajmy marsjańskiej Gwiazdy Polarnej. Jak się okazuje, znajduje się ona w gwiazdozbiorze Łabędzia – jest nią niepozorna, odległa o 430 lat świetlnych gwiazda BD +52 2880.

Ponieważ Mars okrąża Słońce niemal w tej samej płaszczyźnie co Ziemia, te same gwiazdozbiory tworzą tam Zodiak. Wyjątkiem jest konstelacja Wieloryba, którą Słońce odwiedza przez kilka dni w ciągu roku. (...)

Spójrzmy na niebo tuż po zachodzie Słońca. Niekiedy zobaczymy na nim kilka jasnych punktów. Jednym z nich jest Wenus, innym – kolejna Gwiazda Wieczorna, czyli Ziemia. Nasza planeta obserwowana z Marsa pojawia się na niebie zawsze niedługo przed wschodem lub niedługo po zachodzie Słońca. Podobnie jak w przypadku Wenus może też przechodzić na tle tarczy Słońca: najbliższy tranzyt Ziemi zobaczymy z Marsa w roku 2084. Ziemia jest stosunkowo jasna, znacznie jaśniejsza od wszystkich gwiazd. Jednak tuż przy niej dostrzeżemy gołym okiem jeszcze jeden, nieco słabszy obiekt. To Księżyc – możemy z łatwością obserwować jego ruch wokół naszej planety.

Wprawdzie by zobaczyć fazy Księżyca i samej Ziemi musimy użyć lornetki, mamy nad Ziemianami jedną przewagę: z łatwością zobaczymy również niewidoczną z Ziemi stronę Księżyca. Oglądany z Marsa obraca się on wokół osi w ciągu ponad 27 dni, jednocześnie obiegając Ziemię, a nawet niekiedy się za nią chowając. W chwili, gdy wydaje się od niej maksymalnie oddalać, oba ciała może dzielić na marsjańskim niebie odległość porównywalna z połową średnicy Księżyca na niebie Ziemi (...).

Skoro jednak mówimy o księżycach, spójrzmy również na bliższe nam ciała. Marsa obiegają aż dwa naturalne satelity: Fobos i Deimos. Oba poruszają się na tle gwiazd tak szybko, że na podstawie ich położenia zagubiony marsjański wędrowiec mógłby ustalić aktualny czas.

Dalszy z księżyców, odległy o około 20 000 km od marsjańskiej powierzchni Deimos, jest tak mały, że na marsjańskim niebie wygląda raczej jak bardzo jasna gwiazda i tylko osoby z sokolim okiem byłyby w stanie zauważyć jego tarczę i fazy. Maleńki,

mierzący zaledwie 15 km księżyc wschodzi na wschodzie, by po około 2,5 dnia zajść na zachodzie. Jednak nie wszędzie można go zauważyć – dla obserwatorów znajdujących się w pobliżu marsjańskich biegunów zbyt bliski Marsa Deimos jest niewidoczny.

Fobos okrąża Marsa w odległości niecałych 6000 kilometrów od jego powierzchni – najmniejszej ze znanych nam odległości pomiędzy jakąkolwiek planetą i jej księżycem. (...)

Niewielka odległość Fobosa od powierzchni planety sprawia, że jest on dla marsjańskiego obserwatora stosunkowo duży – zajmuje na niebie obszar o średnicy jednej trzeciej tarczy Księżyca obserwowanego z Ziemi. Porusza się po niebie tak szybko, że mniej więcej dwa razy dziennie wschodzi na zachodzie i zachodzi za wschodnim horyzontem. Jego również nie zobaczymy z biegunowych okolic Czerwonej Planety.

Obserwowany z Marsa Fobos przesłania niekiedy Słońce, jednak trudno to zjawisko nazywać prawdziwym zaćmieniem: choć średnica słonecznej tarczy obserwowanej z Marsa jest niemal dwukrotnie mniejsza niż z Ziemi, Fobos zakrywa zaledwie czwartą część jej powierzchni. (...)

Weronika Śliwa, „Wiedza i Życie" 2012, nr 10

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Dlaczego Mars ma inną gwiazdę wyznaczającą północ niż Ziemia, natomiast gwiazdozbiory Zodiaku widziane z obu planet wyglądają prawie jednakowe?

2. Wykonaj w zeszycie rysunek, który wyjaśni, dlaczego Wenus na ziemskim niebie widać zawsze niedługo po zachodzie Słońca lub przed jego wschodem. A jak jest w przypadku Ziemi widzianej z Marsa?

3. Dowiedz się, co to jest tranzyt (jako zjawisko astronomiczne). Z Marsa można czasami zaobserwować tranzyt Ziemi. Czy z Ziemi można obserwować tranzyt Marsa? Dlaczego?

4. Wykonaj w zeszycie rysunek, który wyjaśni, dlaczego z okolic bieguna Marsa nie widać jego księżyców.

5. Wykaż za pomocą odpowiednich obliczeń, że Fobos i Deimos spełniają trzecie prawo Keplera. Zwróć uwagę, że podane w tekście wielkości są przybliżone, nie otrzymasz więc dokładnej równości w wyniku obliczeń. Jakich danych spoza tekstu potrzebujesz do wykonania obliczeń? Znajdź je w tablicach na końcu książki.

Podsumowanie Grawitacja i elementy astronomii

- **Układ Słoneczny**
  - Słońce jest jedyną gwiazdą w Układzie Słonecznym i jako jedyne ciało niebieskie świeci własnym światłem.
  - Wokół Słońca krążą planety, planety karłowate, planetoidy oraz komety.
  - Wokół większości planet i niektórych planet karłowatych krążą księżyce.
  - Orbity planet są elipsami zbliżonymi do okręgów.
  - Orbity komet okresowych są najczęściej bardzo wydłużonymi elipsami.
  - W ruchu planet wokół Słońca siła grawitacji pełni funkcję siły dośrodkowej.

- **Jednostka astronomiczna** to jednostka długości równa średniej odległości Ziemi od Słońca:

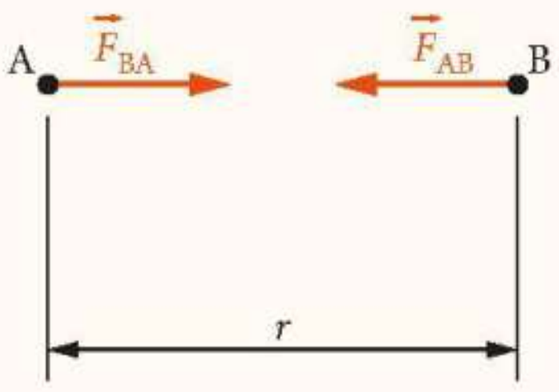
$$1\ \text{au} \approx 149{,}6\ \text{mln km} \approx 150\ \text{mln km}$$

- **Prawo powszechnego ciążenia**
  Siłę przyciągania grawitacyjnego między dwoma ciałami dla przypadków przedstawionych na rysunkach a), b) i c) wyznaczamy ze wzoru:

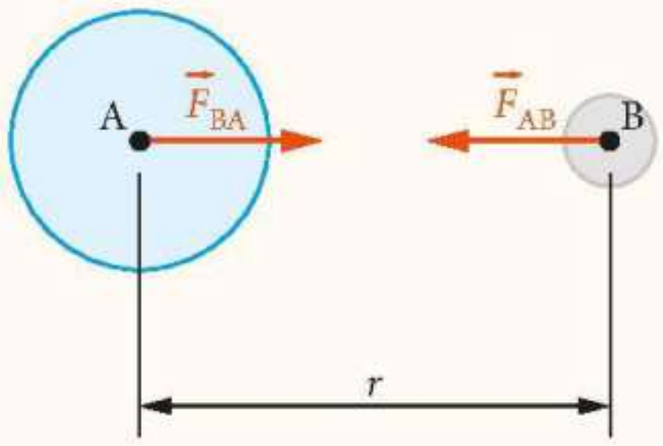
$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

gdzie: $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{kg}^2}$ – stała grawitacji, m_1, m_2 – masy oddziałujących ciał, r – odległość między środkami ciał.

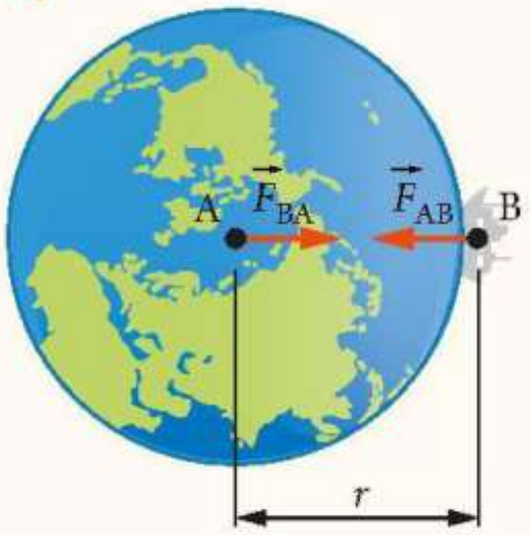
a)



b)



c)



- **Przyspieszenie grawitacyjne**
  Ciało spadające swobodnie na planecie o masie M i promieniu R porusza się z przyspieszeniem:

$$g = G\frac{M}{R^2}$$

- **Ciężar** ciała na Ziemi jest wypadkową siły grawitacji i siły odśrodkowej wynikającej z ruchu obrotowego Ziemi:

$$\vec{Q} = \vec{F}_g + \vec{F}_{od}$$

  Siła odśrodkowa ma jednak niewielki wpływ na ciężar.

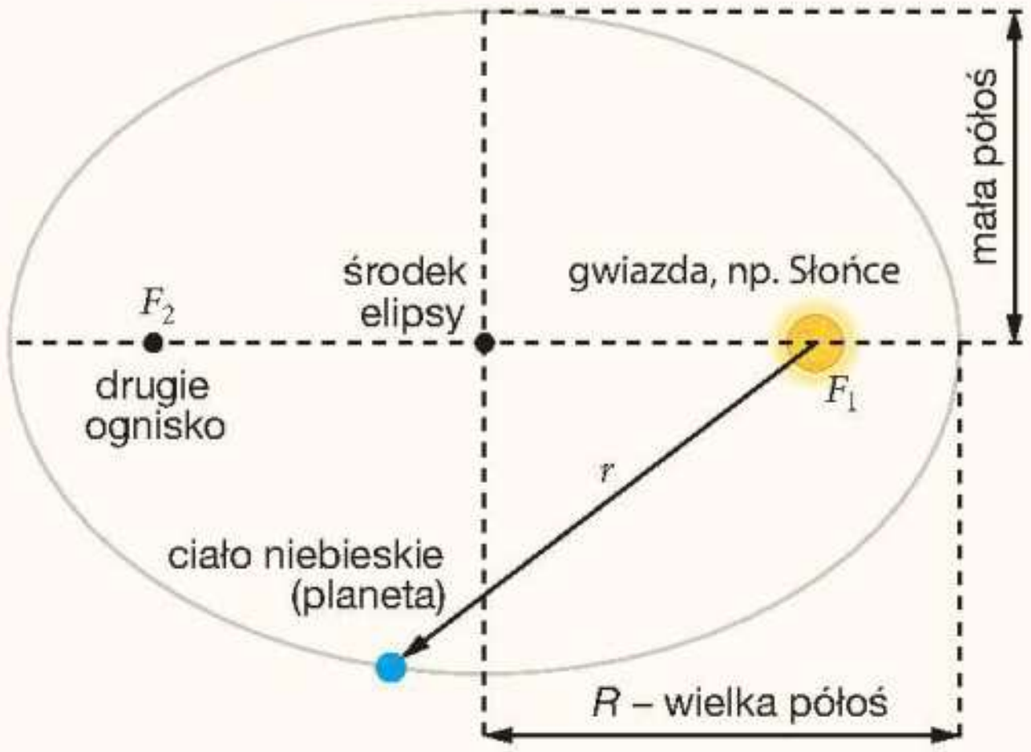
- **Pierwsze prawo Keplera**
  Torem ruchu każdej planety jest elipsa. W jednym z ognisk tej elipsy znajduje się Słońce.

- **Drugie prawo Keplera**
  W trakcie ruchu każdej planety promień wodzący – odcinek łączący Słońce i planetę – zakreśla w równych odstępach czasu równe pola.

- **Trzecie prawo Keplera**
  Stosunek kwadratów okresów obiegu planet wokół Słońca do sześcianów wielkich półosi ich orbit jest stały:

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3} = \text{const}$$

  Trzecie prawo Keplera pozwala wyznaczyć masę gwiazdy na podstawie obserwacji ruchu dowolnej planety krążącej wokół tej gwiazdy.



- **Siły wywołujące ruch orbitalny**
  - W przypadku orbity kołowej siła grawitacji pełni funkcję siły dośrodkowej.
  - W przypadku orbity eliptycznej siłę grawitacji możemy rozłożyć na składowe:
    - o kierunku stycznym do toru, powodującą zmianę wartości prędkości,
    - o kierunku prostopadłym do stycznej, powodującą zmianę kierunku prędkości, czyli zakrzywienie toru.

- Prędkość satelity okrążającego planetę po orbicie kołowej:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

  gdzie: M – masa planety, R – odległość satelity od środka planety.

  Z tego wzoru można obliczyć także pierwszą prędkość kosmiczną v_I, czyli prędkość satelity na niskiej orbicie. Wówczas za R podstawiamy promień planety.

- Minimalną prędkość potrzebną do oddalenia się bez napędu na bardzo dużą odległość od ciała niebieskiego nazywamy **drugą prędkością kosmiczną** (prędkością ucieczki):

$$v_\text{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

  gdzie: M – masa ciała niebieskiego, R – jego promień.

- **Energia potencjalna grawitacji**:

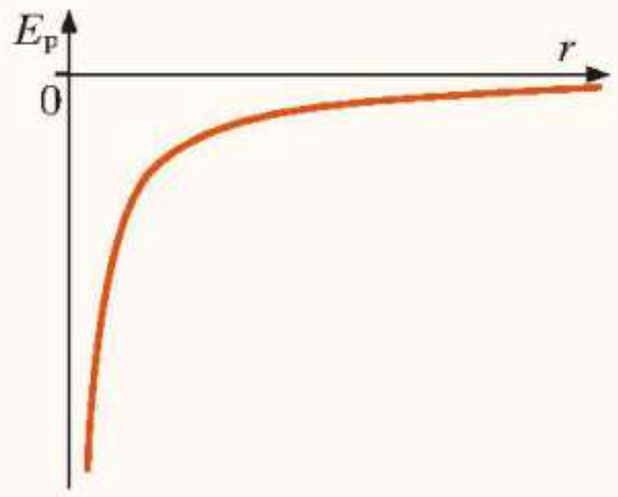
$$E_\text{p} = -\frac{GMm}{r}$$

  gdzie: m – masa ciała, którego energię chcemy obliczyć,

  M – masa ciała, które je przyciąga,

  r – odległość między tymi ciałami.

  Wykres zależności energii potencjalnej ciała od odległości przedstawiono obok. Przyjmujemy, że energia potencjalna ciała wynosi zero w nieskończonej odległości od źródła.



Sposób na zadanie

Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Załóżmy, że w odległości 1,8 mln km od Ziemi dostrzeżono niewielkie ciało (meteoroid) poruszające się z prędkością o wartości 5 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ (18 000 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$) skierowaną w stronę Ziemi. Przyjmij, że w tej odległości od Ziemi grawitacyjna energia potencjalna ciała jest równa zero, a oddziaływanie innych ciał niebieskich można pominąć.

Zadanie 1.1 (0–1)

Zaznacz poprawne dokończenie zdania. Ciało wejdzie w atmosferę ziemską z prędkością:

A. równą 7,9 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

B. większą niż 7,9 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$, ale mniejszą niż 11,2 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

C. równą 11,2 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

D. większą niż 11,2 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Zadanie 1.2 (0–1)

Zaznacz właściwe uzupełnienie zdania wybrane spośród A–C oraz uzasadnienie wybrane spośród 1–3. Czas, po którym ciało dotrze do Ziemi, będzie:

A.	mniejszy od 100 h,	ponieważ	**1.**	ciało porusza się ruchem jednostajnym.
B.	równy 100 h,		**2.**	ciało będzie przyspieszać.
C.	większy od 100 h,		**3.**	w atmosferze ciało będzie hamować.

Rozwiązanie:

Ad 1.1

Poprawna jest odpowiedź **D**.

> **Wskazówka 1.** Jeśli w zadaniu występują wartości znanych ci wielkości fizycznych, przypomnij sobie, jaki sens fizyczny mają te wielkości.

Występujące w zadaniu wartości prędkości 7,9 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ i 11,2 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ to pierwsza prędkość kosmiczna i druga prędkość kosmiczna. Ponieważ w zadaniu mowa o ciele znajdującym się bardzo daleko od Ziemi, więc będziemy jego prędkość porównywać z drugą prędkością kosmiczną.
Druga prędkość kosmiczna to prędkość, która pozwala ciału oddalić się od Ziemi na bardzo dużą odległość. Zgodnie z zasadą zachowania energii ciało nadlatujące z bardzo dużej odległości prawie bez prędkości początkowej wejdzie w atmosferę z prędkością 11,2 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Ponieważ ciało, o którym mowa w zadaniu, miało już na początku sporą prędkość (5 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$), więc dotrze do Ziemi z odpowiednio większą prędkością. Czyli poprawna jest odpowiedź D.

Ad 1.2

Poprawne uzupełnienie zdania to **A** i **2**.
Gdyby ciało poruszało się ruchem jednostajnym, czas ruchu byłby równy 100 h. Jednak na ciało działa siła grawitacji, czyli ruch jest przyspieszony. Dlatego czas ruchu będzie mniejszy od 100 h. Hamowanie w atmosferze zachodzi tylko podczas ostatnich sekund ruchu, nie będzie więc miało znacznego wpływu na wynik.

Zauważ, że siła grawitacji rośnie w miarę zbliżania się do Ziemi, więc ruch nie będzie jednostajnie przyspieszony, ale przyspieszenie będzie rosło. To jednak nie ma wpływu na odpowiedź – ważne tylko, że ciało przyspiesza.

Warto zapamiętać!

- W zadaniach zamkniętych (testowych) nie zawsze trzeba wykonywać obliczenia.
- Nie oznacza to jednak, że takie zadania należy rozwiązywać w pamięci. Lepiej zawsze zanotować skrótowo w brudnopisie tok rozumowania. Jego sformułowanie pozwoli zauważyć ewentualne błędy.

Zadanie 2. W tabeli zapisano dane dotyczące trzech księżyców planet Układu Słonecznego. Dwa z nich krążą wokół tej samej planety.

Nazwa	Wielka półoś orbity (w mln km)	Okres obiegu (w dobach)
Leda	11,165	240,9
Febe	12,952	550,5
Ananke	21,276	629,8

Zadanie 2.1 (0–2)
Wykonaj konieczne obliczenia i na ich podstawie ustal, które dwa księżyce krążą wokół tej samej planety.

Zadanie 2.2 (0–3)
Oblicz masę planety, wokół której krąży księżyc Febe. Załóż, że orbita księżyca jest kołowa.

Rozwiązanie:
Ad 2.1

> **Wskazówka 2.** Zastanów się, w jakim prawie fizyki jest mowa o wielkościach podanych w zadaniu. W tym przypadku dane są wielkie półosie orbit księżyców i okresy obiegu tych satelitów, więc będzie można skorzystać z trzeciego prawa Keplera.

Korzystamy z trzeciego prawa Keplera i obliczamy wyrażenie $\frac{T^2}{R^3}$ dla księżyców.

$$\text{Leda: } \frac{T^2}{R^3} = \frac{(240{,}9)^2}{(11{,}165)^3} \approx 41{,}7 \qquad \text{Febe: } \frac{T^2}{R^3} = \frac{(550{,}5)^2}{(12{,}952)^3} \approx 139{,}5$$

$$\text{Ananke: } \frac{T^2}{R^3} = \frac{(629{,}8)^2}{(21{,}276)^3} \approx 41{,}2$$

Wokół tej samej planety krążą księżyce: Leda i Ananke, ponieważ iloraz $\frac{T^2}{R^3}$ jest dla nich w przybliżeniu równy.

Odpowiedź: Wokół tej samej planety krążą Leda i Ananke.

Ad 2.2

Wskazówka 3. Ponieważ przyjęto, że księżyce poruszają się po orbitach kołowych, zatem możemy korzystać ze wzorów dla ruchu jednostajnego po okręgu.

Siłą dośrodkową, która działa na księżyc Febe, jest siła grawitacji, czyli przyrównujemy:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} \qquad (1)$$

gdzie:
m – masa księżyca, v – jego prędkość, r – promień orbity, M – masa planety, wokół której porusza się księżyc.

W ruchu jednostajnym po okręgu prędkość ciała wyznacza się z zależności:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \qquad (2)$$

gdzie T to okres obiegu.

Uwaga. Jeżeli pamietasz wzór na prękość satelity: $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$, możesz od razu z niego skorzystać i przyrównać tę prędkość do prędkości ciała poruszającego się po okręgu.

Podstawiamy wzór (2) do wzoru (1) i wyznaczamy szukaną masę planety:

$$\frac{m \cdot 4\pi^2 r^2}{r \cdot T^2} = \frac{GMm}{r^2} \quad \rightarrow \quad M = \frac{4\pi^2 r^3}{G \cdot T^2}$$

Przeliczamy długość promienia na metry, a okres na sekundy i podstawiamy dane do powyższego wzoru:

$$M = \frac{4\pi^2 (12{,}952 \cdot 10^9\,\mathrm{m})^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot (550{,}5 \cdot 24 \cdot 3600\,\mathrm{s})^2} \approx 5{,}7 \cdot 10^{26}\,\mathrm{kg}$$

Odpowiedź: Febe obiega planetę o masie ok. $5{,}7 \cdot 10^{26}$ kg.

Uwaga. Febe jest księżycem Saturna, a otrzymana przez nas wartość to właśnie masa tej planety.

Warto zapamiętać!

- Trzecie prawo Keplera wiąże ze sobą okresy obiegu i wielkie półosie orbit satelitów krążących wokół tego samego ciała niebieskiego.
- Jeśli znamy okres obiegu i długość wielkiej półosi orbity dowolnego satelity krążącego wokół ciała niebieskiego, to możemy obliczyć masę tego ciała.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Grawitacja Ziemi i Księżyca

1.1. Oblicz, w jakiej odległości od powierzchni Ziemi siła grawitacji działająca na ciało ma taką samą wartość jak przy powierzchni Księżyca.

1.2. Znajdź na linii łączącej Ziemię i Księżyc taki punkt, w którym wypadkowa sił grawitacji, jakimi działają na ciało, jest równa zero.

1.3. Oblicz wartość wypadkowej sił grawitacji działających na ciało o masie 1 kg w punkcie położonym w połowie odcinka łączącego środek Ziemi i środek Księżyca. Podaj kierunek i zwrot tej siły. Uwzględnij tylko oddziaływanie grawitacyjne Ziemi i Księżyca.

1.4. W powieści Juliusza Verne'a (czyt. werna) *Wokół Księżyca* bohaterowie lecą na Księżyc w pocisku wystrzelonym z ogromnego działa. Przez cały czas w pocisku działa ciążenie, z wyjątkiem chwili, gdy grawitacja Księżyca równoważy grawitację Ziemi. Czy autor książki poprawnie opisał tę sytuację?

Wybierz odpowiedź TAK lub NIE oraz uzasadnienie spośród 1–3.

TAK,	ponieważ	1.	poza punktem równowagi wypadkowa sił grawitacji ziemskiej i księżycowej ma niezerową wartość.
		2.	wartość siły wypadkowej sił grawitacji Ziemi i Księżyca zmienia się stopniowo, a nie skokowo.
NIE,		3.	w pocisku poruszającym się tylko pod wpływem grawitacji zawsze panuje stan nieważkości.

Zadanie 2. Satelity

Na orbicie okołoziemskiej umieszcza się różne satelity: badawcze, telekomunikacyjne, rozpoznawcze itp., które ze względu na przeznaczenie krążą po różnych orbitach. Na przykład satelity meteorologiczne Meteosat są satelitami geostacjonarnymi – krążą dookoła Ziemi z taką prędkością, aby stale pozostawać nad tymi samymi punktami nad jej powierzchnią. Z kolei działanie systemu GPS opiera się na sieci satelitów rozmieszczonych w odległości 20 162 km od powierzchni Ziemi ($R_{GPS} = 4{,}165R_Z$, R_Z – promień Ziemi) na orbitach kołowych nachylonych pod kątem 55° względem płaszczyzny równika.

2.1. Na jakiej orbicie okres obiegu satelity równy jest połowie doby gwiazdowej (okresu obrotu Ziemi wokół własnej osi, wynoszącego 23 h 56 min)?

2.2. Oblicz promień orbity satelity geostacjonarnego.

2.3. Wyznacz prędkość satelity geostacjonarnego. Skorzystaj z pierwszej prędkości kosmicznej dla Ziemi.

2.4. Wybierz prawidłowe uzupełnienia zdania.

Orbita satelity geostacjonarnego może się znajdować **A**/ **B**, a satelita porusza się po niej **C**/ **D**.

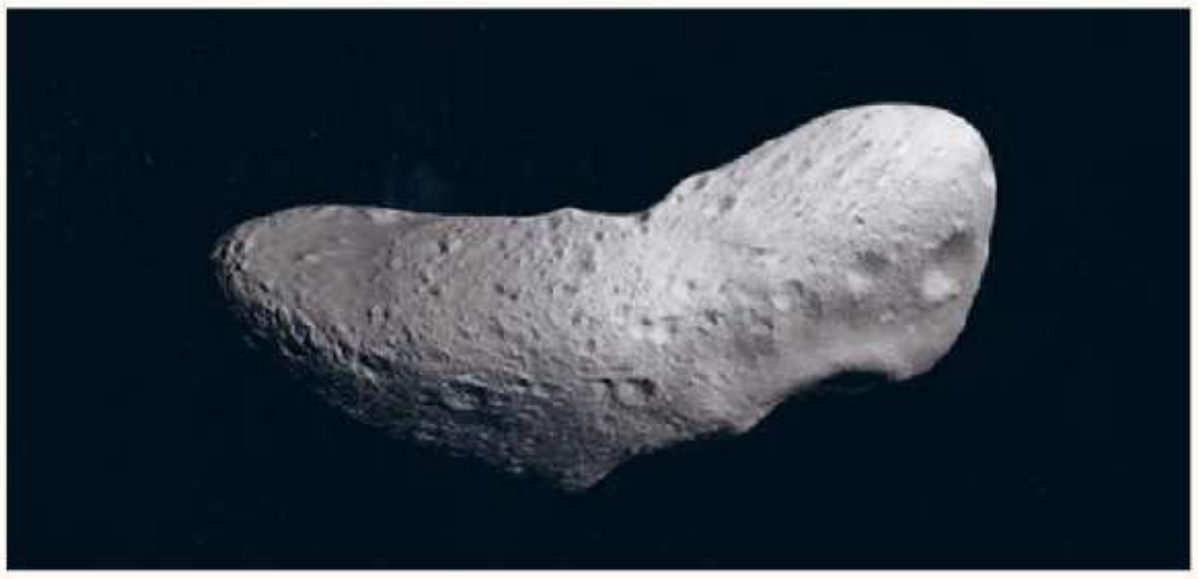
A. tylko nad równikiem
B. nad dowolnym równoleżnikiem
C. z zachodu na wschód
D. ze wschodu na zachód

2.5. Jakiego czasu potrzebuje satelita GPS, aby ponownie znaleźć się **nad tym samym miejscem** na Ziemi?

A. pół doby gwiazdowej
B. dobę gwiazdową
C. półtorej dobry gwiazdowej
D. dwie doby gwiazdowe

2.6. Oblicz prędkość liniową satelity GPS na jego orbicie.

Zadanie 3. Planetoidy



Planetoidy poruszają się po orbitach eliptycznych wokół Słońca, głównie w pasie leżącym pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza. Pas planetoid zajmuje szerokość ok. 1 au.
Wyniesiona w przestrzeń kosmiczną sonda NEAR o masie 805 kg stała się sztucznym satelitą planetoidy Eros (na zdjęciu) i przez pewien czas okrążała ją po orbicie kołowej w odległości 220 km od jej środka masy, a następnie wylądowała na powierzchni planetoidy. Podczas misji uzyskała następujące informacje o planetoidzie: czas obrotu wokół własnej osi $T = 5{,}27$ h, gęstość $d = 2{,}7\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}$, masa $M = 7{,}2 \cdot 10^{15}$ kg, rozmiary 33 km × 13 km × 13 km.

3.1. Oblicz czas obiegu planetoid położonych najbliżej i najdalej od Słońca. Przyjmij, że najbliższe planetoidy znajdują się w odległości 350 mln km od Słońca.

3.2. Oblicz energię mechaniczną sondy NEAR na orbicie wokół planetoidy Eros.



12 Pole elektryczne

1. Ładunki elektryczne i ich oddziaływanie
2. Prawo Coulomba
3. Pole elektryczne
4. Pole elektryczne wielu źródeł
5. Energia potencjalna, potencjał i napięcie
6. Ładunki w przewodniku
7. Ruch naładowanej cząstki w polu elektrycznym
8. Kondensatory

12.1. Ładunki elektryczne i ich oddziaływanie

Przypomnij sobie

- Ładunki elektryczne oddziałują na siebie siłami elektrycznymi.
- W przyrodzie istnieją dwa rodzaje ładunków: dodatnie i ujemne.
- Ładunki o takim samym znaku się odpychają, a ładunki o przeciwnych znakach – przyciągają.
- Substancję, przez którą mogą przepływać ładunki elektryczne (zwykle elektrony), nazywamy przewodnikiem, natomiast substancję, przez którą nie mogą one przepływać – izolatorem albo dielektrykiem.

Rys. **12.1.** Pod wpływem tarcia balonik i sierść kota się elektryzują

W tym rozdziale przypomnimy zjawiska związane z ładunkami elektrycznymi i ich oddziaływaniem. Zetknąłeś się już z tymi zagadnieniami w szkole podstawowej – teraz rozszerzymy wiedzę na ich temat. Poznamy też różnorodne zastosowania praw elektrostatyki w życiu codziennym.
Jak wiesz, w każdym ciele znajdują się naładowane cząstki: protony i elektrony. Choć same zjawiska elektrostatyczne, takie jak przyciąganie skrawków sukna przez potarty tkaniną bursztyn, znane były od tysięcy lat, to dopiero poznanie mikroskopowej struktury materii pozwoliło je zrozumieć. Przyjrzyjmy się temu bliżej.

Jednostka ładunku. Ładunek elementarny

Na oznaczenie ładunku elektrycznego używamy symbolu q lub Q. Jednostką ładunku elektrycznego w układzie SI jest **kulomb** (1 C). Jednak w opisie zjawisk mikroświata wygodniejszą jednostką jest **ładunek elementarny** e, równy wartości bezwzględnej ładunku pojedynczego elektronu. Ładunek protonu ma taką samą wartość bezwzględną, ale przeciwny, czyli dodatni znak.
Każdy ładunek, z którym mamy do czynienia w doświadczeniach, ma wartość będącą całkowitą wielokrotnością ładunku elementarnego:

$$q = ne$$

gdzie n jest liczbą całkowitą, w większości sytuacji – bardzo dużą.

Ładunek elektryczny będziemy dalej w skrócie nazywać **ładunkiem**.

Na co dzień nie zauważamy tego faktu, ponieważ ładunek elementarny jest bardzo mały. Na przykład wskazówka idealnego elektroskopu, obracająca się bez tarcia, poruszałaby się skokowo za każdym razem, gdy elektron wpływa na jego listki lub wypływa z nich do otoczenia. Te zmiany byłyby jednak zbyt małe, aby można je było zaobserwować.
Zgodnie z definicjami jednostek układu SI obowiązującymi od 2019 r. kulomb to taka jednostka, że wyrażony w niej ładunek elementarny wynosi dokładnie: $e = 1{,}602176634 \cdot 10^{-19}$ C.

W przybliżeniu będziemy przyjmować wartość:

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

Jak łatwo stąd obliczyć, kulomb to ładunek ok. $6 \cdot 10^{18}$ elektronów.

Kwarki

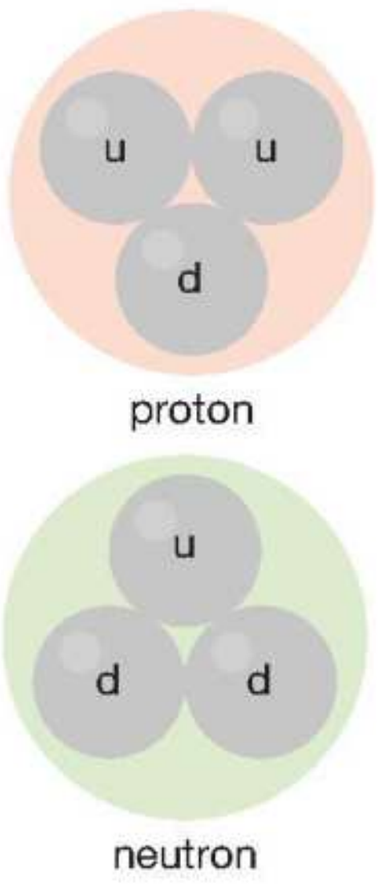
Do połowy zeszłego wieku wydawało się, że ładunek elementarny jest najmniejszym możliwym ładunkiem w przyrodzie. Doświadczenia z dziedziny fizyki cząstek elementarnych doprowadziły jednak do zmiany tego poglądu.

Obecnie wiemy, że protony i neutrony są zbudowane z mniejszych cząstek, zwanych **kwarkami**. Ładunki kwarków mogą przyjmować wartości $-\frac{1}{3}e$ lub $\frac{2}{3}e$, czyli ułamkowe w porównaniu z ładunkiem elektronu lub protonu. Jednak kwarki nigdy nie występują swobodnie, więc wszystkie ładunki mierzone bezpośrednio są wielokrotnościami ładunku elementarnego. Na przykład proton składa się z dwóch kwarków górnych (u) i jednego kwarka dolnego (d). Oznacza to, że jego ładunek wynosi:

$$q = +\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e = +e$$

Z kolei neutron składa się z jednego kwarka górnego (u) i dwóch kwarków dolnych (d), więc jego ładunek jest równy:

$$q = +\frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e = 0$$



Rys. 12.2. Protony i neutrony są zbudowane z kwarków górnych (u) i dolnych (d)

Tabela 12.1. Nazwy kwarków po polsku i po angielsku, ich oznaczenia i ładunki

Nazwa	Symbol	Ładunek e
dolny (*down*)	d	$-\frac{1}{3}$
górny (*up*)	u	$+\frac{2}{3}$
dziwny (*strange*)	s	$-\frac{1}{3}$
powabny (*charm*)	c	$+\frac{2}{3}$
niski (*bottom* albo *beautiful*)	b	$-\frac{1}{3}$
wysoki (*top* albo *true*)	t	$+\frac{2}{3}$

A to ciekawe

Niektóre kwiaty są naelektryzowane ujemnie, a zapylające je owady – dodatnio. Ładunki kwiatu i owada są zbyt małe, aby siła elektryczna mogła je do siebie przyciągnąć, jednak wystarczają, aby pyłek przyczepił się do ciała owada. W 2013 r. odkryto, że trzmiele mają zmysł wyczuwania ładunku elektrycznego. Owady siadały na sztucznych kwiatach, które wabiły je wyłącznie ładunkiem elektrycznym.



Oddziaływanie ładunków elektrycznych

Ze zjawiskami elektrostatycznymi spotykamy się na co dzień: torebka foliowa przykleja się do naczynia, plastikowy grzebień przyciąga suche włosy, a w trakcie zdejmowania wełnianego swetra słychać trzask drobnych iskier.

Wykonajmy proste doświadczenie, dzięki któremu przypomnimy sobie istotę oddziaływań między ładunkami elektrycznymi.

Doświadczenie 2





Uwaga. W trakcie doświadczenia nie dotykaj kawałków taśmy od strony z klejem i trzymaj taśmę za sam koniec. Rolki z taśmą dotykaj tylko z boku.

1. Przygotuj rolkę szerokiej taśmy klejącej i nożyczki.
2. Odetnij kawałek taśmy długości ok. 30 cm i zawieś za jeden koniec tak, aby zwisał swobodnie (np. ze statywu lub brzegu stołu).
3. Zbliżaj powoli rolkę taśmy do wiszącego kawałka taśmy (rys. a). Obserwuj oddziaływanie między paskiem taśmy a rolką. Jak się ono zmienia w zależności od odległości między paskiem taśmy a rolką?
4. Odetnij drugi kawałek taśmy tej samej długości co pierwszy i przyklej jednym końcem do palca tak, aby zwisał luźno.
5. Zbliż do siebie kawałki taśmy stroną nieposmarowaną klejem i obserwuj, jak na siebie oddziałują (rys. b).
6. Wyjaśnij swoje obserwacje. Skorzystaj z wiadomości ze szkoły podstawowej.

Przeprowadzone doświadczenie pokazuje, że rolka i pasek taśmy się przyciągają, natomiast zwisające paski taśmy – odpychają. Zastanówmy się, dlaczego tak się dzieje.

Wskazówki praktyczne (elektrostatyka)

W doświadczeniach z elektrostatyki mamy do czynienia z bardzo wysokimi napięciami*. Często problemem jest pochłanianie przez papier lub bawełnianą nić wody z powietrza, co powoduje, że przewodzą one prąd. Choć to przewodnictwo jest bardzo słabe, jednak zauważalne przy niewielkich ładunkach, z jakimi mamy do czynienia w elektrostatyce. Dlatego dobrze stosować pewne zasady.

1. Doświadczenia z elektrostatyki najlepiej wykonywać w zimie, gdy powietrze jest suche i grzeją kaloryfery.
2. Przyrządy do doświadczeń warto ostrożnie wysuszyć suszarką do włosów.
3. Zamiast nici bawełnianych najlepiej stosować materiały nieabsorbujące wody, takie jak plastikowa wstążka (używana do wiązania bukietów i pakowania prezentów), żyłka wędkarska, rozcięta gumka recepturka.
4. Ciało ludzkie także jest dobrym przewodnikiem, dlatego aby nie rozładować przyrządów, nie należy dotykać ich metalowych części.





* Wysokie napięcia występujące w większości doświadczeń z elektrostatyki nie są niebezpieczne, ponieważ ładunki ciał elektryzowanych w trakcie tych eksperymentów są bardzo małe.

Jeśli zetkniemy, a następnie rozdzielimy dwa ciała, to w zależności od rodzajów substancji, z jakich się one składają, niewielka część elektronów z jednego z nich może przemieścić się na drugie. Ponieważ ładunek elektronu jest ujemny, ciało, które zyskało elektrony, zostaje naelektryzowane ujemnie, czyli zyskuje ładunek ujemny, a ciało, które utraciło elektrony – zyskuje ładunek dodatni.

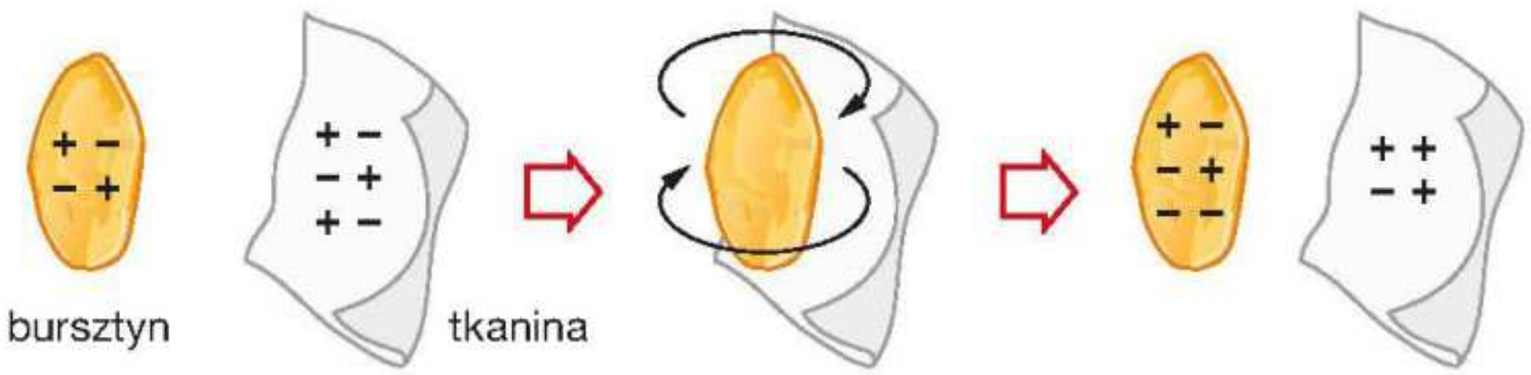
Nadmiar elektronów – ładunek ujemny. Niedomiar elektronów – ładunek dodatni.

Odklejenie kawałka taśmy od rolki, czyli rozdzielenie dwóch stykających się ciał, spowodowało, że na każdym z nich zgromadził się ładunek o przeciwnym znaku. Rolka i pasek taśmy się przyciągały. Na drugim z oderwanych pasków taśmy zgromadził się ładunek o takim znaku jak na pierwszym, dlatego swobodnie zwisające paski taśmy się odpychały.

> **Ładunki tego samego znaku się odpychają, a ładunki różnych znaków się przyciągają.**

Pamiętajmy, że kiedy mówimy o oddziaływaniu ładunków, używamy skrótu myślowego. Mamy bowiem na myśli oddziaływanie ciał, które mają określony ładunek elektryczny.

Zazwyczaj w celu zwiększenia tak zgromadzonego ładunku ciała można nie tylko zetknąć, lecz także potrzeć o siebie. Opisany sposób elektryzowania nazywamy **elektryzowaniem przez potarcie** (rys. 12.3).



Słowo *elektryczność* pochodzi od gr. *elektron* – bursztyn.

Rys. **12.3.** Gdy pocieramy bursztyn tkaniną, część elektronów przechodzi z materiału na bursztyn. Bursztyn ładuje się ujemnie, a tkanina dodatnio

Zasada zachowania ładunku

O zasadach zachowania w fizyce mówiliśmy już wcześniej. Poznaliśmy zasadę zachowania energii, zasadę zachowania pędu i zasadę zachowania momentu pędu. Wszystkie znane doświadczenia przekonują nas, że także całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego jest wielkością zachowaną.

Układ izolowany, cz. I s. 201

Układ, w którym ciała mogą oddziaływać między sobą, ale nie oddziałują z ciałami spoza tego układu.

Możemy zatem podać kolejną zasadę zachowania – **zasadę zachowania ładunku elektrycznego**.

> Całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego jest stały.

Elektroskop

Elektroskop (rys. a) to urządzenie pozwalające badać, czy ciało jest naelektryzowane. Gdy dotykamy kulki elektroskopu ciałem naładowanym ujemnie, część elektronów przepływa na kulkę, a z niej na listki elektroskopu. Jeśli z kolei dotykamy kulki ciałem o ładunku dodatnim, część elektronów z listków przepływa przez kulkę do tego ciała.
Widzimy więc, że niezależnie od znaku ładunku ciała, którym dotykamy kulki, listki elektroskopu zyskują ładunek. Dlatego listki się odpychają, co powoduje ich rozchylenie.
Jeśli w elektroskopie jest jeden listek, to z analogicznego powodu odchyla się on od metalowej części, do której jest przymocowany (rys. a).
Taki przyrząd można też wykonać samodzielnie – wystarczy przyczepić pasek folii aluminiowej do metalowej puszki ustawionej na izolowanej podstawie (rys. b).

a)



b)



W przypadku elektryzowania ciał spełnienie tej zasady jest oczywiste. Elektrony przepływają wówczas między ciałami (podczas dotyku lub pocierania), a protony w nich pozostają, przy czym ani całkowita liczba elektronów, ani całkowita liczba protonów w ciałach się nie zmieniają. Oznacza to, że łączny ładunek protonów i elektronów w ciałach oddziałujących ze sobą pozostaje bez zmian.

Zasada zachowania ładunku elektrycznego obowiązuje także w trakcie przemian cząstek elementarnych. Przykładami takich przemian są rozpad beta oraz anihilacja cząstek, o których więcej powiemy w czwartej części książki. Nawet jeśli w tych przemianach liczba elektronów i protonów ulega zmianie, ich łączny ładunek pozostaje taki sam.

a)



b)



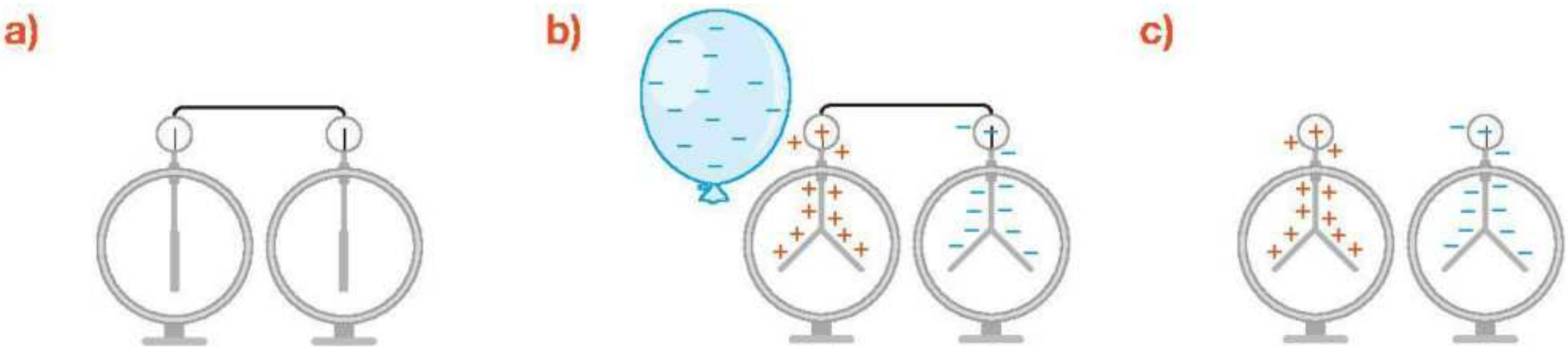
Elektryzowanie przez indukcję

Ciało wykonane z przewodnika można naładować elektrycznie bez stykania go z innymi ciałami. Możesz się o tym przekonać w poniższym doświadczeniu.

Doświadczenie 3

1. Przygotuj dwa elektroskopy, izolowany przewód pozwalający je połączyć, balonik i wełniany sweter albo szalik. Podczas całego doświadczenia obserwuj, jak zachowują się listki elektroskopów.
2. Ustaw elektroskopy obok siebie i połącz ich kulki przewodem.
3. Nadmuchaj balonik i potrzyj go wełnianym swetrem albo szalikiem. Zbliż balonik do kulki jednego z elektroskopów, ale jej nie dotykaj (rys. a). Złap przewód przez izolację i rozłącz elektroskopy. Odsuń balonik.
4. Do przeprowadzenia tej części doświadczenia potrzebny będzie jeden elektroskop. Dotknij jego kulki, aby go rozładować. Ponownie potrzyj balonik o wełnę i zbliż go do elektroskopu. Dotknij kulki (rys. b), odsuń najpierw rękę, a potem balonik.

Wykonanie czynności opisanych w punkcie 3. prowadziło do gromadzenia się ładunków elektrycznych na elektroskopach, mimo że ich nie dotykaliśmy. Taki sposób elektryzowania ciał nazywamy **elektryzowaniem przez indukcję**. Przeanalizujmy rysunek 12.4, przedstawiający zjawiska, które zaszły w trakcie wykonywania tej części doświadczenia. Początkowo połączone elektroskopy nie były naładowane (rys. 12.4a). Po zbliżeniu ujemnie naładowanego balonika niektóre elektrony z bliższego elektroskopu odpłynęły do dalszego, odepchnięte przez ujemny ładunek balonika (rys. 12.4b). Elektroskopy zostały więc naładowane. Zanim odsunęliśmy balonik, rozłączyliśmy elektroskopy, więc elektrony nie mogły już zmienić miejsca: jeden z elektroskopów pozostał naładowany dodatnio, a drugi – ujemnie (rys. 12.4c).

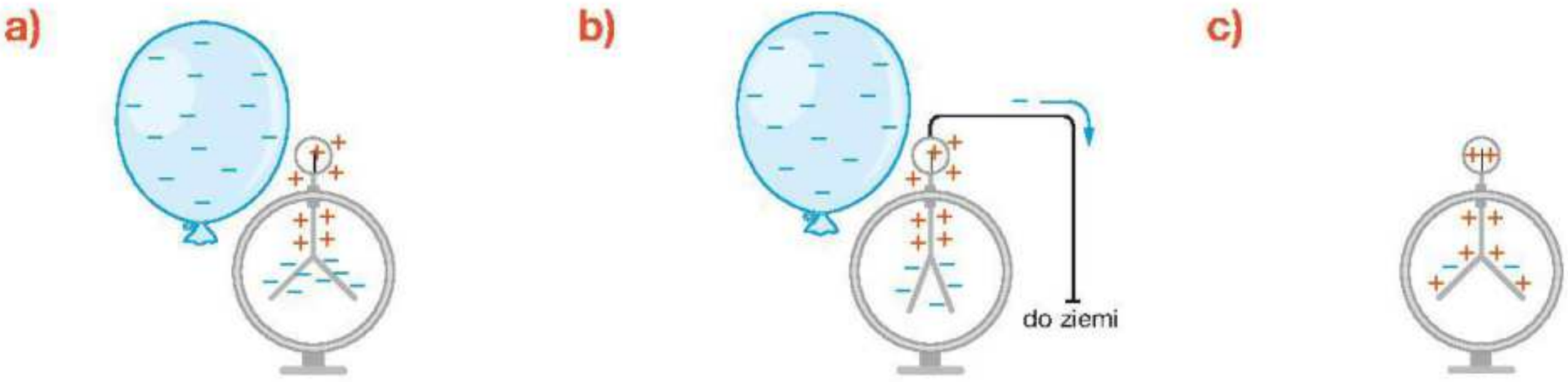


Rys. **12.4.** Elektryzowanie pary ciał przez indukcję

Elektryzowanie przez indukcję można zastosować także do elektryzowania pojedynczego ciała. Za drugie ciało służy wówczas ziemia. Taka sytuacja miała miejsce podczas wykonywania czynności opisanych w punkcie 4. doświadczenia.

Gdy do kulki elektroskopu zbliżyliśmy naładowany ujemnie balonik, elektrony zgromadziły się po przeciwnej stronie urządzenia (rys. 12.5a). Następnie połączyliśmy kulkę elektroskopu z ziemią. Wtedy niektóre elektrony z kulki odpłynęły do niej, odpychane przez naładowany balonik, co spowodowało częściowe opadnięcie listków (rys. 12.5b). Wreszcie kiedy odłączyliśmy elektroskop od ziemi i odsunęliśmy od niego balonik, przyrząd pozostał naładowany dodatnio (rys. 12.5c).

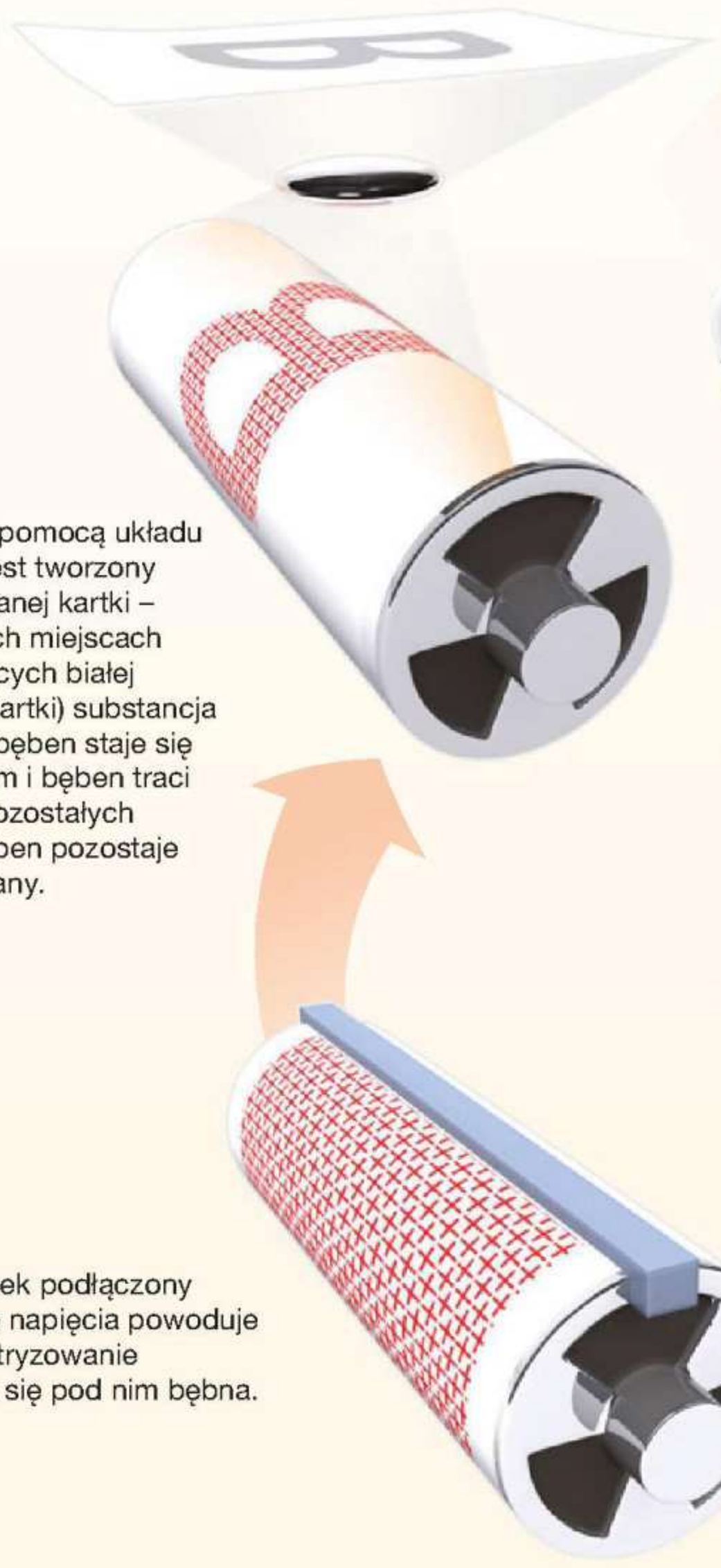
W obydwu przypadkach: zarówno wtedy, gdy używamy dwóch elektroskopów, jak i wtedy, gdy posługujemy się elektroskopem i ziemią, całkowity ładunek pozostaje zachowany, czyli zasada zachowania ładunku elektrycznego jest spełniona.



Rys. **12.5.** Elektryzowanie pojedynczego ciała przez indukcję

Kserograf i drukarka laserowa

Kserograf działa dzięki oddziaływaniom elektrycznym między bębnem, tonerem i papierem. Kluczowe znaczenie ma pokrycie metalowego bębna substancją, która w ciemności jest izolatorem, a po oświetleniu staje się przewodnikiem. Na tej samej zasadzie działa drukarka laserowa. Różnica polega na tym, że w kserografie bęben jest oświetlany światłem odbitym od powielanej kartki, a w drukarce – światłem lasera sterowanego przez komputer. Część nowoczesnych kopiarek nie ma układu optycznego, ale stanowi skaner, komputer i drukarkę w jednej obudowie.



2 Na bębnie za pomocą układu optycznego jest tworzony obraz kopiowanej kartki – w oświetlonych miejscach (odpowiadających białej powierzchni kartki) substancja pokrywająca bęben staje się przewodnikiem i bęben traci ładunek. W pozostałych miejscach bęben pozostaje naelektryzowany.

1 Metalowy pasek podłączony do wysokiego napięcia powoduje dodatnie elektryzowanie obracającego się pod nim bębna.

3 Do naelektryzowanych miejsc bębna przyczepia się proszek – toner.

4 Bęben dotyka naelektryzowanego ujemnie papieru. Toner przechodzi z bębna na papier.

5 Gorące wałki powodują wygrzewanie toneru. W ten sposób utrwalają obraz na papierze. Dlatego wyjęta z kserografu kartka jest gorąca.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać i demonstrować doświadczalnie oddziaływanie ładunków elektrycznych w zależności od ich znaku;
- wyjaśniać mechanizm elektryzowania przez: dotyk, potarcie, indukcję, na podstawie wiadomości o mikroskopowej budowie materii;
- wyjaśniać zasadę zachowania ładunku elektrycznego.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Każde makroskopowe ciało zawiera bardzo dużą liczbę naładowanych cząstek. Wytłumacz, dlaczego w takim razie ciała na ogół nie oddziałują ze sobą elektrycznie, kiedy znajdują się względem siebie w odległości większej od odległości atomowych i cząsteczkowych.
2. Wyjaśnij, jak można naładować elektroskop ujemnie jedynie za pomocą dodatnio naładowanej szklanej pałeczki.
3. Listek elektroskopu jest odchylony, co świadczy o tym, że zgromadził się na nim pewien ładunek. Jak określić jego znak? Podaj inny sposób niż opisany w doświadczeniu poniżej.
4. Wykonaj doświadczenie.
   a) Rozmontuj próbnik napięcia i wyjmij z niego lampkę neonową.
   b) Chwyć lampkę za jedną z końcówek i przesuń wzdłuż naelektryzowanego ciała.
   c) Uważnie obserwuj neonówkę. Znajdujący się w niej gaz świeci tylko w okolicy jednej z elektrod – tej, przez którą wpływają elektrony.
   d) Zbadaj w ten sposób znak kilku naelektryzowanych ciał.



12.2. Prawo Coulomba

Przypomnij sobie

- Większość ciał, z którymi mamy na co dzień do czynienia, jest obojętna elektrycznie, gdyż zawiera tyle samo ładunków dodatnich (protonów) co ładunków ujemnych (elektronów).
- Zgodnie z prawem powszechnego ciążenia każde dwa punkty materialne przyciągają się siłą proporcjonalną do ich mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu dzielącej je odległości.

Prawo Coulomba

Kiedy w trakcie wykonywania doświadczenia 2. na s. 72 zbliżaliśmy rolkę do kawałka taśmy klejącej, mogliśmy zaobserwować, że siła oddziaływania ładunków jest tym większa, im mniejsza jest odległość między nimi. Okazuje się, że zależność wartości tej siły od odległości jest taka sama jak w przypadku siły grawitacji: wartość siły jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między ciałami oddziałującymi ze sobą. Tę zależność opisuje **prawo Coulomba**.



Rys. **12.6.** Portret Charles'a Coulomba (czyt. szarla kulomba, 1736–1806)

Dwa punktowe ładunki elektryczne oddziałują siłą o wartości proporcjonalnej do każdego z ładunków i odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi. Jeśli znaki ładunków są jednakowe, mamy do czynienia z odpychaniem, a jeśli różne – z przyciąganiem.

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

gdzie:
q_1, q_2 – oddziałujące ze sobą ładunki punktowe,
k – stała proporcjonalności, nazywana stałą elektryczną lub stałą elektrostatyczną,
r – odległość między ciałami.

Uwagi:

- Ten sam wzór stosuje się do równomiernie naładowanych kul lub sfer.
- W przypadku ciał o innych kształtach lub nierównomiernie rozmieszczonych ładunkach wzór można stosować, gdy r jest dużo większe od rozmiarów ciał.
- Ponieważ ładunki mogą mieć różny znak, a nas interesuje wartość siły, dlatego we wzorze użyliśmy symbolu wartości bezwzględnej.
- Podany wzór dotyczy przypadku, gdy między ładunkami znajduje się próżnia lub powietrze. O innych przypadkach powiemy w dalszej części lekcji.

Sformułowań **siła elektryczna** i **siła elektrostatyczna** można używać zamiennie – oznaczają ten sam rodzaj siły.

Stała proporcjonalności k wyrażona w jednostkach układu SI wynosi $k = 8{,}988 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}}$. Do obliczeń wystarczy przyjąć przybliżoną wartość $k \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}}$. To oznacza, że w przypadku ładunków jednostkowych siła elektryczna jest bardzo duża: dwa ładunki 1 C oddalone od siebie o 1 m oddziałują na siebie siłą $9 \cdot 10^9$ N, czyli równą ciężarowi ciała o masie 900 tys. ton.

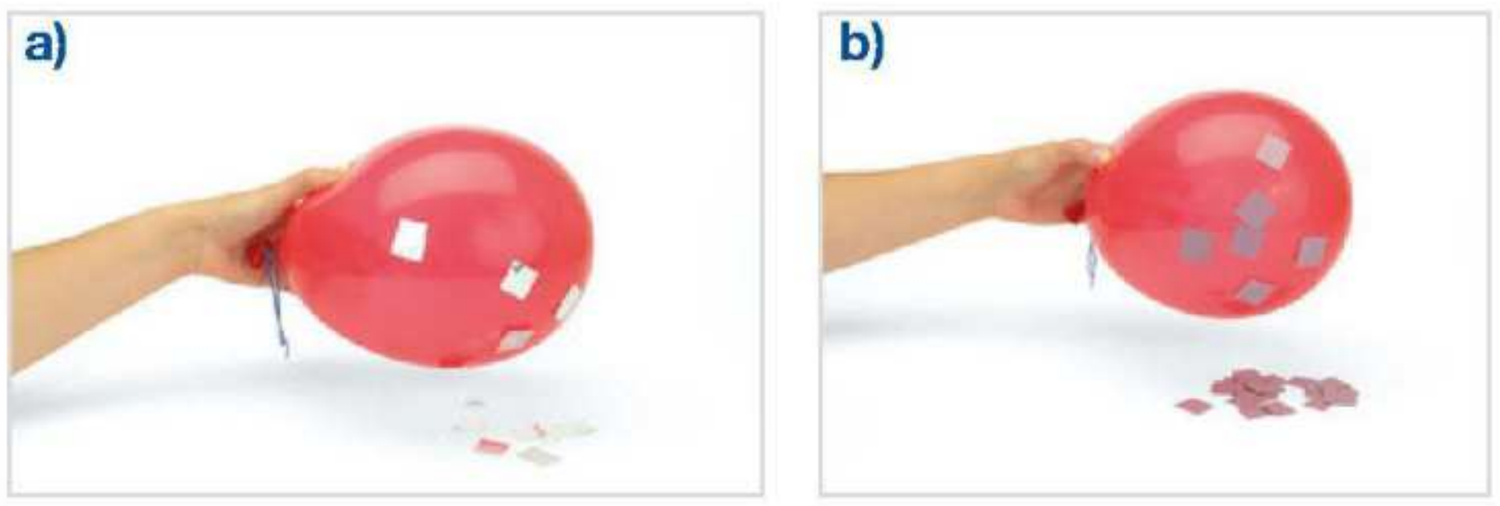
Obserwowane przez nas siły elektryczne są znacznie mniejsze, gdyż na co dzień mamy do czynienia z ładunkami będącymi niewielkim ułamkiem kulomba.

Oddziaływanie ciała naelektryzowanego z ciałem elektrycznie obojętnym

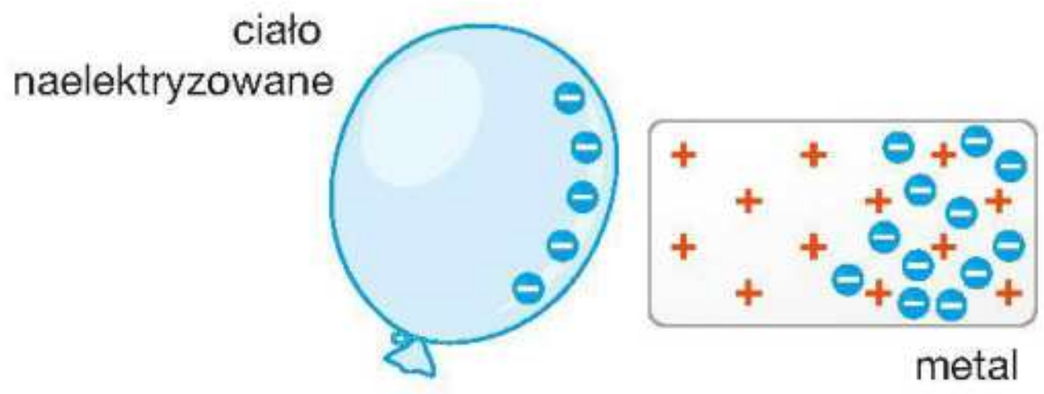
Powiedzieliśmy, że ładunki elektryczne ze sobą oddziałują. Przyjrzyjmy się teraz bliżej oddziaływaniu ciał naelektryzowanych z ciałami obojętnymi elektrycznie.

Doświadczenie 4

1. Przygotuj balonik, wełniany szalik albo sweter oraz suche ścinki papieru i folii aluminiowej.
2. Nadmuchaj balonik i potrzyj go swetrem.
3. Zbliż balonik najpierw do ścinków folii aluminiowej (zdjęcie a), a później do papieru (zdjęcie b). Co obserwujesz?



Przeprowadzone doświadczenie pokazuje, że naelektryzowany balonik przyciąga zarówno ścinki folii aluminiowej, jak i papieru. Ścinki te nie oddziałują między sobą, ponieważ są elektrycznie obojętne (ładunek każdego z nich jest równy zero). Dlaczego więc oddziałują z balonikiem? Czy ciała obojętne mogą oddziaływać elektrycznie?

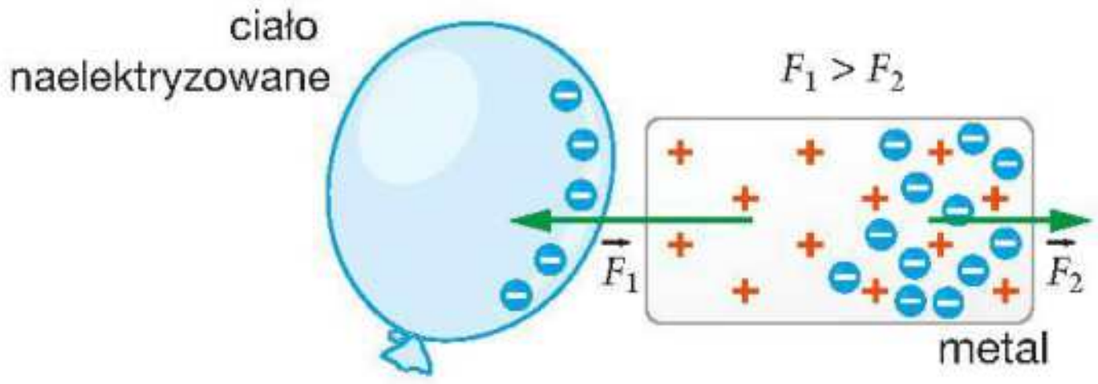


Rys. **12.7.** Zbliżenie naładowanego ciała do kawałka metalu powoduje gromadzenie się swobodnych elektronów po jego jednej stronie

Ścinki papieru lub folii aluminiowej są obojętne elektrycznie nie dlatego, że nie ma w nich żadnych ładunków, ale dlatego, że w każdym z nich ładunków dodatnich (protonów) jest tyle samo co ujemnych (elektronów). Oddziaływanie balonika na ścinki folii aluminiowej jest możliwe, ponieważ w metalu elektrony przemieszczają się w całej objętości.

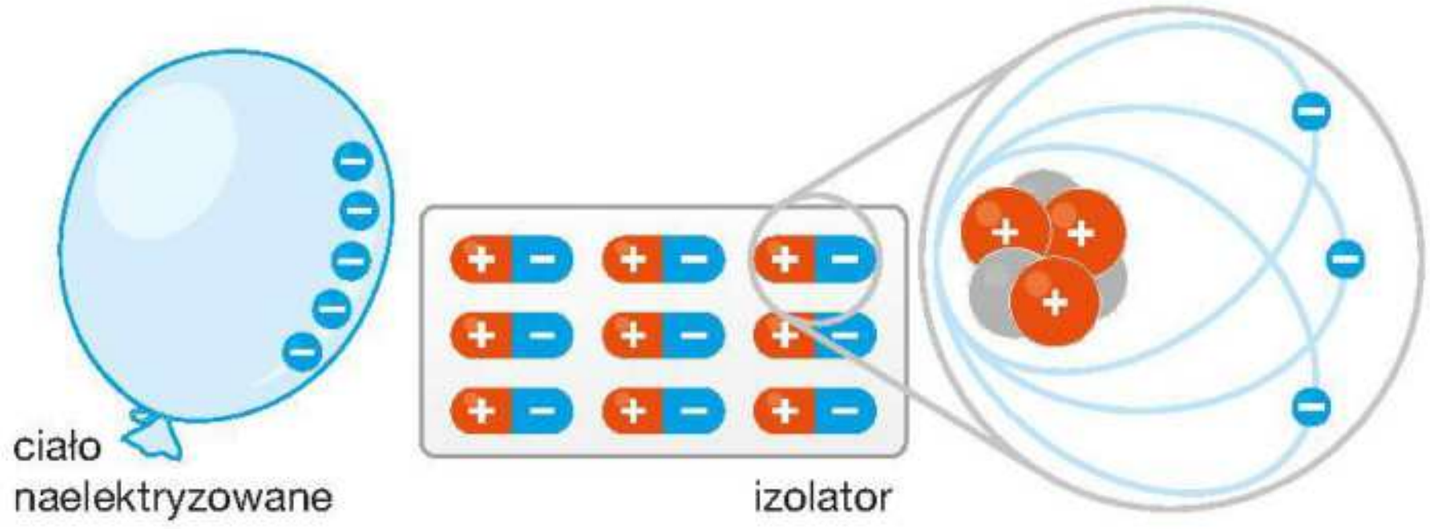
Naładowane ujemnie ciało (np. balonik potarty tkaniną) odpycha elektrony znajdujące się w skrawku folii aluminiowej i powoduje, że przemieszczają się one dalej od balonika (rys. 12.7). To sprawia, że elektrony znajdują się przeciętnie dalej niż dodatnio naładowane jony, więc zgodnie z prawem Coulomba działa na nie mniejsza siła (rys. 12.8). W rezultacie pojawia się siła wypadkowa, która przyciąga skrawek folii aluminiowej do ciała (w naszym przypadku balonika). Oczywiście, zgodnie z trzecią zasadą dynamiki na balonik działa równocześnie druga siła skierowana przeciwnie.

Jon to atom lub cząsteczka, które zostały pozbawione jednego lub kilku elektronów albo obdarzone dodatkowymi elektronami. Jony w metalu nie mogą się poruszać, a jedynie drgają wokół położeń równowagi.



Rys. **12.8.** Siła odpychająca ujemnie naładowany koniec folii jest za słaba, aby zrównoważyć przyciąganie dodatnio naładowanego końca folii

W przypadku skrawków papieru zjawisko z pozoru wygląda na podobne, choć z mikroskopowego punktu widzenia jego przebieg jest nieco inny. Suchy papier jest izolatorem i elektrony nie mogą przez niego swobodnie przepływać. Jednak pod wpływem oddziaływania balonika, czyli ujemnie naładowanego ciała, elektrony na powłokach atomów odsuwają się jak najdalej od niego (rys. 12.9) – mówimy, że cząsteczki ulegają **polaryzacji**. Dalsze wyjaśnienie jest analogiczne: ponieważ przeciętnie elektrony znajdują się dalej niż protony, więc siła odpychania działająca na elektrony ma mniejszą wartość niż siła przyciągania działająca na protony. Dlatego skrawki papieru przyczepiają się do balonika.



Rys. **12.9.** Przesunięcie powłok elektronowych względem jądra atomu powoduje polaryzację cząsteczki. Spolaryzowane cząsteczki są przyciągane przez naelektryzowane ciało

Podobne zjawisko zachodzi, kiedy ciało zbliżone do skrawków folii lub papieru ma ładunek dodatni. W tym przypadku to elektrony znajdują się przeciętnie bliżej niż protony, więc na elektrony działa siła o większej wartości. Ostateczny wynik tego oddziaływania jest taki sam jak w przypadku oddziaływania na skrawki ciałem naładowanym ujemnie – skrawki osiadają na ciele naładowanym elektrycznie.

Zależność siły elektrycznej od ośrodka

Jeżeli oddziałujące ciała znajdują się w próżni, to stałą k występującą w prawie Coulomba zapisujemy w postaci:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

gdzie $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$ to **przenikalność elektryczna próżni**.

Prawo Coulomba s. 79

Tak więc wzór na siłę Coulomba przyjmuje postać:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

Jeżeli natomiast ładunki znajdują się w ośrodku innym niż próżnia, to ich oddziaływanie ze spolaryzowanymi cząsteczkami ośrodka powodują zmniejszenie obserwowanej przez nas siły działającej między ładunkami. Ilościowo możemy to opisać za pomocą wielkości zwanej **przenikalnością elektryczną ośrodka**.

W takim przypadku wzór na siłę elektryczną możemy zapisać w postaci:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

gdzie ε – **przenikalność elektryczna ośrodka**.

Tabela 12.2. Względna przenikalność elektryczna ośrodka

Ośrodek	$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$
Próżnia	1,000
Powietrze	1,00059
Guma	3
Papier	3,7
Beton	4,5
Tlenek glinu	10
Alkohol metylowy	30
Woda destylowana	80
Lód	100

Najczęściej jednak w tablicach fizycznych zamiast wartości przenikalności elektrycznej ośrodków ε są zestawiane wartości **względnej przenikalności elektrycznej ośrodka**, którą wyznacza się ze wzoru:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Wielkość ta informuje, ile razy większa jest przenikalność elektryczna danego ośrodka od przenikalności elektrycznej próżni, czyli innymi słowy, ile razy siła elektryczna jest słabsza w tym ośrodku niż w próżni. Wzór na siłę elektryczną można więc zapisać jako:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

W tabeli 12.2 zestawiono wartości względnej przenikalności elektrycznej kilku wybranych ośrodków. Z zaprezentowanych danych możesz odczytać, że przenikalność elektryczna powietrza jest tylko minimalnie większa niż przenikalność elektryczna próżni, dlatego będziemy pomijać tę różnicę.

Ładunki umieszczone w wodzie destylowanej oddziałują aż 80 razy słabiej niż w próżni.

Porównanie siły elektrycznej z siłą grawitacji

Kiedy porównamy prawo Coulomba z prawem powszechnego ciążenia, zauważymy między nimi wiele podobieństw, choć dotyczą one różnych oddziaływań. Prawo powszechnego ciążenia opisuje ilościowo zdolność oddziaływania ciał posiadających masę, natomiast prawo Coulomba – zdolność oddziaływania ładunków elektrycznych.

Między siłami elektryczną i grawitacji występują następujące podobieństwa:

- Zarówno jedna siła, jak i druga działają na odległość, także w próżni.
- Wartości obu sił są wprost proporcjonalne do iloczynu odpowiednio: mas i ładunków, i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości.

Te analogie widać także we wzorach opisujących oba oddziaływania.



Rys. **12.10.** Sufit przyciąga balonik siłą elektryczną, a Ziemia – grawitacji. Pierwsza z tych sił przeważa i dlatego balonik wisi pod sufitem

Siła elektryczna: $F_e = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2}$

Siła grawitacji: $F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$

k – stała

G – stała

q – wielkość, od której zależy zdolność ciał do oddziaływania

m – wielkość, od której zależy zdolność ciał do oddziaływania

Między omawianymi siłami występują jednak również istotne różnice:

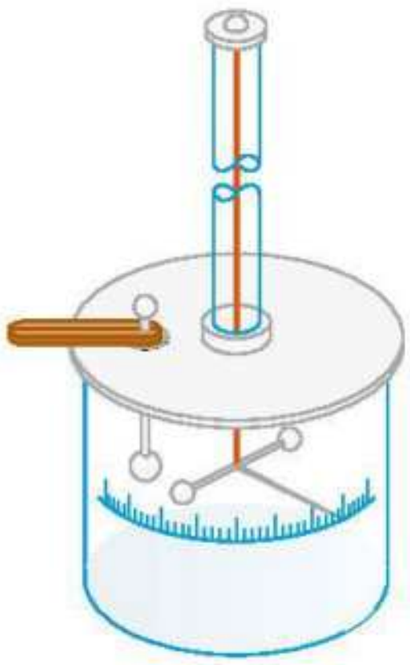
- Istnieją dwa rodzaje ładunków (dodatnie i ujemne), a tylko jeden rodzaj masy. W konsekwencji oddziaływanie grawitacyjne (dotyczące mas) zawsze polega na przyciąganiu, a oddziaływanie elektryczne może polegać na przyciąganiu lub odpychaniu.
- Siły grawitacji działają między wszystkimi ciałami, natomiast siły elektryczne tylko między ciałami naładowanymi elektrycznie.
- Siła grawitacji działa niezależnie od tego, w jakim ośrodku znajdują się ciała. Natomiast siła elektryczna zależy od ośrodka i może przez niego zostać zmniejszona nawet setki razy.
- Masa jest nie tylko odpowiednikiem ładunku w oddziaływaniu grawitacyjnym, lecz także określa bezwładność ciała. Natomiast ładunek elektryczny nie ma żadnego związku z bezwładnością.

Różne są także sytuacje, w których spotykamy się z obiema siłami. W skali kosmicznej istnieją ciała o wielkiej masie, które oddziałują grawitacyjnie, ale są elektrycznie obojętne. Na co dzień obserwujemy siłę przyciągania ziemskiego, a nie zauważamy siły grawitacji działającej między przedmiotami, z którymi mamy do czynienia. Czasami obserwujemy natomiast ich przyciąganie lub odpychanie elektrostatyczne.

W mikroświecie oddziaływania grawitacyjne są po prostu pomijalne. Aby się o tym przekonać, obliczmy, ile razy większa od siły grawitacji jest siła elektryczna działająca między protonem a elektronem w atomie:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{\frac{ke^2}{r^2}}{\frac{Gm_e m_p}{r^2}} = \frac{ke^2}{Gm_e m_p} \approx 2 \cdot 10^{39}$$

$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}$
$m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$
$k = 9 \cdot 10^9\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$
$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$



A to ciekawe

O podobieństwie między oddziaływaniami elektrycznymi i grawitacyjnymi świadczy także fakt, że badano je za pomocą podobnych przyrządów. Aby zbadać zależność siły elektrycznej od odległości między ładunkami, Charles Coulomb zbudował wagę skręceń (schemat obok). Bardzo podobnego urządzenia użył kilka lat później Henry Cavendish do wyznaczania stałej grawitacji (patrz s. 32).
Doświadczenia Coulomba wymagają precyzji, dlatego wielu fizykom nie udało się ich powtórzyć. W konsekwencji wyniki eksperymentu przeprowadzonego przez Coulomba przez pewien czas kwestionowali nawet tak wybitni uczeni jak Alessandro Volta i Christian Ørsted (czyt. erstet).

Obrazowo tę różnicę można oddać za pomocą następującego porównania. Siła elektryczna działająca między elektronem i protonem jest większa od siły grawitacji tyle razy, ile razy masa Ziemi jest większa od masy bakterii.
Wymieniliśmy tylko niektóre podobieństwa i różnice między oddziaływaniami elektrycznymi i grawitacyjnymi. Na kolejne będziemy zwracać uwagę w następnych lekcjach.

Po tej lekcji powinieneś

- znać i stosować w obliczeniach prawo Coulomba;
- demonstrować doświadczalnie i wyjaśniać oddziaływanie ciał naelektryzowanych z ciałami nienaelektryzowanymi;
- omawiać podobieństwa i różnice między siłą grawitacji a siłą elektryczną.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Oszacuj siły elektryczne, którymi oddziaływałyby na siebie dwa samochody o masie $m = 1000$ kg każdy, stojące od siebie w odległości $r = 10$ m, gdyby z każdego z nich usunąć 1% elektronów. Czy pojazdy przyciągałyby się czy odpychały?

Rozwiązanie

Zarówno w żelazie, jak i w innych pierwiastkach, z których jest zbudowany samochód, liczby neutronów i protonów w jądrze atomowym są zbliżone. Ponieważ proton i neutron mają podobną masę, a masy elektronów można pominąć w porównaniu z masą jąder atomowych, przyjmujemy, że połowę masy samochodu stanowi masa protonów. Liczbę protonów obliczamy ze wzoru:

$$N = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{m_p}$$

gdzie: $m = 1000$ kg – masa samochodu, $m_p = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg – masa protonu (odczytana z tablic na końcu podręcznika).

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$N = 2{,}9 \cdot 10^{29}$$

Liczba wszystkich elektronów jest taka sama jak wszystkich protonów, a więc wynosi N. Zgodnie z treścią zadania usunięto 1% z nich, czyli $0{,}01N$ elektronów. Wobec tego wartość bezwzględna ładunku elektronów usuniętych z samochodu wynosi:

$$|q| = 0{,}01N \cdot e \approx 4{,}7 \cdot 10^8 \text{ C}$$

Stąd z prawa Coulomba siła elektryczna oddziaływania między samochodami ma wartość:

$$F = \frac{kq^2}{r^2} \approx 2 \cdot 10^{25} \text{N}$$

Ponieważ z obu samochodów usunięto elektrony, na każdym został zgromadzony ładunek dodatni. Zatem samochody by się odpychały.

Odpowiedź: Samochody odpychałyby się siłą równą ok. $2 \cdot 10^{25}$ N.

Uwaga. Siła, jaką odpychałyby się samochody, byłaby równa ciężarowi na powierzchni Ziemi ciała o masie 28 razy większej od masy Księżyca. Widać stąd, że ładunek ciał, z którymi mamy do czynienia, nigdy nie jest tak duży. Podczas elektryzowania się ciał odpływa raczej jeden elektron na bilion niż jeden na sto.

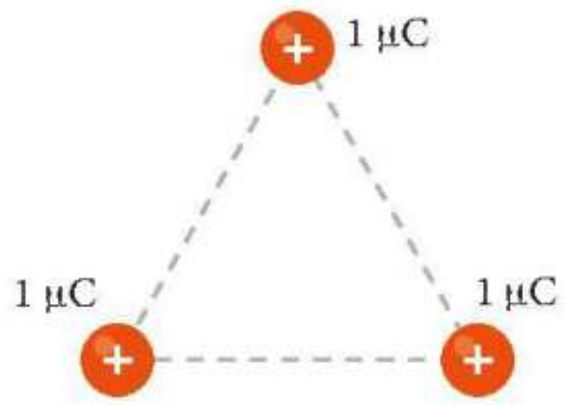
1. Gdy z rolki taśmy klejącej oderwiemy kawałek taśmy, rolka elektryzuje się dodatnio, a oderwany kawałek – ujemnie. Narysuj w zeszycie, jak rozkładają się ładunki w skrawku folii aluminiowej, a jak w skrawku papieru, gdy zbliży się do nich naelektryzowaną rolkę.

2. Oblicz wartość siły działającej między dwiema naładowanymi piłeczkami pingpongowymi o ładunkach –30 nC, odległymi o 80 cm.

3. Dwa ładunki: 5 μC i 3 μC, są odległe od siebie o 0,25 m. Oblicz, w którym miejscu na łączącym je odcinku należy umieścić ładunek ujemny, aby wypadkowa sił działających na ten dodatkowy ładunek była równa zero.

4. Opisz sytuację, w której dwa ciała przyciągają się, mimo że ich ładunki elektryczne mają jednakowy znak. Przedstaw ją w zeszycie za pomocą schematycznej ilustracji.
Wskazówka. Rozważ, jak rozłożone są ładunki w obu ciałach.

5*. W wierzchołkach trójkąta równobocznego umieszczono takie same ładunki 1 μC. Wyznacz geometrycznie punkt wewnątrz trójkąta, w którym należy umieścić czwarty ładunek, aby działające na niego siły się równoważyły.



Rozważania przeprowadź przy założeniu, że:

a) ładunek jest równy +1 μC,

b) ładunek jest ujemny i równy –1 μC.

Skomentuj uzyskane wyniki.

12.3. Pole elektryczne

Przypomnij sobie

- Siły elektryczne działają na odległość.
- Siły elektryczne działają również wtedy, gdy między ładunkami znajduje się próżnia.



Rys. **12.11.** Kiedy człowiek jest mocno naelektryzowany, jego włosy stają w przybliżeniu zgodnie z liniami pola elektrycznego

Pole elektrostatyczne to inna nazwa pola wytworzonego przez ładunki znajdujące się w spoczynku.

Dwa opisy oddziaływania elektrycznego

Do tej pory na lekcjach opisywaliśmy oddziaływanie elektryczne jako siły działające na odległość między dwoma naładowanymi ciałami, bez bezpośredniego kontaktu, nawet jeśli między tymi ciałami znajduje się próżnia.

Możliwość takiego oddziaływania początkowo była przez fizyków kwestionowana. Nie mogli oni zrozumieć, w jaki sposób ciała mogą działać na siebie siłami, skoro dzieli je duża odległość i nie są one niczym połączone.

We współczesnej fizyce oddziaływanie ładunków opisuje się za pomocą **pola elektrycznego**.

Wokół każdego ładunku elektrycznego jest **pole elektryczne**. Na umieszczony w nim inny ładunek działa siła elektryczna.

W ten sposób nie mówimy o oddziaływaniu na odległość bez żadnego pośrednictwa, ponieważ w oddziaływaniu między ładunkami pośredniczy pole.

Pole elektryczne nie jest tylko teoretycznym zabiegiem służącym do opisu działania sił. Jest ono tak samo realne jak ciała fizyczne. W następnej części podręcznika (czyli czwartej) przekonamy się, że to właśnie pojęcie pola pozwala wyjaśnić rozchodzenie się fal elektromagnetycznych, w tym światła.

Źródło pola i ładunek próbny

Ładunek wytwarzający pole elektryczne nazywamy **źródłem pola**. Będziemy go oznaczać literą Q.

W celu zbadania pola elektrycznego umieszcza się w nim drugi ładunek, zwany **ładunkiem próbnym**. Oznaczymy go jako q. Musi być on na tyle mały, aby nie przesunąć ładunków będących źródłem pola, a tym samym nie spowodować zmiany tego pola.

Przyjmuje się, że ładunek próbny jest zawsze dodatni. Dzięki temu unikamy rozważania dwóch przypadków: ładunku dodatniego i ładunku ujemnego.

Natężenie pola

Łatwo jest określić, jak silne jest pole, jeśli możemy je porównać do innego pola, w którym umieścimy ten sam ładunek próbny. Za silniejsze uznamy to, w którym na ten sam ładunek działa większa siła.
Jeśli jednak chcemy opisać jedno pole, znajomość samej siły nam nie wystarczy. Na mniejszy ładunek w tym samym punkcie pola działa przecież mniejsza siła niż na większy ładunek.
Zatem do opisu pola, który jest niezależny od ładunku próbnego, będzie nam potrzebna inna wielkość.
Wielkość opisująca, jak silne jest pole elektryczne, niezależnie od znajdujących się w nim ładunków, nazywa się **natężeniem pola**.

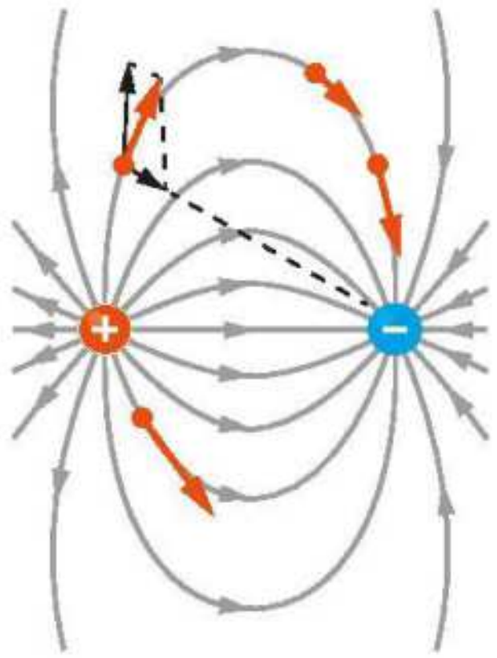
> Natężenie pola elektrycznego to iloraz wektora siły działającej na ładunek próbny i wartości tego ładunku:
>
> $$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

gdzie: $\vec{F}$ – siła działająca na ładunek próbny, q – ładunek próbny.

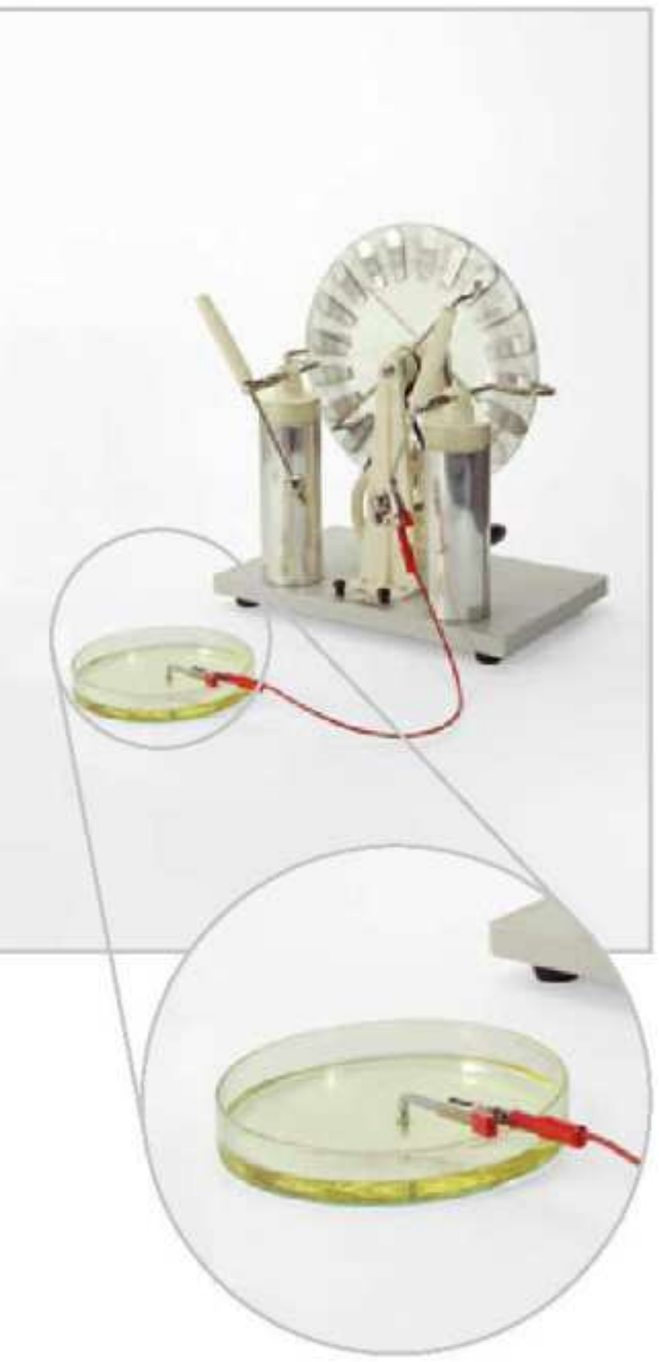
Zgodnie z powyższym wzorem możemy zapisać, że jednostką natężenia pola elektrycznego jest: $1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.
Na przykład natężenie pola $2\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ oznacza, że w tym polu na ładunek 1 C działa siła o wartości 2 N, a na ładunek 0,1 C – siła o natężeniu 0,2 N.
Wektor natężenia pola jest skierowany tak samo jak wektor siły działającej na ładunek próbny (dodatni). Jeśli więc widzimy na rysunku wektor natężenia pola, możemy myśleć o jego kierunku i zwrocie jako o kierunku i zwrocie siły działającej na ładunek próbny.
Natężenie pola w danym punkcie nie zależy jednak od ładunku próbnego. Jeśli weźmiemy np. 2 razy większy ładunek, to będzie na niego działała 2 razy większa siła, czyli iloraz $\frac{F}{q}$ pozostanie bez zmian.

Linie pola elektrycznego

Pole elektryczne można zilustrować za pomocą **linii pola**. Jaki jest ich sens fizyczny? Otóż wektor natężenia pola jest w każdym miejscu styczny do tych linii. Innymi słowy, gdy umieścimy w polu ładunek próbny, to będzie na niego działać siła o kierunku stycznym do linii pola przechodzącej przez dany punkt (rys. 12.12).
Strzałki na liniach pola wskazują zwrot wektora natężenia pola, a więc również zwrot siły działającej na ładunek próbny.
Linie pola elektrycznego są oczywiście niewidzialne, jednak pośrednio możemy je obserwować. W tym celu wykonajmy doświadczenie przedstawione na następnej stronie.



Rys. **12.12.** Linie pola elektrycznego wytworzonego przez dwa ładunki różnoimienne o jednakowej bezwzględnej wartości oraz wektory natężenia pola w różnych punktach



Doświadczenie 5 – obowiązkowe

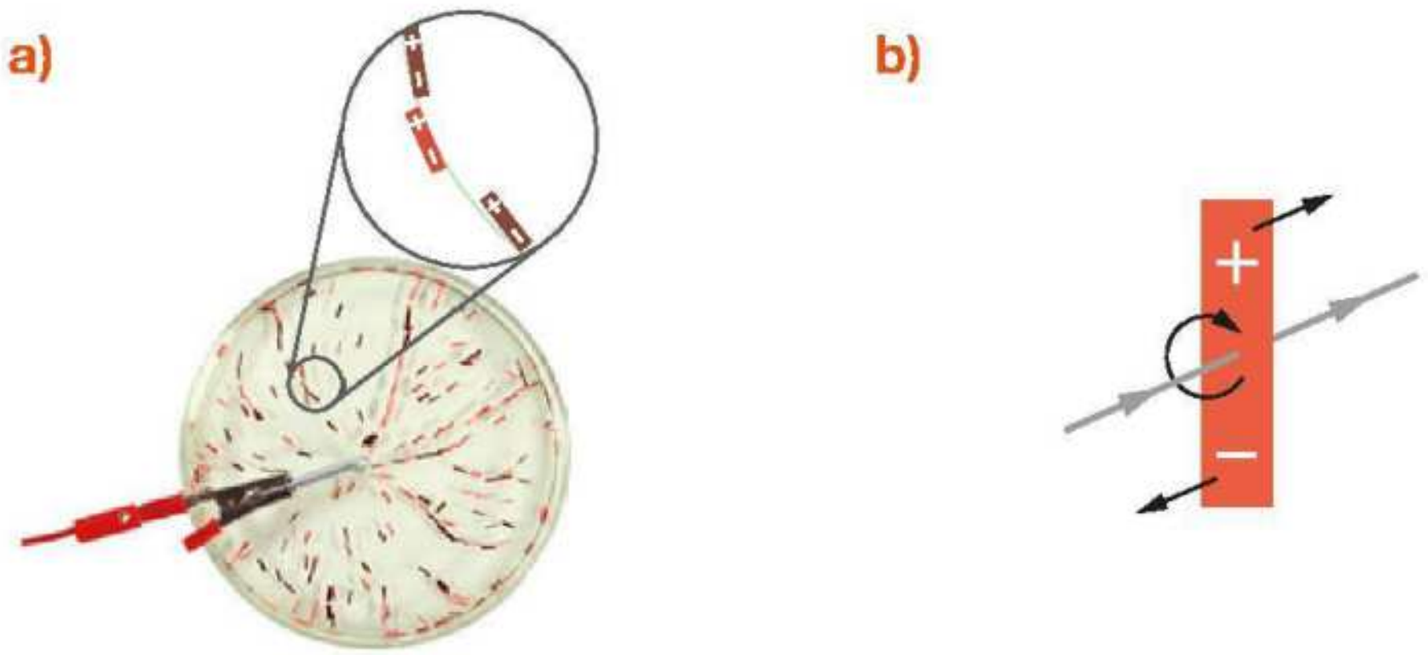
Badanie kształtu linii pola elektrycznego

1. Przygotuj naczynie – najlepiej szalkę Petriego (ew. biały głęboki talerz z porcelany), maszynę elektrostatyczną (lub generator Van de Graaffa, ewentualnie rakietę na komary – patrz ramka na s. 90), dwie metalowe płytki (mogą być wykonane z kilkakrotnie złożonej folii aluminiowej), dwa metalowe pręty (np. grube gwoździe), olej spożywczy i skrawki drobno pociętej plastikowej wstążki do pakowania prezentów.

   Uwaga. Wyłączaj generator, zanim dotkniesz układu doświadczalnego. Nie kręć korbą maszyny, kiedy dotykasz układu.
2. Nalej do naczynia olej i wysyp na jego powierzchnię skrawki wstążki.
3. Umieść metalowy pręt pionowo pośrodku szalki Petriego i podłącz do maszyny. Włącz maszynę. Narysuj schematycznie, jak układają się skrawki wstążki na powierzchni oleju.
4. Przygotuj drugi metalowy pręt. Umieść pręty pionowo w naczyniu w pewnej odległości od siebie. Oba podłącz do tego samego bieguna maszyny. Włącz maszynę. Zilustruj schematycznie układ skrawków wstążki.
5. Ponownie wykonaj czynności opisane w punkcie 4., jednak tym razem podłącz pręty do przeciwnych biegunów maszyny.
6. Zamiast prętów podłącz do maszyny metalowe płytki. Umieść je w naczyniu równoległe do siebie i włącz maszynę. Co zaobserwowałeś? Sporządź schematyczny rysunek.

Dlaczego skrawki wstążki układają się wzdłuż linii pola? Zjawisko to jest podobne do przyciągania skrawków papieru przez naelektryzowany balonik (rys. 12.9 na s. 81). Pod wpływem sił elektrycznych elektrony w atomach, z których jest zbudowana wstążka, przesuwają się na jedną stronę. Wobec tego na jednym końcu wstążka staje się naładowana ujemnie, a na drugim – dodatnio. Siły elektryczne ustawiają taką wstążkę wzdłuż linii pola (rys. 12.13).

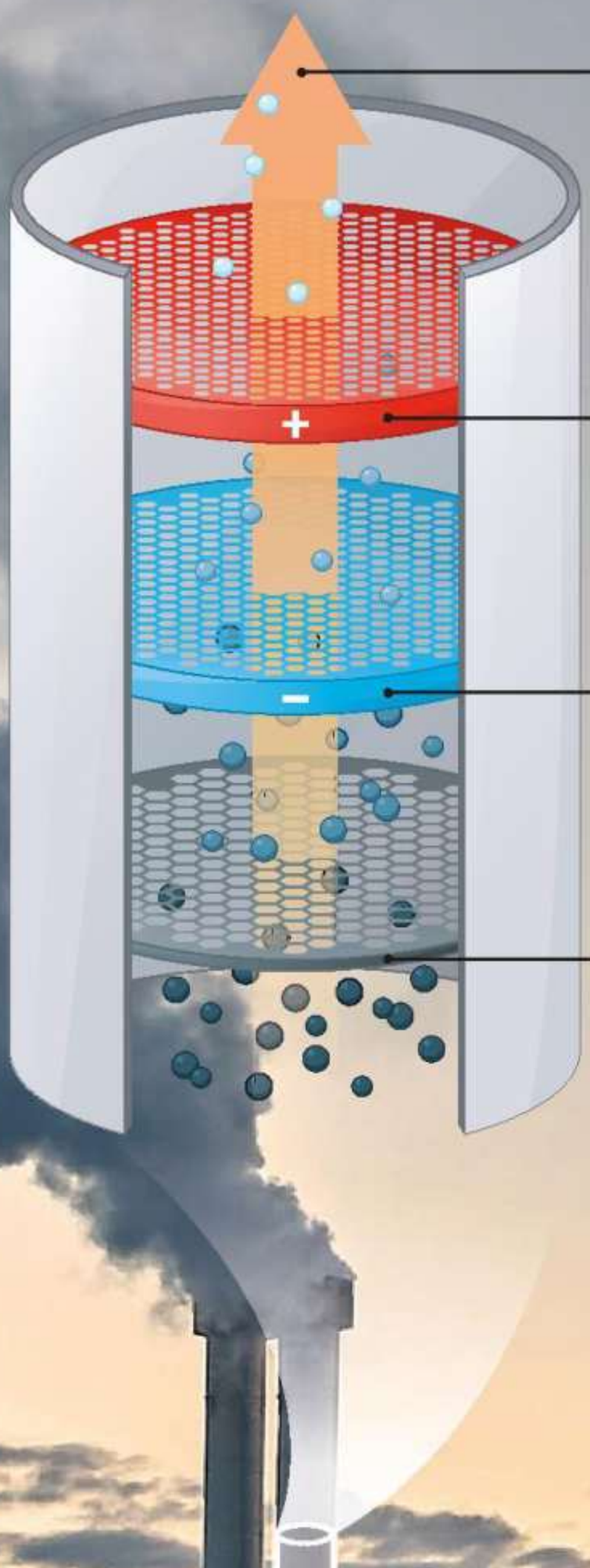
Skrawki nie przyczepiają się do naelektryzowanego pręta, tak jak to się dzieje w powietrzu, gdyż olej jest bardzo lepki i siła elektryczna nie wystarcza do pokonania oporów ruchu.



Rys. **12.13.** a) w polu elektrycznym na jednym końcu skrawka pojawia się ładunek ujemny, a na drugim dodatni, b) siły elektryczne ciągną dodatni koniec w jedną stronę, a ujemny w drugą, dlatego skrawek się obraca

Siły elektrostatyczne w elektrofiltrach

Dym zawiera nie tylko gazy, lecz także pyły, czyli bardzo drobne cząstki stałe. Do ich usuwania służą m.in. elektrofiltry. Podobne urządzenia, ale znacznie mniejsze, można stosować w domowych piecach, aby zapobiegać powstawaniu smogu.



4 Na zewnątrz wydostaje się oczyszczone powietrze.

3 **Pochłanianie naelektryzowanych drobin**

Ujemnie naelektryzowane drobiny przechodzą przez dodatnio naładowaną siatkę elektrod zbiorczych i są do nich przyciągane.

2 **Elektryzowanie drobin pyłu**

Następnie drobiny pyłu przechodzą przez siatkę elektrod naładowaną ujemnie i uzyskują ujemny ładunek elektryczny.

1 **Filtracja mechaniczna**

Pierwszy etap oczyszczania powietrza to filtracja mechaniczna polegająca na zatrzymywaniu większych drobin pyłów przez odpowiednie warstwy filtra.

Alternatywne źródło wysokiego napięcia

Jeśli nie masz do dyspozycji ani generatora Van de Graaffa, ani maszyny elektrostatycznej, możesz użyć rakiety na komary. Jest to przyrząd podobny do rakiety tenisowej, jednak zamiast plastikowej siatki ma dwie siatki metalowe, między którymi po przyciśnięciu przycisku pojawia się wysokie napięcie. Do siatek możemy podłączyć przewody za pomocą spinaczy biurowych lub tzw. krokodylków. W rakietach innego typu siatki są trzy – dwie zewnętrzne stanowią jeden biegun, a wewnętrzna drugi. Wówczas do wewnętrznej siatki najwygodniej podłączyć przewód pozbawiony izolacji na krótkim odcinku (jak na zdjęciu poniżej).





Pamiętaj, że siatek i przewodów nie wolno dotykać, gdy przycisk jest wciśnięty!

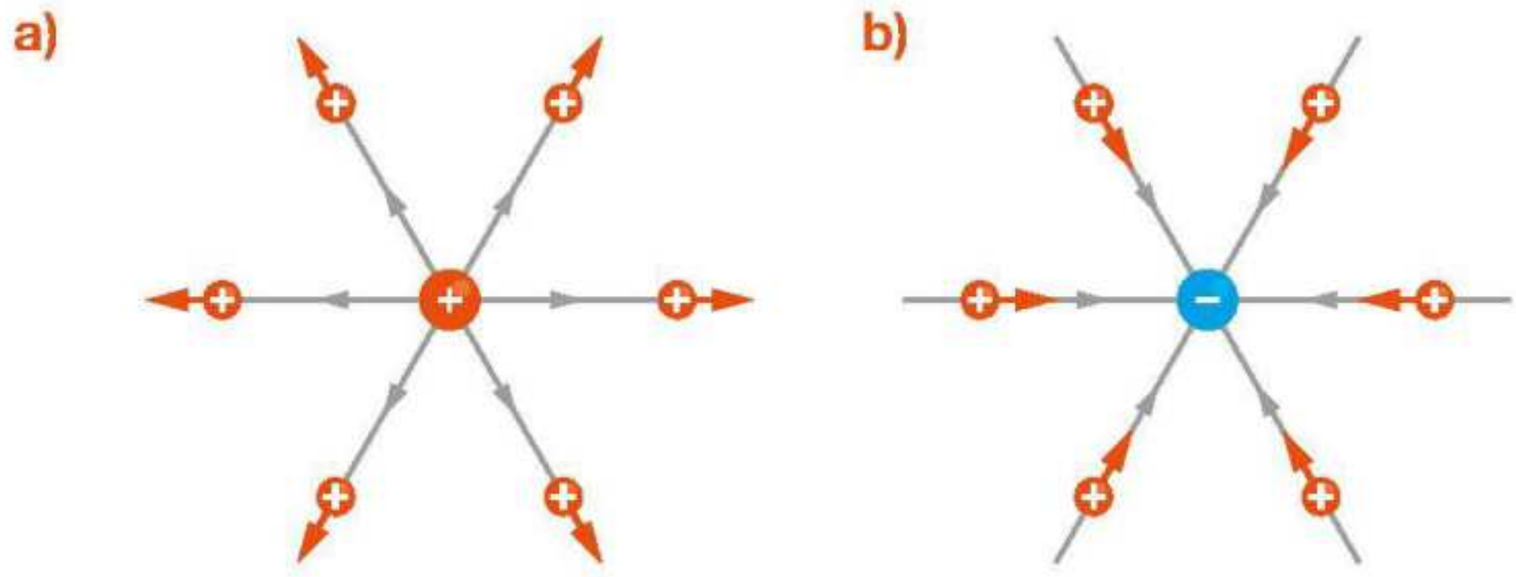
Ładunek utrzymuje się jeszcze przez jakiś czas nawet po wyłączeniu urządzenia, więc najlepiej rozładować je poprzez zwarcie siatki lub przewodów śrubokrętem z plastikową rączką.

Rakieta wytwarza nieco niższe napięcie niż generator Van de Graaffa albo maszyna elektrostatyczna, dlatego do doświadczenia zamiast skrawków wstążki użyj drobno zmielonego pieprzu, a zamiast oleju spożywczego – oliwki dla niemowląt, która jest od niego mniej lepka.

Pole centralne

Rozważmy najpierw pole, którego źródłem jest pojedynczy ładunek. Jak zaobserwowaliśmy w doświadczeniu 5. (s. 88), jego linie rozchodzą się promieniście ze źródła pola (rys. 12.14).

> Pole wytwarzane przez pojedynczy ładunek nazywamy polem centralnym.



Rys. **12.14.** Zwrot linii pola, gdy źródłem jest: a) ładunek dodatni, b) ładunek ujemny

Dlaczego linie pola elektrycznego mają taki kształt? Gdy w pobliżu ładunku Q (miejsca, gdzie pręt przecina powierzchnię oleju) znajduje się ładunek próbny q (dodatni ładunek na skrawku plastikowej wstążki),

działa na niego siła skierowana **wzdłuż prostej łączącej oba ładunki**. Dla ujemnego ładunku Q jest to siła przyciągająca, a dla dodatniego ładunku Q – siła odpychająca.
Aby odróżnić przypadki przyciągania i odpychania, na liniach pola zaznaczamy strzałkami ich zwrot, który zawsze jest zgodny ze zwrotem wektora natężenia pola (zatem także ze zwrotem siły działającej na ładunek próbny, który z definicji jest dodatni).
Wartość natężenia pola wytworzonego przez pojedynczy ładunek Q w odległości r od tego ładunku można obliczyć z prawa Coulomba:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{(k\frac{|qQ|}{r^2})}{q} = k\frac{|Q|}{r^2}$$

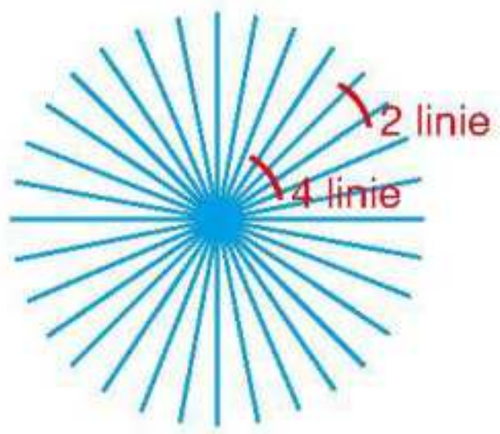
Wynika z tego, że wartość natężenia centralnego pola elektrycznego jest wprost proporcjonalna do ładunku źródła pola i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości punktu, w którym badamy pole, od źródła.

Zagęszczenie linii a natężenie pola

Zauważmy, że na naszych rysunkach (np. na rys. 12.14 na stronie obok) linie pola są tym bardziej zagęszczone, im bliżej źródła się znajdują. A przecież bliżej źródła pole jest silniejsze.

> Linie pola rysujemy tak, że większemu natężeniu pola odpowiada większe zagęszczenie linii.

Zwróćmy uwagę, że na płaskim rysunku wydaje się, że zagęszczenie linii pola maleje wolniej z odległością od źródła niż to ma miejsce w rzeczywistości w przestrzeni trójwymiarowej (rys. 12.15). Na płaszczyźnie, gdy nasza odległość od źródła wzrośnie trzykrotnie, zagęszczenie linii również zmniejszy się trzykrotnie. W rzeczywistości, w przestrzeni, zagęszczenie to zmniejszy się aż 9 razy.



Rys. **12.15.** Na płaszczyźnie dwukrotne zwiększenie odległości powoduje dwukrotne zmniejszenie zagęszczenia linii, ale w rzeczywistości – czterokrotne

Pole jednorodne

Z innym przypadkiem mieliśmy do czynienia, gdy źródłem pola były dwie przeciwnie naładowane płytki (dośw. 5 pkt 6 s. 88). W tym przypadku mogliśmy zaobserwować, że linie pola były równoległe (gdy pominiemy brzegi płytek). Nie zmieniało się też ich zagęszczenie. W takim razie natężenie pola było jednakowe w całym obszarze między płytkami.

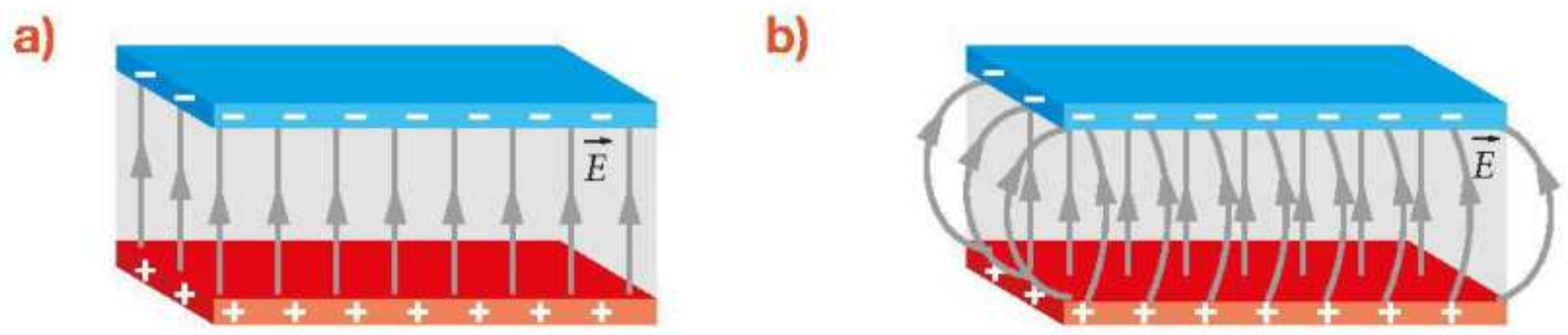
> Pole, którego natężenie jest stałe (co do wartości, kierunku i zwrotu), nazywamy polem jednorodnym.



Rys. **12.16.** Skrawki wstążki układają się wzdłuż linii pola elekrycznego wytworzonego przez dwie równoległe płytki

Ściślej mówiąc, całkowicie jednorodne byłoby pole pomiędzy dwiema równoległymi i nieskończonymi płaszczyznami. Linie tego pola byłyby

idealnie równoległe, a natężenie w każdym jego punkcie – takie samo. Z kolei na zewnątrz płytek nie byłoby pola, gdyż pole jednej płytki równoważyłoby się z polem drugiej (rys. 12.17a).
W przypadku rzeczywistych, skończonych płytek pole jest w dobrym przybliżeniu jednorodne z dala od ich brzegów. W pobliżu brzegów płytek linie pola zakrzywiają się nieco na zewnątrz (rys. 12.17b).
Na koniec zwróćmy uwagę, że choć pole jednorodne i centralne to dwa ważne i najczęściej rozpatrywane przypadki, oprócz nich istnieje jeszcze nieskończenie wiele innych możliwości. Na przykład pole wytwarzane przez dwa (rys. 12.12 s. 87) lub kilka ładunków nie jest ani polem centralnym, ani jednorodnym. Takie pole omówimy w następnej lekcji.



Rys. **12.17.** Linie pola elektrycznego: a) w idealnym przypadku – między nieskończonymi płaszczyznami, b) między naładowanymi płytkami

Po tej lekcji powinieneś

- rozumieć pojęcie pola elektrycznego i rozróżniać pole centralne i jednorodne;
- obliczać wartość natężenia pola elektrycznego, określać jego kierunek i zwrot;
- przedstawiać pole elektryczne za pomocą linii pola;
- demonstrować doświadczalnie linie pola elektrycznego.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Małą metalową kulkę o masie $m = 3$ g i promieniu $r = 0{,}5$ cm, naładowaną ładunkiem $q = +3{,}4$ nC, zawieszono na nici o długości $l = 30$ cm umieszczonej między równoległymi płytami P_1 i P_2, wytwarzającymi pole jednorodne o natężeniu $E = 5 \cdot 10^6 \frac{N}{C}$. Kulka wisi w położeniu równowagi odchylona od pionu o kąt α. Oblicz miarę tego kąta.

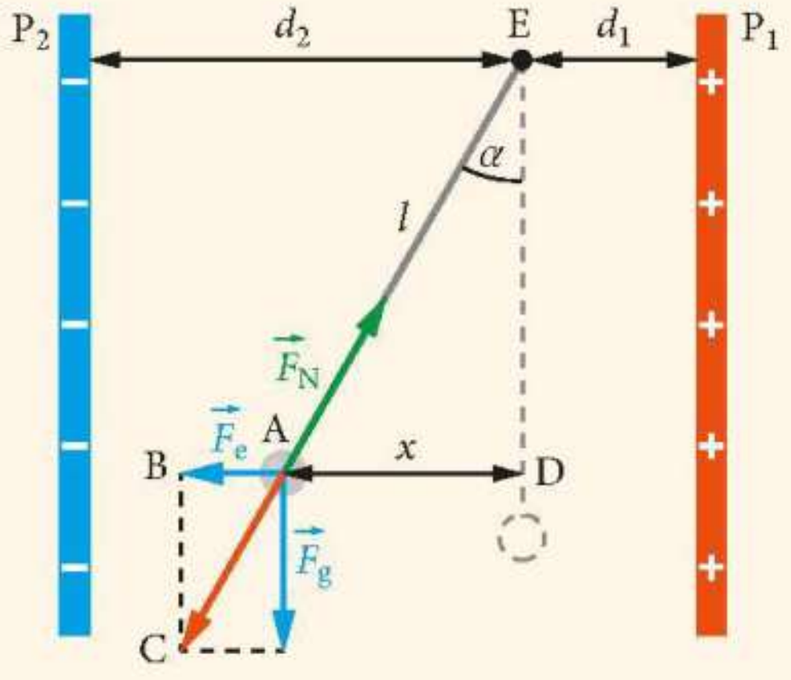
Rozwiązanie

W położeniu równowagi suma wszystkich sił działających na kulkę wynosi zero, wypadkowa sił $\vec{F}_e$ i $\vec{F}_g$ jest więc równa co do wartości sile $\vec{F}_N$.
Trójkąty ABC i ADE są podobne, z czego wynika, że:

$$\frac{AB}{BC} = \frac{AD}{DE}$$

Oznacza to, że:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{AD}{DE} = \operatorname{tg}\alpha$$



Po podstawieniu $F_g = mg$ i $F_e = qE$, otrzymujemy:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{qE}{mg}$$

Po podstawieniu danych liczbowych obliczamy:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{3{,}4 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C} \cdot 5 \cdot 10^{6}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}}{0{,}003\,\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}} \approx 0{,}578$$

więc miara kąta α wynosi ok. 30°.

Odpowiedź: Kąt α ma miarę ok. 30°.

1. Na ładunek 4 nC umieszczony w pewnym punkcie działa siła 8 mN.

a) Oblicz natężenie pola elektrycznego w tym punkcie.

b) Oblicz wartość siły działającej w tym samym punkcie na ładunek 1 nC.

2. Naelektryzowanym balonikiem dotknięto małej metalowej kulki. Dzięki temu zyskała ona ładunek –2 nC. Następnie balonik odsunięto na dużą odległość.

a) Naszkicuj w zeszycie linie pola wytworzonego przez ładunek kulki. Pamiętaj o ich zwrotach.

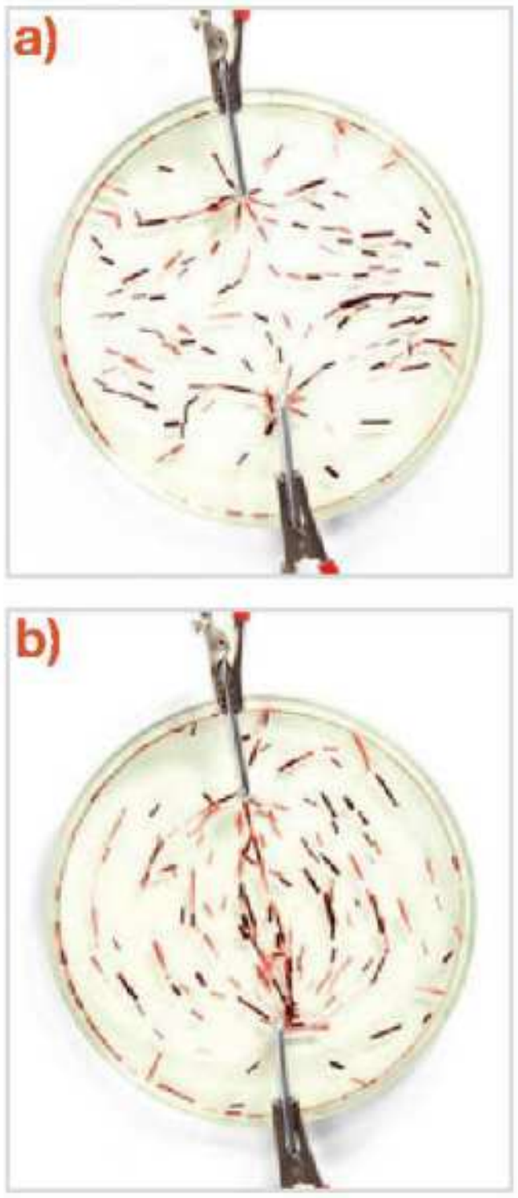
b) Określ, czy jest to pole jednorodne, centralne, czy też nie należy do żadnego z tych rodzajów.

c) Oblicz natężenie tego pola w odległości 20 cm od źródła.

3. Oblicz natężenie pola elektrycznego, które powstrzymałoby swobodny spadek elektronu przy powierzchni Ziemi. Potrzebne dane liczbowe odszukaj w podręczniku lub tablicach fizycznych.

4. Linie jednorodnego pola elektrycznego są ułożone poziomo. W takim polu zawieszono na nici kulkę o masie 0,1 g, na której zgromadzono ładunek +5 nC. Kulkę puszczono swobodnie. Po wytłumieniu drgań kulka pozostała odchylona od pionu o 20°. Oblicz natężenie pola.

12.4. Pole elektryczne wielu źrodeł



Rys. **12.18.** Skrawki wstążki układają się wzdłuż linii pola elektrycznego wytworzonego przez dwa punktowe źródła pola:
a) o tym samym znaku,
b) o przeciwnych znakach

Ładunek punktowy to model, w którym rozmiary ładunku pomijamy.

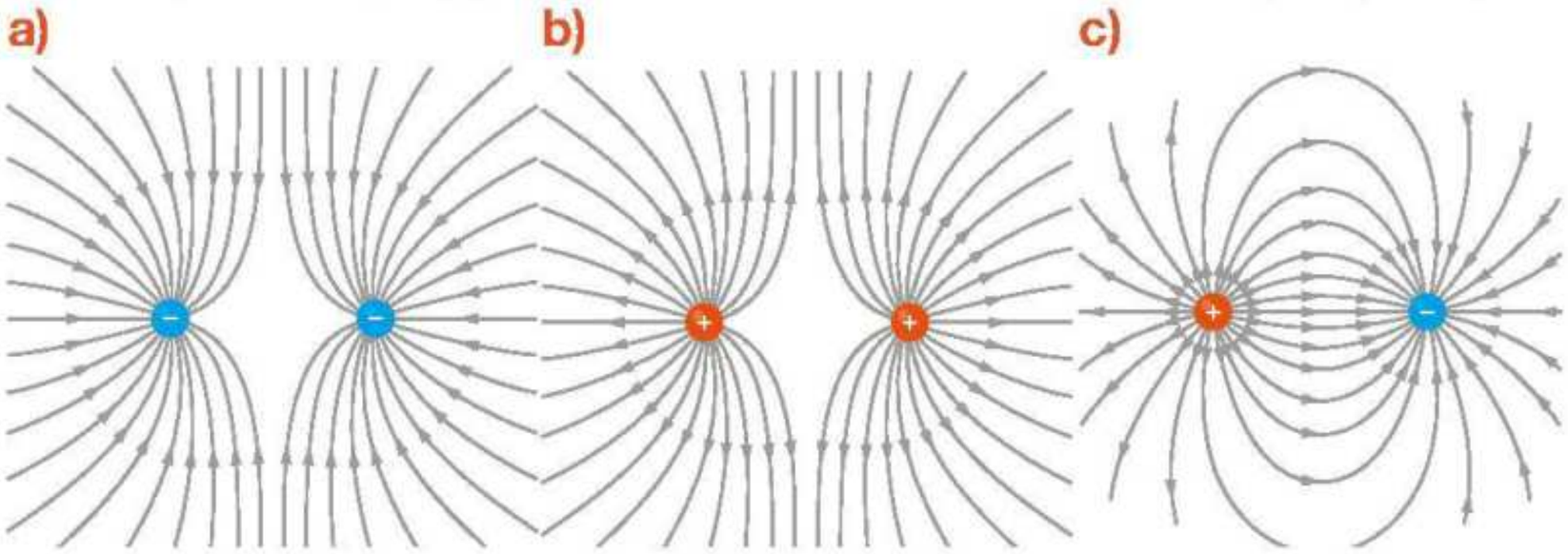
Przypomnij sobie

- Każdy ładunek elektryczny wytwarza wokół siebie pole elektryczne. Na umieszczony w nim inny ładunek działa siła elektryczna.
- Pole elektryczne ilustrujemy graficznie za pomocą linii pola.
- Natężenie pola elektrycznego $\vec{E}$ to stosunek siły $\vec{F}$ działającej na ładunek próbny do wartości tego ładunku $\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q}$.

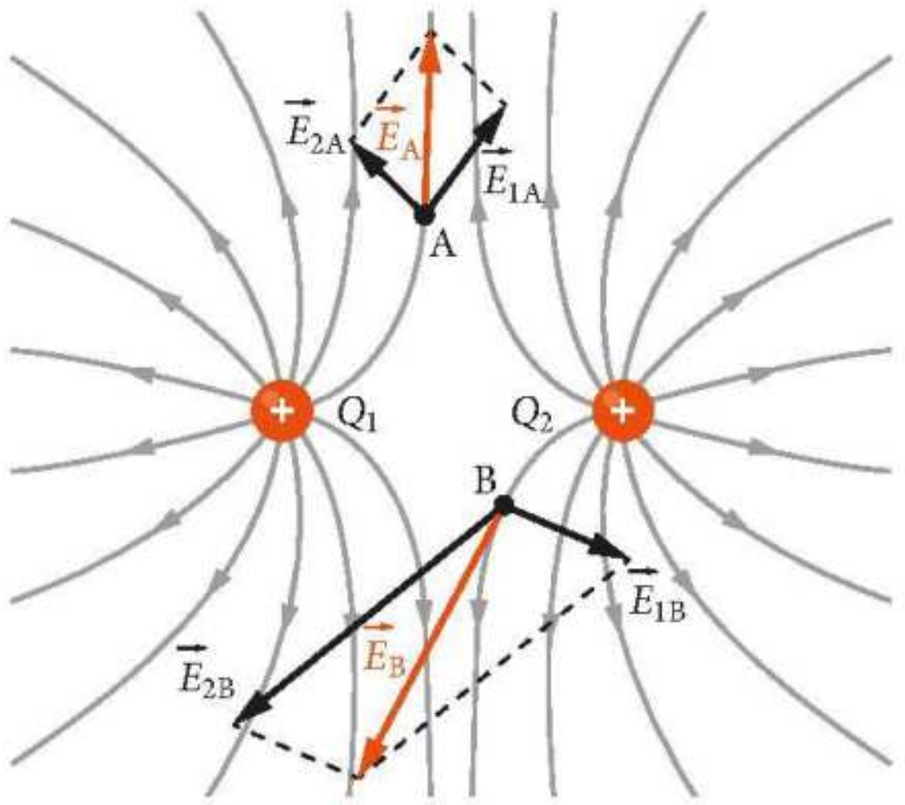
Pole wytwarzane przez dwa ładunki

Do tej pory omówiliśmy dwa rodzaje pola: centralne i jednorodne. Na tej lekcji przyjrzymy się polu, które badaliśmy w doświadczeniu 5 (s. 88) w punktach 4 i 5, czyli polu tworzonemu przez dwa ładunki punktowe o jednakowej wartości. Otrzymaliśmy obrazy podobne do przedstawionych na rys. 12.18.

Możemy je narysować schematycznie, tak jak na rys. 12.19. Pamiętajmy że linie pola zaczynają się w ładunkach dodatnich, a kończą w ujemnych.



Rys. **12.19.** Linie pola elektrycznego wokół dwóch ładunków o tej samej wartości i takim samym znaku (a i b) i o różnych znakach (c)

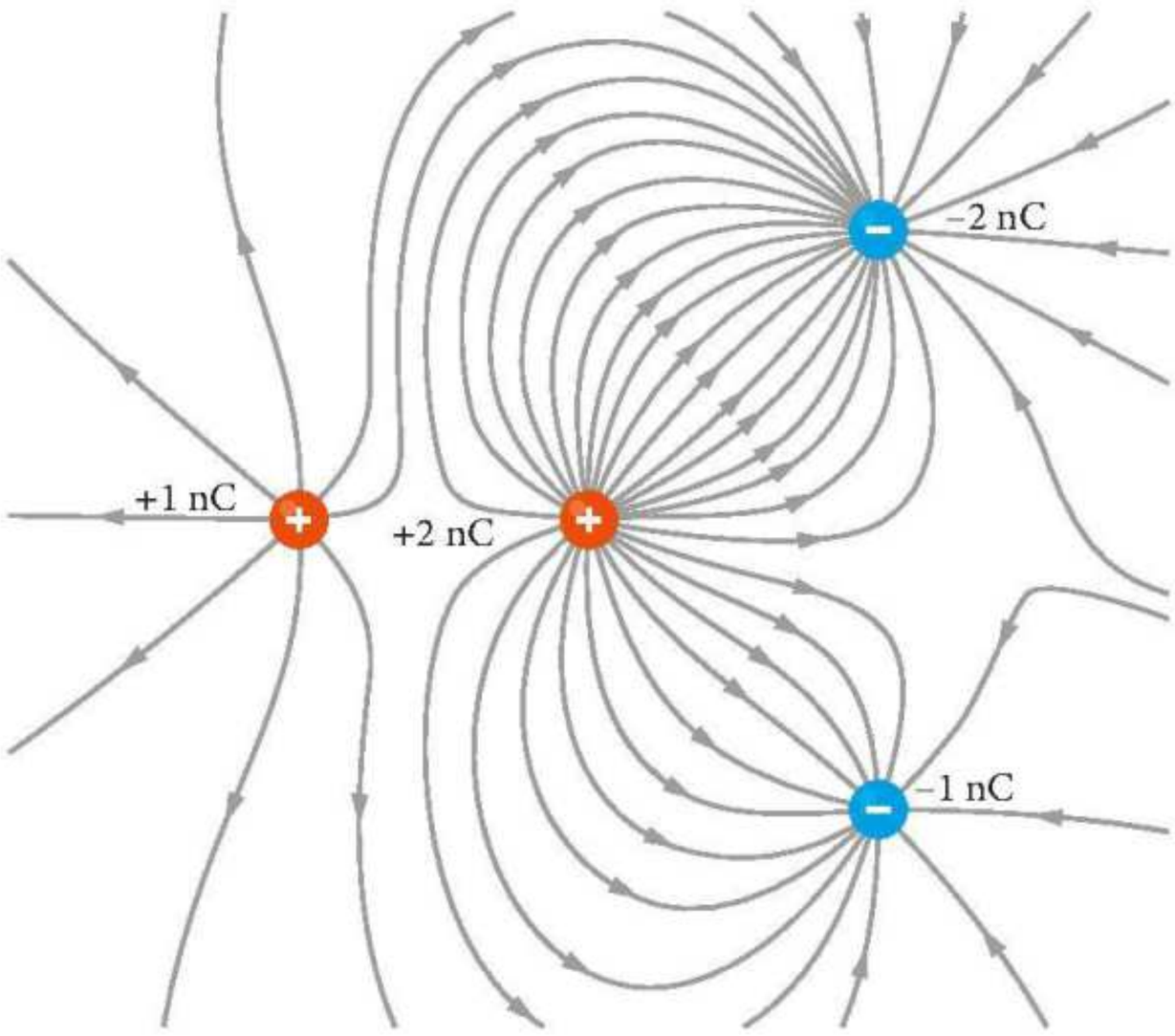


Rys. **12.20.** Natężenie pola w danym punkcie jest sumą natężeń od poszczególnych źródeł

Do takiego samego układu linii pola doszlibyśmy, gdybyśmy w każdym punkcie skonstruowali wektor natężenia pola będący sumą natężeń pól wytwarzanych przez poszczególne ładunki (rys. 12.20 na poprzedniej stronie).

Pole wytwarzane przez kilka ładunków

W doświadczeniu 5 zobaczyliśmy pole wytwarzane przez dwa ładunki. Jednak ładunków najczęściej jest więcej, a wtedy linie pola układają się w bardzo skomplikowany sposób (rys. 12.21).



Rys. **12.21.** Linie pola elektrycznego wokół czterech ładunków

Dlatego też, kiedy mamy do czynienia z większą liczbą ładunków, pole w określonym punkcie będziemy wyznaczać jako sumę pól pochodzących od poszczególnych ładunków.

Wypadkowa siła elektryczna działająca na ładunek próbny w danym punkcie jest równa sumie wektorów sił elektrycznych pochodzących od poszczególnych ładunków wytwarzających pole:

$$\vec{F}_w = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n$$

Wynika stąd, że:

$$\frac{\vec{F}_w}{q} = \frac{\vec{F}_1}{q} + \frac{\vec{F}_2}{q} + \ldots + \frac{\vec{F}_n}{q}$$

Wypadkowe natężenie pola elektrycznego wynosi zatem:

$$\vec{E}_w = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n$$

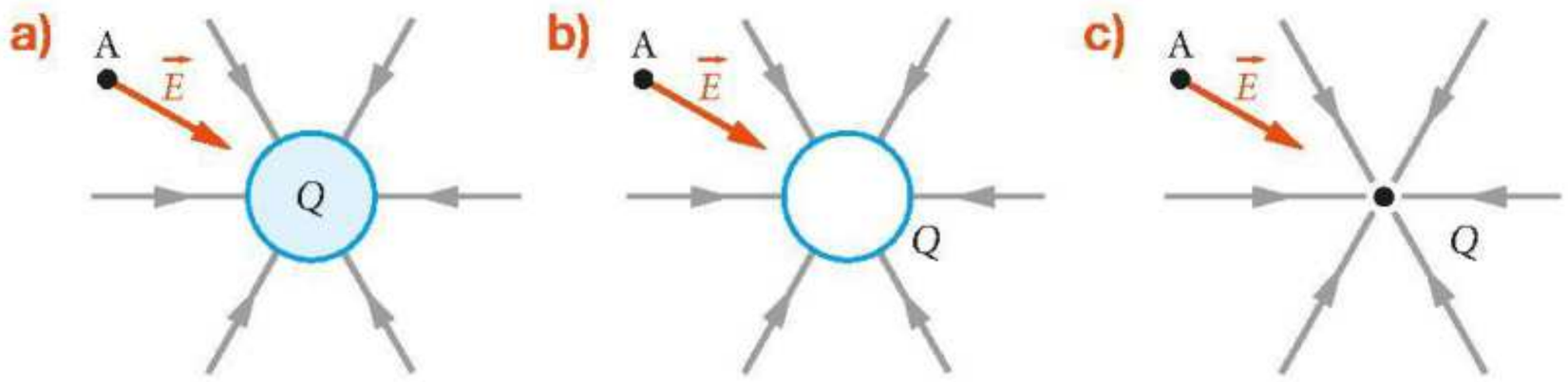
Natężenie pola elektrycznego wytworzonego przez kilka ładunków możemy więc obliczyć w każdym punkcie przestrzeni jako sumę wektorów natężeń pól wytworzonych w tym punkcie przez każdy ładunek z osobna.

Pole wokół kuli lub sfery

W wielu doświadczeniach nie możemy pomijać rozmiarów ciała, na którym jest zgromadzony ładunek, np. kiedy mamy do czynienia z naładowaną kulą.

Jakie pole wytwarza ciało, którego ładunek jest rozmieszczony równomiernie i symetrycznie, tak jak np. w kuli lub sferze – na zewnętrznej powierzchni kuli? Okazuje się, że pole wytwarzane przez takie ciało po jego zewnętrznej stronie jest takie samo, jakie miałoby to ciało, gdyby cały ładunek był zgromadzony w jego środku. W tym przypadku mamy więc również do czynienia z polem centralnym (rys. 12.22).

Jeśli kula jest wykonana z przewodnika, zbliżony ładunek może spowodować przemieszczenie się ładunków na sferze i zaburzenie równomiernego rozkładu. Zakładamy jednak, że ładunek próbny jest mały i możemy pominąć ten efekt.



Rys. 12.22. Ciało sferycznie symetryczne o równomiernie rozmieszczonym ładunku – zarówno kula (a), jak i sfera (b) – wytwarza na zewnątrz takie pole jak ładunek punktowy (c) umieszczony w jego środku. Natężenie pola w punkcie A w każdym przypadku będzie takie samo

Po tej lekcji powinieneś

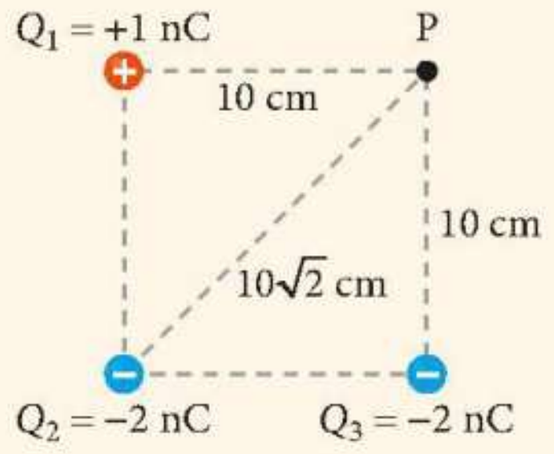
- wyznaczać natężenie pola wytwarzanego przez układ kilku ładunków punktowych;
- wiedzieć, że jednorodnie naładowana sfera wytwarza takie samo pole, jakie wytwarzałby taki sam ładunek punktowy zgromadzony w jej środku.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

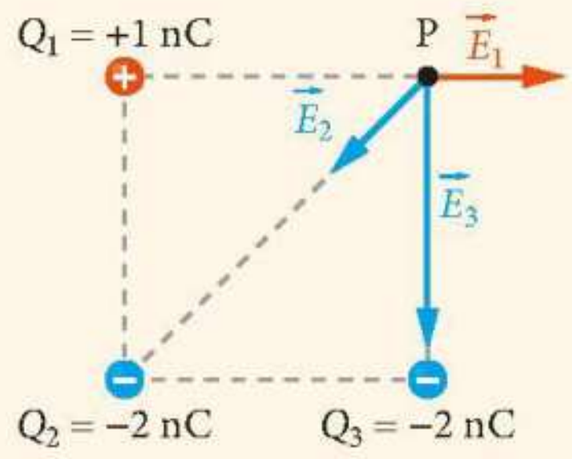
Przykład

W trzech wierzchołkach kwadratu o boku $r = 10$ cm umieszczono ładunki elektryczne, tak jak zaznaczono na rysunku. Wyznacz wektor natężenia pola elektrycznego w czwartym wierzchołku kwadratu, oznaczonym na rysunku jako punkt P.



Rozwiązanie

Jeśli w punkcie P umieścimy ładunek próbny, który z definicji jest dodatni, będzie on odpychany przez ładunek Q_1, a przyciągany przez pozostałe ładunki. Wektory natężenia pola będą miały taki sam kierunek i zwrot jak wektory siły.



Wartość wektora E_1 wyznaczamy z zależności:

$$E_1 = \frac{kQ_1}{r^2}$$

Stąd po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$E_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{10^{-9}\,\mathrm{C}}{(0{,}1\,\mathrm{m})^2} = 900\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Wartości E_2 i E_3 można obliczyć z tego samego wzoru lub zauważyć że:

- $|Q_3| = 2|Q_1|$ i punkt P znajduje się w takiej samej odległości do ładunków Q_3 i Q_1, czyli:

$$E_3 = 2E_1 = 1800\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

- $|Q_2| = |Q_3|$ i punkt P znajduje się $\sqrt{2}$ raza dalej od ładunku Q_2 niż Q_3, czyli:

$$E_2 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 E_3 = \frac{1}{2}E_3 = E_1 = 900\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

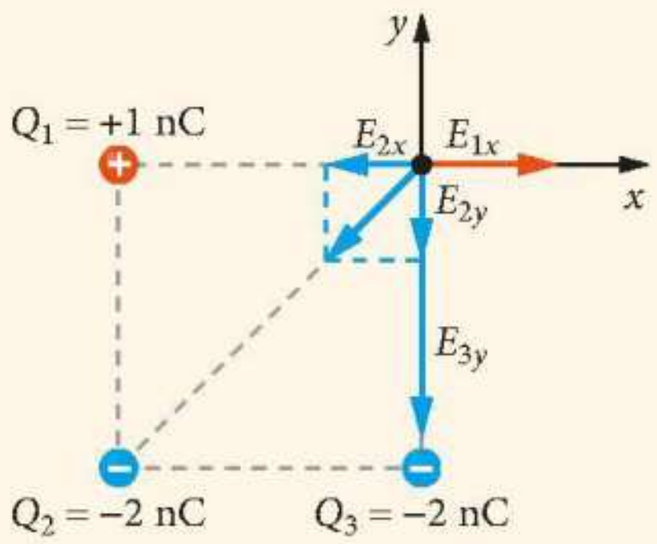
(siła elektryczna i natężenie pola maleją z kwadratem odległości).

Ponieważ kierunki wektorów są różne, wprowadźmy układ współrzędnych (patrz rys. obok). Wektor $\vec{E}_1$ ma kierunek i zwrot osi x, więc jego współrzędne wynoszą:

$$E_{1x} = E_1 = 900\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

$$E_{1y} = 0$$

Wektor $\vec{E}_3$ ma kierunek osi y, ale przeciwny zwrot, więc jego współrzędne wynoszą:



$$E_{3x} = 0$$

$$E_{3y} = -E_3 = -1800\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Współrzędne wektora $\vec{E}_2$ mają równe wartości bezwzględne, ponieważ wektor ten jest skierowany pod kątem 45° do każdej z osi. Obie współrzędne mają znak ujemny:

$$E_{2x} = E_{2y} = -\frac{E_2}{\sqrt{2}} \approx -636\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Wektor całkowitego natężenia pola ma więc współrzędne:

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} + E_{3x} = 900\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} + \left(-636\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\right) + 0 = 264\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} + E_{3y} = 0 + \left(-1800\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\right) + \left(-636\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\right) = -2436\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

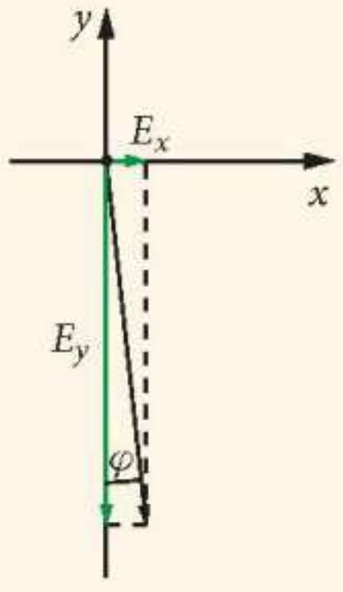
Zgodnie z twierdzeniem Pitagorasa wartość wektora E wynosi:

$$E = \sqrt{\left(264\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\right)^2 + \left(2436\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\right)^2} \approx 2450\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Tangens kąta φ między tym wektorem a osią y to:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{|E_x|}{|E_y|} = \frac{264}{2436} \approx 0{,}11$$

więc kąt wynosi: $\varphi \approx 6{,}2°$.



Odpowiedź: Wektor natężenia pola elektrycznego ma we wskazanym punkcie wartość ok. 2450 $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$, jest skierowany tak jak na rysunku obok, pod kątem ok. 6,2° do boku kwadratu.

Zadania s. 98

Pytania i zadania

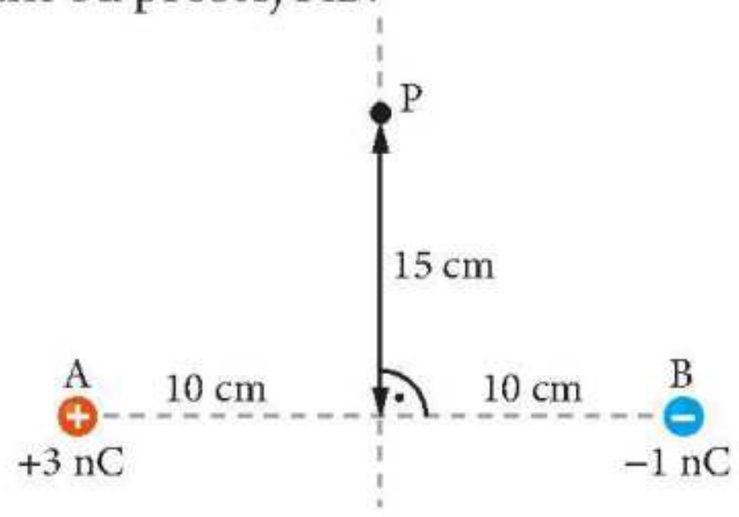
1. Dwa ładunki, 0,25 nC i 0,5 nC, znajdują się w odległości 1 m od siebie.

a) Oblicz natężenie pola w połowie łączącego je odcinka.

b) Znajdź na odcinku łączącym te ładunki punkt, w którym natężenie pola wynosi zero.

c) Opisz, co się stanie z ładunkiem próbnym umieszczonym na odcinku łączącym dane ładunki. Jak to zależy od położenia ładunku?

2. Ładunek +3 nC oraz ładunek −1 nC znajdują się odpowiednio w punktach A i B, położonych w odległości 20 cm od siebie. Wyznacz wektor natężenia pola w punkcie P leżącym na symetralnej odcinka AB w odległości 15 cm od prostej AB.



3. Rozważmy ponownie układ ładunków opisany w przykładzie (w tej lekcji). Wyznacz wektor natężenia pola elektrycznego:

a) w środku kwadratu,

b) w połowie odcinka łączącego ładunki ujemne.

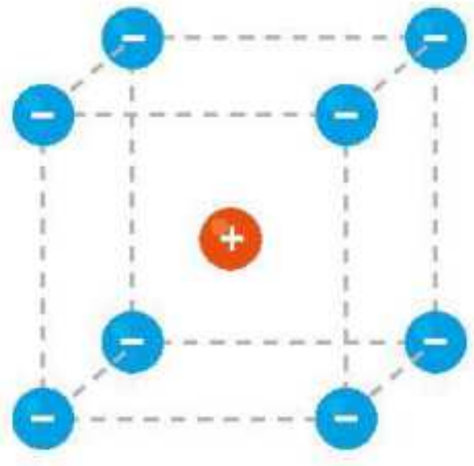
4. Znajdź w internecie program pozwalający rysować linie pola elektrycznego (ang. *electric field lines*). Za jego pomocą wykreśl i wydrukuj linie pola tworzone przez:

a) trzy ładunki dodatnie o jednakowej wartości umieszczone w trzech wierzchołkach kwadratu,

b) dwa ładunki ujemne i jeden dodatni o takiej samej wartości bezwzględnej umieszczone w trzech wierzchołkach kwadratu,

c) inny, wybrany przez siebie układ ładunków elektrycznych.

5*. W rogach sześcianu znajdują się ładunki o jednakowych wartościach i znakach. Czy ładunek o przeciwnym znaku umieszczony w środku sześcianu będzie w stanie równowagi trwałej (równowaga trwała występuje wtedy, gdy ciało wychylone ze swojego położenia samoczynnie do niego wraca)? Skorzystaj z programu, o którym była mowa w zadaniu 4., i odpowiedz na pytanie, czy ładunek może się znaleźć w stanie równowagi trwałej w polu wytworzonym przez kilka inaczej ułożonych ładunków.



12.5. Energia potencjalna, potencjał i napięcie

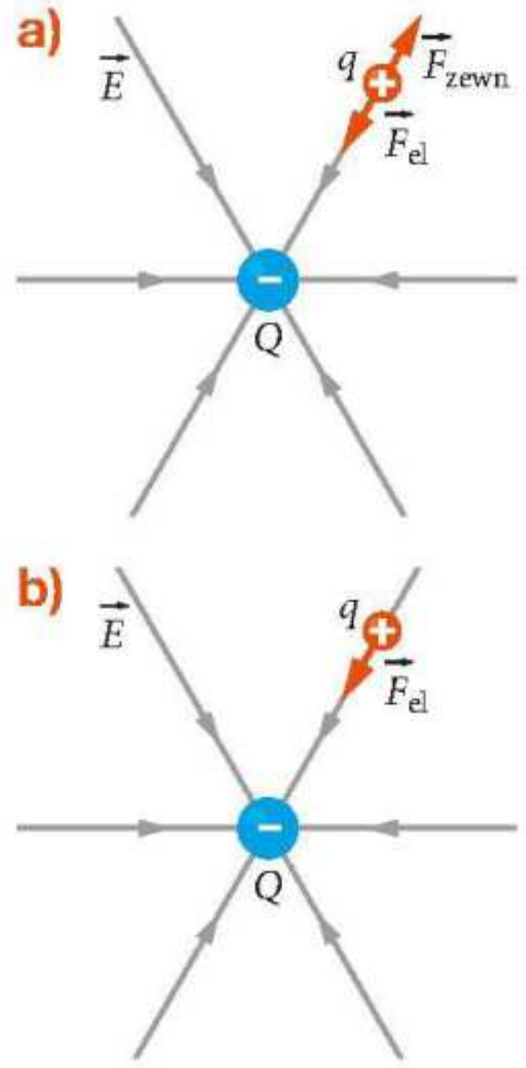
Przypomnij sobie

- Jeśli ciało może wykonać pracę, to mówimy, że ma energię.
- Energia związana z położeniem ciała to energia potencjalna.
- W pobliżu powierzchni Ziemi ciało o masie m ma energię potencjalną grawitacji $E_p = mgh$.
- W odległości r od ciała o masie M ciało o masie m ma energię potencjalną grawitacji $E_p = -G\frac{Mm}{r}$.

Wyobraźmy sobie ładunek próbny q w pobliżu naładowanego ujemnie źródła pola elektrycznego. Jeśli chcemy oddalić ładunek próbny od źródła pola, musimy działać siłą zewnętrzną $\vec{F}_{zewn}$ równoważącą przyciągającą siłę elektryczną $\vec{F}_{el}$. Siłą tą działamy na pewnej drodze, więc wykonujemy nad ładunkiem pracę (rys. 12.23a), dzięki której jego energia się zwiększa. Kosztem tej dodatkowej energii ładunek może wykonać pracę, kiedy przybliży się do źródła pola pod wpływem przyciągania (rys. 12.23b).

Tak więc w różnych punktach pola elektrycznego ładunek próbny ma różną energię. Dlatego możemy wyróżnić nową formę energii – **energię potencjalną ładunku w polu elektrycznym**, nazywaną również **elektrostatyczną energią potencjalną ładunku**.

Ponieważ siła elektryczna zależy od odległości między ciałami tak samo jak siła grawitacji, opis matematyczny obu form energii jest zbliżony.



Rys. 12.23. Aby oddalić ładunek próbny (dodatni) od źródła pola (ładunku ujemnego), trzeba wykonać pracę (a). Gdy ładunek próbny zbliża się do źródła, wykonuje pracę (b)

Energia potencjalna w jednorodnym polu elektrycznym

Jak wiesz, pole jednorodne występuje na przykład między dużymi metalowymi płytkami naelektryzowanymi przeciwnie, z dala od ich brzegów. W takim polu siła działająca na ładunek jest w każdym punkcie taka sama. Podobnie jest z siłą grawitacji w pobliżu powierzchni Ziemi.

Aby przesunąć ładunek próbny q od płytki ujemnej w stronę dodatniej, trzeba działać siłą o wartości:

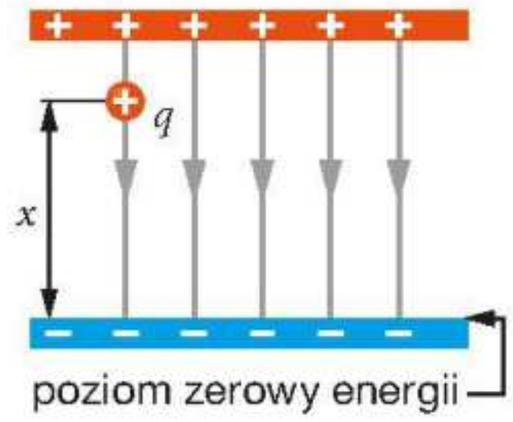
$$F = qE$$

równoważącą siłę elektyczną. Kiedy ładunek zostanie przesunięty o Δx, praca będzie równa:

$$W = qE \cdot \Delta x$$

O tyle samo wzrośnie też jego elektryczna energia potencjalna:

$$\Delta E_{pe} = qE \cdot \Delta x$$



Rys. **12.24.** Energia potencjalna ładunku w jednorodnym polu elektrycznym zależy od położenia ładunku

Elektryczna energia potencjalna, jak każdy rodzaj energii potencjalnej, zależy od tego, jaki poziom przyjmiemy za zerowy. W tym przypadku najwygodniej uznać, że jest nim poziom ujemnej płytki (rys. 12.24), podobnie jak w przypadku energii potencjalnej grawitacji za zerowy przyjmujemy często poziom ziemi. Przy takim założeniu znak energii będzie taki sam jak ładunku (np. dodatni w przypadku ładunku dodatniego).

Energię potencjalną ładunku q w jednorodnym polu elektrycznym o natężeniu E w odległości x od poziomu przyjętego za zerowy możemy wyrazić jako:

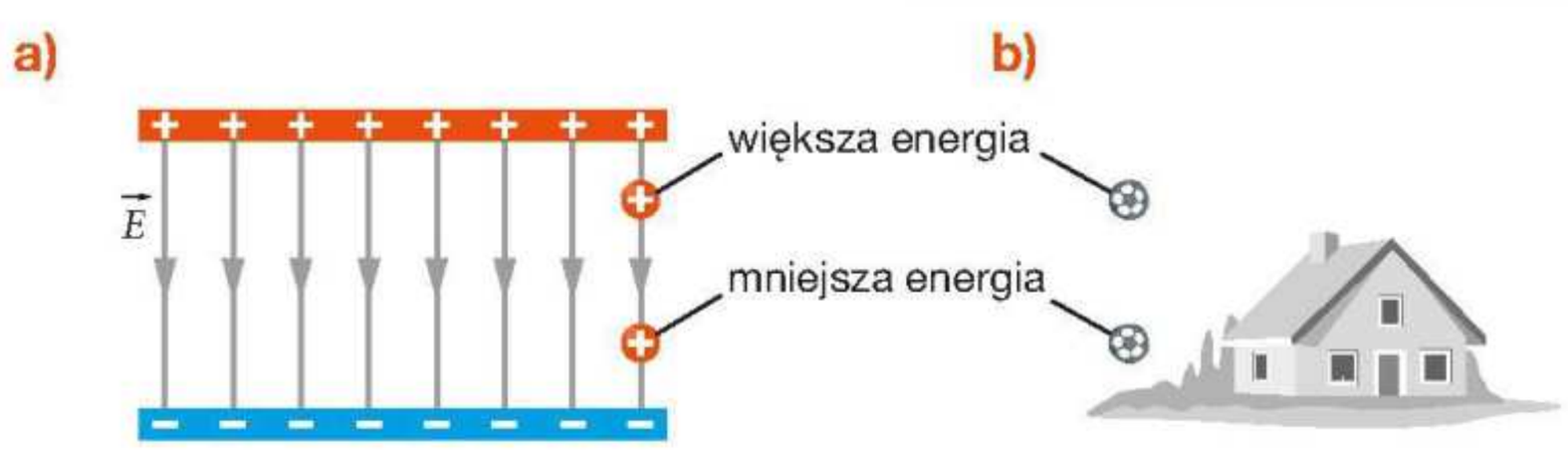
$$E_{pe} = qEx$$

Zapisany wzór przyjmuje postać analogiczną do wzoru na energię potencjalną w pobliżu powierzchni ziemi. Porównajmy oba wzory:

Oddziaływanie elektryczne: $E_{pe} = \boldsymbol{q}\,\boldsymbol{E}\,\boldsymbol{x}$ — $\boldsymbol{x}$ wielkość opisująca położenie
Oddziaływanie grawitacyjne: $E_{pg} = \boldsymbol{m}\,\boldsymbol{g}\,\boldsymbol{h}$

$\boldsymbol{q}$ / $\boldsymbol{m}$: czynnik, od którego zależy zdolność do oddziaływania

$\boldsymbol{E}$ / $\boldsymbol{g}$: wielkość opisująca siłę działającą na jednostkowy ładunek albo jednostkową masę

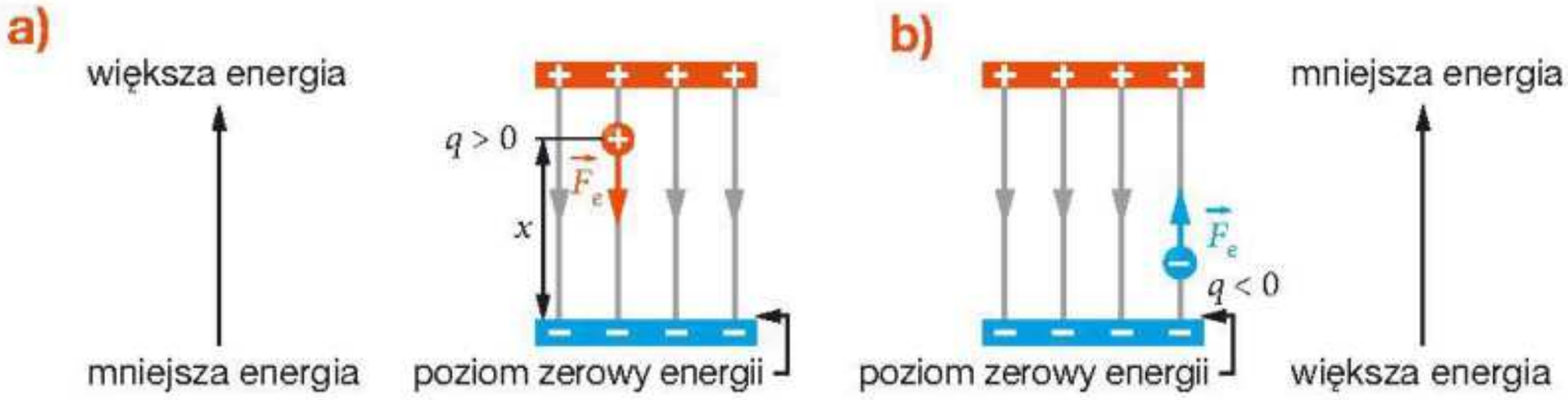


Rys. **12.25.** a) energia potencjalna w jednorodnym polu elektrycznym, b) energia potencjalna grawitacji w pobliżu powierzchni ziemi

Przyjęliśmy, że w omawianej sytuacji płytka naładowana ujemnie znajdowała się na dole, a naładowana dodatnio – na górze, aby podkreślić analogię między energiami potencjalnymi obu rodzajów.
Oczywiście, gdyby płytki były ustawione inaczej, opis energii potencjalnej ładunku by się nie zmienił. Kierunki „góra" i „dół" mają znaczenie tylko w przypadku oddziaływania grawitacyjnego w pobliżu ziemi, ale nie w przypadku pola elektrycznego.
Różnica między elektryczną energią potencjalną a energią potencjalną grawitacji wynika z faktu, że ciało może mieć ładunek ujemny lub dodatni, co wpływa na znak energii potencjalnej w polu elektrycznym.
Do tej pory mówiliśmy o ładunku dodatnim, na który działa siła elektryczna zgodna ze zwrotem linii pola, a pracę trzeba wykonać, aby

przemieścić go w stronę przeciwną. Wówczas, gdy odsuwamy ładunek od ujemnej płytki przyjętej za poziom zerowy, jego energia rośnie i uzyskuje wartości dodatnie.

