NOWOŚĆ

NOWE Zrozumieć fizykę

ZMIANY W PODSTAWACH 2024

podręcznik w pełni dostosowany

3

PODRĘCZNIK • LICEUM • TECHNIKUM

ZAKRES ROZSZERZONY

nowa era

NOWE

Zrozumieć fizykę

3

PODRĘCZNIK • LICEUM • TECHNIKUM

ZAKRES ROZSZERZONY

MARCIN BRAUN
KRZYSZTOF BYCZUK
AGNIESZKA SEWERYN-BYCZUK
ELŻBIETA WÓJTOWICZ

nowa era Twoje mocne strony

NOWE 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: **dr. hab. Stanisława Bednarka, dr. Sławomira Brzezowskiego, dr hab. Iwony Benenowskiej**.
Zakres kształcenia: rozszerzony
Etap edukacyjny: III
Typ szkoły: ponadpodstawowa (liceum ogólnokształcące i technikum)
Rok dopuszczenia: 2025
Numer ewidencyjny w wykazie MEN: 1219/3/2025

Podręcznik przygotowano na podstawie *Programu nauczania fizyki w liceum ogólnokształcącym i technikum do zakresu rozszerzonego. NOWE Zrozumieć fizykę* autorstwa A. Byczuk, K. Byczuka, S. Suwalda i Z. 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.

© Copyright by Nowa Era Sp. z o.o. 2026
ISBN 978-83-267-5348-0

Współpraca autorska: Joanna Borgensztajn – zad. 3 i 4 s. 284, Dorota Jeziorek-Knioła – zad. 2 s. 150, zad. 3 s. 227.
Opracowanie redakcyjne i redakcja merytoryczna: dr Agnieszka Grzelińska.
Konsultacje merytoryczne: Jacek Hirsch, Michał Matraszek.

Współpraca redakcyjna: Dorota Brzozowiec-Dek, Miłosz Budzyński.
Redakcja i korekta językowa: Dorota Rzeszewska. **Fotoedycja:** Katarzyna Iwan-Malawska.
Nadzór artystyczny: Ewa Kaletyn. **Opieka graficzna:** Maciej Galiński, Marcin Oleksak.
Projekt graficzny: Klaudia Jarocka, Aleksandra Szpunar. **Projekt okładki:** Maciej Galiński.
Opracowanie graficzne: Zuzanna Sri.
Infografiki: Laura Maziewska, Agata Muszalska, Marcin Ptak, Zuzanna Sri.
Ilustratorzy: Andrzej Dukata, Ewelina Baran, Elżbieta Buczkowska, Rafał Buczkowski, Marta Długokęcka, Zuzanna Dudzic, Paulina Jarmusik, Laura Maziewska, Krzysztof Mrawiński, Marek Nawrocki, Adam Poczciwek, Paulina Podolska, Joanna Ptak, Marcin Ptak, Ewa Sowulewska.
Realizacja projektu graficznego: Adam Poczciwek.

W rozdziale 13. wykorzystano teksty Weroniki Śliwy z podręcznika „Odkryć fizykę". Podręcznik „NOWE 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 tel. 58 721 48 00

Druk i oprawa:

Spis treści

O czym jest podręcznik 4

13. Grawitacja i elementy astronomii
13.1. Gwiazdy i planety 6
13.2. Układ Słoneczny 15
13.3. Księżyc widziany z Ziemi 21
13.4. Prawo powszechnego ciążenia 28
13.5. Siła grawitacji jako siła dośrodkowa 35
13.6. Pierwsze i drugie prawo Keplera 42
13.7. Trzecie prawo Keplera 51
13.8. Energia potencjalna grawitacji 56
Analiza tekstu. Siły pływowe 65
Wiesz, umiesz, zdasz 68

14. Pole elektryczne
14.1. Ładunki elektryczne i ich oddziaływanie . 76
14.2. Prawo Coulomba 85
14.3. Pole elektryczne 92
14.4. Pole elektryczne wielu źródeł 101
14.5. Elektrostatyczna energia potencjalna . . . 107
14.6. Potencjał i napięcie 115
14.7. Ładunki w przewodniku 122
14.8. Ruch naładowanej cząstki w polu elektrycznym 131
14.9. Kondensatory 136
Projekt. Generator Kelvina 141
Wiesz, umiesz, zdasz 143

15. Prąd stały
15.1. Prąd elektryczny i jego natężenie 152
15.2. Obwody elektryczne 158
15.3. Opór elektryczny 165
15.4. Połączenia szeregowe i równoległe 173
15.5. Opór a temperatura 184
15.6. Łączenie oporników 190
15.7. Od czego zależy opór elektryczny 196
15.8. Praca i moc prądu elektrycznego 199
15.9. Siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny 205
15.10. Drugie prawo Kirchhoffa 213
Analiza tekstu. Energia na czarną godzinę . . 218
Wiesz, umiesz, zdasz 220

16. Pole magnetyczne
16.1. Oddziaływania magnetyczne 230
16.2. Linie pola magnetycznego 238
16.3. Siła Lorentza 245
16.4. Ruch w polu magnetycznym 254
16.5. Siła elektrodynamiczna 262
16.6. Pole wokół przewodnika z prądem 268
Projekt. Kierunek linii ziemskiego pola magnetycznego 274
Wiesz, umiesz, zdasz 275

17. Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny
17.1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej . . 286
17.2. Prawo indukcji Faradaya 294
17.3. Silnik elektryczny i prądnica 300
17.4. Prąd przemienny 306
17.5. (F) Domowa sieć elektryczna 313
17.6. Transformator 323
17.7. Zastosowania indukcji elektromagnetycznej 329
17.8. Dioda i prostowanie prądu 334
Analiza tekstu. Dynamo we wnętrzu Ziemi . . 340
Wiesz, umiesz, zdasz 342

Tabele 351
Spis doświadczeń obowiązkowych 356
Spis infografik 356
Odpowiedzi i wskazówki do wybranych zadań 357
Indeks 363
Indeks nazw obcojęzycznych z wymową . . 366
Spis działów w pozostałych częściach . . . 367

O czym jest podręcznik

W podręczniku *Zrozumieć fizykę 3* znajdziesz 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

Ważne w tej lekcji:

Szybko się zorientujesz, co jest najważniejsze w danej lekcji.

Przypomnij sobie:

Łatwo sprawdzisz, co powinieneś wiedzieć z wcześniejszej edukacji.

$F = IlB\sin\alpha$

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

Inna nazwa planety...

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 nową wiedzę i nabyte umiejętności.

A to ciekawe

Dzięki ciekawostkom dowiesz się interesujących faktów związanych z lekcją.

F Wszystkie opisane czynniki mają...

Treści wykraczające poza podstawę programową.

Doświadczenie 1

Doświadczenie 2 obowiązkowe

Czytelnie opisane i zilustrowane doświadczenia ułatwią ci przeprowadzanie i analizowanie eksperymentów.

P Zadanie analogiczne do przykładu.

Zadanie do infografiki.

Do wykonania doświadczenia lub zadania przyda ci się telefon komórkowy.

Do opracowania wyników pomiarów będzie potrzebny komputer.

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.

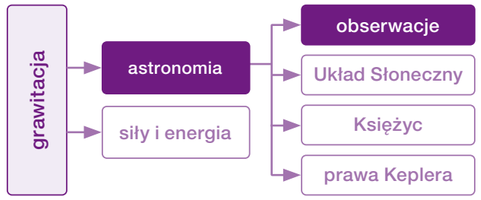
Zadania powtórzeniowe

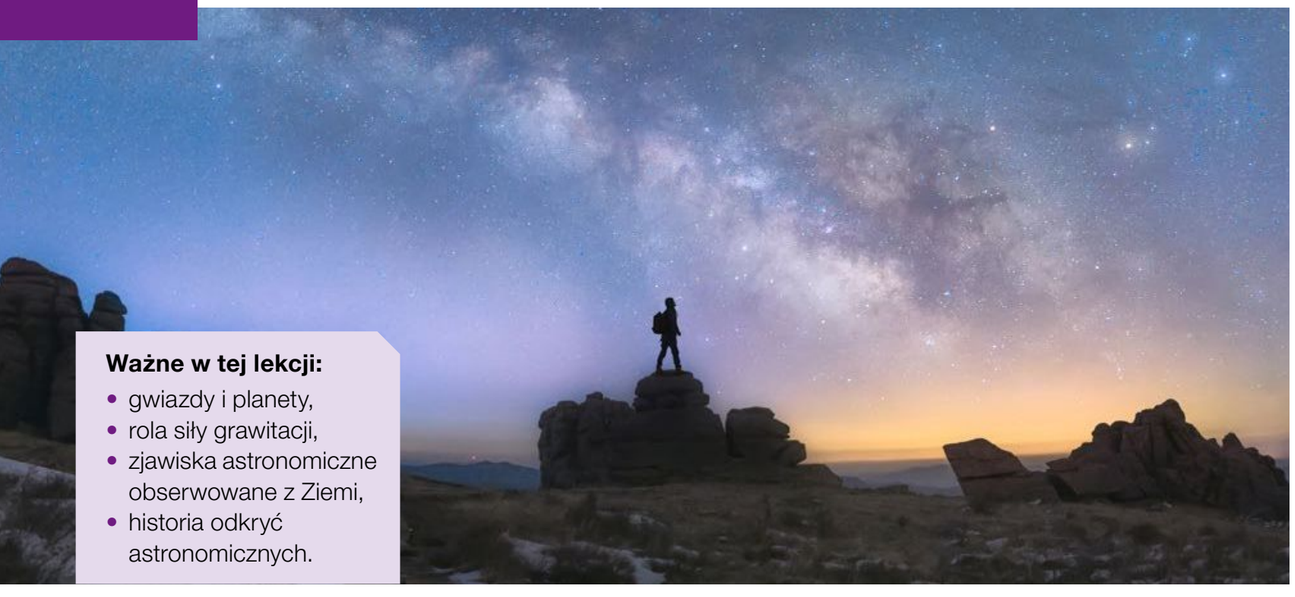
Dzięki tym zadaniom sprawdzisz stopień opanowania umiejętności i wiadomości z danego działu.

13. Grawitacja i elementy astronomii

1. Gwiazdy i planety
2. Układ Słoneczny
3. Księżyc widziany z Ziemi
4. Prawo powszechnego ciążenia
5. Siła grawitacji jako siła dośrodkowa
6. Pierwsze i drugie prawo Keplera
7. Trzecie prawo Keplera
8. Energia potencjalna grawitacji

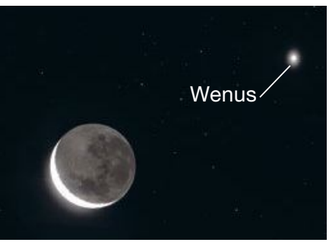
13.1 Gwiazdy i planety





Ważne w tej lekcji:
- gwiazdy i planety,
- rola siły grawitacji,
- zjawiska astronomiczne obserwowane z Ziemi,
- historia odkryć astronomicznych.

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 przy powierzchni Ziemi działa siła ciężkości.



Rys. **13.1.** Księżyc i Wenus widziane z Ziemi

Jak doskonale wiesz, Ziemia przyciąga nas siłą grawitacji, która powoduje spadanie ciał i ich nacisk na podłoże. Okazuje się jednak, że siły grawitacji wywołują także wiele zjawisk w skali kosmicznej – ruch planet wokół Słońca i ruch Księżyca wokół Ziemi, a nawet odpowiadają za powstawanie gwiazd i galaktyk.
Dlatego w tym samym dziale znajdą się jednocześnie wiadomości z grawitacji i z astronomii.

Co już wiesz o kosmosie

Z pewnością wiesz już całkiem sporo na temat ciał niebieskich. Podsumujmy więc i uzupełnijmy te wiadomości.

- W kosmosie jest bardzo wiele gwiazd. Świecą one własnym światłem.
- Gwiazdy w kosmosie występują w skupiskach zwanych galaktykami. Wszystkie gwiazdy widoczne gołym okiem znajdują się w naszej galaktyce, zwanej po prostu Galaktyką albo Drogą Mleczną.

- Jedną z gwiazd jest Słońce. Nie jest szczególnie dużą ani jasną gwiazdą, ale takie się wydaje, ponieważ patrzymy na nie z niewielkiej (jak na skalę astronomiczną) odległości.
- Wszystkie inne gwiazdy znajdują się znacznie dalej od Ziemi niż Słońce, ale ich odległości od nas są mocno zróżnicowane.
- Wokół Słońca krążą planety. Świecą one odbitym światłem słonecznym. Jedną z planet jest Ziemia.
- Wokół większości planet krążą księżyce. Także Ziemia ma swój księżyc o nazwie Księżyc.
- Ziemia wiruje wokół własnej osi – stąd wynika następstwo dnia i nocy.

Zwróć uwagę na ortografię: księżyc Ziemi nazywa się Księżyc.

To wszystko wiemy z książek, filmów czy internetu. Gdy jednak sami patrzymy w niebo, świat wydaje się zupełnie inny.

Co widzimy na niebie

Sfera niebieska

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, natomiast 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 niebieska nie istnieje fizycznie, ale jest pomocnym pojęciem i używają go również współcześni astronomowie.

Sfera to powierzchnia kuli.

Obrót sfery niebieskiej

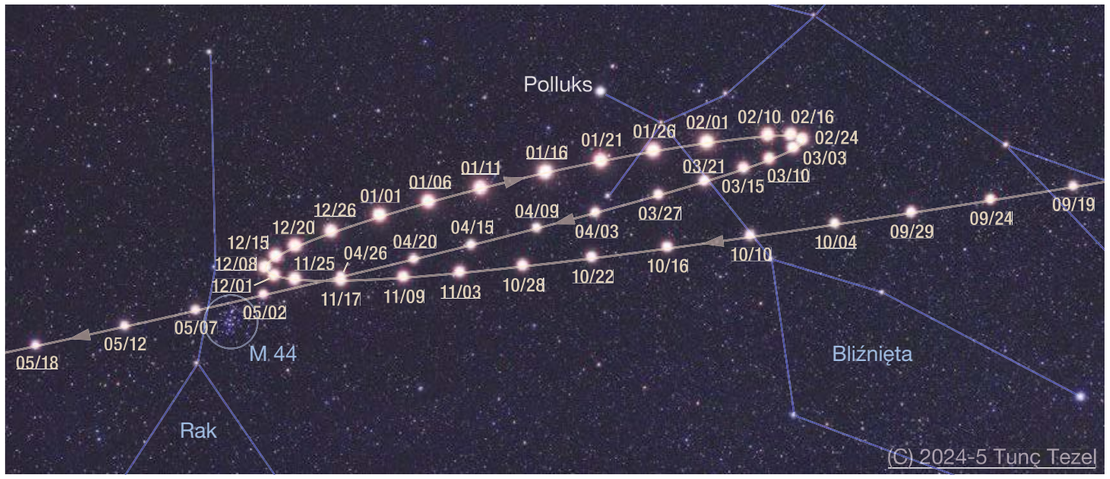
Jeżeli w nocy obserwujemy niebo wystarczająco długo, to widzimy, jak w ciągu kilku godzin jego widok się zmienia. Zauważamy, że gwiazdy wschodzą i zachodzą, ale nie zmieniają wzajemnego położenia. Wydaje nam się, że cała sfera niebieska obraca się wokół Ziemi.
Tylko Gwiazda Polarna, która jest położona tuż przy osi obrotu sfery niebieskiej, pozostaje praktycznie w spoczynku (rys. 13.2).

Rys. **13.2.** Ślady ruchu gwiazd na niebie, widoczne na zdjęciu o długim czasie naświetlania

Planety – „gwiazdy błądzące”

Jeszcze dokładniejsze obserwacje nieba, prowadzone przez kilka miesięcy, pozwolą znaleźć na nim obiekty, które oprócz tego, że biorą udział w zwykłym ruchu sfery niebieskiej, dodatkowo powoli poruszają się na tle gwiazd (rys. 13.3 na następnej stronie). Starożytni Grecy nazwali je planetami, co oznaczało „błądzące”.

Planety poruszają się po sferze niebieskiej po skomplikowanych torach.



Rys. **13.3.** Pętla zakreślana przez Marsa w gwiazdozbiorach: Bliźnięta i Rak, lata 2024/2025

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

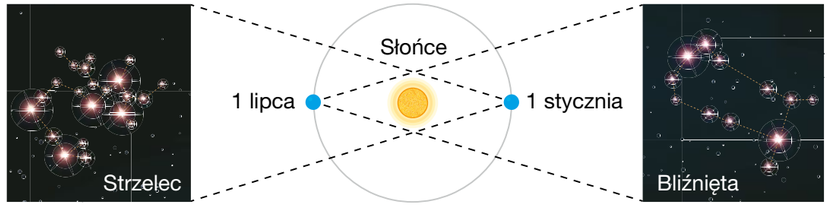
Skąd tak ogromne różnice między tym, co widzimy na niebie, a tym, co wiemy z astronomii?

Wynikają one z dwóch przyczyn: niedoskonałości naszego wzroku oraz obserwacji czynionych z Ziemi, która razem z nami porusza się wokół Słońca i wiruje wokół własnej osi.

JAK WIDZIMY KOSMOS Z ZIEMI

Przyczyna	Skutek
Ciała niebieskie są zbyt daleko, abyśmy mogli ocenić odległość (patrz ramka na następnej stronie)	Wydaje się, że ciała niebieskie znajdują się w jednakowej odległości od nas
Patrzymy z Ziemi, która się obraca. Nie odczuwamy jednak jej obrotu	Widzimy ruch gwiazd względem nas, więc sądzimy, że to one się poruszają
Patrzymy z Ziemi, która obiega Słońce. Tego ruchu jednak także nie odczuwamy	Wydaje się nam, że Słońce porusza się na tle gwiazd (rys. 13.4 na następnej stronie)

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 kręcącej się na drugiej karuzeli.



Rys. **13.4.** 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. Bezpośrednio można to zobaczyć tylko w czasie zaćmienia Słońca, ale już starożytni wiedzieli, że w dzień gwiazdy są na niebie, tylko nie widzimy ich przez znacznie silniejszy blask Słońca

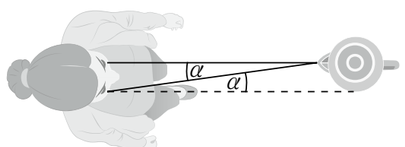
W starożytności 1 lipca Słońce było w gwiazdozbiorze Raka, ale zmieniło się to w wyniku precesji osi Ziemi, co uszło uwadze osób wierzących w astrologię.

W jaki sposób nasz mózg ocenia odległość?

Na siatkówce oka tworzy się **płaski** obraz widzianych przez nas przedmiotów. Jak więc oceniamy odległość? Mamy na to dwa sposoby.

1

Gdy patrzymy na bliski przedmiot, nasze oczy widzą go w nieco odmiennych kierunkach.
Na przykład im dalej znajduje się czajnik przedstawiony na rysunku, tym mniejszy jest kąt α.



2

Porównujemy pozorną wielkość obiektu ze znaną nam wielkością rzeczywistą.
Wiemy na przykład, jak duży jest autobus, więc kiedy wydaje się krótszy od palca, wyciągamy wniosek, że jest daleko.

W przypadku ciał niebieskich oba sposoby zawodzą. Odległość do nich jest tak duża, że oboje oczu widzi ten sam obraz, a do tego nie znamy z naszego życiowego doświadczenia rzeczywistych rozmiarów gwiazd i planet.

Bez takich wskazówek mózg traktuje wszystkie kosmiczne obiekty tak, jakby znajdowały się w tej samej odległości od nas. Stąd złudzenie istnienia sfery niebieskiej.

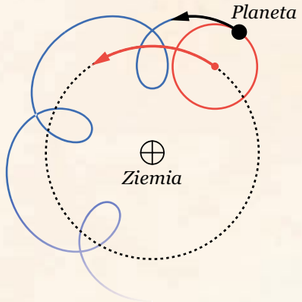
F

Jak odkrywano mechanikę nieba

Dość łatwo dziś wyjaśnić wyniki obserwacji na podstawie wiedzy astronomicznej. Jednak osiągnięcie dzisiejszego poziomu wiedzy było bardzo trudne i zajęło ludzkości kilka tysięcy lat.

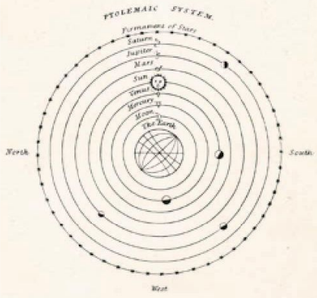
Platon i jego uczniowie (424 p.n.e. – 348 p.n.e.)

Już w starożytności wiedziano, że Ziemia jest kulista. Uważano jednak, że jest nieruchoma, a ciała niebieskie krążą wokół niej. Platon, filozof przekonany o matematycznej doskonałości świata, zachęcił uczniów do opisania ruchu ciał niebieskich jako ruchu jednostajnego. Okazało się, że ruch każdej planety można opisać jako złożenie kilku jednostajnych ruchów obrotowych. Nieco później przyjęto, że wokół Ziemi krąży nie sama planeta, ale **środek mniejszego okręgu**, po którym porusza się planeta. Pozwalało to opisać obserwowane z Ziemi ruchy planety po pętli.



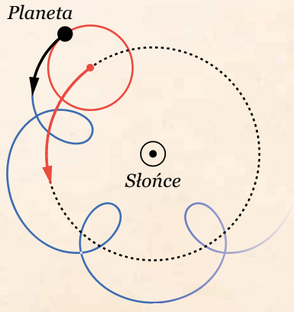
Klaudiusz Ptolemeusz (ok. 100 n.e. – ok. 168 n.e.)

Wykorzystał te pomysły oraz kilka własnych i ok. 140 roku stworzył matematyczną teorię ruchu ciał niebieskich. Pozwalała ona na bardzo precyzyjne przewidywanie położeń ciał niebieskich na niebie. Posługiwano się nią przez kilkanaście wieków. Była imponującym dziełem myśli ludzkiej.

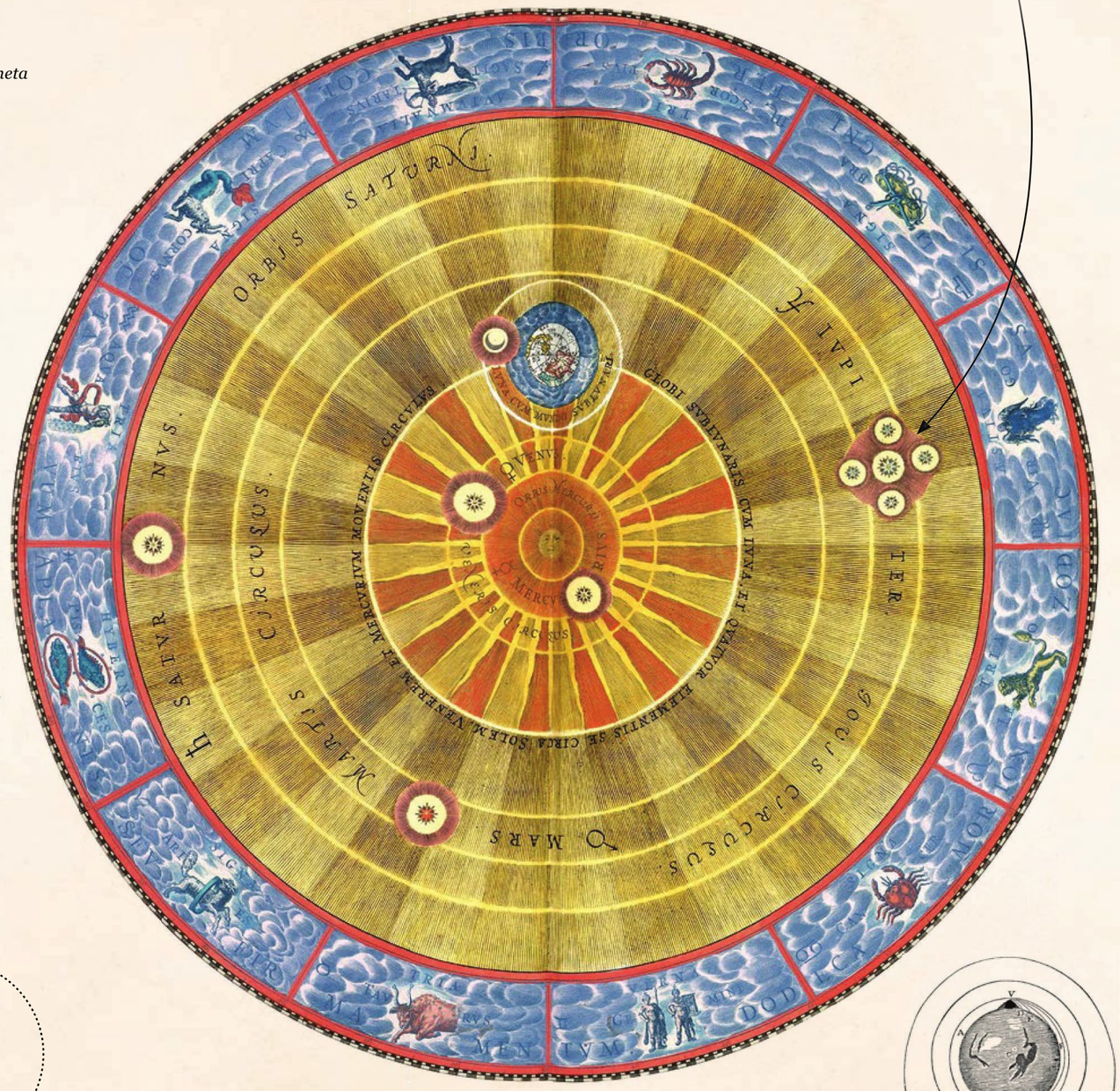


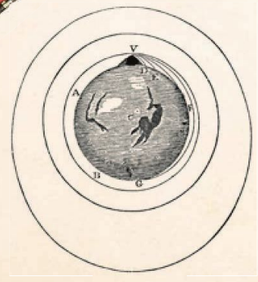
Mikołaj Kopernik (1473–1543)

Opracował konkurencyjną dla Ptolemeusza teorię, według której w środku świata znajduje się Słońce, a Ziemia jest jedną z planet. Sam pomysł był rewolucyjny, ale w szczegółach teoria Kopernika była bliska poglądom starożytnych. Ruch planet miał się odbywać zgodnie ze starym pomysłem: „po okręgu porusza się **środek następnego okręgu**”.



Rycina z atlasu “Harmonia Macrocosmica” z 1660 roku przedstawia ówczesny model Wszechświata. Uwzględnia ziemski Księżyc oraz odkrycia Galileusza z 1610 roku – księżyce krążące wokół Jowisza.



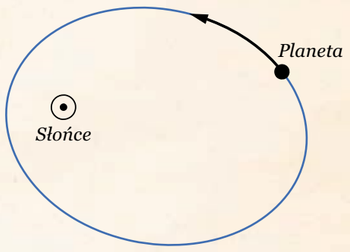


Galileusz (1564–1642)

Według Kopernika prawie wszystkie ciała niebieskie krążą wokół Słońca, ale Księżyc – wokół Ziemi. Początkowo astronomowie uważali to za niekonsekwencję. Dlatego 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. Astronomowie powoli przyzwyczajali się do systemu kopernikańskiego.

Jan Kepler (1571–1630)

Odkrył, że każda z planet porusza się wokół Słońca po elipsie, czyli krzywej wyglądającej jak spłaszczony okrąg. Co ważniejsze, opisał ruch planet za pomocą ilościowych praw (o których powiemy w kolejnych lekcjach).



Izaak Newton (1642–1727)

Zauważył, że ruch planet zgodny z prawami Keplera można wyjaśnić za pomocą siły grawitacji. Stwierdził też, że ta sama siła powoduje spadanie ciał na Ziemi, a ciała niebieskie podlegają tym samym prawom dynamiki, co ciała ziemskie. W ten sposób połączył astronomię z fizyką – dawniej uważano, że ruchem ciał niebieskich rządzą zupełnie inne prawa niż ruchem ciał na Ziemi.

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. Obserwacje najlepiej prowadzić 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 urzędowym 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**.

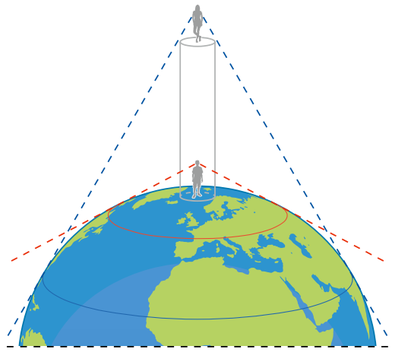
Najprostszym sposobem identyfikowania obiektów na niebie jest skorzystanie z darmowej aplikacji na smartfona, np. **SkyView Free**, **Night Sky**, **Star Chart**, **Star Walk 2** albo **Sky Map**. Gdy kierujemy telefon ku niebu, na jego ekranie pojawiają się gwiazdy i planety widoczne za nim, ale podpisane.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Już starożytni wiedzieli, że Ziemia jest kulą. Jeden z podawanych przez nich argumentów pokazano na ilustracji (Ziemia, obserwatorzy i wysokość, na jakiej znajduje się jeden z nich, nie są przedstawieni w skali). Przedstaw go słowami.

Wskazówka. Jak sądzisz, co przedstawiają okręgi niebieski i czerwony?



2. (i) Do każdego odkrycia astronomicznego A–E dopasuj jedno nazwisko z ramki I–IV.

I. Galileusz II. Kepler III. Kopernik 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.

3. Porównajmy ruch obrotowy Ziemi do ruchu obrotowego karuzeli na placu zabaw. Przyjmijmy, że odległość krzesełka karuzeli od osi obrotu wynosi 80 cm, a okres obrotu wynosi 3 s.

a) Porównaj prędkość liniową pasażera karuzeli z prędkością liniową człowieka na równiku Ziemi, a następnie – ich przyspieszenia dośrodkowe.

b) Która z tych wielkości odpowiada za to, że na karuzeli wyraźnie czujemy obrót, a obrotu Ziemi nie odczuwamy? Dlaczego tak jest?

4. Odległości w kosmosie są bardzo duże, dlatego do ich zapisu korzysta się z poznanej przez ciebie wcześniej notacji wykładniczej. Zapisz w metrach za pomocą tej notacji:

a) 6370 km – promień Ziemi,

b) 384 tys. km – odległość od Ziemi do Księżyca,

c) 150 mln km – odległość od Ziemi do Słońca,

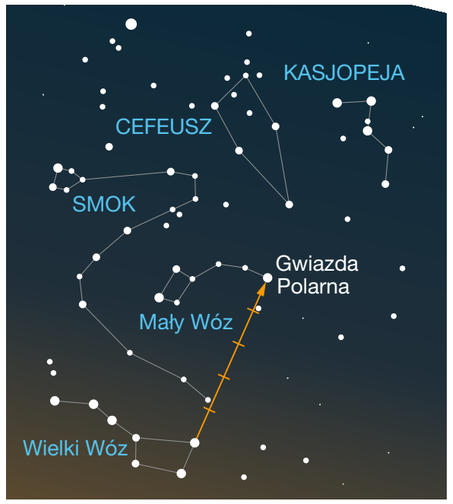
d) 5,9 mld km – odległość od Słońca do Plutona.

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 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.

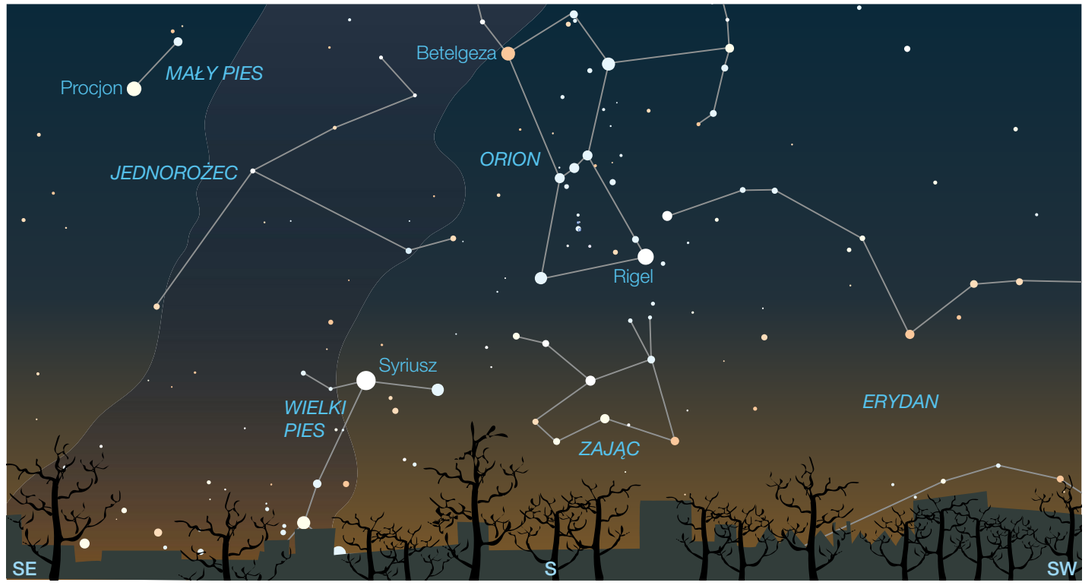
6. Poszukaj gwiazdozbiorów według poniższego opisu.

a) Wydrukuj z odpowiedniego programu komputerowego mapę nieba na czas i miejsce przewidywanych obserwacji.

b) Stań na otwartej przestrzeni twarzą ku południu. Unieś mapę nad głową tak, aby dolna część ilustracji wskazywała południe, a górna – znajdowała się za tobą, czyli była skierowana na północ.

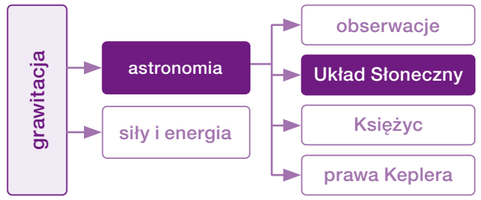
c) Spróbuj odnaleźć na niebie najjaśniejsze gwiazdy, które widzisz na mapie. Zorientujesz się dzięki temu, gdzie szukać kolejnych, słabiej świecących gwiazd.

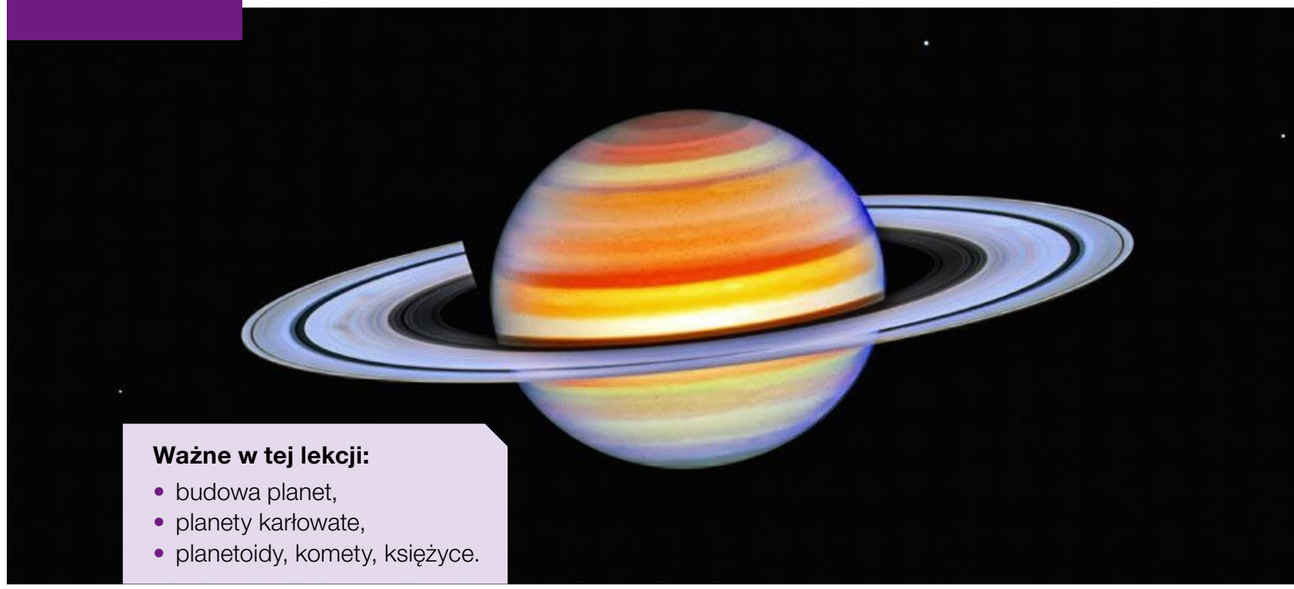
d) Poszukaj gwiazdozbiorów. Wielką Niedźwiedzicę i Małą Niedźwiedzicę odnajdziesz na niebie każdej pogodnej nocy, podobnie jak bardzo charakterystyczny Gwiazdozbiór Kasjopei. Wiele gwiazdozbiorów obserwujemy na niebie tylko przez część roku. Zimą warto poszukać Oriona, latem – Herkulesa i Wolarza.



Niebo widziane z Polski późnym wieczorem (ok. godz. 23) na początku stycznia. SE, S i SW to strony świata: południowy-wschód, południe i południowy-zachód

13.2 Układ Słoneczny





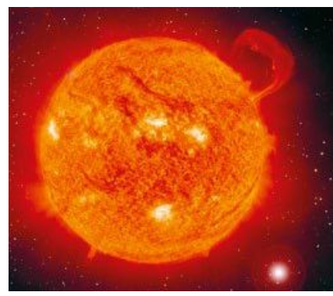
Ważne w tej lekcji:
- budowa planet,
- planety karłowate,
- planetoidy, komety, księżyce.

Przypomnij sobie:
- Ziemia jest jedną z planet krążących wokół Słońca.
- Słońce świeci własnym światłem. Planety odbijają światło słoneczne.

Masa w Układzie Słonecznym

Omówienie budowy Układu Słonecznego zacznijmy od porównania mas ciał wchodzących w jego skład. Słońce ma masę ponad 300 000 razy większą od masy Ziemi i ponad 1000 razy większą od masy Jowisza – największej planety układu Słonecznego. 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.



Rys. **13.5.** Słońce skupia większą część masy Układu Słonecznego

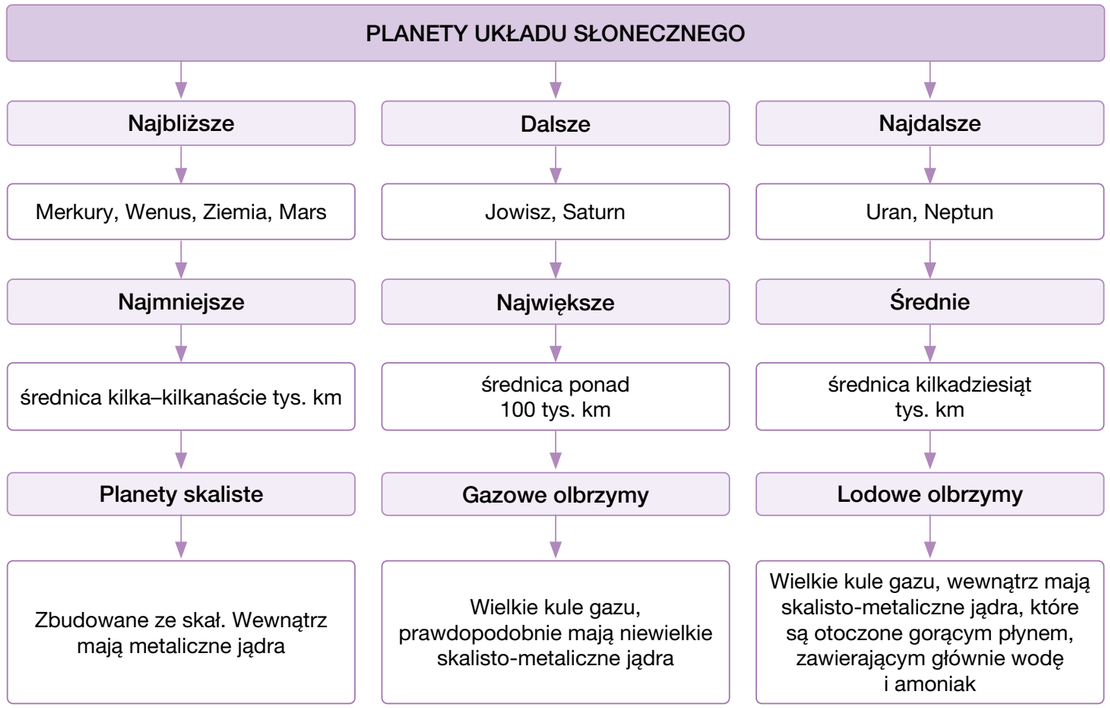
Reszta, w tym ogromna z naszego punktu widzenia masa Ziemi, to drobne pozostałości po formowaniu się naszej gwiazdy.

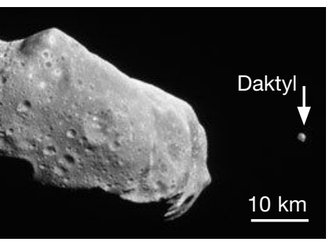
Planety Układu Słonecznego

Największe spośród ciał krążących wokół Słońca nazywamy planetami.

Wokół Słońca krąży osiem planet.

Pod względem wielkości i budowy możemy je podzielić na trzy grupy. Co ciekawe, taki podział zgadza się z ich kolejnością od najbliższej do najdalszej od Słońca.





Rys. **13.6.** Planetoida Ida i jej księżyc Daktyl

Nazwa lodowych olbrzymów może mylić, ponieważ nie ma na nich lodu. Określenie wzięło się stąd, że tuż po uformowaniu planet woda i amoniak trafiły na nie w postaci lodu lub gazu uwięzionego w lodzie. Więcej informacji o planetach znajdziesz na infografice → s. 18–19.

Mniejsze obiekty Układu Słonecznego

Planetoidy

Pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza znajduje się obszar, w którym wokół Słońca krążą niewielkie ciała niebieskie, zwane **planetoidami** (rys. 13.6). Podobny pas drobnych ciał niebieskich znajduje się za orbitą Neptuna.

Planety karłowate

Kategorię pośrednią między planetami a planetoidami stanowią **planety karłowate**. Należy do nich Ceres, obiegająca Słońce w pasie planetoid, a także Pluton i kilka innych ciał niebieskich leżących dalej niż Neptun.

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

Księżyce

Większość planet, a także część planet karłowatych i planetoid, ma swoje księżyce. Wokół Ziemi krąży tylko jeden, o nazwie Księżyc, ale wokół wielkich planet – 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. Księżycami nazywamy je nie z powodu małej masy, ale dlatego, że obiegają Słońce, krążąc wokół planet.
Największym księżycem w Układzie Słonecznym jest księżyc Jowisza – Ganimedes.

Komety

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. 13.7).

Meteoroidy

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

Rys. **13.7.** Kometa NEOWISE widziana nad Wrocławiem, lato 2020 r.

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

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. polski astronom Aleksander Wolszczan jako pierwszy odkrył planety pozasłoneczne.

Do 2024 r. odkryto już kilka tysięcy planet pozasłonecznych. Jednak z badań astronomów wynika, że w naszej Galaktyce są ich prawdopodobnie miliardy.

Inna nazwa planety pozasłonecznej to **egzoplaneta**.

Układ Słoneczny

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

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

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.

Jowisz

- 11,0R_z
- 5,20 au (778 mln km)
- 12 lat

Największa planeta – 318 razy masywniejsza od Ziemi.

Saturn

- 9,14R_z
- 9,57 au (1432 mln km)
- 29 lat

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

Uran

- 3,98R_z
- 19,16 au (2867 mln km)
- 84 lata

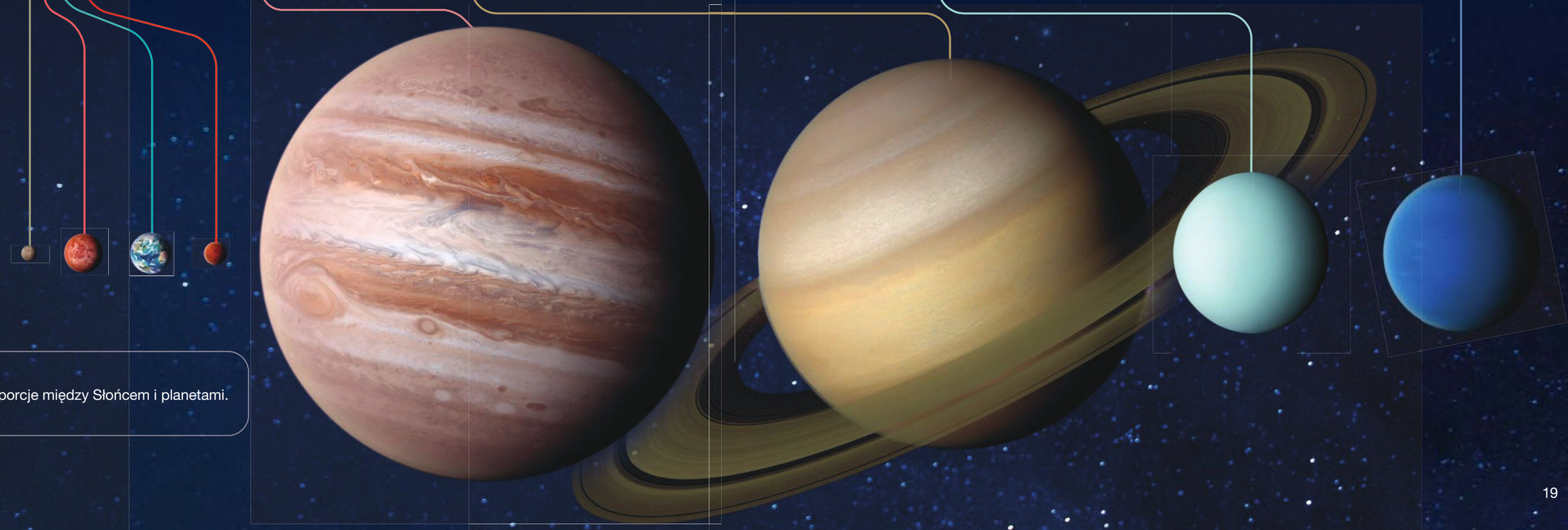
Uran „leży na boku” – oś obrotu planety znajduje się niemal w płaszczyźnie orbity.

Neptun

- 3,86R_z
- 30,18 au (4515 mln km)
- 165 lat

Na Neptunie wieją najsilniejsze wiatry – o prędkościach dochodzących do 2000 $\frac{km}{h}$.

1 au · 5 au · 10 au · 15 au · 20 au · 25 au · 30 au



Proporcje między Słońcem i planetami.

Poszukiwania życia pozaziemskiego

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

Badania Marsa pokazują, że wbrew wcześniejszym poglądom szanse na znalezienie życia na tej planecie są niewielkie. Bardziej prawdopodobnym miejscem może okazać się księżyc Jowisza o nazwie Europa, na którym prawie na pewno znajduje się ciekła woda, a może także księżyc Saturna – Enceladus.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. (i) Oceń prawdziwość zdań. Dla każdego ze zdań fałszywych podaj przykład dowodzący jego nieprawdziwości.

a) Im dalej od Słońca znajduje się planeta, tym jest większa.

b) Cztery planety leżące najbliżej Słońca mają budowę podobną do Ziemi.

c) Jowisz i Saturn to największe planety w Układzie Słonecznym.

d) W Układzie Słonecznym tylko Ziemia ma atmosferę.

e) Im większa jest planeta, tym większą ma gęstość.

2. Porównaj największą planetę Układu Słonecznego z jego najmniejszą planetą. 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 większą?

3. Pluton porusza się wokół Słońca po orbicie będącej bardziej spłaszczoną elipsą niż orbita Ziemi. Najmniejsza odległość tej planety karłowatej od Słońca to 29,6 au, a największa to 48,8 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 : 2 000 000 000. Ziemia ma w nim średnicę 6 mm, co odpowiada wielkości jagody. Oblicz, jaką średnicę miałyby w tej skali podane ciała niebieskie, i podaj przykłady obiektów tej wielkości:

a) Słońce,

b) Jowisz,

c) Księżyc.

5. Rozważmy model Układu Słonecznego opisany w poprzednim zadaniu. Oblicz:

a) w jakiej odległości od Słońca znalazłaby się Ziemia, a w jakiej – Neptun,

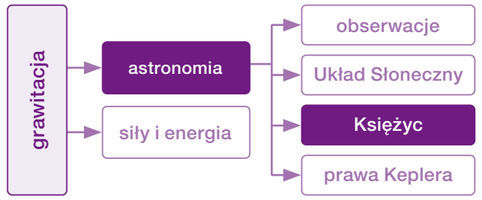
b) w jakiej odległości od Ziemi znalazłby się Księżyc.

6. 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.

13.3 Księżyc widziany z Ziemi



Ważne w tej lekcji:
- fazy Księżyca,
- zaćmienia,
- wschody i zachody Księżyca,
- powierzchnia Księżyca.

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. Dlatego na ziemskim niebie jasno świeci tylko ta 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. Te zmiany w wyglądzie Księżyca widzianego z Ziemi określamy jako **fazy Księżyca**.

- 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, zwłaszcza że w tej sytuacji Księżyc znajduje się na niebie blisko Słońca. 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. Mamy wtedy **pełnię**.

Rysunki faz Księżyca znajdują się na następnej stronie.

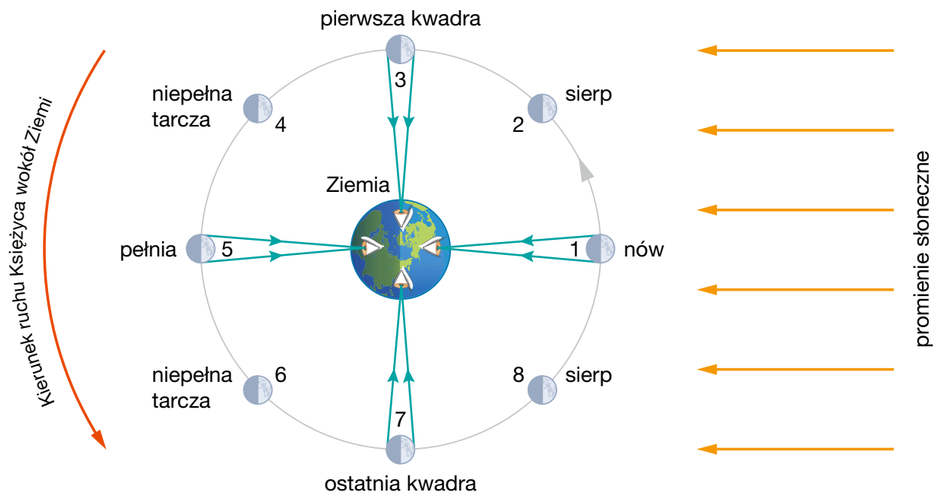
- Po pełni z Ziemi obserwujemy coraz mniejszą część tarczy Księżyca. Gdy widać jej połowę, Księżyc jest **w ostatniej kwadrze**.
- Po ostatniej kwadrze obserwujemy, że oświetlona jest coraz mniejsza część Księżyca, aż znowu mamy **nów**.

Zauważ, że Słońce zawsze oświetla połowę powierzchni Księżyca, ale rzadko całą tę połowę, którą widać z Ziemi. Dzieje się tak tylko w czasie pełni. 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.

Rys. **13.8.** Fazy Księżyca widziane na niebie (dla półkuli północnej)

Jak powstają fazy Księżyca

Na rysunku przedstawiono Księżyc w poszczególnych fazach, widziany z półkuli północnej. Schematyczny rysunek oka obserwatora i zielone linie pomogą ci wyobrazić sobie, w jaki sposób widzimy cztery z tych faz.



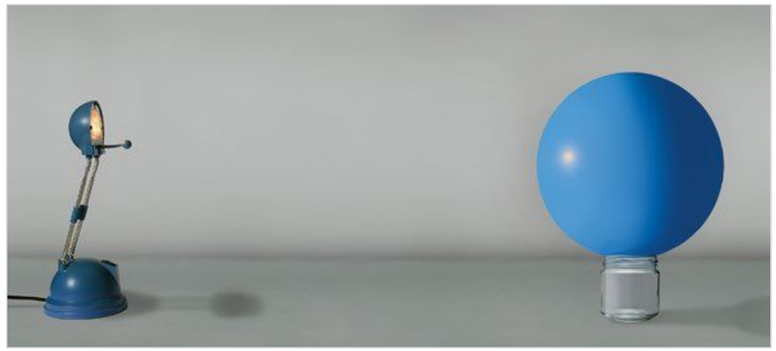
Fazy Księżyca – doświadczenie modelowe

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

Doświadczenie 1

1. Na otwartym słoiku lub podobnej podstawce ustaw piłkę, która będzie naszym modelem Księżyca. Ustaw lampkę tak, aby z pewnej odległości oświetlała nasz model.
2. Stań między lampką a piłką tak, aby nie zasłaniać światła lampki. Jaki kształt ma oświetlona część piłki? Jakiej fazie Księżyca odpowiada ta sytuacja?
3. Stań teraz w takim miejscu, aby między piłką, tobą i lampką powstał kąt prosty (zdjęcie a). Jaką fazę Księżyca obserwujesz?
4. Stań teraz po drugiej stronie globusa niż lampka, ale tak, aby piłka nie zasłaniała żarówki (zdjęcie b). Czy widzisz oświetloną część?
5. Ustaw się teraz w taki sposób, aby widzieć fragment oświetlonej części w kształcie sierpa. Jak wtedy są ustawione względem ciebie piłka i lampka?

a)

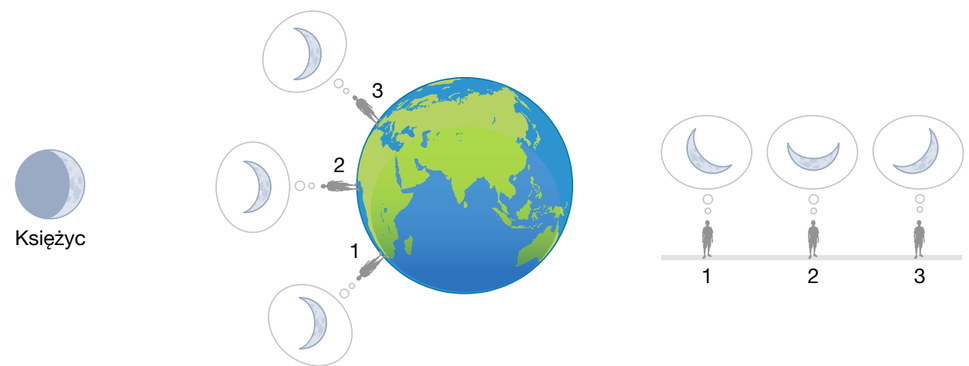


b)

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

Fazy Księżyca z różnych szerokości geograficznych

W ramce na wcześniejszej stronie przedstawiliśmy Księżyc w poszczególnych fazach, tak jak go widać z Polski i ogólnie – z umiarkowanych szerokości geograficznych na półkuli północnej.