Dla ładunku ujemnego jest odwrotnie – siła elektryczna działa przeciwnie do zwrotu linii pola, więc ładunek odsuwający się od poziomu zerowego ma coraz mniejszą energię (rys. 12.26). Skoro energia maleje, a początkowo była równa zeru, to musi przyjmować wartości ujemne, co zgadza się ze wzorem na poprzedniej stronie ($q < 0$, więc $E_{pe} < 0$).

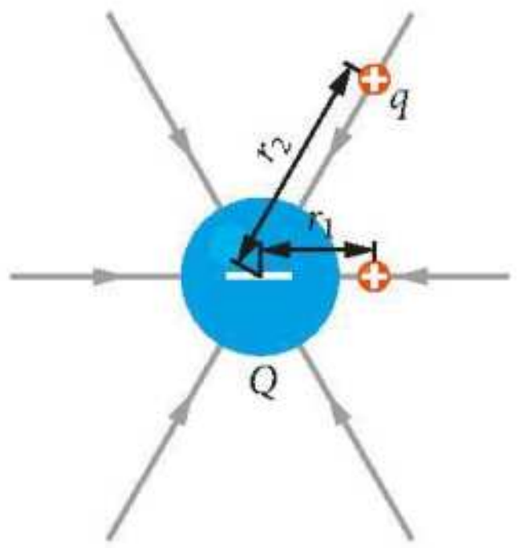


Rys. **12.26.** Energia ładunku dodatniego rośnie (a), a ujemnego maleje (b) podczas odsuwania go od ujemnie naładowanej płytki

Energia potencjalna w centralnym polu elektrycznym

Polem centralnym jest między innymi pole wytwarzane przez pojedynczy ładunek. Przyjmijmy na początek, że jest to ładunek ujemny. W takim polu na ładunek próbny (dodatni) działa siła przyciągająca, opisana prawem Coulomba. Zależy ona od odległości, i to w taki sam sposób jak siła grawitacji: każda z tych sił jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości (rys. 12.27). Dlatego też wzór na energię potencjalną w centralnym polu elektrycznym jest podobny jak w przypadku oddziaływań grawitacyjnych.

Należy jedynie dokonać odpowiednich zmian: zamiast stałej grawitacji G uwzględnić stałą elektrostatyczną k, a zamiast mas ciał – ich ładunki. Zróbmy założenie analogiczne do przyjętego przy opisie energii potencjalnej grawitacji, że **energia potencjalna ładunku w polu elektrycznym osiąga wartość zerową w nieskończoności**.

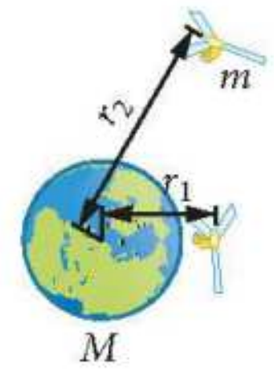


Oddziaływanie elektryczne: $E_{pe} = k\frac{Qq}{r}$

Oddziaływanie grawitacyjne: $E_{pg} = -G\frac{Mm}{r}$

stała

wielkość opisująca zdolność ciał do oddziaływania



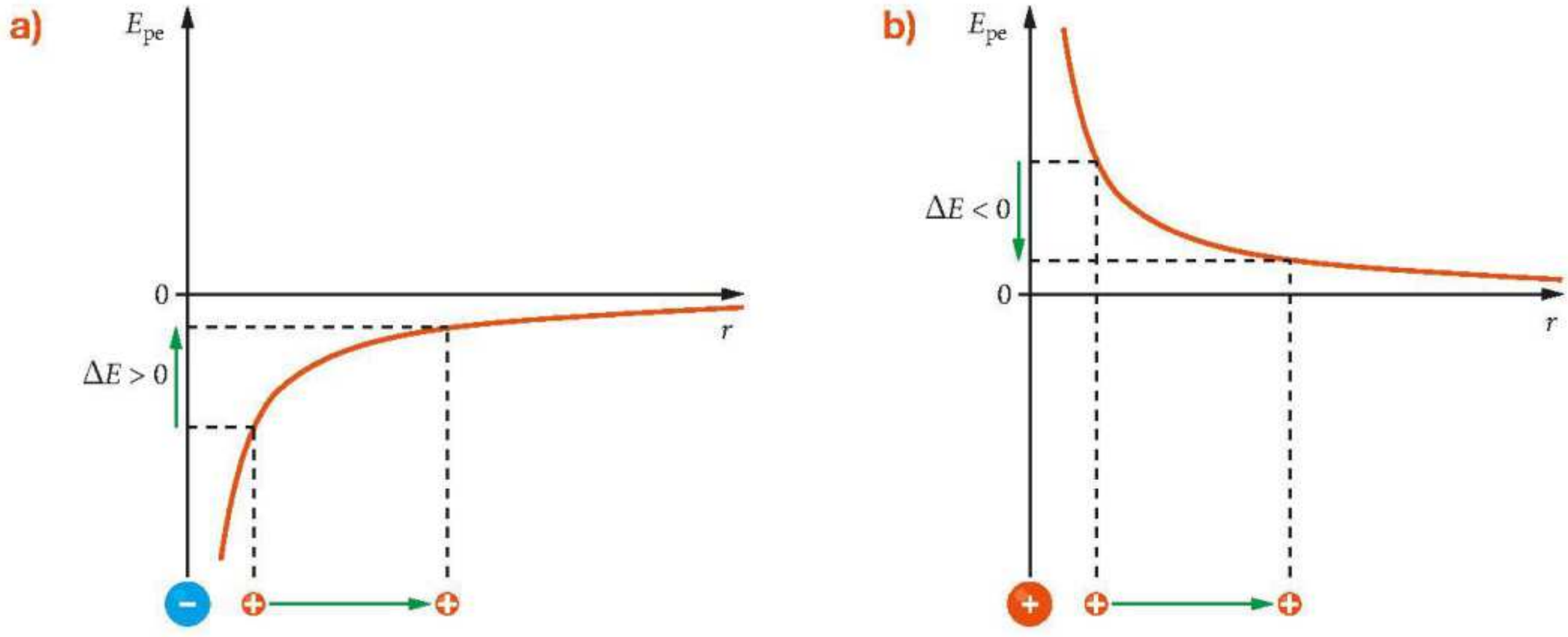
Rys. **12.27.** Siła działająca na ładunek w centralnym polu elektrycznym jest podobna do siły grawitacji wytwarzanej przez kulę, np. kulę ziemską

Zwróćmy uwagę na znaki w obu wzorach. We wzorze na energię potencjalną grawitacji pojawia się minus. W przypadku pola elektrycznego zawiera się on już w samym symbolu Q. Rozważaliśmy przypadek, w którym źródło pola elektrycznego jest ładunkiem ujemnym. Wtedy siła elektryczna działająca na dodatni ładunek próbny jest siłą przyciągającą, a więc energia potencjalna dodatniego ładunku próbnego jest ujemna.

Czy znak we wzorze by się zmienił, gdyby źródłem pola elektrycznego był ładunek dodatni? Tutaj minus także nie byłby potrzebny, ale z całkiem innego powodu.
W takim polu na dodatni ładunek próbny działa siła odpychająca. Tym razem wykonania pracy wymaga zbliżanie dodatniego ładunku próbnego do źródła pola elektrycznego, a nie jego oddalanie. Wobec tego wraz ze zbliżaniem się do źródła pola elektrycznego energia potencjalna ładunku próbnego w polu rośnie. A ponieważ przyjęliśmy, że ta energia jest równa zero w nieskończoności, energia potencjalna dodatniego ładunku próbnego w takim polu jest zawsze dodatnia.
Zatem niezależnie od znaku źródła pola wzór na energię potencjalną ma tę samą postać:

$$E_{pe} = k\frac{Qq}{r}$$

Nie należy jednak zapominać, że w zależności od znaku ładunku Q powyższy wzór oznacza zupełnie inną zależność energii potencjalnej od odległości od źródła (rys. 12.28).



Rys. **12.28.** Wykres zależności energii potencjalnej ładunku próbnego w polu elektrycznym od odległości od źródła naładowanego: a) ujemnie, b) dodatnio

Potencjał i napięcie elektryczne

Energia potencjalna ładunku w polu elektrycznym zależy od wartości tego ładunku. Jeśli ładunek jest większy, to proporcjonalnie większa jest też siła, jaką trzeba działać na ten ładunek, aby go przemieścić, a co za tym idzie – także jego energia potencjalna. Potwierdzają to również wyprowadzone wcześniej wzory na energię potencjalną, z których wynika, że jest ona proporcjonalna do ładunku.
Z opisanej zależności wynika, że możemy zdefiniować wielkość fizyczną charakteryzującą pole elektryczne niezależnie od ładunku q. Jest to iloraz

energii potencjalnej i ładunku, nazywany **potencjałem pola elektrycznego**. Potencjał ten jest równy liczbowo energii ładunku próbnego 1 C.

> Potencjał pola elektrycznego w danym punkcie to iloraz energii potencjalnej ładunku w tym punkcie i wartości tego ładunku:
>
> $$V = \frac{E_{pe}}{q}$$

Jak powiedzieliśmy, potencjał jest niezależny od ładunku q. Jest to spowodowane tym, że energia E_{pe} jest proporcjonalna do ładunku.
Jeśli znamy potencjał pola, możemy obliczyć pracę wykonaną przez siły zewnętrzne w trakcie przemieszczania ładunku q z punktu A do B.

$$W_{AB} = q(V_B - V_A) = q\Delta V$$

gdzie $\Delta V = (V_B - V_A)$ jest **różnicą potencjałów,** czyli **napięciem** między punktami A i B. Przykładowe napięcia, z jakimi możemy się spotkać, pokazano na rysunku 12.29.

> Różnicę potencjałów między dwoma punktami nazywamy napięciem.

Jednostką potencjału i napięcia jest **wolt**: $1\ \mathrm{V} = 1\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}$.

Potencjał w polu centralnym i jednorodnym

Ze wzoru na energię potencjalną w polu centralnym, który ma postać:

$$E_{pe} = k\frac{Qq}{r}$$

łatwo otrzymać wzór na potencjał w takim polu:

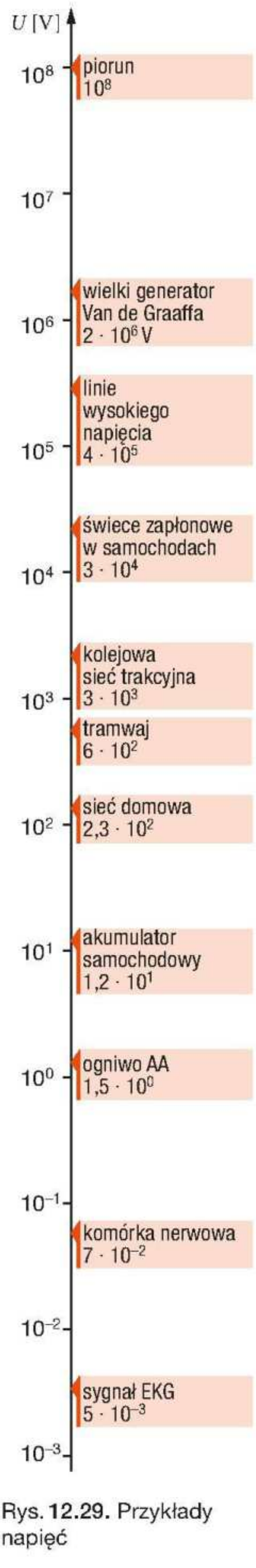
$$V = \frac{k\frac{Qq}{r}}{q} = k\frac{Q}{r}$$

Podobnie możemy postąpić w przypadku pola jednorodnego. Ponieważ $E_{pe} = qEx$, otrzymujemy:

$$V = \frac{E_{pe}}{q} = \frac{qEx}{q} = Ex$$

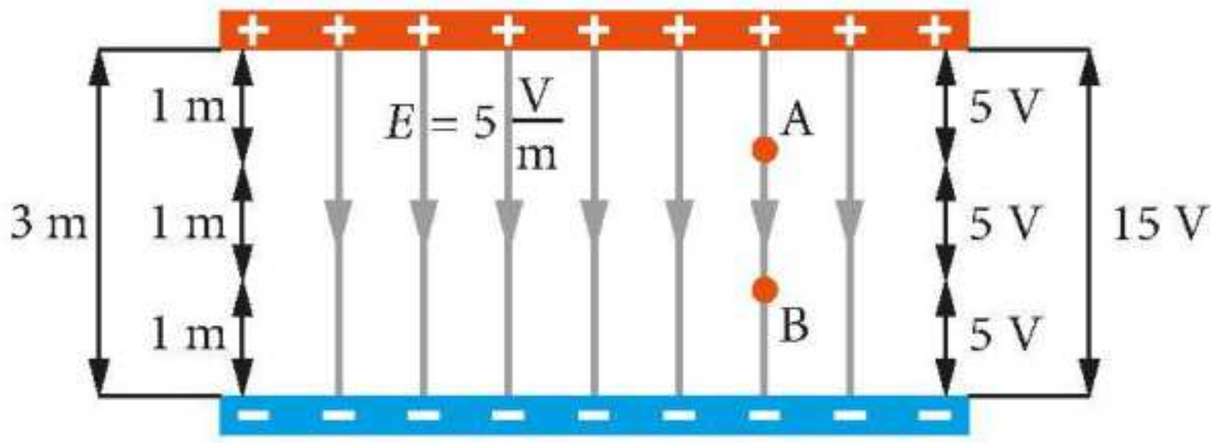
gdzie:
E_{pe} – energia potencjalna ładunku w polu elektrycznym,
x – odległość od poziomu, w którym energia potencjalna wynosi zero,
q – ładunek,
E – natężenie pola elektrycznego.
Po przekształceniu powyższej zależności otrzymujemy dla natężenia jednorodnego pola:

$$E = \frac{V}{x}$$



Rys. **12.29.** Przykłady napięć

Z wyprowadzonego wzoru wynika, że natężenie pola jednorodnego jest liczbowo równe napięciu pomiędzy dwoma punktami w tym polu odległymi od siebie o 1 m wzdłuż linii pola (przykładowe wyznaczenie natężenia pola przedstawiono na rysunku 12.30).



Rys. **12.30.** Odległość między punktami A i B wynosi 1 m, a napięcie 5 V. Natężenie pola jest równe 5 $\frac{N}{C}$, czyli 5 $\frac{V}{m}$

Z wyprowadzonego wzoru na natężenie pola elektrycznego wynika, że jego jednostką jest $\frac{V}{m}$, co jest zgodne z naszą wcześniejszą wiedzą, gdyż $1 \frac{V}{m} = 1 \frac{N}{C}$ (patrz zad. 1. po tej lekcji).

Znaczenie potencjału



Rys. **12.31.** Elektroskop mierzy nie ładunek, ale różnicę potencjałów między wskazówką a ziemią

W punkcie o wysokim potencjale ładunek próbny ma większą elektryczną energię potencjalną, podobnie jak ciało położone wyżej ma większą energię potencjalną grawitacji.

Jeśli to tylko możliwe, ładunek dodatni przemieszcza się z punktu o wyższym potencjale do punktu o niższym potencjale, podobnie jak swobodnie puszczone ciało spada z góry na dół, a więc w kierunku obszaru, gdzie ma mniejszą energię potencjalną.

W rzeczywistych sytuacjach mamy zwykle do czynienia z przepływem ujemnie naładowanych elektronów, a nie z ruchem dodatniego ładunku próbnego. Elektrony przemieszczają się od ciała o niższym potencjale do ciała o wyższym potencjale.

Jeśli więc połączymy dwa naładowane ciała przewodnikiem, ładunek będzie między nimi przepływać do czasu, aż potencjały obu ciał się wyrównają.

W stabilnej sytuacji, po zakończeniu przepływu ładunku, każde z połączonych ciał ma taki sam potencjał, co oznacza, że nie ma między nimi napięcia. Pamiętajmy jednak, że ładunki połączonych ciał nie muszą być wtedy sobie równe.

Tak więc elektroskop, do którego przyłożono naelektryzowane ciało, ma taki sam potencjał jak to ciało. Mierzony jest zatem nie ładunek zgromadzony na badanym ciele, ale jego potencjał względem ziemi. Elektroskopy często mają podziałkę wyskalowaną w kilowoltach (rys. 12.31).

Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że w przypadku niewielkiego ciała na skutek zetknięcia z elektroskopem jego potencjał może się znacznie zmienić. Podobnie za pomocą termometru rtęciowego nie zmierzymy temperatury kropli gorącej wody, ponieważ część ciepła odpłynie z niej do termometru i temperatura kropli się zmieni.

Po tej lekcji powinieneś

- znać pojęcie elektrycznej energii potencjalnej i potencjału elektrycznego oraz ich związek z pracą podczas przemieszczania ładunku;
- obliczać te wielkości dla pola jednorodnego i pola centralnego.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

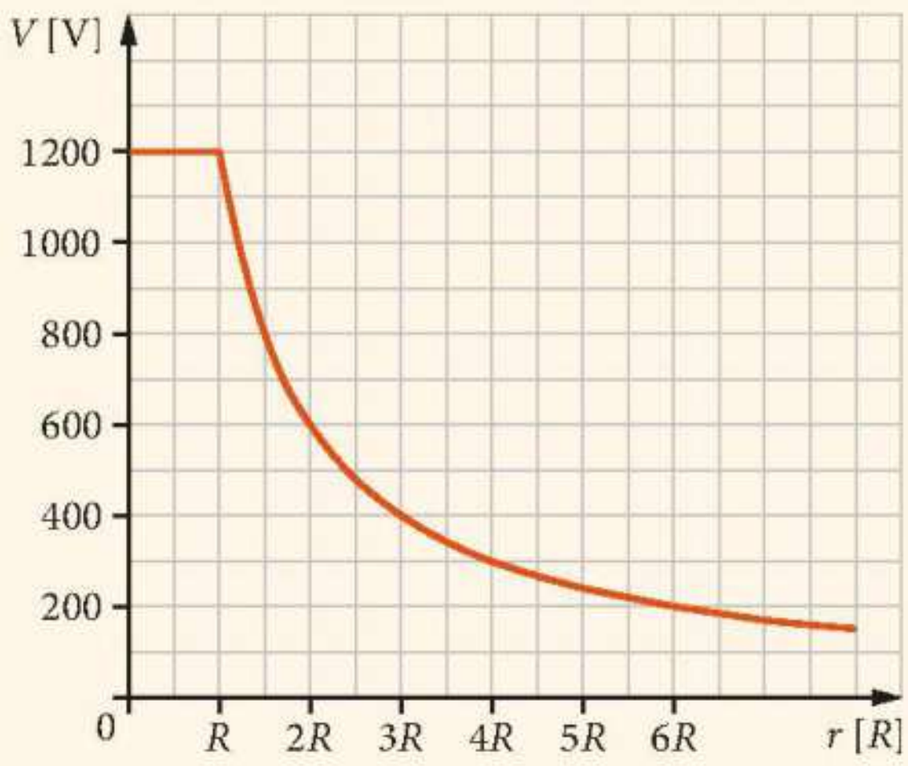
Przykład

Metalowa kulista czasza o promieniu $R = 10$ cm została naładowana ładunkiem dodatnim Q, który rozłożył się równomiernie na jej powierzchni. Rozkład potencjału w zależności od odległości od środka kuli przedstawiono na wykresie. Oblicz:

a) całkowity ładunek elektryczny zgromadzony na powierzchni kuli,

b) natężenie pola w odległości $r = 4R$ od środka naładowanej kuli,

c) pracę, jaką należy wykonać, aby dodatni ładunek punktowy równy ładunkowi elementarnemu $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C przemieścić w polu wytworzonym przez kulę z odległości $r_1 = 4R$ na odległość $r_2 = 2{,}5R$. Wynik podaj w dżulach.



Rozwiązanie

a) Ze wzoru na potencjał $V = k\frac{Q}{R}$ wyznaczamy wzór pozwalający obliczyć ładunek:

$$Q = \frac{VR}{k}$$

Z wykresu odczytujemy wartość potencjału dla $R = 10$ cm, który wynosi $V = 1200$ V. Podstawiamy tę wartość do wyznaczonego wcześniej wzoru i otrzymujemy:

$$Q = \frac{1200\ \text{V} \cdot 0{,}1\ \text{m}}{9 \cdot 10^9\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}} \approx 13{,}3\ \text{nC}$$

$$[Q] = \frac{\text{J} \cdot \text{m} \cdot \text{C}^2}{\text{C} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{J} \cdot \text{C}}{\text{J}} = \text{C}$$

Odpowiedź: Całkowity ładunek zgromadzony na kuli to ok. 13,3 nC.

b) Natężenie pola na zewnątrz sfery naładowanej ładunkiem Q jest takie samo jak natężenie wytwarzane przez ładunek punktowy umieszczony w jej środku, co możemy zapisać następująco:

$$E = k\frac{Q}{(4R)^2}$$

Po podstawieniu wzoru na ładunek $Q = \frac{VR}{k}$ otrzymujemy:

$$E = \frac{V}{16R}$$

Stąd po podstawieniu danych liczbowych:

$$E = \frac{1200\ \text{V}}{16 \cdot 0{,}1\ \text{m}} = 750\ \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Odpowiedź: Natężenie pola w odległości $4R$ od środka sfery wynosi $750\ \frac{\text{V}}{\text{m}}$.

c) Wiemy, że praca jest równa zmianie energii potencjalnej ładunku na skutek przemieszczenia między punktami o różnych potencjałach, możemy więc skorzystać ze wzoru:

$$W_{1\to 2} = q(V_2 - V_1)$$

Po odczytaniu potencjałów V_1 i V_2 z wykresu i podstawieniu danych liczbowych:

$$W \approx 3 \cdot 10^{-17}\ \text{J}$$

Odpowiedź: Praca wynosi ok. $3 \cdot 10^{-17}$ J.

1. Wykonaj odpowiednie przekształcenia jednostek i wykaż, że $1\ \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$.

2. Między rozległą chmurą burzową a powierzchnią ziemi powstaje pole elektryczne, które możemy przyjąć za jednorodne. Oblicz napięcie powstałe między chmurą znajdującą się na wysokości 400 m a ziemią, jeśli na znajdujący się w tym polu jon o ładunku $4{,}8 \cdot 10^{-19}$ C działa siła $9{,}6 \cdot 10^{-14}$ N.

3*. Na jednej prostej w punktach o współrzędnych -1 m i 1 m umieszczono dwa ładunki $Q = +1$ nC. Oblicz natężenie pola elektrycznego i potencjał w punkcie o współrzędnej x. Za pomocą programu komputerowego narysuj wykresy zależności: natężenia pola elektrycznego od położenia $E(x)$ i potencjału tego pola od położenia $V(x)$.

4. Dwie duże stalowe płyty są ustawione poziomo w odległości 50 cm od siebie. Między nimi jest jednorodne pole elektryczne. Jakie napięcie musi być przyłożone do płyt, aby skrawek folii o masie 0,01 g i ładunku 20 nC mógł wisieć między nimi i pozostawać w równowadze?

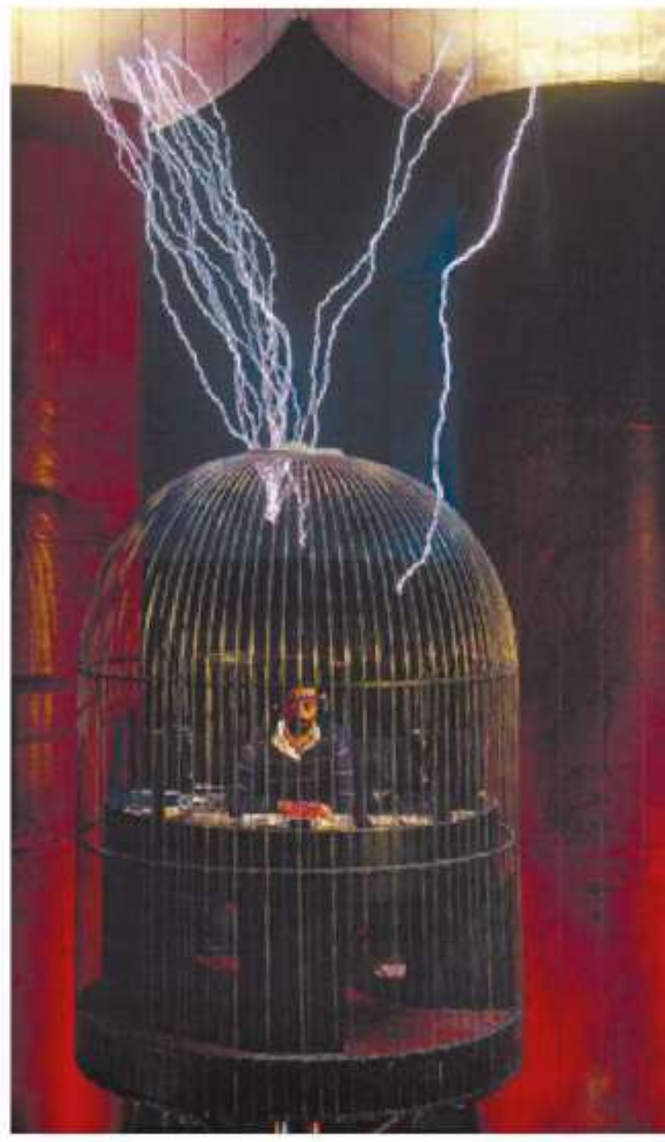
5. Przypomnij sobie przykład ze s. 92. Załóżmy teraz, że kulkę opuszczamy (działamy odpowiednią siłą) do najniższego możliwego położenia, a następnie puszczamy. Wróci ona do położenia równowagi, ale nie zatrzyma się tam, lecz ze względu na bezwładność będzie się poruszać dalej. Czy kulka dotknie płyty P_2, czy też zatrzyma się wcześniej i będzie wykonywać drgania wokół położenia równowagi? Czy zależy to od odległości d_1 i d_2?

12.6. Ładunki w przewodniku

Przypomnij sobie

- Substancję, przez którą mogą przepływać ładunki elektryczne (zwykle elektrony), nazywamy przewodnikiem, a substancję, przez którą nie mogą one przepływać – izolatorem albo dielektrykiem.
- Między dwoma ciałami wykonanymi z przewodnika i połączonymi przewodnikiem ładunki przepływają aż do chwili, gdy ich potencjały się wyrównają.
- Ciało o sferycznie symetrycznym rozkładzie ładunku jest źródłem centralnego pola elektrycznego, które jest takie samo, jakie byłoby w przypadku, gdyby cały ładunek był zgromadzony w środku tego ciała.

W ostatnich lekcjach opisywaliśmy siły działające na ładunek w polu elektrycznym. Ładunek ten na ogół znajdował się w próżni lub w powietrzu. Jednak należy pamiętać, że zazwyczaj badamy ładunki znajdujące się w przewodniku. Właśnie jego właściwości mają decydujący wpływ na przebieg zjawisk elektrostatycznych.



Rys. **12.32.** Wyładowania elektryczne nie są groźne dla osoby zamkniętej w metalowej klatce

Klatka Faradaya

Dlaczego jest możliwa sytuacja przedstawiona na rysunku 12.32? Mimo silnych wyładowań elektrycznych osoba jest bezpieczna, ponieważ znajduje się w metalowej klatce, a mówiąc bardziej ogólnie: w klatce zbudowanej z przewodnika.

Zbadajmy więc doświadczalnie taką właśnie sytuację. Dowiedzmy się, jak rozkłada się ładunek w naelektryzowanym przewodniku.

Doświadczenie 6

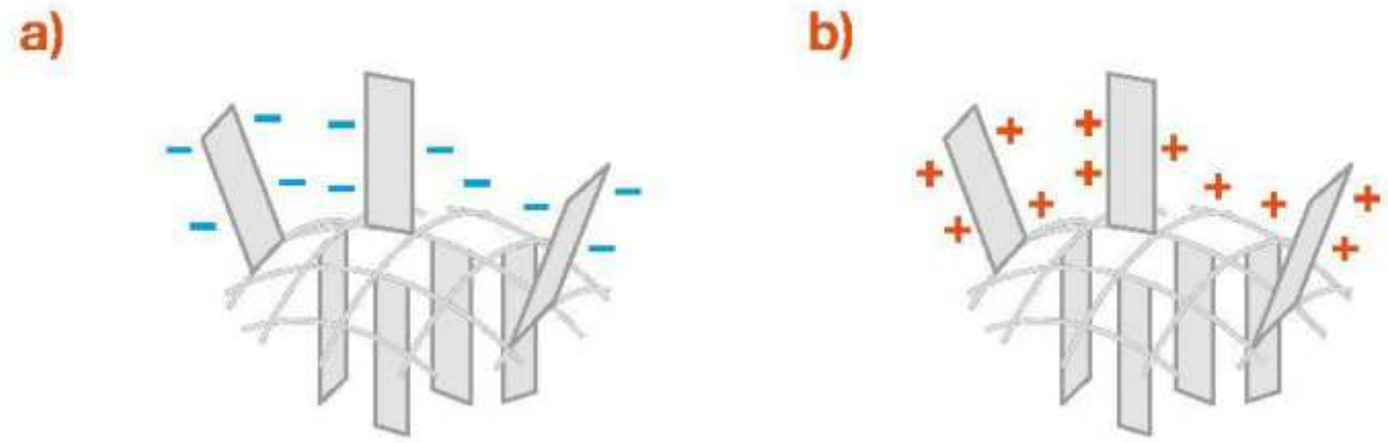
1. Przygotuj metalową siatkę w kształcie półkuli (możesz wykorzystać np. koszyk do smażenia frytek), folię aluminiową, nożyczki i maszynę elektrostatyczną albo generator Van de Graaffa.
2. Utnij kilkanaście pasków folii aluminiowej o długości ok. 6–8 cm i przymocuj po kilka z nich po obu stronach siatki.
3. Ustaw siatkę na izolowanej podstawie.
4. Podłącz siatkę do maszyny elektrostatycznej i włącz urządzenie. Porównaj zachowanie pasków wewnątrz i na zewnątrz siatki.
5. Powtórz czynności opisane w punkcie 4., ale tym razem podłącz siatkę do drugiej elektrody maszyny.



W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować, że paski na zewnątrz siatki ułożyły się tak, aby znaleźć się jak najdalej od siebie, natomiast wewnątrz siatki pozostały bez zmian.

Jak wyjaśnić wynik doświadczenia 6? Przypomnijmy, że elektrony w przewodniku mogą swobodnie przemieszczać się w całej jego objętości. W naszym doświadczeniu przewodnikiem była siatka, którą raz podłączaliśmy do dodatniej, a raz do ujemnej elektrody maszyny.

- Jeśli przewodnik jest naładowany ujemnie, to wskutek działania sił elektrycznych elektrony się odpychają i przemieszczają tak, aby znaleźć się jak najdalej od siebie.
  Z tego powodu gromadzą się na zewnętrznej powierzchni przewodnika (rys. 12.33a), czyli jest on naładowany ujemnie.
- Z kolei kiedy przewodnik jest naładowany dodatnio, wewnątrz przewodnika jest zbyt mało elektronów i znajdujący się tam nadmiarowy ładunek dodatni powoduje ich wciągnięcie do środka, a tym samym brakuje elektronów na powierzchni przewodnika.
  Wynika z tego, że powierzchnia przewodnika naładowana jest dodatnio (rys. 12.33b).



Rys. **12.33.** Ładunki na siatce w przypadku: a) nadmiaru ładunków ujemnych, b) nadmiaru ładunków dodatnich

Możemy więc wyciągnąć następujący wniosek:

> Nadmiarowe ładunki elektryczne (bez względu na znak) gromadzą się na zewnętrznej powierzchni przewodnika.

Natężenie pola elektrycznego s. 87

Ładunki rozmieszczają się zawsze w taki sposób, aby natężenie pola elektrycznego w każdym punkcie wewnątrz przewodnika było równe zeru:

$$E_{\text{wewnątrz}} = 0$$

W przeciwnym razie pole elektryczne powodowałoby dalszy ruch ładunków.

Powyższy wniosek stanowi jednocześnie wyjaśnienie wyniku naszego doświadczenia. Przewodnik chroni swoje wnętrze przed ładunkami elektrycznymi, czyli z przewodnika możemy wykonać osłonę przed zewnętrznym pole elektrycznym.

Taką osłonę nazywa się **klatką Faradaya**. Nazwa pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka Michaela Faradaya (czyt. majkela faradaja), który wymyślił ją i skonstruował w 1836 r.

Dwie połączone kule

Zastanówmy się, ile wyniesie natężenie pola elektrycznego na powierzchni każdej z dwóch oddalonych od siebie naładowanych metalowych kul o różnych promieniach R i r (rys. 12.34), gdy połączymy je przewodnikiem. Dla uproszenia zakładamy, że mimo obecności przewodnika ładunek na kulach jest rozmieszczony równomiernie, a ładunek zgromadzony w samym przewodniku możemy pominąć.

Jak już wiemy, kula wytwarza takie samo pole, jakie wytwarzałaby, gdyby cały ładunek był zgromadzony w jej środku. Wobec tego możemy zastosować do jej powierzchni wzory na natężenie pola i potencjał pojedynczego ładunku.

Dla pierwszej kuli:

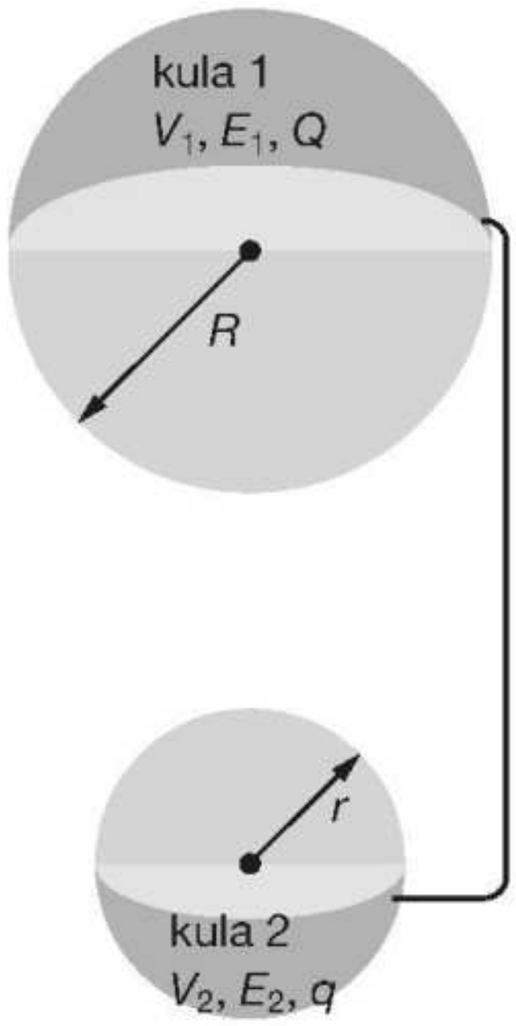
$$E_1 = k\frac{Q}{R^2} \qquad V_1 = k\frac{Q}{R}$$

Stąd: $E_1 = \frac{V_1}{R}$

Dla drugiej kuli:

$$E_2 = k\frac{q}{r^2} \qquad V_2 = k\frac{q}{r}$$

Stąd: $E_2 = \frac{V_2}{r}$



Rys. **12.34.** Dwie metalowe naładowane kule o różnych promieniach

Ponieważ jednak kule są połączone, ich potencjały są takie same: $V_1 = V_2$. Gdyby tak nie było, ładunek przepłynąłby do kuli o niższym potencjale. Oznaczmy potencjał obu kul przez V. Wówczas natężenie pola elektrycznego przy powierzchni poszczególnych kul wynosi odpowiednio:

$$E_1 = \frac{V}{R} \qquad E_2 = \frac{V}{r}$$

Wobec tego mniejsza kula wytwarza przy swojej powierzchni pole silniejsze niż większa kula. Dokładniej – natężenie pola jest odwrotnie proporcjonalne do promienia kuli.

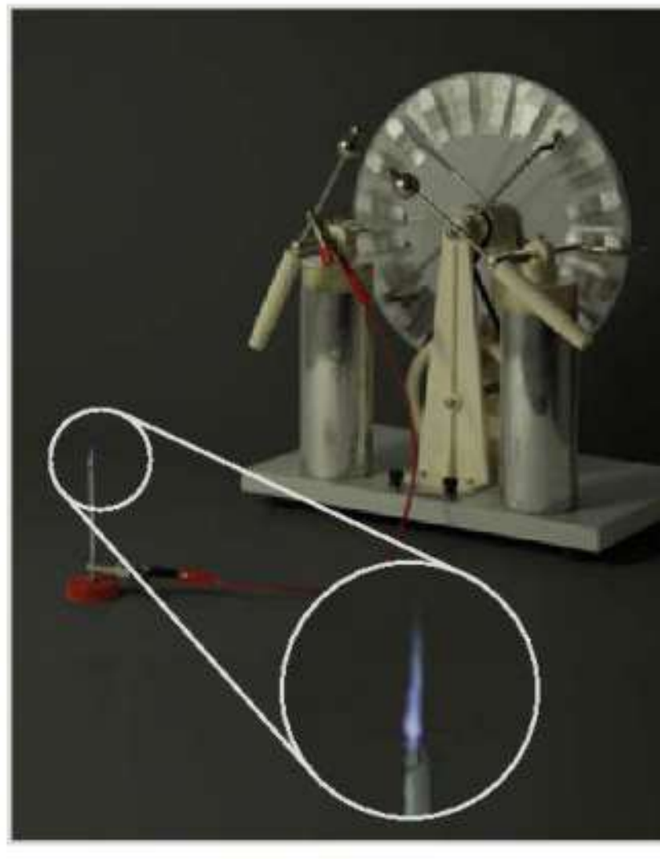
Przewodnik z ostrzem

Interesujący wpływ na pole elektryczne mają przewodniki z ostrym końcem lub ostrą krawędzią. Zbadajmy to zjawisko doświadczalnie.

Doświadczenie 7

Uwaga. Doświadczenie trzeba wykonywać w zaciemnionym pomieszczeniu.

1. Przygotuj maszynę elektrostatyczną lub generator Van de Graaffa, ostry gwóźdź i przewód.
2. Przyczep gwóźdź do jednego z biegunów maszyny elektrostatycznej.
3. Wyłącz światło i włącz maszynę. Co obserwujesz?



W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować, że wokół ostrza gwoździa powietrze świeci. Aby zrozumieć, dlaczego tak się dzieje, odwołajmy się do omawianego wcześniej modelu złożonego z dwóch połączonych kul. Potraktujmy ostry koniec przewodnika jak kulkę o bardzo małym promieniu. Jak pamiętasz z rozważań dotyczących połączonych kul, im mniejszy promień kuli, tym silniejsze pole elektryczne przy jej

Jonizacja powietrza to zjawisko, w którym z cząsteczek powietrza są wyrywane elektrony. W ten sposób powstają swobodne elektrony i dodatnie jony.

powierzchni. Przy ostrzu pole elektryczne jest wystarczająco silne, aby powodować **jonizację powietrza**. Zachodzi ona, ponieważ dzięki naturalnemu promieniowaniu skorupy ziemskiej i promieniowaniu kosmicznemu w powietrzu zawsze znajduje się pewna liczba elektronów i jonów, które w silnym polu elektrycznym rozpędzają się, zderzają z obojętnymi cząsteczkami powietrza i powodują ich jonizację. W ten sposób liczba jonów i elektronów w powietrzu w pobliżu ostrza znacznie się zwiększa. Oderwane od atomów elektrony są przyłączane przez jony i oddają energię w postaci promieniowania, w tym światła widzialnego, albo pobudzają do świecenia inne atomy, którym przekazują energię podczas zderzeń.

Powstawanie burz i działanie piorunochronu

Elektryzowanie przez potarcie s. 73

Zanim uderzy piorun, chmura burzowa musi się naelektryzować. Mamy wówczas do czynienia z elektryzowaniem przez potarcie: kropelki wody i kryształki lodu znajdujące się w chmurze poruszają się na skutek konwekcji i zderzają ze sobą, a w konsekwencji – elektryzują. W efekcie w dolnej części chmury gromadzi się zwykle ładunek ujemny, a w górnej – dodatni.

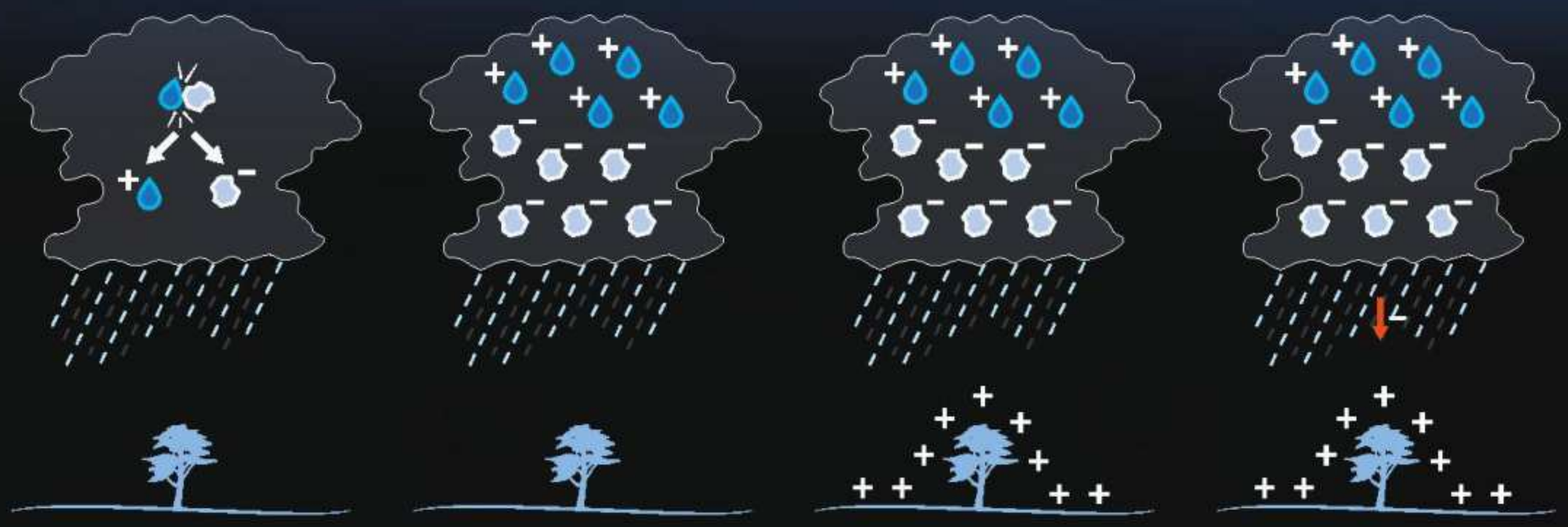
Elektryzowanie przez indukcję s. 74

Ujemny ładunek dolnej części chmury powoduje z kolei na zasadzie indukcji dodatnie naładowanie powierzchni ziemi pod chmurą oraz

Fizyka wokół nas

Powstawanie pioruna

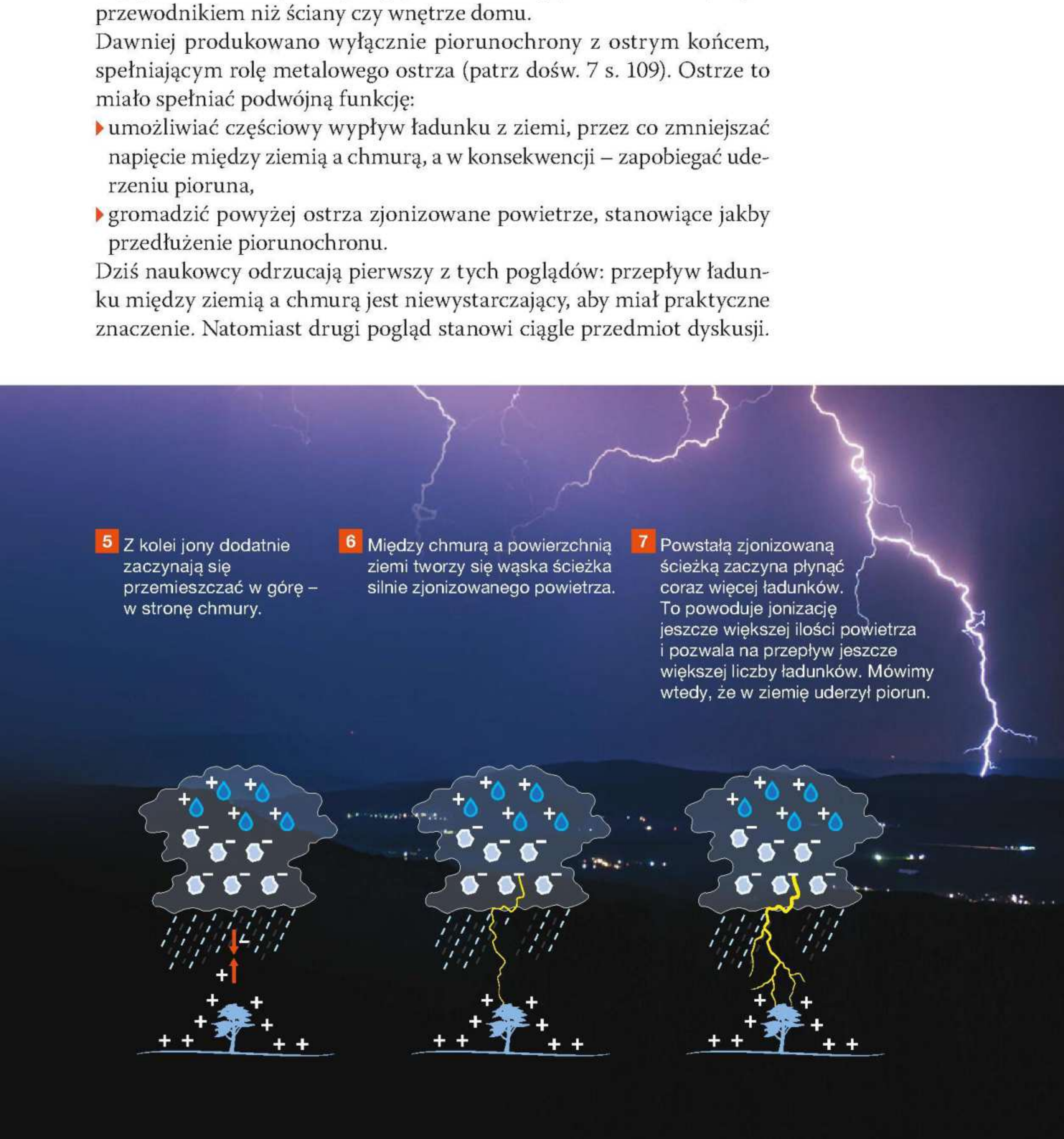
1. Krople wody i bryłki lodu w chmurze zderzają się i elektryzują: krople dodatnio, bryłki ujemnie.
2. Ujemnie naładowane bryłki lodu gromadzą się bliżej spodu chmury.
3. Ponieważ dolna część chmury jest naładowana ujemnie, powierzchnia ziemi ładuje się dodatnio przez indukcję.
4. Gdy napięcie między chmurą a ziemią jest bardzo wysokie, a pole elektryczne bardzo silne, znajdujące się w powietrzu elektrony zaczynają się poruszać w kierunku ziemi. Ładunków jest jednak stosunkowo niewiele, dlatego nie jest to widoczne.



znajdujących się na niej obiektów. Pomiędzy chmurą a ziemią powstaje więc bardzo wysokie napięcie (kilkadziesiąt milionów woltów), które powoduje jonizację powietrza i przeskok iskry (ilustracja poniżej).
Pioruny wybierają drogę o najmniejszym oporze, dlatego często uderzają w wysokie obiekty, takie jak drzewa czy budynki. Aby zapobiec skutkom uderzenia pioruna, na budynkach umieszcza się piorunochrony – metalowe pręty połączone z ziemią. Gdy piorun uderzy, ładunek odpływa do ziemi przez gruby przewód, który jest znacznie lepszym przewodnikiem niż ściany czy wnętrze domu.
Dawniej produkowano wyłącznie piorunochrony z ostrym końcem, spełniającym rolę metalowego ostrza (patrz dośw. 7 s. 109). Ostrze to miało spełniać podwójną funkcję:

- umożliwiać częściowy wypływ ładunku z ziemi, przez co zmniejszać napięcie między ziemią a chmurą, a w konsekwencji – zapobiegać uderzeniu pioruna,
- gromadzić powyżej ostrza zjonizowane powietrze, stanowiące jakby przedłużenie piorunochronu.

Dziś naukowcy odrzucają pierwszy z tych poglądów: przepływ ładunku między ziemią a chmurą jest niewystarczający, aby miał praktyczne znaczenie. Natomiast drugi pogląd stanowi ciągle przedmiot dyskusji.



Niektóre badania doświadczalne przeczą poglądowi, że im ostrzejszy piorunochron, tym lepszy. Być może istnieje optymalny stopień zaostrzenia, zapewniający najlepsze działanie piorunochronu.
Wyładowania atmosferyczne są jednak złożonym zjawiskiem i na ich przebieg mogą mieć wpływ czynniki, których nie umiemy w pełni odtwarzać w laboratorium.

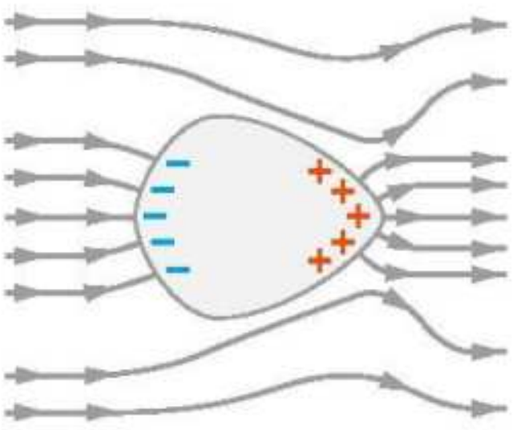
Ekranowanie pola

Obojętny przewodnik elektryczny zachowuje się w bardzo ciekawy sposób, kiedy zostanie umieszczony w zewnętrznym polu elektrycznym. Aby się o tym przekonać, wykonaj opisane poniżej doświadczenie.



Doświadczenie 8

1. Przygotuj szalkę Petriego (ewentualnie biały głęboki talerz z porcelany), maszynę elektrostatyczną (lub generator Van de Graaffa), dwie metalowe płytki i metalowy pierścień (możesz go wykonać z folii aluminiowej), olej spożywczy oraz skrawki wstążki do pakowania prezentów.
2. Nalej do naczynia olej i wysyp na jego powierzchnię skrawki wstążki.
3. Umieść metalowy pierścień pośrodku szalki Petriego.
4. Metalowe płytki umieść w naczyniu równolegle do siebie po dwóch stronach metalowego pierścienia i podłącz do różnych biegunów maszyny elektrostatycznej. Co zaobserwowałeś?
5. Włącz maszynę. Czy coś się zmieniło?
6. Sporządź schematyczny rysunek obrazujący układ linii pola.



Rys. 12.35. Ładunki swobodne w przewodniku w zewnętrznym polu elektrycznym przemieszczają się tak, aby natężenie pola wewnątrz przewodnika było równe zero. Swobodne ładunki ekranują zewnętrzne pole

Skrawki wstążki wewnątrz metalowego pierścienia nie ułożyły się w żaden uporządkowany sposób. Stało się tak dlatego, że elektrony w przewodniku umieszczonym w polu elektrycznym przemieszczają się w taki sposób, że linie pola elektrycznego są prostopadłe do powierzchni przewodnika. Jednocześnie wewnątrz przewodnika natężenie pola elektrycznego jest równe zero. Zjawisko to nazywamy **ekranowaniem** zewnętrznego pola elektrycznego przez swobodne ładunki w przewodniku (rys. 12.35).
Zwróć uwagę na podobieństwo tego doświadczenia do doświadczenia 6. (s. 107) z klatką Faradaya – wtedy także wewnątrz przewodnika nie powstawało pole elektryczne. Jednak opisane doświadczenia istotnie się różniły: w przypadku klatki Faradaya przewodnik był naelektryzowany, a tym razem w zewnętrznym polu elektrycznym umieściliśmy obojętny przewodnik.

Możliwość ekranowania jest jedną z różnic między oddziaływaniami elektrycznymi i grawitacyjnymi. Różnica ta wynika z istnienia dwóch rodzajów ładunków, a tylko jednego rodzaju masy oraz z faktu, że ładunki mogą w metalu przepływać. Grawitacji nie da się ekranować w żaden sposób.

Ochrona przed burzą

Uderzenie pioruna może spowodować ciężkie obrażenia, a nawet śmierć.
Jak się przed nim chronić?

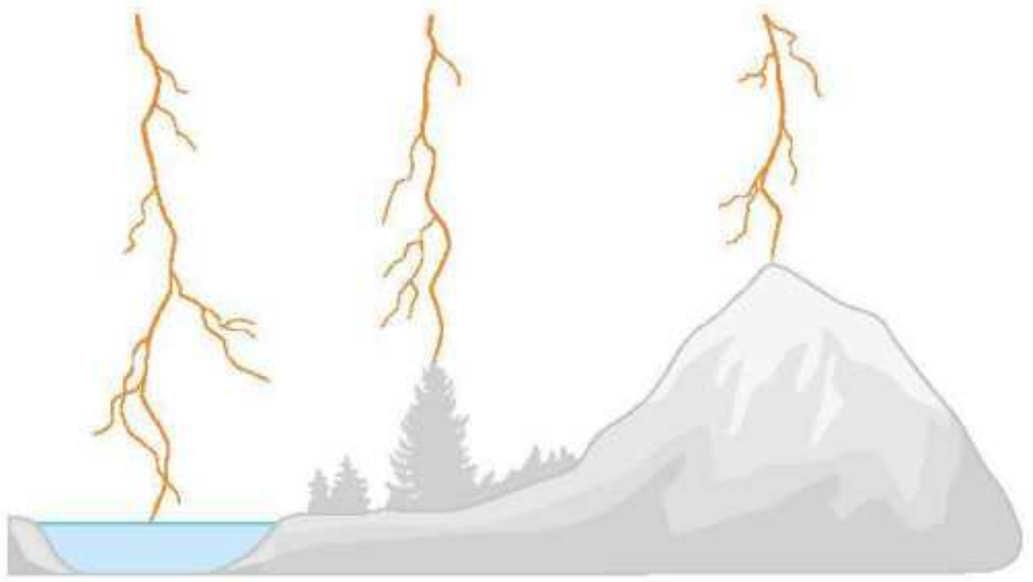
Najlepsza ochrona – piorunochron albo klatka Faradaya

- W czasie burzy najlepiej zostać w domu albo schronić się w innym dostępnym budynku. Każdy budynek powinien mieć piorunochron.
- Samochód albo pociąg – mimo że ma okna – stanowi klatkę Faradaya chroniącą przed wyładowaniami. Nie chroń się jednak w samochodzie zaparkowanym pod drzewem – wiatr może je przewrócić.

Piorun wybiera drogę o najmniejszym oporze

Z tego powodu pioruny często uderzają w najwyższy punkt okolicy albo w wodę.

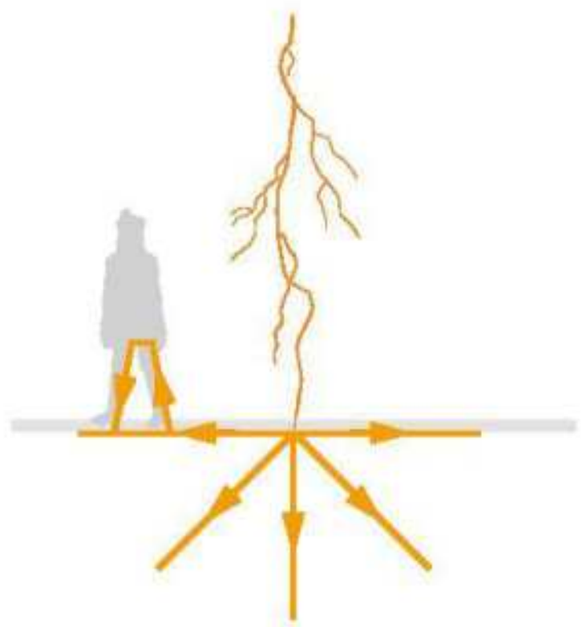
- Staraj się sam nie być najwyższym punktem w okolicy. Nie wchodź na wzniesienia, a na otwartym terenie kucnij.
- Nie stawaj obok drzew ani słupów – pioruny często w nie uderzają. Drzewo może się także przewrócić od towarzyszącego burzy porywistego wiatru.
- Gdy zanosi się na burzę, nie wychodź w góry. Jeśli pogoda zepsuje się w trakcie wycieczki, zejdź najkrótszą drogą w doliny albo do schroniska.
- Nie wchodź do wody.



Napięcie krokowe

Gdy piorun uderzy nawet dość daleko od ciebie, prąd płynie po powierzchni ziemi. Jeśli stoisz w rozkroku albo leżysz, podłączasz się równolegle do tego prądu!

- Dotykaj ziemi jak najmniejszą powierzchnią. Kucaj na złączonych nogach. Nie kładź się na ziemi.
- Biegnij, zamiast iść. W biegu dotykasz podłoża tylko jedną nogą naraz.



Po tej lekcji powinieneś

- opisywać rozkład ładunków w przewodniku;
- wyjaśniać i demonstrować doświadczalnie działanie klatki Faradaya i metalowego ostrza;
- wyjaśniać mechanizm powstawania burz, zasadę działania piorunochronu i sposoby ochrony przed burzą;
- opisywać zjawisko ekranowania pola elektrycznego i wyjaśniać, dlaczego nie da się ekranować pola grawitacyjnego.

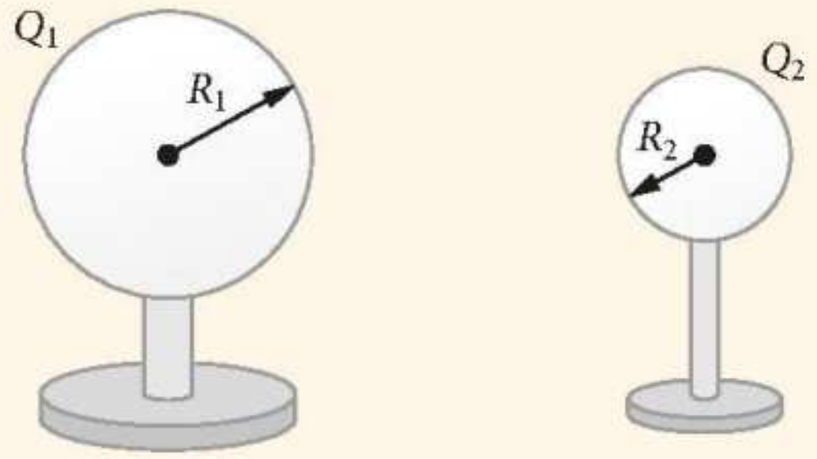
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

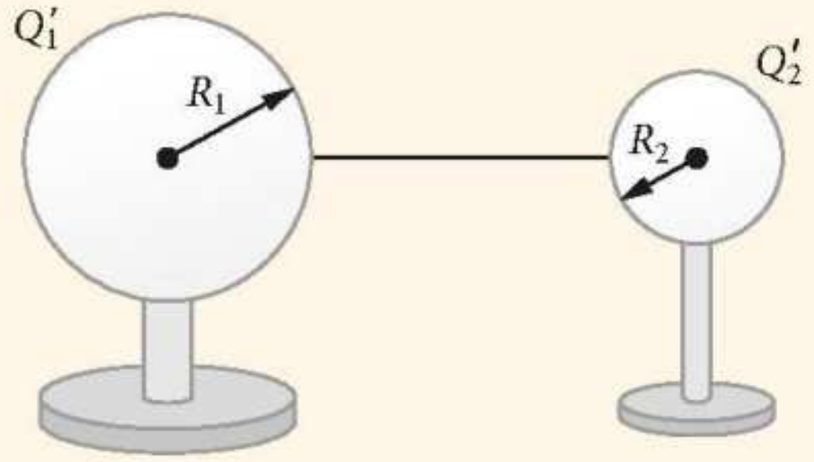
Przykład

Dwie metalowe kule o promieniach R_1 i R_2, spoczywające na izolujących podstawkach, umieszczono w dużej odległości od siebie i naładowano odpowiednio ładunkami Q_1 i Q_2 (rys. a). Następnie kule połączono przewodnikiem (rys. b), co spowodowało przepływ ładunku między kulami aż do wyrównania potencjałów.

a)



b)



a) Wykaż, że ładunek zgromadzony na każdej z kul po ich połączeniu można obliczyć ze wzorów:

$$Q_1' = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_1 \qquad Q_2' = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_2$$

b) Oblicz wartość ładunku na każdej kuli po ich połączeniu, jeśli $R_1 = 10$ cm, $R_2 = 5$ cm, $Q_1 = 20$ nC i $Q_2 = -5$ nC.

c) Dla danych liczbowych z punktu b) oblicz potencjał kul przed połączeniem i po połączeniu oraz wartość ładunku, jaki przepłynął między kulami. W którym kierunku przepływały elektrony?

Rozwiązanie

a) Aby obliczyć ładunek każdej z kul po połączeniu, skorzystamy z zasady zachowania ładunku elektrycznego. Zgodnie z nią możemy zapisać:

$$Q_1 + Q_2 = Q_1' + Q_2'$$

gdzie:

Q_1, Q_2 – ładunki zgromadzone na kulach przed połączeniem,

Q_1', Q_2' – ładunki zgromadzone na kulach po połączeniu.

Wiemy również, że potencjał każdej z kul po połączeniu jest taki sam i wyraża się wzorem:

$$V = k\frac{Q_1'}{R_1} = k\frac{Q_2'}{R_2}$$

Możemy więc zapisać następujący układ równań:

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 = Q_1' + Q_2' \\ \dfrac{Q_1'}{R_1} = \dfrac{Q_2'}{R_2} \end{cases}$$

z którego otrzymujemy:

$$Q_1 + Q_2 = Q_1' + Q_1' \frac{R_2}{R_1}$$

Wyznaczamy z niego

$$Q_1' = \frac{Q_1 + Q_2}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

Po przekształceniu dostajemy zapis w postaci:

$$Q_1' = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_1 \quad (1)$$

Analogicznie wyznaczamy Q_2':

$$Q_2' = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_2 \quad (2)$$

Co było do udowodnienia.

b) Podstawiamy dane do wzorów (1) i (2) z punktu a) i otrzymujemy:

$$Q_1' = \frac{20\,\text{nC} - 5\,\text{nC}}{10\,\text{cm} + 5\,\text{cm}} \cdot 10\,\text{cm} = 10\,\text{nC}$$

$$Q_2' = \frac{20\,\text{nC} - 5\,\text{nC}}{10\,\text{cm} + 5\,\text{cm}} \cdot 5\,\text{cm} = 5\,\text{nC}$$

Odpowiedź: Ładunki zgromadzone na kulach po połączeniu wynoszą odpowiednio $Q_1' = 10\,\text{nC}$, $Q_2' = 5\,\text{nC}$.

c) Aby obliczyć potencjały kul V_1 i V_2 przed połączeniem i ich potencjał V po połączeniu, podstawiamy dane z zadania do wzoru na potencjał. Otrzymujemy odpowiednio:

$$V_1 = k\frac{Q_1}{R_1} = 1800\,\text{V}$$

$$V_2 = k\frac{Q_2}{R_2} = -900\,\text{V}$$

$$V = k\frac{Q_1'}{R_1} = 900\,\text{V}$$

Z powyższych obliczeń wynika, że kule ostatecznie uzyskały potencjał $V = 900\,\text{V}$. W tym czasie przepłynął między nimi ładunek będący różnicą ładunków jednej z kul (którejkolwiek) przed połączeniem i po połączeniu.

$$|Q_1 - Q_1'| = |Q_2 - Q_2'| = 10\,\text{nC}$$

Ponieważ ładunek elektronów jest ujemny, przepływają one zawsze od ciała o niższym potencjale do ciała o wyższym potencjale. Z wcześniejszych obliczeń wynika, że większy potencjał miała kula o ładunku początkowym Q_1, więc elektrony przepływały z drugiej do pierwszej kuli.

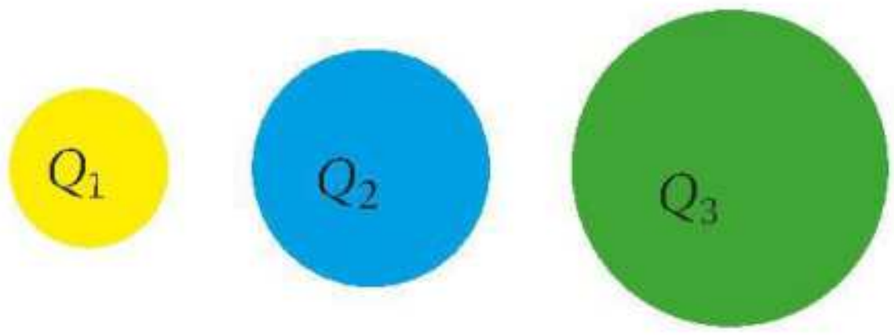
Odpowiedź: Potencjały kul przed połączeniem wynosiły $V_1 = 1800\,\text{V}$, $V_2 = -900\,\text{V}$, a po połączeniu $V = 900\,\text{V}$. Między kulami przepłynął ładunek 10 nC.

Zadania s. 116

Pytania i zadania

1. Dlaczego w czasie burzy człowiek znajdujący się w samochodzie lub pociągu jest bezpieczny?

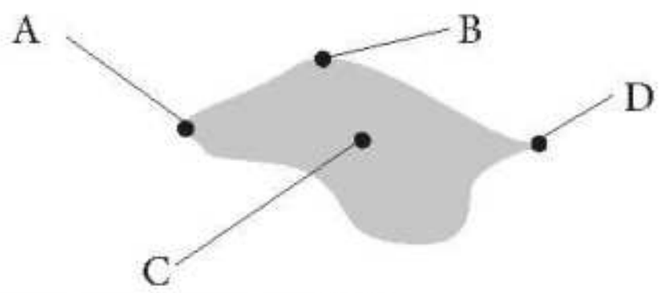
2. Młody fizyk przeprowadził doświadczenie z użyciem trzech metalowych kul: żółtej o promieniu r, naładowanej ładunkiem $Q_1 = -q$, niebieskiej o promieniu $2r$ i ładunku $Q_2 = +4q$ oraz zielonej o promieniu $3r$ i ładunku $Q_3 = -7q$.



Najpierw połączył przewodem kulę żółtą z niebieską – potencjały obu kul się wyrównały. Następnie rozłączył kule i połączył ze sobą kule żółtą i zieloną.

Oblicz, jakie ładunki znajdowały się po zakończeniu eksperymentu na każdej z kul.

3. Na rysunku przedstawiono naładowany przewodnik w postaci blaszki o nieregularnym kształcie.



punkt wewnątrz przewodnika

Znamy natężenie pola elektrycznego E_A oraz potencjał V_A w punkcie A. Porównaj natężenia pola elektrycznego i potencjały w pozostałych punktach do natężenia i potencjału w punkcie A.

4. Wykonaj doświadczenie.

   a) Przygotuj świeczkę na świeczniku, zapałki, gwóźdź, przewodnik (np. miedziany przewód lub pasek folii aluminiowej) oraz maszynę elektrostatyczną lub generator Van de Graaffa.

   b) Umocuj gwóźdź tak, aby był odizolowany od podłoża i skierowany w stronę świeczki. Podłącz go przewodnikiem z maszyną elektryczną.

   c) Zapal świeczkę i włącz maszynę.

   d) Co się dzieje z płomieniem świeczki? Wyjaśnij swoje obserwacje.



12.7. Ruch naładowanej cząstki w polu elektrycznym

Przypomnij sobie

- W jednorodnym polu elektrycznym wektory natężenia pola są sobie równe w każdym punkcie pola (tzn. mają jednakowe: wartość, kierunek i zwrot).
- Ciało podrzucone pionowo w górę porusza się coraz wolniej, zatrzymuje się i spada. Jego przyspieszenie jest w trakcie takiego ruchu stałe (ma wartość g i jest zwrócone w dół).
- Ciało rzucone z prędkością skierowaną poziomo porusza się po paraboli. Ten ruch można traktować jako złożenie niezależnych od siebie ruchów: w poziomie (ruch jednostajny) i w pionie (spadek swobodny).

W tej lekcji omówimy ruch naładowanej cząstki pod wpływem siły elektrycznej. Przez cząstkę rozumiemy niewielkie ciało (punkt materialny) obdarzone ładunkiem oraz masą, takie jak elektron, proton, czy też kropelka wody. Będziemy rozważać sytuację, w której pole jest jednorodne, a siła elektryczna jest jedyną siłą działającą na cząstkę. Omówmy kilka szczególnych przypadków.



Rys. **12.36.** W akceleratorach można przyspieszać naładowane cząstki do prędkości bliskich prędkości światła. Na zdjęciu Wielki Zderzacz Hadronów (Large Hadron Collider – LHC) w ośrodku Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN

Ruch ładunku zgodnie z kierunkiem linii pola

Zgodnie z drugą zasadą dynamiki siła elektryczna może nadawać ciału przyspieszenie. Przeanalizujmy najpierw przypadek, gdy naładowana cząstka jest wprowadzona do jednorodnego pola elektrycznego z prędkością $\vec{v}$ równoległą do wektora natężenia pola $\vec{E}$. Na cząstkę o ładunku q w polu elektrycznym o natężeniu $\vec{E}$ działa siła:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Zwrot tej siły zależy od znaku ładunku i zwrotu wektora natężenia pola. Jak widzimy na rysunkach 12.37a i 12.37c na s. 118, siła elektryczna ma zwrot zgodny ze zwrotem prędkości cząstki lub przeciwny do niego. W związku z tym może zwiększać lub zmniejszać wartość prędkości cząstki. Z drugiej zasady dynamiki wynika, że wartość przyspieszenia wynosi:

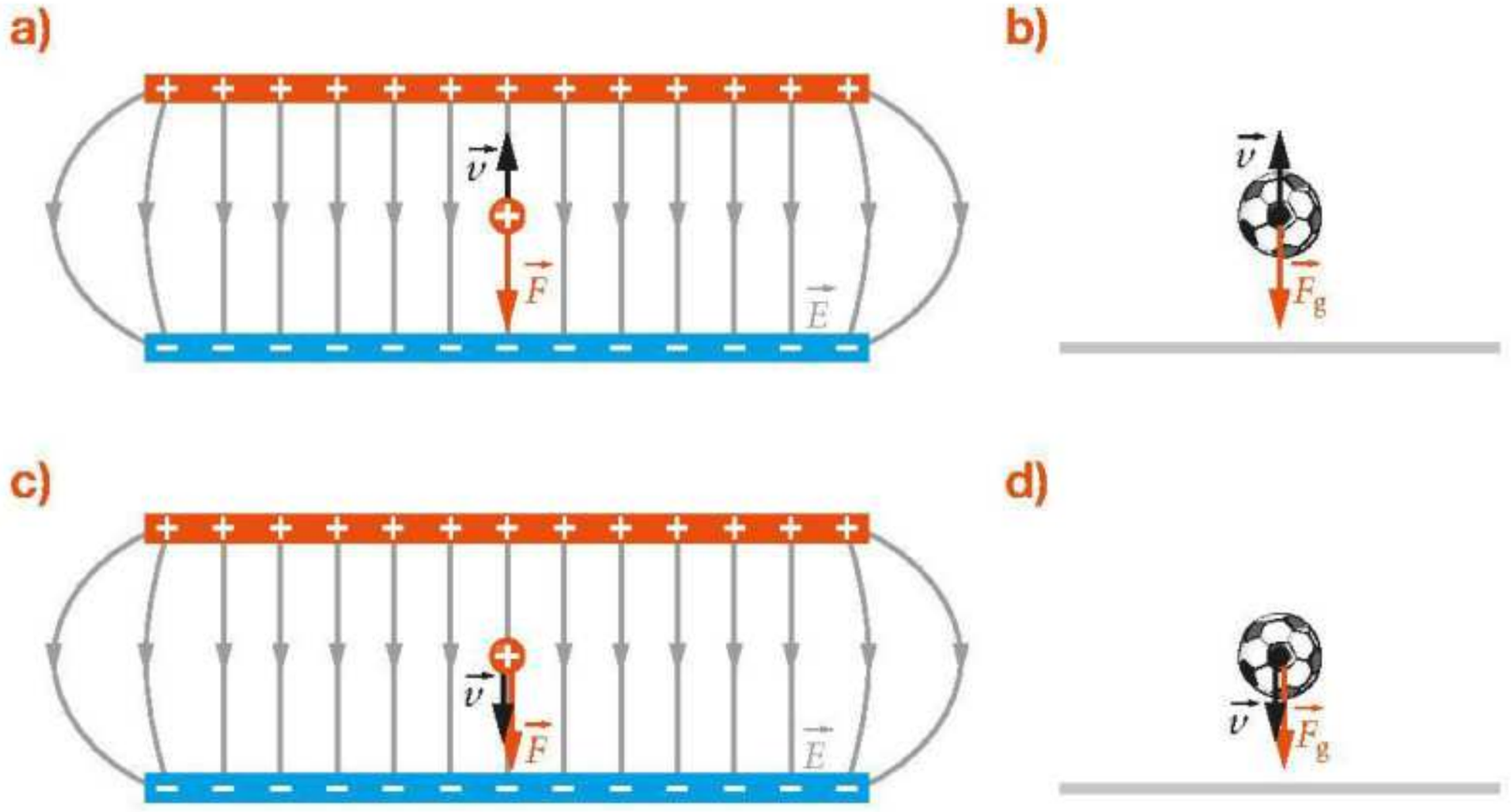
$$a = \frac{qE}{m}$$

Z drugiej zasady dynamiki: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

gdzie: q – ładunek cząstki, E – natężenie pola elektrycznego, m – masa cząstki.

Zjawisko ruchu cząstki naładowanej w jednorodnym polu elektrycznym przebiega podobnie do rzutu pionowego (rys. 12.37b i 12.37d s. 118).

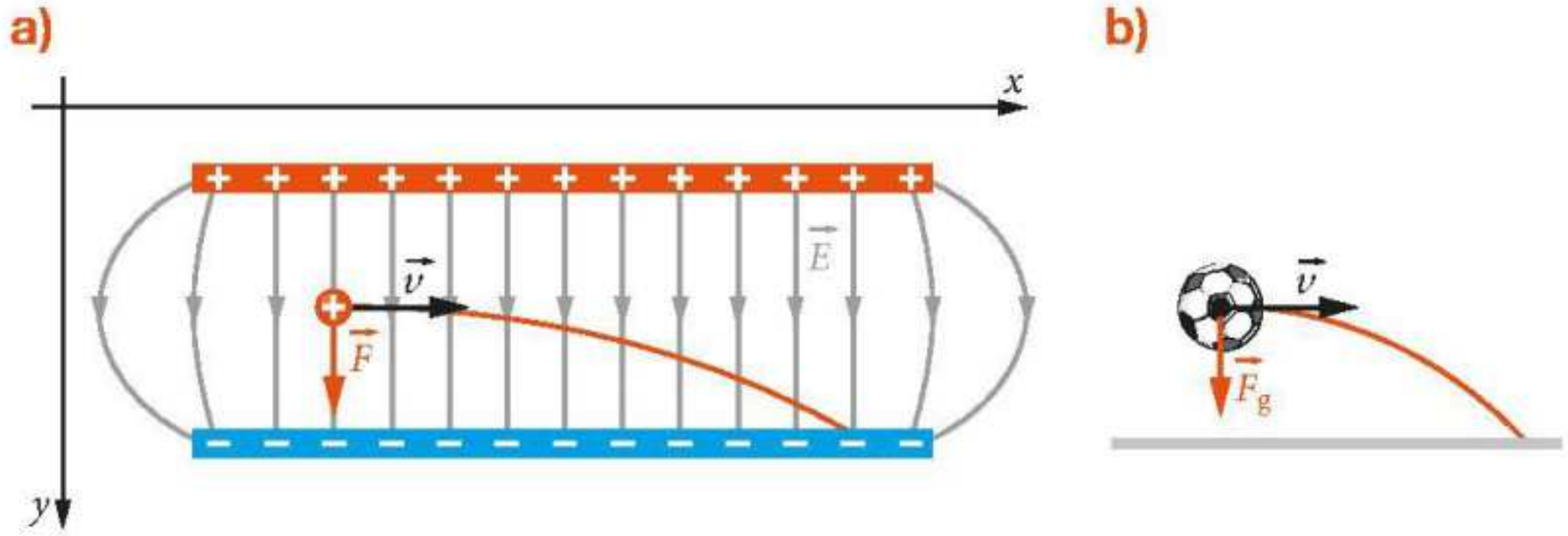
Kiedy cząstka porusza się przeciwnie do zwrotu linii pola, jest hamowana (rys. 12.37a), zatrzymuje się, a potem przyspiesza w przeciwnym kierunku, czyli zgodnie ze zwrotem linii pola (jak na rys. 12.37c).
W przypadku ładunku ujemnego zwrot siły, a więc i przyspieszenia, jest przeciwny do tego, który otrzymaliśmy dla ładunku dodatniego.



Rys. **12.37.** Porównanie ruchu odbywającego się równolegle do linii jednorodnego pola elektrycznego (a, c) i rzutu pionowego (b, d)

Ruch naładowanej cząstki z prędkością początkową prostopadłą do wektora natężenia pola

Przejdźmy do omówienia sytuacji, gdy naładowana cząstka jest wprowadzona do jednorodnego pola elektrycznego z prędkością $\vec{v}$ prostopadłą do kierunku wektora natężenia pola $\vec{E}$. Niech cząstka ma masę m i dodatni ładunek $q > 0$ (rys. 12.38a).



Rys. **12.38.** a) ruch ciała naładowanego dodatnio: w jednorodnym polu elektrycznym, z prędkością początkową $\vec{v}$ prostopadłą do kierunku wektora natężenia pola, b) rzut poziomy

Na cząstkę o masie m działa siła $F = Eq$, która nadaje jej przyspieszenie o wartości:

$$a = \frac{Eq}{m}$$

Kierunek i zwrot wektora przyspieszenia tej cząstki jest zgodny z kierunkiem i zwrotem wektora siły elektrycznej. Oznacza to, że przyspieszenie cząstki jest skierowane równolegle do linii pola, a prostopadle do prędkości początkowej ciała.

Sytuacja jest więc podobna do rzutu poziomego (rys. 12.38b). W kierunku osi x (prostopadłej do linii pola elektrycznego) na ciało nie działa żadna siła, porusza się więc ono ruchem jednostajnym:

Rzut poziomy, cz. I, s. 100–102

$$a_x = 0 \qquad v_x = v_0$$
$$x = x_0 + v_0 t$$

W kierunku osi y (zgodnej z kierunkiem i zwrotem linii pola elektrycznego) ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym:

$$a_y = \frac{Eq}{m} \qquad v_y = \frac{Eq}{m} \cdot t$$
$$y = y_0 + \frac{1}{2}\left(\frac{Eq}{m}\right)t^2$$

W opisie rzutu pionowego w cz. I podręcznika pojawił się znak minus, gdyż oś y była skierowana do góry, czyli przeciwnie do zwrotu siły grawitacji.

Ruchy w pionie i w poziomie są niezależne, a efektem ich złożenia jest ruch ładunku po paraboli.

Przedstawione powyżej wzory zachowują ważność także dla ładunku ujemnego ($q < 0$), jednak zmienia się ich interpretacja. W tej sytuacji $a_y < 0$, czyli wektor przyspieszenia jest skierowany przeciwnie do zwrotu linii pola (przeciwnie do zwrotu osi y).

Skoro początkowa wartość v_y jest równa zeru, a przyspieszenie jest ujemne, to przez cały czas $v_y < 0$. Ta ostatnia nierówność oznacza, że pionowa składowa prędkości jest zwrócona przeciwnie do zwrotu linii pola.

Po tej lekcji powinieneś

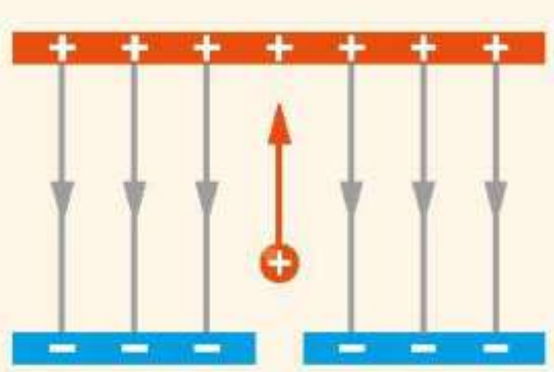
- opisywać siły działające na ładunek elektryczny poruszający się w stałym jednorodnym polu elektrycznym;
- analizować ruch ładunku w takim polu;
- opisywać podobieństwa i różnice między ruchem ładunków w jednorodnym polu elektrycznym a ruchem ciał pod wpływem siły grawitacji.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Natężenie pola elektrycznego między dwiema równoległymi płytkami wynosi $E = 1000\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$. Przez szczelinę w płytce naładowanej ujemnie wpada proton z prędkością początkową $v_\mathrm{p} = 10^5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ i porusza się równolegle do linii pola elektrycznego w kierunku płyty naładowanej dodatnio. Oblicz drogę, jaką przebędzie proton do chwili zatrzymania się. Pomiń wpływ siły grawitacji na ruch cząstki.



Rozwiązanie

Sposób I

Siła $F = qE$ działająca na proton powoduje jego ruch jednostajnie opóźniony z przyspieszeniem o wartości $a = \frac{qE}{m_\mathrm{p}}$. Prędkość protonu zmniejszy się od v_p do zera po czasie:

$$t = \frac{v_\mathrm{p}}{a} = \frac{m_\mathrm{p} v_\mathrm{p}}{qE}$$

W tym czasie proton przebędzie drogę:

$$x = v_\mathrm{p} t - \frac{1}{2} a t^2 = v_\mathrm{p} t - \frac{1}{2} \frac{v_\mathrm{p}}{t} t^2 = \frac{1}{2} v_\mathrm{p} t = \frac{m_\mathrm{p} v_\mathrm{p}^2}{2qE}$$

$$[x] = \frac{\mathrm{kg} \cdot (\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}})^2}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2 \cdot \mathrm{C} \cdot \mathrm{V}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^3}{\mathrm{s}^2 \cdot \cancel{\mathrm{C}} \cdot \frac{\mathrm{J}}{\cancel{\mathrm{C}}}} = \frac{\cancel{\mathrm{kg}} \cdot \mathrm{m}^{\cancel{3}1}}{\cancel{\mathrm{s}^2} \cdot \cancel{\mathrm{kg}} \cdot \frac{\cancel{\mathrm{m}^2}}{\cancel{\mathrm{s}^2}}} = \mathrm{m}$$

Masę protonu m_p i jego ładunek (równy ładunkowi elementarnemu e) odczytujemy z tablic: $m_\mathrm{p} = 1{,}7 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$.

Po podstawieniu wartości liczbowych do wzoru otrzymujemy:

$$x \approx 0{,}053\ \mathrm{m}$$

Sposób II

Energia kinetyczna protonu o prędkości początkowej v_p jest równa:

$$E_\mathrm{k} = \frac{m_\mathrm{p} v_\mathrm{p}^2}{2}$$

Proton traci tę energię podczas hamowania w polu elektrycznym. Zamienia się ona wówczas w elektryczną energię potencjalną $E_\mathrm{pe} = qEx$. Możemy zatem zapisać:

$$\frac{m_\mathrm{p} v_\mathrm{p}^2}{2} = qEx$$

Z tego równania wyznaczamy x:

$$x = \frac{m_\mathrm{p} v_\mathrm{p}^2}{2qE}$$

Dalsze obliczenia przebiegają identycznie jak w sposobie I.

Odpowiedź: Proton do chwili zatrzymania przebędzie drogę równą ok. 5,3 cm.

1. W jednorodnym polu elektrycznym o natężeniu $20\ \frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{m}}$ znajduje się kulka o masie 2 mg i ładunku 3 nC. Oblicz przyspieszenie, z jakim porusza się kulka.

2. Elektron lecący z prędkością $3 \cdot 10^6\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ wpada w pole elektryczne prostopadle do linii tego pola. Natężenie pola wynosi $100\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$. Oblicz wartość odchylenia toru elektronu od linii prostej po przebyciu 4 cm w kierunku prostopadłym do linii pola.

3. Energia kinetyczna rozpędzonego elektronu w wiązce w akceleratorze SLAC wynosi 8 nJ. Oblicz łączną różnicę potencjałów na drodze, jaką elektron musiał pokonać, jeśli na początku znajdował się w spoczynku.

4*. Kula o promieniu R ma ładunek ujemny Q.

a) Oblicz prędkość, jaką musi mieć ciało o ładunku dodatnim q i masie m znajdujące się bardzo blisko kuli, aby bez działania dodatkowej siły oddaliło się od tej kuli na bardzo dużą odległość.

b) Z jaką wielkością z dziedziny grawitacji kojarzy się wielkość obliczana w punkcie a)? Omów podobieństwa i różnice między tymi wielkościami.

Wskazówka. Gdy pole nie jest jednorodne, na ciało działa zmienna siła, jednak na wiele pytań możemy odpowiedzieć dzięki zasadzie zachowania energii lub – w przypadku sił przyciągających – przez analogię z oddziaływaniem grawitacyjnym.

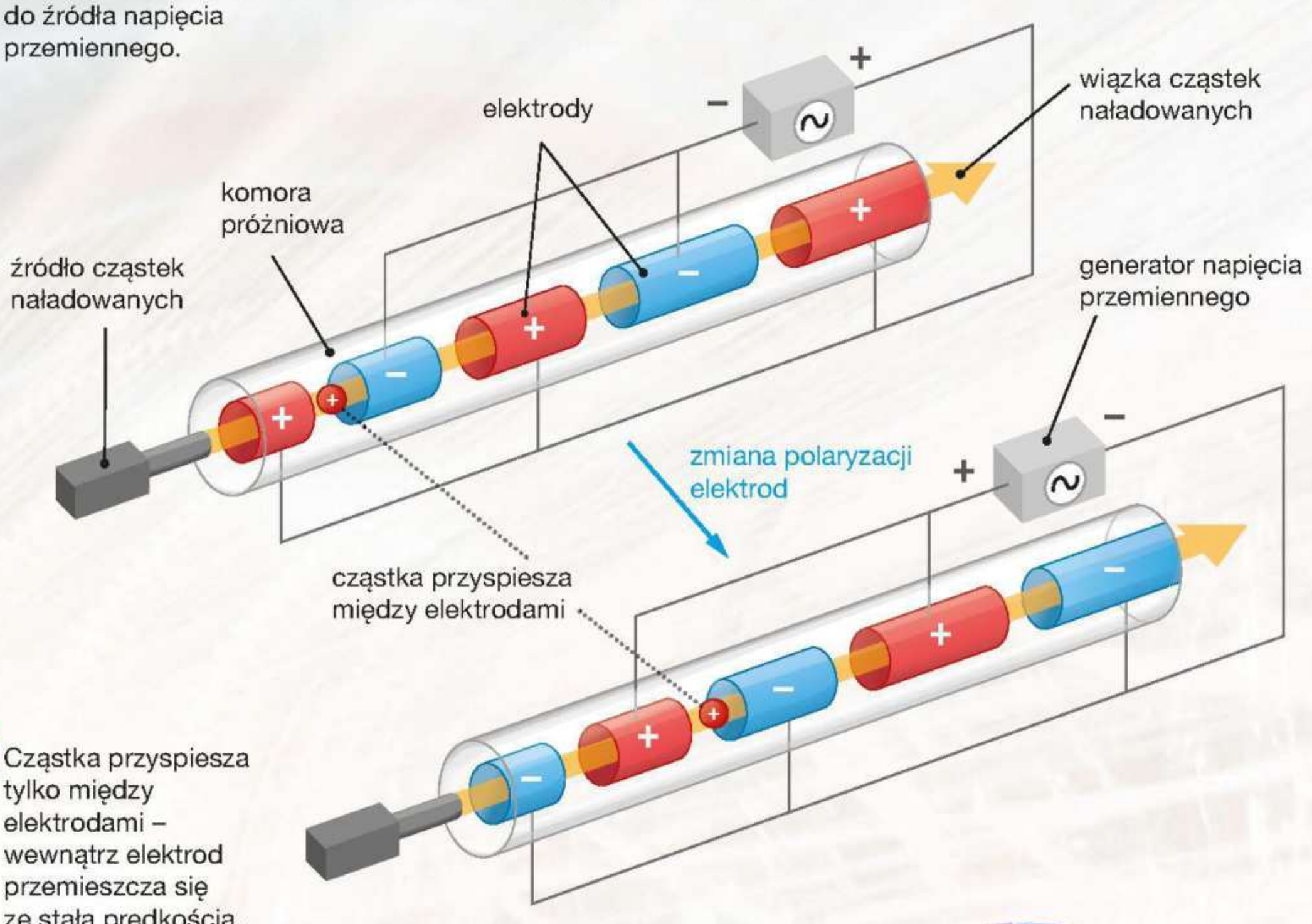
Akcelerator liniowy

Akceleratory to urządzenia rozpędzające cząstki do bardzo dużych prędkości za pomocą pola elektrycznego. Jednym z rodzajów akceleratorów są akceleratory liniowe.

1 Jedna z metod rozpędzania cząstek naładowanych w akceleratorach liniowych polega na skierowaniu wiązki naładowanych cząstek wzdłuż cylindrycznych elektrod, które są podłączone do źródła napięcia przemiennego.

2 Elektrody są podłączone w taki sposób, że sąsiadujące ze sobą mają przeciwną polaryzację. W konsekwencji między elektrodami występuje pole elektryczne, które powoduje przyspieszanie przelatującej naładowanej cząstki.

3 Aby cząstka mogła przyspieszać między kolejnymi parami elektrod, ich polaryzacja się zmienia.



4 Cząstka przyspiesza tylko między elektrodami – wewnątrz elektrod przemieszcza się ze stałą prędkością, która w każdej kolejnej elektrodzie jest coraz większa. Dlatego, aby czas przelotu przez elektrody był taki sam, każda kolejna elektroda jest dłuższa od poprzedniej. Dzięki temu można zsynchronizować przeloty między elektrodami z częstotliwością przemiennego napięcia powodującego ich polaryzację.

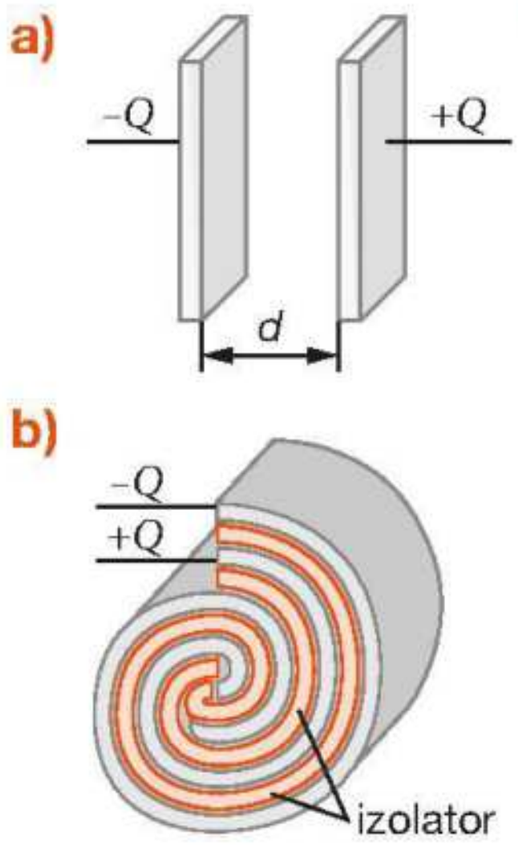


Najdłuższy nadprzewodzący liniowy akcelerator znajduje się obecnie w ośrodku DESY w Hamburgu. Na zdjęciu widać fragment akceleratora, który umieszczono w podziemnym tunelu.

12.8. Kondensatory

Przypomnij sobie

- Między dwiema przeciwnie naładowanymi płytkami występuje jednorodne pole elektryczne.
- Pod wpływem pola elektrycznego cząsteczki w dielektryku ulegają polaryzacji.



Rys. **12.39.** Budowa kondensatora a) płaskiego, b) zwijanego

Kondensator jest urządzeniem, które magazynuje energię elektryczną. W najprostszym przypadku składa się on z dwóch równoległych płytek, zwanych **okładkami**, oddzielonych powietrzem lub izolatorem (rys. 12.39a). Tak skonstruowany kondensator nazywamy **płaskim.** Okładki mogą też zostać zwinięte, co znacznie zmniejsza rozmiary urządzenia (rys. 12.39b). Nie zmienia to jednak zasady jego działania. Aby się przekonać, że kondensator gromadzi energię elektryczną, wykonaj następujące doświadczenie.

Doświadczenie 9 – obowiązkowe

Przekaz energii podczas rozładowania kondensatora



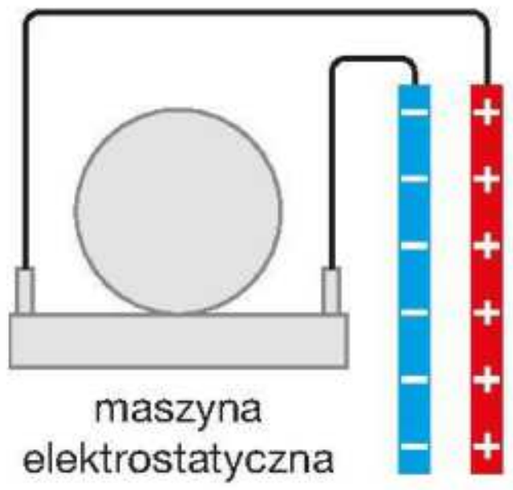
1. Przygotuj 5 plastikowych koszulek do segregatora formatu A4, folię aluminiową, nożyczki, dwa stalowe spinacze biurowe, 3 przewody w izolacji oraz maszynę elektrostatyczną, generator Van de Graaffa lub rakietę na komary. Do łączenia przewodów najłatwiej zastosować krokodylki (patrz s. 148), ale można je zastąpić spinaczami biurowymi.
2. Z folii aluminiowej wytnij dwa prostokątne arkusze, nieco mniejsze niż plastikowa koszulka, i do każdego z nich przypnij spinacz. Do każdego spinacza podłącz przewód.
3. Jeden arkusz folii połóż na stole. Złóż koszulki razem i przykryj nimi pierwszy arkusz, a drugi – połóż na koszulkach. Zadbaj, aby arkusze nie stykały się ze sobą i aby krokodylki były oddalone od siebie o co najmniej 1 cm.
4. Wolny koniec jednego z przewodów przypiętych do spinaczy połącz z biegunem maszyny elektrostatycznej (przewód nr 1 na zdjęciu). Do drugiego bieguna maszyny elektrostatycznej podłącz trzeci przewód. Kondensator jest gotowy – teraz zbadamy, jak działa.
5. **Trzymając za izolację**, zetknij wolne końce przewodów nr 2 i 3 i włącz na chwilę maszynę. Wyłącz ją i rozłącz końce przewodów nr 2 i 3.
6. Teraz zbliż wolny koniec przewodu nr 2 do jednego z końców przewodu nr 1. **Nie przestrasz się efektu!**

W naszym doświadczeniu mieliśmy okazję zobaczyć i usłyszeć przeskok iskry elektrycznej. Zauważ, że maszyna elektrostatyczna (rakieta, generator Van de Graaffa) była wówczas odłączona od kondensatora, a w dodatku – wyłączona. To dowodzi, że energia potrzebna do wytworzenia iskry została zmagazynowana w kondensatorze.

Działanie kondensatora

Gdy okładki kondensatora podłączymy do źródła napięcia, elektrony z ujemnego bieguna źródła przepłyną do jednej z okładek i odepchną elektrony z drugiej okładki do dodatniego bieguna źródła. W ten sposób na obu okładkach zgromadzą się ładunki o tej samej wartości, ale przeciwnym znaku (rys. 12.40). Między okładkami kondensatora jest więc pole elektryczne. Ponieważ okładki mają różny potencjał, między nimi występuje napięcie.

Gdy odłączymy kondensator od źródła napięcia i połączymy okładki przewodnikiem, będą między nimi przepływać ładunki elektryczne. Ich przepływ ustanie w momencie wyrównania potencjałów. Wtedy kondensator się rozładuje.



Rys. 12.40. Kondensator podłączony do maszyny elektrostatycznej

Pojemność kondensatora

Pojemność kondensatora to wielkość opisująca zależność między ładunkiem Q zgromadzonym na okładkach kondensatora a napięciem U między tymi okładkami.

Jak wiesz, napięcie między okładkami to różnica ich potencjałów. Jest ono równe ilorazowi energii potrzebnej do przeniesienia ładunku próbnego między okładkami i wartości tego ładunku. Łatwo zauważyć, że kiedy na okładkach zgromadzi się większy ładunek, to proporcjonalnie rośnie siła działająca na umieszczony między nimi ładunek próbny, a ostatecznie – również energia potrzebna do przeniesienia tego ładunku, czyli także napięcie. Tak więc napięcie U i ładunek Q są proporcjonalne, a ich stosunek jest wielkością stałą:

$$\frac{Q}{U} = \text{const}$$

Ten iloraz wskazuje na ładunek, jaki można zgromadzić w kondensatorze, gdy napięcie między okładkami wynosi 1 V. Oczywiście przy wyższym napięciu ładunek jest odpowiednio większy. Dlatego wielkość $\frac{Q}{U}$ nazywamy **pojemnością kondensatora**.

Aby lepiej zrozumieć to pojęcie, możemy zastosować porównanie. Pojemność butli gazowej dla danej temperatury można mierzyć w molach na paskal – taka wielkość określa, ile moli gazu można zgromadzić w butli pod ciśnieniem 1 Pa. Pod wyższym ciśnieniem ilość gazu w butli będzie odpowiednio większa, ale jej pojemność pozostanie stała.



Rys. 12.41. Pojemność kondensatorów zależy od ich rozmiarów i sposobu wykonania

> Pojemność kondensatora to iloraz ładunku zgromadzonego na każdej z jego okładek i napięcia między okładkami:
>
> $$C = \frac{Q}{U}$$

Podstawową jednostką pojemności kondensatora jest **farad** (F). Nazwa tej jednostki pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka Michaela Faradaya.



Rys. 12.42. Michael Faraday (1791–1867)

Z definicji pojemności kondensatora wynika, że:

$$1\,\mathrm{F} = 1\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}}$$

Tak więc kondensator o pojemności 5 F pozwala na zgromadzenie ładunku 5 C pod napięciem 1 V, ładunku 10 C pod napięciem 2 V itd. Farad to bardzo duża jednostka. Pojemność większości kondensatorów stosowanych w praktyce mieści się w przedziale od pikofaradów ($1\ \mathrm{pF} = 10^{-12}\ \mathrm{F}$) do milifaradów ($1\ \mathrm{mF} = 10^{-3}\ \mathrm{F}$).

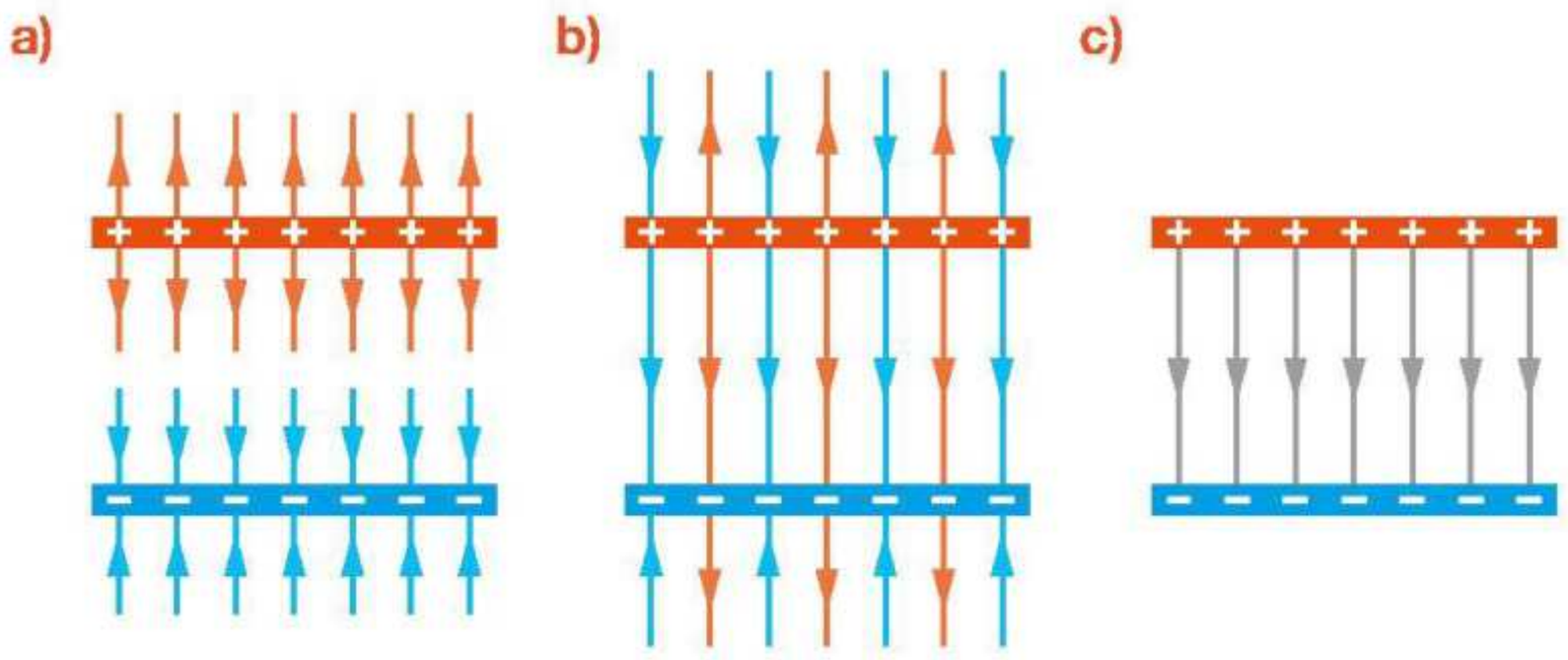
Pole wewnątrz kondensatora płaskiego

Załóżmy, że naładowane okładki są bardzo duże w stosunku do dzielącej je odległości. Wówczas możemy pominąć zjawiska zachodzące na ich brzegach.

Rozważmy każdą okładkę z osobna (rys. 12.43a). Rozpatrujemy pole znajdujące się z dala od brzegów, więc możemy przyjąć, że okładka jest fragmentem nieskończonej płaszczyzny. Ładunki są na takiej powierzchni rozmieszczone równomiernie, zatem nie ma powodu, żeby linie pola odchylały się w jakimś szczególnym kierunku albo żeby natężenie pola miało w jednym punkcie inną wartość niż w innym. Oznacza to, że pole jest jednorodne.

Co się stanie, gdy ustawimy okładki naprzeciwko siebie (rys. 12.43b)? Ich pola się dodają, ponieważ linie pola między nimi mają ten sam zwrot, czyli powstaje silniejsze pole. Natomiast na zewnątrz okładek linie mają zwrot przeciwny, przez co ich suma jest równa zeru (rys. 12.43c). Wynika z tego, że **pole między okładkami jest jednorodne, a na zewnątrz – nie ma pola**.

Pole jednorodne, s. 91



Rys. 12.43. Pole wewnątrz kondensatora: a) każda z okładek rozpatrywana osobno, b) okładki po zbliżeniu, c) łączne pole pochodzące od obu okładek

Na stronie 103 wyprowadziliśmy wzór $V = Ex$, opisujący zależność potencjału V w jednorodnym polu elektrycznym od natężenia pola E i położenia x punktu, w którym badamy pole. Jeśli w przypadku pola wewnątrz kondensatora za punkt o zerowym potencjale przyjmiemy

ujemną okładkę, to potencjał dodatniej okładki jest równy różnicy potencjałów między okładkami, czyli napięciu między nimi:

$$V = U$$

Położenie x dodatniej okładki jest równe odległości między okładkami, czyli $x = d$. Otrzymujemy więc zależność $U = Ed$, z której możemy wyznaczyć natężenie pola.

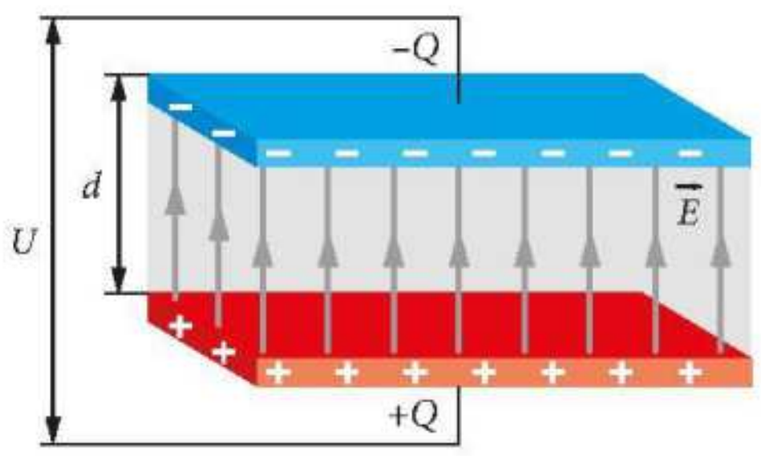
Natężenie pola między okładkami kondensatora płaskiego wynosi:

$$E = \frac{U}{d}$$

gdzie U jest napięciem między okładkami, a d – ich odległością.
Z tej zależności skorzystamy, aby wyprowadzić wzór na pojemność kondensatora.

Od czego zależy pojemność kondensatora płaskiego

Przyjrzyjmy się konstrukcji i działaniu kondensatora płaskiego o pojemności C, na którego okładkach o powierzchni S, oddalonych od siebie o odległość d, zgromadziły się ładunki $+Q$ i $-Q$. Napięcie między okładkami oznaczmy jako U (rys. 12.44).



Rys. 12.44. Schemat kondensatora płaskiego

Gdybyśmy zestawili obok siebie dwa takie same, jednakowo naładowane kondensatory, to łącznie tworzyłyby one jeden większy kondensator. Na każdej z jego okładek o powierzchni $2S$ gromadziłby się ładunek $2Q$ pod tym samym napięciem U. Powstały w ten sposób kondensator miałby dwukrotnie większą pojemność. To rozumowanie przekonuje nas, że **pojemność kondensatora jest proporcjonalna do powierzchni okładek**.
Sprawdźmy, jak pojemność zależy od odległości d między okładkami. W tym celu wykonajmy doświadczenie.



Doświadczenie 10

1. Przygotuj elektroskop i dwie metalowe płytki.
2. Przymocuj jedną z płytek do elektroskopu i ją naelektryzuj (możesz np. naelektryzować balonik przez potarcie go tkaniną, a następnie zebrać jego ładunek na płytce).
3. Weź drugą płytkę w dłoń. Przybliż ją do pierwszej i obserwuj wskazania elektroskopu.

Elektroskop i potencjał s. 104

Opadnięcie wskazówki elektroskopu oznacza zmniejszenie się jego potencjału. Ładunek zgromadzony na dolnej płytce pozostaje stały (płytka jest na tyle duża, że zmianę związaną z przepływem elektronów do elektroskopu lub z elektroskopu możemy pominąć). Oznacza to, że **gdy odległość między okładkami jest mniejsza, to pojemność kondensatora jest większa.**

Dlaczego natężenie pola nie zmienia się przy rozsuwaniu płytek? Najłatwiej pomyśleć o liniach pola. Wydłużą się one, ale nie staną się rzadsze ani gęściejsze.

Wyjaśnijmy wynik tego doświadczenia. Ładunek płytek pozostaje stały, więc nie zmienia się również natężenie pola między okładkami kondensatora. Z zależności $E = \frac{U}{d}$:

$$U = Ed$$

Wobec tego gdy zmniejszamy odległość między okładkami, proporcjonalnie maleje napięcie między nimi. Zgodnie ze wzorem $C = \frac{Q}{U}$ mniejsze napięcie przy takim samym ładunku oznacza proporcjonalnie większą pojemność.

Wiemy już, że pojemność jest proporcjonalna do powierzchni okładek i odwrotnie proporcjonalna do odległości między nimi, co możemy zapisać następująco:

$$C = \text{const} \cdot \frac{S}{d}$$

gdzie: const – stała, S – powierzchnia jednej okładki kondensatora, d – odległość między okładkami.

Defibrylator (AED) może uratować życie

W przypadku niektórych zaburzeń rytmu serca, zagrażających życiu pacjenta, stosujemy defibrylator.

To urządzenie przepuszcza przez serce prąd elektryczny o dużym natężeniu i powoduje przerwanie arytmii, skutkującej zatrzymaniem krążenia. Zasadniczym elementem defibrylatora jest kondensator, pozwalający nie tylko zmagazynować potrzebną energię (równą 360 J), lecz także wyzwolić ją w krótkim czasie.



Nowoczesny defibrylator zautomatyzowany sam udziela instrukcji użytkownikowi, a nawet wykonuje badanie pracy serca pacjenta (EKG) i decyduje, czy zaaplikowanie wstrząsu jest wskazane. Może więc go użyć każda osoba udzielająca pomocy poszkodowanemu, nie tylko lekarz czy ratownik medyczny. Ciebie także to dotyczy. Jeśli znajdziesz nieprzytomną osobę, która nie oddycha, a w pobliżu jest defibrylator AED, nie wahaj się – możesz uratować komuś życie!

Okazuje się, że ta stała to znana nam już przenikalność elektryczna ε ośrodka znajdującego się między okładkami. Pełny wzór na pojemność kondensatora ma więc postać:

Przenikalność elektryczna ośrodka s. 82

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Rola ośrodka między okładkami

Zobaczmy, co się stanie, kiedy w przestrzeni między okładkami zamiast powietrza znajdzie się inny dielektryk (czyli izolator). Sprawdźmy, jak to wpłynie na pojemność kondensatora.

Doświadczenie 11

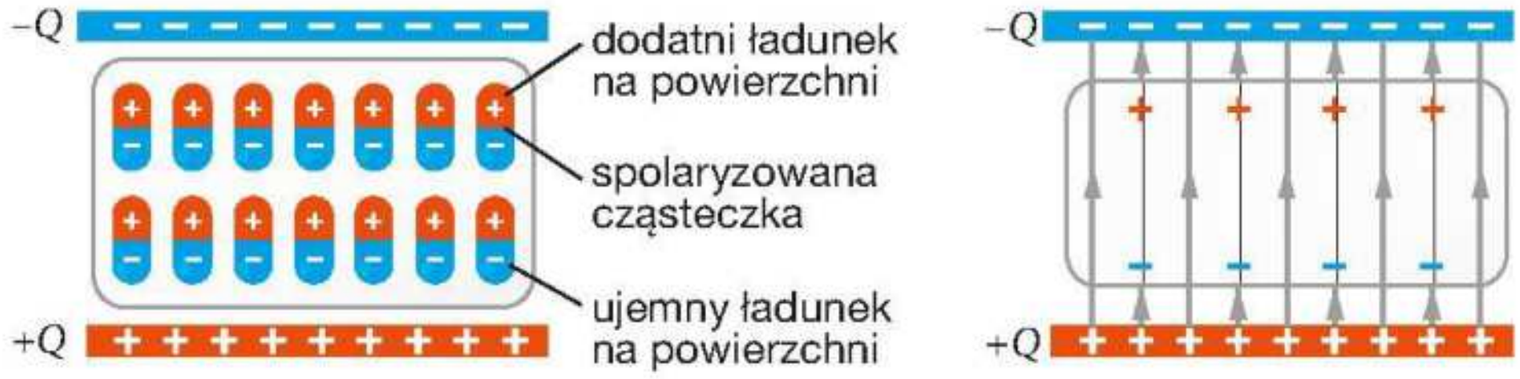
1. Przygotuj taki sam układ jak do doświadczenia 10. (s. 125) oraz dużą plastikową płytę (np. plastikową tacę).
2. Naładuj metalową płytę podłączoną do elektroskopu i zbliż do niej drugą metalową płytkę. Możesz umocować ją na statywie.
3. Drugą ręką (albo przy pomocy drugiej osoby) wsuń plastikową płytę między metalowe płytki.



Kiedy między metalowe płytki włożyliśmy plastikową tacę, wskazówka elektroskopu wychyliła się słabiej (zmniejszyło się napięcie między płytkami). Można z tego wysnuć wniosek, że pojemność kondensatora zawierającego dielektryk jest znacznie większa niż pojemność kondensatora z powietrzem między okładkami. Ile razy – to zależy od użytego izolatora, a konkretnie od jego przenikalności elektrycznej, co jest zgodne z podanym wcześniej wzorem.

Dlaczego włożenie izolatora między płytki zwiększa pojemność kondensatora? Mówiliśmy już o polaryzacji dielektryka, która powoduje jego oddziaływanie z ciałami naelektryzowanymi. To samo zjawisko pozwala wyjaśnić zależność pojemności kondensatora od rodzaju substancji znajdującej się między okładkami.

Polaryzacja dielektryka (izolatora) s. 81



Rys. **12.45.** Dielektryk wewnątrz naładowanego kondensatora

Dielektryk wytwarza pole elektryczne, którego linie są skierowane przeciwnie do linii pola zewnętrznego. W efekcie wypadkowe pole wewnątrz kondensatora z dielektrykiem zostaje osłabione, a co za tym idzie, także napięcie między jego okładkami jest mniejsze, mimo że w kondensatorze

jest zgromadzony taki sam ładunek. Ponieważ pojemność kondensatora zależy odwrotnie proporcjonalnie od napięcia między okładkami, więc pojemność kondensatora wypełnionego dielektrykiem jest większa niż pojemność kondensatora bez dielektryka.

Energia zgromadzona w kondensatorze

Tak się działo w doświadczeniu 9. na s. 122.

W trakcie ładowania kondensatora jest wykonywana pewna praca, w wyniku czego gromadzi on energię. Energię tę możemy odzyskać poprzez rozładowanie kondensatora.

Wyobraźmy sobie, że początkowo rozładowany kondensator o pojemności C jest stopniowo ładowany poprzez przenoszenie ładunku z jednej okładki na drugą. W chwili, gdy między okładkami został przeniesiony ładunek Q, napięcie między okładkami wynosi:

$$U = \frac{Q}{C}$$

Jeżeli znamy napięcie między okładkami kondensatora oraz wartość przeniesionego ładunku, możemy obliczyć pracę włożoną w przeniesienie tego ładunku. Musimy przy tym wziąć pod uwagę, że w czasie ładowania kondensatora napięcie się zmienia – rośnie proporcjonalnie do ładunku zgromadzonego w kondensatorze od wartości 0 do $\frac{Q}{C}$. Z tego względu możemy przyjąć, że średnie napięcie podczas ładowania kondensatora jest równe:

$$U_{śr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{C}$$

Stąd:

$$W = QU_{śr} = \frac{Q^2}{2C}$$

Energia zgromadzona w kondensatorze jest równa tak właśnie wyrażonej pracy:

$$E_c = W = \frac{Q^2}{2C}$$

gdzie: Q – zgromadzony ładunek, C – pojemność kondensatora.

Po podstawieniu wzoru $Q = UC$ powyższą zależność można zapisać także w postaci:

$$E_c = \frac{U^2 C}{2}$$

Z powyższych wzorów wynika, że przy określonej pojemności kondensatora zgromadzona w nim energia jest proporcjonalna do kwadratu zgromadzonego w nim ładunku, a zatem – do kwadratu napięcia między okładkami.

$$\frac{C^2}{F} = \frac{C^2}{\frac{C}{V}} = \frac{C^2 \cdot V}{C} = C \cdot V = C \cdot \frac{J}{C} = J$$

$$V^2 \cdot F = V^2 \cdot \frac{C}{V} = V \cdot C = \frac{J}{C} \cdot C = J$$

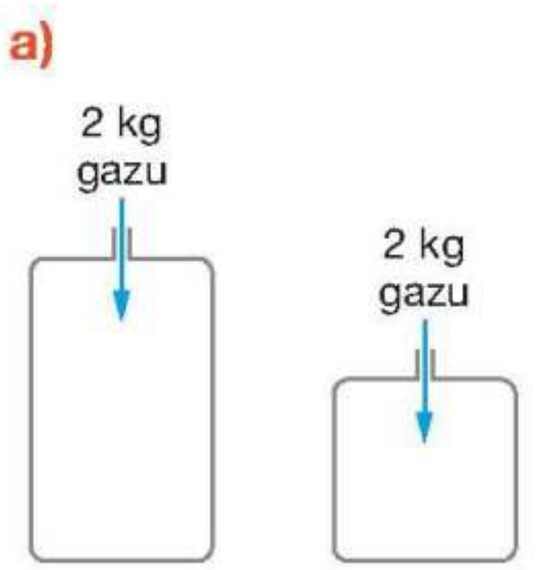
A to ciekawe

W ostatnich latach coraz częściej mamy do czynienia z superkondensatorami. Pozwalają one gromadzić energię wielokrotnie większą niż zwykły kondensator. Dlatego mogą zastępować akumulatory pojazdów hybrydowych i elektrycznych lub przynajmniej je wspomagać. W superkondensatorach można zbierać energię traconą przez pojazd w czasie hamowania, aby następnie wykorzystać ją podczas rozpędzania.
Superkondensatory wykorzystujemy także w niewielkich urządzeniach, takich jak wkrętarki czy lampy. Dzięki szybkiemu ładowaniu pozwalają one uniknąć przerw w pracy.



Jak jednak zgromadzona w kondensatorze energia zależy od jego pojemności? Z pierwszego wzoru wynika, że energia jest odwrotnie proporcjonalna do pojemności, z drugiego – że wielkości te są wprost proporcjonalne. Mimo wszystko żadna sprzeczność tu nie zachodzi, gdyż każdy z przedstawionych wzorów dotyczy innej sytuacji.

- Pierwszy opisuje przypadek, kiedy w kilku kondensatorach chcemy zgromadzić ten sam ładunek. Wówczas im mniejsza jest pojemność kondensatora, tym szybciej rośnie napięcie (i natężenie pola elektrycznego) między jego okładkami, a więc do przemieszczenia takiego samego ładunku jest potrzebna większa praca. Wówczas energia jest odwrotnie proporcjonalna do pojemności. Jest to sytuacja podobna do pompowania tej samej ilości gazu do różnych butli (rys. 12.46a).
- Drugi ze wzorów dotyczy ładowania kilku kondensatorów o różnej pojemności w taki sposób, aby wszystkie miały takie samo napięcie. W takim przypadku musimy przenieść ładunek tym większy, im większa jest pojemność kondensatora. Wówczas energia E_c zgromadzona w kondensatorze jest wprost proporcjonalna do jego pojemności C. Jest to sytuacja podobna do pompowania gazu do różnych butli z zamiarem uzyskania tego samego ciśnienia (rys. 12.46b).

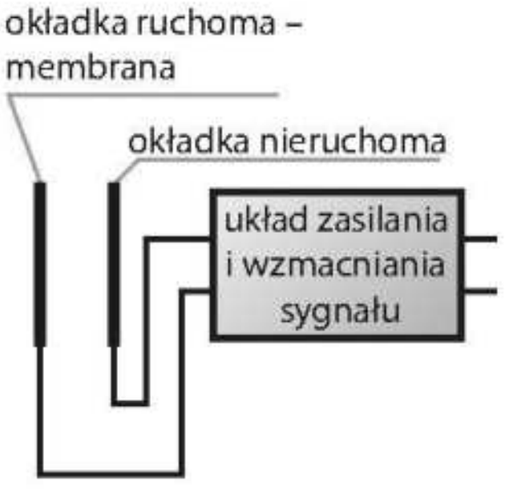


Rys. **12.46.** a) łatwiej wpompować tyle samo gazu do dużej butli, gdyż ciśnienie będzie mniejsze, b) łatwiej napompować do tego samego ciśnienia mniejszą butlę, ponieważ musimy wtłoczyć mniej gazu

Zastosowania kondensatorów

Kondensator może służyć do przechowywania energii elektrycznej, jednak niezbyt dużej. Na przykład kondensator o pojemności 1000 μF naładowany do napięcia 4,5 V może przechowywać zaledwie ok. 0,01 J energii. Kondensator (z wyjątkiem superkondensatorów opisanych w ciekawostce powyżej) nie zastąpi więc baterii ani akumulatora w telefonie, nie mówiąc o samochodzie.
Kondensatory mają jednak pewną przewagę nad akumulatorami i bateriami – pozwalają na bardzo szybkie odzyskanie całej zgromadzonej energii. Dlatego są wykorzystywane w lampach błyskowych oraz defibrylatorach (patrz ramka s. 126).

$$E_c = \frac{(4{,}5\,\mathrm{V})^2 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{F}}{2} \approx \approx 0{,}01\,\mathrm{J}$$



Rys. 12.47. Schemat mikrofonu pojemnościowego

A oto przykłady innych zastosowań:

- Kondensator jest głównym elementem tzw. mikrofonów pojemnościowych. Okładki kondensatora są podłączone do źródła napięcia stałego. Jedna z nich jest nieruchoma, a druga stanowi membranę drgającą pod wpływem drgań powietrza. Zmiany odległości między okładkami powodują, że zmienia się pojemność kondensatora, co przy jego stałym ładunku powoduje zmianę napięcia między okładkami (rys. 12.47).
- Kondensatory znajdują też wiele zastosowań w elektronice. Jednym z nich jest przeciwdziałanie skokom napięcia, np. w komputerach, pracujących w takt zegara. Taki tryb pracy sprawia, że wszystkie elementy jednocześnie zwiększają, a następnie jednocześnie zmniejszają swoje zapotrzebowanie na energię. W komputerach z zegarem 4 GHz taki cykl zachodzi 4 mld razy na sekundę. Tak szybkie zmiany zapotrzebowania na energię mogłyby powodować nieprawidłową pracę urządzenia, jednak dzięki zastosowaniu kondensatora o dużej pojemności niebezpieczeństwo to jest eliminowane: kondensator ładuje się w przerwach między taktami zegara, a oddaje ładunek, a tym samym energię, w chwili największego zapotrzebowania na nią.
- Kondensatory znalazły też zastosowanie w zamianie prądu przemiennego na stały. Ten sposób ich wykorzystania omówimy szerzej w rozdziale 15. podręcznika.

Po tej lekcji powinieneś

- posługiwać się pojęciem pojemności kondensatora;
- obliczać pojemność kondensatora na podstawie jego wymiarów;
- obliczać pracę potrzebną do naładowania kondensatora i zgromadzoną w nim energię.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Kondensator składa się z dwóch kwadratowych okładek o boku $a = 10$ cm każda, rozdzielonych kartką papieru o grubości $d = 0{,}3$ mm. Napięcie między okładkami kondensatora wynosi 100 V. Oblicz:

a) pojemność kondensatora,
b) ładunek zgromadzony na każdej z okładek,
c) energię zgromadzoną w kondensatorze,
d) pracę, jaką należy wykonać w celu usunięcia dielektryka z kondensatora odłączonego od źródła napięcia.

Rozwiązanie

a) Korzystamy ze wzoru na pojemność kondensatora płaskiego wypełnionego dielektrykiem:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

Z treści zadania wiemy, że okładki mają kształt kwadratu o boku 10 cm, a odległość między nimi wynosi: $d = 0{,}3\ \text{mm} = 3 \cdot 10^{-4}\ \text{m}$.

Obliczamy pole jednej okładki i wyrażamy je w jednostkach układu SI:

$$S = a^2$$

$$S = (10\ \text{cm})^2 = 10^{-2}\ \text{m}^2$$

Pozostaje ustalić, ile wynosi przenikalność elektryczna papieru. Z tabeli 12.2 na s. 82 odczytujemy względną przenikalność elektryczną papieru: $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 3{,}7$, zatem: $\varepsilon = 3{,}7\varepsilon_0$.

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$C = \frac{3{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \cdot 10^{-2}\ \text{m}^2}{3 \cdot 10^{-4}\ \text{m}} \approx 1{,}1 \cdot 10^{-9}\ \text{F}$$

$$[C] = \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}} = \frac{\text{C}^2}{\text{J}} = \frac{\text{C}^2}{\text{C} \cdot \text{V}} = \text{F}$$

Odpowiedź: Pojemność kondensatora wynosi ok. 1,1 nF.

b) Aby obliczyć ładunek na okładkach kondensatora, korzystamy ze wzoru definiującego pojemność: $C = \frac{Q}{U}$, który przekształcamy do postaci: $Q = CU$. Wiemy, że $C = 1{,}1$ nF (z punktu a), $U = 100$ V (z treści zadania). Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$Q = 1{,}1 \cdot 10^{-9}\ \text{F} \cdot 100\ \text{V} = 1{,}1 \cdot 10^{-7}\ \text{C}$$

Odpowiedź: Ładunek zgromadzony na kondensatorze wynosi $Q = 1{,}1 \cdot 10^{-7}$ C.

c) Aby obliczyć energię zgromadzoną w kondensatorze z dielektrykiem, korzystamy z następującego wzoru:

$$E_\text{c} = \frac{CU^2}{2}$$

Wartość liczbową otrzymamy po wstawieniu ładunku $Q = 1{,}1 \cdot 10^{-7}$ C (obliczonego w punkcie b) oraz napięcia $U = 100$ V.

$$E_\text{c} = \frac{1{,}1 \cdot 10^{-9}\text{C} \cdot (100\ \text{V})^2}{2} = 5{,}5 \cdot 10^{-6}\ \text{J}$$

Odpowiedź: W kondensatorze jest zgromadzona energia $5{,}5 \cdot 10^{-6}$ J.

d) Wiemy, że przenikalność elektryczna papieru jest 3,7 razy większa od przenikalności próżni. Zatem gdy usuniemy warstwę papieru stanowiącą dielektryk, pojemność kondensatora zmaleje 3,7 razy, ponieważ:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\frac{\varepsilon S}{d}}{\frac{\varepsilon_0 S}{d}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 3{,}7$$

Ładunek zgromadzony na okładkach kondensatora pozostanie taki sam.

Zgodnie ze wzorem $E_\text{c} = \frac{Q^2}{2C}$ przy stałym ładunku energia jest odwrotnie proporcjonalna do pojemności, a więc 3,7 razy mniejszej pojemności odpowiada 3,7 razy większa energia:

$$E'_\text{c} = 3{,}7\,E_\text{c}$$

Energia kondensatora rośnie kosztem pracy wykonywanej podczas wysuwania dielektryka spomiędzy okładki, więc:

$$W = \Delta E_c = E'_c - E_c$$

$$W = 3{,}7E_c - E_c = 2{,}7E_c \approx 1{,}5 \cdot 10^{-5}\,\text{J}$$

Odpowiedź: Przy wysuwaniu dielektryka wykonano pracę ok. $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ J.

1. Energia kondensatora naładowanego do napięcia 20 V wynosi $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ J. Oblicz pojemność tego kondensatora.

2. Okładki płaskiego kondensatora próżniowego znajdowały się początkowo w odległości d od siebie. Po naładowaniu i odłączeniu zewnętrznego źródła napięcia kondensator miał energię $3 \cdot 10^{-4}$ J. Oblicz pracę, jaką należy wykonać, aby powolnym ruchem rozsunąć okładki kondensatora na odległość dwa razy większą ($2d$).

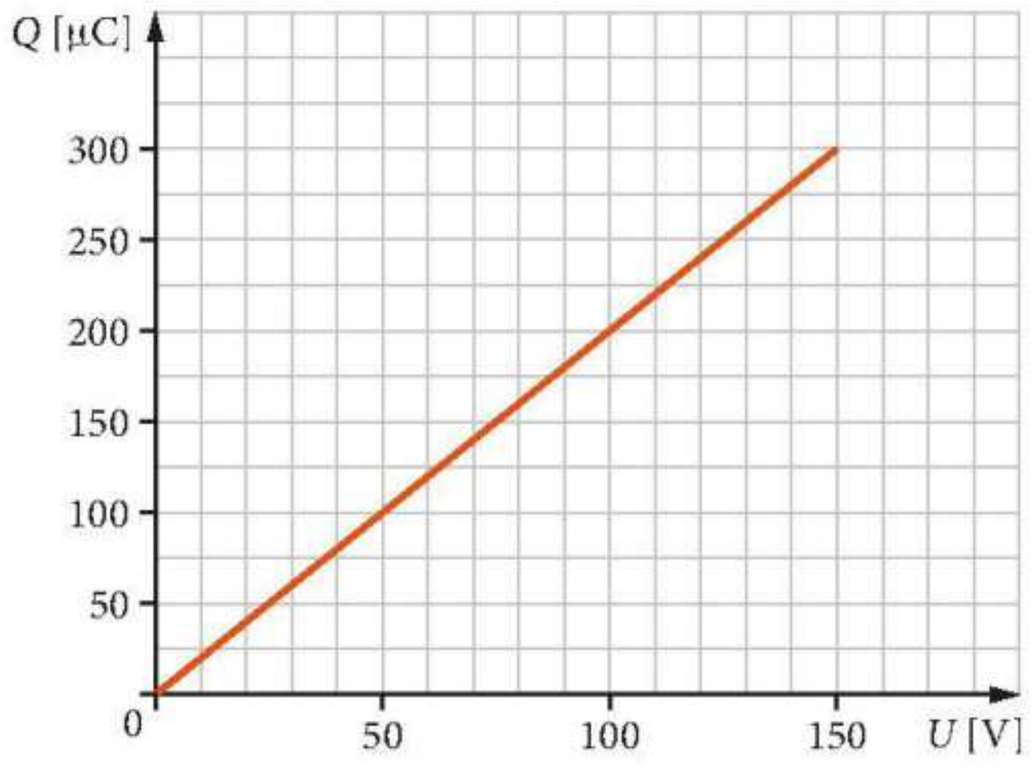
3. Do powietrznego kondensatora o powierzchni płytek 200 cm^2 i odległości między nimi 4 mm przyłożono różnicę potencjałów 300 V. Po naładowaniu kondensator odłączono od źródła napięcia, a następnie przestrzeń między płytkami wypełniono dielektrykiem o względnej przenikalności dielektrycznej $\varepsilon_r = 5$. Oblicz:

a) pojemność kondensatora przed wprowadzeniem dielektryka między okładki i po jego wprowadzeniu,

b) natężenie pola elektrycznego między okładkami kondensatora przed wprowadzeniem dielektryka i po jego wprowadzeniu,

c) ile razy zmalała energia kondensatora po wprowadzeniu do niego dielektryka.

4. Na podstawie wykresu przedstawiającego zależność ładunku zgromadzonego w kondensatorze od napięcia pomiędzy jego okładkami oblicz pojemność kondensatora i energię w nim zgromadzoną, gdy napięcie osiągnęło wartość 150 V.

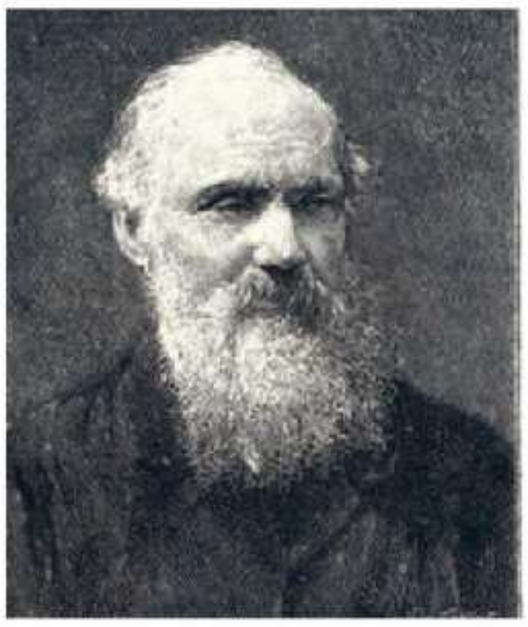


5. Do kondensatora o pojemności 4700 μF naładowanego do napięcia 9 V podłączono całkowicie rozładowany kondensator o pojemności 1000 μF. Oblicz, jakie napięcie ustali się na połączonych kondensatorach.

Projekt Generator Kelvina

Zadania

1. Podaj przykłady generatorów wysokiego napięcia. Gdzie znajdują one zastosowanie?
2. W jakich sytuacjach w życiu codziennym mamy do czynienia z ładunkami elektrycznym? Kiedy są one niebezpieczne? Wyjaśnij, na czym polegają te zagrożenia oraz co się robi, aby do nich nie dopuszczać.
3. Wymień typy wyładowań elektrycznych występujących w przyrodzie. W jaki sposób można im zapobiegać?
4. Czym dla nauki zasłużył się William Thomson – lord Kelvin? Opisz jego wynalazki i odkrycia.



William Thomson, lord Kelvin

Instrukcja wykonania generatora Kelvina

1. Przygotuj dwie 5-litrowe butle po wodzie mineralnej, dwie plastikowe 2-litrowe butelki po napojach z nakrętkami, folię aluminiową, taśmę samoprzylepną, plastelinę, drut miedziany bez izolacji o długości ok. 3 m, dwa kawałki izolatora (np. styropianu lub gumy) o wymiarach co najmniej 25×25 cm, kawałek sznurka, balonik, dwa 25-centymetrowe kawałki wężyka akwarystycznego do filtrów, gwóźdź albo nożyczki do wykonywania otworów, statyw laboratoryjny, łapy do statywu.
2. Każdą z 5-litrowych butli owiń folią aluminiową do mniej więcej $\frac{2}{3}$ wysokości (patrz zdjęcie na następnej stronie), folię możesz zamocować za pomocą taśmy samoprzylepnej.
3. Nad warstwą folii aluminiowej wykonaj niewielki otwór i przeciągnij przez niego kawałek drutu miedzianego o długości ok. 40 cm. Drut wygnij w taki sposób, aby od wewnątrz dotykał dna butelki, a na zewnątrz był przymocowany do folii aluminiowej.
4. Szyjkę każdej z butli owiń folią aluminiową w taki sposób, aby folia znalazła się zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz szyjki butli. Folia powinna jak najściślej przylegać do ścianek butli.
5. Odetnij dna w obu 2-litrowych butelkach. Po przeciwległych stronach butelki w odległości 2 cm od powstałej krawędzi zrób dwa otwory.
6. W nakrętkach 2-litrowych butelek zrób otwory i przeciągnij przez nie końcówki wężyków. Uszczelnij w każdej nakrętce połączenie z wężykiem np. za pomocą plasteliny.
7. W łapach zamocowanych na statywie laboratoryjnym umieść wolne końcówki węża akwarystycznego w taki sposób, aby znajdowały się nad wlotami do 5-litrowych butli (na wysokości ok. 8 cm nad nimi).
8. Odetnij 1 m miedzianego drutu. Pozostałą część drutu podziel na dwa równe fragmenty. Na końcu każdego z nich zrób pętlę i załóż je na szyjki 5-litrowych butli (pokrytych warstwą aluminium). Wolne końce drutów przymocuj za pomocą taśmy klejącej do warstwy aluminium znajdującej się na drugiej z butli. Ważne jest, aby druty się nie dotykały.
9. Butle 5-litrowe umieść na izolującej podstawie. Jedną z nich wstępnie naładuj, np. przez dotknięcie aluminium nadmuchanym balonikiem, który został wcześniej potarty tkaniną.
10. Podwieś za sznurki 2-litrowe butelki. Nalej do mniejszych butelek wody. Ostatni kawałek drutu zegnij w kształt litery U i zanurz końcami w butelkach z wodą.

Projekt s. 134

Projekt

Opis działania generatora

Woda po wydostaniu się z wężyka przechodzi przez pętlę z drutu owiniętą na szyjce butelki. Na skutek zjawiska indukcji ulega naładowaniu ładunkiem przeciwnym do ładunku dostarczonego wcześniej na drugą z butli. Po przedostaniu się do butli ładuje ją, co zmienia ładunek pierścienia znajdującego się na szyjce drugiej butli. Opisany proces powoduje wzrost różnicy potencjałów pomiędzy dwoma naczyniami.

Uwaga. Numery na zdjęciu odnoszą się do instrukcji wykonania generatora.



Zadania

1. Jeśli przed rozpoczęciem doświadczenia dostatecznie blisko zbliżymy do siebie druty, które tworzą pętle wokół wejść do dużych butli, to po przekroczeniu określonej wartości napięcia zaobserwujemy przeskok iskry pomiędzy nimi.
   Sprawdź, w jaki sposób szybkość przepływu wody wpływa na częstość generowania iskier, oraz czy bez wstępnego naelektryzowania 5-litrowej butli da się wykonać doświadczenie.
2. Spróbuj wykorzystać generator do innych doświadczeń z elektrostatyki.

Podsumowanie Pole elektryczne

- Są dwa rodzaje ładunków elektrycznych: **dodatnie** i **ujemne**. Ładunki tego samego znaku (jednoimienne) się odpychają, a różnych znaków (różnoimienne) – przyciągają.
  - Ciała elektryzujemy przez: potarcie, dotyk, indukcję.

- **Zasada zachowania ładunku**
  Całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego jest stały.

- **Prawo Coulomba dla ładunków punktowych**

$$F = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

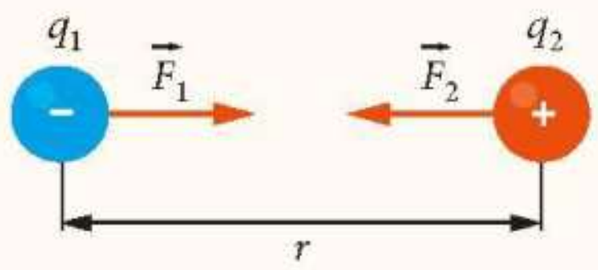
gdzie: q_1, q_2 – oddziałujące ze sobą ładunki punktowe,
$k = 8{,}988 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}}$ – **stała elektrostatyczna**,
$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{Nm^2}}$ – **przenikalność elektryczna próżni**.



Ten sam wzór stosuje się do równomiernie naładowanych kul lub sfer. Dla ciał o innych kształtach wzór można stosować, gdy odległość r jest dużo większa od rozmiarów ciał



- Powyższy wzór na siłę stosujemy, gdy między ładunkami znajduje się próżnia (a w praktyce także dla powietrza).



- Jeżeli ładunki znajdują się w innym ośrodku dielektrycznym niż próżnia, to oddziałują ε_r razy **słabiej**, gdzie ε_r to stała zależna od ośrodka, zwana jego **względną przenikalnością elektryczną**.

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\cdot\frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

- Wielkość $\varepsilon = \varepsilon_r\,\varepsilon_0$ nazywamy przenikalnością elektryczną ośrodka.

- Każdy ładunek elektryczny wytwarza wokół siebie **pole elektryczne**. Na umieszczony w nim inny ładunek działa siła elektryczna.
  - **Natężenie pola elektrycznego** to iloraz wektora siły $\vec{F}$ działającej na ładunek próbny oraz wartości tego ładunku:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

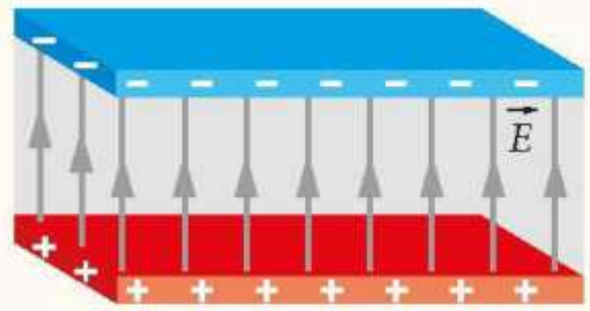
gdzie q to ładunek próbny. Przyjmuje się, że ładunek próbny jest dodatni.

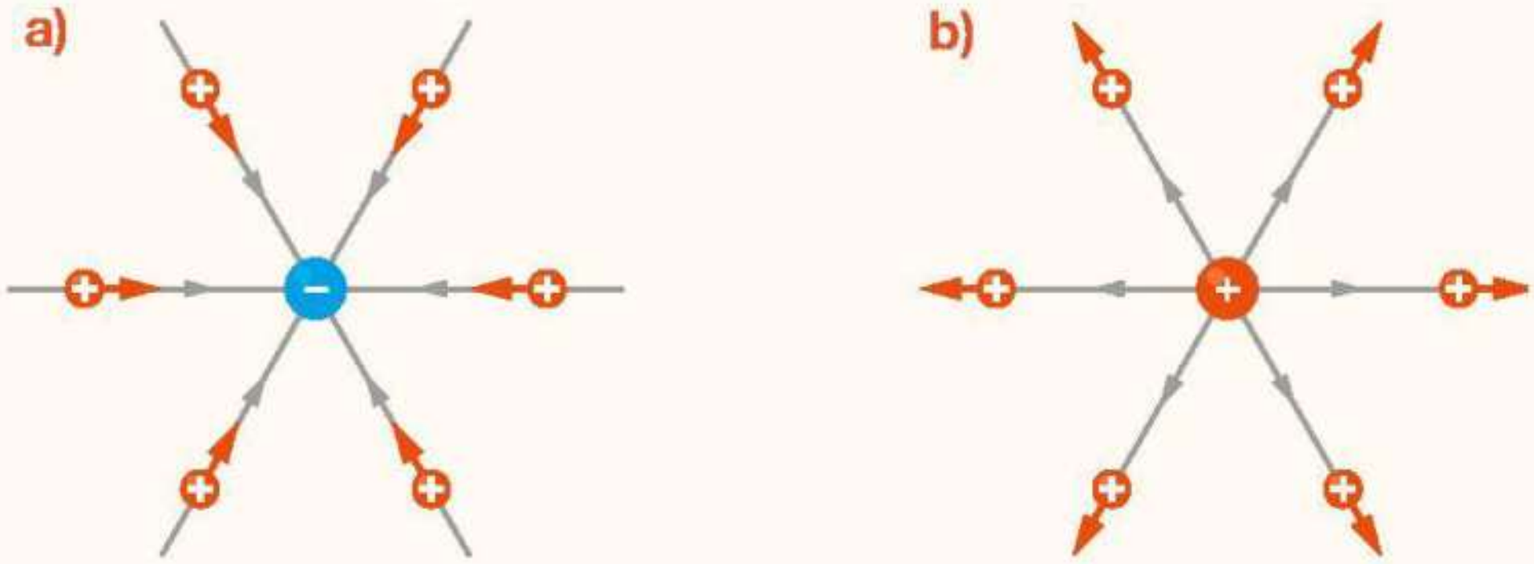
- Jeżeli natężenie pola pochodzi od **kilku ładunków**, to wektory natężenia dodajemy, zatem wypadkowe natężenie pola elektrycznego wynosi:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n$$

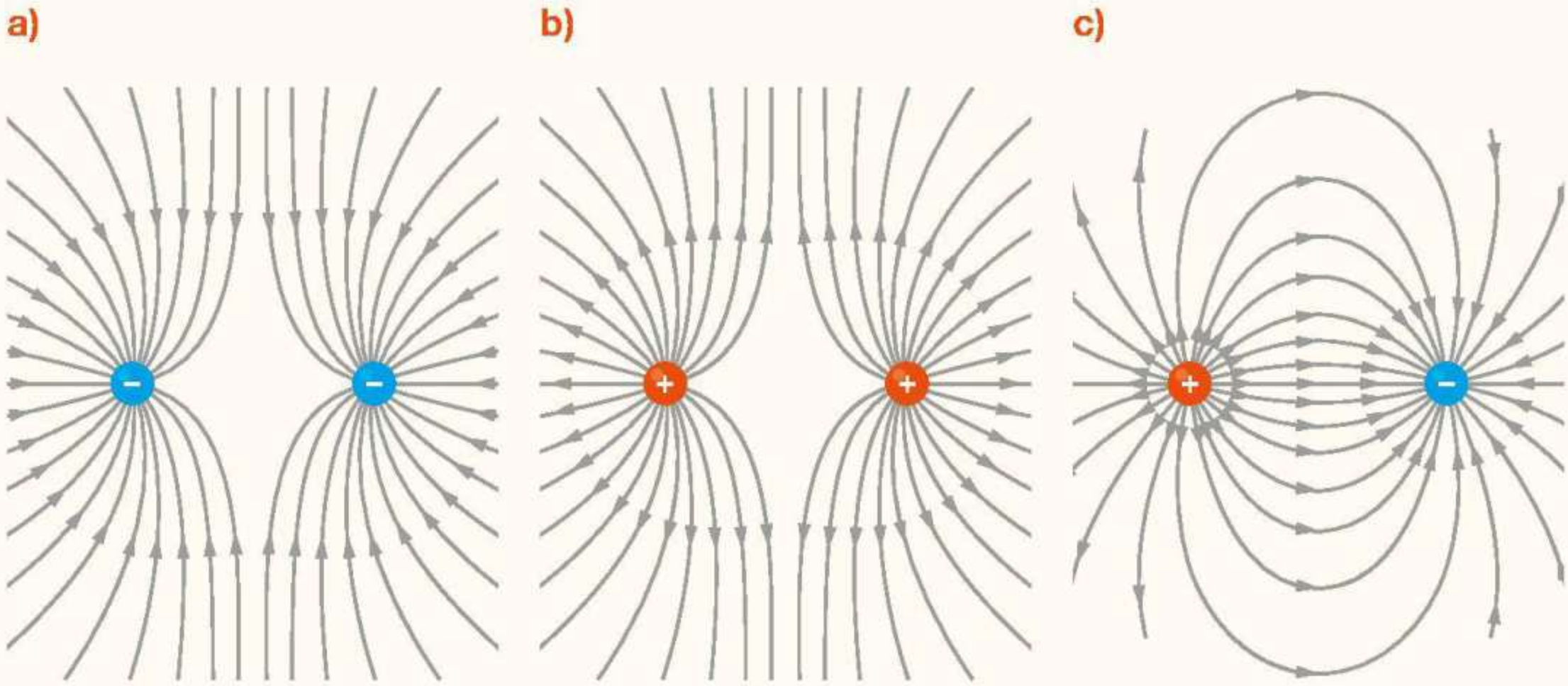
gdzie: $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \ldots, \vec{E}_n$ – natężenia pól pochodzących od poszczególnych źródeł.

- Pole nazywamy **jednorodnym**, jeżeli linie pola są równoległe, a natężenie w każdym jego punkcie jest takie samo.
- Pole wytworzone przez pojedynczy ładunek jest **centralne**, tzn. jego linie pola zbiegają się w jednym punkcie. Zwrot linii pola, gdy jego źródłem jest: ładunek ujemny przedstawia rysunek a), ładunek dodatni – rysunek b).





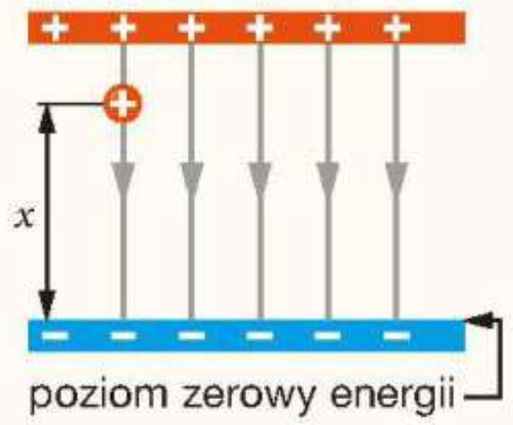
- Linie pola elektrycznego wokół dwóch ładunków o tej samej wartości oraz takim samym znaku (rys. a i b) lub o różnych znakach (rys. c). Takie pole nie jest ani jednorodne, ani centralne.



Energia potencjalna w polu elektrycznym

- Energię potencjalną ładunku q w jednorodnym polu elektrycznym o natężeniu E w odległości x od poziomu przyjętego za zerowy możemy wyrazić jako:

$$E_{pe} = qEx$$



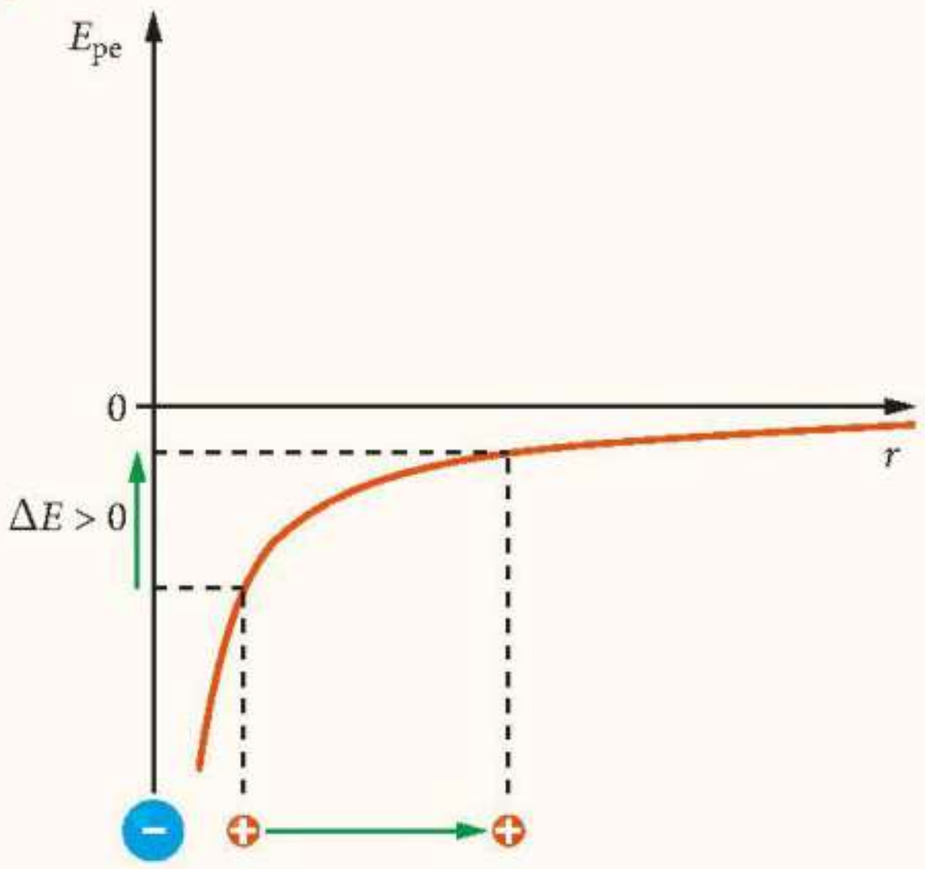
- Energia potencjalna w centralnym polu elektrycznym:

$$E_{pe} = k\frac{Qq}{r}$$

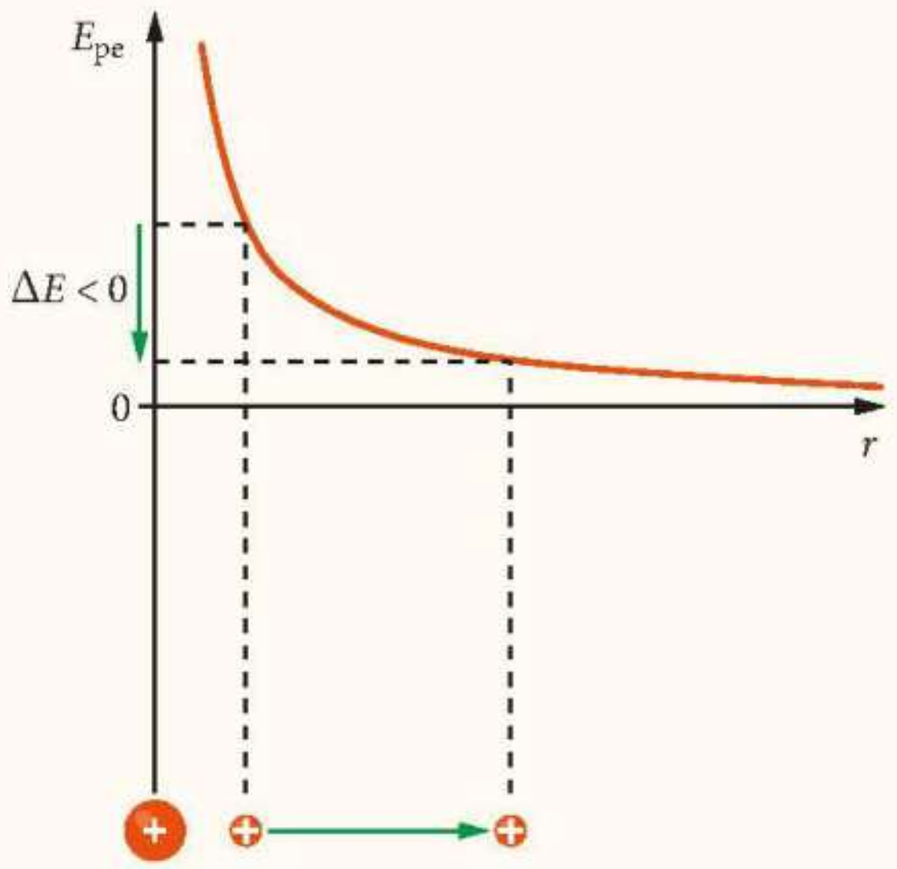
gdzie: k – stała elektryczna, Q – ładunek źródła pola elektrycznego, q – ładunek znajdujący się w polu, r – odległość między ładunkami.

Wykres zależności energii potencjalnej ładunku dodatniego w polu elektrycznym od odległości od źródła naładowanego ujemnie przedstawia rysunek a), dodatnio – rysunek b).

a)



b)



Na ogół przyjmujemy, że energia potencjalna ładunku w polu elektrycznym wytworzonym przez inne ładunki osiąga wartość zerową w nieskończonej odległości od źródeł tego pola.

- **Potencjał pola elektrycznego** V w danym punkcie to iloraz energii potencjalnej E_{pe} ładunku w tym punkcie i wartości q tego ładunku:

$$V = \frac{E_{pe}}{q}$$

  - w polu centralnym:

$$V = k\frac{Q}{r}$$

  - w polu jednorodnym:

$$V = Ex$$

  - Różnicę potencjałów między punktami A i B nazywamy **napięciem**:

$$U = \Delta V = V_B - V_A$$

  - Jednostką potencjału i napięcia jest wolt:

$$1\,\mathrm{V} = \frac{1\,\mathrm{J}}{1\,\mathrm{C}}$$

- **Praca** wykonana przez siły zewnętrzne w polu elektrycznym w trakcie przemieszczania ładunku q z punktu A do B:

$$W_{AB} = q(V_B - V_A) = q\Delta V$$

  Jednostką pracy jest dżul.

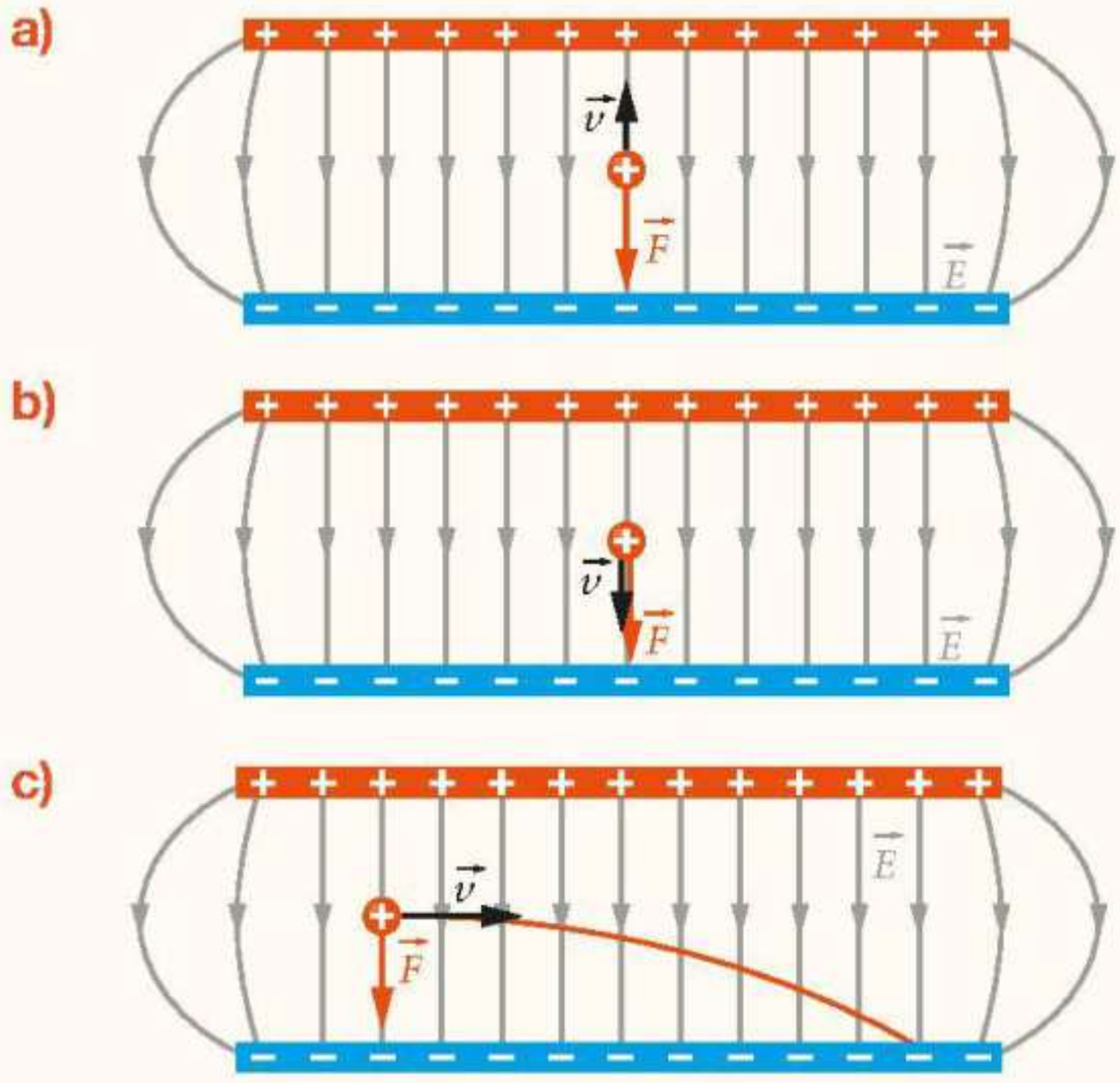
- **Klatka Faradaya** – osłona zbudowana z przewodnika, w jej wnętrzu nie występuje pole elektryczne.