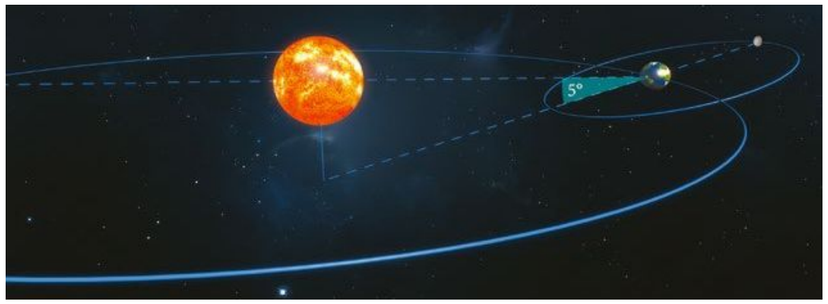


Rys. **13.9.** Zachodzący Księżyc wkrótce po nowiu, widziany na różnych szerokościach geograficznych

W Australii czy Afryce Południowej fazy wyglądają odwrotnie (księżyc „rośnie” i „maleje” z przeciwnej strony). Natomiast w okolicach równika Księżyc ma kształt sierpa z rogami do góry lub na dół. Dlaczego? Wyjaśnienie przedstawiono na rysunku 13.9 (na poprzedniej stronie). Aby zobaczyć, co widzi każdy z obserwatorów, obróć książkę tak, aby ustawić obserwatora głową do góry.

Zaćmienie Księżyca

W czasie pełni Ziemia znajduje się między Słońcem a Księżycem, jednak na ogół nie zasłania naszego satelity, ponieważ płaszczyzna orbity Księżyca jest nachylona względem płaszczyzny orbity Ziemi pod kątem ok. 5° (rys. 13.10).

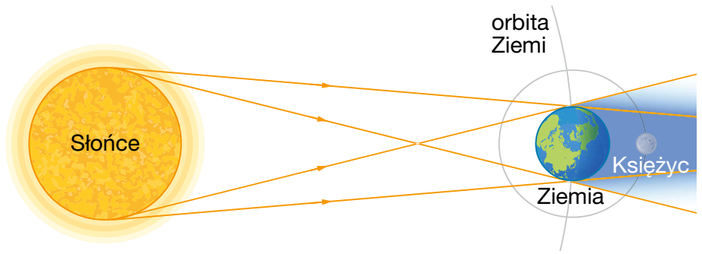


Rys. **13.10.** Nachylenie orbity Księżyca względem orbity Ziemi, położenie Księżyca w pełni (na rysunku nie zachowano proporcji)

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

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

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. 13.11).



Rys. **13.11.** Ustawienie Słońca, Ziemi i Księżyca podczas zaćmienia Księżyca (na rysunku nie zachowano proporcji)

Zaćmienie całkowite i częściowe

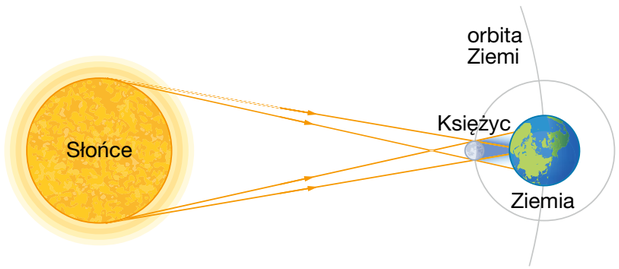
Zaćmienie jest całkowite wtedy, gdy w cieniu Ziemi znajduje się cały Księżyc, a częściowe wtedy, gdy tylko jego część zostaje zasłonięta przez Ziemię przed światłem słonecznym.
W drugim przypadku widoczny jest fragment tarczy (rys. 13.12).

Rys. **13.12.** Częściowe zaćmienie Księżyca widziane z Polski w 2017 r.

Zaćmienie Słońca

Czy jest możliwa sytuacja odwrotna: 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 – jedynie w tym obszarze obserwujemy wtedy **zaćmienie Słońca** (rys. 13.13). Jak myślisz, w jakiej fazie jest Księżyc podczas zaćmienia Słońca?

> Słońce podczas swojego zaćmienia jest niewidoczne, ponieważ zasłania je Księżyc.



Rys. **13.13.** Ustawienie Słońca, Ziemi i Księżyca podczas zaćmienia Słońca

Księżyc jest wtedy oczywiście w nowiu, ponieważ Słońce oświetla jego część niewidoczną z Ziemi.

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 je obchodzić, 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. 13.14).
Chociaż tylko jedną stronę Księżyca możemy obserwować z Ziemi, drugą znamy ze zdjęć wykonanych przez sondy kosmiczne oraz obserwacji załóg misji Apollo (rys. 13.15).

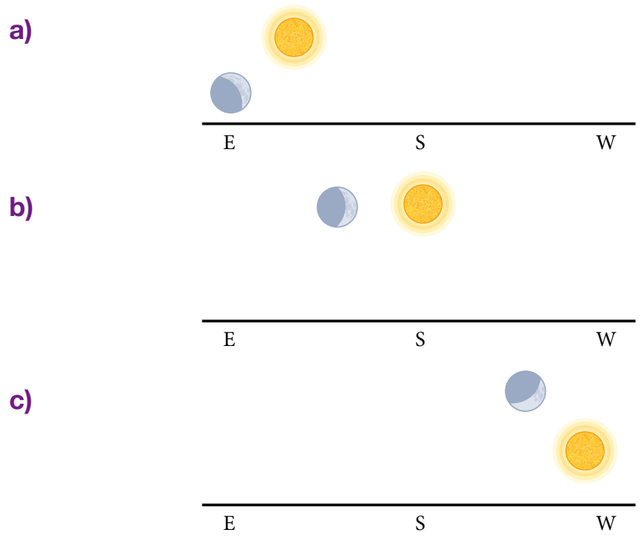
Rys. **13.14.** Chodzenie naokoło krzesła – model ruchu Księżyca wokół Ziemi

Rys. **13.15.** Niewidoczna z Ziemi strona Księżyca

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 zaraz po nowiu Księżyc przyjmuje kształt sierpa, znajduje się na niebie niedaleko Słońca – wschodzi i zachodzi wkrótce po nim (rys. 13.16).



Rys. **13.16.** Słońce i Księżyc wkrótce po nowiu: a) rano, b) w południe, c) wieczorem. Litery E, S, W oznaczają strony świata

Powierzchnia Księżyca

Księżyc jest pozbawiony atmosfery, wody i organizmów żywych – czynników, które zmieniają wygląd powierzchni naszej planety. Dlatego do dziś pozostały na nim kratery powstałe w wyniku uderzeń drobnych ciał niebieskich na samym początku jego historii.

W wyniku największych takich kolizji księżycowa skorupa została przebita. Wylały się spod niej potoki gorącej lawy. Kiedy zastygła, utworzyła ciemniejsze obszary, zwane morzami (choć nigdy nie było w nich wody). Morza księżycowe widzimy z Ziemi gołym okiem (rys. 13.17).

Rys. **13.17.** Kilka nazw ciemnych obszarów na Księżycu

Rys. **13.18.** Ślad buta astronauty pozostanie na Księżycu na zawsze, ponieważ nie ma tam wody ani powietrza, które by go zatarły

Obserwacja kraterów księżycowych

Do obserwacji kraterów na Księżycu może posłużyć lornetka. Najlepiej są one widoczne wtedy, gdy rzucają długie cienie. Ich długość zmienia się w czasie ruchu Księżyca i podczas jego kolejnych faz. Dlatego obserwacje warto prowadzić codziennie lub przynajmniej co dwa, trzy dni. Wtedy każdego dnia będziemy mogli zobaczyć dokładniej inne kratery.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Odpowiedz na pytania.

a) Czy widok połowy tarczy Księżyca na bezchmurnym 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 jego część zwrócona ku Ziemi nie jest oświetlona przez Słońce. Kiedy można się o tym bezpośrednio przekonać?

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

2. 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)

3. Wyobraźmy sobie bazę kosmiczną założoną na samym środku niewidocznej z Ziemi strony Księżyca. Słońce będzie tam wschodzić i zachodzić. Jak rozpoznać z Ziemi, czy w takiej bazie jest dzień czy noc? Jak długo będzie trwała taka „księżycowa doba”?

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 jest potrzebna 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.

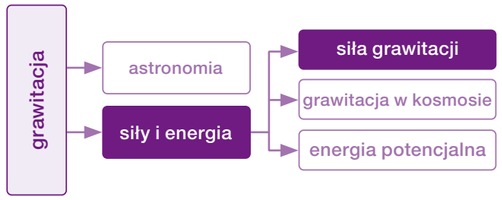
b) Przeprowadź cztery obserwacje tarczy Wenus w miesięcznych odstępach. Zapisz daty swoich obserwacji. Za każdym razem naszkicuj kształt obserwowanej planety.

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 (jak sądzisz, dlaczego?). Zanim wykonasz zadanie, musisz więc sprawdzić, np. za pomocą komputerowej mapy nieba, kiedy dokładnie będzie można zobaczyć Wenus w dniach twoich obserwacji.

13.4 Prawo powszechnego ciążenia



Ważne w tej lekcji:
- obliczanie siły grawitacji,
- warunki stosowania wzoru,
- siła ciężkości na Ziemi i innych planetach.

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 g.
- Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki oddziaływania ciał są wzajemne.

Prawo powszechnego ciążenia

We wcześniejszych lekcjach powiedzieliśmy, że grawitacja odpowiada zarówno za spadanie ciał na Ziemi (patrz ramka „Przypomnij sobie" na następnej stronie), jak i za tory ruchu ciał niebieskich.
Okazuje się jednak, że siła grawitacji działa między dowolnymi dwoma ciałami, np. między kubkiem a czajnikiem. Ponieważ w przypadku ciał o niewielkiej masie siła tego oddziaływania jest bardzo mała, nie obserwujemy skutków jej działania. Nawet dwie stutonowe lokomotywy stojące kilka metrów od siebie przyciągają się siłą zaledwie setnych części niutona.

Słowo *grawitacja* (od łac. *gravis* – ciężki) oznacza dosłownie ciążenie.

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.

Prawo powszechnego ciążenia brzmi następująco:

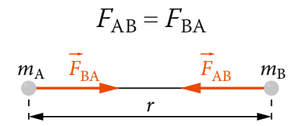
Dwa punkty materialne przyciągają się siłami grawitacji działającymi wzdłuż prostej łączącej te punkty, a wartość każdej z tych sił jest wprost proporcjonalna do mas tych punktów materialnych i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi.

Matematycznie prawo to zapisujemy następującym wzorem:

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

F – wartość siły grawitacji; G – stała grawitacji; m_1, m_2 – masy punktów materialnych; r – odległość między punktami materialnymi

Występująca we wzorze stała proporcjonalności G, nazywana **stałą grawitacji**, to stała uniwersalna, czyli taka sama w całym Wszechświecie i niezmienna w czasie: $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{Nm^2}{kg^2}$.
Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki siły grawitacji działające między dwoma ciałami mają tę samą wartość i ten sam kierunek, ale przeciwne zwroty (rys. 13.19). Tak więc nie tylko Ziemia przyciąga każdego z nas, lecz także każdy z nas przyciąga Ziemię siłą równą swojemu ciężarowi.



Rys. **13.19.** Siły grawitacji, jakimi wzajemnie oddziałują na siebie punkty materialne, mają ten sam kierunek, przeciwne zwroty i tę samą wartość

Przypomnij sobie

SIŁA CIĘŻKOŚCI I SPADEK SWOBODNY

Ziemia przyciąga wszystkie ciała siłą grawitacji (zwaną też siłą ciężkości) proporcjonalną do masy ciała:

$$F_g = mg$$

F_g – siła grawitacji ziemskiej; m – masa ciała; g – przyspieszenie ziemskie

Nazwa *przyspieszenie ziemskie* bierze się stąd, że kiedy jedyną siłą działającą na ciało jest siła ciężkości, porusza się ono właśnie z przyspieszeniem g:

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

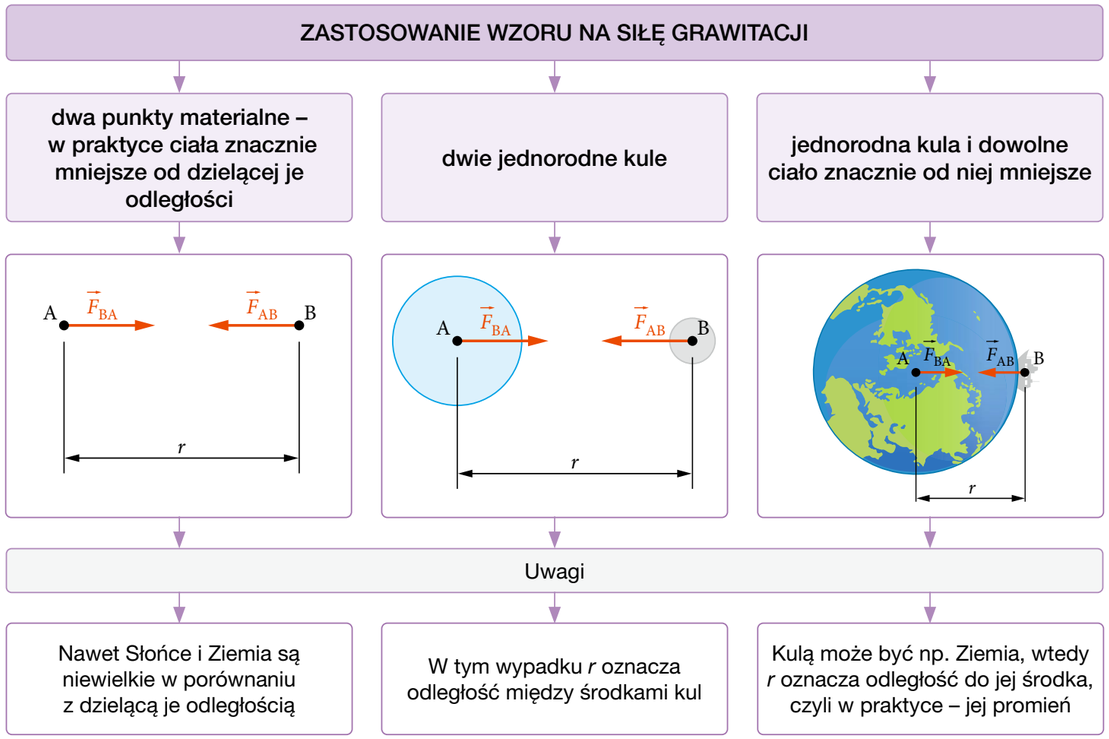
Tak spadają wszystkie ciała w próżni (a więc bez oporu ośrodka).

Analogicznie jest na innych ciałach niebieskich, tyle że przyspieszenie grawitacyjne g ma tam inną wartość. Na przykład na Księżycu g jest 6 razy mniejsze od ziemskiego, zatem ciała spadają tam z 6 razy mniejszym przyspieszeniem niż na Ziemi, a podniesienie ciała wymaga 6 razy mniejszej siły.

Uwaga. Rozpędzenie ciała, czyli nadanie mu przyspieszenia, wymaga takiej samej siły na Księżycu, na Ziemi, a nawet w stanie nieważkości. Bezwładność związana jest z masą, a nie z ciężarem.

Kiedy można stosować wzór na siłę grawitacji

Prawo powszechnego ciążenia sformułowaliśmy dla punktów materialnych. Zawarty w nim wzór można stosować w kilku przypadkach.



Przybliżone obliczenia

Jednak w przypadku kul odległość może być niewielka, a wzór i tak daje dokładny wynik (patrz diagram powyżej).

Wzór $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$ można także stosować w przypadkach innych 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. 13.20a) 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. 13.20b).

a)

b)

Rys. **13.20.** 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 innych planetach

Siłę grawitacji ziemskiej można obliczać ze znanego ci wzoru:

$$F_g = mg$$

ale można także skorzystać z ogólnego wzoru:

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

Z porównania tych wzorów wynika, że przyspieszenie ziemskie możemy obliczyć ze wzoru:

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

Odległość ciała na Ziemi od jej środka jest równa promieniowi Ziemi – patrz diagram na poprzedniej stronie.

Z tego samego wzoru można skorzystać do wyznaczania przyspieszenia grawitacyjnego na innych ciałach niebieskich – należy tylko odpowiednio podstawić masę i promień danego ciała.

Dzięki temu znamy g na innych planetach, nawet tych, na których nigdy nie lądowały statki kosmiczne.

(F) Czynniki wpływające na przyspieszenie grawitacyjne

Kiedy z podanego wyżej wzoru wyznaczamy przyspieszenie grawitacyjne, przyjmujemy przybliżone założenie, że Ziemia jest idealną kulą, i pomijamy jej obrót. Jeśli interesuje nas rzeczywiste przyspieszenie, z jakim spadają ciała, musimy też wziąć pod uwagę:

- różnicę między kształtem Ziemi a idealną kulą,
- różnice gęstości wynikające z budowy geologicznej,
- obrót Ziemi i wynikającą z niego siłę odśrodkową.

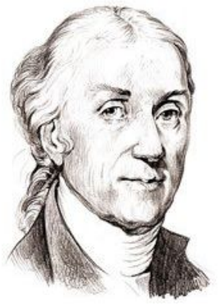
Wszystkie opisane czynniki mają jednak niewielki wpływ na wartość przyspieszenia grawitacyjnego. Spośród nich najistotniejsze jest spłaszczenie Ziemi.
Przyspieszenie ziemskie mierzone na poziomie morza zmienia się od 9,78 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ na równiku do 9,83 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ w okolicach biegunów. Z dokładnością do dwóch cyfr znaczących jest to zawsze 9,8 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$, a rzadko potrzebujemy bardziej precyzyjnych danych.

W różnych książkach słowo „ciężar” może oznaczać: siłę grawitacji działającą na ciało, wypadkową tej siły oraz siły odśrodkowej wynikającej z obrotu Ziemi, a nawet siłę, którą ciało oddziałuje na podłoże.

Wyznaczanie stałej grawitacji i masy Ziemi

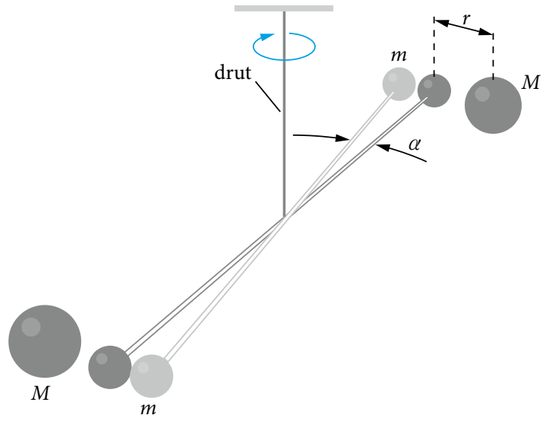
Jak obliczyć masę Ziemi? Można skorzystać z odpowiednio przekształconego wzoru $g = \frac{GM}{R^2}$, ale w tym celu trzeba najpierw zmierzyć wartość stałej G, czyli zmierzyć siłę grawitacji między dwoma ciałami o znanych masach.

Ponieważ w przypadku ciał z naszego otoczenia siła grawitacji jest niewielka, dlatego jej zmierzenie jest bardzo trudne nawet dziś.



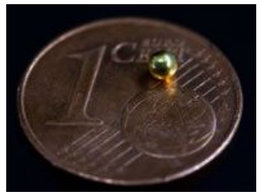
Rys. **13.21.** Henry Cavendish (1731–1810), brytyjski chemik i fizyk

Takiego pomiaru dokonał po raz pierwszy w 1798 r. **Henry Cavendish**. Wykorzystał on urządzenie pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 13.22.



Rys. **13.22.** Schemat pomiaru stałej grawitacji w doświadczeniu Cavendisha

Dwie kulki o jednakowych masach m = 0,78 kg badacz umocował na końcach lekkiego pręta zawieszonego na sprężystym drucie. Do małych kulek na pręcie zbliżył dwie duże kule z ołowiu o jednakowych masach M = 158 kg. Pod wpływem przyciągania kulki zamocowane na pręcie przesunęły się w stronę ołowianych kul, a drut uległ skręceniu. Na podstawie kąta tego skręcenia (na rys. 13.22 jest to kąt α) można obliczyć moment sił skręcających drut, a stąd wyznaczyć siłę grawitacji między kulami. Cavendish wykonał doświadczenie niezmiernie starannie. Sprawdzał, czy różnica temperatury kulek i powietrza, potencjalnie mogąca powodować konwekcyjny ruch powietrza, ma wpływ na wynik. 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%.
Niedawno, w 2020 r., fizycy powtórzyli eksperyment Cavendisha dla maleńkich złotych kulek o masie poniżej 0,1 g (rys. 13.23).



Rys. **13.23.** Złota kulka użyta do eksperymentu w porównaniu z monetą 1-centową (fot. Aspelmeyer group, University of Vienna)

A to ciekawe

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

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Planeta ma gęstość taką samą jak Ziemia, czyli $d = 5500\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Jednak przyspieszenie grawitacyjne na jej powierzchni wynosi $g_1 = 3\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Wyznacz promień tej planety.

Dane: $\boldsymbol{d = 5500\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$ – gęstość planety,
$\boldsymbol{g_1 = 3\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$ – przyspieszenie grawitacyjne przy powierzchni planety

Szukane: $\boldsymbol{R}$ – promień planety

Rozwiązanie:
Objętość kuli o promieniu R obliczamy ze wzoru:

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

Dodatek matematyczny 2, podręcznik cz. 2 → s. 389

Jeśli taka kula ma gęstość d, to jej masa wynosi:

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

Gęstość, podręcznik cz. 1 → s. 258

Zgodnie ze wzorem wyprowadzonym w tej lekcji przyspieszenie grawitacyjne na planecie o masie M i promieniu R wynosi:

$$g_1 = \frac{GM}{R^2} = \frac{G \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 d}{R^2} = \frac{4}{3}\pi GRd \qquad (1)$$

Sposób I
Stąd promień planety jest równy:

$$R = \frac{3g_1}{4\pi Gd}$$

Podstawmy dane i przeliczamy jednostkę:

$$R = \frac{3 \cdot 3\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{4\pi \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5500\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$[R] = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{\text{m}}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \text{m}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $R = 1{,}95 \cdot 10^6\ \text{m} = 1950\ \text{km}$.

Sposób II
Z postaci wzoru (1) na g_1 widzimy, że przy jednakowej gęstości przyspieszenie grawitacyjne na planecie jest proporcjonalne do jej promienia. Możemy więc porównać rozważaną w zadaniu planetę z Ziemią:

$$\frac{g_1}{g} = \frac{R}{R_\text{Z}} \quad \rightarrow \quad R = \frac{g_1}{g} \cdot R_\text{Z}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy taki sam wynik jak sposobem I.

Odpowiedź: Promień planety wynosi 1950 km.

Zadania s. 34

Pytania i zadania

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 wtedy Ziemię większą siłą: Mars czy Jowisz? Wykonaj odpowiednie obliczenia i podaj stosunek tych sił.

Postaraj się tak uprościć wzory, aby działania na liczbach były jak najprostsze.

2. Dwie małe kulki z odległości 12 cm przyciągają się siłą 40 pN. Oblicz:

a) jaką siłą przyciągają się z odległości 4 cm, a jaką – z odległości 24 cm,

b) z jakiej odległości będą się przyciągać siłą 160 pN, a z jakiej – siłą 2,5 pN.

3. Oblicz, o ile procent zmniejszy się siła grawitacji ziemskiej działająca na ciało, gdy podniesiemy je z powierzchni Ziemi na wysokość:

a) 10 km (typowa wysokość przelotowa samolotów),

b) 100 km (umowna granica przestrzeni kosmicznej),

c) 420 km (wysokość, na jakiej Ziemię okrąża Międzynarodowa Stacja Kosmiczna).

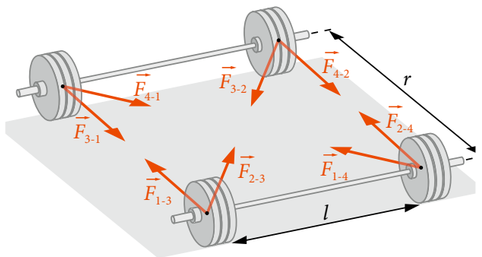
4. Na podstawie prawa powszechnego ciążenia wyznacz przyspieszenie grawitacyjne na Ziemi i na Księżycu. Podaj wynik z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

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

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.

13.5 Siła grawitacji jako siła dośrodkowa

grawitacja → astronomia → siła grawitacji; grawitacja w kosmosie; energia potencjalna
grawitacja → siły i energia

Ważne w tej lekcji:
- znaczenie siły grawitacji,
- prędkość satelity,
- pierwsza prędkość kosmiczna.

Przypomnij sobie:
- Aby ciało poruszało się ruchem jednostajnym po okręgu, musi na nie działać siła o stałej wartości i stale skierowana do środka tego okręgu.
- Ciała niebieskie krążą po swoich orbitach dzięki sile grawitacji.

Dlaczego Księżyc nie spada na Ziemię?

Czy zastanawiałeś się kiedyś, dlaczego siła grawitacji powodująca spadek jabłka nie powoduje (na szczęście!) spadku Księżyca na Ziemię?
Jak wiesz, gdy na ciało nie działa żadna siła, spoczywa ono lub porusza się po linii prostej. Aby poruszało się po okręgu, musi działać na nie siła powodująca zakrzywienie toru, skierowana do środka okręgu i z tego powodu zwana siła dośrodkową. W ruchu Księżyca wokół Ziemi, a także w ruchu innych księżyców wokół planet i planet wokół Słońca, tę rolę odgrywa siła grawitacji.

Siła dośrodkowa, podręcznik cz. 1 → s. 169

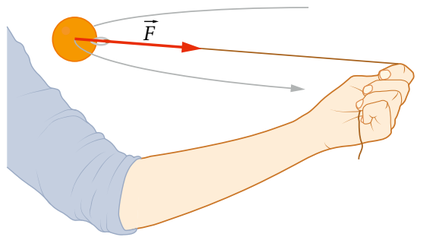
Siła grawitacji jest siłą dośrodkową powodującą zakrzywienie toru ruchu planet wokół Słońca i księżyców wokół planet.

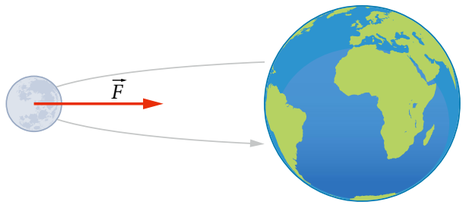
Orbita, po której porusza się Księżyc, to elipsa, ale ponieważ jest ona zbliżona do okręgu, będziemy ją traktować jak okrąg.

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 tor Księżyca i zapobiega jego oddalaniu się od Ziemi.

Siła grawitacji a siła sprężystości

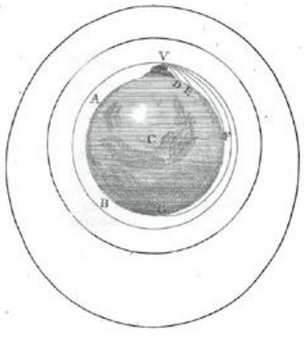
Siła grawitacji, powodująca krążenie Księżyca wokół Ziemi, pełni taką samą funkcję jak siła sprężystości nici, powodująca krążenie piłeczki po okręgu. Różna jest natomiast fizyczna natura tych sił.





- 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 przestałaby krążyć i oddaliłaby się od ciebie po prostej stycznej do okręgu.
- 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 po prostej stycznej do orbity.

Działo Newtona



Rys. **13.24.** Rycina z dzieła Izaaka Newtona

Izaak Newton wymyślił obrazowy sposób wyjaśnienia działania grawitacji jako siły dośrodkowej. Wyobraził sobie działo ustawione na wysokiej górze (rys. 13.24).

- Im większa prędkość pocisku opuszczającego lufę, tym dalej on doleci.
- Przy dużej prędkości znaczenie zaczyna mieć zakrzywienie Ziemi – powierzchnia planety „ucieka spod pocisku" i w rezultacie dolatuje on dalej, niż miałoby to miejsce na płaskiej powierzchni.
- W końcu, przy bardzo dużej prędkości, spadanie pocisku i „uciekanie" powierzchni Ziemi będą się równoważyć. Wtedy pocisk okrąży Ziemię i trafi kanoniera od tyłu.

Takim „pociskiem" był dla Newtona Księżyc, który porusza się wokół Ziemi. Dzisiaj podobnymi „pociskami" są także sztuczne satelity.

Obliczanie prędkości satelity

Orbity Księżyca i wielu sztucznych satelitów wokół Ziemi, a także wielu księżyców innych planet, są zbliżone do okręgu. Dlatego dla uproszczenia dalej zajmiemy się przypadkiem, gdy orbita ma kształt okręgu.

Aby ciało mogło się poruszać po takiej orbicie z prędkością v, musi na nie działać siła dośrodkowa o wartości:

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

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:

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

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

Zauważ, że prędkość nie zależy od masy satelity.

Powyższa zależność pozwala obliczyć prędkość satelity poruszającego się po kołowej orbicie wokół planety albo prędkość planety obiegającej gwiazdę.
Zwróć uwagę na to, 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.

Pierwsza prędkość kosmiczna

Prędkość satelity krążącego nad planetą po okręgu na wysokości niewielkiej w stosunku do promienia planety nazywamy **pierwszą prędkością kosmiczną** i oznaczamy v_I.

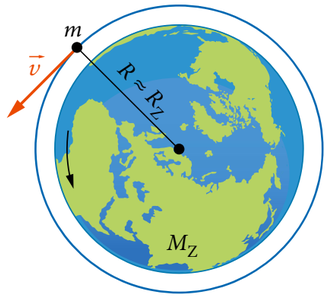
Wysokość, na jakiej krąży satelita Ziemi, nie może być dowolnie mała, ponieważ atmosfera naszej planety spowodowałaby jego zatrzymanie. Jednak na wysokości kilkuset kilometrów praktycznie nie ma już atmosfery, a odległość od środka Ziemi jest tylko o kilka procent większa niż na jej powierzchni.
Prędkość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

Obliczanie pierwszej prędkości kosmicznej dla Ziemi

Obliczmy pierwszą prędkość kosmiczną dla Ziemi. Satelita znajduje się niezbyt wysoko, zatem jego odległość od środka Ziemi jest w przybliżeniu równa promieniowi Ziemi $R_Z = 6370$ km (rys. 13.25).
Po podstawieniu tej wartości oraz masy Ziemi $M_Z = 6 \cdot 10^{24}$ kg do wyprowadzonego wcześniej wzoru i po wykonaniu obliczeń otrzymujemy:

$$v_I = 7900\ \frac{m}{s}$$

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



Rys. **13.25.** Odległość satelity poruszającego się na niewielkiej wysokości nad powierzchnią Ziemi jest w przybliżeniu równa promieniowi Ziemi

JEST NA TO SPOSÓB

Powiązanie ruchu dwóch satelitów tego samego ciała niebieskiego

Wokół planety krążą dwa satelity. Oba obiegają planetę w tej samej płaszczyźnie i w tę samą stronę. Promień orbity satelity S_1 wynosi r_1, a okres jego obiegu to T_1. Natomiast satelita S_2 krąży po orbicie o promieniu $r_2 = 4r_1$.

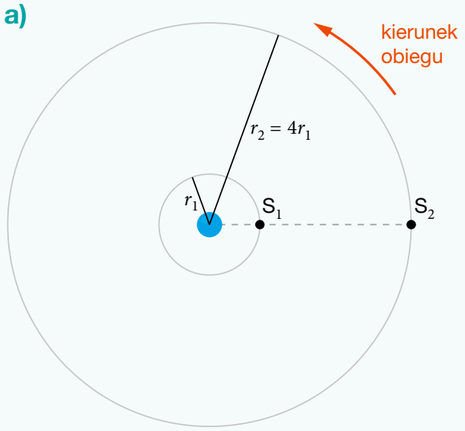
W pewnej chwili t_0 odległość między satelitami jest minimalna. Po czasie t odległość ta stanie się po raz pierwszy maksymalna. Wyznacz czas t jako ułamek T_1.

PRZEANALIZUJ ROZWIĄZANIE KROK PO KROKU

Krok 1. **Analizujemy jakościowo sytuację opisaną w zadaniu**

Zaczynamy od wykonania schematycznego rysunku. Odległość między satelitami jest minimalna, kiedy są one ustawione w jednej linii z planetą i po tej samej stronie planety. Zaznaczamy także kierunek obiegu. Możemy to zrobić dowolnie, ponieważ kierunek na rysunku i tak zależy od tego, z której strony patrzymy na planetę.

a)



Po uwzględnieniu wszystkich potrzebnych informacji wykonaliśmy rysunek a).

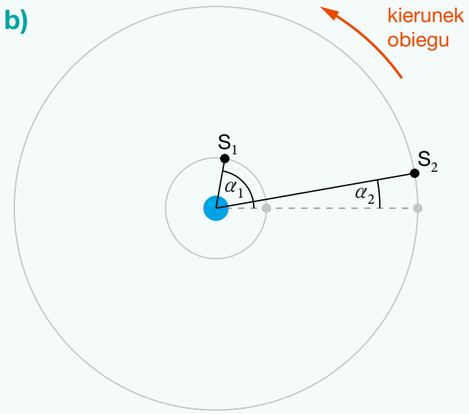
Maksymalna odległość odpowiada sytuacji, kiedy satelity także znajdą się w jednej linii z planetą, ale są po jej przeciwnych stronach. Mamy obliczyć, po jakim czasie to nastąpi w porównaniu z okresem obiegu pierwszego satelity.

Krok 2. **Porównujemy ruch satelitów**

Aby wyobrazić sobie ruch satelitów po orbitach, powinniśmy jeszcze wiedzieć, który satelita porusza się z prędkością większą i ile razy.

Nie obliczymy wartości prędkości satelitów, jednak możemy je porównać:

b)



Długość orbity S_1: $2\pi r_1$, długość orbity S_2: $2\pi r_2 = 2\pi \cdot 4r_1 = 4 \cdot 2\pi r_1$

- dla satelity S_1

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{r_1}}$$

- dla satelity S_2

$$v_2 = \sqrt{\frac{GM}{r_2}} = \sqrt{\frac{GM}{4r_1}} = \sqrt{\frac{1}{4}}\sqrt{\frac{GM}{r_1}} = \frac{1}{2}v_1$$

Tak więc satelita S_2 porusza się 2 razy wolniej, a ponieważ ma 4 razy dłuższą orbitę, więc jej obieg zajmuje mu 8 razy więcej czasu:

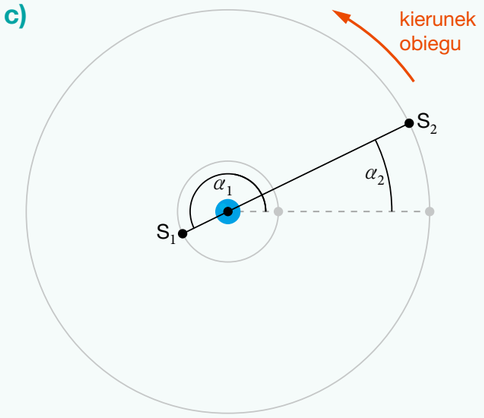
$$T_2 = 8T_1$$

Tak więc kąt, o jaki obróci się promień wodzący (odcinek łączący planetę z satelitą), będzie w określonym przedziale czasu 8 razy większy dla S_1 niż dla S_2. Na rysunku b) zaznaczono kąty α_1 oraz α_2 w pewnej chwili.

Krok 3. **Obliczamy kąt α_1, dla którego satelity oddalą się maksymalnie**

Kąt α_1 rośnie szybciej od α_2, więc zanim jeszcze satelita S_1 wykona pełny obieg, w pewnej chwili znajdzie się po przeciwnej stronie planety niż S_2. Kąt α_1 będzie wtedy o 180° większy niż kąt α_2 – patrz rysunek c).

c)



Otrzymaliśmy więc układ dwóch równań:

$$\begin{cases} \alpha_1 = 8\alpha_2 \\ \alpha_1 = \alpha_2 + 180^\circ \end{cases}$$

Po jego rozwiązaniu dostajemy szukany kąt:

$$\alpha_1 = \frac{8}{7} \cdot 180^\circ = \frac{4}{7} \cdot 360^\circ$$

Kąt zapisaliśmy jako wielokrotność kąta pełnego, aby można go było powiązać z okresem obiegu – czasem, w jakim satelita wykonuje pełny obieg planety, czyli jego promień wodzący obraca się właśnie o kąt pełny.

Krok 4. **Obliczamy szukany stosunek czasów i zapisujemy odpowiedź**

Tak więc satelita S_1 wykona $\frac{4}{7}$ pełnego obiegu od chwili, gdy odległość między satelitami była minimalna, do chwili, gdy była ona maksymalna. Oznacza to, że czas $t = \frac{4}{7}T_1$.

Odpowiedź: Szukany czas wynosi $\frac{4}{7}T_1$.

Sprawdź, czy rozumiesz

1. Po jakim najkrótszym czasie t_1 od chwili t_0 promienie wodzące satelitów będą wzajemnie prostopadłe? Wyraź ten czas jako ułamek okresu T_1.
2. Rozwiąż zadanie sformułowane na poprzedniej stronie dla sytuacji, w której $r_2 = 1{,}21r_1$.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Na jakiej wysokości okrąża Ziemię satelita, którego okres obiegu wynosi $T = 2$ h?

Dane: $\boldsymbol{T = 2\ \mathrm{h}} = 7200$ s – okres obiegu satelity
Szukane: $\boldsymbol{h}$ – wysokość nad Ziemią, na jakiej znajduje się satelita

Rozwiązanie:

Szukamy wzoru, w którym występuje promień orbity

Aby obliczyć wysokość orbity nad Ziemią, wystarczy znać promień r tej orbity, więc od obliczenia tego promienia zaczniemy. Występuje on we wzorze na prędkość satelity okrążającego Ziemię po orbicie kołowej:

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

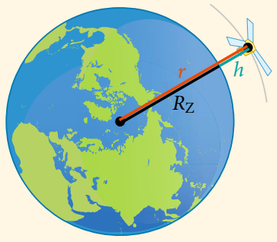
Jednak prędkość o stałej wartości możemy obliczyć także jako stosunek drogi do czasu. Wiemy, że w czasie jednego okresu obiegu T ciało przebywa drogę równą długości okręgu, czyli $2\pi r$:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi r}{T}$$

Obliczamy promień orbity

Porównujemy te dwa wzory:

$$\frac{2\pi r}{T} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



i wyznaczamy promień orbity satelity:

$$\frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{GM}{r} \quad \rightarrow \quad 4\pi^2 r^3 = GMT^2 \quad \rightarrow \quad r^3 = \frac{GMT^2}{4\pi^2}$$

Ostatecznie dostajemy:

$$r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}$$

Podstawiamy dane i przeliczamy jednostkę:

$$r = \sqrt[3]{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot 6 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg} \cdot (7200\ \mathrm{s})^2}{4\pi^2}}$$

$$[r] = \sqrt[3]{\frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot \mathrm{kg} \cdot \mathrm{s^2}} = \sqrt[3]{\frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}} \cdot \mathrm{m^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot \mathrm{kg} \cdot \mathrm{s^2}} = \sqrt[3]{\mathrm{m^3}} = \mathrm{m}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $r = 8{,}07 \cdot 10^6$ m $= 8070$ km.

Obliczamy szukaną wysokość

Taka jest odległość satelity od środka Ziemi. Zatem aby obliczyć jego wysokość nad powierzchnią Ziemi, trzeba od tej wielkości odjąć promień Ziemi:

$$h = r - R_Z = 8070\ \mathrm{km} - 6370\ \mathrm{km} = 1700\ \mathrm{km}$$

Odpowiedź: Satelita porusza się na wysokości 1700 km ponad powierzchnią Ziemi.

1. Oblicz prędkość i okres obiegu satelity okrążającego Ziemię na wysokości równej jej promieniowi. Porównaj tę prędkość z pierwszą prędkością kosmiczną dla Ziemi.

2. P Satelita okrąża Ziemię po orbicie kołowej w czasie 10 h. Oblicz, na jakiej wysokości nad powierzchnią Ziemi się znajduje. Odpowiedź podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

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

4. Oblicz pierwszą prędkość kosmiczną dla Księżyca.

5. Wykaż za pomocą obliczeń, że Słońce przyciąga Księżyc ponad dwa razy silniej niż przyciąga go Ziemia. Przekształć wzory tak, aby działania na liczbach były jak najprostsze.

Jak pogodzić ten wynik z faktem, że Księżyc krąży wokół Ziemi?

6. Przypomnij sobie treść ramki na s. 36. Dlaczego w przypadku piłeczki mówiliśmy *styczna do okręgu*, a w przypadku Księżyca – *styczna do orbity?*

7. Wiele satelitów można obserwować gołym okiem.

a) Wybierz miejsce, z którego dobrze widać znaczną część nieba, położone z dala od źródeł sztucznego światła.

b) Sprawdź na interaktywnej mapie nieba na stronie Heavens Above, jakich satelitów można się spodziewać w najbliższym czasie. Jeśli jeden z nich należy do „szczególnie interesujących satelitów", to będziesz mógł wydrukować od razu mapę nieba z zaznaczonym torem i godziną przelotu satelity.

c) Przybliżone tory pozostałych satelitów możesz nanieść na mapę ręcznie.

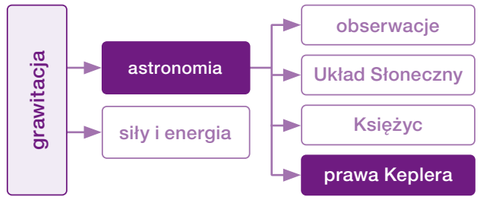
d) Wybierz się na miejsce obserwacji. Za pomocą kompasu ustal strony świata. Nie włączaj żadnych źródeł światła. Poczekaj, aż wzrok przyzwyczai się do mroku. Jeśli chcesz sprawdzać godzinę za pomocą telefonu, to włącz takie ustawienia, aby niezbyt jasne cyfry wyświetlały się na całkowicie ciemnym ekranie.

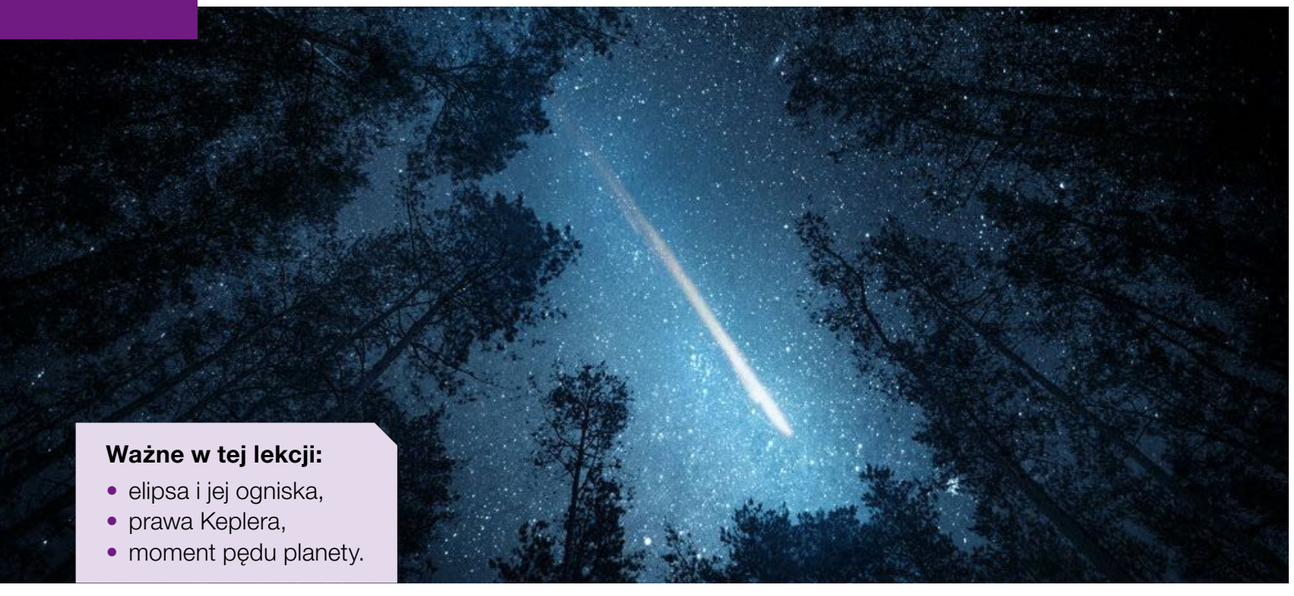
e) Przyjrzyj się przelatującym satelitom. Czy udało ci się zaobserwować wszystkie, które planowałeś?

Uwagi.

- Obserwacje najlepiej prowadzić niedługo po zmroku albo przed świtem. Wieczorem satelity po wschodniej stronie nieba są dobrze widoczne, ponieważ oświetla je Słońce, znajdujące się pod zachodnim horyzontem. Analogicznie jest w przypadku porannych obserwacji: najlepiej skupić się na zachodniej stronie nieba.
- Na stronie Heavens Above trzeba podać położenie miejsca obserwacji.
- Jasność satelitów podawana jest w wielkościach gwiazdowych. Im **mniejsza** liczba, tym **jaśniejszy** obiekt.

13.6 Pierwsze i drugie prawo Keplera





Ważne w tej lekcji:
- elipsa i jej ogniska,
- prawa Keplera,
- moment pędu planety.

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

Od Keplera do Newtona czy od Newtona do Keplera

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.
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 postąpiliśmy w tym dziale. Omówiliśmy już prawa rządzące grawitacją, więc teraz czas na prawa Keplera.

Rys. **13.26.** Johannes Kepler (1571–1630)

Pierwsze prawo Keplera

O tym prawie zapewne słyszałeś, chociaż mogłeś nie znać jego nazwy. Brzmi ono:

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

Choć Kepler mówił o planetach Układu Słonecznego, jego prawa obowiązują także dla:
- innych ciał niebieskich krążących wokół Słońca (planet karłowatych, planetoid, komet okresowych),
- dowolnego układu planetarnego we Wszechświecie,
- księżyców i sztucznych satelitów dowolnej planety.

Mówiąc ogólnie: dotyczą one każdej sytuacji, w której mniejsze ciało krąży wokół znacznie większego, przy czym pomijamy wpływ innych ciał, np. przyciąganie Ziemi przez Jowisza.

Kometa okresowa – taka, która po pewnym czasie wraca w okolice Słońca.

Elipsa czy okrąg

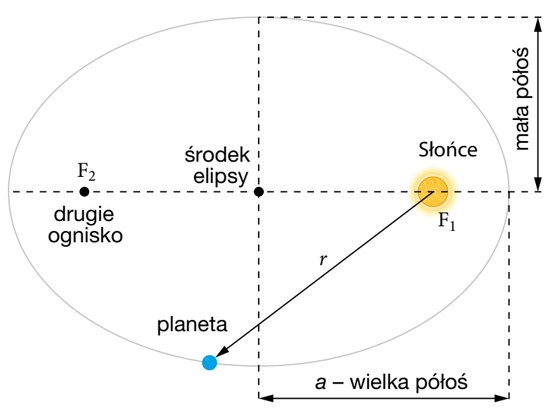
Orbity, po których planety okrążają Słońce, mają kształt elips, ale są bardzo zbliżone do okręgów.
Gdyby orbitę Ziemi narysować w skali 1 : 2 bln, akurat zmieściłaby się na stronie w tej książce, ale różnica między wielką a małą półosią wynosiłaby tylko 0,01 mm.
Doceńmy więc starożytnych i średniowiecznych astronomów, którzy jeszcze bez użycia teleskopów zauważali efekty wynikające z tak niewielkiej różnicy.

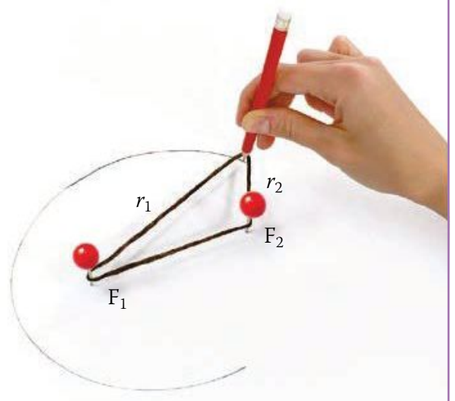
Elipsa – jedyny zamknięty tor małego ciała wokół dużego

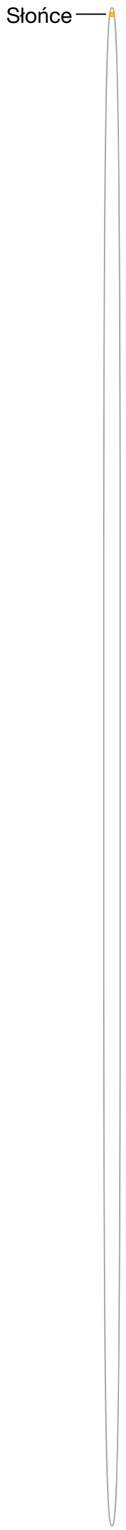
Elipsa to krzywa zamknięta, utworzona w ten sposób, że suma odległości od każdego jej punktu do punktów F_1 i F_2 (ognisk elipsy) jest stała:

$$r_1 + r_2 = 2a$$

gdzie a to wielka półoś elipsy.
Szczególnym przypadkiem elipsy, której oba ogniska się pokrywają, jest okrąg.







Rys. **13.27.** Orbita komety

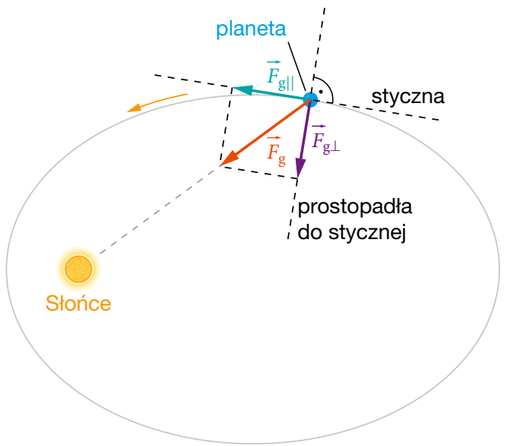
Dalej najczęściej będziemy pomijać różnicę między rzeczywistymi orbitami planet a okręgami – i tak nie wykonujemy obliczeń na tyle dokładnie, aby miało to znaczenie.
Inaczej jest w przypadku komet. Orbity komet okresowych są zwykle bardzo wydłużone (rys. 13.27). Właśnie dlatego możemy je obserwować tylko co jakiś czas, gdy znajdują się blisko Słońca, a tym samym – także Ziemi.
Na przykład Wielka Kometa z 1811 r. zbliżyła się do Słońca na minimalną odległość 1 au, ale ze względu na wydłużenie jej orbity najdalszy punkt, do jakiego dolatuje, znajduje się ok. 400 razy dalej. Rysunek orbity tej komety (rys. 13.27) został wykonany w skali 1 mm – 2 au.

Siła grawitacji a ruch po elipsie

Przeanalizujmy teraz wpływ siły grawitacji działającej na planetę w przypadku jej ruchu po orbicie eliptycznej. Rozłóżmy siłę grawitacji F_g na składowe (rys. 13.28):

- $F_{g||}$ o kierunku równoległym do stycznej,
- $F_{g\perp}$ o kierunku prostopadłym do stycznej.

Pierwsza z tych sił powoduje zmianę wartości prędkości: w sytuacji przedstawionej na rysunku 13.28 – jej zwiększenie. Natomiast druga siła powoduje zakrzywienie toru, czyli zmianę kierunku wektora prędkości.

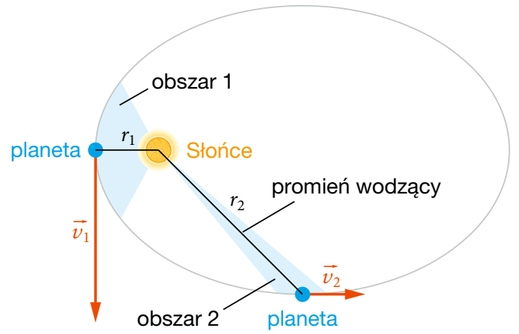


Rys. **13.28.** Siła grawitacji w ruchu po orbicie eliptycznej

Drugie prawo Keplera

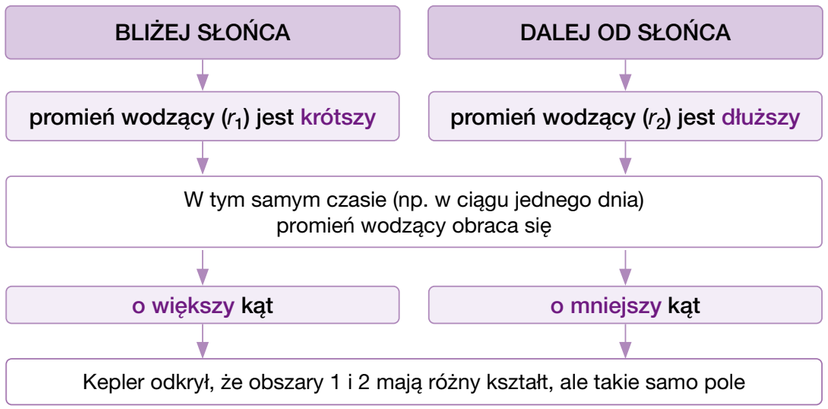
Z ostatnich rozważań wynika, że kiedy planeta zbliża się do Słońca, porusza się coraz szybciej. Czyli im bliżej Słońca znajduje się planeta, tym większa jest jej prędkość. Analogicznie: kiedy się od niego oddala, porusza się coraz wolniej.

Dokładniejszy opis tych zmian zawiera się w drugim prawie Keplera. Aby je sformułować, przypomnijmy, że **promień wodzący** to odcinek łączący Słońce z planetą.
Kiedy planeta krąży po orbicie, koniec promienia wodzącego porusza się razem z nią. Możemy sobie wyobrazić, jak **w określonym czasie promień wodzący zakreśla pewne pole** w płaszczyźnie orbity – na rysunku 13.29 zaznaczyliśmy dwa takie pola jako niebieskie obszary.



Rys. **13.29.** Pola obszarów zakreślanych przez promień wodzący planety

Na rysunku 13.29 widzimy dwa położenia planety: bliżej Słońca i dalej od niego. Na diagramie porównamy ruch planety w tych dwóch położeniach.



To odkrycie jest znane jako **drugie prawo Keplera**:

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

To prawo obowiązuje także dla księżyca obiegającego swoją planetę i każdego innego mniejszego ciała obiegającego po orbicie ciało większe.

Kepler odkrył swoje drugie prawo, kiedy analizował wyniki obserwacji. Obecnie możemy je uzasadnić – patrz następna strona.

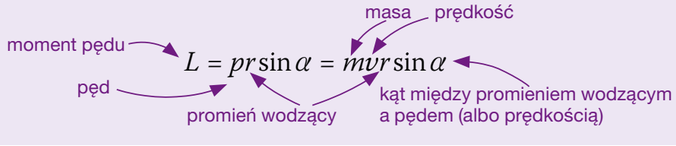
Moment pędu planety

Moment pędu w ruchu po okręgu, podręcznik cz. 2 → s. 174

Od czasów Newtona wiemy, że drugie prawo Keplera jest wnioskiem z zasady zachowania momentu pędu.
Moment pędu punktu materialnego definiowaliśmy wcześniej dla ruchu po okręgu. Teraz uogólnimy tę definicję.

Jak wiesz, moment pędu jest wektorem. Teraz jednak potrzebna nam będzie tylko jego wartość.

Wartość momentu pędu punktu materialnego względem wybranego punktu S możemy obliczyć ze wzoru:

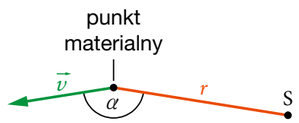


Uwaga. Nie ma znaczenia, czy weźmiemy pod uwagę kąt ostry czy rozwarty między promieniem wodzącym a prędkością, ponieważ $\sin(180° - \alpha) = \sin\alpha$.
Dla ruchu po okręgu definicja sformułowana powyżej sprowadza się do definicji znanej z cz. 2 podręcznika, ponieważ w takim ruchu wektor prędkości jest prostopadły do promienia, a sin 90° = 1.

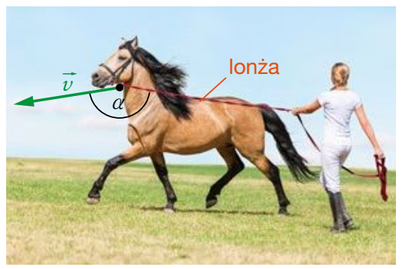
Zasada zachowania momentu pędu, podręcznik cz. 2 → s. 176–177

Punkt S można wybrać dowolnie. Niezależnie od tego wyboru moment pędu spełnia zasadę zachowania – dla układu izolowanego suma momentów pędu jest stała.

a)



b)



Rys. **13.30.** a) wielkości potrzebne do wyznaczenia momentu pędu punktu materialnego względem punktu S, b) promień wodzący można porównać do lonży, na której prowadzi się konia po okręgu, stojąc w miejscu

Uzasadnienie drugiego prawa Keplera

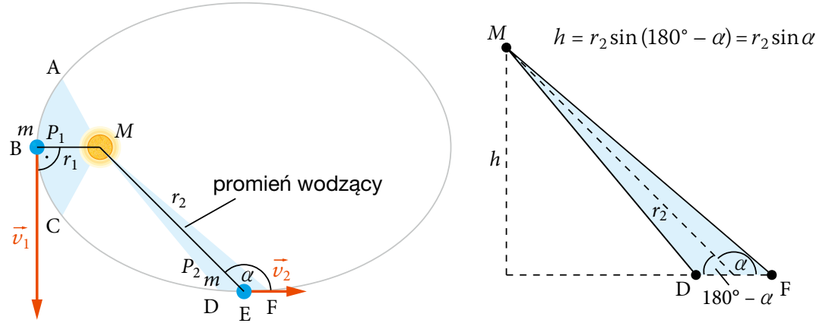
W przypadku planety obiegającej Słońce najwygodniej jest przyjąć, że wybranym punktem S w definicji momentu pędu jest środek Słońca.
Na rysunku 13.31a ponownie przedstawiamy obszary zakreślane przez planetę w jednakowym czasie, tym razem jednak wprowadziliśmy więcej potrzebnych oznaczeń.

W pierwszym położeniu, kiedy planeta znajduje się w punkcie B, wektor prędkości jest prostopadły do promienia wodzącego, a więc moment pędu jest równy:

$$L_1 = mv_1 r_1 \sin 90° = mv_1 r_1$$

a)

b)



Rys. **13.31.** 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 ($v_1 > v_2$)

W drugim położeniu, kiedy planeta znajduje się w punkcie E, moment pędu jest równy (rys. 13.31b):

$$L_2 = mv_2 r_2 \sin\alpha$$

Ponieważ moment pędu jest zachowany, czyli $L_1 = L_2$, możemy przyrównać zapisane wzory:

$$mv_1 r_1 = mv_2 r_2 \sin\alpha \quad | : m$$
$$v_1 r_1 = v_2 r_2 \sin\alpha$$

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

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

$$P_1 = P_2$$

Czas Δt jest na tyle krótki, że obszary zakreślane przez promienie wodzące możemy uznać za trójkąty.

Dlaczego możemy korzystać z zasady zachowania momentu pędu

Przypomnijmy, że prawa Keplera obowiązują przy pewnych założeniach, które pozwalają korzystać z zasady zachowania momentu pędu.

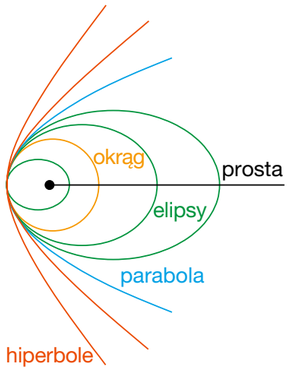
PORÓWNANIE	
Zasada zachowania momentu pędu	**Założenia w prawach Keplera**
Zasada ta obowiązuje dla układu izolowanego	Rozważamy tylko oddziaływanie gwiazdy i planety, pomijamy wpływ innych ciał
Zasada ta mówi, że nie zmienia się **suma** momentów pędu gwiazdy i planety	Zakładamy, że gwiazda jest znacznie cięższa od planety i że możemy pominąć jej ruch, a więc także – zmiany jej momentu pędu

Pole czy moment pędu

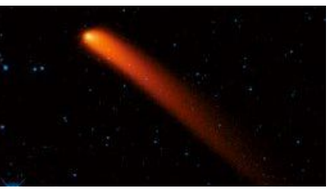
Kepler sformułował swoje prawo za pomocą pojęć znanych w jego czasach, a że nie znano wtedy pojęcia momentu pędu, skorzystał ze znanego od tysiącleci pola powierzchni.
Dziś oryginalne sformułowanie z polami zakreślanymi przez promień wodzący może przemawiać do wyobraźni, jednak w obliczeniach łatwiej korzystać z zasady zachowania momentu pędu.

Inne tory ciała pod wpływem siły grawitacji

Wiemy, że jedynym torem **zamkniętym**, po jakim może poruszać się lżejsze ciało pod wpływem siły grawitacji ciała znacznie cięższego, jest **elipsa**.
Jednak zgodnie z prawem powszechnego ciążenia ciało może także poruszać się po krzywych **otwartych: hiperboli**, **paraboli** i **linii prostej**.
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 13.32.



Rys. **13.32.** Tory ruchu ciał pod wpływem siły grawitacji



Rys. **13.33.** Zdjęcie Komety C/2007Q3, wykonane z Ziemi

Jeżeli ciało porusza się po hiperboli lub paraboli, czyli po krzywych otwartych, zbliża się ono do cięższego ciała tylko raz, a potem stale od niego oddala.
Po takich krzywych pod wpływem grawitacji Słońca poruszają się komety nieokresowe. Zdjęcie jednej z nich pokazano na rysunku 13.33. Jest to Kometa C/2007Q3, zwana Siding Spring, która pojawiła się w pobliżu Słońca i Ziemi w 2007 r. Porusza się ona po hiperboli, a jej ruch także spełnia drugie prawo Keplera.

Powstanie Układu Słonecznego

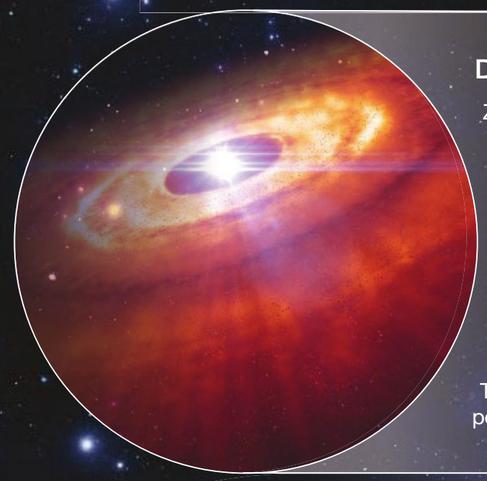
Oddziaływania grawitacyjne odpowiadają za kształt Wszechświata. Dzięki siłom grawitacji z gazowego obłoku uformowały się Słońce, okrążające je planety i inne ciała niebieskie.

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.

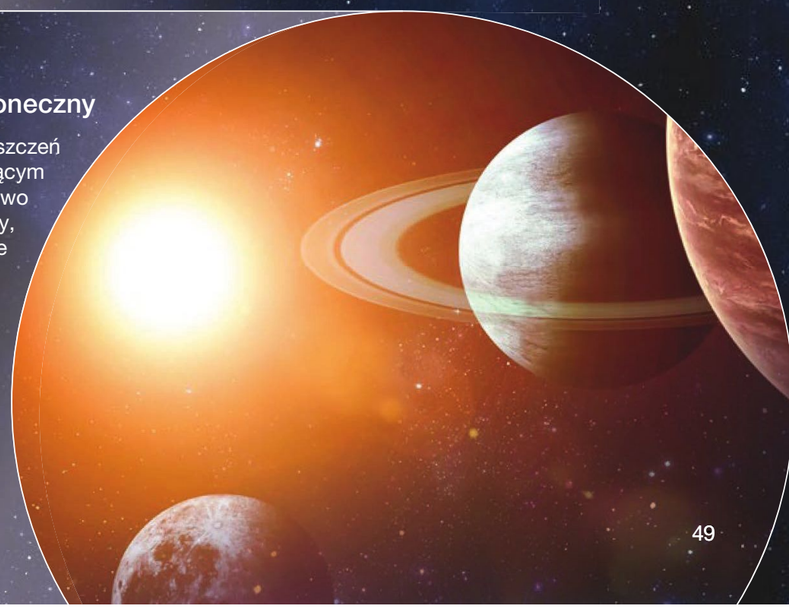
Dysk protoplanetarny



Z czasem pod wpływem grawitacji obłok się kurczył, co zgodnie z zasadą zachowania momentu pędu powodowało coraz szybszy obrót. Powstał z niego dysk protoplanetarny, z którego gaz spływał na centralnie położone zagęszczenie. W centrum dysku w miarę grawitacyjnego zapadania się materii wzrastały temperatura i gęstość. Gdy osiągnęły one odpowiednio duże wartości, rozpoczęła się reakcja termojądrowa: z jąder atomów wodoru zaczęły powstawać jądra atomów helu. Taka była historia powstania Słońca i innych podobnych gwiazd.

Układ Słoneczny

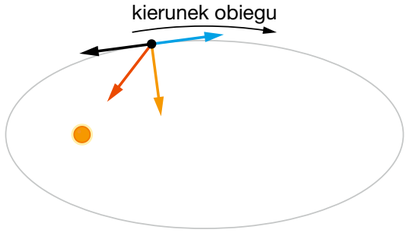
Z drobnych zagęszczeń w dysku otaczającym Słońce stopniowo powstały planety, księżyce i pozostałe ciała Układu Słonecznego.



Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Rysunek przedstawia planetę na jej eliptycznej orbicie wokół gwiazdy.



Odpowiedz i uzasadnij, która ze strzałek przedstawia kierunek i zwrot wektora:

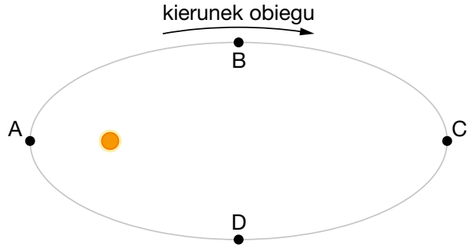
a) prędkości planety,

b) siły grawitacji działającej na planetę,

c) przyspieszenia planety.

Wskazówka. Druga zasada dynamiki pozwala określić także kierunek i zwrot przyspieszenia, a nie tylko jego wartość.

2. Rysunek przedstawia eliptyczną orbitę pewnej planety wokół jej gwiazdy.



Zaznaczono na nim cztery punkty A, B, C, D dzielące ją na części o równej długości. Porównaj czasy przebycia opisanych części orbity. Czy te czasy są takie same, a jeśli nie, to który jest krótszy?

a) od A do C i od C do A

b) od B do D i od D do B

c) od D do A i od A do B

d) od A do B i od B do C

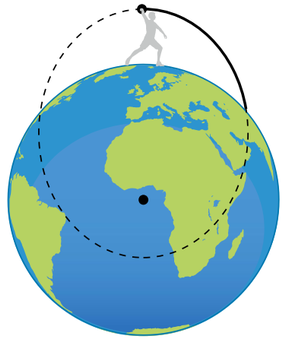
3. Orbita Plutona jest znacznie bardziej wydłużona niż orbita Ziemi. Odległość tej planety karłowatej od Słońca zmienia się od 29,6 au do 48,8 au. Jego maksymalna prędkość w ruchu wokół Słońca to 6,1 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

a) Oblicz minimalną prędkość Plutona.

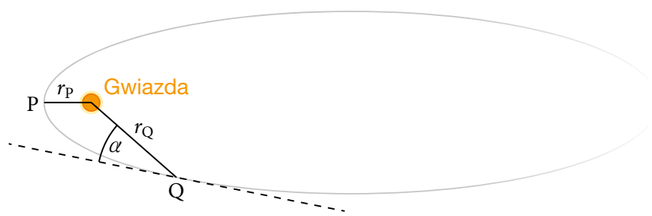
Wskazówka. Zarówno w położeniu najbliższym Słońcu, jak i najdalszym promień wodzący jest prostopadły do prędkości.

b) Wyjaśnij, dlaczego w tym zadaniu nie można korzystać ze wzoru $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$.

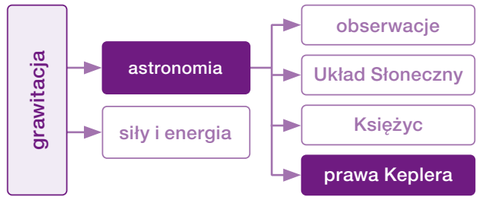
4. Rozważmy ruch ciała rzuconego poziomo z niewielkiej wysokości nad powierzchnią Ziemi (pomijamy opór powietrza). Zgodnie z pierwszym prawem Keplera porusza się ono po elipsie, w której ognisku znajduje się środek Ziemi, a ściślej mówiąc: po fragmencie tej elipsy do punktu jej przecięcia z powierzchnią Ziemi (jak na rys.). Jednak w podręczniku cz. 1 → s. 109 uzasadniliśmy, że rzucone w ten sposób ciało porusza się po paraboli. Kiedy można ten tor traktować jako parabolę? W jakich warunkach takie założenie nie będzie uzasadnione?



5. W punkcie P położonym najbliżej gwiazdy (patrz rys.), w odległości 100 mln km od niej, kometa porusza się z prędkością 40 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Oblicz prędkość komety w punkcie Q, położonym 240 mln km od gwiazdy. W punkcie Q promień wodzący tworzy ze styczną do elipsy kąt $\alpha = 30°$.



13.7 Trzecie prawo Keplera

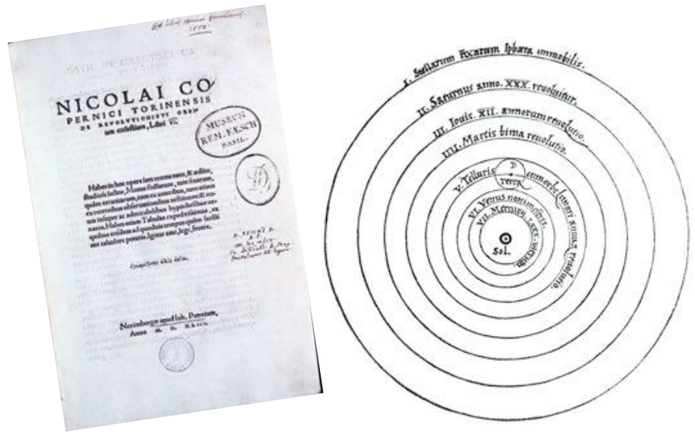


Ważne w tej lekcji:
- zależność między odległością planety od Słońca a okresem jej obiegu,
- wyznaczanie masy ciał niebieskich.

Przypomnij sobie:
- Planety krążą po elipsach ze Słońcem w ognisku (pierwsze prawo Keplera).
- Satelita okrążający planetę o masie M w stałej odległości r od jej środka porusza się z prędkością $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$, gdzie G to stała grawitacji.

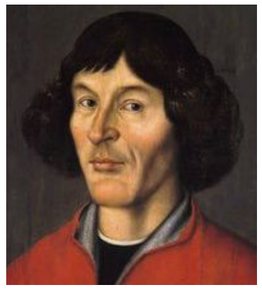
Im dalej, tym dłużej

Kiedy **Mikołaj Kopernik** tworzył swój model świata, posłużył się następującym argumentem: planety położone dalej od Słońca obiegają je w dłuższym czasie (rys. 13.34). W obowiązującym w jego czasach modelu świata, z Ziemią w środku, nie można było znaleźć podobnej regularności.



Rys. **13.34.** Rycina z dzieła Kopernika *O obrotach sfer niebieskich*. Przy orbitach kolejnych planet podano ich okres obiegu (tłumaczenie z łaciny znajduje się poniżej)

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



Rys. **13.35.** Mikołaj Kopernik (1473–1543)

Im dalej, tym wolniej

W pierwszej chwili regularność odkryta przez Kopernika może się wydawać oczywista: planeta obiegająca Słońce po dalszej orbicie ma dłuższą drogę do przebycia.
Okazuje się jednak, że nie mamy tu do czynienia z proporcjonalnością prostą. Na przykład Neptun krąży 30 razy dalej od Słońca niż Ziemia, ale potrzebuje na to aż 165 razy dłuższego czasu. To znaczy, że nie tylko pokonuje dłuższą drogę, ale także przebywa ją z mniejszą prędkością.

Trzecie prawo Keplera

Zależność między odległością od Słońca a okresem obiegu nazywamy dzisiaj trzecim prawem Keplera. Jego odkrywca **Jan Kepler** zauważył kilkadziesiąt lat po Koperniku, że zależność odkryta przez poprzednika podlega ściśle określonemu prawu.
Aby zrozumieć jego treść, przyjrzyjmy się danym z tabeli 13.1 z parametrami ruchu planet Układu Słonecznego.
Szczególną uwagę zwraca jej ostatni wiersz, w którym liczby są niemal identyczne.

Tabela 13.1. Parametry ruchu planet

	Merkury	Wenus	Ziemia	Mars	Jowisz	Saturn	Uran	Neptun
Wielka półoś orbity a, au	0,387	0,723	1,000	1,524	5,204	9,572	19,164	30,180
Okres obiegu wokół Słońca T, lata ziemskie	0,241	0,615	1,000	1,881	11,862	29,448	84,012	164,789
$\frac{T^2}{a^3}$	1,002	1,001	1,000	1,000	0,999	0,989	1,003	0,988

Trzecie prawo Keplera brzmi:

Stosunek kwadratów okresów obiegu planet wokół Słońca do sześcianów wielkich półosi ich orbit jest jednakowy dla wszystkich planet:

okres obiegu planety i wielka półoś jej orbity

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3}$$

okres obiegu drugiej planety i wielka półoś jej orbity

Wielka półoś elipsy jest równa średniej arytmetycznej największej i najmniejszej odległości planety od Słońca (patrz rys. w ramce na s. 43). Dlatego tę odległość czasami nazywamy średnią odległością od Słońca.

Uzasadnienie trzeciego prawa Keplera dla ruchu po okręgu

Trzecie prawo Keplera dotyczy orbit eliptycznych, ale dla uproszczenia uzasadnimy je w odniesieniu do okręgów.
Załóżmy, że planeta o masie m porusza się pod wpływem siły grawitacji wokół Słońca o masie M po okręgu o promieniu r.
Na s. 37 wykazaliśmy, że planeta porusza się z prędkością:

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

Jak wiemy, w ruchu jednostajnym po okręgu prędkość wynosi: $v = \frac{2\pi r}{T}$.
Zatem po przyrównaniu i podniesieniu do kwadratu powyższych wzorów otrzymamy:

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

czyli:

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

Wielkość po prawej stronie równania zależy nie od właściwości planety, a jedynie od masy Słońca. W takim razie również iloraz po lewej stronie musi być taki sam dla wszystkich ciał krążących wokół Słońca.
W ten sposób udowodniliśmy III prawo Keplera dla orbit kołowych, ponieważ dla takiej orbity wielka półoś a jest równa promieniowi r.

Elipsy, po których poruszają się planety, są zbliżone do okręgów. Na przykład mała półoś orbity Ziemi jest tylko o ok. 0,014% krótsza od wielkiej.

Trzecie prawo Keplera w różnych sytuacjach

Z powyższego dowodu wynika też, jakiej konkretnie wielkości jest równy stosunek $\frac{T^2}{r^3}$ dla orbity kołowej. Okazuje się, że w przypadku orbit eliptycznych obowiązuje podobny wzór – wystarczy promień zastąpić wielką półosią:

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

Kiedy Kepler formułował swoje prawa, mówił o planetach krążących wokół Słońca. Jednak jest to zależność ogólna i dotyczy planet w dowolnym układzie planetarnym.
Trzecie prawo Keplera ma zastosowanie także w przypadku satelitów (sztucznych i naturalnych) tej samej planety. Pamiętaj jednak, że dla planet krążących wokół różnych gwiazd oraz dla satelitów różnych planet masy M są różne, a co za tym idzie – różne są wartości stałej $\frac{4\pi^2}{GM}$.

Wyznaczanie mas planet i gwiazd

Na podstawie obserwacji prowadzonych z Ziemi możemy wyznaczyć okres obiegu księżyca dowolnej planety oraz wielką półoś jego orbity.

Na tej podstawie obliczymy masę planety:

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

W ten sam sposób wyznaczamy masę gwiazd na podstawie ruchu okrążających je planet. Z kolei dla gwiazd bardziej odległych, dla których bezpośredni pomiar wielkiej półosi orbity nie jest możliwy, prowadzimy obliczenia w drugą stronę: na podstawie oszacowanej masy gwiazdy obliczamy wielkość orbity (patrz zad. 4 → s. 55).

Pytania i zadania

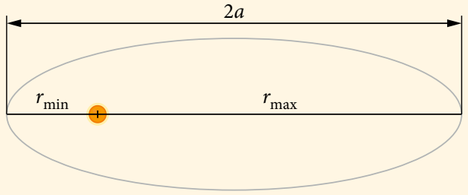
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Wielka Kometa z 1811 r. zbliżyła się do Słońca na minimalną odległość 1 au, a jej maksymalna odległość od naszej gwiazdy wyniesie 423,8 au. W którym roku będziemy mogli ponownie obserwować ją z Ziemi?

Dane: r_{min} = **1 au** – minimalna odległość od Słońca,
r_{max} = **423,8 au** – maksymalna odległość od Słońca
Szukane: **rok**, w którym kometa znajdzie się w odległości 1 au od Słońca

Rozwiązanie:



Ze szkicu elipsy możemy odczytać, że suma minimalnej i maksymalnej odległości komety od Słońca jest równa wielkiej osi (czyli dwóm wielkim półosiom). W naszym przypadku:

$$2a_K = 1\text{ au} + 423{,}8\text{ au}$$

Stąd wielka półoś wynosi: $a_K = 212{,}4$ au.

Porównajmy orbitę komety z orbitą Ziemi. Za jednostkę odległości przyjmijmy jednostkę astronomiczną, a za jednostkę czasu – rok ziemski (oznaczamy go: y od ang. *year*). Przy takich założeniach obliczenia będą wyjątkowo proste, ponieważ wielka półoś Ziemi i jej okres obiegu wokół Słońca wynoszą:

$$a_Z = 1\text{ au},\quad T_Z = 1\text{ y}$$

Z trzeciego prawa Keplera mamy:

$$\frac{T_K^2}{a_K^3} = \frac{T_Z^2}{a_Z^3}$$

Stąd okres obiegu komety wokół Słońca wynosi:

$$T_K = \sqrt{\frac{a_K^3}{a_Z^3}}\,T_Z$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy: $T_K = 3096$ y.
Kometa znajdzie się więc znowu w odległości 1 au od Słońca w 1811 + 3096 = 4907 roku.

Odpowiedź: Kometa znajdzie się ponownie w najmniejszej odległości od Słońca w 4907 r.

1. P Jedną z najbardziej znanych komet okresowych jest Kometa Halleya. Nazwa pochodzi od nazwiska angielskiego astronoma Edmonda Halleya (1656–1742), który przewidział jej powrót w 1758 r. Okres obiegu tej komety wokół Słońca wynosi 75,9 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 (np. na stronie *NASA – Comets Fact Sheet*).

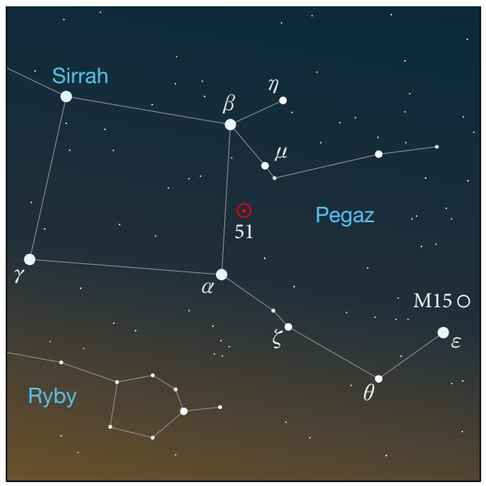
2. W jakiej odległości od Słońca powinna krążyć planeta, aby rok był tam dwukrotnie dłuższy niż na Ziemi? Wynik podaj w jednostkach astronomicznych.

3. 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 trzeciego prawa Keplera i pierwszej prędkości kosmicznej.
   Uwaga. Jeśli nie wiesz, dlaczego okres obrotu Ziemi jest krótszy niż 24 h, to dowiedz się, co to jest doba gwiazdowa.

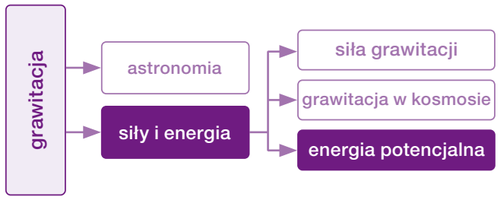
4. W 1995 r. odkryto planetę 51 Pegasi b, obiegającą gwiazdę 51 Pegasi, która znajduje się w odległości 50 lat świetlnych od Słońca, a jej masa jest większa od masy Słońca o 10%. Okres obiegu tej planety wokół swojej gwiazdy wynosi T = 4,23 dnia. Oblicz wielką półoś orbity tej planety i wyraź ją w jednostkach astronomicznych.
   Przeczytaj informacje w ramce i przeprowadź obserwację gwiazdy 51 Pegasi. Skorzystaj z mapy nieba.

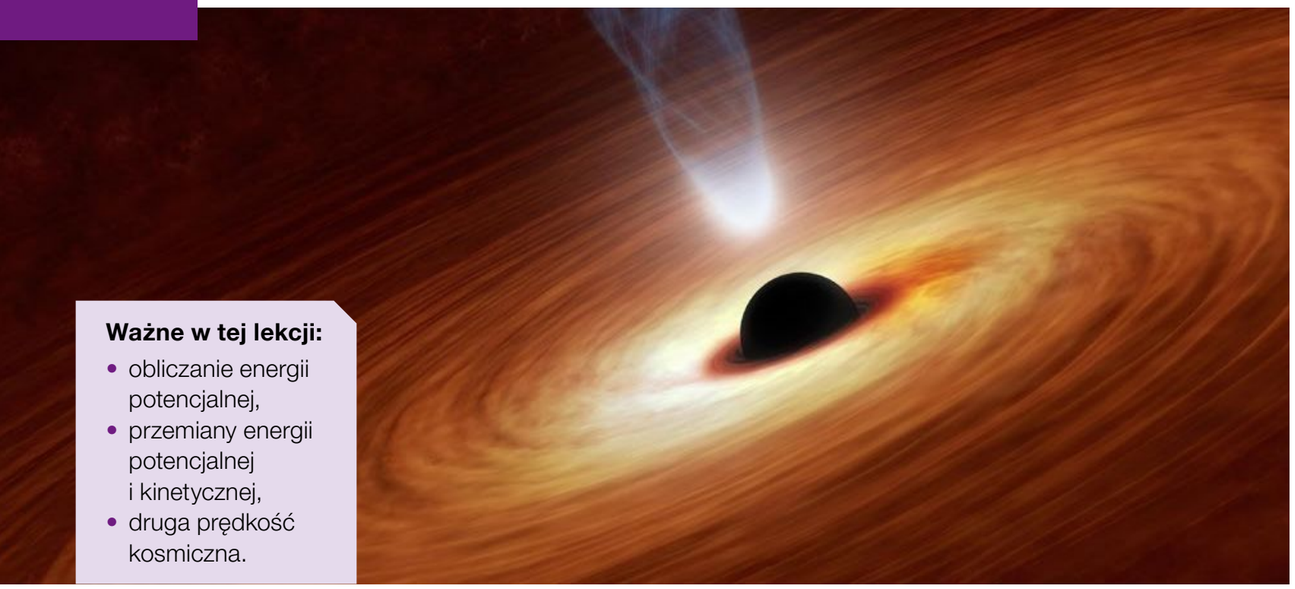
5. Przez miesiąc codziennie obserwuj Księżyc. Obserwacje zacznij wtedy, gdy będzie on dobrze widoczny w nocy na tle gwiazd. Postaraj się zauważyć, po jakim czasie zobaczysz go na tle tego samego gwiazdozbioru (nie będzie on dokładnie w tej samej fazie – wyjaśnij dlaczego).
   Ten odstęp czasu to okres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

W 1992 r. polski astronom Aleksander Wolszczan odkrył pierwsze planety pozasłoneczne. Poruszały się one wokół pulsara, gwiazdy w końcowym etapie życia. Kilka lat później odkryto pierwszą planetę pozasłoneczną obiegającą gwiazdę podobną do Słońca – 51 Pegasi b. Jest ona dwukrotnie lżejsza od Jowisza, ale porusza się bardzo blisko swojej gwiazdy, dlatego jej temperaturę 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 wtedy wysoko na niebie. Do znalezienia gwiazdy posłuż się zamieszczoną mapą i lornetką.



13.8 Energia potencjalna grawitacji





Ważne w tej lekcji:
- obliczanie energii potencjalnej,
- przemiany energii potencjalnej i kinetycznej,
- druga prędkość kosmiczna.

Przypomnij sobie:
- Energia potencjalna ciała o masie m znajdującego się na niewielkiej wysokości h nad poziomem wybranym jako poziom odniesienia jest równa $E_p = mgh$.
- Siła grawitacji maleje z odległością. Jednak kiedy rozważamy ciała w pobliżu powierzchni Ziemi, ta zmiana jest znikoma i można ją pominąć. Tylko przy takim założeniu poprawny jest powyższy wzór.
- Podczas wykonywania pracy nad ciałem zwiększamy jego energię. Jeżeli ciało wykonuje pracę, jego energia się zmniejsza.

Rys. **13.36.** Dźwig wykonuje pracę, zwiększając energię potencjalną ładunku

Stała siła grawitacji

W pierwszej części podręcznika mówiliśmy o energii potencjalnej grawitacji (patrz ramka „Przypomnij sobie" na następnej stronie). Ograniczyliśmy się wtedy do sytuacji, w której wartość siły grawitacji była stała.

Jest to bardzo dobre przybliżenie, jeżeli interesuje nas energia ciała podnoszonego przez dźwig (rys. 13.36), a nawet energia samolotu. Jest tak dlatego, że nawet na wysokości 10 km samolot jest tylko o 0,16% dalej od środka Ziemi niż na lotnisku.

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.

Przypomnij sobie

ENERGIA POTENCJALNA GRAWITACJI

Kiedy ciało podnosimy nad powierzchnię Ziemi, wykonujemy pewną pracę. Spadające ciało samo wykonuje pracę. Tak więc z położeniem ciała jest związana pewna energia, zwana energią potencjalną grawitacji.
Energia potencjalna grawitacji jest większa wtedy, gdy ciało znajduje się wyżej.

W sytuacji, gdy siła grawitacji się nie zmienia (wysokość ciała nad powierzchnią Ziemi jest mała w porównaniu z jej promieniem), czyli jest stale równa mg, praca wykonana przy podnoszeniu ciała w pionie o Δh wynosi:

$$W = \underbrace{mg}_{\text{siła}}\underbrace{\Delta h}_{\text{droga}}$$

Zmiana energii jest równa wykonanej pracy, a więc również:

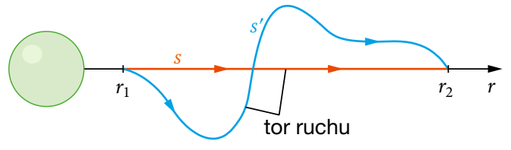
$$\Delta E = mg\Delta h$$

Jeżeli chcemy obliczać energię potencjalną, a nie tylko jej zmianę, **musimy wybrać umownie poziom, który uznamy za zerowy** (poziom odniesienia). W takim przypadku możemy korzystać ze wzoru:

Kiedy nie znajdujemy się na Ziemi, ale na innym ciele niebieskim, także możemy korzystać z tego wzoru, ale za g podstawiamy za każdym razem przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni danej planety lub księżyca.

Praca przeciwko sile grawitacji

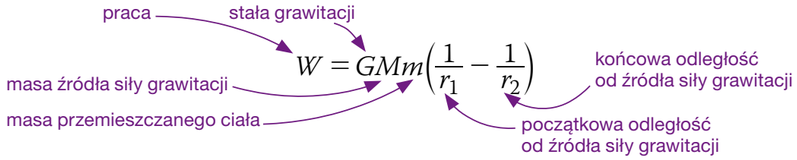
Rozważmy pracę wykonywaną przy przemieszczaniu ciała o masie m przyciąganego siłą grawitacji przez ciało o masie M. Okazuje się, że w przypadku braku oporów ruchu nie musimy znać toru, po jakim porusza się przemieszczane ciało, ani drogi, jaką pokonuje (rys. 13.37).



Rys. **13.37.** Praca wykonana przez siły zewnętrzne podczas przenoszenia ciała, na które działa siła grawitacji, nie zależy od toru jego ruchu

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

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



Pomijamy uzasadnienie powyższego wzoru, ponieważ znacznie wykracza ono poza zakres matematyki w szkole średniej.

Zmiana energii potencjalnej

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

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

Wybór poziomu zerowego

Przypomnij sobie
→ s. 57

Wcześniej powiedzieliśmy, że aby móc używać wzoru $E_\mathrm{p} = mgh$, musimy przyjąć umownie pewien poziom za zerowy. Od niego mierzymy wysokość h. Podobnie jest w rozważanym teraz przypadku.

Wybór poziomu zerowego (poziomu odniesienia) jest konieczny, aby określić energię potencjalną, a nie tylko jej zmianę

Stała siła grawitacji: ciała blisko powierzchni Ziemi albo innego ciała niebieskiego

Zmienna siła grawitacji: ciała w kosmosie

Poziom odniesienia możemy wybrać dowolnie

Zwykle wybieramy poziom gruntu, podłogi itp.

W kosmosie przyjmujemy $E_\mathrm{p} = 0$ w nieskończonej odległości od źródła sił grawitacji

Kiedy ciało znajduje się poniżej poziomu odniesienia (czyli bliżej środka Ziemi niż poziom odniesienia), wtedy $E_\mathrm{p} < 0$, ponieważ dopiero po zwiększeniu energii takiego ciała osiąga ona wartość 0

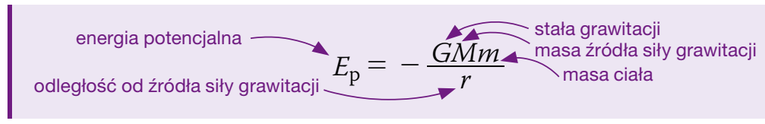
Przy takim wyborze **wszystkie** ciała znajdują się poniżej poziomu odniesienia (czyli bliżej źródła sił grawitacyjnych), a więc **dla wszystkich ciał $E_\mathrm{p} < 0$**

Wzór na energię potencjalną

Znamy już wzór pozwalający określić **zmianę** energii potencjalnej przy przeniesieniu ciała z miejsca odległego o r_1 do miejsca odległego o r_2 od źródła siły grawitacji.
Aby obliczyć samą energię w odległości r_2, powinniśmy za r_1 podstawić odległość do poziomu odniesienia. Poziom ten jednak wybraliśmy w nieskończoności, co w praktyce oznacza „bardzo daleko". Odwrotność bardzo dużej liczby jest bardzo mała, dlatego przyjmujemy, że odwrotność nieskończoności to zero. Wobec tego:

$$E_\mathrm{p} = -GMm \cdot \frac{1}{r_2}$$

Ponieważ mamy tylko jedną odległość, możemy ją oznaczyć po prostu r. Ostatecznie otrzymamy wzór:



Na podstawie tego wzoru możemy wykonać wykres zależności energii potencjalnej ciała od jego odległości od źródła siły grawitacji (patrz ramka).

Energia potencjalna sondy kosmicznej

Rozważmy przykład sondy o masie 100 kg spoczywającej w odległości 1 au od Słońca. Energia potencjalna sondy wynosi wtedy:

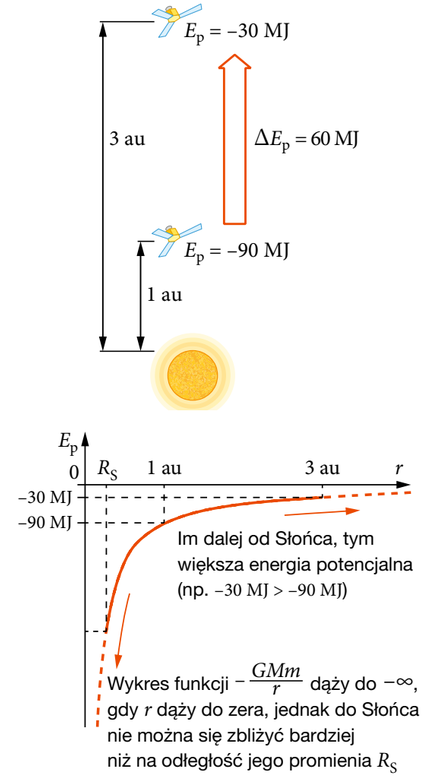
$$E_\mathrm{p} = -\frac{GMm}{r}$$

$$E_\mathrm{p} = -\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot 2 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg} \cdot 100\ \mathrm{kg}}{149{,}6 \cdot 10^{9}\ \mathrm{m}} = -90\ \mathrm{MJ}$$

W miejscu odległym od Słońca o 3 au energia potencjalna będzie miała 3 razy mniejszą wartość bezwzględną, czyli będzie wynosiła –30 MJ. To oznacza, że aby przenieść sondę między tymi miejscami, trzeba wykonać pracę 60 MJ.

Kosztem kolejnych 30 MJ energii można by powiększyć jej energię potencjalną do 0, co oznacza, że sonda mogłaby się oddalić na dowolnie dużą odległość od Słońca.

Uwaga. W rzeczywistości $R_\mathrm{s} \approx 0{,}005$ au, więc dla czytelności na rysunku nie zachowano proporcji.



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. Jednak ponieważ w kosmosie nie ma oporów ruchu, wystarczy rozważyć dwie formy energii: kinetyczną i potencjalną. W ruchu orbitalnym ich suma jest stała:

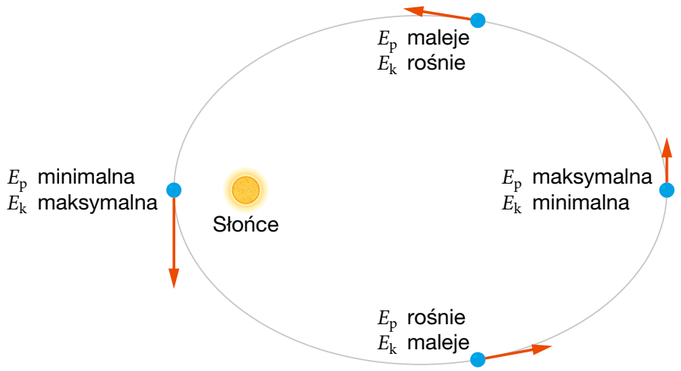
$$E_k + E_p = \text{const}$$

W przypadku orbity kołowej równość jest oczywista, ponieważ każda z tych form energii z osobna jest stała: zarówno E_k, jak i E_p.
Bardziej intersujący jest opis dla orbity eliptycznej, np. planety poruszającej się wokół Słońca (rys. 13.38).

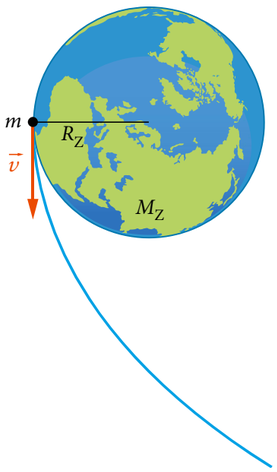
- Kiedy planeta zbliża się do Słońca, jej energia potencjalna maleje. Zmienia się ona w energię kinetyczną, a więc planeta się rozpędza.
- Kiedy planeta oddala się od Słońca, jej energia potencjalna rośnie. Dzieje się to kosztem energii kinetycznej, a więc planeta zwalnia.

Drugie prawo Keplera
→ s. 45

Ten wniosek jest oczywiście zgodny z drugim prawem Keplera oraz z naszymi rozważaniami dotyczącymi sił działających na ciało podczas ruchu po orbicie (s. 44).



Rys. **13.38.** Zmiany energii potencjalnej i kinetycznej w ruchu planety po orbicie eliptycznej



Rys. **13.39.** Całkowita energia ciała wyrzuconego z Ziemi z drugą prędkością kosmiczną jest podczas ruchu stała

Druga prędkość kosmiczna

Zastanówmy się, jaką prędkość należy nadać statkowi kosmicznemu, aby oddalił się on od Ziemi na dużą odległość.
Teoretycznie mógłby się oddalać nawet z bardzo małą prędkością, jednak wtedy musiałby mieć stale włączony silnik – a to nieopłacalne ze względu na ogromną ilość paliwa zużywanego przez statki kosmiczne.

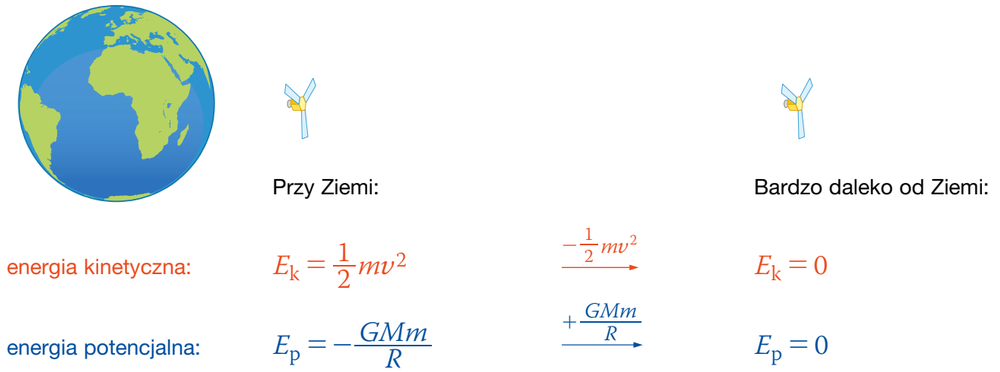
Dlatego w praktyce statek rozpędza się już w pobliżu Ziemi do prędkości, która pozwala mu lecieć dalej „z rozpędu”, bez włączonych silników.

> Prędkość początkową, pozwalającą oddalić się bez napędu na dowolnie dużą odległość od ciała niebieskiego nazywamy drugą prędkością kosmiczną (prędkością ucieczki).

Aby obliczyć tę prędkość, skorzystamy z zasady zachowania energii. Początkowa energia kinetyczna:

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

musi wystarczyć, aby energia potencjalna wzrosła z $E_p = -\frac{GMm}{R}$ do zera, a więc zwiększyła się o $\frac{GMm}{R}$, gdzie R jest promieniem Ziemi, a M – jej masą.



Rys. **13.40.** Energia kinetyczna i energia potencjalna przy powierzchni Ziemi oraz daleko od niej

Tak więc początkowa energia kinetyczna jest równa:

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

co po przekształceniu daje:

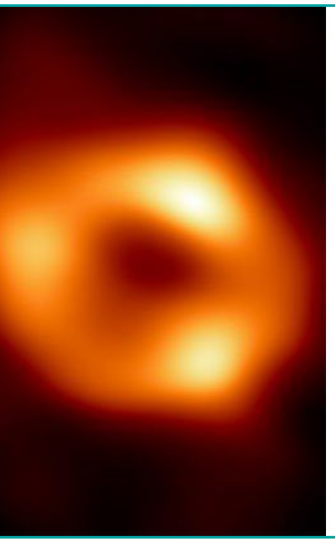
$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Dla Ziemi druga prędkość kosmiczna wynosi ok. 11 $\frac{km}{s}$. Taką prędkość musi na początku podróży rozwinąć statek kosmiczny lecący na inną planetę, a nawet na Księżyc, którego odległość od Ziemi jest kilkadziesiąt razy większa od jej promienia.

Wartości pierwszej i drugiej prędkości kosmicznej dla Ziemi i kilku innych ciał niebieskich podano w tabeli 13.2.

Tabela 13.2. Prędkości kosmiczne

Ciało niebieskie	v_I, $\frac{km}{s}$	v_{II}, $\frac{km}{s}$
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



A to ciekawe

Prędkość światła jest największą możliwą do osiągnięcia prędkością we Wszechświecie. Jeśli więc dla jakiegoś ciała niebieskiego druga prędkość kosmiczna jest większa od prędkości światła, to oznacza, że nawet światło nie może go opuścić. Takie ciało nazywamy **czarną dziurą**.
Do opisu oddziaływań grawitacyjnych w pobliżu czarnych dziur nie starcza prawo powszechnego ciążenia – należy wtedy 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 ogólnej teorii względności Einsteina. Czarne dziury najczęściej obserwujemy pośrednio, poprzez obserwację ich oddziaływania na inne ciała niebieskie. Astronomowie często odnajdują je wtedy, gdy śledzą zjawiska, jakim podlega rozgrzana materia opadająca na czarną dziurę.
Obok widzisz zdjęcie czarnej dziury. Ona sama jest czarna, ale materia, która ją otacza, spada do jej wnętrza, a na skutek zderzeń między poszczególnymi cząstkami rozgrzewa się tak, że aż świeci.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Chcemy umieścić satelitę o masie 200 kg na orbicie kołowej na wysokości 800 km. Oblicz, o ile musimy zwiększyć jego energię potencjalną i jaką energię kinetyczną musimy mu nadać. Porównaj te wielkości.

Dane: $m = 200\ \text{kg}$ – masa satelity, $h = 800\ \text{km}$ – wysokość, na jakiej ma się znaleźć satelita

Szukane: ΔE_p – zmiana energii potencjalnej, E_k – energia kinetyczna

Rozwiązanie:

Obliczamy przyrost energii potencjalnej
Przed startem satelita znajduje się w odległości $r_1 = R_Z = 6370$ km od środka Ziemi, a na orbicie – w odległości:

$$r_2 = R_Z + h = 7170\ \text{km}$$

Przyrost energii potencjalnej wynosi więc:

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

Podstawiamy dane, przeliczamy jednostkę i otrzymujemy:

$$\Delta E_p = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot 6 \cdot 10^{24}\ \text{kg} \cdot 200\ \text{kg} \cdot \left(\frac{1}{6\,370\,000\ \text{m}} - \frac{1}{7\,170\,000\ \text{m}}\right)$$

$$[\Delta E_p] = \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot \text{kg} \cdot \text{kg} \cdot \frac{1}{\text{m}} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$$

$$\Delta E_p = 1{,}4 \cdot 10^9\ \text{J} = 1{,}4\ \text{GJ}$$

Obliczamy energię kinetyczną
Na orbicie kołowej o promieniu r_2 satelita będzie miał prędkość:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r_2}}$$

a więc jego energia kinetyczna wyniesie:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\frac{GM}{r_2} = \frac{GMm}{2r_2}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$E_k = 5{,}6\ \text{GJ}$$

Porównanie energii
Energia kinetyczna jest większa:

$$\frac{E_k}{\Delta E_p} = \frac{5{,}6\ \text{GJ}}{1{,}4\ \text{GJ}} = 4\ \text{razy}$$

Tak więc w przypadku satelity na niskiej orbicie większa energia jest potrzebna do rozpędzenia go do potrzebnej prędkości niż do podniesienia go na odpowiednią wysokość.

Odpowiedź: Energia potencjalna satelity musi wzrosnąć o 1,4 GJ, a jego energia kinetyczna musi wzrosnąć o 5,6 GJ, czyli 4 razy więcej.

Uwaga. W rzeczywistości do wyniesienia satelity jest potrzebna energia znacznie większa niż obliczona powyżej, ponieważ trzeba rozpędzić wynoszącą go rakietę, a początkowo razem z nią – także paliwo. Gorące gazy wylatujące z silnika rakietowego także unoszą znaczną część energii pochodzącej ze spalenia paliwa.

1. P Międzynarodowa Stacja Kosmiczna o masie 417 ton krąży na wysokości 420 km nad Ziemią.

Oblicz jej:
a) energię kinetyczną,
b) energię potencjalną względem powierzchni Ziemi,
c) błąd procentowy, jaki popełniamy podczas obliczania jej energii potencjalnej ze wzoru mgh,
d) energię potencjalną względem punktu w nieskończoności.

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

3. Kiedy Księżyc znajduje się w apogeum, czyli w maksymalnej odległości od Ziemi, środki tych ciał niebieskich są od siebie oddalone o 406 tys. km. Wyobraź sobie, że Księżyc zatrzymał się w apogeum, a następnie pod wpływem ziemskiej grawitacji spadł na Ziemię. Jaka byłaby jego energia kinetyczna w chwili uderzenia w Ziemię (czyli zetknięcia obu ciał niebieskich)? Pomiń ruch Ziemi na skutek przyciągania przez Księżyc.

4. a) Udowodnij, że gdy ciało porusza się pod wpływem siły grawitacji po orbicie kołowej, jest spełniony warunek:

$$E_k = -\frac{1}{2} E_p$$

b) Gdybyśmy chcieli ograniczyć dochodzącą do Ziemi energię słoneczną do takiego poziomu, aby przy obecnej zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze planeta przestała się ogrzewać, musielibyśmy zwiększyć odległość Ziemi od Słońca o 0,2%. Oblicz, jakiej energii wymagałaby taka operacja. Skorzystaj z wyników z podpunktu a).

5. Oblicz średnicę, do jakiej należałoby ścisnąć Ziemię, aby stała się czarną dziurą. Podaj przykład kulistego ciała o takiej średnicy.

Wskazówka. Skorzystaj z informacji zamieszczonej w ciekawostce na s. 61.

6. Kometa Halleya (patrz zdjęcie), jedna z najbardziej znanych komet, 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 $\frac{m}{s}$. Oblicz, z jaką prędkością Kometa Halleya porusza się:

a) w minimalnej odległości od Słońca,

b) kiedy przecina orbitę Neptuna.

Uwaga. Podpunkt a) rozwiąż dwoma sposobami – z drugiego prawa Keplera i z zasady zachowania energii. Dlaczego w przypadku podpunktu b) pierwszy sposób byłby trudny do zastosowania?

Analiza tekstu

Siły pływowe

Wyobraźmy sobie kulisty obłok złożony z małych obiektów, nie oddziałujących na siebie żadnymi siłami i spadający swobodnie w polu grawitacyjnym bardzo dużego obiektu (np. Ziemi) wprost ku jego środkowi, z prędkością początkową równą zeru.