  - Nadmiarowe ładunki w przewodniku zawsze rozmieszczają się w taki sposób, aby natężenie pola elektrycznego w każdym punkcie wewnątrz przewodnika było równe zeru, czyli zawsze gromadzą się na jego zewnętrznej powierzchni.

- Na ładunek q znajdujący się w polu elektrycznym o natężeniu $\vec{E}$ działa siła:

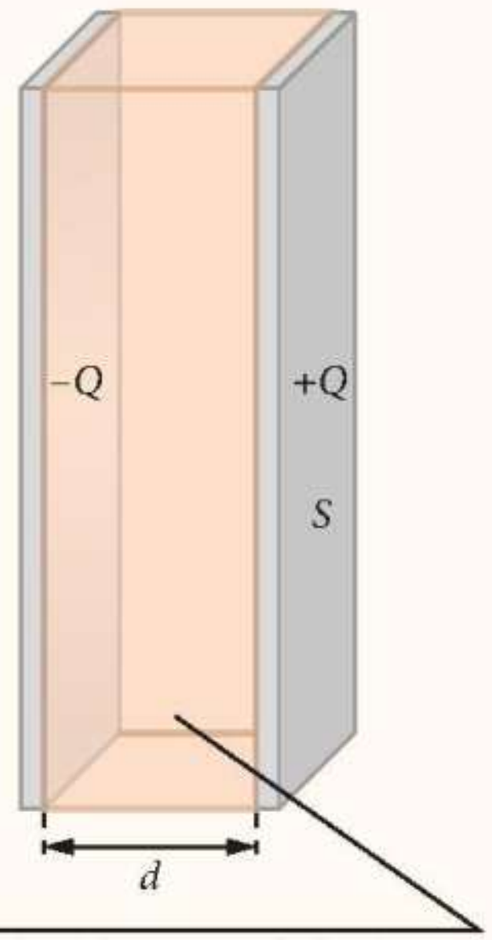
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

  - Na rysunkach a) i b) pokazano ładunek dodatni poruszający się równolegle do linii pola elektrycznego, a na rysunku c) – prostopadle. Na ładunek ujemny działałyby siły o przeciwnych zwrotach.



- **Kondensatory**

Kondensator składa się z dwóch przewodników zwanych **okładkami**. W **kondensatorze płaskim** okładki to dwie równoległe płytki ułożone w pewnej odległości od siebie.



  - **Pojemność** kondensatora:

$$C = \frac{Q}{U}$$

gdzie: Q – ładunek zgromadzony na każdej z okładek, U – napięcie między okładkami.

Jednostką pojemności jest farad: $1\,\mathrm{F} = \frac{1\,\mathrm{C}}{1\,\mathrm{V}}$.

  - **Pojemność** kondensatora płaskiego:

$$C = \varepsilon\frac{S}{d}$$

  - **Energia** zgromadzona w kondensatorze:

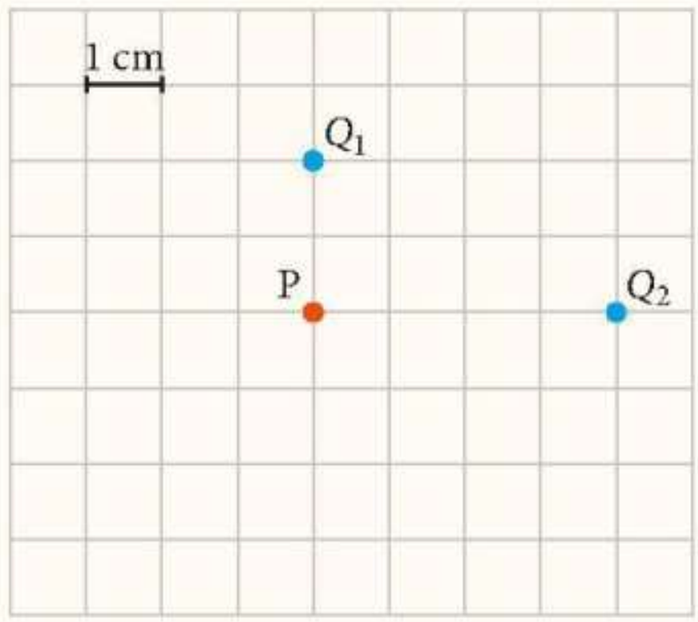
$$E_c = \frac{Q^2}{2C} = \frac{U^2 C}{2}$$

Sposób na zadanie

Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk

Zadanie 1. (0–2)

Rysunek obok przedstawia dwa ładunki: $Q_1 = +10$ nC oraz $Q_2 = -20$ nC. Narysuj wektor natężenia pola elektrycznego w punkcie P, a następnie oblicz wartość i określ kierunek tego wektora.



Rozwiązanie:

Natężenie pola pochodzącego od dwóch ładunków jest sumą wektorów natężenia pola pochodzącego od poszczególnych ładunków:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Obliczmy wartości tych wektorów składowych:

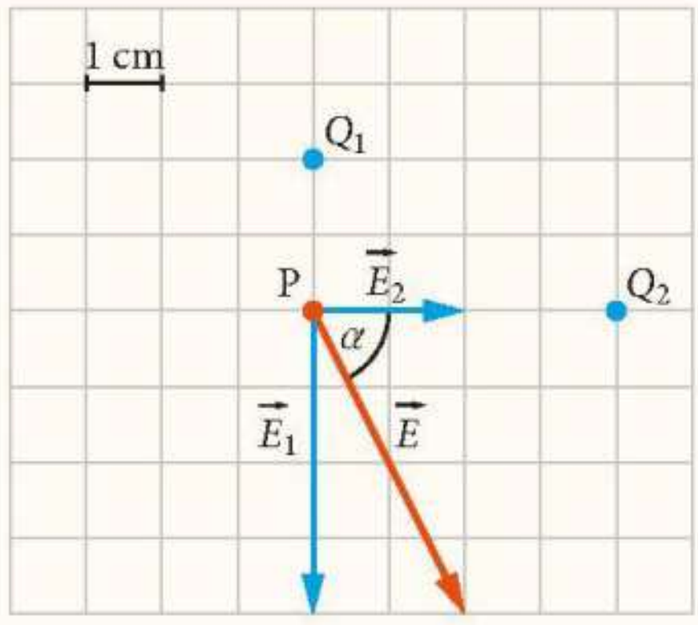
$$E_1 = k\frac{|Q_1|}{r_1^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{10^{-8}\,\mathrm{C}}{(2 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m})^2} = 225\,000\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

$$E_2 = k\frac{|Q_2|}{r_2^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{C}}{(4 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m})^2} = 112\,500\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Zauważmy, że $E_1 = 2E_2$. Jest tak, ponieważ Q_2 znajduje się dwa razy dalej niż Q_1 (co powoduje czterokrotne zmniejszenie siły), ale za to jest dwa razy większy od Q_1.

Kierunek i zwrot wektora natężenia pola elektrycznego jest taki jak kierunek i zwrot siły działającej na **dodatni** ładunek próbny. Tak więc wektor $\vec{E}_1$ jest skierowany od ładunku Q_1 (odpychanie), a wektor $\vec{E}_2$ jest skierowany do ładunku Q_2 (przyciąganie).

Wektory $\vec{E}_1$ i $\vec{E}_2$ możemy dodać metodą równoległoboku. W tym przypadku równoległobok jest prostokątem, więc korzystamy z twierdzenia Pitagorasa:



$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{(2E_2)^2 + E_2^2} = \sqrt{5}E_2 \approx 252\,000\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Wskazówka 1. Jeżeli wielkości we wzorze są swoimi wielokrotnościami, warto najpierw uprościć wzór, a dopiero potem podstawić wartości. Powyższy wynik uzyskamy również przez podstawienie wartości liczbowych E_1 i E_2, ale rachunki będą wówczas bardziej skomplikowane.

Aby określić kierunek wektora $\vec{E}$, możemy podać miarę kąta α zaznaczonego na rysunku powyżej:

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{4}{2} = 2$$

Stąd otrzymujemy, że: $\alpha \approx 63°$.

Odpowiedź: Wartość natężenia w punkcie P wynosi ok. $2{,}52 \cdot 10^5\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$, a wektor natężenia jest skierowany w prawo i w dół pod kątem 63° do poziomu.

Warto zapamiętać!

- Natężenie pola pochodzącego od kilku źródeł to suma natężeń pól pochodzących od każdego ze źródeł.
- Natężenia pola są wektorami, więc możemy je dodawać metodą równoległoboku, natomiast nie możemy dodawać ich wartości (oprócz przypadku, kiedy mają ten sam kierunek i zwrot).
- Aby określić kierunek i zwrot wektora natężenia pola, wystarczy sobie wyobrazić, jak zwrócona byłaby siła działająca w danym punkcie na ładunek próbny (który zawsze jest dodatni).

Zadanie 2. (0–1)

Dwie identyczne nieruchome, przewodzące kule znajdują się w dużej odległości od siebie i są odizolowane od otoczenia. Całkowity ładunek pierwszej kuli jest dodatni, równy 8 nC, a całkowity ładunek drugiej kuli jest ujemny, równy –12 nC. W pewnym momencie kule połączono cienkim miedzianym przewodem, a następnie przewód usunięto. Odległość między kulami się nie zmieniła. Zaznacz właściwe dokończenie poniższego zdania.
Iloraz wartości sił oddziaływania elektrycznego kul przed ich połączeniem i po usunięciu przewodu jest równy:

A. 24 **B.** 12. **C.** 9,6. **D.** 1.

Rozwiązanie:

Poprawną odpowiedzią jest **A**.

Wskazówka 2. Nie zawsze trzeba znać wartości liczbowe dwóch wielkości, aby je porównać. Wiele praw fizyki mówi o tym, jak jedna wielkość zależy od innej, np. prawo Coulomba opisuje zależność siły oddziaływania od ładunków i ich odległości.

Nie jesteśmy w stanie obliczyć wartości obu sił na podstawie prawa Coulomba $F = k \cdot \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$, ale nie jest to potrzebne. Wiemy, że odległość się nie zmieniła, trzeba więc tylko zbadać, jak zmienił się iloczyn ładunków.
Przed połączeniem iloczyn ładunków wynosił:

$$|q_1 q_2| = |8\ \text{nC} \cdot (-12\ \text{nC})| = 96\ \text{nC}^2$$

Po połączeniu kul przewodem ich ładunki się wyrównają, a ponieważ suma ładunków wynosi 8 nC – 12 nC = –4 nC, to po wyrównaniu każdy ładunek będzie równy –2 nC. Stąd iloczyn ładunków po połączeniu kul:

$$|q'_1 q'_2| = |-2\ \text{nC} \cdot (-2\ \text{nC})| = 4\ \text{nC}^2$$

Tak więc iloczyn zmalał $\frac{96}{4} = 24$ razy. Tyle samo razy zmniejszy się siła oddziaływania. Zmieni się także jej charakter – z przyciągania na odpychanie.

Warto zapamiętać!

- Wiele praw fizyki opisuje zależności między wielkościami fizycznymi, dlatego często w zadaniu wystarczy zająć się wielkościami, które się zmieniają.

Zadanie 3. (0–1)

Płaski kondensator próżniowy jest zbudowany z dwóch kwadratowych płytek. Płytki znajdują się dokładnie jedna nad drugą w odległości 0,1 cm. Kondensator naładowano do napięcia 4 V i odłączono od źródła napięcia. Przyjmij, że okładki kondensatora mają boki znacznie dłuższe niż 0,2 cm. Wskaż poprawne dokończenie zdania spośród A–C oraz jego uzasadnienie spośród 1–3.

Po rozsunięciu płytek naładowanego kondensatora na odległość 0,2 cm energia pola elektrycznego tego kondensatora:

A.	wzrosła,	ponieważ pojemność kondensatora	**1.**	nie zmieniła się.
B.	zmalała,		**2.**	wzrosła.
C.	nie zmieniła się,		**3.**	zmalała.

Rozwiązanie:

Poprawne dokończenie zdania i jego uzasadnienie to **A** i **3**.

> **Wskazówka 3.** Nie wykonujemy żadnych obliczeń. W zadaniu interesuje nas tylko zmiana wielkości fizycznych, czy jakaś wielkość fizyczna zmalała, wzrosła czy też pozostała bez zmian.

Pojemność kondensatora zależy od jego budowy zgodnie z zależnością:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Więc aby porównać pojemność kondensatora przed rozsunięciem płytek i po nim, porównujemy wielkości w powyższym wzorze:
ε – przenikalność elektryczna ośrodka się nie zmieniła, kondensator jest próżniowy,
S – płytki kondensatora mają ciągle takie samo pole powierzchni,
d – rozsunięcie płytek oznacza, że odległość między nimi się zwiększyła.

Ze wzoru wynika, że skoro d się zwiększyła (a pozostałe wielkości są stałe), to pojemność kondensatora się zmniejszyła.
Dodatkowo wiemy, że ładunek zgromadzony na kondensatorze się nie zmienił. Zatem zgodnie ze wzorem:

$$E = \frac{Q^2}{2C}$$

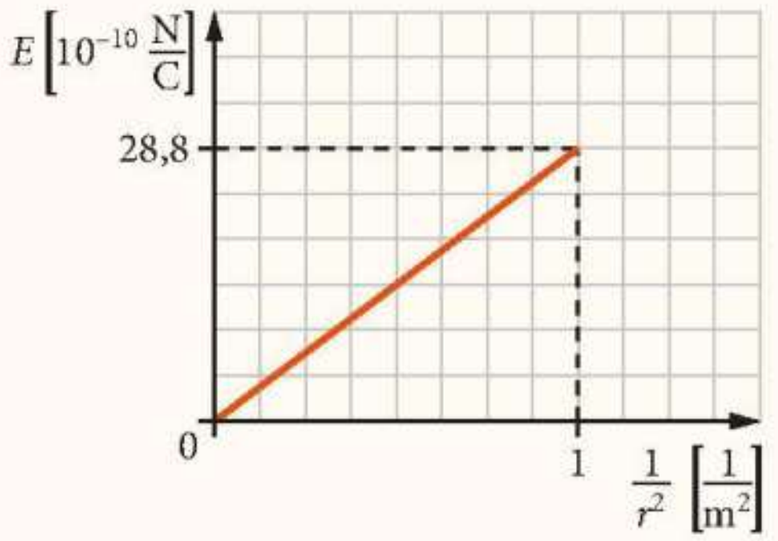
jeśli pojemność się zmniejszyła, to energia zmagazynowana w kondensatorze się zwiększyła. Skąd wzięła się dodatkowa energia? Okładki się przyciągają, więc aby je rozsunąć, musimy wykonać pracę.

Warto zapamiętać!

- Pojemność kondensatora zwiększa się, kiedy zwiększa się pole powierzchni jego okładek oraz kiedy zmniejsza się odległość między nimi.

Zadanie 4. (0–2)

Na wykresie przedstawiono zależność wartości natężenia pola elektrostatycznego od $\frac{1}{r^2}$, gdzie r to odległość od naładowanej cząstki.
Oceń prawdziwość poniższych zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F – jeśli jest fałszywe.



1.	Ładunek cząstki jest około dwa razy większy od ładunku elementarnego.	P	F
2.	Na podstawie wykresu można określić znak ładunku cząstki.	P	F
3.	Wartość natężenia pola wzrasta liniowo wraz ze wzrostem odległości od ładunku.	P	F

Rozwiązanie:

Poprawne odpowiedzi to **1P, 2F, 3F**.
Natężenie pola elektrycznego wytwarzanego przez punktową cząstkę o ładunku Q wynosi:

$$E = \frac{kQ}{r^2}$$

Na wykresie przedstawiono zależność $E(\frac{1}{r^2})$, więc powyższy wzór wygodnie jest przedstawić tak, aby ułamek $\frac{1}{r^2}$ był wyodrębnioną zmienną:

$$E = \frac{kQ}{r^2} = kQ \cdot \frac{1}{r^2}$$

Z tego wynika, że zależność na natężenie pola ma postać $E = a \cdot x$, czyli jest proporcjonalnością prostą, w której współczynnikiem proporcjonalności jest kQ.
1. P. Wykres przechodzi przez punkt $(1; 28{,}8 \cdot 10^{-10})$, więc współczynnik proporcjonalności (tangens kąta nachylenia) wynosi:

$$kQ = \frac{28{,}8 \cdot 10^{-10}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}}{\mathrm{m}^{-2}} = 28{,}8 \cdot 10^{-10}\,\frac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{C}}$$

Wobec tego:

$$Q = \frac{28{,}8 \cdot 10^{-10}\,\frac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{C}}}{k} = \frac{28{,}8 \cdot 10^{-10}\,\frac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{C}}}{9 \cdot 10^{9}\,\frac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{C}^2}} = 3{,}2 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C} = 2e$$

2. F. Wykres przedstawia **wartość** natężenia pola, a więc nie można z niego odczytać znaku E, a w konsekwencji – znaku Q.
3. F. Wykres przedstawia proporcjonalność, ale jest to zależność $E(\frac{1}{r^2})$. Natomiast zależność $E(r)$ jest zupełnie inna: natężenie jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości, czyli gdy oddalamy się od ładunku, to natężenie maleje.

Warto zapamiętać!

- Niewygodne zależności często da się zamienić na proporcjonalność prostą między innymi wielkościami. Na przykład natężenie pola elektrycznego jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości r, ale równie dobrze możemy powiedzieć, że jest wprost proporcjonalne do $\frac{1}{r^2}$. Dzięki temu upraszczamy rysowanie wykresów i opracowywanie wyników pomiarów. Jednak nigdy nie zapominajmy, jakie wielkości są na osiach!

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Kondensator z olejem

Pojemność kondensatora wypełnionego olejem wynosi 20 mF. Kondensator naładowano do napięcia 20 V i odłączono od źródła. Względna przenikalność elektryczna oleju wynosi $\varepsilon_r = 2$. Po pewnym czasie w wyniku nieszczelności kondensatora olej z niego wypłynął.

1.1. Oblicz ładunek zgromadzony na okładkach kondensatora bezpośrednio po jego naładowaniu.

1.2. Wyznacz różnicę potencjałów między okładkami kondensatora po wypłynięciu oleju.

1.3. Uzasadnij, że na skutek wycieku oleju energia elektryczna zgromadzona na kondensatorze zwiększyła się dwukrotnie. Wyjaśnij, skąd wzięła się dodatkowa energia.

1.4. Oceń prawdziwość każdego z poniższych stwierdzeń. Wybierz P, jeśli jest ono prawdziwe, lub F – jeśli jest fałszywe.

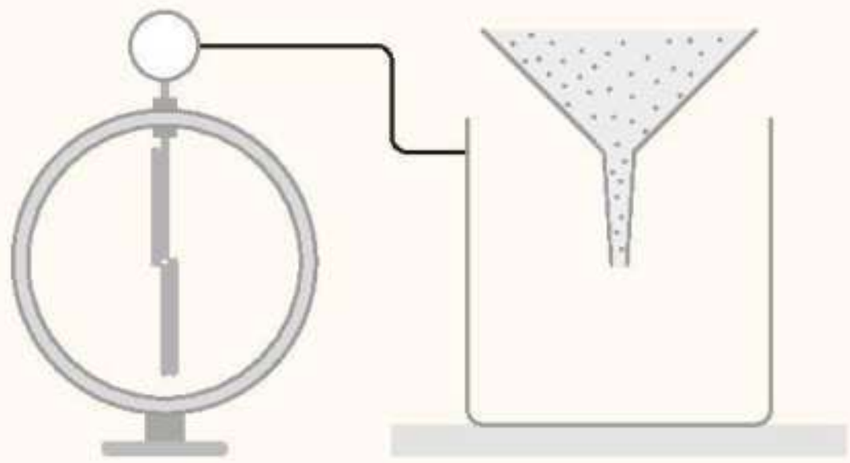
Po wypłynięciu oleju z kondensatora:

1.	natężenie pola elektrycznego między jego okładkami się zmniejszyło	P	F
2.	jego pojemność się zmniejszyła.	P	F

Zadanie 2. Elektroskop

Na zajęciach koła fizycznego uczniowie wykonywali doświadczenia z wykorzystaniem elektroskopu. Mieli do dyspozycji plastikowy lejek, metalową puszkę, kaszę, kawałek styropianu, przewody i elektroskop. Uczniowie ustawili metalową puszkę na styropianie i połączyli ją z kulką elektroskopu. Zakryli palcem wylot lejka i napełnili go kaszą. Następnie umieścili lejek nad metalową puszką i odsunęli palec. Puszka napełniła się kaszą.

2.1. Wyjaśnij, jak zachowuje się wskazówka elektroskopu podczas wysypywania się kaszy z lejka. Uzasadnij odpowiedź.

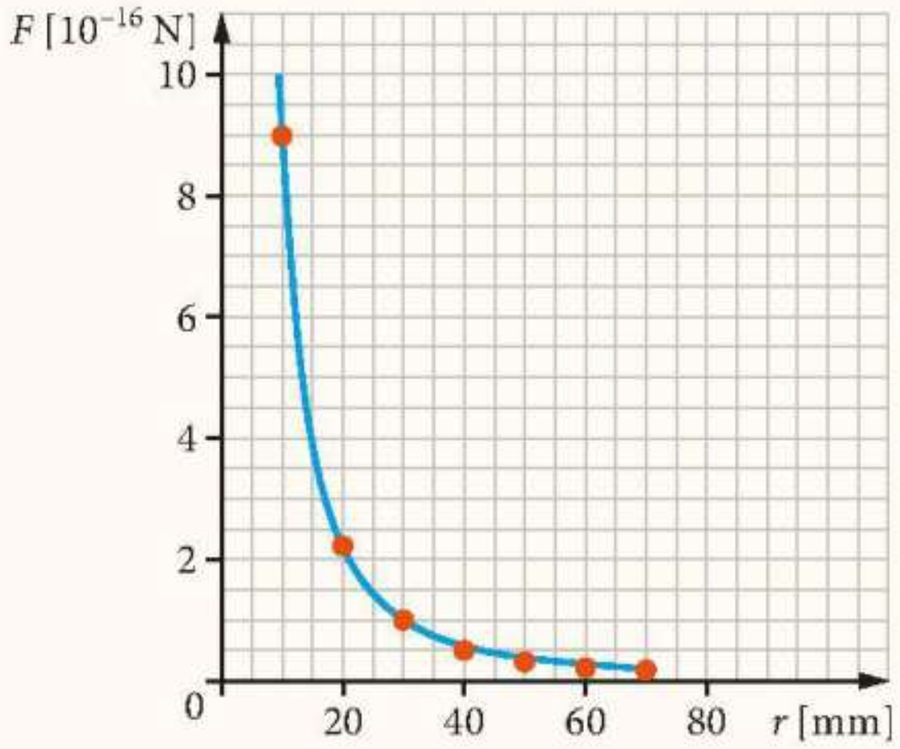


2.2. Po wykonaniu doświadczenia uczniowie uziemili puszkę. Wyjaśnij, jak zachowuje się wskazówka elektroskopu po uziemieniu puszki. Uzasadnij odpowiedź.

2.3. Po wysypaniu się całej kaszy uczniowie pustym lejkiem dotykali nieuziemionej metalowej puszki. Wyjaśnij, jak w takim przypadku zachowuje się wskazówka elektroskopu. Uzasadnij odpowiedź.

Zadanie 3. Naelektryzowana kulka

Źródłem pola elektrycznego jest metalowa kulka o masie 10 g i promieniu 8 mm, zamocowana nieruchomo i naelektryzowana ładunkiem dodatnim wynoszącym $2 \cdot 10^{-14}$ C. Pod wpływem pola elektrycznego kulki naelektryzowany dodatnio pyłek zaczął się przemieszczać. Na wykresie przedstawiono zależność siły oddziaływania elektrycznego między kulką a pyłkiem od odległości między nimi.



3.1. Sporządź wykres zależności potencjału wytworzonego przez naelektryzowaną kulkę od odległości od jej środka.

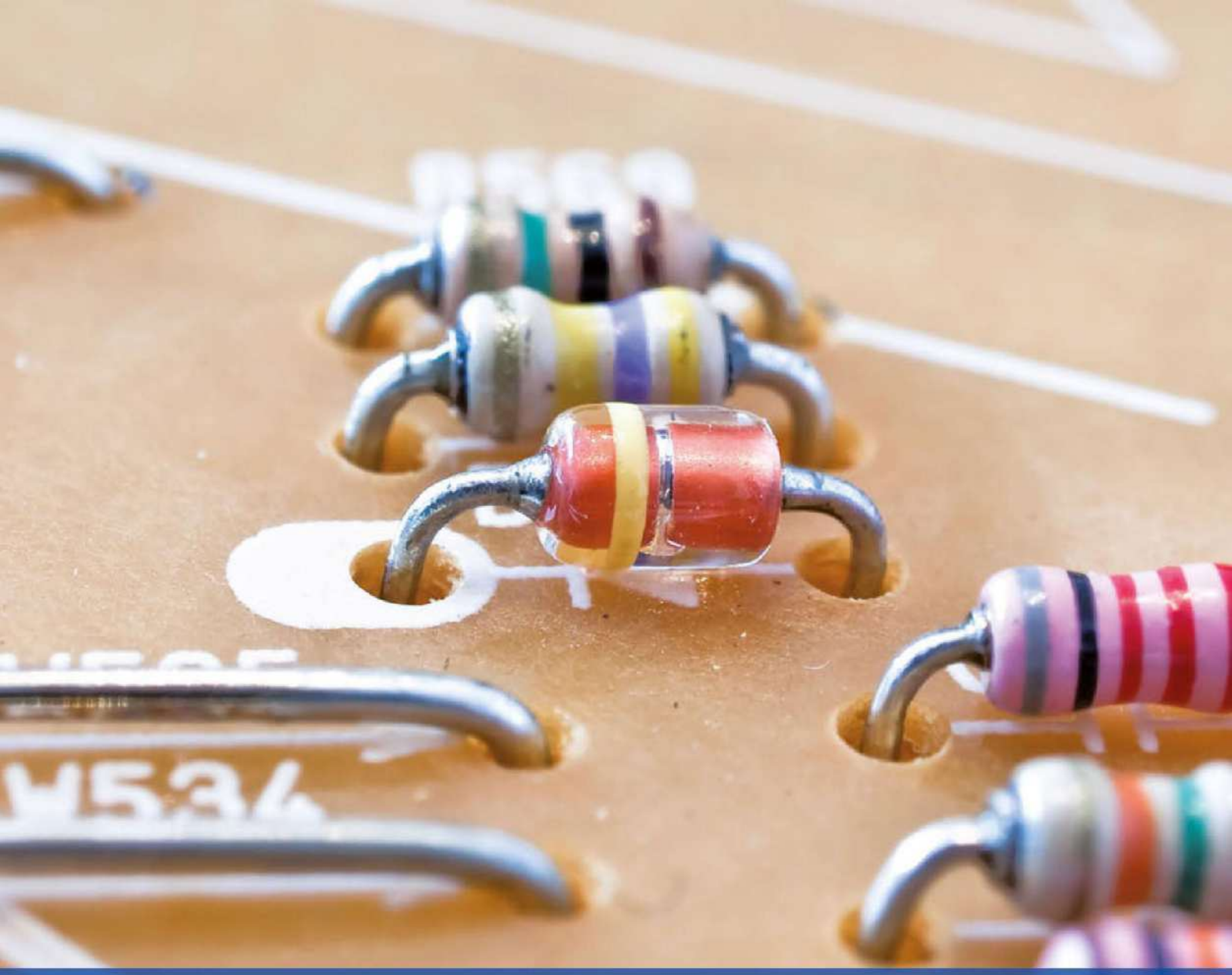
3.2. Sporządź wykres zależności natężenia pola elektrycznego wytworzonego przez naelektryzowana kulkę od odległości od jej środka.

3.3. Oblicz energię potencjalną układu kulka–pyłek, gdy pyłek znajduje się 20 mm od środka kulki. Przyjmij, że ładunek pyłku jest równy 10^{-16} C.

3.4. Jaka musiałaby być masa pyłku, aby siła oddziaływania elektrycznego była równoważona przez siłę oddziaływania grawitacyjnego między nimi? Przyjmij, że ładunek pyłku jest równy 10^{-16} C i pyłek znajduje się 20 mm od środka kulki.

Zadanie 4. Trzy kulki

Trzy małe kulki, każda o masie 5 g, zawieszono w jednym punkcie na jedwabnych nitkach o długości 1 m. Kulki po naelektryzowaniu ładunkiem ujemnym o tej samej wartości utworzyły w płaszczyźnie poziomej trójkąt równoboczny o boku 10 cm. Przyjmij, że kąt odchylenia kulek od pionu jest tak mały, że można przyjąć $\operatorname{tg}\alpha \approx \sin\alpha$.
Oblicz, jakim ładunkiem zostały naelektryzowane kulki.



13 Prąd stały

1. Prąd elektryczny i jego natężenie
2. Obwody elektryczne
3. Połączenia szeregowe i równoległe
4. Napięcie a natężenie. Prawo Ohma
5. Łączenie oporników
6. Od czego zależy opór elektryczny
7. Praca i moc prądu elektrycznego
8. Siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny
9. Drugie prawo Kirchhoffa

13.1. Prąd elektryczny i jego natężenie

Przypomnij sobie

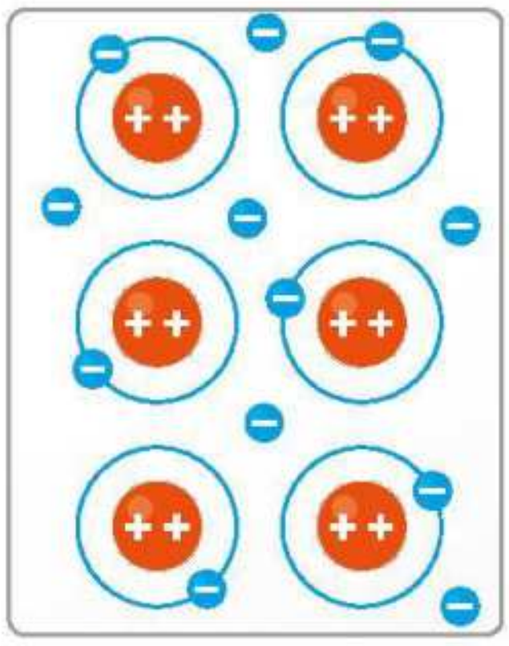
- Napięcie elektryczne między dwoma punktami to różnica potencjałów pola elektrycznego.
- W przewodnikach znajdują się naładowane cząstki, które mogą się poruszać.
- Gdy od atomu lub cząsteczki odłączą się elektrony (jeden lub więcej), otrzymujemy jon dodatni; gdy przyłączą się dodatkowe elektrony – otrzymujemy jon ujemny.

W poprzednim rozdziale omawialiśmy oddziaływania ładunków elektrycznych znajdujących się w spoczynku. Jeśli nawet opisywaliśmy zjawiska, w których ładunki się przemieszczały, np. elektryzowanie przez indukcję, to tak naprawdę nie rozważaliśmy ruchu tych ładunków. Interesowało nas jedynie to, co działo się przed jego rozpoczęciem i po zakończeniu.

Pojęcia z elektrostatyki, które poznałeś w poprzednim rozdziale, pozwolą ci pogłębić wiedzę na temat ruchu ładunków elektrycznych zdobytą w szkole podstawowej.
Okażą się też pomocne do zrozumienia innych, nieomawianych dotąd zjawisk towarzyszących ruchowi ładunków elektrycznych.

Prąd elektryczny

Przypomnijmy najważniejsze pojęcia związane z prądem elektrycznym poznane w szkole podstawowej.



Rys. **13.1.** W metalach część elektronów może się swobodnie przemieszczać

> Prąd elektryczny to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.

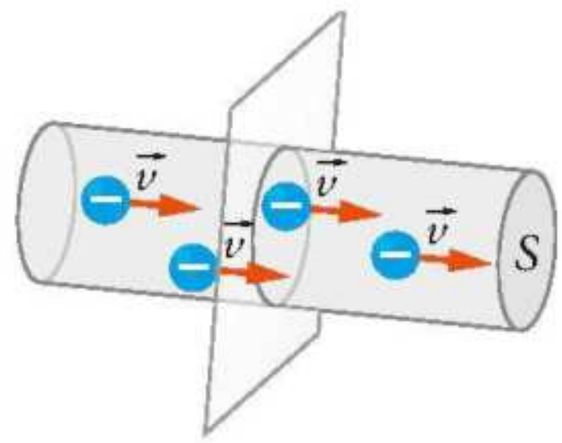
W praktyce najczęściej mamy do czynienia z prądem płynącym przez metale – z nich wykonane są m.in. przewody elektryczne. Wszystkie metale przewodzą prąd (choć niektóre lepiej, a inne gorzej).
W przypadku metali przepływającymi przez nie ładunkami są **elektrony swobodne**, które nie są związane z atomami, dzięki czemu mogą się w metalu swobodnie przemieszczać (rys. 13.1).
Należy jednak pamiętać, że prąd może płynąć także dzięki ruchowi jonów lub równocześnie jonów i elektronów. Tak dzieje się w elektrolitach i gazach. Dlatego w szerszych definicjach prądu mówimy nie o elektronach, ale ogólnie o ładunkach elektrycznych.

Natężenie prądu

Wielkością fizyczną charakteryzującą ilościowo prąd elektryczny jest **natężenie prądu**, określające, jaki ładunek przepływa w jednostce czasu przez przekrój poprzeczny przewodnika w określonym miejscu (rys. 13.2). Natężenie możemy obliczyć ze wzoru:

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

gdzie: I – natężenie prądu, Q – przepływający ładunek, t – czas, w jakim przepływa ten ładunek.



Rys. **13.2.** Elektrony przepływające przez przekrój poprzeczny przewodnika

W tym rozdziale będziemy się zajmować **prądem stałym**, czyli takim, którego natężenie nie zmienia się w czasie.
Jednostką natężenia prądu jest **amper** (1 A). Natężenie prądu wynosi jeden amper, jeśli w czasie jednej sekundy przez przekrój przewodnika przepływa ładunek o wartości jednego kulomba:

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

Pomiar natężenia prądu możemy porównać do pomiaru natężenia ruchu samochodowego na autostradzie. Nie interesuje nas, ile samochodów się po niej porusza – ważne, ile spośród nich przejeżdża w jednostce czasu przez jej przekrój poprzeczny, czyli np. przez bramkę (rys. 13.3).
Gdy zatem interesuje nas natężenie prądu w żarówce, musimy pamiętać, że pytamy nie o to, ile elektronów w danym przedziale czasu znajduje się we włóknie, ale o to, ile spośród nich przepływa w takim czasie przez przekrój poprzeczny włókna.



Rys. **13.3.** Natężenie prądu można porównać do liczby samochodów przejeżdżających w danym czasie przez bramkę na autostradzie

Dlaczego prąd płynie?

Ze szkoły podstawowej wiesz, że prąd płynie, gdy między końcami przewodnika jest napięcie. Wiadomości z poprzedniego rozdziału ułatwią nam zrozumienie, dlaczego tak jest.
Napięcie to różnica potencjałów. Skoro więc istnieje ono między końcami przewodnika, ich potencjały muszą być różne. To z kolei oznacza, że w przewodniku istnieje pole elektryczne. To ono właśnie powoduje ruch ładunków.
Możemy więc powiedzieć, że **przyczyną przepływu prądu elektrycznego jest pole elektryczne**. Zatem ta sama przyczyna – pole elektryczne – wywołuje zarówno ruch elektronów w przewodzie, ruch jonów w cieczy, jak i ruch cząstek rozpędzanych w próżni w akceleratorze.
Siła elektryczna powodująca ten ruch działa na ładunki dodatnie zgodnie ze zwrotem linii pola elektrycznego, a na ładunki ujemne – przeciwnie do niego.

Napięcie elektryczne s. 103

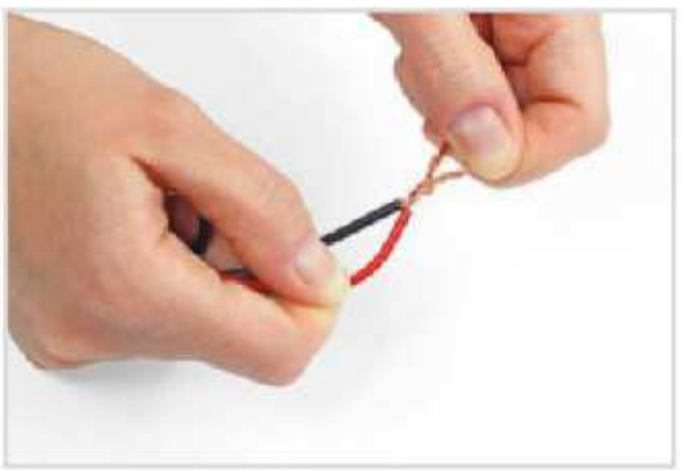
Wskazówki praktyczne (prąd elektryczny)

1 Aby przeprowadzić doświadczenia opisane w rozdziałach 13–15, warto zaopatrzyć się w:

- 2 m przewodu miedzianego jednożyłowego w izolacji, 2 m przewodu w izolacji emaliowej,
- 10 cm grubego przewodu miedzianego (ponad 4 mm^2 przekroju poprzecznego) w izolacji lub bez niej,
- żarówki: 3,6 V, 4,8 V, 1,2 V/0,3 A, 2,2 V/0,3 A, 2 oprawki do małych żarówek,
- baterię 9 V, 8 baterii AA, 4 baterie D (najgrubsze dostępne w handlu),
- miernik uniwersalny (najprostszy model),
- stalowe spinacze biurowe, małe magnesy neodymowe (kilka mm średnicy), większe magnesy neodymowe (2–4 cm średnicy), taśmę klejącą, folię aluminiową, dowolną diodę zwykłą (nieświecącą) i dowolną diodę świecącą oraz tranzystor npn, np. typu BC-107.

2 Elementy układów doświadczalnych można łączyć za pomocą spinaczy biurowych, a przewody można ze sobą skręcać (patrz zdjęcia).



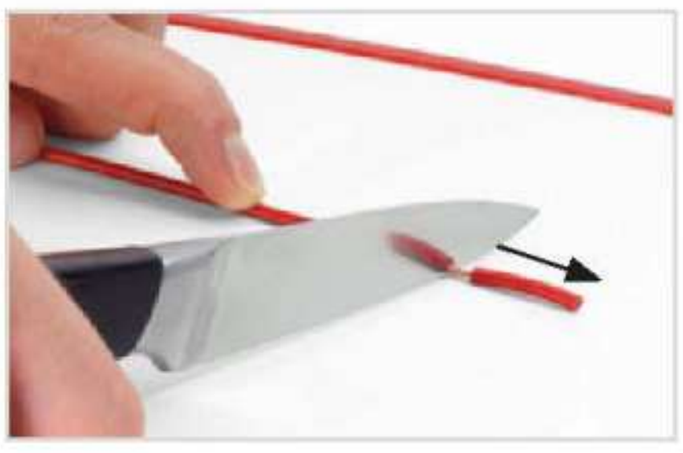


3 Jeśli chcesz sobie ułatwić pracę, możesz zaopatrzyć się w krokodylki do łączenia elementów oraz nakładki na baterię 9 V. Za pomocą małych magnesów neodymowych łączy się stalowe przewody, przewody z przymocowanymi stalowymi spinaczami biurowymi i bieguny ogniw.





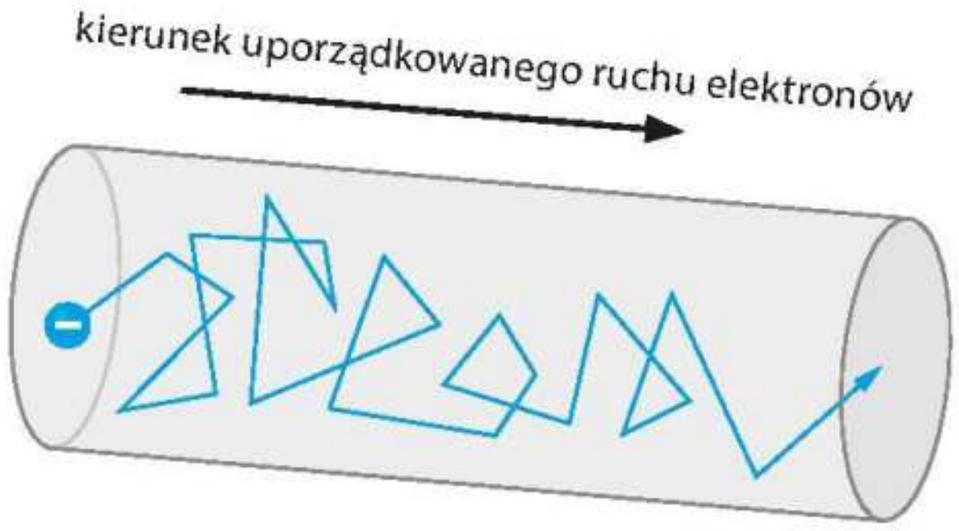

4 Do doświadczeń będziesz potrzebować dwóch rodzajów przewodów i folii aluminiowej. Z przewodu miedzianego odetnij 6 kawałków po 20 cm. Z końcówek zdejmij izolację: najpierw przetnij ją ostrożnie, aby nie uszkodzić przewodu, a następnie ściągnij za pomocą noża (patrz zdjęcie). W podobny sposób można zeskrobać emalię z końcówek przewodów emaliowanych. Z kuchennej folii aluminiowej delikatnie wycinamy nożyczkami odpowiednie paski.





Prąd elektryczny a chaotyczny ruch elektronów

Określenie *uporządkowany ruch ładunków* nie oznacza, że wszystkie ładunki, np. elektrony w metalu, poruszają się równolegle i z jednakową prędkością. Chodzi o to, że ich wypadkowy ruch jest ukierunkowany i **średnio** wszystkie przemieszczają się w określonym kierunku.
W rzeczywistości poszczególne elektrony wykonują chaotyczne ruchy i nieustannie zderzają się ze sobą oraz z jonami sieci krystalicznej metalu (rys. 13.4).
Uporządkowany ruch, tzw. **dryf** elektronów, odbywa się powoli – z prędkością rzędu 0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$, natomiast ruch chaotyczny jest znacznie szybszy – jego prędkość to ok. 100 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.



Rys. **13.4.** Dryf elektronów nakłada się na znacznie szybszy ruch chaotyczny. Proporcja prędkości tych ruchów jest znacznie większa, niż wynikałoby to z rysunku

Dryf elektronów można porównać do wiatru, czyli ukierunkowanego ruchu znacznej masy powietrza. Poszczególne cząsteczki powietrza składającego się na wiatr poruszają się w różne strony chaotycznym ruchem z dużymi prędkościami i zderzają ze sobą, przy czym ich prędkość między zderzeniami jest niezależna od prędkości wiatru. Prędkość wiatru, nawet bardzo silnego, jest znacznie mniejsza od prędkości chaotycznego ruchu cząsteczek powietrza.
Huragan o sile 12 stopni w skali Beauforta (czyt. boforta) to wiatr o prędkości 35 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, a chaotyczny ruch cząsteczek powietrza odbywa się ze średnimi prędkościami rzędu 500 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ (rys. 13.5).



Rys. **13.5.** Chaotyczny ruch cząsteczek w huraganie odbywa się z dużo większą prędkością niż mierzona prędkość wiatru

Prąd w cieczach

W metalach w stanie ciekłym (np. w rtęci w temperaturze pokojowej lub w stopionym żelazie w wysokiej temperaturze) występują elektrony swobodne, a przepływ prądu następuje na takiej samej zasadzie jak w metalach w stanie stałym.
W zupełnie inny sposób prąd płynie przez elektrolity. Sprawdzimy to na przykładzie roztworu soli kuchennej (chlorku sodu) – wykonajmy doświadczenie opisane na następnej stronie.



Doświadczenie 12

1. Zapoznaj się z informacjami z ramki „Wskazówki praktyczne" na s. 148.
2. Przygotuj żarówkę 4,8 V, oprawkę, przewody, baterię 9 V, naczynie (np. głęboki talerz), przegotowaną wodę i sól kuchenną.
3. Nalej do talerza przegotowaną wodę. Podłącz żarówkę do baterii, a wolne końce przewodów włóż do wody (patrz zdjęcie).
4. Zbliżaj i oddalaj od siebie zanurzone w wodzie końce przewodów, ale ich nie stykaj.
5. Rozpuść w wodzie łyżeczkę soli i powtórz czynności opisane w punkcie 4.

Co obserwujesz?

Co zaszło w trakcie tego doświadczenia? Kiedy końce przewodów znajdowały się w przegotowanej wodzie, żarówka nie świeciła. Było tak, ponieważ taka woda zawiera niewiele rozpuszczonych substancji, gdyż znaczna ich część osadziła się jako kamień kotłowy w czajniku.
Kiedy końce przewodów znajdowały się w wodzie z solą, żarówka świeciła. Jest tak, ponieważ roztwór wodny chlorku sodu jest elektrolitem, co oznacza, że zawiera jony dodatnie Na^+ i ujemne Cl^-.
Jak wiemy, jony w elektrolicie mogą się poruszać, dzięki czemu następuje przepływ prądu. Jony dodatnie poruszają się zgodnie ze zwrotem linii pola elektrycznego (czyli od dodatniego do ujemnego bieguna baterii), a jony ujemne – w przeciwną stronę. Kiedy więc zanurzyliśmy przewody w wodzie z solą, obwód został zamknięty (mimo, że przewody się nie dotykały) i żarówka zaczęła świecić.

Sól kuchenna to chlorek sodu NaCl, który w wodzie rozpada się na jony Na^+ i Cl^-.

Prąd w gazach

O ruchu ładunków elektrycznych w gazach (przepływie prądu przez gazy) mówiliśmy już w poprzednim rozdziale. Jego najbardziej spektakularnym przykładem jest wyładowanie elektryczne w trakcie burzy, czyli piorun.
Przez gaz składający się tylko z obojętnych elektrycznie cząsteczek, np. przez powietrze, prąd nie może płynąć, ponieważ nie ma w nim wystarczającej liczby ładunków, które by się mogły przemieszczać. Warunkiem przepływu prądu przez gaz jest więc jego **jonizacja**, czyli wybicie niektórych elektronów z atomów.

Jonizacja powietrza i piorun s. 110

Atomy, które utraciły elektrony, stają się jonami dodatnimi, natomiast wybite elektrony – elektronami swobodnymi, zdolnymi do samodzielnego poruszania się w powietrzu.

> Prąd elektryczny w gazach polega na przepływie elektronów i jonów.

Jonizacja może zachodzić pod wpływem wielu czynników, które często występują jednocześnie. Wymieńmy kilka.

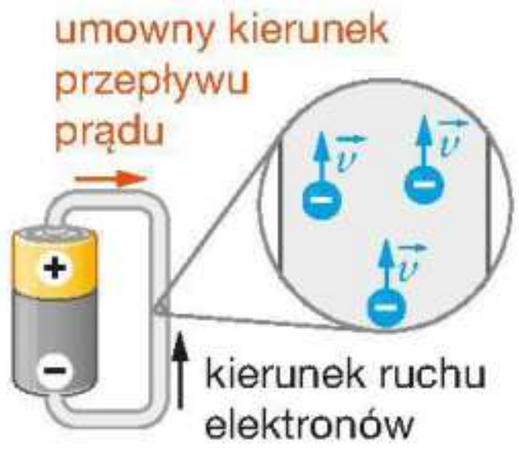
- Promieniowanie – wysokoenergetyczne cząstki promieniowania kosmicznego uderzają w cząsteczki powietrza i wybijają z nich elektrony. Dlatego w powietrzu zawsze znajduje się trochę jonów. O sztucznych źródłach promieniowania powodującego jonizację powietrza (zwanego promieniowaniem jonizującym) powiemy w czwartej części podręcznika, gdy będziemy się zajmować fizyką jądrową.
- Pole elektryczne – w silnym polu elektrycznym jony i elektrony rozpędzają się, uderzają w cząsteczki powietrza i wybijają z nich elektrony, co powoduje dalszą jonizację. W doświadczeniu 7. w poprzednim dziale (s. 109) obserwowaliśmy silną jonizację powietrza w pobliżu ostrza naładowanego przewodnika, gdzie natężenie pola elektrycznego jest szczególnie duże.
- Wysoka temperatura – w takich warunkach cząsteczki gazu mają dużą energię kinetyczną. Cząsteczki gorącego gazu zderzają się ze sobą częściej i z większą energią niż cząsteczki zimnego gazu. Podczas takich zderzeń może dochodzić do wybijania elektronów z atomów.

Uwolnione elektrony napotykają dodatnie jony i zostają do nich przyciągnięte siłami elektrycznymi, a nadmiar energii oddają w postaci światła. Właśnie dlatego zjonizowany gaz świeci. To zjawisko obserwujemy w przypadku błyskawic. W praktyce wykorzystujemy je w niektórych źródłach oświetlenia (lampy neonowe i sodowe, świetlówki).

Umowny kierunek przepływu prądu elektrycznego

Co oznacza określenie *kierunek przepływu prądu*? Wydawać by się mogło, że jest to kierunek ruchu ładunków. Okazuje się jednak, że nie zawsze. Ładunki o przeciwnych znakach w tym samym polu elektrycznym poruszają się przecież w przeciwne strony.

Na przykład w rozważanym przez nas zjawisku przepływu prądu przez wodę z solą (dośw. 12. na sąsiedniej stronie) jony ujemne poruszają się w przeciwnym kierunku niż dodatnie. Nie można więc przyjąć, że kierunek przepływu prądu to kierunek ruchu ładunków. Dlatego jest to pojęcie umowne.



Rys. **13.6.** Porównanie umownego kierunku prądu z rzeczywistym kierunkiem uporządkowanego ruchu elektronów

> Prąd płynie zgodnie ze zwrotem linii pola elektrycznego, czyli z punktów o wyższym potencjale do punktów o niższym potencjale.

Takie podejście pozwala analizować zjawiska związane z przepływem prądu bez wnikania w jego mikroskopową naturę.

Na przykład gdy mówimy o kierunku przepływu prądu w żarówce podłączonej do baterii, rozumiemy, że prąd płynie od bieguna dodatniego do bieguna ujemnego, choć elektrony przemieszczają się w przeciwnym kierunku (rys. 13.6).

Zmysł elektryczny

Od dawna wiadomo, że niektóre ryby wykorzystują do polowania wytwarzane przez siebie impulsy elektryczne o wysokim napięciu. Jednak dopiero w XX w. odkryto, że znacznie słabszymi prądami elektrycznymi posługuje się dużo więcej zwierząt wodnych, które w ten sposób orientują się w przestrzeni i porozumiewają.

Delfin gujański

W 2011 r. odkryto **zmysł elektryczny** u pierwszego gatunku ssaka łożyskowego – delfina gujańskiego. Naukowcy w ramach badań delfinów w delfinarium obserwowali ich reakcje na sztuczne sygnały elektryczne. Zwierzę zostało wytresowane tak, aby wpływało w specjalną pętlę i opierało szczękę na podstawce. Delfin dostawał nagrodę (jedzenie), gdy wypływał na powierzchnię przy włączonym prądzie lub za to, że pozostawał na miejscu, gdy prąd był wyłączony. Okazało się, że zwierzę zorientowało się w sytuacji i poprawnie reagowało na sygnały.

płytkie wody przy ujściach rzek Ameryki Południowej

210 cm, 120 kg





Ryby drętwokształtne

To ryby o charakterystycznym spłaszczonym kształcie, które posługują się narządami elektrycznymi do elektrolokacji, polowania i obrony. Największe osobniki, mające 180 cm długości, mogą wytwarzać napięcie powyżej 200 V.

W przeciwieństwie do ryb słodkowodnych, u których komórki wytwarzające napięcie są połączone szeregowo, u drętwokształtnych stosy takich komórek są połączone równolegle. Dzięki takiej budowie oraz dobremu przewodnictwu elektrycznemu słonej wody ryby te mogą porazić ofiarę prądem o natężeniu dochodzącym nawet do 30 A. Ponieważ żyją przy dnie i często zakopują się w piasku, niektóre ich gatunki są całkowicie ślepe.

Oceany Indyjski, Atlantycki, Spokojny i Morze Śródziemne

do 180 cm, do 90 kg

Strętwa

Narządy elektryczne tej ryby mogą wytwarzać napięcie ok. 10 V, służące do elektrolokacji i komunikacji, ale również impulsy o napięciu nawet 600 V i natężeniu prądu poniżej 1 A, dzięki którym są w stanie ogłuszyć lub zabić ofiarę. Strętwa jest nazywana potocznie węgorzem elektrycznym, choć nie jest blisko spokrewniona z węgorzem.

rzeki Ameryki Południowej

do 2,5 m, 20 kg



Duch brazylijski (Duch amazoński)

Wytwarza słabe przemienne pole elektryczne o częstotliwości ok. 1000 Hz, dzięki któremu orientuje się w otoczeniu i wyszukuje ofiary w ciemności lub mętnej wodzie. Ma dwa rodzaje elektroreceptorów, rozmieszczonych na całym ciele. Pierwsze są dostosowane do pola o częstotliwości, które sama wytwarza, a drugie wyczuwają pola elektryczne o niższych częstotliwościach, wytwarzanych przez inne organizmy.



rzeki Ameryki Południowej

ok. 50 cm

Rekinek psi

Rekinek psi żywi się głównie flądrami ukrytymi w mule. Lokalizuje zdobycze, wyczuwając prąd płynący w układzie nerwowym innych ryb.

W laboratorium rekinek próbował polować na przewody elektryczne, przez które przepływał prąd o parametrach zbliżonych do płynącego w układzie nerwowym fląder.

północno-wschodni Atlantyk

85–100 cm, 2 kg



Nożowiec zielonkawy

Osobniki tego gatunku posługują się sygnałami elektrycznymi nie tylko do elektrolokacji i do porozumiewania się, lecz także do wabienia partnerów w okresie godowym. Prąd odgrywa więc u nich rolę zbliżoną do śpiewu ptaków.

rzeki Ameryki Południowej

do 45 cm, ok. 110 g





Rys. 13.7. Nawet jeśli przewód ma setki kilometrów długości, elektrony zaczynają się w nim poruszać w uporządkowany sposób niemal równocześnie z chwilą włączenia napięcia

Prędkość dryfu ładunków a prędkość rozchodzenia się pola elektrycznego

Prędkość dryfu ładunków w przewodniku jest czymś innym niż prędkość rozchodzenia się pola elektrycznego w tym przewodniku.
Gdy włączamy prądnicę w elektrowni, pole elektryczne rozchodzi się wzdłuż przewodów z prędkością bliską prędkości światła, a więc niemal natychmiast trafia do odległych odbiorców prądu. W miarę jak pole dociera do elektronów wzdłuż przewodu, zaczynają one swój uporządkowany ruch – przemieszczają się w całym przewodzie niemal jednocześnie, choć z bardzo małą prędkością w porównaniu z prędkością rozchodzenia się pola elektrycznego (rys. 13.7).

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać przepływ prądu elektrycznego w metalach, cieczach i gazach;
- posługiwać się pojęciem natężenia prądu elektrycznego;
- odróżniać dryf elektronów od ruchu chaotycznego oraz od rozchodzenia się pola elektrycznego w przewodniku;
- odróżniać umowny kierunek prądu od kierunku ruchu ładunków elektrycznych.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Żarówka w reflektorze motocykla jest zasilana prądem o natężeniu 5 A z akumulatora o napięciu 6 V.

a) Oblicz, jaki ładunek przepłynie przez włókno żarówki w czasie 5 min.

b) W jakim czasie przez włókno żarówki przepłynie ładunek 100 C?

2. Przez żarówkę reflektora samochodowego płynie prąd o natężeniu 2 A. Ile czasu minie, zanim przepłynie przez nią 10^{23} elektronów?

3. Wykonaj odpowiednie obliczenia i dokończ porównanie. Zapisz uzupełnione zdanie w zeszycie.

Prędkość chaotycznego ruchu elektronów jest tyle razy większa od prędkości ich dryfu, ile razy długość równika jest większa od długości...

4. Czy woda destylowana przewodzi prąd elektryczny? Dlaczego?

5. Wskaż wszystkie jednostki natężenia prądu elektrycznego i wyraź je w amperach. Wyjaśnij, dlaczego pozostałe jednostki nie wyrażają natężenia.

A. kulomb na tydzień

B. ładunek elementarny na sekundę

C. kulomb na tydzień do kwadratu

D. sekunda na kulomb

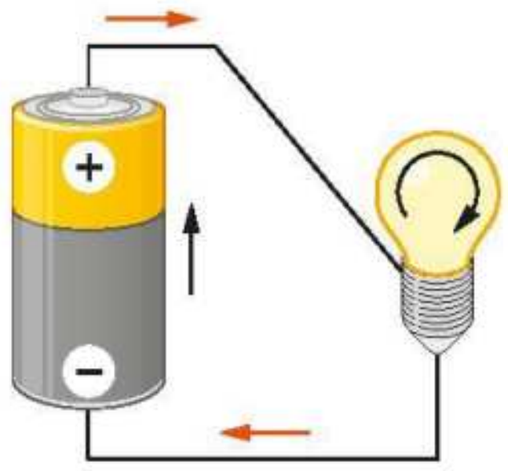
E. ładunek mola elektronów na minutę

13.2. Obwody elektryczne

Przypomnij sobie

- Natężenie prądu to wielkość określająca ilość ładunku przepływającego przez określony przekrój poprzeczny przewodnika w jednostce czasu.
- Napięcie elektryczne między dwoma punktami to różnica energii potencjalnych ładunku 1 C w tych punktach.
- Podczas rysowania obwódów elektrycznych korzystamy z umownych symboli.

Z urządzeń elektrycznych i elektronicznych korzystamy na co dzień. Na ogół nie zastanawiamy się przy tym nad zachodzącymi w nich zjawiskami fizycznymi. W szkole podstawowej poznałeś już pojęcia pozwalające opisywać proste obwody elektryczne i nauczyłeś się je budować na podstawie schematu.
Przypomnijmy kolejne ważne informacje związane z prądem, które powinieneś pamiętać z dotychczasowej edukacji.



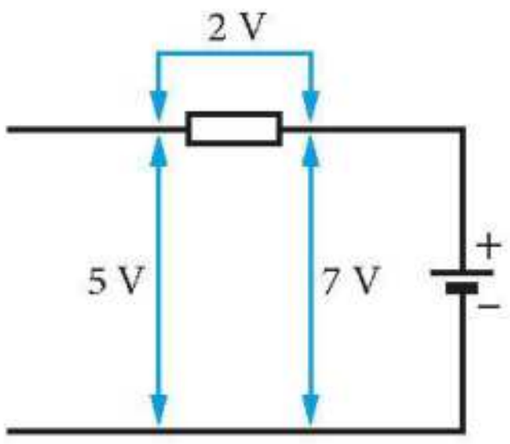
Rys. **13.8.** Prąd w obwodzie płynie po drodze zamkniętej

Podstawowe pojęcia związane z prądem

Najprostszy obwód elektryczny składa się z **odbiornika energii elektrycznej** (np. żarówki, grzałki, silnika) podłączonego do **źródła napięcia** (np. ogniwa, baterii, prądnicy). Akumulator albo kondensator mogą być zarówno źródłami napięcia (gdy czerpiemy z nich prąd), jak i odbiornikami energii (gdy je ładujemy).
W obwodzie prąd płynie po drodze zamkniętej: od dodatniego bieguna źródła napięcia do odbiornika, przez odbiornik, następnie z odbiornika do ujemnego bieguna źródła napięcia, a wreszcie wewnątrz źródła napięcia od ujemnego do dodatniego bieguna (rys. 13.8).
Dzięki źródłom napięcia elektrony zyskują energię, którą stopniowo tracą, gdy płyną przez kolejne odbiorniki energii w obwodzie. Różnica energii elektronów między dwiema końcówkami odbiornika energii (np. opornika, żarówki) odpowiada napięciu między tymi końcówkami, gdyż napięcie to różnica potencjałów, a potencjał to energia w przeliczeniu na ładunek 1 C.
Często słyszymy, że „przewód znajduje się pod wysokim napięciem". Wyrażenie to jest nieprecyzyjne, ponieważ nie uwzględnia istoty napięcia, które jest **różnicą** potencjałów. Dlatego też, w tym przypadku precyzyjniejsze byłoby stwierdzenie, że „przewód jest pod napięciem względem ziemi" albo że „między przewodem a ziemią jest napięcie" (rys. 13.9).

O różnicy między ogniwem a baterią powiemy w lekcji 13.8.


Rys. **13.9.** Wysokie napięcie między przewodami a ziemią nie stanowi zagrożenia dla ptaków, gdyż nie dotykają one ziemi



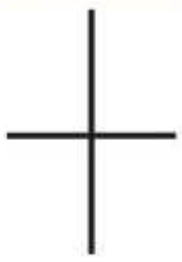
Rys. **13.10.** Napięcie między końcówkami opornika wynosi 2 V. Mówimy też, że spadek napięcia na oporniku jest równy 2 V

W układach elektronicznych zaznacza się czasem napięcie w danym punkcie obwodu. Należy pamiętać, że w taki sposób oznacza się napięcie tego punktu względem ujemnego bieguna baterii.
Zatem gdy mówimy o „napięciu w określonym punkcie", zawsze mamy na myśli napięcie między dwoma punktami: tym, o który nam chodzi, a innym – przyjętym umownie za zerowy (np. ziemią, ujemnym biegunem baterii).
Ponieważ napięcie na wejściu danego elementu obwodu jest wyższe niż napięcie na jego wyjściu, mówimy też o spadku napięcia na tym elemencie (rys. 13.10).

Symbole elektryczne

Każdy, nawet najbardziej skomplikowany obwód elektryczny można przedstawić za pomocą schematycznego rysunku. Poszczególne elementy obwodu pokazujemy na schematach za pomocą określonych symboli (tabela 13.1). Jest to znacznie prostsze niż odwzorowanie rzeczywistego wyglądu urządzenia.

Tabela 13.1. Wybrane symbole elektryczne stosowane w obwodach

Przewód	Skrzyżowanie przewodów bez połączenia	Połączenie przewodów	Ogniwo lub bateria	Żarówka	Opornik	Wyłącznik	Konden-sator
							

Uwaga. Czasami do oznaczenia niektórych elementów stosuje się też inne symbole. W takim wypadku należy zawsze zapoznać się z podanym objaśnieniem symboli.

Napięcie w obwodzie elektrycznym a energia

Napięcie to różnica potencjałów, czyli różnica energii potencjalnych ładunku 1 C w dwóch punktach. Zgodnie z zasadą zachowania energii ładunek 1 C przepływający między tymi punktami zgodnie z liniami pola („od plusa do minusa") może wykonać pracę równą tej różnicy. Z kolei aby ładunek przemieścić w drugą stronę, trzeba mu takiej energii dostarczyć.
Tak więc jeśli pomiędzy końcówkami żarówki jest napięcie 3 V, to na każdy 1 C przepływającego między nimi ładunku przypadają 3 J energii elektrycznej dostarczonej do żarówki i zamienionej w niej w energię światła i energię wewnętrzną.
Z kolei bateria o napięciu 3 V dostarcza 3 J energii do każdego kulomba ładunku.

Obwód elektryczny a przepływ wody

Przepływ prądu elektrycznego często porównuje się do przepływu wody. W takim porównaniu napięcie odpowiada różnicy poziomów, a natężenie – ilości wody przepływającej przez dane miejsce w ciągu sekundy (rys. 13.11).

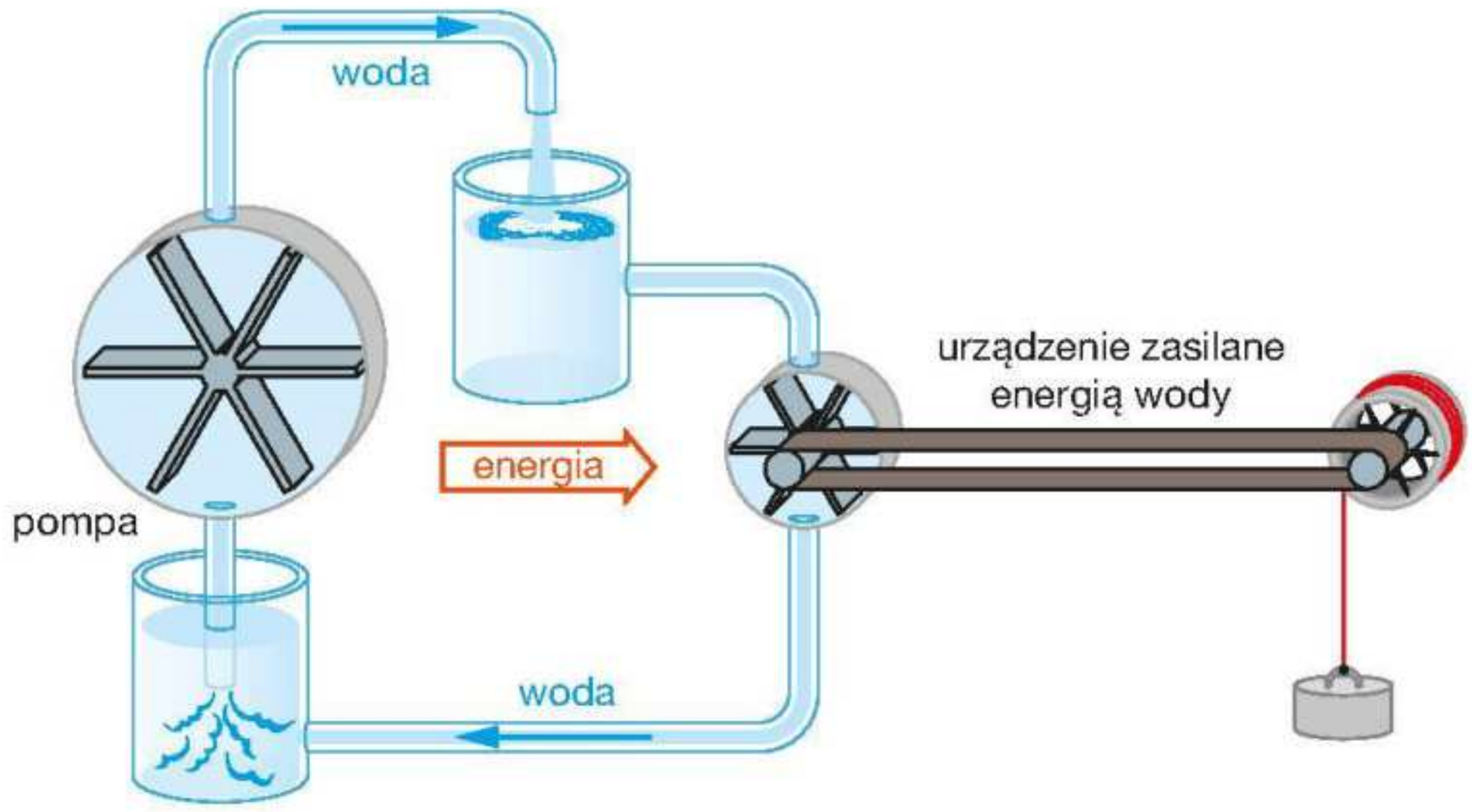
Te porównania powstały, zanim jeszcze poznano naturę prądu elektrycznego, jednak okazały się bardzo trafne. Napięcie określa różnicę energii potencjalnej ładunku w polu elektrycznym, podobnie jak w modelu wodnym różnica poziomów wody określa różnicę jej energii potencjalnej grawitacji.

Natężenie opisuje, jaka jest wartość ładunku przepływającego w ciągu sekundy, a więc także – liczba elektronów przepływających w tym czasie. W modelu wodnym natężenie odpowiada masie wody, a więc także liczbie cząsteczek wody przepływających w ciągu sekundy.

W takim porównaniu baterii odpowiada pompa przenosząca wodę do góry (a więc zwiększająca jej energię potencjalną), a odbiornikowi energii – urządzenie zasilane energią wody (rys. 13.12).



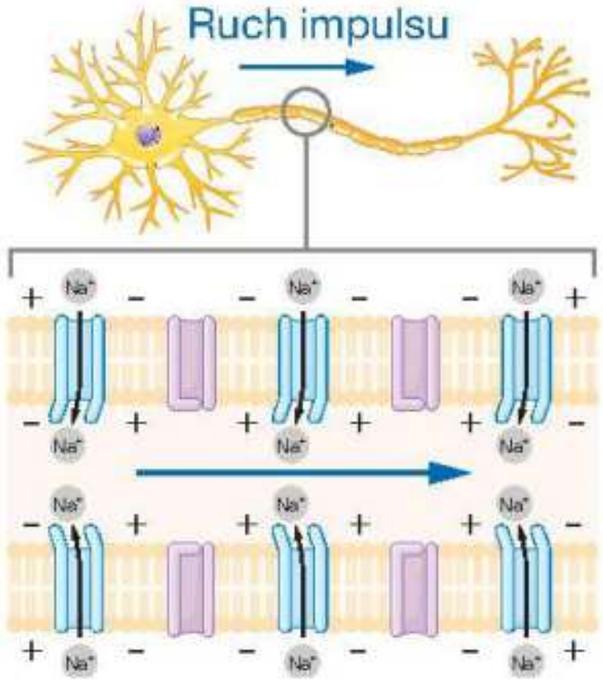
Rys. **13.11.** Porównanie prądu elektrycznego do przepływu wody



Rys. **13.12.** Hydrauliczny odpowiednik obwodu elektrycznego

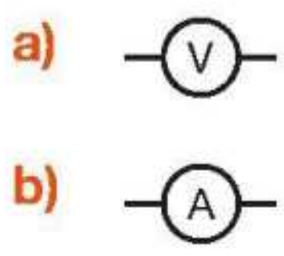
A to ciekawe

Mówi się czasem, że w układzie nerwowym człowieka i innych zwierząt płynie prąd elektryczny, a akson (długa część komórki nerwowej) odgrywa rolę przewodu. To nie jest do końca prawda. Przesyłanie impulsu nerwowego w układzie nerwowym rzeczywiście polega na przepływie ładunków elektrycznych (jonów), trudno jednak porównać akson do przewodu elektrycznego, ponieważ jony poruszają się w nim inaczej: nie wzdłuż, ale w poprzek – przez ścianki aksonu na zewnątrz lub do wewnątrz. Wzdłuż aksonu przesuwa się jedynie obszar, w którym nie zachodzi równowaga między jonami dodatnimi i ujemnymi. Ruch tego obszaru to właśnie impuls nerwowy.



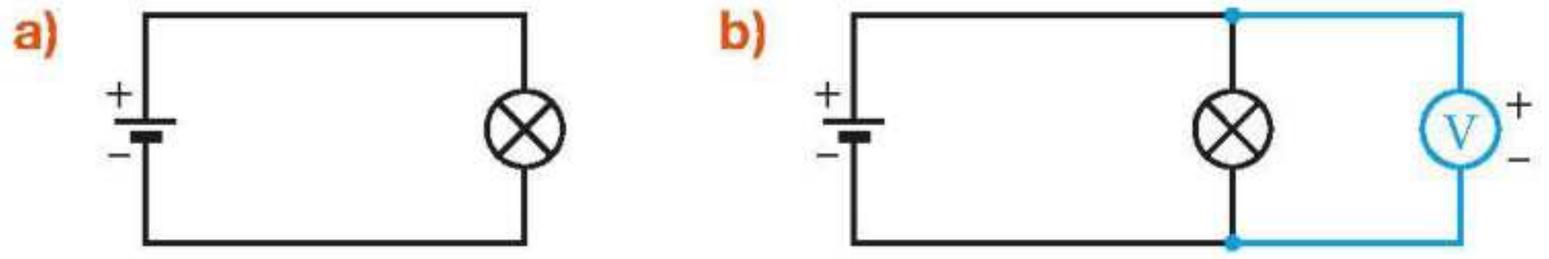
Pomiar napięcia i natężenia

Do pomiaru napięcia służy woltomierz, a do pomiaru natężenia – amperomierz. Ich symbole przedstawiono na rysunku 13.13.



Rys. **13.13.** Symbol: a) woltomierza, b) amperomierza

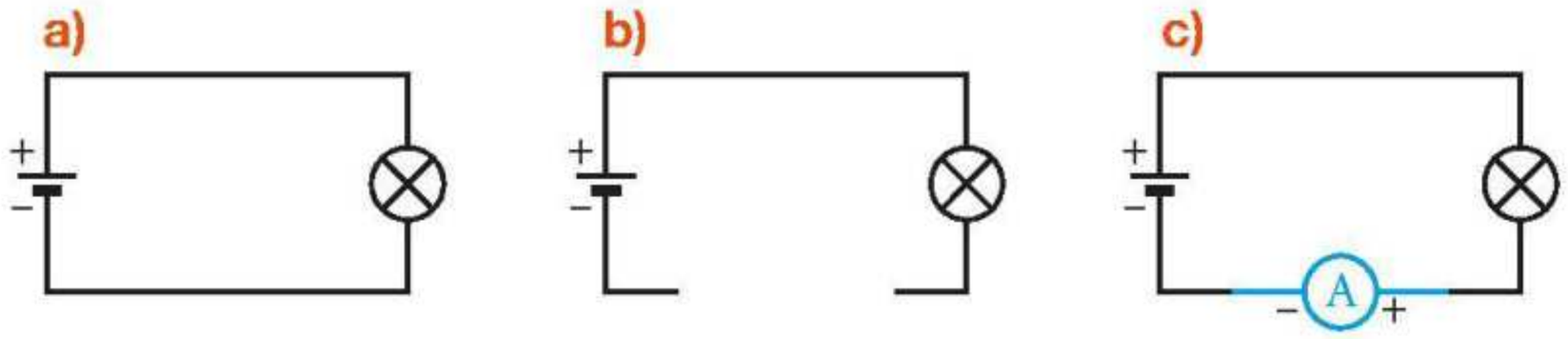
Gdy mierzymy napięcie, musimy pamiętać, że jest ono zdefiniowane jako różnica potencjałów, a różnicę zawsze określamy **między dwoma punktami**, w tym przypadku – dwoma punktami obwodu. Jeżeli więc chcemy zmierzyć napięcie między wybranymi punktami, końcówki woltomierza należy podłączyć do tych punktów (rys. 13.14).



Rys. **13.14.** Pomiar napięcia na żarówce: a) wyjściowy obwód, b) obwód z podłączonym woltomierzem

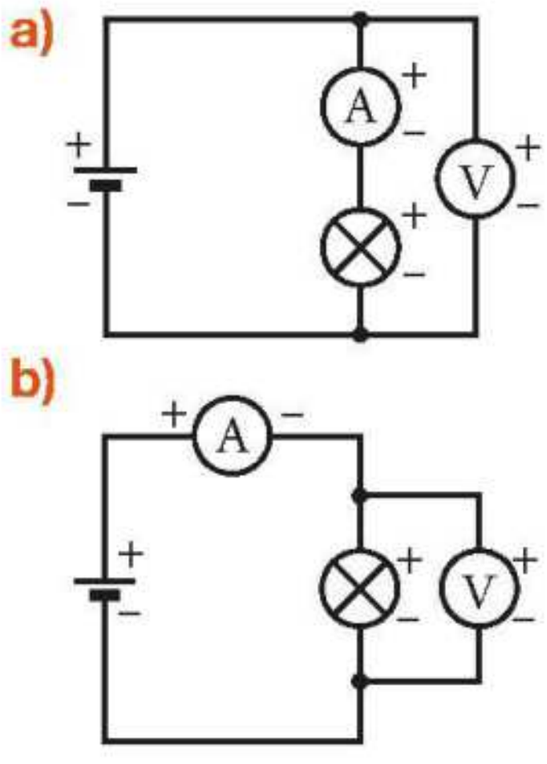
Inaczej jest w przypadku pomiaru natężenia prądu. Jak pamiętasz, wielkość ta określa ładunek przepływający w jednostce czasu w **jednym**, określonym miejscu obwodu.

Amperomierz musimy więc podłączyć tak, aby płynął przez niego określony prąd. W tym celu obwód trzeba najpierw rozłączyć (rys. 13.15b), a następnie podłączyć miernik (rys. 13.15c).



Rys. **13.15.** Pomiar natężenia prądu płynącego przez żarówkę: a) obwód wyjściowy, b) obwód po rozłączeniu (żarówka nie świeci), c) obwód po włączeniu amperomierza

Często w obwodach interesuje nas pomiar zarówno napięcia, jak i natężenia, dlatego podłączamy równocześnie oba mierniki (rys. 13.16).



Rys. **13.16.** Jednoczesny pomiar napięcia i natężenia – dwa możliwe sposoby podłączenia mierników

Woltomierz podłączamy **równolegle** do obwodu.

Amperomierz podłączamy **szeregowo** do obwodu.

Założenia dotyczące mierników

W naszych rozważaniach będziemy przyjmować, że:

- amperomierz nie wpływa na natężenie prądu płynącego przez obwód, a spadek napięcia między jego końcówkami można pominąć,
- woltomierz nie powoduje spadku napięcia między punktami, do których jest podłączony, a natężenie płynącego przez niego prądu pomijamy.

W rzeczywistości oba te założenia są spełnione tylko w przybliżeniu. Im wyższa jakość miernika, tym lepsze jest to przybliżenie.

Dla nas nie ma znaczenia, który ze sposobów podłączenia obu mierników wybierzemy (patrz rys. 13.16). Tylko przy bardzo dokładnych pomiarach musielibyśmy brać pod uwagę parametry stosowanych przyrządów.

Mierniki uniwersalne

Obecnie rzadko stosuje się woltomierze i amperomierze w osobnych obudowach. Obie te funkcje łączy w sobie miernik uniwersalny – analogowy lub cyfrowy. Zazwyczaj za pomocą tego typu miernika można też mierzyć opór elektryczny. Czasem mierniki uniwersalne są wyposażone w dodatkowe funkcje, np. pomiaru pojemności kondensatorów lub temperatury. Funkcję miernika i zakres przeprowadzanych pomiarów ustawia się za pomocą pokrętła na przyrządzie.

Prosty cyfrowy miernik uniwersalny można kupić w sklepie elektronicznym, sklepie budowlanym lub supermarkecie.



Rys. **13.17.** Ten sam miernik uniwersalny może służyć do pomiaru napięcia, natężenia i oporu

Niepewność pomiaru miernikiem analogowym

Aby obliczyć niepewność pomiaru wykonanego za pomocą woltomierza lub amperomierza, musimy znać **klasę miernika**. Jest to parametr określający, jak dokładne są wskazania danego urządzenia. Klasa miernika jest podana na jego obudowie lub w instrukcji obsługi i często zależy od przyjętego zakresu pomiaru.

W przypadku miernika analogowego klasa to niepewność pomiaru wyrażona w procentach maksymalnego zakresu. Jeśli więc miernik analogowy klasy 1,5 nastawimy na zakres 200 mA, to niepewność bezwzględna wykonanego nim pomiaru natężenia wynosi 1,5% z 200 mA, czyli:

Niepewność względna i bezwzględna, cz. I s. 24–25

$$0{,}015 \cdot 200\ \text{mA} = 3\ \text{mA}$$

Z taką niepewnością będzie mierzona każda wielkość przy tym zakresie, a więc jeśli z miernika odczytamy natężenie 100 mA, to wynik pomiaru wraz z niepewnością wyniesie 100 mA ± 3 mA, a jeśli odczytamy natężenie 5 mA, to będzie on równy 5 mA ± 3 mA.

Zwróć uwagę, że w przypadku 100 mA zmierzyliśmy natężenie z niepewnością względną 3%, a w przypadku 5 mA – z niepewnością względną 60%. Aby dokładniej zmierzyć natężenie w drugim przypadku, lepiej byłoby – o ile to tylko możliwe – przełączyć miernik na niższy zakres pomiarowy.

Niepewność pomiaru miernikiem cyfrowym

W przypadku mierników cyfrowych klasa przyrządu nie oznacza procentu zakresu pomiarowego, ale procent zmierzonej wartości. W pomiarach tego typu miernikiem oprócz niepewności wynikającej z jego klasy należy także uwzględnić niepewność wynikającą z ostatniej wyświetlanej cyfry. Jak ją interpretować, najprościej wyjaśnić na przykładzie.

Dokładność miernika cyfrowego dla zakresu 200 mA podano w instrukcji w postaci (1,5% + 2). Na wyświetlaczu pojawił się wynik pomiaru natężenia: 100,0 mA.

Liczba 1,5% oznacza klasę miernika, a więc niepewność z niej wynikająca wynosi 1,5% zmierzonej wartości, czyli:

$$0{,}015 \cdot 100{,}0\ \text{mA} = 1{,}5\ \text{mA}$$

Liczba 2 podana w dokładności miernika mówi o tym, że dodatkowa niepewność pomiaru jest 2 razy większa niż cyfra określająca rząd wielkości, reprezentowany przez ostatnią cyfrę wyświetlaną przez urządzenie. W omawianym przykładzie ta cyfra oznacza dziesiąte części miliampera. Dodatkowa niepewność wynikająca z tego rzędu wielkości wynosi więc:

$$2 \cdot 0{,}1\ \text{mA} = 0{,}2\ \text{mA}$$

W sumie niepewność pomiaru to:

$$1{,}5\ \text{mA} + 0{,}2\ \text{mA} = 1{,}7\ \text{mA}$$

Zwróć uwagę, że niepewność jest tutaj dużo większa niż wynikałoby z liczby cyfr wyświetlanych przez przyrząd.

Ostatecznie wynik pomiaru wraz z niepewnością zapiszemy w postaci:

$$100{,}0\ \text{mA} \pm 1{,}7\ \text{mA}$$

Jeśli nie została podana dokładność wynikająca z wielokrotności rzędu ostatniej cyfry, przyjmuje się, że wynosi ona 1.

Po tej lekcji powinieneś

- znać podstawowe pojęcia dotyczące obwodów elektrycznych;
- rysować i czytać schematy elektryczne;
- posługiwać się woltomierzem, amperomierzem i miernikiem uniwersalnym, podawać wynik pomiarów przeprowadzonych za ich pomocą wraz z niepewnością pomiarową;
- rozumieć, czym jest klasa przyrządu pomiarowego.

Pytania i zadania

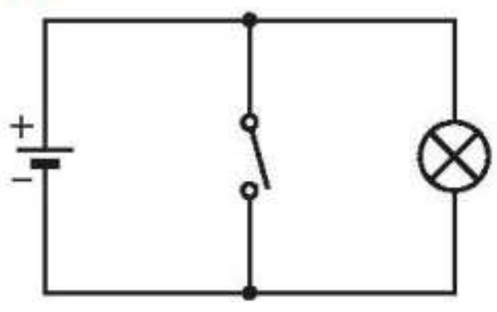
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Schemat obwodu elektrycznego przedstawia tylko połączenia elementów, a nie ich rozmieszczenie w przestrzeni. Dlatego ten sam obwód można narysować za pomocą różnych schematów.

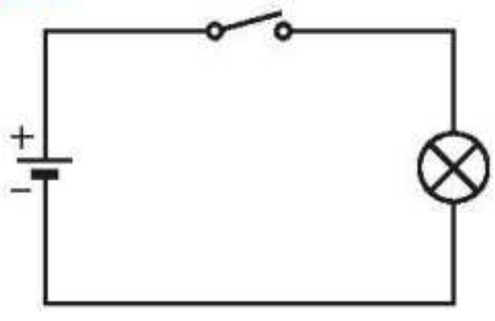
a) Znajdź wśród schematów A–D dwa przedstawiające ten sam obwód.

b) Dla każdego z pozostałych schematów narysuj w zeszycie ten sam obwód w inny sposób.

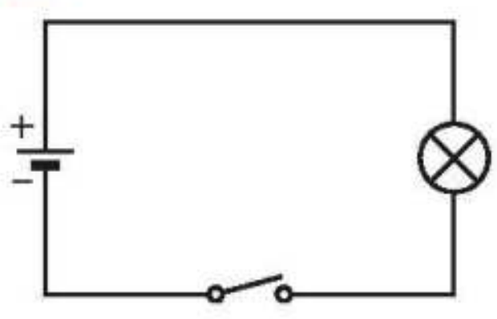
A.



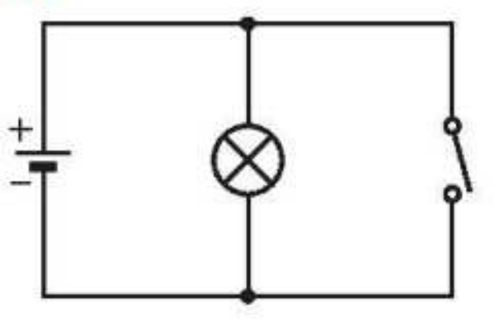
B.



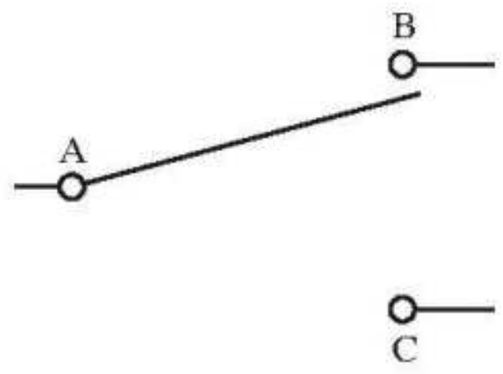
C.



D.



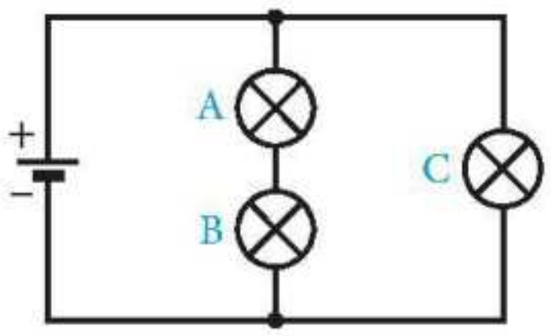
2. Na rysunku przedstawiono schematycznie przełącznik.



W jednym położeniu przełącznika są połączone końcówki A i B, a w drugim – A i C.

Z wykorzystaniem tego typu przełączników można zbudować układ do włączania i wyłączania światła na schodach domu jednorodzinnego, działający w obie strony zarówno na parterze, jak i na piętrze. Zaprojektuj w zeszycie opisany układ.

3. Przerysuj ołówkiem do zeszytu poniższy schemat. Następnie dorysuj do niego: woltomierz pozwalający zmierzyć napięcie między końcówkami żarówki A oraz amperomierz pozwalający zmierzyć natężenie prądu płynącego przez żarówkę C. Jak sądzisz, dlaczego napisaliśmy, aby schemat narysować ołówkiem?



4. Cyfrowy miernik uniwersalny nastawiony na zakres 200 mV podaje wynik pomiaru 152,7. Wiemy, że klasa miernika wynosi (1% + 1). Podaj wynik pomiaru w woltach wraz z niepewnością pomiarową.

5. Jaki zakres pomiarowy należy wybrać w opisanych sytuacjach? Używamy miernika, którego skalę przedstawiono na zdjęciu.

a) Chcemy sprawdzić, czy prądnica samochodu jest sprawna. Powinna wytwarzać napięcie ok. 14 V.

b) Chcemy sprawdzić, czy zasilacz do laptopa jest sprawny. Według instrukcji powinien dawać napięcie 21 V.

c) Mierzymy napięcie między biegunami baterii AA.

Uwaga. Skrót DC (ang. *direct current*) oznacza napięcie stałe, AC (ang. *alternate current*) to napięcie przemienne.



6. Podłącz żarówkę dostosowaną do napięcia 1,2 V do baterii AA. Zmierz napięcie między biegunami żarówki oraz natężenie płynącego przez nią prądu. Zapisz w zeszycie wyniki wraz z niepewnością pomiarową.

13.3. Połączenia szeregowe i równoległe

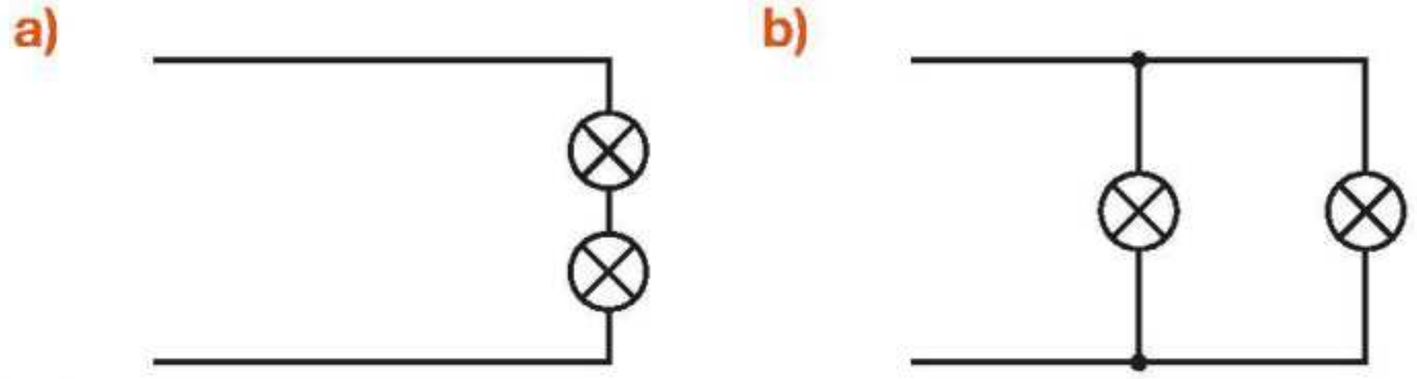
Przypomnij sobie

- Napięcie mierzymy za pomocą woltomierza, a natężenie za pomocą amperomierza. Oba te pomiary można wykonać miernikiem uniwersalnym.
- Niepewność pomiaru napięcia i natężenia miernikiem cyfrowym jest zwykle większa niż wynikałoby to z liczby cyfr wyświetlanych przez przyrząd.

W tej lekcji poznamy podstawowe połączenia odbiorników energii elektrycznej, np. żarówek, i źródeł energii, np. baterii, występujące w obwodach elektrycznych.

Połączenia w obwodach elektrycznych

Gdy chcemy podłączyć dwie żarówki do jednej baterii, możemy je ze sobą połączyć na dwa sposoby: szeregowo (rys. 13.18a) lub równolegle (rys. 13.18b). Kiedy żarówek jest więcej, także możemy je łączyć szeregowo lub równolegle.



Rys. **13.18.** Dwie żarówki połączone: a) szeregowo, b) równolegle



Rys. **13.19.** Woda płynie przez wszystkie progi po kolei, tak jak elektrony przez każdy element w połączeniu szeregowym

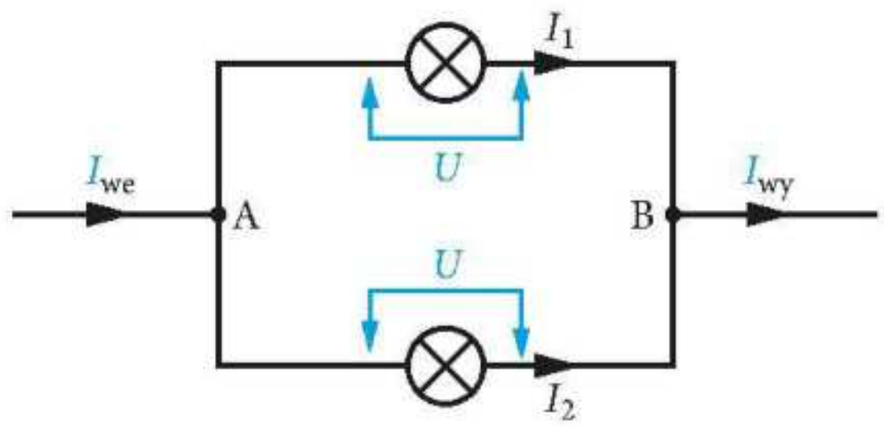
Przy większej liczbie elementów są możliwe także bardziej skomplikowane połączenia, niemniej te dwa podstawowe rodzaje wystarczą nam, aby zbadać najważniejsze prawa rządzące przepływem prądu. Zwróćmy uwagę na podstawową różnicę między tymi sposobami łączenia.

> Gdy dwa elementy są połączone równolegle, część elektronów przepływa przez jeden z nich, a pozostałe elektrony – przez drugi. Przy połączeniu szeregowym wszystkie elektrony przepływają przez każdy z elementów po kolei.

Z tych obserwacji będziemy korzystać podczas dokładniejszego omówienia każdego z przedstawionych sposobów łączenia elementów.

Połączenie równoległe

Gdy łączymy elementy równolegle, napięcie na nich jest jednakowe. Wynika to z definicji napięcia jako różnicy potencjałów. Na przykład na rysunku 13.20 napięcie na każdej z żarówek jest równe różnicy potencjałów w punktach A i B.



Rys. 13.20. Napięcia na dwóch żarówkach połączonych równolegle są takie same

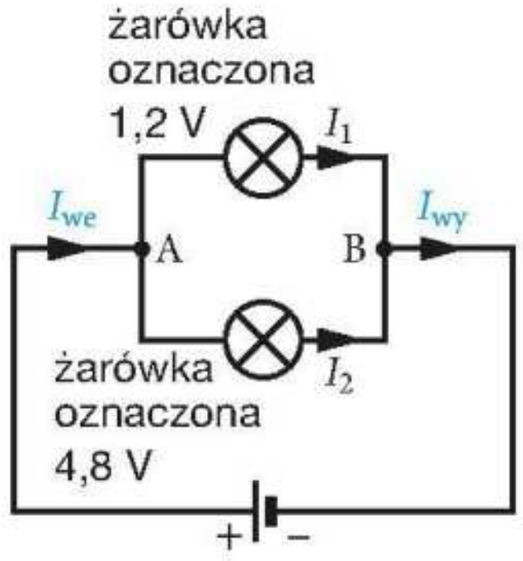
Zbadamy teraz zależność między natężeniami prądu: I_1 i I_2 – płynącego przez poszczególne żarówki, I_{we} – wpływającego do obwodu oraz I_{wy} – wypływającego.

Doświadczenie 13 – obowiązkowe

Pierwsze prawo Kirchhoffa

1. Przygotuj ogniwo AA oraz dwie żarówki: jedną dostosowaną do napięcia 1,2 V, a drugą – do napięcia 4,8 V, amperomierz i przewody.
2. Zbuduj obwód zgodnie ze schematem.
3. Zmierz natężenia prądu I_1, I_2, I_{we} i I_{wy}.
4. Porównaj wyniki pomiarów. Co zauważasz?

Uwaga. Podpisy 1,2 V i 4,8 V dotyczą nominalnego napięcia żarówek. W rzeczywistości obie żarówki są podłączone do napięcia 1,5 V. Żarówka 4,8 V może nie świecić, ale nie przeszkadza to w naszym doświadczeniu – będzie przez nią płynął prąd, tylko o niewielkim natężeniu.



Analiza wyników doświadczenia

Używaliśmy miernika uniwersalnego ustawionego na zakres 10 A, gdyż mniejszy zakres, czyli 200 mA, był za mały w przypadku większości pomiarów. Otrzymane wyniki zebraliśmy w tabeli 13.2.

Tabela 13.2. Wyniki pomiarów natężenia prądu

Natężenie prądu	I_{we}	I_1	I_2	I_{wy}
Zmierzona wartość [A]	0,34	0,21	0,14	0,35

W instrukcji sprawdziliśmy, że klasa miernika przy zakresie 10 A wynosi (2% + 2). Niepewność pomiaru I_{we} wynosi więc:

$$0{,}02 \cdot 0{,}34\ \text{A} + 0{,}02\ \text{A} = 0{,}0268 \approx 0{,}03\ \text{A}$$

Niepewność pomiaru miernikiem cyfrowym s. 159–160

Analogicznie obliczyliśmy niepewności pozostałych pomiarów:

$$0{,}02 \cdot 0{,}21\ \text{A} + 0{,}02\ \text{A} \approx 0{,}03\ \text{A}$$
$$0{,}02 \cdot 0{,}14\ \text{A} + 0{,}02\ \text{A} \approx 0{,}03\ \text{A}$$
$$0{,}02 \cdot 0{,}35\ \text{A} + 0{,}02\ \text{A} \approx 0{,}03\ \text{A}$$

Ponieważ niepewności zawsze zaokrąglamy w górę, za każdym razem otrzymaliśmy wynik 0,03 A.

Wnioski z doświadczena

Po uwzględnieniu niepewno ści widzimy, że dwie wartości pomiarów się pokrywają.

> Natężenie prądu wpływającego do obwodu (części obwodu) jest równe natężeniu prądu wypływającego:
>
> $$I_{\text{we}} = I_{\text{wy}}$$

Zasada zachowania ładunku s. 73

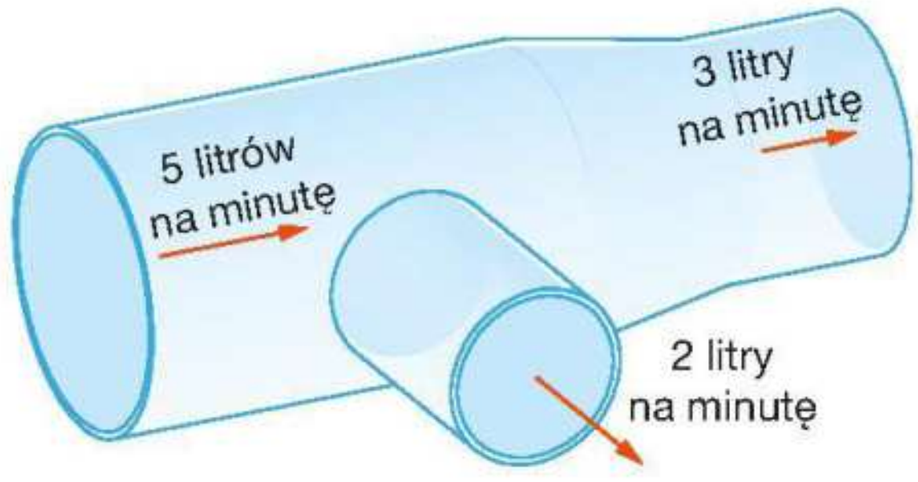
Fakt ten wynika z **zasady zachowania ładunku**. Z baterii wypływa w określonym czasie tyle samo elektronów, ile do niej wpływa. Natężenie prądu zależy właśnie od tej liczby. Elektrony nie są zużywane w czasie przepływu prądu.

Z pomiarów prądów płynących przez żarówki możemy wyciągnąć drugi wniosek.

> Jeśli przy połączeniu równoległym prąd rozdziela się z jednego do dwóch przewodów, to natężenie prądu przed podziałem jest równe sumie natężeń prądów po podziale.

Analogiczna sytuacja ma miejsce, kiedy prąd z dwóch przewodów łączy się w jeden.

Tę prawidłowość łatwo zrozumieć, gdy pamiętamy o **zasadzie zachowania ładunku**. Spośród wypływających z baterii elektronów część płynie przez jedną żarówkę, część przez drugą, ale żaden nie znika ani się nie pojawia. Również model wodny (rys. 13.21) pokazuje oczywistą interpretację tej zależności.



Rys. **13.21.** Rozgałęzienie rury – wodny odpowiednik rozgałęzienia przewodów elektrycznych

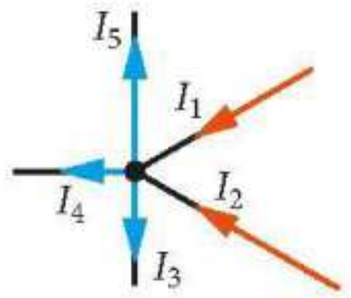
Pierwsze prawo Kirchhoffa

Opisana powyżej sytuacja jest przykładem zastosowania **pierwszego prawa Kirchhoffa**, które mówi:

> Suma natężeń prądów wpływających do punktów rozgałęzienia (węzła) obwodu jest równa sumie natężeń prądów z niego wypływających.

Gałąź obwodu to fragment obwodu między węzłami utworzony z jednego lub kilku elementów połączonych szeregowo.

Pierwsze prawo Kirchhoffa wynika bezpośrednio z zasady zachowania ładunku. W jednostce czasu do węzła musi wpływać tyle samo ładunku, ile z niego wypływa. A jak wiemy, ilość ładunku przepływającego w jednostce czasu przez dany punkt obwodu to natężenie prądu (rys. 13.22).

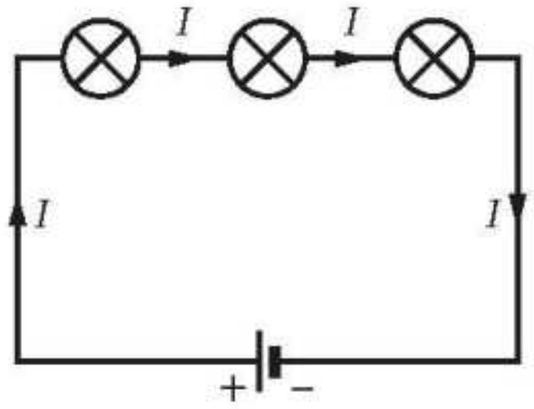


$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$

Rys. **13.22.** Pierwsze prawo Kirchhoffa dla pojedynczego węzła

Połączenie szeregowe

Przez wszystkie elementy obwodu połączone szeregowo płynie prąd o takim samym natężeniu (rys. 13.23), co wynika z zasady zachowania ładunku. Ponieważ przy takim połączeniu ładunki nie mają dokąd odpłynąć ani skąd dopłynąć, więc natężenie prądu nie ulega zmianie.



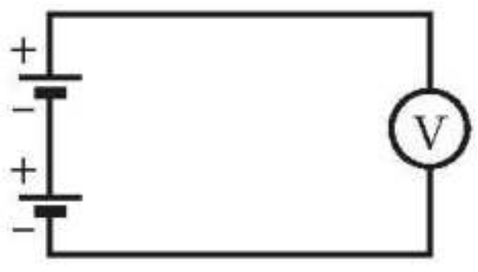
Rys. **13.23.** Przy połączeniu szeregowym natężenie prądu *I* jest takie samo w każdym punkcie obwodu. Takie samo natężenie ma prąd wewnątrz każdej z żarówek i wewnątrz baterii

Zbadamy teraz, jakie napięcie wytwarza układ baterii połączonych szeregowo.

Doświadczenie 14 – obowiązkowe

Pomiar napięcia baterii połączonych szeregowo

1. Przygotuj dwie baterie AA oraz miernik uniwersalny.
2. Zmierz napięcie między biegunami każdej z baterii z osobna.
3. Połącz baterie szeregowo i zmierz napięcie między wolnymi biegunami (tak jak na zdjęciu i na schemacie).
4. Porównaj wyniki pomiarów. Weź pod uwagę niepewności pomiarów. Co zauważasz?





Analiza wyników doświadczenia

W doświadczeniu korzystaliśmy z woltomierza cyfrowego klasy (2% + 1), czyli niepewność pomiaru wynosi 2% wyniku pomiaru plus 1 razy niepewność wynikająca z ostatniej cyfry.
Dla obu baterii mierzyliśmy napięcie woltomierzem ustawionym na zakres 2000 mV i odczytaliśmy:

- dla pierwszej baterii 1550 mV = 1,55 V, stąd niepewność pomiaru $0{,}02 \cdot 1550\ \text{mV} + 1\ \text{mV} = 32\ \text{mV} = 0{,}032\ \text{V}$, czyli po zaokrągleniu (niepewności zaokrąglamy w górę):

$$U_1 = 1{,}55\ \text{V} \pm 0{,}04\ \text{V}$$

- dla drugiej baterii 1394 mV, stąd po uwzględnieniu niepewności i zaokrągleniu:

$$U_2 = 1{,}39\ \text{V} \pm 0{,}03\ \text{V}$$

Napięcie połączonych baterii musieliśmy już mierzyć na wyższym zakresie, był to zakres 20 V. Uzyskaliśmy wynik:

$$U = 2{,}95\ \text{V} \pm 0{,}07\ \text{V}$$

Zauważmy, że suma napięć na pojedynczych bateriach jest w przybliżeniu równa napięciu na połączonych bateriach:

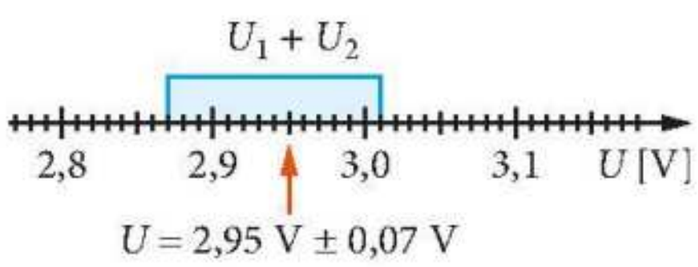
$$U_1 + U_2 = 1{,}55\ \text{V} + 1{,}39\ \text{V} = 2{,}94\ \text{V}$$

Posługujemy się tu niepewnościami maksymalnymi – patrz cz. I podręcznika, s. 22

Wynik nie jest dokładnie równy 2,95 V, więc sprawdzamy, czy ta niedokładność mieści się w granicach niepewności pomiarowej.
Napięcie pierwszej baterii wynosiło co najmniej 1,51 V, a co najwyżej 1,59 V, a na drugiej – co najmniej 1,36 V, a co najwyżej 1,42 V. Stąd ich suma mieści się pomiędzy:

$$1{,}51\ \text{V} + 1{,}36\ \text{V} = 2{,}87\ \text{V} \text{ a } 1{,}59\ \text{V} + 1{,}42\ \text{V} = 3{,}01\ \text{V}$$

Natomiast napięcie na połączonych bateriach mieści się między 2,88 V a 3,02 V. Te zakresy częściowo się pokrywają (rys. 13.24), więc w granicach niepewności pomiarowej suma napięć poszczególnych baterii jest równa napięciu na połączonych bateriach.

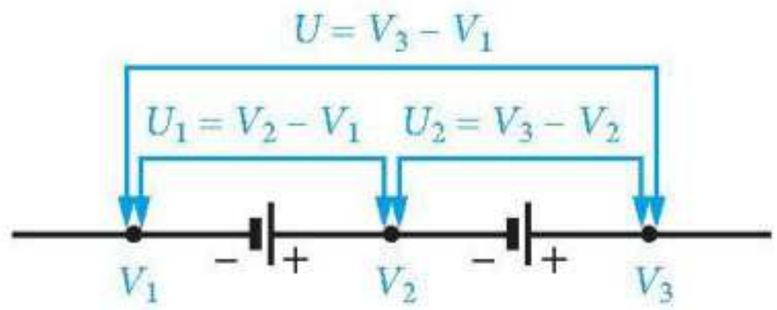


Rys. **13.24.** Wyniki doświadczenia 14. przedstawione na osi liczbowej

> Napięcie wytwarzane przez dwie baterie połączone szeregowo jest równe sumie napięć poszczególnych baterii.

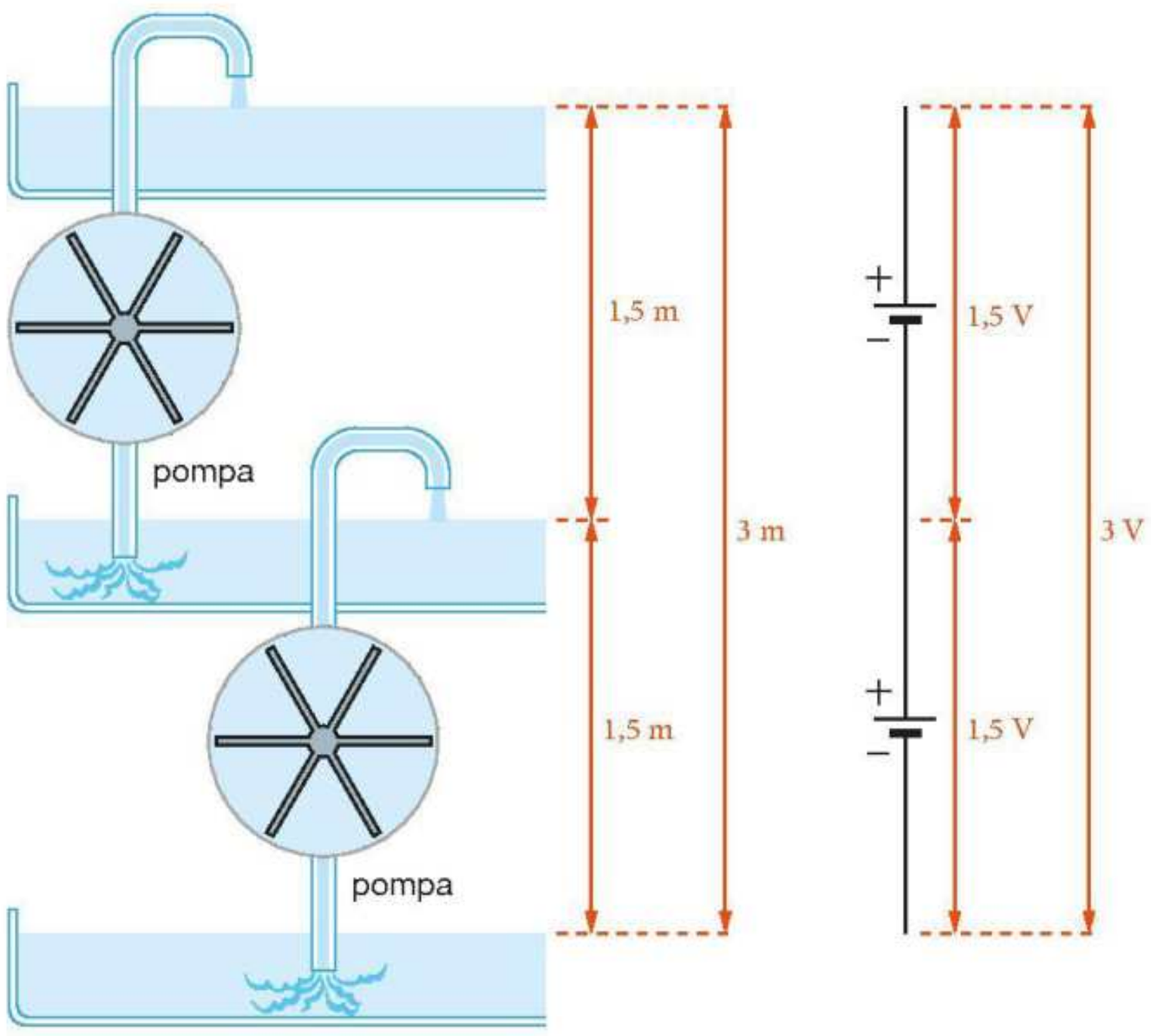
Ten fakt, który odkryliśmy doświadczalnie, można także uzasadnić wprost z definicji napięcia jako różnicy potencjałów. Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rysunku 13.25 mamy:

$$U_1 + U_2 = (V_2 - V_1) + (V_3 - V_2) = V_2 - V_1 + V_3 - V_2 = V_3 - V_1 = U$$



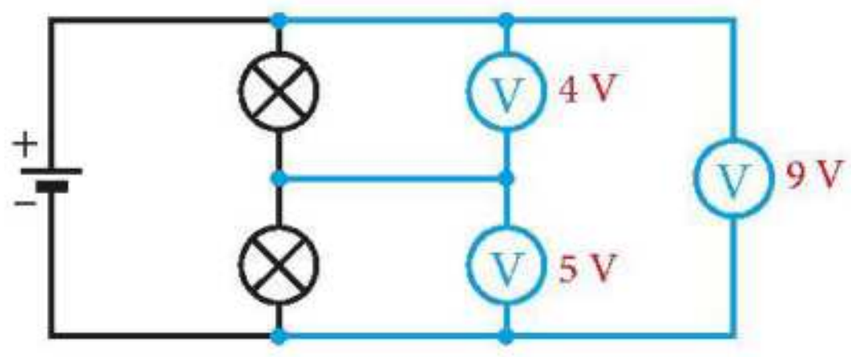
Rys. **13.25.** Dodawanie napięć baterii wynika z definicji napięcia jako różnicy potencjałów

W poprzedniej lekcji odwoływaliśmy się do porównania prądu elektrycznego do przepływu wody. W modelu wodnym bateriom połączonym szeregowo odpowiadają pompy pozwalające łącznie przenieść wodę na poziom wyższy niż za pomocą każdej z nich z osobna (rys. 13.26). Dodawaniu napięć odpowiada tutaj dodawanie wysokości.



Rys. **13.26.** Porównanie szeregowego łączenia pomp i baterii

Podobnie dodajemy spadki napięć na połączonych szeregowo żarówkach lub innych odbiornikach energii elektrycznej (rys. 13.27). Uzasadnienie jest takie samo: na rysunku 13.25 moglibyśmy zastąpić baterie żarówkami, a rozważania dotyczące potencjałów pozostałyby takie same.

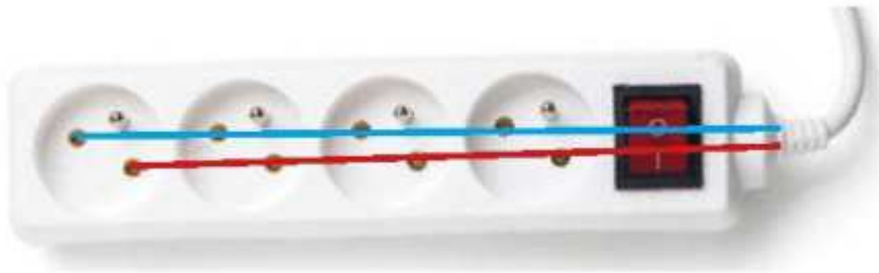


Rys. **13.27.** Przykład dodawania napięć przy szeregowym połączeniu odbiorników energii

Zastosowania połączeń szeregowych i równoległych

Domowy licznik energii elektrycznej jest połączony szeregowo z pozostałą częścią sieci.

Połączenia równoległe stosujemy bardzo często. W taki sposób są podłączane wszystkie urządzenia czerpiące energię z domowej sieci elektrycznej, wszystkie odbiorniki energii w samochodzie itd.



Rys. **13.28.** Gniazdka w przedłużaczu – a w konsekwencji podłączone do nich odbiorniki energii – są połączone równolegle

Także źródła napięcia możemy łączyć równolegle. Takie połączenie stosujemy w przypadku źródeł o jednakowym napięciu. Pozwala ono uzyskać prąd o większym natężeniu.

Lampki choinkowe bywają połączone albo równolegle, albo szeregowo. Jak rozpoznać, z którym połączeniem mamy do czynienia?

Połączenia szeregowe stosujemy m.in. w bateriach i akumulatorach (rys. 13.29a). Pojedyncze ogniwo ze względu na zachodzące w nim reakcje chemiczne może wytwarzać napięcie 1,5 V–2 V. Jeśli potrzebne nam jest wyższe napięcie, ogniwa łączymy szeregowo.
W starszych typach polskich lokomotyw elektrycznych (rys. 13.29b), zasilanych z sieci pod napięciem 3000 V, są stosowane silniki przystosowane do napięcia 1500 V, połączone parami szeregowo.

a)



b)



Rys. **13.29.** Zastosowania połączeń szeregowych

Po tej lekcji powinieneś

- odróżniać połączenia równoległe od szeregowych;
- badać doświadczalnie układy z połączeniami równoległymi i szeregowymi;
- rozumieć, że I prawo Kirchhoffa wynika z zasady zachowania ładunku;
- znać i stosować podczas rozwiązywania zadań zależności między napięciami i natężeniami prądów w obwodach z elementami połączonymi równolegle i szeregowo.

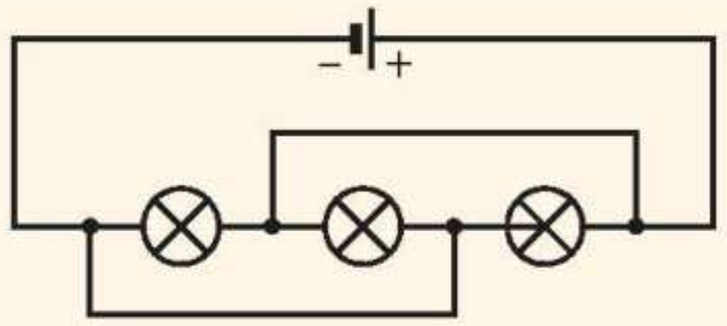
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Czy żarówki na rysunku I połączono równolegle czy szeregowo?

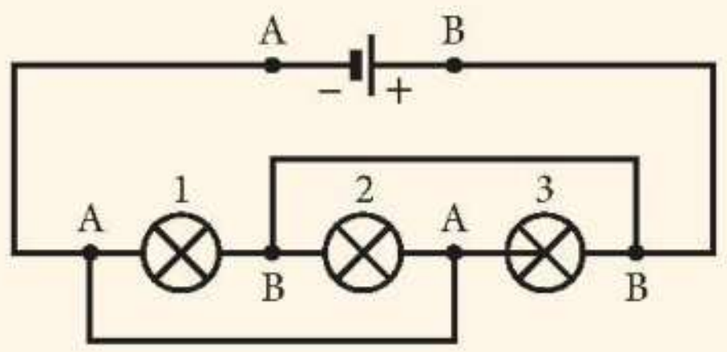
I



Rozwiązanie

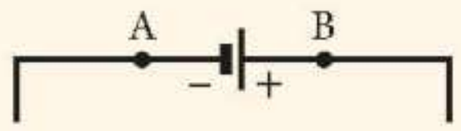
Nasz schemat, tak jak każdy schemat obwodu elektrycznego, przedstawia połączenia między elementami, a nie ich rozmieszczenie w rzeczywistym urządzeniu. Dlatego możemy narysować go w czytelniejszy sposób, o ile nie będziemy zmieniać połączeń między elementami.
W tym celu oznaczmy na schemacie jednakowymi literami punkty, które zostały połączone przewodem. Aby rozróżnić żarówki, podpiszmy je kolejnymi numerami (rys. II).

II



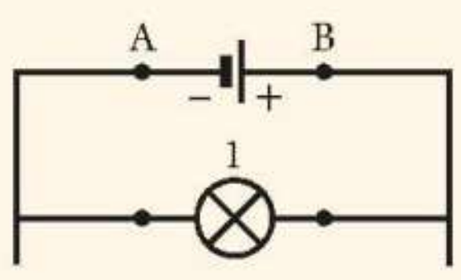
Sporządzanie nowego rysunku rozpoczynamy od narysowania źródła napięcia (rys. III).

III



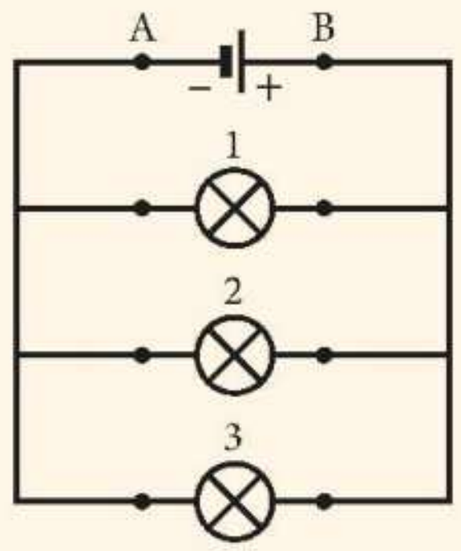
Teraz powinniśmy dorysować do niego żarówkę nr 1. Jak widzimy, jedna z jej końcówek jest podłączona do punktu A, druga – do punktu B (rys. IV).

IV



Następnie w analogiczny sposób dorysowujemy kolejne żarówki.
Z otrzymanego w ten sposób schematu możemy odczytać, że wszystkie żarówki są połączone równolegle (rys. V).

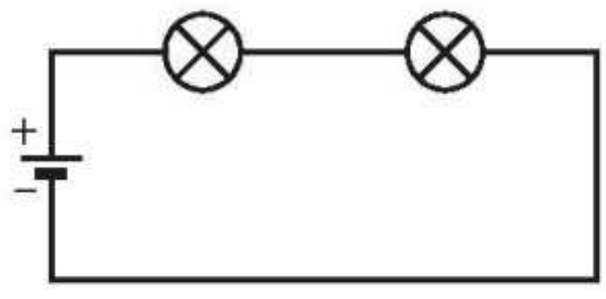
V



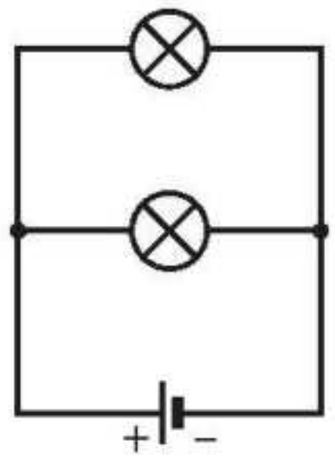
Odpowiedź: Żarówki są połączone równolegle.

1. Określ, czy żarówki na schematach połączono równolegle czy szeregowo. Pamiętaj, że zależy to od połączeń między nimi, a nie od sposobu rozmieszczenia symboli na rysunku.

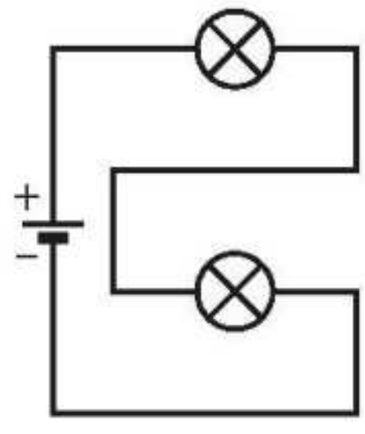
A.



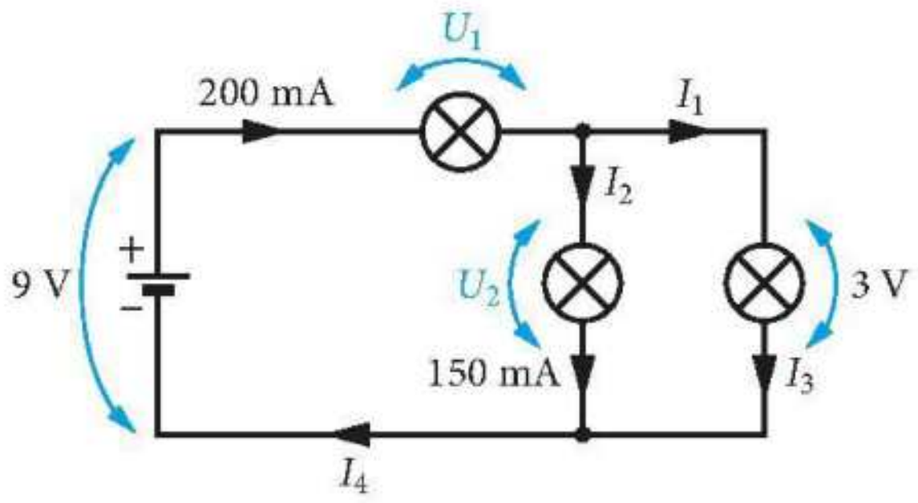
B.



C.



2. Oblicz wartości napięć U_1 i U_2 oraz natężeń I_1, I_2, I_3 i I_4 w obwodzie przedstawionym na schemacie.

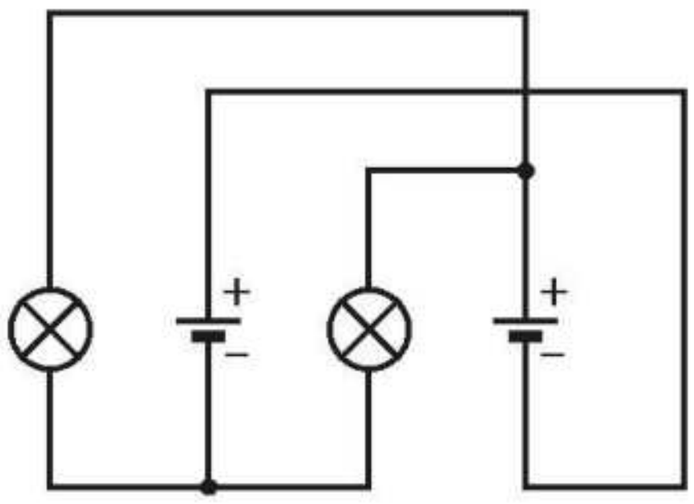


3. W motocyklu akumulator wytwarza napięcie 6 V. Wiemy, że składa się z połączonych szeregowo ogniw o napięciu 2 V. Ile takich ogniw zawiera akumulator?

4. Na podstawie wskazań mierników podaj napięcie pomiędzy biegunami baterii.



5. Narysuj w zeszycie podany schemat w postaci lepiej obrazującej zastosowane w nim połączenia i określ, czy baterie połączono szeregowo czy równolegle. A jak połączono żarówki?



6. Narysuj w zeszycie schemat obwodu złożonego z dwóch baterii: AA oraz D połączonych równolegle oraz podłączonej do nich żarówki 1,2 V albo 2,2 V.

a) Jaki będzie związek pomiędzy natężeniami prądów płynących przez baterie a natężeniem prądu płynącego przez żarówkę?

b) Zbuduj obwód zgodnie ze schematem i sprawdź doświadczalnie, czy spełniły się twoje przewidywania z punktu a). Pamiętaj o niepewności pomiarowej!

7. Stwierdziliśmy, że przy połączeniu szeregowym elementów obwodu natężenie prądu jest takie samo w każdym jego punkcie. Sprawdź to doświadczalnie.

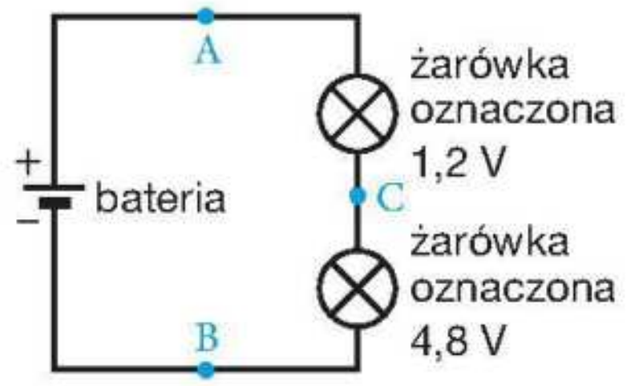
a) Przygotuj baterię AA (o napięciu 1,5 V), dwie żarówki: jedną dostosowaną do napięcia 4,8 V, a drugą do napięcia 1,2 V, amperomierz i przewody.

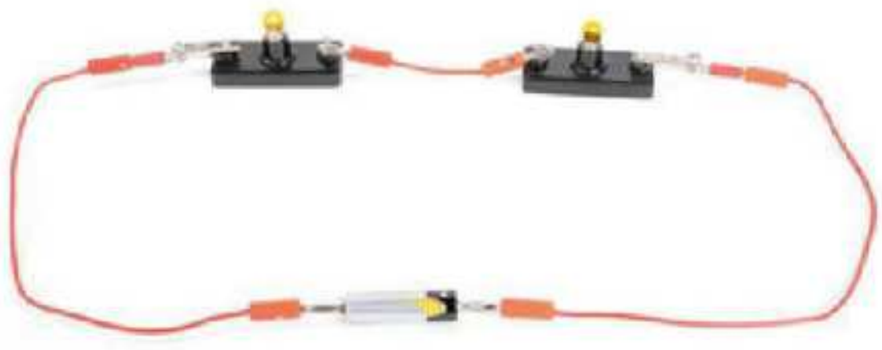
b) Połącz żarówki szeregowo i podłącz do baterii (patrz schemat i zdjęcie).

c) Zmierz natężenie prądu w punktach obwodu oznaczonych na schemacie literami. Zapisz w zeszycie wyniki wraz z niepewnością pomiaru.

d) Porównaj wyniki z uwzględnieniem niepewności pomiarowych.

Uwaga. Żarówki są podłączone do napięcia niższego niż wymagane, więc mogą nie świecić, ponieważ płynący przez nie prąd ma zbyt małe natężenie. Nie przeszkodzi nam to jednak w doświadczeniu.





13.4. Napięcie a natężenie. Prawo Ohma

Przypomnij sobie

- Pole elektryczne może powodować uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.
- Uporządkowany ruch ładunków elektrycznych nazywamy prądem elektrycznym.

Ruch ładunku w próżni i w przewodniku

W lekcji 12.7 badaliśmy ruch ładunku w polu elektrycznym. Przyjęliśmy wówczas założenie, że na ładunek działa wyłącznie siła elektryczna, a jego ruch nie jest w żaden sposób zakłócony. W takim przypadku w jednorodnym polu elektrycznym ładunek porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym. Powiedzieliśmy też, że elektrony przemieszczające się w metalu również są ładunkami poruszającymi się pod wpływem pola elektrycznego. Należy jednak pamiętać, że nie znajdują się one w próżni, ale zderzają się z drgającymi jonami, tworzącymi sieć krystaliczną metalu, a także między sobą. Przy zderzeniach elektrony tracą energię, ale następnie zyskują ją dzięki sile elektrycznej działającej na nie w polu elektrycznym. Podobnie zachowują się ładunki elektryczne w elektrolitach. Na przykład podczas przepływu prądu przez wodę z solą jony sodu i chloru zderzają się z cząsteczkami wody i ze sobą nawzajem. Zderzenia te powodują, że poruszające się ładunki tracą energię, która ulega rozproszeniu, co z kolei jest przyczyną wzrostu temperatury przewodnika. Aby uporządkowany ruch ładunków elektrycznych nie ustał, do przewodnika musi być przez cały czas dostarczana energia.

Ruch ładunku rozpędzanego w próżni można porównać do spadku swobodnego, ruch ładunku w przewodniku – do skoku na spadochronie.

Napięcie a natężenie prądu

Im wyższe napięcie przyłożymy do przewodnika, tym silniejsze pole elektryczne w nim uzyskamy. Co za tym idzie, ładunki poruszające się w przewodniku będą między zderzeniami zyskiwać większą energię. Mimo że w wyniku tych zderzeń ładunki tracą energię, pod wyższym napięciem dryf elektronów odbywa się z większą prędkością średnią, więc w ciągu sekundy przez dany przekrój przewodnika przepłynie więcej elektronów. Oznacza to, że natężenie prądu będzie większe.

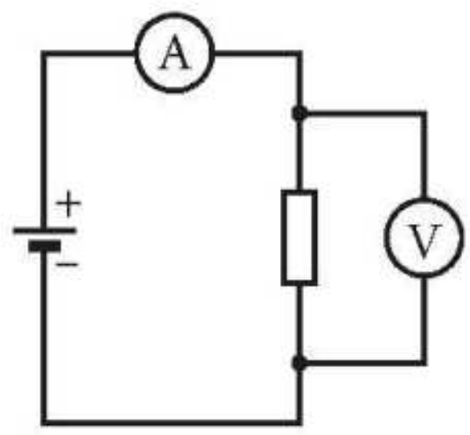
Dryf elektronów s. 149

Powyższe rozważania prowadzą do wniosku, że natężenie prądu rośnie wraz z napięciem przyłożonym do przewodnika. Zbadajmy dokładniej zależność między tymi dwiema wielkościami, czyli wyznaczmy **charakterystykę prądowo-napięciową** przewodnika. Do doświadczenia użyjemy opornika, który jest po prostu kawałkiem przewodnika w obudowie.

Doświadczenie 15

1. Przygotuj opornik, co najmniej 6 ogniw 1,5 V (mogą to być baterie AA), oprawkę lub magnesy do ich łączenia, woltomierz i amperomierz lub dwa mierniki uniwersalne. Jeśli nie masz opornika, możesz wziąć żelazko i podłączyć przewody do obu metalowych podłączeń jego wtyczki sieciowej. Możesz też korzystać tylko z jednego miernika, ale wtedy pomiary będą trwały dłużej.
2. Zbuduj obwód elektryczny zgodnie ze schematem. Zmierz napięcie na oporniku i natężenie płynącego przez niego prądu. Zapisz uzyskane wyniki pomiarów w tabeli.
3. Do ogniwa podłącz szeregowo jeszcze jedno ogniwo i powtórz pomiary. Zapisz ich wyniki.
4. Powtarzaj czynności opisane w punkcie 3. do czasu, aż podłączysz do obwodu wszystkie ogniwa.
5. Wyznacz niepewności pomiarów napięcia i natężenia (patrz s. 163).
6. Na podstawie danych z tabeli sporządź wykres zależności $I(U)$, uwzględnij obliczone niepewności pomiarowe. Jeśli wykres jest linią prostą, wyznacz współczynnik kierunkowy tej prostej.





Analiza wyników doświadczenia

Przeprowadziliśmy opisane doświadczenie z użyciem opornika, 8 ogniw 1,5 V, woltomierza o klasie 0,5 i odczycie do dwóch miejsc po przecinku oraz amperomierza o klasie 2,5 i odczycie do trzech miejsc po przecinku. Oba użyte przez nas mierniki były urządzeniami cyfrowymi. Wyniki 8 pomiarów zebraliśmy w tabeli 13.3.

Tabela 13.3. Wyniki pomiarów do doświadczenia 15.

Liczba ogniw	U [V]	I [A]
1	1,52	0,017
2	3,06	0,036
3	4,60	0,054
4	6,12	0,073
5	7,67	0,092
6	9,22	0,111
7	10,71	0,128
8	12,12	0,145

Analizę wyników rozpoczęliśmy od obliczenia niepewności pomiarowych wszystkich uzyskanych wyników.

Woltomierz cyfrowy, którym wykonywaliśmy pomiary, pozwalał na odczytanie dwóch cyfr po przecinku, a jego dokładność opisano w instrukcji obsługi jako (0,5% + 2). Na tej podstawie obliczyliśmy niepewności pomiarowe poszczególnych pomiarów. Dla przykładu przedstawimy obliczenia dla niepewności pomiaru $U_1 = 1{,}52$ V.

Niepewność wynikająca z klasy przyrządu wynosiła 0,5%, co w przypadku 1,52 V dało $0{,}005 \cdot 1{,}52\ \text{V} = 0{,}0076$ V. Doliczyliśmy do niej niepewność wynikającą z dokładności ostatniej cyfry wyświetlanej przez miernik, która w instrukcji dla przyjętego przez nas zakresu pomiaru została

określona na 2. Ostatnia cyfra wyniku odczytywanego z miernika odpowiadała setnym częściom wolta, dlatego pomnożyliśmy 0,01 V · 2, co dało wynik 0,02 V. Ostatecznie otrzymamy $\Delta U_1 = 0{,}0276\ \text{V} \approx 0{,}03\ \text{V}$. Tak więc wynik pomiaru wraz z niepewnością przyjął postać:

$$U_1 = 1{,}52\ \text{V} \pm 0{,}03\ \text{V}$$

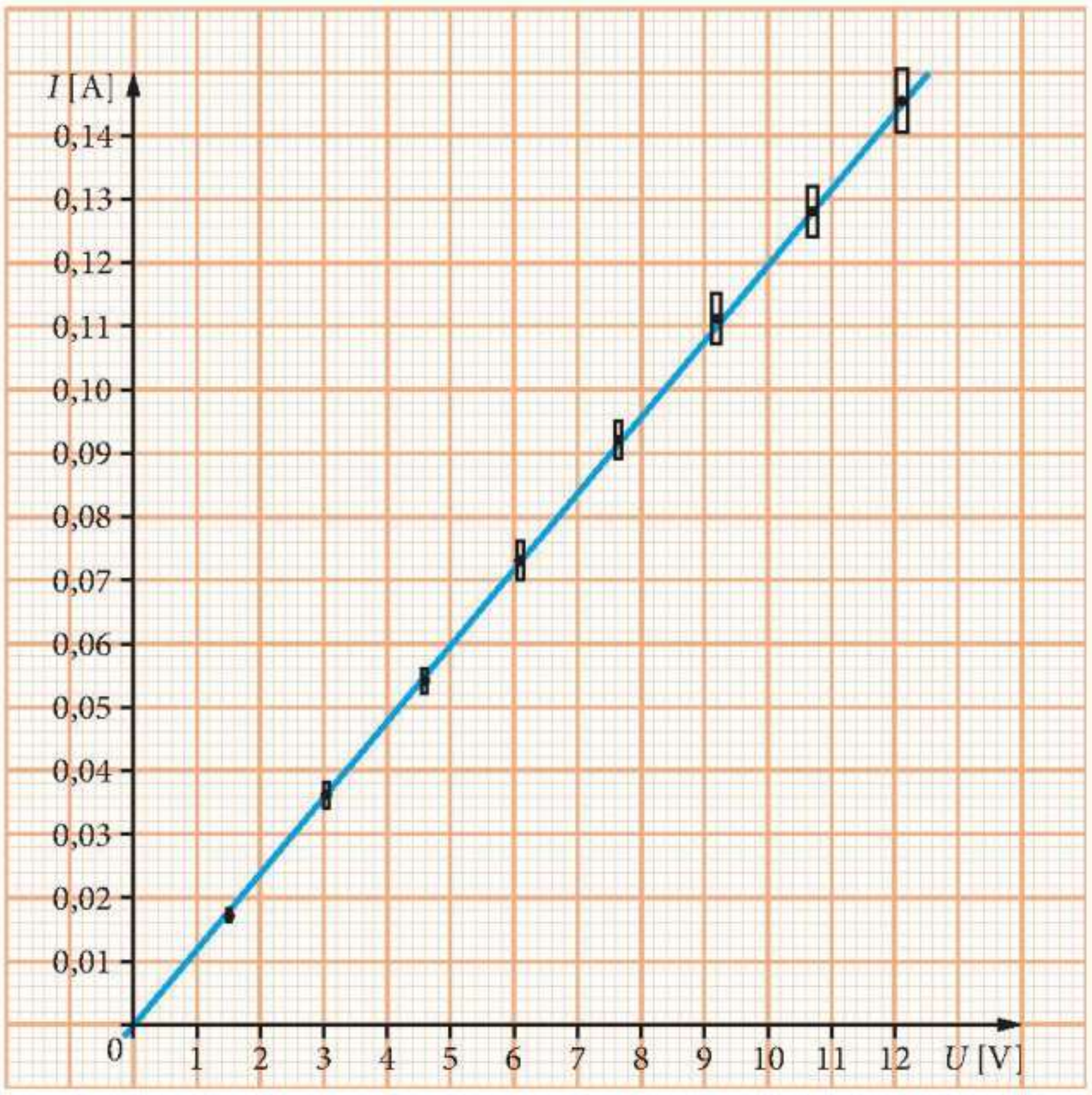
Analogicznie obliczyliśmy niepewności pomiarów natężenia. Uwzględnialiśmy niepewności amperomierza, określone jako (2,5% + 1). Przyrząd umożliwiał odczyt do trzech cyfr po przecinku. Wyniki pomiarów wraz z niepewnościami pomiarowymi przedstawiono w tabeli 13.4.

Obliczenia wykonamy szybciej, jeśli użyjemy **arkusza kalkulacyjnego**.

Tabela 13.4. Wyniki pomiarów wraz z niepewnościami do doświadczenia 15

U [V]	1,52	3,06	4,60	6,12	7,67	9,22	10,71	12,12
ΔU [V]	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
I [A]	0,017	0,036	0,054	0,073	0,092	0,111	0,128	0,145
ΔI [A]	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005

Na podstawie danych z tabeli 13.4 sporządziliśmy wykres $I(U)$. Zaznaczyliśmy w układzie współrzędnych wyniki pomiarów wraz z prostokątami ich niepewności (rys. 13.30). Po przyłożeniu linijki do punktów pomiarowych stwierdziliśmy, że leżą one niemal na jednej prostej, przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Po narysowaniu wykresu odczytaliśmy współczynnik kierunkowy zależności $I(U)$. Wynosi on 0,0120.



Rys. **13.30.** Wykres zależności $I(U)$ na podstawie danych z tabeli 13.4

Ostateczna analiza wyników przeprowadzonego doświadczenia pokazuje, że natężenie prądu jest proporcjonalne do napięcia, a współczynnik tej proporcjonalności wynosi 0,0120 $\frac{A}{V}$.

Dopasowanie prostej, cz. I s. 59

Gdy przez punkty pomiarowe wraz z prostokątami niepewności poprowadziliśmy proste o minimalnym i maksymalnym nachyleniu przechodzące przez początek układu współrzędnych, okazało się, że ich współczynniki kierunkowe wynoszą odpowiednio 0,0118 i 0,0122. Tak więc współczynnik proporcjonalności między napięciem i natężeniem wraz z niepewnością pomiaru możemy zapisać następująco:

$$(0{,}0120 \pm 0{,}0002)\ \frac{A}{V}$$



Rys. **13.31.** Georg Ohm (czyt. georg om, 1789–1854)

Prawo Ohma

Wniosek z doświadczenia 15. pozwala sformułować **prawo Ohma**:

> Natężenie prądu płynącego przez przewodnik jest wprost proporcjonalne do napięcia między jego końcami:
>
> $$I \sim U$$

Należy podkreślić, że prawo Ohma **nie jest** podstawowym prawem przyrody, tak jak zasada zachowania ładunku czy zasada zachowania energii. O ograniczeniach w stosowaniu tego prawa powiemy w następnych lekcjach.

Opór elektryczny

Pod wpływem przyłożonego napięcia ładunki uzyskują energię, którą w dużej części tracą podczas zderzeń z jonami. Można powiedzieć, że przepływ prądu napotyka na opór. W zależności od rodzaju substancji, z jakiej wykonano przewodnik, a także od jego wymiarów utrata energii może być większa lub mniejsza. Innymi słowy, opór przewodnika może być większy lub mniejszy. Jeśli jest większy, to do utrzymania przepływu prądu o określonym natężeniu jest potrzebne większe napięcie.

Jako miarę oporu przewodnika możemy więc przyjąć napięcie potrzebne do tego, aby przez przewodnik płynął prąd o natężeniu 1 A. Jeśli zatem podzielimy napięcie przez natężenie, dowiemy się, ile wynosi opór elektryczny przewodnika. Zgodnie z prawem Ohma ta wielkość dla danego przewodnika jest stała.

Opór elektryczny to iloraz napięcia między końcami przewodnika i natężenia płynącego prądu.

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

Ω to wielka grecka litera omega.

Jednostką oporu elektrycznego jest **om**: $1\ \Omega = 1\ \frac{V}{A}$.

W doświadczeniu 15. stwierdziliśmy, że współczynnik kierunkowy prostej, czyli stosunek $\frac{I}{U}$, wynosi $(0{,}0120 \pm 0{,}0002)\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V}}$. Teraz interesuje nas odwrotny stosunek, czyli $\frac{U}{I}$. Wynosi on $\frac{1}{0{,}0120} \approx 83{,}3\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = 83{,}3\ \Omega$.
Jeśli obliczymy odwrotności maksymalnej i minimalnej wartości $\frac{I}{U}$ zgodnie z niepewnością pomiarową, otrzymamy 82,0 Ω i 84,7 Ω.
Tak więc opór badanego opornika wynosił $83 \pm 2\ \Omega$. Z obudowy opornika użytego w doświadczeniu mogliśmy odczytać, że jego opór jest równy 80 Ω. Którą z tych wielkości należy uznać za dokładniejszą?
Oporniki nigdy nie są wykonane idealnie, dlatego ich opór jest podawany z uwzględnieniem niepewności. W przypadku opornika wykorzystanego przez nas w doświadczeniu wynosiła ona aż 10%. Z porównania wyniku doświadczenia i wartości podanej na oporniku wynika, że dzięki przeprowadzonym pomiarom określiliśmy rzeczywisty opór z większą dokładnością niż podana przez producenta.

Informacja o niepewności opornika jest zapisana w kodzie paskowym na jego obudowie.



Rys. **13.32.** W kolorowych paskach zakodowano opór oporników (tabela s. 346)

Opornik i potencjometr

Oprócz oporników o stałym oporze istnieją także oporniki o oporze regulowanym, nazywane **potencjometrami**. Potencjometry służą m.in. do regulacji głośności w sprzęcie audio-wideo.
Potencjometr ma trzy końcówki. Dwie z nich znajdują się na końcach przewodnika, trzecia jest podłączona do elementu, który można przemieszczać po przewodniku. Dwa typy potencjometrów pokazano na rysunku 13.33, a symbol tego elementu – na rysunku 13.34.

a)



b)



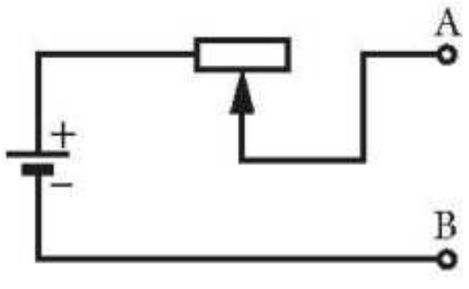
Rys. **13.33.** Rodzaje najczęściej stosowanych potencjometrów: a) suwakowy, b) obrotowy



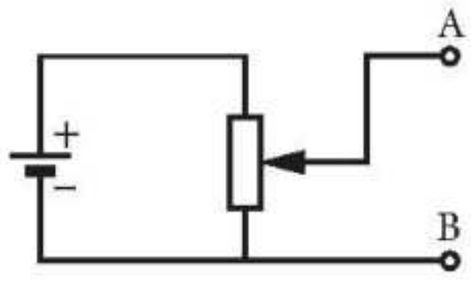
Rys. **13.34.** Symbol potencjometru – strzałką oznaczono suwak przemieszczający się po oporniku

Potencjometr można podłączyć do obwodu tak, aby regulować natężenie prądu w obwodzie (rys. 13.35a), lub tak, aby regulować napięcie między punktami A i B w dalszej części obwodu (rys. 13.35b).

a)



b)



Rys. **13.35.** Różne sposoby podłączenia potencjometru



Rys. **13.36.** Miernik uniwersalny włączony jako omomierz. Jako opornik został podłączony potencjometr

Omomierz

Opór elektryczny można mierzyć także za pomocą **omomierza**, który przepuszcza niewielki prąd przez przewodnik i automatycznie oblicza jego opór. Taką funkcję może spełniać także miernik uniwersalny. Omomierz przydaje się także w życiu codziennym. Jeśli chcesz sprawdzić, czy żarówka samochodowa jest sprawna, nie musisz instalować jej w reflektorze. Wystarczy, że zmierzysz jej opór za pomocą omomierza. Powinien on wynosić kilka omów. Jeśli przyrząd wskazuje, że opór wynosi wiele tysięcy omów lub nieskończoność (co oznacza: więcej niż zakres pomiaru), to wiesz, że włókno jest przepalone. Podobnie można ocenić, czy nie pękły przewody wewnątrz silnika elektrycznego, np. w odkurzaczu.

Po tej lekcji powinieneś

- znać pojęcie oporu elektrycznego;
- posługiwać się prawem Ohma;
- badać doświadczalnie, czy odbiornik energii elektrycznej spełnia prawo Ohma, i analizować wyniki pomiarów.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Narysuj wykres przedstawiający zależność $U(I)$ dla opornika o oporze 200 kΩ.

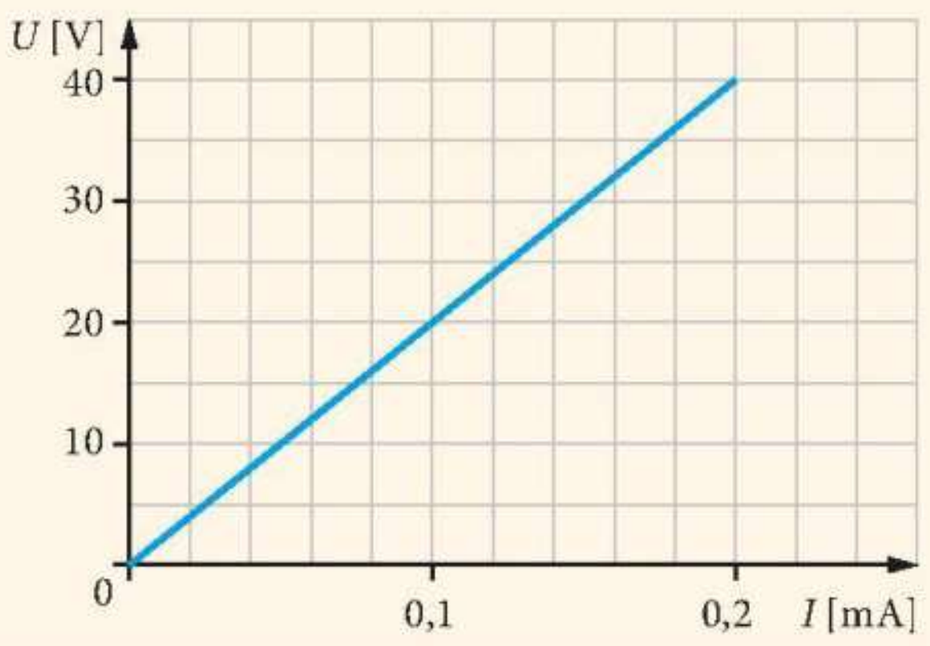
Rozwiązanie

Prawo Ohma mówi, że natężenie prądu płynącego przez opornik jest proporcjonalne do podłączonego napięcia. W takim razie również spadek napięcia na oporniku jest proporcjonalny do natężenia płynącego przez niego prądu. Wykres $U(I)$ jest więc linią prostą, przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Aby ją narysować, wystarczy znaleźć jeszcze jeden punkt.

Trzeba jednak pamiętać, że nasz wykres powinien mieć sens fizyczny. Dla natężenia $I = 1$ A otrzymalibyśmy ze wzoru $U = IR$ napięcie $U = 200\,000$ V, a takiej wartości żaden opornik po prostu nie wytrzyma – spali się albo ulegnie przebiciu. Na osi poziomej powinniśmy więc zaznaczyć znacznie mniejsze wartości natężenia prądu. Jeśli chcemy, aby wykres obejmował napięcia np. do 40 V, to ze wzoru $I = \frac{U}{R}$ obliczymy, że natężenie nie może przekroczyć wartości:

$$I = \frac{40\text{ V}}{200\,000\,\Omega} = 0{,}0002\text{ A} = 0{,}2\text{ mA}$$

Rysujemy więc układ współrzędnych, w którym oś I obejmuje wartości od 0 do 0,2 mA, a oś U od 0 do 40 V, a następnie prowadzimy prostą przez wyznaczone punkty (0,0) oraz (0,2 mA, 40 V).



1. Oblicz natężenie prądu płynącego przez żarówkę w lampie włączonej do sieci pod napięciem 230 V, jeśli rozgrzane włókno tej żarówki ma opór 1000 Ω.

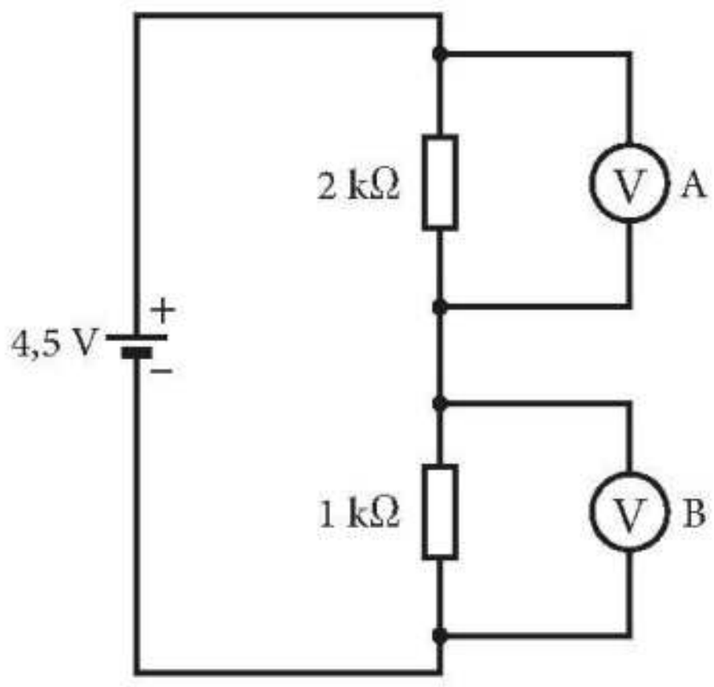
Uwaga. Zimne włókno żarówki ma inny opór. Powiemy o tym więcej wkrótce.

2. Narysuj w zeszycie wykresy zależności $I(U)$ dla oporników o oporze 100 Ω, 200 Ω i 300 Ω w jednym układzie współrzędnych. W drugim układzie współrzędnych narysuj wykresy zależności $U(I)$ dla tych samych trzech oporników. Porównaj nachylenia wykresów. Co zauważasz?

3. Przyjrzyj się poniższemu schematowi.

a) Jakie napięcie wskazuje woltomierz A, a jakie woltomierz B?

b) Przedstawiony układ nazywamy dzielnikiem napięcia. Wyjaśnij dlaczego.

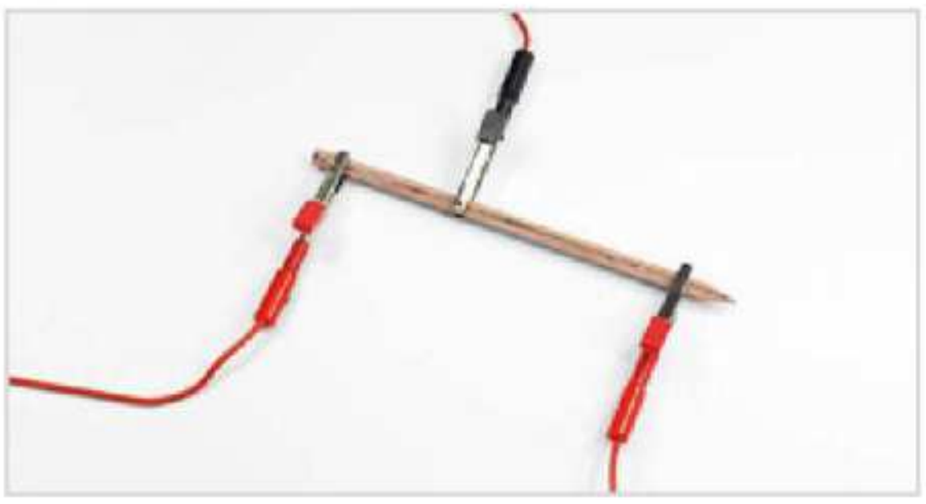


4. Zastanów się i odpowiedz, czy opór amperomierza powinien być jak największy czy jak najmniejszy. A opór woltomierza?

Wskazówka. Przypomnij sobie założenia dotyczące tych przyrządów opisane na s. 158.

5. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj gruby ołówek stolarski, ostry nóż, trzy krokodylki, przewody, ogniwo 1,5 V i dwie żarówki 2,2 V (albo baterię o wyższym napięciu i dwie żarówki dostosowane do pracy pod napięciem zbliżonym do napięcia baterii).



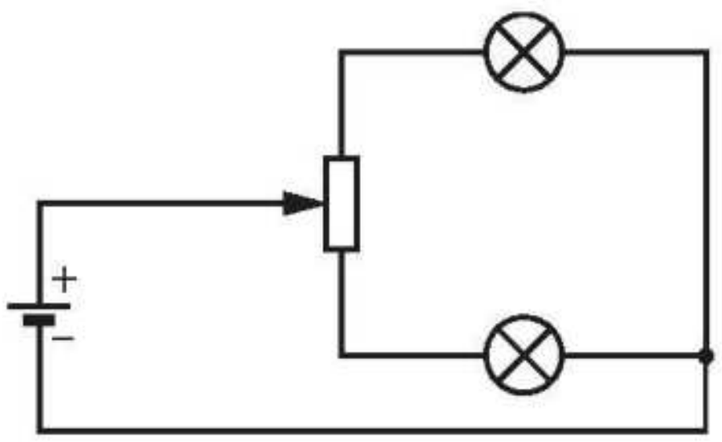
b) Rozetnij ołówek wzdłuż tak, aby rysik lekko z niego wystawał na całej długości (patrz zdjęcie).

c) Przyczep przewody do krokodylków.

d) Załóż krokodylki na ołówek: dwa na końcach i jeden pośrodku, w taki sposób, aby dotykały rysika.

e) Tak oto zbudowałeś potencjometr – przesuwanie środkowego krokodylka po rysiku pozwoli na regulowanie oporu między końcówkami (skrajnymi krokodylkami).

f) Zbuduj układ według podanego schematu. Sprawdź, jak zmienia się jasność żarówek, gdy poruszamy suwakiem potencjometru.