Przypomnijmy wzór na przyspieszenie grawitacyjne:

$$\vec{g} = -\frac{GM\vec{r}}{r^3}$$

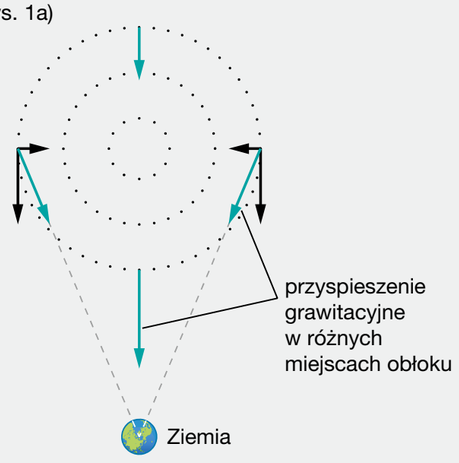
gdzie: G – stała grawitacyjna, M – masa Ziemi, r – odległość obiektu od [środka – przypis autorów podręcznika] Ziemi.

Ponieważ obiekty znajdujące się w „górnej” („tylnej”?) części obłoku są zawsze dalej od Ziemi niż obiekty w dolnej części obłoku, przyspieszenie tylnej części będzie zawsze mniejsze od przyspieszenia przedniej części. Ta różnica przyspieszeń wywoła różnicę w prędkościach, stale narastającą. W rezultacie dolna część obłoku będzie oddalała się od górnej.

Równocześnie przyspieszenia bocznych części obłoku nie będą równoległe, lecz nachylone ku sobie (są one wszystkie skierowane ku środkowi Ziemi). Będą więc miały małe składowe skierowane ku środkowi obłoku i boki obłoku będą powoli zbliżały się do siebie. Widać stąd, że różnice w natężeniu pola grawitacyjnego w sąsiednich punktach spowodują deformację obłoku. Będzie on rozciągany w kierunku środka Ziemi i ściskany w kierunkach prostopadłych, zmieniając kształt z kulistego na wrzecionowaty (rys. 1b).

Te różnice w natężeniu pola grawitacyjnego nazywane są **siłami pływowymi**. Przy ich obliczaniu odejmuje się wartości składowych siły grawitacyjnej po przeciwległych stronach badanego obiektu (w powyższym przykładzie był to spadający obłok). Wynik tego obliczenia nie może być zakodowany jako wektor, ponieważ składa się on z 9 liczb – jest to macierz; nie będziemy się dalej zajmowali szczegółami matematycznymi, ale trzeba wiedzieć, że mówimy tu o innym pojęciu niż zwyczajna siła wektorowa.

Rys. 1a)

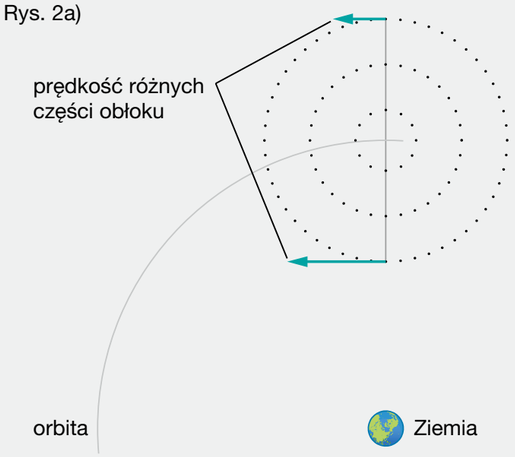


Obłok swobodnie spadających obiektów, w chwili początkowej mający kształt kulisty...

Rys. 1b)

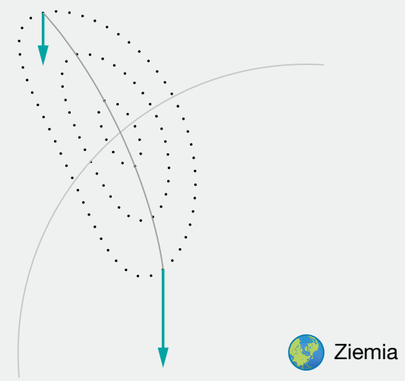
... wydłuży się podczas lotu i zwęzi wskutek różnic w natężeniu pola grawitacyjnego w sąsiednich punktach

Rys. 2a)



Obłok poruszający się po orbicie, początkowo kulisty…

Rys. 2b)



…również zostanie zdeformowany wskutek różnych prędkości orbitalnych różnych części obłoku (spowodowanych różnicami w natężeniu pola grawitacyjnego)

Obłok poruszający się po orbicie kołowej ulegnie podobnej deformacji (rys. 2a i 2b). Obiekty dalsze od Ziemi poruszają się po orbicie z mniejszą prędkością niż obiekty bliższe. „Dolna” część obłoku będzie więc stale wyprzedzała część górną, i jeśli w chwili początkowej obłok będzie kulisty, to po pewnym czasie przybierze kształt banana.

Przypływy na Ziemi

Mechanizm przypływów oceanicznych na Ziemi jest skomplikowany. Przedstawione wyżej rozumowanie pozwala na jakościowe zrozumienie tego procesu.

Będąc ciałem prawie sztywnym, cała Ziemia jest przymuszana do ruchu po orbicie z tą samą prędkością. Jednakże, część Ziemi znajdująca się bliżej Słońca, gdyby mogła, poruszałaby się szybciej niż środek Ziemi. Powoduje to nadwyżkę siły ciążenia nad siłą odśrodkową – na tę część Ziemi działa siła odciągająca ją ku Słońcu, od środka Ziemi.

Część Ziemi znajdująca się dalej od Słońca, gdyby mogła, poruszałaby się po orbicie wolniej niż środek Ziemi, jest więc przymuszana do ruchu „zbyt szybkiego”. To z kolei wywołuje nadwyżkę siły odśrodkowej nad siłą ciążenia – na tę część Ziemi działa więc siła odciągająca ją od Słońca, znów od środka Ziemi.

Jedyną częścią powierzchni Ziemi, która może w widoczny sposób poddać się tym siłom, są masy wody w oceanach. Wzniesienia przypływów, znajdujące się zawsze na linii łączącej środki Słońca i Ziemi, powodują obserwowalne efekty na wybrzeżach.

Dla uproszczenia mówiliśmy tu o przypływach spowodowanych przez Słońce. W rzeczywistości na Ziemię działa także przyciąganie grawitacyjne Księżyca. Ponieważ Księżyc jest znacznie bliżej, niejednorodność jego pola grawitacyjnego jest większa niż w przypadku Słońca i przypływy spowodowane przez Księżyc są wyższe.

Na podstawie artykułu Andrzeja Krasińskiego *Siły pływowe na Ziemi i w Układzie Słonecznym*, „Delta” 1999, nr 11*.

* Cały tekst można znaleźć na portalu czasopisma – adres strony podaliśmy na s. 367.

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Wypisz z artykułu pojęcia, których nie rozumiesz. Dowiedz się, co znaczą, a następnie zapisz ich wyjaśnienia w zeszycie. Zanotuj także, z jakich źródeł korzystasz – postaraj się, aby były one wiarygodne.

2. W jakim sensie „górna” część obłoku jest jednocześnie jego „tylną” częścią?

3. Porównaj podany w tekście wzór na przyspieszenie grawitacyjne ze wzorem na wartość tego przyspieszenia (s. 31).

a) Co może oznaczać wektor $\vec{r}$ (skoro nie odległość, która jest skalarem)?

b) Dlaczego we wzorze w artykule pojawia się minus?

c) A dlaczego w mianowniku jest sześcian?

4. W artykule pojawia się porównanie siły odśrodkowej i siły ciężkości działających na określony fragment Ziemi.

a) Skoro mowa o sile odśrodkowej, to znaczy, że autor opisuje zjawisko w układzie nieinercjalnym. Z jakim punktem jest związany ten ruch?

Wskazówka. W tym punkcie siła odśrodkowa i siła grawitacji będą się równoważyć.

b) W nieinercjalnym układzie odniesienia naszkicuj wektory sił grawitacji i siły odśrodkowej działającej na trzy obszary na Ziemi: najbliższy od Słońca, w jej środku i najdalszy od Słońca.

Podsumowanie Grawitacja i elementy astronomii

■ **Układ Słoneczny**

► Słońce jest jedyną gwiazdą w Układzie Słonecznym i jako jedyne ciało niebieskie w Układzie Słonecznym 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 i w ruchu księżyców wokół planet siła grawitacji pełni funkcję siły dośrodkowej.

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

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

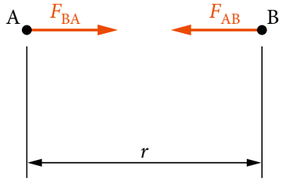
■ **Prawo powszechnego ciążenia**

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

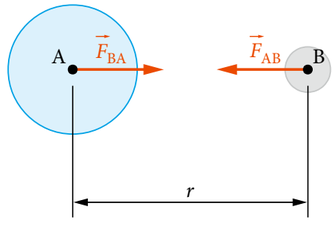
$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

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

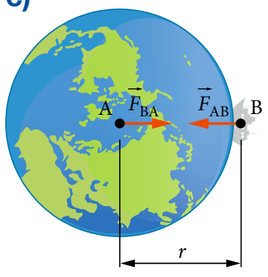
a)



b)



c)



■ **Przyspieszenie grawitacyjne**

Ciało spadające swobodnie w pobliżu powierzchni planety o masie M i promieniu R porusza się z przyspieszeniem:

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

■ **Znaczenie siły grawitacji dla ruchu ciał niebieskich**

► 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.

■ **Pierwsze prawo Keplera**

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

■ **Drugie prawo Keplera**

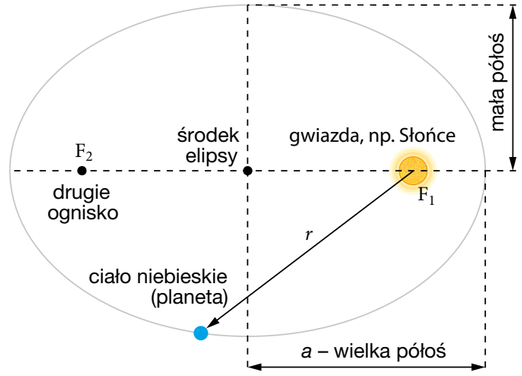
W trakcie ruchu każdej planety promień wodzący – odcinek łączący Słońce i planetę – zakreśla w równych odstępach czasu równe pola.

■ **Trzecie prawo Keplera**

Stosunek kwadratów okresów obiegu planet wokół Słońca do sześcianów wielkich półosi ich orbit jest taki sam dla wszystkich planet:

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \text{const} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

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



■ 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. Za r podstawiamy wtedy promień planety.

■ Minimalną prędkość początkową 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**:

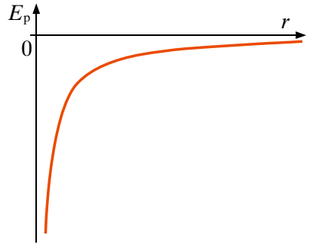
$$E_\text{p} = -\frac{GMm}{r}$$

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

M – masa ciała, które je przyciąga,

r – odległość między środkami tych ciał.

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



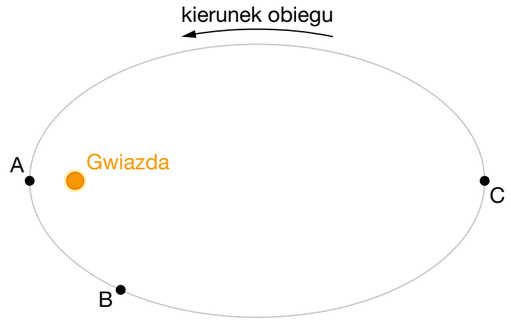
Sposób na zadanie

Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych

Nie znamy skali, ale proporcje odległości są w rzeczywistości takie same jak na rysunku.

Zadanie 1. Rysunek przedstawia w pewnej skali ruch komety po orbicie eliptycznej. Na tej orbicie zaznaczono trzy punkty. Oznaczmy prędkości w tych punktach symbolami $\vec{v}_A$, $\vec{v}_B$, $\vec{v}_C$, a przyspieszenia – symbolami $\vec{a}_A$, $\vec{a}_B$, $\vec{a}_C$.

Widać, że chodzi tu o wektory, a nie tylko o ich wartości.



Zadanie 1.1 (0–1)

Naszkicuj wektory prędkości $\vec{v}_A$, $\vec{v}_B$, $\vec{v}_C$ tak, aby prawidłowo przedstawić ich kierunek i zwrot oraz aby dłuższy wektor odpowiadał większej prędkości. Nie musisz natomiast zachować dokładnej proporcji długości wektorów.

Rozwiązanie:

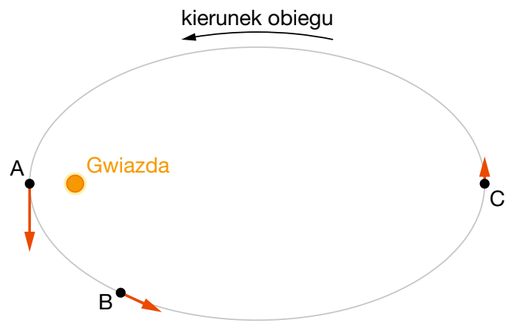
W tym zadaniu nie jest ważne, ile razy wolniej.

Wiemy, że:
- wektor prędkości jest zawsze styczny do toru ruchu,
- im dalej od gwiazdy znajduje się planeta, tym wolniej się ona porusza.

To wystarczy, aby naszkicować wektory prędkości.

Zwróć też uwagę na kierunek obiegu komety wokół gwiazdy.

Odpowiedź: Patrz rysunek poniżej.



Zadanie 1.2 (0–2)

Wykonaj odpowiednie pomiary na rysunku z głównej treści zadania i **oblicz stosunek prędkości** $\frac{v_C}{v_A}$.

Rozwiązanie:

W ruchu planety po okręgu jest spełniona zasada zachowania momentu pędu. Ponieważ w punktach A i C prędkość jest prostopadła do wektora wodzącego, możemy zapisać tę zasadę w postaci:

W innych punktach nie jest tak łatwo!

$$mv_A r_A \sin 90^\circ = mv_C r_C \sin 90^\circ$$

Stąd:

$$\frac{v_C}{v_A} = \frac{r_A}{r_C} = \frac{1}{9}$$

Tę wartość wyznaczamy dzięki pomiarom linijką na rysunku: r_A jest 9 razy krótsze od r_C.

Odpowiedź: Stosunek prędkości w punktach C i A wynosi 1 : 9, czyli prędkość w punkcie C jest 9 razy mniejsza niż w punkcie A.

Zadanie 1.3 (0–1)

Naszkicuj wektory przyspieszenia $\vec{a}_A$, $\vec{a}_B$, $\vec{a}_C$ tak, aby prawidłowo przedstawić ich kierunek i zwrot oraz aby dłuższy wektor odpowiadał większemu przyspieszeniu. Nie musisz natomiast zachować dokładnej proporcji długości wektorów.

A nie tylko wartości prędkości!

Rozwiązanie:

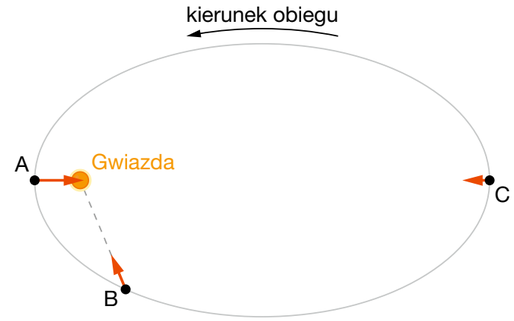
Zgodnie z definicją przyspieszenie określa zmianę wektora prędkości w czasie. Jednak w naszym zadaniu nie wiemy, jak dokładnie zmienia się ten wektor, więc musimy skorzystać z innej metody. Przypominamy sobie, że o przyspieszeniu jest mowa w drugiej zasadzie dynamiki. Równanie $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ nie tylko pozwala obliczyć wartość a, lecz także informuje nas o tym, że przyspieszenie ma kierunek i zwrot takie same jak wywołująca je siła.

Przy mnożeniu i dzieleniu wektora przez liczbę dodatnią nie zmienia się jego kierunek i zwrot.

Tak więc w każdym z punktów przyspieszenie będzie skierowane w stronę Słońca.
Druga zasada dynamiki pozwala także stwierdzić, że dalej od Słońca, gdzie siła grawitacji jest mniejsza, także przyspieszenie jest mniejsze.

A w tym zadaniu nie pytamy, ile razy mniejsze.

Odpowiedź: Patrz rysunek poniżej.



Zadanie 1.4 (0–3)

Wykonaj odpowiednie pomiary na rysunku i **oblicz stosunek przyspieszeń** $\frac{a_B}{a_A}$.

Rozwiązanie:

W rozwiązaniu zadania 1.3 przypomnieliśmy sobie, że przyspieszenie jest proporcjonalne do siły. Możemy z tego skorzystać ponownie:

$$\frac{a_B}{a_A} = \frac{F_B}{F_A} = \frac{\frac{GMm}{r_B^2}}{\frac{GMm}{r_A^2}} = \frac{r_A^2}{r_B^2} = \left(\frac{r_A}{r_B}\right)^2$$

Kiedy rozwiązujesz kilka zadań o tej samej sytuacji, rozwiązanie jednego z nich może przydać się w innych.

Mierzymy linijką odcinki i wyznaczamy stosunek $\frac{r_A}{r_B} \approx \frac{1}{3}$, stąd:

$$\frac{a_B}{a_A} \approx \frac{1}{9}$$

Odpowiedź: Stosunek przyspieszeń w punktach B i A wynosi 1 : 9, czyli przyspieszenie w punkcie A jest 9 razy większe niż w punkcie B.

Warto zapamiętać!

- Przyspieszenie ciała ma taki sam kierunek i ten sam zwrot, co powodująca je siła wypadkowa.
- Nie musimy wiedzieć, w jakiej skali jest wykonany rysunek, aby wyznaczyć stosunki odległości. Ważne, że w ogóle wykonany jest w skali, a nie tylko naszkicowany schematycznie.
- Stosunek prędkości w różnych punktach orbity eliptycznej można wyznaczyć z zasady zachowania momentu pędu.

Zadania analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Dla sytuacji opisanej w przykładzie powyżej **oblicz stosunek przyspieszeń** $\frac{a_C}{a_A}$.

Zadanie 2. Kiedy Ziemia znajduje się najbliżej Słońca, czyli w odległości 147,09 mln km, porusza się z prędkością 30,29 $\frac{km}{s}$. **Oblicz prędkość, z jaką porusza się Ziemia w największej odległości od Słońca**, wynoszącej 152,10 mln km.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Grawitacja Ziemi i Księżyca

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

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

Zadanie 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.

Zadanie 1.4. W powieści Juliusza Verne'a *Wokół Księżyca* bohaterowie lecą na Księżyc w pocisku wystrzelonym z ogromnego działa. W pocisku ciążenie działa cały czas 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.
NIE,		**2.**	wartość siły wypadkowej sił grawitacji Ziemi i Księżyca zmienia się stopniowo, a nie skokowo.
		3.	w pocisku poruszającym się tylko pod wpływem grawitacji zawsze panuje stan nieważkości.

Zadanie 2. 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 o niej następujące informacje: czas obrotu wokół własnej osi T = 5,27 h, gęstość d = 2,7 $\frac{g}{cm^3}$, masa $M = 7{,}2 \cdot 10^{15}$ kg, rozmiary 33 km × 13 km × 13 km.

Zadanie 2.1. **Oblicz czas obiegu planetoid położonych najbliżej i najdalej od Słońca.** Przyjmij, że najbliższe planetoidy znajdują się w odległości 350 mln km od Słońca.

Zadanie 2.2. **Oblicz energię mechaniczną sondy NEAR na orbicie wokół planetoidy Eros.** Przyjmij, że energia potencjalna przyjmuje wartość zerową w nieskończoności.

Zadanie 3. Meteoroid

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

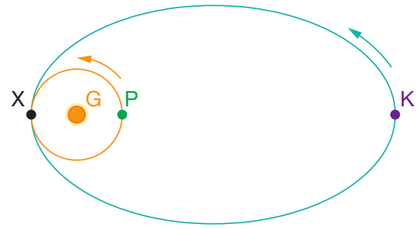
Zadanie 3.1. **Zaznacz poprawne dokończenie zdania.**
Ciało wejdzie w atmosferę ziemską z prędkością:

A. równą 7,9 $\frac{km}{s}$.
B. większą niż 7,9 $\frac{km}{s}$, ale mniejszą niż 11,2 $\frac{km}{s}$.
C. równą 11,2 $\frac{km}{s}$.
D. większą niż 11,2 $\frac{km}{s}$.

Zadanie 3.2. **Zaznacz właściwe uzupełnienie zdania spośród A–C oraz uzasadnienie spośród 1–3.**
Czas, po jakim 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.

Zadanie 4. **Układ gwiazda–planeta–kometa**
Pewna planeta P krąży wokół swojej gwiazdy G po orbicie kołowej o promieniu 1 au. Jej okres obiegu wynosi 400 dni. Wokół tej samej gwiazdy w tej samej płaszczyźnie krąży kometa K. Jej odległość od gwiazdy zmienia się od 1 au do 7 au, a orbity mają jeden punkt wspólny X, tak jak na rysunku. W pewnej chwili kometa znajduje się w największej odległości od gwiazdy, a planeta znajduje się na linii prostej pomiędzy gwiazdą a kometą.



Zadanie 4.1. Niech M oznacza masę gwiazdy G, $r_1 = 1$ au, $r_2 = 7$ au. **Oceń prawdziwość podanych stwierdzeń. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, albo F – jeśli jest fałszywe.**

1.	Prędkość planety w punkcie X wynosi $\sqrt{\frac{GM}{r_1}}$.	**P**	**F**
2.	Prędkość komety w punkcie X wynosi $\sqrt{\frac{GM}{r_1}}$.	**P**	**F**
3.	Gwiazda G ma nieco mniejszą masę niż Słońce.	**P**	**F**

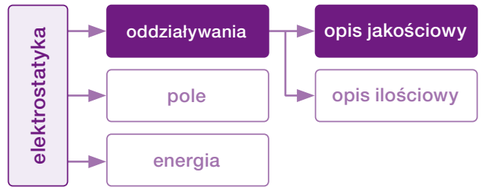
Zadanie 4.2. **Czy mieszkańcy planety powinni się obawiać zderzenia z kometą? Jeśli tak, to kiedy to nastąpi?** Odpowiedzi uzasadnij za pomocą odpowiednich obliczeń.

Zadanie 4.3. **Oblicz masę gwiazdy G.**

14. Pole elektryczne

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

14.1 Ładunki elektryczne i ich oddziaływanie



Ważne w tej lekcji:
- ładunek i jego jednostki,
- przyciąganie i odpychanie,
- elektryzowanie ciał,
- zasada zachowania ładunku.

Przypomnij sobie:
- 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 (elektrony lub jony), nazywamy przewodnikiem, natomiast substancję, przez którą nie mogą one przepływać – izolatorem albo dielektrykiem.

Ładunek elektryczny

Wielkością, która określa zdolność ciał do oddziaływania elektrycznego, jest ładunek elektryczny. W skrócie nazywamy go po prostu ładunkiem i oznaczamy Q lub q. W tym dziale przypomnimy zjawiska związane z ładunkami elektrycznymi i ich oddziaływaniem. Choć niektóre z tych zjawisk były znane od tysięcy lat, to dopiero poznanie mikroskopowej struktury materii pozwoliło je zrozumieć.

Ładunek elementarny

W mikroświecie – w skali cząsteczkowej, atomowej i mniejszej.

W mikroświecie najwygodniejszą jednostką ładunku elektrycznego jest **ładunek elementarny** e, czyli wartość bezwzględna ładunku jednego elektronu. Przykładowo:
- elektron ma ładunek $-e$,
- proton ma ładunek $+e$,
- atom wapnia bez dwóch elektronów, czyli jon Ca^{2+}, ma ładunek $+2e$.

Ładunki w makroświecie

Również w makroskopowych doświadczeniach każdy ładunek jest całkowitą wielokrotnością ładunku elementarnego. Przecież z jednego ciała do drugiego może przepłynąć nie pół albo trzy czwarte elektronu, ale tylko ich całkowita liczba.
Nie ma to jednak praktycznego znaczenia, ponieważ i tak nie jesteśmy w stanie mierzyć ładunku tak dokładnie, aby odróżnić np. 617 817 192e od 617 817 193e (rys. 14.1).
Możemy sobie jedynie wyobrazić idealny elektroskop, którego wskazówka porusza się skokowo za każdym razem, kiedy przepłynie na nią jeden elektron. Skoki byłyby jednak na tyle małe i następowały na tyle często, że i tak by się nam zdawało, że ruch jest ciągły (patrz zad. 4 → s. 84).
Dlatego w makroświecie używamy znacznie większej jednostki ładunku: kulomba (C). Wyrażony w niej ładunek elementarny wynosi dokładnie:

$$e = 1{,}602176634 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

W przybliżeniu będziemy przyjmować wartość:

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

Łatwo obliczyć, że kulomb to ładunek ok. $6{,}25 \cdot 10^{18}$ (czyli 6,25 mld mld) elektronów.

Rys. **14.1.** Żaden elektroskop nie pozwoli zmierzyć ładunku z dokładnością do 1e

Jest to dokładna wartość, ponieważ wynika z definicji kulomba.

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 przestrzegać pewnych zasad.

1. Doświadczenia z elektrostatyki najlepiej wykonywać w zimie, gdy grzeją kaloryfery, a powietrze jest suche.
2. Przyrządy do doświadczeń warto ostrożnie wysuszyć suszarką do włosów.
3. Zamiast nici bawełnianych lepiej 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.

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 do tego, 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: foliowa torebka 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, a zwisające paski taśmy – odpychają. Zastanówmy się, dlaczego tak się dzieje.
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,
- ciało, które utraciło elektrony, zostaje naelektryzowane dodatnio, czyli zyskuje ładunek dodatni.

W naszym doświadczeniu:

- rolka i pasek zyskały ładunki o *przeciwnych znakach* → rolka i pasek się przyciągały
- dwa paski zyskały ładunki o *jednakowym znaku* → dwa paski się odpychały

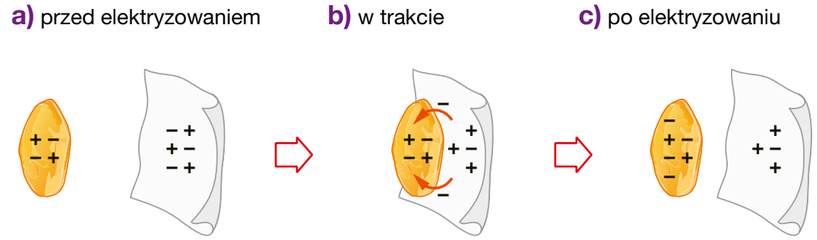
Jest to przykład zasady znanej ci już ze szkoły podstawowej:

> Ładunki o przeciwnych znakach się przyciągają, a o jednakowych znakach – odpychają.

„Oddziaływanie ładunków" to skrótowe określenie wzajemnego oddziaływania ciał, które są naładowane takimi ładunkami.

Elektryzowanie przez potarcie

Aby na ciele zgromadzić ładunek większy niż przy samym zetknięciu ciał, możemy je potrzeć o drugie ciało. Opisany sposób elektryzowania nazywamy **elektryzowaniem przez potarcie** (rys. 14.2).



Rys. **14.2.** Gdy pocieramy bursztyn tkaniną, część elektronów przechodzi z materiału na bursztyn (czerwone strzałki, b). Bursztyn ładuje się ujemnie, a tkanina dodatnio (c)

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

Zasada zachowania ładunku

Znasz już zasadę zachowania energii, zasadę zachowania pędu i zasadę zachowania momentu pędu. Wszystkie znane fizyce doświadczenia przekonują nas, że także całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego jest wielkością zachowaną.
Możemy zatem podać kolejną zasadę zachowania – **zasadę zachowania ładunku elektrycznego**.

> Całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego jest stały.

Układ izolowany,
podręcznik cz. 1 → s. 200

W przypadku elektryzowania ciał spełnienie tej zasady jest oczywiste. Elektrony przepływają 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 oddziałujących na siebie ciałach pozostaje bez zmian.

W podręczniku cz. 4 omówimy zjawiska, w których cząstki (m.in. protony) zmieniają się w inne cząstki, ale ładunek jest zachowany.

Elektroskop

Elektroskop to urządzenie pozwalające badać, czy ciało jest naelektryzowane (rys. a i b).

Kiedy dotykamy kulki elektroskopu ciałem naładowanym ujemnie, część elektronów odpychana przez to ciało przepływa na kulkę, a z niej – na listki elektroskopu (dwa lub jeden w zależności od budowy elektroskopu, patrz rys. a i b). Z kolei kiedy dotykamy kulki ciałem o ładunku dodatnim, część elektronów z listków przepływa przez kulkę do tego ciała.

Widzimy, że niezależnie od tego, jaki znak ma ładunek ciała, którym dotykamy kulki, listki elektroskopu zyskują ładunek o takim samym znaku – dlatego się odpychają, co powoduje ich rozchylenie (rys. a).

a)

b)

c)

Jeśli w elektroskopie listek jest jeden (rys. b), to z analogicznego powodu odchyla się on od metalowej części, do której jest przymocowany.

Taki przyrząd można wykonać samodzielnie – wystarczy przyczepić pasek folii aluminiowej do metalowej puszki ustawionej na izolowanej podstawie (rys. c).

a)

b)

Elektryzowanie przez indukcję

Ciało wykonane z przewodnika można naładować elektrycznie bez stykania go z ciałem naelektryzowanym.

Doświadczenie 3

1. Przygotuj dwa elektroskopy, izolowany przewód pozwalający je połączyć, balonik i wełniany sweter albo szalik.

Uwaga. 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.
4. Zbliż balonik do kulki jednego z elektroskopów, ale jej nie dotykaj (rys. a).
5. Złap przewód przez izolację i rozłącz elektroskopy. Odsuń balonik.
6. Do przeprowadzenia tej części doświadczenia potrzebny będzie jeden elektroskop. Dotknij jego kulki, aby go rozładować.
7. Ponownie potrzyj balonik o wełnę i zbliż go do elektroskopu. Dotknij palcem kulki (rys. b), odsuń najpierw rękę, a potem balonik.

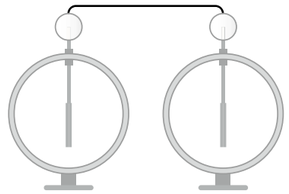
Taki sposób elektryzowania ciał nazywamy **elektryzowaniem przez indukcję** (patrz ramka na następnej stronie).

Indukcja elektrostatyczna

Prześledźmy przepływ elektronów w czasie elektryzowania przez indukcję.

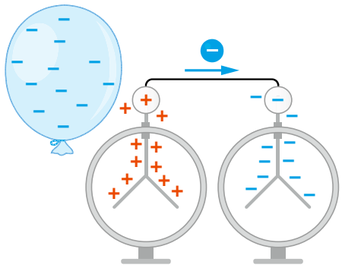
W pierwszej części doświadczenia 3. z dwoma elektroskopami (punkty 2–5 w opisie doświadczenia 3. → s. 80):

Krok 1.



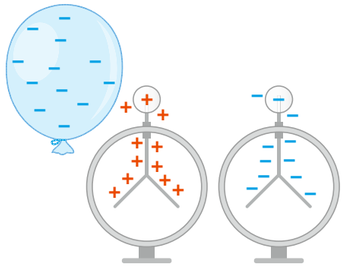
Oba elektroskopy były obojętne elektrycznie (nienaelektryzowane).

Krok 2.



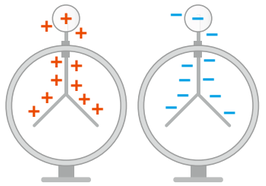
Kiedy zbliżyliśmy do nich balonik naładowany ujemnie, część elektronów, odepchnięta przez balonik, przepłynęła z lewego elektroskopu (położonego bliżej balonika) na prawy.

Krok 3.



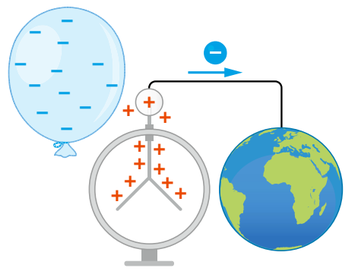
Rozłączyliśmy elektroskopy. Ich ładunek się nie zmienił.

Krok 4.



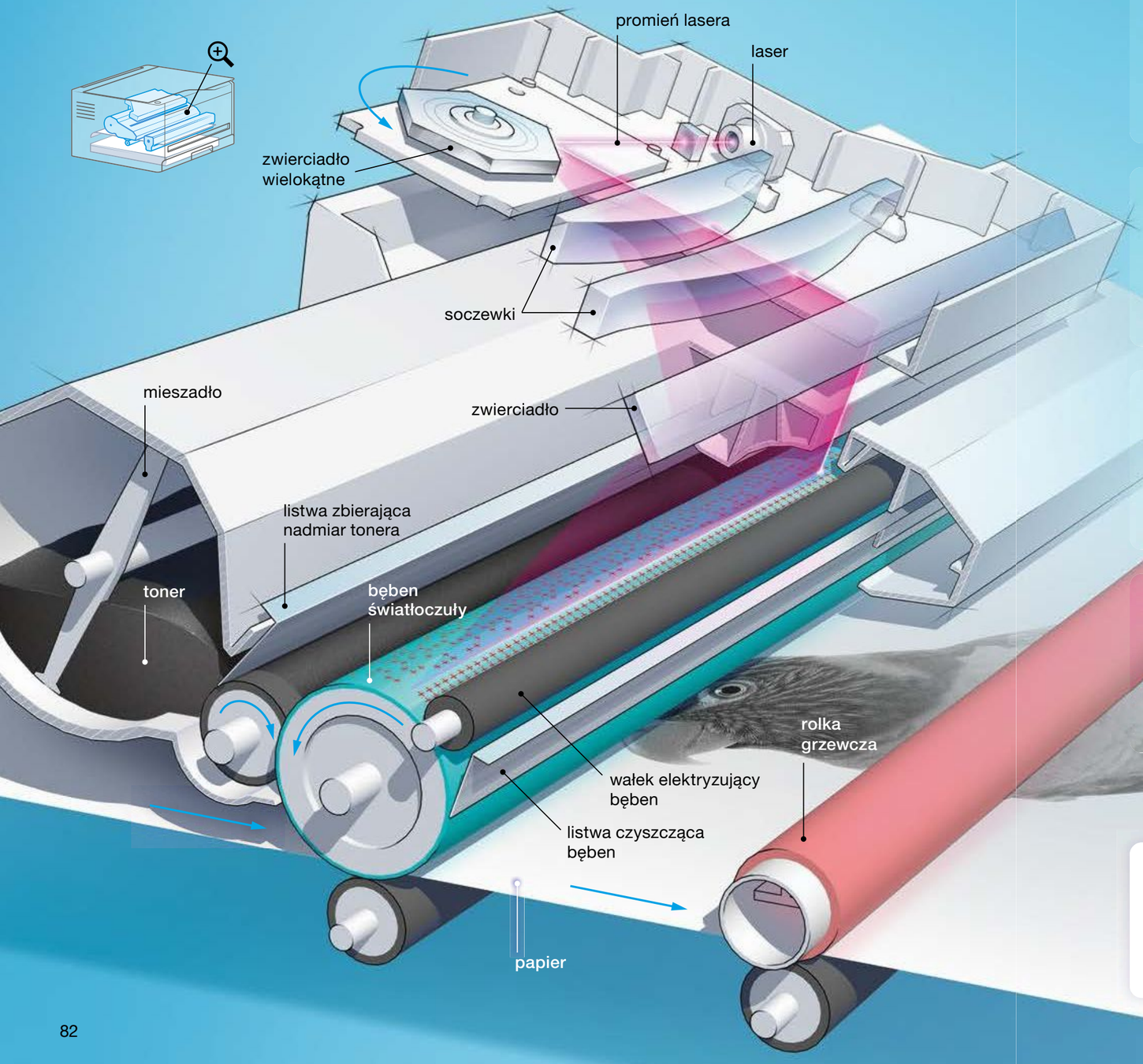
Teraz możemy zabrać balonik, elektrony nie mogą wrócić na lewy elektroskop, ponieważ nie ma już przewodu łączącego przyrządy.

W drugiej części doświadczenia 3. (punkty 6. i 7. w opisie) mieliśmy co prawda tylko jeden elektroskop, ale rolę drugiego odgrywała Ziemia.



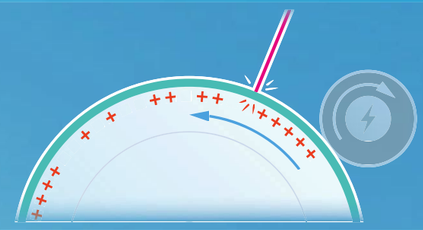
DRUKARKA LASEROWA I KSEROKOPIARKA

Drukarka laserowa 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. W starych typach kserografów bęben oświetlany był światłem odbitym od kopiowanego oryginału, dlatego przy każdej kopii trzeba go było ponownie oświetlać. Współczesna kopiarka stanowi skaner, komputer i drukarkę w jednej obudowie.

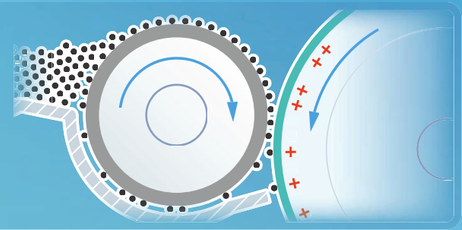


1 Metalowy wałek podłączony do wysokiego napięcia powoduje dodatnie elektryzowanie obracającego się pod nim bębna.

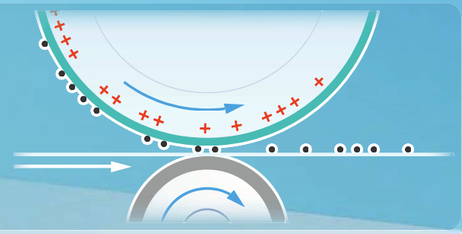
2 Na bębnie tworzony jest obraz kopiowanej kartki – w miejscach oświetlonych przez laser (odpowiadających białej powierzchni kartki) substancja pokrywająca bęben staje się przewodnikiem i bęben traci ładunek. W pozostałych miejscach bęben pozostaje naelektryzowany.



3 Do naelektryzowanych miejsc bębna przyczepia się proszek – toner.

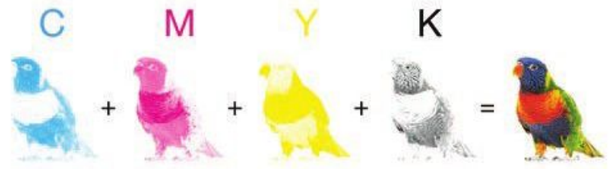


4 Toner przechodzi z bębna na papier.



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

Kolorowa drukarka nakłada osobno toner o różnych barwach podstawowych (cyjan, magenta, żółty, czarny). Z ich zmieszania w różnych proporcjach powstają wszystkie odcienie.



Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

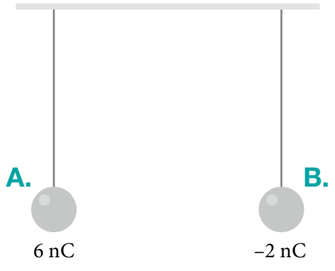
1. Każde ciało makroskopowe zawiera bardzo dużą liczbę naładowanych cząstek. Wytłumacz, dlaczego w takim razie na ogół ciała nie oddziałują na siebie elektrycznie, kiedy znajdują się od siebie w odległości większej od odległości atomowych i cząsteczkowych.

2. Typowe ładunki, z jakimi mamy do czynienia przy elektryzowaniu ciał, to kilka nanokulombów (nC). Wykonaj obliczenia i odpowiedz na pytania. W razie potrzeby sprawdź w tabeli na końcu podręcznika, co oznacza przedrostek „nano-”.

a) Ile elektronów ma łącznie ładunek –1 nC? Odpowiedź przedstaw w notacji wykładniczej oraz słownie.

b) Na baloniku zebrało się 100 mld dodatkowych elektronów. Jaki mają łącznie ładunek? Odpowiedź podaj w nanokulombach.

3. Na nieprzewodzących niciach wiszą dwie jednakowe metalowe kulki o różnych ładunkach, tak jak przedstawiono na rysunku.



a) Kulka A przyciąga kulkę B siłą 30 μN. Jaka jest wartość siły, którą kulka B przyciąga kulkę A?

b) Kiedy kulki się zetkną, przepłyną między nimi elektrony. Czy przepłyną one z kulki A na B czy odwrotnie?

c) Elektrony przestaną przepływać wtedy, gdy ładunki kulek będą jednakowe. Ile będzie wtedy wynosił każdy z nich?

d) Czy kulki po zetknięciu nadal będą się przyciągać, przestaną na siebie oddziaływać czy zaczną się odpychać?

4. Wyobraź sobie idealny elektroskop, którego wskazówka reaguje na zmianę ładunku nawet o jeden ładunek elementarny. Zakładamy, że kąt odchylenia wskazówki od pionu jest proporcjonalny do ładunku zgromadzonego w elektroskopie, ładunek 20 nC odpowiada odchyleniu o 20°, a długość wskazówki z jednej strony osi obrotu wynosi 4 cm.

Do elektroskopu dopłynął jeden elektron. Oblicz:

a) o jaki kąt obróci się wskazówka,

b) jaką drogę przebędzie jej koniec.

5. Wykonaj doświadczenie.

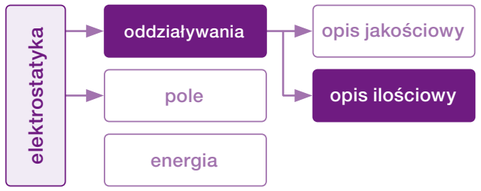
a) Rozmontuj próbnik napięcia i wyjmij z niego lampkę neonową.

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.

14.2 Prawo Coulomba



Ważne w tej lekcji:
- wzór na siłę elektryczną,
- warunki jego stosowania,
- przyciąganie ciał obojętnych,
- podobieństwo do grawitacji.

Przypomnij sobie:
- Większość ciał, z którymi mamy do czynienia na co dzień, jest obojętna elektrycznie, ponieważ zawiera tyle samo ładunków dodatnich (protonów) co 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. ze s. 78 zbliżaliśmy rolkę do kawałka taśmy klejącej, mogliśmy zaobserwować, że siła oddziaływania ładunków jest tym większa, im mniejsza jest odległość między nimi. Łatwo się też domyślić, że im większe są ładunki, tym mocniej na siebie wzajemnie oddziałują. Te zależności opisuje **prawo Coulomba**.

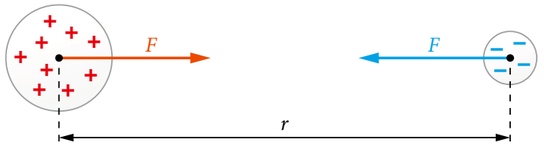
Dwa punktowe ładunki elektryczne oddziałują siłą o wartości proporcjonalnej do każdego z ładunków i odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi. Jeśli znaki ładunków są jednakowe, mamy do czynienia z odpychaniem, a jeśli różne – z przyciąganiem.

Matematycznie prawo Coulomba zapisujemy następującym wzorem:

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

wartość siły; stała elektrostatyczna; ładunki; odległość między ładunkami

Rys. **14.3.** Portret Charles'a Coulomba (1736–1806)



Rys. **14.4.** Podobnie jak w przypadku grawitacji, odległość r między kulami albo sferami to odległość między ich środkami

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 wtedy, gdy r jest dużo większe od rozmiarów ciał.
- Ponieważ ładunki mogą mieć różne znaki, a nas interesuje wartość siły, dlatego we wzorze użyliśmy symbolu wartości bezwzględnej.
- Mówimy tutaj o przypadku, kiedy między ładunkami znajduje się próżnia lub powietrze. W innych przypadkach stała k ma inną wartość niż ta, jaką będziemy posługiwać się w podręczniku.

Wartość stałej k

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.

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

Oddziaływanie ciała naelektryzowanego z ciałem elektrycznie obojętnym

Przyjrzyjmy się teraz bliżej innemu przypadkowi: kiedy ciało naelektryzowane oddziałuje na ciało elektrycznie obojętne.

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?

a)

b)

Przeprowadzone doświadczenie pokazuje, że naelektryzowany balonik przyciąga ścinki zarówno folii aluminiowej, jak i papieru. Te ścinki nie oddziałują między sobą, ponieważ są elektrycznie obojętne (ładunek każdego z nich jest równy zeru). Dlaczego więc oddziałują z balonikiem? Ścinki papieru lub folii aluminiowej są obojętne elektrycznie nie dlatego, że nie ma w nich żadnych ładunków, ale dlatego, że w każdym z nich jest tyle samo ładunków dodatnich (protonów), ile ujemnych (elektronów). Jakie zjawiska zachodzą podczas oddziaływania tych ładunków z ciałem naelektryzowanym (balonikiem), wyjaśniamy w ramce na następnej stronie.

Porównanie siły elektrycznej z siłą grawitacji

Kiedy porównamy prawo Coulomba z prawem powszechnego ciążenia, zauważymy między nimi wiele podobieństw:

- Zarówno jedna, jak i druga siła działają na odległość, także w próżni.
- Wartości obu sił są wprost proporcjonalne do wielkości opisujących zdolność do oddziaływania (w przypadku grawitacji jest to masa, w przypadku siły elektrycznej – ładunek).
- Wartości obu sił są odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości między ciałami.

Te analogie widać także we wzorach opisujących oba oddziaływania.

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

Siła grawitacji: $F_\mathrm{g} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

stała

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. Oddziaływanie grawitacyjne zawsze polega na przyciąganiu, a oddziaływanie elektryczne może polegać na przyciąganiu lub odpychaniu.
- Siły grawitacji działają między wszystkimi ciałami, a 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 zostać przez niego zmniejszona nawet setki razy.
- Masa nie tylko jest odpowiednikiem ładunku w oddziaływaniu grawitacyjnym, lecz także określa bezwładność ciała. Natomiast ładunek elektryczny nie ma żadnego związku z bezwładnością.

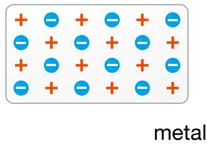
Rys. **14.5.** Sufit przyciąga balonik napełniony powietrzem siłą elektryczną, a Ziemia – siłą grawitacji. Pierwsza z tych sił przeważa, dlatego balonik wisi pod sufitem

Przyciąganie ciał nienaelektryzowanych

1 Gdy ciało nienaelektryzowane jest przewodnikiem

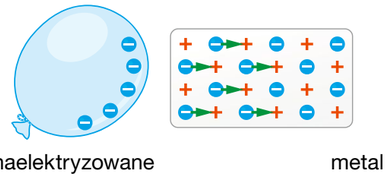
Zobacz, co się dzieje z elektronami, kiedy do obojętnego elektrycznie metalowego paska zbliżymy naelektryzowany ujemnie balonik.

Krok 1.



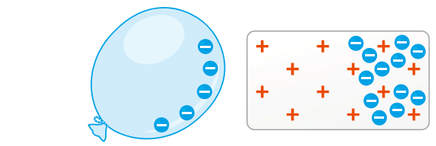
Ładunki dodatnie i ujemne w nienaelektryzowanym metalu są rozłożone równomiernie.

Krok 2.



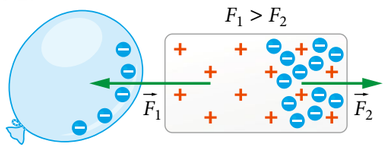
Zbliżamy naelektryzowany balonik, który odpycha elektrony. Część z nich przepływa na dalszy koniec paska folii.

Krok 3.



Od strony balonika pasek jest teraz naładowany dodatnio, a od strony przeciwnej – ujemnie.

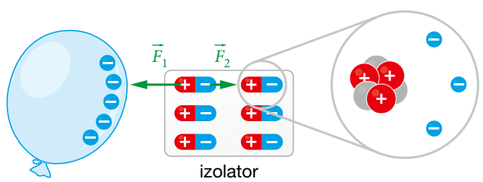
Krok 4.



Ładunki dodatnie znajdują się bliżej balonika niż ujemne, więc balonik przyciąga je większą siłą niż odpycha ujemne. Przyciąganie przeważa i pasek przykleja się do balonika.

2 Gdy ciało nienaelektryzowane jest izolatorem (dielektrykiem)

W przypadku papieru zjawisko przebiega nieco inaczej, chociaż efekt jest ten sam. Papier to izolator, więc elektrony nie mogą się po nim swobodnie poruszać. Jednak mogą przesunąć się dalej od balonika w ramach swoich atomów.



Balonik przyciąga teraz jądro każdego atomu silniej, niż odpycha jego elektrony. Przeważa więc przyciąganie. A skoro balonik przyciąga każdy atom papierka z osobna, to przyciąga także cały papierek.
Gdyby zamiast balonika zbliżyć do papierka ciało naładowane dodatnio, elektrony przemieściłyby się w drugą stronę, ale ostateczny efekt byłby taki sam.

Kiedy mamy do czynienia z grawitacją, a kiedy z siłami elektrycznymi

Różne okazują się także sytuacje, w których spotykamy się z obiema siłami. Na ogół im większe ciała badamy, tym ważniejsza staje się grawitacja, a mniej ważna – siła elektryczna.

- 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 jest siła elektryczna działająca między protonem a elektronem w atomie od siły grawitacji między nimi:

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

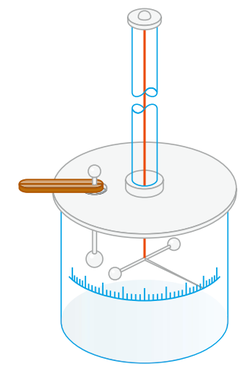
Obrazowo tę różnicę można oddać za pomocą następującego porównania. Siła elektryczna działająca między elektronem i protonem jest większa od siły grawitacji tyle razy, ile razy masa Ziemi jest większa od masy bakterii.

Właśnie dlatego podczas badania ruchu cząstki w polu elektrycznym w lekcji 14.8. będziemy mogli zakładać, że jedyną siłą działającą na cząstkę jest siła elektryczna.

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

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).
Doświadczenie wykonane przez Coulomba wymaga dużej precyzji i jest podatne na różne zakłócenia, dlatego wielu fizykom nie udało się go powtórzyć.
W konsekwencji wyniki eksperymentu przeprowadzonego przez Coulomba przez pewien czas kwestionowali nawet tak wybitni uczeni jak Alessandro Volta i Christian Ørsted.



Pytania i zadania

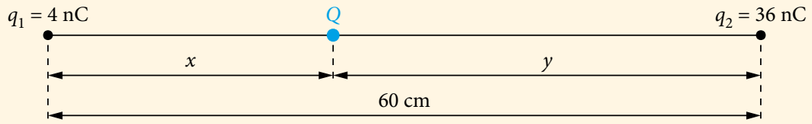
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Ładunki $q_1 = 4$ nC i $q_2 = 36$ nC umieszczono w odległości 60 cm od siebie. Kiedy na łączącym je odcinku w odległości x od ładunku q_1 umieszczono pewien ładunek Q, okazało się, że siły elektryczne, którymi działają na niego ładunki q_1 i q_2, się równoważą. Oblicz odległość x.

Dane: $\boldsymbol{q_1 = 4\ \text{nC}}$, $\boldsymbol{q_2 = 36\ \text{nC}}$ – ładunki, $\boldsymbol{r = 60\ \text{cm}}$ – odległość między ładunkami
Szukane: $\boldsymbol{x}$ – odległość ładunku q_1 od ładunku Q

Rozwiązanie:
Zacznijmy od wykonania ilustracji.



Nie znamy znaku ładunku Q. W zależności od tego znaku:

- jeśli $Q > 0$, to oba ładunki (q_1 i q_2) go odpychają,
- jeśli $Q < 0$, to oba ładunki (q_1 i q_2) go przyciągają.

W obu przypadkach siły oddziaływania q_1 oraz q_2 na Q mają przeciwne zwroty, więc jeśli tylko mają równe wartości, to się równoważą. Oznaczmy te siły F_1 i F_2. Wtedy:

$F_1 = k\frac{q_1 Q}{x^2}$ → ładunki q_1 i Q oddziałują na siebie z odległości x

$F_2 = k\frac{q_2 Q}{y^2}$ → ładunki q_2 i Q oddziałują na siebie z odległości y

Te siły mają mieć równe wartości, a więc:

$$k\frac{q_1 Q}{x^2} = k\frac{q_2 Q}{y^2} \quad \rightarrow \quad \frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{y^2}$$

Przekształcamy ostatni wzór tak, aby po jednej stronie były odległości:

$$\frac{x^2}{y^2} = \frac{q_1}{q_2}$$

stąd (dla dodatnich x i y):

$$\frac{x}{y} = \sqrt{\frac{q_1}{q_2}}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$\frac{x}{y} = \sqrt{\frac{4\ \text{nC}}{36\ \text{nC}}} = \sqrt{\frac{1}{9}} = \frac{1}{3}$$

Zatem musimy podzielić odcinek 60 cm w stosunku 1 : 3. Dzielimy więc ten odcinek na 4 równe części (1 + 3 = 4), z których każda ma 15 cm, przy czym jedną taką część stanowi x, a pozostałe trzy części stanowi y. To znaczy, że:

$$x = 1 \cdot 15\ \text{cm} = 15\ \text{cm}, \qquad y = 3 \cdot 15\ \text{cm} = 45\ \text{cm}$$

Odpowiedź: Odległość ładunku q_1 od ładunku Q wynosi 15 cm.

1. Oblicz:

a) wartość siły działającej między dwiema naładowanymi piłeczkami pingpongowymi o ładunkach –30 nC, odległymi o 80 cm,

b) odległość między ładunkami 2 nC i 4 nC, które odpychają się siłą 1,8 μN,

c) ładunek, który z odległości 5 cm przyciąga ładunek 6 nC siłą 12 μN.

2. Dwie równomiernie naładowane kulki oddalone od siebie o 30 cm odpychają się siłą 16 μN.

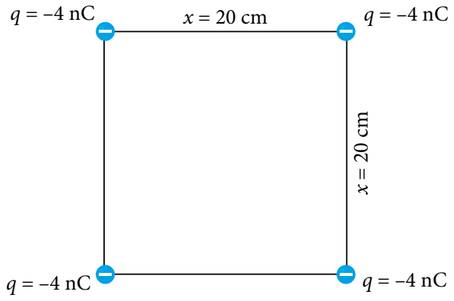
a) Z jakiej odległości będą się odpychać siłą 1 μN?

b) Jaką siłą będą się odpychać z odległości 3 cm?

Wskazówka. W podpunkcie a) najłatwiej się zastanowić, czy odległość ma być większa czy mniejsza niż 30 cm i ile razy. W podpunkcie b) najłatwiej się zastanowić, czy ta siła ma być większa czy mniejsza niż 16 μN i ile razy.

3. P Dwa ładunki: 5 nC i 3 nC, znajdują się w odległości 0,25 m od siebie. Oblicz, w którym miejscu na łączącym je odcinku należy umieścić ładunek ujemny, aby wypadkowa sił działających na ten dodatkowy ładunek była równa zeru.

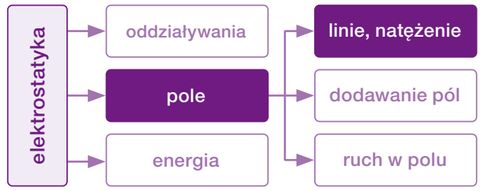
4. W każdym wierzchołku kwadratu o boku 20 cm umieszczono ładunek –4 nC. Wyznacz siłę wypadkową działającą na jeden z tych ładunków ze strony pozostałych trzech. Oblicz jej wartość, a także określ kierunek i zwrot.



5. Opisz sytuację, w której dwa ciała się przyciągają, mimo że ich ładunki elektryczne mają jednakowe znaki. Przedstaw ją w zeszycie za pomocą schematycznej ilustracji.

Wskazówka. Możesz samodzielnie ustalić, jak rozmieścić ładunki na tych ciałach i z czego te ciała są wykonane.

14.3 Pole elektryczne



Ważne w tej lekcji:
- pojęcie pola elektrycznego,
- wektor natężenia pola,
- linie pola,
- pole centralne i jednorodne.

Przypomnij sobie:
- Siły elektryczne działają na odległość.
- Siły elektryczne działają również wtedy, gdy między ładunkami znajduje się próżnia.
- Siła elektryczna działająca na ładunek q ze strony innego ładunku jest proporcjonalna do q.

Dwa opisy oddziaływania elektrycznego

Do tej pory gdy mówiliśmy o oddziaływaniu elektrycznym, rozważaliśmy siły działające między naładowanymi ciałami. Siły te działają na odległość, bez bezpośredniego kontaktu oddziałujących ciał, nawet jeśli między tymi ciałami znajduje się próżnia.
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.

Rys. **14.6.** Schemat oddziaływania ładunków: a) bezpośrednio, b) za pośrednictwem pola elektrycznego

W ten sposób nie mówimy o oddziaływaniu na odległość bez żadnego pośrednictwa, ponieważ w oddziaływaniu między ładunkami pośredniczy pole.
Pole elektryczne to nie tylko teoretyczny zabieg służący do opisu działania sił. Pole jest tak samo realne jak ciała fizyczne. W następnej (czwartej) części podręcznika przekonamy się o tym, że to właśnie istnienie pola pozwala wyjaśnić rozchodzenie się fal elektromagnetycznych, w tym światła.

Źródło pola i ładunek próbny

Wprowadźmy dwa ważne pojęcia służące do opisu pola elektrycznego.
- 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.

Umawiamy się, że ładunek próbny zawsze jest dodatni.

Oddziaływania grawitacyjne także możemy opisywać za pomocą pojęcia pola. Źródłem pola grawitacyjnego jest dowolna masa, a w polu grawitacyjnym na każdą masę działa siła grawitacji.

Wartość natężenia pola elektrycznego

Aby opisać, jak silne jest pole elektryczne w jakimś punkcie, wprowadzamy nowe pojęcie – **natężenie pola** równe stosunkowi siły działającej na ładunek próbny umieszczony w danym punkcie do tego ładunku:

wartość natężenia pola, ładunek próbny: $E = \frac{F}{q}$ – wartość siły działającej na ładunek próbny

Ponieważ siła F jest proporcjonalna do ładunku q (na dwa razy większy ładunek działa dwa razy większa siła, na trzy razy większy – trzy razy większa itd.), ten stosunek nie zależy od q i wartość E opisuje warunki panujące w danym punkcie. Z powyższej definicji wynika, że jednostką natężenia pola jest niuton na kulomb $\left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\right)$.

Na razie omawiamy tylko **wartość** natężenia pola, wektorem zajmiemy się za chwilę.

Przykłady natężenia pola elektrycznego

Czy 1 $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ to dużo? Oto kilka przykładów:
- W typowych doświadczeniach z elektryzowaniem ciał mamy do czynienia z polami o natężeniu rzędu kilku tysięcy $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.
- Aby przez powietrze przeskoczyła iskra elektryczna, potrzebne jest pole o natężeniu kilku milionów $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.
- Natomiast niektóre ryby wyczuwają pola elektryczne rzędu tysięcznych części $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.

Przypominamy, że zgodnie z umową ładunek próbny jest dodatni.

Wektor natężenia pola elektrycznego

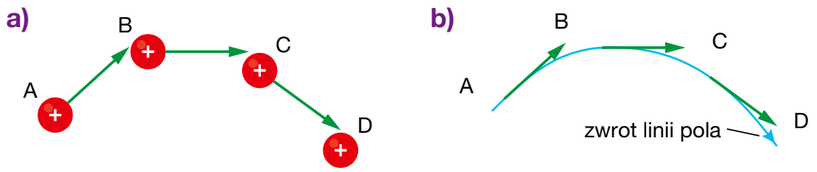
Pole elektryczne możemy określić jako wektor:

wektor natężenia pola → $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ ← wektor siły; ładunek próbny

Jak wiesz, dzielenie wektora przez liczbę dodatnią oznacza, że dzielimy wartość wektora przez tę liczbę, a jego kierunek i zwrot pozostają bez zmian.
Tak więc wektor $\vec{E}$ pokazuje nam, w którą stronę działałaby siła na ładunek próbny, gdybyśmy go umieścili w danym punkcie. Gdyby z kolei umieścić tam ładunek ujemny, siła miałaby zwrot przeciwny.

Linie pola elektrycznego

Wyobraź sobie, że w pewnym punkcie A w polu elektrycznym umieszczamy ładunek próbny (rys. 14.7a). Zakładamy, że nie działa na niego żadna siła poza siłą elektryczną (albo pozostałe siły się równoważą). Przesunie się on w stronę, w którą działa na niego siła elektryczna, czyli zgodnie z wektorem $\vec{E}$. Po krótkiej chwili znajdzie się w punkcie B. Tam go zatrzymujemy (aby nie poruszał się z rozpędu, czyli z powodu bezwładności) i puszczamy. Natężenie pola może już być w tym miejscu skierowane inaczej, a ładunek – przesunąć się do punktu C, a potem do D.



Rys. **14.7.** Na rysunku a) pokazaliśmy ruch ładunku próbnego – na podstawie tego ruchu została narysowana linia pola elektrycznego (b)

W ten sposób będzie poruszał się po łamanej, ale jeśli przedziały czasu między zatrzymaniami będą coraz krótsze, łamana upodobni się do krzywej (rys. 14.7b). Tę krzywą nazywamy linią pola. Ma ona ważną własność: wektor $\vec{E}$ jest w każdym jej punkcie do niej styczny.
Na liniach pola zaznaczamy strzałki pokazujące zwrot wektora natężenia pola.

Czy linie pola można zobaczyć?

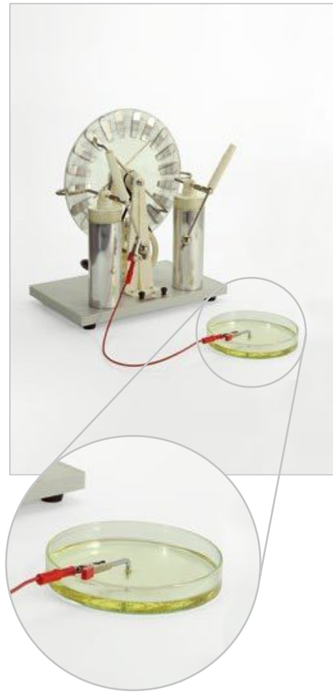
Linie pola są oczywiście niewidzialne – kiedy naelektryzujemy grzebień, w przestrzeni wokół niego nie pojawiają się przecież żadne krzywe.
Okazuje się jednak, że w pośredni sposób można je zaobserwować doświadczalnie.

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 poniżej), 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.



Alternatywne źródło wysokiego napięcia

W doświadczeniach możesz czasami użyć rakiety na komary. Jest podobna do rakiety tenisowej, ale zamiast siatki plastikowej ma dwie metalowe, między którymi po przyciśnięciu przycisku pojawia się wysokie napięcie. Do siatek możemy podłączyć przewody za pomocą spinaczy biurowych lub krokodylków. W rakietach innego typu siatki są trzy – dwie zewnętrzne stanowią jeden biegun, a wewnętrzna drugi. Wtedy do wewnętrznej siatki najwygodniej podłączyć przewód pozbawiony izolacji na krótkim odcinku (zdjęcie poniżej).

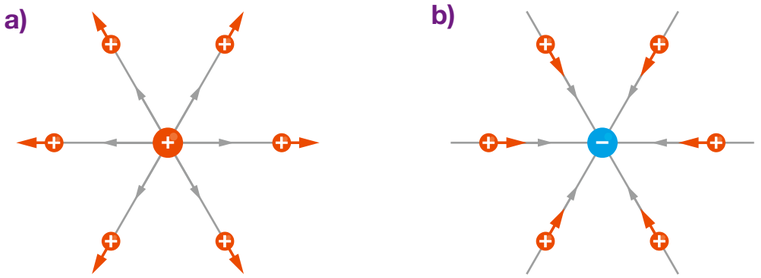
Pamiętaj, że siatek i przewodów nie wolno dotykać, gdy przycisk jest wciśnięty!
Ładunek utrzymuje się jeszcze przez jakiś czas po wyłączeniu urządzenia, więc najlepiej rozładować je poprzez zwarcie siatki lub przewodów śrubokrętem z plastikową rączką. Rakieta wytwarza nieco niższe napięcie niż generator 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.

Dlaczego skrawki wstążki układają się wzdłuż linii pola? Zjawisko to jest podobne do przyciągania skrawków papieru przez naelektryzowany balonik (doświadczenie 4. → s. 86).
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. 14.8).
Skrawki nie przyczepiają się do naelektryzowanego pręta, tak jak to się dzieje w powietrzu, ponieważ olej jest bardzo lepki i siła elektryczna nie wystarcza do pokonania oporów ruchu.

Rys. **14.8.** 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

Pole centralne

Rozważmy najpierw pole, którego źródłem jest pojedynczy ładunek. Wtedy, jak zaobserwowaliśmy w punkcie 3. dośw. 5. (s. 95), linie pola rozchodzą się promieniście z jego źródła (rys. 14.9). Pole wytwarzane przez pojedynczy ładunek nazywamy polem centralnym.

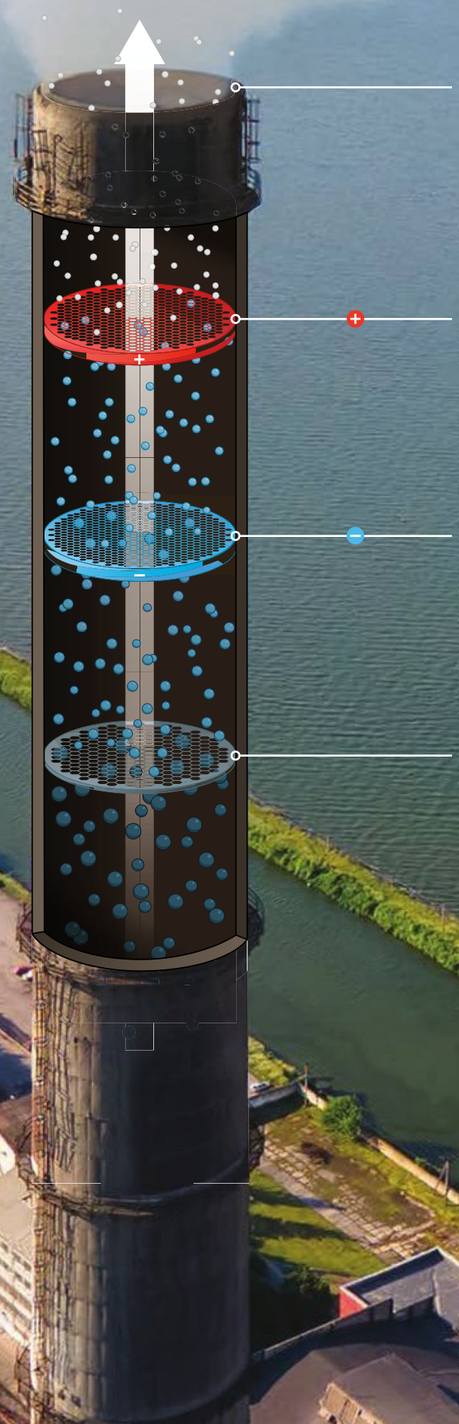


Rys. **14.9.** Zwrot linii pola, gdy źródłem jest: a) ładunek dodatni, b) ładunek ujemny

Dlaczego linie pola elektrycznego mają taki kształt? Kiedy 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 – odpychająca, co zaznaczamy strzałkami na liniach pola.

Siły elektrostatyczne w elektrofiltrach

Zapobieganie przedostawaniu się zanieczyszczeń do atmosfery jest dziś jednym z priorytetów rozwoju przemysłu w wielu krajach. Do usuwania pyłu z dymów przemysłowych wykorzystuje się m.in. siły elektrostatyczne w elektrofiltrach.



4 Gazy wylatujące z komina nie zawierają już pyłów.

3 Pochłanianie naelektryzowanych drobin
Ujemnie naelektryzowane drobiny przechodzą przez dodatnio naładowana 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.

$q > 0$, więc $|q| = q$, zatem:
$|qQ| = |q| \cdot |Q| = q|Q|$

Natężenie pola centralnego

Wartość natężenia pola wytworzonego przez pojedynczy ładunek Q w odległości r od tego ładunku można obliczyć z prawa Coulomba:

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

czyli:

$$E = k\frac{|Q|}{r^2}$$

natężenie pola; stała elektrostatyczna; ładunek źródła pola; odległość od źródła pola

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. 14.9) linie pola są tym bardziej zagęszczone, im bliżej źródła się znajdują. A przecież bliżej źródła pole jest silniejsze.

Większemu natężeniu pola odpowiada większe zagęszczenie linii na rysunku.

W rzeczywistości linii pola jest nieskończenie wiele, a rysujemy tylko wybrane z nich.
Informacja powyżej w fioletowym polu oznacza, że jeśli dobrze zaczniemy rysunek, np. linie pola z ładunku punktowego będą wychodziły równomiernie we wszystkie strony, to dalej zagęszczenie linii będzie się automatycznie zmieniało zgodnie z natężeniem pola.

Rys. **14.10.** Skrawki wstążki układają się wzdłuż linii pola elekrycznego wytworzonego przez dwie równoległe płytki

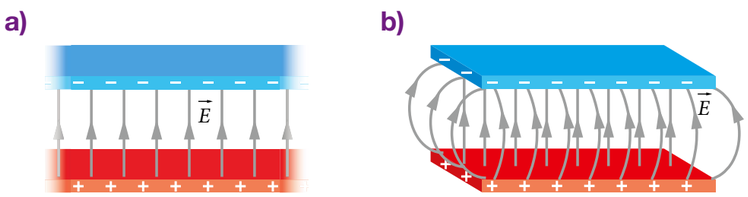
Pole jednorodne

Z innym przypadkiem mieliśmy do czynienia wtedy, gdy źródłem pola były dwie przeciwnie naładowane płytki (punkt 6. dośw. 5. → s. 95, rys. 14.10).
W tym przypadku mogliśmy zaobserwować, że linie pola były równoległe (z wyjątkiem brzegów 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.

Ściślej mówiąc, całkowicie jednorodne byłoby pole pomiędzy dwiema równoległymi i **nieskończonymi** płaszczyznami (rys. 14.11a). Linie tego pola byłyby idealnie równoległe, a natężenie w każdym jego punkcie – takie samo. W przypadku rzeczywistych, skończonych płytek pole jest w dobrym przybliżeniu jednorodne z dala od ich brzegów (rys. 14.11b).

Zwróć uwagę na to, co się dzieje przy końcach płytek na rysunku 14.11b.



Rys. **14.11.** Linie pola elektrycznego: a) w przypadku idealnym – między nieskończonymi płaszczyznami, b) między naładowanymi płytkami

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Małą metalową kulkę o masie m = 3 g, 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.

Dane: $\boldsymbol{m}$ = 3 g, $\boldsymbol{q}$ = 3,4 nC, $\boldsymbol{l}$ = 30 cm, $\boldsymbol{E} = 5 \cdot 10^6 \frac{N}{C}$
Szukane: $\boldsymbol{\alpha}$ – kąt, o jaki odchyli się kulka od pionu

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:

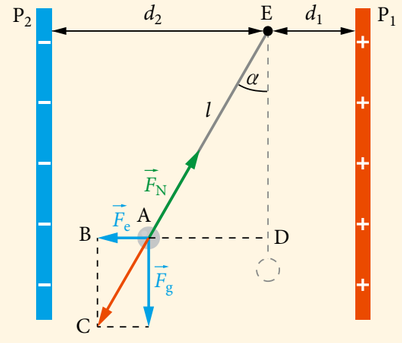
$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{qE}{mg}$$

Po podstawieniu danych liczbowych mamy:

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

więc miara kąta α wynosi ok. 30°.

Odpowiedź: Kąt α ma miarę ok. 30°.



Zadania s. 100

Pytania i zadania

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.

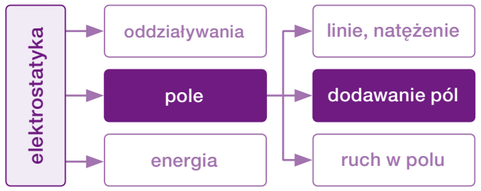
3. (P) Linie jednorodnego pola elektrycznego są ułożone poziomo. W takim polu zawieszono na nici kulkę o masie 0,1 g, na której zgromadzono ładunek +5 nC. Kulkę puszczono swobodnie. Po wytłumieniu drgań kulka pozostała odchylona od pionu o 20°. Oblicz natężenie pola.

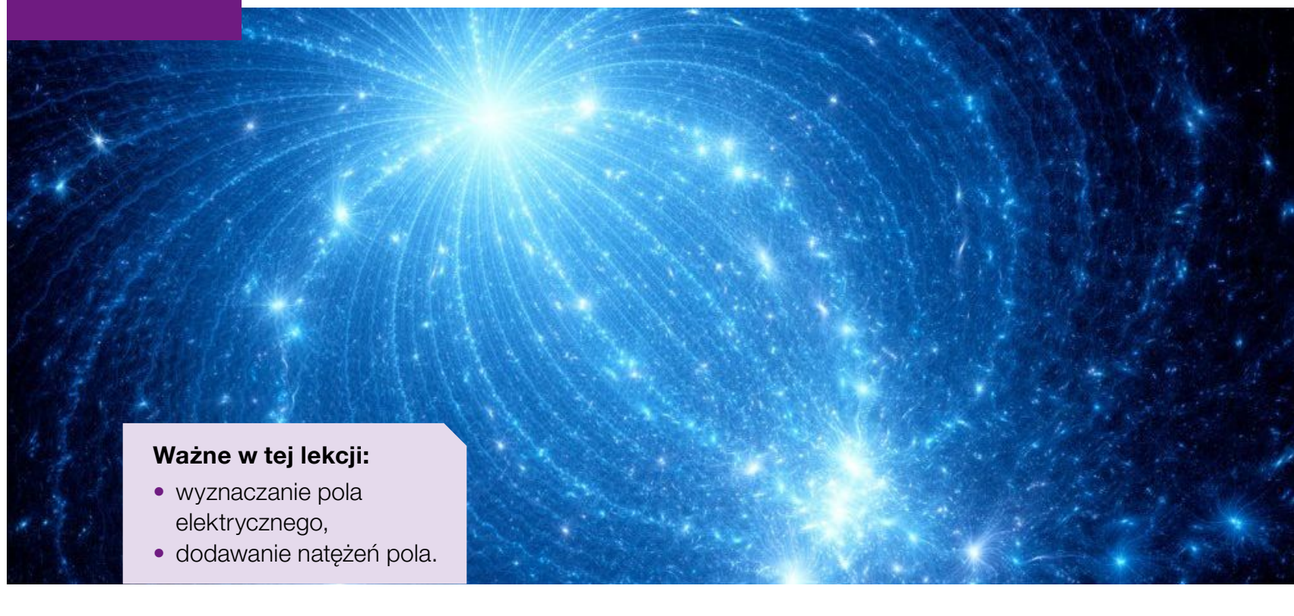
4. Natężenie pola elektrycznego między chmurą burzową a powierzchnią Ziemi wynosi 20 000 $\frac{N}{C}$. Oblicz, jakie przyspieszenie nadaje ono elektronowi. Samodzielnie znajdź potrzebne dane.

Uwaga. Obliczone przyspieszenie dotyczy sytuacji na początku ruchu. Już po niewielkim ułamku sekundy prędkość elektronu będzie tak duża, że jego ruch trzeba opisywać za pomocą teorii względności.

5. (i) Zbuduj działający model elektrofiltra (s. 97). Jako źródła zasilania możesz użyć rakiety na komary (s. 95), a jako źródła dymu – kadzidełka. Inspiracje możesz znaleźć w internecie, jednak spróbuj je udoskonalić.

14.4 Pole elektryczne wielu źródeł





Ważne w tej lekcji:
- wyznaczanie pola elektrycznego,
- dodawanie natężeń pola.

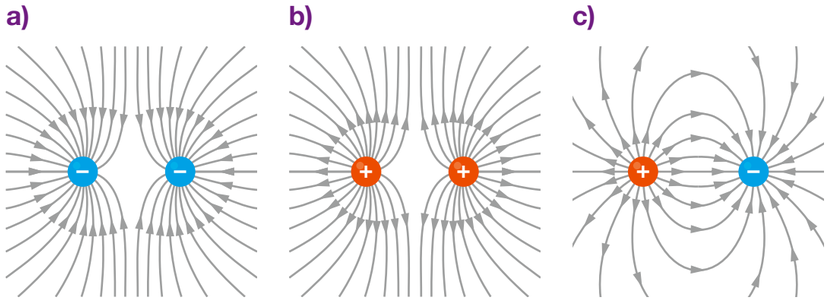
Przypomnij sobie:
- Natężenie pola elektrycznego $\vec{E}$ to stosunek siły $\vec{F}$ działającej na ładunek próbny do wartości tego ładunku $\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q}$.
- Wektory o różnym kierunku dodajemy metodą równoległoboku.

Pole wytwarzane przez dwa ładunki

Do tej pory omówiliśmy dwa rodzaje pola: centralne i jednorodne. W tej lekcji przyjrzymy się polu, które badaliśmy w doświadczeniu 5. (s. 95) w punktach 4. i 5., czyli polu tworzonemu przez dwa ładunki punktowe o jednakowej wartości. Otrzymaliśmy obrazy podobne do przedstawionych na rysunku 14.12.

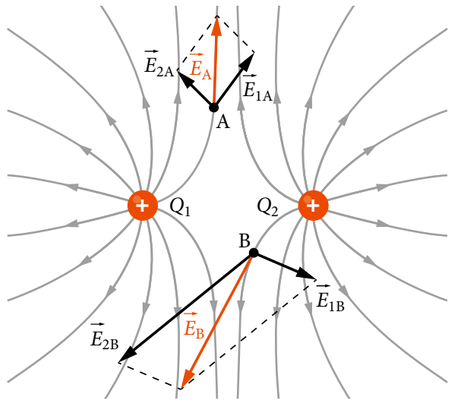
Możemy je narysować schematycznie, tak jak przedstawiono na rysunku 14.13 na następnej stronie. Pamiętajmy przy tym, aby na rysunku linie zaczynały się od ładunków dodatnich i kończyły na ujemnych.

Rys. **14.12.** Skrawki wstążki układają się wzdłuż linii pola elektrycznego wytworzonego przez dwa punktowe źródła pola: a) o tym samym znaku, b) o przeciwnych znakach



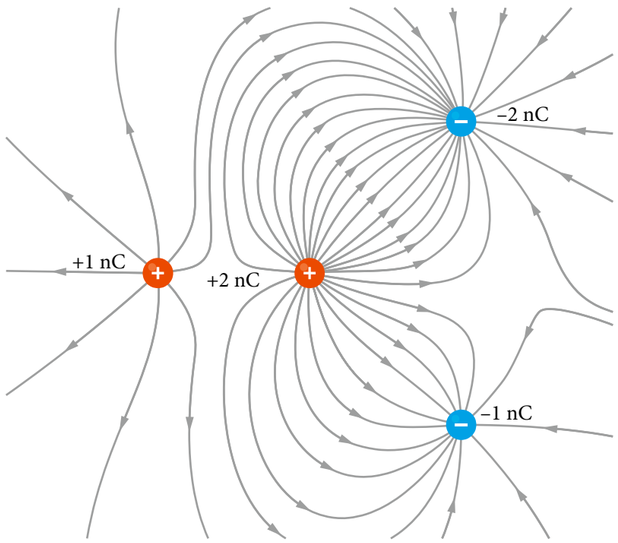
Rys. **14.13.** Linie pola elektrycznego wokół dwóch ładunków o tej samej wartości i takim samym znaku (a i b) i o różnych znakach (c)

Do takiego samego układu linii pola doszlibyśmy, gdybyśmy w każdym punkcie skonstruowali wektor natężenia pola będący sumą natężeń pól wytwarzanych przez poszczególne ładunki (rys. 14.14).



Rys. **14.14.** Natężenie pola w danym punkcie jest sumą natężeń od poszczególnych źródeł

W doświadczeniu 5. obserwowaliśmy pole wytwarzane przez dwa ładunki. Jednak najczęściej jest ich więcej, a wtedy linie pola układają się w bardzo skomplikowany sposób (rys. 14.15).



Rys. **14.15.** Linie pola elektrycznego wokół czterech przykładowych ładunków

Kiedy mamy do czynienia z większą liczbą ładunków, natężenie pola w określonym punkcie wyznaczamy jako sumę natężeń pól pochodzących od poszczególnych ładunków.

Uzasadnienie reguły dodawania natężeń pola

Dlaczego natężenia pola można dodawać? 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 równość:

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

Wypadkowe natężenie pola elektrycznego wynosi zatem:

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

JEST NA TO SPOSÓB

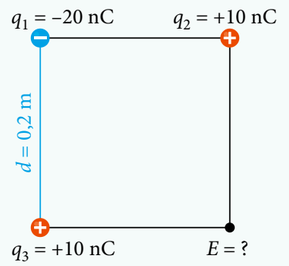
Jak wyznaczyć natężenie pola elektrycznego pochodzącego od kilku źródeł

W dwóch przeciwległych wierzchołkach kwadratu o boku 20 cm umieszczono dwa ładunki po +10 nC, a w jednym z pozostałych wierzchołków ładunek –20 nC. Wyznacz wektor natężenia pola elektrycznego w czwartym wierzchołku.

PRZEANALIZUJ ROZWIĄZANIE KROK PO KROKU

Krok 1. **Wykonujemy rysunek**

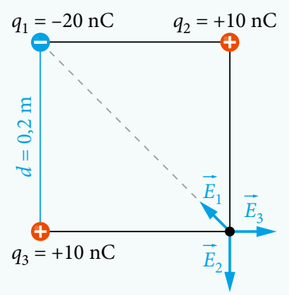
Zaznaczamy na nim wszystkie informacje podane w treści zadania.



Krok 2. **Określamy kierunek i zwrot składowych natężeń pola**

Wektor natężenia pola jest skierowany tak jak siła działająca na ładunek próbny. Ponieważ ładunek próbny jest dodatni, więc ładunki dodatnie go odpychają, a ładunek ujemny go przyciąga.

Możemy naszkicować wektory (na razie ich wartości są przypadkowe, ponieważ znamy tylko kierunki i zwroty).



Krok 3. **Obliczamy wartości składowych natężeń pola**

Natężenie pola pochodzącego od ładunku q_2 w odległości d wynosi:

$$E_2 = k\frac{|q_2|}{d^2} = 2250\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Ładunek q_3 jest równy q_2 i znajduje się w tej samej odległości od interesującego nas punktu, więc możemy stwierdzić, że:

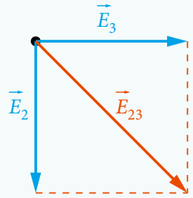
$$E_3 = E_2 = 2250\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Natomiast ładunek q_1 znajduje się w odległości $\sqrt{2}\,d$ od tego punktu, ale za to ma dwa razy większą wartość bezwzględną, więc także wytwarza pole o takim samym natężeniu:

$$E_1 = k\frac{|q_1|}{(\sqrt{2}\,d)^2} = 2250\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Krok 4. **Wyznaczamy wektor całkowitego natężenia pola**

Najpierw dodajmy natężenia $\vec{E}_2$ i $\vec{E}_3$. Ich wektory mają równe wartości i są prostopadłe, a więc równoległobok sił jest w tym przypadku kwadratem.



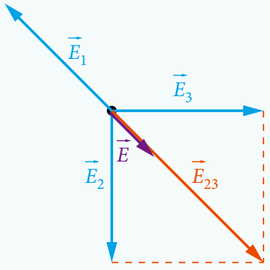
Zatem wektor:

$$\vec{E}_{23} = \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

ma wartość:

$$E_{23} = \sqrt{2}\,E_2 = 3180\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Teraz bardzo łatwo do tego wektora dodać wektor $\vec{E}_1$, ponieważ mają one ten sam kierunek (ale przeciwne zwroty).



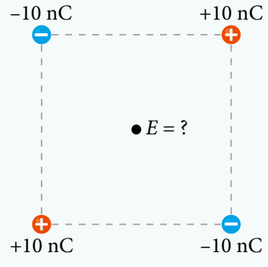
Tak więc:

$$E = E_{23} - E_1 = 930\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Odpowiedź: Wektor natężenia pola jest skierowany wzdłuż przedłużenia przekątnej na zewnątrz kwadratu wyznaczonego przez ładunki (patrz s. 103), a jego wartość wynosi 930 $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.

Sprawdź, czy rozumiesz

1. Ile wynosiłoby natężenie pola w przypadku z przykładu, gdyby bok kwadratu zmniejszyć dwukrotnie, a nie zmieniać ładunków?
2. Ile wynosiłoby natężenie pola w przypadku z przykładu, gdyby nie zmieniać wielkości kwadratu, ale ładunek –20 nC zamienić na +20 nC?
3. W wierzchołkach kwadratu o boku 40 cm umieszczono cztery ładunki, tak jak przedstawiono na rysunku obok. Wyznacz natężenie pola w środku kwadratu.

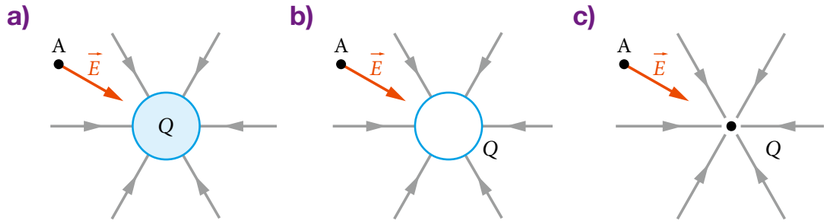


Pole wokół kuli lub sfery

W wielu doświadczeniach nie możemy pomijać rozmiarów ciała, na którym jest zgromadzony ładunek. Zajmiemy się teraz szczególnie prostym przypadkiem takiej sytuacji.

Jakie pole powstaje, gdy ładunek jest rozmieszczony równomiernie i symetrycznie w kuli lub na sferze (na zewnętrznej powierzchni kuli)?

Okazuje się, że pole wytwarzane przez takie ciało po jego zewnętrznej stronie jest takie, jak gdyby cały ładunek był zgromadzony w jego środku. W tym przypadku mamy więc również do czynienia z polem centralnym (rys. 14.16).



Rys. **14.16.** 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 położonym na zewnątrz kuli lub sfery w każdym przypadku będzie takie samo

Uwaga. Jeśli do naładowanej sfery wykonanej z przewodnika zbliżymy ładunek, może to spowodować przemieszczenie się ładunków na sferze i zaburzenie równomiernego rozkładu. Zakładamy jednak, że ładunek próbny jest mały i możemy pominąć ten efekt.

Przyciąganie ciał nienaelektryzowanych
→ s. 88

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Dwa ładunki, 0,25 nC i 0,5 nC, znajdują się w odległości 1 m od siebie.

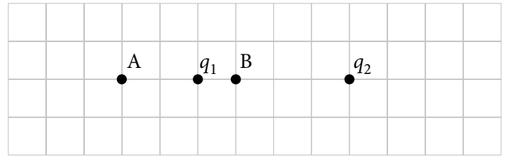
a) Oblicz natężenie pola w połowie łączącego je odcinka.

b) Na odcinku łączącym te ładunki znajdź 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?

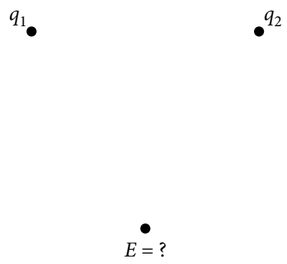
2. Rysunek wykonany w skali 1 kratka = 2 cm przedstawia dwa ładunki: $q_1 = -5$ nC oraz $q_2 = +3$ nC.

Wyznacz natężenia pola elektrycznego w punktach A i B, czyli oblicz ich wartości i określ zwroty (w lewo lub w prawo).



Pytania i zadania

3. W dwóch wierzchołkach trójkąta równobocznego o boku 5 cm znajdują się ładunki q_1 i q_2.



Wyznacz wektor natężenia pola w trzecim wierzchołku trójkąta, kiedy ładunki wynoszą odpowiednio:

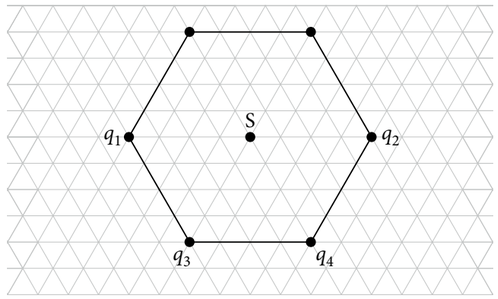
a) $q_1 = 3$ nC, $q_2 = 3$ nC,

b) $q_1 = 3$ nC, $q_2 = -3$ nC.

4. W czterech spośród wierzchołków sześciokąta foremnego o boku 10 cm umieszczono ładunki, tak jak przedstawiono na rysunku. Ładunki wynoszą:

$$q_1 = q_2 = 5 \text{ nC}, q_3 = q_4 = 2 \text{ nC}$$

Wyznacz natężenie pola elektrycznego w punkcie S, czyli w środku tego sześciokąta.



Uwaga. Siatka składa się z trójkątów równobocznych.

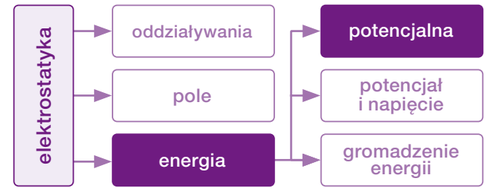
5. Znajdź w internecie program pozwalający rysować linie pola elektrycznego (ang. *electric field lines*). Wykreśl za pomocą takiej aplikacji i wydrukuj linie pola tworzone przez:

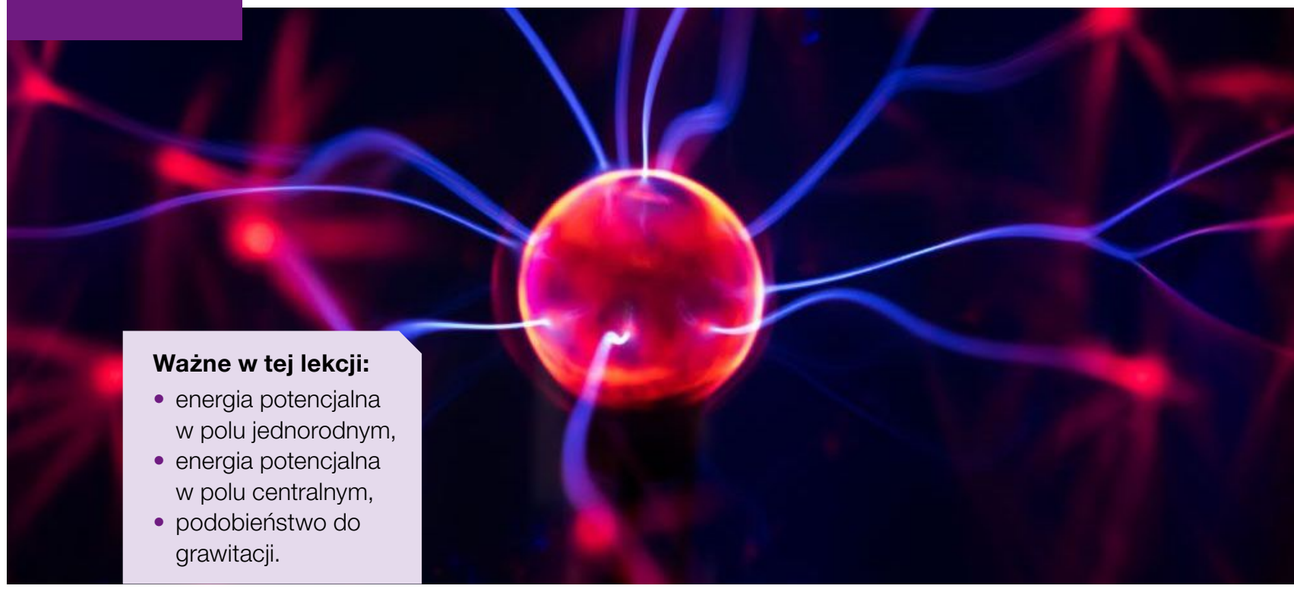
a) trzy ładunki dodatnie o jednakowej wartości umieszczone w trzech wierzchołkach kwadratu,

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.

14.5 Elektrostatyczna energia potencjalna





Ważne w tej lekcji:
- energia potencjalna w polu jednorodnym,
- energia potencjalna w polu centralnym,
- podobieństwo do grawitacji.

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 $E_p = -G\frac{Mm}{r}$.

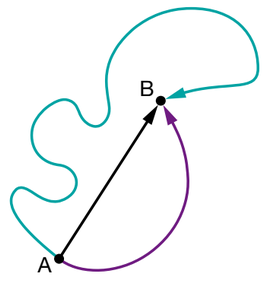
Praca w polu elektrycznym

Wyobraź sobie ładunek próbny (a więc dodatni) w polu elektrycznym. Zauważ, że:

- Jeśli chcemy poruszyć go przeciwnie do zwrotu linii pola, musimy wykonać pewną pracę W.
- Kiedy ładunek będzie wracał na swoje miejsce, będzie mógł wykonać taką samą pracę W.

Te dwie sytuacje przedstawiamy w ramce na następnej stronie.

Okazuje się, że w ogólnym przypadku, jeśli siły zewnętrzne przemieszczają ładunek pomiędzy dwoma dowolnymi punktami A i B w polu elektrycznym, niekoniecznie wzdłuż linii pola, to całkowita praca wykonana nad ładunkiem nie zależy od tego, po jakim torze był przemieszczany ten ładunek (rys. 14.17).



Rys. **14.17.** Różne drogi z punktu A do B w polu elektrycznym

Podobną własność ma grawitacja → s. 57

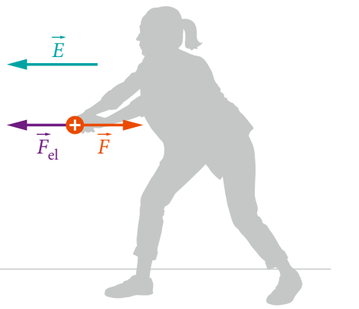
Elektrostatyczna energia potencjalna

Możemy zatem wyróżnić nową formę energii: energię potencjalną ładunku w polu elektrycznym, nazywaną również elektrostatyczną energią potencjalną ładunku.
W różnych punktach pola elektrycznego ładunek próbny ma różną energię potencjalną. Aby poruszyć go z punktu A do B, musimy wykonać pewną (dodatnią lub ujemną) pracę. Być może praca będzie na części toru ujemna, na części dodatnia, a na części równa zeru, ale jeśli obliczymy sumę tych prac (z uwzględnieniem znaków + i –), to zawsze będzie ona równa zmianie energii potencjalnej: $\Delta E = W$.

Praca a zmiana energii, podręcznik cz. 1 → s. 198

Energia potencjalna w polu elektrycznym

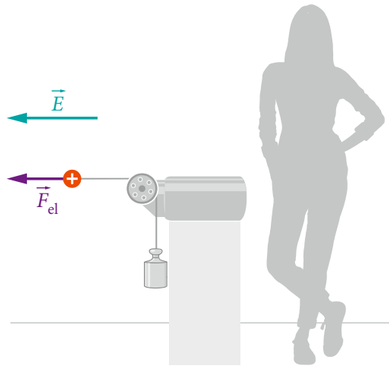
Z położeniem naładowanego ciała w polu elektrycznym jest związana energia.



Kiedy ciągniemy ładunek dodatni i przemieszczamy go **przeciwnie do zwrotu linii pola**, działamy pewną siłą $\vec{F}$, aby zrównoważyć siłę elektryczną $\vec{F}_{el}$.

Tą siłą działamy na pewnej drodze, więc wykonujemy pracę.

Kosztem tej pracy nasz ładunek **zyskuje** elektrostatyczną energię potencjalną.

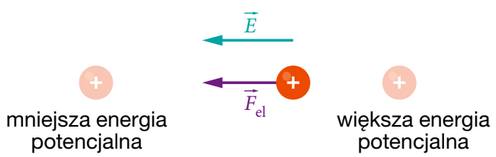


Kiedy na ładunek działa tylko siła elektryczna $\vec{F}_{el}$, porusza się on **zgodnie ze zwrotem linii pola**.

Ładunek może wykonać pracę albo się rozpędzić (czyli zyskać energię kinetyczną).

Wobec tego ładunek **traci** elektrostatyczną energię potencjalną.

Tak więc przesuwając ładunek w polu elektrycznym, możemy magazynować energię, a jak wiesz, taka zmagazynowana energia to energia potencjalna.



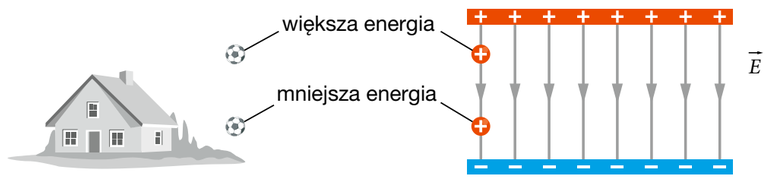
Pole jednorodne

Najprostszy przypadek pola elektrycznego to pole jednorodne, w którym siła działająca na ładunek jest taka sama w każdym punkcie pola. Podobnie jest z siłą grawitacji w pobliżu powierzchni Ziemi, dlatego nasze rozważania przeprowadzimy, porównując te dwie sytuacje.
Przypomnijmy, że jednorodne pole elektryczne występuje między dwiema przeciwnie naładowanymi metalowymi płytkami.

Mówimy też, że pole grawitacyjne w pobliżu powierzchni Ziemi jest jednorodne.

ENERGIA POTENCJALNA

grawitacyjna	**elektrostatyczna**
Kiedy podnosimy ciało z podłoża, musimy działać siłą, aby zrównoważyć siłę grawitacji	Kiedy przesuwamy ładunek próbny (dodatni) z płytki ujemnej na dodatnią, musimy działać siłą, aby zrównoważyć siłę elektryczną
Wykonujemy więc pracę i zwiększamy energię potencjalną	
Wyżej grawitacyjna energia potencjalna jest większa	Dalej od ujemnej płytki elektrostatyczna energia potencjalna jest większa



Aby podnieść ciało na wysokość h i pokonać przy tym siłę grawitacji mg, musimy wykonać pracę: $W = mgh$	Aby odsunąć ciało na odległość x od ujemnej płytki i pokonać przy tym siłę elektrostatyczną qE, musimy wykonać pracę: $W = qEx$
Jeśli za poziom zerowy energii potencjalnej przyjmiemy	
poziom podłoża, to na wysokości h energia potencjalna wynosi: $E_{pg} = mgh$	poziom ujemnej płytki, to w odległości x od niej energia potencjalna wynosi: $E_{pe} = qEx$

Uwaga. Na rysunkach powyżej dodatnia płytka jest u góry, aby podkreślić podobieństwo sytuacji. Płytki mogą być ułożone dowolnie – góra i dół to pojęcia dotyczące ziemskiej grawitacji, a nie pola elektrycznego.

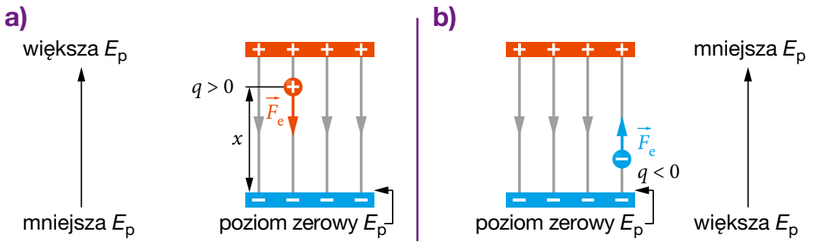
Jak widzisz na diagramie na poprzedniej stronie, wzory w obu przypadkach są bardzo podobne:

Oddziaływanie elektryczne: $E_{pe} = q\,E\,x$
Oddziaływanie grawitacyjne: $E_{pg} = m\,g\,h$

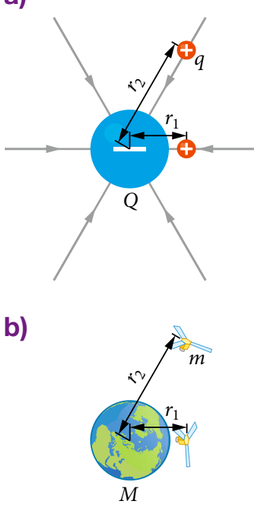
q – czynnik, od którego zależy zdolność do oddziaływania
E / g – wielkość opisująca siłę działającą na jednostkowy ładunek albo jednostkową masę
x / h – wielkość opisująca położenie

Pole jednorodne i ładunek ujemny

Mówiliśmy do tej pory o ładunku próbnym, a więc dodatnim. Dla ładunku ujemnego jest odwrotnie: siła elektryczna działa przeciwnie do zwrotu linii pola, więc ładunek odsuwający się od poziomu zerowego ma coraz mniejszą energię potencjalną (rys. 14.18b).



Rys. **14.18.** Energia potencjalna (E_p) ładunku dodatniego rośnie (a), natomiast ujemnego maleje (b) podczas odsuwania go od ujemnie naładowanej płytki



Rys. **14.19.** Siła działająca na ładunek w centralnym polu elektrycznym (a) jest podobna do siły grawitacji wytwarzanej przez kulę, np. kulę ziemską (b)

Jeśli nadal będziemy zakładać, że poziomem zerowej energii jest poziom ujemnej płytki, to w pozostałych punktach energia będzie ujemna. Wzór:

$$E_{pe} = qEx$$

pozostanie w mocy, tyle że po obu jego stronach znajdą się liczby ujemne.

Pole centralne o ujemnym źródle

Jak już wiesz, polem centralnym jest m.in. pole wytwarzane przez pojedynczy ładunek, a także przez jednorodnie naładowaną sferę lub kulę. Przyjmijmy na początek, że źródło pola ma ładunek ujemny.
W takim polu na ładunek próbny (dodatni) działa siła przyciągająca, opisana prawem Coulomba.
Zależy ona od odległości w taki sam sposób, jak siła grawitacji: każda z tych sił jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości (rys. 14.19).

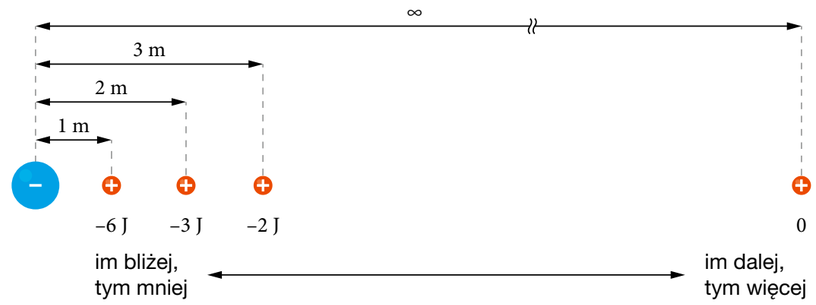
Dlatego też wzór na energię potencjalną w centralnym polu elektrycznym jest podobny do wzoru dla oddziaływań grawitacyjnych:

Oddziaływanie elektryczne: $E_{pe} = k\,\frac{Qq}{r}$
Oddziaływanie grawitacyjne: $E_{pg} = -G\,\frac{Mm}{r}$

k / $-G$ – stała
Qq / Mm – wielkość opisująca zdolność ciał do oddziaływania

Tak jak w przypadku grawitacji, również elektrostatyczna energia potencjalna jest wtedy ujemna (rys. 14.20).
Wprawdzie w górnym wzorze nie ma znaku minus, ale jest on ukryty w ładunku Q, który – jak założyliśmy – jest ujemny.

Zakładamy, że $E_p = 0$ w nieskończoności.

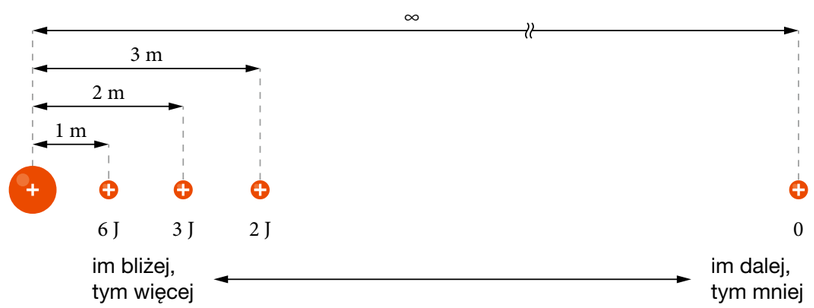


Dlaczego energia potencjalna grawitacji jest ujemna → s. 58.

Rys. **14.20.** Przykładowe wartości energii potencjalnej ładunku w polu centralnym o **ujemnym** źródle

Pole centralne o dodatnim źródle

Rozważmy teraz drugą możliwość, czyli że źródło pola ma ładunek dodatni. W tym przypadku ładunek próbny jest odpychany od źródła i dalej od niego ma mniejszą energię.
Nadal zakładamy, że w nieskończoności energia jest zerowa, a więc wszędzie indziej energia jest dodatnia (rys. 14.21).

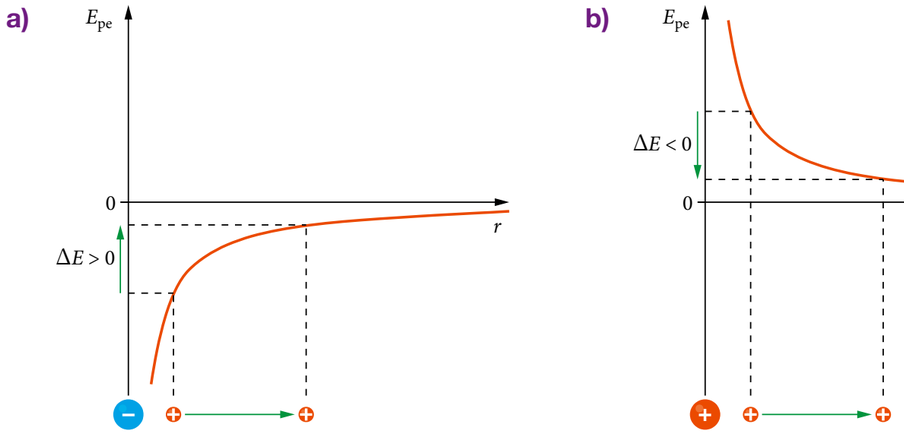


Rys. **14.21.** Przykładowe wartości energii potencjalnej ładunku w polu centralnym o **dodatnim** źródle

Okazuje się, że wzór na energię potencjalną nadal ma tę samą postać:

$$E_{pe} = k\frac{Qq}{r}$$

jednak oznacza on już inną zależność. Zobacz porównanie zależności $E_{pe}(r)$ dla źródła pola ujemnego i dodatniego – rysunek 14.22.
Na koniec zwróćmy uwagę na to, że mówiliśmy o energii ładunku próbnego, a więc dodatniego. Jeśli w polu centralnym umieścimy ładunek ujemny ($q < 0$), zwroty sił i znaki energii się zmienią. Nie zmieni się jednak wzór na energię potencjalną, tyle że po podstawieniu do niego danych otrzymamy wynik o innym znaku.



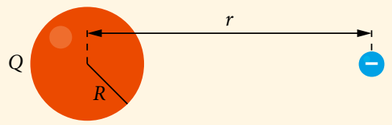
Rys. **14.22.** Wykres zależności energii potencjalnej ładunku próbnego w polu elektrycznym od odległości od źródła naładowanego: a) ujemnie, b) dodatnio

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Sferę o promieniu R = 10 cm naładowano równomiernie ładunkiem Q = +20 nC. W odległości r = 25 cm od środka tej sfery spoczywa elektron. Pod wpływem przyciągania rozpędza się on i uderza w sferę. Z jaką prędkością w nią uderzy?