13.5. Łączenie oporników

Przypomnij sobie

- Zgodnie z prawem Ohma natężenie prądu płynącego przez przewodnik jest proporcjonalne do przyłożonego napięcia.
- Iloraz napięcia i natężenia nazywamy oporem elektrycznym.
- Jednostką oporu jest om $\left(1\ \Omega = 1\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}\right)$.

Opór zastępczy

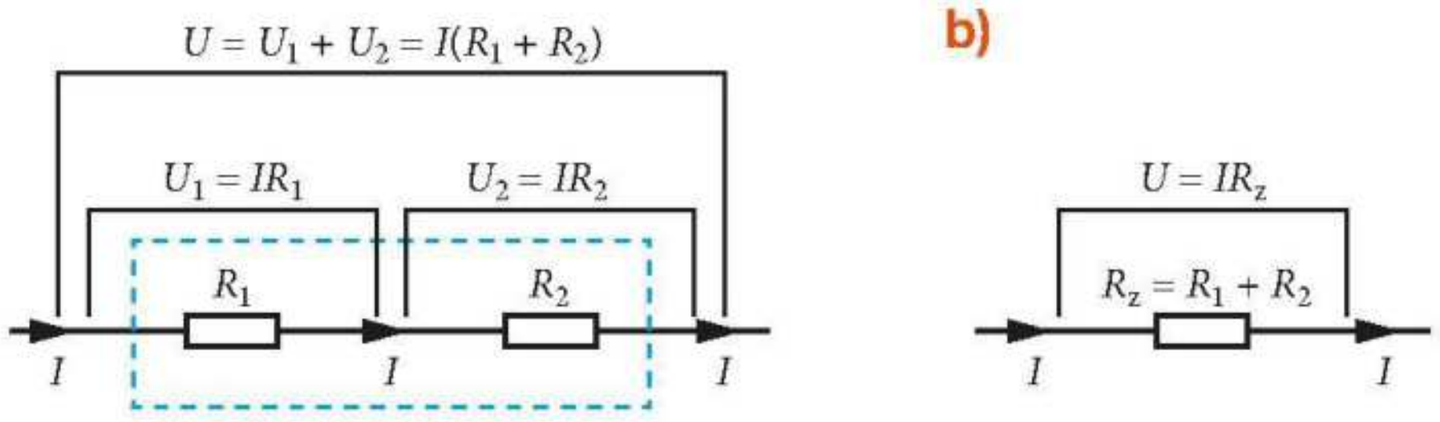
Opór pojedynczego opornika możemy odczytać z jego obudowy. Jaki jednak opór ma układ kilku oporników połączonych szeregowo, równolegle lub w sposób mieszany?

Układ kilku połączonych oporników zawsze można zastąpić jednym opornikiem o oporze R_z, nazywanym **oporem zastępczym układu**. W tej lekcji zajmiemy się obliczaniem oporu zastępczego. Odpowiednie wzory wyprowadzimy na podstawie znanych już praw opisujących przepływ prądu.

Połączenie szeregowe oporników

Połączenia szeregowe s. 165

Przeanalizujmy sytuację, gdy dwa oporniki, R_1 i R_2, są połączone szeregowo (rys. 13.37a). Płynie przez nie prąd o natężeniu I.



Rys. **13.37.** Wyznaczanie oporu zastępczego oporników połączonych szeregowo

Spadek napięcia na oporniku to napięcie pomiędzy jego końcówkami.

Gdy wzór $R = \frac{U}{I}$ przekształcimy do postaci $U = IR$, zapiszemy, że spadek napięcia na pierwszym oporniku wynosi IR_1, a na drugim IR_2. Wobec tego łączny spadek napięcia na tych opornikach wynosi:

$$U = I(R_1 + R_2)$$

Jeżeli zastąpimy oporniki R_1 i R_2 jednym opornikiem o oporze zastępczym równym sumie oporów tych oporników: $R_z = R_1 + R_2$, zależność między napięciem U i natężeniem I nie ulegnie zmianie (rys. 13.37b). Widzimy też, że gdyby było więcej oporników, ich opory także należałoby dodać.

> Opór zastępczy oporników połączonych szeregowo jest równy sumie ich oporów:
>
> $$R_z = R_1 + R_2 + ... + R_n$$

gdzie: $R_1, R_2, ..., R_n$ – opory poszczególnych oporników.

Połączenie równoległe

Przeanalizujmy, co się dzieje w sytuacji, gdy oporniki są połączone równolegle (rys. 13.38a). Napięcie na każdym z nich wynosi U, jednak płynie przez nie prąd o różnym natężeniu:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \text{ i } I_2 = \frac{U}{R_2}$$

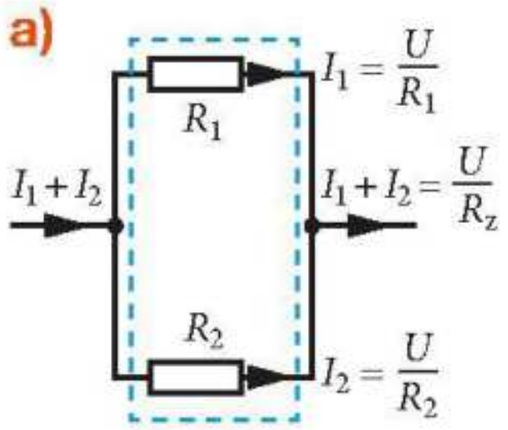
Przez cały układ płynie prąd $I = I_1 + I_2$. Jeśli opór zastępczy oznaczymy R_z, to możemy zapisać, że $I = \frac{U}{R_z}$, a więc:

$$I = I_1 + I_2$$

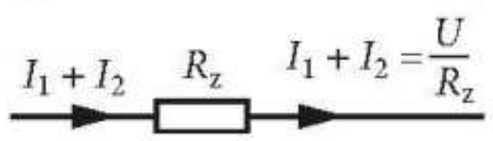
$$\frac{U}{R_z} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}, \quad \text{czyli} \quad \frac{1}{R_z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Dla większej liczby oporników prąd I rozdzieli się na więcej części i otrzymamy analogiczny wzór z większą liczbą składników po prawej stronie.

a)



b)



Rys. **13.38.** Wyznaczanie oporu zastępczego oporników połączonych równolegle

> Odwrotność oporu zastępczego oporników połączonych równolegle jest równa sumie odwrotności oporów poszczególnych oporników:
>
> $$\frac{1}{R_z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}$$

Zauważmy, że zgodnie z powyższymi wzorami opór zastępczy oporników połączonych szeregowo jest większy niż opór pojedynczych oporników, a opór zastępczy oporników połączonych równolegle – mniejszy od oporu poszczególnych oporników.

Aby obliczyć opór zastępczy bardziej skomplikowanego obwodu, najczęściej dzielimy go na mniejsze części, składające się z samych połączeń równoległych lub szeregowych (patrz przykład po lekcji).

Na przykład:

- $4 + 4 = 8$; **8 > 4**
- $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$; **2 < 4**

Po tej lekcji powinieneś

- znać podstawowe sposoby łączenia oporników;
- obliczać opór zastępczy układu oporników połączonych szeregowo i równolegle;
- obliczać opór zastępczy obwodu jako układu połączeń szeregowych i równoległych.

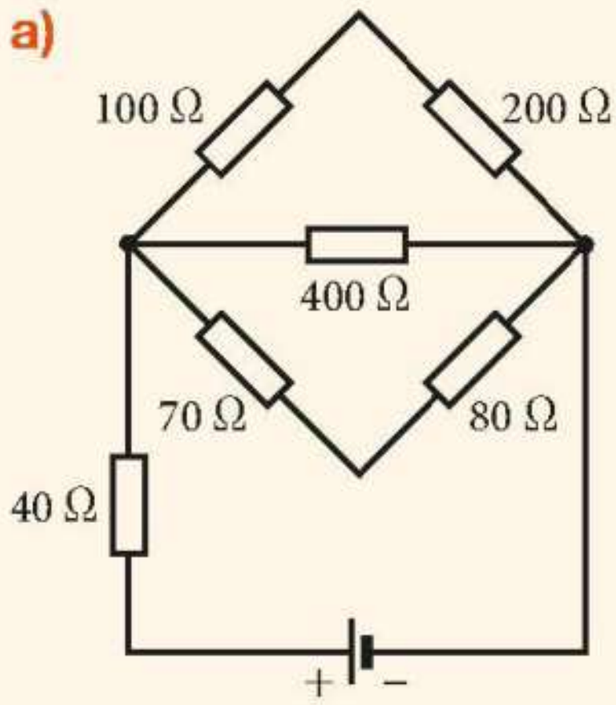
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Oblicz natężenie prądu płynącego przez każdy z oporników w układzie przedstawionym na rysunku a), jeśli napięcie między biegunami baterii wynosi 12 V.

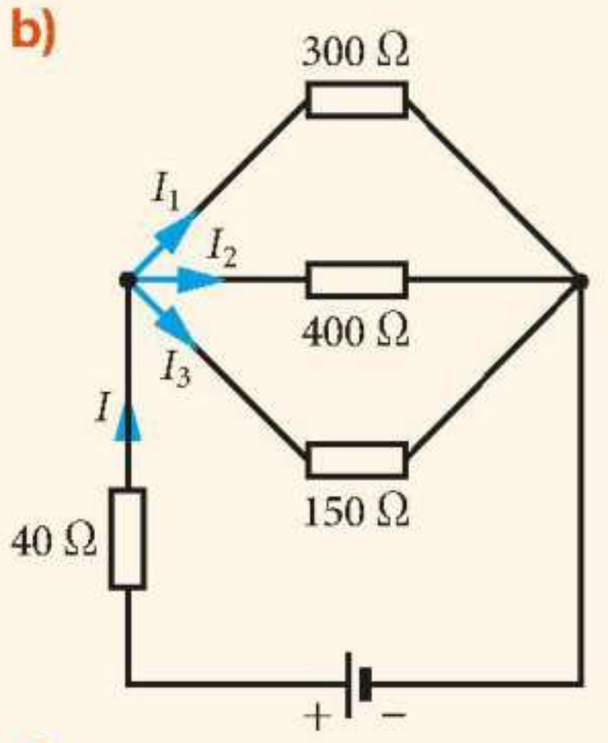
a)



Rozwiązanie

Ze schematu odczytujemy, że oporniki 100 Ω i 200 Ω są połączone szeregowo. Można je więc zastąpić jednym opornikiem o oporze 300 Ω. Analogicznie oporniki 70 Ω i 80 Ω można zastąpić jednym opornikiem o oporze 150 Ω. Nasz układ przyjmuje więc prostszą postać (rys. b).

b)



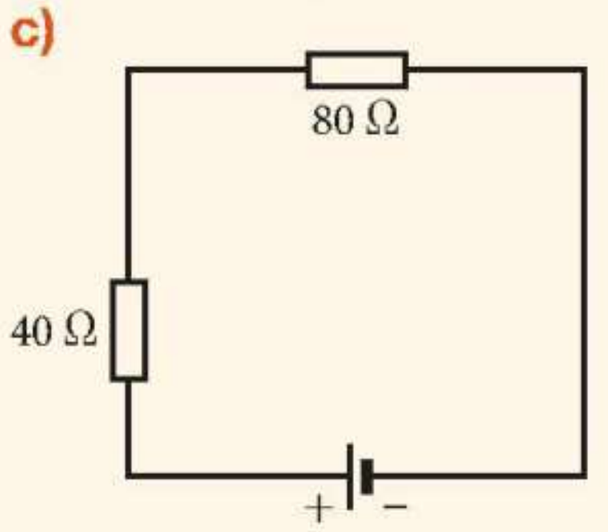
Tak narysowany układ można jeszcze bardziej uprościć, jeśli się uwzględni, że oporniki 300 Ω, 400 Ω i 150 Ω są połączone równolegle. Ich opór zastępczy R_z można obliczyć ze wzoru:

$$\frac{1}{R_z} = \frac{1}{300\,\Omega} + \frac{1}{400\,\Omega} + \frac{1}{150\,\Omega}$$

$$R_z = 80\,\Omega$$

Cały układ składa się więc z oporów 40 Ω i 80 Ω połączonych szeregowo (rys. c).

c)



Jego opór zastępczy wynosi 120 Ω, a natężenie prądu I jest równe:

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

$$I = \frac{12\,\text{V}}{120\,\Omega} = 0{,}1\,\text{A} = 100\,\text{mA}$$

Taki prąd płynie przez opornik 40 Ω. Spadek napięcia na tym oporniku wynosi więc:

$$0{,}1\,\text{A} \cdot 40\,\Omega = 4\,\text{V}$$

Spadek napięcia na pozostałej części obwodu to: 12 V − 4 V = 8 V.

Po przepłynięciu przez opornik 40 Ω prąd się rozdziela między trzy gałęzie. Aby obliczyć natężenie prądu płynącego przez poszczególne gałęzie, wróćmy do rysunku b), na którym zapisaliśmy opór każdej z gałęzi. Ponieważ napięcie na każdej gałęzi jest takie samo i wynosi 8 V, ze wzoru $I = \frac{U}{R}$ możemy obliczyć natężenia w poszczególnych gałęziach:

$$I_1 = \frac{8\,\text{V}}{300\,\Omega} \approx 27\,\text{mA},\quad I_2 = \frac{8\,\text{V}}{400\,\Omega} = 20\,\text{mA},\quad I_3 = \frac{8\,\text{V}}{150\,\Omega} \approx 53\,\text{mA}$$

Łatwo sprawdzić, że: $I_1 + I_2 + I_3 = I$

Odpowiedź: Przez opornik 40 Ω płynie prąd o natężeniu 100 mA, przez oporniki 100 Ω i 200 Ω – o natężeniu ok. 27 mA, przez opornik 400 Ω – o natężeniu 20 mA. Przez pozostałe oporniki płynie prąd o natężeniu ok. 53 mA.

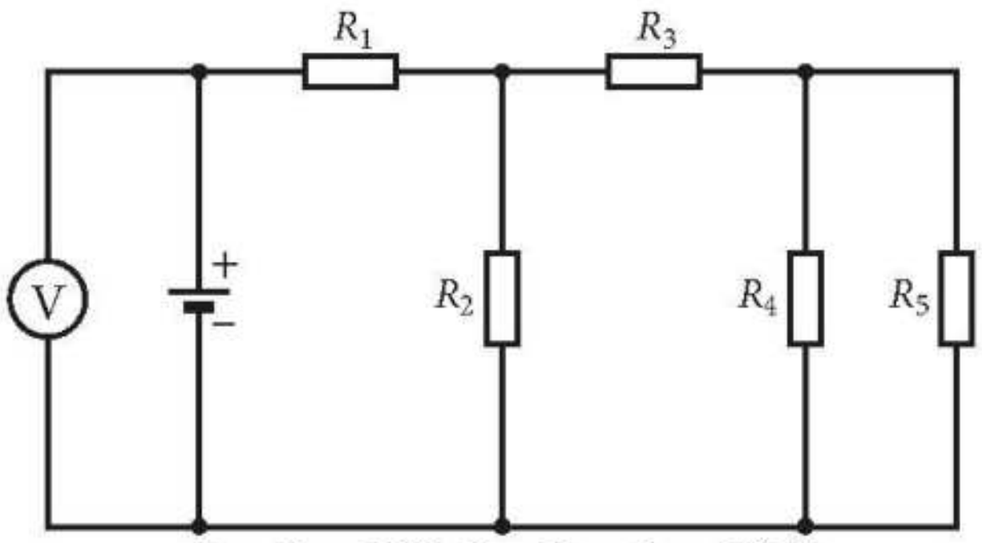
1. Dwa oporniki o oporze 1 kΩ każdy łączymy:

a) równolegle,

b) szeregowo.

Oblicz opory zastępcze w obu przypadkach.

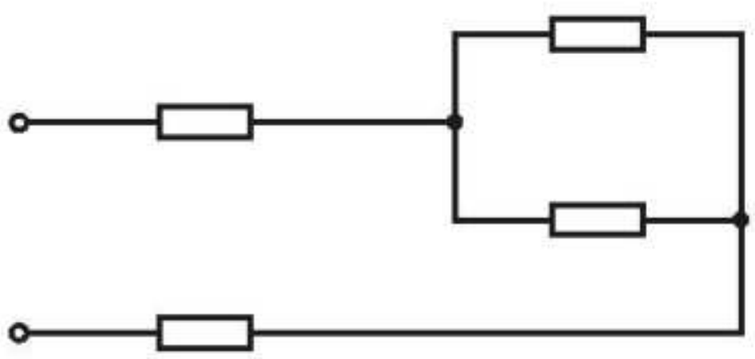
2. Woltomierz w układzie przedstawionym na rysunku wskazuje napięcie 9 V. Oblicz opór zastępczy całego układu oporników, a następnie natężenie prądu płynącego przez każdy z oporników i spadek napięcia na każdym z nich.



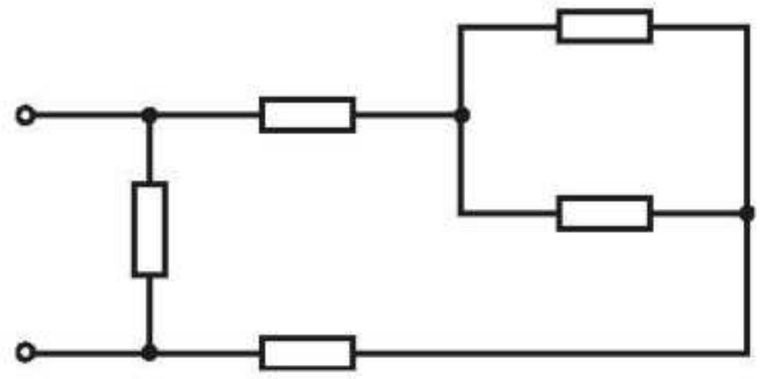
$R_1 = R_2 = 50\ \Omega$, $R_3 = R_4 = R_5 = 100\ \Omega$

3. Oblicz opór zastępczy układów przedstawionych na rysunkach, jeśli wiadomo, że każdy z oporników wchodzących w ich skład ma opór 1 kΩ.

a)



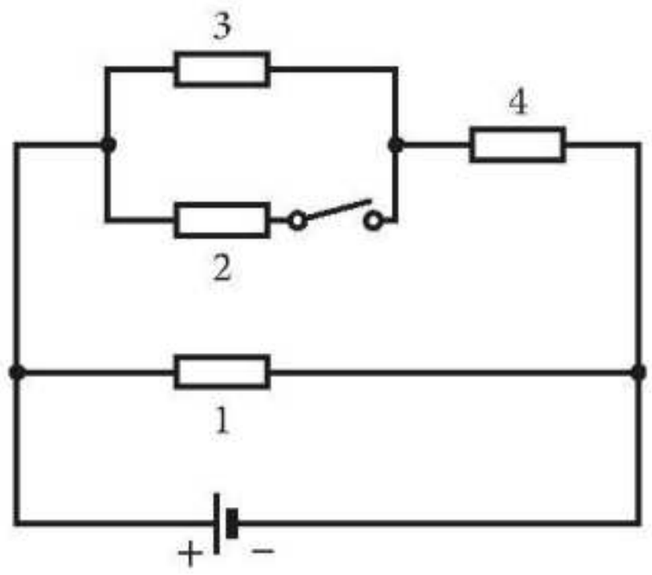
b)



4. Na schemacie przedstawiono układ czterech oporników o oporze 100 Ω każdy, podłączonych do baterii o napięciu $U = 9$ V. Oblicz spadki napięć na opornikach i natężenie prądu płynącego przez każdy opornik w sytuacji, gdy:

a) wyłącznik jest otwarty,

b) wyłącznik jest zamknięty.



5. Układ składa się z n jednakowych oporników. Podaj i uzasadnij wzór na opór zastępczy tego układu, jeśli oporniki są połączone:

a) szeregowo,

b) równolegle.

13.6. Od czego zależy opór elektryczny

Przypomnij sobie

- Natężenie prądu płynącego przez opornik jest proporcjonalne do podłączonego napięcia.
- Opór zastępczy oporników połączonych szeregowo jest równy sumie ich oporów:

$$R_z = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$$

- Odwrotność oporu zastępczego oporników połączonych równolegle jest równa sumie odwrotności ich oporów:

$$\frac{1}{R_z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

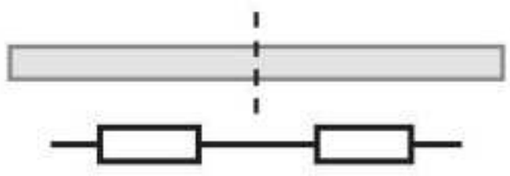
Opór może zależeć od *U* lub *I* **pośrednio**, jeśli zwiększenie natężenia prądu powoduje rozgrzewanie przewodnika. Dalej powiemy więcej na ten temat.

Wiemy już, jaka jest zależność między oporem, napięciem i natężeniem prądu. Zastanówmy się, od jakich czynników zależy opór elektryczny przewodnika. Zwróćmy uwagę, że choć we wzorze $R = \frac{U}{I}$, definiującym opór, występują napięcie i natężenie, to opór **nie zależy** ani od napięcia, ani od natężenia. O tym właśnie mówi prawo Ohma: gdy zmieni się napięcie, proporcjonalnie zmieni się natężenie, więc opór pozostanie bez zmian.

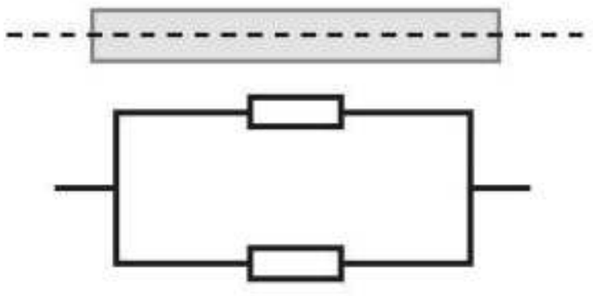
Od czego zależy opór przewodnika?

$R \sim l$
l – długość przewodnika

Okazuje się, że na opór wpływają właściwości przewodnika i jego rozmiary. Na początek wyobraźmy sobie dwa odcinki takiego samego przewodu, z których jeden jest dwa razy dłuższy od drugiego. Dłuższy przewód można w tym przypadku potraktować jak dwa krótsze przewody połączone szeregowo. Tak więc dwukrotnie dłuższy przewód ma dwukrotnie większy opór (rys. 13.39). Ogólnie można powiedzieć, że **opór elektryczny przewodnika jest wprost proporcjonalny do jego długości**.
Wyobraźmy sobie teraz dwa przewody równej długości takie, że pole przekroju poprzecznego jednego z nich jest dwa razy większe od pola przekroju poprzecznego drugiego. Przewód o dwukrotnie większym polu przekroju poprzecznego możemy potraktować jak dwa cieńsze przewody połączone równolegle (rys. 13.40).



Rys. **13.39.** Dłuższy przewodnik możemy wyobrazić sobie jako dwa krótsze przewodniki (oporniki) połączone szeregowo

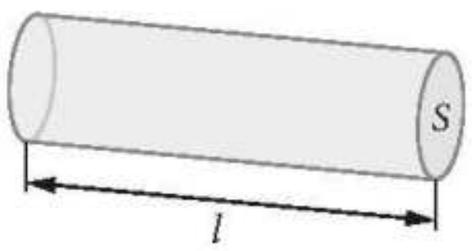


Rys. **13.40.** Grubszy przewodnik możemy wyobrazić sobie jako dwa cieńsze przewodniki połączone równolegle

Ze wzoru na opór zastępczy oporników połączonych równolegle wynika, że grubszy przewodnik ma dwukrotnie mniejszy opór niż cieńszy. Możemy zatem wyciągnąć ogólny wniosek, że **opór elektryczny przewodnika jest odwrotnie proporcjonalny do pola jego przekroju poprzecznego**.

$R \sim \frac{1}{S}$
S – pole powierzchni przekroju poprzecznego przewodnika

Ta obserwacja ma znaczenie praktyczne. Jak wiemy, opór wynika ze zderzeń elektronów z jonami sieci krystalicznej metalu. W trakcie tych zderzeń wydziela się energia w postaci ciepła. Przy stałym natężeniu prądu im większy opór, tym więcej ciepła się wydziela, zatem aby uniknąć nadmiernego rozgrzania się przewodnika i jego przepalenia, należy stosować przewód odpowiednio gruby w stosunku do natężenia prądu, który ma w nim płynąć.



Rys. **13.41.** Opór przewodnika zależy od jego długości l i pola przekroju poprzecznego S

Trzecim czynnikiem wpływającym na opór przewodnika jest substancja, z jakiej został on wykonany.

Jeśli przewody aluminiowy i miedziany mają takie same wymiary, to większy opór ma przewód aluminiowy. Wynika to z różnicy w budowie krystalicznej tych metali.

W aluminium elektrony swobodne częściej zderzają się z jonami sieci niż w miedzi, przez co tracą na zderzenia większą energię, co obserwujemy jako większy opór. Mówimy, że aluminium ma większy **opór właściwy** niż miedź.

Opór właściwy substancji to wielkość określająca opór przewodnika o jednostkowym polu przekroju poprzecznego i jednostkowej długości, wykonanego z tej substancji.

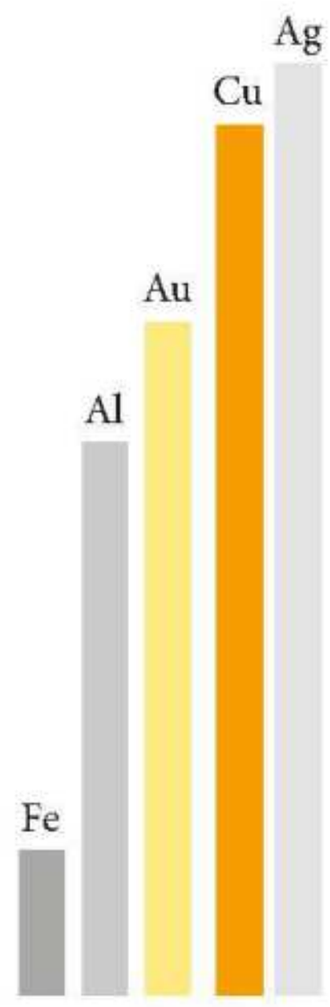
Opisane zależności możemy zapisać w postaci wzoru:

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

gdzie:
ρ – opór właściwy, l – długość przewodnika, S – pole przekroju poprzecznego przewodnika.

Gdy powyższy wzór przekształcimy do postaci $\rho = \frac{RS}{l}$ i przeliczymy jednostkę, zobaczymy, że jednostką oporu właściwego jest:

$$1\,\Omega \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}} = 1\,\Omega \cdot \mathrm{m}$$



Rys. **13.42.** Przewodniki o tym samym oporze i przekroju poprzecznym wykonane z różnych metali mają różną długość

Opór właściwy jest więc liczbowo równy oporowi przewodnika o długości 1 m i polu przekroju poprzecznego 1 m^2.
Przewodniki nie przypominają wyglądem sześcianu o boku 1 m, na ogół są długie i cienkie. Dlatego też wyrażanie pola przekroju poprzecznego przewodników w metrach kwadratowych jest niewygodne. Znacznie prościej jest podawać je w milimetrach kwadratowych.
Dlatego często można się spotkać z inną jednostką oporu właściwego: $1\ \Omega\ \frac{mm^2}{m}$. Wyrażony w niej opór właściwy jest liczbowo równy oporowi przewodnika o długości 1 m i powierzchni przekroju poprzecznego 1 mm^2, czyli odnosi się do wymiarów znacznie bliższych wymiarom przewodów używanych w praktyce.

Przewodniki, półprzewodniki, izolatory

Ze szkoły podstawowej znasz już dwa rodzaje substancji: **przewodniki**, które dobrze przewodzą prąd elektryczny, oraz **izolatory**, które nie przewodzą prądu, a ściślej: przewodzą go bardzo słabo.
Opór właściwy przewodników jest mały (rzędu $10^{-8}\ \Omega \cdot m$). Z kolei opór właściwy izolatorów jest bardzo duży (zwykle ponad $10^{10}\ \Omega \cdot m$), a w praktyce nieskończony – prąd płynący przez izolator jest zbyt mały, aby go zmierzyć.
Oprócz tych dwóch grup wyróżniamy jeszcze **półprzewodniki**. Jak łatwo się domyślić, ich opór właściwy jest mniejszy niż opór właściwy izolatorów, ale większy niż opór właściwy przewodników. Najważniejsze jednak, że opór właściwy półprzewodników może się znacznie zmieniać pod wpływem czynników zewnętrznych, np. światła. Jak to możliwe?
Jak wiesz, w metalach znajdują się swobodne elektrony, których przepływ jest prądem. Z kolei w izolatorach elektrony są mocno związane z atomami i w tych substancjach nie ma swobodnych ładunków elektrycznych.
W półprzewodnikach zachodzi sytuacja pośrednia – elektrony są związane z atomami, ale nie tak mocno jak w przypadku izolatorów. Dostarczenie energii do półprzewodnika, np. przez jego oświetlenie albo zwiększenie temperatury, powoduje oderwanie części elektronów od atomów. W półprzewodniku pojawiają się wtedy swobodne ładunki i może on przewodzić prąd. Im więcej swobodnych ładunków uwalnia się w półprzewodniku, tym większy prąd może w nim popłynąć pod wpływem przyłożonego napięcia, co pociąga za sobą spadek oporu właściwego półprzewodnika.

Tabela 13.5. Opór właściwy wybranych substancji

Opór właściwy w temperaturze 25°C	
Substancja	[Ω · m]
przewodniki	
Srebro	$1{,}62 \cdot 10^{-8}$
Miedź	$1{,}71 \cdot 10^{-8}$
Złoto	$2{,}23 \cdot 10^{-8}$
Glin (aluminium)	$2{,}71 \cdot 10^{-8}$
Żelazo	$9{,}71 \cdot 10^{-8}$
półprzewodniki	
Krzem	0,4
German	0,46
izolatory	
Etanol	ok. 10^{7}
Papier	ok. 10^{10}
Powietrze	$4 \cdot 10^{13}$
Oliwa z oliwek	$5 \cdot 10^{14}$

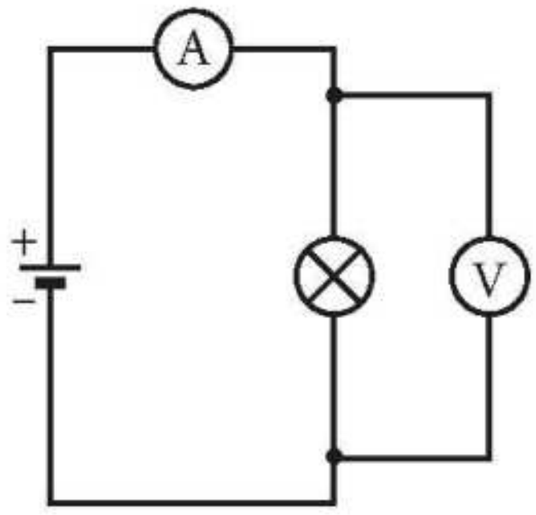
Zależność oporu od temperatury

W dotychczasowych rozważaniach zajmowaliśmy się tylko przewodnikami w stałej temperaturze. Sprawdźmy, jak natężenie prądu zależy

od napięcia w przypadku włókna żarówki, które rozgrzewa się na skutek przepływu prądu, a także we włóknie żarówki, którego temperaturę utrzymujemy na stałym poziomie.

Doświadczenie 16 – obowiązkowe

Charakterystyka prądowo-napięciowa żarówki



1. Przygotuj wodę destylowaną lub zdemineralizowaną, 8 ogniw 1,5 V i oprawkę lub magnesy do ich łączenia, tradycyjną żarówkę sieciową i oprawkę lub magnesy, woltomierz i amperomierz lub dwa mierniki uniwersalne, ręcznik papierowy, deskę, miskę, młotek i pęsetę. Jeśli nie masz dwóch mierników, wystarczy jeden, ale pomiary będą trwały dłużej.
2. Poprzedniego dnia zamroź ok. 100 ml wody destylowanej lub zdemineralizowanej.
3. Zbuduj układ według schematu. Zmierz napięcie na żarówce i natężenie płynącego przez nią prądu (zdjęcie a). Zapisz wyniki pomiarów w tabeli.
4. Do ogniwa w obwodzie podłącz szeregowo jeszcze jedno ogniwo, wykonaj pomiary opisane w punkcie 3. i zapisz ich wyniki w tabeli.
5. Powtarzaj czynności opisane w punkcie 3. do czasu, aż podłączysz do obwodu wszystkie ogniwa.

a)



b)



6. Wyznacz niepewność pomiaru napięcia i natężenia.
7. Na podstawie danych z tabeli sporządź wykres $I(U)$ wraz z zaznaczonymi niepewnościami pomiarowymi. Jeśli to możliwe, wyznacz współczynnik kierunkowy prostej będącej wykresem zależności $I(U)$.
8. Zawiń szczelnie żarówkę w ręcznik papierowy, połóż ją na desce i uderz młotkiem tak, aby rozbić bańkę, ale nie uszkodzić włókna. Następnie ostrożnie usuń ręcznik wraz ze wszystkimi odłamkami szkła. Nie dotykaj szkła gołymi rękami, posłuż się pęsetą.
9. Nalej do miski wodę zdemineralizowaną i wrzuć do niej wcześniej przygotowany lód.
10. Włóż żarówkę do miski z wodą i lodem (zdjęcie b), a następnie ponownie wyznacz jej charakterystykę prądowo-napięciową metodą opisaną wyżej.

Analiza wyników doświadczenia

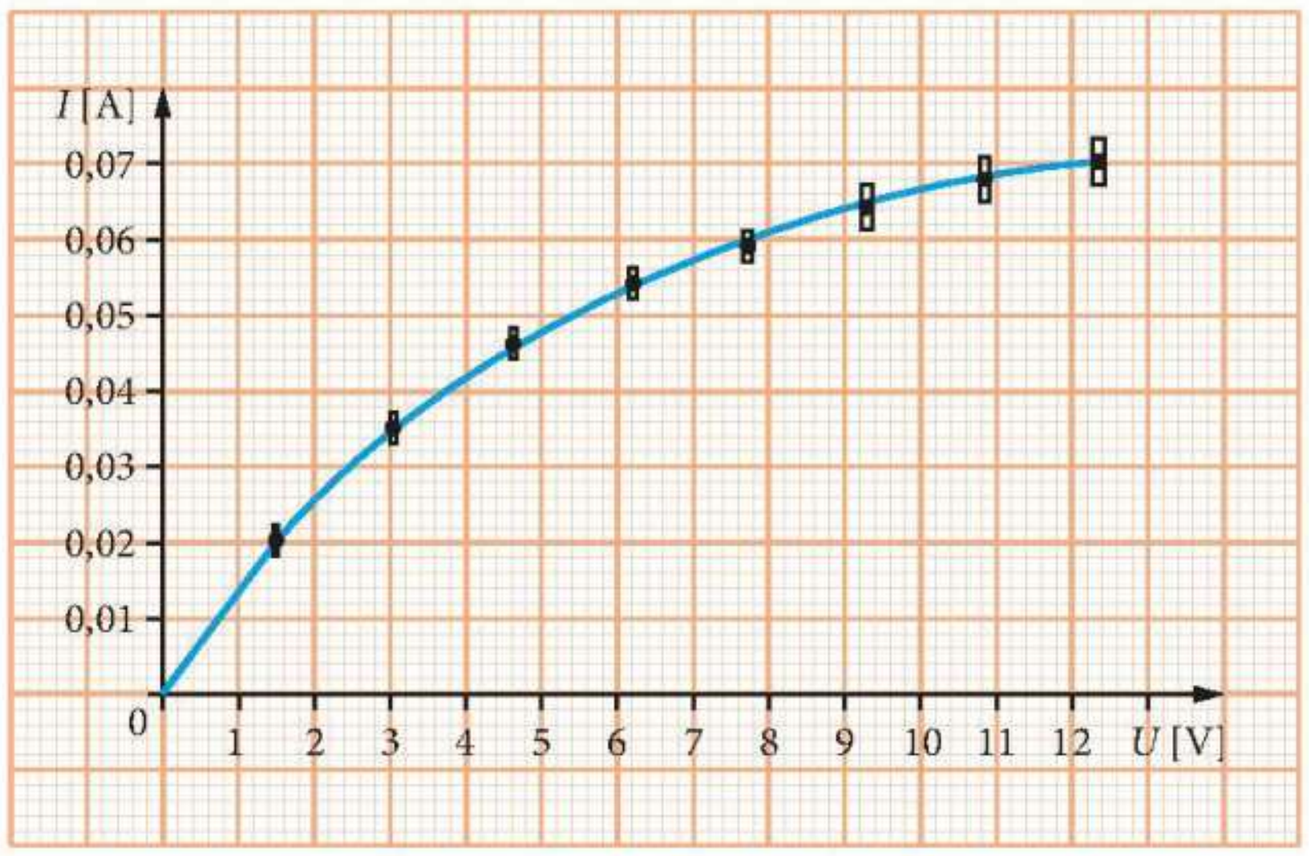
Na początek przeanalizujmy wyniki pomiarów opisanych w punktach 3–5, czyli charakterystykę prądowo-napięciową żarówki przed jej rozbiciem.

W naszym doświadczeniu wykonaliśmy 8 pomiarów. Następnie obliczyliśmy niepewności pomiarowe metodą opisaną w analizie doświadczenia 15. na stronie 172. Otrzymane wyniki przedstawiliśmy w poniższej tabeli 13.6.

Tabela 13.6. Wyniki pomiarów wraz z niepewnościami uzyskane w pkt 3–5 doświadczenia 16.

U [V]	1,51	3,04	4,62	6,21	7,73	9,29	10,85	12,35
ΔU [V]	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08
I [A]	0,020	0,035	0,046	0,054	0,059	0,064	0,068	0,070
ΔI [A]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003

Wyniki pomiarów wraz z prostokątami niepewności pomiarowych zaznaczyliśmy w układzie współrzędnych (rys. 13.43). Jak widzimy, układają się one nie wzdłuż jednej prostej, ale wzdłuż krzywej o zmniejszającym się nachyleniu.



Rys. **13.43.** Wykres zależności natężenia prądu od napięcia, sporządzony na podstawie danych z tabeli 13.6

Oznacza to, że natężenie prądu płynącego przez żarówkę nie jest wprost proporcjonalne do napięcia na tej żarówce. **Żarówka nie spełniała więc prawa Ohma**. Innymi słowy, jej opór zmieniał się w kolejnych pomiarach.

Prawo Ohma s. 174

Okazało się, że im większe napięcie przykładaliśmy do żarówki, tym większy stawał się opór jej włókna.

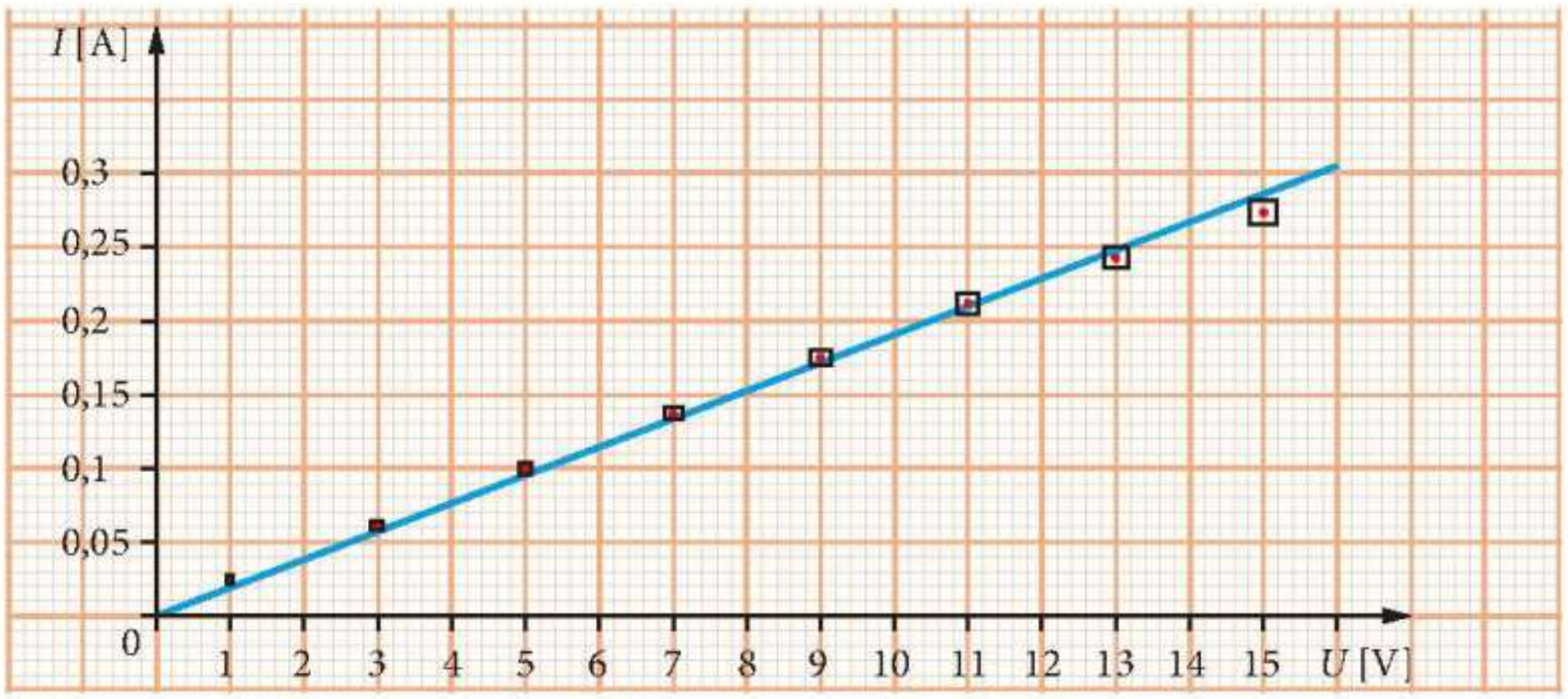
Dlaczego więc żarówka nie spełnia prawa Ohma? Aby się tego dowiedzieć, przeanalizujmy drugą część doświadczenia, w której temperatura włókna żarówki była stała, gdyż wydzielane ciepło było oddawane do wody z lodem.

Użyliśmy wody zdemineralizowanej, czyli pozbawionej jonów, a tym samym nieprzewodzącej prądu.

W tym przypadku w wyniku analogicznej analizy danych (tabela 13.7) otrzymaliśmy wykres $I(U)$, który jest linią prostą (rys. 13.44).

Tabela 13.7. Wyniki pomiarów wraz z niepewnościami uzyskane w pkt 10. doświadczenia 16.

U [V]	1,13	3,09	5,09	7,06	9,05	11,04	13,03	15,00
ΔU [V]	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09
I [A]	0,023	0,063	0,102	0,139	0,174	0,210	0,240	0,270
ΔI [A]	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,007	0,008



Rys. **13.44.** Wykres zależności $I(U)$ dla danych z tabeli 13.7

Widzimy więc, że wolfram, z którego jest wykonane włókno żarówki, dla stałej temperatury spełnia prawo Ohma. Oznacza to, że zmiana oporu włókna żarówki wynikała nie bezpośrednio ze zwiększania się przyłożonego napięcia, ale ze wzrostu temperatury włókna.

Zależność oporu od temperatury dla różnych substancji

Na podstawie wyników doświadczenia 16. ze s. 185 stwierdziliśmy, że opór wolframowego włókna żarówki rośnie w miarę wzrostu jego temperatury.

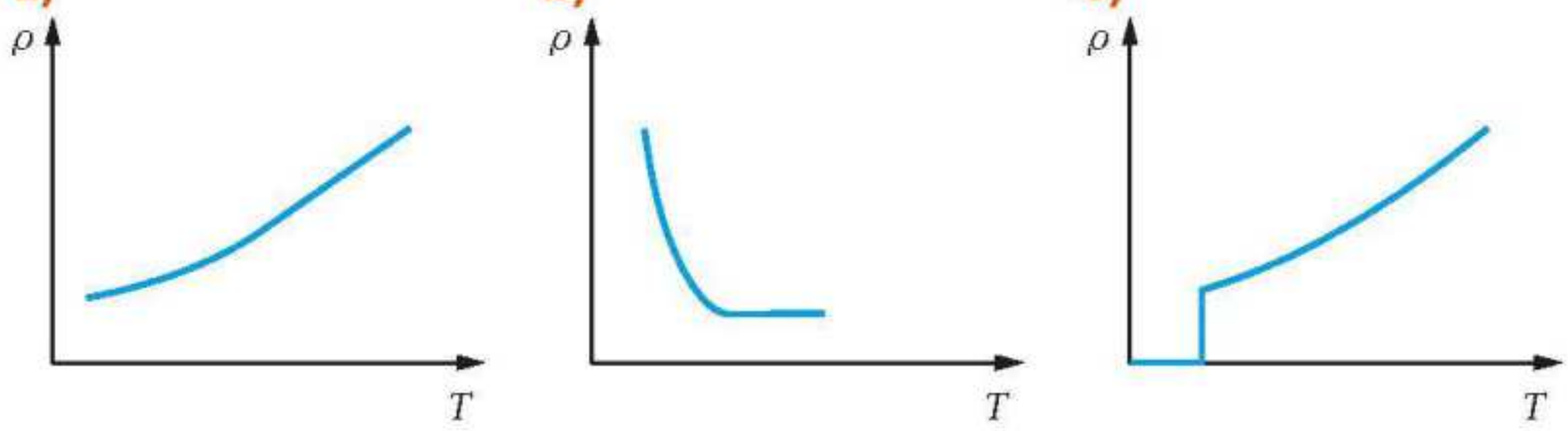
A to ciekawe

Zależność oporu od temperatury wykorzystujemy w praktyce. Opornik, którego opór zmienia się wraz z temperaturą otoczenia w ściśle określony sposób, nazywamy termistorem (nazwa ta pochodzi od słowa *rezystor* – innej nazwy opornika). Termistory służą m.in. do pomiaru temperatury płynu w chłodnicy samochodu oraz są elementem termostatu utrzymującego stałą temperaturę topionego tworzywa w drukarce 3D (patrz zdjęcie). Sterują także układem ograniczającym dopływ prądu do urządzenia, którego temperatura niebezpiecznie rośnie.



Podobnie zachowuje się większość **metali** (rys. 13.45a). Dzieje się tak dlatego, że w wyższej temperaturze elektrony poruszają się szybciej, więc częściej zderzają się z jonami i tracą więcej energii.

> Opór przewodnika rośnie z temperaturą.



Rys. **13.45.** Schematyczny wykres zależności oporu właściwego od temperatury dla: a) przewodnika, b) półprzewodnika, c) nadprzewodnika

Również w **półprzewodnikach** wraz ze wzrostem temperatury elektrony poruszają się szybciej, co powoduje większe straty energii przy zderzeniach z jonami i wzrost oporu.
Jednak w miarę wzrostu temperatury coraz więcej elektronów odrywa się od atomów i staje się elektronami swobodnymi. Ten drugi efekt przeważa i w konsekwencji opór półprzewodnika maleje z temperaturą. Dopiero gdy wszystkie możliwe ładunki zostaną wykorzystane do przewodzenia prądu, dalszy wzrost temperatury zwiększa tylko drgania sieci krystalicznej – następuje w ich wyniku wzrost oporu. Jest to jednak wzrost tak mały, że nie widać go na wykresie (rys. 13.45b).

> Opór półprzewodnika maleje z temperaturą aż do pewnej granicznej wielkości.

Niektóre substancje (przewodniki lub półprzewodniki), gdy obniżamy ich temperaturę, wykazują nietypowe własności. Otóż przy pewnej wartości temperatury ich opór spada do zera w sposób skokowy (rys. 13.45c). Mówimy wówczas, że taka substancja jest **nadprzewodnikiem**.
Jeśli zatem w zamkniętej pętli z nadprzewodnika wzbudzimy prąd, będzie on płynął całymi latami bez zauważalnej zmiany natężenia. Z taką sytuacją mamy do czynienia w aparaturze medycznej (rys. 13.46).



Rys. **13.46.** W aparacie do rezonansu magnetycznego wykorzystujemy cewkę (zwojnicę) z nadprzewodnika

Po tej lekcji powinieneś

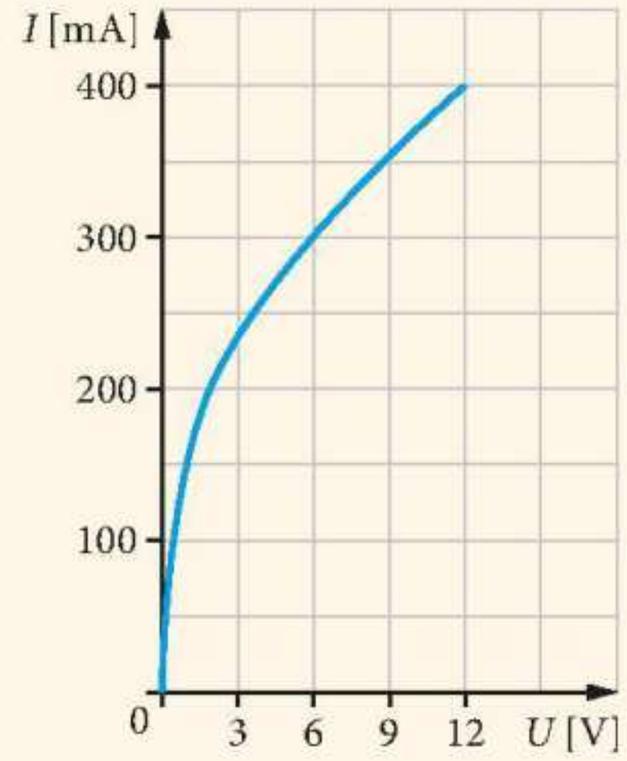
- obliczać opór przewodnika w zależności od rodzaju substancji, z jakiej jest wykonany, oraz jego wymiarów geometrycznych;
- wyjaśniać zależność oporu od temperatury dla przewodników i półprzewodników.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

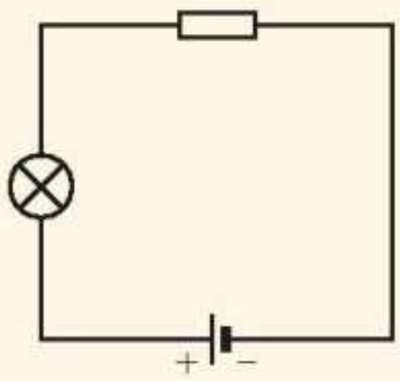
Wykres przedstawia charakterystykę prądowo-napięciową pewnej żarówki. Żarówka ta została połączona szeregowo z opornikiem o oporze R, a układ został podłączony do napięcia 12 V. Przy jakim oporze R spadek napięcia na oporniku będzie równy spadkowi napięcia na żarówce?



Rozwiązanie

W treści zadania powiedziano, że spadek napięcia na żarówce jest taki sam jak na oporniku. To oznacza, że skoro elementy zostały połączone szeregowo, a układ podłączony do napięcia 12 V, to na każdym z nich napięcie wynosi $U = 6$ V.

Z wykresu odczytujemy, że takiemu spadkowi napięcia na żarówce odpowiada prąd o natężeniu $I = 300$ mA. Ponieważ opornik i żarówka są połączone szeregowo, więc przez oba te elementy płynie prąd o takim samym natężeniu.



Możemy zatem obliczyć opór opornika, który wynosi:

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

$$R = \frac{6\text{ V}}{300\text{ mA}} = \frac{6\text{ V}}{0{,}3\text{ A}} = 20\ \Omega$$

Odpowiedź: Spadek napięcia na oporniku będzie równy spadkowi napięcia na żarówce, jeżeli opór R wyniesie 20 Ω.

1. Oblicz opór przewodu miedzianego o średnicy 0,3 mm i długości 5 m.

2. Oblicz, jaką średnicę powinien mieć przewód aluminiowy o przekroju kołowym, aby 1 km tego przewodu miał opór 10 Ω.

3. Opornik o oporze R i żarówkę, której charakterystykę przedstawiono na wykresie w przykładzie, połączono szeregowo i podłączono do napięcia 9 V. Przy jakim oporze R spadek napięcia na oporniku będzie równy połowie spadku napięcia na żarówce?

4. Odpowiedz na pytania i wyjaśnij przyczynę różnicy między odpowiedziami.

a) Gdy opornik podłączono do napięcia 9 V, płynął przez niego prąd o natężeniu 200 mA. Następnie do tego samego napięcia podłączono dwa takie oporniki połączone szeregowo. Ile wyniesie natężenie prądu płynącego przez obwód?

b) Gdy żarówkę podłączono do napięcia 9 V, płynął przez nią prąd o natężeniu 200 mA. Następnie do tego samego

napięcia podłączono dwie takie żarówki połączone szeregowo. Co można powiedzieć o natężeniu prądu płynącego przez obwód?

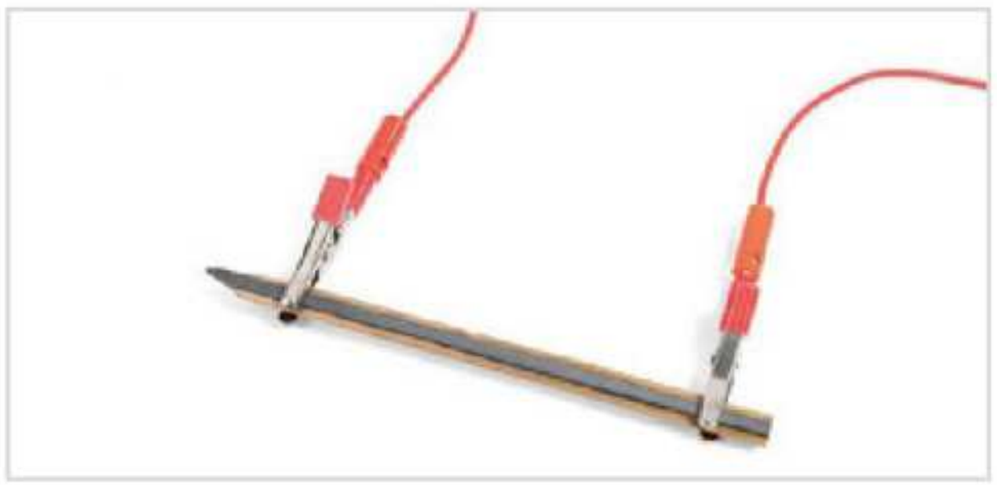
5. Przygotuj żarówkę 4,8 V. Odczytaj z jej obudowy informację o natężeniu prądu, który płynie przez nią po podłączeniu jej do napięcia znamionowego (tzn. podanego na obudowie, czyli wynoszącego 4,8 V). Na podstawie tych danych oblicz opór żarówki. Następnie zmierz jej opór za pomocą omomierza i porównaj wyniki. Sformułuj wniosek płynący z ich analizy.



6. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj bardzo miękki ołówek: B8 albo B9 (w twardszych ołówkach grafit zmieszany jest z glinką, przez co traci interesujące nas właściwości).

b) Za pomocą nożyka **ostrożnie** usuń drewno z jednej strony ołówka tak, aby grafit lekko wystawał z niego na całej długości (patrz zdjęcie). Podłącz krokodylki do grafitu.



c) Zbadaj charakterystykę prądowo-napięciową grafitu, podobnie jak to robiliśmy dla żarówki w doświadczeniu obowiązkowym na stronie 185 (ale bez chłodzenia w wodzie).

d) Jak zmienia się opór grafitu wraz z temperaturą? Czy grafit jest przewodnikiem czy półprzewodnikiem?

13.7. Praca i moc prądu elektrycznego

Przypomnij sobie

- Po podłączeniu przewodnika do źródła napięcia w przewodniku pojawia się pole elektryczne.
- Elektrony płynące przez metal tracą energię z powodu zderzeń z jonami.
- W wyniku przepływu prądu elektrycznego może zostać wykonana praca.
- Moc to iloraz wykonanej pracy i czasu jej wykonywania.

Przemiany energii podczas przepływu prądu

Wiesz już, że elektrony przepływające przez przewodnik zderzają się z jonami oraz że w wyniku tych zderzeń tracą energię. Oczywiście zgodnie z zasadą zachowania energii energia ta nie znika, ale jest oddawana jonom, które zaczynają się szybciej poruszać, co obserwujemy jako wzrost temperatury przewodnika.

Nie jest to jednak jedyny powód utraty energii przez elektrony. Na przykład w silniku elektrycznym utrata energii przez elektrony płynące w uzwojeniu wynika z ich oddziaływania z magnesem (budowę silnika znasz ze szkoły podstawowej, przypominamy ją także na stronie 303).

W każdym z opisanych przypadków możemy jednak powiedzieć, że z przepływem prądu jest związana przemiana energii albo że prąd wykonuje pracę. Wielkość tej pracy nie zależy od mechanizmu przemiany energii. Bez względu na to, czy mówimy o grzejniku, silniku, czy też o innym urządzeniu elektrycznym, praca zależy wyłącznie od wielkości opisujących przepływ prądu: napięcia, natężenia i czasu.



Rys. **13.47.** Energia elektryczna to najczęściej wykorzystywana forma energii. Na zdjęciu taśma bagażowa na lotnisku

Obliczanie pracy i mocy

Punkt wyjścia do obliczenia pracy prądu stanowi definicja napięcia. Przypomnijmy, że zgodnie z nią napięcie to różnica potencjałów. Natomiast potencjał określa, jaką energię potencjalną będzie miał jednostkowy ładunek w danym punkcie pola elektrycznego:

$$U = \Delta V = \frac{\Delta E_p}{Q}$$

gdzie: ΔV – różnica potencjałów, ΔE_p – różnica energii potencjalnych, Q – ładunek.

Zatem jeżeli napięcie między końcówkami odbiornika energii elektrycznej wynosi U, to różnica energii potencjalnej ładunku Q między końcówkami jest równa:

$$\Delta E_p = UQ$$

Jednocześnie jest ona równa pracy wykonanej przez przepływający ładunek:

$$W = UQ$$

Ponieważ natężenie prądu można wyrazić jako $I = \frac{Q}{t}$, to $Q = It$, gdzie t jest czasem przepływu ładunku Q. Po podstawieniu tej zależności do wzoru na pracę otrzymujemy wzór na pracę prądu elektrycznego:

$$W = UIt$$

Wzór na pracę prądu elektrycznego jest żartobliwie nazywany „wzorem wójta".

Praca prądu elektrycznego płynącego w różnych odbiornikach w tym samym czasie na ogół jest różna. Aby ją porównać, posługujemy się, podobnie jak w mechanice, pojęciem mocy.

Moc, cz. I s. 190

Jak pamiętasz, moc to iloraz pracy W i czasu jej wykonania t. Po podstawieniu wyprowadzonej wyżej zależności do wzoru na moc otrzymujemy:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UIt}{t}$$

$$P = UI$$

W układzie SI pracę prądu wyrażamy w dżulach, a moc w watach.

Inna jednostka pracy prądu (energii elektrycznej) to kilowatogodzina, równa energii pobranej przez urządzenie o mocy 1 kW w czasie 1 h:
1 kWh = 1 kW · 1 h =
= 1000 W · 3600 s =
= 3 600 000 J

Moc a opór

Doświadczenie 17

1. Przygotuj dwa ogniwa 1,5 V oraz dwie żarówki: 1,2 V / 0,3 A i 2,2 V / 0,3 A.
2. Połącz żarówki równolegle i podłącz je do baterii zbudowanej z dwóch ogniw 1,5 V połączonych szeregowo (zdjęcie a). Która żarówka świeci jaśniej?
3. Połącz żarówki szeregowo i ponownie podłącz je do tej samej baterii (zdjęcie b). Która żarówka świeci jaśniej?
4. Porównaj wyniki obserwacji i spróbuj na ich podstawie wyjaśnić przebieg doświadczenia.

a)



b)



Napięcie znamionowe – napięcie, do którego dostosowane jest dane urządzenie, np. żarówka.

Kiedy żarówki były połączone równolegle, jaśniej świeciła żarówka przystosowana do pracy pod mniejszym napięciem. Przy połączeniu szeregowym stało się odwrotnie, jaśniej świeciła żarówka o większym napięciu znamionowym.

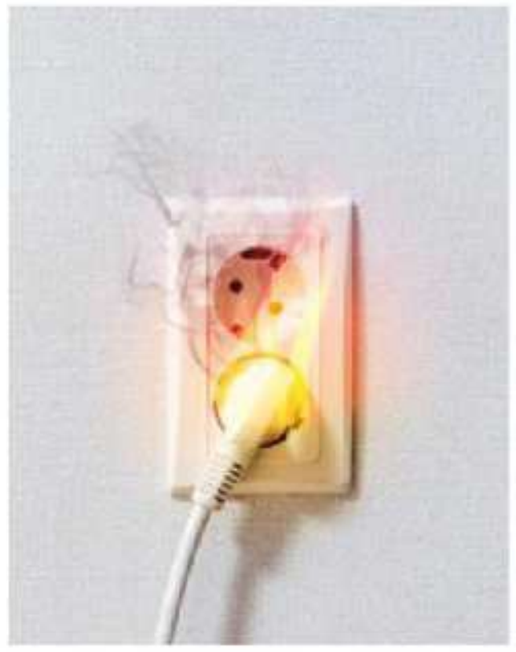
Aby wyjaśnić, dlaczego tak się stało, przeanalizujmy związek między mocą prądu elektrycznego a oporem.
Moc można wyrazić na dwa sposoby: w zależności od napięcia lub natężenia. Jeżeli podstawimy do wzoru $P = UI$ odpowiednią wielkość wyznaczoną z prawa Ohma, to otrzymamy:

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

$$P = UI = IR \cdot I \qquad P = UI = \frac{U \cdot U}{R}$$

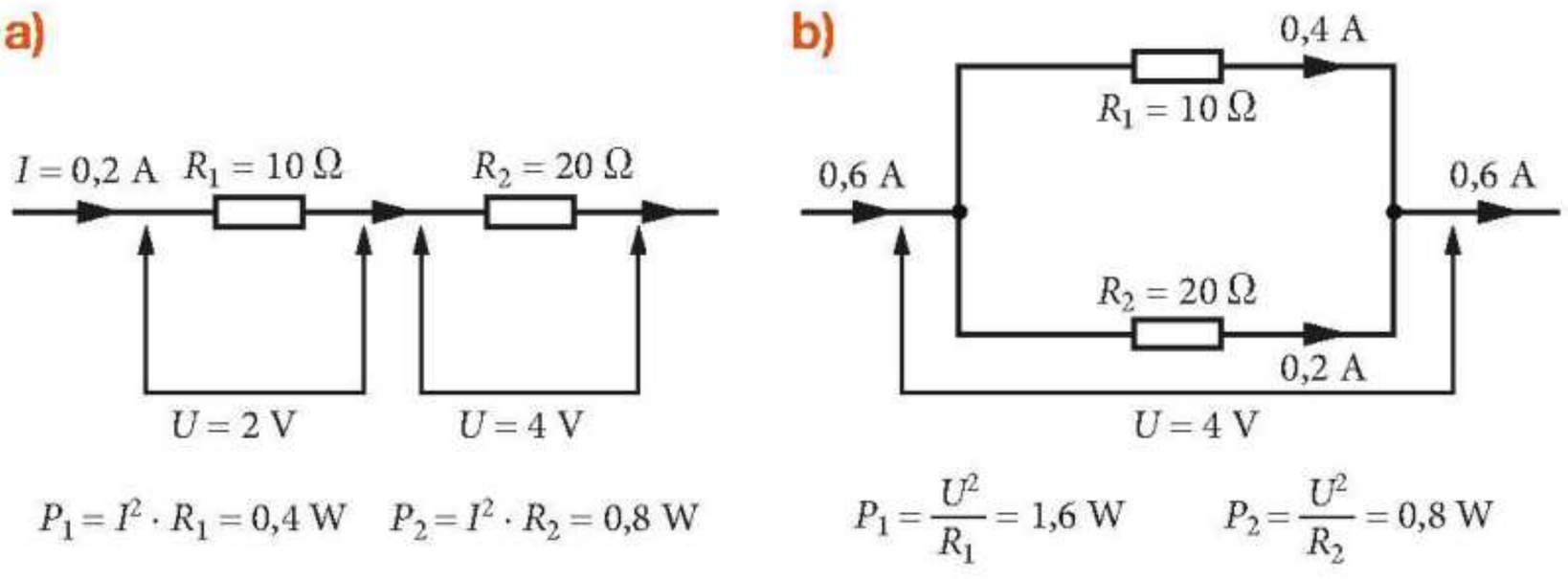
$$P = I^2R \qquad P = \frac{U^2}{R}$$

Z pierwszej zależności wynika, że moc wydzielana na oporniku jest wprost proporcjonalna do jego oporu, a z drugiej – że jest ona do niego odwrotnie proporcjonalna. Nie ma tu jednak sprzeczności, gdyż wzory dotyczą różnych sytuacji.



Rys. **13.48.** Ponieważ nigdy w miejscu połączenia wtyczki z gniazdkiem przewodniki nie są idealnie dopasowane, a do tego mogą być zabrudzone lub skorodowane, więc opór jest tam większy niż w przewodzie. Dlatego w tych miejscach wydziela się więcej ciepła, co przy przeciążeniu może doprowadzić do pożaru

Wzór $P = I^2R$ wykorzystujemy do obliczania mocy wydzielanej na opornikach, przez które płynie prąd o takim samym natężeniu. Dzieje się tak wtedy, gdy są one **połączone szeregowo**. Wówczas **na oporniku o większym oporze następuje większy spadek napięcia**, więc wydziela się na nim większa moc. Przykład takiej sytuacji przedstawiono na rysunku 13.49a.
Z kolei wzór $P = \frac{U^2}{R}$ służy do obliczania mocy oporników podłączonych do tego samego napięcia, co ma miejsce wtedy, gdy są one połączone równolegle (rys. 13.49b). W tym przypadku **przez opornik o większym oporze płynie mniejszy prąd**, więc wydziela się na nim mniejsza moc.



Rys. **13.49.** Przykład obliczania mocy wydzielanej na opornikach połączonych: a) szeregowo, b) równolegle

W doświadczeniu 17. mieliśmy okazję przekonać się o słuszności tych rozważań. Żarówki miały różny opór i w zależności od sposobu ich połączenia raz większa moc wydzielała się na jednej, a raz na drugiej. Dostrzegaliśmy to jako silniejsze świecenie raz jednej, a raz drugiej żarówki.

Po tej lekcji powinieneś

- stosować wzory na pracę i moc prądu elektrycznego;
- analizować zależność mocy urządzenia od jego oporu.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Wózek elektryczny o masie $m = 150$ kg, zasilany trzema 12-woltowymi akumulatorami połączonymi szeregowo, rozpędza się ruchem jednostajnie przyspieszonym od 0 do prędkości $v_{max} = 30 \frac{km}{h}$ w ciągu $t = 6$ s. Sprawność wózka (tzn. jego silnika i przekładni) wynosi 80%, a opory ruchu są stałe i równe $F_{op} = 200$ N. Oblicz natężenie prądu płynącego przez silnik wózka elektrycznego w chwili, gdy porusza się on z prędkością $v = 18 \frac{km}{h}$.

Rozwiązanie

Najpierw prześledzimy związki między wielkościami, od których zależy ruch wózka. Wózek porusza się ruchem jednostajnie zmiennym, więc jego przyspieszenie wyraża się wzorem:

$$a = \frac{v_{max} - 0}{t} = \frac{v_{max}}{t}$$

co oznacza, że siła wypadkowa ma wartość:

$$F_w = ma = \frac{mv_{max}}{t}$$

Z treści zadania wiemy, że na wózek działają także stałe opory ruchu. Dopiero po ich uwzględnieniu otrzymujemy wzór na siłę F, która równoważy opory i nadaje wózkowi przyspieszenie. Jak pamiętasz z I części podręcznika, jest to siła tarcia między podłożem a kołami: koła odpychają podłoże do tyłu, a podłoże zgodnie z trzecią zasadą dynamiki odpycha koła i popycha cały wózek do przodu.

$$F = \frac{mv_{max}}{t} + F_{op}$$

Po podstawieniu danych liczbowych (zamieniamy $30 \frac{km}{h}$ na jednostki SI) otrzymujemy:

$$F \approx 408 \text{ N}$$

Wiemy, że wzór na moc można zapisać w postaci:

$$P = Fv$$

Zauważ, że ta moc (a więc także szukane natężenie prądu) rośnie w miarę rozpędzania wózka. Dla prędkości $18 \frac{km}{h}$ otrzymujemy wartość: $P = 2040$ W.
Jest to moc użyteczna. Ponieważ jednak sprawność wózka wynosi 80%, moc prądu elektrycznego P_{el} związana jest z nią zależnością:

$$P = 0{,}8P_{el}$$

Stąd po przekształceniu wzoru i podstawieniu danych moc prądu elektrycznego jest równa:

$$P_{el} = 2550 \text{ W}$$

Aby obliczyć natężenie, wzór $P_{el} = UI$ przekształcamy do postaci:

$$I = \frac{P_{el}}{U}$$

Znamy już moc P_{el}. Wiemy, że wózek był zasilany trzema akumulatorami 12 V, zatem:

$$U = 3 \cdot 12 \text{ V} = 36 \text{ V}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy $I \approx 71$ A.

Odpowiedź: Przez silnik w opisanej chwili płynie prąd o natężeniu ok. 71 A.

1. Laptop jest zasilany prądem o natężeniu 1,5 A pod napięciem 19 V. Jego akumulator ma pojemność 5200 mAh (miliamperogodzin), przy czym 1 mAh to ładunek, który przepływa w czasie 1 h, gdy natężenie prądu wynosi 1 mA.

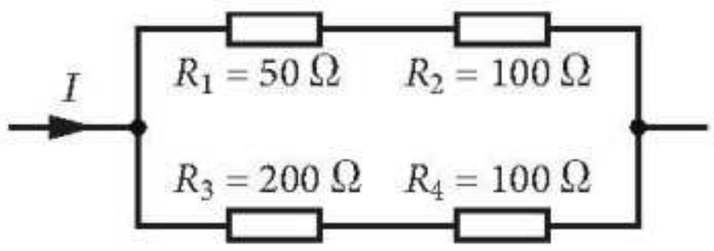
a) Przelicz pojemność akumulatora na kulomby i oblicz moc laptopa.

b) Oblicz, ile czasu laptop może pracować bez przerwy, jeżeli w chwili rozpoczęcia pracy akumulator urządzenia był w pełni naładowany.

c) Oblicz energię zgromadzoną we w pełni naładowanym akumulatorze laptopa.

Uwaga. Przyjmij, że napięcie akumulatora się nie zmienia.

2. Na którym z oporników wydziela się najwięcej ciepła?



3. Masa wózka elektrycznego wraz z kierowcą i ładunkiem wynosiła 400 kg. Podczas jazdy ze stałą prędkością 25 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ pojazd pobierał prąd o natężeniu 120 A z akumulatorów o napięciu 36 V. Po wyłączeniu silnika pojazd zatrzymał się bez hamowania po przejechaniu 20 m. Oblicz sprawność pojazdu (silnika i przekładni). Przyjmij, że opory ruchu są stałe.

4. Do czajnika elektrycznego o mocy 2 kW nalano 2,5 l wody o temperaturze 10°C. Po włączeniu go do sieci domowej o napięciu 230 V woda zaczęła w nim wrzeć po 10 min.

a) Oblicz sprawność czajnika. Wyjaśnij, dlaczego sprawność czajnika nie jest równa 100%, chociaż grzałka zamienia całą dostarczoną energię elektryczną na ciepło.

b) Oblicz opór grzałki czajnika. Pomiń zmiany oporu w czasie grzania wody.

c) Oblicz, ile kosztuje zagotowanie 1 litra wody w tym czajniku, jeżeli 1 kWh energii elektrycznej kosztuje 0,80 zł.

5. Wytnij z folii aluminiowej pasek o długości kilkunastu cm i szerokości 2 cm. Połącz nim na kilka sekund bieguny ogniwa D. Oceń, w których miejscach pasek nagrzał się najbardziej. Wyjaśnij dlaczego.



6. Wykonaj doświadczenie.

a) Zmierz opór zimnego włókna żarówki przeznaczonej do pracy pod napięciem 230 V.

b) Na podstawie danych odczytanych z obudowy żarówki oblicz opór jej włókna w czasie świecenia w sieci domowej (jej napięcie wynosi ok. 230 V). Możesz też zmierzyć rzeczywistą moc świecącej żarówki i bieżące napięcie w sieci za pomocą watomierza (patrz zdjęcie s. 311) – pozwoli to uzyskać dokładniejsze wyniki.

c) Dla dodatniej temperatury T w skali Celsjusza opór włókna wolframowego (w omach) można obliczyć z zależności:

$$R(T) = (3{,}46 \cdot 10^{-7}T^2 + 5 \cdot 10^{-3}T + 0{,}875)R_0$$

gdzie R_0 jest oporem w temperaturze pokojowej (25°C). Dla uproszczenia we wzorze pominięto jednostki. Na podstawie tej zależności i wyników pomiarów wyznacz temperaturę włókna świecącej żarówki.



13.8. Siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny

Przypomnij sobie

- Opór elektryczny to wielkość związana ze stratami energii podczas przepływu prądu.
- Opór to stosunek napięcia do natężenia prądu: $R=\frac{U}{I}$. Na mocy prawa Ohma ten iloraz jest stały w danej temperaturze.
- Elektrolit to ciecz zawierająca jony dodatnie (kationy) i ujemne (aniony). Elektrolity przewodzą prąd.

Ogniwa

O źródłach napięcia wspominaliśmy już w poprzednich lekcjach. Teraz poznamy dokładniej ich właściwości.

Doświadczenie 18



1. Przygotuj talerzyk, kilka plasterków cytryny o grubości ok. 1 cm, czuły woltomierz i po dwie próbki kilku różnych metali (np. kawałki folii aluminiowej, monety 1-złotowe, kawałki przewodu miedzianego bez izolacji, żelazne gwoździe).

2. Połóż plasterek cytryny na talerzyku.

3. Przyłóż do jego przeciwległych brzegów po próbce tego samego metalu (jeśli tak jest wygodniej, możesz je wbić w cytrynę). Zmierz napięcie między próbkami umieszczonymi w cytrynie.

4. Powtórz pomiary z użyciem pozostałych par próbek tego samego metalu.

5. Przyłóż do przeciwległych brzegów cytryny próbki dwóch różnych metali. Zmierz napięcie między nimi.

6. Powtórz pomiary tak, żeby odczytać napięcie między próbkami dla wszystkich możliwych par. Co zauważyłeś?



Rys. **13.50.** W urządzeniach elektrycznych i elektronicznych wykorzystujemy wiele typów ogniw

W doświadczeniu zbudowałeś proste ogniwo – źródło napięcia stałego, w którym napięcie powstaje dzięki reakcjom chemicznym. W ogniwie energia chemiczna jest zamieniana na energię elektryczną. Ogniwo składa się z dwóch elektrod, wykonanych z różnych substancji, oraz elektrolitu, znajdującego się między elektrodami. W ogniwie z doświadczenia 18. elektrolitem był sok cytryny.

Ogniwa wykorzystywane w praktyce (rys. 13.50) są zbudowane podobnie, ale z substancji pozwalających otrzymać większe natężenie prądu i zgromadzić większą energię. Wytwarzają one napięcie ok. 1,5 V. Aby uzyskać wyższe napięcie, łączymy ogniwa szeregowo, czyli budujemy baterię. Potocznie pojedyncze ogniwa także nazywa się bateriami.

Podstawową wadą ogniw i baterii zbudowanych w opisany sposób jest jednorazowość – po rozładowaniu trzeba je wyrzucić. Dlatego w samochodach, telefonach komórkowych, laptopach i wielu innych urządzeniach stosujemy akumulatory, czyli baterie, które można ponownie naładować.

Opór wewnętrzny ogniwa

Na ogniwach i bateriach jest podana wielkość wyrażona w woltach, nazywana napięciem baterii. Czy w rzeczywistości napięcie między biegunami baterii zawsze jest takie samo? Zbadamy to doświadczalnie.

Doświadczenie 19

1. Przygotuj ogniwo 1,5 V, woltomierz i dwie żarówki 1,2 V.
2. Zmierz napięcie pomiędzy biegunami baterii w sytuacji, gdy do baterii:
   – nie podłączono żadnego odbiornika (zdjęcie a),
   – jest podłączona żarówka (zdjęcie b),
   – są podłączone dwie żarówki połączone równolegle (zdjęcie c).
3. Porównaj wyniki pomiarów. Co zauważasz?

a)



b)



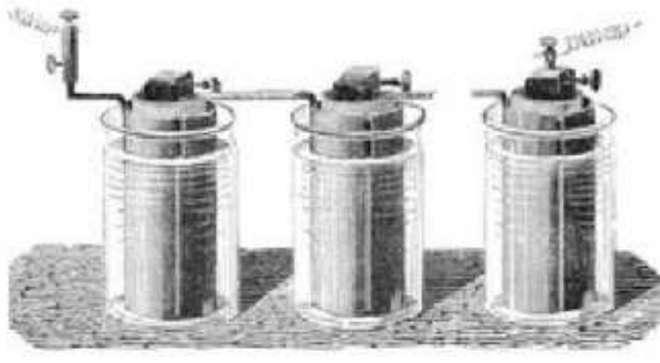
c)



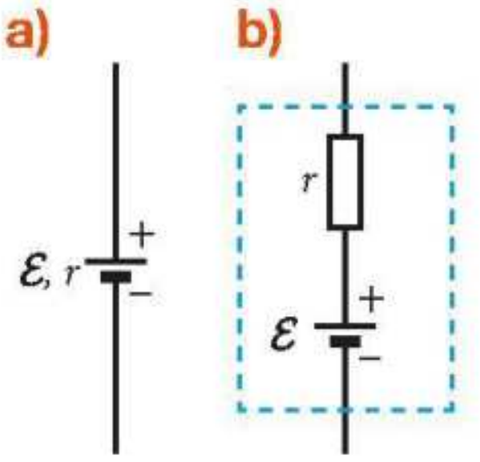
Napięcie między biegunami ogniwa zmniejszało się w miarę przepływu przez nie prądu o coraz większym natężeniu.
Z podobnymi spostrzeżeniami mamy do czynienia na co dzień. Gdy w samochodzie najpierw włączymy reflektory, a dopiero potem uruchamiamy silnik, zauważymy, że w czasie pracy rozrusznika światła przygasają. Oznacza to, że napięcie między biegunami akumulatora się zmniejsza – czyli nie jest stale równe 12 V, jak napisano na jego obudowie. Dlaczego?

A to ciekawe

W 1780 r. włoski biolog Luigi Galvani (czyt. luidżi galwani) w czasie sekcji żaby zauważył skurcz mięśnia martwego zwierzęcia w chwili, gdy dotykał je skalpelem. Od tego przypadkowego odkrycia rozpoczęły się badania, dzięki którym 20 lat później inny Włoch – Alessandro Volta zbudował pierwsze ogniwo elektryczne.



Opisane zjawiska są konsekwencją istnienia **oporu wewnętrznego źródła** napięcia. Mówiliśmy już, że prąd w obwodzie płynie nie tylko poza ogniwem, ale także w jego wnętrzu, w którym to przepływ ładunku również wiąże się z pewnym oporem.



Rys. **13.51.** Rzeczywiste źródło napięcia (a) i jego schemat zastępczy (b)

> Rzeczywiste źródło napięcia możemy przedstawić jako idealne źródło napięcia stałego połączone szeregowo z opornikiem (rys. 13.51).

To idealne źródło wytwarza niezmienne napięcie, tradycyjnie zwane **siłą elektromotoryczną** (w skrócie SEM, symbol $\mathcal{E}$), jednak w zależności od podłączonego oporu zewnętrznego spadek napięcia na oporze wewnętrznym może być różny, ponieważ zależy od natężenia prądu płynącego w obwodzie.

> Napięcie między biegunami baterii jest równe różnicy siły elektromotorycznej $\mathcal{E}$ i spadku napięcia na oporze wewnętrznym r:
>
> $$U = \mathcal{E} - Ir$$

Omówmy tę zależność na przykładzie. Weźmy baterię o sile elektromotorycznej $\mathcal{E} = 9$ V i oporze wewnętrznym $r = 1\ \Omega$. Jeśli z baterii czerpiemy prąd o natężeniu $I = 0{,}01$ A, to z definicji oporu możemy obliczyć spadek napięcia na jej oporze wewnętrznym:

$$U_{\text{wewnątrz}} = Ir$$

Wyniesie on zaledwie 0,01 V, a więc napięcie między biegunami baterii spadnie do 8,99 V. W sytuacji gdy z tej samej baterii czerpiemy prąd o natężeniu 1 A, w podobny sposób obliczymy, że spadek napięcia na jej oporze wewnętrznym wyniesie 1 V, czyli napięcie między biegunami tej baterii będzie wynosić zaledwie 8 V. Kiedy prąd w ogóle nie płynie, nie ma spadku napięcia. Możemy teraz podać definicję SEM.



Rys. **13.52.** Kiedy podłączamy woltomierz do nieobciążonej baterii, mierzymy jej SEM

> Siła elektromotoryczna jest równa napięciu między biegunami źródła napięcia, z którego nie pobieramy prądu.

Na schematach obwodów elektrycznych na ogół zaznaczamy rzeczywiste źródło napięcia (rys. 13.51a). Często w zadaniach warto traktować je tak, jakby składało się z idealnego źródła napięcia połączonego z opornikiem (rys. 13.51b).

SEM jako energia przypadająca na ładunek

Jak wiesz, napięcie między dwoma punktami to różnica potencjałów. Jest ono liczbowo równe różnicy energii potencjalnej ładunku 1 C między tymi punktami.

Jeśli SEM ogniwa wynosi 9 V, to ładunek 1 C na biegunie dodatnim baterii ma energię o 9 J większą niż na ujemnym. Zgodnie z zasadą zachowania energii podczas przepływu przez obwód wykonuje on pracę 9 J. Jest to możliwe, ponieważ w baterii 9 J energii chemicznej zmieniło się w energię elektryczną. Można więc powiązać siłę elektromotoryczną z energią.

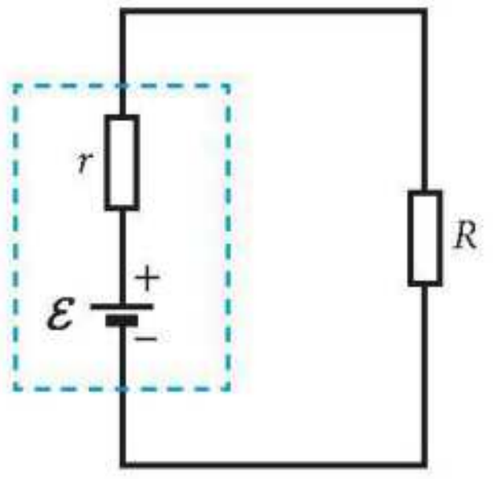
> SEM baterii to ilość energii zamienianej z energii chemicznej w elektryczną w przeliczeniu na 1 C przepływającego ładunku.

Skoro zarówno SEM, jak i napięcie oznaczają energię w przeliczeniu na 1 C, na czym polega różnica między tymi wielkościami?
Napięcie określa różnicę energii ładunku 1 C **między dwoma punktami A i B**, natomiast SEM określa energię potrzebną do przemieszczenia ładunku **po torze zamkniętym**, czyli od punktu A do tego samego punktu A.
W rozdziale o elektrostatyce zdefiniowaliśmy napięcie, natomiast o SEM nie mówiliśmy. Dlaczego? Gdy w polu elektrycznym ładunek przesuwa się po torze zamkniętym, praca wykonana podczas jego przesunięcia jest równa zero.

Natężenie prądu w obwodzie zamkniętym

Rozważmy obwód zamknięty zbudowany z ogniwa składającego się ze źródła o sile elektromotorycznej $\mathcal{E}$ i oporze wewnętrznym r oraz odbiornika energii o oporze zewnętrznym R (rys. 13.53).
Opór wewnętrzny źródła i opór zewnętrzny są połączone szeregowo, a więc ich opór zastępczy wynosi $R_z = R + r$.
Siła elektromotoryczna ogniwa jest równa napięciu idealnego źródła, z którego to ogniwo się składa, a więc zgodnie z zależnością $I = \frac{U}{R}$:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

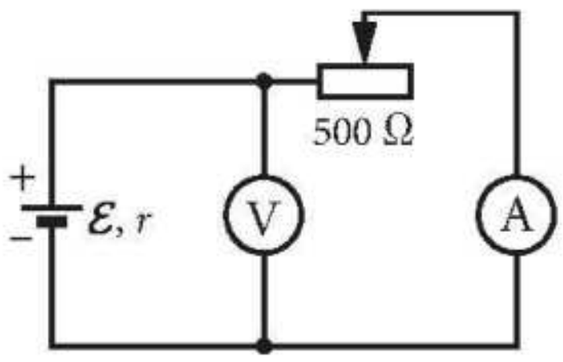


Rys. 13.53. Schemat obwodu z uwzględnieniem oporu wewnętrznego

Z powyższego wzoru wynika, że im mniejszy opór R podłączymy do ogniwa, tym większy prąd przez nie popłynie. Jednak nawet przy zwarciu biegunów (czyli dla $R = 0$) natężenie prądu nie rośnie w nieskończoność, a jedynie do maksymalnej wartości $\frac{\mathcal{E}}{r}$.

Wyznaczanie SEM i oporu wewnętrznego

Stosowane na co dzień ogniwa mają mały opór wewnętrzny, dlatego ich SEM można zmierzyć bezpośrednio za pomocą woltomierza. My jednak wykonamy doświadczenie, które pozwoli nam określić nie tylko SEM źródła, lecz także wyznaczyć jego opór wewnętrzny. Najlepiej, jeżeli wykonacie opisane doświadczenie w grupach, z których każda zbada innego rodzaju ogniwo.





Doświadczenie 20

1. Przygotuj ogniwo lub baterię, woltomierz i amperomierz oraz potencjometr o maksymalnym oporze 500 Ω.
2. Podłącz przewody do dwóch wyprowadzeń potencjometru. Za pomocą omomierza sprawdź, czy opór między nimi się zmienia. Jeśli nie – wybierz inne wyprowadzenia. Jeśli tak – ustaw potencjometr w taki sposób, aby opór był jak największy.
3. Zbuduj układ doświadczalny według schematu zamieszczonego obok.
4. Sporządź tabelę wartości U oraz I, w której będziesz zapisywać wartości odczytane z przyrządów. Wykonaj kilkanaście pomiarów – za każdym razem nieco zmniejszaj opór potencjometru. Gdy wielkości odczytane z mierników będą zbliżać się do granic zakresu pomiarowego, zwiększ zakres miernika albo zakończ pomiary.
   Uwaga. Nastawienie potencjometru na 0 Ω może spowodować uszkodzenie amperomierza!
5. Wykonaj wykres $U(I)$ z uwzględnieniem niepewności pomiarowej. Narysuj prostą przechodzącą przez prostokąty niepewności pomiarowych i odczytaj jej współczynnik kierunkowy oraz współrzędne punktu przecięcia prostej z osią pionową.
6. Wyprowadź wzór przedstawiający zależność $U(I)$, uwzględniający SEM ogniwa i jego opór wewnętrzny. Porównaj wyprowadzony wzór z równaniem narysowanej prostej. Podaj SEM i opór wewnętrzny badanego ogniwa.
7. Porównaj otrzymane wartości z wynikami kolegów badających inne ogniwa oraz z wartością SEM podaną przez producenta na obudowie ogniwa.

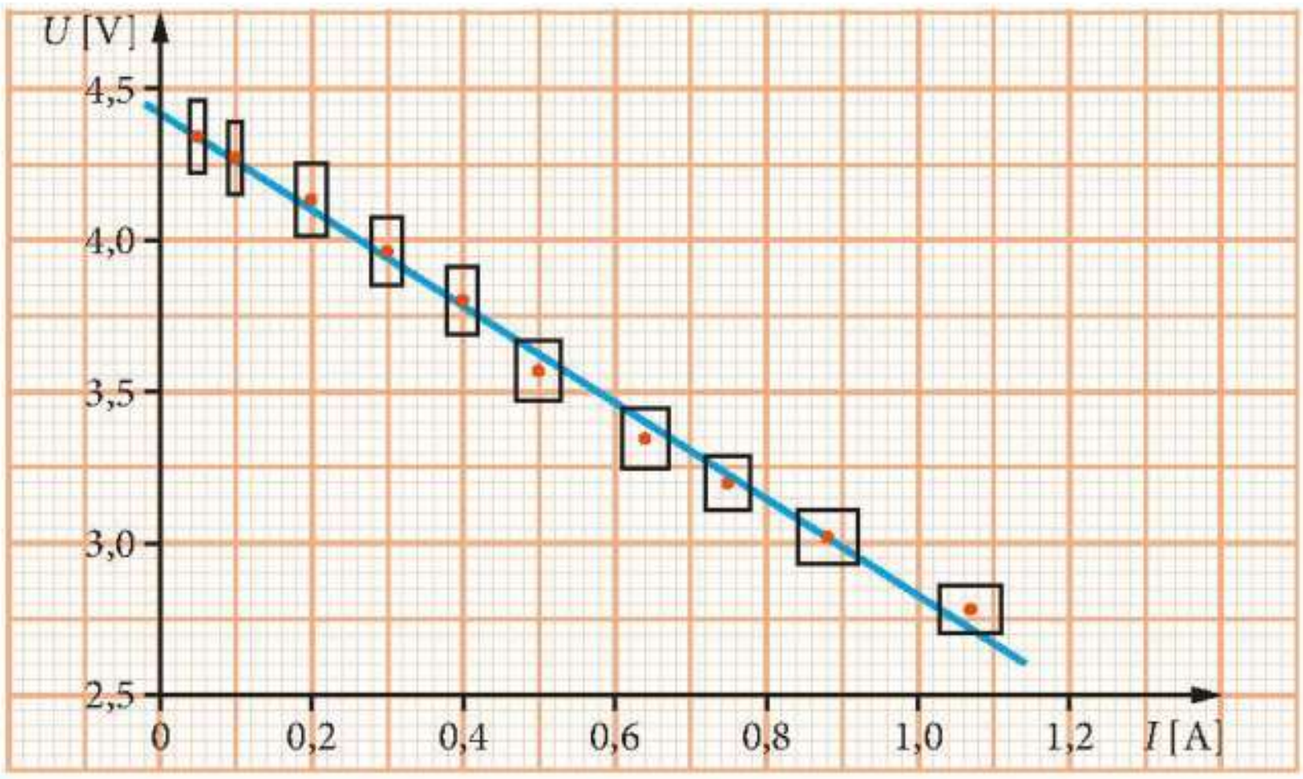
Analiza doświadczenia

W naszym doświadczeniu zmierzyliśmy napięcie i natężenie dla 10 ustawień potencjometru. Wyniki pomiarów zebraliśmy w tabeli 13.8. Niepewności pomiarowe obliczyliśmy taką samą metodą jak w doświadczeniu 15. na s. 172 (tym razem używaliśmy amperomierza klasy 2,5% + 1 oraz woltomierza klasy 2,5% + 1). Następnie obliczone niepewności dopisaliśmy do tabeli 13.8.

Tabela 13.8. Dane oraz niepewności pomiarowe dla doświadczenia 20.

I [A]	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,64	0,75	0,88	1,07
ΔI [A]	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
U [V]	4,34	4,27	4,13	3,96	3,80	3,56	3,34	3,20	3,02	2,78
ΔU [V]	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08

Po zaznaczeniu punktów pomiarowych wraz z niepewnościami w układzie współrzędnych poprowadziliśmy przez nie prostą. Wyznaczyliśmy jej współczynnik kierunkowy, który wyniósł $-1{,}6\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}$. Prosta przecina oś pionową w punkcie o współrzędnej 4,42 V (rys. 13.54 na następnej stronie).



Rys. **13.54.** Wykres zależności $U(I)$ na podstawie danych z tabeli 13.8

Aby móc zinterpretować uzyskane wyniki, odwołajmy się do wzoru na siłę elektromotoryczną:

$$\mathcal{E} = U + I \cdot r$$

Wyznaczmy z niego napięcie:

$$U = -I \cdot r + \mathcal{E}$$

Otrzymaliśmy w ten sposób zależność będącą funkcją liniową, której odpowiada narysowany przez nas wykres. Z zapisu funkcji widać, że jej współczynnikiem kierunkowym jest opór wewnętrzny źródła ze znakiem minus ($-r$), a wartość siły elektromotorycznej $\mathcal{E}$ odpowiada współrzędnej punktu przecięcia wykresu z osią pionową. W takim razie nasze wyniki oznaczają, że: $\mathcal{E} = 4{,}42$ V, $r = 1{,}6\ \Omega$.

$y = ax + b$
$U = -rI + \mathcal{E}$

Po tej lekcji powinieneś

- znać budowę ogniwa;
- posługiwać się pojęciami: siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny;
- obliczać prąd płynący w obwodzie z uwzględnieniem oporu wewnętrznego.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Do akumulatora o sile elektromotorycznej $\mathcal{E} = 12$ V i oporze wewnętrznym $r = 0{,}1\ \Omega$ podłączono opornik $R = 0{,}5\ \Omega$. Oblicz natężenie prądu płynącego przez układ, napięcie między biegunami akumulatora oraz moc wydzielającą się na oporniku.

Rozwiązanie

Obliczamy natężenie prądu dla obwodu zamkniętego (z uwzględnieniem oporu wewnętrznego źródła napięcia):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = 20\ \text{A}$$

Napięcie możemy obliczyć ze wzoru:

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

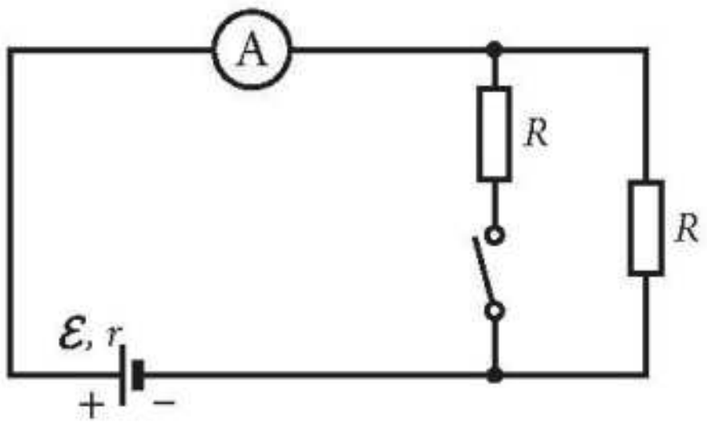
Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy: $U = 10$ V.
Moc wydzielająca się na oporniku wynosi: $P = I^2R$. Zatem:

$$P = (20\text{ A})^2 \cdot 0{,}5\ \Omega = 200\text{ W}$$

Odpowiedź: Natężenie prądu płynącego przez obwód to 20 A, napięcie między biegunami akumulatora wynosi 10 V, a wydzielana na oporniku moc to 200 W.

1. Bezpośrednie zwieranie (np. przewodnikiem o małym oporze) zacisków baterii jest niebezpieczne i może prowadzić do eksplozji baterii. Zastanów się dlaczego.

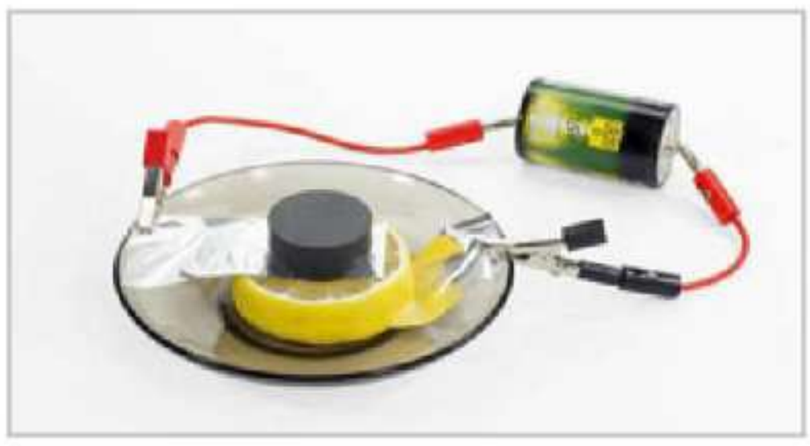
2. Oblicz wartość SEM ogniwa i jego opór wewnętrzny, jeżeli przy otwartym wyłączniku amperomierz włączony do obwodu elektrycznego przedstawionego na schemacie wskazał 0,5 A, a przy zamkniętym wyłączniku 0,9 A. Dwa oporniki włączone do obwodu mają tę samą wartość oporu, wynoszącą 10 Ω.



3. Gdy do dwóch stron plasterka cytryny przyłożymy elektrody z folii aluminiowej, nie powstanie między nimi napięcie. Taki układ może jednak być prostym modelem akumulatora. Wykonaj opisane doświadczenie.

a) Wytnij z cytryny plasterek o grubości ok. 1 cm, a z folii aluminiowej – dwa paski o wymiarach ok. 4 cm × 8 cm.

b) Połóż na talerzyku pasek folii, na nim plasterek cytryny, a na nim jeszcze jeden pasek folii. Całość przyciśnij (np. kubkiem) tak, aby paski dokładnie przylegały do cytryny, ale nie stykały się ze sobą.





c) Do pasków podłącz na 10 minut bieguny ogniwa D.

d) Odłącz baterię i zmierz napięcie między paskami folii.

4. Z artykułów spożywczych i przedmiotów codziennego użytku zbuduj baterię, która będzie zasilać zegarek elektroniczny.

Wskazówka. Kup najtańszy zegarek. Wyjmij z niego baterię i podłącz przewody do styków, których zwykle dotykają bieguny baterii. Następnie podłącz swoją baterię do tych przewodów. Zwróć uwagę na biegunowość!

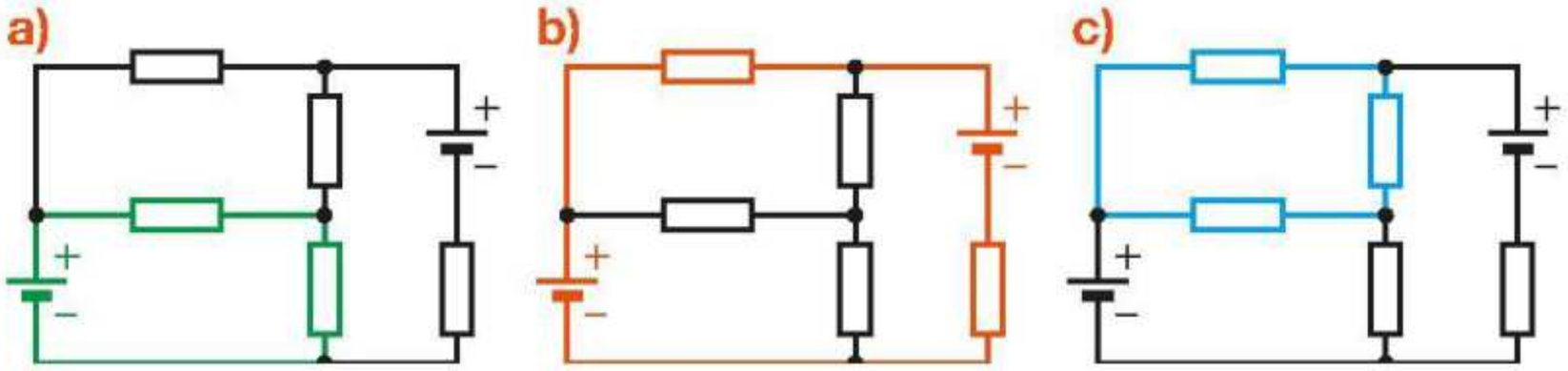
13.9. Drugie prawo Kirchhoffa

Przypomnij sobie

- Suma natężeń prądów wpływających do punktu rozgałęzienia (węzła) obwodu jest równa sumie natężeń prądów z niego wypływających (pierwsze prawo Kirchhoffa).
- Rzeczywiste źródło napięcia możemy przedstawić jako idealne źródło napięcia stałego połączone szeregowo z opornikiem.

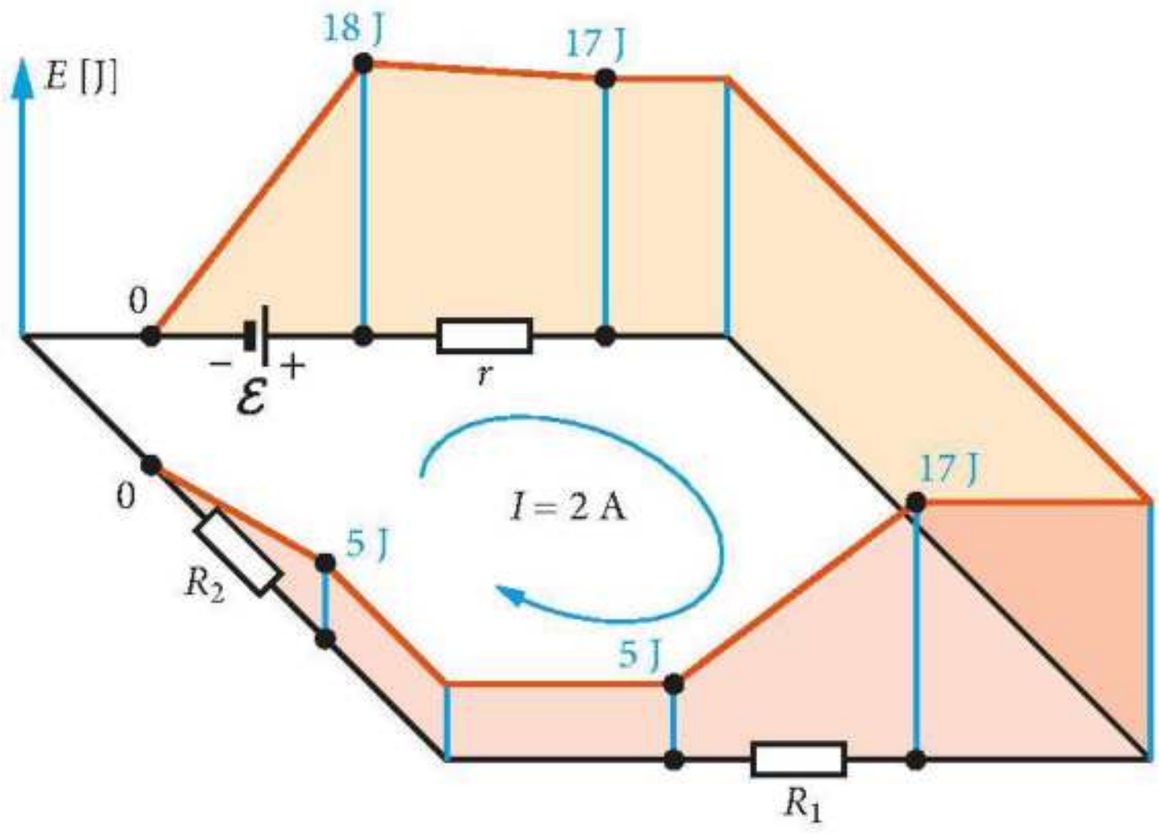
W lekcji 13.5 pokazywaliśmy, w jaki sposób skomplikowany obwód elektryczny można rozłożyć na połączenia równoległe i szeregowe.
Nie zawsze jest to jednak możliwe. W takim przypadku oprócz pierwszego prawa Kirchoffa należy również zastosować **drugie prawo Kirchhoffa**, które mówi, że:

> W każdym zamkniętym oczku obwodu suma spadków napięcia na odbiornikach energii (włącznie z oporami wewnętrznymi) jest równa sumie sił elektromotorycznych.



Rys. **13.55.** W skomplikowanym obwodzie elektrycznym można wyróżnić wiele oczek

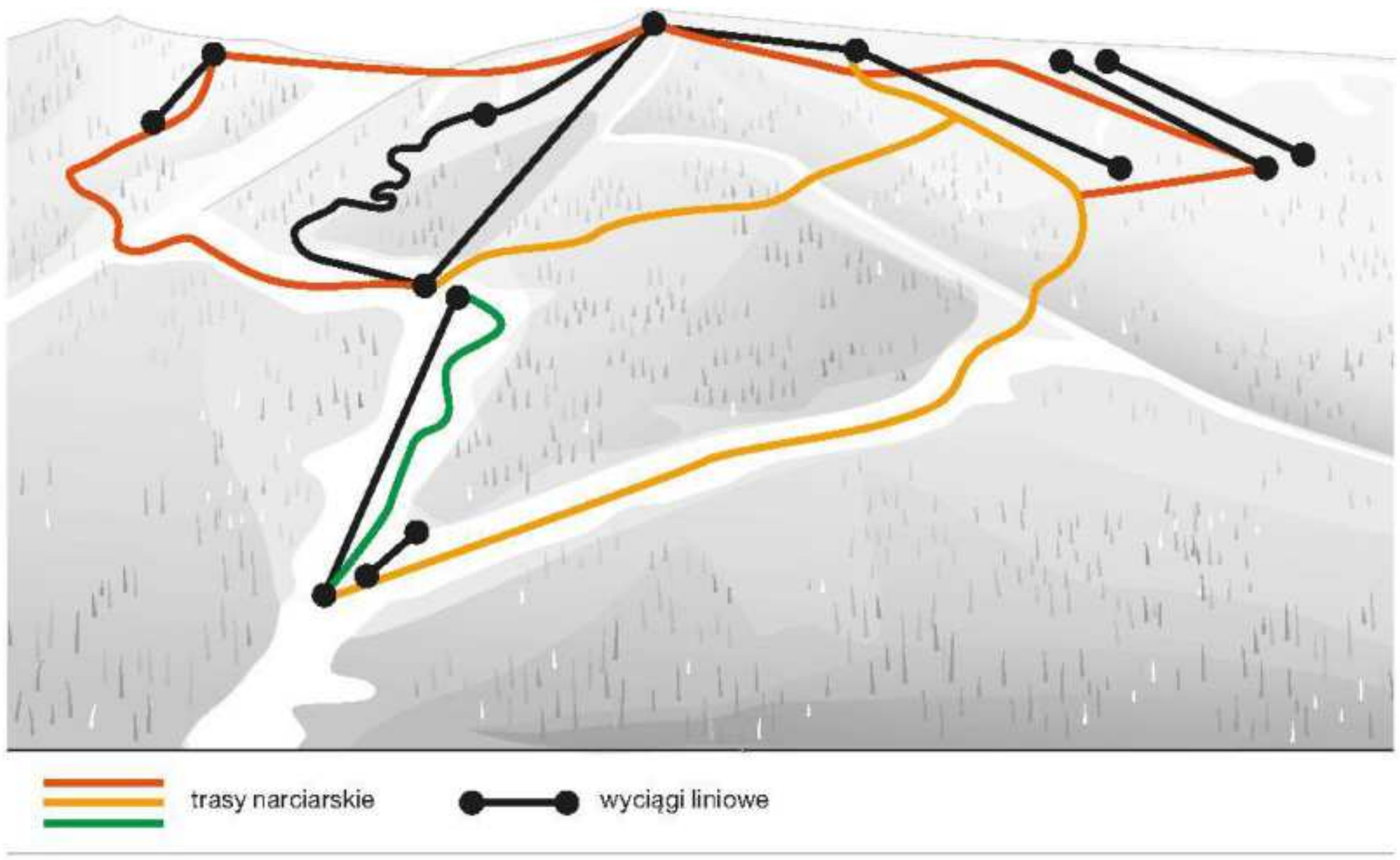
Oczkiem nazywamy fragment obwodu bez rozgałęzień, który tworzy zamkniętą pętlę (rozpoczyna się i kończy w tym samym węźle, rys. 13.55).
Pojęcie oczka obwodu wyjaśnia rysunek 13.55.



Rys. **13.56.** Zmiany energii ładunku 1 C podczas przepływu przez oczko obwodu z rysunku 13.55a

Zasada zachowania energii, cz. I s. 201
W układzie izolowanym całkowita energia wszystkich ciał nie ulega zmianie.

Drugie prawo Kirchhoffa jest szczególnym przypadkiem zasady zachowania energii. Ładunek traci energię, kiedy przepływa przez opornik, a zyskuje ją w źródle napięcia. Jeśli ładunek okrążył oczko, suma wszystkich zysków i strat jest równa zero.
Można to porównać do sytuacji narciarza w dużej stacji narciarskiej (rys. 13.57). Narciarz może wybrać wiele tras. Jednak gdy powróci do miejsca, z którego wyruszył, stwierdzi, że przemieścił się wyciągami o tyle samo metrów n.p.m. w górę, ile zjechał na nartach.

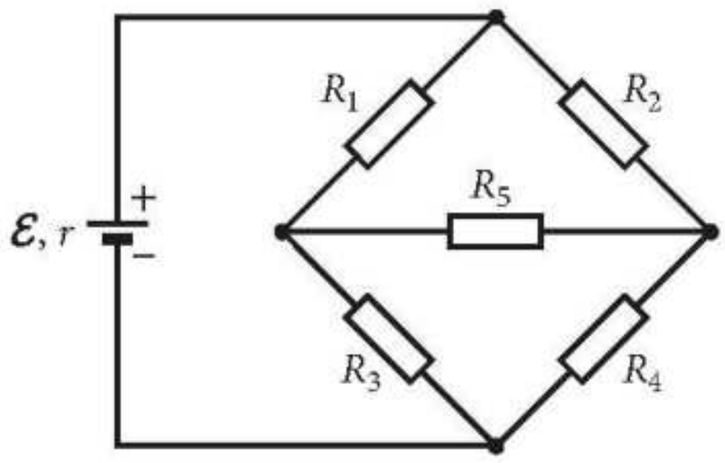


Rys. **13.57.** Zmiany energii ładunku w obwodzie elektrycznym można porównać do zmian energii potencjalnej narciarza przemieszczającego się w obrębie stacji narciarskiej

Jest to porównanie nie tylko obrazowe, lecz także uzasadnione fizycznie – wysokość n.p.m. jest proporcjonalna do energii potencjalnej grawitacji, podobnie jak przyrost lub spadek napięcia są proporcjonalne do zmiany energii potencjalnej w polu elektrycznym.

Zastosowanie praw Kirchhoffa

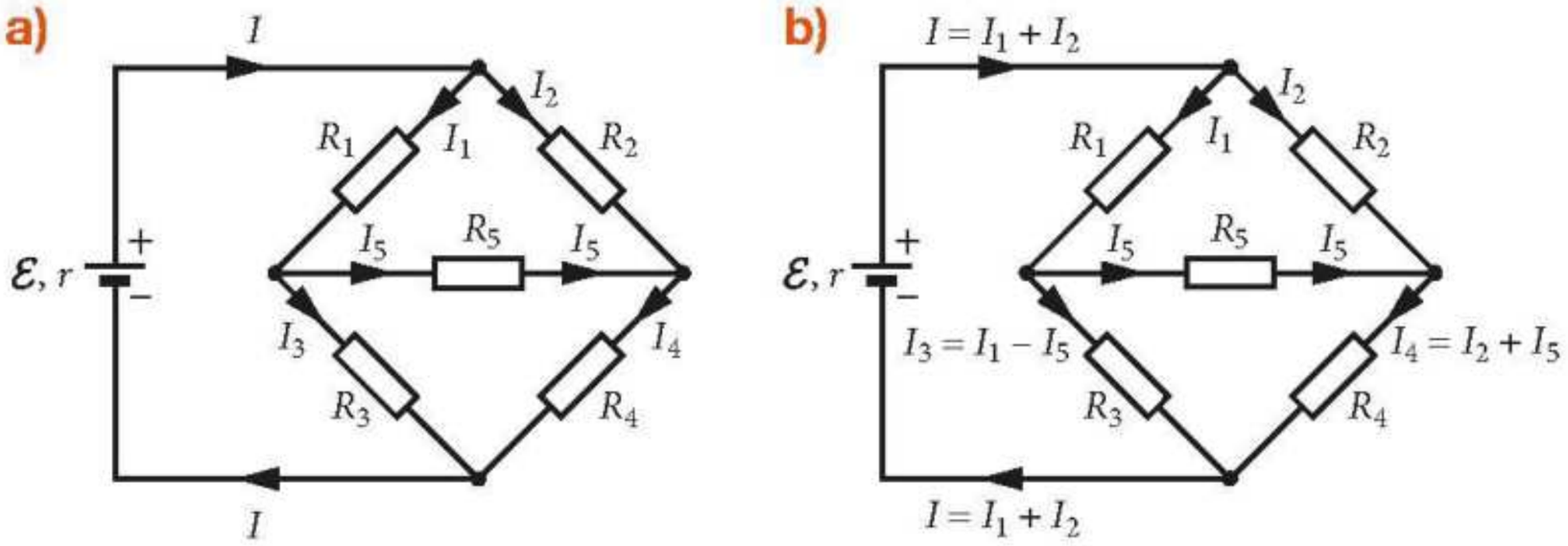
Zastosowanie praw Kirchhoffa przedstawimy na przykładzie obwodu z rysunku 13.58.



$R_1 = 20\ \Omega$
$R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 10\ \Omega$
$\mathcal{E} = 9\ \mathrm{V}$
$r = 2\ \Omega$

Rys. **13.58.** Przykład schematu obwodu, którego nie da się uprościć jedynie za pomocą połączeń równoległych i szeregowych

Na początek zaznaczmy na schemacie natężenia prądu: przez opornik R_1 płynie prąd o natężeniu I_1, przez opornik R_2 – prąd o natężeniu I_2 itd. Nasz schemat wygląda teraz tak, jak pokazano na rysunku 13.59a.



Rys. **13.59.** Obwód z zaznaczonymi kierunkami przepływu prądu

Zaznaczmy, w którą stronę płynie prąd przez opornik R_5. Ponieważ nie jesteśmy w stanie odczytać tego ze schematu, musimy przyjąć pewne założenie, to znaczy sami musimy obrać kierunek przepływu prądu. Zaznaczamy strzałkę skierowaną w wybraną przez nas stronę i wykonujemy obliczenia. Jeżeli otrzymamy ujemne natężenie I_5, będzie to znaczyć, że prąd w oporniku R_5 płynie w kierunku przeciwnym do obranego przed obliczeniami.

Z pierwszego prawa Kirchhoffa możemy zapisać, że

Pierwsze prawo Kirchhoffa s. 165

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2 \\ I_3 = I_1 - I_5 \\ I_4 = I_2 + I_5 \end{cases}$$

Dalsze obliczenia będą prostsze, jeśli uwzględnimy zapisane równości w oznaczeniach na rysunku. Otrzymamy wówczas schemat w postaci przedstawionej na rysunku 13.59b. Zwróćmy uwagę, że w tym momencie naszych rozważań wykorzystaliśmy już w pełni pierwsze prawo Kirchhoffa. Jak widać, okazało się ono niewystarczające.

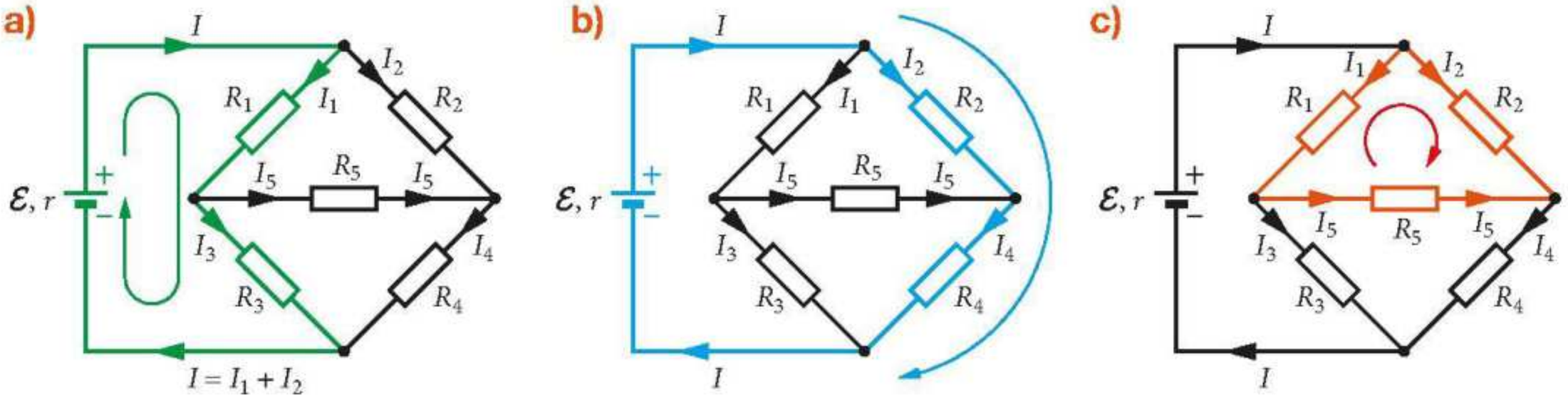
Musimy więc skorzystać z drugiego. Pozostały nam trzy wielkości do obliczenia: I_1, I_2 oraz I_5. Jak wiesz z lekcji matematyki, do wyznaczenia trzech niewiadomych potrzebny jest układ trzech równań. Zapiszmy więc równania opisujące poszczególne oczka obwodu, widoczne na rysunku 13.60 na następnej stronie.

Aby prawidłowo zapisać równania spadków napięć na poszczególnych elementach obwodu, należy dla każdego oczka zaznaczyć kierunek, w którym będziemy je obchodzić. Wybór kierunku jest dowolny. Ważne, aby nie zmieniać go w trakcie obliczeń, ponieważ od niego zależy, czy wielkości występujące w równaniu będą zapisywane ze znakiem plus czy minus. Jeśli kierunek obchodzenia oczka dla danego odbiornika energii jest przeciwny do przyjętego przez nas kierunku przepływu prądu, spadek napięcia na tym elemencie należy zapisać ze znakiem minus. Pokażemy to w dalszej części omawianego przykładu.

Uważaj na znaki plus i minus przy zapisywaniu równania!

Analogicznie jest z siłą elektromotoryczną (SEM). Jeśli w czasie obiegu oczka zgodnie z przyjętym kierunkiem przechodzimy przez źródło

napięcia wstecz, czyli od bieguna dodatniego do ujemnego, SEM źródła uwzględniamy ze znakiem minus.



Rys. **13.60.** Trzy oczka obwodu wybrane do obliczeń

My przyjęliśmy zasadę, że każde z oczek obchodzimy zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Otrzymujemy odpowiednio równania:

- dla oczka zaznaczonego na rysunku 13.60a

$$\mathcal{E} = \underbrace{I_1 R_1}_{\text{spadek napięcia na } R_1} + \underbrace{(I_1 - I_5)R_3}_{\text{spadek napięcia na } R_3} + \underbrace{(I_1 + I_2)r}_{\text{spadek napięcia na oporze wewnętrznym baterii}}$$

- dla oczka zaznaczonego na rysunku 13.60b

$$\mathcal{E} = \underbrace{I_2 R_2}_{\text{spadek napięcia na } R_2} + \underbrace{(I_2 + I_5)R_4}_{\text{spadek napięcia na } R_4} + \underbrace{(I_1 + I_2)r}_{\text{spadek napięcia na oporze wewnętrznym baterii}}$$

- dla oczka zaznaczonego na rysunku 13.60c

$$\underbrace{0}_{\text{w tym oczku nie ma źródeł napięcia}} = I_2 R_2 - \underbrace{I_5 R_5 - I_1 R_1}_{\text{oporniki } R_5 \text{ i } R_1 \text{ obchodzimy przeciwnie do kierunku przepływającego przez nie prądu – spadki napięć wstawiamy do równania ze znakiem minus}}$$

Zapiszmy więc układ trzech równań z drugiego prawa Kirchhoffa:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = I_1 R_1 + (I_1 - I_5)R_3 + (I_1 + I_2)r \\ \mathcal{E} = I_2 R_2 + (I_2 + I_5)R_4 + (I_1 + I_2)r \\ 0 = I_2 R_2 - I_5 R_5 - I_1 R_1 \end{cases}$$

Podstawmy do naszych równań dane liczbowe. Dla uproszczenia pomijamy jednostki. Otrzymujemy:

$$\begin{cases} 9 = I_1 \cdot 20 + (I_1 - I_5) \cdot 10 + (I_1 + I_2) \cdot 2 \\ 9 = I_2 \cdot 10 + (I_2 + I_5) \cdot 10 + (I_1 + I_2) \cdot 2 \\ 0 = I_2 \cdot 10 - I_5 \cdot 10 - I_1 \cdot 20 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 9 = 32I_1 + 2I_2 - 12I_5 \\ 9 = 2I_1 + 22I_2 + 10I_5 \\ I_5 = I_2 - 2I_1 \end{cases}$$

Z układu równań obliczamy natężenia prądów:

$$I_1 \approx 0{,}237,\ I_2 \approx 0{,}414,\ I_5 \approx -0{,}060$$

Ponieważ opór wyrażaliśmy w omach, a SEM w woltach, otrzymujemy natężenie w amperach. Tak więc:

$$I_1 = 237\ \text{mA}, I_2 = 414\ \text{mA}, I_5 = -60\ \text{mA}$$

Po obliczeniu natężenia prądu płynącego przez opornik R_5 otrzymaliśmy wynik ze znakiem minus, co oznacza, że przez ten opornik prąd płynie w kierunku przeciwnym, niż zostało to zaznaczone na rysunku. Z równań zapisanych na początku przykładu dla pierwszego i drugiego prawa Kirchhoffa bez problemów możemy obliczyć natężenia prądu płynącego przez pozostałe oporniki oraz przez ogniwo, spadki napięć i moc wydzieloną na poszczególnych elementach obwodu.

Po tej lekcji powinieneś

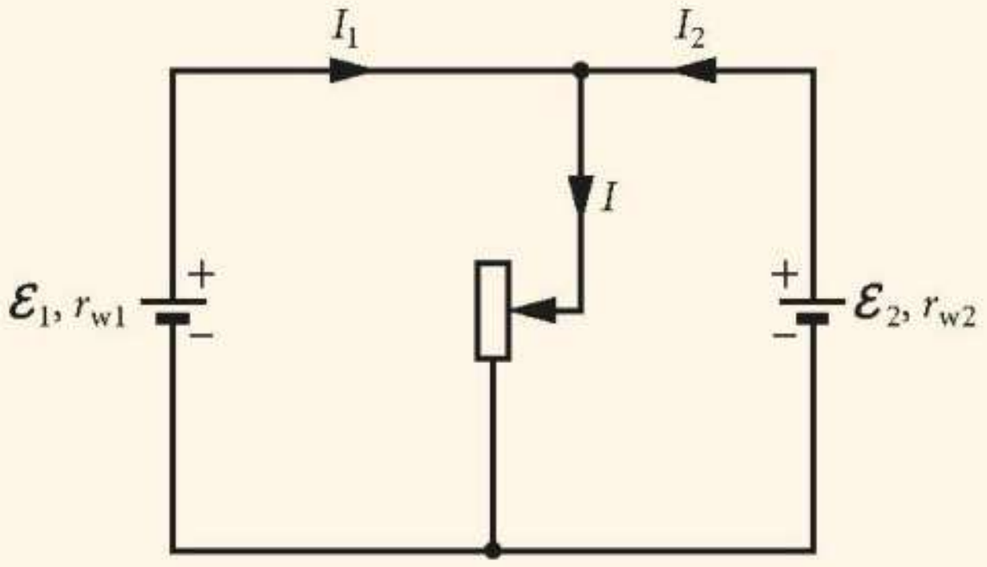
- znać prawa Kirchhoffa;
- wiedzieć, z jakich podstawowych zasad fizyki one wynikają;
- stosować prawa Kirchhoffa w obliczeniach dotyczących obwodów elektrycznych.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Dwa akumulatory o parametrach: $\mathcal{E}_1 = 9$ V, $r_{w1} = 3\ \Omega$ oraz $\mathcal{E}_2 = 6$ V, $r_{w2} = 2\ \Omega$, i potencjometr połączono jak na rysunku. Niech R będzie oporem między włączonymi do obwodu końcówkami potencjometru. Za pomocą programu komputerowego narysuj wykresy przedstawiające zależność prądów płynących w obwodzie (I_1, I_2 oraz I) od oporu R. Zinterpretuj uzyskane wykresy.

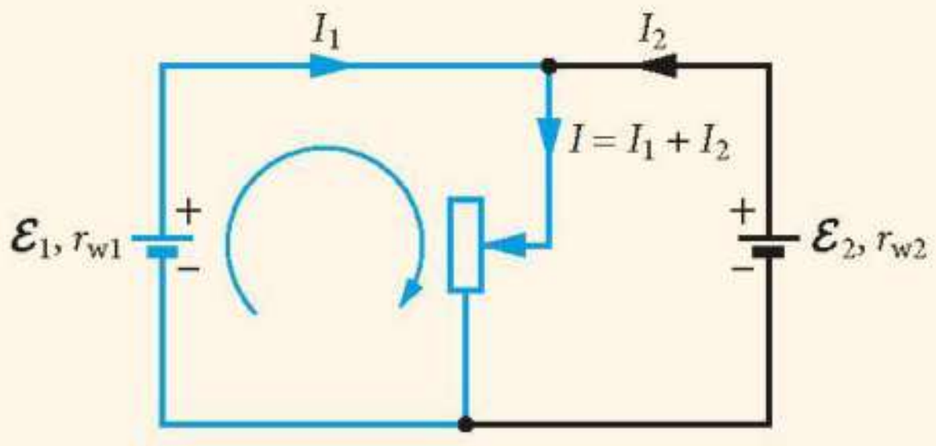


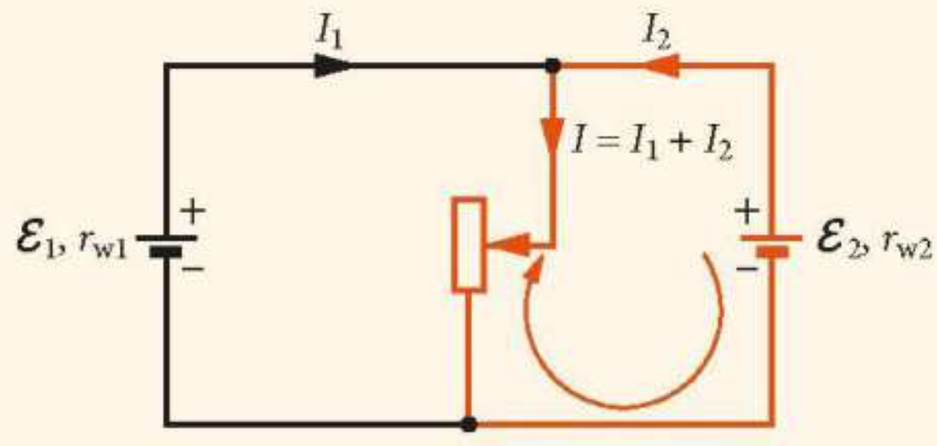
Rozwiązanie

Zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa $I = I_1 + I_2$.

Zapiszmy drugie prawo Kirchhoffa dla oczek obwodu zaznaczonych na rysunkach poniżej.

$$\begin{cases} \mathcal{E}_1 = I_1 r_{w1} + (I_1 + I_2)R \\ -\mathcal{E}_2 = -I_2 r_{w2} - (I_1 + I_2)R \end{cases}$$





Ponieważ wykresy będziemy wykonywać dla konkretnych wartości liczbowych, możemy dla uproszczenia już teraz podstawić do zapisanego układu równań wartości liczbowe podane w treści zadania (wyrażone w jednostkach układu SI).

$$\begin{cases} 9 = 3I_1 + (I_1 + I_2)R \\ -6 = -2I_2 - (I_1 + I_2)R \end{cases}$$

Z układu równań wyznaczamy I_1 i I_2. Po przekształceniach otrzymujemy:

$$I_1 = \frac{18+3R}{6+5R} \quad \text{i} \quad I_2 = \frac{18-3R}{6+5R}$$

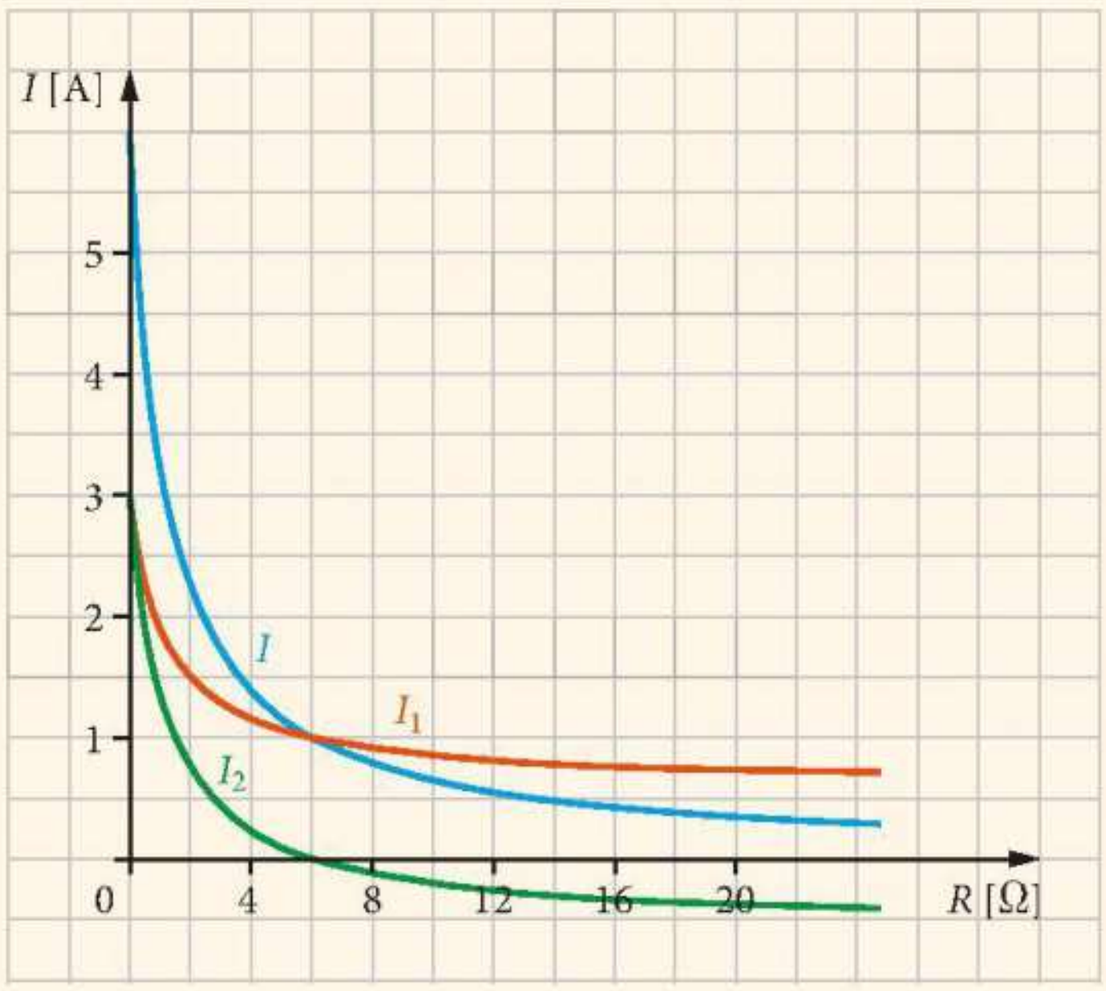
Stąd:

$$I = I_1 + I_2 \rightarrow I = \frac{36}{6+5R}$$

Zapisujemy równania w programie komputerowym do generowania wykresów i otrzymujemy wynik taki jak na rysunku obok.

Możemy z niego odczytać, że wszystkie natężenia prądu maleją, gdy zwiększa się R.

Jednak I_1 oraz $I_1 + I_2$ są stale dodatnie, natomiast I_2 osiąga dla $R = 6\ \Omega$ wartość zero, a następnie nadal maleje, co oznacza, że prąd zaczyna płynąć w przeciwnym kierunku.



Uwaga:

Aby wyjaśnić to zjawisko, wyobraźmy sobie, że odłączamy akumulator 6 V. Otrzymujemy wówczas zasilacz, którego napięcie można regulować za pomocą potencjometru.

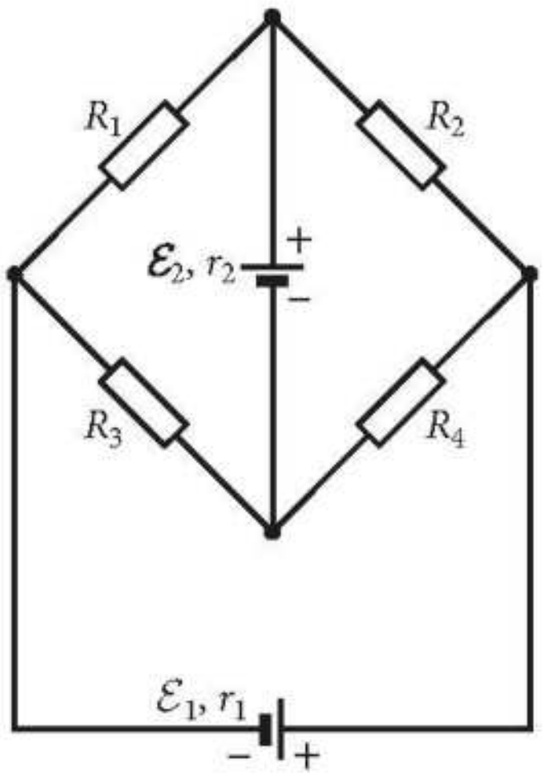
W obwodzie tego zasilacza stale płynie prąd (o jednakowym natężeniu w całym obwodzie), a napięcie na jego wyjściu jest równe spadkowi napięcia U na potencjometrze. Spadek napięcia jest proporcjonalny do oporu, a ponieważ dla $R = 6\ \Omega$ opór potencjometru stanowi $\frac{2}{3}$ całego oporu w obwodzie, napięcie na potencjometrze ma wartość $\frac{2}{3}$ SEM akumulatora, czyli $U = 6$ V. Dla $R > 6\ \Omega$ napięcie $U > 6$ V, a dla $R < 6\ \Omega$ napięcie $U < 6$ V.

Gdy do takiego zasilacza dołączymy akumulator 6 V, to:

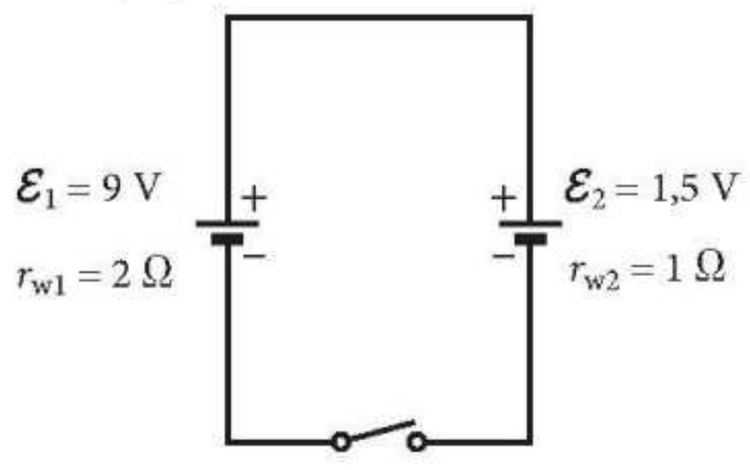
- dla $R > 6\ \Omega$ napięcie zasilacza będzie większe od SEM dołączonego akumulatora i zasilacz będzie ładował akumulator,
- dla $R < 6\ \Omega$ napięcie zasilacza będzie za niskie i dołączony akumulator będzie się rozładowywać,
- dla $R = 6\ \Omega$ – przypadek graniczny: akumulator ani się nie rozładowuje, ani nie ładuje.

1*. Wyznacz natężenie prądu płynącego przez poszczególne oporniki oraz przez poszczególne baterie dla następujących danych:

$\mathcal{E}_1 = 9\ \text{V}, r_1 = 3\ \Omega, \mathcal{E}_2 = 6\ \text{V}, r_2 = 2\ \Omega, R_1 = 46\ \Omega,$
$R_2 = 15\ \Omega, R_3 = 20\ \Omega, R_4 = 74\ \Omega$

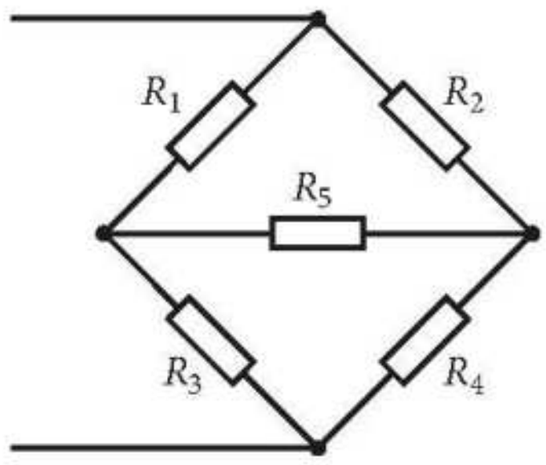


2. Oblicz moc, jaka wydzieli się na oporze wewnętrznym każdej z baterii po włączeniu wyłącznika w obwodzie przedstawionym na rysunku. Wyjaśnij, dlaczego wyniku obliczeń nie należy sprawdzać doświadczalnie.



Wskazówka. Niezależnie od tego, w którą stronę obiegasz oczko, SEM jednej z baterii musisz przyjąć ze znakiem plus, a drugiej – ze znakiem minus.

3. Na podstawie wyników ze s. 204–206 oblicz opór zastępczy układu przedstawionego na rysunku.



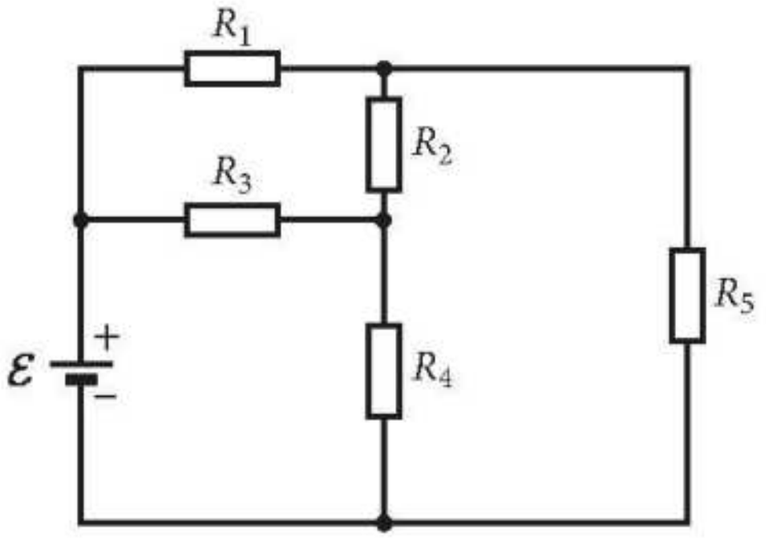
$R_1 = 20\ \Omega$
$R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 10\ \Omega$

4. Gdy zewrzemy bieguny ogniwa krótkim i grubym miedzianym przewodem, popłynie prąd o natężeniu 3 A. Oblicz natężenie prądu, który popłynie, gdy zewrzemy dwa takie ogniwa, połączone:

a) równolegle,

b) szeregowo.

5*. Ogniwo o sile elektromotorycznej 9 V i bardzo małym oporze wewnętrznym oraz pięć oporników o oporze 1 kΩ połączono jak na schemacie. Oblicz natężenie prądu i spadek napięcia na oporniku R_3 i R_5.



Energia na czarną godzinę

Baterie – duże i małe, konstruowane na dziesiątki sposobów – będą przebojem technologicznym (i ekonomicznym) najbliższych dekad. Ziemia zmieni się w wielki magazyn prądu.

Akumulator dla Berlina

Baterie litowo-jonowe (lub, jak kto woli, akumulatory) zdominowały dziś świat. Są lekkie, wygodne i można je łatwo łączyć w duże zestawy, tworząc magazyny energii wystarczającej do zasilania małego miasta albo stabilizującej pracę dużej elektrowni wiatrowej. Z powodu tych zalet stały się powszechne, a w konsekwencji – tanie w produkcji. Ale naukowcy pracują też nad innymi technologiami. Jedną z nich są baterie (akumulatory) przepływowe [...]

Zasada działania baterii przepływowej jest w sumie dość prosta. Niemal wszystko zawiera się tu w słowie „przepływ", od którego wzięła ona nazwę. Wyobraźmy sobie dwa zbiorniki z cieczą umieszczone obok siebie, ale zarazem odizolowane. Dopóki owe ciecze (elektrolity) są nieruchome, nic się nie dzieje. Lecz kiedy zostaną wprawione w ruch, ich przepływ generuje prąd. Dzieje się tak, choć każda z cieczy porusza się we własnym zbiorniku. Tajemnica tkwi w oddzielającej je półprzepuszczalnej membranie, która nie pozwala na wymieszanie się obu cieczy, ale zarazem umożliwia (do spółki ze specjalnym ogniwem) zamianę energii chemicznej, zmagazynowanej w elektrolitach, w energię elektryczną. Takie baterie mogłyby mieć olbrzymie rozmiary, a tym samym naprawdę wielką pojemność [...]

Bateria przepływowa wytrzymuje znacznie większą liczbę pełnych cykli ładowania i rozładowywania (ponad 10 tys.), a więc może służyć nawet przez 20 lat bez znaczącego obniżenia sprawności [...] Poza tym pojemność baterii przepływowej można łatwo zwiększyć dzięki wymianie zbiorników z elektrolitem na większe [...]



Ogromne zestawy baterii litowo-jonowych to jeden z pomysłów na zapewnienie stabilności dostaw energii również w nagłych wypadkach, np. po klęskach żywiołowych

Pomysł Niemców polega na wykorzystaniu dwóch kawern do zbudowania akumulatora przepływowego o mocy ponad 120 MW i pojemności 700 MWh. Miałby on zwiększyć bezpieczeństwo energetyczne Berlina. W razie awarii sieci energetycznej obejmującej całe trzymilionowe miasto (co raczej mało prawdopodobne) podziemny akumulator wystarczyłby do zasilania mniej więcej przez godzinę [...]

Baterie z bakterii albo zwinięte w rulon

Akurat niestandardowych pomysłów na magazynowanie energii nie brakuje. Niektóre z nich to kompletna futurologia, co nie znaczy, że nie prowadzi się nad nimi badań. Weźmy np. baterię, której właściwie nigdy nie trzeba będzie wymieniać, ponieważ po 200 tys. rozładowań będzie tak sprawna, jakby była nowa. Namiastkę takiego ogniwa stworzyli naukowcy z University of California w Irvine. Wykorzystali do tego celu nanowłókna wykonane ze złota. Badania nad bateriami z nanowłókien z różnych pierwiastków (krzemu, germanu) oraz tlenków metali przejściowych zaczęto prowadzić, aby zwiększyć powierzchnię jednej z elektrod. Jak wiadomo, im większa powierzchnia elektrody, tym większa pojemność baterii [...]

Tymczasem naukowcy szukają kolejnych, jeszcze bardziej niestandardowych dróg. Ostatnio bawią się materiałami pozwalającymi na tworzenie baterii elastycznych i cienkich jak kartka papieru [...] Trwają też próby budowania baterii ładowanych falami radiowymi, ultradźwiękami i zwykłymi dźwiękami, rosą, a nawet... moczem. W tym ostatnim przypadku zastosowano mikrobiologiczne ogniwo paliwowe, czyli bakterie, które – w uproszczeniu mówiąc – konsumują mocz, a przy okazji wytwarzają prąd [...] I kto powiedział, że technika i natura nie mogą żyć ze sobą w zgodzie?

Andrzej Hołdys
(skrócona wersja artykułu opublikowanego w czasopiśmie „Wiedza i Życie" 2017, nr 10)

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Wyjaśnij swoimi słowami znaczenie użytych w tekście wyrazów:
elektrolit, *kawerna*, *namiastka*, *nanowłókno*, *elektroda*

2. W pierwszym akapicie napisano, że zestaw baterii litowo-jonowych wystarcza do stabilizowania pracy elektrowni wiatrowej. Co to dokładnie znaczy? Dlaczego elektrownia wiatrowa wymaga stabilizowania? Jakie inne elektrownie także wymagają stabilizowania?

3. Porównaj energię zgromadzoną w akumulatorze samochodowym (48 Ah przy napięciu 12 V) z energią, jaka ma być zgromadzona w akumulatorze dla Berlina. Ile razy większa jest ta druga wielkość?

4. Wyjaśnij, dlaczego zastosowanie nanowłókien pozwala zwiększyć powierzchnię elektrod.

5. W drugiej części tekstu mowa o nanowłóknach wykonanych z trzech pierwiastków. Wymień te pierwiastki. Dowiedz się, które z nich są przewodnikami, a które półprzewodnikami.

Podsumowanie Prąd stały

- **Prąd elektryczny** to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych: swobodnych elektronów, jonów lub równocześnie jonów i elektronów.
  - Gdy od atomu lub cząsteczki odłączą się elektrony (jeden lub więcej), otrzymujemy **jon dodatni**; gdy przyłączą się dodatkowe elektrony – otrzymujemy **jon ujemny**.
  - Przyczyną przepływu prądu elektrycznego jest **pole elektryczne**.

    Prąd płynie zgodnie ze zwrotem linii pola elektrycznego, czyli z punktów o wyższym potencjale do punktów o niższym potencjale, np. od dodatniego do ujemnego bieguna baterii. Nośniki prądu o ujemnym ładunku (elektrony, jony ujemne) poruszają się w przeciwną stronę.
  - **Dryf** elektronów to uporządkowany ruch elektronów. W rzeczywistości elektrony wykonują chaotyczne ruchy, ale ich wypadkowy ruch jest ukierunkowany i średnio wszystkie przemieszczają się w określonym kierunku.
  - **Natężenie prądu** I: $$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

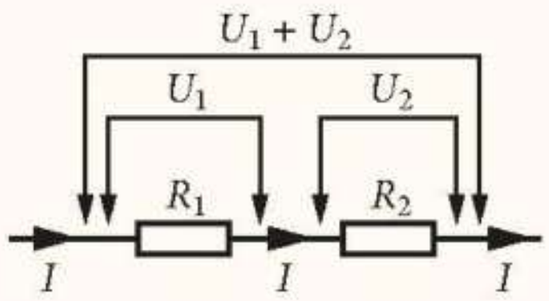
  gdzie ΔQ jest ładunkiem przepływającym w czasie Δt przez przekrój poprzeczny przewodnika w wybranym miejscu.
  - Jednostką natężenia prądu jest amper: $1\,\text{A} = \frac{1\,\text{C}}{1\,\text{s}}$.

- Symbole elektryczne

Przewód	Skrzyżowanie przewodów bez połączenia	Połączenie przewodów	Ogniwo lub bateria	Żarówka	Opornik	Wyłącznik	Kondensator
							

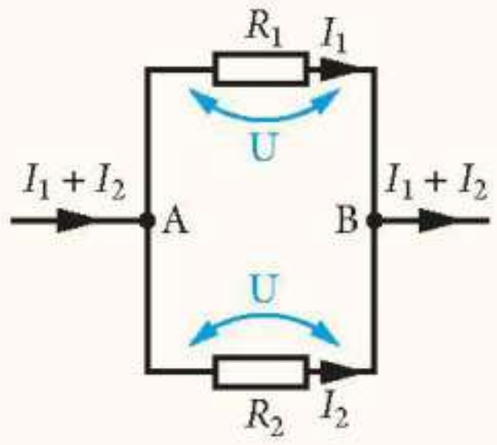
- **Połączenie szeregowe** – przez wszystkie elementy w takim połączeniu płynie prąd o takim samym natężeniu, natomiast napięcia są sumowane.
  - **Opór zastępczy** oporników połączonych szeregowo to:

$$R_z = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$$

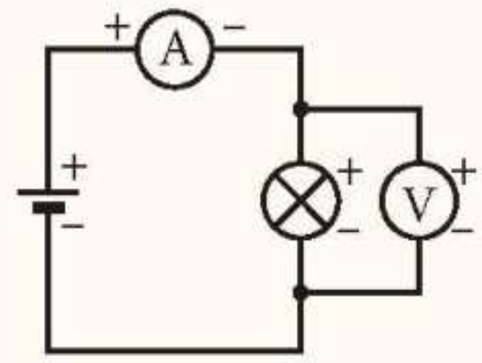


- **Połączenie równoległe** – napięcie na wszystkich połączonych elementach jest jednakowe. Natomiast suma natężeń prądów po rozdzieleniu jest równa natężeniu prądu przed rozdzieleniem.
  - **Opór zastępczy** oporników połączonych równolegle wyznaczamy z zależności:

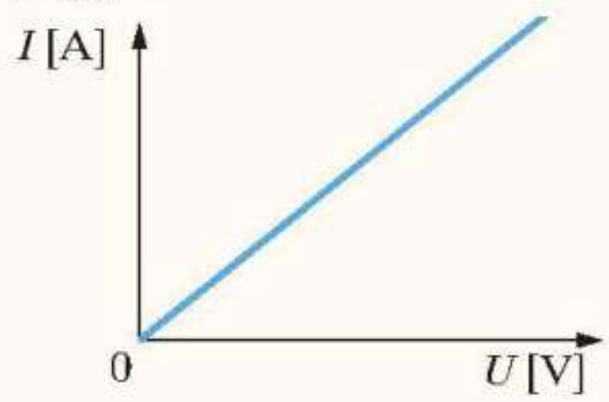
$$\frac{1}{R_z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$



- **Woltomierz** podłączamy do obwodu równolegle, a **amperomierz** podłączamy do obwodu szeregowo.



- **Prawo Ohma**: Natężenie prądu płynącego przez przewodnik jest wprost proporcjonalne do napięcia między jego końcami: $I \sim U$.



  - Prawo Ohma obowiązuje tylko dla przewodników w stałej temperaturze.

- **Opór elektryczny** R to iloraz napięcia U między końcami przewodnika i natężenia I płynącego prądu:

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

Jednostką oporu elektrycznego jest **om**: $1\,\Omega = \frac{1\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{A}}$.

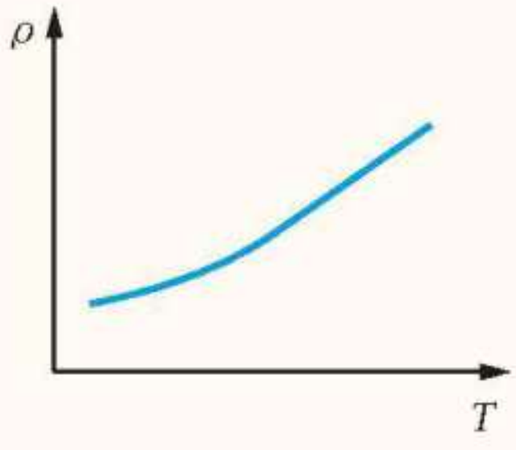
- **Opór przewodnika**:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

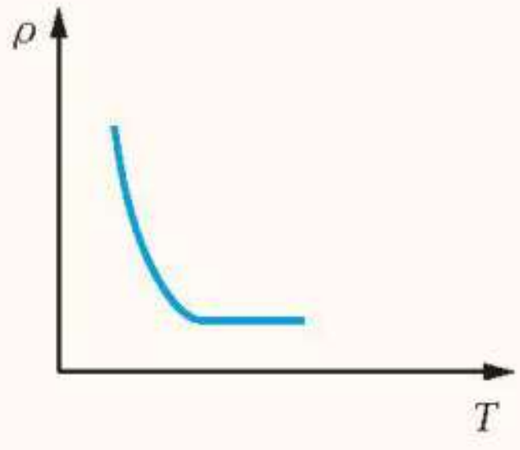
gdzie: ρ – **opór właściwy**, $[\rho] = 1\,\Omega \cdot \mathrm{m}$, l – długość przewodnika, S – pole przekroju poprzecznego przewodnika.

  - Ze względu na opór właściwy rozróżniamy: **przewodniki** o oporze rzędu $10^{-8}\,\Omega \cdot \mathrm{m}$, dobrze przewodzące prąd elektryczny; **izolatory** o oporze ponad $10^{11}\,\Omega \cdot \mathrm{m}$, nieprzewodzące prądu (ściślej: przewodzące bardzo słabo); **półprzewodniki** o oporze pomiędzy wartościami dla przewodników i izolatorów, który może się znacznie zmieniać pod wpływem czynników zewnętrznych

- **Zależność oporu właściwego od temperatury**



Opór przewodników rośnie wraz ze wzrostem temperatury



Opór półprzewodników w pewnym przedziale temperatur maleje wraz ze wzrostem temperatury

- **Praca *W* prądu** elektrycznego:

$$W = UIt$$

gdzie: U – napięcie, I – natężenie prądu, t – czas przepływu prądu.

- **Moc *P* prądu** elektrycznego:

$$P = UI$$

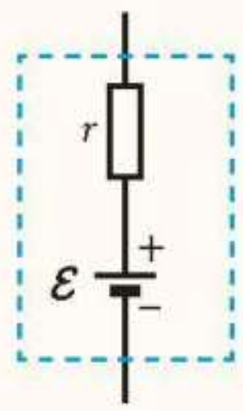
gdzie: U – napięcie, I – natężenie prądu.

- Rzeczywiste źródło napięcia (rys. a) możemy przedstawić jako idealne źródło napięcia stałego (**siła elektromotoryczna**) połączone szeregowo (rys. b) z opornikiem (opór wewnętrzny źródła).

a)



b)



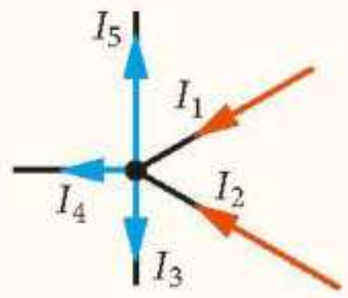
- **Napięcie między biegunami baterii** jest równe różnicy siły elektromotorycznej i spadku napięcia na oporze wewnętrznym:

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

gdzie I – natężenie prądu.

- **Siła elektromotoryczna** równa jest napięciu między biegunami źródła, z którego nie pobieramy prądu. SEM baterii można także zdefiniować jako ilość energii zamienianej z energii chemicznej w elektryczną w przeliczeniu na 1 C przepływającego ładunku.

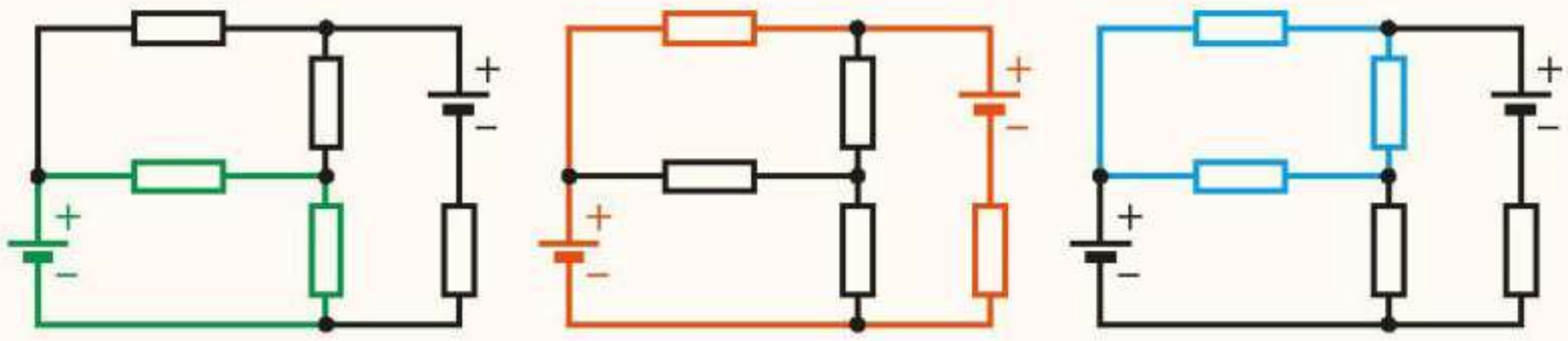
- **Pierwsze prawo Kirchhoffa**: Suma natężeń prądów wpływających do punktu rozgałęzienia (węzła) obwodu jest równa sumie natężeń prądów z niego wypływających.



$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

- **Drugie prawo Kirchhoffa**: W każdym zamkniętym oczku obwodu suma spadków napięcia na odbiornikach energii (włącznie z oporami wewnętrznymi) jest równa sumie sił elektromotorycznych.

W skomplikowanym obwodzie można wyróżnić wiele oczek:



Sposób na zadanie

Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Pomiędzy trzy punkty A, B i C włączono cztery jednakowe oporniki. Dwa z nich są połączone szeregowo. Opory zastępcze pomiędzy punktami są równe odpowiednio: $R_{AB} = 40\ \Omega$ i $R_{AC} = R_{BC} = 30\ \Omega$.



Zadanie 1.1 (0–3)

Narysuj schemat połączenia wszystkich czterech oporników i oblicz opór pojedynczego opornika.