Dane: $\boldsymbol{R = 10\ cm}$ = 0,1 m – promień sfery,
$\boldsymbol{Q = 20\ nC}$ = $20 \cdot 10^{-9}$ C – ładunek rozłożony na sferze,
$\boldsymbol{r = 25\ cm}$ = 0,25 m – odległość środka sfery od elektronu
Szukane: v – prędkość elektronu w chwili uderzenia w sferę

Rozwiązanie:
Skorzystajmy z zasady zachowania energii.

Kiedy porównujemy tylko sytuację na początku i na końcu zjawiska, zwykle warto korzystać z zasad zachowania.

Zapisujemy wzory na energię
Na początku elektron ma zerową energię kinetyczną oraz energię potencjalną równą:

$$E_{pe1} = \frac{kQ(-e)}{r}$$

Tuż przed uderzeniem w sferę energia kinetyczna elektronu wynosi:

$$E_{k2} = \frac{mv^2}{2}$$

a energia potencjalna:

$$E_{pe1} = \frac{kQ(-e)}{R}$$

Zapisujemy równanie wynikające z zasady zachowania energii
Z zasady zachowania energii mamy równość energii elektronu na początku oraz tuż przed uderzeniem w sferę:

$$0 + \frac{kQ(-e)}{r} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kQ(-e)}{R}$$

Wyznaczamy i obliczamy prędkość
Stąd wyznaczamy prędkość elektronu w odległości R od środka sfery:

$$\frac{mv^2}{2} = kQ(-e)\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right) \rightarrow \frac{mv^2}{2} = kQe\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r}\right)$$

$$v^2 = \frac{2kQe}{m}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r}\right)$$

$$v = \sqrt{\frac{2kQe}{m}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r}\right)}$$

Podstawiamy dane, przy czym masę elektronu i jego ładunek odczytujemy z tablic (patrz tabela 2 → s. 351):

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9\ \frac{Nm^2}{C^2} \cdot 20 \cdot 10^{-9}\,C \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,C}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg}\left(\frac{1}{0{,}1\ m} - \frac{1}{0{,}25\ m}\right)}$$

$$[v] = \sqrt{\frac{\frac{Nm^2}{C^2} \cdot C \cdot C}{kg} \cdot \frac{1}{m}} = \sqrt{\frac{Nm}{kg}} = \sqrt{\frac{kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m}{kg}} = \sqrt{\frac{m^2}{s^2}} = \frac{m}{s}$$

Ostatecznie prędkość elektronu wynosi:

$$v = 19{,}5 \cdot 10^6\ \frac{m}{s} = 19\,500\ \frac{km}{s}$$

Odpowiedź: Elektron uderzy w sferę z prędkością 19 500 $\frac{km}{s}$.

Zadania s. 114

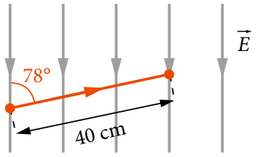
Pytania i zadania

1. W jednorodnym polu elektrycznym o natężeniu $E = 20\,000\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ przesuwamy kulkę o ładunku q o $x = 8$ cm zgodnie z kierunkiem i zwrotem linii pola. Czy musimy wykonać pracę? Jeśli tak, to ile ona wynosi? Jeśli nie, to czy kulka może wykonać pracę i jak dużą? Rozważ dwa przypadki:

a) $q = +2$ nC,

b) $q = -2$ nC.

2. Rysunek przedstawia tor ruchu kulki o ładunku +20 nC przesuwanej ruchem jednostajnie prostoliniowym przez siłę zewnętrzną F w jednorodnym polu elektrycznym o natężeniu 800 $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$. Oblicz pracę wykonaną przez siłę F.



3. W jednorodnym polu elektrycznym o natężeniu 400 $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ umieszczono proton. Jego prędkość początkowa wynosiła 0. Proton zaczął przyspieszać. Oblicz, do jakiej prędkości rozpędzi się:

a) w czasie 5 μs,

b) na drodze 8 cm.

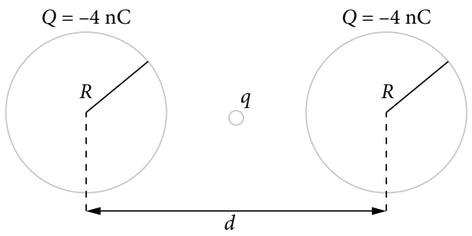
Wskazówka. W podpunkcie a) wygodniej skorzystać z zasad dynamiki, a w podpunkcie b) – z pojęcia energii.

4. (P) Na sferze o promieniu $R = 5$ cm znajduje się równomiernie rozłożony ładunek $Q = -4$ nC. Tuż przy powierzchni tej sfery umieszczono elektron. Pod wpływem odpychania elektron rozpędza się i oddala od sfery.

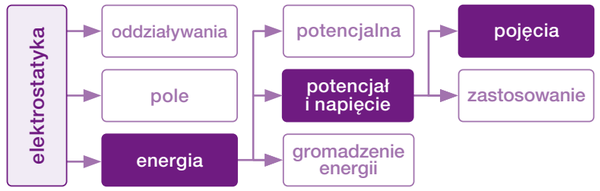
a) Czy elektron oddala się od sfery ruchem jednostajnym, jednostajnie przyspieszonym czy ze zmiennym przyspieszeniem? Jeśli przyspieszenie się zmienia, to rośnie czy maleje?

b) Oblicz prędkość elektronu w odległości 20 cm od środka sfery.

5*. Dwie jednakowe sfery o promieniu $R = 5$ cm, wykonane z izolatora, ustawiono w ten sposób, że odległość między ich środkami wynosi $d = 50$ cm. Sfery naelektryzowano równomiernie tak, że każda z nich zyskała ładunek $Q = -4$ nC. Dokładnie w połowie odległości między sferami znajduje się kulka o ładunku $q = -1$ nC. Jaką pracę trzeba wykonać, aby ją przesunąć o $x = 1$ cm w stronę jednej ze sfer?



14.6 Potencjał i napięcie



Ważne w tej lekcji:
- potencjał,
- napięcie,
- wyrównywanie potencjału i uziemienie.

Przypomnij sobie:
- Ładunek w polu elektrycznym ma energię potencjalną zależną od położenia tego ładunku.
- Swobodny ładunek przemieszcza się do miejsca, w którym jego energia potencjalna jest mniejsza.
- Wzory na elektrostatyczną energię potencjalną w jednorodnym i centralnym polu elektrycznym są analogiczne do wzorów na grawitacyjną energię potencjalną w podobnych polach.

Potencjał

Energia potencjalna ładunku w polu elektrycznym jest proporcjonalna do tego ładunku. Widzimy to z samych wzorów, a fizyczną przyczynę można przedstawić za pomocą diagramu:

większy ładunek próbny → większa siła potrzebna do jego przesuwania → większa praca wykonana przy jego przesuwaniu → większa energia

Jeśli więc chcemy opisać samo pole elektryczne niezależnie od ładunku próbnego, to możemy wskazać, jaka jest energia potencjalna w przeliczeniu na 1 C ładunku próbnego. Tę wielkość nazywamy **potencjałem elektrycznym** i obliczamy jako stosunek energii ładunku próbnego do tego ładunku:

potencjał elektryczny → $V = \frac{E_{\mathrm{pe}}}{q}$ ← energia potencjalna, ładunek próbny

Jeśli na przykład ładunek 1 C ma w danym punkcie energię potencjalną 5 J, to ładunek 2 C ma energię 10 J itd., a potencjał obliczony dla każdego z tych przykładów jest jednakowy:

$$V = \frac{5\ \text{J}}{1\ \text{C}} = \frac{10\ \text{J}}{2\ \text{C}} = \frac{15\ \text{J}}{3\ \text{C}} = \ldots$$

Z definicji wynika, że jednostką potencjału jest dżul na kulomb. Ta jednostka ma własną nazwę – wolt.

$$1\ \text{V} = 1\ \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Uwaga. Ta sama litera oznacza wielkość (potencjał) i jej jednostkę (wolt). W książkach jednostki piszemy pismem prostym, a symbole wielkości – pochyłym, ale w zeszycie musisz po prostu uważać.

Tak, to ten sam wolt dobrze ci znany z życia codziennego jako jednostka napięcia. O związku potencjału z napięciem powiemy za chwilę.

Wielkości zależne i niezależne od ładunku próbnego

Zwróć uwagę na to, że podobnie postępowaliśmy wtedy, gdy chcieliśmy wprowadzić natężenie pola – wielkość analogiczną do siły, ale niezależną od ładunku próbnego.

Wielkość zależna od ładunku próbnego	Wielkość niezależna od ładunku próbnego
Siła F	Natężenie pola: siła w przeliczeniu na ładunek $E = \frac{F}{q}$
Energia potencjalna E_{pe}	Potencjał: energia potencjalna w przeliczeniu na ładunek $V = \frac{E_{pe}}{q}$

Napięcie

Aby określać energię potencjalną, musimy wybrać pewien poziom jako zerowy (poziom odniesienia). Bez niego możemy mówić jedynie **o różnicy energii potencjalnych** ładunku w różnych punktach.
Tę cechę dziedziczy potencjał, który przecież definiujemy za pomocą energii potencjalnej. Tak więc potencjał zależy od wyboru poziomu zerowego, natomiast różnica potencjałów nie zależy od tego wyboru.
Dlatego w praktyce różnica potencjałów okazuje się wielkością ważniejszą od samego potencjału. Ma ona własną nazwę: **napięcie elektryczne**.

Napięcie elektryczne U między danymi punktami to różnica potencjałów między tymi punktami:

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

Z definicji napięcia elektrycznego wynika, że:
- napięcie mierzymy w tych samych jednostkach co potencjał, czyli w woltach,
- napięcie możemy określić tylko dla **dwóch** punktów – nie można mówić o różnicy, kiedy punkt jest tylko jeden.

Czasem potocznie mówimy, że „przewód jest pod napięciem" (rys. 14.23a), ale dokładniej to oznacza, że napięcie występuje między tym przewodem a ziemią.

a)

b)

Rys. **14.23.** Tak naprawdę tablica ostrzega przed napięciem **między przewodami a ziemią**, czyli przed wysokim potencjałem przewodów względem ziemi (a). Wróble na przewodzie pod napięciem (b)

Dla ptaka siedzącego na drucie pod napięciem to napięcie nie ma znaczenia, skoro nie dotyka on ziemi. Jedyne, co mogłoby mu zaszkodzić, to napięcie między dwoma punktami przewodu, których dotyka dwiema nogami. Ono jednak nie jest duże (rys. 14.23b).

Plus i minus napięcia

Kiedy porównujemy potencjały dwóch punktów, często interesuje nas nie tylko wartość bezwzględna różnicy tych potencjałów, czyli wartość napięcia, lecz także to, który punkt ma wyższy potencjał. Wyższy potencjał oznaczamy plusem, a niższy – minusem. Takich symboli używamy m.in. na bateriach (rys. 14.24).

Rys. **14.24.** Ładunek 1 C na dodatnim biegunie tej baterii ma energię o 9 J wyższą niż na ujemnym

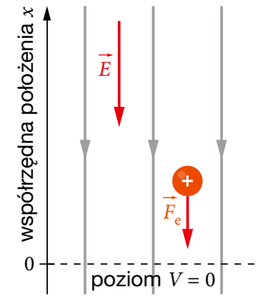
Potencjał w polu jednorodnym

Zajmiemy się teraz po kolei dwoma najprostszymi przypadkami: polem jednorodnym, a następnie polem centralnym. Aby wyznaczyć wzór na potencjał w polu jednorodnym, wystarczy do definicji potencjału $V = \frac{E_{ep}}{q}$ podstawić wzór na energię potencjalną $E_{ep} = qEx$:

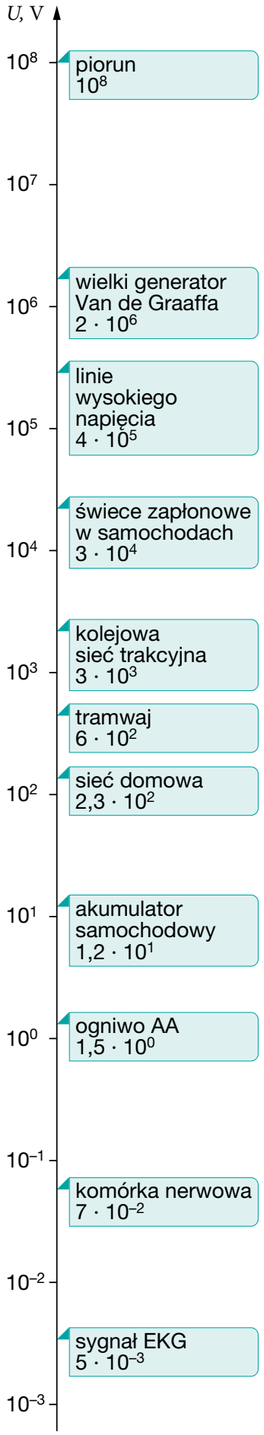
$$V = \frac{E_{ep}}{q} = \frac{qEx}{q} = Ex$$

Otrzymujemy prosty wzór:

potencjał → $V = Ex$ ← natężenie pola, odległość od poziomu zerowego



Rys. **14.25.** Gdy poruszamy się zgodnie ze zwrotem linii pola (czyli zwrotem wektora $\vec{E}$), przemieszczamy się do miejsca o niższym (czyli mniejszym) potencjale



Rys. **14.27.** Przykłady napięć

Napięcie i natężenie pola między naładowanymi płytkami

Rozważmy pole jednorodne między dwiema naładowanymi metalowymi płytkami. Skoro za zero energii potencjalnej przyjmujemy płytkę ujemną, to napięcie między płytkami jest równe potencjałowi dodatniej płytki, czyli wynosi:

$$U = V_+ - V_- = V_+ - 0 = V_+ = Ed$$

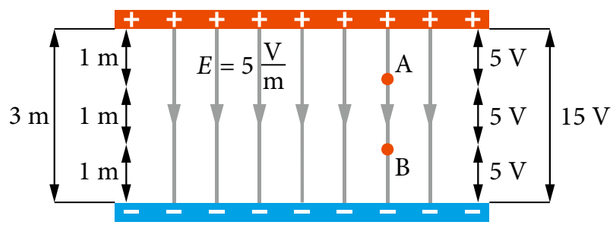
gdzie d jest odległością między płytkami.

Z tego wzoru najczęściej korzystamy po przekształceniu do postaci:

$$E = \frac{U}{d}$$

- Pozwala on na podstawie napięcia i odległości, które łatwo się mierzy, wyznaczyć natężenie pola elektrycznego – wielkość trudną do bezpośredniego pomiaru.
- Ten sam wzór pozwala też stwierdzić, że natężenie pola jest liczbowo równe napięciu między dwoma punktami w tym polu odległymi od siebie o 1 m wzdłuż linii pola (przykładowe wyznaczanie natężenia pola przedstawiono na rys. 14.26).

Kolejnym wnioskiem płynącym z wzoru na natężenie pola elektrycznego jest jego jednostka: $\frac{\text{V}}{\text{m}}$, co jest zgodne z naszą wcześniejszą wiedzą, ponieważ $1\,\frac{\text{V}}{\text{m}} = 1\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$ (patrz zad. 1. po tej lekcji).



Rys. **14.26.** Odległość między punktami A i B wynosi 1 m, a napięcie 5 V. Natężenie pola jest równe 5 $\frac{\text{N}}{\text{C}}$, czyli 5 $\frac{\text{V}}{\text{m}}$

Warto zapamiętać tę równość jednostek – pozwala ona spojrzeć na natężenie pola na dwa sposoby:

- Zapis 5 $\frac{\text{N}}{\text{C}}$ przypomina, jak obliczać siłę działającą na ładunek.
- Zapis 5 $\frac{\text{V}}{\text{m}}$ wskazuje na związek napięcia z odległością w polu jednorodnym.

Potencjał w polu centralnym

W przypadku pola centralnego, wytwarzanego przez pojedynczy ładunek Q, możemy postąpić podobnie jak w przypadku pola jednorodnego:

$$V = \frac{k\frac{Qq}{r}}{q} = k\frac{Q}{r}$$

czyli:

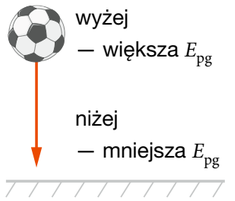
$$V = k\frac{Q}{r}$$

potencjał, stała elektryczna, ładunek źródła pola, odległość od źródła pola

Jak wiesz, również równomiernie naładowana kula (lub sfera) wytwarza wokół siebie pole centralne, tak jakby cały ładunek był zgromadzony w jej środku.
Dlatego również w przypadku potencjału na zewnątrz kuli i sfery możemy korzystać z podanego wyżej wzoru.

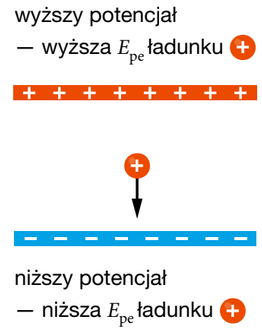
Ciało dąży do minimalnej energii

Zamiast rozważać siły działające na ciało, możemy sobie wyobrazić, że ciało „chce” znaleźć się w punkcie, w którym jego energia potencjalna jest najmniejsza.



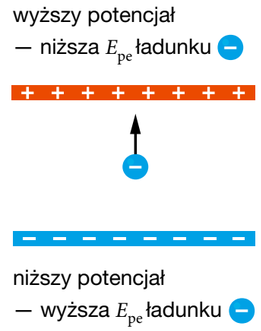
Piłka spada, ponieważ w dół ciągnie ją siła grawitacji.

W ten sposób zdąża do punktu, w którym ma jak najmniejszą grawitacyjną energię potencjalną.



Ładunek dodatni przesuwa się do miejsca o niższym potencjale, ponieważ ciągnie go siła elektryczna.

W ten sposób zdąża do punktu, w którym ma jak najmniejszą elektrostatyczną energię potencjalną.



Ładunek ujemny przesuwa się do miejsca o wyższym potencjale, ponieważ ciągnie go siła elektryczna.

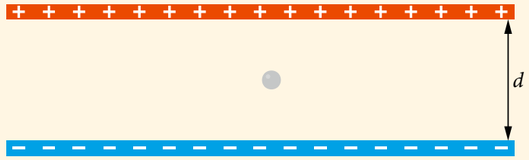
W ten sposób zdąża do punktu, w którym ma jak najmniejszą elektrostatyczną energię potencjalną.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Dwie metalowe płyty ustawiono poziomo jedną nad drugą, tak że odległość między nimi wynosi 8 cm. Płyty podłączono do napięcia 4 kV, przy czym dodatni biegun źródła napięcia podłączono do górnej płyty. Pomiędzy płytami w powietrzu unosi się bez ruchu mała naelektryzowana kuleczka o ładunku –5 nC. Oblicz masę kuleczki.



Dane: $\boldsymbol{d = 8\ cm} = 0{,}08$ m – odległość między płytkami,
$\boldsymbol{U = 4\ kV} = 4000$ V – napięcie między płytkami,
$\boldsymbol{q = -5\ nC} = -5 \cdot 10^{-9}$ C – ładunek kuleczki
Szukane: $\boldsymbol{m}$ – masa kuleczki

Rozwiązanie:
Na początek rozważmy, jakie siły działają na kuleczkę. Są to siły:

- zwrócona w dół siła ciężkości o wartości mg,
- zwrócona w górę siła elektryczna o wartości $E|q|$.

Wiemy z treści zadania, że kuleczka jest w równowadze. Oznacza to, że siły działające na kuleczkę muszą mieć równe wartości:

$$mg = E|q|$$

A ponieważ zgodnie ze wzorem:

$$E = \frac{U}{d}$$

natężenie pola E można obliczyć na podstawie napięcia U i odległości d, to:

$$mg = \frac{U \cdot |q|}{d}$$

stąd masa kuleczki:

$$m = \frac{U \cdot |q|}{d \cdot g}$$

$$[m] = \frac{\mathrm{V \cdot C}}{\mathrm{m} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}} = \frac{\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} \cdot \mathrm{C}}{\mathrm{m} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}} = \frac{\mathrm{N \cdot m}}{\mathrm{m} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}} = \frac{\mathrm{N}}{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}}{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}} = \mathrm{kg}$$

Podstawiamy dane liczbowe i obliczamy:

$$m = \frac{4000\ \mathrm{V} \cdot 5 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{C}}{0{,}08\ \mathrm{m} \cdot 9{,}81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}} = 2{,}5 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{kg} = 25 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{kg} = 25\ \mathrm{mg}$$

Odpowiedź: Masa kuleczki wynosi 25 mg.

1. Wykonaj odpowiednie przekształcenia jednostek i wykaż, że:

$$1\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}} = 1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

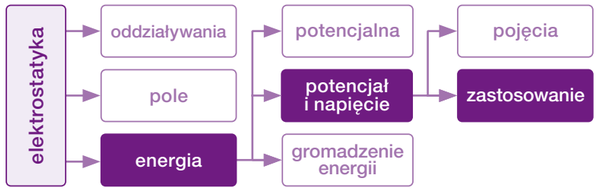
2. W polu elektrycznym wybieramy dwa punkty A i B. Jeśli w punkcie A umieścimy ładunek 3 C, to będzie on miał elektrostatyczną energię potencjalną 12 J. Jeśli natomiast w punkcie B umieścimy ładunek 2 C, to będzie on miał elektrostatyczną energię potencjalną 10 J. Jakie jest napięcie między tymi punktami? Gdzie jest plus, a gdzie minus (gdzie potencjał jest większy, a gdzie mniejszy)?
3. Kula o promieniu 1 cm ma jednorodnie rozmieszczony ładunek +30 nC. Oblicz napięcie między punktem A oddalonym od środka tej kuli o 3 cm i punktem B oddalonym od środka o 10 cm. Gdzie jest plus, a gdzie minus (gdzie potencjał jest większy, a gdzie mniejszy)?
4. P Dwie duże stalowe płyty są ustawione poziomo w odległości 50 cm od siebie.

   Jakie napięcie należy do nich przyłożyć, aby w powstałym jednorodnym polu elektrycznym skrawek folii o masie 0,01 g i ładunku 20 nC mógł wisieć między płytami i pozostawać w równowadze?
5. Na wykonanej z izolatora sferze o promieniu 10 cm znajduje się jednorodnie rozmieszczony ładunek 5 μC.

   Do jakiej odległości można zbliżyć do niej palec, zanim przeskoczy na niego iskra elektryczna?

   Załóż, że potencjał palca wynosi zero. Przyjmij, że iskra przeskakuje wtedy, gdy natężenie pola elektrycznego między sferą a palcem jest równe $3\ \frac{\mathrm{MV}}{\mathrm{m}}$, i że w obszarze między sferą a palcem pole jest jednorodne.

14.7 Ładunki w przewodniku



Ważne w tej lekcji:

- brak pola wewnątrz przewodnika,
- jednakowy potencjał wszystkich punktów przewodnika,
- klatka Faradaya,
- burze i piorunochrony.

Przypomnij sobie:

- W przewodniku (np. w metalu) znajdują się elektrony swobodne, które nie są związane z atomami i mogą poruszać się po całej objętości przewodnika.
- Jeśli ładunek elektryczny może się poruszać, to dąży do punktu, w którym będzie miał najmniejszą energię potencjalną.
- Ciało o sferycznie symetrycznym rozkładzie ładunku jest źródłem centralnego pola elektrycznego, które na zewnątrz ciała jest takie samo, jakie byłoby w przypadku, gdyby cały ładunek był zgromadzony w środku tego ciała.

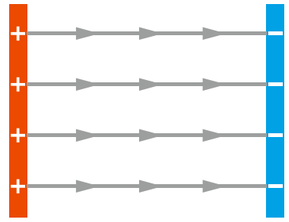
Do tej pory rozważaliśmy ładunki elektryczne znajdujące się w próżni lub w powietrzu. Jednak w praktyce często mamy do czynienia z ładunkami znajdującymi się w przewodniku. Jak się przekonasz, właśnie właściwości przewodnika – a konkretnie obecność w nim swobodnych elektronów – mają decydujący wpływ na przebieg zjawisk elektrostatycznych.

Przewodnik w polu elektrycznym

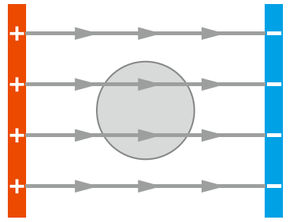
Kiedy przewodnik znajdzie się w polu elektrycznym, siły elektryczne działające na elektrony powodują ich ruch do momentu, gdy we wnętrzu przewodnika stworzy się równowaga: pole wytworzone przez nierównomierny rozkład elektronów zrównoważy pole zewnętrzne (patrz ramka na następnej stronie). Tak więc wewnątrz przewodnika nie będzie pola.

Dlaczego wewnątrz przewodnika nie ma pola elektrycznego

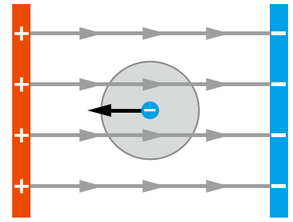
Ilustracje przedstawiają, co się dzieje, gdy w polu elektrycznym znajdzie się przewodnik. Na rysunkach pole jest jednorodne, jednak w innych przypadkach zjawisko przebiega analogicznie.



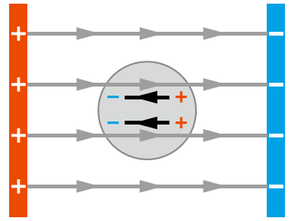
1 Rozważmy pole elektryczne w próżni między dwiema elektrodami.



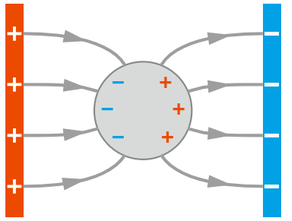
2 W tym polu umieszczamy przewodnik.



3 Na elektrony swobodne działają siły powodujące ich ruch.



4 Na skutek ruchu elektronów rozkład ładunków w przewodniku nie jest już równomierny i ładunki te wytwarzają własne pole elektryczne.



5 Kiedy pole wewnątrz przewodnika zostanie zrównoważone przez pole zewnętrzne, przepływ elektronów ustaje. W efekcie natężenie pola wewnątrz przewodnika staje się zerowe, a pole na zewnątrz – zmienione w stosunku do pierwotnego.

Elektronów swobodnych w przewodniku jest w praktyce niewyczerpany zapas (patrz zadanie 4 → s. 130), więc na pewno nie zabraknie ich do zrównoważenia pola zewnętrznego. Opisany ruch elektronów trwa zbyt krótko, abyśmy zdążyli go zaobserwować. Dlatego zwykle mówimy, że pole elektryczne nie wnika do przewodnika.

Potencjał przewodnika

Skoro natężenie pola elektrycznego w przewodniku jest zerowe, to potencjał w każdym punkcie jest taki sam.
Można to uzasadnić bezpośrednio: kiedy występują różnice potencjału, ładunki przepływają do miejsc, w których ich energia potencjalna jest mniejsza. Ten ruch ustaje dopiero wtedy, gdy potencjały się wyrównają.

Potencjał a pole, ramka → s. 119

Potencjały wszystkich punktów przewodnika zanurzonego w polu elektrycznym są jednakowe. Dlatego mówimy o potencjale przewodnika.

Ekranowanie pola

W szkolnych warunkach trudno byłoby badać, co się dzieje **we wnętrzu** przewodnika (np. w głębi pełnej w środku stalowej kuli). Zbadamy za to podobne zjawisko: sprawdzimy, co się dzieje w obszarze **otoczonym przewodnikiem**.

Doświadczenie 6

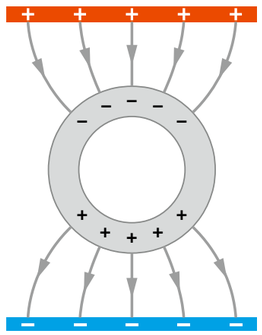
1. Przygotuj szalkę Petriego (ewentualnie biały głęboki talerz z porcelany), maszynę elektrostatyczną (lub generator Van de Graaffa), dwie metalowe płytki i metalowy pierścień (możesz go wykonać z folii aluminiowej), olej spożywczy oraz skrawki wstążki do pakowania prezentów.
2. Nalej do naczynia olej 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.

W doświadczeniu zaobserwowaliśmy, że skrawki wstążki wewnątrz metalowego pierścienia nie ułożyły się w żaden uporządkowany sposób. Tak więc w obszarze otoczonym przez pierścień nie było pola elektrycznego – inaczej mówiąc, natężenie pola elektrycznego w tym obszarze było równe zeru.

Dlaczego tak się stało? Wiemy, że punkty na wewnętrznej powierzchni pierścienia mają jednakowy potencjał. Okazuje się, że tak samo jest dla punktów w obszarze otoczonym przez pierścień.

Innymi słowy, nierównomierny rozkład ładunków w przewodniku (pierścieniu) powoduje powstanie pola, które równoważy pole zewnętrzne nie tylko we wnętrzu metalu, lecz także w obszarze otoczonym przez pierścień (rys. 14.28).

Przypomnijmy: potencjał w każdym punkcie to łączny potencjał pola zewnętrznego i pola wywołanego przez rozkład ładunków w pierścieniu.



Rys. **14.28.** Pole wokół pierścienia umieszczonego pomiędzy dwiema płytkami o przeciwnym ładunku

Klatka Faradaya

Doświadczenie 6. pokazuje, że z przewodnika można wykonać osłonę przed polem elektrycznym. W tym celu nie jest potrzebne pudełko z blachy zamknięte ze wszystkich stron. W doświadczeniu wystarczył nam pierścień. Podobnie działa klatka wykonana z prętów albo siatki. Właśnie dlatego jest możliwa sytuacja przedstawiona na rysunku na górze strony 122. Widzimy, że mimo silnych wyładowań elektrycznych osoba w klatce jest bezpieczna.

Taką osłonę nazywamy **klatką Faradaya** (nie musi ona wyglądać jak klatka w potocznym rozumieniu, może to być na przykład metalowe pudełko). Jej nazwa pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka Michaela Faradaya, który ją wymyślił i skonstruował w 1836 r.

Wyrównywanie potencjału

Kiedy połączymy dwa przewodniki (np. zetkniemy je albo połączymy przewodem), razem tworzą one jeden większy przewodnik, a więc po ewentualnym chwilowym przepływie ładunków ustala się na nich jednakowy potencjał.

Dwie połączone kule

Zajmijmy się tym zagadnieniem nieco dokładniej. Rozważmy dwie oddalone od siebie zbudowane z przewodnika kule o różnych promieniach R i r, które zostały naładowane elektrycznie. Gdy połączymy je przewodnikiem, po ewentualnym przepływie elektronów ich potencjały się wyrównają i przyjmą wspólną wartość V. Dla uproszenia zakładamy, że odległość między kulami jest wystarczająco duża, aby żadna z nich nie zakłócała równomiernego rozkładu ładunku na drugiej. Pomijamy także ładunek zgromadzony w samym przewodniku.

Jak już wiemy, kula wytwarza takie samo pole, jakie by wytwarzała, gdyby cały ładunek był zgromadzony w jej środku. Wobec tego do jej powierzchni możemy zastosować wzory na natężenie pola i potencjał pola pochodzącego od pojedynczego ładunku:

Dla pierwszej kuli: $E_1 = \frac{kQ}{R^2}$ $V = \frac{kQ}{R}$

Dla drugiej kuli: $E_2 = \frac{kq}{r^2}$ $V = \frac{kq}{r}$

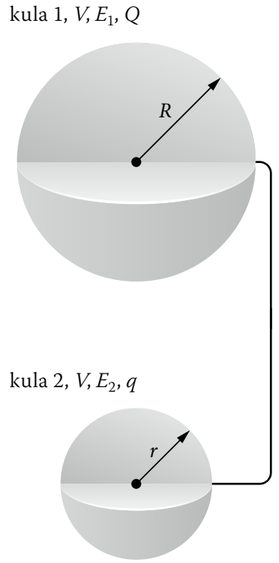
Stąd:

$$Q = \frac{V}{k} \cdot R, \qquad q = \frac{V}{k} \cdot r$$

$$E_1 = \frac{V}{R}, \qquad E_2 = \frac{V}{r}$$

Tak więc mimo wspólnego potencjału na większej kuli ładunek będzie większy.

Odwrotnie jest z natężeniem pola: mniejsza kula wytworzy przy swojej powierzchni pole o większym natężeniu.



Rys. **14.29.** Dwie metalowe naładowane kule o różnych promieniach (odległość między kulami powinna być większa niż to widać na rysunku)

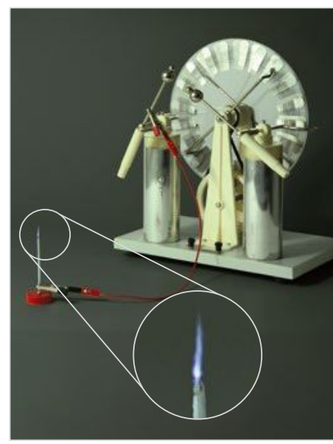
Przewodnik z ostrzem

Ostatnią zależność zademonstrujemy w efektowny sposób za pomocą przewodnika z ostrym końcem. Taki koniec można traktować jako fragment kuli o bardzo małym promieniu.

Doświadczenie 7

Uwaga. Doświadczenie trzeba wykonywać w zaciemnionym pomieszczeniu.

1. Przygotuj maszynę elektrostatyczną lub generator Van de Graaffa, ostry gwóźdź i przewód.
2. Połącz gwóźdź z jednym z biegunów maszyny elektrostatycznej.
3. Wyłącz światło i włącz maszynę. Co obserwujesz?



Taki jest mechanizm powstawania wszystkich iskier elektrycznych – od małych przy zdejmowaniu wełnianego swetra do gigantycznych błyskawic.

W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować, że wokół ostrza gwoździa powietrze świeci. To potwierdza nasze przypuszczenia: przy ostrzu pole elektryczne jest bardzo silne.
Zastanówmy się jednak, co sprawia, że w obszarze silnego pola elektrycznego powietrze świeci.
Otóż w powietrzu zawsze znajduje się niewielka liczba naładowanych cząstek. W silnym polu elektrycznym naładowane cząstki przyspieszają, a gdy zderzają się z cząsteczkami powietrza, powodują ich jonizację, czyli wybijają z nich elektrony. Te elektrony i powstałe jony również się rozpędzają i uderzają w kolejne cząsteczki, co powoduje ich jonizację.
Gdy elektrony ponownie przyłączają się do jonów, pozbywają się nadmiaru energii poprzez wypromieniowanie jej w postaci światła.

Powstawanie burz i działanie piorunochronu

Wiemy, że pioruny wybierają drogę o najmniejszym oporze, dlatego aby skrócić drogę przez powietrze, często uderzają w wysokie obiekty, takie jak drzewa czy budynki.
Skutkom uderzenia pioruna zapobiega się, umieszczając na budynkach piorunochrony – metalowe pręty połączone z ziemią. Kiedy piorun w nie uderza, ładunek odpływa do ziemi przez gruby przewód, który jest znacznie lepszym przewodnikiem niż ściany czy wnętrze domu. Znaczenie ma także zaostrzony koniec piorunochronu. W jego otoczeniu pole elektryczne ma bardzo duże natężenie, co powoduje jonizację powietrza. Zjonizowane powietrze stanowi swego rodzaju przedłużenie piorunochronu.
Choć najczęściej jonizacja nie jest tak silna, aby powietrze świeciło, to czasami na końcach piorunochronów (a także słupów, masztów czy skrzydeł samolotów) widać błękitną poświatę, którą żeglarze na cześć swojego patrona nazwali *ogniami św. Elma* (rys. 14.30)

Rys. **14.30.** Ognie Świętego Elma

Uziemienie

Szczególnym przypadkiem wyrównywania potencjałów jest uziemienie, czyli wyrównanie potencjału ciała z potencjałem ziemi (przyjmowanym najczęściej za zerowy). Podsumujmy to, co o nim wiemy:

- W niektórych naszych doświadczeniach dotykaliśmy naładowanych ciał, aby umożliwić przepływ ładunków do ziemi.
- Wspomnieliśmy o tym, że każdy piorunochron jest uziemiony.
- Z uziemieniem mamy do czynienia także w domowej sieci elektrycznej (patrz → s. 317).

Rys. **14.31.** Symbol uziemienia

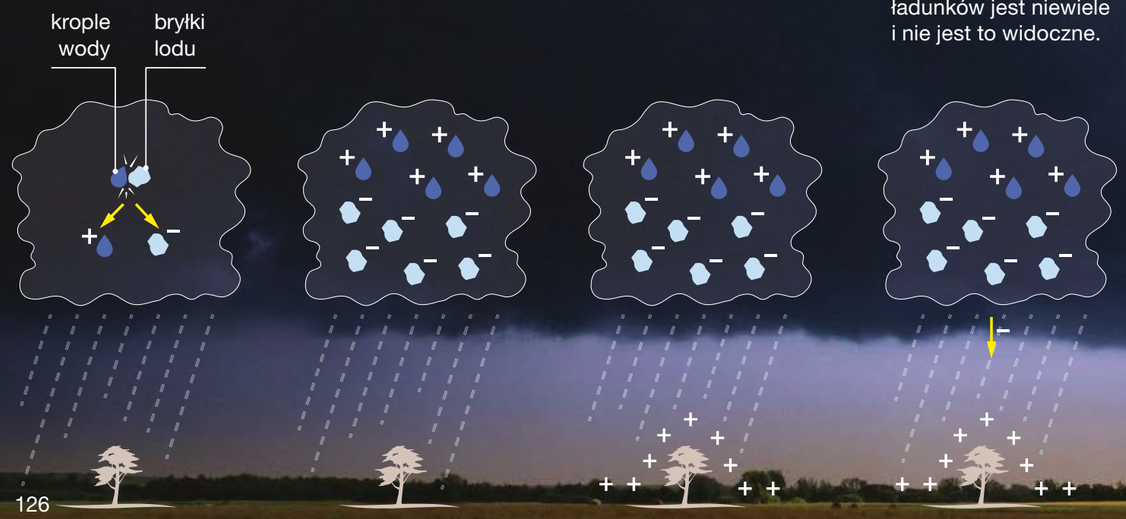
Powstawanie pioruna

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 dostatecznie wysokie, znajdujące się w powietrzu elektrony zaczynają się poruszać ku ziemi. Początkowo ładunków jest niewiele i nie jest to widoczne.



5 W tym samym czasie jony dodatnie zaczynają się przemieszczać w górę – w stronę chmury.
Jony i elektrony zderzają się z kolejnymi cząsteczkami powietrza i powodują ich jonizację.

6 Między chmurą a powierzchnią ziemi tworzy się wąska ścieżka silnie zjonizowanego powietrza.

7 Zjonizowaną ścieżką płynie coraz więcej ładunków. To powoduje dalszą jonizację powietrza i przepływ jeszcze większej liczby ładunków. Mówimy, że w ziemię uderzył piorun.

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 mają okna – stanowią klatkę Faradaya chroniącą przed wyładowaniami. Nie chroń się jednak w samochodzie zaparkowanym pod drzewem – wiatr może je przewrócić.

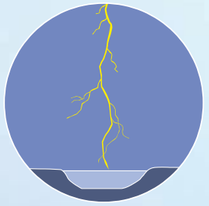
Piorun wybiera drogę o najmniejszym oporze

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.

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 stawaj obok drzew ani słupów – pioruny często w nie uderzają. Drzewo może się także przewrócić od towarzyszącego burzy porywistego wiatru.

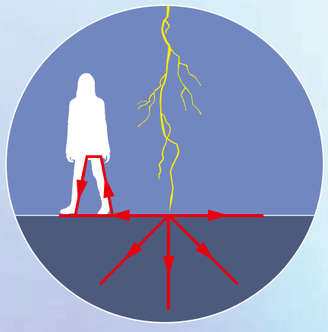


Nie wchodź do wody.

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!

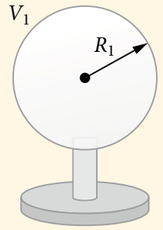
- Dotykaj ziemi jak najmniejszą powierzchnią. Kucaj na złączonych nogach. Nie kładź się na ziemi.
- Biegnij, zamiast iść. W biegu dotykasz podłoża tylko jedną nogą naraz.

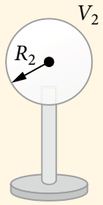


Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Dwie metalowe kule o promieniach $R_1 = 20$ cm oraz $R_2 = 10$ cm, spoczywające na izolujących podstawkach, umieszczono w dużej odległości od siebie, z dala od naelektryzowanych ciał. Następnie kule naelektryzowano tak, że potencjał pierwszej z nich względem Ziemi wynosił $V_1 = 2000$ V, a potencjał drugiej $V_2 = -2000$ V.





Gdy połączono je przewodnikiem, nastąpił przepływ ładunku między nimi aż do wyrównania potencjałów. Oblicz potencjał V kul po ich połączeniu.

Dane: $\boldsymbol{R_1 = 20\ cm} = 0{,}2$ m, $\boldsymbol{R_2 = 10\ cm} = 0{,}1$ m – promienie kul,
$\boldsymbol{V_1 = 2000\ V}$, $\boldsymbol{V_2 = -2000\ V}$ – początkowe potencjały kul
Szukane: $\boldsymbol{V}$ – potencjał po połączeniu kul

Rozwiązanie:

Naładowana jednorodnie kula wytwarza pole centralne, tak jakby cały ładunek był zgromadzony w jej środku. Zatem potencjały wynoszą:

$$V_1 = k\frac{Q_1}{R_1} \qquad V_2 = k\frac{Q_2}{R_2}$$

gdzie Q_1 i Q_2 to ładunki zgromadzone na kulach. Przekształcamy wzory:

$$Q_1 = \frac{V_1 R_1}{k} \qquad Q_2 = \frac{V_2 R_2}{k}$$

Podstawiamy dane do pierwszego z nich i przeliczamy jednostkę:

$$Q_1 = \frac{2000\ \mathrm{V} \cdot 0{,}2\ \mathrm{m}}{9 \cdot 10^9\ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}}$$

$$[Q_1] = \frac{\mathrm{V \cdot m}}{\frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}}} = \mathrm{V \cdot m} \cdot \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N \cdot m^2}} = \mathrm{V} \cdot \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N \cdot m}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} \cdot \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{J}} = \mathrm{C}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $Q_1 = 4{,}444 \cdot 10^{-8}$ C $= 44{,}44$ nC.

Analogicznie dla drugiej kuli: $Q_2 = -22{,}22$ nC. Tak więc łączny ładunek wynosi:

$$Q = 44{,}44\ \mathrm{nC} + (-22{,}22\ \mathrm{nC}) = 22{,}22\ \mathrm{nC}$$

Ładunki na poszczególnych kulach po połączeniu oznaczmy Q_1' i Q_2'. Możemy zapisać:

$$V = k\frac{Q_1'}{R_1} \quad V = k\frac{Q_2'}{R_2}$$

czyli:

$$\frac{Q_1'}{R_1} = \frac{Q_2'}{R_2} \rightarrow \frac{Q_1'}{Q_2'} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{0{,}2\ \mathrm{m}}{0{,}1\ \mathrm{m}} = 2$$

Tak więc po ustaleniu wspólnego potencjału ładunki są proporcjonalne do promieni sfer. Łączny ładunek 22,22 nC trzeba podzielić w stosunku 2 : 1, czyli:

$$Q_1' = \frac{2}{3}Q = 14{,}81\ \text{nC} \qquad Q_2' = \frac{1}{3}Q = 7{,}41\ \text{nC}$$

Obliczamy szukany potencjał z zależności:

$$V = k\frac{Q_1'}{R_1}$$

$$[V] = \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\cdot\frac{\text{C}}{\text{m}} = \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V}$$

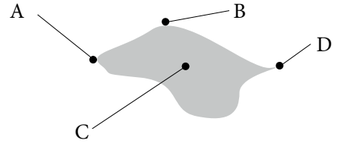
Podstawiamy wartości liczbowe i otrzymujemy:

$$V = 9\cdot10^9\ \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\cdot\frac{14{,}81\cdot10^{-9}\ \text{C}}{0{,}2\ \text{m}} = 667\ \text{V}$$

Odpowiedź: Po połączeniu kule będą miały potencjał 667 V.

1. Dlaczego w czasie burzy człowiek znajdujący się w samochodzie lub pociągu jest bezpieczny?

2. 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.

3. P Fizyk przeprowadził doświadczenie, do którego użył dwóch różnych metalowych kul: o promieniu $2r$ i ładunku $Q_1 = +4q$ oraz o promieniu $3r$ i ładunku $Q_2 = -7q$.

Kiedy połączył kule przewodem, ich potencjały się wyrównały.

Oblicz, jakie ładunki znajdowały się po zakończeniu eksperymentu na każdej z kul.

4. W miedzi na każdy atom przypada jeden elektron swobodny.

a) Oblicz, ile elektronów swobodnych znajduje się w miedzianym przewodzie o długości 5 cm i średnicy 1 mm. Oceń samodzielnie, jakich danych potrzebujesz, a następnie je znajdź.

b) Oblicz, jaką siłą odpychałyby się dwa takie przewody z odległości 1 m, gdyby z każdego z nich usunąć 1% elektronów swobodnych. Wskaż przykład ciała, którego ciężar jest zbliżony do takiej siły.

5. Wykonaj doświadczenie.

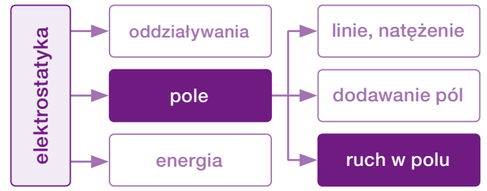
a) Przygotuj świeczkę na świeczniku, zapałki, gwóźdź, przewodnik (np. miedziany przewód lub pasek folii aluminiowej) oraz maszynę elektrostatyczną lub generator Van de Graaffa.

b) Umocuj gwóźdź tak, aby był odizolowany od podłoża i skierowany ostrzem 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.

14.8 Ruch naładowanej cząstki w polu elektrycznym



Ważne w tej lekcji:
- ruch w jednorodnym polu elektrycznym,
- ruch wokół punktowego ładunku,
- ruch pod wpływem siły elektrycznej a ruch pod wpływem siły grawitacyjnej.

Przypomnij sobie:
- W jednorodnym polu elektrycznym wektory natężenia pola są sobie równe we wszystkich punktach pola (mają jednakowe: wartość, kierunek i zwrot).
- Ciało podrzucone pionowo w górę porusza się coraz wolniej, zatrzymuje się i spada. W trakcie takiego ruchu jego przyspieszenie jest 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).
- Aby ciało poruszało się po okręgu, musi na nie działać siła o stałej wartości, w każdej chwili zwrócona do środka okręgu (a więc zmieniająca kierunek w miarę ruchu ciała).

W tej lekcji omówimy ruch naładowanej cząstki pod wpływem siły elektrycznej. Będziemy rozważać sytuację, kiedy siła elektryczna jest jedyną siłą działającą na cząstkę. Omówmy kilka szczególnych przypadków.

Cząstką nazywamy tutaj niewielkie naładowane ciało, np. elektron czy jon.

Ruch w polu jednorodnym

W jednorodnym polu elektrycznym na naładowaną cząstkę działa stała siła, więc porusza się ona ze stałym przyspieszeniem. Zgodnie z drugą zasadą dynamiki to przyspieszenie można obliczyć ze wzoru:

przyspieszenie, masa: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q\vec{E}}{m}$ — siła; ładunek, natężenie pola, masa

Sytuacja jest więc podobna do przypadku, gdy ciało porusza się pod wpływem stałej siły grawitacji. Ruch przebiega różnie w zależności od prędkości cząstki w chwili, gdy znalazła się ona w polu elektrycznym. Stałe przyspieszenie $\vec{a}$ może przecież oznaczać zarówno wzrost wartości prędkości, jak i jej zmniejszanie się, a także – zmianę kierunku ruchu.

Ruch zgodnie z kierunkiem linii pola

Najpierw zajmiemy się przypadkiem, kiedy początkowa prędkość cząstki jest równa zeru lub jest skierowana zgodnie z kierunkiem linii pola.

Ruch pod wpływem stałej siły równoległej do prędkości

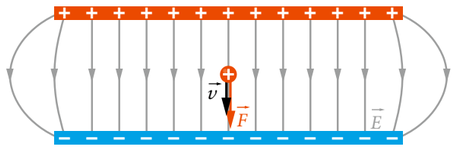
siła elektryczna | **siła grawitacji**

1. Prędkość początkowa równa zeru

Ciało zaczyna się rozpędzać i porusza dalej ruchem jednostajnie przyspieszonym zgodnie z kierunkiem linii pola (zwrot zależy od znaku ładunku)

Spadek swobodny: upuszczone ciało zaczyna się rozpędzać i porusza dalej ruchem jednostajnie przyspieszonym w dół

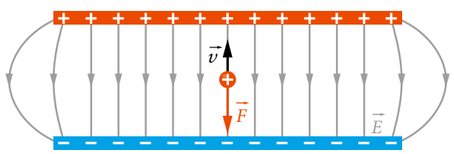
2. Zwrot prędkości początkowej jest taki sam jak zwrot siły



Dla ładunku dodatniego prędkość ma taki sam zwrot jak linie pola (jak wektor $\vec{E}$), a dla ładunku ujemnego zwroty te byłyby przeciwne. Ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym zgodnie ze zwrotem siły elektrycznej

Rzut pionowy w dół: ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym w dół – zgodnie ze zwrotem siły ciężkości

3. Zwrot prędkości początkowej jest przeciwny do zwrotu siły



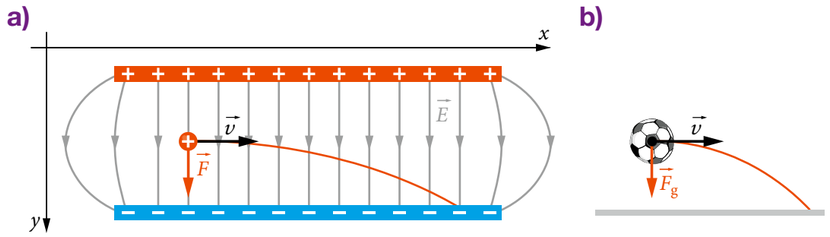
Ciało porusza się coraz wolniej, zatrzymuje się i zaczyna poruszać w przeciwną stronę ruchem jednostajnie przyspieszonym (jeśli zdąży się zatrzymać, zanim uderzy w dodatnią płytkę). Wektor przyspieszenia jest stały

Rzut pionowy w górę: ciało porusza się coraz wolniej w górę, zatrzymuje i zaczyna spadać ruchem jednostajnie przyspieszonym. Wektor przyspieszenia jest stały: ma wartość g i zwrócony jest w dół

Ruch naładowanej cząstki z prędkością początkową prostopadłą do wektora natężenia pola

Przejdźmy do omówienia sytuacji, kiedy naładowana cząstka zostaje wprowadzona do jednorodnego pola elektrycznego z prędkością $\vec{v}$ prostopadłą do kierunku wektora natężenia pola $\vec{E}$.
Ta sytuacja jest podobna do rzutu poziomego: cząstka porusza się po paraboli (rys. 14.32), a jej ruch możemy badać z wykorzystaniem zasady niezależności ruchów. W kierunku równoległym do linii pola cząstka porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym, a w kierunku prostopadłym (w którym nie działają siły) – ruchem jednostajnym.

Zasada niezależności ruchów, podręcznik cz. 1 → s. 107



Rys. **14.32.** a) ruch ciała naładowanego dodatnio: w jednorodnym polu elektrycznym, z prędkością początkową $\vec{v}$ prostopadłą do kierunku wektora natężenia pola, b) rzut poziomy

Rysunek 14.32a został ustawiony tak, aby podkreślić podobieństwo do rzutu poziomego, ale oczywiście siła elektryczna nie musi być skierowana w dół. Pojęcia „góra” i „dół” dotyczą tylko zwrotu siły grawitacji.

Siła elektryczna jako siła dośrodkowa

Siła przyciągania elektrycznego pochodząca od pojedynczego ładunku (albo symetrycznie naładowanej sfery lub kuli) zależy od odległości tak samo jak siła grawitacji. Zatem również ruch naładowanej cząstki w centralnym polu elektrycznym zachodzi tak samo jak w przypadku ruchu pod wpływem grawitacji gwiazdy lub planety. Możliwy jest więc np. ruch po orbicie eliptycznej, w którym jest spełnione drugie prawo Keplera.
My zajmiemy się jednak najprostszym przypadkiem: ruchem po okręgu. W takim ruchu siła przyciągania elektrostatycznego pełni funkcję siły dośrodkowej, więc zachodzi równość:

$$\frac{k|Qq|}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

czyli:

$$k|Qq| = mv^2 r$$

stała elektrostatyczna, ładunki

masa cząstki, promień okręgu, prędkość cząstki

Z niej możemy wyznaczyć dowolną interesującą nas wielkość.

Grawitacja i siła elektryczna – różnice

Podobieństwa między siłą grawitacji, znaną z życia codziennego, a mniej dla nas oczywistą siłą elektryczną pozwalają nam lepiej zrozumieć drugą z nich. Trzeba jednak pamiętać o różnicach:

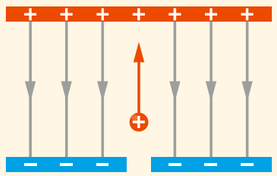
- siła grawitacji ma taki sam zwrot w przypadku wszystkich ciał – żadne ciało nie „spada w górę” – podczas gdy zwrot siły elektrycznej zależy od znaku ładunku cząstki,
- siła grawitacji jest proporcjonalna do masy, dlatego przyspieszenie pod wpływem siły grawitacji od masy nie zależy, natomiast w przypadku siły elektrycznej nie ma podobnej zależności.

Uwaga. Jak się dowiesz z czwartej części podręcznika, naładowana cząstka poruszająca się z przyspieszeniem emituje fale elektromagnetyczne, przez co traci część swojej energii. Tak właśnie działa nadajnik radiowy. W sytuacjach omawianych w tej lekcji ten efekt jest jednak znikomy, dlatego możemy go pominąć.
W przypadku grawitacji analogicznym zjawiskiem jest emisja fal grawitacyjnych, ale jest ona bardzo słaba i obserwujemy ją tylko w tak ekstremalnych zjawiskach kosmicznych jak zderzenie czarnych dziur.

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.



Dane: $E = 1000\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$ – natężenie pola elektrycznego,
$v_\mathrm{p} = 10^5\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ – prędkość początkowa protonu
Szukane: s – droga protonu do chwili zatrzymania

Rozwiązanie:
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 wtedy 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:

$$x = \frac{m_\mathrm{p} v_\mathrm{p}^2}{2qE}$$

$$[x] = \frac{\mathrm{kg} \cdot (\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}})^2}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2 \cdot \mathrm{C} \cdot \mathrm{V}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^3}{\mathrm{s}^2 \cdot \cancel{\mathrm{C}} \cdot \frac{\mathrm{J}}{\cancel{\mathrm{C}}}} = \frac{\cancel{\mathrm{kg}} \cdot \mathrm{m}^{\cancel{3}\,1}}{\cancel{\mathrm{s}^2} \cdot \cancel{\mathrm{kg}} \cdot \frac{\cancel{\mathrm{m}^2}}{\cancel{\mathrm{s}^2}}} = \mathrm{m}$$

Masę protonu m_p i jego ładunek (równy ładunkowi elementarnemu e) odczytujemy z tablic: $m_\mathrm{p} = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$. Po podstawieniu wartości liczbowych do wzoru otrzymujemy:

$$x = 0{,}052\ \mathrm{m}$$

Odpowiedź: Proton do chwili zatrzymania przebędzie drogę równą 5,2 cm.

Uwagi.

- We wszystkich zadaniach zakładamy, że siła elektryczna jest jedyną siłą działającą na badane ciało.
- Dane takie jak ładunek elementarny, masy cząstek itp. znajdziesz w tablicach na końcu podręcznika.

1. Dwie metalowe płytki odległe o 10 cm ustawiono równolegle i podłączono do napięcia 1000 V. Pomiędzy nimi znalazła się naładowana cząstka. Oblicz stosunek siły elektrostatycznej działającej na tę cząstkę do działającej na nią siły ziemskiej grawitacji, jeśli cząstką jest:

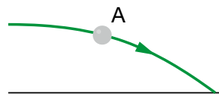
a) elektron, **b)** proton.

2. P Jon wapnia Ca^{2+}, o masie $6{,}6 \cdot 10^{-26}$ kg, poruszał się w jednorodnym polu elektrycznym z prędkością początkową $v_0 = 1000\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ zwróconą przeciwnie do zwrotu linii pola. Siła elektryczna spowodowała, że jon wyhamował na drodze 50 cm. Oblicz natężenie pola elektrycznego.

3. Rysunek przedstawia tor elektronu poruszającego się pomiędzy dwiema równoległymi naładowanymi płytkami.

a) Która z płytek była naładowana ujemnie, a która dodatnio?

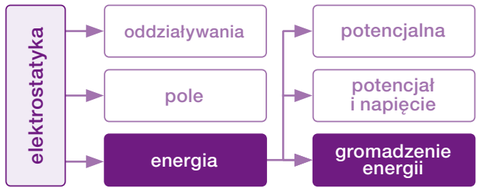
b) Przerysuj ilustrację i zaznacz wektor prędkości i wektor przyspieszenia elektronu w punkcie A. Podpisz te wektory.



4. Chcemy, aby elektron poruszał się wokół małej jednorodnie naładowanej kuli po okręgu o średnicy 4 m z prędkością o stałej wartości $200\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$. Oblicz ładunek kuli.

5. Wyobraź sobie, że Ziemię zamieniamy na ciało o ładunku +1000 C. Jaki ładunek powinien mieć satelita o masie 100 kg krążący wokół ciała, które zastąpiło Ziemię, aby w takim przypadku nie zmienił swojej orbity? Zakładamy, że ciało zastępujące Ziemię ma na tyle niewielką masę, aby pozwolić na pominięcie siły grawitacji, jednak na tyle większą od masy satelity, aby pominąć ruch tego ciała pod wpływem przyciągania przez satelitę.

14.9 Kondensatory



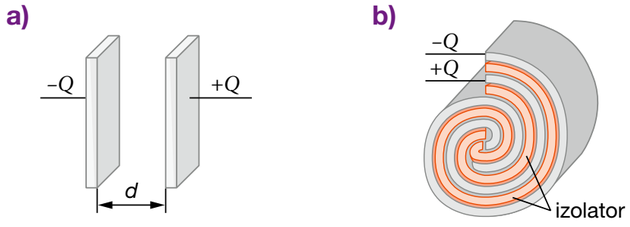
Ważne w tej lekcji:

- budowa kondensatora,
- zasada działania,
- zastosowania,
- pole wewnątrz kondensatora.

Przypomnij sobie:

- Między dwiema przeciwnie naładowanymi równoległymi płytkami występuje jednorodne pole elektryczne.
- Z położeniem ładunku w polu elektrycznym jest związana energia, zwana elektrostatyczną energią potencjalną.

Kondensator to urządzenie, które magazynuje energię elektryczną. W najprostszym przypadku składa się z dwóch równoległych płytek, zwanych **okładkami**, oddzielonych powietrzem lub innym izolatorem. Tak skonstruowany kondensator nazywamy **płaskim** (rys. 14.33a).



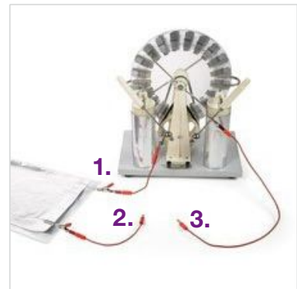
Rys. **14.33.** Budowa kondensatora a) płaskiego, b) zwijanego

Okładki mogą też zostać zwinięte, co znacznie zmniejsza rozmiary urządzenia (rys. 14.33b). Nie zmienia to jednak zasady jego działania. Aby się przekonać, że kondensator gromadzi energię elektryczną, wykonaj następujące doświadczenie.

Doświadczenie 8 – obowiązkowe

Przekaz energii podczas rozładowania kondensatora

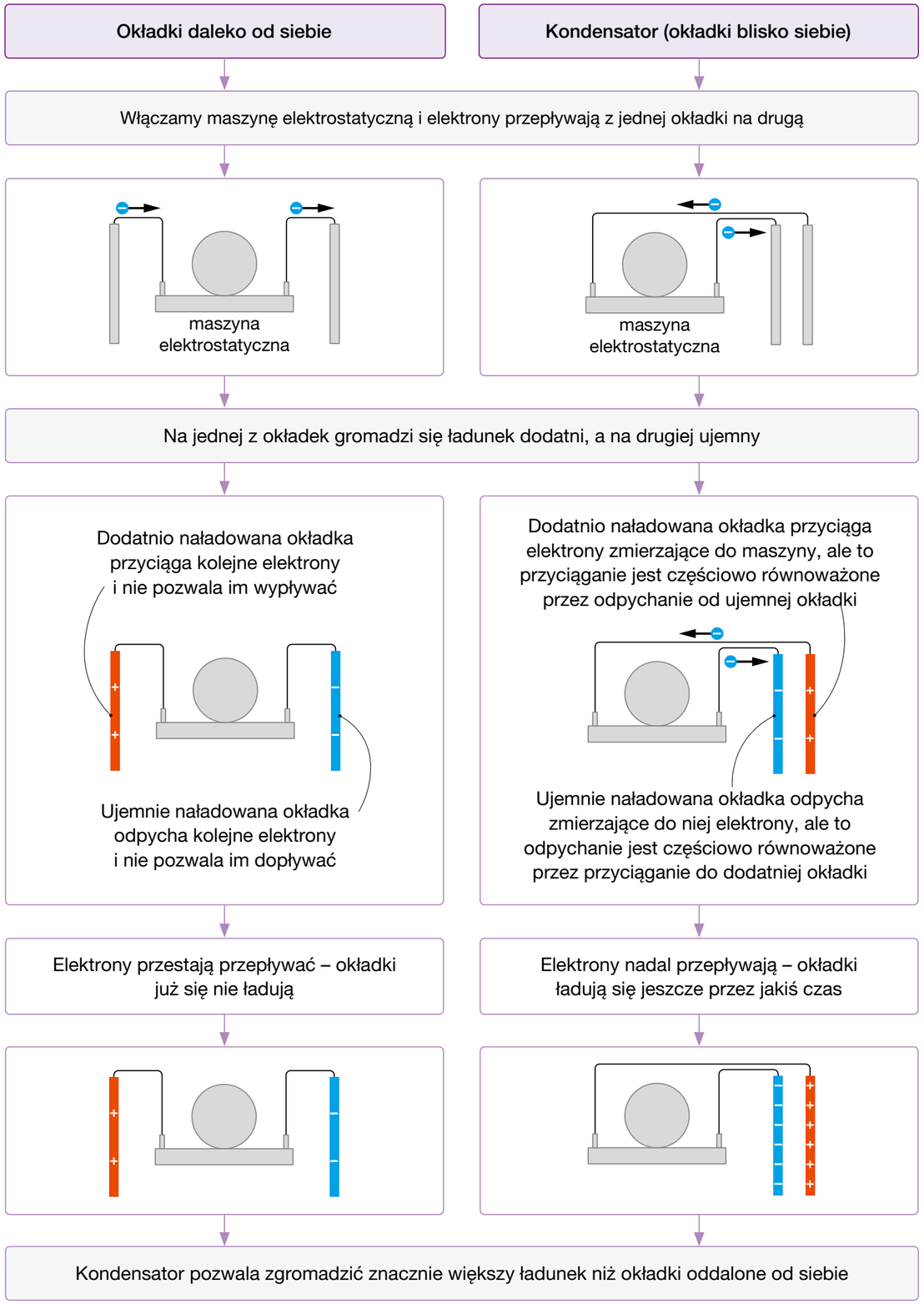
1. Przygotuj 5 plastikowych koszulek do segregatora formatu A4, folię aluminiową, nożyczki, dwa stalowe spinacze biurowe, 3 przewody w izolacji oraz maszynę elektrostatyczną, generator Van de Graaffa lub rakietę na komary. Do łączenia przewodów najłatwiej zastosować krokodylki, ale można je zastąpić 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 z 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 wtedy odłączona od kondensatora, a w dodatku – wyłączona. To dowodzi, że energia potrzebna do wytworzenia iskry została zmagazynowana w kondensatorze.

Działanie kondensatora

Jak działa kondensator? Nietrudno zrozumieć, że kawałki folii podłączone do biegunów maszyny elektrostatycznej zyskują ładunek: jeden z nich zostaje naładowany dodatnio, a drugi ujemnie – tak samo jak biegun maszyny, do którego został podłączony.
Później, gdy odłączymy kondensator od źródła napięcia i połączymy kawałki folii przewodnikiem, będą między nimi przepływać elektrony. Ich przepływ ustanie w momencie wyrównania potencjałów. Wtedy kondensator będzie rozładowany.
Jednak gdyby kawałki folii – w kondensatorze zwane **okładkami** – znajdowały się daleko od siebie, gromadziłby się na nich niewielki ładunek. Zatem przy rozładowaniu kondensatora wyzwoliłaby się niewielka energia, niewystarczająca do zauważalnego przeskoku iskry.
Aby zrozumieć, dlaczego umieszczenie okładek tuż obok siebie pozwala zgromadzić większy ładunek, a zatem – większą energię, przeanalizuj diagram na następnej stronie.



Zastosowania kondensatorów

Typowy kondensator może zgromadzić znacznie mniej energii niż podobnej wielkości bateria, ale możemy pobrać tę energię w bardzo krótkim czasie. Dlatego kondensatory są wykorzystywane m.in. w lampach błyskowych i defibrylatorach (patrz ramka na następnej stronie).

Kondensatory są też stosowane w elektronice, np. w komputerach pracujących w takt zegara, aby przeciwdziałać skokom napięcia. W takim trybie pracy wszystkie elementy jednocześnie zwiększają, a następnie 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 mogą powodować nieprawidłową pracę, co jest eliminowane dzięki kondensatorowi, który ładuje się w przerwach między taktami zegara, a oddaje ładunek, a tym samym energię – w chwili największego zapotrzebowania na nią.

Rys. **14.34.** W elektronice stosujemy wiele różnych typów kondensatorów

Pole wewnątrz kondensatora

Na koniec zauważmy, że choć o kondensatorze jako urządzeniu technicznym mówimy dopiero w tej lekcji, to z układem dwóch przeciwnie naładowanych płytek mieliśmy do czynienia już wielokrotnie wcześniej.

| **Pole jednorodne** → s. 98

Wiesz już, że pomiędzy takimi płytkami (z dala od ich brzegów) występuje jednorodne pole elektryczne. Skoro znasz już pojęcie kondensatora, możesz ten sam fakt wyrazić inaczej: wewnątrz kondensatora płaskiego występuje jednorodne pole elektryczne.
Wartość natężenia tego pola E można wyrazić znanym ci już wzorem:

$$E = \frac{U}{d}$$

gdzie U jest napięciem między okładkami, a d – odległością między nimi.
Podobnie gdy badamy ruch cząstki w polu jednorodnym między dwiema przeciwnie naładowanymi płytkami, możemy mówić o ruchu cząstki pomiędzy okładkami kondensatora.

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.

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 zagrażającej życiu arytmii. Zasadniczym elementem defibrylatora jest kondensator, pozwalający nie tylko zmagazynować potrzebną energię (równą 360 J), lecz także wyzwolić ją w krótkim czasie. Zbyt długotrwały impuls prądu byłby groźny dla życia pacjenta.

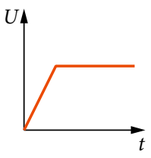
Nowoczesny defibrylator sam udziela instrukcji użytkownikowi, a nawet wykonuje badanie pracy serca pacjenta (EKG) i decyduje, czy zaaplikowanie wstrząsu jest wskazane. Może więc go użyć każda osoba udzielająca pomocy poszkodowanemu, nie tylko lekarz czy ratownik medyczny. Ciebie także to dotyczy. Jeśli znajdziesz nieprzytomną osobę, która nie oddycha, a w pobliżu jest defibrylator AED, nie wahaj się – możesz uratować komuś życie!

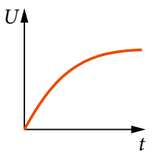
Pytania i zadania

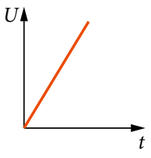
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

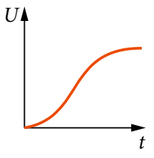
1. W czasie wykonywania doświadczenia 8. (s. 137) obserwujemy, że podczas ładowania kondensator ulega sprasowaniu: aluminiowe okładki przywierają do rozdzielającej je plastikowej folii. Wyjaśnij to zjawisko.

2. Kondensator podłączamy do maszyny elektrostatycznej i włączamy maszynę. Jak napięcie na kondensatorze zależy od czasu? Wskaż właściwy szkic wykresu i uzasadnij swój wybór.

A.


C.


B.


D.


3. Zapoznaj się z tekstem o defibrylatorze zamieszczonym w ramce powyżej.

a) Wyjaśnij, w jakim celu w defibrylatorze stosujemy kondensator.

b) Dowiedz się, czy i gdzie w twojej miejscowości znajdują się publicznie dostępne defibrylatory (AED).

c) Znajdź i obejrzyj przykładowy film szkoleniowy na temat użycia defibrylatora (AED). Zapisz, jakie informacje podano w filmie, a nie było ich w podręczniku.

4. Dwie metalowe płytki oddalone o 2 mm tworzą kondensator. Między płytkami jest powietrze. Kondensator naładowano do napięcia 300 V (takie jest napięcie między jego płytkami). Oblicz różnicę między energią potencjalną elektronu na dodatniej płytce i jego energią na płytce ujemnej. Na której z nich ta energia jest większa?

Projekt Generator Kelvina

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). Początkowo powinny być zaciśnięte, aby woda nie mogła z nich wypływać.

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.

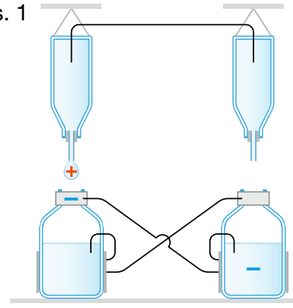
9. Butle 5-litrowe umieść na izolującej podstawie. Jedną z nich wstępnie naładuj, np. przez dotknięcie aluminium nadmuchanym balonikiem, który został wcześniej potarty tkaniną.

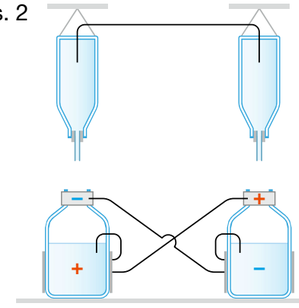
10. Podwieś na sznurkach 2-litrowe butelki. Nalej do nich wody. Ostatni kawałek drutu zegnij w kształt litery U i zanurz końcami w butelkach z wodą. Odblokuj jednocześnie wężyki, aby woda mogła z nich **powoli** wypływać kropla po kropli.

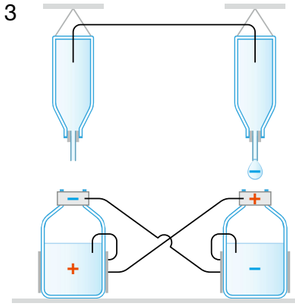
Uwaga. Numery na zdjęciu na następnej stronie odnoszą się do instrukcji wykonania generatora.

Opis działania generatora

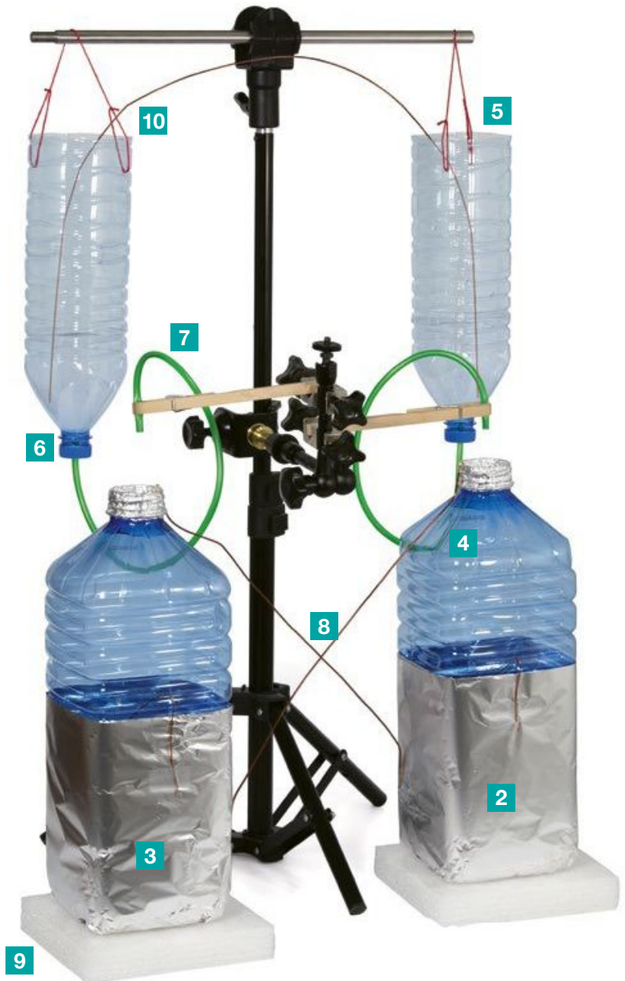
Załóżmy, że wstępnie naładowana ujemnie za pomocą balonika jest prawa butla, a więc także – połączona z nią szyjka lewej butli. Zanim kropla spadająca do lewej butli oderwie się od wężyka, ładuje się przez indukcję dodatnio (rys. 1).

rys. 1


rys. 2


rys. 3


Takie krople, spadające do lewej butli, zwiększają ładunek dodatni wody, a więc także – połączonej z nią szyjki prawej butli (rys. 2).
Analogicznie kropla spadająca do prawej butli ładuje się przez indukcję ujemnie (rys. 3).
W miarę, jak krople spadają, woda w obu butlach jest coraz bardziej naelektryzowana.
Zwróć uwagę, że gdy kropla przed spadnięciem do lewej butli elektryzuje się dodatnio, to woda w górnej lewej butelce elektryzuje się ujemnie. Jednak w tym samym czasie woda w prawej górnej butelce elektryzuje się dodatnio, a ponieważ te butelki są połączone, ich ładunki się redukują (całkowicie lub przynajmniej w znacznym stopniu).



Zadania

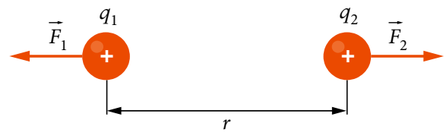
1. Jeśli przed rozpoczęciem doświadczenia dostatecznie blisko zbliżymy do siebie druty, które tworzą pętle wokół wejść do dużych butli, to po przekroczeniu określonej wartości napięcia zaobserwujemy przeskok iskry między nimi.
   Sprawdź, w jaki sposób szybkość przepływu wody wpływa na częstość generowania iskier oraz czy bez wstępnego naelektryzowania 5-litrowej butli da się wykonać to doświadczenie.
2. Spróbuj wykorzystać generator do innych doświadczeń z elektrostatyki.

Podsumowanie Pole elektryczne

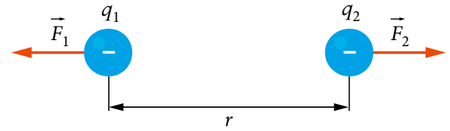
- Są dwa rodzaje ładunków elektrycznych: **dodatnie** i **ujemne**. Ładunki tego samego znaku się odpychają, a różnych znaków – przyciągają.
  - ▶ Ciała elektryzujemy przez: potarcie, dotyk, indukcję.
- **Zasada zachowania ładunku**
  Całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego jest stały.
- **Prawo Coulomba dla ładunków punktowych**

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

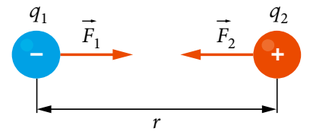
gdzie: q_1, q_2 – oddziałujące z sobą ładunki punktowe, $k = 8{,}988 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}}$ – **stała elektrostatyczna**.



- ▶ Ten sam wzór stosuje się do równomiernie naładowanych kul lub sfer.
- ▶ Dla ciał o innych kształtach wzór można stosować tylko wtedy, gdy odległość r jest dużo większa od rozmiarów ciał.



- ▶ Powyższy wzór na siłę stosujemy wtedy, gdy między ładunkami znajduje się próżnia (a w praktyce także dla powietrza).
- ▶ W innych przypadkach również można korzystać z powyższego wzoru, ale wtedy trzeba podstawiać inną wartość stałej k, odpowiednią dla danej substancji.



- **Pole elektryczne**

Każdy ładunek elektryczny wytwarza wokół siebie **pole elektryczne**. Jeśli umieścimy w nim inny ładunek, to będzie na niego działać siła elektryczna.

- ▶ **Natężenie pola elektrycznego** to iloraz wektora siły $\vec{F}$, która działałaby na ładunek próbny, oraz wartości tego ładunku:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

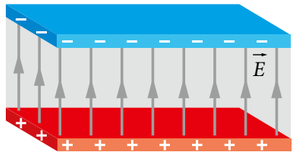
gdzie q to ładunek próbny.

- ▶ Przyjmuje się, że ładunek próbny jest dodatni.
- ▶ Jeżeli pole 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 jednorodne



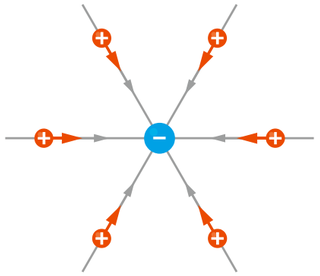
▶ Pole nazywamy jednorodnym, jeżeli linie pola są równoległe, a natężenie w każdym jego punkcie jest takie samo (patrz rys. obok).

Pole centralne

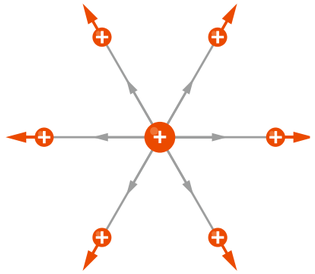
▶ Pole wytworzone przez pojedynczy ładunek jest **centralne**, tzn. jest sferycznie symetryczne, a jego linie pola zbiegają się w jednym punkcie.

▶ Zwrot linii pola, gdy jego źródłem jest: ładunek ujemny przedstawia rysunek a), ładunek dodatni – rysunek b).

a)

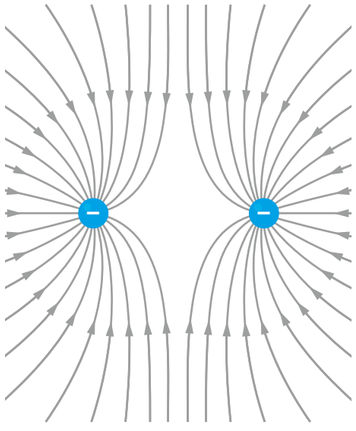


b)

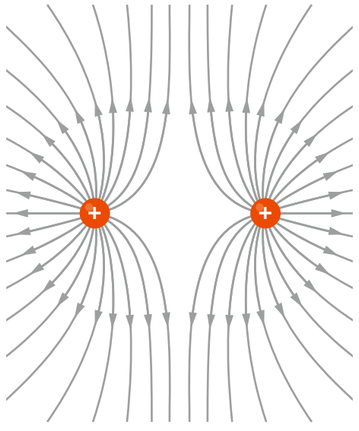


▶ Poniżej przedstawiono linie pola elektrycznego wokół dwóch ładunków o tej samej wartości oraz takim samym znaku (rys. a i b) lub o różnych znakach (rys. c). Takie pole nie jest ani jednorodne, ani centralne.

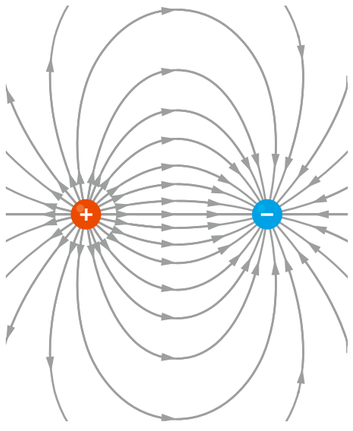
a)



b)



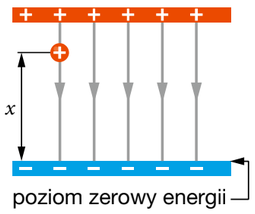
c)



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:

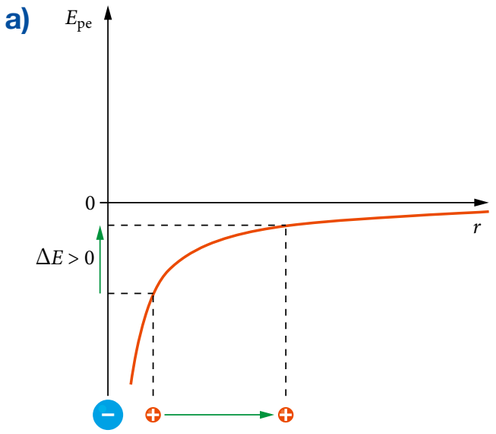
$$E_{pe} = k\frac{Qq}{r}$$

gdzie: k – stała elektryczna, Q – ładunek źródła pola elektrycznego, q – ładunek znajdujący się w polu, r – odległość między ładunkami.

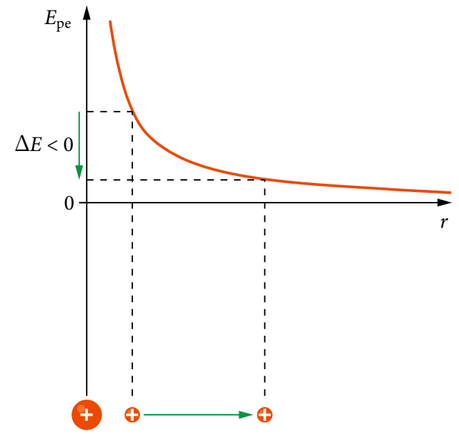
Przyjmujemy tutaj, że energia potencjalna ładunku w polu elektrycznym wytworzonym przez inne ładunki osiąga wartość zerową w nieskończonej odległości od źródeł tego pola.

▶ Wykres zależności energii potencjalnej ładunku dodatniego w polu elektrycznym od odległości od źródła naładowanego ujemnie przedstawia rysunek a), dodatnio – rysunek b).

a)



b)



Potencjał pola elektrycznego

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:

$$1\,\text{V} = \frac{1\,\text{J}}{1\,\text{C}}$$

Praca w polu elektrycznym

Praca wykonana przez siły zewnętrzne w polu elektrycznym w trakcie przemieszczania ładunku q z punktu A do B:

$$W_{AB} = q(V_B - V_A) = q\Delta V$$

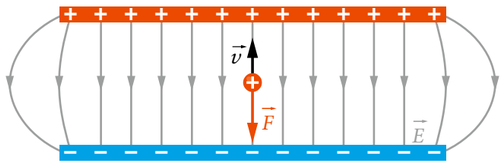
Jednostką pracy jest **dżul**.

- **Klatka Faradaya** – osłona zbudowana z przewodnika, w jej wnętrzu nie występuje pole elektryczne.
- Na ładunek q znajdujący się w polu elektrycznym o natężeniu $\vec{E}$ działa siła:

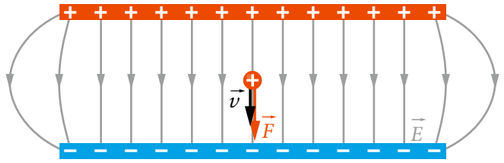
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

▶ 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.

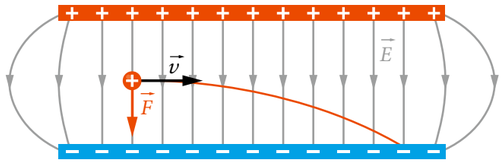
a)



b)



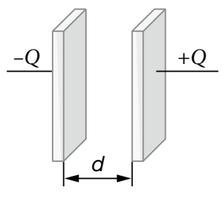
c)



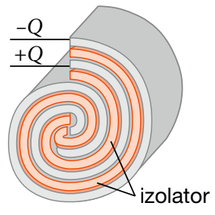
- **Kondensatory**

Kondensator składa się z dwóch przewodników zwanych **okładkami**. W **kondensatorze płaskim** okładki to dwie równoległe płytki ułożone w pewnej odległości od siebie (rys. a). Okładki mogą być też zwinięte (rys. b).

a)



b)



▶ Kondensator służy do przechowywania energii. Ta energia nie jest duża, ale można ją uwolnić w krótkim czasie.

Sposób na zadanie

Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Metalowa sfera o średnicy d = 40 cm została naładowana ładunkiem Q = –100 nC. Z dużej odległości w stronę środka sfery wystrzelono elektron z prędkością $v_0 = 5000\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

A więc promień R = 20 cm = 0,2 m.

Czyli znacznie większej od promienia sfery.

Jego masę i ładunek można sprawdzić w tablicach.

Zadanie 1.1 (0–1)

Wybierz prawidłowe dokończenie zdania A, B lub C oraz jego uzasadnienie 1, 2 lub 3.

Kiedy elektron zbliża się do sfery, wartość jego przyspieszenia

A.	wzrasta,	ponieważ	**1.**	ani ładunek sfery, ani ładunek elektronu nie ulegają zmianie.
B.	maleje,		**2.**	prędkość elektronu jest coraz mniejsza.
C.	nie zmienia się,		**3.**	zwiększa się wartość siły działającej na elektron.

Rozwiązanie:

Elektron i sfera są naładowane ładunkiem ujemnym, czyli się odpychają. Im bliżej siebie się znajdą, tym silniejsze będzie odpychanie, czyli siła działająca na elektron. Im większa siła, tym większa wartość bezwzględna przyspieszenia (zgodnie z drugą zasadą dynamiki).

Odpowiedź: A-3

Elektron zwalnia, czyli zwrot przyspieszenia jest przeciwny do zwrotu prędkości.

Elektron jest odpychany, więc porusza się coraz wolniej.

Zadanie 1.2 (0–3)

Czy elektron doleci do sfery? Jeśli nie, to w jakiej odległości od brzegu sfery się zatrzyma?

Rozwiązanie:

Sfera wytwarza takie pole, jakby cały ładunek znajdował się w jej środku. Obliczmy więc, w jakiej odległości r od środka sfery zatrzymałby się elektron. Jeśli ta odległość okaże się nie większa od promienia sfery, to znaczy, że elektron doleci do jej brzegu.

Przy takim założeniu prawdziwy jest wzór na E_p.

W dużej odległości od sfery („w nieskończoności”) energia potencjalna elektronu jest zerowa, a energia kinetyczna wynosi $E_{k1} = \frac{1}{2} m v_0^2$.

W szukanej odległości r od środka sfery energia potencjalna elektronu wynosi:

$$E_{p2} = \frac{kQ(-e)}{r} = \frac{-kQe}{r}$$

Ładunek elementarny $e > 0$, elektron ma ładunek $-e$.

Ta wielkość jest **dodatnia**, ponieważ Q jest ujemne.

a energia kinetyczna jest równa zeru.

Wobec tego otrzymujemy równanie:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = -\frac{kQe}{r} \quad \rightarrow \quad r = -\frac{2kQe}{mv_0^2}$$

Podstawiamy dane i sprawdzamy jednostkę:

$$r = -\frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \,\frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot (-100 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{C}) \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg} \cdot (5 \cdot 10^6\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}})^2}$$

$$[r] = \frac{\frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \mathrm{C} \cdot \mathrm{C}}{\mathrm{kg} \cdot (\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}})^2} = \frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m^2}}{\mathrm{s^2}}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}} \cdot \mathrm{m^2}}{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m^2}}{\mathrm{s^2}}} = \mathrm{m}$$

Ostatecznie otrzymujemy: r = 12,7 m.

Tak więc elektron zatrzyma się w odległości większej od środka sfery niż jej promień – nie doleci do niej. Pozostało nam obliczyć odległość punktu zatrzymania od sfery:

$$r - R = 12{,}7\ \mathrm{m} - 0{,}2\ \mathrm{m} = 12{,}5\ \mathrm{m}$$

Kiedy najtrudniejsze za nami, łatwo zapomnieć o dokończeniu rozwiązania. Warto więc jeszcze raz uważnie przeczytać pytanie.

Odpowiedź: Elektron zatrzyma się w odległości 12,5 m od brzegu sfery.

Zadanie 1.3 (0–2)

Oblicz potencjał powierzchni sfery.

Rozwiązanie:

Ładunek próbny q tuż przy powierzchni sfery ma energię:

$$E_{\mathrm{pr}} = \frac{kQq}{R}$$

a więc potencjał tej sfery wynosi:

$$V = \frac{E_{\mathrm{pr}}}{q} = \frac{kQ}{R}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$V = -4500\ \mathrm{V}$$

Poniżej we wzorze lewe V to potencjał, prawe V to jego jednostka – wolt.

Odpowiedź: Potencjał sfery wynosi –4500 V.

Warto zapamiętać!

- Często aby wyznaczyć przyspieszenie, najłatwiej pomyśleć o sile, która je wywołuje, i skorzystać z drugiej zasady dynamiki.
- Gdy ładunek znajduje się bardzo daleko od źródła pola, to znaczy, że zgodnie z przyjętą przez nas umową jego energia jest bardzo bliska zera.
- Jednorodnie naładowana sfera wytwarza takie pole, jakby cały ładunek znajdował się w jej środku. To tak samo jest w przypadku grawitacji.

Zadania analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Metalowa sfera o promieniu R = 30 cm została równomiernie naładowana ładunkiem Q = 300 nC. Tuż przy jej powierzchni umieszczono nieruchomy proton. Pod wpływem oddziaływania z kulą proton zaczął się od niej oddalać.

Zadanie 1.1. Wybierz prawidłowe dokończenie zdania A, B lub C oraz jego uzasadnienie 1, 2 lub 3.

Kiedy proton oddala się od sfery, wartość jego przyspieszenia

A.	maleje,	ponieważ	**1.**	ani ładunek sfery, ani ładunek protonu nie ulegają zmianie.
B.	rośnie,		**2.**	prędkość protonu jest coraz większa.
C.	nie zmienia się,		**3.**	zmniejsza się wartość siły działającej na proton.

Zadanie 1.2. Jaką prędkość osiągnie proton w dużej odległości od sfery?

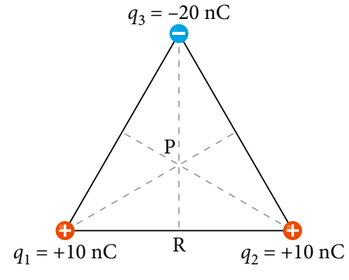
Zadanie 2. Balonik wykonany z gumy napylonej warstwą metalu został z wierzchu naelektryzowany dodatnio. Jego ładunek wynosi Q, a potencjał V. **Określ, jak zmieni się każda z tych wielkości** (zwiększy się, zmniejszy, pozostanie bez zmian), **kiedy balonik bardziej nadmuchamy**.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Trzy ładunki

W trzech wierzchołkach trójkąta równobocznego o boku d = 30 cm umieszczono ładunki: dwa po +10 nC oraz jeden –20 nC (patrz rysunek). Punkt P to punkt przecięcia wysokości trójkąta równobocznego – taki punkt dzieli każdą z wysokości w stosunku 2 : 1. Punkt R to środek boku łączącego wierzchołki, w których znajdują się równe ładunki.



Zadanie 1.1. Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń. Zaznacz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, albo F – jeśli jest fałszywe.

1.	Siły, którymi ładunki q_1 i q_2 działają na ładunek próbny umieszczony w punkcie R, się równoważą.	**P**	**F**
2.	Siły, którymi ładunki q_1 i q_2 działają na ładunek próbny umieszczony w punkcie P, się równoważą.	**P**	**F**
3.	Jeśli ładunek próbny umieścimy w punkcie P, to wypadkowa sił, którymi działają na niego ładunki q_1 i q_2, jest równa sile, którą działa na niego ładunek q_3.	**P**	**F**

Zadanie 1.2. Wyznacz natężenie pola elektrycznego w punkcie P.

Zadanie 2. Naładowane kulki

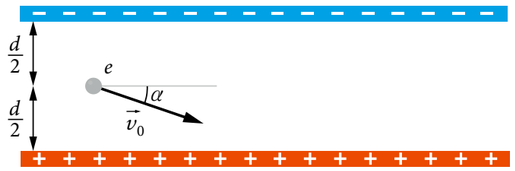
Trzy małe kulki, każda o masie 5 g, zawieszono w jednym punkcie na jedwabnych nitkach o długości 1 m. Kulki po naelektryzowaniu ładunkiem ujemnym o tej samej wartości utworzyły w płaszczyźnie poziomej trójkąt równoboczny o boku 10 cm. Przyjmij, że kąt odchylenia kulek od pionu jest tak mały, że można przyjąć $\operatorname{tg}\alpha \approx \sin\alpha$.

Oblicz, jakim ładunkiem zostały naelektryzowane kulki.

Zadanie 3. Elektron w kondensatorze

Okładki kondensatora są oddalone o d = 2 cm i podłączone do napięcia U. Do przestrzeni pomiędzy tymi okładkami – w połowie odległości między nimi – wpadł elektron z prędkością $v_0 = 2000\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$ skierowaną pod kątem α do okładek (patrz rys. a), a po pewnym czasie uderzył w dodatnią okładkę z prędkością o wartości $v_1 = 4000\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

a)



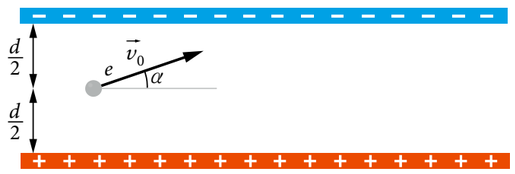
Zadanie 3.1. Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń. Zaznacz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, albo F – jeśli jest fałszywe.

1.	Wektor przyspieszenia elektronu był skierowany tak samo jak wektor jego prędkości.	P	F
2.	Elektron poruszał się ruchem jednostajnym prostoliniowym aż do zderzenia z dodatnią okładką.	P	F
3.	Składowa prędkości równoległa do okładek nie zmieniała się w czasie ruchu.	P	F

Zadanie 3.2. Oblicz napięcie U.

Zadanie 3.3. Porównajmy opisany wyżej przypadek z sytuacją pokazaną na rysunku b). Wszystkie wielkości są takie same oprócz kierunku i zwrotu prędkości początkowej. Tym razem elektron po pewnym czasie uderza w okładkę dodatnią z prędkością końcową o wartości v_2.

b)



Wybierz prawidłową relację A, B lub C oraz jej uzasadnienie 1, 2 lub 3.

A.	$v_1 < v_2$,	ponieważ	1.	w sytuacji z rys. a) już od początku ruchu elektron ma składową prędkości w stronę okładki dodatniej.
B.	$v_1 = v_2$,		2.	w sytuacji z rys. b) czas ruchu jest dłuższy.
C.	$v_1 > v_2$,		3.	zarówno początkowa energia potencjalna, jak i początkowa energia kinetyczna elektronu są jednakowe w obu sytuacjach.

15. Prąd stały

1. Prąd elektryczny i jego natężenie
2. Obwody elektryczne
3. Opór elektryczny
4. Połączenia szeregowe i równoległe
5. Opór a temperatura
6. Łączenie oporników
7. Od czego zależy opór elektryczny
8. Praca i moc prądu elektrycznego
9. Siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny
10. Drugie prawo Kirchhoffa

15.1 Prąd elektryczny i jego natężenie

prąd elektryczny → przepływ prądu
prąd elektryczny → obwody
prąd elektryczny → opór

Ważne w tej lekcji:
- prąd w metalach, elektrolitach i gazach,
- natężenie prądu.

Przypomnij sobie:
- Napięcie elektryczne między dwoma punktami to różnica potencjałów pola elektrycznego.
- W przewodnikach znajdują się naładowane cząstki, które mogą się poruszać.
- Kiedy od atomu lub cząsteczki odłączą się elektrony (jeden lub więcej), otrzymujemy jon dodatni, a kiedy przyłączą się dodatkowe elektrony – otrzymujemy jon ujemny.

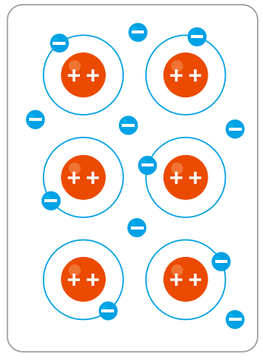
Prąd elektryczny

Przypomnijmy ze szkoły podstawowej, co oznacza to pojęcie:

Prąd elektryczny to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.

W praktyce najczęściej mamy do czynienia z prądem płynącym przez metale – z nich są wykonane m.in. przewody elektryczne. Wszystkie metale przewodzą prąd (choć niektóre lepiej, a inne gorzej).

W przypadku metali ładunkami przez nie przepływającymi są elektrony swobodne, które nie są silnie związane z atomami, dzięki czemu mogą się swobodnie przemieszczać w metalu (rys. 15.1).



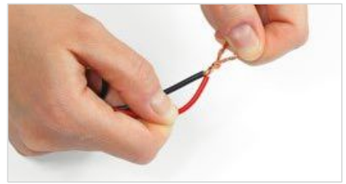
Rys. **15.1.** W metalach część elektronów może się swobodnie przemieszczać

Jednak w definicji prądu mówimy ogólnie o ładunkach elektrycznych, ponieważ w elektrolitach i gazach poruszają się także jony. Dokładniej powiemy o tym w dalszej części lekcji.

Wskazówki praktyczne (prąd elektryczny)

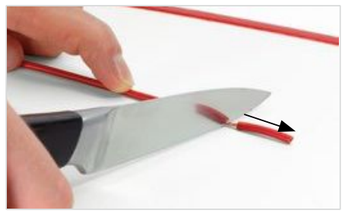
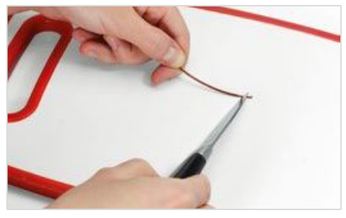
1 Aby przeprowadzić doświadczenia opisane w działach 15–17, warto zaopatrzyć się w:
- 2 m przewodu miedzianego jednożyłowego w izolacji, 2 m przewodu w izolacji emaliowej,
- 10 cm grubego przewodu miedzianego (ponad 4 mm^2 przekroju poprzecznego),
- żarówki: 3,6 V, 4,8 V, 1,2 V/0,3 A (2 szt.), 2,2 V/0,3 A (2 szt.), 2 oprawki do małych żarówek,
- baterię 9 V, 8 baterii AA, 4 baterie D (najgrubsze dostępne w handlu),
- miernik uniwersalny (najprostszy model), kompas,
- 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 tradycyjną żarówkę sieciową z oprawką. Przydatna będzie także zwojnica o kilkuset zwojach.

2 Elementy układów doświadczalnych można łączyć za pomocą spinaczy biurowych, a przewody można z sobą skręcać (patrz zdjęcia).



3 Jeśli chcesz sobie ułatwić pracę, zaopatrz się w krokodylki do łączenia elementów oraz nakładki na baterię 9 V. Z kolei za pomocą małych magnesów neodymowych możesz łączyć 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 na desce do krojenia (patrz zdjęcie).
W podobny sposób można zeskrobać emalię z końcówek przewodów emaliowanych. Z kuchennej folii aluminiowej delikatnie wytnij nożyczkami odpowiednie paski.

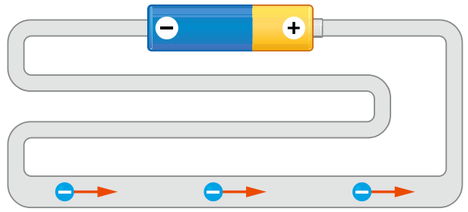



Dlaczego prąd płynie

Ze szkoły podstawowej wiesz, że prąd płynie wtedy, gdy między końcami przewodnika jest napięcie, np. kiedy jest on podłączony do biegunów baterii. Wiadomości z poprzedniego działu pozwolą ci teraz zrozumieć, **dlaczego** tak jest. Otóż:

- Napięcie to różnica potencjałów.
- Między biegunami baterii jest napięcie, czyli ich potencjały są różne.
- W takim razie w przewodzie łączącym bieguny jest pole elektryczne.
- W polu elektrycznym na elektrony działa siła powodująca ich ruch.

Tak więc przyczyną przepływu prądu elektrycznego jest pole elektryczne (rys. 15.2), podobnie jak w przypadku ruchu naładowanych cząstek w próżni. Ponieważ elektrony mają ładunek ujemny, poruszają się przeciwnie do zwrotu linii pola.



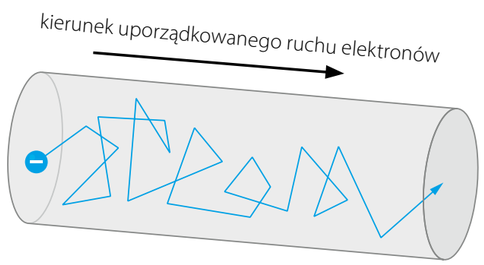
Rys. **15.2.** Elektrony poruszają się dzięki polu elektrycznemu występującemu w przewodniku

Pole elektryczne jest także na zewnątrz przewodnika, jednak teraz o nim nie mówimy, ponieważ zajmujemy się tylko przepływem ładunków wewnątrz przewodnika.

Prąd elektryczny, dryf elektronów i rozchodzenie się pola

Określenie *uporządkowany ruch ładunków* nie oznacza, że wszystkie ładunki poruszają się w tę samą stronę i z jednakową prędkością. W rzeczywistości poszczególne elektrony wykonują chaotyczne ruchy i nieustannie zderzają się z sobą oraz z jonami sieci krystalicznej metalu (rys. 15.3).

Chodzi jednak o to, że **średnio** wszystkie przemieszczają się w określonym kierunku. Ten wspólny ruch nazywamy **dryfem elektronów**.



Rys. **15.3.** Dryf elektronów nakłada się na znacznie szybszy ruch chaotyczny. Proporcja prędkości tych ruchów jest znacznie większa, niż wynikałoby to z rysunku

Jeszcze innym zjawiskiem jest rozchodzenie się pola elektrycznego. Kiedy w elektrowni włączamy prądnicę, pole z prędkością światła dochodzi do odbiorców energii, nawet tych odległych o setki kilometrów. W miarę jak pole rozchodzi się wzdłuż przewodów – a więc niemal natychmiastowo – elektrony zaczynają swój ruch. Porównajmy prędkości:

- dryf elektronów zachodzi z prędkością rzędu 0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$, a więc typową dla ślimaków,
- ruch chaotyczny jest znacznie szybszy – rzędu 100 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$, czyli ma prędkość większą niż rakiety kosmiczne,
- pole elektryczne rozchodzi się niemal z prędkością światła, czyli prawie 300 000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Rys. **15.4.** Dryf elektronów jest podobny do wiatru, a ich ruchy chaotyczne – do ruchów chaotycznych (termicznych) cząsteczek powietrza. Mimo że ruchy chaotyczne są znacznie szybsze, to elektronom (i cząsteczkom powietrza) udaje się z pewną przeciętną prędkością poruszać w jedną stronę

Prąd w elektrolitach

Wykonajmy teraz doświadczenie pozwalające zrozumieć, jak prąd płynie przez niektóre ciecze.

Doświadczenie 9

1. Zapoznaj się z informacjami z ramki „Wskazówki praktyczne” na s. 153.
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. Zbuduj obwód zgodnie ze zdjęciem.
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?

W doświadczeniu mogliśmy zauważyć, że przegotowana woda nie przewodzi prądu, a posolona – już tak. Na czym polega różnica?

- Przegotowana woda zawiera niewiele rozpuszczonych substancji, ponieważ znaczna ich część osadza się w czajniku jako kamień kotłowy.

Sól kuchenna to chlorek sodu NaCl, który w wodzie dysocjuje na jony Na^+ i Cl^-.

- Roztwór wodny soli zawiera jony dodatnie sodu i ujemne chloru. Pod wpływem pola elektrycznego jony się poruszają – ten ruch to przepływ prądu.

Prąd w gazach

O ruchu ładunków elektrycznych w gazach (przepływie prądu przez gazy) mówiliśmy już w poprzednim dziale. Jego najbardziej spektakularnym przykładem jest wyładowanie elektryczne w trakcie burzy, czyli piorun. Przypomnijmy, że:

- Przez gaz składający się tylko z obojętnych elektrycznie cząsteczek prąd nie może płynąć.
- Czasem jednak – na przykład pod wpływem promieniowania albo w silnym polu elektrycznym – z niektórych atomów zostają wybite elektrony. W gazie znajdują się wtedy zarówno wybite elektrony, jak i powstałe w ten sposób jony dodatnie. Ruch elektronów i jonów w polu elektrycznym to właśnie przepływ prądu.

> Prąd elektryczny w gazach polega na przepływie elektronów i jonów.

Rys. **15.5.** Lampy neonowe często rozświetlają ulice miast

Przypomnijmy także, że kiedy elektrony przyłączają się z powrotem do atomów, emitują namiar energii w postaci światła. Właśnie dlatego zjonizowany gaz świeci.
To zjawisko obserwujemy w przypadku błyskawic. Praktycznie wykorzystujemy je w niektórych źródłach oświetlenia (lampy neonowe i sodowe, świetlówki).

Umowny kierunek przepływu prądu elektrycznego

Co oznacza określenie *kierunek przepływu prądu*? Ładunki o przeciwnych znakach w tym samym polu elektrycznym poruszają się w przeciwne strony. Tak działo się z jonami Na^+ i Cl^- w doświadczeniu 9. Nie można więc przyjąć narzucającego się rozwiązania i za kierunek prądu uznać kierunek ruchu ładunków.
Dlatego przyjęto następującą umowę:

> Prąd płynie zgodnie ze zwrotem linii pola elektrycznego, czyli z punktów o wyższym potencjale do punktów o niższym potencjale.

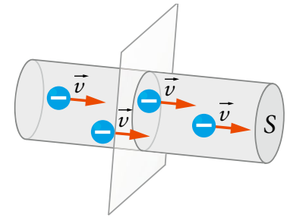
Rys. **15.6.** Porównanie umownego kierunku prądu z rzeczywistym kierunkiem uporządkowanego ruchu elektronów

Mówiąc bardziej potocznie, prąd płynie „od plusa do minusa".
Musimy pamiętać, że w przypadku przewodników, przez które płynie prąd, ruch elektronów zachodzi w przeciwną stronę. Umowa jest więc niefortunna, ale dziś trudno byłoby ją zmienić. Powstała ona jeszcze w czasach, gdy nie znano natury prądu elektrycznego.

Natężenie prądu

Prąd elektryczny możemy opisać ilościowo za pomocą pojęcia natężenia prądu (rys. 15.7).

> Natężenie prądu określa, jaki ładunek przepływa w jednostce czasu przez przekrój poprzeczny przewodnika w określonym miejscu.



Rys. **15.7.** Elektrony przepływające przez przekrój poprzeczny przewodnika

Jednak często w uproszczeniu myślimy o przewodzie jak o jednowymiarowej linii. Wtedy zamiast mówić: „przez przekrój poprzeczny", powiemy po prostu: „przez dany punkt przewodnika".
Jednostką natężenia prądu jest amper, czyli kulomb na sekundę:

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

Jeśli przykładowo w ciągu 1 s przez dane miejsce w obwodzie przepływa 10 C ładunku, to mówimy, że natężenie prądu wynosi 10 $\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}}$, czyli 10 A. Jeśli z kolei 10 C ładunku przepłynęło w czasie 2 s, to na każdą sekundę przypada 5 C, a więc natężenie prądu wynosi 5 $\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}}$ = 5 A. Ogólnie natężenie prądu możemy obliczać ze wzoru:

natężenie prądu → $I = \frac{q}{t}$ ← ładunek, czas

Rys. **15.8.** Natężenie prądu można porównać do liczby samochodów przejeżdżających w danym czasie przez bramkę na autostradzie

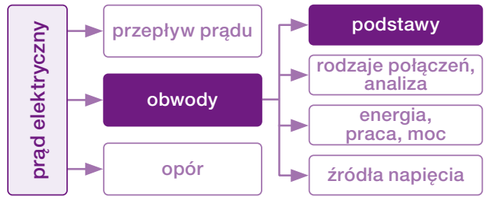
W tym dziale będziemy się zajmować prądem stałym, czyli takim, którego natężenie nie zmienia się w czasie.