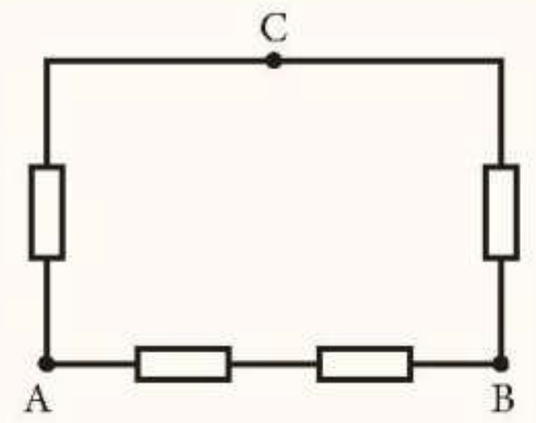
Zadanie 1.2 (0–1)

Podaj przykład pary punktów, do których należałoby przyłożyć ustalone napięcie, aby w układzie oporników wydzielała się maksymalna moc.

Rozwiązanie:

Wskazówka 1. Zwróć uwagę, że opór zastępczy pomiędzy dwoma punktami oznacza opór, jakim możemy zastąpić wszystkie opory w całym obwodzie, wstawiony między te dwa punkty.

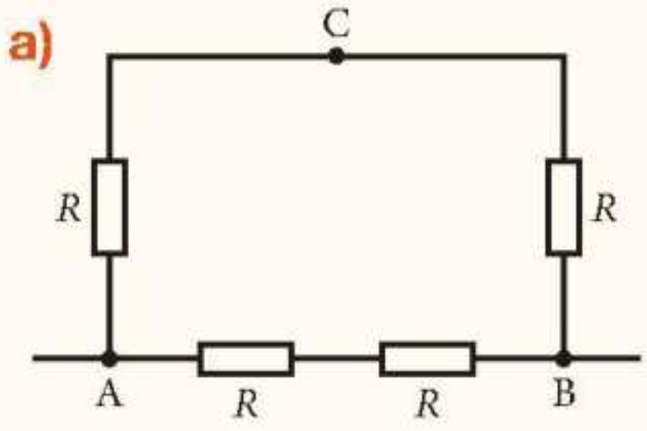
Ad 1.1. Ponieważ opór zastępczy obwodu zmierzony między punktami AC i BC jest taki sam, więc pojedyncze oporniki są na gałęziach AC i BC, a szeregowo połączone oporniki – na gałęzi AB. Obwód po dodaniu oporników wygląda tak jak na rysunku obok.



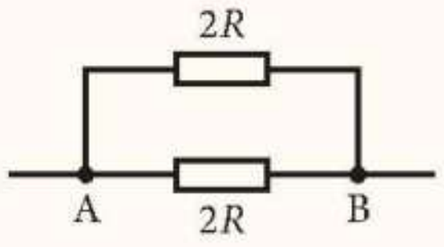
Policzmy teraz opór zastępczy między punktami A i B. Opór pojedynczego opornika oznaczamy jako R (rys. a). Najpierw na każdej gałęzi dodajemy dwa opory połączone szeregowo (rys. b). Następnie obliczymy opór zastępczy dwóch równoległych oporników o oporze $2R$ każdy (rys. c):

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R} \rightarrow R = R_{AB} = 40\,\Omega$$

a)



b)



c)



Odpowiedź: Schemat z opornikami przedstawiony jest powyżej, a opór pojedynczego opornika wynosi 40 Ω.

Ad 1.2. Przy ustalonym napięciu moc zależy od oporu zastępczego obwodu zgodnie ze wzorem:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

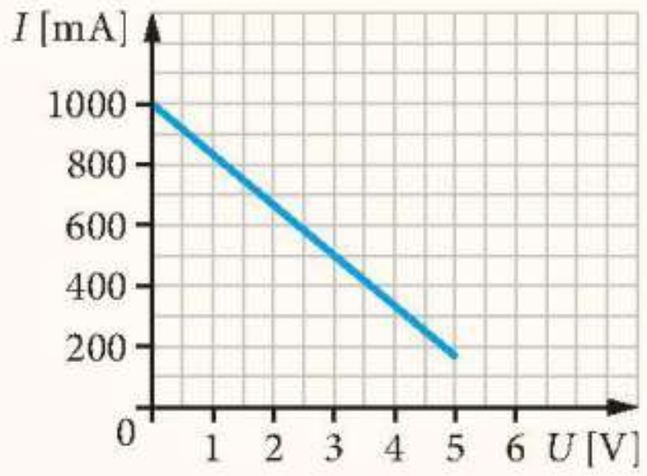
Oznacza to, że im mniejszy jest opór zastępczy, tym większa moc się wydziela. W treści zadania podano opory zastępcze między każdą parą punktów, czyli AB, AC i BC. Największy opór jest między punktami AB, a mniejszy (i równy sobie) między punktami AC i BC. Czyli napięcie należy przyłożyć właśnie między punktami AC lub BC.

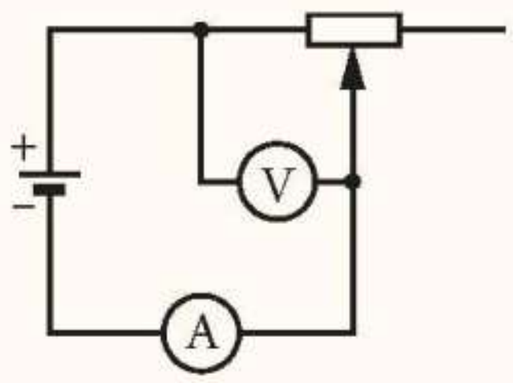
Odpowiedź: Napięcie należy przyłożyć między punktami AC lub BC.

Warto zapamiętać!

- Znasz połączenia oporników: szeregowe (kiedy dodaje się opory) oraz równoległe (kiedy dodaje się odwrotności oporów).
- Jeżeli napięcie jest stałe, to moc wydzielana w układzie rośnie wraz ze zmniejszaniem się oporu $P = \frac{U^2}{R}$, natomiast jeżeli natężenie prądu jest stałe, to moc rośnie wraz ze wzrostem oporu $P = I^2R$. Te wzory łatwo wyprowadzić ze wzorów $P = UI$ oraz $R = \frac{U}{I}$.

Zadanie 2. Zbudowano układ zgodnie ze schematem. Następnie zmieniano położenia suwaka potencjometru i odczytywano wskazania woltomierza U oraz amperomierza I. Na wykresie przedstawiono zależność $I(U)$.





Zadanie 2.1 (0–1)

Wyjaśnij, dlaczego zależność przedstawiona na wykresie jest malejąca.

Zadanie 2.2 (0–1)

Dlaczego w przypadku opisanym w zadaniu natężenie nie jest wprost proporcjonalne do napięcia?

Zadanie 2.3 (0–2)

Wyznacz siłę elektromotoryczną baterii oraz jej opór wewnętrzny.

Rozwiązanie:

Ad 2.1. Siła elektromotoryczna $\mathcal{E}$ baterii, napięcie U między jej biegunami, prąd I płynący w obwodzie i opór wewnętrzny r baterii spełniają warunek:

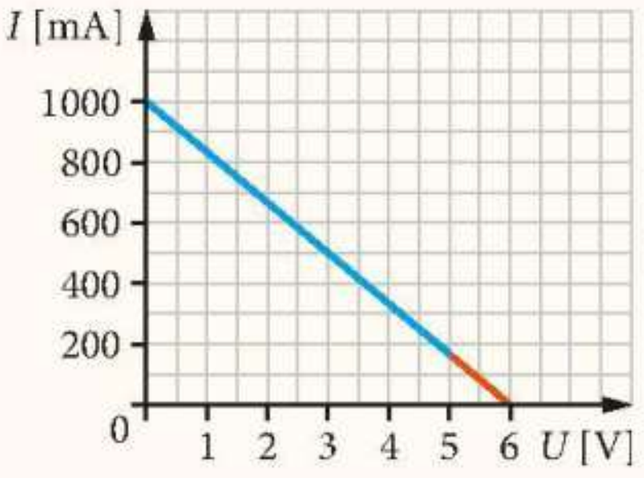
$$U = \mathcal{E} - Ir$$

Stąd: $$I = -\frac{U}{r} + \frac{\mathcal{E}}{r} \rightarrow I = -\frac{1}{r} \cdot U + \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Jak widzimy, zależność $I(U)$ jest zależnością liniową z ujemnym współczynnikiem kierunkowym $-\frac{1}{r}$. Zatem jest to zależność malejąca.

Odpowiedź: Zależność $I(U)$ jest funkcją liniową o ujemnym współczynniku kierunkowym, czyli jest malejąca.

Ad 2.2. Natężenie jest wprost proporcjonalne do napięcia wtedy, gdy różne napięcia podłączamy do przewodnika o tym samym oporze, a w tym zadaniu suwakiem potencjometru zmieniamy właśnie opór.



Ad 2.3. Przedłużamy wykres $I(U)$ do przecięcia z poziomą osią. Punkt przecięcia odpowiada napięciu 6 V i natężeniu $I = 0$ A. Podstawiamy te wartości do wzoru:

$$Ir = -U + \mathcal{E}$$

wyprowadzonego w poprzedniej części zadania i wyznaczamy siłę elektromotoryczną baterii:

$$\mathcal{E} = 6\,\text{V}$$

Rzeczywiście, kiedy przez potencjometr nie płynie prąd, napięcie między jego końcówkami jest równe napięciu na nieobciążonej baterii, a to z kolei jest równe SEM baterii.

Z powyższego wzoru wyznaczamy opór wewnętrzny:

$$r = \frac{-U + \mathcal{E}}{I}$$

i podstawiamy do niego współrzędne przecięcia wykresu z osią pionową: $I = 1000$ mA $= 1$ A i $U = 0$ V oraz obliczoną wcześniej wartość SEM:

$$r = \frac{6\,\text{V}}{1\,\text{A}} = 6\,\Omega$$

Rzeczywiście, kiedy napięcie między końcówkami potencjometru jest zerowe, to znaczy, że widocznie końcówki są zwarte i cały spadek napięcia następuje na oporze wewnętrznym.

Wskazówka 2. Warto sprawdzić, czy wyniki otrzymane na podstawie wzorów i wykresów zgadzają się z intuicyjnym rozumieniem zjawiska.

Warto zapamiętać!

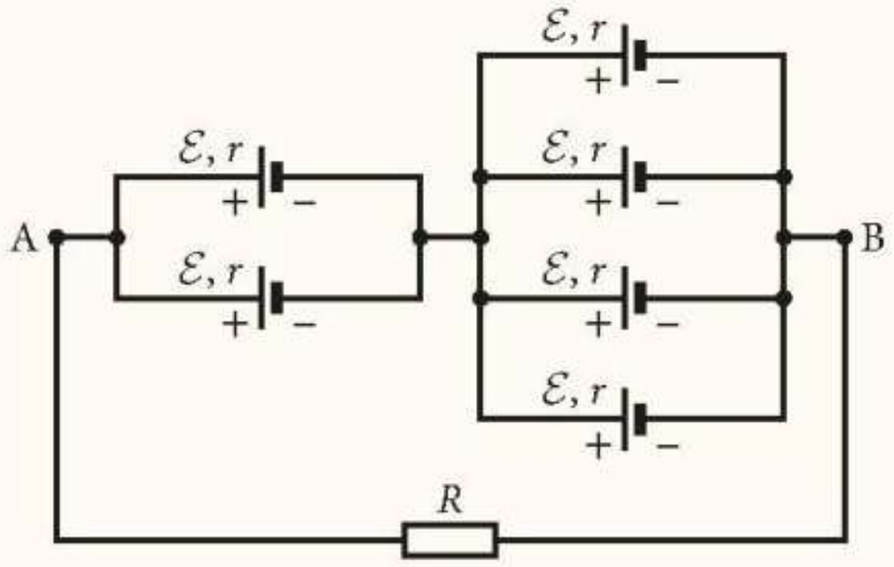
- Każde źródło napięcia ma określony opór wewnętrzny.
- Skutkiem istnienia oporu wewnętrznego jest zmiana napięcia między biegunami źródła po podłączeniu obciążenia (odbiornika energii). Te zmiany opisuje wzór: $U = \mathcal{E} - Ir$.
- Siła elektromotoryczna jest równa napięciu między biegunami źródła, kiedy nic nie jest do niego podłączone albo kiedy opór podłączonego obciążenia jest znacznie większy od oporu wewnętrznego.
- Opór wewnętrzny możemy zaniedbać tylko wtedy, gdy jest znacznie mniejszy niż opór obciążenia. Jeśli w doświadczeniu lub w zadaniu występują zmiany napięcia między biegunami baterii, to znaczy, że nie można pominąć oporu wewnętrznego.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Równoległe połączenie ogniw

Sześć jednakowych ogniw o sile elektromotorycznej 1,5 V i oporze wewnętrznym 1 Ω połączono z opornikiem o oporze 10 Ω w sposób przedstawiony na schemacie.

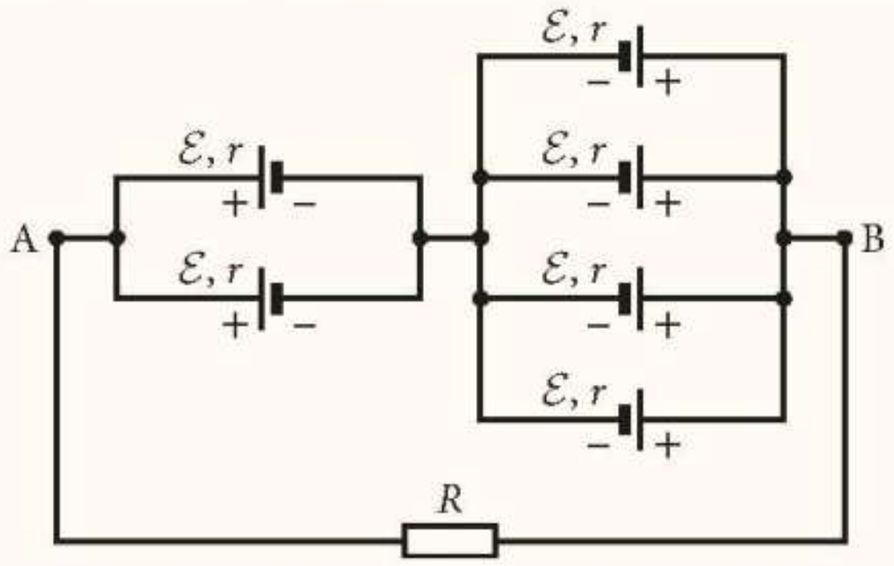


1.1. Wyznacz natężenie prądu płynącego przez opornik. Zapisz wynik z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

1.2. Oblicz moc wydzieloną na oporniku.

1.3. Jakie będzie natężenie prądu w obwodzie po usunięciu z niego opornika i połączeniu punktów A i B przewodem?

1.4. Dokończ zdanie. Wybierz właściwe uzupełnienie I lub II oraz uzasadnienie spośród 1–3.



Po odwrotnym podłączeniu biegunów czterech równolegle połączonych ogniw przez opornik prąd:

I.	popłynie,	ponieważ	**1.**	różnica potencjałów między punktami A i B będzie równa zero.
II.	nie popłynie,		**2.**	różnica potencjałów między punktami A i B nie będzie równa zero.
			3.	prąd w gałęzi z dwoma równoległymi ogniwami popłynie w przeciwną stronę niż w gałęzi z czterema równoległymi ogniwami.

Zadanie 2. Opór miedzianego drutu

Miedziany przewód o długości 800 cm i średnicy 2 mm ma w temperaturze 20°C opór właściwy równy $1{,}68 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$.

2.1. Oblicz opór elektryczny tego przewodu.

2.2. Jak zmieni się opór tego przewodu, jeśli rozciągniemy go tak, że trzykrotnie zwiększy swoją długość?

2.3. Przewód podzielono na cztery jednakowe części. Jaki będzie opór przewodu powstałego ze skręcenia tych czterech części?

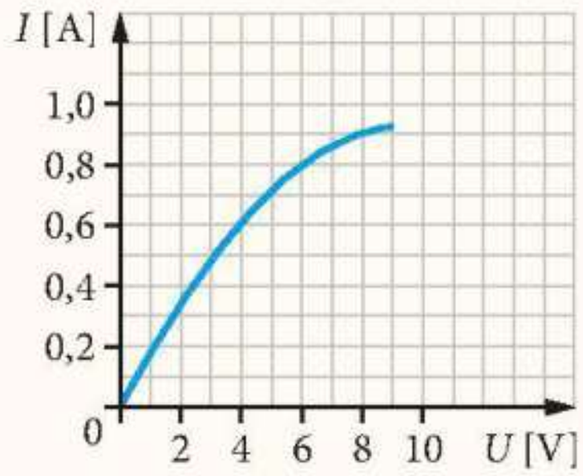
2.4. Drut miedziany został użyty do budowy uzwojenia silnika elektrycznego. Silnik stał przez dłuższy czas w temperaturze 0°C, a następnie został włączony.
Po kilkugodzinnej pracy opór uzwojenia wzrósł o 57 mΩ, zgodnie z zależnością:

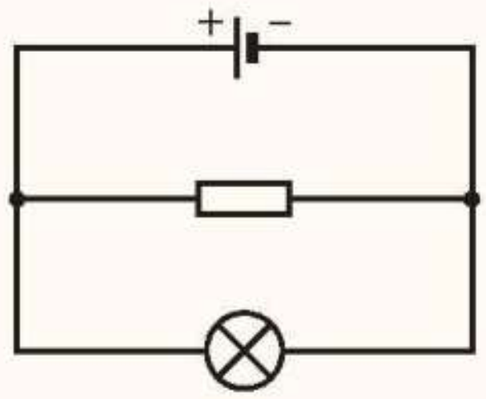
$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$$

gdzie: R_0 – opór drutu w temperaturze 0°C, α – temperaturowy współczynnik oporu dla miedzi $\alpha = 3{,}9 \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{\text{K}}$, ΔT – zmiana temperatury w stosunku do 0°C. Zakładamy, że rozmiary przewodu nie uległy zmianie.
Wyznacz temperaturę uzwojenia po zakończeniu pracy silnika.

Zadanie 3. Żarówka w obwodzie

Na wykresie przedstawiono zależność natężenia prądu płynącego przez żarówkę od przyłożonego napięcia. Żarówkę włączono do obwodu przedstawionego na schemacie.





Gdy użyto źródła o sile elektromotorycznej 10 V i oporze wewnętrznym 2 Ω, przez baterię popłynął prąd o natężeniu 2 A.

3.1. Czy prawo Ohma jest spełnione dla tej żarówki? Uzasadnij odpowiedź.

3.2. Oblicz opór żarówki podczas przepływu prądu przez obwód.

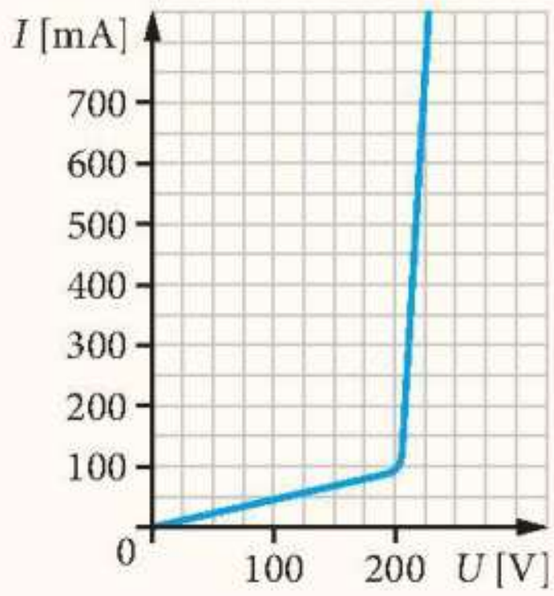
3.3. Jaka moc wydzieli się na żarówce podczas przepływu prądu w obwodzie?

3.4. Oblicz opór opornika.

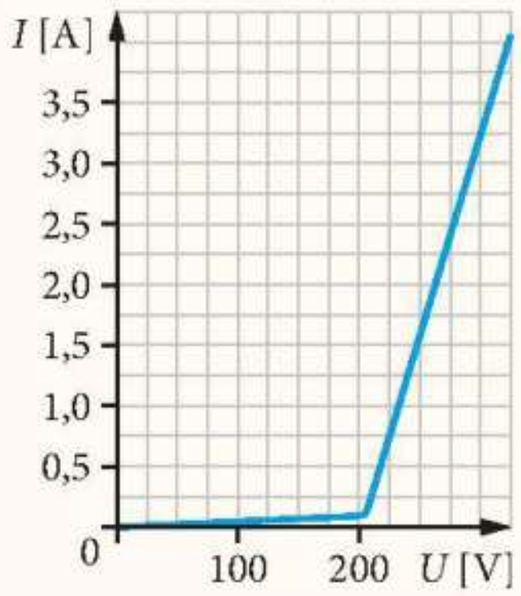
Zadanie 4. Warystor

Warystor to element elektroniczny podobny do opornika. Różnica polega na tym, że zależność $I(U)$ dla tego elementu nie jest liniowa, jak to ma miejsce w przypadku zwykłego opornika. Tę zależność dla przykładowego warystora przedstawiają wykresy (wykres A to powiększona część wykresu B dla mniejszych natężeń prądu).

A.



B.



4.1. Uzupełnij zdania.

Dla niskiego napięcia opór warystora jest **A**/ **B**, ale gdy napięcie przekroczy pewną wartość, opór ten szybko **C**/ **D**.

A. duży **B.** mały **C.** rośnie **D.** maleje

4.2. Na podstawie odpowiedniego wykresu oblicz opór warystora przy napięciu 100 V i przy napięciu 225 V.

4.3. Na podstawie odpowiedniego wykresu wyznacz napięcie, dla którego opór warystora wynosi 150 Ω.

4.4. Jednym z zastosowań warystorów jest ochrona urządzeń przed skokami napięcia. W jaki sposób należy połączyć warystor z zabezpieczanym urządzeniem: szeregowo (rys. A) czy równolegle (rys. B)? Uzasadnij odpowiedź.

A.

B.

14 Pole magnetyczne

1. Źródła pola magnetycznego
2. Linie pola magnetycznego wytwarzanego przez ruch ładunków
3. Siła Lorentza. Wektor indukcji magnetycznej
4. Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym
5. Siła elektrodynamiczna
6. Indukcja magnetyczna pola wokół przewodnika z prądem

14.1. Źródła pola magnetycznego

Przypomnij sobie

- Każdy magnes ma dwa bieguny, umownie nazywane północnym i południowym.
- Magnes silnie przyciąga żelazo i niektóre inne metale.
- Gdy w jakimś obszarze na każde naładowane elektrycznie ciało działa siła elektryczna, mówimy, że w tym obszarze istnieje pole elektryczne.
- Między magnesami zachodzi oddziaływanie magnetyczne. Magnesy przyciągają się lub odpychają.



Rys. **14.1.** Magnesy wykorzystujemy m.in. w mikrofonach i słuchawkach

Magnesy występują w przyrodzie. Wiedzieli o tym już starożytni, którzy zaobserwowali oddziaływanie magnetyczne bryłek czarnego minerału, który później nazwano magnetytem (zawiera on tlenek żelaza Fe_3O_4). Przez wieki na temat tych niezwykłych kamieni powstało wiele legend. Wierzono, że przyłożony do chorego miejsca magnetyt może uleczyć nawet z ciężkiej przypadłości. Przypisywano mu też działanie magiczne i używano jako amuletu. Jednak sądzono, że traci swoje magnetyczne właściwości pod wpływem cebuli lub czosnku.

Praktyczne zastosowanie magnes znalazł w nawigacji. Kompas pozwolił statkom wypływać na pełne morze, zamiast żeglować wzdłuż brzegów.





Rys. **14.2.** Pierwsze kompasy zostały wynalezione w Chinach

Mimo że oddziaływania magnetyczne były znane od tysiącleci, dopiero w XIX i XX w. zrozumiano ich naturę. Od tamtego czasu liczba zastosowań magnesów wzrosła tak bardzo, że obecnie można je znaleźć niemal w każdym domu. Znajdują się w dziesiątkach urządzeń, m.in. w słuchawkach, głośnikach i mikrofonach, a także wielu silnikach elektrycznych.

Podczas omawiania zagadnień w tym rozdziale będziemy wykonywać liczne doświadczenia z zastosowaniem magnesów. Najlepiej sprawdzą się magnesy neodymowe, które są stosunkowo silne. Można je kupić między innymi w sklepach internetowych.

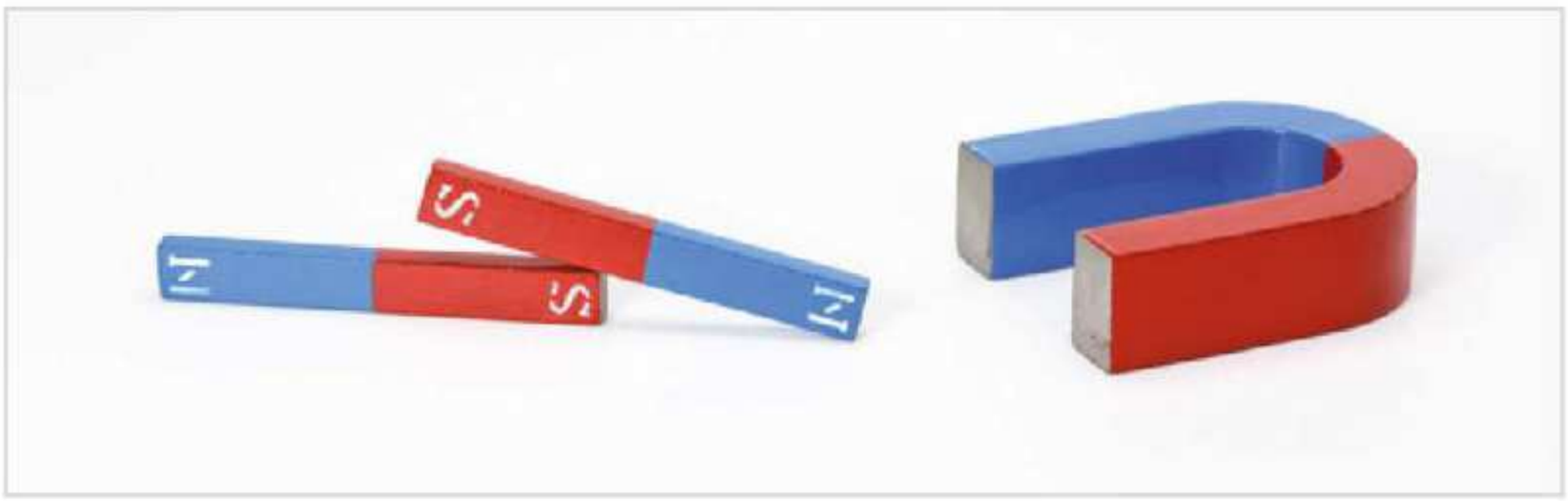
Uwaga. Z magnesami neodymowymi należy postępować ostrożnie. Mogą one boleśnie ścisnąć palce, puszczone swobodnie, przyciągają się z dużej odległości, a ich odłamki mogą się rozprysnąć. Stanowią także śmiertelne niebezpieczeństwo dla dzieci w razie połknięcia.

Magnes i jego bieguny

Jak wiesz ze szkoły podstawowej, każdy magnes ma dwa bieguny, które umownie nazywamy: północnym (N) i południowym (S). Między sobą magnesy mogą się zarówno przyciągać, jak i odpychać, zależnie od ustawienia ich biegunów.



Rys. **14.3.** Magnesy mogą mieć różne kształty

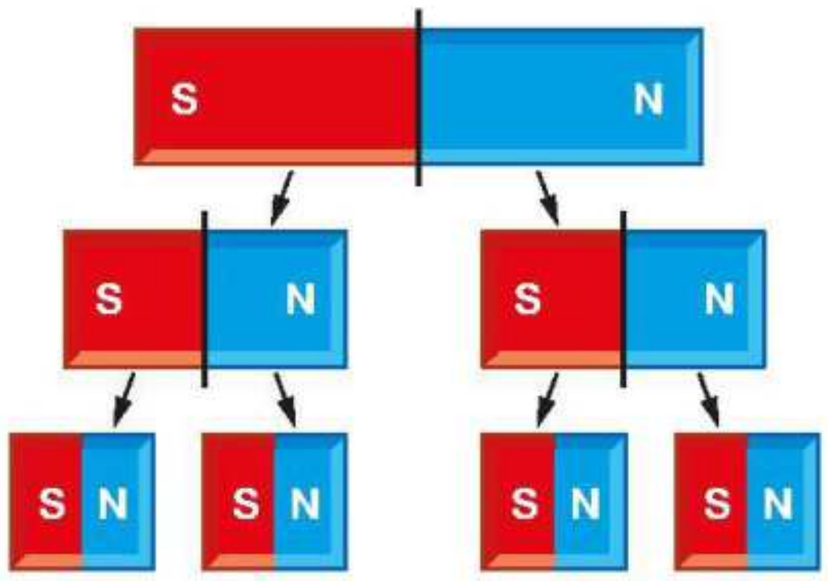


Rys. **14.4.** Bieguny magnesów są umownie oznaczane literami N (*north* – północ) i S (*south* – południe) lub kolorami – w Polsce: niebieskim (N) i czerwonym (S)

> Jednakowe bieguny się odpychają, a różne przyciągają.

Używamy także nazw bieguny jednoimienne i różnoimienne.

W odróżnieniu od ładunków elektrycznych, które można łatwo rozdzielić, bieguny magnetyczne zawsze występują parami. Jeśli rozetniemy magnes na dwa kawałki, to na końcach obu części uzyskanych w ten sposób powstaną nowe bieguny magnetyczne (rys. 14.5). Doświadczenie pokazuje, że w każdym magnesie występuje zarówno biegun północny, jak i południowy.



Rys. **14.5.** Bieguny magnetyczne zawsze występują parami, nawet gdy przetniemy magnes w połowie, otrzymamy magnes z dwoma biegunami

Ferromagnetyki, paramagnetyki i diamagnetyki

Z życia codziennego i ze szkoły podstawowej wiesz, że magnes przyciąga żelazo i stal (która jest stopem żelaza). Okazuje się jednak, że równie silnie oddziałuje na kilka innych metali, m.in. nikiel i kobalt. Z niklu wykonane są zewnętrzne powierzchnie magnesów neodymowych. Substancje silnie przyciągane przez magnes nazywamy **ferromagnetykami** (łac. *ferrum* – żelazo).



Rys. **14.6.** Zarówno żelazo, kobalt, jak i nikiel są ferromagnetykami



A to ciekawe

Magnes odpycha wodę, a więc również organizmy żywe, złożone głównie z tej cieczy. W 1997 r. fizyk Andre Geim (czyt. gajm) w ramach eksperymentu naukowego umieścił żywą żabę w polu magnetycznym tak silnym, że lewitowała, czyli unosiła się w powietrzu (nie było to dla niej szkodliwe). Nie udały się natomiast próby podobnych doświadczeń z chomikiem. W ramach rekompensaty dla zwierzaka Geim uwiecznił go pod nazwiskiem H.A.M.S. ter Tisha (*hamster* to po angielsku chomik) jako współautora artykułu naukowego.
Geim jest jedynym uczonym, który zdobył zarówno prawdziwą nagrodę Nobla, jak i jej żartobliwy odpowiednik: nagrodę Ig Nobla (od ang. *ignoble* – niegodny). Tę pierwszą otrzymał za odkrycie grafenu – nowej formy węgla, natomiast drugą właśnie za lewitację żaby.

Na co dzień nie zauważamy, że magnes działa także na substancje inne niż ferromagnetyki. Jest tak dlatego, że oddziaływanie magnetyczne w ich przypadku jest znacznie słabsze.
Okazuje się jednak, że oprócz ferromagnetyków można wyróżnić jeszcze dwie inne ważne grupy materiałów:

- **paramagnetyki** (np. aluminium, cyna, tlen, wapń), które magnes słabo przyciąga,
- **diamagnetyki** (np. miedź, srebro, węgiel, woda), które magnes słabo odpycha. Diamagnetyczne właściwości węgla zbadasz w zadaniu 5 na s. 230.

Domeny magnetyczne

Skąd się biorą szczególne właściwości ferromagnetyków? Możesz łatwo sprawdzić doświadczalnie, że magnes nie przyciąga w zauważalnym stopniu monety jednozłotowej, choć składa się ona ze stopu miedzi i niklu, a nikiel jest silnie przyciągany przez magnesy.
Można z tego wyciągnąć wniosek, że właściwości ferromagnetyków nie wynikają z właściwości pojedynczych atomów, ale z budowy całego kryształu metalu.
Rozważania o mikroskopowej budowie magnesów rozpoczniemy od wykonania prostego doświadczenia.



Doświadczenie 21

1. Przygotuj magnes i dwa stalowe spinacze.
2. Połóż spinacze na stole jeden za drugim tak, aby zostały między nimi ok. 2 mm odstępu (patrz zdjęcie).
3. Jeden ze spinaczy przyciśnij palcem do stołu.
4. Weź magnes i zbliżaj go powoli do przyciśniętego spinacza (z przeciwnej strony niż leży drugi spinacz – jak na zdjęciu). Obserwuj, co się dzieje.

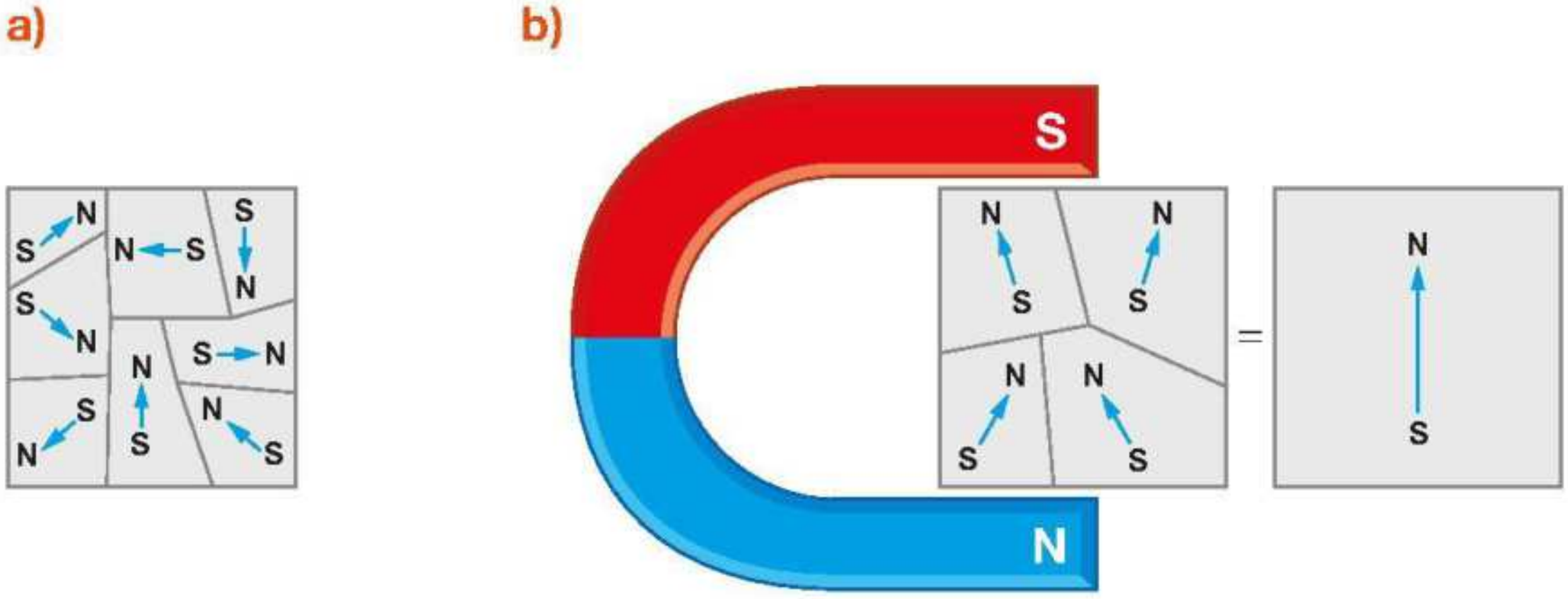
W naszym doświadczeniu zbliżenie magnesu do przyciskanego spinacza sprawiło, że przyciągnął on spinacz leżący swobodnie. Możemy powiedzieć, że kawałek stali zbliżony do magnesu sam stał się magnesem. Tak więc magnes nie tyle przyciąga nienamagnesowane żelazo, ile powoduje jego namagnesowanie, a dopiero w drugiej kolejności je przyciąga. Przypomina to mechanizm przyciągania skrawków papieru przez naelektryzowane ciało.

Przyciąganie skrawków papieru przez naelektryzowane ciało s. 80

Jak to się jednak dzieje, że kawałek żelaza można namagnesować? W ferromagnetykach znajdują się **domeny magnetyczne** – namagnesowane obszary o różnych kierunkach namagnesowania.

W nienamagnesowanym kawałku żelaza kierunki namagnesowania poszczególnych domen są ustawione przypadkowo i skierowane w różne strony, a ich oddziaływania się równoważą (rys. 14.7a). Kiedy jednak zaczynamy zbliżać do niego magnes, domeny ustawione zgodnie z zewnętrznym polem magnetycznym się powiększają (kolejne jony tworzące sieć krystaliczną ferromagnetyku ustawiają się we właściwą stronę), a domeny ustawione w innych kierunkach – zmniejszają (rys. 14.7b).

Istnienie domen magnetycznych wyjaśnia, dlaczego nie da się uzyskać pojedynczych biegunów magnetycznych np. przez przecinanie magnesu.



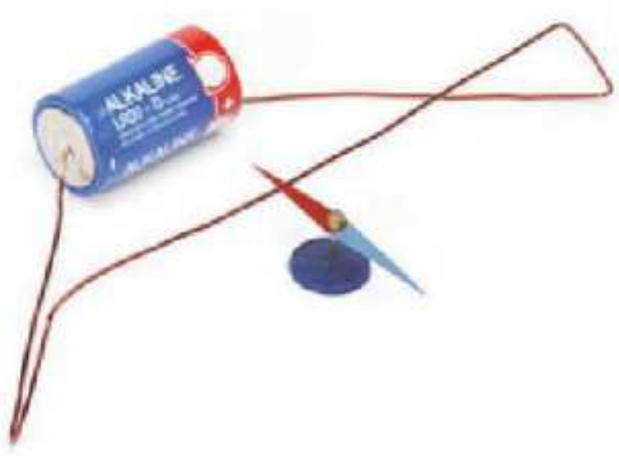
Rys. **14.7.** Zmiany układu domen pod wpływem namagnesowania ferromagnetyku

Domeny magnetyczne istnieją tylko do pewnej temperatury, charakterystycznej dla danego pierwiastka lub związku chemicznego, np. dla żelaza to ok. 770°C. Gdy temperatura jest wyższa, ruchy termiczne jonów powodują rozpad domen.

Pojęcie pola magnetycznego

W poprzednich rozdziałach spotkaliśmy się z dwiema siłami działającymi na odległość: grawitacji i elektrostatyczną. Do opisu takich oddziaływań wprowadziliśmy pojęcie pola, teraz postąpimy podobnie.

Pole elektryczne s. 86



Rys. **14.8.** Odchylenie igły magnetycznej pod wpływem przepływu prądu świadczy o tym, że ruch ładunków jest źródłem pola magnetycznego

Mówimy, że magnes jest **źródłem pola magnetycznego**. Gdy w tym polu znajdzie się inny magnes, działają na niego siły magnetyczne.

> Jeżeli w jakimś obszarze działają siły magnetyczne, to mówimy, że w tym obszarze istnieje pole magnetyczne.

Jak wiesz ze szkoły podstawowej, w pobliżu przewodnika, w którym płynie prąd (poruszają się elektrony), na magnes działa siła magnetyczna (rys. 14.8). Z tego faktu wyciągnęliśmy ważny wniosek.

> Poruszające się ładunki elektryczne są źródłem pola magnetycznego.

Prostym przyrządem do badania pola magnetycznego jest igła magnetyczna. Stanowi ona zasadniczy element kompasu, dlatego może się kojarzyć przede wszystkim z określaniem stron świata. Jednak igła magnetyczna jest po prostu niewielkim magnesem zamocowanym w taki sposób, aby mógł się obracać z minimalnymi oporami. Dlatego może służyć do badania dowolnego pola magnetycznego.

W szczególności igłę magnetyczną można wykorzystać do rozpoznawania biegunów magnesów, zwłaszcza neodymowych, w których nie są one oznaczone. Wystarczy zbliżyć taki magnes do igły jednym z biegunów. Jeśli igła odwróci się do niego swoim biegunem północnym, to znaczy, że magnes jest do niej zwrócony biegunem południowym (rys. 14.9), i na odwrót.



Rys. **14.9.** Rozpoznawanie biegunów magnesu za pomocą igły magnetycznej

Linie pola magnetycznego

Podobnie jak w przypadku elektrostatyki, pole magnetyczne będziemy przedstawiać graficznie za pomocą linii pola.

Linie pola elektrycznego s. 87

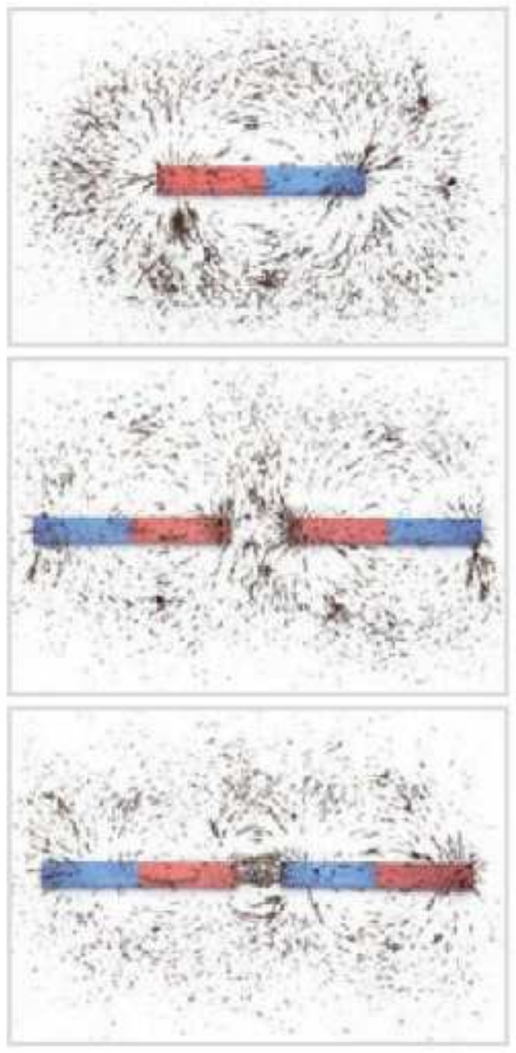
Doświadczalne uzyskanie ich obrazu jest jeszcze prostsze niż w przypadku pola elektrycznego.

Doświadczenie 22 – obowiązkowe

Linie pola magnetycznego wokół magnesów trwałych

1. Przygotuj kawałek sztywnej przezroczystej folii lub tekturkę, dwa magnesy sztabkowe (w kształcie podłużnych prostopadłościanów) i stalowe opiłki. O opiłki możesz poprosić w punkcie dorabiania kluczy – można je tam zebrać magnesem.

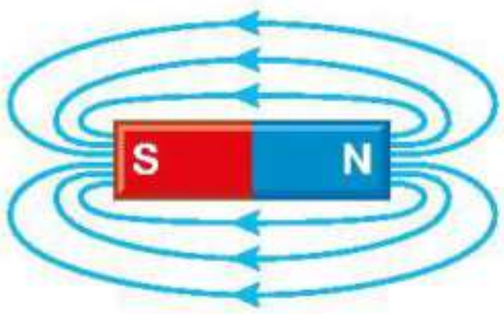
   Uważaj, aby opiłki nie dostały się do oczu! Nie dotykaj oczu palcami, którymi dotykałeś opiłków!
2. Połóż na stole jeden magnes.
3. Tuż nad nim umieść folię lub tekturkę i rozsyp na niej opiłki.
4. Postukaj delikatnie w folię lub tekturkę i obserwuj, jak układają się opiłki. Naszkicuj powstałe linie.
5. Połóż na stole dwa magnesy, zbliżone do siebie jednakowymi biegunami. Wykonaj czynności opisane w punktach 3. i 4.
6. Odwróć jeden z magnesów tak, aby leżały na stole zbliżone do siebie różnymi biegunami. Powtórnie wykonaj czynności opisane w punktach 3. i 4.



W doświadczeniu opiłki układają się wzdłuż **linii pola magnetycznego**. Pozwala to określić kształt linii pola, ale nie ich zwrot. Aby określić zwrot, możemy użyć niewielkiego magnesu, np. igły magnetycznej kompasu (rys. 14.10). Przyjmuje się, że zwrot linii pola magnetycznego jest **od bieguna północnego do południowego**. Na rysunku zaznaczamy ten zwrot za pomocą strzałek (rys. 14.11).



Rys. **14.10.** Jeśli zamiast opiłków użyjemy igieł magnetycznych, od razu możemy określić zwrot linii pola magnetycznego



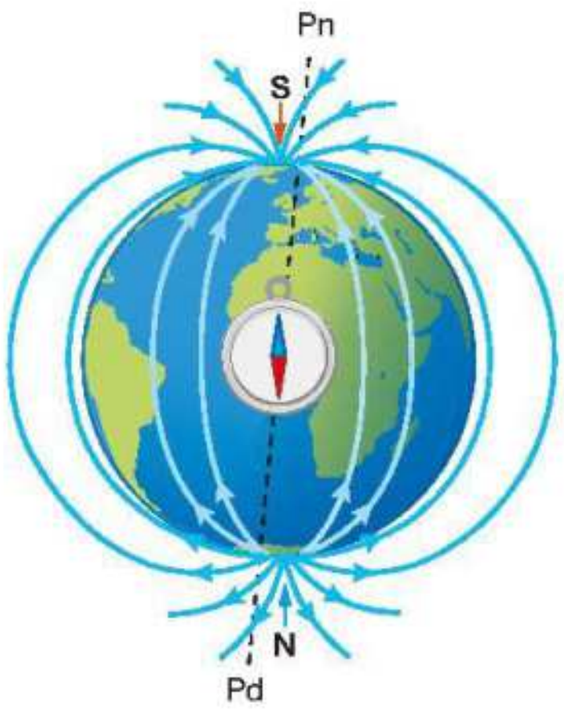
Rys. **14.11.** Magnes sztabkowy i linie pola magnetycznego z zaznaczonymi zwrotami

Silniejszemu polu magnetycznemu odpowiadają na rysunku gęściej narysowane linie pola. Na przykład w pobliżu bieguna magnesu linie biegną bliżej siebie niż w większej odległości od magnesu.

A to ciekawe

Bieguny magnetyczne Ziemi stopniowo zmieniają swoje położenie. Zmiany są niewielkie, ale na tyle wyraźne, że trzeba je brać pod uwagę w nawigacji morskiej i lotniczej. Właśnie z tego powodu w 2013 r. zmieniono oznaczenia pasów startowych lotniska w Brukseli (na zdjęciu). Oznaczenia te bowiem określają kierunek pasa względem wskazań kompasu, a nie względem biegunów geograficznych Ziemi. Co jakiś czas w historii Ziemi bieguny magnetyczne naszej planety zamieniały się miejscami. Nie zaobserwowano żadnej regularności w odstępach między tymi zdarzeniami, więc nie wiadomo, kiedy nastąpi kolejna zamiana biegunów. Nie stanie się to jednak z dnia na dzień – proces zamiany trwał zawsze kilka tysięcy lat.





Rys. **14.12.** Linie pola magnetycznego Ziemi

Pole magnetyczne Ziemi

Działanie kompasu, czyli odwracanie się igły magnetycznej na północ, jest dowodem na to, że także Ziemia wytwarza pole magnetyczne. Jego źródłem jest ruch konwekcyjny płynnego żelaza w jej wnętrzu. Więcej na ten temat dowiesz się z artykułu na końcu kolejnego działu (s. 331).

Bieguny magnetyczne Ziemi są położone w pobliżu jej biegunów geograficznych, ale się z nimi nie pokrywają (rys. 14.12).

Przyjęto, że północny biegun magnesu to ten, który kieruje się w stronę północnego bieguna geograficznego Ziemi. Z tej umowy wynika, że w pobliżu północnego bieguna geograficznego Ziemi znajduje się jej **południowy** biegun magnetyczny. Południowy biegun magnetyczny Ziemi przyciąga bowiem północny biegun igły kompasu.

W terminologii dotyczącej nazewnictwa biegunów magnetycznych Ziemi panuje jednak duże zamieszanie. Często północnym biegunem magnetycznym nazywa się – zwłaszcza w książkach z dziedziny geografii – ten biegun, który znajduje się przy północnym biegunie geograficznym.

Energia potencjalna w polu magnetycznym

Magnes może wykonać pracę, aby podnieść metalowy przedmiot. Skąd bierze się potrzebna do tego energia? Podobnie jak w przypadku innych pól i oddziaływań, z polem magnetycznym jest związana energia potencjalna. Nie będziemy wyrażać jej ilościowo, gdyż jest to zbyt skomplikowane, jednak trzeba pamiętać o konieczności uwzględnienia tej formy energii podczas interpretacji wyników doświadczeń. Inaczej może się wydawać, że nie są one zgodne z zasadą zachowania energii.



Rys. **14.13.** Stalowa kulka rozpędza się w polu magnetycznym. Jej energia kinetyczna rośnie kosztem energii potencjalnej w polu magnetycznym

Zauważmy tylko, że gdy odciągamy stalową kulkę od magnesu, wykonujemy pewną pracę, więc energia kulki w polu magnetycznym rośnie (rys. 14.13). Podobnie jak w przypadku pola elektrycznego (gdy rozważamy siły przyciągania) możemy przyjąć, że energia potencjalna kulki jest równa zero w nieskończonej odległości od magnesu, a w skończonej odległości – jest ujemna. O energii potencjalnej możemy mówić także w przypadku dwóch magnesów. Zależy ona nie tylko od tego, z jak silnymi magnesami mamy do czynienia, lecz także od ich wzajemnego ustawienia.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać oddziaływanie magnesów;
- posługiwać się pojęciem pola magnetycznego i wymieniać jego źródła;
- opisywać właściwości ferromagnetyków;
- wyznaczać doświadczalnie linie pola magnetycznego tworzonego przez magnesy;
- rozpoznawać bieguny magnesu i wyznaczać zwrot linii pola magnetycznego za pomocą igły magnetycznej.

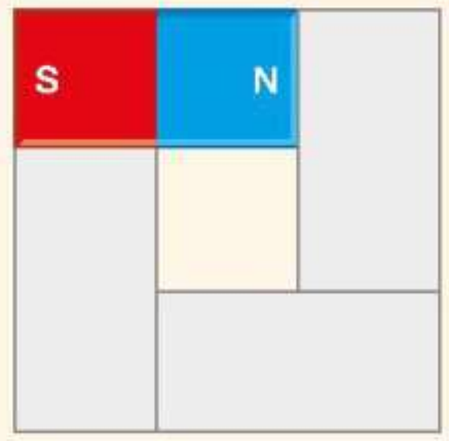
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Magnes sztabkowy i trzy nienamagnesowane sztabki żelaza ustawiono jak na rysunku I. Jak są ustawione domeny w sztabkach? Jak przebiegają linie pola magnetycznego? Gdzie znajdują się bieguny magnetyczne takiego układu trzech żelaznych sztabek i magnesu?

I



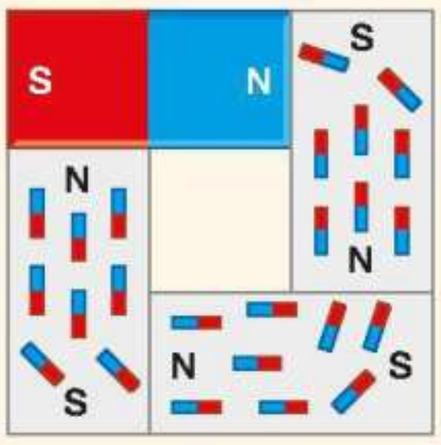
Rozwiązanie

Sztabki żelaza namagnesują się pod wpływem magnesu – ich domeny ułożą się zgodnie z liniami pola wytworzonymi przez magnes. Zatem przy biegunie N powstanie biegun S i na odwrót. Sztabka leżąca naprzeciwko magnesu namagnesuje się od swoich sąsiadek. Ułożenie domen w sztabkach przedstawiono na rysunku II.

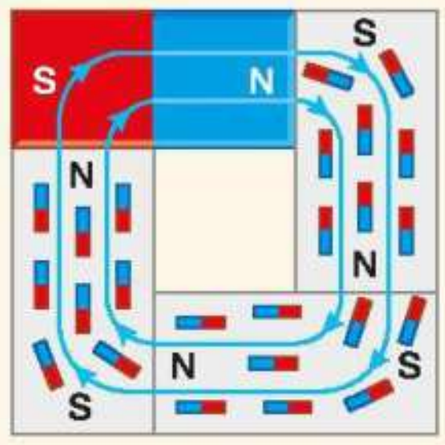
Linie pola magnetycznego biegną tylko wewnątrz tak powstałego układu. Ich przebieg przedstawiono na rysunku III.

Taki układ nie ma biegunów. Pojawią się one dopiero wtedy, gdy rozłączymy go w dowolnym miejscu.

II

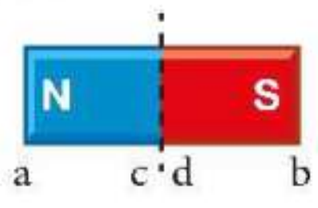


III

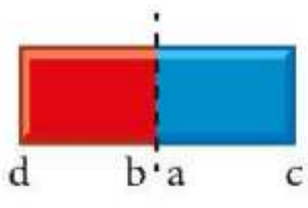


1. Magnes sztabkowy przedstawiony na rysunku A rozcięto w połowie długości, a następnie powstałe kawałki złączono tak, jak pokazano na rysunku B. Czy powstał magnes czy nienamagnesowana sztabka? Jeśli magnes, to gdzie są jego bieguny?

A.



B.



2. Rysunek przedstawia namagnesowany pierścień żelaza i domeny magnetyczne w jego wnętrzu.

a) W jaki sposób można uzyskać takie namagnesowanie bez rozcinania pierścienia?

b) Magnes przecięto i rozgięto. Jak ułożyły się bieguny nowo powstałego magnesu?



3. Po złączeniu magnesów pokazanych na zdjęciu nakrętka spadnie. Wyjaśnij dlaczego.



4. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj duży stalowy gwóźdź i silny magnes (np. neodymowy). Przesuń kilkadziesiąt razy północnym biegunem magnesu po gwoździu, za każdym razem ruchem w tę samą stronę – od łepka do ostrza.

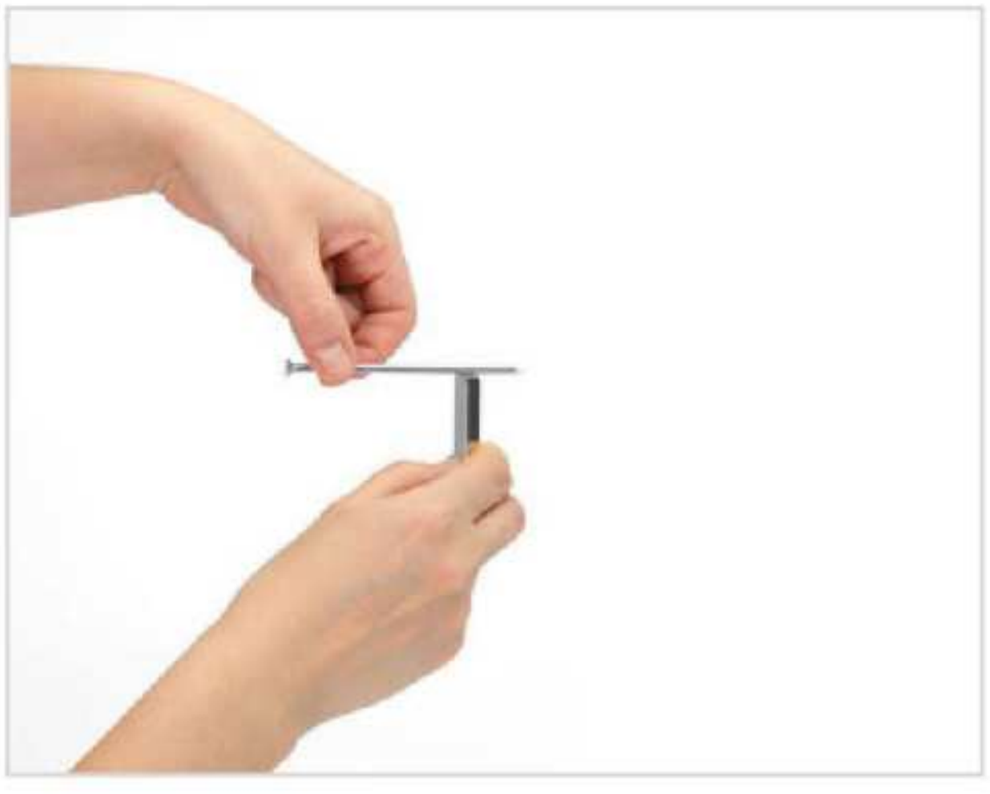
b) Sprawdź doświadczalnie, czy gwóźdź się namagnesował, a następnie zbadaj, który z jego biegunów jest biegunem północnym, a który południowym.

c) Wyjaśnij, dlaczego gwóźdź namagnesował się w taki sposób. Skorzystaj z wiadomości o domenach magnetycznych.

d) Złap gwóźdź obcęgami i rozgrzej go do czerwoności w płomieniu kuchenki gazowej.

e) Ostudź gwóźdź w zimnej wodzie i sprawdź, czy nadal jest namagnesowany.

f) Co zaobserwowałeś? Skorzystaj z wiedzy o domenach magnetycznych i wyjaśnij wynik doświadczenia.



5. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj: silny magnes (np. neodymowy), grafit – wkład do ołówka automatycznego HB lub B oraz cienką nitkę długości ok. 60 cm.

b) Uważnie, aby nie złamać grafitu, przywiąż w połowie długości wkładu jeden koniec nitki. Drugi przywiąż do statywu lub innego elementu, pod którym taki układ mógłby swobodnie wisieć.

c) Jeśli grafit się obraca lub kiwa na nitce, zatrzymaj ten ruch.

d) Zbliż magnes do grafitu. Co obserwujesz?



Uwaga. W podobny sposób można badać słabe przyciąganie przez magnes niektórych substancji, np. tworzyw sztucznych. Niestety, w przypadku przyciągania nie możemy być pewni, czy obserwowane oddziaływanie ma rzeczywiście charakter magnetyczny, a nie elektryczny.

14.2. Linie pola magnetycznego wytwarzanego przez ruch ładunków

Przypomnij sobie

- Źródłem pola magnetycznego jest ruch ładunków elektrycznych, np. prąd płynący w przewodniku lub elektrony poruszające się w magnesie.
- Pole magnetyczne możemy ilustrować za pomocą linii pola.

Linie pola wokół prostego przewodnika

Jak wiesz, przepływające ładunki wytwarzają pole magnetyczne. Zbadajmy, jak są ułożone linie tego pola.

Doświadczenie 23 – obowiązkowe

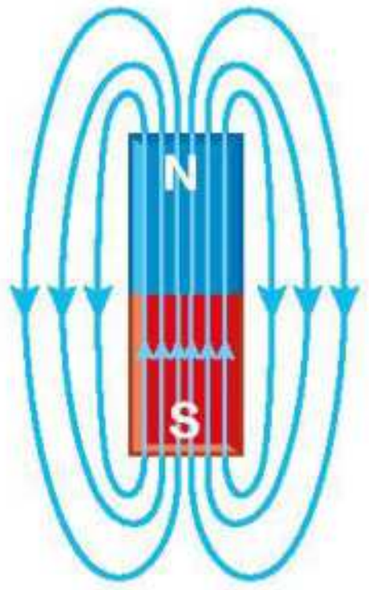
Pole magnetyczne wokół prostego przewodnika z prądem

1. Przygotuj kompas, ogniwo D (najgrubsze dostępne w sklepie), gruby przewód długości ok. 50 cm, tekturkę i opiłki żelazne.
2. W środku tekturki zrób gwoździem mały otwór i przełóż przez niego przewód.
3. Ustaw tekturkę w poziomie, a przewód w pionie. Wysyp na tekturkę opiłki.
4. Podłącz końce przewodu do biegunów ogniwa: górny do ujemnego, dolny do dodatniego. Możesz połączyć **równolegle** dwa lub trzy ogniwa, wtedy efekt będzie lepiej widoczny.
5. Postukaj delikatnie w tekturkę, aby opiłki ułożyły się wzdłuż linii pola.
6. Przybliż kompas do przewodu i określ zwrot linii pola.
7. Rozłącz obwód jak najszybciej, aby nie rozładować ogniwa.



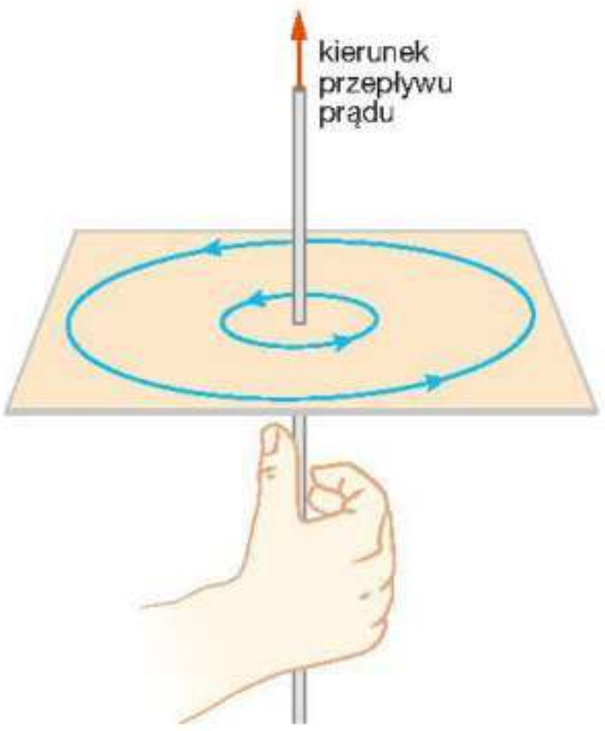
Wynik doświadczenia może być zaskakujący: linie pola magnetycznego wytwarzanego przez płynący w obwodzie prąd nie mają początków i końców, ale przybierają kształt okręgów.

Jak już powiedzieliśmy, na zewnątrz magnesu trwałego linie pola magnetycznego rysujemy od bieguna północnego do południowego. Okazuje się, że również wewnątrz takiego magnesu występuje pole magnetyczne. Jego linie są skierowane od bieguna południowego do północnego i razem z liniami na zewnątrz magnesu tworzą zamknięte pętle (rys. 14.14). Obecność pola magnetycznego wewnątrz magnesu wykażemy pod koniec kolejnej lekcji (w dośw. 27. s. 240).



Rys. **14.14.** Pole magnetyczne występuje wewnątrz i na zewnątrz magnesu

> Linie pola magnetycznego są zawsze zamknięte.



Rys. **14.15.** Wyznaczanie zwrotu linii pola magnetycznego za pomocą reguły prawej ręki

Fakt, że linie pola magnetycznego zawsze tworzą zamknięte pętle, stanowi jedną z różnic między polem magnetycznym a elektrycznym. Jak pamiętasz, linie pola elektrycznego wychodzą z ładunków dodatnich i kończą się w ładunkach ujemnych. Nie istnieją natomiast ładunki magnetyczne (pojedyncze bieguny), które mogłyby stanowić końce linii pola magnetycznego.

Zwrot linii pola magnetycznego wokół prostego przewodnika

Jaki jest zwrot linii pola wytwarzanego przez przewodnik? Doświadczalnie możemy go wyznaczyć za pomocą kompasu lub igły magnetycznej, tak jak opisaliśmy to na s. 227. Możemy też posłużyć się **regułą prawej ręki** (rys. 14.15). Jeśli wyobrazimy sobie, że obejmujemy przewodnik palcami prawej ręki tak, aby odgięty kciuk wskazywał kierunek przepływu prądu, to zagięte palce wskażą zwrot linii pola.

Pole magnetyczne wytwarzane przez pętlę i zwojnicę

Dotąd badaliśmy pole magnetyczne wokół prostego przewodnika. Zbadajmy teraz przypadek, gdy ma on kształt jednej lub wielu pętli. Wykonajmy doświadczenie analogiczne do poprzedniego.

a)



b)



Doświadczenie 24 – obowiązkowe

Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem w kształcie pętli lub zwojnicy

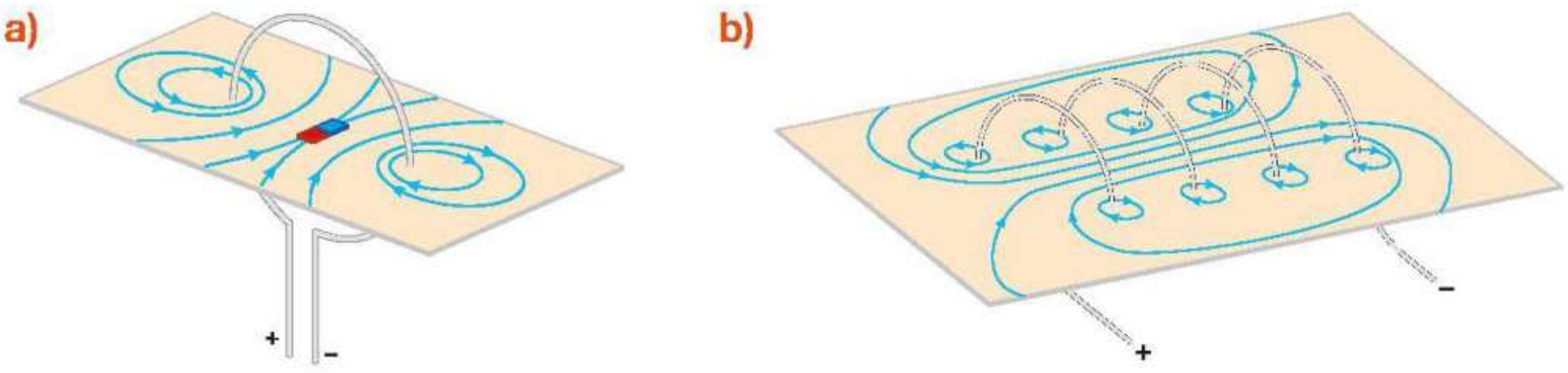
1. Przygotuj kompas lub igłę magnetyczną, ogniwo D, gruby przewód długości ok. 50 cm, tekturkę i opiłki żelazne.
2. W tekturce wybij gwoździem otwory i przepleć przez nie przewód tak, aby tworzył pojedynczą pętlę (patrz zdjęcie a).
3. Ustaw tekturkę w poziomie. Wysyp na nią opiłki.
4. Podłącz końce przewodu do biegunów ogniwa.
5. Postukaj delikatnie w tekturkę, aby opiłki ułożyły się wzdłuż linii pola.
6. Przybliż kompas do tekturki i określ zwrot linii pola. Rozłącz obwód jak najszybciej.
7. Przepleć przewód przez tekturkę tak, aby utworzył kilka pętli w równych odstępach (jak na zdjęciu b) i powtórz czynności opisane w punktach 3–6.



A to ciekawe

Od ponad 50 lat wiadomo, że wiele ptaków odlatujących na zimę kieruje się polem magnetycznym Ziemi. Okazuje się, że zmysł magnetyczny mają też niektóre zwierzęta morskie, np. żółw karetta (na zdjęciu), a także lądowe, np. lis czy bydło domowe. Krowy ustawiają się na pastwisku zgodnie z liniami ziemskiego pola magnetycznego. Jednak w przypadku zakłóceń pola przez linie wysokiego napięcia ta regularność znika. Czy człowiek ma zmysł magnetyczny? Prowadzone badania nie dały dotąd jednoznacznej odpowiedzi.

Jaki kształt miały linie pola wytwarzane przez pętlę w tym doświadczeniu? Przedstawiliśmy je na rysunku 14.16a. Są kształtem podobne do linii pola wytwarzanego przez sztabkowy magnes trwały.
Pole to jest silniejsze niż wówczas, gdy użyliśmy prostego przewodnika. Dzieje się tak dlatego, że pola wytwarzane przez poszczególne fragmenty pętli dodają się do siebie. Każdy fragment wytwarza wokół siebie pole magnetyczne, którego linie mają kształt okręgów. W sumie otrzymujemy pole zbliżone do tego, jakie wytwarzałby magnes umieszczony w środku pętli.



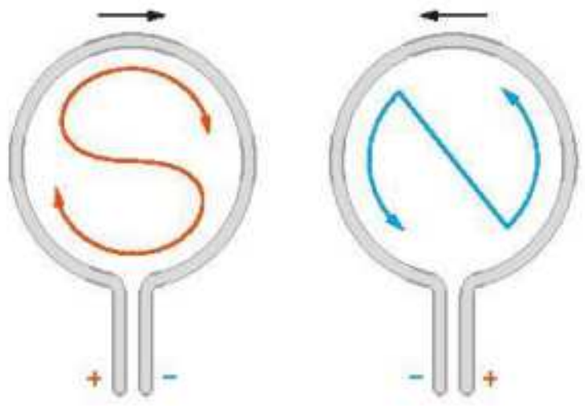
Rys. **14.16.** Pole magnetyczne wytwarzane przez: a) pętlę z prądem, b) zwojnicę

Jeśli chcemy, aby pole było silniejsze, możemy nawinąć wiele pętli w tę samą stronę i w równych odstępach. W ten sposób otrzymamy **zwojnicę**, czyli **cewkę**, którą badaliśmy w dalszej części doświadczenia (linie pola przedstawiliśmy na rysunku 14.16b). Zwróć uwagę, że wewnątrz zwojnicy pole jest zbliżone do pola jednorodnego, czyli linie pola są prawie równoległe.

Jednorodne pole elektryczne s. 91

Zwrot linii pola wytwarzanego przez pętlę i zwojnicę

Powiedzieliśmy, że pole wytwarzane przez pętlę lub zwojnicę przypomina pole wytwarzane przez magnes. Zwrot linii tego pola wewnątrz zwojnicy można wyznaczyć podobnie jak w przypadku prostego przewodnika. W tym celu stosujemy **regułę prawej ręki**, tyle że tym razem zwinięte palce pokazują kierunek przepływu prądu, a odgięty kciuk – zwrot linii pola magnetycznego.
Możemy też posłużyć się sposobem przedstawionym na rysunku 14.17. Jeśli prąd w pętli płynie tak, jak wskazują strzałki na końcach litery S, to znaczy, że patrzymy na nią od strony bieguna S, a jeśli tak jak strzałki na końcach litery N, to patrzymy na pętlę od strony bieguna N.



Rys. **14.17.** Określanie biegunów zwojnicy

Elektromagnes

Zwojnicę wykorzystuje się do budowy elektromagnesów, ale jak się przekonamy, sama cewka nie wystarczy. Wykonajmy doświadczenie obrazujące działanie elektromagnesu.



Doświadczenie 25

1. Przygotuj duży gwóźdź, długi kawałek przewodu w izolacji (najlepiej emaliowej, takiego jak na zdjęciu), drobne stalowe gwoździki lub spinacze, ogniwo D.
2. Usuń izolację z końcówek przewodu.
3. Wykonaj zwojnicę: nawiń na gwóźdź 100 zwojów przewodu (wszystkie w tę samą stronę).
4. Podłącz końcówki przewodu do biegunów ogniwa i zbliż łepek dużego gwoździa do drobnych gwoździków.
5. Wysuń gwóźdź ze zwojnicy i zbliż ją jednym końcem do drobnych gwoździków.

Po podłączeniu przewodu do ogniwa gwóźdź wewnątrz zwojnicy przyciągał drobne gwoździki, natomiast zwojnica, z której wyjęto gwóźdź, nie była w stanie ich przyciągnąć. Dlaczego tak się stało?
Kiedy wewnątrz zwojnicy umieściliśmy gwóźdź (ferromagnetyk), namagnesował się on pod wpływem pola wytwarzanego przez prąd (domeny ustawiły się we właściwy sposób) i łączne pole stało się setki razy silniejsze niż wytwarzane przez samą zwojnicę. W ten sposób powstał **elektromagnes**.
Jednak nawet po usunięciu pola magnetycznego ferromagnetyk pozostaje w pewnym stopniu namagnesowany. W przypadku niektórych ferromagnetyków, zwanych twardymi, to namagnesowanie jest silne i długotrwałe, dla innych, zwanych miękkimi – jest ono bardzo słabe. Twarde ferromagnetyki stosuje się do produkcji magnesów trwałych, a z miękkich wykonuje się rdzenie elektromagnesów.

Elektromagnesy znalazły bardzo wiele różnorodnych zastosowań. Wykorzystujemy je w silnikach i niektórych prądnicach. Poza tym służą m.in. do:

- zapisywania informacji na twardym dysku komputera (w niektórych typach tych urządzeń),
- ubijania kawy w ekspresie,
- otwierania drzwi za pośrednictwem domofonu,
- przenoszenia złomu żelaznego z wagonów do pieca hutniczego.



A to ciekawe

W urządzeniach do magnetycznego rezonansu jądrowego (MR albo MRI), stosowanego w badaniach medycznych, wykorzystuje się silne pole magnetyczne. Wytwarzają je bardzo duże cewki – tak duże, że do ich wnętrza wsuwa się pacjenta na specjalnym łóżku. Zasadniczym problemem podczas konstruowania takiego urządzenia jest nie tylko konieczność dostarczenia prądu o bardzo dużym natężeniu, lecz także odprowadzenie ciepła powstałego w wyniku oporu elektrycznego. Dlatego w MR stosuje się cewki zbudowane z nadprzewodnika – substancji o zerowym oporze elektrycznym. Prąd w takiej cewce może krążyć latami bez zewnętrznego zasilania.

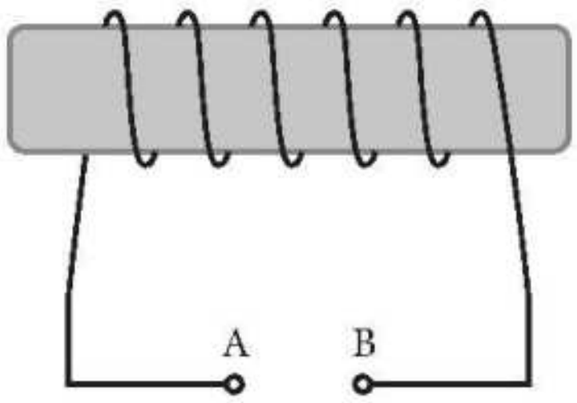
Po tej lekcji powinieneś

- demonstrować doświadczalnie linie pola magnetycznego wytwarzanego przez przewodniki z prądem;
- określać zwrot tych linii pola;
- budować elektromagnes, opisywać zasadę jego działania i zastosowania.

Pytania i zadania

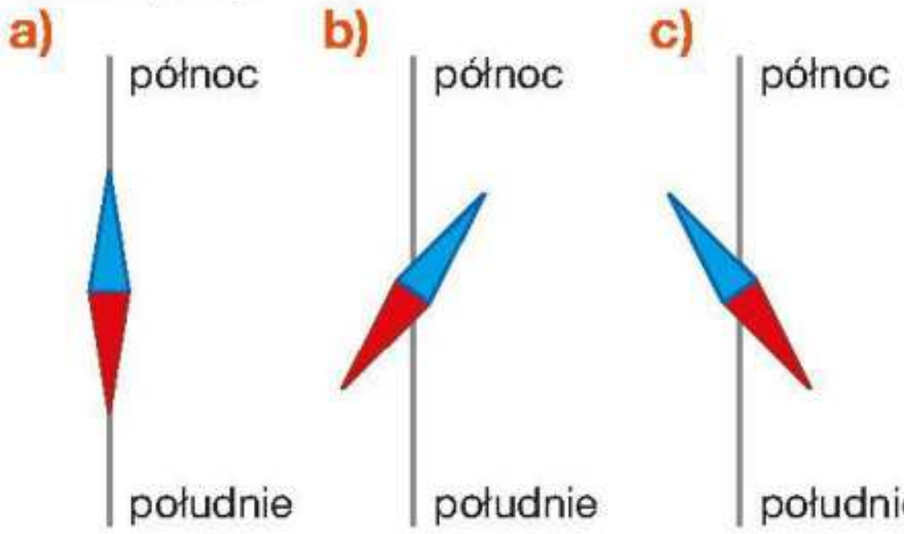
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Ustal bieguny źródła napięcia, do jakiego należy podłączyć zwojnicę, aby biegun północny igły magnetycznej był zwrócony w kierunku zwojnicy tak, jak pokazano na rysunku.

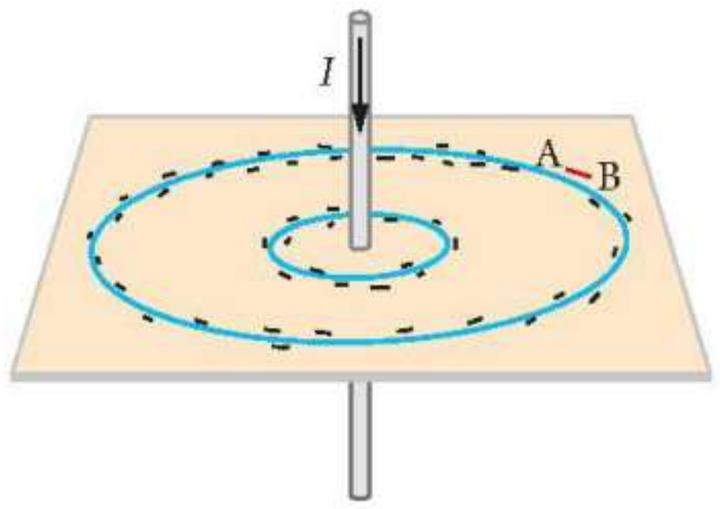




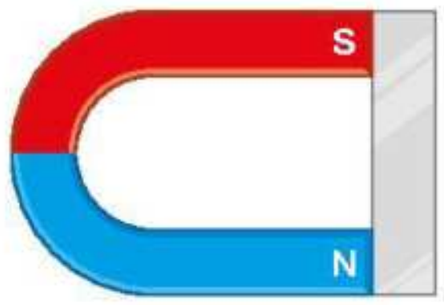
2. Przewodnik ustawiono wzdłuż południka magnetycznego Ziemi, a nad nim umieszczono igłę magnetyczną (rys. a).
Następnie przewodnik podłączano do źródła napięcia. Początkowo igła magnetyczna odchyliła się w prawo (rys. b), a po zmianie kierunku przepływu prądu – w lewo (rys. c).
Określ kierunek przepływu prądu na rysunkach b) i c).



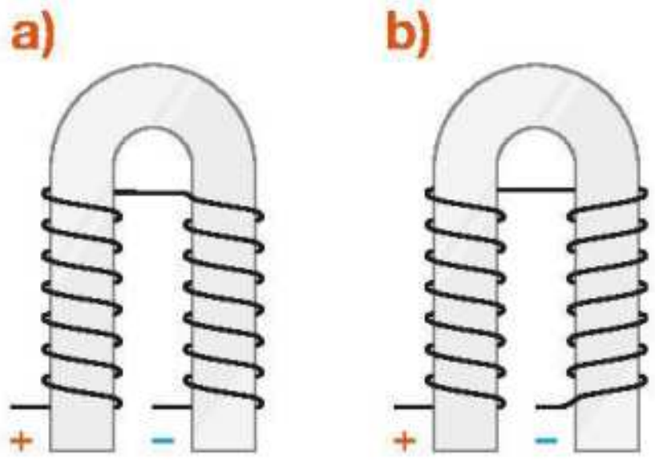
3. Żelazne opiłki układają się wzdłuż linii pola magnetycznego, gdyż pod jego wpływem same stają się małymi magnesami. Na rysunku widzisz opiłki ułożone wokół prostoliniowego przewodnika. Końce jednego z nich (oznaczonego na czerwono) podpisano literami A i B. Która z nich oznacza biegun północny, a która południowy? Uzasadnij odpowiedź.



4. Narysuj w zeszycie linie pola magnetycznego w sztabce ze stali miękkiej przyłożonej do magnesu podkowiastego (jak na poniższym rysunku) oraz ułożenie domen magnetycznych w tej sztabce.



5. Uczniowie chcieli wykonać elektromagnes podkowiasty. W tym celu na rdzeń ze stali miękkiej nawinęli uzwojenie z drutu, a następnie podłączyli go do biegunów ogniwa. Na którym rysunku: (a) czy (b), poprawnie przedstawiono nawinięte zwoje? Odpowiedź uzasadnij. Wyznacz bieguny elektromagnesu.



14.3. Siła Lorentza. Wektor indukcji magnetycznej

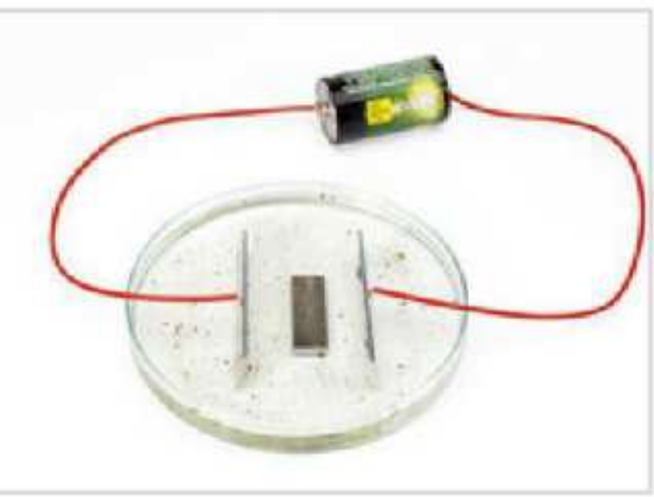
Przypomnij sobie

- Przyczyną powstawania pola magnetycznego jest ruch ładunków elektrycznych.
- Magnesy oddziałują na siebie siłą magnetyczną.

Siła działająca na poruszający się ładunek

W doświadczeniach z poprzedniej lekcji wykazaliśmy, że wokół przewodnika, w którym płynie prąd, powstaje pole magnetyczne i że zależy ono od kształtu przewodnika, czyli od tego, w jaki sposób poruszają się ładunki elektryczne.
Zbadajmy, co się dzieje, gdy ładunek porusza się w zewnętrznym polu magnetycznym.

Doświadczenie 26



1. Przygotuj płaskie naczynie, folię aluminiową lub metalowe płytki, wodę, sól i mielony pieprz, magnes neodymowy o biegunach na największych powierzchniach oraz ogniwo D.
2. Na dnie naczynia połóż magnes i nalej tyle wody, żeby go zakrywała. Rozpuść w wodzie łyżeczkę soli i wysyp na jej powierzchnię szczyptę mielonego pieprzu.
3. Z dwóch stron magnesu włóż do wody elektrody wykonane z metalowych płytek lub pasków folii aluminiowej. Podłącz ich końce do biegunów ogniwa. Co obserwujesz?

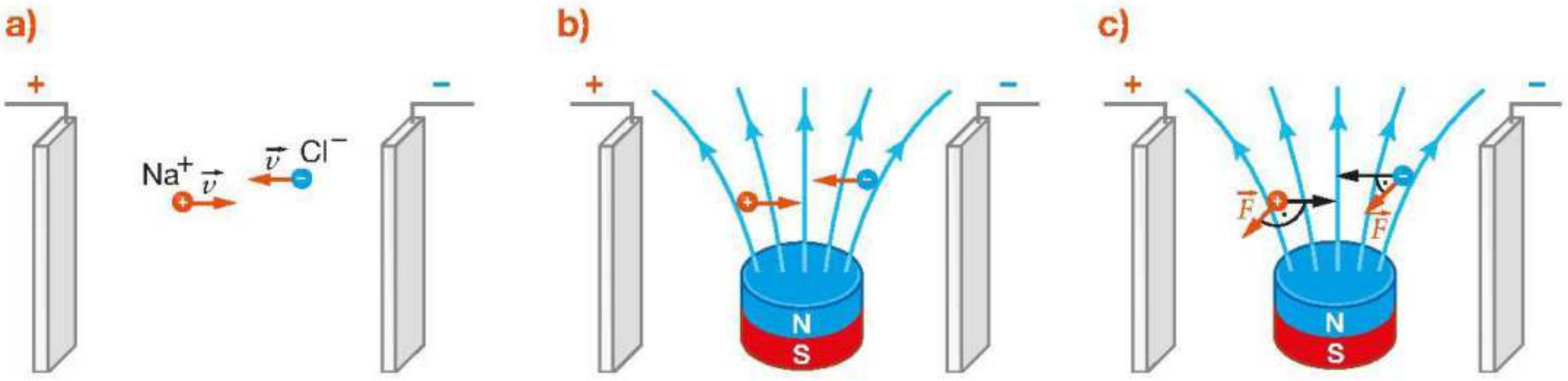
W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować ruch wody i pieprzu wzdłuż metalowych elektrod. Dlaczego tak się stało? Sól kuchenna to chlorek sodu (NaCl). Substancja ta rozpada się w wodzie na jony Na^+ i Cl^-. Pod wpływem pola elektrycznego, które powstaje między elektrodami po podłączeniu układu do baterii, jony zaczynają się poruszać: Na^+ w stronę elektrody ujemnej, a Cl^- w stronę elektrody dodatniej.
Ponieważ w wodzie znajduje się magnes, wytwarzający pole magnetyczne, na jony działa siła, która powoduje ich ruch w kierunku prostopadłym do linii łączącej elektrody. Nazywamy ją **siłą Lorentza**. Poruszające się jony zabierają ze sobą cząsteczki wody i drobiny pieprzu, dzięki czemu możemy obserwować ich ruch.

> Na ładunek poruszający się w polu magnetycznym działa siła magnetyczna. Siłę tę nazywamy **siłą Lorentza**.

Kierunek siły Lorentza

Zaznaczmy na schemacie doświadczenia kierunek ruchu jonów między elektrodami i linie pola magnetycznego (rys. 14.18).
W doświadczeniu mogliśmy wyraźnie zaobserwować, że drobiny pieprzu poruszały się wzdłuż elektrod, co oznacza, że:

> Siła Lorentza jest prostopadła zarówno do linii pola magnetycznego, jak i do kierunku ruchu ładunków.



Rys. **14.18.** Schemat działania siły Lorentza $\vec{F}$ na jony w polu magnetycznym

O zwrocie siły Lorentza powiemy więcej w dalszej części lekcji. Na razie zauważmy, że jony Na^+ i Cl^- miały ładunki o przeciwnym znaku, więc pod wpływem pola elektrycznego poruszały się w przeciwne strony. Te dwa czynniki powodowały, że siła Lorentza działała w tę samą stronę na oba rodzaje jonów.

Wektor indukcji magnetycznej

Na podstawie dokładniejszych doświadczeń stwierdzono, że wektor siły Lorentza $\vec{F}$ działającej na ładunek q poruszający się z prędkością $\vec{v}$ można obliczyć z iloczynu wektorowego:

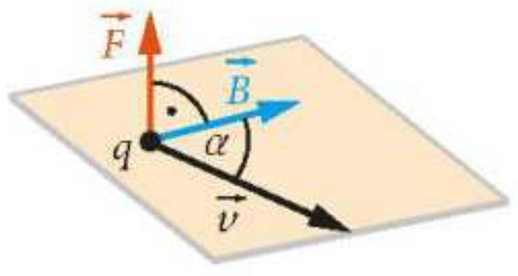
Iloczyn wektorowy, cz. I s. 249

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

gdzie $\vec{B}$ to **wektor indukcji magnetycznej** (wektor indukcji pola magnetycznego), skierowany stycznie do linii pola. Jego wartość określa, jak silne jest pole magnetyczne w danym punkcie. Liczbowo wartość ta jest równa sile działającej na ładunek 1 C poruszający się z prędkością $1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ prostopadle do linii pola.
Korzystamy z własności iloczynu wektorowego i zapisujemy wzór na wartość siły Lorentza:

$$F = |q|vB\sin\alpha$$

gdzie: q – ładunek, v – jego prędkość, B – indukcja magnetyczna, α – kąt między wektorami $\vec{v}$ i $\vec{B}$ (rys. 14.19).



Rys. **14.19.** Przykładowe położenie wektorów $\vec{B}$, $\vec{v}$ i $\vec{F}$ dla ładunku próbnego (dodatniego)

Tesla to bardzo duża jednostka (patrz infografika na dole tej i następnej strony).

Ze wzoru $F = qvB\sin\alpha$ wynika, że jednostką indukcji magnetycznej $\vec{B}$ jest $1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}$. Jednostka ta nosi nazwę **tesla**:

$$1\,\mathrm{T} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}$$

Uwaga. W niektórych publikacjach siła Lorentza oznacza wypadkową opisanej tutaj siły oraz siły elektrycznej działającej na ten sam ładunek, czyli siłę $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$.

Wyznaczanie zwrotu siły Lorentza

Wektorowy wzór na siłę Lorentza pozwala wyznaczać jej zwrot na podstawie zwrotów wektorów $\vec{B}$ i $\vec{v}$ zgodnie z **regułą śruby prawoskrętnej**, podobnie jak w przypadku wielkości znanych ci z mechaniki bryły sztywnej (rys. 14.20a).

Można także posłużyć się **regułą prawej ręki**: gdy prawą rękę ułożymy zgodnie z wektorem $\vec{v}$, a następnie zegniemy palce zgodnie z wektorem $\vec{B}$, to odgięty kciuk wskaże wektor siły Lorentza $\vec{F}$ (rys. 14.20b).

Uwaga. Pamiętaj, że gdy znak q jest ujemny, np. w przypadku elektronów, zwrot siły należy zmienić na przeciwny.

Fizyka wokół nas

Pola magnetyczne w przyrodzie i technice

Podobnie jak inne wielkości fizyczne, również pole magnetyczne występujące w przyrodzie przyjmuje wartości w szerokim przedziale, który można przedstawić na skali.



wytwarzane przez ludzki mózg — $5 \cdot 10^{-14}$

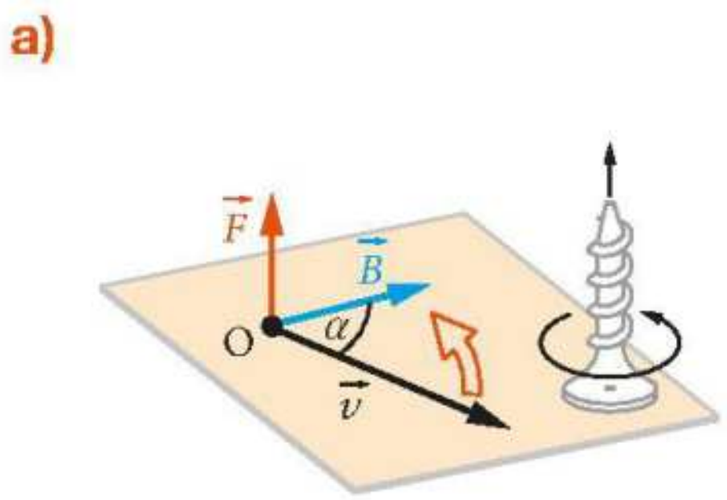
telefon komórkowy — $2 \cdot 10^{-5}$

wokół Ziemi (średnio) — $6 \cdot 10^{-5}$

na powierzchni Słońca — 10^{-4}

średni magnes neodymowy (przy biegunie) — $0{,}1$

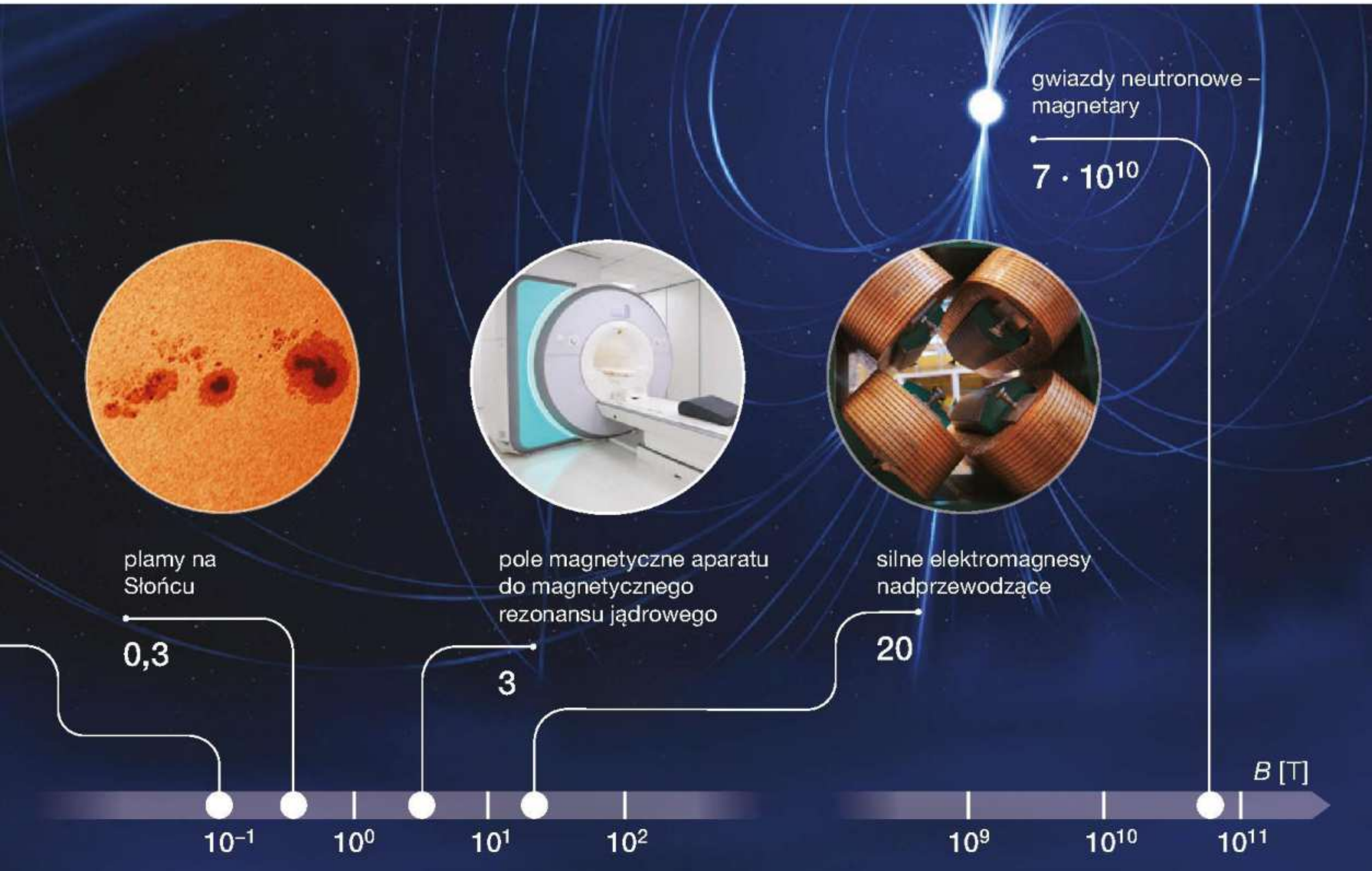
10^{-15} 10^{-14} 10^{-13} 10^{-13} 10^{-5} 10^{-4} 10^{-3} 10^{-2}



Rys. **14.20.** Wyznaczanie zwrotu siły Lorentza za pomocą reguły śruby prawoskrętnej (a) i reguły prawej ręki (b)

Natura siły magnetycznej

Wiemy, że gdy ładunek elektryczny się porusza, wytwarza pole magnetyczne. Dzieje się tak niezależnie od tego, czy jest to ładunek swobodny, czy też elektron, którego przepływ przez przewodnik jest prądem elektrycznym. Stwierdziliśmy też, że na poruszający się ładunek w polu magnetycznym działa siła Lorentza. Możemy więc stwierdzić, że **poruszające się ładunki oddziałują ze sobą siłą magnetyczną**.



Dawniej uważano, że siła magnetyczna zawsze polega na oddziaływaniu poruszających się ładunków. W przypadku dwóch magnesów trwałych byłoby to oddziaływanie elektronów poruszających się w ich wnętrzu.
Dziś jednak wiemy, że elektron, tak jak wiele innych cząstek elementarnych, ma własność zwaną spinowym momentem magnetycznym, która oznacza, że zachowuje się jak maleńki magnes.

Obserwacja pola magnetycznego wewnątrz magnesu

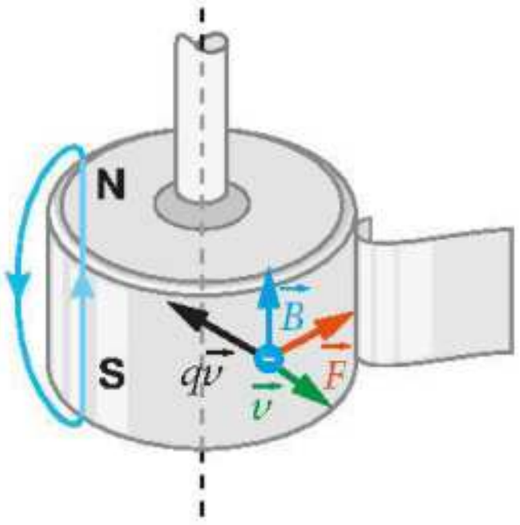
Wykonajmy doświadczenie, które zapowiadaliśmy w poprzedniej lekcji. Pozwoli nam ono zaobserwować siłę Lorentza działającą na elektrony poruszające się wewnątrz magnesu.
Działanie tej siły dowodzi, że wewnątrz magnesu także występuje pole magnetyczne.



Doświadczenie 27

1. Przygotuj magnes neodymowy w kształcie walca, okrągłe ogniwo, pasek folii aluminiowej o wymiarach ok. 3 cm x 15 cm, stalowy gwóźdź z płaskim łepkiem, kompas lub magnes o podpisanych biegunach.
2. Zbadaj, który biegun magnesu neodymowego jest biegunem północnym. Przyłóż do niego łepek gwoździa (na środku bieguna).
3. Weź w dłoń ogniwo. Przyłóż gwóźdź do ogniwa tak, aby wisiał, dotykając ostrym końcem do jego denka.
4. Przytrzymaj jeden z końców paska folii tak, aby dotykał górnego bieguna ogniwa (możesz przymocować go drugim magnesem).
5. Drugim końcem paska dotknij delikatnie bocznej powierzchni magnesu.
6. Zaobserwuj i zanotuj kierunek obrotu magnesu.

W doświadczeniu mieliśmy do czynienia z zamkniętym obwodem: elektrony płynęły z ujemnego bieguna baterii, przez gwóźdź, magnes i pasek folii, do dodatniego bieguna.
Gdy elektrony płynęły przez magnes, poruszały się prostopadle do linii pola magnetycznego, więc działała na nie siła Lorentza (rys. 14.21). To właśnie ona powodowała obrót magnesu.
Zwróć uwagę, że przy wyznaczaniu zwrotu siły Lorentza, działającej na elektrony, musimy wziąć pod uwagę ujemny znak ich ładunku. Wektor $q\vec{v}$ ma zwrot przeciwny do $\vec{v}$.
Działanie siły Lorentza świadczy o tym, że we wnętrzu magnesu istnieje pole magnetyczne. Co więcej, na podstawie kierunku wirowania magnesu możemy stwierdzić, że linie pola w jego wnętrzu są skierowane od bieguna południowego do północnego, a więc odwrotnie niż na zewnątrz magnesu. Wynika z tego, że linie wewnątrz i na zewnątrz się łączą i tworzą pętle.



Rys. 14.21. Na elektron poruszający się we wnętrzu magnesu działa siła Lorentza

Po tej lekcji powinieneś

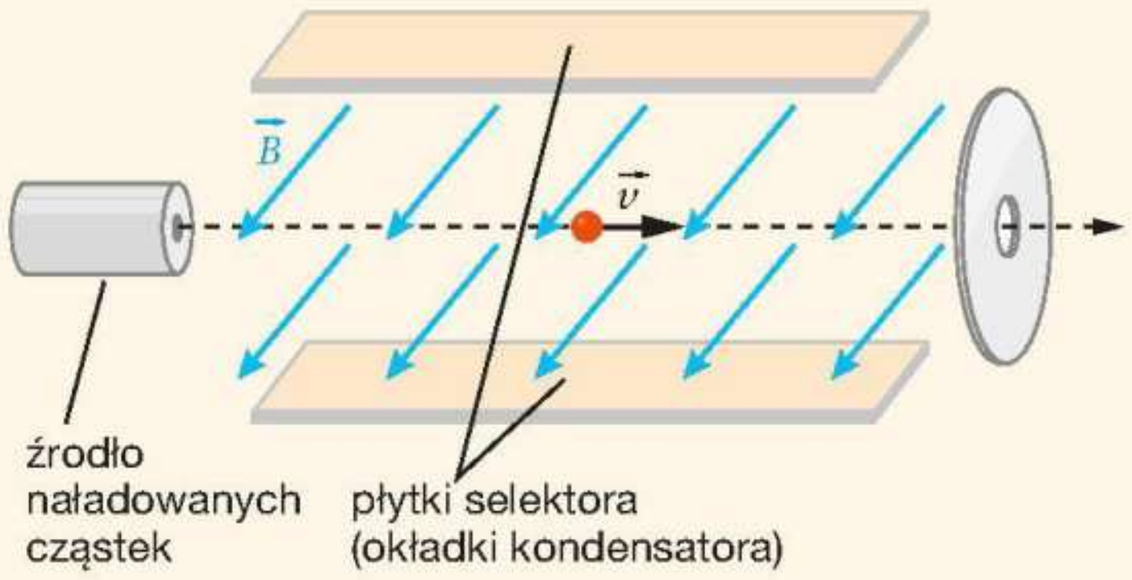
- opisywać pole magnetyczne za pomocą wektora indukcji magnetycznej;
- wyznaczać wartość, kierunek i zwrot siły Lorentza;
- dowodzić doświadczalnie, że pole magnetyczne występuje także wewnątrz magnesu.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

W niektórych doświadczeniach zachodzi potrzeba, aby ze strumienia naładowanych cząstek o różnych prędkościach wybrać tylko cząstki poruszające się z określoną prędkością. Wówczas możemy zastosować selektor prędkości – urządzenie, w którym na poruszający się ładunek działają zarówno siła elektryczna, jak i siła magnetyczna.
Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku. Dwie metalowe płytki, tworzące rodzaj kondensatora, wytwarzają pole elektryczne. Pomiędzy te płytki trafia cząstka poruszająca się równolegle do płytek. Kondensator znajduje się w polu magnetycznym, którego linie biegną prostopadle do linii pola elektrycznego.



Ponieważ siła magnetyczna (siła Lorentza) zależy od prędkości cząstki, przy odpowiedniej prędkości równoważy siłę elektryczną, a cząstka biegnie pomiędzy płytkami po linii prostej aż do szczeliny na końcu kondensatora. W przypadku cząstek o innej prędkości siły te się nie równoważą, cząstka jest odchylana przez ich wypadkową i nie trafia do wyjścia.
Rozważmy selektor prędkości, w którym wektor indukcji magnetycznej $\vec{B}$ ma wartość 0,1 T i jest zwrócony tak jak na rysunku.

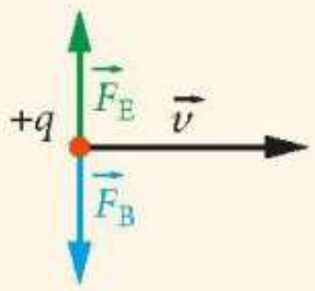
a) Określ zwrot wektora natężenia pola elektrycznego, przy którym siła elektryczna działająca na cząstkę poruszającą się w selektorze będzie miała przeciwny zwrot niż działająca na nią siła elektryczna. Czy zależy to od znaku ładunku cząstki?

b) Oblicz, przy jakim natężeniu pola elektrycznego cząstka poruszająca się z prędkością $v = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ nie zostanie odchylona w selektorze i przejdzie przez szczelinę na jego końcu.

c) Dla sytuacji z podpunktu b) oblicz wartość napięcia przyłożonego między płytkami selektora, jeśli odległość między nimi wynosi $d = 1$ cm.

Rozwiązanie

a) Aby cząstka naładowana przeszła przez układ pól w selektorze, pola magnetyczne i elektryczne muszą być dobrane tak, aby siły działające na cząstkę się równoważyły (patrz rysunek). Przyjmijmy, że cząstka jest naładowana dodatnio. W przypadku ładunku ujemnego zmienią się zarówno zwrot siły elektrycznej, jak i zwrot siły Lorentza, co oznacza, że siły nadal będą się równoważyć.



Znamy zwrot indukcji magnetycznej, więc możemy zastosować jedną ze znanych metod i ustalić zwrot siły Lorentza. Będzie ona działać w dół. Oznacza to, że siła pochodząca od pola elektrycznego powinna działać do góry, więc dolna okładka musi mieć ładunek dodatni, a górna ujemny. Wynika z tego, że wektor natężenia pola elektrycznego jest zwrócony w górę.

b) Wartość natężenia pola możemy wyznaczyć z warunku równości sił:

$$F_B = F_E$$

Z treści zadania wynika, że kąt między wektorem prędkości a wektorem indukcji jest równy $\alpha = 90°$. Stąd $\sin 90° = 1$, więc wzór na wartość siły Lorentza przyjmuje w tym przypadku postać:

$$F_B = qvB$$

Z kolei siła pola elektrycznego jest iloczynem ładunku i natężenia pola elektrycznego:

$$F_E = qE$$

Po wstawieniu wzorów opisujących obie siły do równania wyrażającego warunek równości sił otrzymujemy:

$$qvB = qE$$

Z powyższego równania wyznaczamy natężenie pola elektrycznego:

$$E = vB$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$E = 2 \cdot 10^6 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 0{,}1\,\mathrm{T} = 2 \cdot 10^5 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

$$[E] = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot \frac{\mathrm{N}}{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot \mathrm{C}} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

c) Napięcie przyłożone między płytkami selektora obliczymy ze wzoru na natężenie pola elektrycznego w kondensatorze:

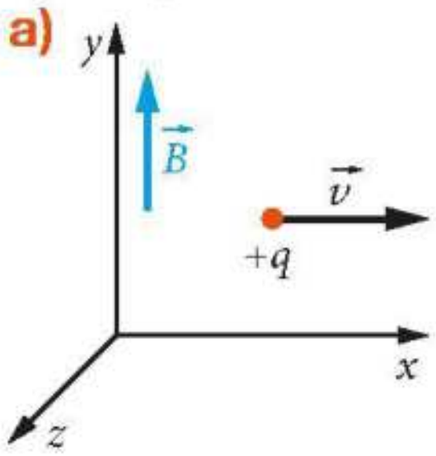
$$E = \frac{U}{d} \rightarrow U = Ed$$

$$U = 2 \cdot 10^5 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} \cdot 0{,}01\,\mathrm{m} = 2000 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} = 2\,\mathrm{kV}$$

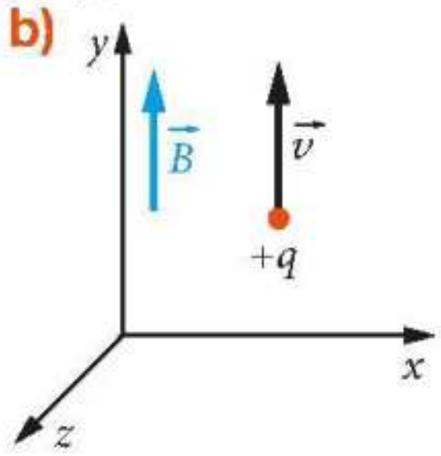
Odpowiedź: Wektor natężenia pola elektrycznego, który pozwala cząstce na spełnienie warunków opisanych w zadaniu, jest zwrócony w górę. Natężenie pola elektrycznego między płytkami selektora ma wartość $2 \cdot 10^5 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ (czyli $2 \cdot 10^5 \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$), a napięcie między nimi wynosi 2 kV.

1. W układzie współrzędnych przedstawiono dodatnio naładowaną cząstkę w polu magnetycznym, którego wektor indukcji $\vec{B}$ jest zwrócony zgodnie ze zwrotem osi y. Na rysunkach a) i b) zaznaczono wektor prędkości cząstki. Określ kierunek i zwrot siły Lorentza w obu przedstawionych przypadkach.

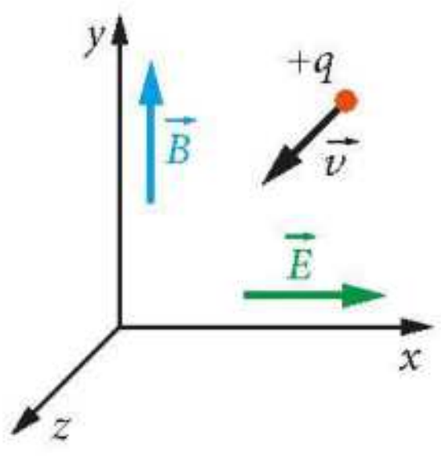
a)



b)



2. W układzie współrzędnych przedstawiono dodatnio naładowaną cząstkę umieszczoną w jednorodnych polach: magnetycznym i elektrycznym. Określ kierunki i zwroty siły elektrycznej i siły magnetycznej, które działają na cząstkę.



3. Siła magnetyczna działająca na proton promieniowania kosmicznego poruszający się w kierunku Ziemi z prędkością $v = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ma wartość $F = 1{,}7 \cdot 10^{-16}$ N. Oblicz wartość indukcji pola magnetycznego w tym miejscu, jeśli kierunek prędkości protonu tworzy z wektorem indukcji kąt 45°.

4. Naładowana cząstka porusza się bez zmiany kierunku w obszarze o wzajemnie prostopadłych polach elektrycznym i magnetycznym, których wartości wynoszą odpowiednio $E = 4000 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ i $B = 20$ mT. Oblicz prędkość cząstki przy założeniu, że jest ona:

a) protonem, **b)** elektronem.

Czy prędkość zależy od rodzaju cząstki? Odpowiedź uzasadnij.

5. Elektron porusza się w polu magnetycznym o indukcji $B = 1{,}4$ T z prędkością $v = 5 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, w którym działa na niego siła $F = 9{,}7 \cdot 10^{-16}$ N. Oblicz kąt między kierunkiem wektora prędkości elektronu a kierunkiem linii pola magnetycznego.

6. Zainstaluj w smartfonie aplikację Phyphox. Sprawdź, czy działa w niej magnetometr. Jeśli nie – twój telefon nie ma czujnika pola magnetycznego i nie możesz wykonać zadania. Jeśli tak – włącz magnetometr. Zobaczysz, że aplikacja mierzy trzy składowe wektora indukcji $\vec{B}$ wzdłuż osi oznaczonych x, y, z.
Uwaga! W punktach c i d nie zbliżaj magnesu do telefonu bardziej niż na 10 cm, aby nie uszkodzić urządzenia.

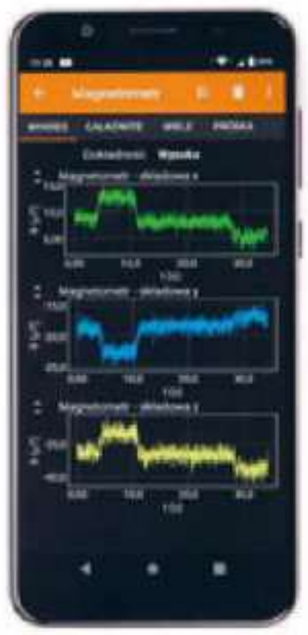
a) Połóż telefon płasko z dala od magnesów i ferromagnetyków. Twój telefon mierzy teraz wektor indukcji ziemskiego pola magnetycznego, który ma składową poziomą (w kierunku północ-południe) oraz składową pionową. Obracaj telefon i obserwuj, jak zmieniają się poszczególne składowe wektora indukcji. Zastanów się, jak na tej podstawie określić ustawienie osi x, y i z magnetometru względem obudowy telefonu.

b) Zmierz poziomą i pionową składową indukcji ziemskiego pola magnetycznego. Oblicz wartość wektora indukcji magnetycznej.

c) Zbliżaj mały magnes do telefonu, aby sprawdzić, gdzie dokładniej w jego obudowie znajduje się czujnik pola magnetycznego.

d) Zmierz indukcję pola wytwarzanego przez mały magnes w różnych odległościach od magnesu. Pamiętaj, że przyrząd mierzy całkowite pole magnetyczne – magnesu i Ziemi. Przedstaw swoje dane na wykresie.



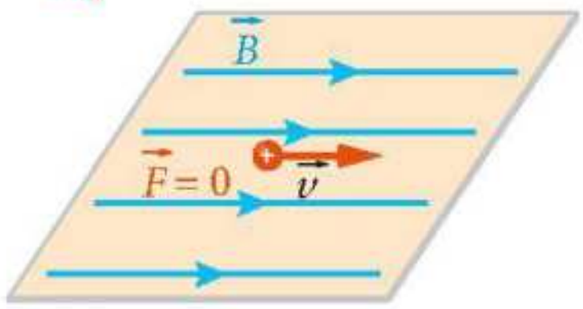


14.4. Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym

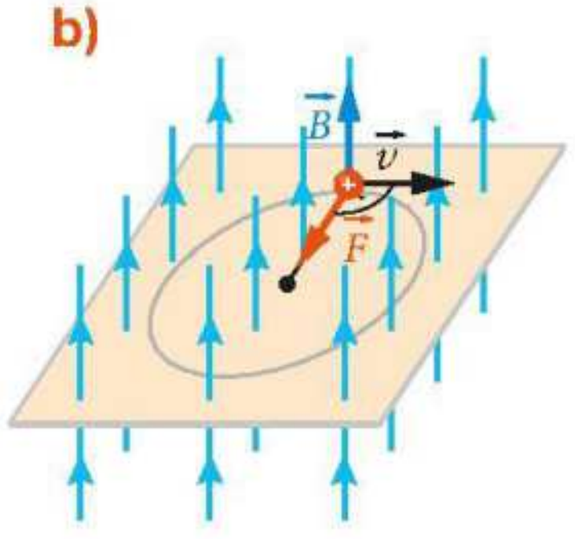
Przypomnij sobie

- Na ciało o ładunku q poruszające się w polu magnetycznym o indukcji $\vec{B}$ z prędkością $\vec{v}$ działa siła magnetyczna zwana siłą Lorentza: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$.
- Jeśli na ciało działa siła wypadkowa o niezmiennej wartości i stale prostopadła do jego prędkości, to ciało porusza się po okręgu. Siłę taką nazywamy siłą dośrodkową.

a)



b)



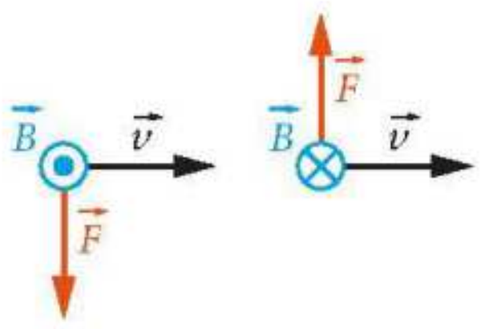
Rys. 14.22. Siła Lorentza działająca na ładunek poruszający się: a) wzdłuż linii pola, b) prostopadle do linii pola

Zbadajmy, jak naładowane ciało (rozpatrywane jako punkt materialny) porusza się w jednorodnym polu magnetycznym. Przyjmijmy, że siła Lorentza jest jedyną siłą działającą na ciało w tym polu.

Ruch ładunku wzdłuż linii pola i prostopadle do nich

W przypadku gdy naładowane ciało porusza się **wzdłuż linii pola**, kąt α między wektorami $\vec{B}$ i $\vec{v}$ jest równy zeru, a ponieważ $\sin 0° = 0$, zgodnie ze wzorem $F = qvB\sin\alpha$ otrzymujemy $F = 0$.
Tak więc na ciało poruszające się wzdłuż linii pola nie działa siła Lorentza i porusza się ono ruchem jednostajnym prostoliniowym (rys. 14.22a).

Rozważmy teraz przypadek, gdy w pewnej chwili ciało porusza się **prostopadle do linii pola**. Wówczas działająca na ciało siła Lorentza jest prostopadła zarówno do prędkości, jak i do wektora indukcji $\vec{B}$ (rys. 14.22b). Jak wiesz, siła prostopadła do prędkości nie powoduje zmiany jej wartości, zmienia się jedynie jej kierunek. Ponieważ wraz z nim (gdy ciało skręca) zmienia się także kierunek siły $\vec{F}$ (jest on stale prostopadły do prędkości $\vec{v}$), ciało porusza się po okręgu. Siła Lorentza odgrywa więc rolę siły dośrodkowej.



Rys. 14.23. Ruch ładunku prostopadły do linii pola przedstawiony w płaszczyźnie obserwatora

Do przedstawienia tej sytuacji na rysunku 14.23 korzystamy z dość często stosowanej konwencji oznaczania wektorów prostopadłych do płaszczyzny rysunku następującymi symbolami:

⊙ – jeśli wektor jest skierowany w stronę patrzącego,

⊗ – jeśli wektor jest skierowany w głąb kartki.

Symbole te stanowią schematyczny rysunek strzały do łuku widzianej z przodu lub z tyłu, podobnie jak typowa strzałka to schematyczny obraz strzały do łuku, tyle że widzianej z boku.

Promień okręgu, po którym porusza się naładowane ciało

Do obliczenia promienia R okręgu, po którym porusza się ciało, posłużymy się wzorem na siłę dośrodkową:

$$F = \frac{mv^2}{R}$$

Siła dośrodkowa, cz. I s. 158

Funkcję siły dośrodkowej pełni w tym przypadku siła Lorentza, więc:

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

Z tego wzoru wyznaczamy promień i otrzymujemy:

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

$\vec{v} \perp \vec{B}$
$\alpha = 90°$
$\sin\alpha = 1$
$F = qvB$

$$[R] = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{C} \cdot \mathrm{T}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{N}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}}{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}} = \mathrm{m}$$

Promień okręgu, po którym porusza się naładowane ciało w polu magnetycznym, jest więc wprost proporcjonalny do m i v oraz odwrotnie proporcjonalny do q i B. Zależności te można wyjaśnić intuicyjnie:

- im większa masa ciała, tym większa jego bezwładność, a więc tym trudniej zmienić kierunek jego ruchu,
- im większa prędkość ciała, tym okrąg, po którym się porusza, ma większy promień (ciało przebędzie dłuższą drogę, zanim zatoczy pełny okrąg),
- im większy ładunek ciała i im silniejsze pole magnetyczne, tym większa wartość siły Lorentza, a większa siła powoduje większe zakrzywienie toru ruchu ciała.

Czas jednego pełnego okrążenia możemy obliczyć ze wzoru:

$$v = \frac{2\pi R}{T} \rightarrow T = \frac{2\pi R}{v}$$

Ruch jednostajny po okręgu, cz. I s. 111

Gdy do tego wzoru podstawimy wyznaczony wcześniej promień R, to:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

Widzimy, że okres – a więc i częstotliwość – obiegu ciała w polu magnetycznym **nie zależy od prędkości** tego ciała.

Pole magnetyczne jest wykorzystywane w badaniach cząstek elementarnych (protonów, elektronów itd.). Na przykład w używanych dawniej do badań komorach pęcherzykowych cząstki biegnące przez przegrzaną ciecz powodowały powstawanie pęcherzyków pary. Choć samej cząstki nie widać, można było zobaczyć i sfotografować jej ślad (rys. 14.24).

Ponieważ komora znajdowała się w polu magnetycznym o znanej indukcji, kierunek, w którym skręcała cząstka, i promień okręgu, po którym się poruszała, pozwalały określić znak jej ładunku oraz pęd cząstki nawet bez znajomości masy. Było to możliwe, bo wszystkie badane cząstki miały ładunek równy co do wartości ładunkowi elementarnemu.



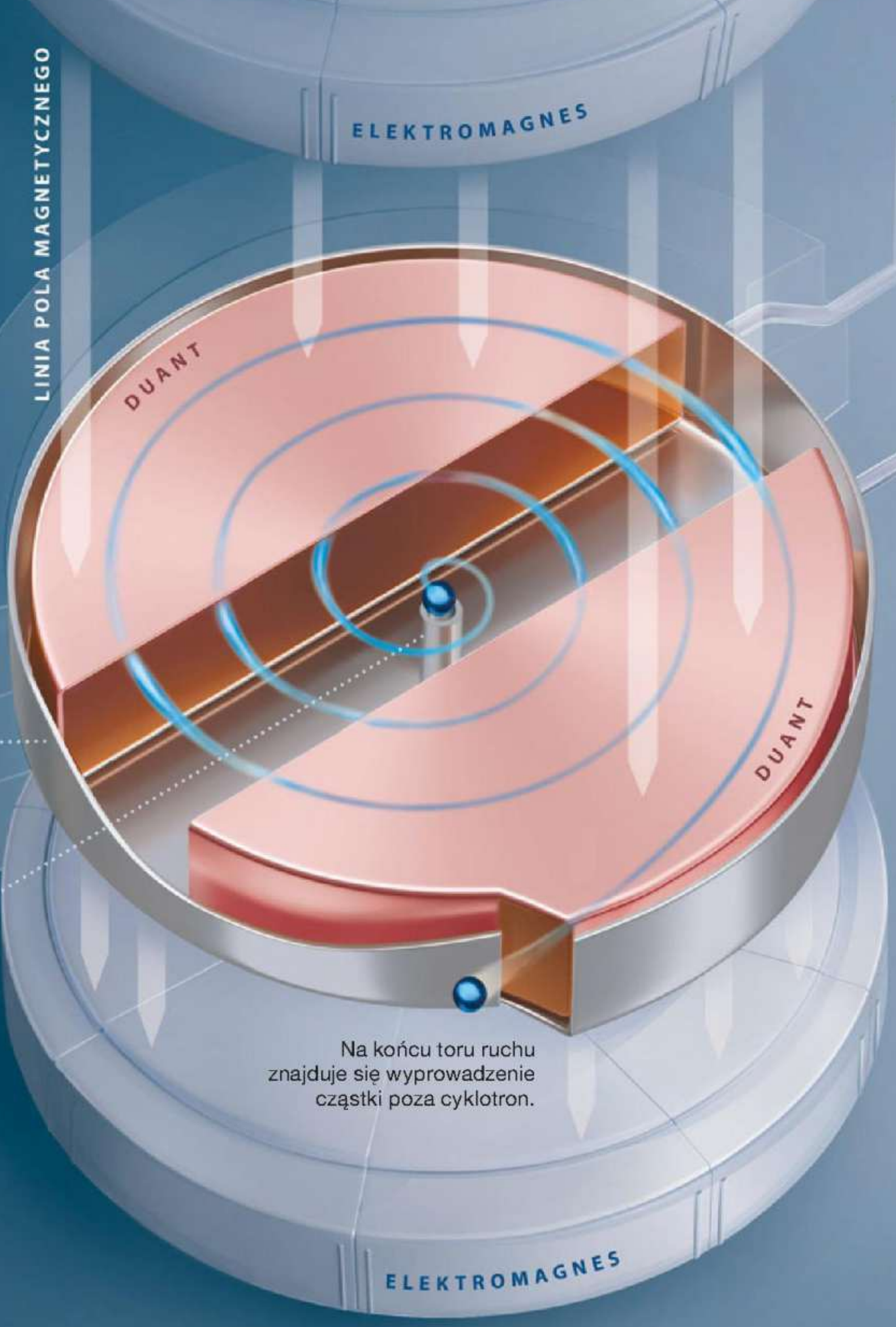
Rys. **14.24.** Tory cząstek w komorze pęcherzykowej

Cyklotron

Na s. 121 pokazano akcelerator liniowy. Innym rodzajem akceleratora jest cyklotron, w którym naładowana cząstka porusza się po linii zbliżonej do spirali. Przedstawiamy najprostszy typ cyklotronu, skonstruowany już w 1931 r.

Sercem cyklotronu są dwie półkoliste elektrody – komory wykonane z miedzi, zwane **duantami**.

Nad i pod duantami znajdują się silne **elektromagnesy**, które wytwarzają pole magnetyczne o liniach skierowanych prostopadle do duantów.



Duanty umieszczone są wewnątrz **komory próżniowej**.

Naładowane cząstki są wprowadzane do cyklotronu pośrodku, między duantami.

Na końcu toru ruchu znajduje się wyprowadzenie cząstki poza cyklotron.

Ruch cząstki

Ruch cząstki wynika z oddziaływania na nią pola elektrycznego i magnetycznego. Prześledźmy dokładniej jej tor ruchu w cyklotronie.



1 Cząstka została wprowadzona do cyklotronu. Ponieważ pole magnetyczne jest skierowane prostopadle do duantów, naładowana cząstka zaczyna się poruszać po okręgu.

2 Duanty są podłączone do źródła napięcia, zatem gdy cząstka dotrze do przerwy między duantami, znajdzie się pod wpływem pola elektrycznego, które spowoduje jej przyspieszenie.

W trakcie ruchu cząstki wewnątrz duantu jej prędkość się nie zmienia. Tor ruchu cząstki jest jedynie zakrzywiany w wyniku oddziaływania pola magnetycznego.

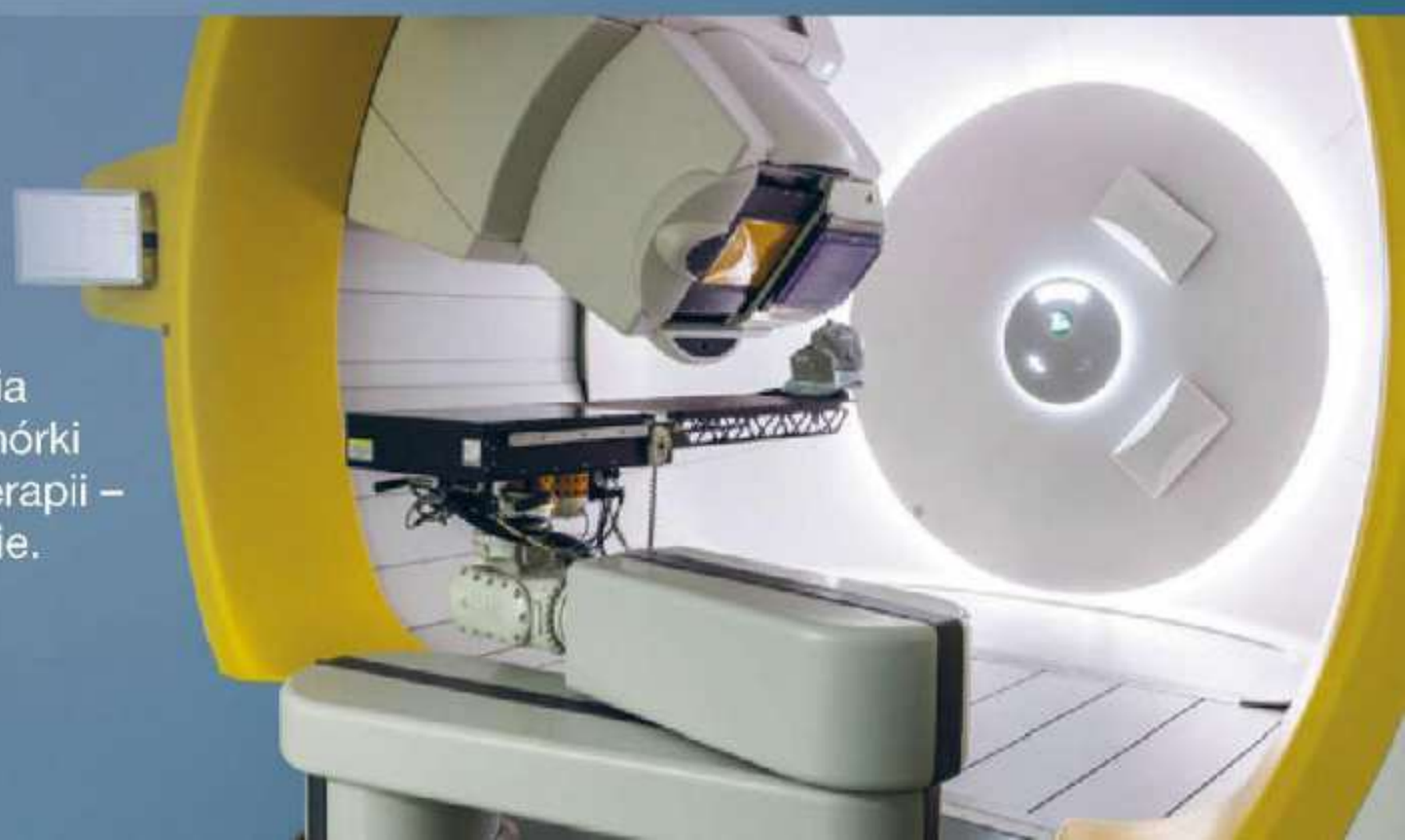
3 Po pokonaniu kolejnej połowy okręgu cząstka znów trafia na przerwę między duantami, ale w tym momencie polaryzacja duantów jest już zmieniona i cząstka znowu przyspiesza.

4 Cykl się powtarza. Co pół okręgu zmienia się polaryzacja duantów, a każde przejście między duantami powoduje zwiększenie prędkości cząstki.

W trakcie ruchu zwiększa się nie tylko prędkość cząstki, lecz także promień okręgu, po którym się ona porusza. Dlatego czas, w jakim cząstka pokonuje drogę wewnątrz duantów, jest za każdym razem taki sam. Dzięki temu można zmieniać polaryzację duantów ze stałą częstotliwością.

Cyklotron w medycynie

Rozpędzone w cyklotronie protony wykorzystuje się np. do leczenia raka. Protony są absorbowane w precyzyjnie wyznaczonym (z dokładnością do 1 mm) obszarze guza nowotworowego, a ich energia kinetyczna jest tak duża, że niszczą one komórki rakowe. Na zdjęciu widzisz stanowisko do terapii – sam cyklotron zajmuje osobne pomieszczenie.

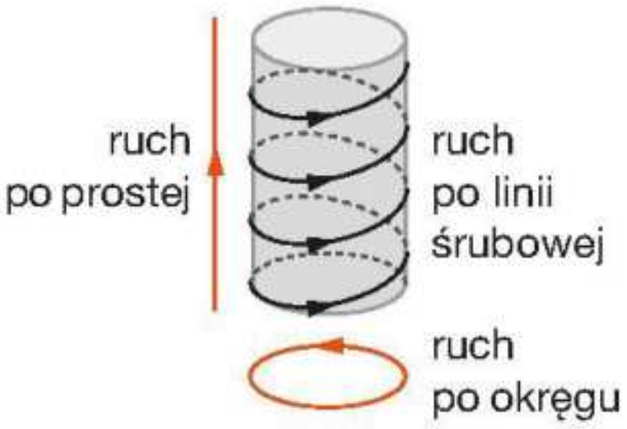


Dowolny kierunek prędkości początkowej

Jeśli wektor prędkości początkowej cząstki naładowanej nie jest ani równoległy, ani prostopadły do linii pola, to możemy rozłożyć go na składowe: równoległą i prostopadłą do linii pola. Ruch ciała możemy analizować osobno dla kierunku równoległego do linii pola i dla płaszczyzny prostopadłej do tych linii. Na podstawie wyników dotychczasowych rozważań możemy stwierdzić, że w opisanej sytuacji:

- w kierunku linii pola magnetycznego na ciało nie działa siła Lorentza, więc porusza się ono ruchem jednostajnym po linii prostej wzdłuż linii pola,
- w płaszczyźnie prostopadłej do linii pola ruch odbywa się po okręgu.

Złożeniem takich dwóch ruchów jest ruch po linii śrubowej (rys. 14.25).



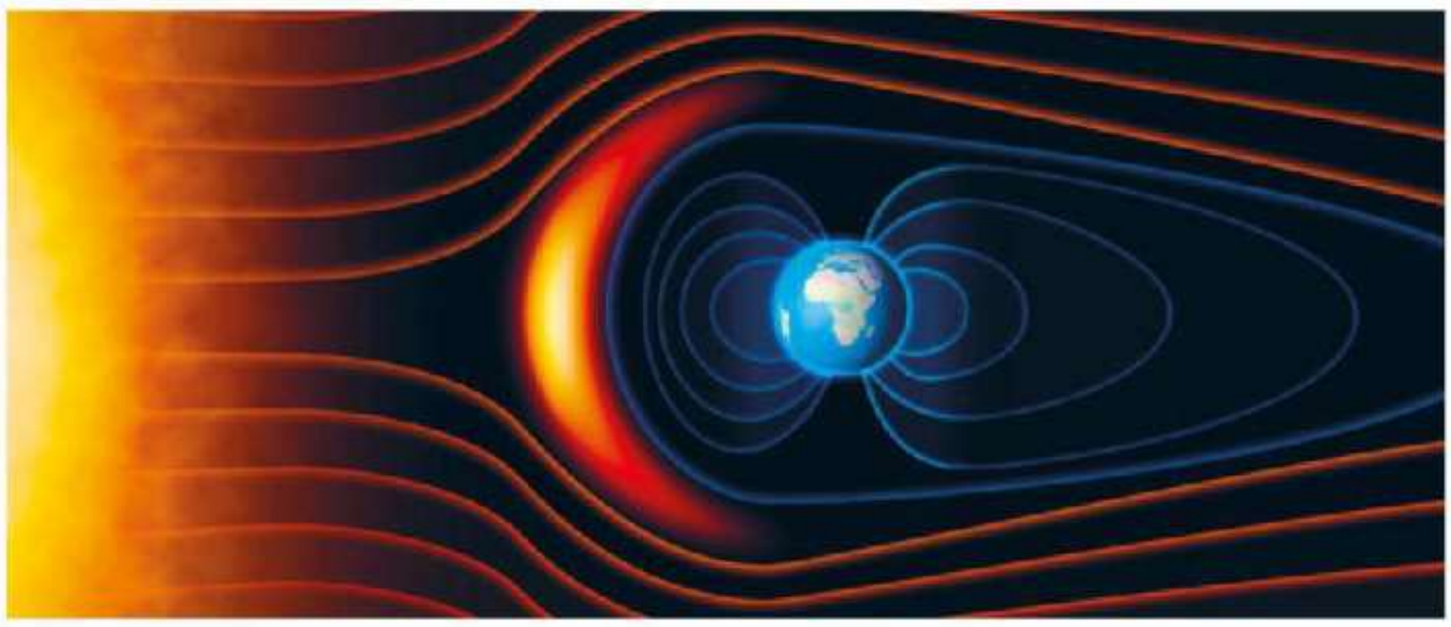
Rys. **14.25.** Ruch ciała po linii śrubowej to złożenie ruchu po okręgu i ruchu po prostej

Widzimy więc, że torem naładowanej cząstki w jednorodnym polu magnetycznym może być:

- linia prosta – gdy prędkość początkowa jest równoległa do linii pola,
- okrąg – gdy prędkość początkowa jest prostopadła do linii pola,
- linia śrubowa – w pozostałych przypadkach.

Wiatr słoneczny

Do Ziemi nieustannie dociera **wiatr słoneczny**, czyli strumień naładowanych cząstek, głównie protonów, pochodzących ze Słońca. Pole magnetyczne Ziemi zakrzywia tor ich ruchu i powoduje, że większość cząstek omija naszą planetę w odległości nawet kilkudziesięciu tysięcy kilometrów, a więc znacznie dalej, niż sięga atmosfera (rys. 14.26).



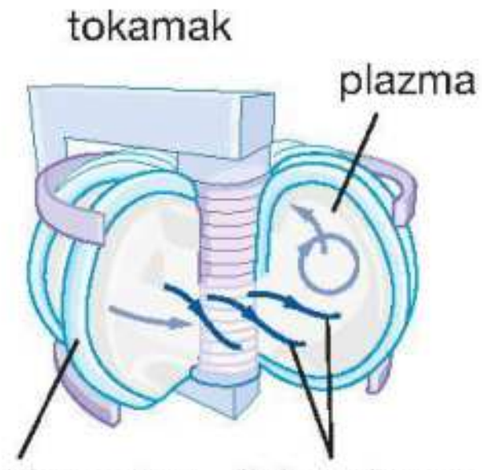
Rys. **14.26.** Pole magnetyczne Ziemi chroni Ziemię przed wiatrem słonecznym

W ten sposób pole magnetyczne chroni naszą planetę przed wiatrem słonecznym. Aby zrozumieć, jakie stanowi on zagrożenie, porównajmy Ziemię z Marsem.

Sąsiednia planeta jest pozbawiona pola magnetycznego i prawie nie ma atmosfery. Astronomowie łączą te fakty i przypuszczają, że atmosfera Marsa została zdmuchnięta przez wiatr słoneczny. Mówiąc ściślej, cząstki wiatru słonecznego dostarczały cząsteczkom gazów w atmosferze Marsa energii, która w wielu przypadkach była tak duża, że pozwalała pokonać oddziaływanie grawitacyjne planety.

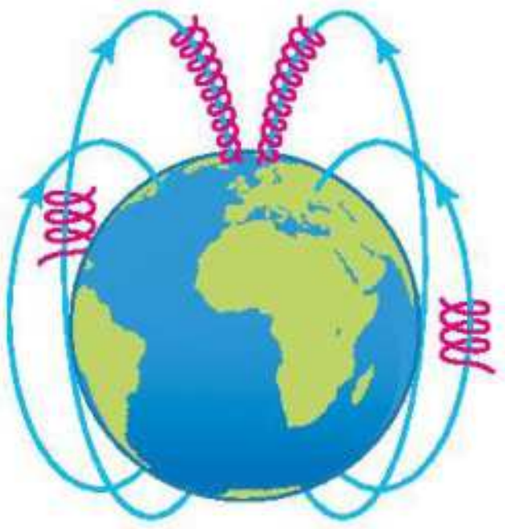
A to ciekawe

Siła Lorentza pozwala utrzymać w warunkach ziemskich gaz naładowanych cząstek o temperaturze rzędu miliona kelwinów w taki sposób, aby nie dotykał ścianek naczynia. Gdyby stało się inaczej, naczynie uległoby zniszczeniu. Opisane warunki są potrzebne do przeprowadzenia kontrolowanej reakcji syntezy termojądrowej – przemiany wodoru w hel, w której wyzwala się bardzo duża energia. Prace nad syntezą termojądrową mają na celu nie tylko poznawanie praw fizyki, lecz także wymiar praktyczny: elektrownie termojądrowe byłyby znacznie wydajniejsze i bezpieczniejsze od elektrowni jądrowych, opartych na rozszczepieniu uranu.
Na rysunku widzisz schemat tokamaka (z ros. – toroidalna komora z cewką magnetyczną) – urządzenia do badań nad taką syntezą.



Powstawanie zorzy polarnej

Niektóre cząstki wiatru słonecznego dostają się jednak w pobliże Ziemi. Gdy się tak stanie, ziemskie pole magnetyczne kieruje je ku biegunom magnetycznym naszej planety. Dzieje się tak mimo niejednorodności ziemskiego pola magnetycznego. Jeśli uwzględnimy pole tylko na małym obszarze, możemy uznać je za pole jednorodne, a w takim polu cząstki naładowane poruszają się wokół linii pola po linii śrubowej. Gdy linia pola lekko zakręca, linia śrubowa, po której porusza się cząstka, zakręca razem z nią (rys. 14.27).
W obszarach podbiegunowych naładowane cząstki powodują wybijanie elektronów z cząsteczek znajdujących się w górnych warstwach jonosfery, czyli jonizację powietrza. Jak już wiesz, jonizacja powietrza powoduje jego świecenie, co obserwujemy jako jedno z najpiękniejszych zjawisk w atmosferze – **zorzę polarną** (patrz zdjęcie na początku działu).
Jak sama nazwa wskazuje, zorzę najłatwiej zaobserwować w rejonach podbiegunowych. Jednak w czasie dużej aktywności słonecznej, gdy nasza gwiazda emituje szczególnie silny wiatr słoneczny, czasami to zjawisko bywa widoczne nawet z terenów Polski, zwłaszcza na północy naszego kraju. Zorzę zaobserwować można nocą, gdyż w dzień jej słabe światło zostaje przytłumione przez znacznie silniejsze światło słoneczne. Z tego samego powodu nie da się jej zauważyć w okolicach miast, gdzie niebo rozświetlone jest sztucznymi światłami.



Rys. 14.27. Zorza polarna powstaje dzięki sile Lorentza działającej na naładowane cząstki promieniowania kosmicznego

Po tej lekcji powinieneś

- analizować ruch naładowanej cząstki w jednorodnym polu magnetycznym;
- rozwiązywać zadania dotyczące ruchu cząstki naładowanej w polu magnetycznym;
- wyjaśniać rolę pola magnetycznego Ziemi w ochronie przed wiatrem słonecznym oraz mechanizm powstawania zorzy polarnej.

Pytania i zadania

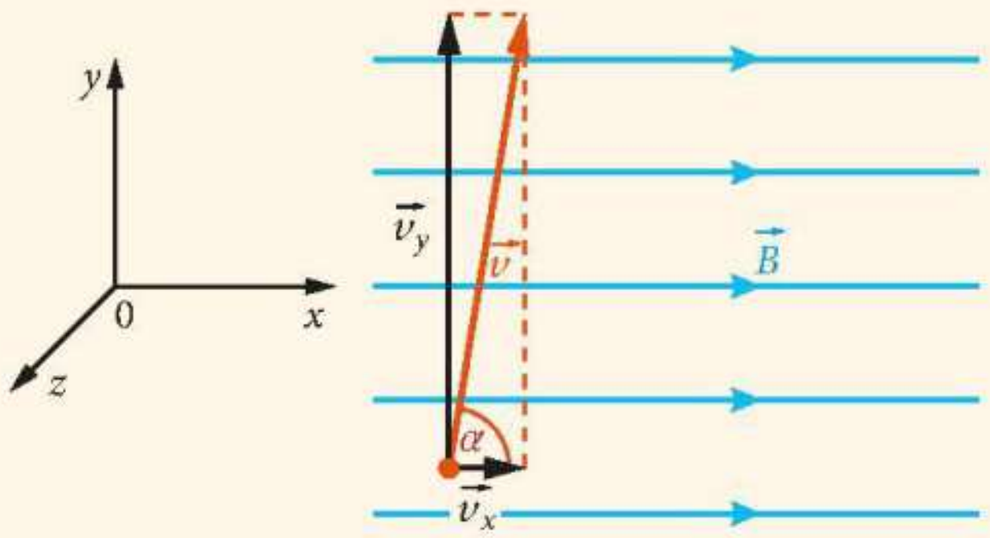
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Elektron porusza się z prędkością $v = 1\frac{\text{km}}{\text{s}}$ w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $B = 10\ \text{mT}$. Kąt między wektorem prędkości elektronu a liniami pola wynosi $\alpha = 80°$. Oblicz średnicę i skok linii śrubowej, po której porusza się elektron.

Rozwiązanie

Ponieważ elektron nie porusza się ani równolegle, ani prostopadle do linii pola, musimy rozpatrzyć jego ruch w każdym kierunku niezależnie, a następnie złożyć cały ruch cząstki z danych dla obu kierunków.

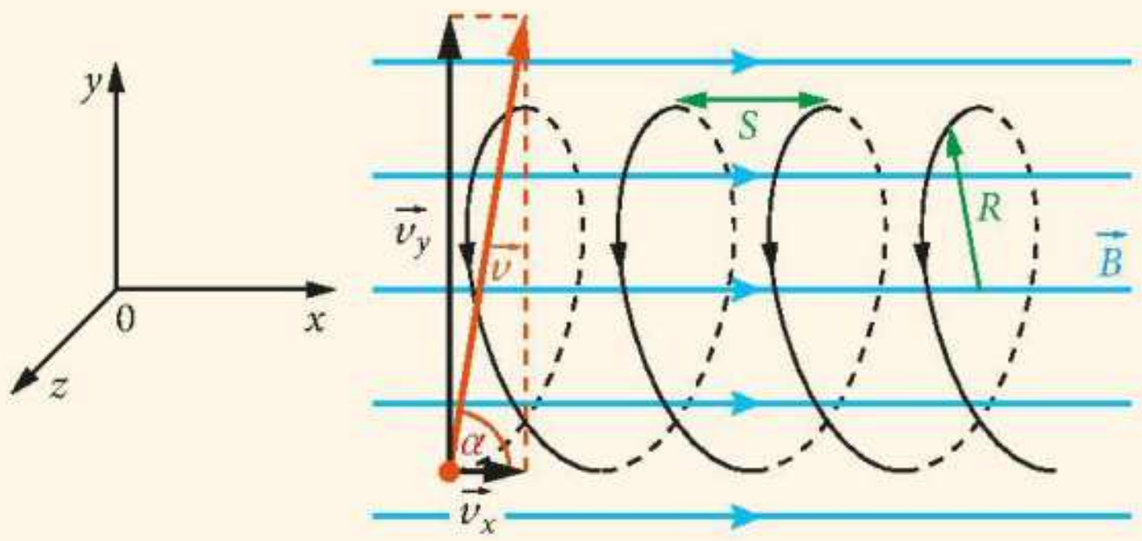


Prędkość początkową $\vec{v}$ rozkładamy na dwie składowe: równoległą do linii pola $\vec{v}_x$ i prostopadłą do linii pola $\vec{v}_y$ (patrz rysunek). Ich wartości wynoszą odpowiednio: $v_x = v\cos\alpha$ i $v_y = v\sin\alpha$.

Następnie analizujemy wpływ siły Lorentza na ruch elektronu w obu kierunkach niezależnie od siebie.

- Wzdłuż osi x elektron porusza się z prędkością, której wektor jest równoległy do wektora indukcji magnetycznej. Oznacza to, że siła magnetyczna $F_x = 0$.
  Elektron wzdłuż osi x porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, w którym przebyta droga jest równa: $x = v_x t = v\cos\alpha \cdot t$.

- Wzdłuż osi y elektron porusza się z prędkością, której wektor jest prostopadły do wektora indukcji magnetycznej, więc siła magnetyczna ma wartość $F_y = qv_yB = qvB\sin\alpha$.
  W tej sytuacji elektron zacznie poruszać się w płaszczyźnie yz po okręgu, którego promień i okres obiegu obliczyliśmy na s. 245:



$$R = \frac{mv_y}{qB} = \frac{mv\sin\alpha}{qB}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

Wracamy do ruchu cząstki, która wykonuje oba wyżej wymienione ruchy składowe jednocześnie. Porusza się po okręgu w płaszczyźnie yz, a zarazem ruchem prostoliniowym wzdłuż osi x. Tor ruchu wypadkowego elektronu jest więc linią śrubową.

Promień śruby R jest równy promieniowi okręgu, po jakim porusza się elektron:

$$R = \frac{mv\sin\alpha}{qB}$$

Średnica wynosi $d = 2R$, więc możemy zapisać:

$$d = \frac{2mv\sin\alpha}{qB} \qquad [d] = \frac{\mathrm{kg}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{C}\cdot\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}} = \frac{\mathrm{kg}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{kg}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\cdot\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{m}}} = \mathrm{m}$$

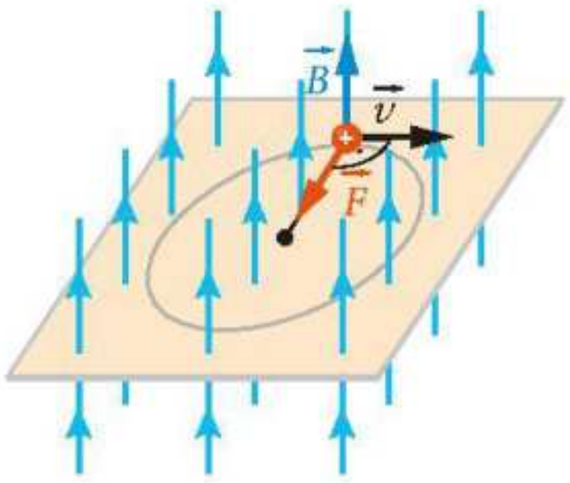
Po podstawieniu danych liczbowych otrzymamy: $d = 1{,}12 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m} = 1{,}12\ \mu\mathrm{m}$.
Skok linii śrubowej S jest równy drodze przebytej przez elektron ruchem jednostajnym z prędkością v_x wzdłuż linii pola w czasie okresu T:

$$S = v_x T = v\cos\alpha \cdot T = v\cos\alpha \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

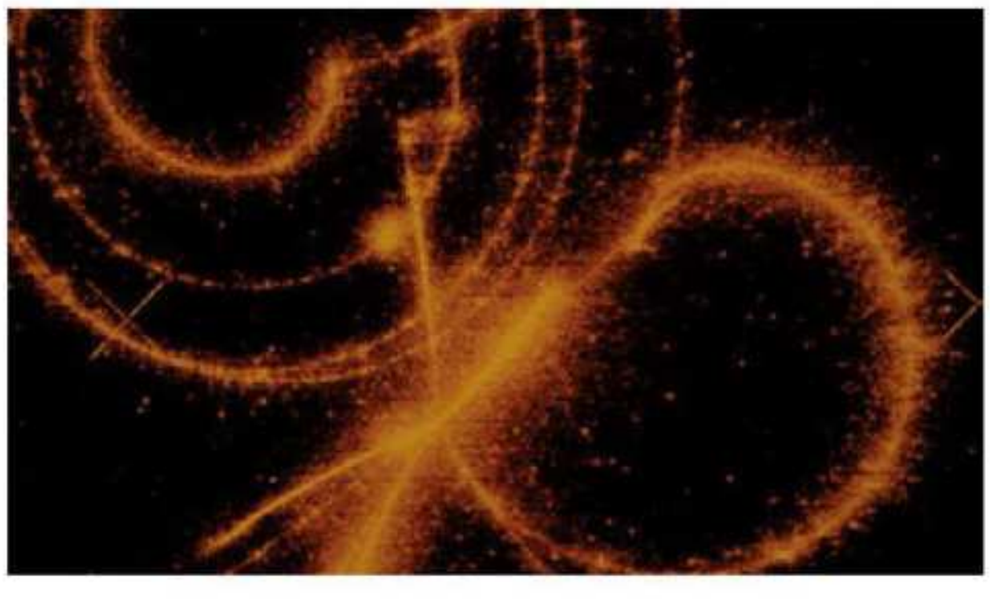
Po podstawieniu danych liczbowych mamy: $S = 6{,}2 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m} = 0{,}62\ \mu\mathrm{m}$.

Odpowiedź: Średnica linii śrubowej, po której porusza się elektron, wynosi 1,12 μm, a skok śruby jest równy 0,62 μm.

1. Rysunek przedstawia ruch dodatniego ładunku w polu magnetycznym. Określ, co zmieniłoby się na rysunku, gdyby ładunek był ujemny.



2. Na zdjęciu widzisz tory cząstek zarejestrowane w komorze mgłowej. Podczas wykonywania eksperymentu znane były: skala obrazu, prędkości cząstek, wartość indukcji magnetycznej B.
Wyjaśnij, dlaczego na podstawie tych danych nie da się wyznaczyć osobno masy i ładunku, ale można wyznaczyć stosunek masy do ładunku.



3. Bieguny magnetyczne Ziemi stale się przemieszczają i bywało już w jej historii tak, że znajdowały się z dala od biegunów geograficznych. Gdzie wówczas pojawiały się zorze polarne: przy biegunach geograficznych czy magnetycznych?



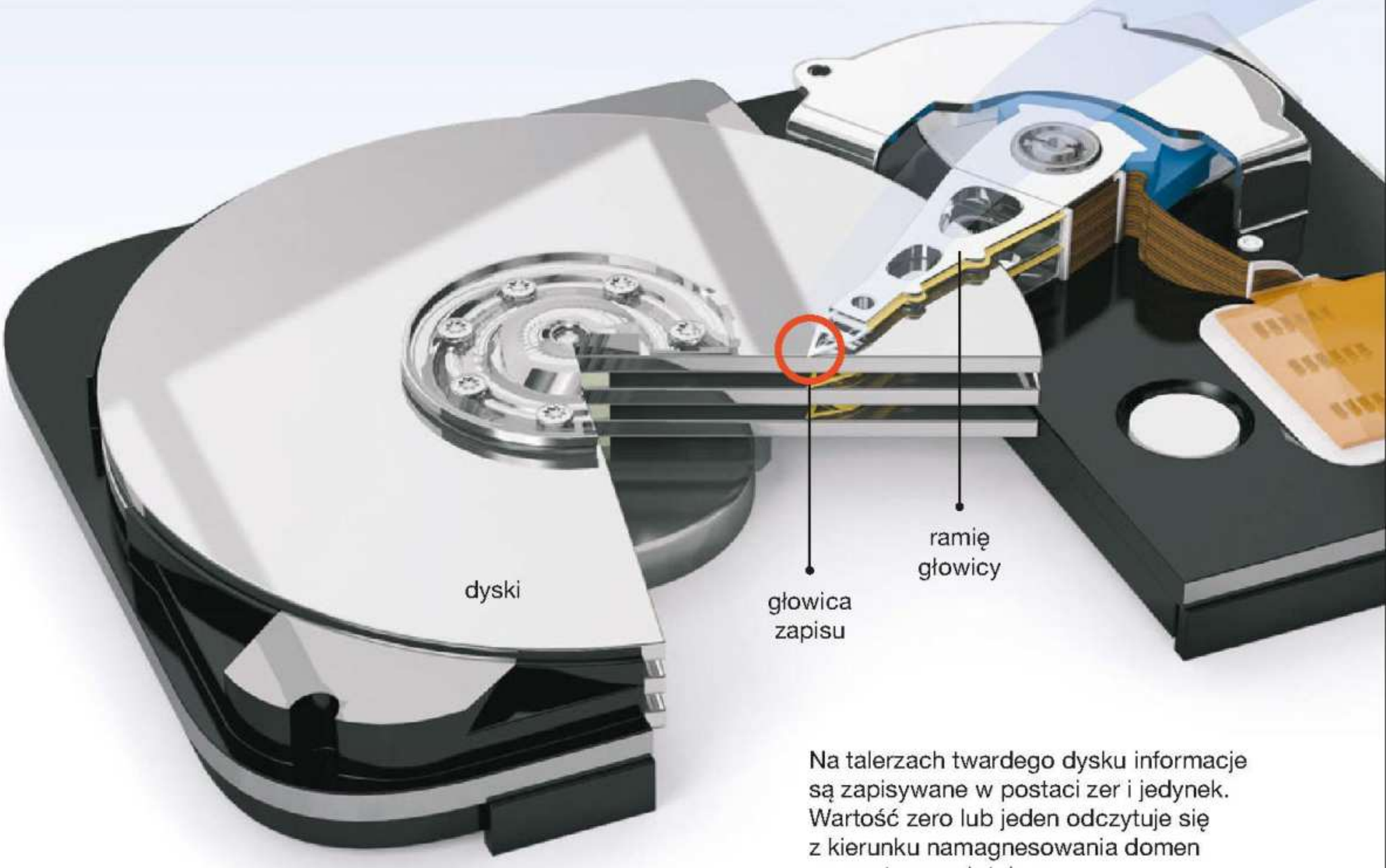
4. Elektron i proton promieniowania kosmicznego poruszają się z tą samą prędkością $5 \cdot 10^5\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ prostopadle do ziemskiego pola magnetycznego na wysokości, na której indukcja pola magnetycznego ma wartość $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ T. Przyjmij, że w rozważanym obszarze pole magnetyczne jest jednorodne.

a) Oblicz promień okręgu zakreślonego przez proton i porównaj jego tor z torem elektronu.

b) Ile razy okres obiegu protonu jest większy od okresu obiegu elektronu?

Pamięć magnetyczna

Zanim pojawiła się pamięć optyczna, stosowana np. w płytach DVD, czy pamięć półprzewodnikowa flash, stosowana np. w kartach SD, informacje zapisywano przede wszystkim w pamięci magnetycznej.
Choć mogłoby się wydawać, że wykorzystywanie magnetyzmu do zapisu danych odchodzi już do lamusa, jest zupełnie odwrotnie – badane w ostatnich latach zjawisko gigantycznego magnetooporu, które zachodzi w strukturach wielowarstwowych, otwiera olbrzymie możliwości konstrukcji jeszcze szybszych systemów pamięciowych.



Na talerzach twardego dysku informacje są zapisywane w postaci zer i jedynek. Wartość zero lub jeden odczytuje się z kierunku namagnesowania domen magnetycznych talerza.

Stare magnetyczne nośniki danych

Cechą wspólną wszystkich magnetycznych nośników danych jest zapisywanie informacji za pomocą kierunku namagnesowania domen magnetycznych substancji ferromagnetycznej.



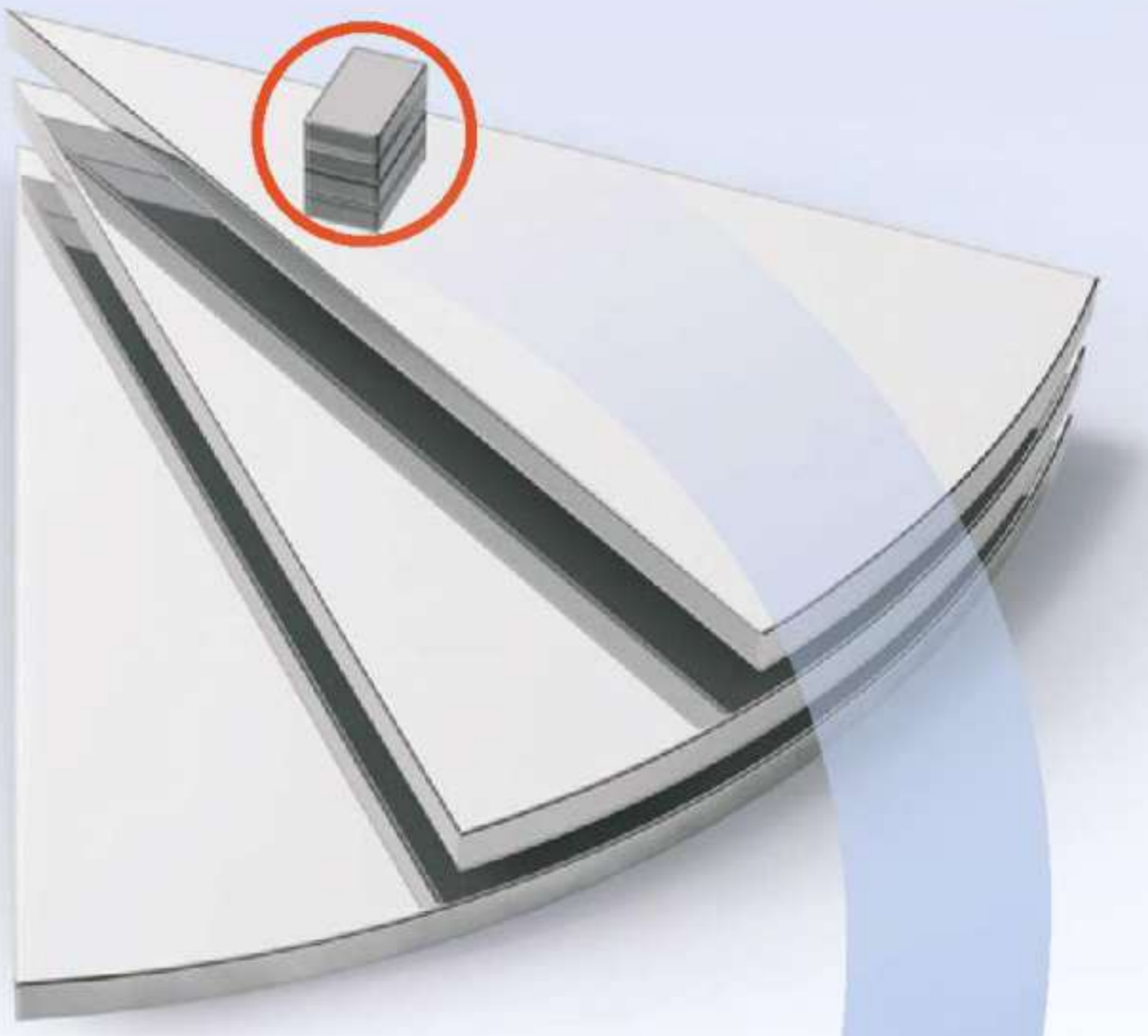
kaseta magnetofonowa



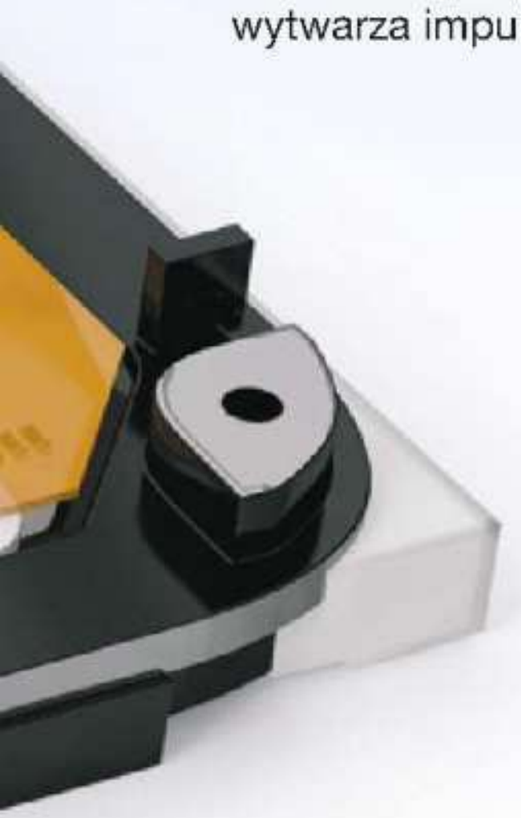
dyskietka



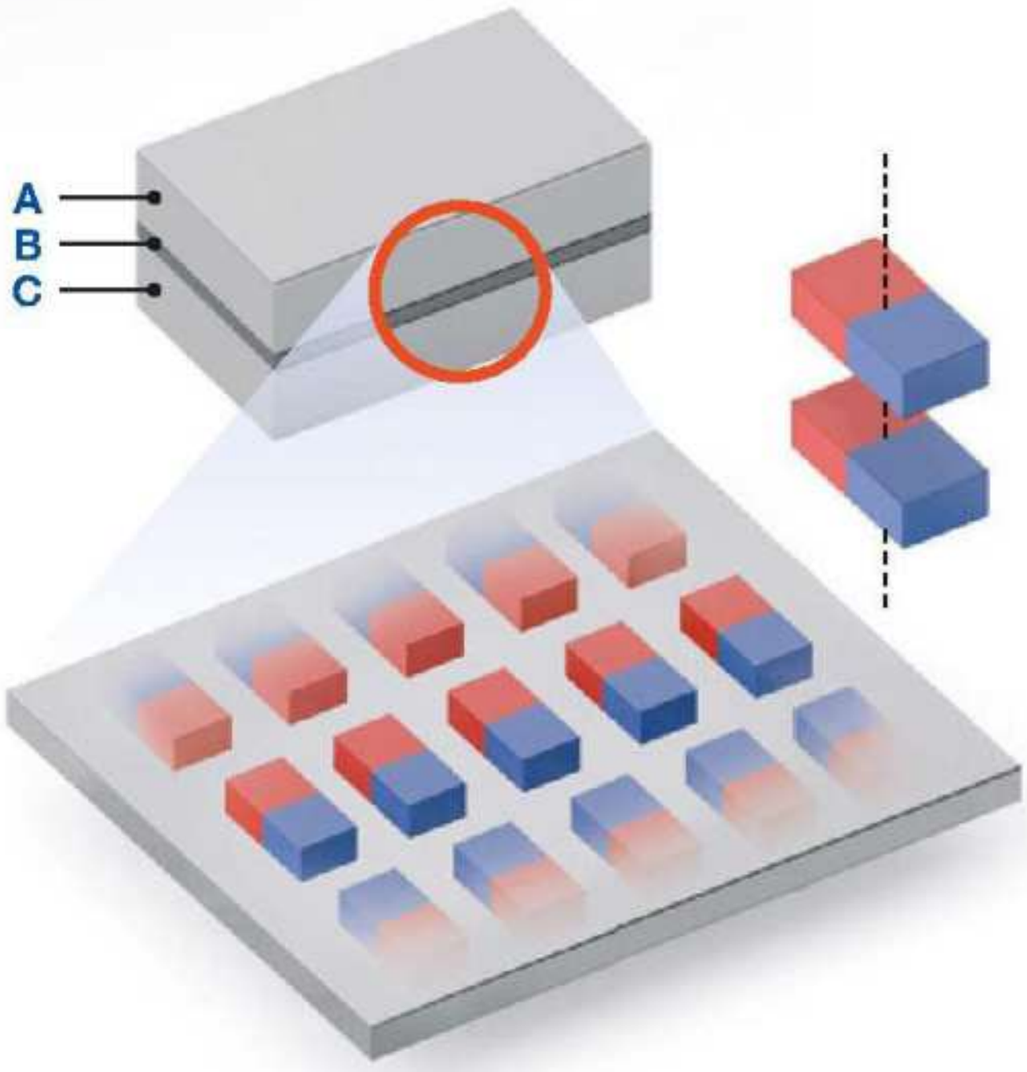
kaseta VHS



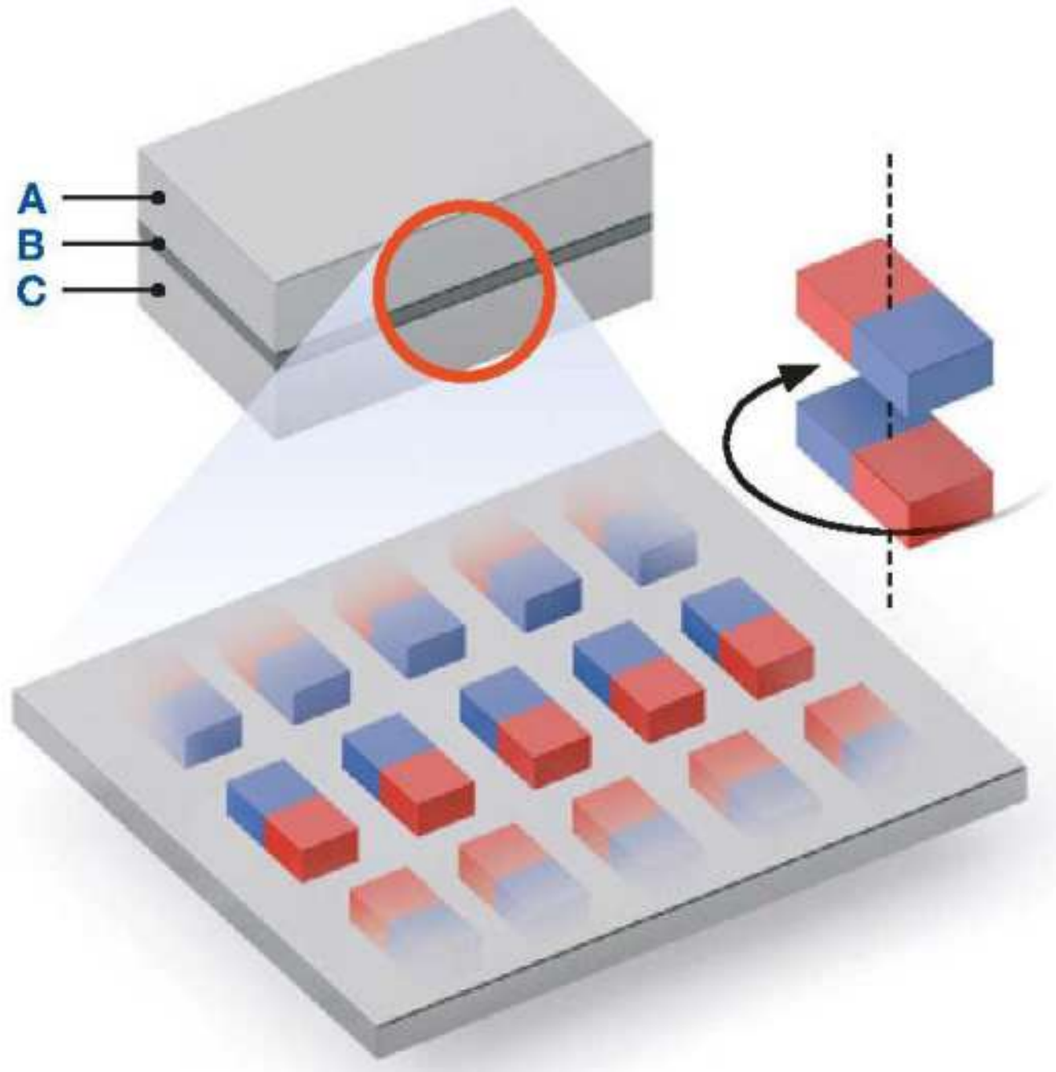
Podczas zapisu głowice elektromagnetyczne za pomocą impulsów elektrycznych powodują namagnesowanie domen na nośniku. Podczas odczytu głowica rejestruje ułożenie domen magnetycznych i na tej podstawie wytwarza impulsy elektryczne.



Głowica składa się z trzech warstw. Warstwa górna (**A**) ma stały kierunek namagnesowania. Warstwa dolna (**C**) przyjmuje taki kierunek namagnesowania, jaki mają domeny w talerzu znajdujące się pod głowicą. Warstwa środkowa (**B**) jest wykonana z substancji, której opór elektryczny zależy od tego, czy warstwy A i C mają zgodny czy przeciwny kierunek namagnesowania.



1 Jeśli kierunek namagnesowania warstw jest zgodny, opór substancji jest mały i między warstwami A i C przepływa prąd – głowica odczytuje 0.



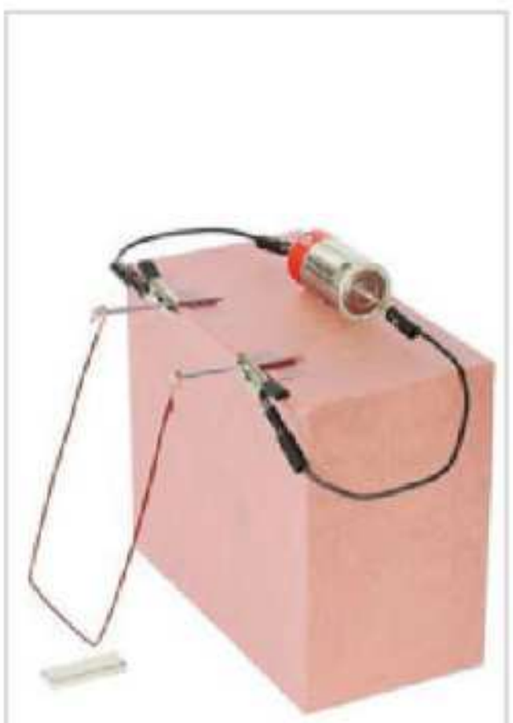
2 Jeśli kierunek namagnesowania warstw A i C jest przeciwny – opór staje się bardzo duży i prąd między warstwami nie płynie – głowica odczytuje 1.

14.5. Siła elektrodynamiczna

Przypomnij sobie

- Na poruszający się ładunek działa w polu magnetycznym siła Lorentza.
- Prąd elektryczny to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.

Skoro siła Lorentza działa na poruszający się ładunek, to znaczy, że działa także na cały strumień elektronów w przewodniku, w którym płynie prąd. Jakie to może mieć znaczenie? Aby się o tym przekonać, wykonamy doświadczenie.



Doświadczenie 28

1. Przygotuj dwa długie gwoździe, baterię D (najgrubszą dostępną w handlu), mocny magnes (np. neodymowy), przewody, magnesy do łączenia przewodów, taśmę klejącą oraz gruby miedziany przewód. Jeśli nie masz takiego przewodu, możesz skręcić razem kilka cieńszych przewodów bez izolacji.
2. Przyklej gwoździe taśmą klejącą do blatu stołu tak, aby wystawały poza jego brzeg (patrz zdjęcie).
3. Wykonaj ramkę z drutu miedzianego i zaczep ją na gwoździach tak, aby mogła się swobodnie kołysać (jak na zdjęciu).
4. Do ramki zbliż od dołu magnes.
5. Podłącz gwoździe do baterii.

Uwaga! Ramka się rozgrzewa, zwłaszcza w miejscach, gdzie dotyka gwoździ. Nie zostawiaj obwodu włączonego na dłużej niż to konieczne.

6. Co dzieje się z ramką? Co się zmieni, gdy obrócimy magnes drugim biegunem w górę? A gdy odwrotnie podłączymy przewody do baterii?

W doświadczeniu zaobserwowaliśmy odchylanie się przewodu. Stało się tak, ponieważ na płynące w nim elektrony w polu magnetycznym działała siła Lorentza. My widzimy działanie na cały przewodnik wypadkowej tych sił. Gdy odwróciliśmy bieguny magnesu, kierunek odchylenia się przewodu również się zmienił.

Siłę działającą w polu magnetycznym na przewodnik, przez który płynie prąd, nazywamy siłą elektrodynamiczną.

Mnogość nazw sił stosowanych w opisie zjawisk związanych z oddziaływaniem magnetycznym wynika z tego, że powstały one w czasach, gdy nie znano mechanizmu tego oddziaływania.
Należy jednak pamiętać, że siła działająca między magnesami trwałymi, siła Lorentza i siła elektrodynamiczna to różne przykłady działania tej samej siły – siły magnetycznej.

Obliczanie siły elektrodynamicznej

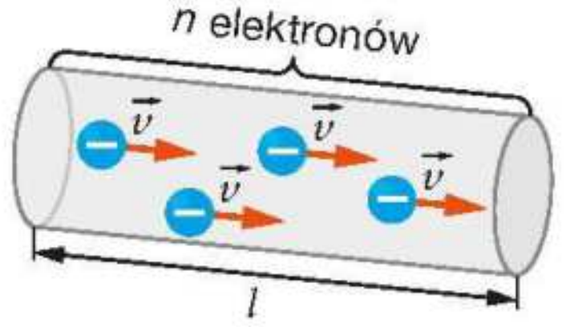
Siła elektrodynamiczna jest równa sumie sił Lorentza działających na poszczególne elektrony w przewodniku. Zwykle nie znamy ani liczby elektronów, ani ich prędkości. Okazuje się jednak, że te dane nie są potrzebne do wyznaczenia siły elektrodynamicznej – zamiast nich wystarczą nam długość przewodnika i natężenie prądu.

Załóżmy, że w polu magnetycznym o indukcji $\vec{B}$ umieściliśmy przewodnik o długości l. W przewodniku znajdują się elektrony swobodne o łącznym ładunku q, a ich prędkość dryfu wynosi v. Przepłynięcie przez cały przewód o długości l zajmuje pojedynczemu elektronowi czas t, przy czym:

Prędkość dryfu s. 149

$$v = \frac{l}{t}$$

W tym czasie przez przewód przepłynie ładunek q (rys. 14.28), a co za tym idzie, natężenie prądu w tym przewodniku wynosi $I = \frac{q}{t}$.



Rys. 14.28. W czasie, gdy elektron przepływa z jednego końca przewodu na drugi, przez przewód przepływa tyle elektronów swobodnych, ile się w nim znajduje

Na wszystkie elektrony działa łączna siła Lorentza:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Jeśli zdefiniujemy $\vec{l}$ jako wektor o długości l skierowany wzdłuż przewodu w stronę, w którą płynie prąd, możemy zapisać równość wektorową:

$$\vec{v} = \frac{\vec{l}}{t}$$

Wzór na łączną siłę Lorentza przyjmuje wówczas postać:

$$F = q\vec{v} \times \vec{B} = q\frac{\vec{l}}{t} \times \vec{B} = \frac{q}{t}\vec{l} \times \vec{B}$$

$$F = I\vec{l} \times \vec{B}$$

Wzór skalarny wyrażający wartość siły elektrodynamicznej wygląda następująco:

$$F = IlB \sin\alpha$$

gdzie α jest kątem między przewodem a liniami pola.

Ponieważ siła elektrodynamiczna jest szczególnym przypadkiem siły Lorentza, jej zwrot można także wyznaczać za pomocą reguły prawej ręki.

Zastosowanie siły elektrodynamicznej

W wykonanym przez nas doświadczeniu siła elektrodynamiczna powodowała krótkotrwały ruch niewielkiego ciała – ramki z drutu. Jednak ta sama siła znalazła zastosowanie w silnikach elektrycznych napędzających maszyny i pojazdy. O budowie silników powiemy w następnym rozdziale.

Po tej lekcji powinieneś

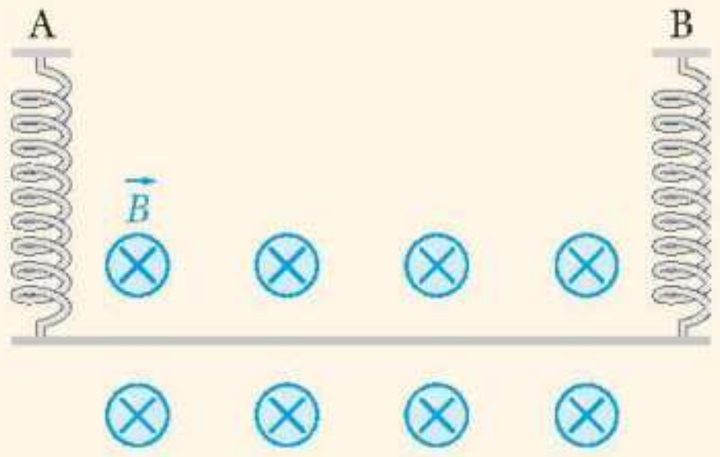
- demonstrować doświadczalnie działanie siły elektrodynamicznej;
- wiedzieć, że siła elektrodynamiczna i siła Lorentza to określenia siły magnetycznej w szczególnych sytuacjach;
- obliczać wartość oraz wyznaczać kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Metalowy pręt o masie $m = 10$ g i długości $l = 20$ cm został zawieszony poziomo na dwóch jednakowych sprężynkach, których górne końce połączono z biegunami źródła napięcia stałego.



Całość umieszczono w jednorodnym polu magnetycznym, którego linie biegły poziomo i prostopadle do osi pręta (patrz rysunek). Po zamknięciu obwodu przez pręt popłynął prąd o natężeniu $I = 5$ A. Po wytłumieniu drgań sprężynek okazało się, że wydłużenie każdej sprężynki zwiększyło się o 50%.

Określ kierunek przepływu prądu w pręcie i oblicz wartość indukcji pola magnetycznego.

Rozwiązanie

Na pręt zadziałała siła elektrodynamiczna prostopadła zarówno do kierunku linii pola, jak i kierunku przepływu prądu. Z treści zadania wiemy, że spowodowała ona wydłużenie sprężynek, zatem była zwrócona w dół. Zgodnie z regułą prawej ręki oznacza to, że prąd płynął od punktu B do punktu A (a więc zacisk B podłączono do dodatniego bieguna źródła prądu, a zacisk A do ujemnego).

Wydłużenie sprężyny jest wprost proporcjonalne do wartości działającej siły. Skoro więc zwiększyło się ono o połowę, to dodatkowa siła (elektrodynamiczna) musiała być równa połowie ciężaru pręta:

$$F_{el} = \frac{1}{2} mg$$

Ponieważ prąd płynie prostopadle do linii pola, siła elektrodynamiczna jest równa:

$$F_{el} = BIl$$

Z powyższej zależności wyznaczamy indukcję magnetyczną i podstawiamy wzór na siłę elektrodynamiczną:

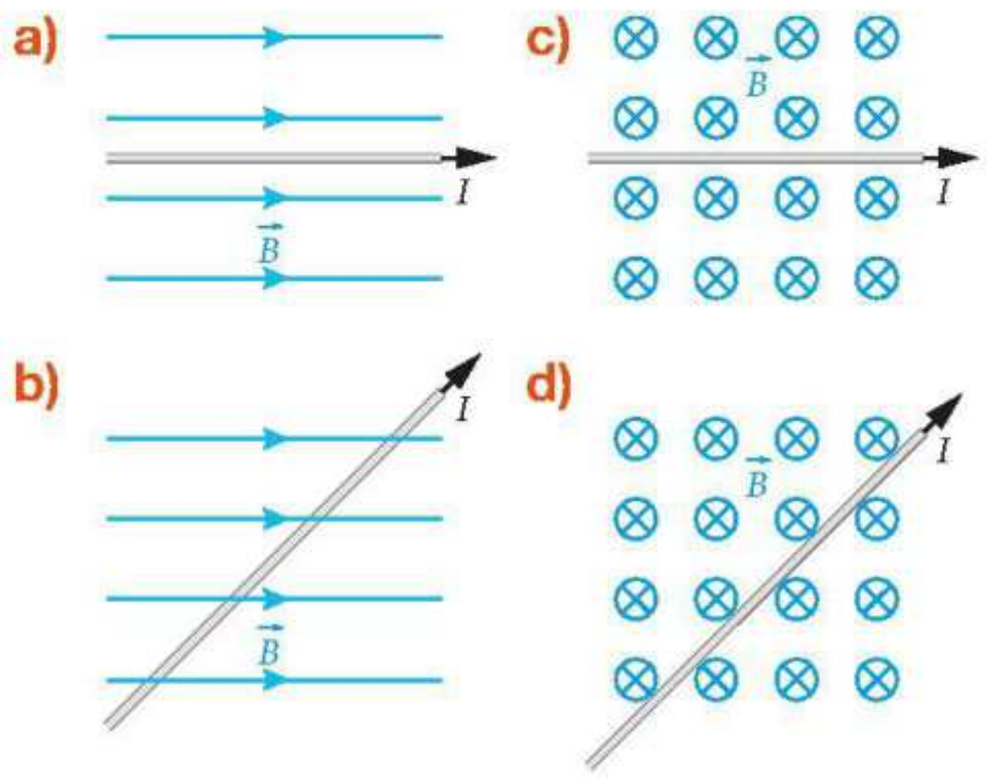
$$B = \frac{mg}{2Il}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$B \approx 0{,}05 \text{ T}$$

Odpowiedź: Prąd płynie od punktu B do punktu A. Indukcja pola magnetycznego ma wartość ok. 50 mT.

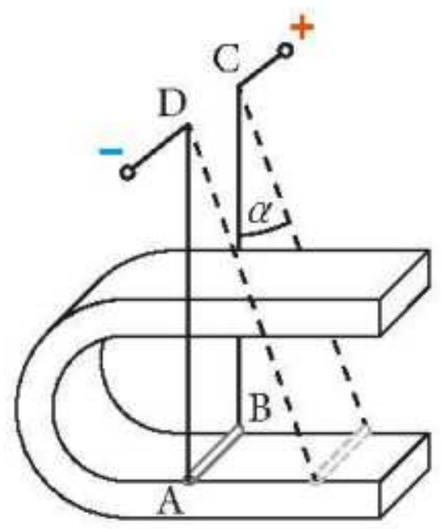
1. Przez prostoliniowy przewodnik o długości 5 m płynie prąd o natężeniu 8 A. Przewodnik ten znajduje się w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji 5 mT. Ułożenie przewodnika i przebieg linii pola przedstawiają rysunki. Oblicz wartość siły elektrodynamicznej działającej na przewodnik oraz określ jej kierunek i zwrot.



Uwaga. Na rysunkach b) i d) kąt między kierunkiem ułożenia przewodnika a brzegami kartki wynosi 45°.

2. Prosty przewód o długości 50 cm umieszczono w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $B = 1{,}5$ T. Oblicz kąt między przewodem a kierunkiem wektora indukcji magnetycznej, jeśli wiadomo, że przez przewód płynie prąd o natężeniu 8 A i działa na niego siła 2 N. Jaka siła działałaby na ten przewód, gdyby był ustawiony pod kątem 90° względem kierunku linii pola magnetycznego?

3. Aluminiowa ramka do demonstracji siły elektrodynamicznej została umocowana w polu magnetycznym magnesu tak, aby miała swobodę obrotu wokół osi poziomej przechodzącej przez punkty oznaczone na rysunku jako C i D. Gdy przez ramkę popłynął prąd o natężeniu 10 A, odchyliła się ona od pionu o kąt 20° (tak jak na rysunku). Odległość między punktami A i B to 5 cm. Określ zwrot wektora indukcji magnetycznej oraz oblicz jego wartość. W obliczeniach uwzględnij jedynie masę elementu AB, która wynosi 30 g.



4. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj silny magnes, lupę oraz lampkę biurkową lub nocną z tradycyjną żarówką, której bańka jest przezroczysta i widać w niej włókno.

b) Ustaw lampkę tak, aby świeciła na ścianę. Umieść lupę między żarówką a ścianą, w takiej odległości, aby na ścianie utworzył się ostry obraz włókna.

c) Zbliż magnes do włókna żarówki. Obserwuj, jak zmienia się obraz na ścianie.

d) Wyjaśnij obserwowane zjawisko.



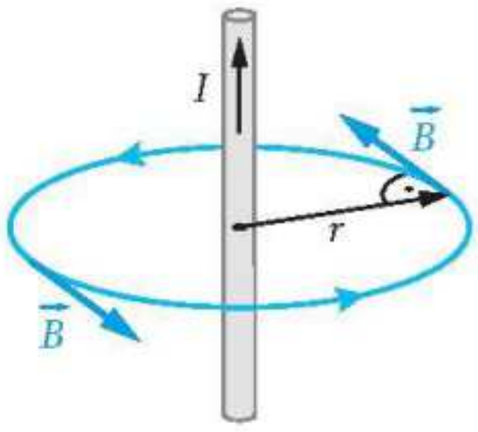
14.6. Indukcja magnetyczna pola wokół przewodnika z prądem

Przypomnij sobie

- Prostoliniowy przewodnik z prądem jest źródłem pola magnetycznego, którego linie są okręgami otaczającymi przewodnik.
- Linie pola magnetycznego pętli lub zwojnicy z prądem układają się podobnie do linii pola wokół magnesu, który umieścilibyśmy w jej wnętrzu.

Powiedzieliśmy, że przewodniki z prądem wytwarzają pole magnetyczne. Zbadaliśmy też, jak przebiegają linie takiego pola. W tej lekcji dowiemy się, jak obliczyć wartość wektora indukcji pola magnetycznego wytworzonego przez przewodnik z prądem.

Prosty przewód



Rys. **14.29.** Linie pola magnetycznego wokół prostego przewodnika z prądem

Rozważmy pole magnetyczne wytwarzane przez długi prosty przewód (rys. 14.29), w którym płynie prąd o natężeniu I. Załóżmy, że jest on nieskończenie długi. W praktyce oznacza to, że nie będziemy opisywać zjawisk zachodzących w pobliżu jego końców.

Łatwo przewidzieć, że pole magnetyczne wytworzone przez taki przewodnik jest silniejsze:

- gdy przez przewód płynie prąd o większym natężeniu,
- bliżej przewodnika.

Doświadczalnie wykazano, że wartość wektora indukcji magnetycznej $\vec{B}$ jest:

- wprost proporcjonalna do natężenia prądu I,
- odwrotnie proporcjonalna do odległości r od przewodu.

Możemy to zapisać w postaci:

$$B = \text{stała} \cdot \frac{I}{r}$$

W przypadku przewodu w próżni tę stałą zapisujemy w postaci $\frac{\mu_0}{2\pi}$, gdzie μ_0 to **przenikalność magnetyczna próżni**. Nasz wzór możemy więc zapisać w postaci:

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

Gdy przewód znajduje się w innym ośrodku niż próżnia, powinniśmy uwzględnić przenikalność magnetyczną tego ośrodka, a nie próżni.

Jednak dla paramagnetyków i diamagnetyków, a w szczególności dla powietrza, różnica jest pomijalnie mała.
Z kolei dla ferromagnetyków ta różnica jest ogromna (nawet miliony razy), ale w praktyce niemal się nie zdarza, aby przewód znajdował się wewnątrz ferromagnetyka. Dlatego dalej będziemy pomijać te wyjątkowe przypadki i korzystać ze wzoru z przenikalnością magnetyczną próżni.
Wartość przenikalności magnetycznej próżni wynosi:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$$

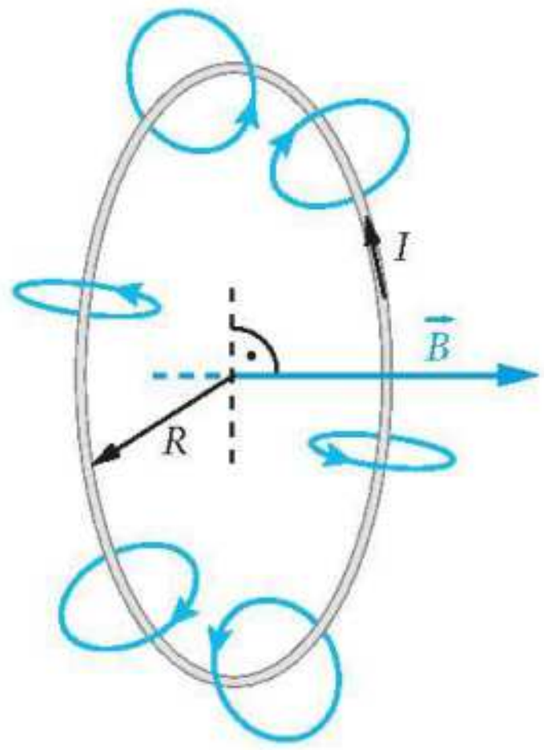
Dlatego wzór na wartość indukcji magnetycznej upraszcza się do wygodnej postaci:

$$B = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} \cdot \frac{I}{r}$$

Pojedyncza pętla

Jak silne jest pole magnetyczne wewnątrz pętli (rys. 14.30), w której płynie prąd o natężeniu I? A dokładniej: jaką wartość ma wektor indukcji w jej geometrycznym środku?
Również w przypadku przewodnika w kształcie pętli wartość wektora indukcji jest wprost proporcjonalna do natężenia prądu I płynącego przez pętlę i odwrotnie proporcjonalna do jej promienia R (im większy promień, tym większa odległość środka pętli od przewodnika, który jest źródłem pola). Okazuje się (ścisły dowód wykracza poza szkolny kurs fizyki, więc go pominiemy), że współczynnikiem proporcjonalności jest $\frac{\mu_0}{2}$, stąd wzór na indukcję w środku pojedynczej pętli:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$



Rys. **14.30.** Linie pola magnetycznego wewnątrz pętli, w której płynie prąd

Zwojnica

Podobnie ma się rzecz ze zwojnicą, jednak w tym przypadku pole w jej wnętrzu jest w przybliżeniu jednorodne. Jego indukcja jest wprost proporcjonalna do natężenia prądu I, ale dodatkowo zależy także od liczby n zwojów.
Jeśli dwie zwojnice mają tyle samo zwojów, a jedna z nich jest krótsza, to właśnie we wnętrzu tej zwojnicy będzie większe pole – jej zwoje znajdują się bowiem bliżej siebie.
Wartość wektora indukcji jest odwrotnie proporcjonalna do długości zwojnicy l, a współczynnikiem proporcjonalności jest μ_0. Dla długiej, ciasno nawiniętej, pustej w środku zwojnicy wzór na indukcję w jej wnętrzu przyjmuje postać:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{l}$$

Założenie, że zwojnica jest długa, oznacza, że jej długość jest znacznie większa od średnicy i że badamy pole z dala od końców zwojnicy.



Oddziaływanie przewodników, w których płynie prąd

Przewodnik, w którym płynie prąd, wytwarza pole magnetyczne. Z kolei na przewodnik odpowiednio ustawiony w polu magnetycznym działa siła elektrodynamiczna. Z tych dwóch faktów płynie wniosek, że dwa przewodniki mogą ze sobą oddziaływać. Sprawdzimy to doświadczalnie.

Doświadczenie 29

1. Przygotuj cztery ogniwa D, taśmę klejącą i folię aluminiową.
2. Dwa kawałki kilkukrotnie złożonej folii aluminiowej przyklej do ogniw taśmą klejącą tak, aby otrzymać baterię równolegle połączonych ogniw. Bateria taka daje napięcie 1,5 V, ale dzięki niskiemu oporowi wewnętrznemu pozwala na uzyskanie dużego natężenia prądu.
3. Wytnij z folii pasek długości ok. 1 m i szerokości ok. 2 cm. Zegnij go w pół i podłącz do baterii ogniw (zdjęcie a). Odległość między pionowymi odcinkami długiego paska powinna być jak najmniejsza, ale na tyle duża, aby paski folii się nie dotykały.
4. Obserwuj, czy paski folii się przyciągają czy odpychają.
5. Od góry połącz paski folii przewodem. Podłącz drugi przewód do pasków folii w taki sposób, aby prąd w paskach płynął w tę samą stronę (zdjęcie b). Jak teraz oddziałują paski?

W doświadczeniu obserwujemy, że gdy prąd płynął przez paski folii w tym samym kierunku, paski się przyciągały, a gdy w przeciwnych kierunkach – odpychały.

Ponieważ poznaliśmy już wzór zarówno na indukcję pola magnetycznego wytwarzanego przez przewód, jak i na siłę elektrodynamiczną działającą na przewód w polu magnetycznym, możemy obliczyć siłę działającą między przewodnikami.

Aby to zrobić, rozważmy dwa równoległe przewodniki o długości l, wykonane z bardzo cienkiego drutu o okrągłym przekroju, przez które płyną prądy o natężeniach I_1 oraz I_2 (rys. 14.31). Niech odległość między nimi wynosi r.

Wyznaczmy siłę elektrodynamiczną działającą na drugi przewodnik, znajdujący się w polu magnetycznym wytworzonym przez pierwszy przewodnik.

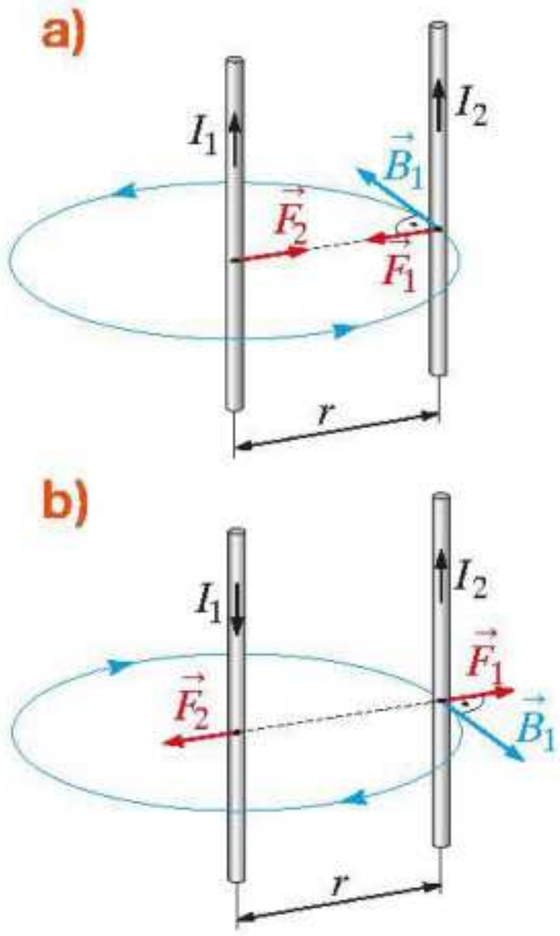
Zgodnie z poznanym wzorem indukcję pola magnetycznego pierwszego z przewodników w odległości r (czyli tam, gdzie znajduje się drugi przewodnik) można wyrazić wzorem:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

Siła działająca na drugi przewodnik wynosi zatem:

$$F_2 = B_1 I_2 l = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$$

Oczywiście na pierwszy przewodnik działa siła o takiej samej wartości, co łatwo można sprawdzić przez odpowiednie obliczenia.



Rys. **14.31.** Siły działające między przewodnikami, w których prąd płynie: a) w tę samą stronę – przyciąganie, b) w przeciwne strony – odpychanie

Zwrot siły działającej na przewód wyznaczamy z reguły prawej ręki (patrz s. 232). Dzięki temu wiemy, kiedy przewody się przyciągają, a kiedy odpychają, co pozwala nam wyjaśnić wyniki doświadczenia 29. (rys. 14.31). Jeśli podzielimy F przez l, otrzymamy wzór określający siłę w przeliczeniu na jednostkę długości:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

Stałe wyznaczane eksperymentalnie i stałe wynikające z definicji

Zaskakujący fakt, że przenikalność magnetyczna próżni wynosi akurat $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$, wynika z dawnej definicji ampera.

Przed 2019 r. amper określano jako natężeniu prądu, który płynie w równoległych przewodnikach oddalonych o 1 m i powoduje ich oddziaływanie siłą $2 \cdot 10^{-7}$ N na metr długości. Stąd oraz z podanego wyżej wzoru można obliczyć, że $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$. Była to wartość **dokładna**, wynikająca z definicji ampera, podobnie jak prędkość światła wynika z definicji metra. Z kolei ładunek elementarny był wówczas wielkością wyznaczaną doświadczalnie i jak każdy wynik doświadczenia – obarczony pewną niepewnością pomiarową.

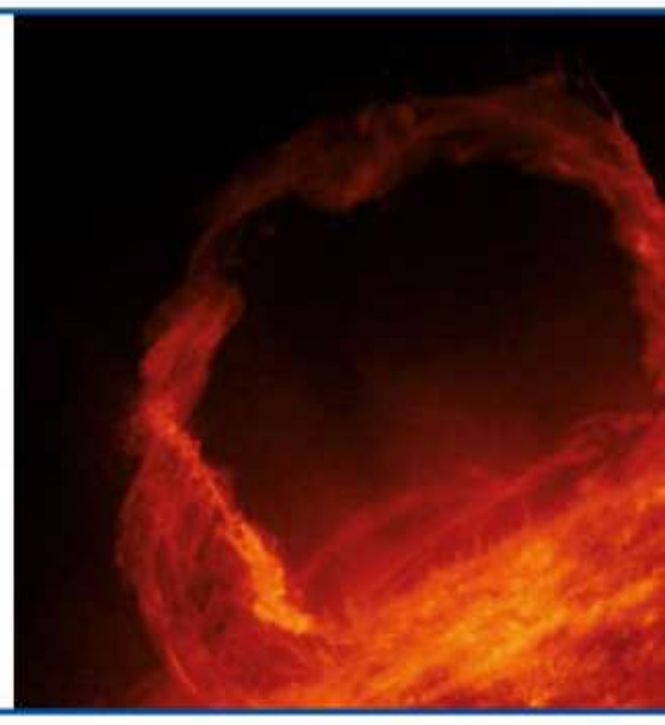
Stare i nowe definicje jednostek, cz. I s. 18

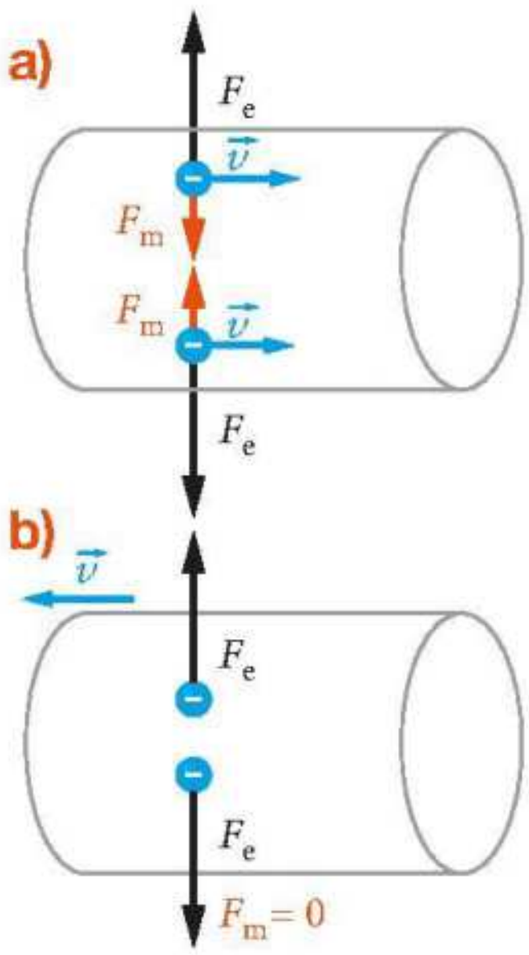
W 2019 r. zmieniono definicje niektórych jednostek układu SI. Oczywiście zadbano, aby rzeczywista wartość ampera się nie zmieniła – inaczej należałoby wymienić wszystkie amperomierze na świecie, poprawić oznaczenia na urządzeniach elektrycznych itd. Zmiana definicji nie ma więc praktycznego znaczenia w codziennym życiu i technice.

Obecnie definicja ampera jest oparta na ładunku elementarnym. Wobec tego dzisiaj **ładunek elementarny jest znany dokładnie**, bez żadnej niepewności pomiarowej, jego wartość wynika bowiem z definicji. Natomiast w miarę poprawiania się dokładności pomiarów za jakiś czas może się okazać, że przenikalność magnetyczna próżni jest nieco inna niż $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$. Ewentualna różnica będzie jednak pomijalnie mała.

A to ciekawe

Przykładem oddziaływania magnetycznego poruszających się ładunków jest jedno ze zjawisk obserwowanych w zewnętrznej warstwie Słońca. Naładowany gaz unosi się ku górze na skutek konwekcji. Taki ruch ładunku możemy traktować jak prąd elektryczny. Ponieważ poszczególne strumienie gazu poruszają się w tę samą stronę i przyciągają, więc wskutek ściskania powstaje prąd o bardzo dużym natężeniu. Wytwarza on pole magnetyczne wychodzące poza powierzchnię Słońca. To pole ukierunkowuje wylatujące na zewnątrz naładowane jony i tworzy spektakularne łuki nad powierzchnią gwiazdy.





Rys. 14.32. Ruch elektronów w rurze próżniowej w różnych układach odniesienia

Pole magnetyczne i względność ruchu

Wyobraźmy sobie dwa elektrony poruszające się obok siebie w tę samą stronę i z taką samą prędkością (rys. 14.32a). Oddziałują one siłą magnetyczną F_m, jakby płynęły w dwóch przewodach położonych obok siebie. Ponieważ są tak samo naładowane, odpychają się siłą elektryczną F_e. Jeśli jednak popatrzymy na to samo zjawisko w układzie odniesienia elektronów – a możemy to zrobić, bo ruch jest względny – stwierdzimy, że elektrony się nie poruszają, a więc nie działa między nimi siła magnetyczna, a jedynie siła elektryczna (rys. 14.32b).
Jak wyjaśnić tę sprzeczność? Na gruncie znanych ci praw fizyki klasycznej jest to niemożliwe. Rozwiązanie przyniosła teoria względności opracowana przez Alberta Einsteina. Jej elementy omówimy w czwartej części podręcznika.

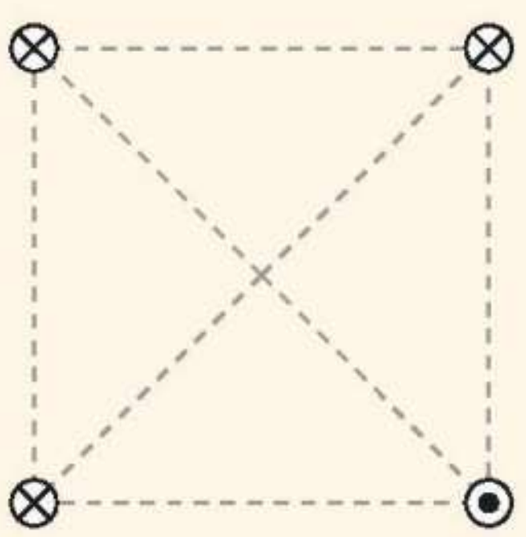
Po tej lekcji powinieneś

- obliczać wartość indukcji magnetycznej pola wytwarzanego przez prosty przewodnik, pętlę i zwojnicę;
- opisywać oddziaływanie przewodników, w których płynie prąd.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Cztery wzajemnie równoległe prostoliniowe przewodniki są prostopadłe do płaszczyzny rysunku i przecinają go w wierzchołkach kwadratu o boku $a = 10$ cm. W trzech z nich prąd płynie w tę samą stronę, a w czwartym – w przeciwną. Określ kierunek i zwrot wektora indukcji w środku kwadratu oraz oblicz wartość tego wektora. Przyjmij, że w każdym przewodzie płynie prąd o tym samym natężeniu, równym $I = 2$ A.

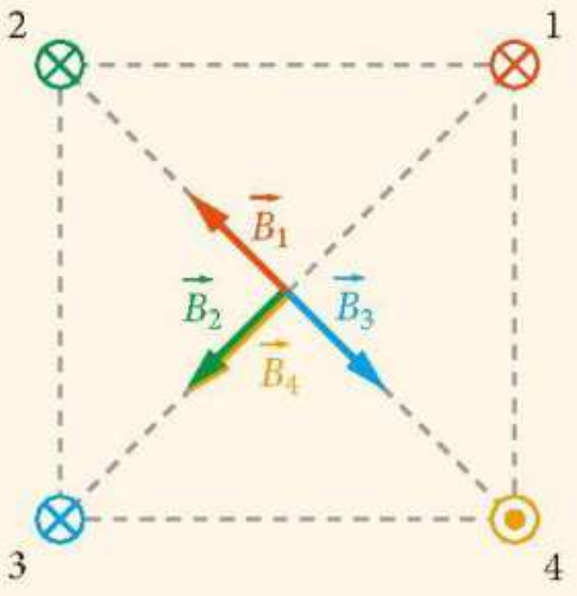


Rozwiązanie

Wyznaczymy najpierw indukcję pola magnetycznego wytworzonego przez każdy przewodnik oddzielnie, a następnie znajdziemy wypadkowy wektor indukcji, będący sumą poszczególnych wektorów:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4$$

Na rysunku zaznaczamy wektory $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$, $\vec{B}_3$, $\vec{B}_4$. Pamiętajmy, że wektor indukcji magnetycznej jest w każdym punkcie styczny do linii pola magnetycznego i prostopadły do wektora łączącego przewód z punktem, w którym badamy pole. Zwrot wektorów określamy za pomocą reguły śruby prawoskrętnej.



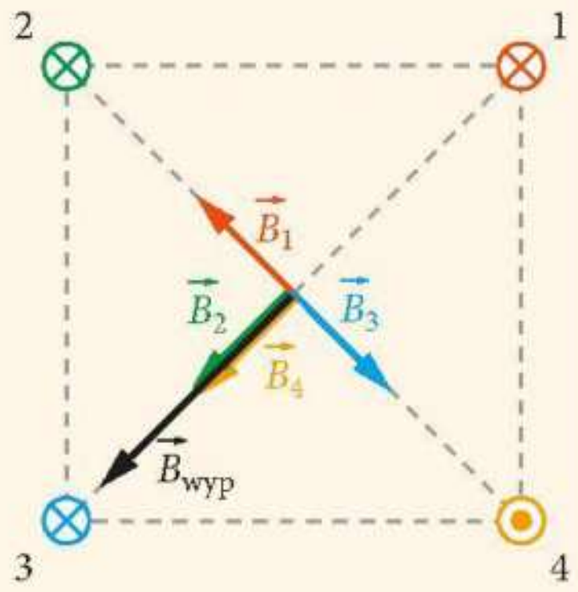
Wiemy, że wartość indukcji wytworzonej przez każdy z przewodów jest taka sama i wynosi:

$$B_1 = B_2 = B_2 = B_4 = \frac{\mu_0 I}{2\pi\left(\frac{a\sqrt{2}}{2}\right)} = \frac{\mu_0 I\sqrt{2}}{2\pi a}$$

Dodajmy wektory. Wektory $\vec{B}_1$ i $\vec{B}_3$ mają takie same wartości, ale przeciwne zwroty. Wobec tego ich wektor wypadkowy jest równy zeru: $\vec{B}_1 + \vec{B}_3 = 0$.
Pozostałe wektory $\vec{B}_2$ i $\vec{B}_4$, które mają ten sam kierunek i zgodne zwroty, sumujemy:

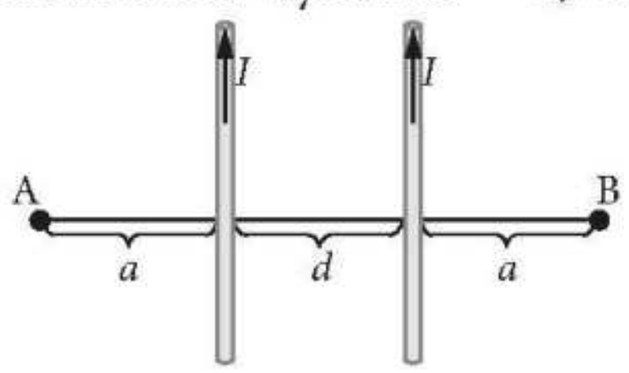
$$B_2 + B_4 = \frac{\mu_0 I\sqrt{2}}{\pi a}$$

Tyle samo wynosi wypadkowy wektor indukcji magnetycznej $\vec{B}_{wyp}$ w środku kwadratu.
Po podstawieniu danych liczbowych $B_{wyp} \approx 1{,}13 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{T} = 11{,}3\,\mu\mathrm{T}$.

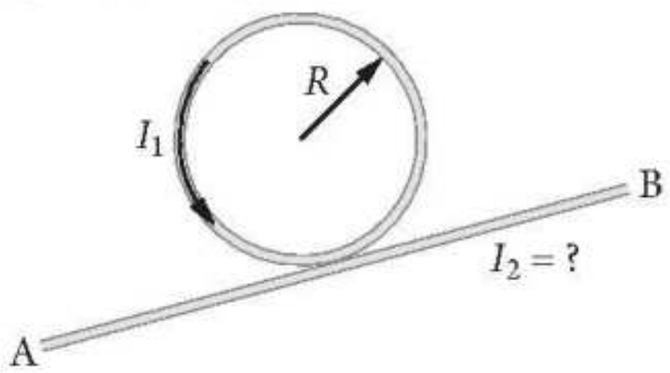


Odpowiedź: Wektor wypadkowy indukcji magnetycznej ma wartość ok. 11,3 μT, leży na przekątnej kwadratu łączącej przewody 1 i 3 oraz jest zwrócony w stronę przewodu 3.

1. W dwóch długich, równoległych przewodnikach odległych od siebie o $d = 0{,}1$ m płyną w tym samym kierunku prądy o takim samym natężeniu 10 A. Określ kierunek, zwrot i wartość indukcji magnetycznej w punktach A i B, jeśli odległość tych punktów od najbliższego przewodnika wynosi $a = 0{,}1$ m.



2. Z tego samego drutu zrobiono pętlę o promieniu R i prostoliniowy długi przewodnik, które leżą w tej samej płaszczyźnie. Do pętli doprowadzono prąd o natężeniu $I_1 = 10$ A. W jakim kierunku powinien popłynąć prąd w prostoliniowym drucie i jakie powino być jego natężenie, aby w środku pętli indukcja pola magnetycznego była równa zeru?



3. Oblicz natężenie prądu, który musi płynąć w pętli o promieniu 10 cm, aby indukcja pola wytwarzanego w środku pętli była równa indukcji pola ziemskiego, która w Polsce wynosi $B = 30\,\mu\mathrm{T}$.

4. W trakcie uderzenia pioruna płynie prąd o natężeniu od 30 kA do 150 kA. Oblicz minimalną i maksymalną wartość indukcji generowanego przez niego pola magnetycznego w odległości 100 m. Przyjmij, że piorun to jednokrotny przepływ prądu w kierunku pionowym.

5. Na pustą kartonową rurkę o średnicy 1 cm i długości 10 cm nawinięto 200 zwojów drutu i puszczono przez nią prąd o natężeniu 2 A. Oblicz indukcję pola magnetycznego wewnątrz zwojnicy.

Projekt Kierunek linii ziemskiego pola magnetycznego

Zadania

1. Dowiedz się i zapisz, co to jest inklinacja magnetyczna. Zapisz, z jakich źródeł korzystasz.
2. Przeprowadź doświadczenia opisane poniżej. Wyjaśnij zaobserwowane zjawiska na podstawie wiadomości o inklinacji magnetycznej.
3. Zbuduj kompas inklinacyjny zgodnie ze zdjęciem obok lub według własnego projektu. Zmierz za jego pomocą inklinację magnetyczną w swojej miejscowości.
4. Zmierz składowe ziemskiego pola magnetycznego za pomocą aplikacji Phyphox (patrz zadanie 6. s. 243). Na podstawie wyników tych pomiarów wyznacz inklinację magnetyczną i porównaj ją z wynikiem pomiaru za pomocą kompasu. Oba wyniki porównaj z pomiarami publikowanymi przez naukowców.
5. Spróbuj nawiązać kontakt z uczniami szkół średnich w krajach leżących na innych szerokościach geograficznych, a może także na półkuli południowej lub w pobliżu równika. Porównajcie swoje wyniki.



Doświadczenie 1

1. Wyznacz za pomocą kompasu strony świata w pomieszczeniu, w którym znajduje się pralka (ewentualnie lodówka).
2. Zbliż kompas do zachodniej lub wschodniej ścianki pralki: raz w pobliżu jej górnego, a raz w pobliżu dolnego brzegu.
3. Sprawdź, czy tak samo jest namagnesowany duży stalowy garnek stojący długo w jednej pozycji, np. dnem do dołu.
4. Zbadaj, jak długo trwa samorzutne przemagnesowanie garnka, jeżeli zmieni się jego ustawienie, np. z dnem do dołu na dnem do góry.



Doświadczenie 2

1. Ustaw stalowy gwóźdź ostrzem w dół. Oprzyj go o kowadełko lub kamień.
2. Przez 2–3 minuty stukaj delikatnie młotkiem w łepek gwoździa.
3. Sprawdź za pomocą kompasu, jak namagnesował się gwóźdź.
4. Wyjaśnij zaobserwowane zjawisko.



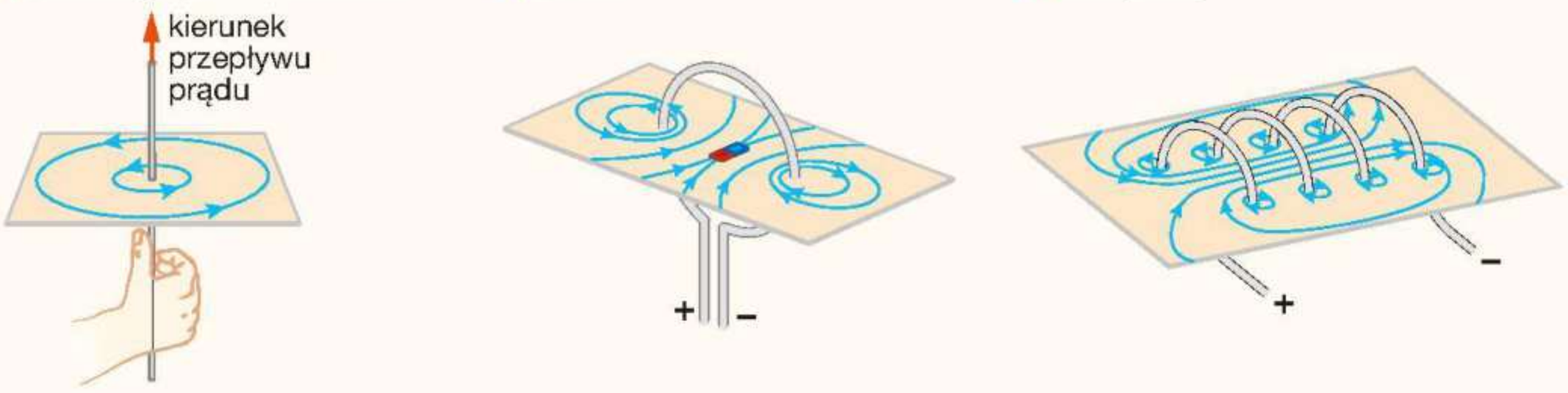
Podsumowanie Pole magnetyczne



- Każdy **magnes** ma dwa bieguny o umownych nazwach: północny (N) i południowy (S). Bieguny jednoimienne się odpychają, a różnoimienne przyciągają.

- **Pole magnetyczne**
  Jeżeli w jakimś obszarze działają siły magnetyczne, to mówimy, że w tym obszarze istnieje **pole magnetyczne**.
  - Źródłem pola magnetycznego są poruszające się ładunki.
  - Pole magnetyczne przedstawiamy graficznie za pomocą **linii pola**.
  - Linie pola magnetycznego są zawsze **zamknięte** i występują zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz magnesu.
  - Na zewnątrz magnesu linie są zwrócone od bieguna północnego do południowego, a wewnątrz magnesu przeciwnie – od bieguna południowego do północnego.
  - Linie pola magnetycznego wokół przewodników z prądem:

a) prostego przewodnika **b)** pętli **c)** zwojnicy



  - Zwrot linii pola magnetycznego wyznaczamy za pomocą **reguły prawej ręki** (rys. a). Jeżeli wyobrazimy sobie, że obejmujemy przewodnik palcami prawej ręki tak, aby odgięty kciuk wskazywał kierunek przepływu prądu, to zgięte palce wskażą zwrot linii pola magnetycznego.

- **Indukcja magnetyczna**
  - Prostoliniowy przewodnik z prądem wytwarza pole magnetyczne, którego indukcja magnetyczna wynosi:

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

gdzie: I – natężenie prądu w przewodniku, r – odległość od przewodnika, μ_0 – **przenikalność magnetyczna próżni**, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$.

  - Indukcja magnetyczna w środku pojedynczej pętli z prądem:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

gdzie R to promień pętli.

- Indukcja magnetyczna we wnętrzu zwojnicy:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{l}$$

gdzie: n – liczba zwojów, l – długość zwojnicy.

- Jednostką indukcji magnetycznej B jest **tesla**: $1\ \mathrm{T} = 1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}$.
- Pole magnetyczne nazywamy **jednorodnym**, jeżeli wektory indukcji w każdym punkcie pola są sobie równe co do wartości i mają jednakowe kierunki i zwroty.

Siła Lorentza

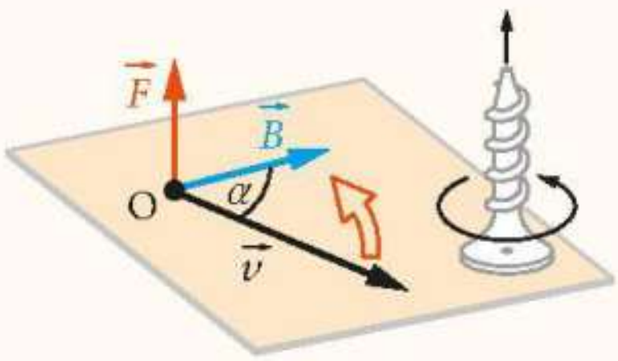
- Siła działająca na poruszający się w polu magnetycznym ładunek q nosi nazwę **siły Lorentza**:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

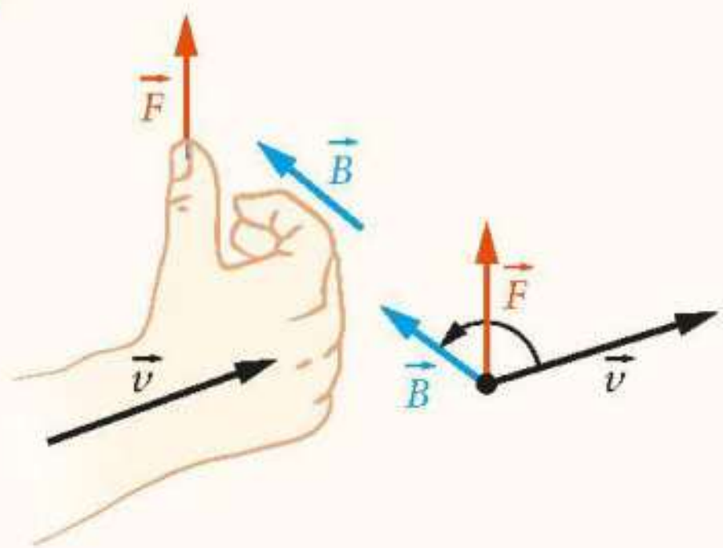
gdzie: $\vec{v}$ – prędkość ładunku, $\vec{B}$ – indukcja magnetyczna.

- Wartość siły Lorentza: $F = qvB \sin\alpha$, gdzie α to kąt między wektorem prędkości ładunku i wektorem indukcji magnetycznej.

a)



b)



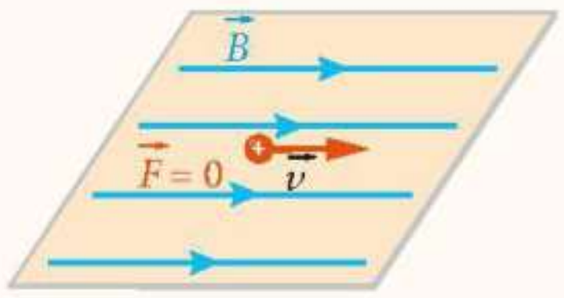
- Zwrot siły Lorentza wyznaczamy za pomocą **reguły śruby prawoskrętnej** (rys. a).

  Można też posłużyć się **regułą prawej ręki** (rys. b): gdy prawą rękę ułożymy zgodnie z wektorem $\vec{v}$, a następnie zegniemy palce w kierunku wektora $\vec{B}$, to odgięty kciuk wskaże wektor siły Lorentza.

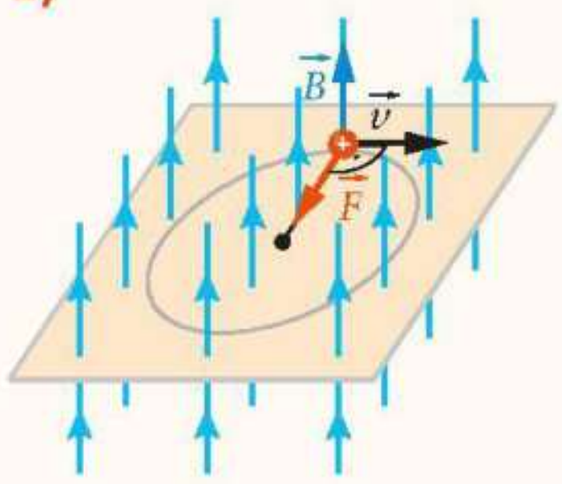
Ruch naładowanej cząstki w polu magnetycznym

Jeżeli naładowana cząstka porusza się w jednorodnym polu magnetycznym, to w zależności od kąta α między wektorem prędkości początkowej cząstki i wektorem indukcji magnetycznej rozróżniamy następujące sytuacje:

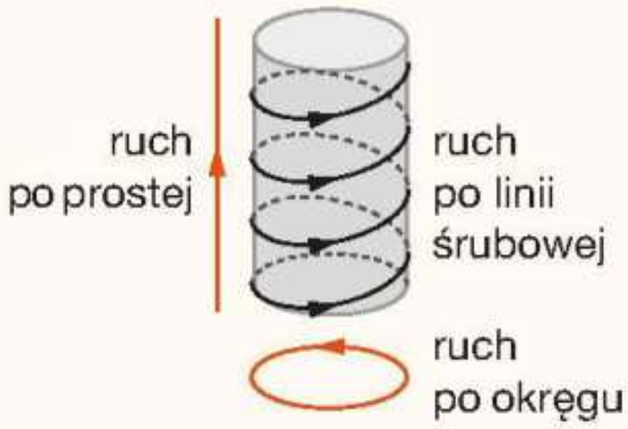
a)



b)



c)



- $\alpha = 0°$, siła Lorentza $F = 0$ i cząstka porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym (rys. a),
- $\alpha = 90°$, siła Lorentza jest prostopadła zarówno do wektora prędkości, jak i do wektora indukcji, czyli pełni funkcję siły dośrodkowej, cząstka porusza się ruchem jednostajnym po okręgu (rys. b),
- cząstka nie porusza się ani równolegle, ani prostopadle do linii pola, jej ruch odbywa się po linii śrubowej ze stałą wartością prędkości (rys. c).

- Prawie wszystkie substancje oddziałują magnetycznie, rozróżniamy trzy najważniejsze grupy:
  - **ferromagnetyki**, np. żelazo, nikiel, kobalt, które są silnie przyciągane przez magnes,
  - **paramagnetyki**, np. aluminium, cyna, które są słabo przyciągane przez magnes,
  - **diamagnetyki**, np. miedź, srebro, woda, które są słabo odpychane przez magnes.

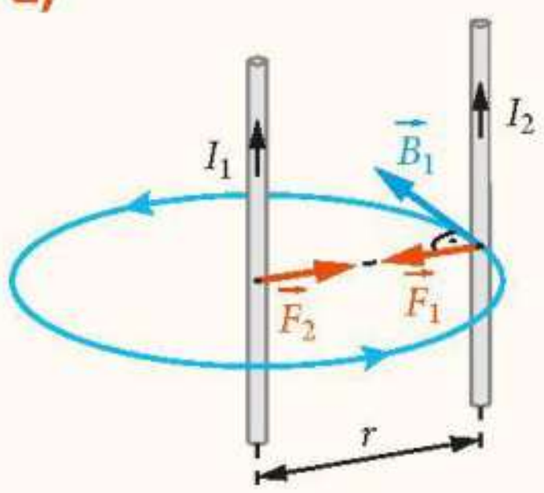
- Siłę działającą w polu magnetycznym na przewodnik z prądem nazywamy **siłą elektrodynamiczną**:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$

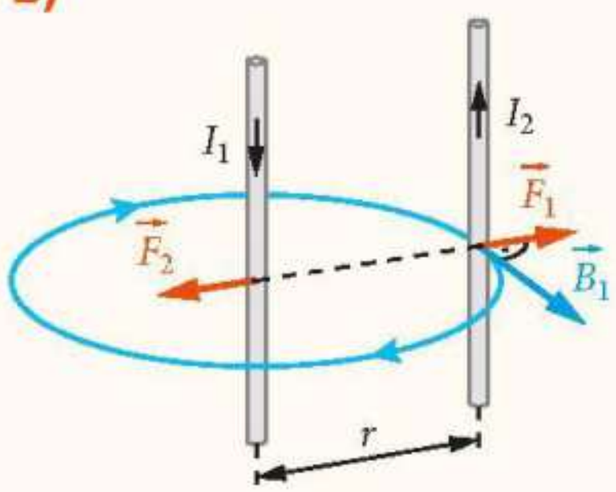
gdzie: I – natężenie prądu w przewodniku, $\vec{l}$ – wektor o długości przewodu, skierowany wzdłuż przewodu w stronę, w którą płynie prąd, $\vec{B}$ – indukcja magnetyczna pola, w którym przewodnik się znajduje.

- Dwa równoległe przewodniki o długości l, w których płynną prądy o natężeniu I_1 i I_2, są umieszczone w odległości r od siebie.
Jeżeli prądy w nich płyną w tym samych kierunku (rys. a), to przewodniki się przyciągają, jeżeli prądy płyną w przeciwnych kierunkach (rys. b), to przewodniki się odpychają.

a)



b)



  - Pole magnetyczne wytworzone przez pierwszy przewodnik w miejscu, gdzie jest drugi przewodnik:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

siła działająca na drugi przewodnik to zatem:

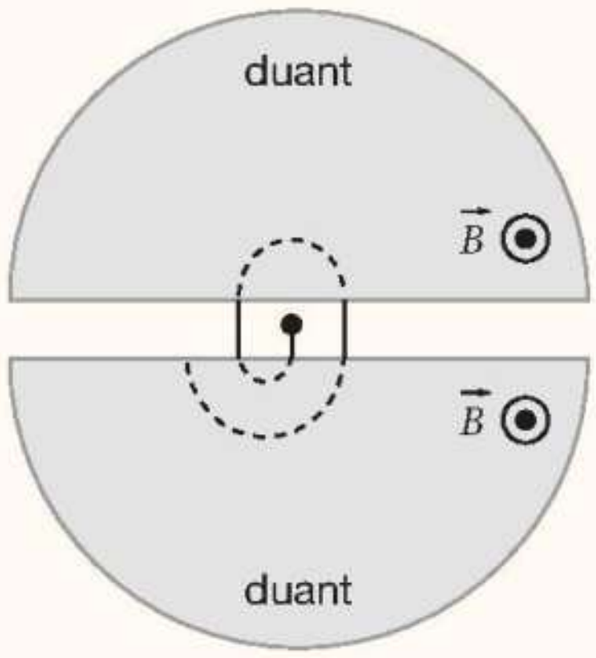
$$F_1 = BI_2 l = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} l$$

Na pierwszy przewodnik działa siła o takiej samej wartości: $F_1 = F_2$.

Sposób na zadanie

Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Na rysunku przedstawiono sposób działania cyklotronu. Jest to urządzenie służące do przyspieszania cząstek naładowanych, np. jonów. Dzięki zastosowaniu pola magnetycznego skierowanego prostopadle do płaszczyzny rysunku jon krąży w cyklotronie po torze składającym się z szeregu półokręgów. W szczelinie między duantami jony są przyspieszane polem elektrycznym skierowanym wzdłuż ich toru (na rysunku – pionowo). Napięcie między duantami jest równe U i po każdym przejściu jonów znak napięcia jest zmieniany na przeciwny.



Po każdym przyspieszeniu jonu w szczelinie jego energia kinetyczna zwiększa się o qU. Również promień zakreślanego przez niego półokręgu staje się coraz większy. Jeżeli jon o masie m i ładunku q porusza się w cyklotronie z prędkością v w jednorodnym i stałym w czasie polu magnetycznym o indukcji $\vec{B}$, to promień zakreślanego okręgu wyraża się wzorem:

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

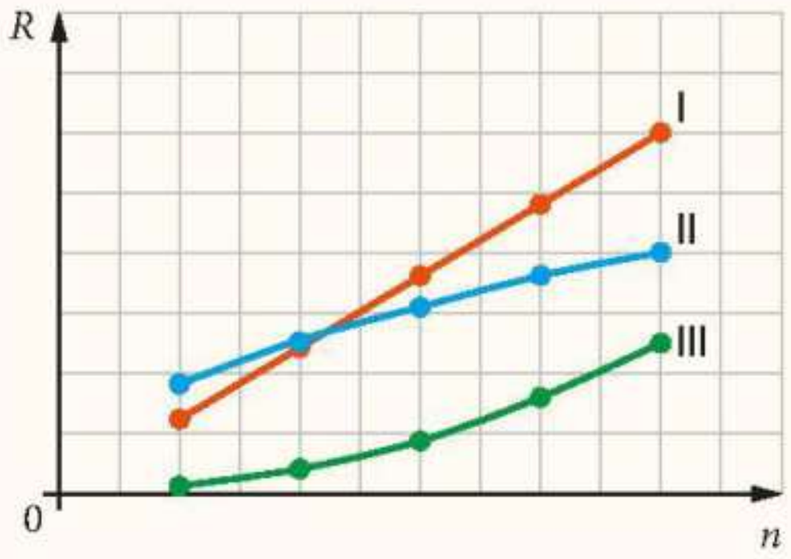
Zadanie 1.1 (0–2)

Wykaż, że pomiędzy promieniem półokręgu a liczbą przejść przez szczelinę istnieje związek $R^2 \sim n$, czyli że kwadrat promienia jest proporcjonalny do liczby przejść.

Zadanie 1.2 (0–1)

Jeden z wykresów poprawnie przedstawia zależność $R(n)$.
Wybierz właściwy wykres spośród I–III oraz uzasadnienie tego wyboru spośród 1–3.
Poprawną zależność $R(n)$ przedstawiono na wykresie

I,	z którego wynika, że różnice długości promieni kolejnych półokręgów, po których porusza się jon, są	1.	jednakowe.
II,		2.	coraz mniejsze.
III,		3.	coraz większe.



Rozwiązanie:

Ad 1.1. Chcemy poznać zależność promienia półokręgu, po którym porusza się jon, od liczby przejść przez szczelinę. W treści zadania podano wzór na promień: $R = \frac{mv}{qB}$. W tym wzorze masa, ładunek i indukcja pola są stałe, zmieniają się promień i prędkość. Wyznaczmy więc wzór na prędkość.
Podczas przejścia przez pole elektryczne między duantami jon nabiera prędkości, czyli zyskuje energię kinetyczną. W treści zadania mamy zapisane, że po każdym przejściu energia jonu zwiększa się o qU, czyli po n przejściach:

$$\frac{mv^2}{2} = nqU$$

Z tego wzoru wyznaczamy prędkość jonu:

$$v^2 = \frac{2nqU}{m}$$

Ponieważ mamy uzasadnić zależność R^2 od n, wzór na R podnosimy do kwadratu:

$$R = \frac{mv}{qB} \rightarrow R^2 = \frac{m^2v^2}{q^2B^2}$$

Stąd po podstawieniu wzoru na v^2 otrzymujemy:

$$R^2 = \frac{m^2}{q^2B^2} \cdot \frac{2nqU}{m} = \frac{2mU}{qB^2} \cdot n = k \cdot n$$

gdzie k – stała.
Dostaliśmy szukaną zależność:

$$R^2 \sim n$$

Co należało wykazać.

Ad 1.2. Poprawny wybór to **II** i **2**.
Mamy podaną zależność między promieniem a liczbą przejść przez szczelinę: $R^2 \sim n$, co można też zapisać $R \sim \sqrt{n}$.

> **Wskazówka 1.** Linia prosta jest wykresem proporcjonalności prostej. Ma ona stałe nachylenie.

Nie jest to proporcjonalność prosta, czyli nie jest to wykres I.

Nie jest to także wykres III. Na tym wykresie wielkość na osi pionowej rośnie szybciej niż wielkość na osi poziomej, czyli nachylenie wykresu rośnie.

Poprawny jest wykres II. Na tym wykresie wielkość na osi pionowej rośnie wolniej niż wielkość na osi poziomej, nachylenie wykresu maleje. Właśnie tak dzieje się z wykresem wielkości proporcjonalnej do pierwiastka innej wielkości. Przyrost długości promienia, po którym porusza się jon, jest coraz mniejszy przy kolejnych przejściach przez szczelinę.

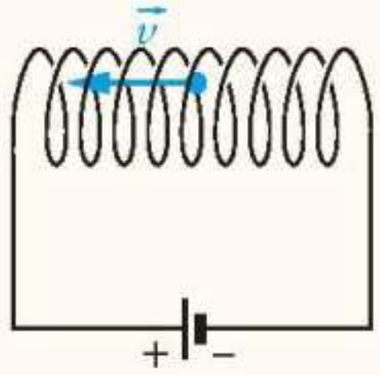
Możemy się o tym przekonać także w inny sposób. Gdy n rośnie 4 razy (z 2 do 8 kratek), R rośnie tylko 2 razy (z prawie 2 do prawie 4 kratek), zgodnie z równością $\sqrt{4} = 2$. Tak jest tylko na wykresie II.

Warto zapamiętać!

- Kiedy mamy wybrać prawidłowy wykres, musimy określić, jak zmieniają się wielkości na osiach poziomej i pionowej, np. czy jedna rośnie szybciej niż druga.
- Wykresem proporcjonalności $y = ax$ jest linia prosta. Wykres funkcji $y = ax^k$ $(x > 0)$ staje się coraz bardziej stromy, gdy $k > 1$, a coraz mniej stromy, gdy $k < 1$ (np. dla $k = \frac{1}{2}$ otrzymujemy pierwiastek kwadratowy).

Zadanie 2. (0–1)

Wskaż właściwą odpowiedź TAK lub NIE i jej uzasadnienie spośród 1–3. Ładunek elektryczny porusza się wewnątrz zwojnicy wzdłuż jej osi. Czy na ten ładunek działa siła Lorentza?



TAK,	ponieważ	1.	wewnątrz zwojnicy nie ma pola magnetycznego.
NIE,		2.	ładunek porusza się wzdłuż linii pola magnetycznego.
		3.	siła Lorentza działa na każdy ładunek poruszający się w polu magnetycznym.

Rozwiązanie:

Poprawną odpowiedzią jest **NIE** i **2**.

> **Wskazówka 2.** Często łatwiej odpowiedzieć na pytanie, gdy pomyślimy o konkretnym technicznym zastosowaniu omawianego zjawiska fizycznego.

Jeśli nie pamiętasz, czy wewnątrz zwojnicy jest pole magnetyczne, przypomnij sobie, jak działa elektromagnes. Jego rdzeń zostaje namagnesowany, a znajduje się on wewnątrz zwojnicy, więc pole musi tam występować.
Zastanówmy się więc, jak mogą być skierowane linie tego pola.

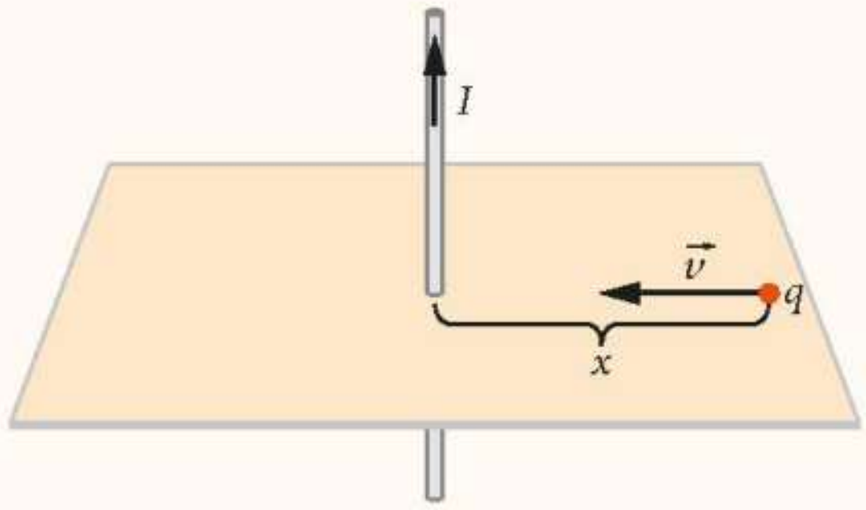
> **Wskazówka 3.** W wielu zadaniach jakościowych (nieobliczeniowych) do prawidłowego rozwiązania wystarczy rozumowanie oparte na symetrii.

Skorzystajmy z symetrii zjawiska. W zwojnicy żaden kierunek prostopadły do osi zwojnicy nie jest wyróżniony. Nie ma więc powodu, aby linie miały przecinać zwojnicę akurat z góry rysunku na dół, a nie odwrotnie. W takim razie jedyny możliwy kierunek linii pola to kierunek wzdłuż osi zwojnicy.
W naszym zadaniu ładunek porusza się więc wzdłuż linii pola.
Jeśli nie pamiętasz, czy na taki ładunek działa siła Lorentza, znowu możesz skorzystać z symetrii układu. Taka siła działa prostopadle do prędkości. Jednak nie może działać w bok, ponieważ żaden kierunek prostopadły do linii pola nie jest wyróżniony i nie ma powodu, aby siła działała akurat w tę stronę, a nie w inną. Pozostaje nam więc jedna możliwość: na ładunek poruszający się wzdłuż linii pola nie działa siła Lorentza.

Warto zapamiętać!

- Zwojnica wytwarza pole magnetyczne podobne do pola wytwarzanego przez magnes trwały.
- Linie pola magnetycznego są zawsze zamknięte, ponieważ nie istnieją ładunki magnetyczne.
- Siła Lorentza działa prostopadle do linii pola magnetycznego (inaczej niż siła elektryczna w polu elektrycznym!).
- Siła Lorentza działa prostopadle do prędkości ładunku, więc nie zmienia wartości jego prędkości, a jedynie jej kierunek (inaczej niż siła elektryczna, która nie zależy od prędkości).
- Siła Lorentza nie działa na ładunek poruszający się wzdłuż linii pola.

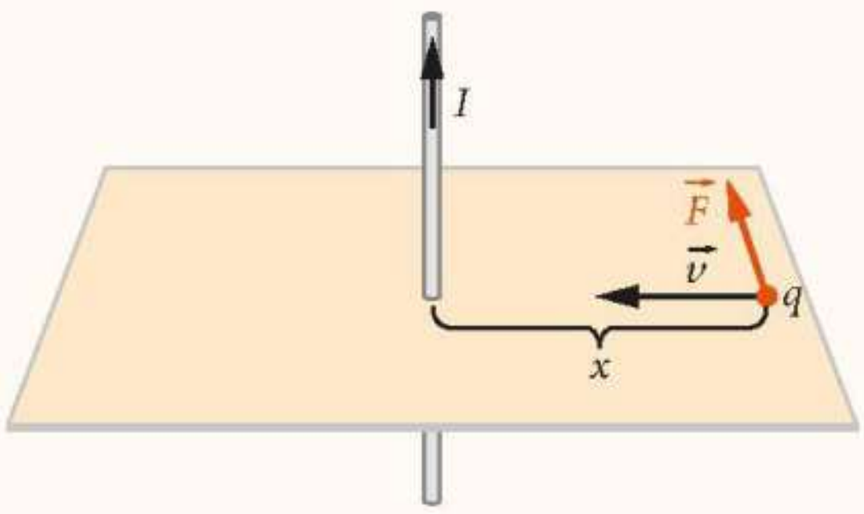
Zadanie 3. W prostoliniowym przewodniku płynie prąd o natężeniu I. W płaszczyźnie prostopadłej do tego przewodnika porusza się ładunek dodatni q. Jego prędkość ma wartość v i jest skierowana w stronę przewodnika. Odległość między ładunkiem a przewodnikiem wynosi x.



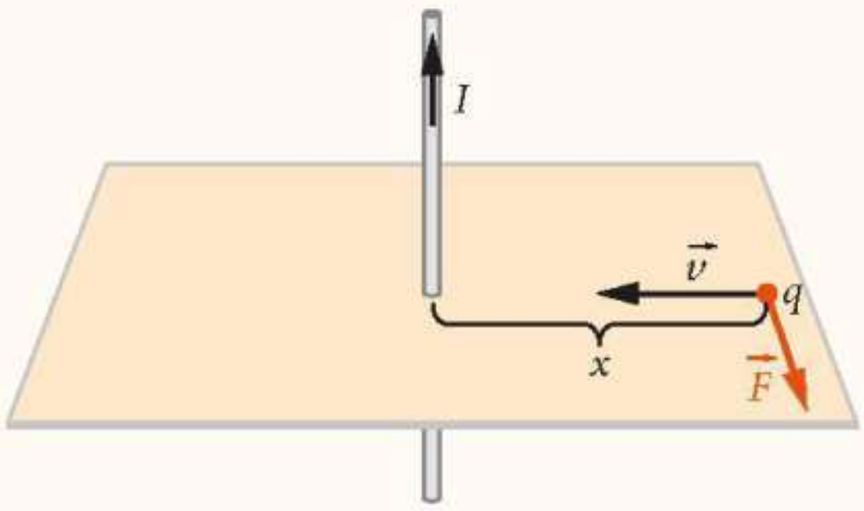
Zadanie 3.1 (0–1)

Wskaż, na którym rysunku poprawnie przedstawiono kierunek i zwrot siły Lorentza działającej na ładunek.

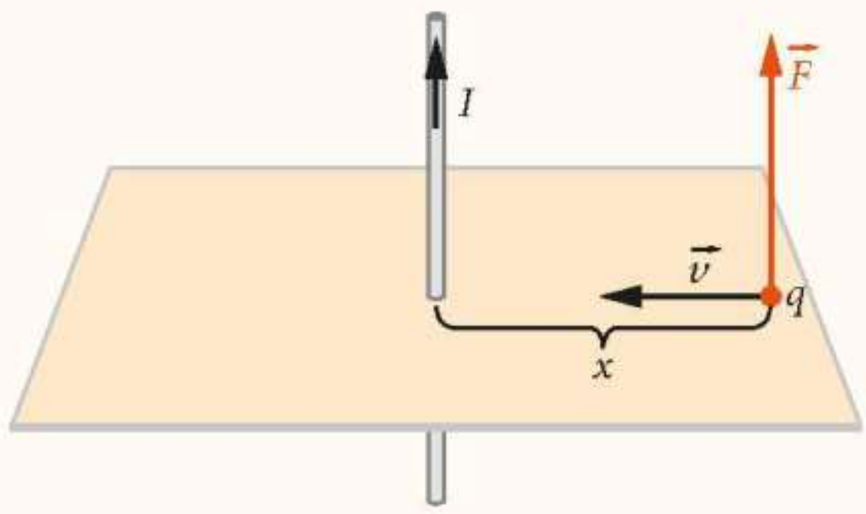
A.



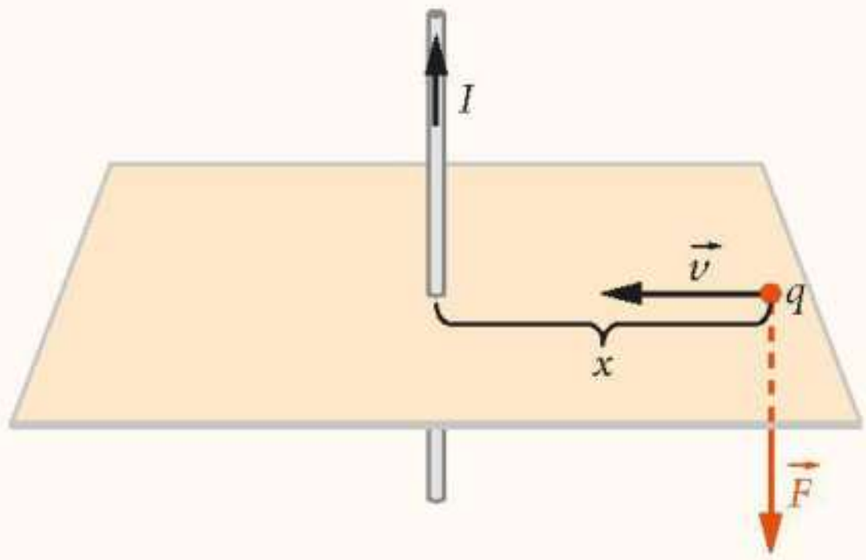
B.



C.



D.



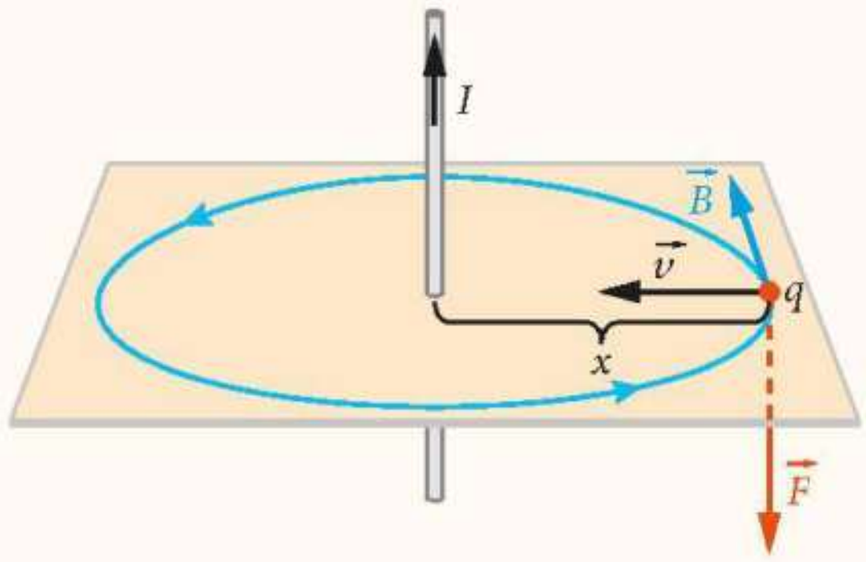
Zadanie 3.2 (0–2)

Oblicz wartość przyspieszenia, jakie siła Lorentza nada w opisanej sytuacji jonowi Na^+ będącemu w odległości $x = 20$ cm od przewodnika i poruszającemu się z prędkością $v = 1000 \frac{km}{s}$ w jego stronę, jeżeli w przewodniku płynie prąd $I = 5$ A.

Rozwiązanie:

Ad 3.1. Poprawną odpowiedzią jest **D**.

Aby wyznaczyć kierunek i zwrot siły Lorentza, najpierw należy określić kierunek i zwrot linii pola magnetycznego. Wokół przewodnika z prądem linie pola mają kształt okręgów, a zwrot tych linii określamy z reguły prawej ręki (patrz rys. 14.15 s. 232). Teraz możemy wyznaczyć kierunek i zwrot wektora indukcji magnetycznej $\vec{B}$, który jest styczny do linii pola. Gdy znamy kierunki i zwroty wektorów prędkości i indukcji, możemy z reguły śruby prawoskrętnej lub reguły prawej ręki (patrz rys. 14.20 s. 239) wyznaczyć kierunek i zwrot siły Lorentza.



Ad 3.2. Z symbolu Na^+ odczytujemy, że jon ma ładunek dodatni, równy jednemu ładunkowi elementarnemu, czyli $q = +e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.
W układzie okresowym znajdujemy masę atomową sodu: 23 u. Masa brakującego elektronu stanowi tak mały ułamek masy atomu, że możemy ją pominąć. Masę atomową przeliczamy na kilogramy:

$$m = 23\,\text{u} = 23 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}\,\text{kg} = 3{,}8 \cdot 10^{-26}\,\text{kg}$$

Wskazówka 4. Do rozwiązywania zadań z fizyki przydają się elementarna wiedza z chemii i umiejętność korzystania z układu okresowego pierwiastków.

Wektor indukcji pola magnetycznego w odległości x od prostoliniowego przewodnika, w którym płynie prąd o natężeniu I, ma wartość:

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

Ponieważ prędkość jest prostopadła do wektora $\vec{B}$ (czyli do linii pola), siła Lorentza ma wartość:

$$F = qvB$$

i nadaje jonowi przyspieszenie o wartości:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qBv}{m} = \frac{\mu_0 qIv}{2\pi x m}$$

Po podstawieniu danych liczbowych uzyskujemy wynik:

$$a = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{C} \cdot 5\,\text{A} \cdot 10^{6}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2\pi \cdot 0{,}2\,\text{m} \cdot 3{,}8 \cdot 10^{-26}\,\text{kg}} \approx 2{,}1 \cdot 10^{7}\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 21\,000\,\frac{\text{km}}{\text{s}^2}$$

$$[a] = \frac{\frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot \text{C} \cdot \text{A} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{m} \cdot \text{kg}} = \frac{\frac{\text{N}}{\text{A}} \cdot \text{C} \cdot \frac{1}{\text{s}}}{\text{kg}} = \frac{\frac{\text{N}}{\text{A}} \cdot \text{A}}{\text{kg}} = \frac{\text{N}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{kg}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Odpowiedź: Jon Na^+ ma w danym punkcie przyspieszenie o wartości ok. 21 000 $\frac{\text{km}}{\text{s}^2}$.

Uwaga. Jon nie będzie się poruszał po prostej, okręgu ani linii śrubowej, ponieważ pole, w którym się znajduje, nie jest jednorodne. W czasie ruchu będzie się także zmieniać jego przyspieszenie. Obliczona w zadaniu wartość to tylko przyspieszenie chwilowe w momencie opisanym w zadaniu.

Warto zapamiętać!

- Ponieważ masa elektronu jest bardzo mała w porównaniu z masą atomu, w zadaniach często ją pomijamy.
- Informacje, które można odczytać z układu okresowego pierwiastków, uznajemy za dane.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Pierścień magnesów



Cztery magnesy w kształcie fragmentów pierścienia złożono ze sobą tak, aby powstał zamknięty pierścień. Bieguny północne magnesów oznaczono kolorem niebieskim, a południowe – czerwonym.

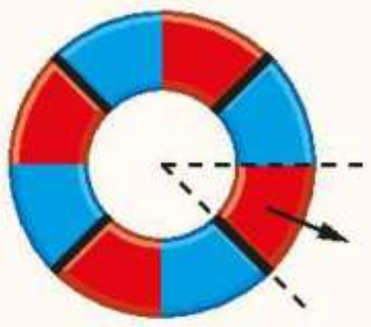
1.1. Zastanów się, jakie pole magnetyczne wytwarza pierścień i oceń prawdziwość poniższych zdań. Zaznacz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F – jeśli jest fałszywe.

1.	W każdym punkcie na zewnątrz pierścienia indukcja pola magnetycznego wynosi zero.	P	F
2.	Linie pola magnetycznego tworzą zamknięte pętle, biegnące wewnątrz materiału, z którego jest zbudowany pierścień.	P	F
3.	W otworze wewnątrz pierścienia pole magnetyczne jest silniejsze niż na zewnątrz.	P	F

1.2. Z pierścienia usunięto jeden magnes. Naszkicuj w zeszycie linie powstałego pola magnetycznego. Zaznacz również ich zwrot.



1.3. Zastanów się, co by się stało, gdyby z pierścienia została usunięta tylko połowa pojedynczego magnesu, zaznaczona na poniższym rysunku.



Dokończ zdanie. Wybierz uzupełnienie A lub B oraz uzasadnienie 1 lub 2.

Po usunięciu zaznaczonej na rysunku części pierścienia uzyskamy:

A.	dwa bieguny północne na końcach układu magnesów,	ponieważ	1.	z jednego z magnesów został usunięty tylko jeden biegun.
B.	jeden biegun północny i jeden biegun południowy na końcach układu magnesów,		2.	nawet pojedyncza domena magnetyczna ma dwa bieguny.

Zadanie 2. Ruch elektronu

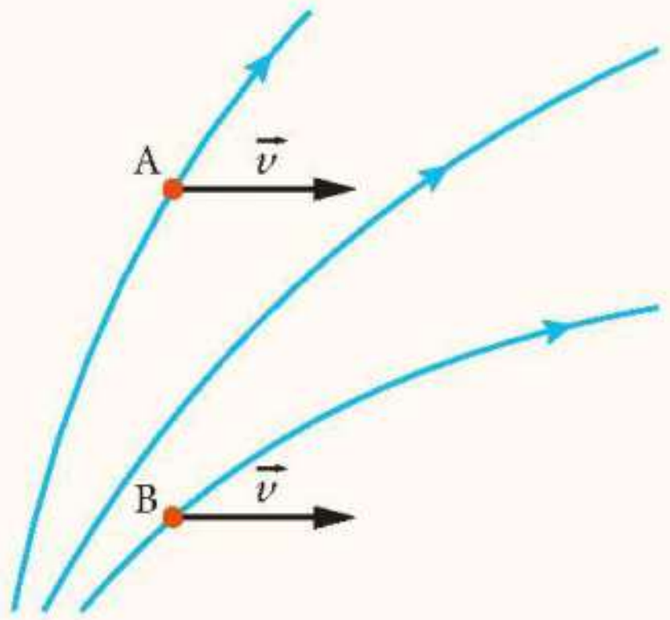
Elektron umieszczony w jednorodnym polu magnetycznym porusza się pod wpływem siły Lorentza po okręgu w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wektora indukcji magnetycznej. Masa elektronu wynosi w przybliżeniu $9 \cdot 10^{-31}$ kg, a wartość jego ładunku to $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

2.1. Oblicz wartość indukcji magnetycznej pola, jeśli wiemy, że prędkość elektronu wynosi $2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, a promień okręgu to 0,05 m.

2.2. Oblicz siłę Lorentza działającą na elektron w polu magnetycznym o indukcji równej 3 mT, jeśli wiemy, że elektron poruszał się po okręgu o promieniu równym 0,05 m.

Zadanie 3. Ładunki w polu magnetycznym

W niejednorodnym polu magnetycznym znalazły się dwa ładunki o wartości $+q$, poruszające się z jednakową prędkością $\vec{v}$.



3.1. Czy działająca na ładunki siła Lorentza ma ten sam kierunek? Wybierz właściwą odpowiedź TAK lub NIE oraz uzasadnienie spośród 1–3.

TAK,	ponieważ	**1.**	w punkcie A wektor indukcji magnetycznej ma inny kierunek niż w punkcie B.
NIE,		**2.**	oba ładunki poruszają się z tą samą prędkością.
		3.	w obu przypadkach siła Lorentza jest prostopadła do płaszczyzny rysunku.

3.2. Porównaj wartość siły Lorentza działającej na ładunki. Wybierz zdanie prawdziwe.

A. W punkcie A na ładunek działa siła Lorentza o większej wartości.
B. W punkcie B na ładunek działa siła Lorentza o większej wartości.
C. Siły działające na oba ładunki mają jednakową wartość.
D. Brakuje danych, aby stwierdzić, na który ładunek działa siła o większej wartości.

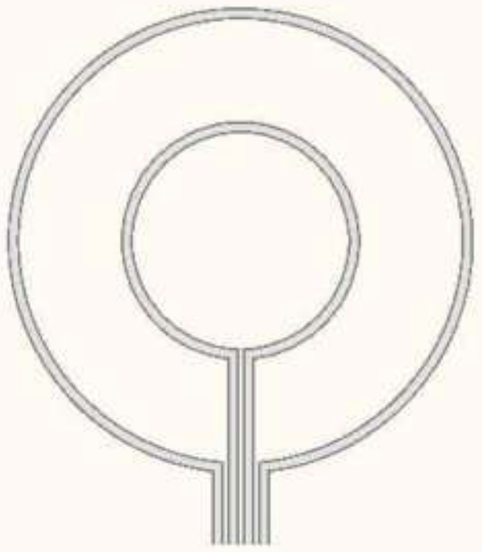
Zadanie 4. Pętla z przewodnika

W polu magnetycznym umieszczono pętlę z przewodnika w płaszczyźnie prostopadłej do linii jednorodnego pola magnetycznego. W pętli płynie prąd. Czy siła elektrodynamiczna działająca na pętlę może przesunąć całą pętlę wzdłuż linii pola? Wybierz właściwą odpowiedź TAK lub NIE oraz uzasadnienie spośród 1–3.

TAK,	ponieważ	**1.**	siła elektrodynamiczna działa równolegle do linii pola.
NIE,		**2.**	siła elektrodynamiczna będzie w każdym punkcie działać wzdłuż promienia pętli.
		3.	pętla będzie się poruszać w poprzek linii pola, a nie wzdłuż nich.

Zadanie 5. Dwa koncentryczne przewodniki

Dwa przewodniki w kształcie pętli umieszczono koncentrycznie jeden w drugim, tak jak pokazano na rysunku. Czy można tak dobrać natężenia i kierunki prądów płynących w tych przewodnikach, aby w środku geometrycznym okręgów indukcja magnetyczna wynosiła zero? Jeśli tak, to znajdź warunki, jakie muszą zostać spełnione. Jeśli nie – uzasadnij, dlaczego nie jest to możliwe.



15 Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej
2. Prawo indukcji Faradaya
3. Prąd przemienny
4. Domowa sieć elektryczna
5. Silniki elektryczne i prądnice
6. Indukcja wzajemna i samoindukcja
7. Dioda i prostowanie prądu
8. Tranzystor

15.1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

Przypomnij sobie

- Przewodnik z prądem jest źródłem pola magnetycznego.
- Pole magnetyczne opisujemy za pomocą wektora indukcji magnetycznej, oznaczanego symbolem $\vec{B}$.
- Graficzną ilustracją pola magnetycznego są linie pola.



Rys. **15.1.** W dnie garnka stojącego na kuchence indukcyjnej płynie prąd elektryczny, powodujący jego rozgrzewanie – płyta samej kuchenki nie jest gorąca

Po odkryciu na początku XIX w., że prąd elektryczny może być źródłem pola magnetycznego, fizycy podejrzewali istnienie także zjawiska odwrotnego: pole magnetyczne może być źródłem prądu elektrycznego. Jednak dopiero w 1831 r. Michael Faraday przeprowadził udany eksperyment potwierdzający podejrzenia badaczy. Wykonajmy doświadczenie, w którym zaobserwujemy wytwarzanie prądu przez pole magnetyczne.

Doświadczenie 30 – obowiązkowe

Demonstrowanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej

1. Przygotuj zwojnicę, magnes neodymowy, sprężynę, statyw, nić, taśmę klejącą, czuły amperomierz oraz kamerę.
2. Umocuj zwojnicę w położeniu pionowym. Podłącz jej końcówki do amperomierza nastawionego na najczulszy zakres.
3. Ustaw kamerę tak, aby w jej obiektywie znalazł się cały układ doświadczalny. Włącz ją.
4. Przywiąż magnes do nici jednym biegunem w dół, a drugim do góry i wsuń go do zwojnicy. Przez chwilę trzymaj go nieruchomo w tej pozycji. Co obserwujesz?
5. Umocuj tak przywiązany magnes na sprężynie w taki sposób, aby w położeniu równowagi znajdował się tuż nad zwojnicą (zdjęcie a).
6. Wpraw magnes na sprężynie w ruch drgający.
7. Zdejmij magnes ze sprężyny i przymocuj go do nici taśmą klejącą tak, aby linia przechodząca przez bieguny znajdowała się w płaszczyźnie poziomej (zdjęcie b). Zacznij szybko obracać magnesem wokół osi pionowej.
8. Odtwórz i przeanalizuj film.

a)



b)



Indukcja elektromagnetyczna

Podczas wykonywania czynności opisanych w punkcie 6. doświadczenia mogliśmy zaobserwować na podstawie wskazań amperomierza, że w następstwie ruchu magnesu nastąpił przepływ prądu przez obwód, w którego skład wchodziła zwojnica. Oznacza to, że między jej końcówkami powstało napięcie.

Pojawienie się napięcia było spowodowane **zmianą** pola magnetycznego, w którym znajdowała się zwojnica, i występowało tylko **podczas** tej zmiany.

Przy wsuwaniu magnesu do zwojnicy kierunek prądu był przeciwny niż przy wysuwaniu, co mogliśmy zauważyć w postaci zmiany znaku na wyświetlaczu.

> Powstawanie napięcia podczas zmian pola magnetycznego nazywamy **indukcją elektromagnetyczną**.

Prąd płynący w wyniku indukcji elektromagnetycznej nazywamy prądem indukcyjnym. Zwróć uwagę, że przyczyną zjawiska indukcji elektromagnetycznej jest zmiana pola, a nie samo pole. Kiedy magnes wisiał bez ruchu wewnątrz zwojnicy, prąd nie płynął, choć zwojnica znajdowała się w silnym polu magnetycznym. Dopiero ruch magnesu spowodował, że prąd popłynął.

Właśnie dostrzeżenie tej zależności pozwoliło odkryć zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Wcześniej fizycy bezskutecznie próbowali wykonać doświadczenie, które by potwierdziło, że skoro prąd stały pozwala uzyskać stałe pole magnetyczne, to także stałe pole magnetyczne pozwoli wytworzyć prąd stały. Dzięki odkryciu Faradaya wiemy, dlaczego jest to niemożliwe: nawet bardzo silne pole magnetyczne nie spowoduje indukcji, jeśli się nie zmienia.

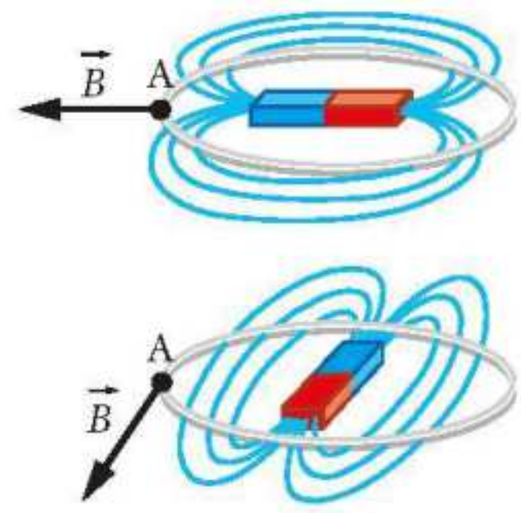
Podobnie jak w przypadku ogniwa, do opisu indukcji elektromagnetycznej używamy pojęcia siły elektromotorycznej (SEM). Mówimy, że w zwojnicy **indukuje się siła elektromotoryczna**. Jest ona równa napięciu między końcami zwojnicy, do której nic nie zostało podłączone.

SEM ogniwa s. 198

Uwaga. Indukcja magnetyczna i indukcja elektromagnetyczna to dwa różne pojęcia. Indukcja **magnetyczna** to wielkość wektorowa charakteryzująca pole magnetyczne (oznaczana symbolem $\vec{B}$), natomiast indukcja **elektromagnetyczna** to zjawisko powstawania siły elektromotorycznej na skutek zmian pola magnetycznego. Choć określenia te brzmią podobnie, znaczą zupełnie co innego.

Indukcja a liczba linii pola

Zastanówmy się, co rozumiemy przez zmianę pola magnetycznego. Kiedy w trakcie wykonywania czynności opisanych w punkcie 7. doświadczenia 30. magnes przyczepiony do nici został wprawiony w ruch obrotowy, każdy z punktów zwojnicy znajdował się w polu magnetycznym, którego indukcja się zmieniała (rys. 15.2). Nie powodowało to jednak indukowania SEM.



Rys. **15.2.** Przy różnych położeniach magnesu wektor indukcji w punkcie A jest różny. Mimo to nie zachodzi zjawisko indukcji

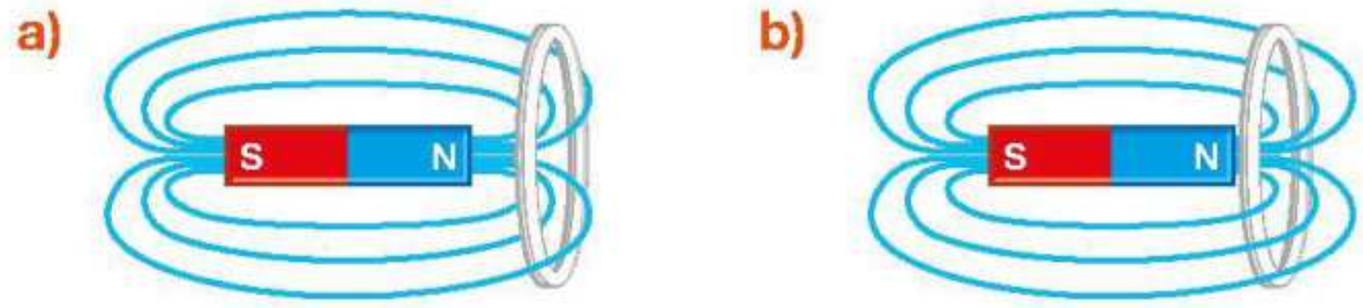
Warunek zachodzenia indukcji elektromagnetycznej po raz pierwszy sformułował Michael Faraday.

> Zjawisko indukcji elektromagnetycznej zachodzi, gdy zmienia się liczba linii pola magnetycznego przecinających obszar ograniczony pętlą przewodnika. Indukowana siła elektromotoryczna jest tym większa, im szybciej następują te zmiany.

Takie sformułowanie **prawa Faradaya** nie jest całkowicie ścisłe, ponieważ linie pola można rysować bliżej lub dalej od siebie. Jednak pomaga szybko się zorientować, czy w danym przypadku zajdzie zjawisko indukcji. Dokładniejszą, matematyczną postać prawa Faradaya omówimy w następnej lekcji.

Zauważmy tymczasem, że wyniki doświadczenia 30. zgadzają się z tym prawem:

- W trakcie przesuwania magnesu (pkt 6. dośw. 30) liczba linii pola przechodzących przez zwojnicę ulegała zmianie. Pokazuje to schematyczny rysunek 15.3 – od dwóch linii na rysunku 15.3a do czterech linii na rysunku 15.3b.
- Podczas obracania magnesu liczba linii pola pozostawała bez zmian (pkt 7. dośw. 30), co widać na rysunku 15.2 na s. 277.



Rys. **15.3.** Liczba linii pola przechodzących przez pętlę zależy od położenia magnesu względem pętli

Reguła Lenza

Wykonajmy teraz doświadczenie, w którym zbadamy kierunek przepływu prądu indukcyjnego.

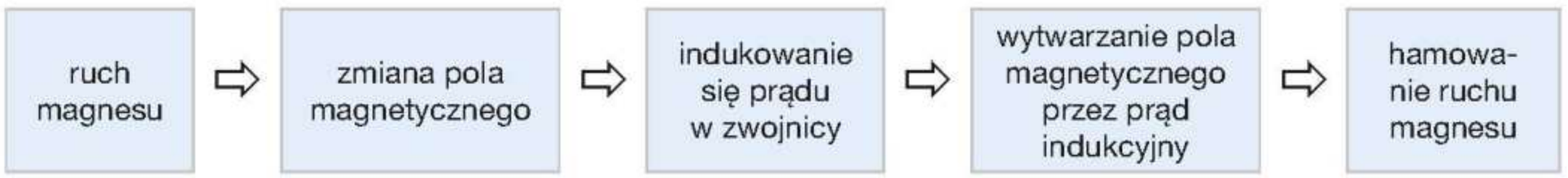


Doświadczenie 31

1. Przygotuj długi, cienki drut, magnes neodymowy, sprężynę, statyw i nić.
2. Umocuj magnes na sprężynie jednym biegunem w dół, a drugim do góry.
3. Wpraw magnes na sprężynie w ruch drgający.
4. Zwiń drut tak, aby powstała zwojnica w kształcie pierścienia, złożona z ciasno zwiniętych kilkudziesięciu zwojów. Połącz ze sobą końce drutu.
5. Umieść zwojnicę poziomo tak, aby magnes neodymowy znajdował się wewnątrz niej w stanie równowagi.
6. Ponownie wpraw magnes na sprężynie w ruch drgający (działaj podobną siłą jak w punkcie 3). Czy coś się zmieniło?

W doświadczeniu obserwujemy, że obecność zwojnicy powoduje szybkie tłumienie drgań magnesu. Dlaczego? Otóż gdy magnes zbliża się do zwojnicy, jego pole magnetyczne powoduje indukowanie się prądu elektrycznego w zwojnicy. Ten prąd także wytwarza pole magnetyczne. Właśnie to pole jest przyczyną obserwowanego w doświadczeniu 31. hamowania ruchu magnesu.

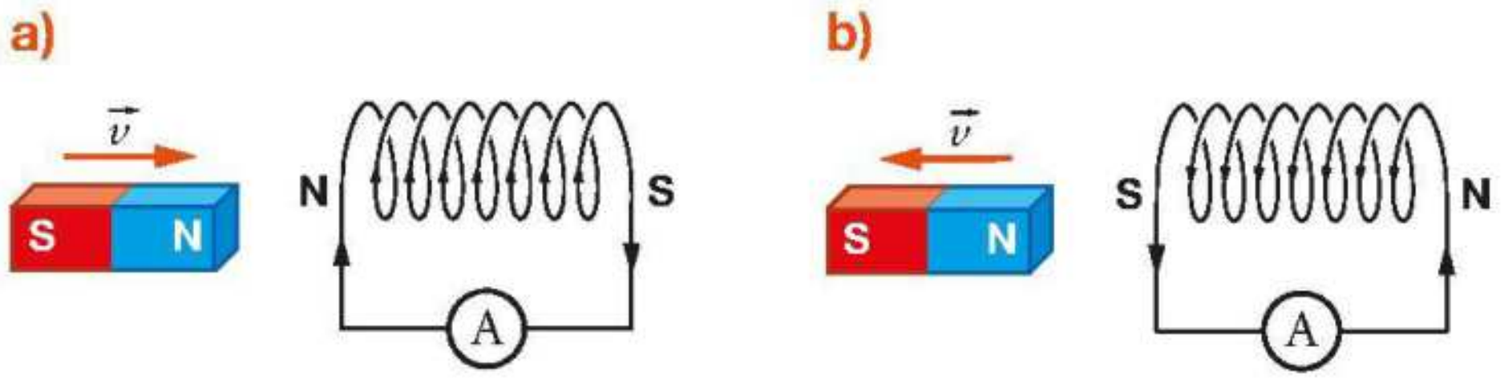
Opisane zmiany można przedstawić za pomocą diagramu (strzałki przedstawiają zależności przyczynowo-skutkowe, a nie następstwo w czasie, gdyż wszystkie opisane zjawiska zachodzą równocześnie).



Zwróćmy uwagę, że zgodnie z diagramem ostatecznym skutkiem ruchu magnesu jest hamowanie tego ruchu. Zilustrowany za pomocą diagramu wynik naszego doświadczenia jest zgodny z **regułą Lenza**:

> Kierunek przepływu prądu indukcyjnego jest taki, że wytwarzane przez niego pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie, która ten prąd wywołuje.

Gdy magnes zbliża się do zwojnicy, zaczyna w niej płynąć prąd w kierunku takim, że wytworzone przez nią pole magnetyczne odpycha zbliżany magnes (rys. 15.4a). Gdy magnes oddala się od zwojnicy, zaczyna w niej płynąć prąd w kierunku takim, że jej pole magnetyczne przyciąga magnes (rys. 15.4b).



Rys. **15.4.** Indukcja prądu w zwojnicy: a) magnes zbliża się do zwojnicy – bieguny jednoimienne się odpychają, b) magnes oddala się od zwojnicy – bieguny różnoimienne się przyciągają

A to ciekawe

Nadprzewodnik to substancja o zerowym oporze elektrycznym. Umieszczony nad nim magnes przez chwilę spada na jego powierzchnię. Jednak zmienne pole magnetyczne wytwarzane przez ten ruch sprawia, że w nadprzewodniku powstaje prąd, który z kolei wytwarza pole magnetyczne, hamujące magnes. Po chwili magnes się zatrzymuje i zawisa (lewituje) nad nadprzewodnikiem. Zerowy opór sprawia, że wytworzony prąd nie zanika i magnes może lewitować dowolnie długo. Analogicznie, magnes może lewitować pod nadprzewodnikiem, a nadprzewodnik – nad lub pod magnesem.



Reguła Lenza wynika z zasady zachowania energii. Gdyby pole wytwarzane przez prąd w zwojnicy powodowało dalsze nabieranie prędkości przez magnes, jego energia kinetyczna rosłaby w nieskończoność bez zasilania, mielibyśmy więc do czynienia z perpetuum mobile.
Gdy magnes hamuje, jego energia kinetyczna nie znika, ale zamienia się w energię elektryczną prądu indukcyjnego, która z kolei zostaje rozproszona na skutek oporu elektrycznego w zwojnicy.

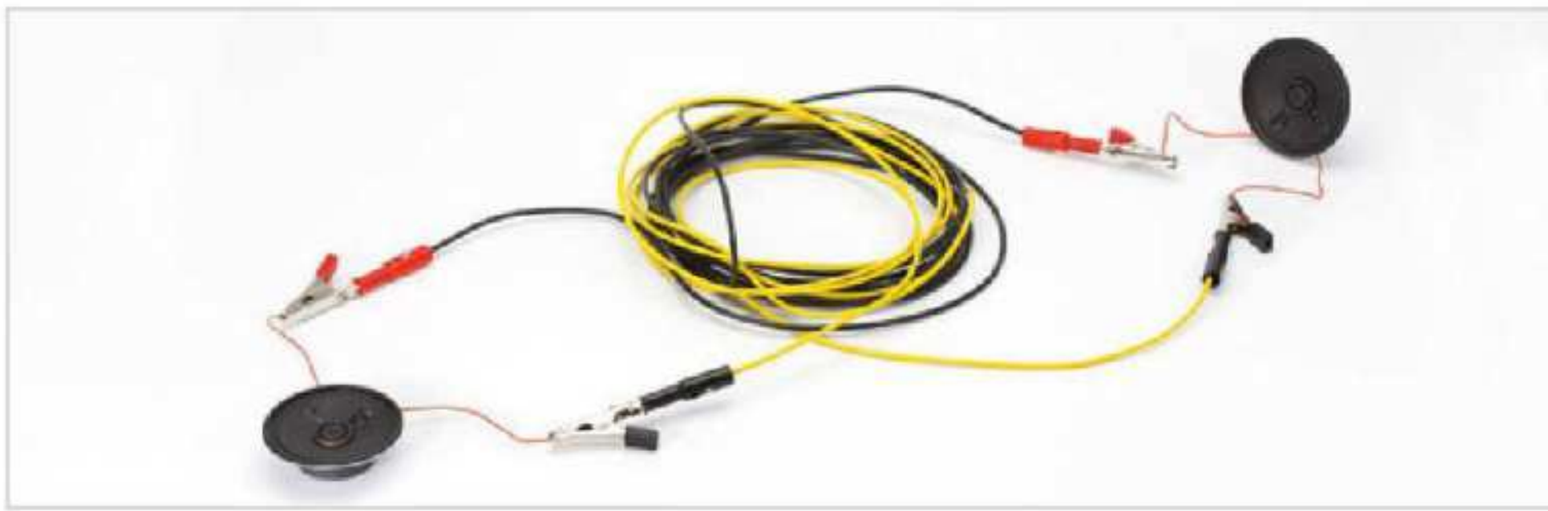
Mikrofon i głośnik

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej znajduje zastosowanie w budowie wielu urządzeń codziennego użytku, np. prądnicy, o której więcej powiemy w lekcji 15.5, czy transformatorze (lekcja 15.6). Oprócz tego jest wykorzystywane m.in. w popularnym typie mikrofonów – mikrofonach dynamicznych.
Zasadniczo głośnik jest zbudowany tak samo jak mikrofon dynamiczny, więc także może służyć za mikrofon. W praktyce oba urządzenia różnią się od siebie jedynie szczegółami technicznymi, które pozwalają osiągnąć wyższą jakość dźwięku. Aby się o tym przekonać, wykonaj doświadczenie.

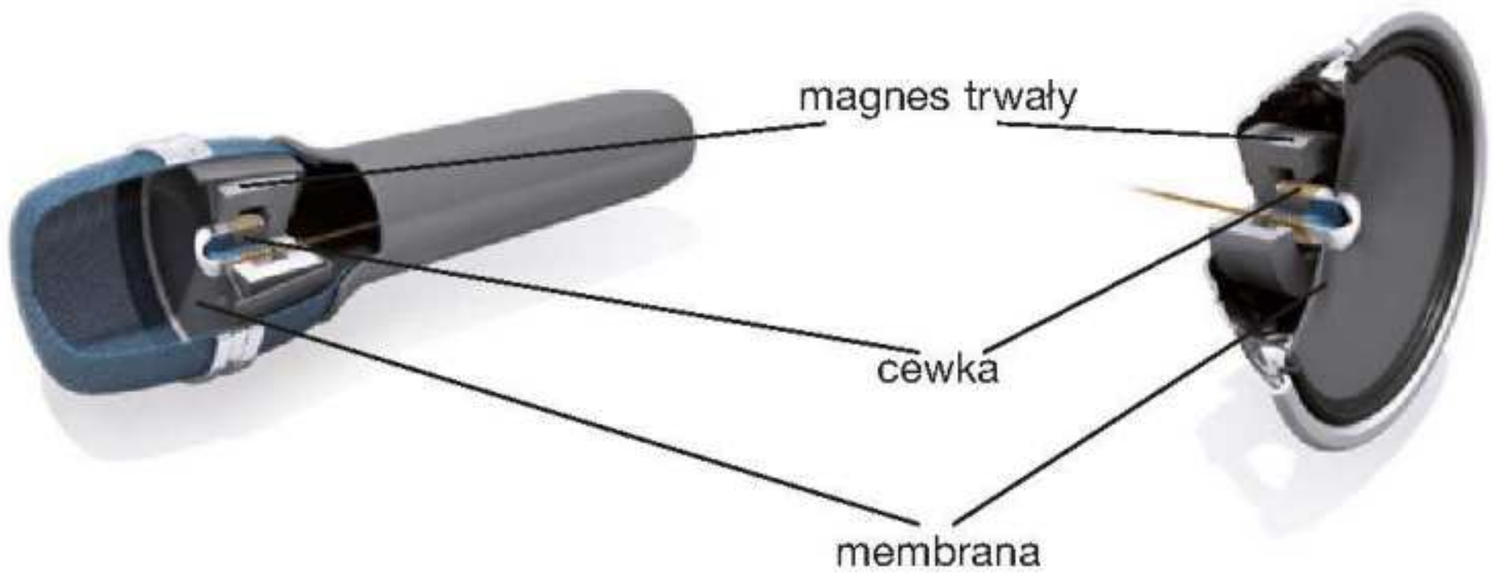


Doświadczenie 32

1. Przygotuj dwa głośniki bez obudowy, ogniwo, woltomierz oraz dwa przewody o długości kilku metrów każdy. Możesz także użyć głośników w obudowie, jeśli nie zasłania ona membrany i można się podłączyć do przewodów wychodzących z głośnika.
2. Podłącz jeden z głośników do ogniwa. Co słyszysz?
3. Podłącz jeden z głośników do woltomierza i zapukaj w membranę. Co obserwujesz?
4. Połącz głośniki za pomocą przewodów i umieść je jak najdalej od siebie. Zbliż ucho do jednego z głośników. Poproś inną osobę, aby mówiła do drugiego. Co słyszysz?



Z naszego doświadczenia wynika, że głośnik może pełnić funkcję mikrofonu. Stukanie w membranę było przyczyną powstawania sygnałów elektrycznych rejestrowanych przez miernik, podobnie jak miałoby to miejsce w przypadku mikrofonu.
Jak zatem działają mikrofony i głośniki?



Rys. **15.5.** Budowa mikrofonu i głośnika – oba urządzenia mają podobną konstrukcję

Zarówno mikrofon dynamiczny, jak i głośnik składają się z membrany, zwojnicy (cewki) i magnesu trwałego.

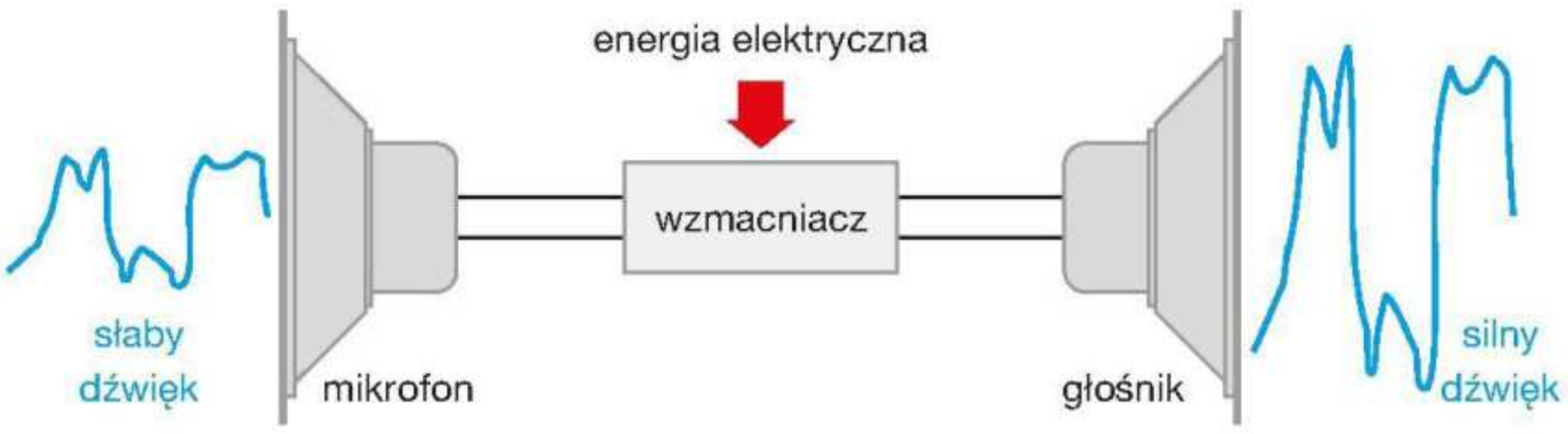
W mikrofonie drgania powietrza wprawiają w ruch membranę, ona zaś – przymocowaną do niej cewkę. Cewka porusza się w polu magnetycznym wytwarzanym przez magnes trwały, więc na końcach jej przewodów indukuje się napięcie, które zmienia się w czasie zgodnie z drganiami powietrza.

Głośnik zbudowany jest podobnie, ale jego działanie jest przeciwne: gdy do cewki podłączymy napięcie, zaczyna ona działać jak elektromagnes: w wyniku oddziaływania z magnesem trwałym porusza się i wprawia w ruch membranę.

Jeśli do głośnika podłączymy napięcie z mikrofonu, membrana drga w takt zmian napięcia i wytwarza falę dźwiękową. Tak więc drgania powietrza wytwarzane przez membranę głośnika przypominają drgania powietrza, które padało na membranę mikrofonu.

Aby zwiększyć natężenie dźwięku, zwykle stosujemy wzmacniacz (rys. 15.6). Podobnie jest, gdy głośnik podłączymy do urządzenia elektronicznego, np. odtwarzacza płyt albo komputera.

W punkcie 2 doświadczenia 32 włączenie ogniwa powodowało jednorazowe przesunięcie cewki i membrany. W ten sposób powstawał pojedynczy impuls falowy – pyknięcie.



Rys. **15.6.** Schemat przetwarzania dźwięku przez mikrofon i głośnik

Po tej lekcji powinieneś

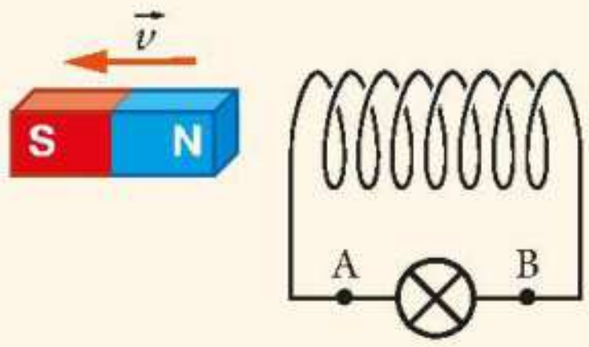
- wyjaśniać, kiedy zachodzi zjawisko indukcji elektromagnetycznej;
- stosować regułę Lenza do określania kierunku przepływu prądu indukcyjnego;
- opisywać budowę i zasadę działania mikrofonu i głośnika.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Magnes oddala się od zwojnicy w sposób pokazany na rysunku. Określ kierunek przepływu prądu indukcyjnego przez żarówkę.

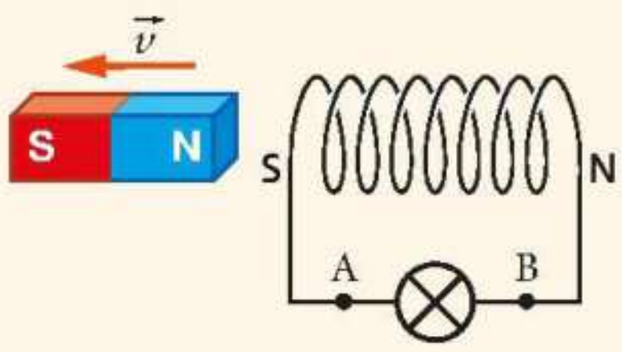


Rozwiązanie

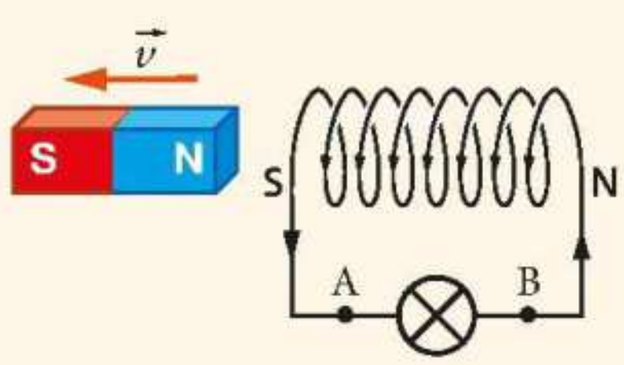
Ponieważ magnes się oddala, zgodnie z regułą Lenza pole magnetyczne prądu indukcyjnego przyciąga go do zwojnicy. To oznacza, że zwojnica wytwarza pole takie jak umieszczony w niej drugi magnes, skierowany biegunem południowym w stronę oddalającego się magnesu. Sytuację tę przedstawiono na rysunku a).

Kierunek prądu w zwojnicy wyznaczamy zgodnie z regułą przedstawioną na s. 233 (rys. 14.17). Widzimy, że w żarówce prąd płynie od punktu A do punktu B (rys. b).

a)

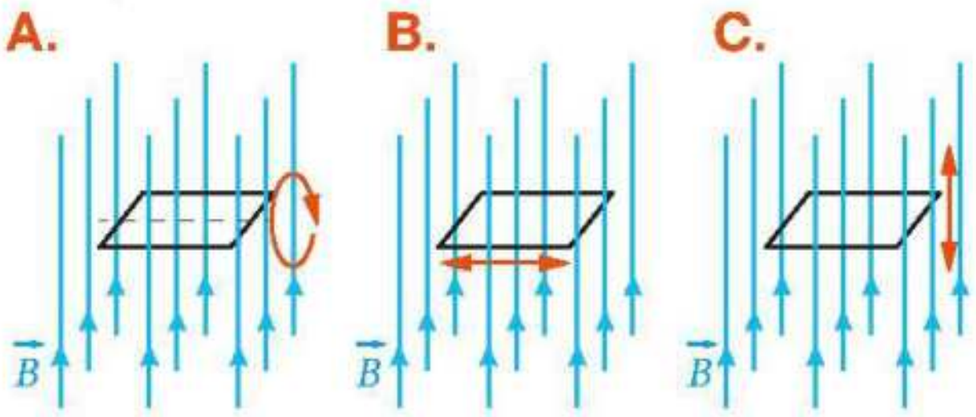


b)



Odpowiedź: Prąd w żarówce płynie od punktu A do punktu B.

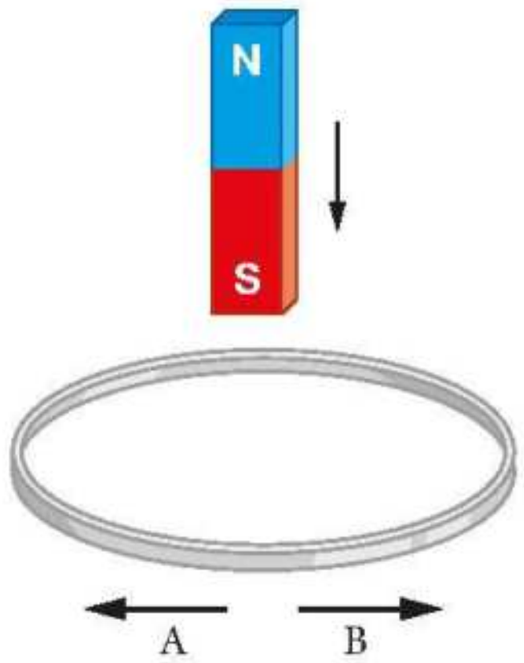
1. Na rysunkach przedstawiono schematycznie ruch metalowej ramki w jednorodnym polu magnetycznym. W którym z narysowanych przypadków zajdzie zjawisko indukcji? Uzasadnij odpowiedź.



2. Do ustawionego poziomo aluminiowego pierścienia wsuwano magnes, skierowany w jego stronę biegunem południowym.

a) W którą stronę płynie prąd indukcyjny? Posłuż się oznaczeniami przedstawionymi na rysunku.

b) Wyobraź sobie, że magnes w przedstawionym ułożeniu upuszczono. Czy kierunek prądu indukcyjnego zmieni się, gdy cały magnes znajdzie się poniżej pierścienia? Uzasadnij odpowiedź.



3. Wykonaj poniższe doświadczenie i wyjaśnij jego wyniki.

a) Przygotuj pustą aluminiową puszkę po napoju, dwa jednakowe silne magnesy, gumkę recepturkę, miskę i otwieracz do konserw.

b) Usuń całkowicie wieczko puszki. Nalej wody do miski i postaw puszkę na wodzie tak, aby swobodnie się na niej unosiła.

c) Rozetnij gumkę recepturkę. Jeden z jej końców włóż między dwa magnesy złączone biegunami.

d) Umieść magnesy i gumkę z dala od metalowych przedmiotów. Trzymaj gumkę za drugi koniec i skręć ją wielokrotnie, a następnie puść. Obserwuj ruch magnesów.

e) Powtórz czynności opisane w punkcie d), tylko tym razem trzymaj gumkę tak, aby magnesy znajdowały się wewnątrz puszki. Obserwuj ruch magnesów i ruch puszki. Czy coś się zmieniło?



4. W doświadczeniu opisanym w zadaniu 3. mamy do czynienia z prądami wirowymi. Znajdź informacje o innych przykładach i zastosowaniach prądów wirowych. Zapisz, z jakich źródeł korzystasz.

5. Wykonaj poniższe doświadczenie i wyjaśnij jego wyniki.

a) Przygotuj magnes neodymowy oraz miedzianą lub aluminiową rurę (można ją kupić w sklepie budowlanym). Możesz użyć również rolki folii aluminiowej zapakowanej fabrycznie w plastik.

b) Upuść kilkakrotnie magnes z wysokości równej długości rury i oszacuj czas jego spadania. Nie musisz wykonywać dokładnych pomiarów.

c) Umieść magnes nad pionowo ustawioną rurą i go puść. Oszacuj, jak długo spada magnes wewnątrz rury. Wyjaśnij obserwowane zjawisko.



6. Zaprojektuj i wykonaj doświadczenie, w którym prąd indukuje się w cewce poruszającej się względem nieruchomego magnesu.

15.2. Prawo indukcji Faradaya

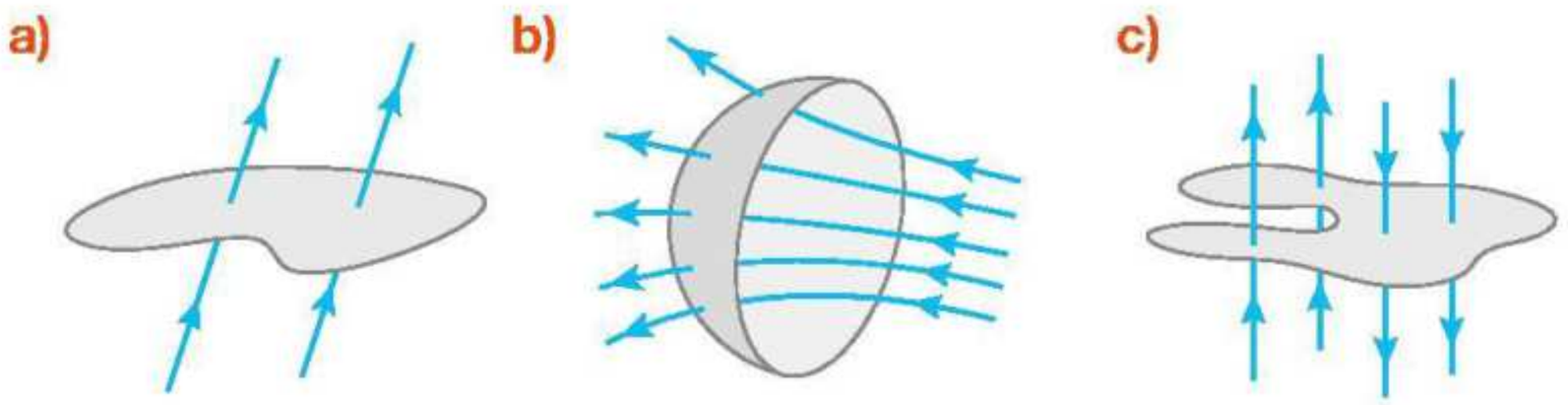
Przypomnij sobie

- Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na powstawaniu SEM w przewodniku na skutek zmiany pola magnetycznego.
- Siła elektromotoryczna indukcji jest tym większa, im szybciej zmienia się liczba linii pola magnetycznego przecinających obszar ograniczony przez przewodnik.

W poprzedniej lekcji powiedzieliśmy, że zmiany pola magnetycznego powodują indukowanie się prądu elektrycznego. Przez „zmiany pola" rozumieliśmy zmiany liczby linii pola przecinających obszar ograniczony pętlą z przewodnika (lub zwojnicą, która stanowi układ wielu takich pętli). Taka interpretacja daje nam pewne wyobrażenie, ale jest tylko przybliżeniem: linie pola można przecież rysować w różny sposób.
Aby móc sformułować prawo Faradaya w postaci, która pozwoli obliczać napięcie powstające w wyniku zmian pola magnetycznego, musimy zdefiniować mierzalną wielkość odpowiadającą liczbie linii pola. Taką wielkością jest **strumień indukcji magnetycznej przez powierzchnię**, który będziemy też krótko nazywać strumieniem indukcji magnetycznej.

Strumień indukcji magnetycznej

Intuicyjnie wielkość tę można rozumieć jako liczbę linii pola przechodzących przez interesującą nas powierzchnię, przy czym linie przechodzące w przeciwne strony należy traktować jak liczby z przeciwnymi znakami (rys. 15.7).



Rys. **15.7.** Przez narysowane powierzchnie: a) przechodzą dwie linie pola, b) przechodzi pięć linii pola, c) przechodzi zero linii pola (tyle samo linii przechodzi w jedną stronę co w drugą)

Należy pamiętać, że jest to jedynie intuicyjne wyobrażenie strumienia. W rzeczywistości linii pola jest nieskończenie wiele, a my rysujemy ich skończoną liczbę. Jeśli chcemy wyrażać strumień ilościowo, musimy wprowadzić dokładniejszą definicję. Zrobimy to w trzech krokach.

1. W najprostszym przypadku, gdy linie jednorodnego pola magnetycznego są prostopadłe do wybranej przez nas powierzchni (rys. 15.8a), strumień pola, oznaczany jako Φ, jest równy iloczynowi wartości indukcji B oraz powierzchni S:

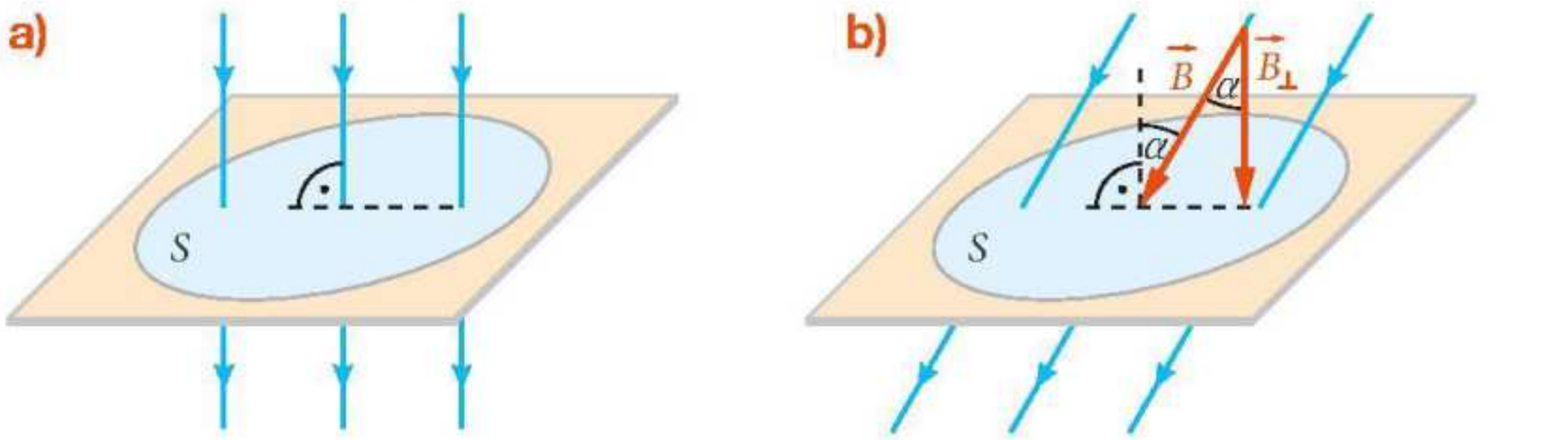
$$\Phi = BS \text{ dla } B \perp S$$

Litera Φ to wielka grecka litera fi, odpowiednik naszego F.

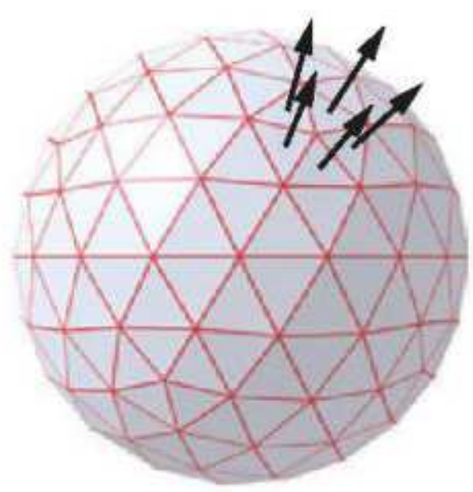
2. Jeśli pole jest jednorodne, ale jego linie nie są prostopadłe do wybranej przez nas powierzchni S, to uwzględniamy wyłącznie składową $B_\perp$ wektora indukcji magnetycznej, prostopadłą do tej powierzchni. Jeśli kąt między wektorem B a prostą prostopadłą do powierzchni oznaczymy jako α, to $B_\perp = B\cos\alpha$ (rys. 15.8b). Możemy więc zapisać:

$$\Phi = BS\cos\alpha$$

Przyjmujemy przy tym, że jeden ze zwrotów linii pola jest dodatni. Gdy linie są zwrócone przeciwnie, zakładamy, że strumień jest ujemny.



Rys. **15.8.** Gdy linie pola nie są prostopadłe do powierzchni, uwzględniamy tylko prostopadłą składową wektora indukcji

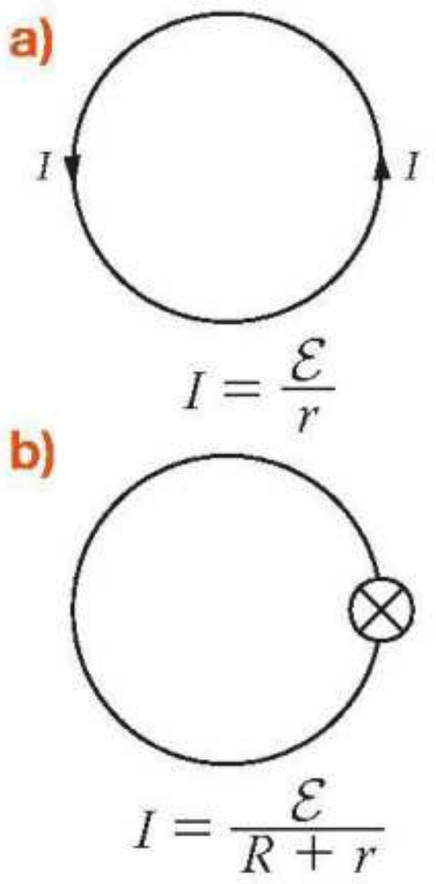


Rys. **15.9.** Przybliżenie sfery za pomocą figur płaskich

3. Jeżeli pole nie jest jednorodne, musimy podzielić powierzchnię na fragmenty w taki sposób, aby dla każdego z nich można było przyjąć stały wektor $\vec{B}$ (rys. 15.9), a następnie obliczyć strumień dla każdego fragmentu i zsumować uzyskane wyniki – w ten sposób otrzymamy całkowity strumień indukcji magnetycznej.

Z powyższych wzorów wynika, że jednostką strumienia indukcji jest $1\ \mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^2$. Ta jednostka ma własną nazwę – **weber**.

$$1\ \mathrm{Wb} = 1\ \mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^2$$



Rys. **15.10.** Natężenie prądu indukcyjnego płynącego w: a) pętli, b) pętli z odbiornikiem energii (żarówką)

Siła elektromotoryczna indukcji

Jak wiesz, do ilościowego opisu indukcji elektromagnetycznej służy siła elektromotoryczna (SEM) indukcji. Podobnie jak w przypadku ogniwa, określa ona pracę potrzebną do przemieszczenia ładunku po drodze zamkniętej wokół obwodu. Obwód może stanowić sama pętla, jeśli jest zamknięta (rys. 15.10a), lub pętla z włączonym do niej odbiornikiem energii (np. żarówką, rys. 15.10b).

Kiedy znamy SEM, możemy obliczyć natężenie prądu indukcyjnego w obwodzie:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

gdzie: $\mathcal{E}$ – siła elektromotoryczna, R – opór odbiornika energii, r – opór pętli.

Prawo Faradaya w postaci ilościowej

Dzięki wprowadzeniu pojęcia strumienia indukcji magnetycznej możemy sformułować **prawo Faradaya** ujęte ilościowo:

> Siła elektromotoryczna indukująca się w pętli jest równa szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej przechodzącego przez powierzchnię ograniczoną tą pętlą:
>
> $$\mathcal{E} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Z powyższego wzoru wynika, że im krótszy czas trwania zmiany strumienia magnetycznego, tym większa wartość bezwzględna siły elektromotorycznej indukcji. Natomiast ujemny znak SEM jest związany z regułą Lenza: wskazuje on kierunek przepływu prądu indukcyjnego. Najczęściej interesuje nas tylko wartość SEM i wartość natężenia prądu, wówczas ten znak możemy pominąć.

Reguła Lenza s. 279

Na podstawie powyższego wzoru wyznaczymy jednostkę SEM indukcji:

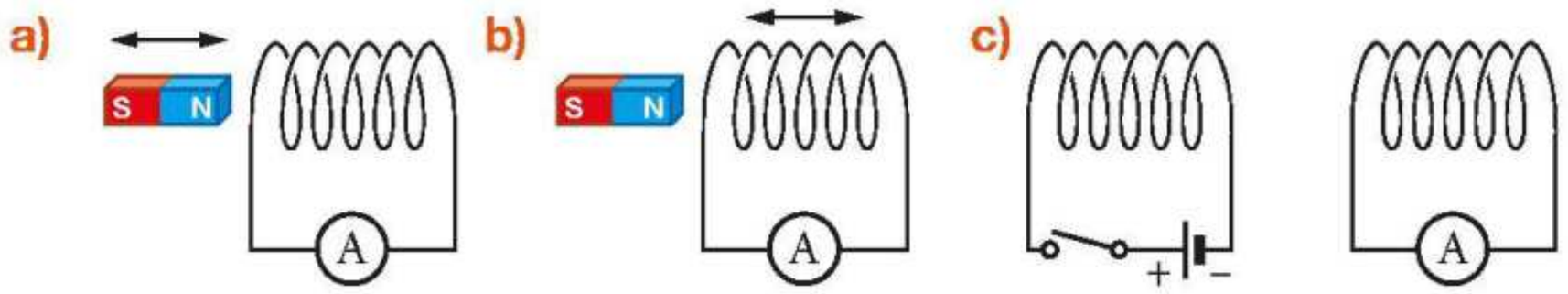
$$[\mathcal{E}] = \frac{\mathrm{T \cdot m^2}}{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} \cdot \frac{\mathrm{m^2}}{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{N \cdot m}}{\mathrm{C}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} = \mathrm{V}$$

Jest to taka sama jednostka jak w przypadku SEM ogniwa, co jest zgodne z naszą wiedzą – jednostką siły elektromotorycznej jest wolt.

Gdy zamiast pojedynczej pętli mamy ich więcej, siła elektromotoryczna jest odpowiednio większa, gdyż kolejne zwoje możemy traktować jako połączone szeregowo źródła napięcia.

Kiedy zmienia się strumień indukcji?

Zmiany strumienia indukcji magnetycznej mogą zachodzić z różnych powodów, m.in. ruchu magnesu (rys. a) lub zwojnicy (rys. b), czyli ogólnie – ruchu magnesu względem zwojnicy. Zmiany pola magnetycznego możemy powodować także za pomocą zwojnicy lub elektromagnesu poprzez zmianę napięcia zasilającego (np. włączanie i wyłączanie zasilania – rys. c). Nie musimy wówczas poruszać elementami układu. Faraday odkrył zjawisko indukcji właśnie w ten ostatni sposób.



Po tej lekcji powinieneś

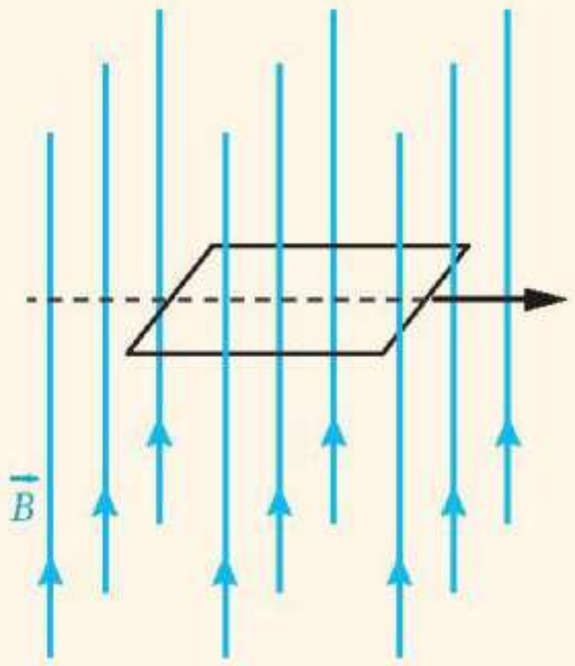
- posługiwać się pojęciem strumienia pola magnetycznego;
- stosować prawo Faradaya do obliczania SEM indukcji
- obliczać natężenie prądu indukcyjnego.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Ramka miedziana w kształcie kwadratu o boku $l = 5$ cm została wykonana z drutu o przekroju kołowym i grubości $d = 1$ mm. Ramka była umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $B = 100$ mT prostopadle do linii pola, a następnie z prędkością $v = 10\,\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ wysunięta z niego do obszaru, w którym pole magnetyczne było pomijalnie słabe. Oblicz, o ile zwiększyła się energia wewnętrzna ramki.



Rozwiązanie

Przyrost energii wewnętrznej ramki jest równy pracy prądu elektrycznego w ramce. Aby obliczyć tę pracę, musimy obliczyć najpierw SEM indukcji i natężenie prądu płynącego przez ramkę. Prąd w ramce indukował się w czasie, gdy jeden z jej końców znajdował się jeszcze w polu magnetycznym, a drugi już nie. Trwało to przez:

$$\Delta t = \frac{l}{v},\ \text{czyli}\ \ \Delta t = 0{,}5\ \text{s}$$

W tym czasie strumień indukcji zmniejszył się od wartości (cała ramka w polu):

$$\Phi = BS = Bl^2$$

do zera, a więc:

$$\Delta\Phi = 0 - \Phi = -Bl^2$$

Zgodnie z prawem Faradaya SEM indukcji wynosi:

$$\mathcal{E} = \frac{Bl^2}{\Delta t}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$\mathcal{E} = \frac{100 \cdot 10^{-3}\ \text{T} \cdot (0{,}05\ \text{m})^2}{0{,}5\ \text{s}} = 5 \cdot 10^{-4}\ \text{V}$$

Zauważmy, że wzór na SEM możemy też zapisać w postaci $\mathcal{E} = Blv$, z którego wynika, że skoro B, l i v się nie zmieniają, to SEM jest stała w czasie wysuwania ramki.
Wzór na pracę prądu elektrycznego poznałeś w postaci: $W = UIt$. Jednak w naszym wypadku jest mowa o mocy wydzielającej się w zamkniętej ramce, więc zamiast napięcia musimy uwzględnić SEM oraz czas, oznaczony przez nas wcześniej jako Δt:

$$W = \mathcal{E}I\Delta t$$

Obliczamy natężenie prądu:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Stąd wzór na pracę przyjmuje postać:

$$W = \frac{\mathcal{E}^2 \Delta t}{R}$$

Obliczmy opór ramki. Z treści zadania wiemy, że jest to przewód o długości:

$$l = 4 \cdot l = 20\,\text{cm} = 0{,}2\,\text{m}$$

Jego przekrój poprzeczny, obliczony ze wzoru na pole koła, wynosi $S_\text{p} = \frac{\pi d^2}{4} \approx 0{,}785\ \text{mm}^2$.
Ramka została wykonana z miedzi, czyli przewodnika o oporze właściwym:

$$\rho = 1{,}71 \cdot 10^{-8}\,\Omega \cdot \text{m} = 1{,}71 \cdot 10^{-2}\,\Omega\,\frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Wobec tego, aby obliczyć opór ramki, możemy skorzystać ze wzoru:

$$R = \frac{\rho l}{S_\text{p}}$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy: $R \approx 0{,}0044\ \Omega$. Zatem praca prądu elektrycznego wyniosła:

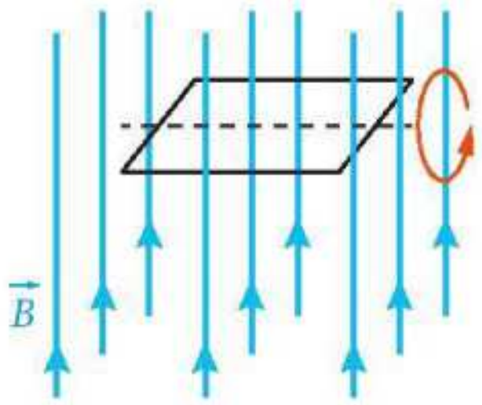
$$W = \frac{(5 \cdot 10^{-4}\,\text{V})^2 \cdot 0{,}5\,\text{s}}{0{,}0044\,\Omega} \approx 2{,}8 \cdot 10^{-5}\,\text{J}$$

O tyle samo zwiększyła się energia wewnętrzna ramki.

Odpowiedź: Energia wewnętrzna ramki zwiększyła się o ok. $2{,}8 \cdot 10^{-5}$ J.

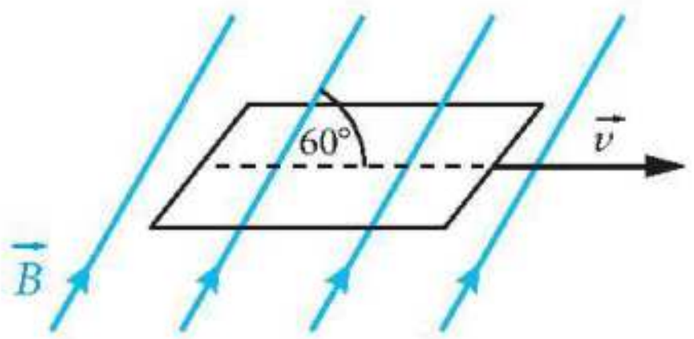
Uwaga. Jeżeli sprawdzimy w tablicach gęstość i ciepło właściwe miedzi, możemy obliczyć, że ramka ogrzeje się zaledwie o 0,00003°C. Tak niewielkiego przyrostu temperatury nie uda nam się zmierzyć.

1. Ramka z drutu ma kształt kwadratu o boku 20 cm. Została ona umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji 100 mT, w płaszczyźnie prostopadłej do linii pola. Następnie obrócono ją o kąt 5° tak, jak to przedstawia rysunek. Oblicz strumień indukcji magnetycznej przez ramkę przed obrotem i po nim.



2. Oblicz średnie natężenie prądu płynącego w ramce z zadania 1 podczas jej obrotu, jeśli trwał on 0,1 s, a opór ramki wynosi 6 mΩ.

3. Kwadratowa ramka o boku 20 cm wykonana z drutu miedzianego o przekroju poprzecznym 1 mm^2 znajdowała się w obszarze, w którym pole magnetyczne możemy przyjąć za jednorodne. Wektor indukcji tego pola miał wartość 0,05 T i był nachylony pod kątem 60° do płaszczyzny, w której znajdowała się ramka.
Następnie ramka została wysunięta z pola magnetycznego z prędkością 10 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ równolegle do jednego z jej boków, wskutek czego znalazła się w obszarze, w którym pole magnetyczne było pomijalnie małe. Oblicz natężenie prądu płynącego w ramce w czasie, gdy jeden koniec znajdował się już w obszarze o małym polu, a drugi jeszcze nie.



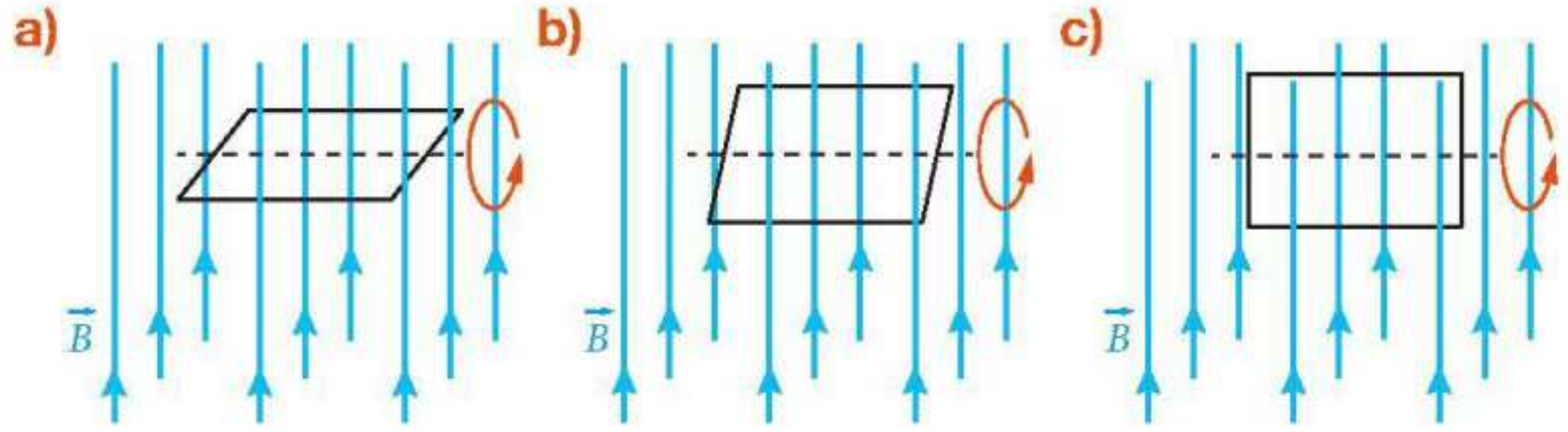
15.3. Prąd przemienny

Przypomnij sobie

- W domowej sieci elektrycznej występuje napięcie przemienne.
- Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na powstawaniu SEM na skutek zmian strumienia pola magnetycznego.
- Położenie ciała w ruchu harmonicznym opisujemy zależnością $x(t) = A\sin\omega t$.

Jak powstaje napięcie przemienne

Jak wiesz ze szkoły podstawowej, napięcie w domowej i przemysłowej sieci elektrycznej jest napięciem przemiennym. Zmieniają się zarówno jego wartość, jak i znak. W tej lekcji wyjaśnimy sposób wytwarzania takiego napięcia i dokładnie omówimy przebieg jego zmian.
Rozważmy najpierw sytuację, gdy ramka obraca się w jednorodnym polu magnetycznym (rys. 15.11). W kolejnych położeniach przez ramkę przechodzi różna liczba linii pola, co oznacza, że zmienia się strumień indukcji magnetycznej przechodzący przez ramkę. Tak więc w ramce będzie się indukować SEM.



Rys. **15.11.** Liczba linii pola magnetycznego przechodzących przez ramkę zależy od jej ułożenia: a) ramka prostopadła do linii pola, b) ramka pod kątem 45° do linii pola, c) ramka równoległa do linii pola

Opisywana przez nas ramka to najprostsza **prądnica prądu przemiennego** – urządzenie zamieniające energię mechaniczną w elektryczną. Zauważmy, że energii mechanicznej, dzięki której ramka się obracała, trzeba byłoby dostarczać nawet wtedy, gdyby nie było tarcia, ponieważ zgodnie z regułą Lenza siły magnetyczne powodują hamowanie obrotu ramki.

Reguła Lenza s. 279

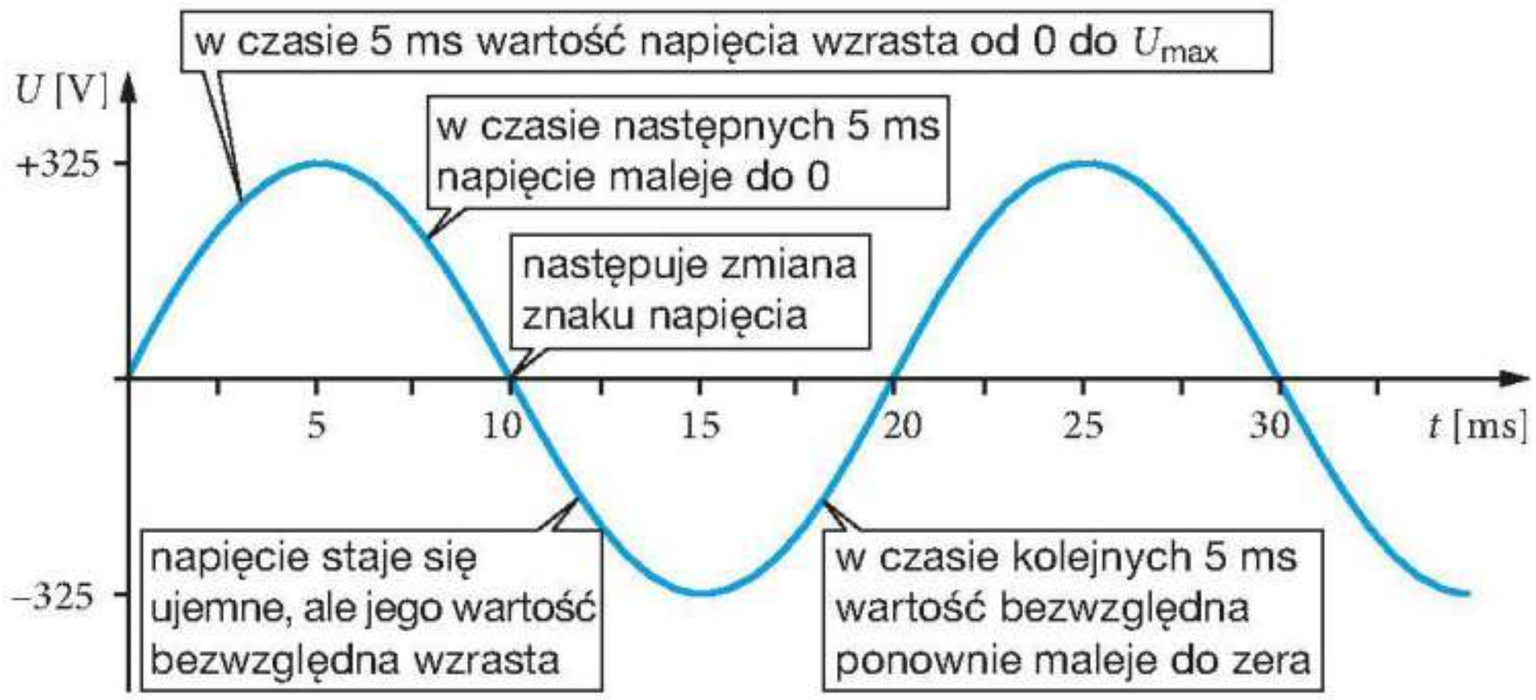
Zależność napięcia od czasu

Zmiany siły elektromotorycznej indukującej się w ramce obracającej się ze stałą prędkością kątową (innymi słowy: napięcia, które zmierzylibyśmy między końcami rozciętej ramki) opisujemy funkcją sinus. Tak więc są one podobne do zmian położenia ciała w ruchu harmonicznym i możemy je opisać podobnym wzorem:

$$U(t) = U_{\max}\sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right)$$

gdzie: $U_{\max}$ – maksymalna wartość napięcia, czyli amplituda jego zmian, T – okres zmian.

Zależność napięcia od czasu $U(t)$ dla prądu przemiennego możemy więc przedstawić w postaci sinusoidy (rys. 15.12).



Rys. **15.12.** Zależność napięcia od czasu w sieci prądu przemiennego

W Europie napięcie w sieci domowej zmienia się od $U_{max} = 325$ V do $U_{min} = -325$ V. Częstotliwość tych zmian wynosi $f = 50$ Hz, a więc $T = \frac{1}{50}$ s $= 20$ ms.

W niektórych krajach, np. w Japonii, w państwach Ameryki Północnej i w części państw Ameryki Południowej, napięcie zmienia się od $U_{max} = 156$ V do $U_{min} = -156$ V.

Napięcie skuteczne

Być może zaskoczyła cię informacja, że w polskiej sieci $U_{max} = 325$ V. Przecież wszyscy wiedzą, że napięcie sieciowe wynosi 230 V. Między tymi wielkościami nie zachodzi jednak żadna sprzeczność.

Znana powszechnie wartość 230 V to **napięcie skuteczne,** a nie napięcie maksymalne. Należy ją interpretować następująco: żarówka podłączona do sieci 230 V świeci tak samo jasno jak żarówka podłączona do napięcia stałego 230 V.

Aby lepiej zrozumieć, czym jest napięcie skuteczne, wykonaj doświadczenie opisane niżej.

Doświadczenie 33



1. Przygotuj oscyloskop, miernik uniwersalny, transformator zamieniający napięcie sieciowe na napięcie kilku, kilkunastu woltów, dwie jednakowe żarówki dostosowane do napięcia, które uzyskujesz za pomocą transformatora, zasilacz prądu stałego z regulacją napięcia i przewody.

   Uwaga. Możesz wykorzystać lampkę podobną do pokazanej na zdjęciu. W jej stopce znajduje się transformator obniżający napięcie sieciowe do napięcia ok. 12 V (zasilającego żarówkę), a słupki podtrzymujące górną część lampki są jednocześnie przewodami zasilającymi żarówkę, więc jest do nich łatwy dostęp. W niektórych typach lampek słupki są pokryte lakierem nieprzewodzącym prądu. Jeśli tak jest, przed podłączeniem przewodów należy zdrapać lakier.

2. Podłącz jedną z żarówek do transformatora (lampki) włączonego do sieci.
3. Odczytaj z oscyloskopu amplitudę napięcia przemiennego zasilającego żarówkę.
4. Za pomocą miernika nastawionego na odpowiedni zakres napięcia przemiennego (ACV, AC voltage) zmierz napięcie między końcówkami żarówki (patrz zdjęcie).
5. Podłącz drugą żarówkę do zasilacza prądu stałego i ustaw takie napięcie, aby obie żarówki świeciły jednakowo jasno.
6. Porównaj amplitudę napięcia przemiennego odczytaną z oscyloskopu z napięciem wskazywanym przez miernik oraz z napięciem zasilacza.

W doświadczeniu zaobserwowaliśmy, że jeśli obie żarówki świecą tak samo jasno, to woltomierz podłączony do żarówki zasilanej prądem przemiennym wskazuje takie samo napięcie jak napięcie zasilacza prądu stałego.
Wynika z tego, że woltomierz wskazuje napięcie skuteczne. Natomiast wartość amplitudy napięcia (czyli napięcie maksymalne U_{max}) wskazywana przez oscyloskop jest większa.
Wynik przeprowadzonego doświadczenia pozwala nam sformułować ogólniej pojęcie napięcia skutecznego.

Jeśli opornik podłączymy do napięcia przemiennego o amplitudzie U_{max}, to średnia moc prądu będzie taka sama jak w sytuacji, gdy zostałby on podłączony do napięcia stałego o pewnej wartości U_{sk}. Wartość U_{sk} nazywamy napięciem skutecznym odpowiadającym amplitudzie U_{max}.

Można udowodnić, że między napięciem skutecznym U_{sk} a amplitudą zmian U_{max} zachodzi zależność:

$$U_{sk} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

$\frac{325\ \text{V}}{\sqrt{2}} \approx 230\ \text{V}$

Podane wcześniej wartości dla sieci elektrycznej zgadzają się z tym wzorem. Sprawdź, na ile dokładnie zgadzają się z nim wartości z twojego doświadczenia.

Jak uzasadnić tę zależność? Jeśli opornik podłączamy do napięcia przemiennego o wartości skutecznej U_{sk}, to praca prądu W w całym okresie zmian napięcia jest taka sama jak wtedy, gdy podłączamy go do napięcia stałego równego U_{sk}. Aby ją obliczyć, skorzystamy ze związanej z nią wielkości – mocy prądu. Zapiszmy wzór na moc prądu:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Ponieważ napięcie zmienia się w czasie zgodnie ze wzorem $U(t) = U_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$, więc wyrażenie na moc przyjmuje postać:

$$P(t) = \frac{U^2(t)}{R} = \frac{U_{max}^2}{R} \sin^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

Przybliżanie pola pod wykresem, cz. I s. 74

Na rysunku 15.13a przedstawiono wykres zależności mocy chwilowej od czasu. Aby obliczyć średnią moc prądu, powinniśmy obliczyć całkowitą pracę wykonaną przez ten prąd w czasie jednego okresu. Wiemy, że jest ona równa polu pod wykresem $P(t)$, które możemy przybliżyć za pomocą schodków – pole pod każdym schodkiem jest równe $P(t) \cdot \Delta t$, co odpowiada pracy ΔW (rys. 15.13b).

To samo pole można obliczyć również inaczej. Zauważ, że jeśli narysujemy poziomą linię na wysokości $\frac{U_{max}^2}{2R}$, czyli w połowie maksymalnej wysokości wykresu, a następnie część wykresu ponad tą linią podzielimy na fragmenty, to wypełnią one puste miejsca między tą linią a wykresem (rys. 15.13c). Praca prądu w czasie T jest równa polu powstałego prostokąta o pionowym boku $\frac{U_{max}^2}{2R}$ i poziomym boku T, zatem:

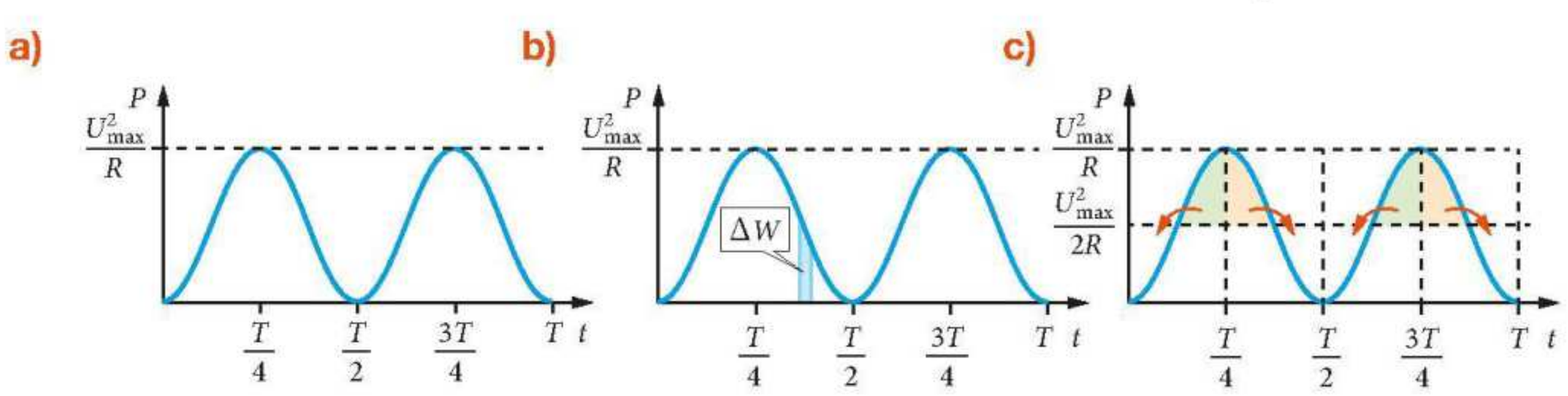
$$W = \frac{U_{max}^2}{2R} \cdot T, \quad \text{czyli:} \quad P = \frac{U_{max}^2}{2R}$$

Taką samą moc miałby prąd stały o napięciu U_{sk}, a ponieważ jego moc wynosiłaby:

$$P = \frac{U_{sk}^2}{R}$$

więc z porównania ostatnich dwóch wzorów otrzymujemy:

$$\frac{U_{sk}^2}{R} = \frac{U_{max}^2}{2R}, \quad \text{czyli} \quad U_{sk} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$



Rys. **15.13.** Pracę prądu można wyznaczyć jako pole pod wykresem $P(t)$. a) Wykres $P(t)$, b) przybliżenie pracy przez schodki na wykresie, c) geometryczne wyznaczanie pola pod wykresem

Natężenie skuteczne

Ponieważ w obwodzie prądu przemiennego zmienia się napięcie, więc natężenie tego prądu także ulega zmianom. Wartość skuteczna natężenia wyraża się wzorem analogicznym do wzoru na napięcie skuteczne:

$$I_{sk} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

który można uzasadnić, podobnie jak w przypadku napięcia, na podstawie wzoru $P = I^2R$. Wartości skuteczne to bardzo użyteczne wielkości, gdyż spełniają zależność $R = \frac{U}{I}$ i prawdziwy jest dla nich wzór $P = UI$. Dzięki nim wiele zadań dotyczących prądu przemiennego można rozwiązywać tak samo jak w przypadku prądu stałego.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać prąd przemienny;
- opisywać przemiany energii w prądnicy;
- rozróżniać wartości chwilowe, maksymalne i skuteczne napięcia i natężenia prądu;
- posługiwać się zależnościami między napięciem i natężeniem skutecznym i maksymalnym.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Ilustracja przedstawia tabliczkę znamionową czajnika elektrycznego. Oblicz opór spirali podczas pracy oraz koszt używania czajnika przez 5 min przy cenie energii elektrycznej 80 gr za 1 kWh.



Rozwiązanie

Wyjaśnijmy najpierw znaczenie informacji podanych na tabliczce (rysunek obok).



Do rozwiązania są potrzebne dwie z nich: napięcie $U = 230$ V oraz moc $P = 2100$ W. Dzięki nim ze wzoru na moc $P = UI$ możemy obliczyć natężenie prądu płynącego przez spiralę:

$$I = \frac{P}{U}, \text{ stąd } I = \frac{2100\ \text{W}}{230\ \text{V}} \approx 9{,}1\ \text{A}$$

Gdy już mamy napięcie i natężenie prądu, możemy obliczyć opór spirali:

$$R = \frac{U}{I} \approx 25\ \Omega$$

Ten sam wynik uzyskamy, jeśli opór wyznaczymy ze wzoru $P = \frac{U^2}{R}$.

Aby odpowiedzieć na pytanie o koszt, musimy obliczyć energię zużywaną przez czajnik w czasie $t = 5$ min.

Przypomnijmy, że 1 kWh (kilowatogodzina) to energia zużywana przez urządzenie o mocy 1 kW w czasie 1 h. Aby otrzymać wynik od razu w kilowatogodzinach, wyrazimy moc w kilowatach, a czas w godzinach:

$$P = 2100\ \text{W} = 2{,}1\ \text{kW} \quad \text{oraz} \quad t = 5\ \text{min} = \frac{5}{60}\ \text{h} = \frac{1}{12}\ \text{h}$$

Stąd:

$$E = Pt = 2{,}1\ \text{kW} \cdot \frac{1}{12}\ \text{h} = 0{,}175\ \text{kWh}$$

Za energię zapłacimy więc $0{,}175\ \text{kWh} \cdot 80\ \frac{\text{gr}}{\text{kWh}} = 14\ \text{gr}$.

Odpowiedź: Opór spirali podczas pracy wynosi ok. 25 Ω. Za energię potrzebną na działanie czajnika przez 5 min zapłacimy 14 gr.

Uwaga. Jak pamiętamy, opór przewodnika rośnie wraz z temperaturą, więc opór zimnej spirali jest mniejszy niż 25 Ω.

Zadania s. 294

Pytania i zadania

1. Żarówka w oświetleniu sufitowym ma moc 35 W i jest zasilana napięciem przemiennym o wartości skutecznej 12 V. Oblicz:

a) amplitudę napięcia U_{max},

b) wartości skutecznego i maksymalnego natężenia prądu płynącego przez żarówkę,

c) opór żarówki, gdy jest włączona.

2. Po jakim czasie od chwili, gdy napięcie chwilowe w domowej sieci elektrycznej jest równe zeru, jego wartość chwilowa jest taka sama jak wartość skuteczna?

3. Wykonaj zdjęcie tabliczki znamionowej dowolnego urządzenia elektrycznego w swoim domu. Na podstawie danych na niej zawartych oblicz:

a) skuteczne natężenie prądu płynącego przez urządzenie,

b) czas, w jakim urządzenie zużyje 1 kWh energii elektrycznej.

4*. Przeczytaj tekst w ramce poniżej i uzasadnij, że napięcie między dowolnymi dwoma przewodami domowej sieci trójfazowej jest napięciem przemiennym o częstotliwości 50 Hz i wartości skutecznej ok. 400 V. Rozwiąż zadanie na dwa sposoby:

a) na podstawie wykresów zamieszczonych w ramce,

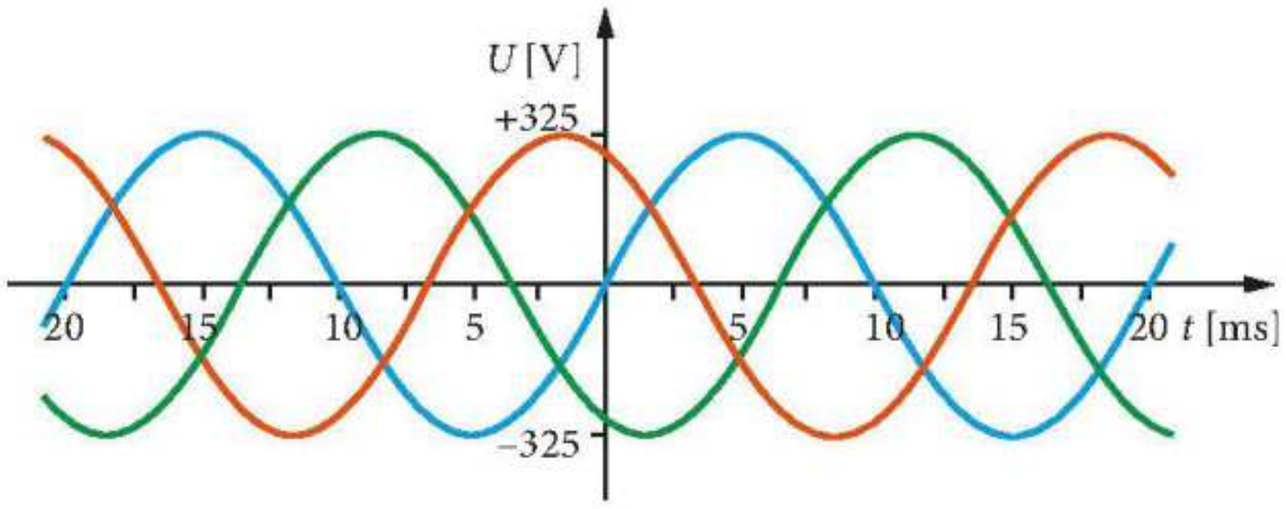
b) za pomocą obliczeń z wykorzystaniem tożsamości trygonometrycznych.

Kiedy napięcie przemienne opisujemy wzorem $U(t) = U_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$, zakładamy, że czas zaczynamy mierzyć w chwili, gdy $U = 0$. Ogólniejszy wzór wyrażający zależność $U(t)$, nieuwzględniający tego założenia, ma postać:

$$U(t) = U_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right)$$

gdzie φ_0, podobnie jak w przypadku ruchu drgającego, nazywamy przesunięciem fazowym, a argument funkcji sinus nazywamy fazą.

W przemyśle, rolnictwie oraz niektórych urządzeniach domowych o dużej mocy (np. kuchenkach elektrycznych) stosuje się **prąd przemienny trójfazowy**. W każdym przewodzie występuje napięcie przemienne o takiej samej wartości skutecznej (w domu jest to 230 V) i takiej samej częstotliwości (50 Hz), ale w poszczególnych przewodach cykle zmian napięcia są przesunięte w fazie o $\frac{1}{3}$ okresu (patrz wykresy). Potocznie prąd trójfazowy nazywany jest siłą, co oczywiście nie ma nic wspólnego z fizycznym znaczeniem tego słowa.



15.4. Domowa sieć elektryczna

Przypomnij sobie

- W domowej sieci elektrycznej wykorzystujemy napięcie przemienne, którego wartość i znak zmieniają się okresowo.
- W Europie napięcie skuteczne w domowej sieci elektrycznej wynosi 230 V, a częstotliwość zmian napięcia jest równa 50 Hz.
- Jeśli przez opornik o oporze R płynie prąd o natężeniu I, to moc wydzielaną na tym oporniku obliczamy z zależności $P = I^2R$

Z napięciem przemiennym mamy do czynienia na co dzień, ponieważ występuje ono w domowej sieci elektrycznej. Omówimy teraz tę sieć. Szczególną uwagę zwrócimy na urządzenia służące zwiększeniu bezpieczeństwa użytkowników.

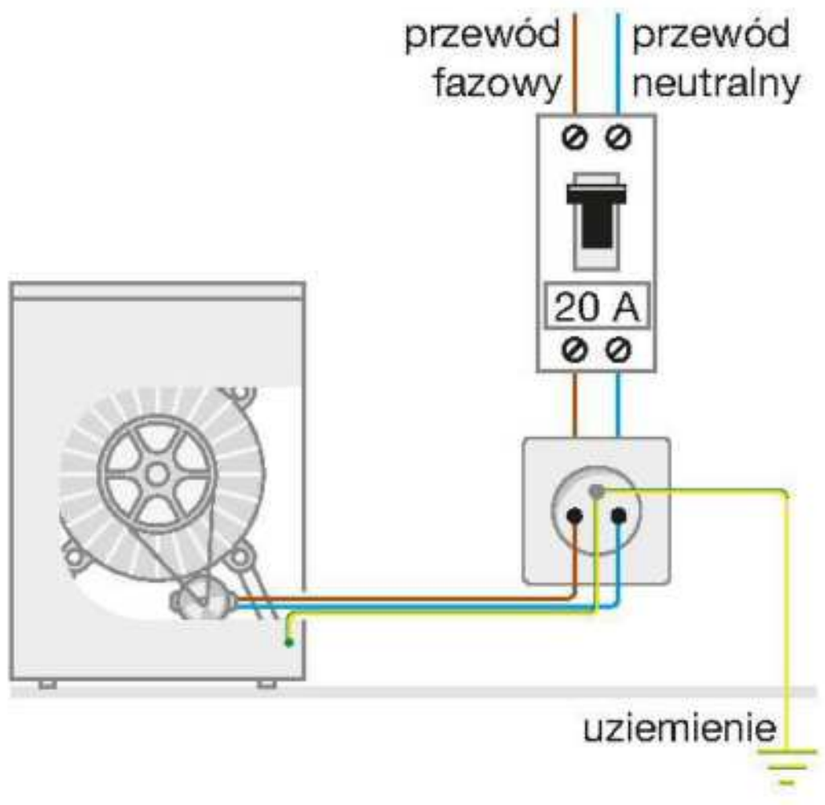
Rola przewodów w sieci domowej

W domowym gniazdku sieciowym do otworów prowadzą dwa przewody służące do zasilania podłączonego urządzenia (rys. 15.14). Jeden z nich ma potencjał taki jak ziemia, czyli innymi słowy, nie jest pod napięciem względem ziemi. To przewód neutralny, zwany często po prostu „zerem".

Potencjał drugiego przewodu zmienia się od −325 V do +325 V względem ziemi, co odpowiada wartości skutecznej $\frac{325\,\text{V}}{\sqrt{2}} = 230\,\text{V}$. Jest to przewód fazowy, zwany „fazą".

Jeśli przewody są założone prawidłowo, to przewód fazowy prowadzi do lewego otworu gniazdka (rys. 15.14). Jednak w żadnym wypadku nie wolno sprawdzać gołymi rękami, czy elektryk się nie pomylił!

Nazwa „faza" pochodzi stąd, że jest to jedna z faz prądu trójfazowego (patrz ramka na poprzedniej stronie).



Rys. **15.14.** Przewody w gniazdku sieciowym

Z kolei bolec (rys. 15.15a) lub styki z boku wtyczki (rys. 15.15b) to **uziemienie**, czyli bezpośrednie połączenie z ziemią. O jego funkcji powiemy w dalszej części lekcji.



Rys. **15.15.** Uziemienie: a) w bolcu wystającym z gniazdka, b) w styku z boku wtyczki

Badanie bezpiecznika

Najprostszy bezpiecznik składa się z cienkiego drutu umieszczonego w szklanej lub plastikowej obudowie. Takie bezpieczniki stosujemy dzisiaj w samochodach i małych urządzeniach elektronicznych. Zbadamy teraz jego działanie.

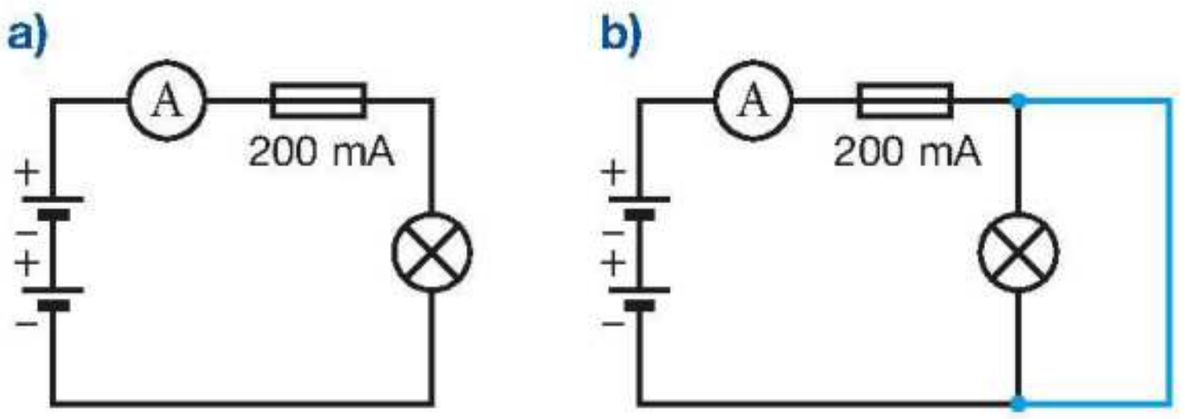


Rys. **15.16.** Symbol bezpiecznika

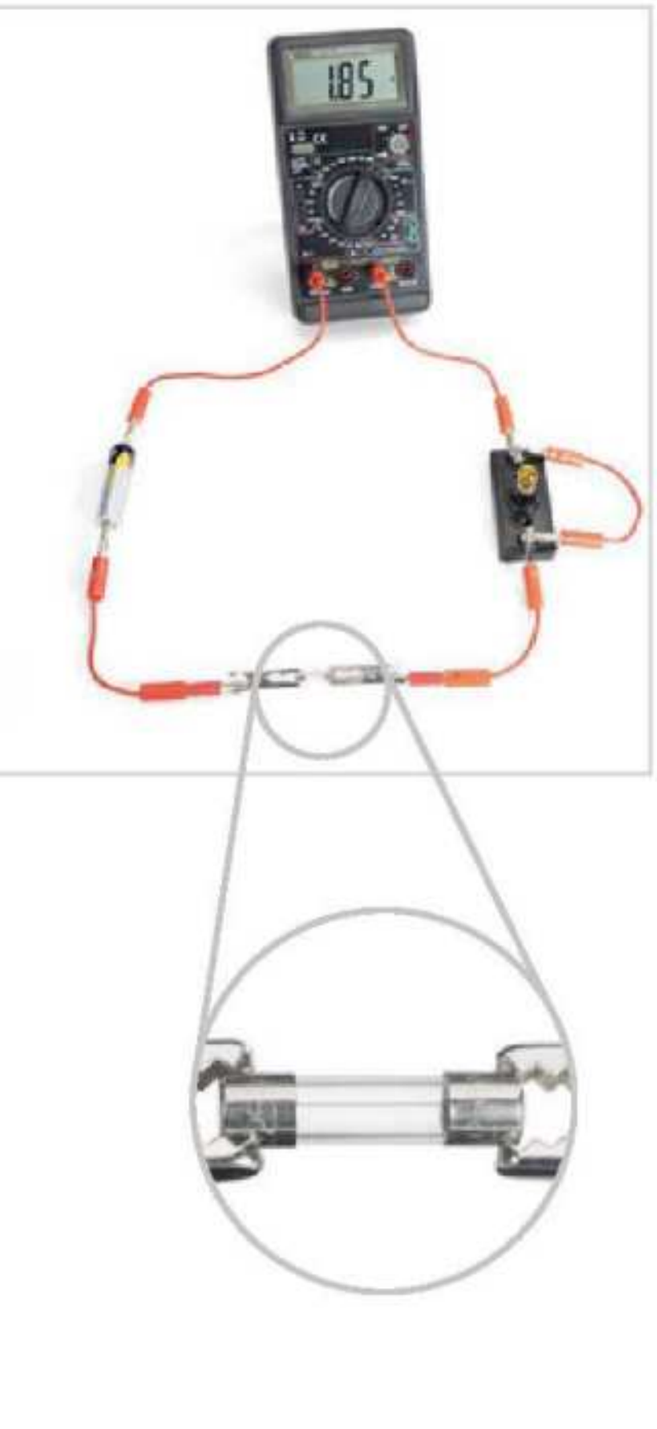
Doświadczenie 34

Uwaga. Doświadczenie wykonajcie w grupie 3, 4 osób.

1. Przygotujcie: bezpiecznik 200 mA, żarówkę 2,2 V, baterię AA (paluszek), amperomierz oraz przewody.
2. Obejrzyjcie dokładnie bezpiecznik pod światło.
3. Zbudujcie układ zgodnie ze schematem na rysunku a).
4. Zapiszcie wskazanie amperomierza. Następnie przełączcie go na najwyższy zakres.



5. Teraz niech jedna osoba obserwuje wskazania amperomierza, druga – wygląd bezpiecznika, a trzecia niech powie „już” i dołączy dodatkowy przewód, tak jak na schemacie na rysunku b), aby spowodować zwarcie końcówek żarówki. Poczekajcie chwilę.
6. Ponownie obejrzyjcie bezpiecznik pod światło. Omówcie swoje obserwacje.



W punkcie 5. doświadczenia dołączyliśmy dodatkowy przewód. Jego opór był niewielki, znacznie mniejszy od oporu żarówki, dlatego przez bezpiecznik zaczął płynąć prąd o dużym natężeniu. Mówimy, że w obwodzie nastąpiło **zwarcie**.

Zgodnie ze wzorem $P = I^2R$, kiedy wzrosło natężenie prądu, wzrosło też ciepło wydzielane w czasie przepływu prądu przez bezpiecznik (R jest tutaj oporem drucika w bezpieczniku).
Drucik rozgrzał się tak bardzo, że się przepalił, a wówczas przestał przewodzić prąd.

> **Bezpiecznik** to urządzenie rozłączające obwód, gdy natężenie prądu przekroczy dopuszczalną wartość.

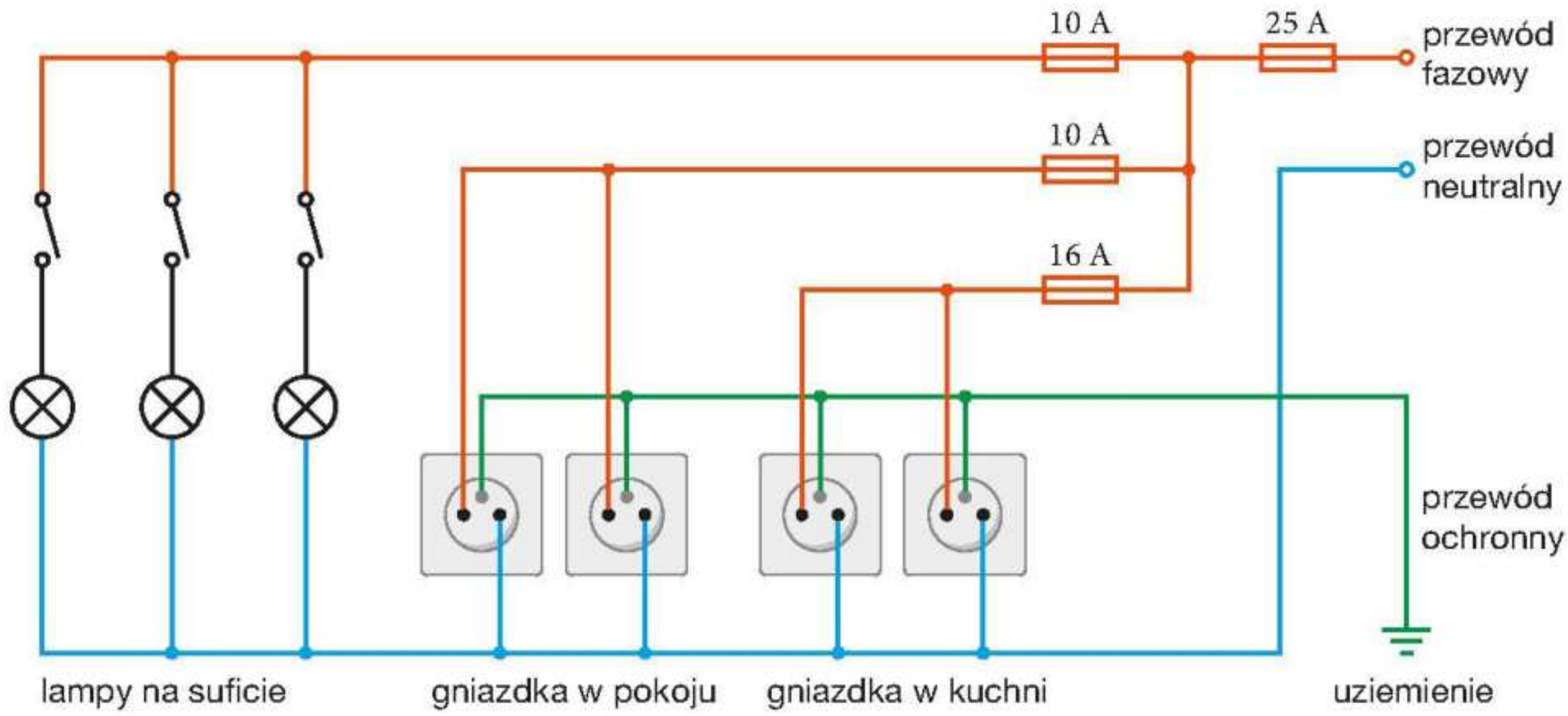
Teraz możemy wyjaśnić, jakie jest zastosowanie bezpieczników w domowej sieci elektrycznej.

Bezpieczniki w sieci domowej

Wszystkie urządzenia w sieci domowej są połączone równolegle. Dzięki temu są zasilane tym samym napięciem, którego wartość skuteczna wynosi 230 V. Natomiast natężenie prądu wpływającego do sieci jest – zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa – równe sumie natężeń prądów płynących przez poszczególne urządzenia.

I prawo Kirchhoffa s. 165

Oznacza to, że jeśli włączymy jednocześnie wiele urządzeń o dużej mocy, przewodami doprowadzającymi prąd do mieszkania popłynie prąd o bardzo dużym natężeniu. Przewody zaczną się rozgrzewać, co może doprowadzić do ich zniszczenia, a co gorsza – do pożaru. Aby zapobiec takiej sytuacji, w sieci domowej stosuje się bezpieczniki. Zabezpieczają one sieć także przed zwarciem instalacji.
Zwykle w sieci domowej główny bezpiecznik (zabezpieczający całą instalację) wyłącza się przy prądzie o natężeniu wynoszącym 25 A, natomiast poszczególne części sieci są zabezpieczone bezpiecznikami 10 A i 16 A.



Rys. **15.17.** Przykład użycia bezpieczników w sieci domowej



Rys. **15.18.** Przeciążenie rozgałęźnika może doprowadzić do pożaru

Przeciążenie rozgałęźnika

Niebezpieczeństwo, przed którym nie mogą nas uchronić projektanci sieci domowej, wiąże się z korzystaniem z rozgałęźników. Kiedy do rozgałęźnika włączymy kilka urządzeń o łącznej mocy 3450 W, będzie do niego wpływał prąd o natężeniu $I = \frac{3450\ \mathrm{W}}{230\ \mathrm{V}} = 15\ \mathrm{A}$. Zatem bezpiecznik 16 A nie rozłączy obwodu.

Jednak może się okazać, że sam rozgałęźnik nie jest dostosowany do tak dużego natężenia. Taka sytuacja zawsze stanowi potencjalną przyczynę pożaru (rys. 15.18).

> Nigdy nie podłączaj kilku urządzeń o dużej mocy do jednego rozgałęźnika.

Dopuszczalne natężenie prądu dla rozgałęźnika jest podane na jego obudowie lub opakowaniu. Najłatwiej jednak zapamiętać, że spośród urządzeń używanych w domu dużą moc mają te, które coś podgrzewają, np. piekarnik, pralka, zmywarka, toster, lub chłodzą, np. lodówka. Każde z takich urządzeń należy włączać do oddzielnego gniazdka.



Rys. **15.19.** Bezpiecznik automatyczny

Bezpieczniki jednorazowe i automatyczne

Dawniej bezpieczniki sieci domowej działały tak samo jak mały bezpiecznik badany przez nas w doświadczeniu 34. Miały one cienki drucik, który się przepalał, kiedy natężenie przekroczyło odpowiednią wartość.

Zasadnicza wada tego rozwiązania to konieczność wymiany bezpiecznika na nowy, co jest kłopotliwe. Dlatego zastąpiono je bezpiecznikami automatycznymi (rys. 15.19) i nowszymi wyłącznikami nadmiarowo-prądowymi (rys. 15.20).

W bezpieczniku automatycznym obwód przerywa blaszka, która wygina się, gdy wraz z natężeniem prądu rośnie temperatura. W wyłącznikach nadmiarowo-prądowych dodatkowo stosuje się elektromagnes, rozłączający obwód, kiedy natężenie prądu przekroczy określoną wartość. Bezpiecznik można z powrotem włączyć, gdy już usuniemy przyczynę jego zadziałania.

Rys. **15.20.** Wyłącznik nadmiarowo-prądowy

Wyłączniki różnicowoprądowe

Gdy ktoś niechcący dotknie przewodu pod napięciem 230 V i przez jego ciało przepłynie do ziemi prąd o natężeniu np. 2 A, dozna porażenia elektrycznego, które może być nawet śmiertelne. Jednak bezpiecznik dostosowany do prądu 10 A albo 16 A nie rozłączy w tej sytuacji obwodu. Dlatego obecnie do zabezpieczenia sieci stosujemy oprócz bezpieczników także wyłączniki różnicowoprądowe.

> Wyłącznik różnicowoprądowy odcina dopływ prądu, jeśli natężenie prądu wpływającego do domowej sieci elektrycznej jest inne niż natężenie prądu z niej wypływającego.

Istnienie takiej różnicy oznacza, że prąd musi wypływać z sieci do ziemi (być może przez ciało użytkownika), ponieważ zgodnie z I prawem Kirchhoffa w obu przewodach dochodzących do domowej sieci powinien płynąć prąd o tym samym natężeniu.



Rys. **15.21.** a) skrzynka rozdzielcza (tablica bezpieczników i wyłączników różnicowoprądowych), b) wyłączniki różnicowoprądowe z bezpiecznikiem

Wyłączniki różnicowoprądowe (rys. 15.21) zwykle umieszcza się w jednej obudowie z bezpiecznikami.

Uziemienie

Ważnym elementem zabezpieczeń sieci domowej jest uziemienie – przewód połączony bezpośrednio z ziemią. Do tego przewodu podłącza się metalową obudowę urządzenia.
Gdyby na skutek uszkodzenia izolacji przewodów obudowa znalazła się pod napięciem, stanowiłaby śmiertelne niebezpieczeństwo dla użytkowników. Dzięki uziemieniu prąd odpływa do ziemi, a bezpieczniki albo wyłączniki różnicowoprądowe odcinają zasilanie.

> Urządzenia wyposażone we wtyczkę z uziemieniem włączaj tylko do gniazdka z uziemieniem.

Obecnie wszystkie gniazdka sieciowe powinny być wyposażone w uziemienie. Wyjątek mogą stanowić stare budynki lub gniazdka samodzielnie wymieniane przez osoby niekompetentne.
Również większość produkowanych współcześnie rozgałęźników jest wyposażona w przewód uziemienia. Jeśli masz rozgałęźnik bez takiego przewodu, to używaj go tylko do urządzeń z wtyczką bez uziemienia.
W niektórych starszych budynkach nie ma odrębnego przewodu uziemienia. Wówczas bolec uziemienia w gniazdku jest połączony z przewodem zerowym. Takie rozwiązanie jest bezpieczniejsze niż całkowity brak uziemienia, ale gorsze niż odrębny przewód (patrz zad. 3.). Warto więc zadbać o zainstalowanie uziemienia przy najbliższym większym remoncie budynku.



Rys. 15.22. Przewód zasilający z płaską wtyczką

Na ogół urządzenia niewymagające uziemienia są zaopatrzone w przewód zasilający z płaską wtyczką (rys. 15.22), dzięki czemu można je podłączać także do gniazdka z bolcem.

Pierwsza pomoc w przypadku porażenia elektrycznego

Mimo wszelkich zabezpieczeń sieci domowej porażenia elektryczne prądem z sieci domowej się zdarzają.

Skutki porażenia zależą przede wszystkim od tego, czy prąd przepłynął przez narządy wewnętrzne oraz czy ciało poszkodowanego było połączone z ziemią przewodnikiem o małym oporze. Szczególnie niebezpieczne są porażenia w kuchni i w łazience, gdy poszkodowany dotyka rur wodociągowych prowadzących do ziemi.

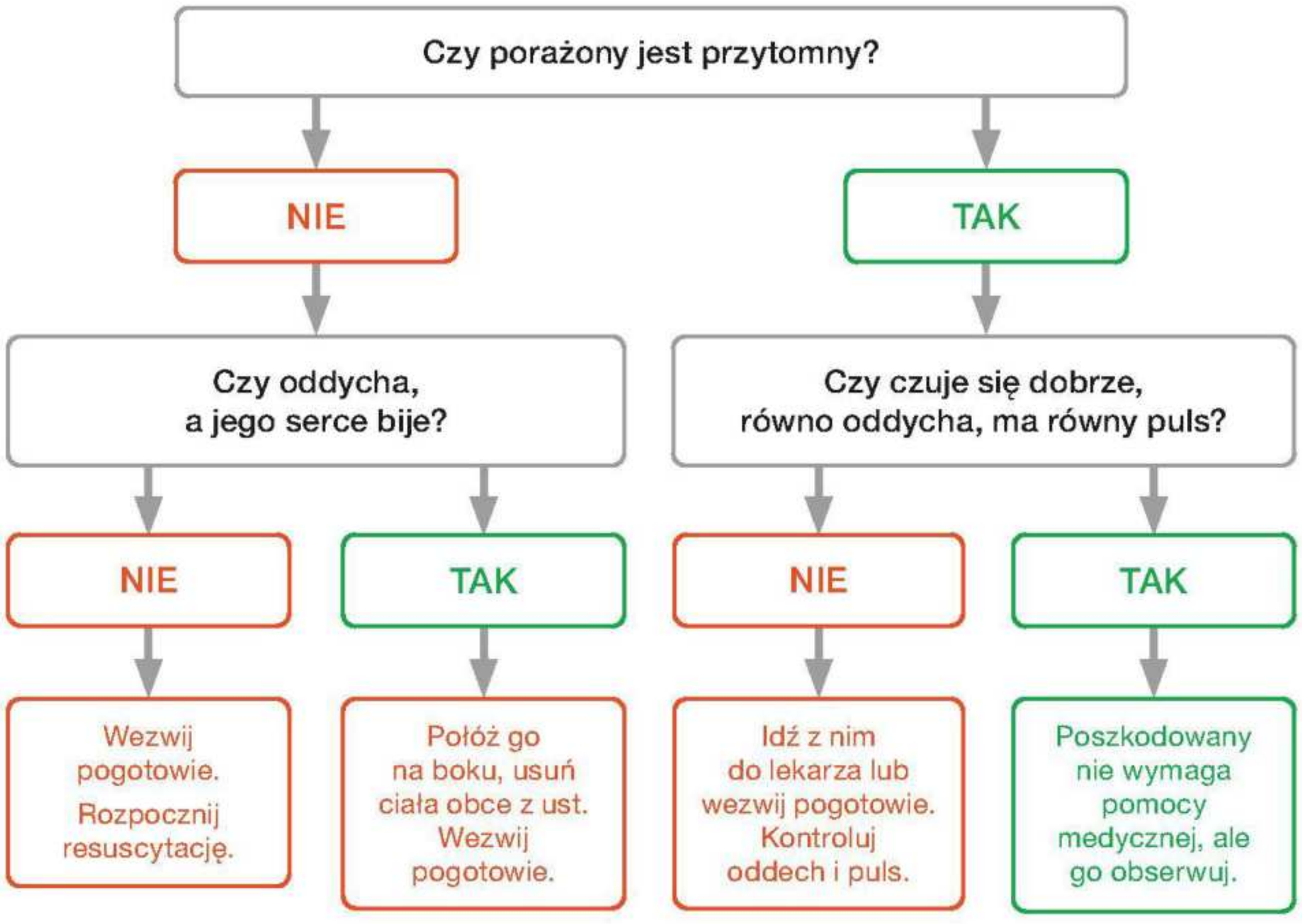
Prąd płynący przez serce może zatrzymać jego pracę.

Z tego samego powodu nie wolno używać urządzeń elektrycznych w czasie kąpieli ani przechowywać ich nad wanną, gdy są włączone (gdyż mogą do niej spaść).

Zapamiętaj zasady postępowania – w razie wypadku nie będzie czasu na szukanie podręcznika!

Zachowaj spokój, ale nie trać czasu

Odłącz napięcie albo za pomocą izolatora odsuń poszkodowanego od źródła napięcia. Nie dotykaj rękoma poszkodowanego, dopóki ma on kontakt ze źródłem napięcia.



Po tej lekcji powinieneś

- rozumieć, jak działają poszczególne zabezpieczenia domowej sieci elektrycznej: uziemienie, bezpieczniki, wyłączniki różnicowoprądowe;
- wiedzieć, jak bezpiecznie korzystać z sieci elektrycznej i jak udzielić pierwszej pomocy osobie po porażeniu elektrycznym.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Część sieci elektrycznej obejmująca gniazdka w kuchni jest zabezpieczona bezpiecznikiem 16 A. Wykonaj odpowiednie obliczenia i odpowiedz, czy bezpiecznik odetnie dopływ prądu, gdy jednocześnie włączymy:

a) toster o mocy 1000 W i czajnik o mocy 2100 W,

b) czajnik o mocy 2100 W i piekarnik o mocy 1900 W.

2. Jeden z bezpieczników samochodowych przepala się w chwili, gdy natężenie prądu płynącego przez niego wyniesie 2 A. Oblicz maksymalną moc urządzenia, które można chronić za pomocą tego bezpiecznika. Napięcie w sieci samochodowej wynosi 12 V.

3. W starym budynku bolce uziemienia są połączone z przewodem neutralnym. W czasie budowy domu nie znano jeszcze wyłączników różnicowoprądowych, ale obecny właściciel zdecydował się je zainstalować. Zastanów się, czy te wyłączniki odłączą zasilanie w opisanych sytuacjach. Czy w którejś z tych sytuacji zadziałałyby bezpieczniki?

a) Na skutek awarii obudowa pralki znalazła się pod napięciem.

b) Nieostrożna osoba dotknęła przewodu pod napięciem.

4. Wyjaśnij, kiedy porażenie elektryczne jest groźniejsze: gdy prąd przepłynął pomiędzy stopą a kolanem poszkodowanego czy gdy przepłynął między jedną a drugą dłonią. Dlaczego?

5. Bateria AA o napięciu 1,5 V ma pojemność ok. 3 Ah. Jej cena wynosi 2,70 zł. Oblicz, ile razy energia elektryczna z tej baterii jest droższa niż energia z sieci domowej, kosztująca 80 gr za 1 kWh.

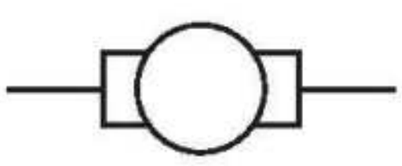
15.5. Silniki elektryczne i prądnice

Przypomnij sobie

- Na przewodnik z prądem znajdujący się w polu magnetycznym działa siła magnetyczna, zwana także siłą elektrodynamiczną.
- Silnik elektryczny działa dzięki sile elektrodynamicznej.
- W ramce z przewodnika obracającej się w polu magnetycznym indukuje się siła elektromotoryczna.

Ze szkoły podstawowej znasz zasadę działania silnika elektrycznego prądu stałego (przypominamy ją poniżej), a z poprzednich lekcji – zasadę działania prądnicy prądu przemiennego. W technice stosujemy wiele różnych rodzajów silników i prądnic. W tej lekcji omówimy zasadę działania kilku najczęściej stosowanych.

Silnik elektryczny prądu stałego



Rys. **15.23.** Symbol silnika elektrycznego

Przypomnijmy najpierw zasadę działania silnika prądu stałego, tzw. silnika komutatorowego. W tym celu przeanalizujmy siły działające na pojedynczą ramkę z prądem umieszczoną w polu magnetycznym (rys. 15.24 na następnej stronie).

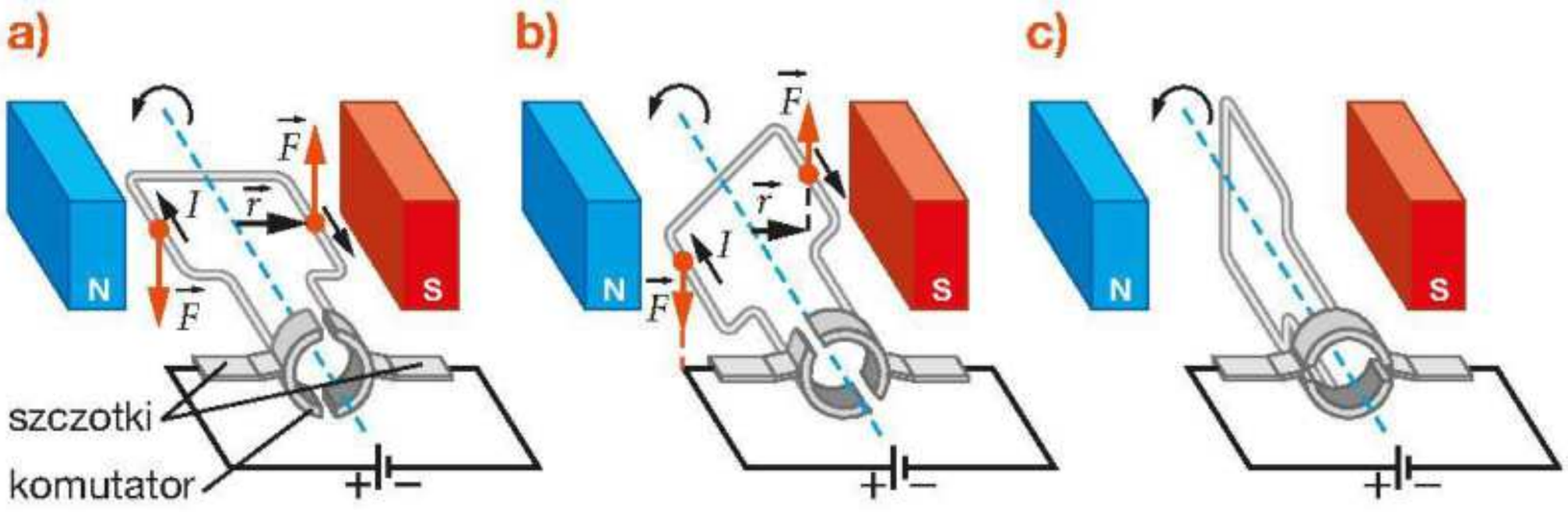
Prąd do niej jest doprowadzony przez styki, zwane **szczotkami**, dotykające walca, zwanego **komutatorem**, który obraca się razem z ramką. Komutator jest podzielony na dwie części, przewodzące prąd (rys. 15.24a). Jak widzisz, na przeciwległe przewody ramki, w których prąd płynie w przeciwne strony, działają przeciwnie skierowane siły elektrodynamiczne. Jednak momenty obu sił działają w tę samą stronę względem osi ramki, więc powodują jej obrót (na rysunku – przeciwnie do ruchu wskazówek zegara).

Moment siły, cz. I s. 245

Gdy ramka znajduje się w położeniu przedstawionym na rysunku 15.24b, wartości sił działających na przewody są takie same, ale ich momenty – mniejsze, gdyż wzrósł kąt między wektorem siły a jej ramieniem. Ciągle jednak łączny moment siły powoduje obrót.

W położeniu przedstawionym na rysunku 15.24c siły powodowałyby już nie obrót ramki, ale jej rozciąganie. Dlatego w takiej pozycji prąd nie jest doprowadzany do ramki. Jednak ze względu na swoją bezwładność ramka przechodzi przez to położenie i obraca się dalej. Po chwili znowu zaczyna płynąć prąd i działają na nią siły powodujące obrót.

Zauważ, że każda ze szczotek przeskakuje w tym momencie na drugą połowę komutatora. Dzięki temu, choć ramka się odwróciła, moment siły działa nadal w tę samą stronę.



Rys. **15.24.** Pojedyncza ramka to najprostszy model silnika elektrycznego

Gdyby silnik miał tylko jedną ramkę, moment siły byłby tak mały, że silnik nie mógłby wykonywać użytecznej pracy, a być może nie pokonałby nawet oporu własnego ruchu i w ogóle nie zaczął się obracać. Dlatego w silniku przewód tworzący ramkę jest nawinięty tysiące razy. Aby moment siły był w przybliżeniu stały, zwoje nie tworzą jednej dużej zwojnicy, ale wiele mniejszych, które są ustawione pod różnymi kątami. Komutator również składa się z wielu segmentów, które pozwalają włączać prąd tylko do tych ramek, które w danej chwili są ustawione jak na rysunku 15.24a, czyli znajdują się w pozycji, w której działa na nie największy moment siły.

Silnik uniwersalny

Aby zwiększyć moc silnika elektrycznego bez zwiększania natężenia prądu płynącego przez zwoje wirującej części (zwanej **wirnikiem**, rys. 15.25), możemy wzmocnić pole magnetyczne przez zamianę magnesu trwałego na elektromagnes.

Takie silniki prądu stałego stosujemy powszechnie w samochodach do napędzania wycieraczek, nawiewu czy rozrusznika. Silniki o tej konstrukcji znajdziemy również w starszych (ale ciągle stosowanych) typach lokomotyw elektrycznych i tramwajów.

Zamiana magnesu trwałego na elektromagnes ma jeszcze jedną konsekwencję. Silnik prądu stałego z magnesem trwałym w przypadku zmiany biegunowości napięcia zasilającego będzie obracać się w przeciwną stronę. Jeśli jednak magnes zastąpimy elektromagnesem, to po zmianie biegunowości zmieni się na przeciwny zarówno kierunek prądu w uzwojeniach, jak i zwrot wektora indukcji magnetycznej, a w rezultacie siła elektrodynamiczna będzie działać w tę samą stronę co przed zmianą. Skoro jednak silnik obraca się w tę samą stronę niezależnie od biegunowości przyłożonego napięcia, to możemy go równie dobrze podłączyć do napięcia przemiennego. Dlatego też silniki prądu stałego z elektromagnesem nazywa się **silnikami uniwersalnymi** (rys. 15.26). Takie silniki stosujemy często w urządzeniach gospodarstwa domowego, np. w pralkach czy zmywarkach.



Rys. **15.25.** Wirnik silnika elektrycznego



Rys. **15.26.** Silniki uniwersalne były stosowane m.in. w tramwajach

Silnik indukcyjny

Opisany wcześniej silnik komutatorowy jest dość prosty w budowie. Łatwo zmienić kierunek jego obrotu w przypadku prądu stałego: wystarczy zmiana polaryzacji (plus i minus) napięcia zasilającego. Z kolei zmiana wartości tego napięcia pozwala regulować wartość siły elektrodynamicznej, a przez to – prędkość obrotów i moc silnika.

Niestety, w przypadku silników o dużej mocy dają o sobie znać wady opisanego rozwiązania, a konkretnie – sposobu dostarczania prądu do ruchomych części za pomocą komutatora. Przeskakiwanie szczotek pomiędzy jego segmentami jest przyczyną iskrzenia, a w konsekwencji zużywania się tych elementów.

Dlatego w większych urządzeniach – takich jak duże maszyny, nowoczesne elektrowozy i tramwaje, a nawet samochody elektryczne i hybrydowe – stosuje się **silniki indukcyjne prądu przemiennego**.

W przypadku pojazdów szynowych zasilanych z sieci prądu stałego i samochodów zasilanych prądem stałym z akumulatora taki silnik okazuje się korzystniejszy mimo konieczności zamiany prądu stałego na przemienny.

W silniku indukcyjnym końce przewodów uzwojenia wirnika są połączone nie ze źródłem napięcia, ale ze sobą nawzajem. Uzwojenie tworzy więc zamkniętą pętlę. Prąd powstaje w niej dzięki indukcji, gdy wirnik znajdzie się w zmiennym polu magnetycznym. Rzecz jasna, taki silnik musi wykorzystywać elektromagnes zasilany napięciem przemiennym, a nie magnes trwały.

Silniki dużej mocy zasilane są zwykle prądem trójfazowym (patrz ramka s. 294).

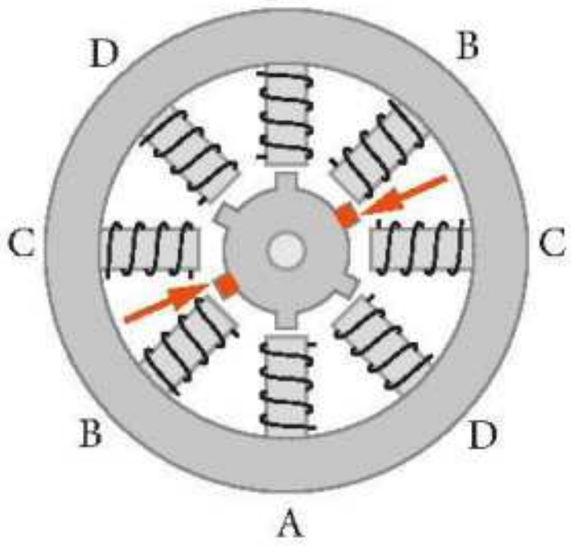
Silniki do urządzeń precyzyjnych

Silniki w napędach dysków optycznych i twardych dysków komputerowych nie mają dużej mocy, ale powinny być trwałe i precyzyjne. Stosuje się kilka typów takich urządzeń. Oto dwa przykłady.

Jednym ze sposobów pozbycia się komutatora – a tym samym zwiększenia trwałości urządzenia – jest zamiana miejscami magnesu trwałego i uzwojenia w zwykłym silniku. Przy zastosowaniu takiego rozwiązania na wirniku silnika znajduje się magnes trwały, a wokół niego – uzwojenie, stanowiące elektromagnes.

Inny typ silnika to **silnik krokowy**. Jest on sterowany impulsami, a nie ciągłym prądem. Jeden impuls sprawia, że silnik obraca się zawsze o ten sam kąt. Pozwala to na bardzo precyzyjne sterowanie urządzeniem. Takie rozwiązanie sprawdza się m.in. w napędach twardych dysków komputerowych.

Wirnik silnika krokowego nie ma uzwojenia ani nie jest magnesem – to stalowa tarcza z zębami. Wokół niej umieszcza się elektromagnesy, których liczba jest większa niż liczba zębów. Na rysunku 15.27 przedstawiono moment pracy wirnika, gdy włączone są elektromagnesy A.

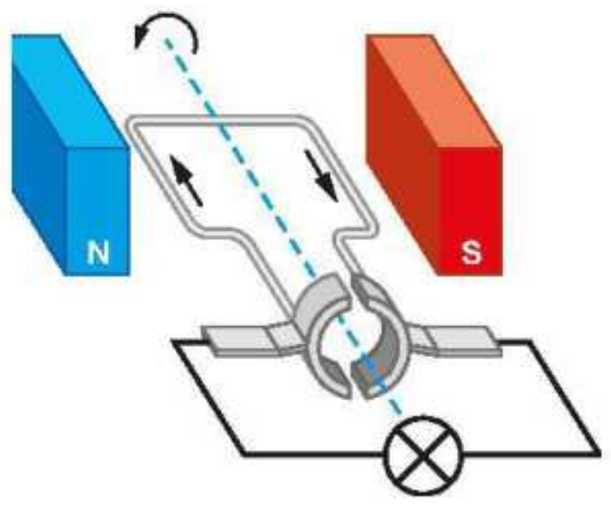


Rys. 15.27. Schemat silnika krokowego

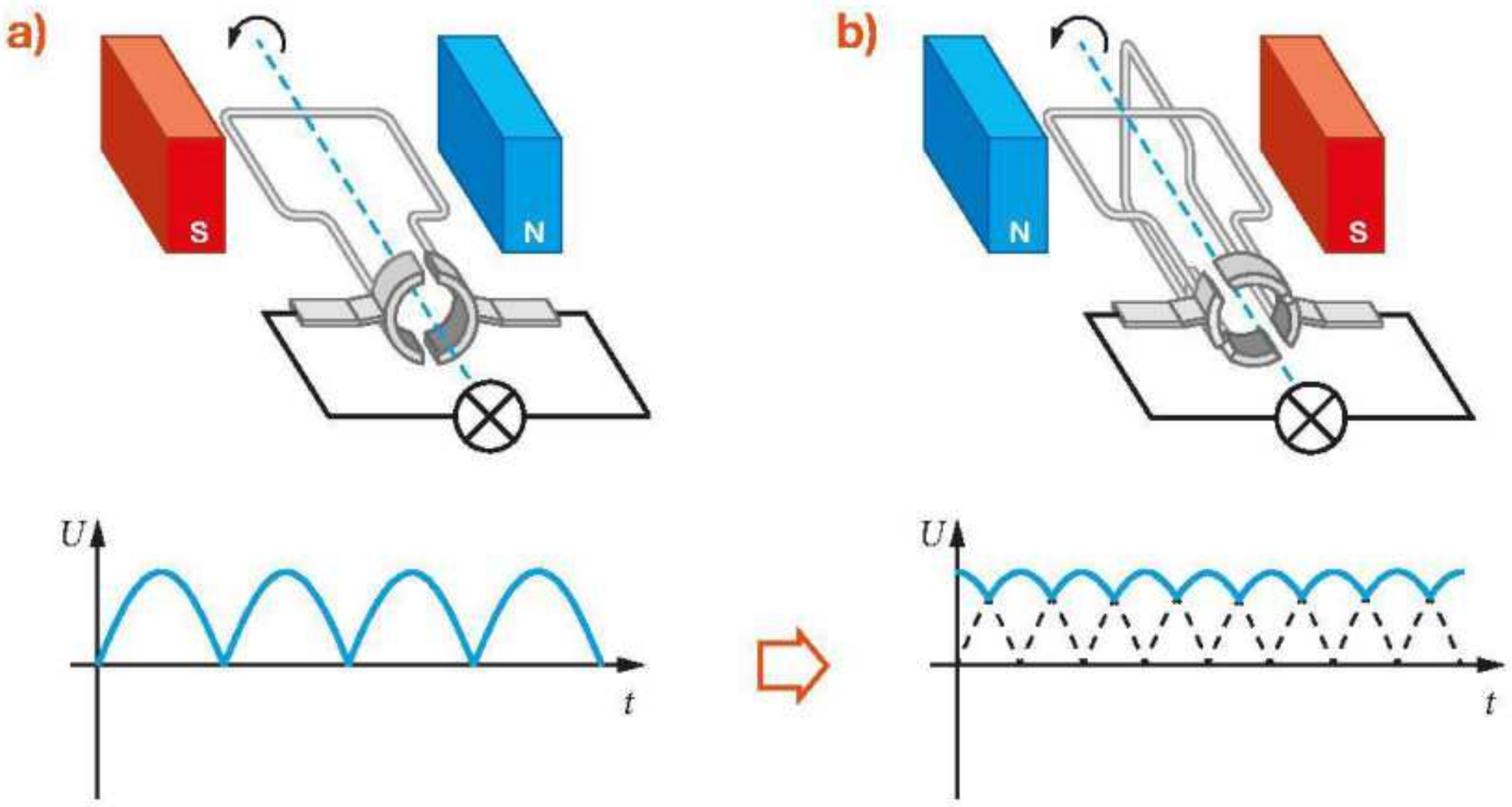
Jeśli elektroniczny układ sterujący silnikiem je wyłączy, a włączy elektromagnesy B, to największa siła przyciągania będzie działać na zęby wskazane czerwonymi strzałkami i wirnik obróci się w lewo.

Prądnica prądu stałego

Wróćmy do schematu działania najprostszego silnika elektrycznego (rys. 15.28). Załóżmy, że zamiast źródła napięcia podłączamy żarówkę i zaczynamy obracać ramką. Ponieważ liczba linii pola magnetycznego przechodzących przez ramkę się zmienia, w ramce indukuje się SEM. Zwróć uwagę, że obecność komutatora powoduje przepływ prądu w obwodzie podłączonym do szczotek zawsze w tę samą stronę (rys. 15.29a). Jak powiedzieliśmy, rzeczywisty silnik nie jest pojedynczą ramką, ale ma wiele uzwojeń ustawionych pod różnymi kątami. To sprawia, że napięcie indukuje się przez cały czas obrotu, a jego przebieg w czasie jest zbliżony do napięcia wytworzonego przez ogniwo (rys. 15.29b).
Wynika z tego, że silnik elektryczny może działać jako prądnica – nawet nie trzeba nic w nim zmieniać.



Rys. **15.28.** Silnik może działać jak prądnica



Rys. **15.29.** Prądnica prądu stałego z komutatorem 2-segmentowym (a) i 4-segmentowym (b)

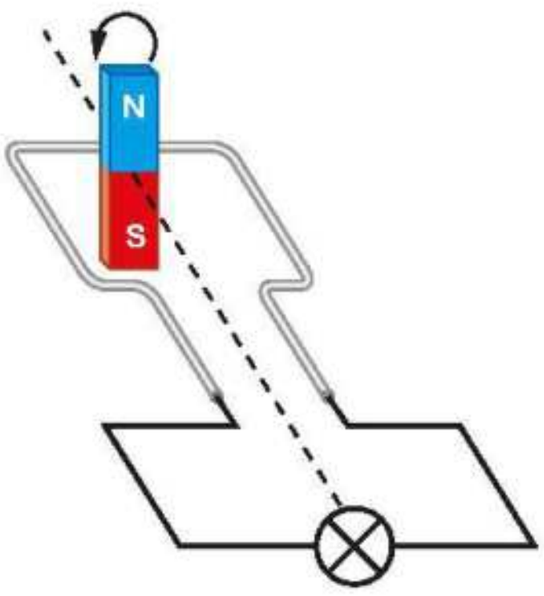
Fakt, że to samo urządzenie może działać zarówno jako silnik, jak i jako prądnica, jest bardzo korzystny. W samochodach elektrycznych lub hybrydowych podczas hamowania silnik działa jako prądnica i doładowuje akumulatory. W przypadku tramwajów i elektrowozów energia jest w tym momencie oddawana do sieci.
Opisane zastosowania indukcji magnetycznej potwierdzają, jak ważne było jej odkrycie. Bez niego nie moglibyśmy przecież tak powszechnie korzystać z energii elektrycznej, bez której w dzisiejszych czasach trudno sobie wyobrazić życie.

To podobnie jak z mikrofonem i głośnikiem.



A to ciekawe

W niektórych typach samochodów, np. w pierwszych wersjach Polskiego Fiata 126p, instalowano prądnice prądu stałego. Z tego powodu właściciele niektórych maluchów mieli kłopot, gdy wprowadzono obowiązek jazdy z włączonymi światłami również w dzień – prądnica nie nadążała z dostarczaniem energii i akumulator się rozładowywał. Problem ten nie występował w samochodach z prądnicą prądu przemiennego, która jest wydajniejszym źródłem energii.



Rys. 15.30. Prądnica prądu przemiennego

Prądnica prądu przemiennego

Stwierdziliśmy już, że ramka obracająca się w polu magnetycznym magnesu znajdującego się na zewnątrz tej ramki to najprostsza prądnica prądu przemiennego. Powiedzieliśmy też, że aby silnik działał bez zastrzeżeń, potrzeba wielu ramek.

W praktyce jednak stosujemy inne rozwiązanie. Złożone z wielu ramek uzwojenie, w którym indukuje się prąd, znajduje się na zewnątrz, a wewnątrz niego obraca się magnes (rys. 15.30). W przypadku małych prądnic, takich jak dynamo rowerowe, jest to magnes trwały, natomiast w dużych prądnicach – elektromagnes.

Prądnica i przemiany energii

Jeśli z prądnicy pobieramy prąd o większym natężeniu, to dostarcza ona nam więcej energii elektrycznej. Oznacza to, że przy większym natężeniu prądu czerpanego z prądnicy musimy wykonywać większą pracę, aby obracać jej wirnikiem. Takie wyjaśnienie, odwołujące się do zasady zachowania energii, nie wyjaśnia jednak mechanizmu zjawiska. Jaką konkretnie siłę musimy dodatkowo pokonywać?

Aby to wyjaśnić, odwołajmy się do reguły Lenza. Prąd indukujący się w prądnicy sam wytwarza pole magnetyczne, i to takie, które przeciwdziała wywołującej go zmianie. Zatem na obracający się wirnik prądnicy działa moment sił hamujących jego ruch.

Przez uzwojenia prądnicy płynie prąd o takim samym natężeniu jak przez zasilane przez nią urządzenie. Tak więc im większy prąd czerpiemy z prądnicy, tym silniejsze pole wytwarza prąd w jej uzwojeniach, a więc tym większy jest moment sił hamujących ruch wirnika.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać budowę i działanie silników elektrycznych oraz wymieniać ich zastosowania;
- opisywać budowę, działanie i wymieniać zastosowania prądnic;
- wyjaśniać, jakie zjawisko fizyczne stanowi podstawę działania prądnicy, a jakie – silnika.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

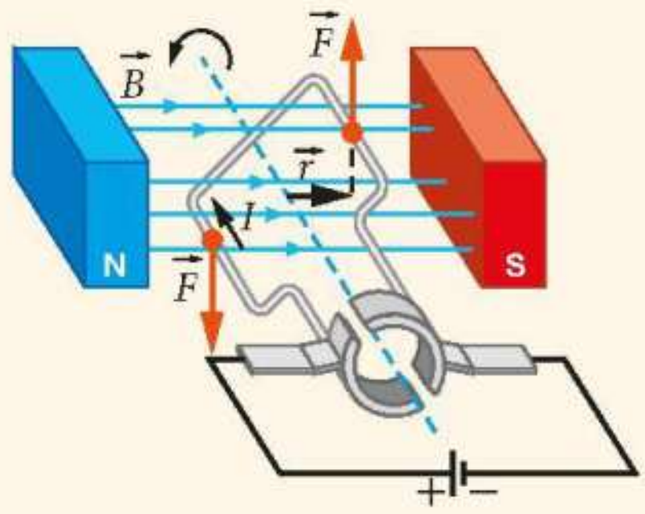
Ramka najprostszego modelu silnika elektrycznego jest wykonana z drutu i ma kształt kwadratu o boku $l = 5$ cm. Przez ramkę płynie prąd $I = 1{,}5$ A, a magnes wytwarza jednorodne pole magnetyczne o indukcji $B = 0{,}05$ T. Oblicz łączny moment sił elektrodynamicznych działających na ramkę względem jej osi obrotu, gdy znajduje się ona w płaszczyźnie nachylonej do linii pola pod kątem $\alpha = 45°$.

Rozwiązanie

Aby obliczyć moment siły, trzeba znać jej wartość oraz ramię (patrz cz. I s. 245). W naszym przypadku siły elektrodynamiczne działają zarówno na odcinki ramki prostopadłe do linii pola, jak i na odcinki leżące skośnie do linii pola.

W przypadku każdego z odcinków skośnych do linii pola siły działają wzdłuż osi obrotu, a więc mają względem niej zerowy moment siły, czyli nie powodują obrotu.

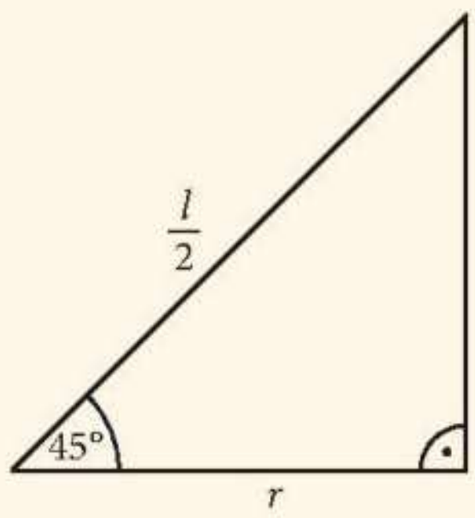
Momenty sił działających na odcinki prostopadłe do linii pola są równe i jednakowo skierowane wzdłuż osi obrotu ramki. Wartość każdego z nich wynosi:



$$M = Fr$$

gdzie $F = BIl$ jest siłą elektrodynamiczną, a r jest jej ramieniem. Zgodnie z zamieszczonym obok rysunkiem:

$$r = \frac{l}{2\sqrt{2}} = \frac{l\sqrt{2}}{4}$$



Tak więc:

$$M = BIl\frac{l\sqrt{2}}{4} = \frac{\sqrt{2}BIl^2}{4}$$

W takim razie całkowity moment sił wynosi:

$$M_c = 2M = 2\frac{\sqrt{2}BIl^2}{4}$$

$$M_c = \frac{\sqrt{2}}{2}BIl^2$$

Po podstawieniu danych liczbowych (z uwzględnieniem zamiany jednostki długości na metry) otrzymujemy:

$$M_c \approx 1{,}32 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{N \cdot m}$$

Przeliczmy jeszcze jednostkę, żeby się upewnić, że nie popełniliśmy błędu:

$$\mathrm{T \cdot A \cdot m^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} \cdot \mathrm{A \cdot m^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}} \cdot \mathrm{A \cdot m^2} = \mathrm{N \cdot m}$$

Odpowiedź: Całkowity moment sił w opisanym przypadku wynosi ok. $1{,}32 \cdot 10^{-4}$ N · m.

Zadania s. 308

Pytania i zadania

1. Omów podobieństwa i różnice między:

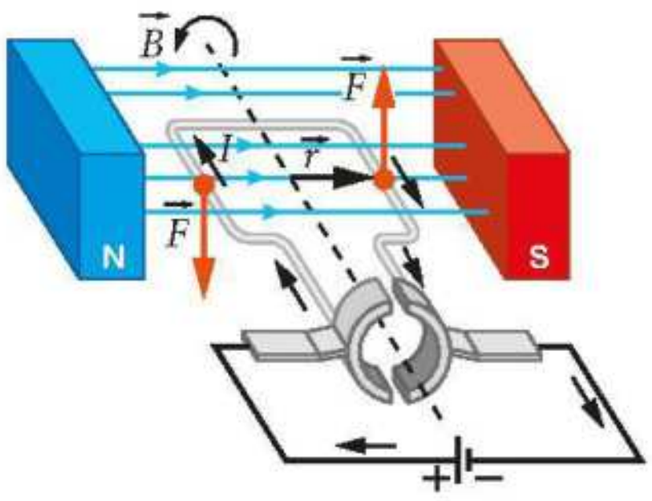
a) silnikiem elektrycznym a głośnikiem,

b) prądnicą a mikrofonem,

c) prądnicą a silnikiem elektrycznym,

d) mikrofonem a głośnikiem.

2. Ramka modelu najprostszego silnika elektrycznego (patrz rysunek) ma kształt kwadratu o boku 2 cm. Magnes silnika wytwarza jednorodne pole magnetyczne o indukcji 0,1 T. Gdy ramka znajduje się w płaszczyźnie równoległej do linii pola, łączny moment sił elektrodynamicznych działających na ramkę względem jej osi obrotu wynosi 10^{-4} N m. Oblicz natężenie prądu płynącego przez ramkę.



3. Oblicz, o jaki kąt obróci się wirnik silnika krokowego przedstawionego na rysunku 15.27 (s. 304), gdy układ sterujący przełączy zasilanie z elektromagnesów A do elektromagnesów B.

4. Zbuduj działający model silnika elektrycznego zasilanego jednym lub kilkoma ogniwami.

Wskazówka. Możesz skorzystać z projektów zamieszczonych w internecie, np. w serwisie YouTube. Przydatne wyrażenia to: *DC motor* (*direct current motor*) – silnik prądu stałego, *DIY* (*do it yourself*) – zrób to sam, *homemade* – domowej roboty, *lab* (*laboratory*) – laboratorium, ale także prosty eksperyment.

5. Źródłem niskiego napięcia przemiennego jest prądnica rowerowa (dynamo). Zbadaj to źródło.

a) Jeśli dynamo jest zamontowane na rowerze, postaw rower do góry kołami, aby można było wygodnie napędzać dynamo, kręcąc kołem roweru. Jeśli nie jest zamontowane, wtedy na kółko dynama, które podczas jazdy dotyka koła rowerowego, nawiń metr grubej nici. W ten sposób możesz obracać tym kółkiem, ciągnąc za nić.

b) Do końcówek dynama podłącz woltomierz ustawiony na najczulszy zakres napięcia stałego. Jeśli jest tylko jedna końcówka, drugą stanowi obudowa (patrz zdjęcie).

c) Obracaj powoli kółkiem dynama – jeden obrót powinien przypadać na około 2 s. Obserwuj wskazania woltomierza. Co zauważasz?



15.6. Indukcja wzajemna i samoindukcja

Przypomnij sobie

- Zwojnica (cewka), przez którą płynie prąd, wytwarza pole magnetyczne.
- Rdzeń ferromagnetyczny, na który jest nawinięta zwojnica, pozwala uzyskać znacznie silniejsze pole magnetyczne.
- Zmiany pola magnetycznego powodują indukowanie się SEM w zwojnicy.



Rys. **15.31.** Akumulator szczoteczki jest ładowany bezprzewodowo dzięki indukcji elektromagnetycznej

Indukcja wzajemna

Wspominaliśmy już, że zmianę strumienia indukcji magnetycznej można uzyskać nie tylko dzięki ruchowi magnesu lub zwojnicy, lecz także dzięki zmianie napięcia zasilającego zwojnicę. Mówimy wówczas o zjawisku **indukcji wzajemnej**. W tej lekcji zbadamy to zjawisko dokładniej. Opiszemy także jego zastosowania.

Doświadczenie 35 – obowiązkowe

Demonstrowanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej i jego związku ze zmianą natężenia prądu w elektromagnesie

1. Przygotuj cewkę podłączaną do sieci 230 V nakładaną na stalowy rdzeń w kształcie ramki oraz woltomierz i przewód w izolacji o długości 1–2 m.

   Uwaga. Wykorzystaj zwojnicę podłączaną do sieci za pomocą kabla z wtyczką. Nie wolno podłączać do sieci nieizolowanych przewodów.
2. Na rdzeń nawiń 10 zwojów przewodu i podłącz jego końce do woltomierza. Pamiętaj o nastawieniu miernika na pomiar napięcia przemiennego (AC voltage). Podłącz cewkę do sieci 230 V. Odczytaj wskazanie woltomierza.
3. Nawiń na rdzeń jeszcze 10 zwojów przewodu i powtórz pomiar napięcia.
4. Powtórz kilkakrotnie czynności opisane w punkcie 3.
5. Sporządź wykres zależności napięcia wskazywanego przez woltomierz od liczby zwojów. Pamiętaj o niepewnościach pomiarowych. Co zauważasz?



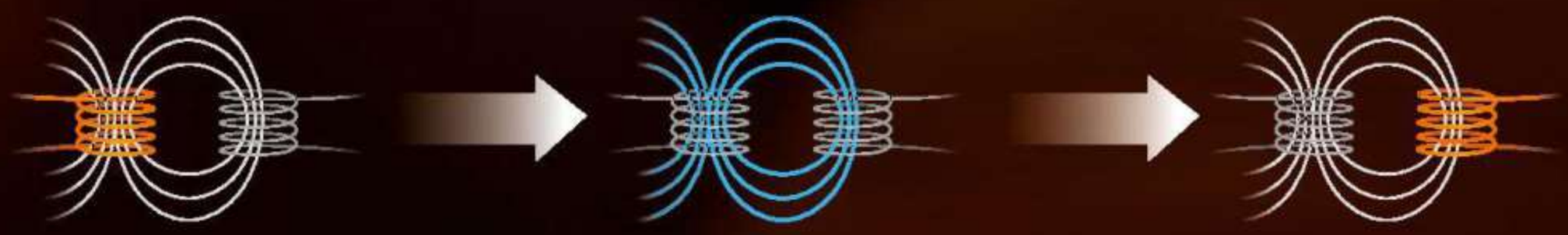
Z doświadczenia wynika, że napięcie wskazywane przez woltomierz zmienia się wprost proporcjonalnie do liczby zwojów przewodu, do którego przyrząd jest podłączony. W doświadczeniu użyliśmy dwóch cewek (zwojnic). Jedna z nich – podłączona do sieci – wytwarzała pole magnetyczne, czyli działała jako elektromagnes. Drugą cewkę stanowiły nawinięte przez ciebie zwoje przewodu. Zachodziło w niej zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Gdy zmieniał się prąd płynący przez pierwszą cewkę, zmieniało się również wytwarzane przez nią pole magnetyczne. Z kolei ta zmiana powodowała indukowanie się SEM w drugiej cewce. W naszym doświadczeniu zbudowaliśmy prosty model **transformatora**. Więcej o tym urządzeniu przeczytasz na następnej stronie.

Zakładamy, że napięcie na uzwojeniu wtórnym jest równe SEM indukcji w tym uzwojeniu (pomijamy więc jego opór, gdyż jest znacznie mniejszy od oporu woltomierza lub urządzenia podłączonego do transformatora).

Transformator

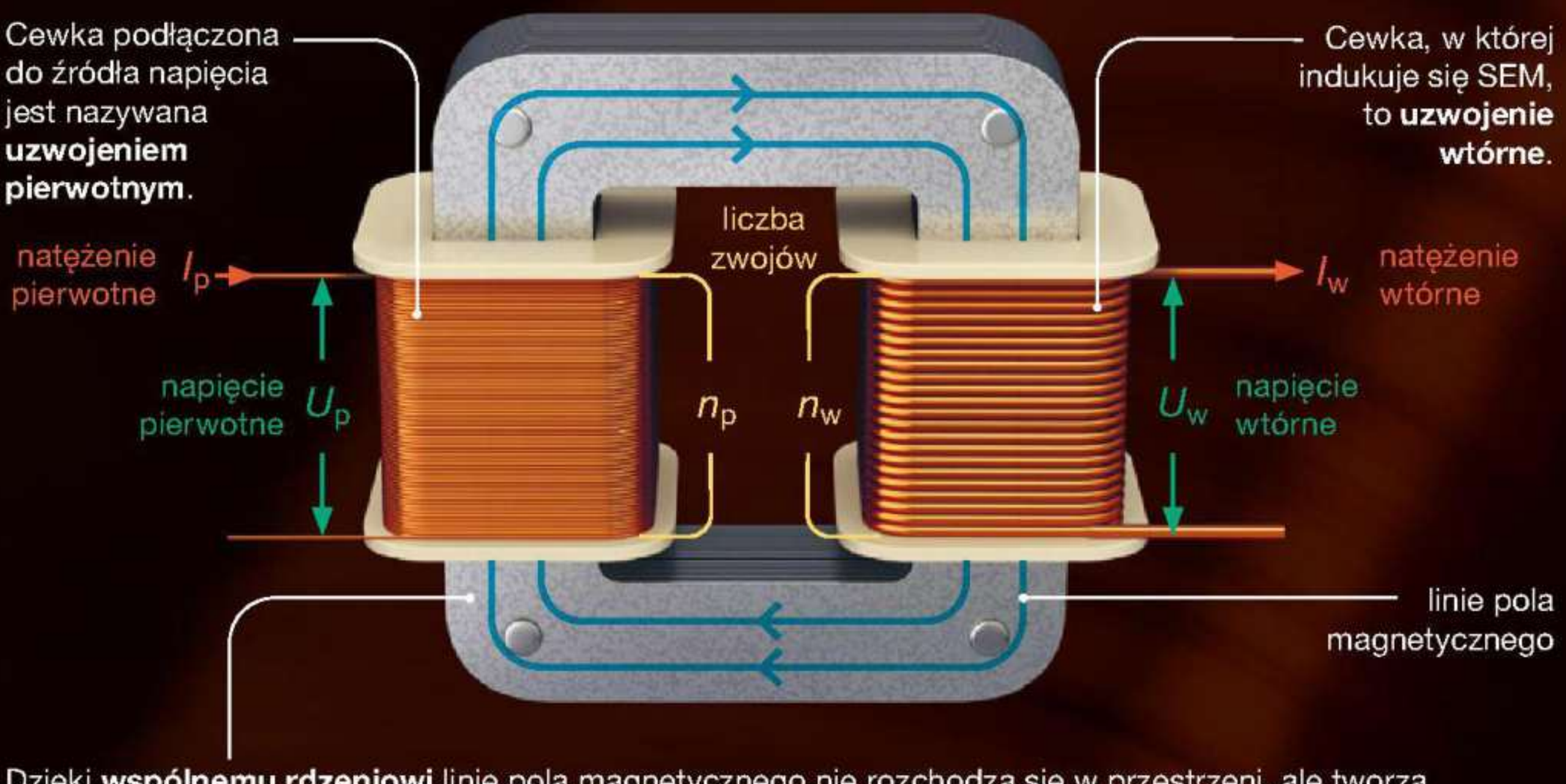
Transformator zmienia energię elektryczną pierwszego obwodu na energię pola magnetycznego, a następnie – energię pola magnetycznego znowu na energię elektryczną w drugim obwodzie.

Zjawiska zachodzące w transformatorze można przedstawić na schemacie:



zmiana natężenia prądu w pierwszej cewce → zmiana strumienia pola magnetycznego wytwarzanego przez pierwszą cewkę → indukowanie się SEM w drugiej cewce

Transformator jest zbudowany z dwóch cewek nawiniętych na wspólny rdzeń.



Dzięki **wspólnemu rdzeniowi** linie pola magnetycznego nie rozchodzą się w przestrzeni, ale tworzą zamknięte pętle. Cały strumień pola wytwarzanego przez pierwszą cewkę biegnie przez drugą cewkę.

Jeśli cewki uzwojenia pierwotnego i wtórnego mają różną liczbę zwojów, to napięcie na uzwojeniu wtórnym jest inne niż napięcie na uzwojeniu pierwotnym. Również natężenia prądów płynących w pierwszym i drugim uzwojeniu są różne. Zależność tę opisuje **równanie transformatora**.

więcej zwojów n_p	$\frac{n_p}{n_w} = \frac{U_p}{U_w} = \frac{I_w}{I_p}$	mniej zwojów n_w
wyższe napięcie U_p		niższe napięcie U_w
mniejsze natężenie I_p		większe natężenie I_w

Uzasadnienie równania transformatora

W niektórych typach telefonów komórkowych po odłączeniu aparatu od ładowarki wyświetla się komunikat: „Odłącz ładowarkę od gniazdka sieciowego, aby ograniczyć zużycie energii". Czy jest to słuszne stwierdzenie? Sprawdźmy to.

Doświadczenie 36

1. Przygotuj ładowarkę do telefonu, telefon komórkowy i watomierz.

   Uwaga. Przyrząd przedstawiony na zdjęciu, zwany w handlu watomierzem cyfrowym, pozwala mierzyć nie tylko moc urządzeń elektrycznych, lecz także natężenie prądu i napięcie sieciowe.

   Jego użycie jest znacznie bezpieczniejsze niż stosowanie zwykłego miernika, gdyż nie mamy do czynienia z nieizolowanymi przewodami pod napięciem sieciowym.
2. Włącz ładowarkę do gniazdka za pośrednictwem watomierza.
3. Ustaw przyrząd na pomiar natężenia i odczytaj wynik.
4. Sprawdź, jak zmieni się wynik, gdy do ładowarki podłączymy telefon.



Ładowarka składa się z transformatora oraz prostownika, czyli urządzenia zamieniającego prąd przemienny na stały. Gdy do ładowarki nie jest podłączony telefon, przez uzwojenie wtórne jej transformatora nie płynie prąd. Przez uzwojenie pierwotne podłączone do sieci płynie prąd o bardzo małym natężeniu (być może miernik wskazywał nawet zero amperów). Dlaczego prąd nie płynie, skoro uzwojenie pierwotne to przewodnik podłączony do sieci?

Otóż zarówno uzwojenie wtórne, jak i uzwojenie pierwotne znajdują się w zmiennym polu magnetycznym. Dlatego również w uzwojeniu pierwotnym indukuje się siła elektromotoryczna (SEM), która w znacznej mierze równoważy napięcie sieciowe. To sprawia, że natężenie prądu jest bardzo małe.

Opisana obserwacja pozwala uzasadnić równanie transformatora. Ściślej rzecz biorąc, możemy je uzasadnić w sytuacji, gdy do uzwojenia wtórnego transformatora nic nie jest podłączone, a dodatkowo przy założeniu, że natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym jest równe dokładnie zeru.

Napięcie, do którego podłączamy transformator, jest równe napięciu U_p indukującemu się w uzwojeniu pierwotnym. Zgodnie z prawem Faradaya mamy więc:

Prawo Faradaya s. 286

$$U_p = -n_p \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

gdzie:
U_p – napięcie na uzwojeniu pierwotnym,
n_p – liczba zwojów w uzwojeniu pierwotnym,
$\Delta \Phi$ – zmiana strumienia indukcji magnetycznej,
Δt – czas, w którym następuje ta zmiana.

Dzięki żelaznemu rdzeniowi (zamykającemu linie pola magnetycznego) taka sama zmiana strumienia magnetycznego $\Delta\Phi$ zachodzi w cewce uzwojenia wtórnego, a więc napięcie U_w na uzwojeniu wtórnym wynosi:

$$U_w = -n_w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

gdzie: U_w – napięcie na uzwojeniu wtórnym, n_w – liczba zwojów uzwojenia wtórnego.

Z porównania tych wzorów otrzymujemy podaną wcześniej zależność:

$$\frac{U_w}{U_p} = \frac{n_w}{n_p}$$

Widzimy, że transformator pozwala dowolnie zmieniać napięcie przemienne. Trzeba tylko użyć urządzenia o odpowiedniej liczbie zwojów.

Transformator a natężenie prądu

Zasada zachowania energii, cz. I s. 201

Zgodnie z zasadą zachowania energii podniesieniu napięcia towarzyszy odpowiednie obniżenie natężenia prądu. Energia wydzielona w określonym czasie jest dana wzorem:

$$E = Pt$$

Moc prądu s. 192

Jeśli pominiemy straty energii, to zgodnie z zasadą zachowania energii dla uzwojenia pierwotnego i wtórnego ze wzoru $P = UI$ wynika równość:

$$U_p I_p = U_w I_w$$

Fizyka wokół nas

Transformatory i przesyłanie energii

Energię elektryczną przesyła się na ogromne odległości, dlatego jest ważne, aby po drodze jej straty były jak najmniejsze. Jest to możliwe dzięki transformatorom.

Transformator działa w taki sposób, że gdy napięcie się zwiększa, natężenie prądu maleje. Zmniejszenie natężenia prądu pozwala zminimalizować straty energii podczas jej przesyłania. Dlatego właśnie przed przesłaniem energii elektrycznej na dużą odległość napięcie podnosi się aż do 400 000 V. Później ponownie stosuje się transformatory, aby obniżyć napięcie i dopasować je do potrzeb poszczególnych odbiorców.



która po przekształceniach przyjmuje postać:

$$\frac{U_w}{U_p} = \frac{I_p}{I_w}$$

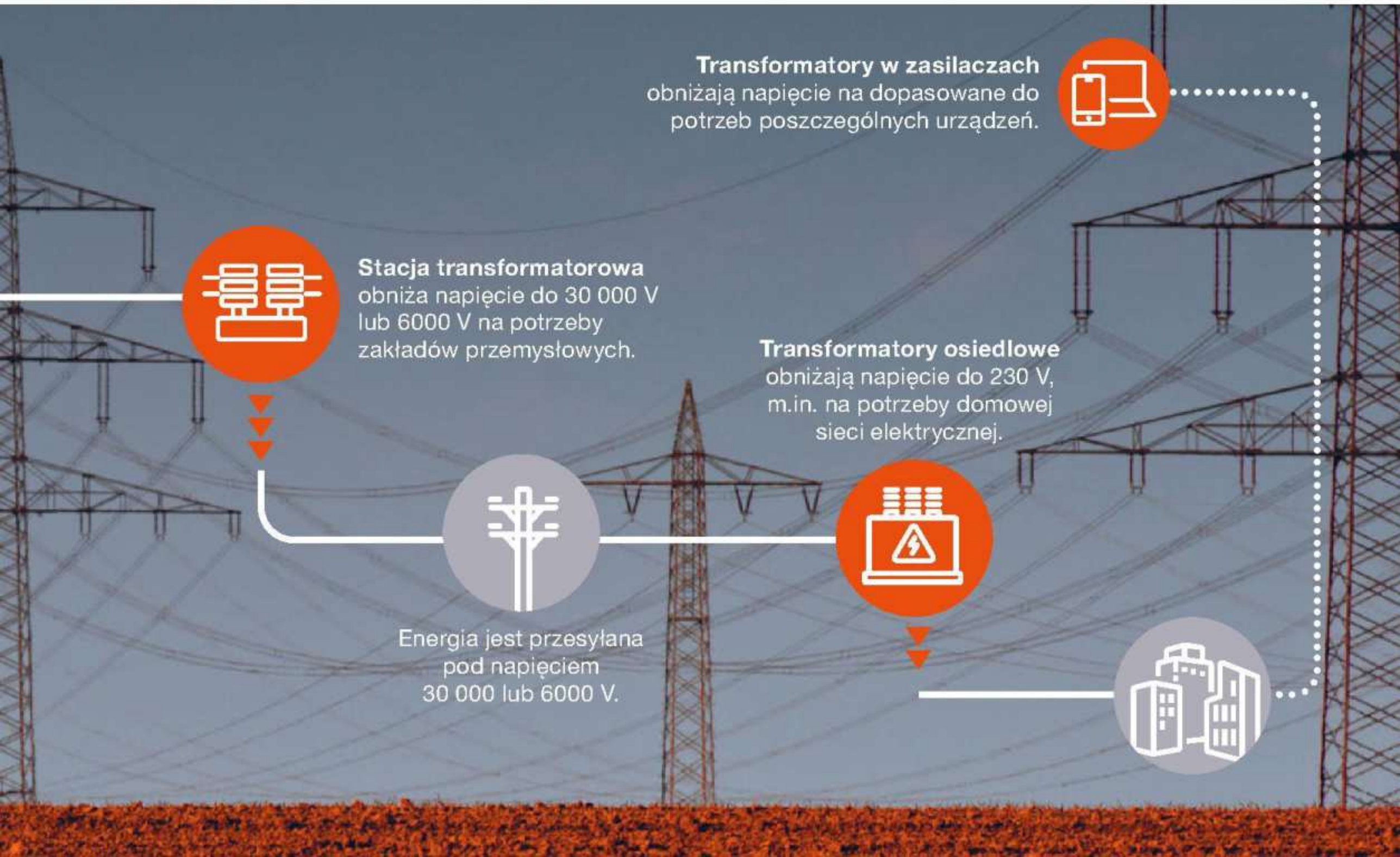
Widzimy więc, że między natężeniami i napięciami na uzwojeniach transformatora zachodzi zależność odwrotnie proporcjonalna. Na przykład, jeżeli napięcie na uzwojeniu wtórnym **się zwiększy**, tyle samo razy **zmniejszy się** natężenie na tym uzwojeniu.

Ten wzór wyprowadziliśmy przy założeniu, że moc w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym jest jednakowa, czyli że transformator ma sprawność 100%. W rzeczywistości jest ona nieco niższa ze względu na opór uzwojeń. Pewna część energii jest także tracona w postaci fal dźwiękowych (charakterystyczne buczenie transformatorów). Dlatego też natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym jest niższe niż wynikałoby to z przedstawionych obliczeń.

Sprawność dobrego transformatora to nawet 99%.

Przesyłanie energii elektrycznej

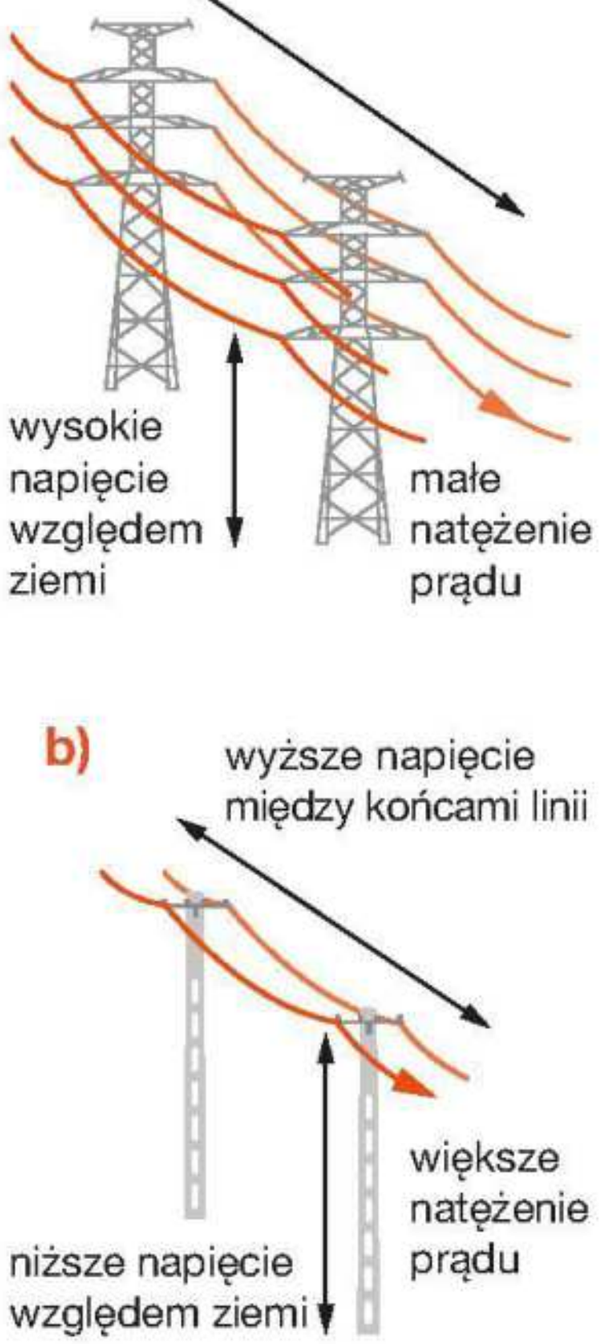
Możliwość zmiany napięcia jest jednym z głównych powodów stosowania w sieci energetycznej prądu przemiennego. Napięcie wytwarzane w elektrowni przez prądnice wynosi 6,3 kV lub 10,5 kV. Jednak bardziej opłaca się przesyłać energię pod dużo wyższym napięciem, wynoszącym nawet 400 kV. Wówczas przez przewody płynie prąd o mniejszym natężeniu, co zgodnie ze wzorem $P = I^2R$, gdzie R jest oporem przewodów, oznacza mniejsze straty energii.



Dlaczego w takim razie nie podwyższa się napięcia jeszcze bardziej, np. do 40 MV? Jak pamiętasz, przy takim napięciu między chmurami a ziemią następuje wyładowanie atmosferyczne. Przewody znajdują się zdecydowanie bliżej ziemi niż chmura, a odległość między przewodami jest jeszcze mniejsza, więc tym łatwiej dochodziłoby między nimi do wyładowań.

Wyładowanie elektryczne s. 110–111

Wystarczy jednak stanąć w cichym miejscu pod linią wysokiego napięcia 400 kV, aby usłyszeć charakterystyczny świergot, będący odgłosem niewielkich wyładowań, zwanych koronowymi. Do przesyłania prądu wybrano napięcie 400 kV, ponieważ przy takiej wartości łączne straty energii na ciepło i wyładowania są najmniejsze.



Rys. **15.32.** Przesyłanie energii elektrycznej

Straty energii a wzór $P = \frac{U^2}{R}$

Ze wzoru $P = I^2R$ wynika, że energię elektryczną należy przesyłać pod jak najwyższym napięciem, gdyż małe natężenie prądu pozwala na zmniejszenie strat energii. Czy jednak z zależności $P = \frac{U^2}{R}$ nie wynika jednocześnie wniosek przeciwny? Nie. Jak pamiętasz, występujące w tym wzorze napięcie U oznacza spadek napięcia na przewodzie, czyli napięcie między końcami przewodu. W opisanej sytuacji jeden z końców przewodu znajduje się w elektrowni, a drugi u odbiorcy prądu. Gdy napięcie w przewodzie linii energetycznej mierzone **względem ziemi jest wyższe** (rys. 15.32a), mniejsze jest natężenie prądu, a więc także napięcie U **pomiędzy końcami przewodu jest niższe**. Dlatego tych dwóch napięć nie należy utożsamiać.

Samoindukcja

Zmienne pole magnetyczne wytwarzane przez cewkę jest przyczyną indukowania się napięcia nie tylko w innych przewodnikach, lecz także w samej cewce, która je wytworzyła. W takim przypadku mówimy o zjawisku **samoindukcji**. Możemy je zaobserwować dzięki prostemu doświadczeniu.

Uwaga. Mimo zasilania ogniwem 1,5 V w obwodzie może się indukować wysokie napięcie. Wykonuj doświadczenie ostrożnie, pod kontrolą nauczyciela i nie dotykaj nieizolowanych przewodów!



Doświadczenie 37

1. Przygotuj zwojnicę, woltomierz, baterię AA (ogniwo 1,5 V) oraz przewody i magnesy do ich łączenia.
2. Do zwojnicy podłącz woltomierz, nastawiony na najwyższy zakres (minimum 1000 V), a równolegle do woltomierza – ogniwo 1,5 V.
3. Patrz cały czas na woltomierz. Ostrożnie chwyć za izolację jeden z przewodów łączących cewkę z ogniwem i go odłącz. Co wskazuje woltomierz w chwili odłączania?

W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować, że w chwili odłączania przewodu od baterii woltomierz wskazał skok napięcia. Tak więc w chwili wyłączenia prądu zachodzi zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Jego mechanizm jest taki sam jak poprzednio. Zmiana natężenia prądu płynącego przez cewkę powoduje zmianę pola magnetycznego, a ta z kolei – indukowanie się SEM.

Jak mogliśmy odczytać na wyświetlaczu woltomierza, indukowana w trakcie doświadczenia siła elektromotoryczna (czyli napięcie między końcami cewki) była znacznie większa niż napięcie ogniwa 1,5 V. Łatwo to wyjaśnić za pomocą prawa Faradaya: SEM zależy od szybkości zmiany strumienia pola magnetycznego.

Prawo Faradaya s. 286

W naszym doświadczeniu pole magnetyczne wytwarzane przez cewkę nie było zbyt silne, ale w chwili wyłączania napięcia zmieniało się bardzo szybko i dlatego powstała bardzo duża siła elektromotoryczna.

Samoindukcja w silniku elektrycznym

Mówiliśmy już, że silnik elektryczny może działać jak prądnica. Ściślej rzecz biorąc, nie tyle może działać, ile działa, gdyż zjawisko indukcji zachodzi w nim także wtedy, gdy urządzenie służy zgodnie ze swoim pierwotnym przeznaczeniem – jako silnik.

Doświadczenie 38

1. Przygotuj odkurzacz (najlepiej użyć prostszego modelu bez regulacji mocy), omomierz oraz watomierz (patrz uwaga do dośw. 36. s. 311).
2. Ustaw watomierz cyfrowy tak, aby pokazywał natężenie prądu płynącego przez odkurzacz.
3. Włącz odkurzacz. Odczytaj natężenie prądu.
4. Zatkaj rurę odkurzacza i odczytaj natężenie prądu. Jednocześnie obserwuj zmianę wysokości dźwięku wydawanego przez silnik odkurzacza.
5. Wyjmij z gniazdka wtyczkę kabla zasilającego odkurzacz. Nie wyłączaj przycisku! Zmierz omomierzem opór między końcówkami wtyczki wyjętej z gniazdka.





Ostatniego punktu doświadczenia nie da się wykonać w bardziej zaawansowanych odkurzaczach z regulacją mocy, w których silnik nie jest połączony bezpośrednio z wtyczką. Takie połączenie jest konieczne do pomiaru oporu silnika za pomocą omomierza. W naszym

doświadczeniu użyliśmy starego, prostego odkurzacza. Opór jego uzwojenia wynosił 20 Ω. Ponieważ napięcie w sieci domowej wynosi 230 V, przez silnik odkurzacza powinien płynąć prąd o natężeniu:

$$I = \frac{230\ \text{V}}{20\ \Omega} = 11{,}5\ \text{A}$$

Jednak amperomierz wskazywał zaledwie 5,5 A przy odetkanej rurze i 5 A przy zatkanej. Z czego wynika ta różnica?

Kluczem do jej wyjaśnienia jest zmiana natężenia prądu po zatkaniu rury (tę część doświadczenia można wykonać niezależnie od typu odkurzacza). Dźwięk silnika stał się wówczas wyższy, co oznacza, że jego wirnik obracał się szybciej. Wówczas amperomierz wskazywał niższe natężenie prądu.

Wynika z tego, że w sytuacji odwrotnej, czyli przy wolniejszych obrotach wirnika, przez silnik płynie prąd o większym natężeniu (rys. 15.33). Gdyby całkowicie zatrzymać silnik odkurzacza podłączonego do sieci, płynąłby przez niego prąd o natężeniu 11,5 A, tak jak to obliczyliśmy powyżej. Nie trwałoby to długo, gdyż przewody uzwojenia nie są przystosowane do tak dużego natężenia i z powodu nadmiernego rozgrzewania uległyby przepaleniu (przed taką awarią może ochronić bezpiecznik 10 A, jeśli taki jest zainstalowany w gałęzi sieci, do której podłączamy odkurzacz).



Rys. **15.33.** Podczas wiercenia w betonie wiertło, a więc i silnik obracają się wolniej. Siła elektromotoryczna indukcji jest mniejsza i przez silnik płynie prąd o większym natężeniu

W rzeczywistości wirnik się kręci, co oznacza, że indukuje się w nim siła elektromotoryczna, której znak zgodnie z regułą Lenza jest przeciwny do znaku przyłożonego napięcia. Całkowite napięcie powodujące przepływ prądu przez wirnik jest więc mniejsze od sieciowego, a co za tym idzie, również natężenie prądu jest mniejsze niż w przypadku zatrzymanego wirnika.

Gdybyśmy obracali wirnik silnika jeszcze szybciej, niż on sam obraca się po włączeniu, siła elektromotoryczna samoindukcji przeważyłaby nad napięciem sieciowym i silnik oddawałby energię do sieci. Tak właśnie dzieje się w pojazdach o napędach elektrycznym i hybrydowym. Dzięki temu w czasie hamowania odzyskują one część energii, zamiast tracić ją bezpowrotnie na ogrzewanie tarcz i klocków hamulcowych.



A to ciekawe

Lampa błyskowa w aparacie fotograficznym potrzebuje do działania napięcia kilkuset woltów. Do uzyskania go w urządzeniu zasilanym z kilku ogniw 1,5 V wykorzystuje się zjawisko indukcji.

Ponieważ układ zasilający lampę oprócz cewki zawiera także kondensator, wysokie napięcie może się w nim utrzymywać nawet przez wiele lat po wyjęciu baterii. Dlatego nie należy samodzielnie rozbierać aparatu z lampą błyskową.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać i demonstrować doświadczalnie zjawiska indukcji wzajemnej i samoindukcji;
- rozumieć znaczenie tych zjawisk w urządzeniach elektrycznych;
- stosować równanie transformatora;
- znać budowę i zastosowanie transformatorów.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Oświetlenie sufitowe składa się z 10 lampek o mocy 25 W każda, połączonych równolegle i zasilanych napięciem przemiennym o wartości skutecznej 12 V. Cały obwód jest podłączony przez transformator do napięcia sieciowego 230 V. Jakie jest natężenie prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne transformatora, a jakie – przez uzwojenie wtórne? Pomiń straty energii w transformatorze i w przewodach.

Rozwiązanie

Znamy wartość skuteczną napięcia zasilającego lampkę oraz moc, zatem ze wzoru $P = UI$ możemy obliczyć natężenie $I = \frac{P}{U}$ prądu płynącego przez pojedynczą lampkę. Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$I = \frac{25\,\text{W}}{12\,\text{V}} \approx 2{,}08\,\text{A}$$

Ponieważ lampki są połączone równolegle i podłączone do uzwojenia wtórnego, zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa przez to uzwojenie płynie prąd:

$$I_{\text{wt}} = 10 \cdot I = 20{,}8\,\text{A}$$

Napięcie na uzwojeniu wtórnym wynosi 12 V, a na uzwojeniu pierwotnym 230 V, czyli napięcie na uzwojeniu pierwotnym jest $\frac{230}{12} = 19{,}17$ razy wyższe niż na uzwojeniu wtórnym. Oznacza to, że przez uzwojenie pierwotne płynie prąd o natężeniu 19,17 razy mniejszym niż przez wtórne:

$$I_{\text{pierw}} = \frac{20{,}8\,\text{A}}{19{,}17} \approx 1{,}1\,\text{A}$$

Do tego samego wniosku można dojść również w inny sposób. Moc całego urządzenia wynosi 250 W (10 lampek o mocy 25 W każda), więc przez przewody zasilające i uzwojenie pierwotne płynie prąd o natężeniu:

$$I_{\text{pierw}} = \frac{250\,\text{W}}{230\,\text{V}} \approx 1{,}1\,\text{A}$$

Odpowiedź: Przez uzwojenie pierwotne transformatora płynie prąd o natężeniu ok. 1,1 A, a przez uzwojenie wtórne o natężeniu ok. 20,8 A.

Uwaga. To oznacza, że do połączenia transformatora z lampkami musimy używać grubszych przewodów niż do połączenia go z siecią 230 V.

Zadania s. 318

Pytania i zadania

1. Uzwojenie pierwotne transformatora ma 1000 zwojów. Ile zwojów powinno mieć uzwojenie wtórne, aby pozwalał on podłączać amerykańskie odbiorniki energii przystosowane do napięcia 110 V do europejskiej sieci 230 V?

2. Napięcie w sieci wysokiego napięcia zmieniono za pomocą transformatora z 400 kV na 40 kV. Czy straty energii wynikające z oporu przewodów się powiększą czy zmniejszą? Ile razy?

3. Lampa rentgenowska jest zasilana napięciem z transformatora podwyższającego napięcie z 230 V na 100 kV. W uzwojeniu pierwotnym transformatora o 92 zwojach płynie prąd o natężeniu 8 A.

   a) Oblicz, ile zwojów ma uzwojenie wtórne tego transformatora.

   b) Oblicz natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym, jeśli sprawność transformatora wynosi $\eta = 98\%$.

4. Przeczytaj tekst w ramce. Oceń, czy miernik cęgowy pozwala na pomiar natężenia prądu płynącego przez dwużyłowy przewód (patrz zdjęcie) zasilający lampkę.



Czy można mierzyć natężenie prądu przemiennego płynącego przez izolowany przewód? Dzięki zjawisku indukcji jest to możliwe. Wystarczy objąć przewód klamrą, w której – po zamknięciu – indukuje się prąd. Tak działa miernik cęgowy (na zdjęciu). Pozwala mierzyć natężenie bez rozłączania obwodu, co w przypadku wysokich napięć dodatkowo zwiększa bezpieczeństwo, ponieważ nie musimy podłączać końcówek przyrządu do przewodów pod napięciem.



15.7. Dioda i prostowanie prądu

Przypomnij sobie

- Ogniwa i baterie wytwarzają napięcie stałe.
- W sieci domowej wykorzystujemy napięcie przemienne.

W sieci energetycznej i w sieci domowej wykorzystujemy prąd przemienny. Jednak urządzenia elektroniczne, takie jak telewizor czy komputer, wymagają zasilania prądem stałym o różnych napięciach. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu urządzenia, które zamienia napięcie przemienne na stałe. Taką funkcję pełni **prostownik**.

Dioda

Jednym z najważniejszych elementów prostownika jest dioda lub – częściej – kilka diod. Zbadajmy właściwości tego elementu.

Doświadczenie 39 – obowiązkowe

Dioda jako element składowy prostownika

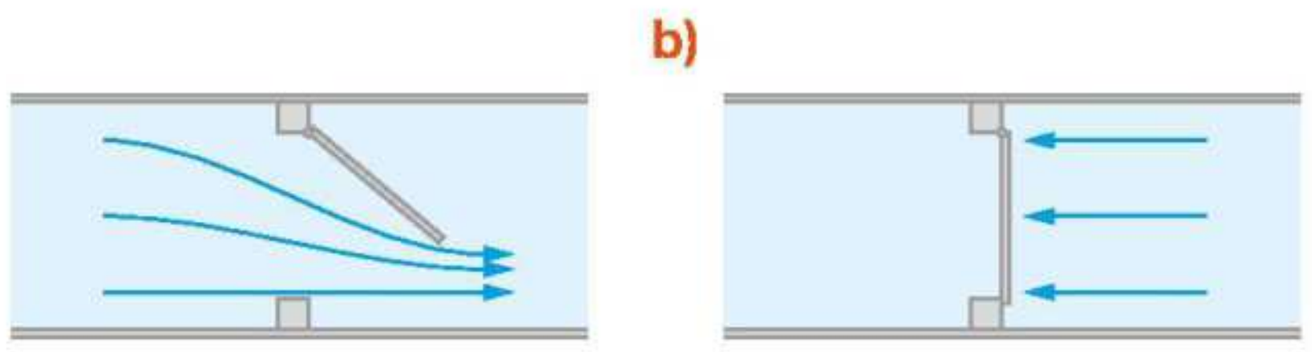
1. Przygotuj diodę, baterię 9 V, żarówkę 9 V i przewody.
2. Podłącz diodę i żarówkę szeregowo do baterii. Czy żarówka świeci?
3. Zamień miejscami końcówki diody. Czy coś się zmieniło?



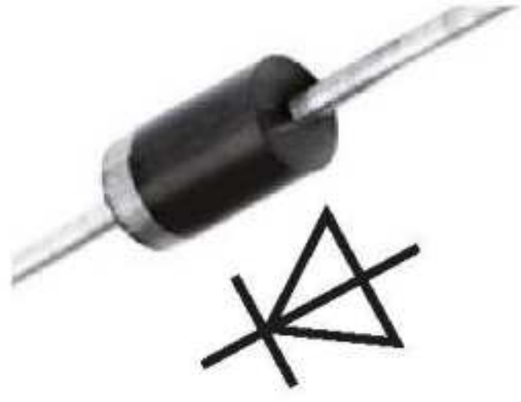
W doświadczeniu zaobserwowaliśmy, że żarówka świeci, gdy dioda jest podłączona do odpowiednich biegunów baterii. Oznacza to, że jest ona elementem, który przewodzi prąd tylko w jedną stronę.

> Dioda przewodzi prąd tylko w jedną stronę.

Jeżeli porównamy prąd elektryczny do przepływu wody, możemy powiedzieć, że odpowiednikiem diody jest zawór przepuszczający wodę tylko w jedną stronę (rys. 15.35).



Rys. **15.35.** Zawór, który przepuszcza wodę w jedną stronę (a), natomiast zamyka jej przepływ w przeciwnym kierunku (b). Jego odpowiednikiem dla prądu elektrycznego jest dioda



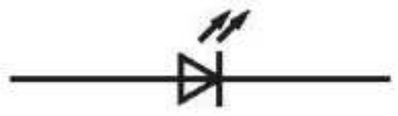
Rys. **15.34.** Przykładowa dioda oraz symbol diody – grot strzałki wskazuje kierunek przepływu prądu



A to ciekawe

Aby zbudować najprostszą diodę, wystarczy zarysować drutem powierzchnię ołowiu. Ponieważ dawniej z ołowiu wykonywano m.in. ołówki (o czym świadczy ich nazwa), żołnierze w czasie I wojny światowej wykorzystywali je jako diody do budowy prostych odbiorników radiowych. Rolę anteny odgrywały druty zasieków, a zamiast głośnika używano słuchawek do telefonu polowego.

Dioda świecąca



Rys. **15.36.** Symbol diody LED

Niektóre diody nie tylko spełniają funkcję swoistego zaworu, ale do tego świecą – nazywamy je **diodami świecącymi** albo **LED** (ang. *light emitting diode*). Wykonajmy proste doświadczenie i zbadajmy właściwości takiej diody.



Doświadczenie 40 – obowiązkowe

Dioda jako źródło światła

1. Przygotuj diodę świecącą (LED), dwie baterie AA oraz przewody i magnesy do ich łączenia.
2. Połącz baterie szeregowo i podłącz do nich diodę.
3. Sprawdź, czy dioda świeci, jeśli podłączymy ją odwrotnie do biegunów.



Rys. **15.37.** Przez diodę LED prąd płynie tylko wtedy, gdy dłuższa końcówka jest podłączona do bieguna dodatniego

Jeszcze niedawno diody LED spotykaliśmy najczęściej w roli lampek wskazujących, czy urządzenie jest włączone. Obecnie stosuje się je na dużo większą skalę.

Coraz popularniejsze jest oświetlenie diodowe. Sprawność LED osiąga 40%, podczas gdy dla świetlówki wynosi ona 25%, a dla tradycyjnej żarówki z rozgrzanym włóknem zaledwie 4%. Tak więc dioda LED zużywa 10 razy mniej energii elektrycznej, aby wytworzyć tę samą ilość światła co tradycyjna żarówka i prawie dwa razy mniej niż świetlówka.

W przypadku latarek takie diody są najczęściej stosowanym źródłem światła, gdyż przy niskim napięciu nie jest możliwe stosowanie świetlówek, a zwykła żarówka powoduje szybkie wyczerpanie baterii. Coraz częściej stosujemy także diodowe oświetlenie mieszkań.

Prostownik

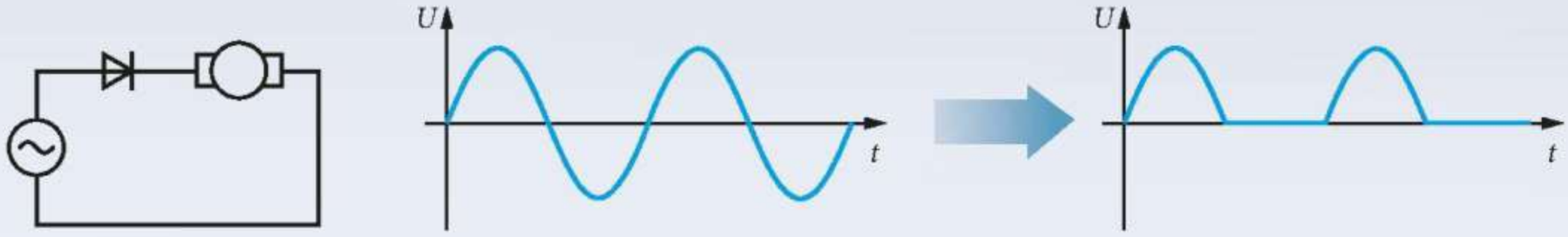
Jak już napisaliśmy, urządzenie zamieniające prąd przemienny na stały nazywamy **prostownikiem**. Na infografice na sąsiedniej stronie przedstawiamy kilka rodzajów prostowników – od najprostszego, ale też najmniej doskonałego, złożonego z pojedynczej diody, do znacznie lepszego, zawierającego większą liczbę elementów.

Prostowanie prądu

Urządzenia elektroniczne wymagają zasilania prądem stałym pod niskim napięciem (np. 5 V albo 20 V). Aby podłączyć je do sieci domowej, czyli do napięcia przemiennego, musimy obniżyć napięcie i zamienić prąd przemienny na stały. Pierwszą z tych funkcji pełni transformator, a drugą – prostownik. Zasadniczym elementem każdego prostownika jest dioda.

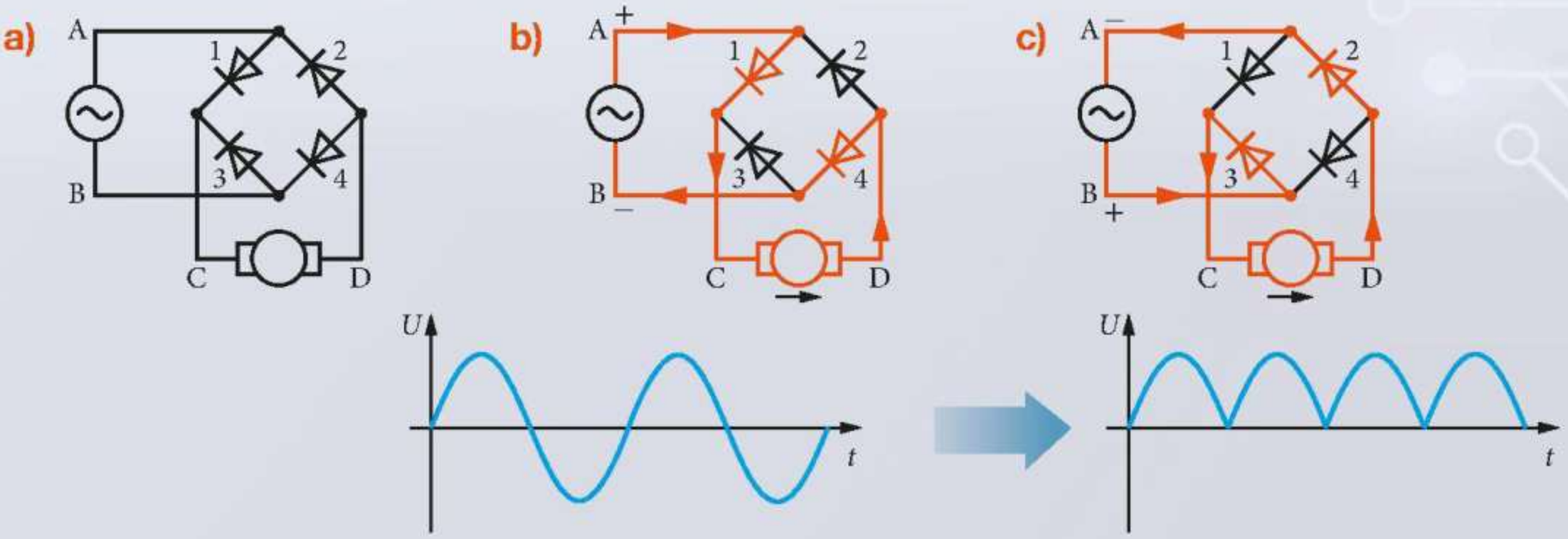
1 Pojedyncza dioda

Pojedyncza dioda umożliwia przepływ prądu tylko w jednym kierunku. Wpięcie jej w obwód umożliwia uzyskanie napięcia niezmieniającego znaku, ale zmieniającego się w czasie. Co więcej, przez połowę czasu napięcie wynosi zero, ponieważ dioda uniemożliwia przepływ prądu w przeciwnym kierunku. Na wykresie odpowiada to odcięciu jego dolnych połówek.



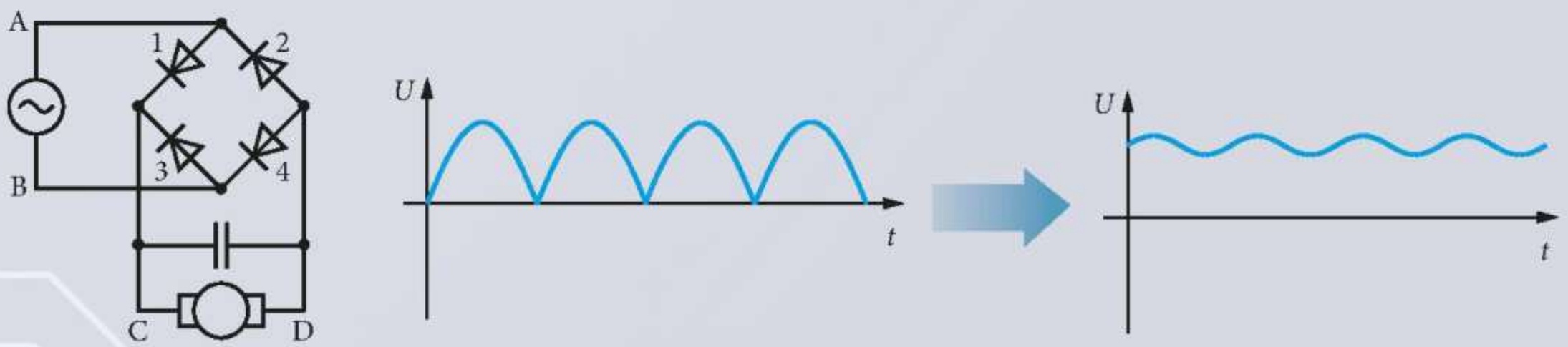
2 Mostek prostowniczy

Z czterech diod można zbudować układ, w którym napięcie nie zanika co pół okresu.
Diody należy połączyć tak jak pokazano na rys. a). Przez każde pół okresu prąd płynie przez inną parę diod (rys. b i c), na dodatek przez odbiornik płynie on cały czas w jednym kierunku. Mostek prostowniczy odwraca co drugą połówkę wykresu napięcia przemiennego (patrz wykresy poniżej). Taka sytuacja jest lepsza niż w przypadku pojedynczej diody, ale wciąż napięcie za mostkiem trudno nazwać stałym.



3 Mostek prostowniczy i kondensator

Sposobem na zmniejszenie zmian napięcia uzyskanego na wyjściu mostka prostowniczego jest dołączenie kondensatora. Ładuje się on w czasie, gdy napięcie osiąga dużą wartość, a rozładowuje, gdy jego wartość jest mała.



Po tej lekcji powinieneś

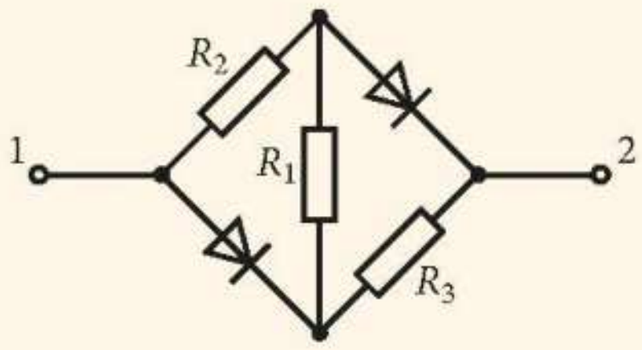
- opisywać i demonstrować doświadczalnie działanie diody;
- demonstrować działanie diody świecącej i opisywać jej zastosowania;
- opisywać działanie diody jako prostownika.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Do zacisków 1 i 2 obwodu przedstawionego na schemacie podłączono napięcie przemienne, którego wartość skuteczna wynosi $U = 120$ V. Wartości oporów R_1, R_2 i R_3 są jednakowe i wynoszą 30 Ω każdy. Oblicz średnią moc w obwodzie. Pomiń spadek napięcia na diodach.

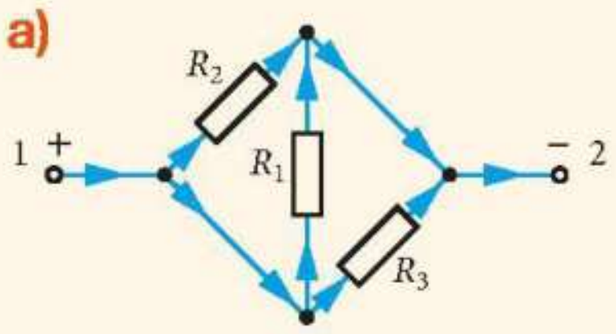


Rozwiązanie

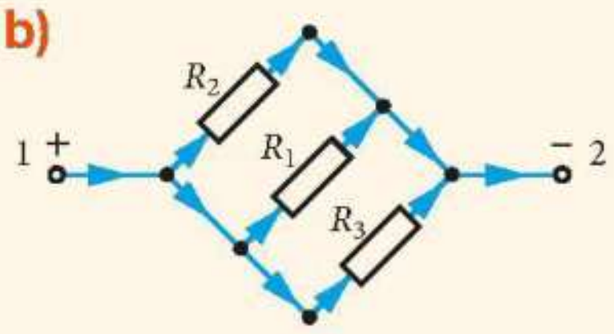
Aby obliczyć moc, należy znać napięcie skuteczne i opór zastępczy obwodu: $P = \frac{U_{sk}^2}{R}$.
Średnia moc odpowiada energii wydzielonej na elementach obwodu w czasie pełnego okresu zmian napięcia. Ponieważ do obwodu są podłączone diody, więc w zależności od znaku napięcia na zaciskach prąd będzie płynął przez obwód w różny sposób. Należy zatem obliczyć moc dla każdego z półokresów, a następnie ich średnią.
Gdy napięcie na wejściu 1–2 jest dodatnie (w punkcie 1 jest plus), prąd płynie przez obydwie diody i wszystkie oporniki. Ponieważ pomijamy spadek napięcia na diodach, możemy je na schemacie zastąpić przewodami. Prąd płynący przez obwód w takiej sytuacji zaznaczono na niebiesko na rys. a). Możemy go przerysować w czytelniejszy sposób bez zmiany połączeń (rys. b) – okazuje się, że oporniki są połączone równolegle.

Obliczamy opór zastępczy: $\frac{1}{R_{rów}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{3}{R}$, stąd $R_{rów} = \frac{R}{3} = 10\,\Omega$.

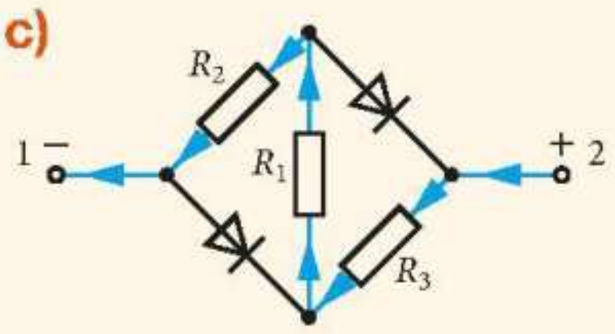
a)



b)



c)



Zatem moc dla jednego półokresu wynosi $P_1 = \frac{U^2}{R_{rów}} = 1440$ W.

Rozważamy teraz drugi półokres. W tym przypadku na zacisku 2 jest plus i prąd płynie od 2 do 1 przez oporniki połączone szeregowo. Schemat przepływu prądu pokazano na rys c).

$$P_2 = \frac{U^2}{R_{sz}} = \frac{U^2}{3R} = 160 \text{ W}$$

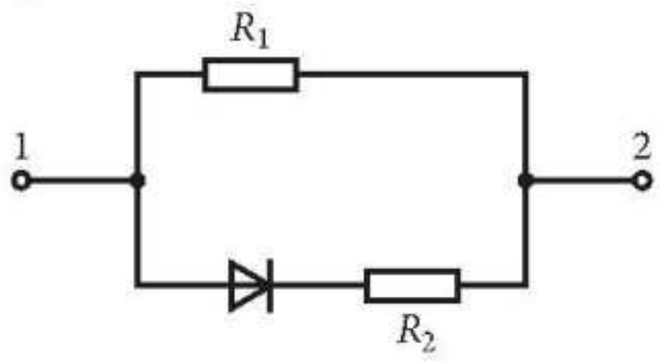
Moc średnią w obwodzie obliczamy jako średnią arytmetyczną poszczególnych mocy, ponieważ czas przepływu prądu był taki sam w obydwu przypadkach.

$$P_{śr} = \frac{P_1 + P_2}{2} = 800 \text{ W}$$

Odpowiedź: Średnia moc w obwodzie wynosi 800 W.

1. Dlaczego w zasilaczu do telefonu najpierw transformator obniża napięcie, a potem jest prostowany prąd, a nie odwrotnie?

2. Do zacisków 1 i 2 obwodu przedstawionego na schemacie podłączono napięcie przemienne o wartości skutecznej 120 V. Wartości oporów R_1 i R_2 są jednakowe i wynoszą 20 Ω każdy.
Oblicz średnią moc w obwodzie. Pomiń spadek napięcia na diodzie.

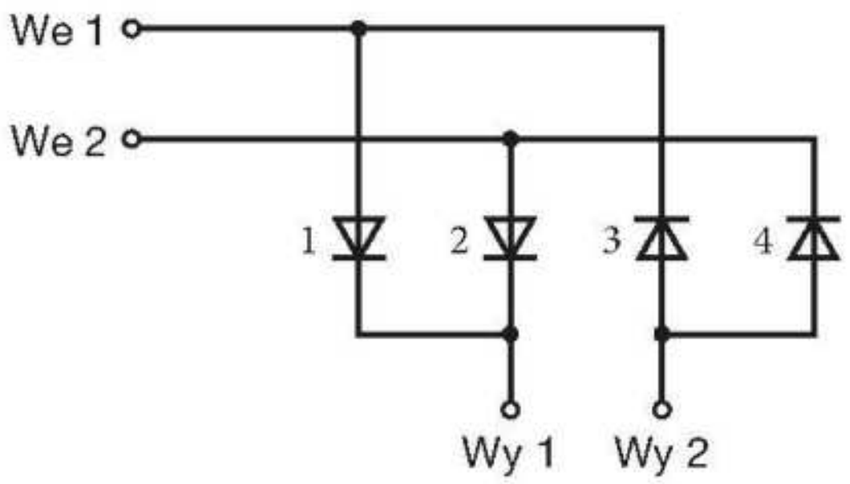


3. Schemat mostka prostowniczego można narysować także w sposób inny niż przedstawiony na infografice ze s. 321, np. tak jak na ilustracji poniżej. We 1 i We 2 to przewody do podłączenia wejściowego napięcia przemiennego, a Wy 1 i Wy 2 to przewody wyjścia.

a) Wskaż, która z końcówek wyjścia to plus, a która – minus.

b) Wskaż diody, które przewodzą, gdy napięcie wejściowe ma plus na końcówce We 1.

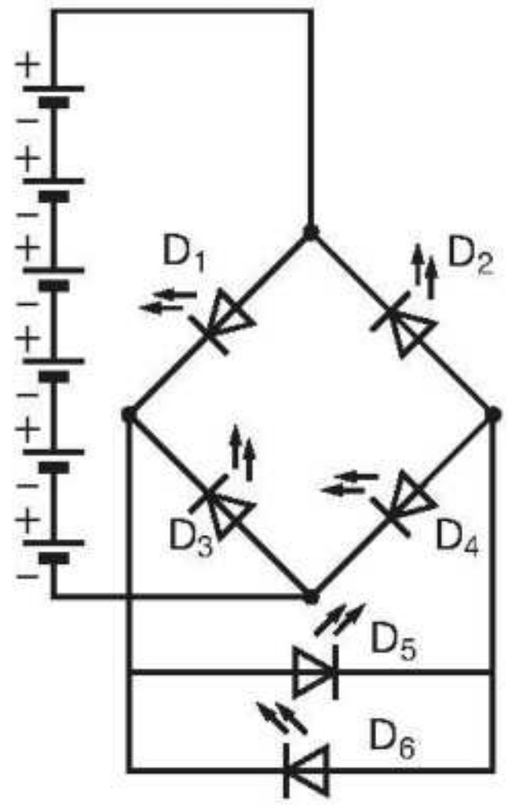
c) Wskaż diody, które przewodzą, gdy napięcie wejściowe ma plus na końcówce We 2.



4. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj sześć diod świecących (najlepiej, aby dwie miały inny kolor od pozostałych, ale nie jest to konieczne), 6 baterii AA (paluszków) oraz przewody i magnesy do ich łączenia.

b) Przeanalizuj schemat. Które diody będą świecić? Zapisz swoje przypuszczenia.



c) Zbuduj obwód według schematu. Jeśli masz dwie diody innego koloru, użyj ich jako diod oznaczonych na schemacie jako D_5 i D_6. Które diody świecą? Sprawdź, czy twoje przypuszczenia były słuszne.

d) Które diody będą świecić, jeśli odwrócimy biegunowość baterii? Zapisz swoje przewidywania.

e) Odwróć biegunowość baterii i sprawdź, czy twoje przypuszczenia były słuszne.

5. Dioda świecąca może działać także jako ogniwo fotowoltaiczne, przyrząd zamieniający energię światła w energię elektryczną, czyli mieć odwrotne zastosowanie niż zazwyczaj.

a) Podłącz czerwoną diodę świecącą do woltomierza ustawionego na najczulszy zakres.

b) Odczytaj, jakie napięcie pojawia się na diodzie, gdy jest umieszczona w normalnie oświetlonym pokoju, a jakie – gdy jest mocno oświetlona za pomocą lampy.

c) Przygotuj co najmniej dwa wskaźniki laserowe o podobnej mocy, ale różnej barwie, w tym jeden czerwony. Odczytaj, jakie napięcie pojawia się na diodzie, gdy oświetlamy ją światłem o poszczególnych barwach. Co zauważasz?

15.8. Tranzystor

Przypomnij sobie

- Dioda przewodzi prąd tylko w jedną stronę.

Epoka krzemu

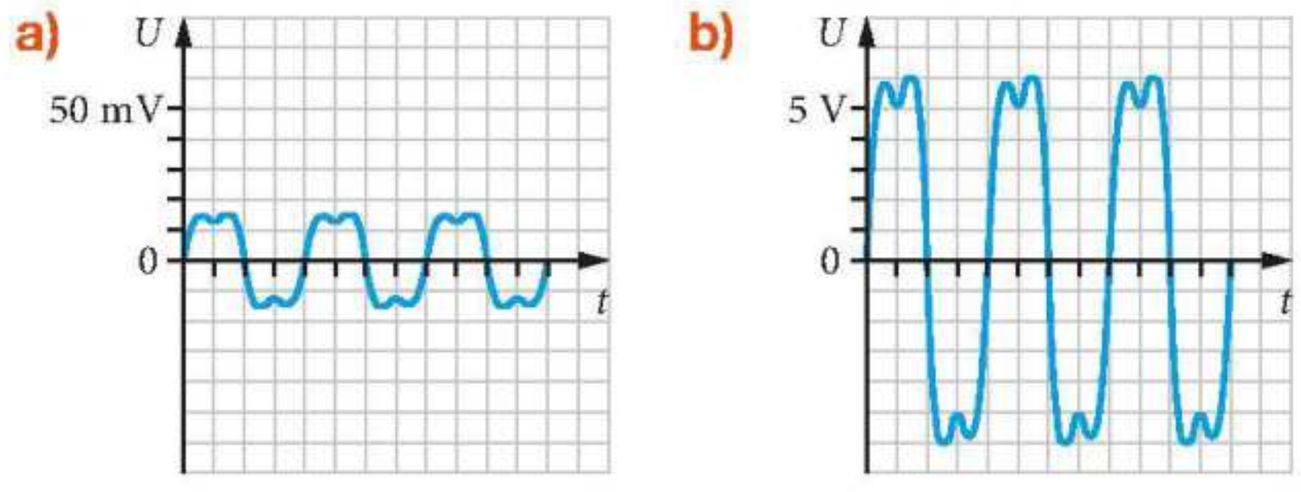
Każde urządzenie elektroniczne, od kieszonkowego kalkulatora do superkomputera sterującego lotami kosmicznymi, składa się tylko z kilku rodzajów elementów. Niektóre z nich już znasz: kondensator, opornik, cewka i dioda. Do kompletu najważniejszych elementów brakuje jeszcze **tranzystora**.

Po angielsku: *silicon* – krzem, *silicone* – silikon (tworzywo sztuczne).

Podobnie jak diody, tranzystory wykonuje się z półprzewodników, najczęściej z krzemu. Dlatego nasze czasy w historii cywilizacji nazywa się czasem epoką krzemu. Podobnie biolodzy mówią o badaniach *in silico* (dosł. w krzemie), gdy prowadzą komputerowe symulacje zjawisk przyrodniczych. To określenie dołączyło do tradycyjnych metod *in vivo* (na żywym organizmie) oraz *in vitro* (dosł. w szkle, czyli w laboratorium).

Wzmacniacz

Większości osób wzmacniacz kojarzy się ze sprzętem audio-wideo. Rzeczywiście, jak wykazaliśmy w doświadczeniu 32. na s. 280, sygnał z mikrofonu bez wzmacniania zasila głośnik, jednak otrzymany dźwięk jest cichy. Dlatego na ogół sygnał elektryczny z mikrofonu lub sprzętu do odtwarzania muzyki trzeba wzmocnić.



Rys. **15.38.** Działanie wzmacniacza: a) sygnał wejściowy, b) sygnał wyjściowy



Rys. **15.39.** Elektrokardiogram

Wzmacnianie sygnałów elektrycznych nie ogranicza się jednak do przetwarzania dźwięków. Mamy z nim do czynienia wszędzie tam, gdzie sygnał otrzymany bezpośrednio z urządzenia wyjściowego jest zbyt słaby do naszych celów.

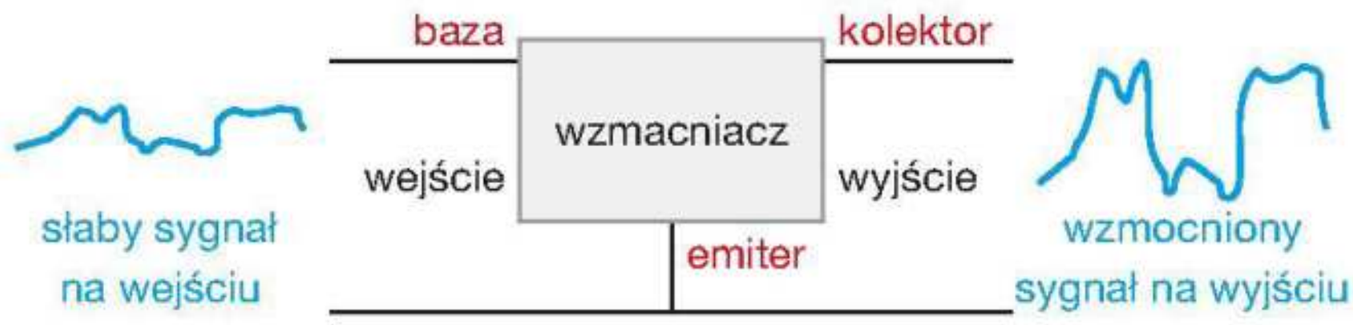
Na przykład elektrody w badaniu EKG (elektrokardiograficznym, rys. 15.39) odbierają z organizmu pacjenta bardzo słaby sygnał. Musi być on wielokrotnie wzmocniony, aby sterował pisakami rysującymi wykres, który stanowi wynik badania.

Tranzystor jako wzmacniacz

Żaden z elementów elektronicznych poznanych na wcześniejszych lekcjach nie może spełniać funkcji wzmacniacza. Potrzebny jest do tego **tranzystor**.

> Tranzystor służy do wzmacniania sygnału elektrycznego.

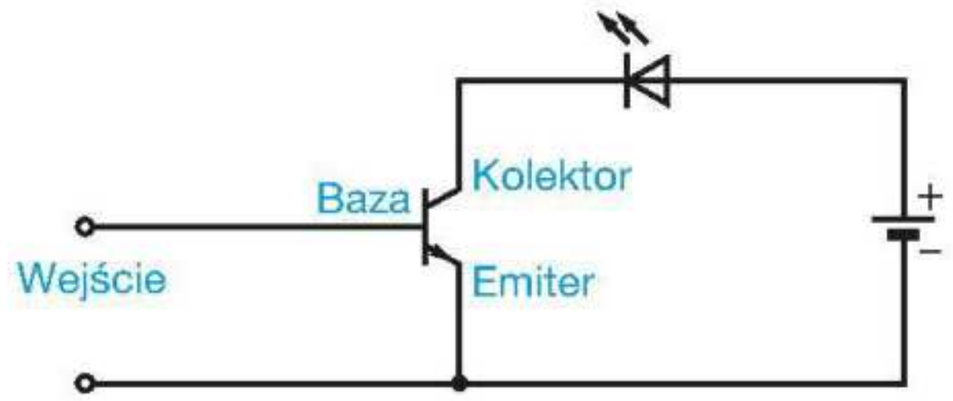
Tranzystor ma trzy końcówki. Sygnał wejściowy podłączamy do **bazy (B)** i **emitera (E)**. Im większy prąd płynie pomiędzy końcówkami wejściowymi, tym większy prąd może płynąć między **kolektorem (C)** a **emiterem**. Jak widzisz, **emiter jest wspólną końcówką** dla wejścia i wyjścia.



Rys. **15.40.** Schemat działania tranzystora

Przykładowy obwód z tranzystorem przedstawia w uproszczeniu rysunek 15.41.

- Dopóki prąd nie płynie między bazą a emiterem, nie może też płynąć między kolektorem a emiterem. Dioda nie świeci.
- Im większy prąd płynie między bazą a emiterem, tym większy prąd może płynąć między kolektorem a emiterem. Tym jaśniej świeci dioda.



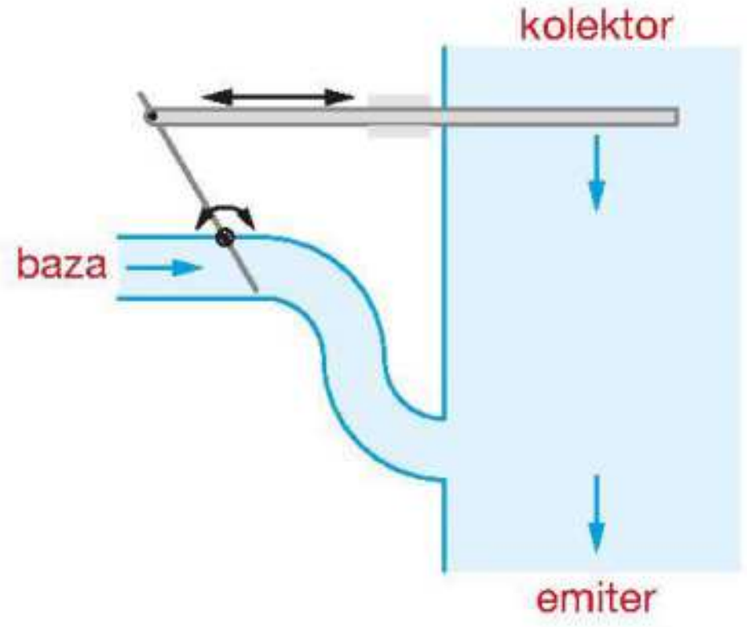
Rys. **15.41.** Uproszczony schemat wzmacniacza z jednym tranzystorem

> Prąd w układzie baza–emiter steruje prądem w układzie kolektor–emiter.

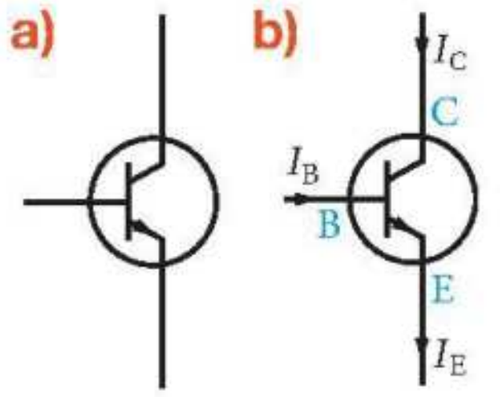
Drugi prąd ma przy tym znacznie większe natężenie (np. 100 razy większe) niż prąd płynący między bazą a emiterem.

Hydrauliczny model tranzystora

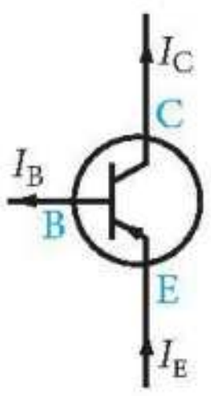
Diodę porównaliśmy do jednokierunkowego zaworu w instalacji hydraulicznej. Podobne porównanie można uczynić dla tranzystora (rys. 15.42 s. 326). Woda płynąca z bazy przez cienką rurkę popycha klapkę, która porusza zasuwką regulującą przepływ wody z szerokiego kolektora.



Rys. **15.42.** Wodny model tranzystora: woda płynąca cienką rurką z bazy popycha klapkę, która porusza zasuwką regulującą przepływ wody z szerokiego kolektora



Rys. **15.43.** Symbol tranzystora bipolarnego npn (a) z zaznaczonymi końcówkami i kierunkiem przepływu prądu (b)



Rys. **15.44.** Symbol tranzystora bipolarnego pnp z zaznaczonymi końcówkami i kierunkiem przepływu prądu

Uwaga. Omawiamy tutaj jeden z rodzajów tranzystorów, zwany tranzystorem bipolarnym npn (rys. 15.43). Drugi typ tranzystora bipolarnego oznaczamy jako pnp. Najprościej można powiedzieć, że różnica między nimi polega na zmianie kierunku przepływu prądu (rys. 15.44, bateria podłączana do tego tranzystora musi być przeciwnie spolaryzowana niż w układzie z tranzystorem npn). Oprócz tranzystorów bipolarnych istnieją jeszcze tranzystory polowe (FET), w których czynnikiem sterującym jest pole elektryczne, a nie prąd.

Badanie wzmacniających właściwości tranzystora

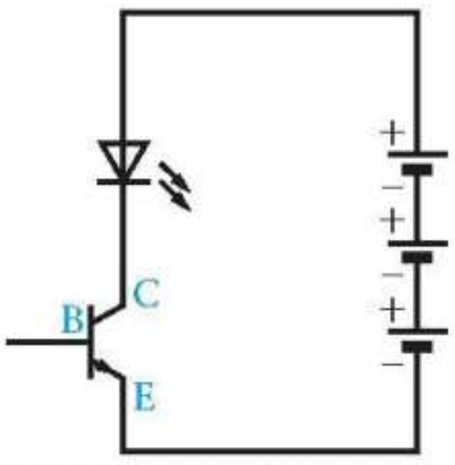
Profesjonalny wzmacniacz audio składa się z wielu tranzystorów, a także elementów pomocniczych, np. oporników i kondensatorów. Zaprojektowanie takiego urządzenia wymaga dużej wiedzy technicznej. Jednak nieskomplikowany układ, w którym jest widoczne wzmacniające działania tranzystora, można zbudować znacznie prościej.

Doświadczenie 41

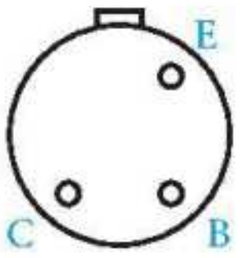


1. Przygotuj tranzystor typu BC-107, diodę świecącą, trzy baterie AA (paluszki) i przewody.
2. Zbuduj układ przedstawiony na schemacie a). Pomoże ci w tym rysunek układu nóżek tranzystora (widok od spodu – rys. b).
3. Przez obwód baza-emiter nie płynie prąd. Dlatego prąd nie płynie także przez obwód kolektor-emiter, a dioda nie świeci.
4. Dotknij jednym palcem bazy tranzystora, a drugim – dodatniego bieguna baterii. Co obserwujesz?

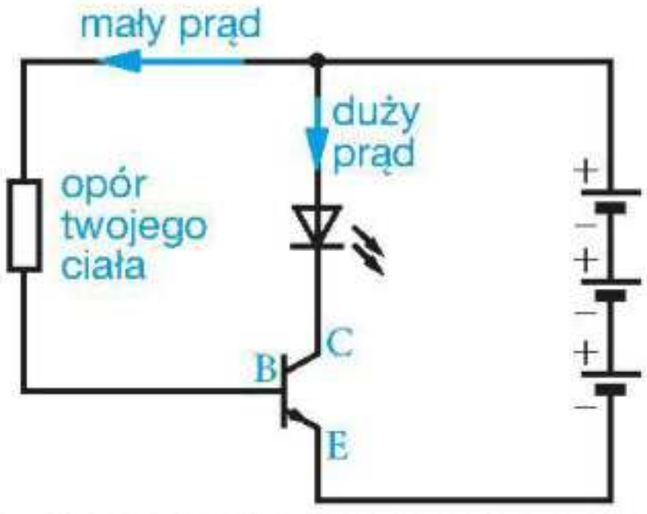
a)



b)



c)



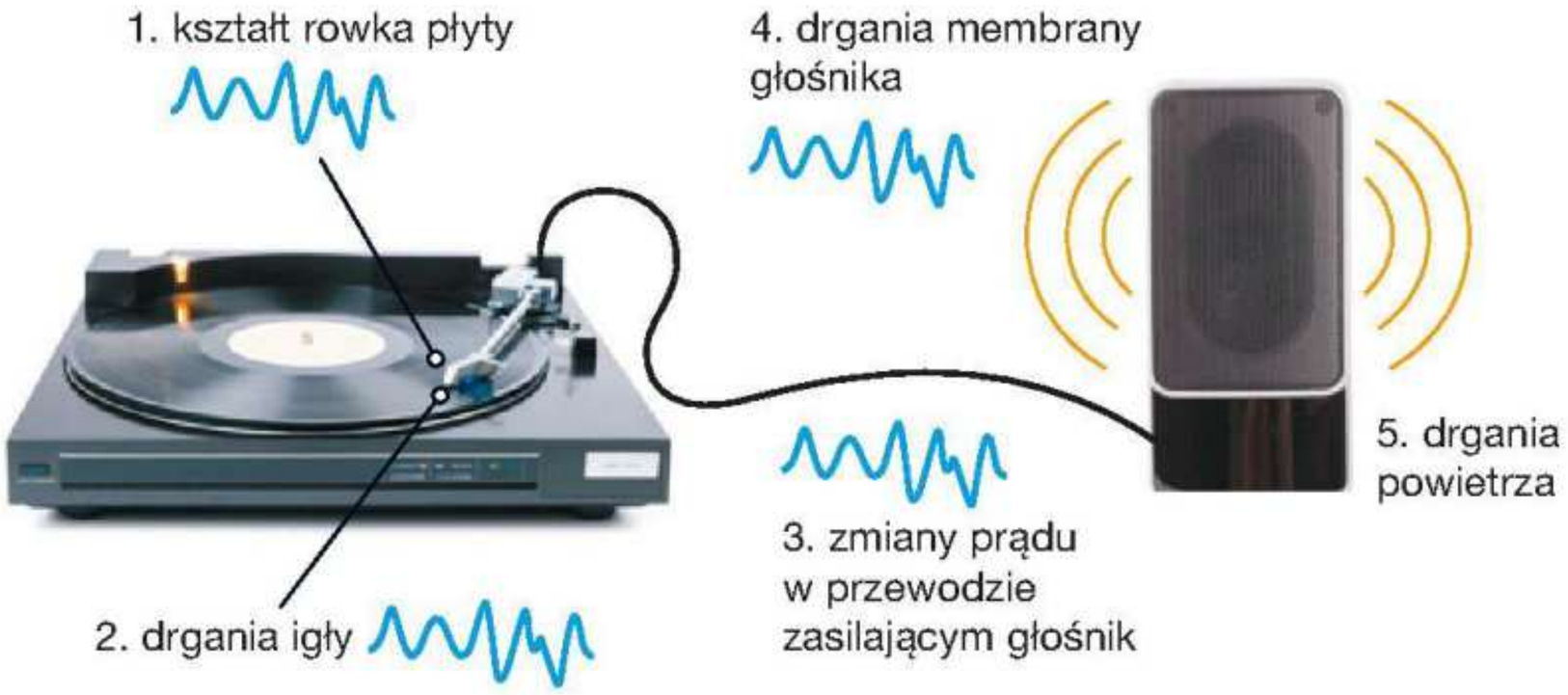
Przez twoje ciało i obwód baza–emiter płynie prąd o bardzo małym natężeniu. Nie wystarczyłby on, aby dioda świeciła. Jednak przez diodę i obwód kolektor–emiter płynie prąd o znacznie większym natężeniu. Oba te natężenia możesz zmierzyć za pomocą mikroamperomierza. W naszym doświadczeniu w obwodzie baza–emiter (i przez ciało eksperymentatora) płynął prąd 1,3 μA, a przez obwód kolektor–emiter (i przez diodę) – prąd 370 μA. Oznacza to, że tranzystor wzmacniał prąd ok. 300 razy.

Technika analogowa a technika cyfrowa

Różnicę między techniką analogową a cyfrową najłatwiej wyjaśnić na przykładzie zapisu dźwięku. Rowek płyty winylowej ma taki kształt, że przy jej obrocie wprawia igłę w drgania odpowiadające drganiom powietrza w czasie rozchodzenia się dźwięku. Taki sam przebieg mają zmiany napięcia zasilającego głośnik, a wreszcie – drgania membrany głośnika (rys. 15.45).

Pierwsze gramofony nie miały układu elektronicznego. Igła bezpośrednio poruszała membranę.

W technice analogowej na każdym etapie przetwarzania informacji sygnał zmienia się w sposób ciągły.

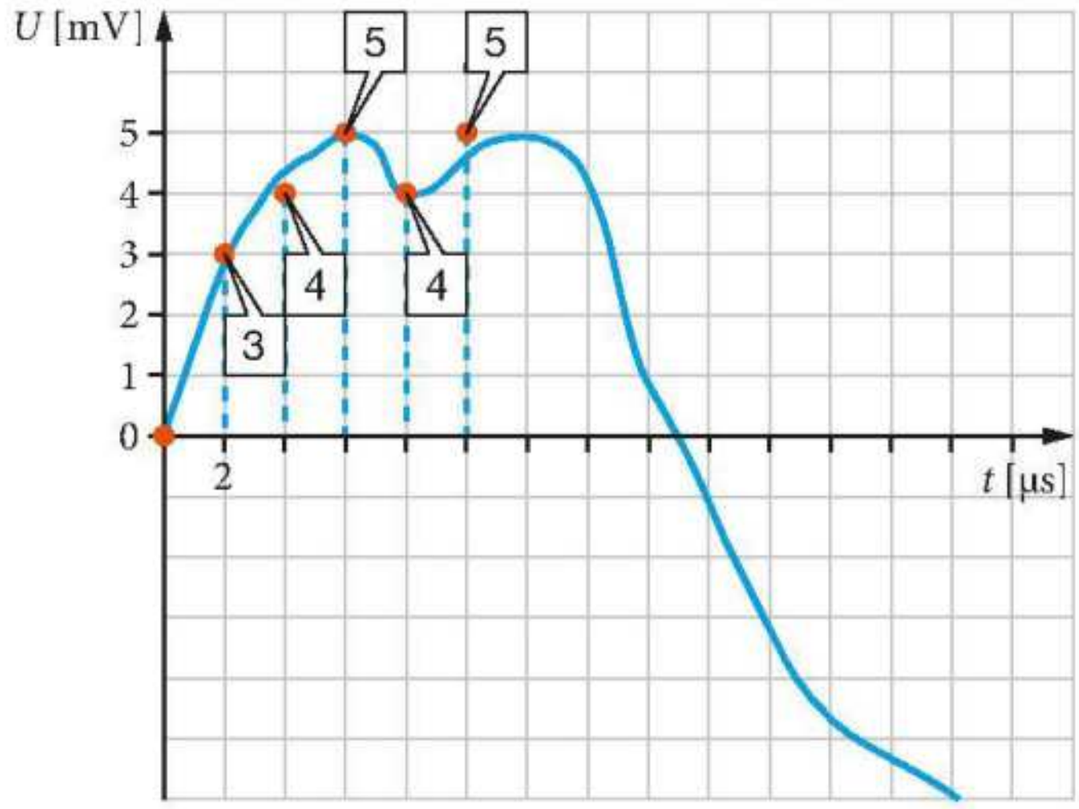


Rys. **15.45.** Analogowe przetwarzanie dźwięku

Zupełnie inaczej jest w przypadku płyt CD zapisanych sygnałem cyfrowym albo plików muzycznych mp3. Tam dźwięk jest zakodowany za pomocą liczb.

W najprostszym przypadku to wartości napięcia wytwarzanego przez mikrofon w kolejnych równych odstępach czasu (rys. 15.46 na następnej stronie).

Następnie liczby zapisujemy w systemie dwójkowym (binarnym), czyli jedynie za pomocą cyfr 0 i 1. Cyfrom 0 i 1 odpowiadają ciemne i jasne miejsca na płycie, a później – napięcie lub brak napięcia w przewodzie. Komputer odczytuje ten kod i zamienia go na w miarę ciągły sygnał zasilający głośnik.



Rys. **15.46.** Dźwięk można zapisać za pomocą serii liczb oznaczających napięcie wytwarzane przez mikrofon w równych odstępach czasu: 0, 3, 4, 5, 4, 5, ...

W zegarku elektronicznym ze wskazówkami ruchem wskazówek także steruje układ cyfrowy, więc potoczna nazwa „zegarek analogowy" nie jest trafna.

Technika cyfrowa stanowi podstawę działania komputerów, telefonów i współczesnych odtwarzaczy multimediów. W tych urządzeniach cała informacja – nie tylko dźwięk, lecz także tekst i obraz – są zakodowane w postaci liczb zapisanych w systemie dwójkowym. Zatem filmy, zdjęcia, piosenki i listy na dysku naszego komputera to po prostu zbiór kilku bilionów zer i jedynek, a więc najczęściej – kilku bilionów obszarów dysku namagnesowanych biegunem północnym w górę lub w dół.
Zatem sygnał cyfrowy ma tę przewagę nad analogowym, że przetwarzający go układ musi jedynie odróżniać zero (brak napięcia) od jedynki (ustalonego napięcia, zwykle 5 V).

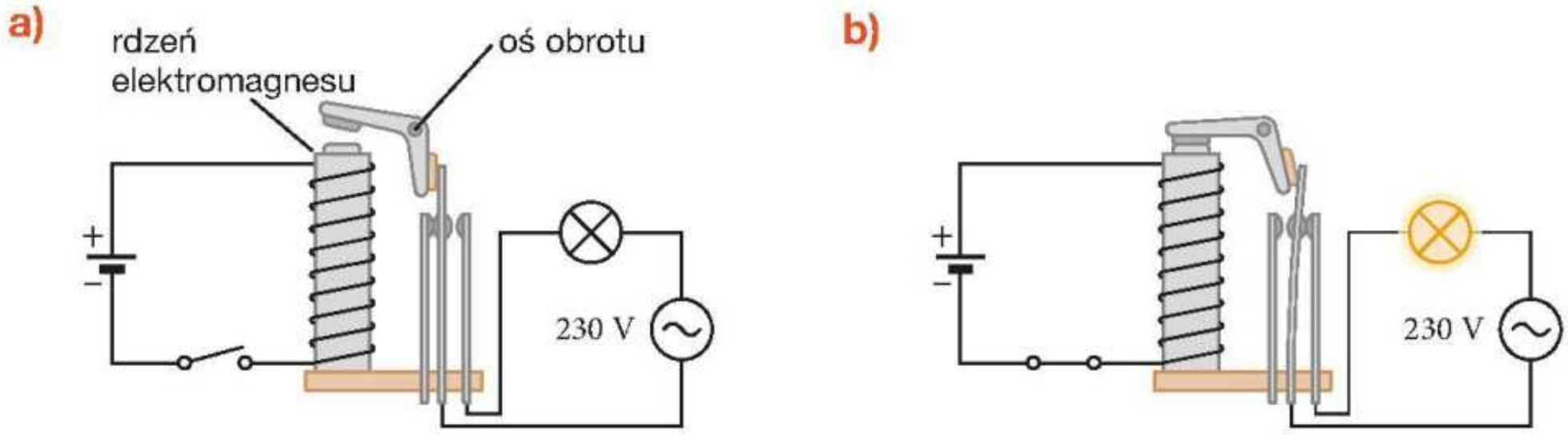
> W technice cyfrowej informacja zapisana jest w postaci zer i jedynek, którym odpowiadają dwie znacznie różniące się wartości napięcia.

W układach analogowych, w których napięcie zmienia się w sposób ciągły, trzeba odróżniać np. napięcie 5 V od 4,9 V. Taka różnica może wynikać po prostu ze zmiany oporu elementu wraz z temperaturą.

Tranzystor w układach cyfrowych

Przekaźników używamy dzisiaj do sterowania urządzeniami o dużej mocy.

Tranzystor może równie dobrze działać w układach cyfrowych. Wówczas nie wykorzystujemy w pełni jego możliwości do płynnej regulacji prądu kolektor–emiter przez prąd baza–emiter. Po prostu traktujemy go jak przełącznik: prąd płynie – prąd nie płynie.
Aby lepiej zrozumieć działanie tranzystora w układach cyfrowych, zapoznajmy się najpierw z przekaźnikiem, czyli jego poprzednikiem z pierwszych komputerów (rys. 15.47). W przekaźniku prąd płynący przez obwód wejściowy zasila elektromagnes, który porusza wyłącznikiem i włącza obwód wyjściowy. Tranzystor robi to samo, ale miliardy razy szybciej.



Rys. **15.47.** Przekaźnik może służyć do sterowania żarówką sieciową za pomocą obwodu niskiego napięcia: a) prąd z baterii nie płynie, obwód napięcia 230 V jest otwarty, żarówka nie świeci, b) prąd z baterii płynie, elektromagnes powoduje zamknięcie obwodu napięcia 230 V, żarówka świeci

Bramki logiczne

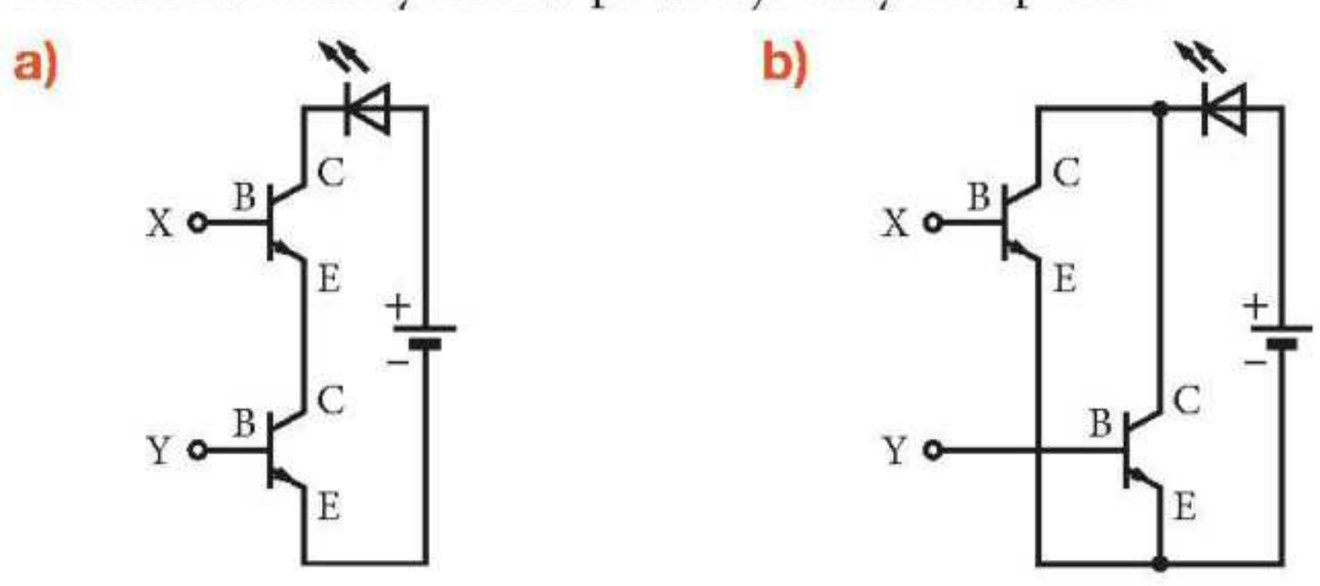
Z kilku tranzystorów możemy zbudować tak zwaną bramkę logiczną, czyli układ, w którym napięcie na wyjściu pojawia się tylko w określonej przez nas sytuacji, np. gdy:

- na obu wejściach jest napięcie,
- co najmniej na jednym z dwóch wejść jest napięcie,
- na (jedynym) wejściu nie ma napięcia.

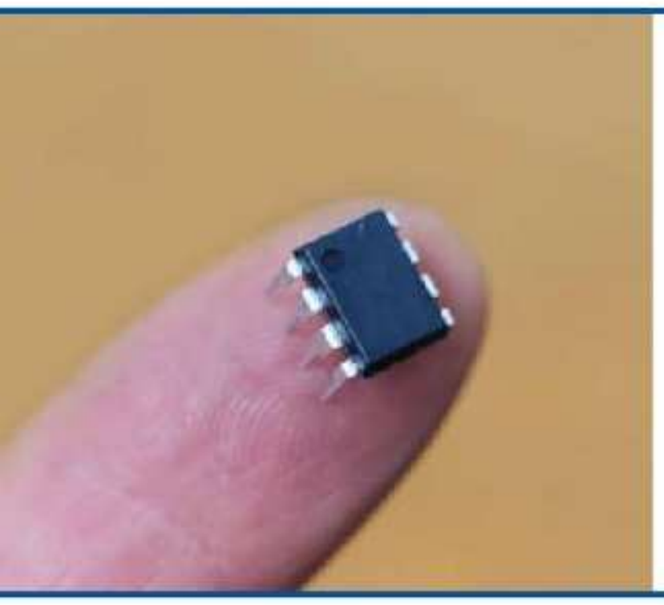
Przykładowe układy zostały w uproszczeniu przedstawione na rysunku 15.48. Funkcję urządzenia wyjściowego pełni w nich dioda świecąca. Wszystkie działania arytmetyczne w układzie dwójkowym można wykonać za pomocą takich układów. Na przykład mnożenie dwóch liczb jednocyfrowych może wykonywać układ z rys. 15.48a, ponieważ iloczyn dwóch liczb jednocyfrowych w układzie dwójkowym jest równy 1 tylko wtedy, gdy obie są równe 1:

$$0 \cdot 0 = 0 \qquad 0 \cdot 1 = 0 \qquad 1 \cdot 0 = 0 \qquad 1 \cdot 1 = 1$$

Odpowiada temu bardziej fizyczny opis: napięcie na wyjściu pojawia się tylko, gdy na obu wejściach jest napięcie, czyli tak jak w układzie 15.48a. Z wielu bramek logicznych buduje się układy dodające i mnożące wielocyfrowe liczby zapisane w układzie dwójkowym. Ostatecznie z milionów lub miliardów tranzystorów powstaje cały komputer.



Rys. **15.48.** Tranzystory połączone tak, aby dioda świeciła, gdy napięcie pojawi się: a) jednocześnie między wejściem X i ujemnym biegunem baterii oraz między wejściem Y i ujemnym biegunem baterii, b) między co najmniej jednym z wejść X lub Y oraz ujemnym biegunem baterii



A to ciekawe

Już w czasach pierwszych komputerów eksperci wróżyli ich miniaturyzację. „Być może nie będą ważyć więcej niż półtorej tony" – mówiono. A przecież możliwości obliczeniowe ówczesnych komputerów należy porównywać raczej z obecnymi kieszonkowymi kalkulatorami.
Miniaturyzacja sprzętu elektronicznego była możliwa dzięki wynalezieniu układów scalonych – w jednej kostce (patrz zdjęcie) mieści się wiele milionów tranzystorów i innych elementów elektronicznych.

Po tej lekcji powinieneś

- rozumieć działanie tranzystora jako wzmacniacza;
- opisywać zastosowania tranzystora w technice analogowej i cyfrowej;
- budować prosty obwód z tranzystorem.

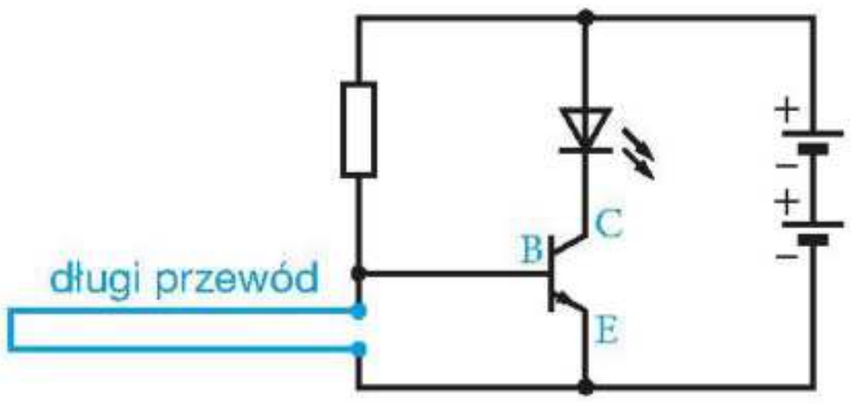
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Dwukrotnie powtórz doświadczenie ze s. 326: raz dotykaj przewodów suchymi palcami, a raz palcami zwilżonymi. Kiedy dioda świeci jaśniej? Z czego wynika różnica? Zmierz natężenie prądu płynącego przez bazę i przez emiter w obu przypadkach.

2. Przeanalizuj schemat.

a) Co się stanie, gdy przerwiemy długi przewód: dioda zacznie świecić czy przestanie świecić? Jakie zastosowanie może mieć taki układ?



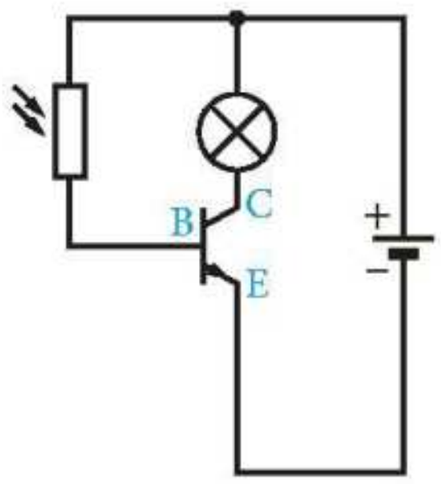
b) Zbuduj taki układ. Użyj tranzystora BC-107, dwóch ogniw AA oraz opornika 10 kΩ. Czy układ działa zgodnie z twoimi przewidywaniami?

3. Fotorezystor to opornik, którego opór się zmniejsza, gdy ten element elektroniczny zostanie oświetlony. Oto jego symbol:

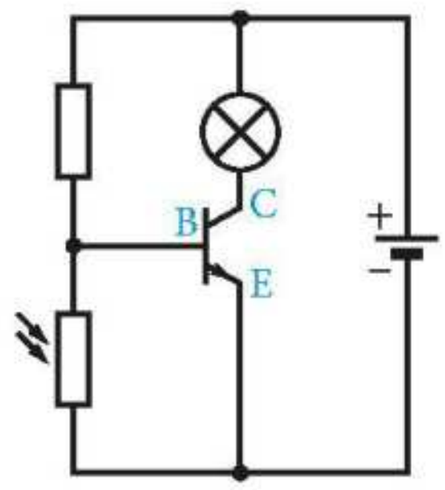


W każdym z poniższych obwodów wykorzystano fotorezystor oraz tranzystor do włączania lub wyłączania żarówki. W którym przypadku żarówka się włącza, gdy jest jasno, a w którym – gdy jest ciemno? Uzasadnij swoje odpowiedzi.

A.



B.



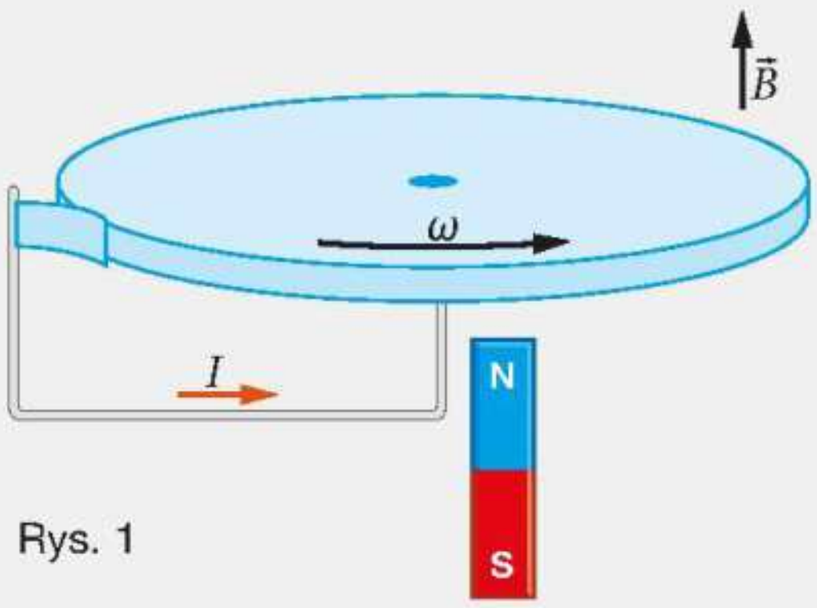
4*. Zaprojektuj układ złożony z tranzystorów, w którym dioda LED świeci wtedy, gdy jest napięcie na jednym z dwóch wejść, ale nie na obu naraz. Zbuduj taki układ np. z tranzystorów BC-107 i sprawdź, czy działa zgodnie z założeniem.

Dynamo we wnętrzu Ziemi

Ziemskie pole magnetyczne jest wszechobecne i bardzo łatwe do wykrycia. O jego istnieniu wiedzieli uczeni i podróżnicy w starożytności, a dzisiaj wie o nim każdy, kto miał w ręku kompas.

Jednak niewiele zapytanych osób potrafiłoby wyjaśnić, skąd ono się bierze. Na usprawiedliwienie niewiedzących trzeba przyznać, że naukowcy badający fizykę Ziemi, geofizycy, sami nie do końca rozumieją mechanizm jego powstawania. Nie znaczy to, że są wobec tego zjawiska bezradni – w 1919 roku Larmor zapostulował mechanizm, który dziś jest już powszechnie uznawany. Mechanizm ten oparty jest na zasadzie działania prądnicy.

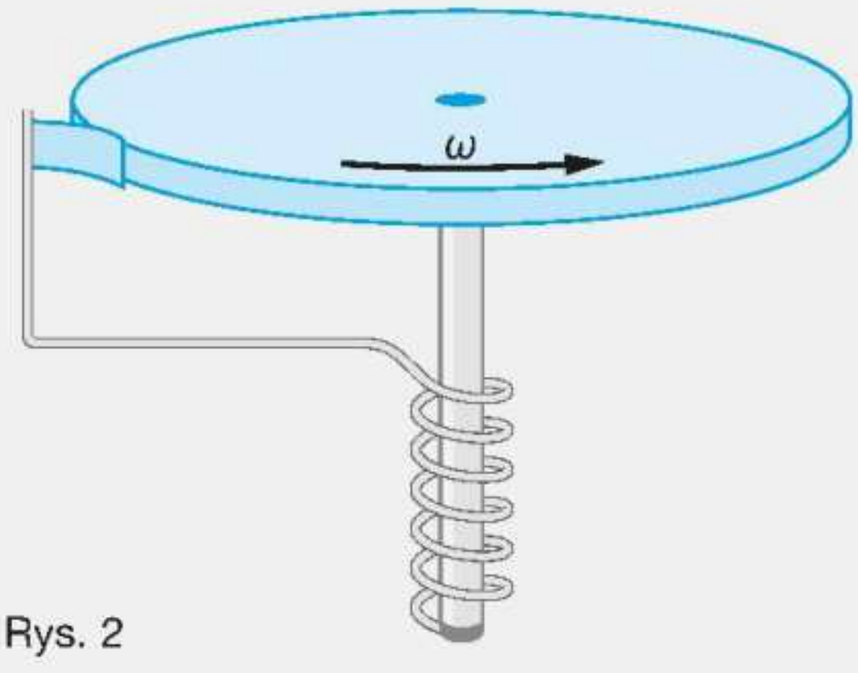
Jedno z pierwszych urządzeń tego typu zbudowanych przez Faradaya przedstawia rysunek 1: wirujący metalowy dysk umieszczony jest w polu magnetycznym stałego magnesu. Do brzegu dysku dotyka kontakt (np. metalowa szczotka), drugi przyłączony jest do środka dysku. Ruch wirowy dysku powoduje powstanie różnicy potencjałów między zewnętrznym brzegiem a środkiem, a ta z kolei powoduje przepływ niewielkiego, stałego prądu w obwodzie.



Rys. 1

Dobrze – ale skąd takie urządzenie w środku Ziemi? Skąd wirujący przewodnik i zewnętrzny magnes?

Na pierwsze pytanie odpowiedzieć jest bardzo łatwo: we wnętrzu Ziemi znajduje się dużo płynnego żelaza, które jest znakomitym przewodnikiem. Z kolei konwekcja, czyli unoszenie gorętszych i lżejszych warstw żelaza, połączone z obrotem Ziemi wokół własnej osi, dostarcza energii mechanicznej. Brakuje tylko magnesu – wszak w pobliżu naszej planety nie unosi się żadna namagnesowana sztabka lub podkowa. Czy jednak prądnica koniecznie potrzebuje zewnętrznego pola magnetycznego aby działać? Popatrzmy na rysunek 2.



Rys. 2

Magnes zewnętrzny zastąpiono tutaj cewką, przez którą przepływa indukowany prąd. Przypuśćmy, że w urządzeniu płynie już prąd. Przy konfiguracji takiej, jak na rysunku, pole magnetyczne wytworzone w cewce ma taki zwrot, że ruch dysku wytwarza siłę elektromotoryczną podtrzymującą prąd [...]. Taka prądnica może sama działać bez stałego magnesu z zewnątrz, ale wymaga początkowego impulsu. Ale to nie wszystko: okazuje się, że jeśli prędkość wirowania dysku jest odpowiednio duża, układ bez ingerencji z zewnątrz wytwarza pole magnetyczne! Jak to możliwe? Po prostu dla odpowiednio

dużych prędkości obrotu najmniejszy prąd, jaki powstanie w obwodzie, czy to na skutek bezładnego ruchu elektronów, czy też wzbudzony przez jakieś niewielkie pole magnetyczne z zewnątrz, zostaje wzmocniony, aż wartości natężenia prądu i pola osiągną stabilną wartość równowagową, czyli taką, której nie są w stanie zniszczyć niewielkie zaburzenia. Fizycy mówią, że stan „bez prądu" stał się stanem równowagi niestabilnej.

Analogiczny mechanizm, tzw. geodynamo, wyjaśnia jakościowo istnienie pola magnetycznego wokół Ziemi. Wspomnieliśmy jednak na początku, że sprawa ziemskiego pola magnetycznego nie jest jeszcze do końca wyjaśniona. Fizycy chcieliby wymodelować, czyli odtworzyć to zjawisko przy użyciu komputera. Problem jest jednak bardzo trudny: trzeba jednocześnie śledzić zachowanie linii pola magnetycznego, przepływ prądu i ruch gorącego płynu, przy czym wszystkie te ruchy powiązane są skomplikowanymi równaniami różniczkowymi, tzw. równaniami magnetohydrodynamiki. W szczególności chcieliby dzięki symulacjom uzyskać odpowiedź na pytanie, skąd bierze się najbardziej chyba zadziwiająca własność ziemskiego pola magnetycznego, a mianowicie jego skłonność do zamiany biegunów magnetycznych co kilkanaście do kilkuset tysięcy lat. Dane geologiczne w postaci namagnesowania zastygłych w dawnych epokach skał pokazują, że takie zmiany orientacji pola magnetycznego zdarzały się w historii wiele razy, ale w bardzo nieregularnych odstępach.

Na podstawie artykułu:
Mikołaj Korzyński,
„Delta" 2005, nr 11

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Co to jest geodynamo?

2. Czy prądnica ziemska potrzebuje zewnętrznego pola magnetycznego, aby działać? A jak jest z prądnicami produkowanymi przez człowieka?

3. Dowiedz się, na czym polega zjawisko przebiegunowania magnetycznego Ziemi i skąd o nim wiadomo.

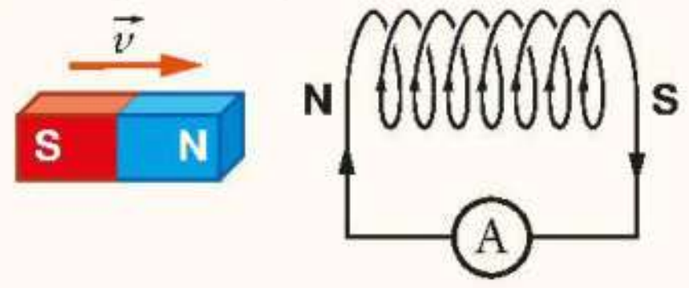
4. Zauważ, że w prądnicy przedstawionej na rysunku 1. zamiast dysku i magnesu można by użyć tylko namagnesowanego dysku. Taka prądnica jest zbudowana analogicznie do prostego silnika elektrycznego, również wynalezionego przez Michaela Faradaya. Znajdź opis takiego silnika w poprzednim rozdziale tej książki.

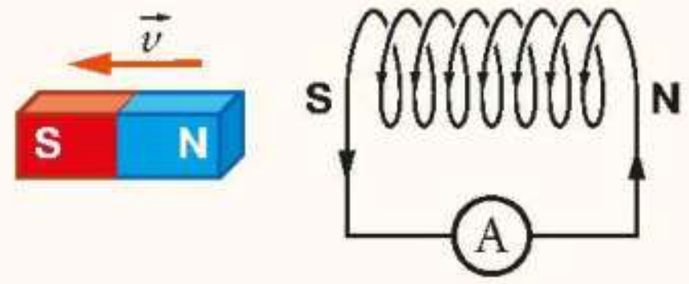
Podsumowanie
Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

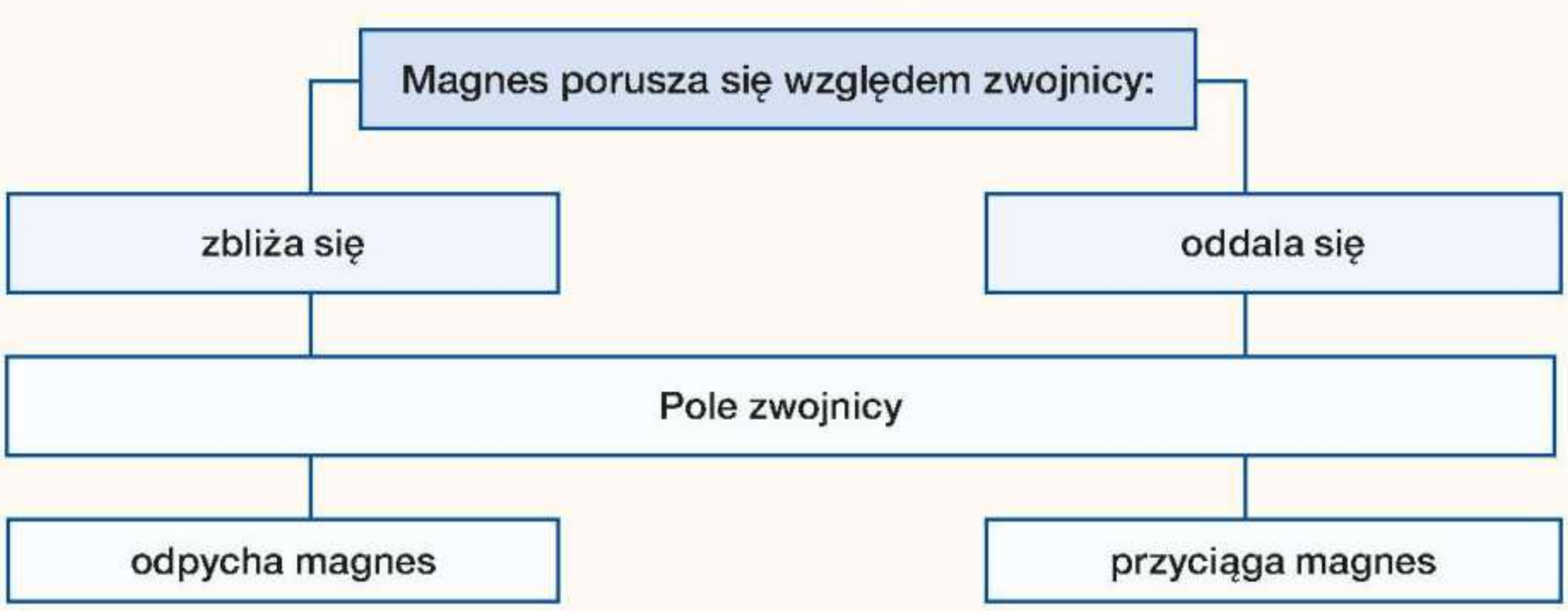
- Powstawanie napięcia podczas zmian pola magnetycznego nazywamy **indukcją elektromagnetyczną**.
- **Prawo Faradaya** ujęte jakościowo:
  Zjawisko **indukcji elektromagnetycznej** zachodzi wtedy, gdy zmienia się liczba linii pola magnetycznego przecinających obszar ograniczony pętlą przewodnika. Indukowana **siła elektromotoryczna** jest tym większa, im szybciej następują te zmiany. Wzbudzony w przewodniku prąd nazywamy **prądem indukcyjnym**.
- **Prawo Faradaya** ujęte ilościowo:
  Siła elektromotoryczna $\mathcal{E}$ indukująca się w pętli jest równa szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej $\Delta\Phi$ przechodzącego przez powierzchnię ograniczoną tą pętlą:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

  Im krótszy czas trwania zmiany strumienia indukcji magnetycznej, tym większa wartość bezwzględna siły elektromotorycznej indukcji.
- **Reguła Lenza**
  Kierunek przepływu prądu indukcyjnego jest taki, że wytwarzane przez niego pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie, która ten prąd wywołuje. Na rysunku a) magnes zbliża się do zwojnicy, a na rysunku b) oddala się od niej.



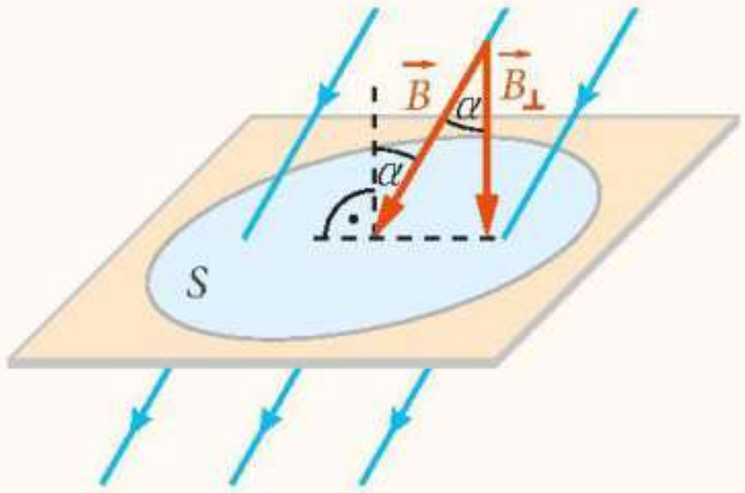




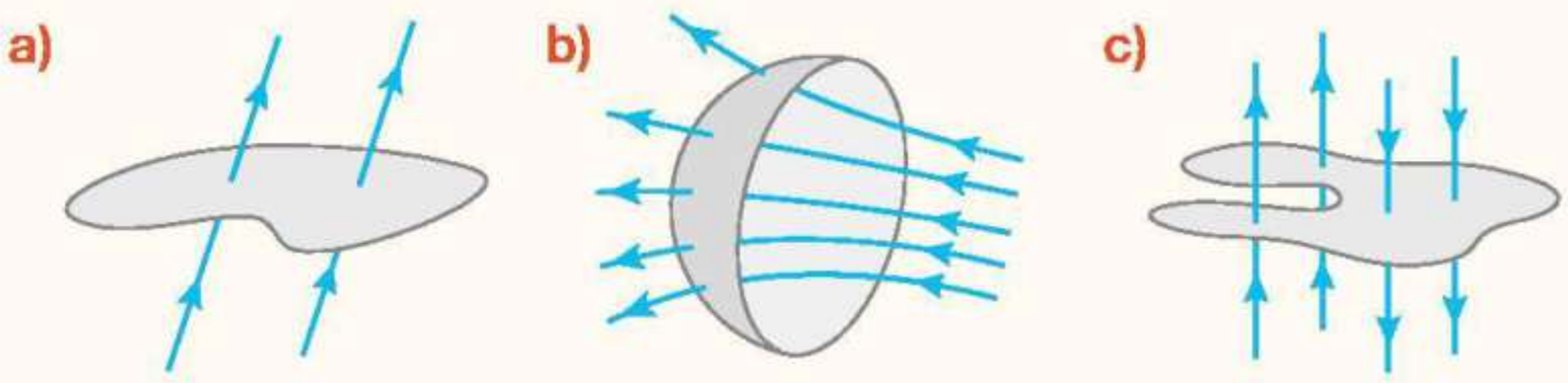
■ **Strumień indukcji magnetycznej** (strumień pola magnetycznego przez powierzchnię) Φ:

$$\Phi = BS\cos\alpha = B_{\perp} S$$

gdzie: B – wartość indukcji magnetycznej, S – powierzchnia, α – kąt między $\vec{B}$ i prostą prostopadłą do powierzchni.



- Jednostką strumienia indukcji magnetycznej jest weber: $[\Phi] = 1\ \mathrm{Wb} = 1\ \mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^2$.
- Przyjmujemy, że jeden ze zwrotów linii pola magnetycznego jest dodatni. Gdy linie są zwrócone przeciwnie, zakładamy, że strumień indukcji magnetycznej jest ujemny.

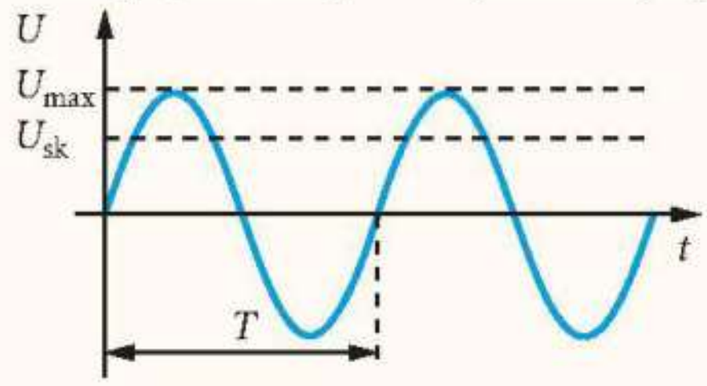


Przez narysowane powierzchnie: a) przechodzą dwie linie pola, b) przechodzi pięć linii pola, c) przechodzi zero linii pola (tyle samo linii przechodzi w jedną stronę co w drugą)

■ Napięcie przemienne opisujemy wzorem:

$$U(t) = U_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

gdzie: $U_{\max}$ – maksymalna wartość napięcia, czyli amplituda jego zmian, T – okres zmian.



- Jeśli opornik podłączymy do napięcia przemiennego o amplitudzie $U_{\max}$, to średnia moc prądu będzie taka sama jak w sytuacji, w której ten opornik zostałby podłączony do napięcia stałego o pewnej wartości U_{sk}. Wartość U_{sk} nazywamy **napięciem skutecznym**, odpowiadającym amplitudzie $U_{\max}$.

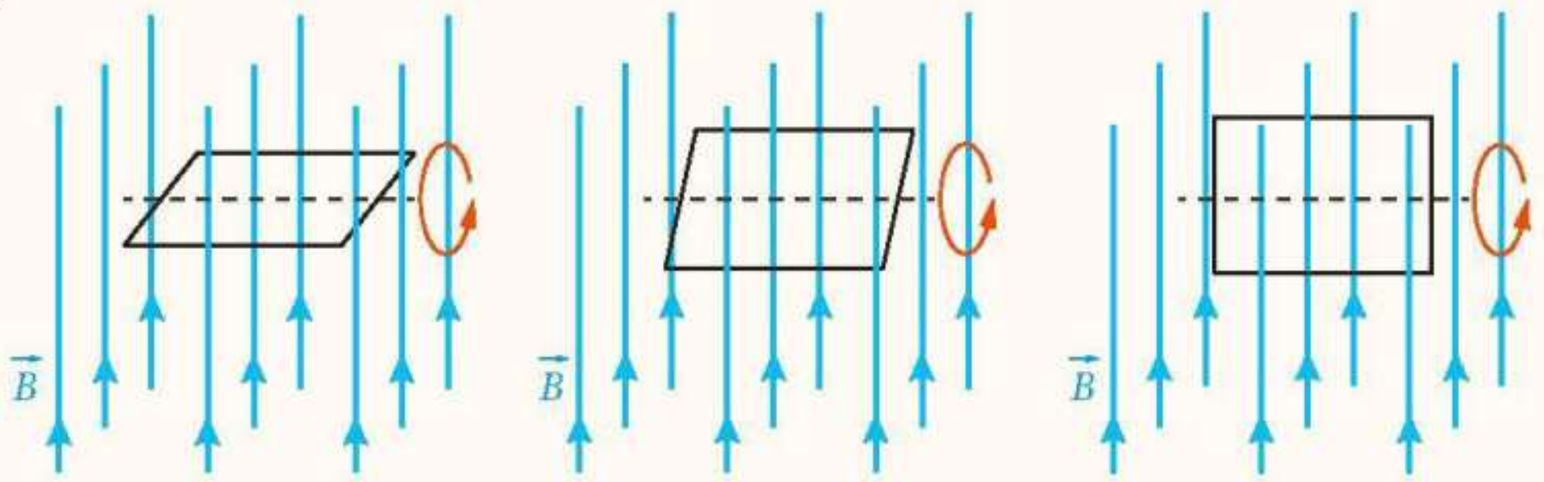
$$U_{sk} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$$

- W obwodzie prądu przemiennego zmienia się zarówno napięcie, jak i natężenie prądu. Wartość skuteczna natężenia wynosi:

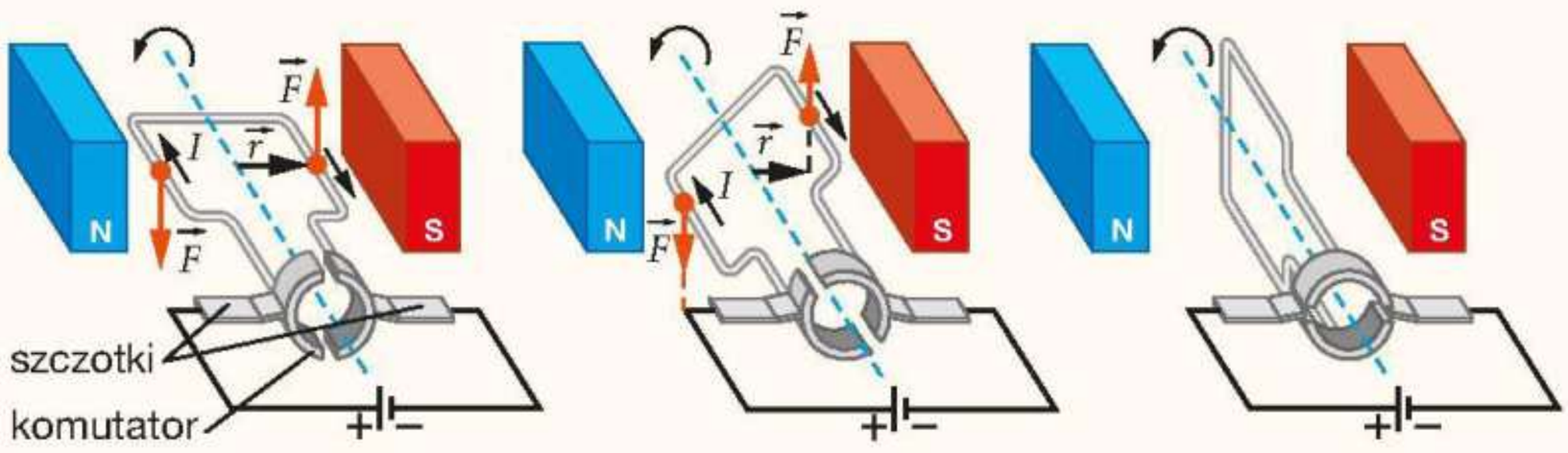
$$I_{sk} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

- W domowej sieci elektrycznej występuje napięcie przemienne o wartości skutecznej 230 V i częstotliwości 50 Hz.
  Spośród dwóch przewodów w gniazdku jeden jest stale pod napięciem 0 względem ziemi, a drugi pod napięciem zmieniającym się cyklicznie.
  - Wśród zabezpieczeń sieci domowej mamy bezpieczniki, wyłączniki różnicowoprądowe oraz uziemienie.
  - Porażenie prądem z sieci domowej może być bardzo groźne, dlatego warto znać zasady udzielania pierwszej pomocy (patrz s. 300).

- Najprostszą **prądnicą** prądu przemiennego jest ramka obracająca się w jednorodnym polu magnetycznym.



- Najprostszym modelem **silnika** elektrycznego jest pojedyncza ramka poruszająca się w polu magnetycznym. Silnik może działać jako prądnica prądu stałego.

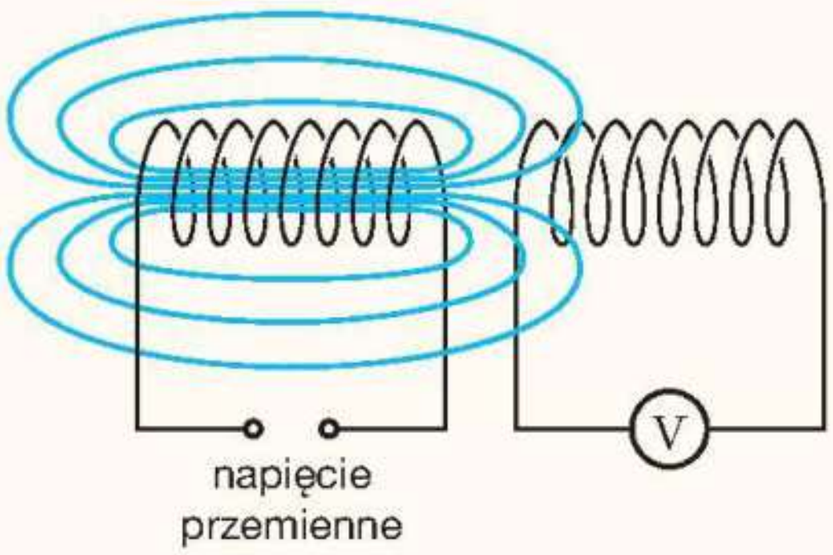


- Zjawisko **indukcji wzajemnej** możemy zilustrować za pomocą schematu:

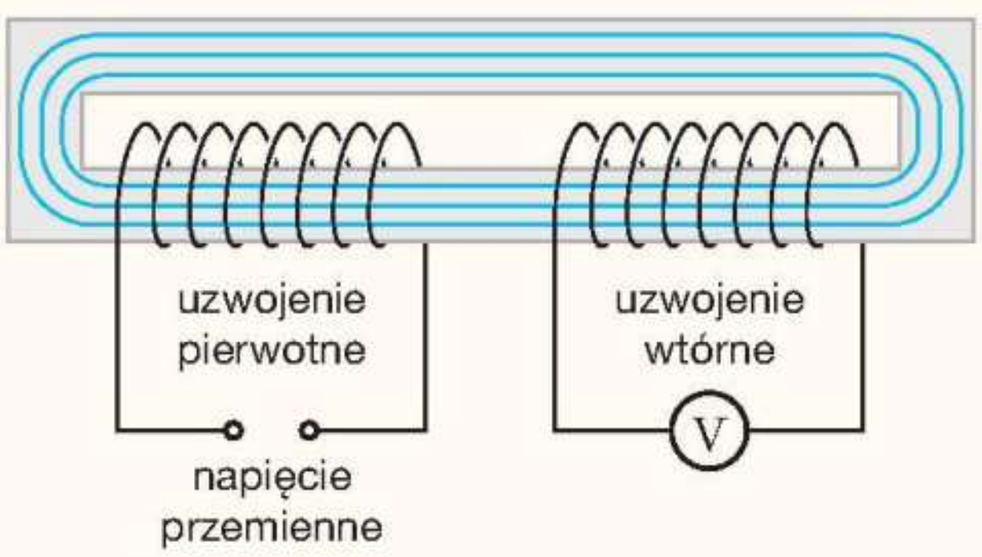
zmiana natężenia prądu w pierwszej cewce ⇨ zmiana strumienia indukcji magnetycznej wytwarzanego przez pierwszą cewkę i przenikającego przez drugą cewkę ⇨ indukowanie się SEM w drugiej cewce

Obie cewki mogą być bez rdzenia (rys. a) lub na wspólnym rdzeniu (rys. b).

a)



b)



- Dwie cewki na wspólnym zamkniętym rdzeniu tworzą **transformator**. Cewka podłączona do źródła napięcia to **uzwojenie pierwotne**, a cewka, w której indukuje się SEM, to **uzwojenie wtórne**.
  Równanie transformatora (bez strat energii):

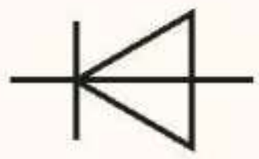
$$\frac{U_w}{U_p} = \frac{n_w}{n_p} = \frac{I_p}{I_w}$$

  gdzie:

  U_w – napięcie na uzwojeniu wtórnym, U_p – napięcie na uzwojeniu pierwotnym, n_w – liczba zwojów uzwojenia wtórnego, n_p – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, I_p – natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym, I_w – natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym.

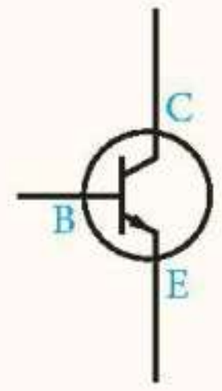
- Zmienne pole magnetyczne wytwarzane przez cewkę powoduje indukowanie się napięcia w niej samej – jest to **zjawisko samoindukcji**.

- **Dioda** (symbol diody na rysunku poniżej) jest elementem elektronicznym, który przewodzi prąd elektryczny tylko w jedną stronę.



  Dioda ma zastosowanie w prostownikach oraz jako źródło światła.

- **Tranzystor** to trójelektrodowy półprzewodnikowy element elektroniczny, który może służyć jako wzmacniacz. Ma on trzy końcówki: bazę, kolektor i emiter. Prąd płynący między bazą a emiterem steruje większym prądem płynącym między kolektorem a emiterem.

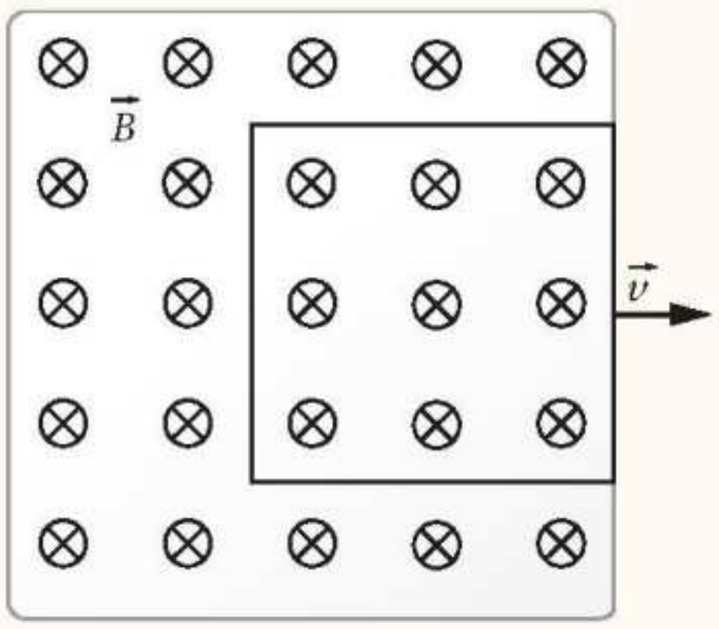


Sposób na zadanie

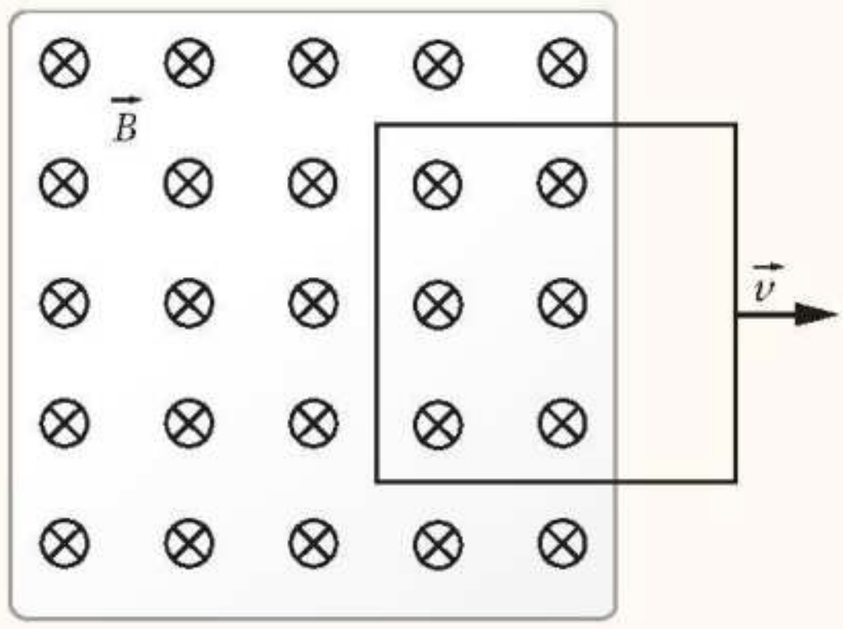
Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Kwadratowa ramka z drutu, początkowo znajdująca się w całości w jednorodnym polu magnetycznym prostopadłym do jej powierzchni (rys. a), została wyciągnięta z obszaru pola ruchem jednostajnym (rys. b).

a)



b)

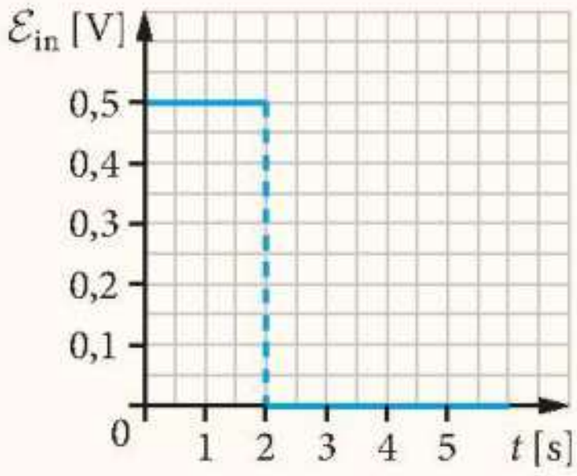


Zadanie 1.1 (0–1)

Określ kierunek przepływu prądu indukcyjnego w ramce podczas jej wyciągania z obszaru pola magnetycznego. Podaj nazwę reguły, z której wynika ten kierunek.

Zadanie 1.2 (0–1)

Wykres zależności SEM indukowanej w ramce od czasu przedstawiono na wykresie. Dorysuj wykres zależności SEM od czasu w sytuacji, gdy ramka porusza się z dwa razy mniejszą prędkością.

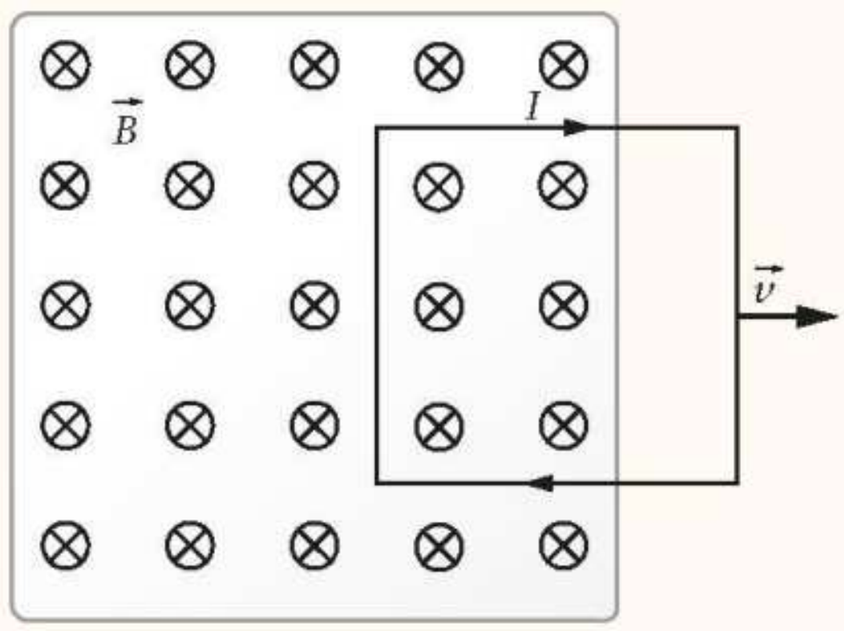


Rozwiązanie:

Ad 1.1

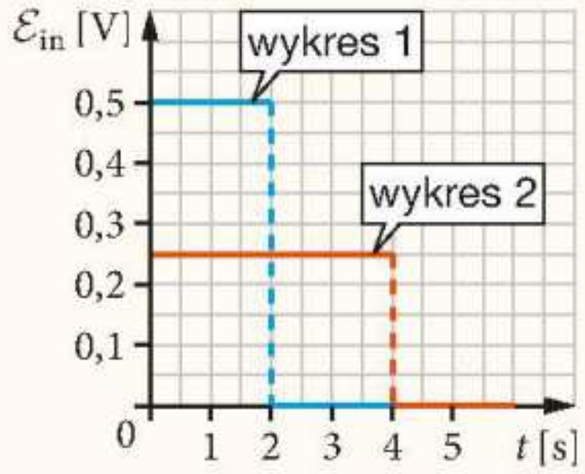
Wskazówka 1. Kółko z krzyżykiem oznacza, że linie pola magnetycznego, w którym znajduje się ramka, są zwrócone za kartkę.

Kierunek przepływu prądu w ramce wynika z reguły Lenza: jest taki, że prąd wytwarza pole magnetyczne przeciwdziałające zmianie, która go wytworzyła.
Ta zmiana polegała na zmniejszeniu strumienia pola przez ramkę. Aby jej przeciwdziałać, prąd wytwarza pole skierowane tak samo jak pole, z którego wyciągamy ramkę. Wówczas strumień pola wytwarzany przez prąd dodaje się do strumienia pola zewnętrznego, co przeciwdziała zmniejszaniu strumienia.
Aby uzyskać takie pole, prąd powinien płynąć w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara.



Ad 1.2.

Wskazówka 2. SEM może się indukować tylko wtedy, gdy ramka jest wysuwana (lub wsuwana) w pole magnetyczne.



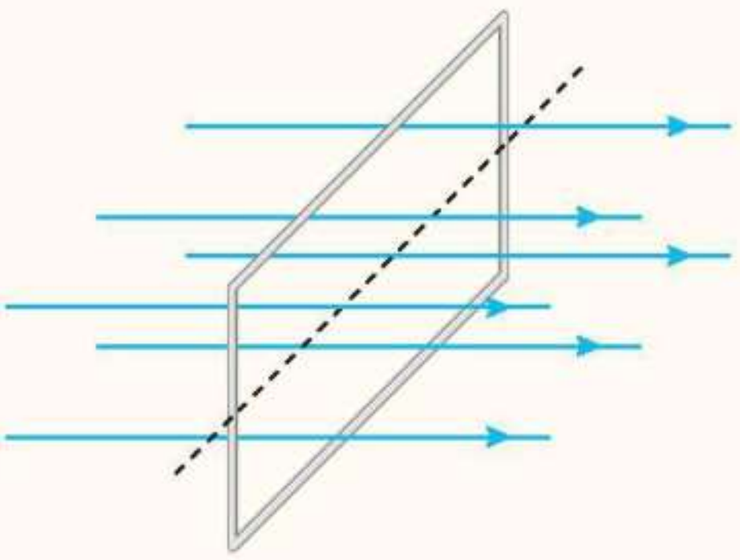
Ponieważ prędkość ramki ma być dwa razy mniejsza, więc jej wyciąganie z pola magnetycznego będzie trwać dwa razy dłużej. Z prawa Faradaya wynika, że wyindukowana SEM będzie wówczas dwa razy mniejsza. Na podstawie zapisanych informacji wykonaliśmy wykres.

Warto zapamiętać!

- Wyindukowana SEM zależy od szybkości zmian liczby linii pola przechodzących przez obszar ograniczony ramką, więc kiedy ramka porusza się (wsuwa lub wysuwa) wolniej, wolniej zmienia się także liczba linii przechodzących przez ramkę.

Zadanie 2. (0–2)

Prostokątna ramka z drutu jest umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym prostopadle do linii pola. Oblicz, o jaki kąt należy ją obrócić, aby strumień indukcji pola magnetycznego przechodzącego przez ramkę zmniejszył się 8 razy.



Rozwiązanie:

Początkowo strumień indukcji pola magnetycznego wynosi:

$$\Phi = BS$$

gdzie B jest indukcją pola, a S powierzchnią ramki.

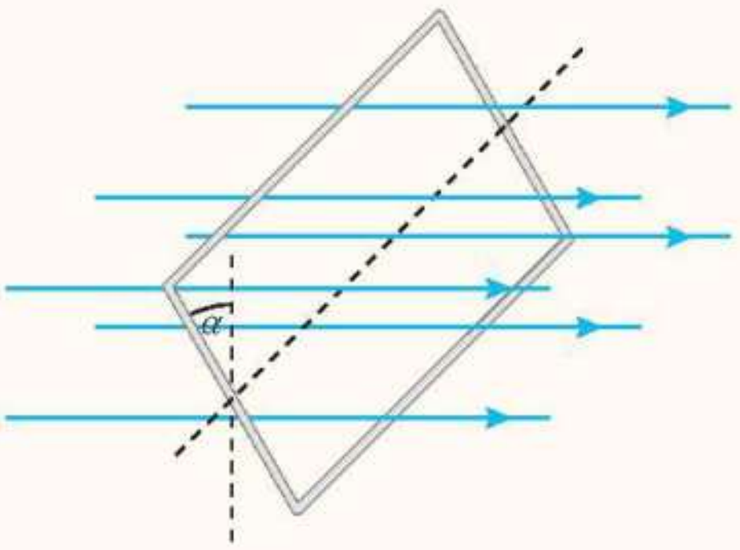
Po obróceniu ramki o kąt α strumień zmniejszy się do wartości:

$$\Phi' = BS\cos\alpha$$

Z warunków zadania wynika, że:

$$\Phi' = \frac{1}{8}\Phi \rightarrow BS\cos\alpha = \frac{1}{8}BS$$

$$\cos\alpha = \frac{1}{8} = 0{,}125$$



Z tablic możemy odczytać, że kąt, o jaki trzeba obrócić ramkę, wynosi: $\alpha \approx 83°$.

Odpowiedź: Aby strumień pola przechodzący przez ramkę zmniejszył się ośmiokrotnie, ramkę należy obrócić o 83°.

Warto zapamiętać!

- Pole magnetyczne przechodzi przez największą powierzchnię, kiedy ramka jest prostopadła do linii pola, zatem wtedy strumień indukcji magnetycznej jest największy. Kiedy ramka jest ustawiona równolegle do linii pola, strumień indukcji magnetycznej wynosi zero – pole magnetyczne nie przechodzi przez powierzchnię ograniczoną ramką.

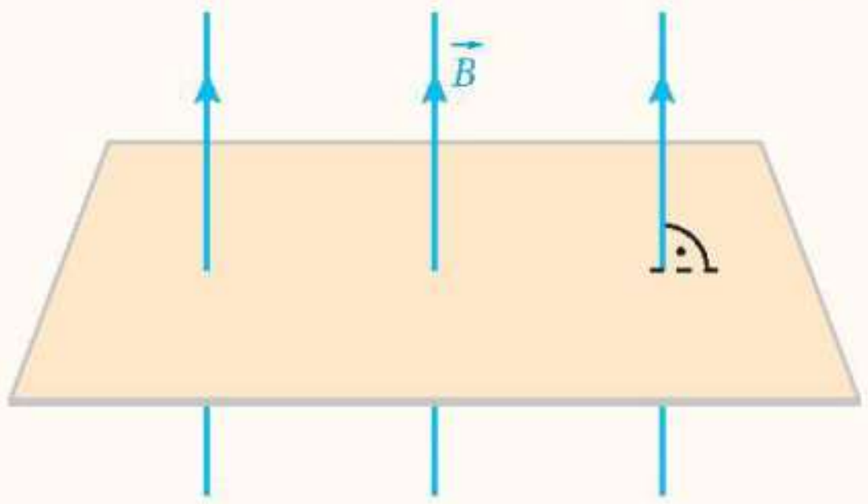
Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

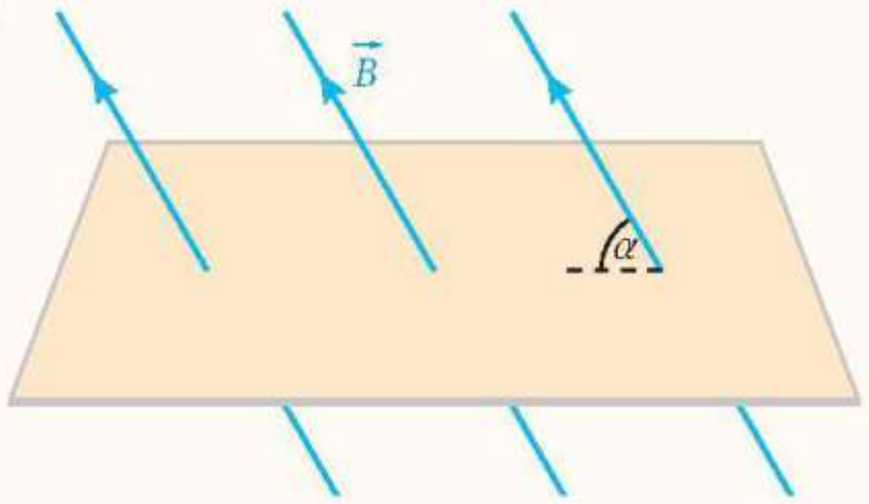
Zadanie 1. Strumień indukcji

1.1. Na poniższych rysunkach zilustrowano dwa różne ustawienia powierzchni S względem linii jednorodnego pola magnetycznego o indukcji $\vec{B}$.

A.

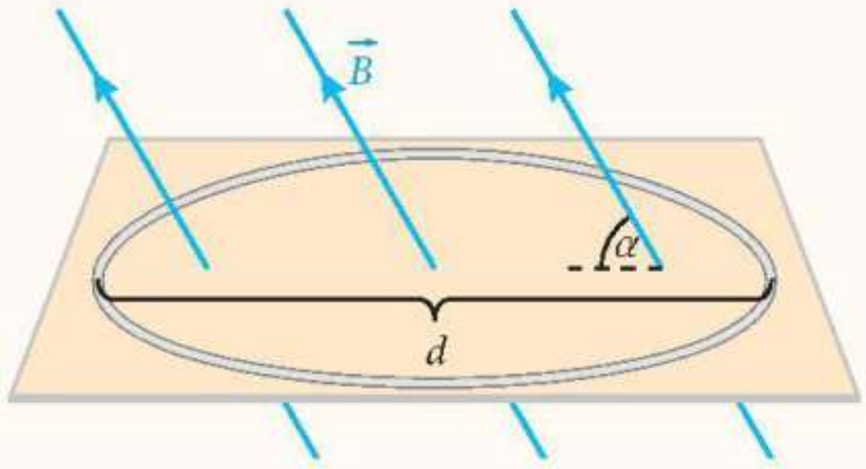


B.



Wyznacz stosunek strumienia indukcji w sytuacji na rysunku B do strumienia indukcji w sytuacji na rysunku A.

1.2. Linie jednorodnego pola magnetycznego o indukcji 50 mT przecinają płaszczyznę pod kątem $\alpha = 60°$. W tej płaszczyźnie umieszczono ramkę z drutu w kształcie koła o średnicy 10 cm (rys. obok). Oblicz strumień indukcji przechodzący przez ramkę.



1.3. Ramkę opisaną w zadaniu 1.2 zaczęto obracać ze stałą prędkością kątową ω. W czasie obrotu, gdy kąt α zmieniał się z 60° do 61°, indukowana SEM wynosiła 5 mV. Wyznacz prędkość kątową ω.

Uwaga. SEM indukcji zmienia się podczas obrotu, ale w krótkim czasie odpowiadającym obrotowi o 1° można pominąć te zmiany.

Zadanie 2. Transformator

2.1. W jaki sposób jest zbudowany typowy transformator? Wskaż prawidłową odpowiedź.

A. Są to dwie cewki umieszczone w powietrzu lub próżni.

B. Są to dwie cewki, z których jedna jest umieszczona w powietrzu lub próżni, a druga – nawinięta na rdzeń z ferromagnetyku.

C. Są to dwie cewki nawinięte na wspólny rdzeń z ferromagnetyku.

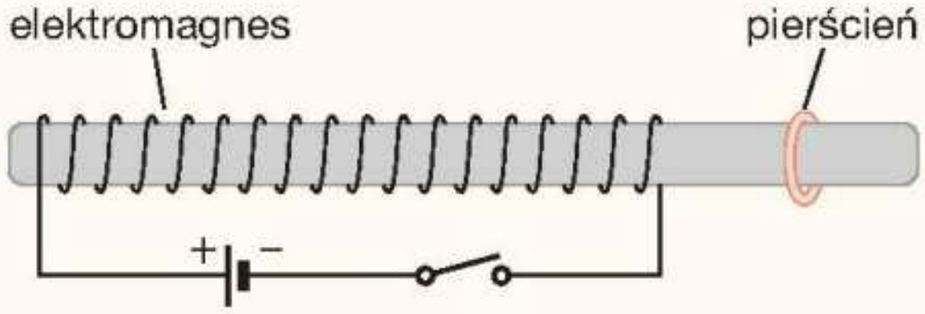
D. Są to dwie cewki nawinięte na oddzielne rdzenie z ferromagnetyku.

2.2. Mamy do dyspozycji: źródło napięcia przemiennego o wartości skutecznej 240 V, urządzenie przystosowane do zasilania napięciem przemiennym o wartości skutecznej nie większej niż 12 V, rdzeń z ferromagnetyku oraz trzy cewki o liczbie zwojów równej odpowiednio n_1, $n_2 = 15n_1$, i $n_3 = 20n_1$. Zaproponuj, w jaki sposób z wymienionych elementów zbudować transformator, który pozwoli zasilić urządzenie z opisanego źródła napięcia.

2.3. Zastanów się, czy można za pomocą transformatora przekształcić prąd przemienny o napięciu skutecznym 3 V oraz o natężeniu skutecznym 0,2 mA w taki sposób, aby natężenie skuteczne pozostało bez zmian, a napięcie skuteczne wzrosło do 12 V. Odpowiedź krótko uzasadnij.

Zadanie 3. Elektromagnes

Na ustawiony poziomo rdzeń elektromagnesu założono miedziany pierścień.



Co się stanie, gdy elektromagnes podłączymy do źródła napięcia stałego?

A. Nic się nie stanie, bo miedź nie jest ferromagnetykiem.

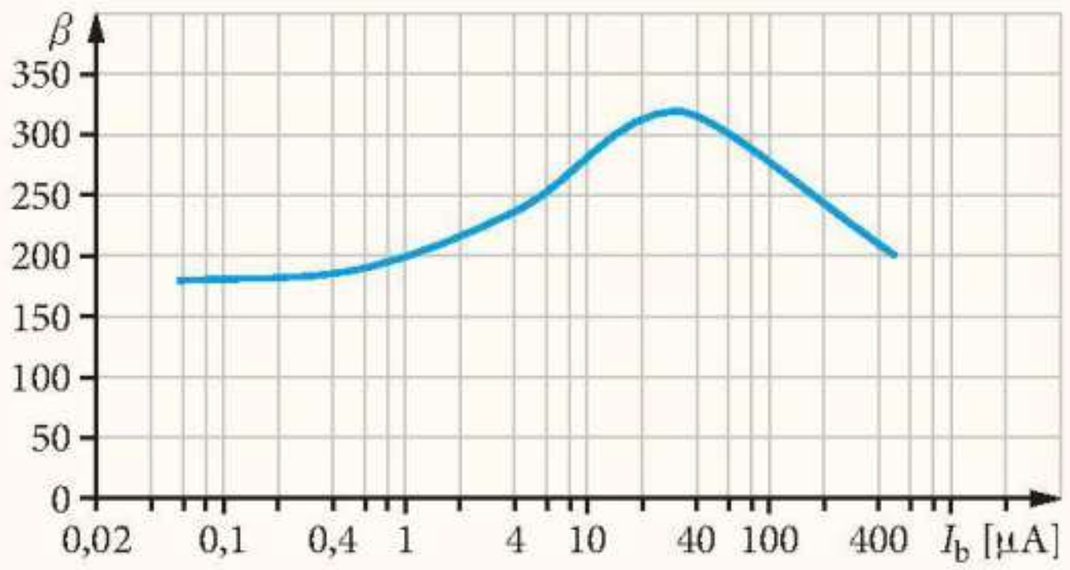
B. Pierścień przesunie się w lewo.

C. Pierścień przesunie się w prawo.

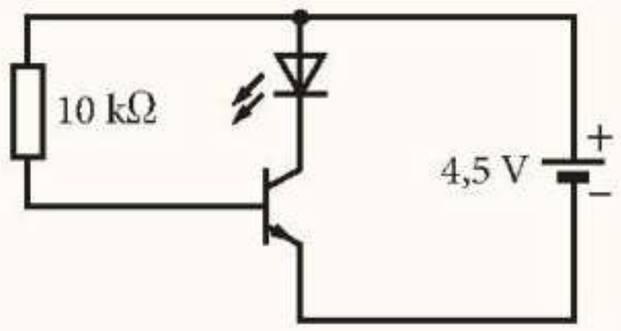
D. Pierścień przesunie się w lewo lub prawo w zależności od kierunku przepływu prądu.

Zadanie 4. Układ tranzystora z diodą

Wzmocnienie prądowe tranzystora to stosunek natężenia prądu płynącego przez kolektor do natężenia prądu płynącego przez bazę: $\beta = \frac{I_c}{I_b}$. Wykres przedstawia zależność tego wzmocnienia od I_b dla pewnego tranzystora. Zwróć uwagę, że skala na osi poziomej jest logarytmiczna.



Na podstawie wykresu wyznacz natężenie prądu płynącego przez diodę świecącą w układzie zbudowanym według poniższego schematu. Przyjmij, że napięcie między bazą a emiterem wynosi 0,6 V, a opór wewnętrzny baterii można pominąć.



Tabele

Tabela 1. Wielokrotności i podwielokrotności jednostek

Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik
E	eksa	10^{18}	M	mega	10^{6}	d	decy	10^{-1}	n	nano	10^{-9}
P	peta	10^{15}	k	kilo	10^{3}	c	centy	10^{-2}	p	piko	10^{-12}
T	tera	10^{12}	h	hekto	10^{2}	m	mili	10^{-3}	f	femto	10^{-15}
G	giga	10^{9}	da	deka	10^{1}	μ	mikro	10^{-6}	a	atto	10^{-18}

Tabela 2. Stałe fizyczne

Stała grawitacji		$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$
Jednostka astronomiczna		$1\ \mathrm{au} = 149{,}6\ \mathrm{mln\ km} = 1{,}496 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m} \approx 150\ \mathrm{mln\ km}$
Masa Słońca		$M_S = 1{,}988 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg} \approx 2 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg}$
Masa Ziemi		$M_Z = 5{,}97 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg} \approx 6 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$
Promień Ziemi	**średni**	6370 km
	równikowy	6378,1 km
	biegunowy	6356,8 km
Przenikalność elektryczna próżni		$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N \cdot m^2}}$
Stała elektryczna		$k = 8{,}988 \cdot 10^{9} \cdot \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \approx 9 \cdot 10^{9} \cdot \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}$
Przenikalność magnetyczna próżni		$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A^2}}$
Ładunek elementarny		$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$
Masa protonu		$m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
Masa neutronu		$m_n = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
Masa elektronu		$m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$
Prędkość światła w próżni		$c \approx 3 \cdot 10^{8} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Tabela 3. Układ Słoneczny

Nazwa	Masa [$\cdot 10^{24}$ kg]	Średnica [km]	Średnia odległość od Słońca [mln km]	Okres obiegu wokół Słońca [dni]	Okres obrotu wokół własnej osi [godziny]	Liczba księżyców	Średnia gęstość $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
GWIAZDA							
Słońce	1 988 000	1 392 000			609,12		1408
PLANETY							
Merkury	0,33	4880	57,9	88,0	1407,6	0	5430
Wenus	4,87	12 104	108,2	224,7	5832,5	0	5243
Ziemia	5,97	12 740	149,6	365,2	23,9	1	5520
Mars	0,642	6794	227,9	687,0	24,6	2	3933
Jowisz	1898,6	142 984	778,6	4332,6	9,9	63	1326
Saturn	568,5	120 536	1433,5	10 759,2	10,7	62	687
Uran	86,8	51 118	2872,5	30 685,4	17,2	27	1270
Neptun	102,4	49 528	4495,1	60 189,0	16,1	13	1638
PLANETY KARŁOWATE							
Ceres	0,000946	960	414,0	1680	9,075	0	2080
Pluton	0,0125	2390	5906,4	90 465	153,3	3	1750
Eris	0,017	2400?	10121	203 600	25,9	1	2500?

Uwaga. Znak „?" oznacza, że tej wartości naukowcy jeszcze nie wyznaczyli lub że nie są pewni wyznaczonej wartości.

Tabela 4. Wybrane księżyce planet i planet karłowatych

Nazwa	Masa [$\cdot 10^{21}$ kg]	Średnica [km]	Średnia odległość od planety [tys. km]	Okres obiegu wokół planety [dni]	Okres obrotu wokół własnej osi [dni]	Średnia gęstość $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Ziemia						
Księżyc	73,5	3475	384	27,3	27,3	3350
Mars						
Deimos	0,0000024	15	23,46	1,26	1,26	1750
Fobos	0,0000106	26,8	9,38	0,32	0,32	1900
Jowisz						
Io	89,3	3642	421,6	1,77	1,77	3530
Europa	48,0	3120	671	3,55	3,55	3010
Ganimedes	148,2	5262	1070	7,15	7,15	1940
Kallisto	107,6	4820	1882,7	16,69	16,69	1830
Saturn						
Tytan	134,5	5150	1222	15,94	15,94	1881
Uran						
Tytania	3,52	1598	435,9	8,7	8,7	1710
Neptun						
Tryton	21,4	2706	354,8	5,88	5,88	2050
Pluton – planeta karłowata						
Charon	1,62	1186	19,6	6,39	6,39	1850
Eris – planeta karłowata						
Dysnomia	?	300–400	37	15,7	15,7	?

Uwaga. Znak „?" oznacza, że tej wartości naukowcy jeszcze nie wyznaczyli lub że nie są pewni wyznaczonej wartości.

Tabela 5. Wartości pierwszej i drugiej prędkości kosmicznej dla wybranych ciał niebieskich

Nazwa	Pierwsza prędkość kosmiczna $[\frac{km}{s}]$	Druga prędkość kosmiczna $[\frac{km}{s}]$
Słońce	437	618
Merkury	3,04	4,3
Wenus	7,35	10,4
Ziemia	7,91	11,2
Księżyc	1,68	2,38
Mars	3,54	5,0
Jowisz	42,1	59,5
Saturn	25,5	36,1
Uran	15,1	21,4
Neptun	16,7	23,6
Ceres – planeta karłowata	0,36	0,51
Pluton – planeta karłowata	0,87	1,23
Io – księżyc Jowisza	1,81	2,56
Europa – księżyc Jowisza	1,56	2,20
Ganimedes – księżyc Jowisza	1,94	2,74
Kallisto – księżyc Jowisza	1,73	2,44
Tytan – księżyc Saturna	1,87	2,64
Tryton – księżyc Neptuna	1,03	1,46

Tabela 6. Względna przenikalność elektryczna substancji

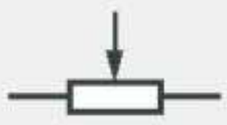
Ośrodek	$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$
Próżnia	1,000
Powietrze	1,00059
Olej silnikowy	2,5
Guma	3
Papier	3,7
Beton	4,5
Tlenek glinu	10
Alkohol metylowy	30
Woda destylowana	80
Lód	100

Tabela 7. Opór właściwy wybranych substancji w temperaturze 25°C

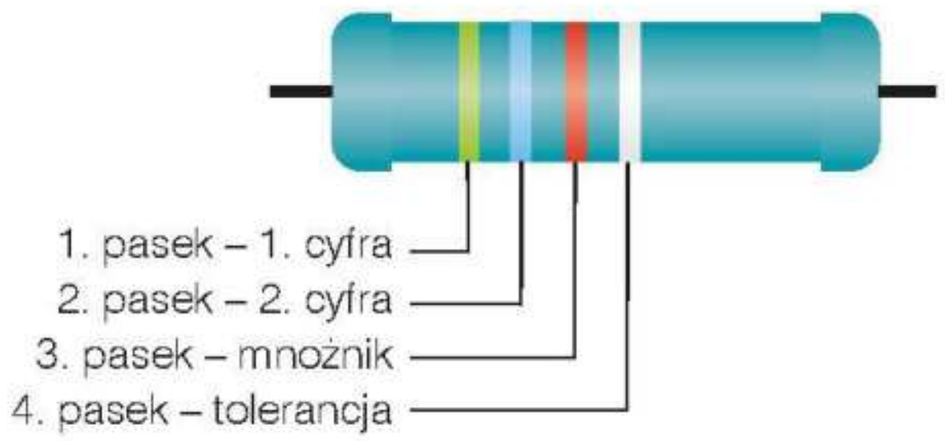
Substancja	$[\Omega \cdot m]$
przewodniki	
Srebro	$1{,}62 \cdot 10^{-8}$
Miedź	$1{,}71 \cdot 10^{-8}$
Złoto	$2{,}23 \cdot 10^{-8}$
Glin (aluminium)	$2{,}71 \cdot 10^{-8}$
Żelazo	$9{,}71 \cdot 10^{-8}$
półprzewodniki	
Krzem	0,4*
German	0,46
izolatory	
Etanol	ok. 10^7
Papier	ok. 10^{10}
Powietrze	$4 \cdot 10^{13}$
Oliwa z oliwek	$5 \cdot 10^{14}$

* *Tablice fizyczno-astronomiczne*, pod red. Witolda Mizerskiego, wyd. IV zaktualizowane, Adamantan, Warszawa 2005

Tabela 8. Elektryczne symbole graficzne

Nazwa	Symbol	Nazwa	Symbol
przewód elektryczny		kondensator	
źródło energii elektrycznej prądu stałego		źródło energii elektrycznej prądu przemiennego	
wyłącznik (klucz)		opornik (rezystor)	
żarówka		potencjometr	
amperomierz		węzeł	
woltomierz		bezpiecznik	
dioda		tranzystor bipolarny npn	
dioda świecąca			

Oznaczenia na opornikach z barwnym kodem paskowym



Kolor	Wartość		Mnożnik	Tolerancja ± [%]
	1. pasek	2. pasek	3. pasek	4. pasek
czarny	0	0	10^0	–
brązowy	1	1	10^1	1
czerwony	2	2	10^2	2
pomarańczowy	3	3	10^3	15
żółty	4	4	10^4	–
zielony	5	5	10^5	0,5
niebieski	6	6	10^6	1,25
fioletowy	7	7	10^7	0,1
szary	8	8	10^8	–
biały	9	9	10^9	–
złoty	–	–	10^{-1}	5
srebrny	–	–	10^{-2}	10
brak oznaczenia	–	–	–	20

Przykład:  $47 \cdot 10^5\,\Omega = 4{,}7 \cdot 10^6\,\Omega = 4{,}7\,\mathrm{M}\Omega$

Uwaga:

- pierwszą cyfrę oznacza pasek bliższy końca; między mnożnikiem a tolerancją jest najczęściej odstęp,
- pasków jest zazwyczaj trzy, cztery lub pięć:
  - jeśli są trzy paski – wtedy wszystkie trzy oznaczają oporność, a tolerancja wynosi ±20%,
  - jeśli są cztery paski – wtedy trzy pierwsze oznaczają oporność, a czwarty – tolerancję,
  - jeśli jest pięć pasków – wtedy pierwsze trzy oznaczają cyfry, czwarty – mnożnik, a piąty – tolerancję.

Spis doświadczeń obowiązkowych

Doświadczenia	Numer doświadczenia	Strona
Badanie kształtu linii pola elektrycznego	5	88
Przekaz energii podczas rozładowania kondensatora	9	122
Pierwsze prawo Kirchhoffa	13	163
Pomiar napięcia baterii połączonych szeregowo	14	165
Charakterystyka prądowo-napięciowa żarówki	16	185
Linie pola magnetycznego wokół magnesów trwałych	22	227
Pole magnetyczne wokół prostego przewodnika z prądem	23	231
Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem w kształcie pętli lub zwojnicy	24	232
Demonstrowanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej	30	276
Demonstrowanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej i jego związku ze zmianą natężenia prądu w elektromagnesie	35	309
Dioda jako element składowy prostownika	39	319
Dioda jako źródła światła	40	320

Spis infografik

Układ Słoneczny 16–17
Powstanie Układu Słonecznego 40
Kserograf i drukarka laserowa 76–77
Siły elektrostatyczne w elektrofiltrach 89
Powstawanie pioruna 110–111
Akcelerator liniowy 121
Zmysł elektryczny 152–153
Pole magnetyczne w przyrodzie i technice 238–239
Cyklotron 246–247
Pamięć magnetyczna 252–253
Transformator 310
Transformatory i przesyłanie energii 312–313
Prostowanie prądu 321

Odpowiedzi i wskazówki do wybranych zadań

Uwaga 1. Większość wyników została zaokrąglona.

Uwaga 2. Jeśli w treści zadania nie wskazano innej wartości, przyjęto $g=9{,}81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

Rozdział 11. Grawitacja i elementy astronomii

11.1. Gwiazdy i planety

Zadanie 1. A – III, B – III, C – IV, D – II, E – I

11.2. Układ Słoneczny

Zadanie 1. a) $\frac{M_\mathrm{J}}{M_\mathrm{M}}\approx 5753$, b) $\frac{2R_\mathrm{J}}{2R_\mathrm{M}}\approx 29{,}3$,

c) $\frac{d_\mathrm{J}}{d_\mathrm{M}}=\frac{\frac{M_\mathrm{J}}{V_\mathrm{J}}}{\frac{M_\mathrm{M}}{V_\mathrm{M}}}=\frac{M_\mathrm{J}}{M_\mathrm{M}}\cdot\frac{1}{\left(\frac{2R_\mathrm{J}}{2R_\mathrm{M}}\right)^3}\approx 0{,}23$,

czyli większą gęstość ma Merkury $d_\mathrm{M}=4{,}4d_\mathrm{J}$

Zadanie 2. a) $\frac{1\,\mathrm{ly}}{1\,\mathrm{au}}\approx 63\,000$,

b) Czas, jaki zajmuje światłu dotarcie ze Słońca na Ziemię: $t=\frac{150\cdot 10^6\,\mathrm{km}}{3\cdot 10^5\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}}=500\,\mathrm{s}\approx 8{,}33\,\mathrm{min}$, zatem 1 jednostka astronomiczna to ok. 8,33 minuty świetlnej.

Zadanie 3. a) $r_1=29{,}7\,\mathrm{au}\approx 4{,}5\cdot 10^9\,\mathrm{km}$,
$r_2=49{,}3\,\mathrm{au}\approx 7{,}4\cdot 10^9\,\mathrm{km}$,

b) $t_1=\frac{r_1}{3\cdot 10^5\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}}\approx 14\,900\,\mathrm{s}\approx 4{,}13\,\mathrm{h}$,

$t_2=\frac{r_2}{3\cdot 10^5\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}}\approx 24\,700\,\mathrm{s}\approx 6{,}85\,\mathrm{h}$

Zadanie 4. Zmniejszamy Układ Słoneczny $\frac{1\,\mathrm{au}}{1\,\mathrm{m}}=150\cdot 10^9$ razy.

a) $d_\mathrm{a}\approx 0{,}39\,\mathrm{m}$,

b) $d_\mathrm{b}\approx 30\,\mathrm{m}$,

c) $d_\mathrm{c}\approx 39\,\mathrm{m}$ (średnia odległość),

d) $d_\mathrm{d}=\frac{1{,}4\cdot 10^9\,\mathrm{m}}{150\cdot 10^9}\approx 9{,}3\,\mathrm{mm}$,

e) $d_\mathrm{e}=\frac{12{,}7\cdot 10^6\,\mathrm{m}}{150\cdot 10^9}\approx 0{,}085\,\mathrm{mm}$

11.3. Księżyc widziany z Ziemi

Zadanie 3. Błąd popełniono na rysunku b). Na nieoświetlonej części tarczy Księżyca nigdy nie są widoczne gwiazdy (są zasłonięte przez Księżyc).

11.4. Prawo powszechnego ciążenia

Zadanie 1.
$\frac{F_\mathrm{J}}{F_\mathrm{M}}=\frac{M_\mathrm{J}}{M_\mathrm{M}}\cdot\left(\frac{r_\mathrm{M}-r_\mathrm{Z}}{r_\mathrm{J}-r_\mathrm{Z}}\right)^2\approx 46$, czyli Jowisz przyciągał Ziemię większą siłą.

Zadanie 2.
Sposób I. $r=\sqrt{\frac{GM_\mathrm{Z}m}{F}}\approx 63\,100\,\mathrm{km}$, wysokość punktu nad powierzchnią Ziemi:
$h=r-R_\mathrm{Z}\approx 57\,000\,\mathrm{km}$.

Sposób II. Jeżeli przyjmiemy $g=10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$, to siła działająca na odważnik w szukanym miejscu ma się zmniejszyć 100 razy (na powierzchni Ziemi dla ciężarka o masie 10 kg to 100 N), czyli odważnik ma być $\sqrt{100}=10$ razy dalej od środka Ziemi: $r=10R_\mathrm{Z}$, a nad powierzchnią to: $h=10R_\mathrm{Z}-R_\mathrm{Z}\approx 57\,000\,\mathrm{km}$.

Zadanie 3. $F=\frac{Gm^2}{(2R)^2}=\frac{4\pi^2GR^4d^2}{9}$,

stąd $R=\sqrt[4]{\frac{9F}{4\pi^2Gd^2}}\approx 2{,}3\,\mathrm{m}$

Zadanie 4. $g_\mathrm{M}=\frac{GM_\mathrm{M}}{R_\mathrm{M}^2}\approx 3{,}7\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$

Zadanie 5. a) $Q=\frac{GM_\mathrm{k}m}{R_\mathrm{k}^2}\approx 7{,}5\cdot 10^5\,\mathrm{N}$,

b) $F_\mathrm{od}=m\omega^2R_\mathrm{k}\approx 4{,}4\cdot 10^5\,\mathrm{N}$, $Q'=Q-F_\mathrm{od}=3{,}1\cdot 10^5\,\mathrm{N}$

Zadanie 6. a) $F=\frac{G(2m)^2}{r^2}\approx 1{,}04\cdot 10^{-6}\,\mathrm{N}$,

b) $F=2Gm^2\left[\frac{1}{r^2}+\frac{r}{(r^2+l^2)^{\frac{3}{2}}}\right]\approx 6\cdot 10^{-7}\,\mathrm{N}$

Drugi sposób obliczenia daje dokładniejszy wynik. Ciężarek jest lepszym przybliżeniem punktu materialnego niż cała sztanga.

Zadanie 7. $T=2\pi\sqrt{\frac{R_\mathrm{Z}^3}{GM_\mathrm{Z}}}\approx 84\,\mathrm{min}$

Taki jest okres obiegu satelity na niskiej orbicie nad Ziemią. Zastanów się, czy to przypadek.

11.5. Pierwsze i drugie prawo Keplera

Zadanie 1. $v=\sqrt{\frac{GM_\mathrm{Z}}{2R_\mathrm{Z}}}=\frac{v_\mathrm{I}}{\sqrt{2}}\approx 5{,}6\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$,

$T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{4\pi R_\mathrm{Z}}{v}\approx 14\,300\,\mathrm{s}\approx 4\,\mathrm{h}$

Zadanie 2. a) $v(h)=\sqrt{\frac{GM_\mathrm{Z}}{r}}=\sqrt{\frac{GM_\mathrm{Z}}{R_\mathrm{Z}+h}}$, dla $h\geqslant 0$,

b) $T(h)=\frac{2\pi r}{v}=2\pi\sqrt{\frac{(R_Z+h)^3}{GM_Z}}$, dla $h\geqslant 0$,

Zadanie 3. $v_I=\sqrt{\frac{GM_K}{R_K}}\approx 1680\,\frac{m}{s}$

Zadanie 4. $v_I=\sqrt{\frac{GM}{R}}=R\sqrt{\frac{4}{3}\pi Gd}$,

gdzie $d=5510\,\frac{kg}{m^3}$, czyli $v_I\sim R$

Zadanie 5. $\frac{F_S}{F_Z}=\frac{\frac{GM_SM_K}{r_{SK}^2}}{\frac{GM_ZM_K}{r_{ZK}^2}}=\frac{M_S}{M_Z}\cdot\left(\frac{r_{ZK}}{r_{SK}}\right)^2\approx 2{,}2$,

gdzie: r_{ZK} – odległość Księżyca od Ziemi,

r_{SK} – odległość Księżyca od Słońca

Zadanie 6. $v_a=\frac{v_Pr_P}{r_a}\approx 29{,}29\,\frac{km}{s}$

11.6. Trzecie prawo Keplera

Zadanie 1. Przykładowe obliczenia dla Ziemi:

$M=\frac{4\pi^2R_Z^3}{GT_Z^2}\approx 1{,}99\cdot 10^{30}\,kg$

Zadanie 2. Promień orbity satelity geostacjonarnego:

$r=\sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}\approx 42\,200\,km$,

wysokość nad powierzchnią Ziemi:

$h=r-R_Z\approx 35\,800\,km$

Zadanie 5. Trzecie prawo Keplera dla komety i dla Ziemi: $\frac{a_H^3}{T_H^2}=\frac{a_Z^3}{T_Z^2}$, stąd:

$a_H=a_Z\sqrt[3]{\left(\frac{T_H}{T_Z}\right)^2}\approx 17{,}8\,au.$

Zauważ, że najłatwiej używać au jako jednostki odległości i roku jako jednostki czasu.

11.7. Energia potencjalna grawitacji

Zadanie 1. a) $E_{min}=-\frac{GM_ZM_K}{r_{min}}\approx -8\cdot 10^{28}\,J$

dla $r_{min}=366\cdot 10^6\,m$,

b) $E_{max}=-\frac{GM_ZM_K}{r_{max}}\approx -7{,}2\cdot 10^{28}\,J$

dla $r_{max}=405{,}7\cdot 10^6\,m$

Zadanie 2. $v_{II}=\sqrt{\frac{2GM_{Sat}}{R_{Sat}}}\approx 35\,\frac{km}{s}$

Zadanie 3. $\frac{v_{II}}{v_I}=\sqrt{2}$

Zadanie 5.

$v_{II}=\sqrt{\frac{2GM_Z}{r}}=c\rightarrow r=\frac{2GM_Z}{c^2}$,

$V=\frac{4}{3}\pi r^3=\frac{32\pi(GM_Z)^3}{3c^6}\approx 2{,}9\,cm^3$

Zadanie 6. a) Z zasady zachowania energii:

$\frac{mv_a^2}{2}-\frac{GM_Sm}{r_a}=\frac{mv_P^2}{2}-\frac{GM_Sm}{r_P}\rightarrow$

$v_P=\sqrt{v_a^2+2GM_S\left(\frac{1}{r_P}-\frac{1}{r_a}\right)}\approx 54{,}7\,\frac{km}{s}$

b) $v_N=\sqrt{v_a^2+2GM_S\left(\frac{1}{r_N}-\frac{1}{r_a}\right)}\approx 3{,}06\,\frac{km}{s}$

11.8. Siły pływowe – temat dodatkowy

Zadanie 1. Siły pływowe pochodzące od Słońca – F_S i Księżyca – F_K,

$F=F_S+F_K=2GmR\left(\frac{M_S}{d_S^3}+\frac{M_K}{d_K^3}\right)\approx 1{,}6\cdot 10^{-6}\,N$

Zadanie 2. $F=2GM_Km\frac{x}{d_K^3}\approx 5\cdot 10^{-13}\,N$,

gdzie $x\approx 1$ m to odległość środka masy głowy od środka masy tułowia i $m = 3$ kg to masa głowy.

Zadanie 3. Minimalna odległość Jowisza od Ziemi: $d_J=4{,}2\,au=630\cdot 10^6\,km$, stąd:

$F=2GM_Jm\frac{R}{d_J^3}\approx 6{,}5\cdot 10^{-12}\,N.$

Zadanie 4. $R=\frac{l}{2}$ – środek masy układu znajduje się w połowie długości sznurka: $F=GMm\frac{l}{d^3}$.

Sznurek zerwie się, gdy $F=1000$ N, stąd

$d=\sqrt[3]{\frac{GMml}{F}}\approx 1100\,km.$

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

1.1. $h=R_K\sqrt{\frac{M_Z}{M_K}}-R_Z\approx 9300\,km$

1.2. $x=\frac{d}{1+\sqrt{\frac{M_K}{M_Z}}}\approx 0{,}9d\approx 346\,000\,km$,

x – odległość szukanego punktu od środka Ziemi,

d – odległość Ziemia–Księżyc

1.3. $F=F_Z-F_K=\frac{4Gm}{d^2}(M_Z-M_K)\approx 0{,}011$ N, zwrot w stronę Ziemi

Zadanie 2.

2.1. $r=\sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}\approx 27\,000\,km$

2.2. $r_s=\sqrt[3]{\frac{GMT_s^2}{4\pi^2}}\approx 42\,000\,km$

2.3. $v_s=v_I\sqrt{\frac{R_Z}{r_s}}\approx 3{,}1\,\frac{km}{s}$

2.6. $v_G=v_I\sqrt{\frac{R_Z}{R_{GPS}}}\approx 3{,}9\,\frac{km}{s}$

Zadanie 3.

3.1. $r_{p,min}=350\cdot10^6$ km$=2{,}3$ au,
$r_{p,max}=2{,}3$ au $+1$ au$=3{,}3$ au

Z trzeciego prawa Keplera zapisanego dla wybranej planetoidy i Ziemi: $\frac{r_P^3}{T_P^2}=\frac{r_Z^3}{T_Z^2}$. Wyznaczmy minimalny okres obiegu:
$T_{p,min}=T_Z\sqrt{\left(\frac{r_{p,min}}{r_Z}\right)^3}\approx3{,}5$ roku oraz okres maksymalny: $T_{p,max}=T_Z\sqrt{\left(\frac{r_{p,max}}{r_Z}\right)^3}\approx6$ lat.

3.2.
$$E_1=\frac{mv^2}{2}-\frac{GM_Em}{R}=-\frac{GM_Em}{2R}\approx-880\,\text{J}$$

Rozdział 12. Pole elektryczne

12.1. Ładunki elektryczne i ich oddziaływanie

Zadanie 2. Do uziemionego elektroskopu zbliżamy dodatnio naładowaną pałeczkę. Elektroskop elektryzuje się ujemnie dzięki zjawisku indukcji. Odłączamy elektroskop od uziemienia i odsuwamy pałeczkę. Ujemny ładunek pozostaje na elektroskopie.

12.2. Prawo Coulomba

Zadanie 2. $F=\frac{k|Q|^2}{r^2}\approx0{,}013$ mN

Zadanie 3. x – odległość od ładunku $Q_1=5\,\mu$C,
$$x=\frac{d}{1+\sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}}\approx0{,}141\text{ m},\ d=0{,}25\text{ m}$$

12.3. Pole elektryczne

Zadanie 1. a) $E=\frac{F}{q}=2\cdot10^6\frac{\text{N}}{\text{C}}$,

b) $F'=Eq'=F\frac{q'}{q}=2$ mN

Zadanie 2. c) $|E|=\frac{F}{q}=k\frac{|Q|}{r^2}=450\frac{\text{N}}{\text{C}}$

Zadanie 3. $eE=m_eg\rightarrow E=\frac{m_eg}{e}\approx5{,}6\cdot10^{-11}\frac{\text{N}}{\text{C}}$

Zadanie 4. $\text{tg}\alpha=\frac{F_e}{F_g}=\frac{qE}{mg}\rightarrow E=\frac{mg}{q}\text{tg}\,\alpha\approx7{,}1\cdot10^4\frac{\text{N}}{\text{C}}$

12.4. Pole elektryczne wielu źródeł

Zadanie 1. a) $E=E_2-E_1=\frac{4k}{d^2}(q_2-q_1)=9\frac{\text{N}}{\text{C}}$,

b) x – odległość od ładunku $q_1=0{,}25$ nC,

$$x=\frac{d}{1+\sqrt{\frac{q_2}{q_1}}}\approx0{,}414\text{ m},$$

Uwaga. Porównaj z zadaniem 1.2 na s. 67.

Zadanie 2. $d=10$ cm, $x=15$ cm,

$$E=\sqrt{E_x^2+E_y^2}=$$
$$=\frac{k}{(x^2+d^2)^{\frac{3}{2}}}\sqrt{d^2(q_A+|q_B|)^2+x^2(q_A-|q_B|)^2}\approx$$
$$\approx768\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Kąt między wektorem natężenia a poziomą osią układu współrzędnych:
$$\text{tg}\varphi=\frac{E_y}{E_x}=\frac{x(q_A-|q_B|)}{d(q_A+|q_B|)}\rightarrow\varphi\approx37^\circ$$

Zadanie 3.

a) Natężenia pól od poszczególnych ładunków:
$E_1=\frac{2kQ_1}{r^2}=1800\frac{\text{N}}{\text{C}}$,
$E_2=E_3=\frac{2k|Q_2|}{r^2}=3600\frac{\text{N}}{\text{C}}$, stąd
$E=\sqrt{(E_1+E_3)^2+E_2^2}=6490\frac{\text{N}}{\text{C}}$.

Kąt między wektorem natężenia a przekątną kwadratu łączącą ładunki Q_1 i Q_3: $\text{tg}\alpha=\frac{E_2}{E_1+E_3}$, czyli $\alpha\approx33{,}7^\circ$.

b) Wypadkowa natężeń pochodzących od ładunków 2 i 3 jest równa zeru. Całkowite natężenie pola jest równe natężeniu pochodzącemu od ładunku 1 i wynosi: $E'=E_1'=\frac{4kQ_1}{5r^2}=720\frac{\text{N}}{\text{C}}$. Kąt między wektorem a pionowym bokiem kwadratu: $\text{tg}\,\beta=\frac{1}{2}$, czyli: $\beta\approx26{,}6^\circ$.

12.5. Energia potencjalna, potencjał i napięcie

Zadanie 2. $U=\frac{Fh}{q}=80$ MV

Zadanie 4. $mg=qE$ i $U=Ed$, stąd $U=\frac{mgd}{q}\approx2500$ V

Zadanie 5. **Wskazówka.** Załóżmy, że kulka nie dotknie płyty P_2. Wówczas w maksymalnym wychyleniu, podobnie jak przed puszczeniem, jej energia kinetyczna będzie równa zeru. Jakie formy energii ulegną zmianie? Oblicz na tej podstawie kąt maksymalnego wychylenia nitki z kulką.

12.6. Ładunki w przewodniku

Zadanie 2. Połączenie kuli żółtej i niebieskiej:
$$Q_1'=\frac{Q_1+Q_2}{R_1+R_2}R_1=\frac{-q+4q}{r+2r}\cdot r=q,$$

$$Q_2' = \frac{Q_1+Q_2}{R_1+R_2}R_2 = \frac{-q+4q}{r+2r}\cdot 2r = 2q,$$

Połączenie kuli żółtej i zielonej:

$$Q_1'' = \frac{Q_1'+Q_3}{R_1+R_3}R_1 = \frac{q-7q}{r+3r}\cdot r = -\frac{3}{2}q,$$

$$Q_3'' = \frac{Q_1'+Q_3}{R_1+R_3}R_3 = \frac{q-7q}{r+3r}\cdot 3r = -\frac{9}{2}q$$

12.7. Ruch naładowanej cząstki w polu elektrycznym

Zadanie 1. $a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} = 30\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$

Zadanie 2. $x = \frac{at^2}{2} = \frac{eEs^2}{2m_e v^2} \approx 1{,}6$ mm

Zadanie 3. $\Delta U = \frac{E_k}{e} = 50$ GV

12.8. Kondensatory

Zadanie 1. $C = \frac{2E}{U^2} = 125\,\mu$F

Zadanie 2. $W = \frac{Q^2}{2C} = E = 3\cdot 10^{-4}$ J

Zadanie 3. a) $C = \frac{\varepsilon_0 S}{d} = 44$ pF,

$C' = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d} = \varepsilon_r C = 220$ pF,

b) $E = \frac{U}{d} = 7{,}5\cdot 10^4 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$, $E' = \frac{E}{\varepsilon_r} = 1{,}5\cdot 10^4 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$,

c) $\frac{E_p}{E_p'} = \varepsilon_r = 5$

Zadanie 4. $C = \frac{Q}{U} = 2\,\mu$F, zgromadzona energia:

$E = \frac{CU^2}{2} = 2{,}25\cdot 10^{-2}$ J.

Zadanie 5. $U_1' = \frac{C_1 U}{C_1+C_2} = 7{,}42$ V

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

1.1. $Q = CU = 0{,}4$ C

1.2. $U' = \frac{Q}{C'} = \varepsilon_r U = 40$ V

Zadanie 3.

3.3. $E_p = \frac{kQq}{r} = 9\cdot 10^{-19}$ J

3.4. $m = \frac{kQq}{gr^2} \approx 4{,}6\cdot 10^{-18}$ kg

Zadanie 4.

$x = 10$ cm, $l = 1$ m, $m = 5$ g,

$Q = -\sqrt{\frac{mgx^3}{3kl}} \approx -4{,}3\cdot 10^{-8}$ C

Rozdział 13. Prąd stały

13.1. Prąd elektryczny i jego natężenie

Zadanie 1. a) $Q = It = 1500$ C, b) $t = \frac{Q}{I} = 20$ s

Zadanie 2. $t = \frac{Q}{I} = \frac{ne}{I} = 8000$ s $\approx 2{,}2$ h

Zadanie 3. **Wskazówka.** Możesz podać dowolny przedmiot o długości 4 cm.

Zadanie 5. A. 1,6 μA, B. $1{,}6\cdot 10^{-19}$ A, E. 1,6 kA

13.2. Obwody elektryczne

Zadanie 1. a) AD

Zadanie 4. $U = (0{,}153 \pm 0{,}002)$ V

13.3. Połączenia szeregowe i równoległe

Zadanie 2. $U_1 = 6$ V, $U_2 = 3$ V, $I_1 = I_3 = 50$ mA, $I_2 = 150$ mA, $I_4 = 200$ mA

13.4. Napięcie i natężenie. Prawo Ohma

Zadanie 1. $I = \frac{U}{R} = 0{,}23$ A

Zadanie 3. a) $U_A = 3$ V, $U_B = 1{,}5$ V

13.5. Łączenie oporników

Zadanie 1. a) $R_Z = \frac{R}{2} = 500\ \Omega$,

b) $R_Z = R + R = 2$ kΩ

Zadanie 2. $R_Z = 87{,}5\ \Omega$,

$I_1 = \frac{U}{R_Z} \approx 0{,}103$ A, $U_1 = I_1 R_1 \approx 5{,}14$ V,

$U_2 = U - U_1 \approx 3{,}86$ V, $I_2 = \frac{U_2}{R_2} \approx 0{,}077$ A,

$I_3 = I_1 - I_2 = 0{,}026$ A, $U_3 = I_3 R_3 = 2{,}6$ V,

$U_4 = U_5 = U - U_1 - U_3 \approx 1{,}26$ V,

$I_4 = \frac{U_4}{R_4} \approx 0{,}0126$ A, $I_5 = \frac{U_5}{R_5} \approx 0{,}0126$ A

Zadanie 3. a) $R_Z = 2{,}5$ kΩ, b) $R_Z \approx 0{,}714$ kΩ

Zadanie 4. a) $U_1 = U = 9$ V, $I_1 = \frac{U_1}{R} = 0{,}09$ A, $U_2 = 0$, $I_2 = 0$, $I_3 = I_4 = \frac{U}{2R} = 0{,}045$ A,

$U_3 = U_4 = \frac{U}{2} = 4{,}5$ V,

b) $U_1 = U = 9$ V, $I_1 = \frac{U_1}{R} = 0{,}09$ A,

$I_4 = \frac{U}{\frac{3}{2}R} = 0{,}06$ A, $U_4 = I_4 R = 6$ V,

$I_2 = I_3 = \frac{I_4}{2} = 0{,}03$ A, $U_2 = U_3 = U - U_4 = 3$ V

13.6. Od czego zależy opór elektryczny

Zadanie 1. $R=\frac{\rho l}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}\approx 1{,}2\,\Omega$

Zadanie 2. $R=\frac{\rho l}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}$, stąd: $d=\sqrt{\frac{4\rho l}{\pi R}}\approx 1{,}9\,\text{mm}$

Zadanie 3. $R=\frac{3\,\text{V}}{0{,}3\,\text{A}}=10\,\Omega$

13.7. Praca i moc prądu elektrycznego

Zadanie 1. a) $Q=5200\,\text{mAh}=18\,720\,\text{C}$,

$P=UI=28{,}5\,\text{W}$,

b) $t=\frac{Q}{I}\approx 12\,500\,\text{s}\approx 3{,}5\,\text{h}$,

c) $E=QU\approx 356\,\text{kJ}$

Zadanie 2. R_2

Zadanie 3. $\eta=\frac{P}{P_{\text{el}}}=\frac{mv^3}{2sUI}\approx 0{,}78$,

gdzie: P – moc użyteczna, P_{el} – moc dostarczana z akumulatora

Zadanie 4. a) $\eta=\frac{Q_{\text{uż}}}{E}=\frac{mc_{\text{w}}(100^\circ\text{C}-T_0)}{Pt}\approx 0{,}79$,

b) $P=\frac{U^2}{R}$, stąd: $R=\frac{U^2}{P}\approx 26{,}5\,\Omega$,

c) $c\approx 10\,\text{gr}$

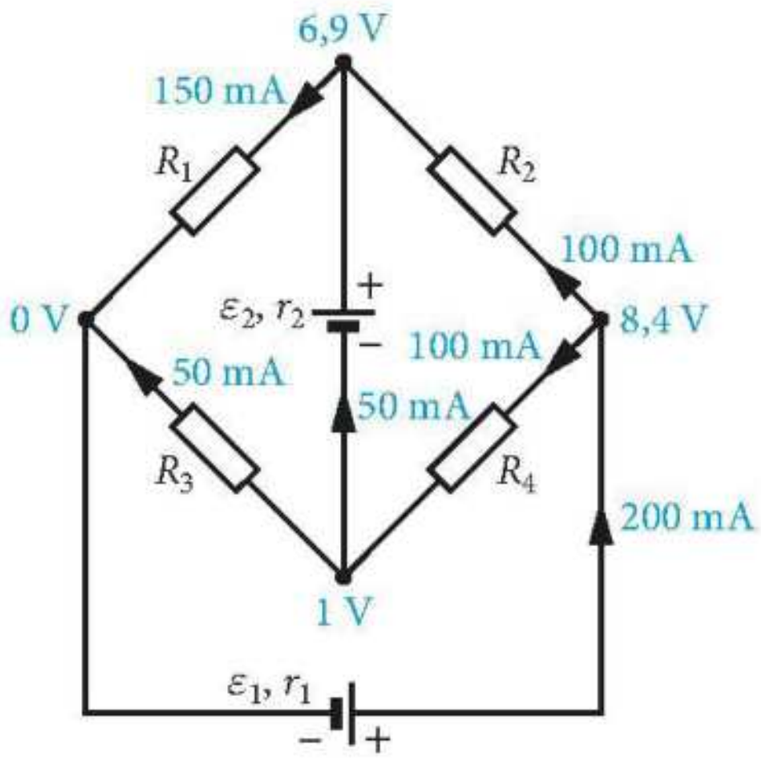
13.8. Siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny

Zadanie 2. $\mathcal{E}=\frac{RI_1I_2}{2(I_2-I_1)}\approx 5{,}63\,\text{V}$,

$r=R\frac{2I_1-I_2}{2(I_2-I_1)}=1{,}25\,\Omega$

13.9. Drugie prawo Kirchhoffa

Zadanie 1.



Zadanie 2. $P_1=12{,}5\,\text{W}$, $P_2=6{,}25\,\text{W}$

Zadanie 3. $R_{\text{Z}}\approx 11{,}8\,\Omega$

Zadanie 4. a) $I=6\,\text{A}$, b) $I=3\,\text{A}$

Zadanie 5. **Wskazówka.** Gdy przerysujesz obwód w inny sposób, zauważysz jego symetrię. Z tej symetrii wynika, że przez jeden z oporników nie płynie prąd (który to opornik?).

$I_3=I_5=\frac{\mathcal{E}}{2R}=4{,}5\,\text{mA}$,

$U_3=U_5=I_3R=4{,}5\,\text{V}$

Analiza tekstu

Zadanie 3.

$\frac{E_{\text{B}}}{E_{\text{ak}}}=\frac{E_{\text{B}}}{QU}=\frac{700\,\text{MWh}}{48\,\text{Ah}\cdot 12\,\text{V}}\approx 1{,}2\,\text{mln}$

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

1.1. $I=\frac{2\mathcal{E}}{R+\frac{3}{4}r}\approx 0{,}28\,\text{A}$

1.2. $P=I^2R\approx 0{,}78\,\text{W}$

1.3. $I'=\frac{8\mathcal{E}}{3r}=4\,\text{A}$

1.4. II, 1

Zadanie 2.

2.1. $R_2=\frac{\rho l}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}\approx 42{,}8\,\text{m}\Omega$

2.2. $R'=9R_{20}\approx 385\,\text{m}\Omega$

2.3. $R''=\frac{1}{16}R_2\approx 2{,}68\,\text{m}\Omega$

2.4. $T_{\text{k}}=0^\circ\text{C}+\frac{\Delta R}{\alpha R_{20}}(1+\alpha\cdot 20^\circ\text{C})\approx 368^\circ\text{C}$

Zadanie 3.

3.2. $U_{\dot{z}}=\mathcal{E}-Ir=6\,\text{V}$, $I_{\dot{z}}=0{,}8\,\text{A}$, $R_{\dot{z}}=\frac{U_{\dot{z}}}{I_{\dot{z}}}=7{,}5\,\Omega$

3.3. $P_{\dot{z}}=U_{\dot{z}}I_{\dot{z}}=4{,}8\,\text{W}$

3.4. $I_{\text{R}}=I-I_{\dot{z}}=1{,}2\,\text{A}$, $U_{\text{R}}=U_{\dot{z}}=6\,\text{V}$, $R=\frac{U_{\text{R}}}{I_{\text{R}}}=5\,\Omega$

Zadanie 4.

4.1. A, D

4.2. $R_{100}=\frac{100\,\text{V}}{0{,}05\,\text{A}}=2000\,\Omega$,

$R_{225}=\frac{225\,\text{V}}{0{,}75\,\text{A}}=300\,\Omega$

4.3. $U\approx 260\,\text{V}$

Wskazówka. Przyłóż linijkę do wykresu tak, aby jej brzeg tworzył wykres $I(U)$ dla opornika $150\,\Omega$.

Rozdział 14. Pole magnetyczne

14.2. Linie pola magnetycznego wytwarzanego przez ruch ładunków

Zadanie 3. A – biegun południowy, B – biegun północny

14.3. Siła Lorentza. Wektor indukcji magnetycznej

Zadanie 1. a) równoległa do osi z i ze zwrotem zgodnym z tą osią,

b) ma wartość zero

Zadanie 3. $B=\frac{F}{ev\sin\alpha}\approx 3\cdot 10^{-5}\,\mathrm{T}$

Zadanie 4. $v=\frac{E}{B}=2\cdot 10^5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ dla protonu i elektronu

Zadanie 5. $\sin\alpha=\frac{F}{evB}\approx 0{,}866$, czyli $\alpha=60^\circ$

14.4. Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym

Zadanie 4. a) $R_{\mathrm{proton}}=\frac{m_\mathrm{p}v}{eB}\approx 350\,\mathrm{m}$,

$R_{\mathrm{elektron}}=\frac{m_\mathrm{e}v}{eB}\approx 19\,\mathrm{cm}$, $\frac{R_\mathrm{p}}{R_\mathrm{e}}=\frac{m_\mathrm{p}}{m_\mathrm{e}}\approx 1800$,

b) $\frac{T_\mathrm{p}}{T_\mathrm{e}}=\frac{m_\mathrm{p}}{m_\mathrm{e}}\approx 1800$

14.5. Siła elektrodynamiczna

Zadanie 1. a) $F=0$,

b) $F=IlB\sin 45^\circ\approx 0{,}141$ N,

c) $F=IlB=0{,}2$ N,

d) $F=IlB=0{,}2$ N

Zadanie 2. $\sin\alpha=\frac{F}{BIl}\approx 0{,}333$, $\alpha\approx 19{,}5^\circ$

Zadanie 3. $B=\frac{mg\,\mathrm{tg}\,\alpha}{Il}\approx 0{,}214$ T

14.6. Indukcja magnetyczna pola wokół przewodnika z prądem

Zadanie 1.

$B_\mathrm{A}=B_\mathrm{B}=B_1+B_2=\frac{\mu_0 I}{2\pi}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{a+d}\right)=30\,\mu\mathrm{T}$

Zadanie 2. $B_2=B_1$, czyli: $\frac{\mu_0 I_2}{2\pi R}=\frac{\mu_0 I_1}{2R}$, stąd

$I_2=\pi I_1\approx 31{,}4$ A, prąd płynie od B do A.

Zadanie 3. $I=\frac{2Br}{\mu_0}\approx 4{,}8$ A

Zadanie 4. $B_{\min}=\frac{\mu_0 I_{\min}}{2\pi r}=60\,\mu\mathrm{T}$,

$B_{\max}=\frac{\mu_0 I_{\max}}{2\pi r}=300\,\mu\mathrm{T}$

Zadanie 5. $B=\frac{\mu_0 nI}{l}\approx 5{,}03\,\mathrm{mT}$

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

1.1. P, P, F

1.2. Linie pola biegną od N do S.

1.3. B, 2

Zadanie 2.

2.1. $B=\frac{mv}{eR}\approx 0{,}23\,\mathrm{mT}$

2.2. $F=\frac{B^2e^2R}{m}\approx 1{,}3\cdot 10^{-14}$ N

Zadanie 3.

3.1. TAK, 3

3.2. D (W punkcie A pole jest słabsze, ale za to kąt między liniami pola a prędkością jest większy – nie wiemy, który czynnik przeważy.)

Zadanie 4.

NIE, 2

Zadanie 5.

Można. Natężenie prądu powinno być proporcjonalne do promienia, a kierunek przepływu prądu – przeciwny.

Rozdział 15. Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

15.1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

Zadanie 1. A

15.2. Prawo indukcji Faradaya

Zadanie 1. $\Phi_1=Bl^2=4\,\mathrm{mWb}$,

$\Phi_2=Bl^2\cos\alpha\approx 3{,}985\,\mathrm{mWb}$

Zadanie 2. $I=\frac{\Phi_1-\Phi_2}{R\Delta t}=25\,\mathrm{mA}$

Zadanie 3. **Wskazówka.** Pamiętaj, że kąt w definicji strumienia indukcji jest kątem między kierunkiem linii pola magnetycznego a prostą prostopadłą do powierzchni ramki.

$\mathcal{E}=Blv\sin\alpha$, $R=\frac{4\rho l}{S}$, $I=\frac{\mathcal{E}}{R}=\frac{SBv\sin 60^\circ}{4\rho}\approx 63\,\mathrm{mA}$

15.3. Prąd przemienny

Zadanie 1. a) $U_{max}=\sqrt{2}U_{sk}\approx 17\,V$,

b) $I_{sk}=\frac{P}{U_{sk}}\approx 2{,}9\,A$, $I_{max}=\sqrt{2}I_{sk}\approx 4{,}1\,A$,

c) $R=\frac{U_{sk}}{I_{sk}}=\frac{U_{sk}^2}{P}\approx 4{,}1\,\Omega$

Zadanie 2. $t=\frac{T}{8}=\frac{1}{8f}=2{,}5\,ms$

15.4. Domowa sieć elektryczna

Zadanie 1. a) nie, b) tak

Zadanie 2. $P_{max}=UI_{max}=24\,W$

Zadanie 5. 750 razy

15.5. Silniki elektryczne i prądnice

Zadanie 2. $I=\frac{M_c}{Bl^2}=2{,}5\,A$

Zadanie 3. $\varphi=15°$

15.6. Indukcja wzajemna i samoindukcja

Zadanie 1. $n_w=n_p\frac{U_w}{U_p}\approx 478$

Zadanie 3. a) $n_w=n_p\frac{U_w}{U_p}=40\,000$,

b) $I_w=\frac{\eta I_p U_p}{U_w}=18\,mA$

15.7. Dioda i prostowanie prądu

Zadanie 2. $P_1=\frac{U^2}{R}=\frac{2U^2}{R_1}=1440\,W$,

$P_2=\frac{U^2}{R_1}=720\,W$, $P_{śr}=\frac{P_1+P_2}{2}=1080\,W$

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

1.1. **Wskazówka.** Kąt w definicji strumienia indukcji jest kątem między kierunkiem linii pola magnetycznego a prostą prostopadłą do powierzchni, natomiast w zadaniu podano kąt między kierunkiem linii pola a powierzchnią.

$\frac{\Phi_B}{\Phi_A}=\frac{BS\cos(90°-\alpha)}{BS\cos 0°}=\sin\alpha$

1.2. $\Phi=BS\cos(90°-\alpha)=B\frac{\pi d^2}{4}\sin\alpha\approx 3{,}4\cdot 10^{-4}\,Wb$

1.3. $\omega=\frac{\mathcal{E}}{45Bd^2(\sin 61°-\sin 60°)}\approx 26\,\frac{rad}{s}$

Zadanie 2.

2.1. C

2.2. $n_p=n_3=20n_1$, $n_w=n_1$

2.3. Średnia moc w uzwojeniu pierwotnym: $P_p=U_{sk}I_{sk}=3\,V\cdot 0{,}2\,mA=0{,}6\,mW$ byłaby mniejsza od mocy oczekiwanej w uzwojeniu wtórnym: $P_w=12\,V\cdot 0{,}2\,mA=2{,}4\,mW$. Jest to niemożliwe, gdyż naruszałoby zasadę zachowania energii.

Zadanie 3. C

Zadanie 4.

Przez opornik, bazę i emiter płynie prąd o natężeniu: $I_b=\frac{3{,}9\,V}{10\,000\,\Omega}=390\,\mu A$.

Z wykresu odczytujemy, że dla takiego natężenia wzmocnienie prądowe wynosi: $\beta\approx 210$. Zatem przez diodę płynie prąd o natężeniu: $I_c=\beta I_b=81\,900\,\mu A\approx 0{,}08\,A$.

Indeks

A

AED → defibrylator
akcelerator liniowy 121
amper 147, 261
amperomierz 158

B

bezpiecznik 297
bezpieczniki automatyczne 298
– jednorazowe 298
bieguny magnesów 223
Brahe, T. 37
bramki logiczne 329

C

Cavendish, H. 32
cewka 233
ciężar 32
Coulomb, Ch. 79, 84
cyklotron 246, 247
czarna dziura 52

D

defibrylator 126
diamagnetyki 224
dioda 319
– świecąca 320
domeny magnetyczne 225
druga prędkość kosmiczna 52, 53
drugie prawo Keplera 42
– – Kirchhoffa 203
drukarka laserowa 76
dryf elektronów 149

E

egzoplanety → planety pozasłoneczne
Einstein, A. 39, 52, 262
ekranowanie pola 112
elektrofiltry 89
elektromagnes 233
elektryzowanie przez indukcję 74
– – potarcie 73
elipsa 38
energia potencjalna grawitacji 49, 50
– – ładunku w polu elektrycznym 99, 100
– – w centralnym polu elektrycznym 101
– – w polu magnetycznym 228
– zgromadzona w kondensatorze 122, 128

F

farad 123
Faraday, M. 108, 123, 276
fazy Księżyca 21
ferromagnetyki 223

G

Galileusz 9
gazowe olbrzymy 14
głośnik 280
gwiazdy 6

H

hiperbola 38

I

indukcja elektromagnetyczna 276
– magnetyczna 237
– –, pojedyncza pętla 259
– –, prosty przewodnik 258
– –, zwojnica 259
– wzajemna 309
izolator 184

J

jednostka astronomiczna 18
jon 81
jonizacja 110, 150

K

Kepler, J. 10, 38, 45
klatka Faradaya 108
komety 15, 39
komutator 302
kondensator płaski 122
Kopernik, M. 9, 45
kserograf 76
Księżyc 15, 21
księżyce 15
kwadra 21
kwarki 71

L

LED → dioda świecąca
linie pola elektrycznego 87

– – magnetycznego 227, 231
– – – wokół prostego przewodnika 231
– – – wytwarzane przez pętlę i zwojnicę 232
lodowe olbrzymy 14

Ł

ładunek elementarny 70
– próbny 86

M

magnes 223
mapa nieba 11
masa gwiazdy 46
meteoroidy 15
miernik uniwersalny 159
mikrofon 280
moc prądu elektrycznego 192
morza księżycowe 26

N

napięcie 103
– skuteczne 291
natężenie pola elektrycznego 87
– – – między okładkami kondensatora 125
– prądu 147
– skuteczne 292
Newton, I. 10, 29, 52
niepewność pomiaru miernikiem analogowym 159
– – – cyfrowym 159
nów 21

O

ochrona przed burzą 113
odbiornik energii elektrycznej 155
odpływy 55
ogniwo 196
okładki kondensatora 122
om 174
omomierz 176
opór a temperatura 188
– elektryczny 174
– wewnętrzny 198
– właściwy 183
– zastępczy oporników połączonych szeregowo 179
– – – – równolegle 179
ostatnia kwadra 21

P

parabola 38
paramagnetyki 224
pełnia 21
pierwsza kwadra 21
pierwsza prędkość kosmiczna 42
pierwsze prawo Keplera 38
– – Kirchhoffa 165
piorunochron 110
planetoidy 15
planety 6, 7, 14
– karłowate 15
– pozasłoneczne 19, 48
pływy 55
piorunochron 110
pojemność kondensatora 123, 127
polaryzacja 81
pole centralne 90
– elektryczne 86
– grawitacyjne 33, 34
– jednorodne 91
– magnetyczne 226
– – Ziemi 228
– – wokół naładowanego ciała sferycznie symetrycznego 96
– – wytwarzane przez dwa ładunki 94
– – – kilka ładunków 95
połączenia równoległe 162, 163
– szeregowe 162, 165
pomiar napięcia 158
– natężenia 158
porażenie elektryczne 300
potencjał pola elektrycznego 103
– w polu centralnym 103
– w polu jednorodnym 103
potencjometr 175
powstawanie burz 110
półprzewodnik 184
praca przeciwko sile grawitacji 49, 50
– prądu elektrycznego 192
prawo Coulomba 79
– Faradaya 278, 286
– Keplera, drugie 42
– –, pierwsze 38
– –, trzecie 46
– Kirchhoffa, drugie 203
– –, pierwsze 165

– powszechnego ciążenia 29
– Ohma 174, 186
prąd elektryczny 146
– stały 147
– trójfazowy 294
– w cieczach 149
– w gazach 150
prądnica prądu przemiennego 289, 306
– – stałego 305
prędkość satelity 42
promień wodzący 41
prostownik 321
przenikalność elektryczna ośrodka 82
– – próżni 82
– magnetyczna próżni 258
przewodnik 107, 184, 188
przypływy 55
przyspieszenie grawitacyjne 30, 31
– ziemskie 31
Ptolemeusz, K. 9
pył międzyplanetarny 15

R

reguła Lenza 279
– prawej ręki dla prostego przewodnika 232
– – – dla pętli i zwojnicy 233
– – – dla siły Lorentza 238, 239
reguła śruby prawoskrętnej 238, 239
ruch ładunku w jednorodnym polu elektrycznym 117
– – w jednorodnym polu magnetycznym 244
równanie transformatora 310
różnica potencjałów → napięcie

S

samoindukcja 314, 315
satelita 42
SEM → siła elektromotoryczna
sfera niebieska 7, 8
sierp Księżyca 21
silnik elektryczny prądu stałego 302
– indukcyjny 304
– uniwersalny 303
siła elektrodynamiczna 254
– elektromotoryczna 198, 277, 286
– elektrostatyczna 80
– elektryczna 80
– grawitacji 10, 28, 29
– Lorentza 236, 237
siły pływowe 55
Słońce 14
spadek swobodny 28
stała elektrostatyczna 79
– elektryczna 79
– grawitacji 29, 32
strumień indukcji magnetycznej 284, 285
swobodne elektrony 146
symbole elektryczne 156
szczotki 302

T

teoria geocentryczna 9
– heliocentryczna 9
tesla 238
transformator 310
tranzystor 325
trzecie prawo Keplera 46

U

umowny kierunek przepływu prądu 151
uziemienie 296, 299

W

wiatr słoneczny 248
Wolszczan, A. 19, 48
woltomierz 158
wyłączniki różnicowoprądowe 298
względna przenikalność elektryczna ośrodka 82
wzmacniacz 324

Z

zaćmienie Księżyca 23
– – całkowite 24
– – częściowe 24
– Słońca 24
zasada zachowania ładunku 73, 164
zmysł elektryczny 150, 151
– magnetyczny 232
zorza polarna 249
zwarcie 296
zwojnica 233

Ź

źródło pola 86
– napięcia 155

Literatura uzupełniająca

Bardziej zaawansowany podręcznik

David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, *Podstawy fizyki*, t. 1–5, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.

Nietypowe zadania i doświadczenia

Juliusz Domański, Józefina Turło, *Nieobliczeniowe zadania z fizyki*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1997.

Juliusz Domański, *Domowe zadania doświadczalne z fizyki*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1999.

Jan Gaj, *Laboratorium fizyczne w domu*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.

Związki fizyki z innymi dziedzinami nauki i techniki

Mieczysław Drobner, *Instrumentoznawstwo i akustyka*, Polskie Wydawnictwo Muzyczne, Kraków 1997.

Alyn C. Duxbury, Alison B. Duxbury, Keith A. Sverdrup, *Oceany świata*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.

Krzysztof Ernst, *Fizyka sportu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

Krzysztof Ernst, *Einstein na huśtawce, czyli fizyka zabaw, gier i zabawek*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2003.

Robert Greenler, *Tęcze, glorie i halo, czyli niezwykłe zjawiska optyczne w atmosferze*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998.

Cathleen Shamieh, *Elektronika dla bystrzaków*, Septem, Gliwice 2020.

Knut Schmidt-Nielsen, *Dlaczego tak ważne są rozmiary zwierząt. Skalowanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.

Knut Schmidt-Nielsen, *Fizjologia zwierząt*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.

Konrad Widelski, *Spotkanie z elektroniką*, Wydawnictwa Kominikacji i Łączności, Warszawa 2001.

Astronomia

Andrzej Branicki, *Na własne oczy. O samodzielnych obserwacjach nieba i Ziemi*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.

Hannu Karttunen, Pekka Kröger, Heikki Oja i in., *Astronomia ogólna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2020.

Historia fizyki

Andrzej Drzewiński, Jacek Wojtkiewicz, *Opowieści z historii fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.

Andrzej Kajetan Wróblewski, *Historia fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.

Andrzej Kajetan Wróblewski, *Prawda i mity w fizyce*, Iskry, Warszawa 1987.

Andrzej Kajetan Wróblewski, *Uczeni w anegdocie*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1999.

Andrzej Kajetan Wróblewski, *Historia fizyki w Polsce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2020.

Literatura popularnonaukowa

Brian Cox, Jeff Forshaw, *Kwantowy Wszechświat. Dlaczego zdarza się wszystko, co może się zdarzyć*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2014.

Brian Cox, Jeff Forshaw, *Dlaczego* $E = mc^2$ *(i dlaczego powinno nas to obchodzić)*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2013.

Andrzej Dragan, *Kwantechizm, czyli klatka na ludzi*, Fabuła Fraza, Warszawa 2019.

Christoph Drösser, *Fizyka. Daj się uwieść*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.

Michio Kaku, *Hiperprzestrzeń. Wszechświaty równoległe, pętle czasowe i dziesiąty wymiar*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2011.

Krzysztof Królas, Zbigniew Inglot, *Wszędzie fizyka*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2018.

Michał Krupiński, *Ryzyk fizyk, czyli sens niepoważnych eksperymentów naukowych*, Wydawnictwo Feeria, Łódź 2018.

Leon M. Lederman, Dick Teresi, *Boska cząstka. Jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie?*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2007.

Gerard Milburn, *Inżynieria kwantowa*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1999.

O kwantach i smokach. Fizyka według «Delty», Agata Meissner, Krzysztof Meissner, Krzysztof Turzyński (red.), Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2016.

Marcin Popkiewicz, Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski, *Nauka o klimacie*, Wydawnictwo Nieoczywiste i Post Factum, Warszawa – Katowice 2019.

Jearl Walker, *Latający cyrk fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.

Frank Wilczek, Betsy Devine, *W poszukiwaniu harmonii. Wariacje na tematy z fizyki współczesnej*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2007.

Spis rozdziałów w pozostałych częściach

Część 1

1. Wprowadzenie

2. Ruch prostoliniowy

3. Ruch krzywoliniowy

4. Ruch i siły

5. Energia i pęd

6. Bryła sztywna

Część 2

7. Hydrostatyka i wstęp do zjawisk cieplnych

8. Termodynamika

9. Ruch drgający

10. Fale mechaniczne

Część 4

16. Fale elektromagnetyczne i optyka

17. Fizyka atomowa i kwanty promieniowania elektromagnetycznego

18. Fizyka jądrowa

19. Elementy fizyki relatywistycznej

Rysunki: Joanna Ptak – s. 6, 8d (słońce), 11 (słońce), 18p, 21–27, 30c), 31, 44, 51g, 56, 62c), 101d (z ziemią), 110, 111, 135, 155, 156, 212 (symbole), 223, 229, 233, 235 (zad. 4), 249d, 257 (zad. 3), 277–279, 282 (przykład), 286, 303, 305, 307, 308, 333, 335 (silniki), 345 (symbole); **Ewelina Baran** – s. 303, 305, 307, 308, 335 (silniki); **Ewa Sowulewska** – s. 8, 11, 13l, 25, 30, 31, 33, 36, 43, 44, 48, 51g, 52, 56, 62, 73, 88, 91, 92g, 96g, 98p, 100, 101g, 104, 113, 114, 119, 125, 135, 136g i d, 147, 155, 156, 157d, 170 (zad. 2 i 5), 183, 204g, 212 (symbole), 228, 229, 233, 235 (zad. 1, 2, 3, 4, 5), 237d, 241, 246, 247, 249, 255, 257 (zad. 3), 270, 277–279, 282 (przykład, zad. 2), 284, 285 (zad. 2), 286, 304, 306, 314, 326 (margines), 327 (przy zdjęciach), 331, 333, 334d i ś, 335d, 336, 340g, 345 (symbole); **Paulina Podolska** – s. 223, 232, 233, 235 (zad. 3), 237, 239, 240, 244 (a, b), 251, 262 (a, b), 265, 266, 337; **Elżbieta Buczkowska** – s. 9d, 18p, 24, 31; **Zuzanna Dudzic** – s. 18 (ręka); **Laura Maziewska** – s. 89, 121; **Paulina Jarmusik** – s. 122, 124, 225, 248, 256, 266c); **Agata Knajdek** – s. 9d; **Rafał Buczkowski** – s. 76, 77, 253 (kostki i ćwiartki); **Andrzej Dukata** – s. 9d, 10, 13l, 29, 32, 35–39, 41, 50, 51d i wykres, 56, 58, 63, 71, 75, 80, 81, 84–87, 90, 92g i d, 94, 95, 96 (na apli), 97, 98l, 99, 100 (margines), 101d, 102–109, 112, 114, 118, 123, 125, 127–132, 136–144, 146, 149, 151, 156g, 157g, 158, 160–169, 170 (zad. 2, 7), 172–182, 185, 186–189, 193, 195, 198–203, 204d, 205–209, 212–220, 227, 229b), 231, 242, 243, 244d, 250, 255, 257 (zad. 2), 258–260, 262 (przykład), 263, 267, 268, 271–274, 281, 282 (zad. 1), 285d, 287–292, 294–297, 305 (wykresy), 307d, 319, 321, 323–326, 328–330, 334d, 335g, 337 (wykres), 338–340.

Infografiki: Klaudia Jarocka-Ciok – s. 11, 76–77, 110–111, 252–253; **Agata Muszalska** – s. 16–17, 40, 88, 121, 152–153, 238–239, 246–247, 310, 312–313, 321.

Zdjęcie na okładce: Getty Images/iStock/Getty Images Plus/3DSculptor.

Mapa: redakcja kartograficzna Nowa Era – s. 13.

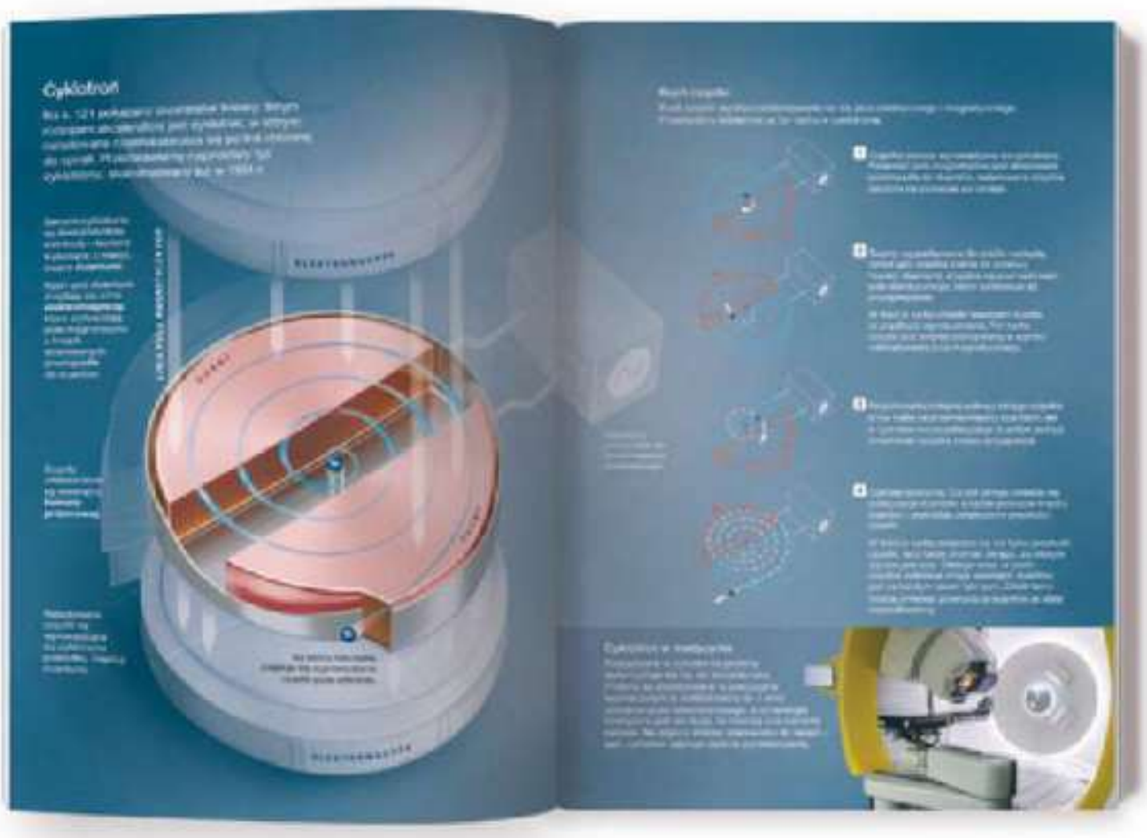
Zdjęcia: Agencja Gazeta: Kamil Gozdan s. 168 (parowóz), Mieczysław Michalak s. 24; Archiwum Wydawnictwa: s. 11 (obrotowa mapa nieba); BE&W: Alamy Stock Photo – Art Directors & TRIP s. 54, blickwinkel s. 153 (duch brazylijski), Malcolm Park sciences s. 239 (plamy na Słońcu), ManuelMata s. 68, Matteo Omied s. 33, Prisma by Dukas Presseagentur GmbH s. 153 (strętwa), Science History Images s. 19, Heritage Images/Ann Ronan Pictures s. 45 (dzieło Kopernika), s. 320 (żołnierze), Science Source – s. 45 (układ heliocentryczny), 174, Omikron s. 245, Rick Browne s. 153 (nożowiec zielonkawy); Depositphotos: ibphoto s. 318 (kabel dwużyłowy); East News: Associated Press/Douglas Engle s. 56 (fala na Arguari), Xinhua/Photoshot/Reporter/Xinhua/RIA s. 53; Forum: Arco/W. Rolfes s. 7 (ruch gwiazd), Granger History Collection/Granger s. 79, Reuters/Eric Vidal s. 227 (lotnisko); Getty Images: Brand X Pictures/Science Photo Library – NASA Earth Observatory s. 16 (Ziemia), Corbis Documentary/Getty Images Plus/Roger Ressmeyer/ Corbis/VCG s. 70, Cultura/Monty Rakusen s. 239 (silny magnes nadprzewodzący), DigitalVision Vectors – duncan1890 s. 133, ilbusca s. 197 (pierwsze ogniwo elektryczne), E+/malerapaso s. 296 (wtyczka z blaszką), E+/sololos s. 40 (gwiazdy), imageBROKER/ Michael Runkel s. 152 (delfin gujański), iStock/Getty Images Plus – AndreiZ s. 299 (wyłączniki różnicowoprądowe), davidhajnal s. 23, Funnycreature s. 238 (magnes neodymowy), mipan s. 310 (transformator) Nomadsoul1 s. 310 (zwoje transformatora w tle), olegback s. 8, Piotr Mitelski s. 15, J. Helgason s. 30 (parking dla samochodów), Moment Open/Bill Hinton Photography s. 11 (aplikacja), Moment – Cigdem Uzun s. 152 (ryba drętwokształtna), CleliaMichelini.com s. 152–153 (światło, dno morskie), Ekkehard Streit Fotografie s. 330, Pakin Songmor s. 16–17 (tło – niebo z gwiazdami), Philipp Klinger s. 312–313 (słupy wysokiego napięcia), PHOTOS.com>> /Getty Images Plus s. 45 (Kopernik), Science Photo Library/SCIEPRO s. 16 (Merkury, Wenus, Mars, Jowisz), s. 17 (Saturn, Neptun), Stocktrek Images – s. 17 (Uran), s. 238–239 (gwiazda neutronowa – tło), Stone/Arctic–Images s. 89, The Image Bank/Matthias Kulka s. 69, wizdata s. 30 (parking dla autobusów); Indigo: Alamy Stock Photo – Dominika Zarzycka s. 247, Naeblys s. 248, NHPA/Paulo de Oliveira s. 153 (rekinek psi), Science Photo Library – s. 107 (klatka Faradaya), s. 123 (Faraday), Paul D Stewart s. 37, SLA s. 121 (akcelerator liniowy SLAC – tło); Panthermedia: jgroup s. 234 (rezonans); Polska Agencja Prasowa: DPA/ PAP/EPA/DANIEL BOCKWOLDT s. 121 (DESY Hamburg); Shutterstock: Agsandrew s. 40 (obłok molekularny), Alexey Boldin s. 238 (smartfon), Alice July s. 152–153 (ilustracja kuli ziemskiej), andreiuc88 s. 110–111 (błyskawica), Andrzej Mielcarek s. 298 (bezpiecznik automatyczny), Andy Geldman s. 145, 175 (opomiki), Aphelleon s. 16 (Słońce), BAIVECTOR s. 321, blue–sea.cz s. 232 (żółw), Castleski s. 26, Christian Horz s. 300, conde s. 303 (tramwaj), Daolauong Kamkhom s. 162, Darren Tierney s. 157, Digital Images Studio s. 238 (wybuchy na Słońcu), Evgeniyqw s. 149, Forance s. 279, Gold Picture s. 306, gvictoria s. 55 (Zatoka Fundy – przypływ), hjochen s. 222 (kompasy), HomeArt s. 327 (gramofon), hsagencia s. 319 (dioda), hwanchul s. 193, Ivan Masiuk s. 320 (dioda LED), Jacky Co s. 312 (ilustracja fabryki), KaliAntye s. 239 (rezonans magnetyczny), marianoarias.soy s. 6, marina_eno1 s. 188, MarinaGrigorivna s. 187, Monika Wisniewska s. 316 (człowiek z wiertarką), Mopic s. 238 (pole magnetyczne Ziemi), Nostalgia for Infinity s. 60, oshuaDaniel s. 57, Palau s. 313 (ilustracja budynków), pedrosala s. 324, Peter Sobolev s. 223 (magnesy neodymowe), petrmalinak s. 210, Philip Lange s. 129, Piotr Szczepanek s. 168 (rozgałęźnik), pryzmat s. 296 (gniazdko z bolcem uziemienia), Radovan1 s. 299 (tablica z bezpiecznikami), Rhea Khoiri s. 152–153 (ilustracja ryby), Ronald Sumners s. 222 (dziewczyna), SciePro s. 238 (mózg), Serg64 s. 309 (szczoteczka do zębów), Set Line Vector Icon s. 313 (ilustracja komputera), shanshinyury s. 161, sharps s. 221, sirtravelalot s. 83, SURKED s. 126, Tomsickova Tatyana s. 86, V.J. Matthew s. 55 (Zatoka Fundy – odpływ), Vadim Sadovski s. 40 (Układ Słoneczny), vectorwin s. 312–313 (ilustracje transformatorów), View Factor Images s. 147, Vladi333 s. 14, Voronin76 s. 327 (głośnik), wk1003mike s. 298 (przepalony rozgałęźnik), XONIX s. 11 (teleskop), yurazaga s. 123 (kondensatory); Thinkstock/Getty Images: iStockphoto – dranzi s. 49, henryn0580 s. 275, micha_h s. 318 (miernik cęgowy), nanoqfu s. 316 (lampa błyskowa), Nastco s. 71, Oleg_Golikov s. 154, petar ishmeriev s. 303 (wirnik), pichet_w s. 252 (dyskietki), robnroll s. 276 (kuchenka indukcyjna), Roman Krochuk s. 251 (zorza polarna), starekase s. 155, zygotehasnobrain s. 252 (kasety magnetofonowe, kaseta VHS), Photodisc/Amos Morgan s. 191; CERN s. 117, 251 (tory cząstek); European Southern Observatory: ESO/L. Calçada s. 40 (dysk protoplanetarny); NASA: ESA s. 28, ESA/Halley Multicolor Camera Team, Giotto Project s. 48, JPL–Caltech/UCLA s. 39 (kometa), s. 52 (czarna dziura), NASA s. 5, 7 (pętla zakreślona przez Marsa), s. 25 (Księżyc), s. 43, 56 (Księżyc), NASA/SDO s. 261; Wikipedia/Wikimedia/Lijnis Nelemans – Creative Commons Attribution–Share Alike 3.0 Unported license (CC BY–SA 3.0) s. 224 (żaba); Anna Budzyńska s. 34, 39 (membrana z kulkami), s. 72, 74, 78, 80, 88, 91, 94, 104, 107 (doświadczenie), s. 109, 112, 116, 125, 127, 134, 148, 150, 159, 165, 168 (bateria i ogniwa), s. 170, 172, 175 (potencjometry), s. 176, 177, 185, 190, 192, 195, 196, 197, 200, 202, 223 (magnesy z oznaczeniami biegunów), s. 224 (doświadczenie), s. 226, 227 (doświadczenia), s. 228, 229, 230, 231, 232 (doświadczenia), s. 234 (doświadczenie), s. 236, 240, 243, 254, 257, 260, 264, 265, 276 (doświadczenia), s. 278, 280, 283, 290, 296 (doświadczenie), s. 308, 309 (doświadczenie), s. 311, 314, 315, 319 (doświadczenie), s. 320 (doświadczenie), s. 326; Miłosz Budzyński s. 22, 90, 122, 198, 298 (wyłącznik nadmiarowo–prądowy); Maciej Wróbel s. 25 (dziewczyna z krzesłem), s. 38.

Wydawnictwo Nowa Era oświadcza, że podjęło starania mające na celu dotarcie do właścicieli i dysponentów praw autorskich wszystkich zamieszczonych utworów. Wydawnictwo Nowa Era, przytaczając w celach dydaktycznych utwory lub ich fragmenty, postępuje zgodnie z art. 27^1 ust. 1 ustawy o prawie autorskim. Jednocześnie Nowa Era oświadcza, że jest jedynym podmiotem właściwym do kontaktu autorów tych utworów lub innych podmiotów uprawnionych w przypadkach, w których twórcy przysługuje prawo do wynagrodzenia.

Twoje mocne strony

Zrozumieć fizykę

Podręcznik *Zrozumieć fizykę 3* do zakresu rozszerzonego zawiera treści dotyczące takich zagadnień jak hydrostatyka, termodynamika, drgania i fale.



Przystępnie podane treści

Prosty język, infografiki i dobrze opracowane doświadczenia pomagają zrozumieć kluczowe informacje.

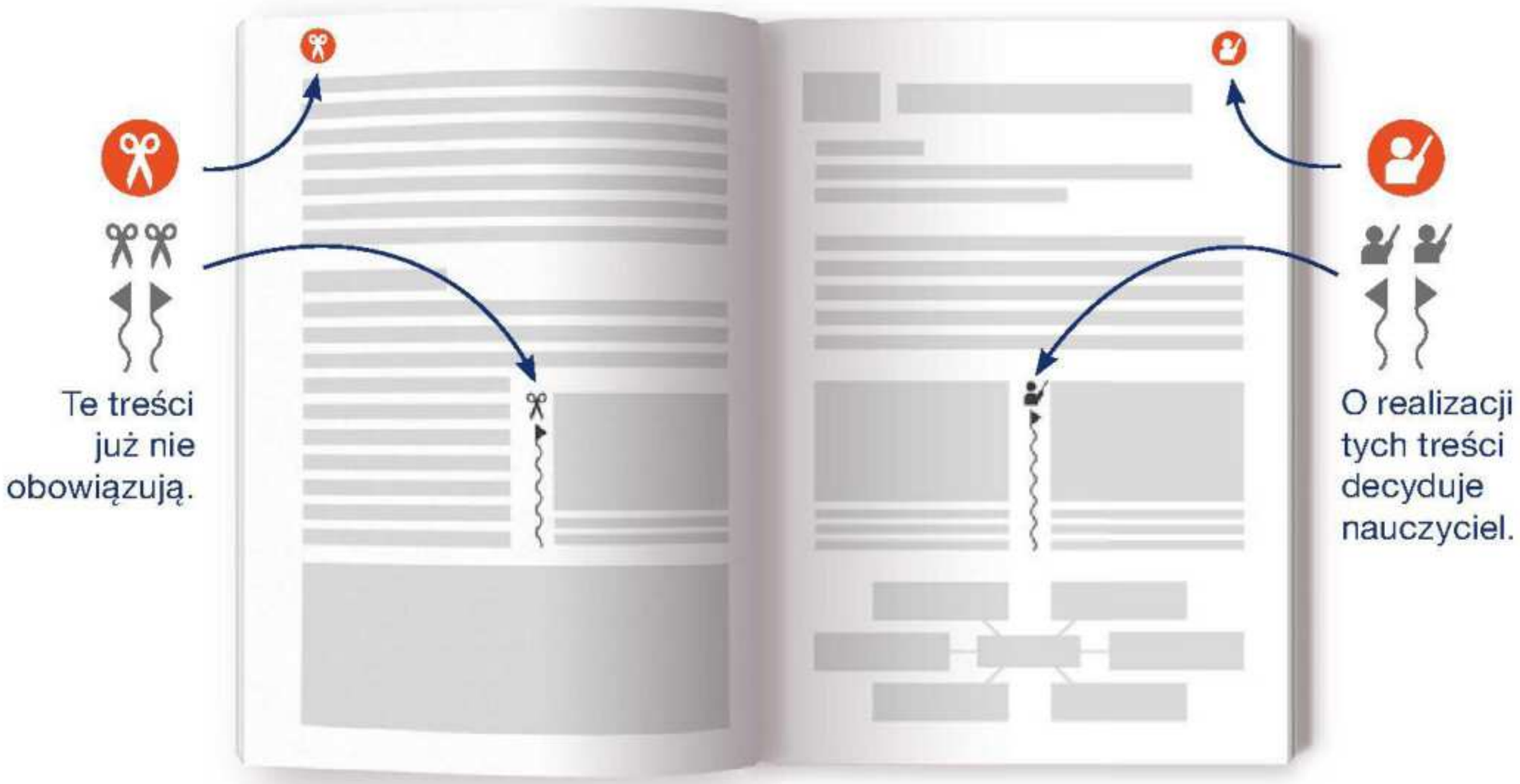
Wsparcie w nauce

Przykłady zadań rozwiązanych krok po kroku i dodatki matematyczne ułatwiają opanowanie kolejnych zagadnień.

Wiesz, umiesz, zdasz

Podsumowania teorii, przykłady i zadania powtórzeniowe pomagają w powtarzaniu materiału i przygotowaniach do matury.

W podręczniku znajdziesz oznaczenia treści, które od września 2024 r. nie są już wymagane.



Czerwona ikona na górze strony wskazuje, że na tej stronie znajdują się treści, które nie są wymagane – oznaczono je szarą ikoną i falką.

Nowa Era Sp. z o.o.

www.nowaera.pl nowaera@nowaera.pl

Centrum Kontaktu: 58 721 48 00

ISBN 978-83-267-5074-8