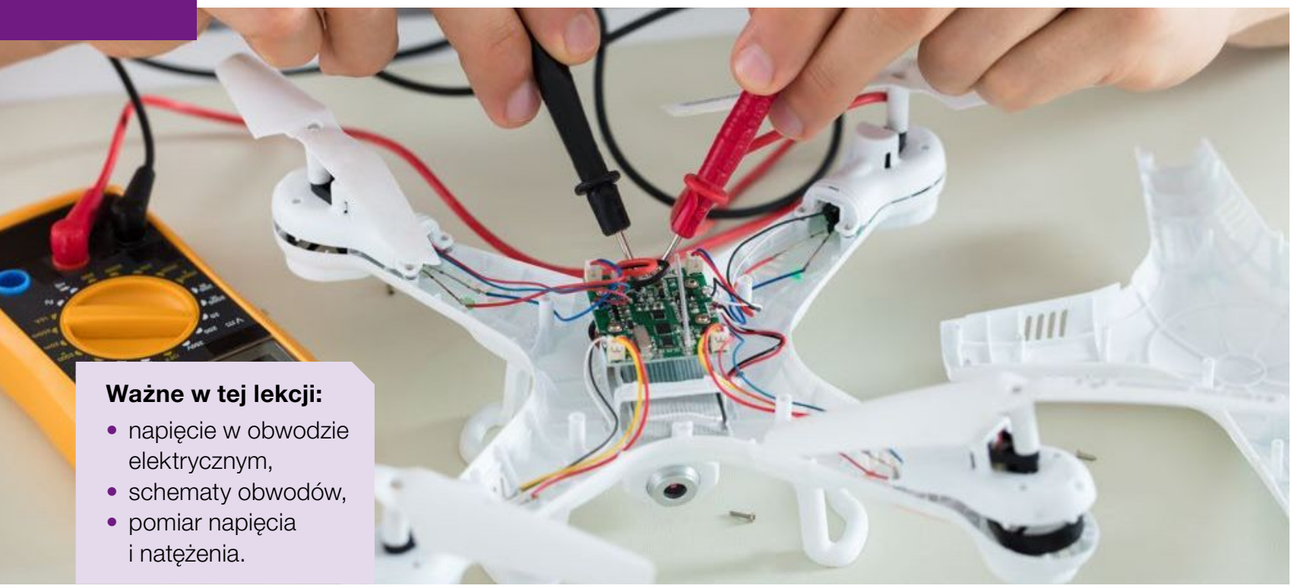
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Żarówka w reflektorze motocykla jest zasilana prądem o natężeniu 5 A z akumulatora o napięciu 6 V. Wykonaj odpowiednie obliczenia i odpowiedz na pytania. Które dane z zadania będą do tego potrzebne?
   a) 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...
4. Czy woda destylowana przewodzi prąd elektryczny? Dlaczego?
5. Wskaż wszystkie jednostki natężenia prądu elektrycznego i wyraź je w amperach. Wyjaśnij też, 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

15.2 Obwody elektryczne





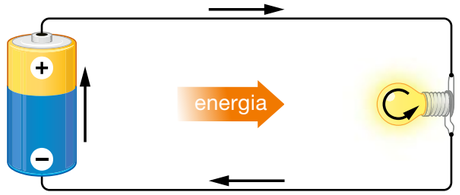
Ważne w tej lekcji:
- napięcie w obwodzie elektrycznym,
- schematy obwodów,
- pomiar napięcia i natężenia.

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 potencjałów, czyli energii potencjalnych ładunku 1 C w tych punktach.

Prąd w obwodzie

Najprostszy obwód elektryczny składa się:
- ze źródła napięcia (np. baterii, prądnicy),
- z odbiornika energii elektrycznej (np. żarówki, grzałki, silnika),
- z łączących je przewodów.

Prąd w obwodzie płynie po drodze zamkniętej (rys. 15.9). Zupełnie czym innym jest natomiast przepływ energii. Energia płynie ze źródła napięcia do odbiornika energii.



Rys. **15.9.** Prąd płynie w obwodzie po drodze zamkniętej. Energia płynie tylko w jedną stronę

Napięcie w obwodzie elektrycznym

Dzięki źródłom napięcia elektrony zyskują energię. Tracą ją wtedy, gdy płyną przez kolejne odbiorniki energii w obwodzie. Aby opisać tę energię ilościowo, możemy skorzystać z pojęcia napięcia, ponieważ:
- napięcie to różnica potencjałów,
- potencjał to energia w przeliczeniu na ładunek.

Na przykład jeśli mówimy, że bateria ma napięcie 9 V, to znaczy, że pozwala ona uzyskać energię 9 J na każdy 1 C przepływającego ładunku. Ogólnie zapisujemy to wzorem:

napięcie → $U = \frac{E}{q}$ ← energia, ładunek

Skoro elektrony o łącznym ładunku –1 C tracą w obwodzie energię 9 J, to ta sama energia ulega przemianie w inne formy energii.

Przypomnijmy z poprzedniego działu, że jednostką napięcia jest wolt, czyli dżul na kulomb:

$$1\ \mathrm{V} = \frac{1\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{C}}$$

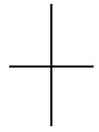
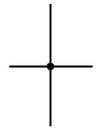
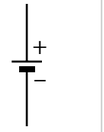
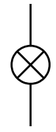
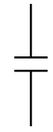
Napięcie: między punktami czy w punkcie?

Napięcie jest **różnicą** potencjałów, a żeby mówić o różnicy, potencjały muszą być dwa. Tak więc napięcie określamy zawsze między **dwoma** punktami obwodu. Zwróć uwagę na to, że to inaczej niż w przypadku natężenia prądu, które opisuje przepływ ładunków przez określony **jeden** punkt obwodu.

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 15.1). Jest to znacznie prostsze niż odwzorowanie rzeczywistego wyglądu urządzenia.

Tabela 15.1. Wybrane symbole elektryczne stosowane w obwodach

Przewód	Skrzyżowanie przewodów bez połączenia	Skrzyżowanie z połączeniem przewodów	Ogniwo lub bateria	Żarówka	Opornik	Wyłącznik	Kondensator
							

Rys. **15.10.** Porównanie prądu elektrycznego do przepływu wody

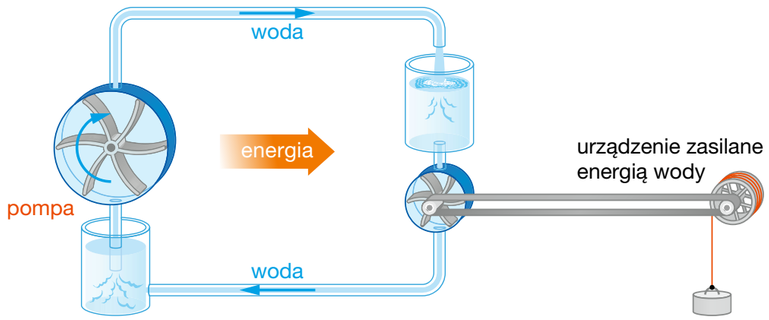
Obwód elektryczny a przepływ wody

Przepływ prądu elektrycznego często porównuje się do przepływu wody. W takim modelu napięcie odpowiada różnicy poziomów, a natężenie – ilości wody przepływającej przez dane miejsce w ciągu sekundy (rys. 15.10). Te porównania powstały, zanim jeszcze poznano naturę prądu elektrycznego, jednak okazały się bardzo trafne.

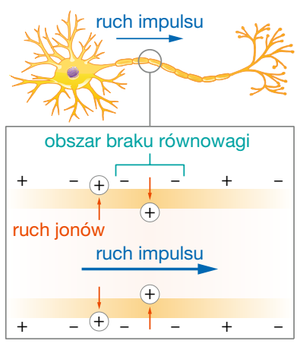
- Napięcie określa różnicę energii potencjalnej ładunku w polu elektrycznym, podobnie jak w modelu wodnym różnica poziomów wody określa różnicę jej energii potencjalnej grawitacji.

- Natężenie opisuje, jaka jest wartość ładunku przepływającego w ciągu sekundy, a więc także – liczba elektronów przepływających w tym czasie przez dane miejsce. W modelu wodnym natężenie odpowiada masie wody, a więc także liczbie cząsteczek wody przepływających w ciągu sekundy przez dane miejsce.

W takim porównaniu baterii odpowiada pompa przenosząca wodę do góry (a więc zwiększająca jej energię potencjalną), a odbiornikowi energii – urządzenie zasilane energią wody (rys. 15.11).



Rys. **15.11.** Hydrauliczny odpowiednik obwodu elektrycznego

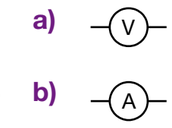


A to ciekawe

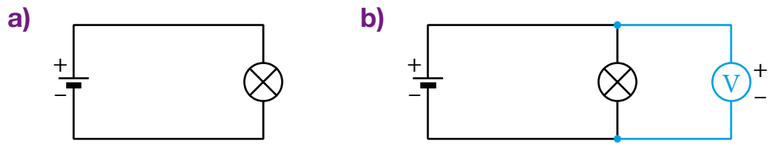
Mówi się czasem, że w układzie nerwowym człowieka i innych zwierząt płynie prąd elektryczny, a akson (długa część komórki nerwowej) odgrywa rolę przewodu. To nie do końca jest prawda. Przesyłanie impulsu nerwowego w układzie nerwowym rzeczywiście polega na przepływie ładunków elektrycznych (jonów), jednak trudno 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 prądu

Do pomiaru napięcia służy woltomierz, a do pomiaru natężenia – amperomierz. Ich symbole przedstawiono na rysunku 15.12.
Kiedy mierzymy napięcie, musimy pamiętać, że jest ono zdefiniowane **między dwoma punktami**. Dlatego, aby zmierzyć napięcie, końcówki woltomierza należy podłączyć do tych punktów (rys. 15.13). W samym obwodzie nie trzeba niczego zmieniać.

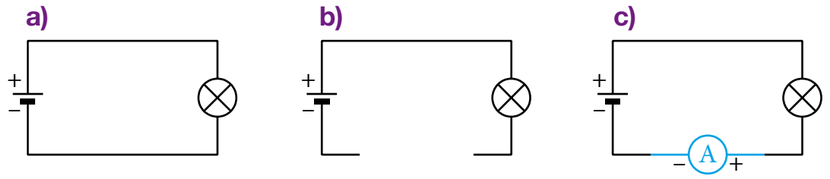


Rys. **15.12.** Symbole:
a) woltomierza,
b) amperomierza



Rys. **15.13.** 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. 15.14b), a następnie w tym miejscu podłączyć miernik (rys. 15.14c).



Rys. **15.14.** Pomiar natężenia prądu płynącego przez żarówkę: a) obwód wyjściowy, b) obwód po rozłączeniu (żarówka nie świeci), c) obwód po włączeniu amperomierza

Mierniki uniwersalne

Obecnie rzadko woltomierz i amperomierz są umieszczone w osobnych obudowach. Obie te funkcje łączy miernik uniwersalny – analogowy lub cyfrowy. Zazwyczaj za pomocą tego typu miernika można też mierzyć opór elektryczny. Funkcję miernika i zakres przeprowadzanych pomiarów ustawia się za pomocą pokrętła na przyrządzie (ramka → s. 162).

Prosty cyfrowy miernik uniwersalny można kupić w sklepie elektronicznym, sklepie budowlanym lub w supermarkecie.

Jaki zakres wybrać

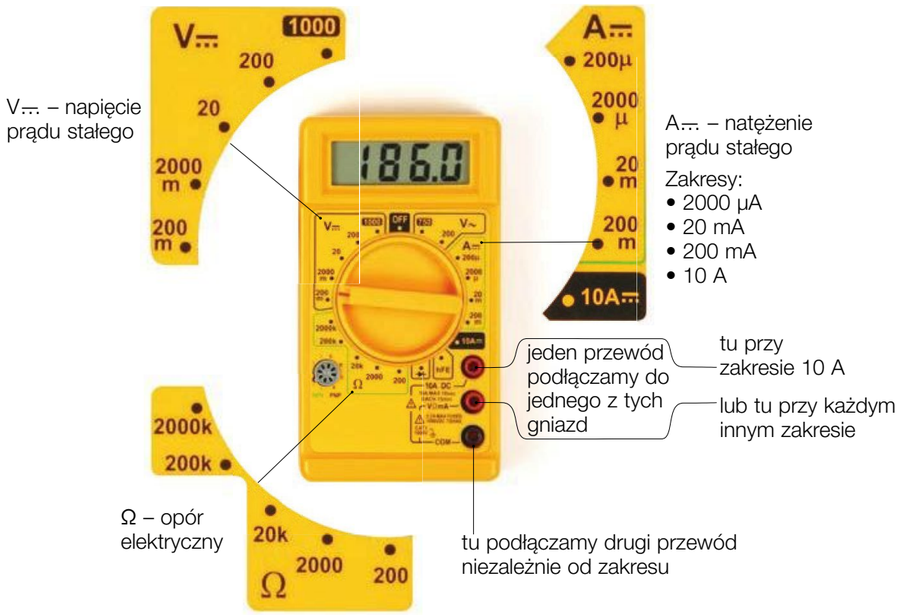
Jeśli mniej więcej się orientujemy, jaki będzie wynik pomiaru, to wiemy też, który zakres wybrać. Kiedy przykładowo chcemy sprawdzić, czy napięcie między biegunami baterii 9 V odpowiada tej nominalnej wartości, wybierzemy zakres 20 V, a nie 200 V czy 2 V.
Jeśli nie wiemy, jakiego rzędu napięcia mierzymy, zaczynamy od największego zakresu, a potem w miarę możliwości przełączamy urządzenie na niższy.

Miernik uniwersalny

Pokrętło pozwala przełączać się między funkcjami miernika, a także wybierać zakres pomiaru.

Woltomierz
V⎓ albo DCV (*direct current voltage*) → napięcie prądu stałego
V~ albo ACV (*alternating current voltage*) → napięcie prądu przemiennego

Amperomierz
A⎓ albo DCA (*direct current amperage*) → natężenie prądu stałego
A~ albo ACA (*alternating current amperage*) → natężenie prądu przemiennego



Uwaga. O pomiarze oporu elektrycznego powiemy później.

Zakres pomiaru i przedrostki
W opisie zakresu zwykle pomija się jednostkę. Na przykład gdy wybieramy pomiar napięcia: „20” oznacza 20 V, a „200 m” oznacza 200 mV. Przy włączonym zakresie „200 m” napięcie wyświetla się w miliwoltach, a nie w woltach. Miernik na zdjęciu wskazuje napięcie stałe 186 mV (a nie 186 V).

Niepewność pomiaru

Szczegółowe informacje na temat niepewności pomiaru miernikiem uniwersalnym znajdziemy w jego instrukcji obsługi. Oczywiście specjalistyczne, drogie mierniki pozwalają na dokładniejszy pomiar. W przypadku prostych, tanich przyrządów można zakładać, że przy najdokładniejszym z możliwych w danym przypadku zakresów pomiarowych niepewność wynosi 3% zmierzonej wielkości.

Jeśli więc woltomierz wyświetla wynik 1487 mV, to niepewność wynosi:

$$0{,}03 \cdot 1487 \text{ mV} = 44{,}61 \text{ mV} \approx 50 \text{ mV}$$

Wynik takiego pomiaru zapisujemy w postaci:

$$U = 1490 \text{ mV} \pm 50 \text{ mV} \quad \text{albo} \quad U = (1490 \pm 50) \text{ mV}$$

Niepewność zawsze zaokrąglamy w górę.

Jak widzisz, przy określaniu niepewności nie należy się sugerować liczbą cyfr wyświetlanych przez miernik – na ogół jest ona zbyt duża. W rozważanym przykładzie zapis 1487 mV mógłby sugerować, że napięcie zmierzone jest z dokładnością do 1 mV, podczas gdy faktyczna dokładność jest kilkadziesiąt razy mniejsza.
Zdarza się jednak, że miernik wyświetla tylko jedną albo dwie cyfry – wtedy trzeba wziąć pod uwagę niepewność wynikającą z tej liczby cyfr. Na przykład 8 µA oznacza pomiar z dokładnością do 1 µA, a nie do 3% czyli 0,24 µA.
Innymi słowy: zawsze bierzemy pod uwagę „gorszą” możliwość, czyli większą niepewność.

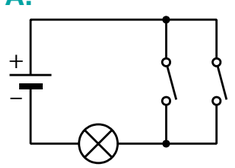
Pytania i zadania

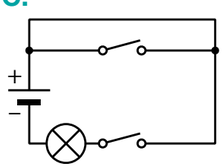
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

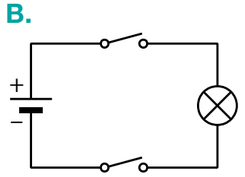
1. Schemat obwodu elektrycznego przedstawia tylko połączenia elementów, a nie ich rozmieszczenie w przestrzeni. Dlatego ten sam obwód można narysować za pomocą różnych schematów.

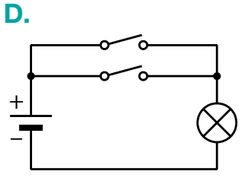
a) Znajdź wśród schematów A–D dwa przedstawiające ten sam obwód.

b) Dla każdego z pozostałych schematów narysuj w zeszycie ten sam obwód w inny sposób.

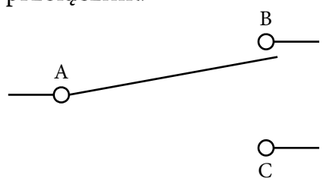
A.


C.


B.


D.


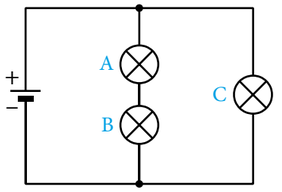
2. Na rysunku przedstawiono schematycznie przełącznik.



W jednym jego położeniu 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.

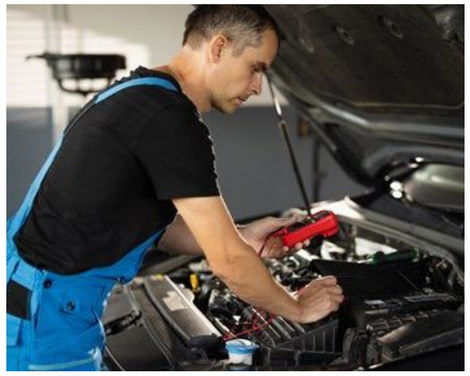
3. Przerysuj ołówkiem do zeszytu poniższy schemat.



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. Jaki zakres pomiarowy należy wybrać w opisanych sytuacjach? Używamy miernika, którego skalę przedstawiono na zdjęciu na s. 162.

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.

d) Mierzymy natężenie prądu płynącego przez żarówkę. Według producenta powinno wynosić ono ok. 0,25 A.

e) Mierzymy natężenie prądu stałego płynącego przez grzałkę. Nie mamy pojęcia, ile powinno ono wynosić.

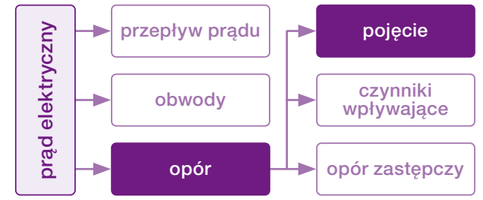
5. Miernik przedstawiony na s. 162 nastawiono na najczulszy zakres pomiaru natężenia prądu większy od mierzonej wielkości. Przyrząd wyświetlił wynik podany niżej. Zapisz ten wynik z uwzględnieniem niepewności pomiarowej.

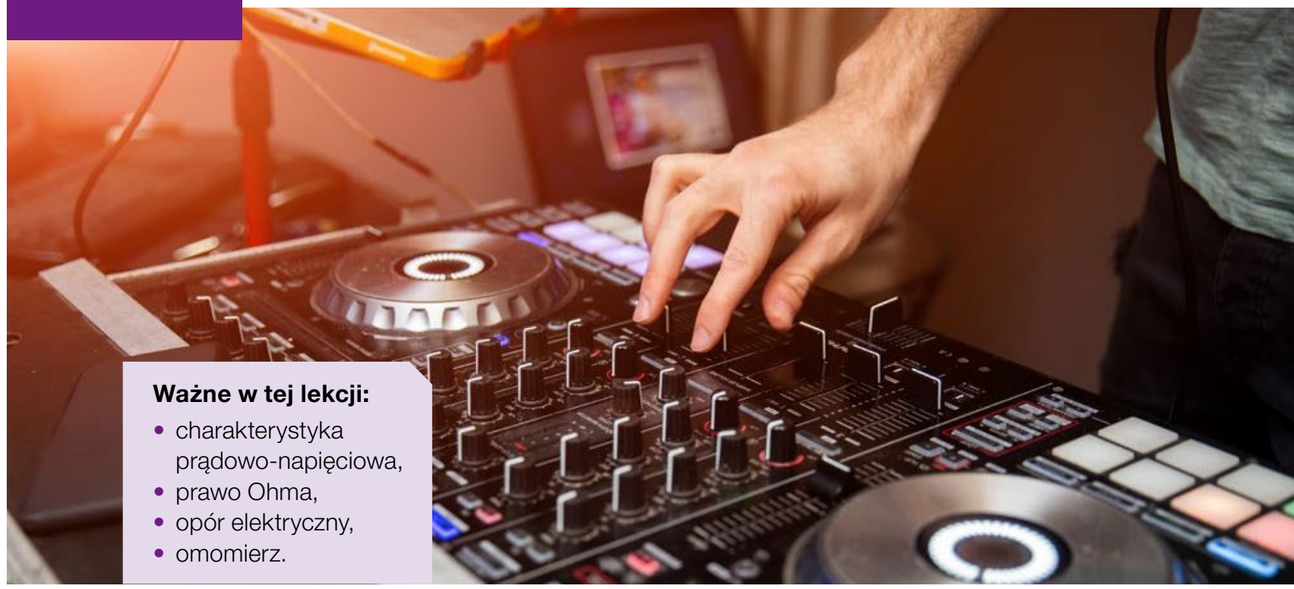
a) 653,2 mA **c)** 0,2 A

b) 2,3 A **d)** 0,20 A

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.

15.3 Opór elektryczny





Ważne w tej lekcji:

- charakterystyka prądowo-napięciowa,
- prawo Ohma,
- opór elektryczny,
- omomierz.

Przypomnij sobie:

- Przepływ prądu elektrycznego w przewodzie jest spowodowany występowaniem tam pola elektrycznego.
- 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. Tak więc jednostką napięcia jest 1 $\frac{\text{J}}{\text{C}}$ czyli wolt (1 V).

Ruch ładunku w próżni i w przewodniku

W lekcji 14.8 badaliśmy ruch ładunku w próżni w polu elektrycznym. Zakładaliśmy, 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.

Inaczej jest z elektronami w przewodniku. Elektrony także rozpędzają się pod wpływem pola elektrycznego, jednak zderzają się z jonami metalu i z sobą wzajemnie. Przy zderzeniach elektrony tracą energię, ale następnie zyskują ją dzięki sile elektrycznej, działającej na nie w polu elektrycznym.

Ruch ładunku rozpędzanego w próżni można wobec tego porównać do spadku swobodnego, a ruch ładunku w przewodniku – do ruchu kogoś, kto spada z drzewa, po drodze hamując przy uderzeniach o gałęzie.

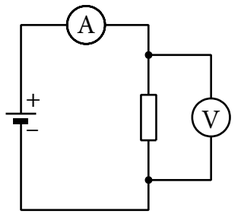
Ruch cząstki w polu elektrycznym → s. 131

Napięcie a natężenie prądu

Dzięki tym rozważaniom możemy przewidzieć zależność między napięciem przyłożonym do przewodnika a natężeniem płynącego prądu. Kiedy napięcie będzie wyższe, to:

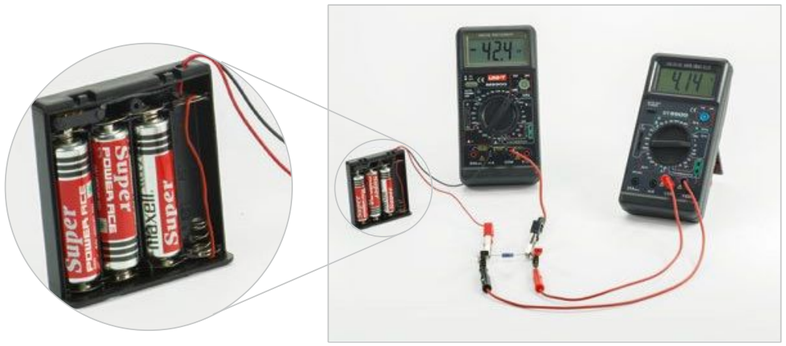
- pole elektryczne będzie silniejsze,
- elektrony będą się rozpędzać z większym przyspieszeniem,
- średnia prędkość dryfu elektronów między zderzeniami będzie większa,
- więcej elektronów przepłynie przez dane miejsce w przewodniku,
- większe będzie natężenie prądu.

Zbadamy teraz dokładniej tę zależność, czyli wyznaczymy **charakterystykę prądowo-napięciową** przewodnika. Do doświadczenia użyjemy opornika, który jest po prostu kawałkiem przewodnika w obudowie.



Doświadczenie 10

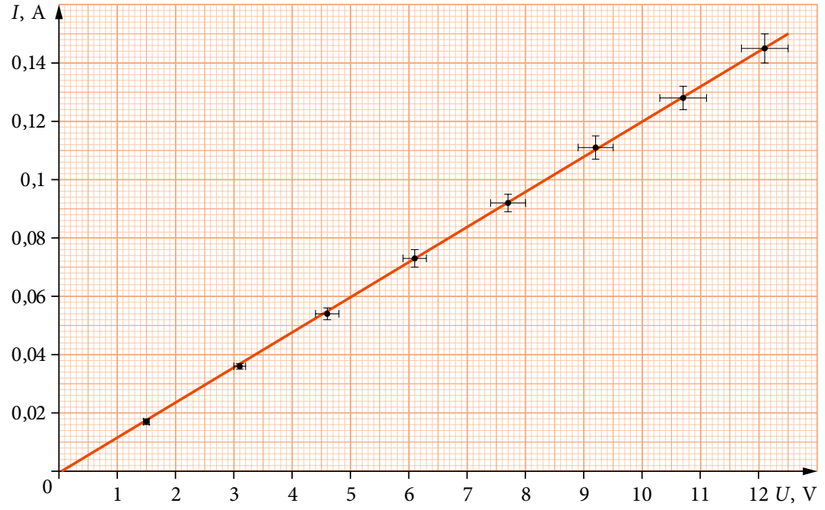
1. Przygotuj opornik, co najmniej 6 ogniw 1,5 V (mogą to być baterie AA), oprawkę lub magnesy do ich łączenia, woltomierz i amperomierz lub dwa mierniki uniwersalne. Jeśli nie masz opornika, możesz wziąć żelazko i podłączyć przewody do obu metalowych podłączeń jego wtyczki sieciowej. Możesz też korzystać tylko z jednego miernika, ale wtedy pomiary będą trwały dłużej.
2. Zbuduj obwód elektryczny zgodnie ze schematem.
3. Zmierz napięcie na oporniku i natężenie płynącego przez niego prądu. Zapisz uzyskane wyniki pomiarów w tabeli.
4. Do ogniwa podłącz szeregowo jeszcze jedno ogniwo i powtórz pomiary. Zapisz ich wyniki.
5. Powtarzaj czynności opisane w punkcie 4. do czasu, aż podłączysz do obwodu wszystkie ogniwa.
6. Wyznacz niepewności pomiarów napięcia i natężenia (patrz → s. 162).
7. Na podstawie danych z tabeli sporządź wykres zależności $I(U)$, uwzględnij obliczone niepewności pomiarowe.



Analiza wyników doświadczenia

Tabela 15.2. Wyniki doświadczenia wraz z niepewnościami

Liczba ogniw	U, V		I, A	
	wartość	niepewność	wartość	niepewność
1	1,5	0,05	0,017	0,001
2	3,1	0,1	0,036	0,001
3	4,6	0,2	0,054	0,002
4	6,1	0,2	0,073	0,003
5	7,7	0,3	0,092	0,003
6	9,2	0,3	0,111	0,004
7	10,7	0,4	0,128	0,004
8	12,1	0,4	0,145	0,005



Rys. **15.15.** Wykres zależności $I(U)$ dla danych z doświadczenia 10.

Po przyłożeniu linijki do punktów pomiarowych stwierdziliśmy, że leżą one niemal na jednej prostej, przechodzącej przez początek układu współrzędnych (dorysowanej na czerwono, rys. 15.15). Oznacza to, że natężenie prądu jest proporcjonalne do napięcia.

Prawo Ohma

Wniosek z doświadczenia 10. pozwala sformułować **prawo Ohma**:

> Natężenie prądu płynącego przez przewodnik jest wprost proporcjonalne do napięcia między jego końcami:
>
> $$I \sim U$$

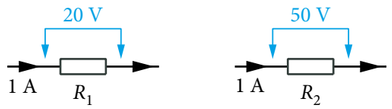
Należy podkreślić, że prawo Ohma **nie jest** podstawowym prawem przyrody, takim jak zasada zachowania ładunku czy zasada zachowania energii. O ograniczeniach w stosowaniu tego prawa powiemy w następnych lekcjach.

Opór elektryczny jako zjawisko

Jak już wiesz z początku lekcji, pod wpływem przyłożonego napięcia ładunki uzyskują energię, którą w dużej części tracą podczas zderzeń z jonami. Można powiedzieć, że przepływ prądu napotyka na opór.

Opór elektryczny jako wielkość fizyczna

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.
Jak wyrazić opór liczbowo? Spójrz na rysunek 15.16. W przypadku drugiego opornika do uzyskania tego samego natężenia prądu potrzebne jest wyższe napięcie. To znaczy, że drugi opornik ma większy opór.



Rys. **15.16.** Drugi opornik ma większy opór

Ogólnie: opór jako wielkość fizyczna określa, jakie napięcie jest potrzebne, aby przez przewodnik przepłynął prąd o natężeniu 1 A.

Jeśli na przykład do uzyskania prądu o natężeniu 5 A jest potrzebne napięcie 100 V, to na każdy amper przypada 20 V, czyli opór wynosi 20 $\frac{\text{V}}{\text{A}}$. Przekonuje nas to, że opór możemy obliczać jako iloraz napięcia między końcami przewodnika i natężenia płynącego prądu:

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

(opór — napięcie, natężenie)

R od ang. *resistance*

Zgodnie z prawem Ohma iloraz $\frac{U}{I}$ jest stały, ponieważ wzrost napięcia powoduje, że natężenie zwiększa się tyle samo razy – zatem wartość ułamka pozostaje bez zmian. Tak więc prawo Ohma oznacza po prostu, że opór przewodnika jest stały.

W lekcji 15.5 zbadamy, jak rozgrzewanie się przewodnika wpływa na jego opór.

Jednostką oporu elektrycznego jest om:

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

Ω to duża grecka litera omega.

Odczytywanie oporu z wykresu

Jaki opór miał opornik używany przez nas w doświadczeniu 10.? Aby to stwierdzić, możemy wybrać dowolny punkt na prostej dopasowanej do punktów pomiarowych. Wybierzmy punkt (10 V; 0,12 A).
Na podstawie tych danych możemy obliczyć opór:

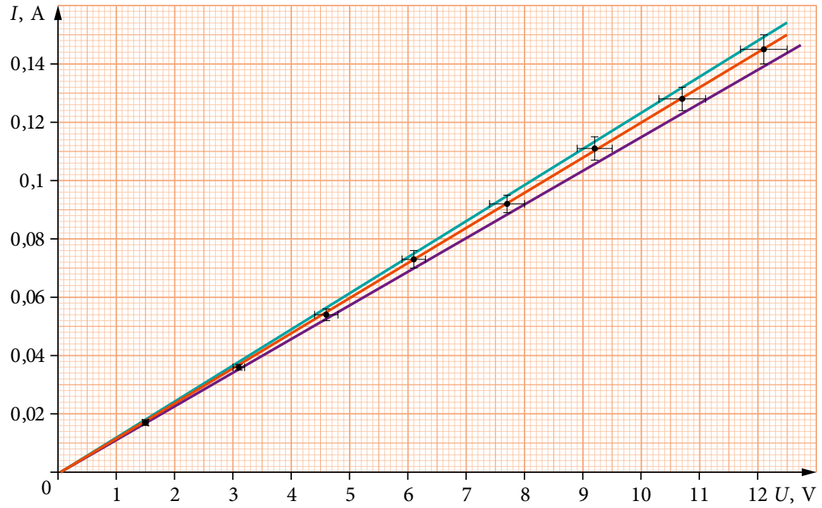
$$R = \frac{10\ \text{V}}{0{,}12\ \text{A}} = 83\ \Omega$$

Z obudowy opornika można odczytać, że jego opór wynosił 80 Ω ± 10%, a więc nasz wynik zgadza się z danymi producenta.

Lepiej, aby wybrany punkt znajdował się jak najdalej od początku układu współrzędnych. Wtedy niedokładność odczytywania jego współrzędnych jest mniejsza w stosunku do ich wartości.

(F) Niepewność wyznaczenia oporu

Jeśli chcemy się dowiedzieć, z jaką niepewnością wyznaczyliśmy opór, możemy dopasować do punktów pomiarowych (wraz z ich niepewnościami) proste przechodzące przez początek układu współrzędnych o jak największym i jak najmniejszym nachyleniu.



Rys. **15.18.** Wykres zależności *I*(*U*) dla danych z doświadczenia 10. z prostymi o największym i najmniejszym nachyleniu

Rys. **15.17.** W kolorowych paskach zakodowano opór oporników wraz z niepewnością tej wielkości (patrz → s. 354)

Na każdej z tych prostych wybieramy jeden z punktów i na podstawie jego współrzędnych obliczamy opór:

$$R_1 = \frac{12\ \text{V}}{0{,}148\ \text{A}} = 81\ \Omega \qquad R_2 = \frac{12\ \text{V}}{0{,}138\ \text{A}} = 87\ \Omega$$

Pierwsza z tych wielkości różni się od wyznaczonej wcześniej wielkości *R* o 2 Ω, a druga o 4 Ω. Bierzemy pod uwagę większą z tych różnic.
Tak więc ostatecznie:

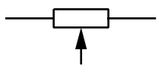
$$R = 83\ \Omega \pm 4\ \Omega$$

Dzięki przeprowadzonym pomiarom określiliśmy rzeczywisty opór z dokładnością większą niż podana przez producenta.

a)

b)

c)



Rys. **15.19.** Rodzaje najczęściej stosowanych potencjometrów:
a) suwakowy,
b) obrotowy. Symbol potencjometru – strzałką oznaczono suwak przemieszczający się po oporniku (c)

Zastosowania oporników

Opornik jest jednym z najpowszechniej stosowanych elementów elektronicznych. Używamy go m.in. do ograniczania napięcia i natężenia prądu. W najprostszym przypadku opornik połączony z żarówką chroni ją przed zbyt wysokim napięciem.
Także spirale grzejne w tosterach i czajnikach elektrycznych to z fizycznego punktu widzenia oporniki, choć w tym przypadku wydzielanie się ciepła jest nie stratą energii, ale przeciwnie – jej użyteczną formą.

Opornik i potencjometr

Oprócz oporników o stałym oporze istnieją także oporniki o oporze regulowanym, nazywane **potencjometrami** (patrz rys. 15.19). Służą one m.in. do regulacji głośności w sprzęcie audio-wideo.
Potencjometr ma trzy końcówki. Dwie z nich znajdują się na końcach przewodnika o dużym oporze, natomiast trzecia jest podłączona do elementu, który można przemieszczać po tym przewodniku.

Omomierz

Opór elektryczny można mierzyć także za pomocą **omomierza**, który – korzystając z własnego źródła napięcia – przepuszcza niewielki prąd przez przewodnik i automatycznie oblicza jego opór. Taką funkcję może spełniać także miernik uniwersalny.
Omomierz przydaje się również w życiu codziennym. Jeśli chcesz sprawdzić, czy żarówka samochodowa jest sprawna, nie musisz instalować jej w reflektorze. Wystarczy, że za pomocą omomierza zmierzysz jej opór. 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.
Nigdy nie podłączaj omomierza do baterii ani do obwodu, w którym płynie prąd. Spowoduje to zniszczenie przyrządu.

Opór przewodów i mierników

Każdy przewód ma pewien opór elektryczny. Ponieważ jednak zwykle ten opór jest znacznie mniejszy od oporu odbiornika energii, będziemy go dalej pomijać. Zgodnie ze wzorem $R = \frac{U}{I}$, który możemy przekształcić do postaci $U = IR$, oznacza to, że również napięcie między różnymi punktami tego samego przewodu jest niewielkie, a my będziemy przyjmować w przybliżeniu, że jest ono równe zeru.

W analizie obwodów będziemy pomijać opór przewodów, a tym samym – różnice potencjału między różnymi punktami tego samego przewodu.

Gdy mierzymy natężenie prądu, chcemy, aby włączony w obwód amperomierz nie zmieniał tego natężenia. W takim razie opór amperomierza powinien być jak najmniejszy, a w przybliżeniu będziemy przyjmować, że jest on równy zeru.
Odwrotnie jest z woltomierzem. Nie chcemy, aby płynął przez niego prąd, ponieważ może to zmienić mierzone przezeń napięcie. Wobec tego opór woltomierza powinien być jak największy, a w przybliżeniu będziemy przyjmować, że jest on nieskończony. Jak łatwo się domyślić, im lepszy miernik, w tym lepszym stopniu spełnia nasze założenia.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

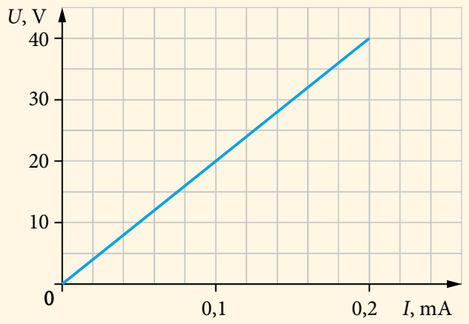
Narysuj wykres przedstawiający zależność $U(I)$ dla opornika o oporze 200 kΩ.

Dane: $R = 200\ \text{k}\Omega = 200\,000\ \Omega$ – opór opornika **Szukane:** **wykres** zależności $U(I)$

Rozwiązanie:
Prawo Ohma mówi, że natężenie prądu płynącego przez opornik jest proporcjonalne do podłączonego napięcia. W takim razie również napięcie na oporniku jest proporcjonalne do natężenia płynącego przez niego prądu. Wykres zależności $U(I)$ 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 $I = \frac{U}{R}$ obliczamy, 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).



Odpowiedź: Wykres obok przedstawia zależność $U(I)$ dla oporu 200 kΩ.

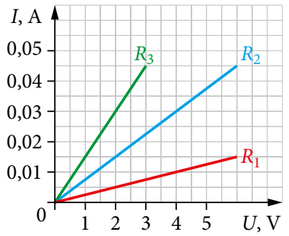
Zadania s. 172

Pytania i zadania

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. Więcej powiemy o tym wkrótce.

2. W jednym układzie współrzędnych narysowano kilka wykresów (patrz rys. poniżej). Każdy z nich przedstawia zależność natężenia prądu płynącego przez opornik od przyłożonego napięcia.



a) Spróbuj bez wykonywania obliczeń odpowiedzieć na pytanie, który z oporników ma największy opór.

b) Oblicz opór każdego z oporników. Sprawdź, czy twoje przypuszczenia się potwierdziły.

3. P Narysuj w zeszycie w jednym układzie współrzędnych wykresy zależności $I(U)$ dla oporników o oporze 100 Ω, 200 Ω i 300 Ω. W drugim układzie współrzędnych narysuj wykresy zależności $U(I)$ dla tych samych trzech oporników. Porównaj nachylenia wykresów. Co zauważasz?

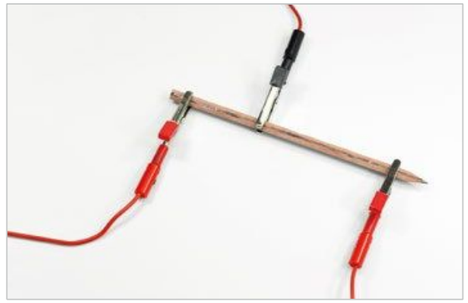
4. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj gruby ołówek stolarski, ostry nóż, trzy krokodylki, przewody, ogniwo 1,5 V i dwie żarówki 2,2 V.

b) Rozetnij ołówek wzdłuż tak, aby rysik lekko z niego wystawał na całej długości.

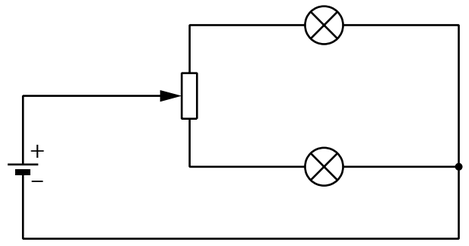
c) Przyczep przewody do krokodylków.

d) Załóż krokodylki na ołówek: dwa na końcach i jeden pośrodku, w taki sposób, aby dotykały rysika (patrz zdjęcie).



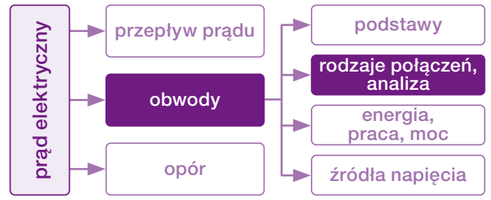
e) Tak oto zbudowałeś potencjometr – przesuwanie środkowego krokodylka po rysiku pozwoli na regulowanie oporów między czarnym krokodylkiem a każdym z czerwonych krokodylków.

f) Zbuduj układ według podanego schematu. Sprawdź, jak zmienia się jasność żarówek wtedy, gdy poruszamy suwakiem potencjometru.



5. Zaprojektuj samodzielnie doświadczenie pozwalające sprawdzić, że opór amperomierza jest znikomo mały, natomiast opór woltomierza jest praktycznie nieskończony. Wykonaj je.

15.4 Połączenia szeregowe i równoległe



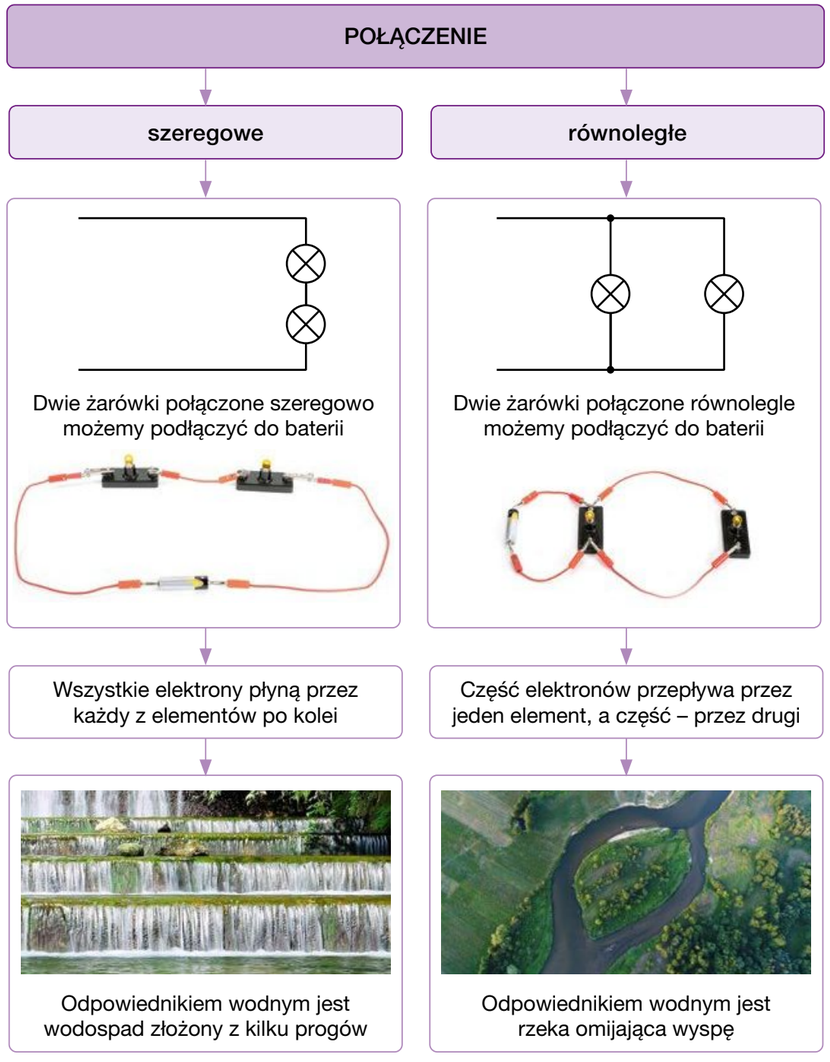
Ważne w tej lekcji:
- połączenia szeregowe i równoległe,
- dodawanie napięć baterii,
- pierwsze prawo Kirchhoffa.

Przypomnij sobie:
- Natężenie prądu określa, jaki ładunek przepływa przez określone miejsce obwodu w jednostce czasu.
- Napięcie określa, jaka energia ulega przemianom, kiedy przez obwód przepływa jednostkowy ładunek.
- Napięcie mierzymy za pomocą woltomierza, a natężenie za pomocą amperomierza. Oba te pomiary można wykonać miernikiem uniwersalnym.

W tej lekcji poznamy podstawowe połączenia odbiorników energii elektrycznej (np. żarówek) i źródeł energii (np. baterii) występujące w obwodach elektrycznych.

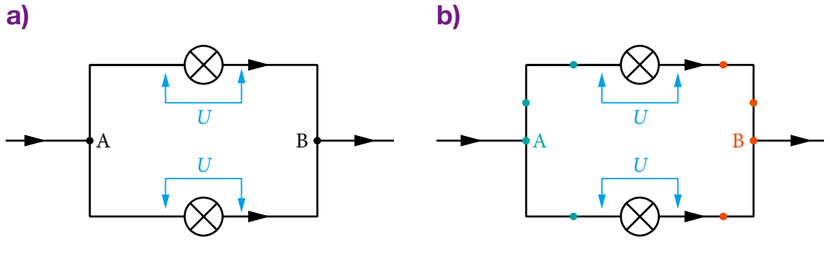
Połączenia w obwodach elektrycznych

Kiedy dwie żarówki chcemy podłączyć do jednej baterii, możemy je z sobą połączyć na dwa sposoby: szeregowo lub równolegle (patrz ramka na następnej stronie).
Jeżeli żarówek jest więcej, oprócz tych dwóch możliwości mamy także inne, bardziej skomplikowane. Jednak te dwa podstawowe rodzaje wystarczą nam do tego, aby zbadać najważniejsze prawa rządzące przepływem prądu. Co więcej, znaczną część tych bardziej skomplikowanych układów będziemy mogli przedstawić w postaci kilku połączeń szeregowych i równoległych (patrz przykład na końcu tej lekcji → s. 182).



Napięcie przy połączeniu równoległym

Kiedy łączymy elementy równolegle, napięcia na nich są jednakowe. Wynika to z definicji napięcia jako różnicy potencjałów. Na przykład na rysunku 15.20 napięcie na każdej z żarówek jest równe różnicy potencjałów w punktach A i B.



Rys. **15.20.** Napięcia na dwóch żarówkach połączonych równolegle są takie same

Do tego samego wniosku doprowadzi nas bardziej praktyczne rozumowanie: aby zmierzyć napięcie na dowolnej z żarówek, jedną końcówkę miernika podłączamy do punktu A, a drugą – do punktu B. Zamiana punktu A na jeden z pozostałych zielonych punktów na rysunku 15.20b niczego w praktyce nie zmieni, podobnie jak zamiana punktu B na jeden z czerwonych.

Przyjmujemy, że potencjał punktów połączonych przewodem jest jednakowy → s. 171.

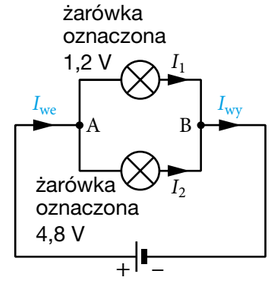
Natężenie przy połączeniu równoległym

Skoro napięcia na elementach połączonych równolegle są jednakowe, to czy podobnie jest z natężeniem? Zbadamy to w doświadczeniu.

Doświadczenie 11 – 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}. Porównaj wyniki pomiarów. Co zauważasz?



Uwaga. Podpisy 1,2 V i 4,8 V dotyczą napięcia znamionowego żarówek, czyli napięcia, do którego są dostosowane. 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, ponieważ mniejszy zakres, czyli 200 mA, był za mały w przypadku większości pomiarów. Otrzymane wyniki zebraliśmy w tabeli 15.3.

Sposób wyznaczenia niepewności → s. 162–163

Tabela 15.3. Wyniki pomiarów natężenia prądu

Pomiar	I_{we}	I_1	I_2	I_{wy}
Zmierzona wartość, A	0,34 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,34 ± 0,01

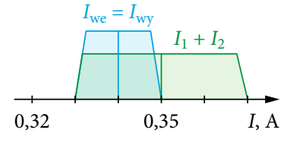
Na podstawie wyników pomiarów łatwo obliczyć, że:

$$I_1 + I_2 = 0{,}35 \pm 0{,}02 \text{ A}$$

Wnioski z doświadczenia

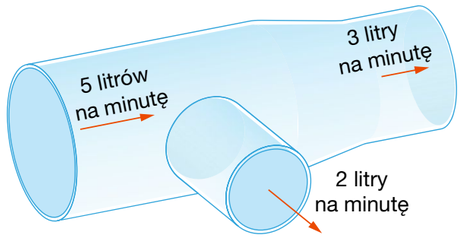
Po uwzględnieniu niepewności (rys. 15.21) możemy wyciągnąć następujące wnioski:

- kiedy prąd rozdziela się z jednego przewodu do dwóch, wtedy natężenie prądu przed podziałem jest równe sumie natężeń prądu po podziale,
- analogicznie, kiedy prąd z dwóch przewodów łączy się w jeden, natężenie prądu po połączeniu jest równe sumie natężeń przed połączeniem,
- natężenie prądu wpływającego do obwodu jest równe natężeniu prądu z niego wypływającego.



Rys. **15.21.** Wyniki pomiarów wraz z niepewnościami

Te prawidłowości łatwo zrozumieć, jeżeli pamiętamy o zasadzie zachowania ładunku. Spośród wypływających z baterii elektronów część płynie przez jedną żarówkę, część – przez drugą, ale żaden elektron nie znika ani się nie pojawia. Również model wodny (rys. 15.22) pokazuje oczywistą interpretację opisanych zależności.

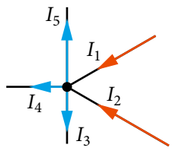


Rys. **15.22.** Rozgałęzienie rury – wodny odpowiednik rozgałęzienia przewodów elektrycznych

Pierwsze prawo Kirchhoffa

Opisana powyżej sytuacja jest przykładem zastosowania **pierwszego prawa Kirchhoffa**, które mówi:

> Suma natężeń prądów wpływających do punktu rozgałęzienia (węzła) obwodu jest równa sumie natężeń prądów z niego wypływających.



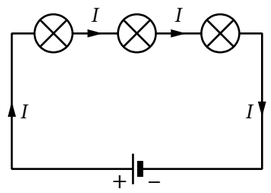
$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$

Rys. **15.23.** Pierwsze prawo Kirchhoffa dla pojedynczego węzła

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. 15.23).

Natężenie prądu przy połączeniu szeregowym

Przejdźmy teraz do połączenia szeregowego. Przez wszystkie elementy obwodu połączone szeregowo płynie prąd o takim samym natężeniu (rys. 15.24), co wynika z zasady zachowania ładunku. Ponieważ przy takim połączeniu ładunki nie mają skąd dopłynąć ani dokąd odpłynąć, więc natężenie prądu nie ulega zmianie.



Rys. **15.24.** 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

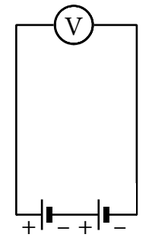
Napięcie przy połączeniu szeregowym

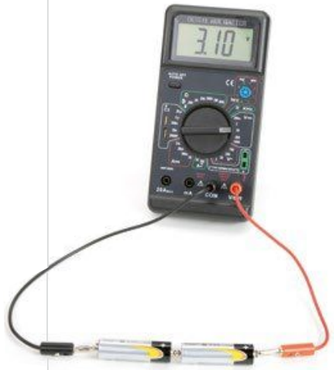
Zbadamy teraz, jakie napięcie wytwarza układ baterii połączonych szeregowo.

Doświadczenie 12 – 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?



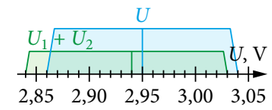


Analiza wyników doświadczenia

W naszym doświadczeniu otrzymaliśmy następujące wyniki:

- napięcie pierwszej baterii: $U_1 = 1{,}55\ \text{V} \pm 0{,}05\ \text{V}$
- napięcie drugiej baterii: $U_2 = 1{,}39\ \text{V} \pm 0{,}05\ \text{V}$
- napięcie połączonych baterii: $U = 2{,}95\ \text{V} \pm 0{,}09\ \text{V}$

Suma napięć baterii wynosi 2,94 V, co z dokładnością do niepewności pomiaru jest równe napięciu na połączonych bateriach.



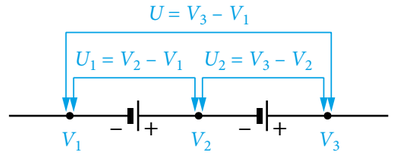
Rys. **15.25.** Wyniki pomiarów wraz z niepewnościami

> 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 15.26 mamy:

$$U_1 + U_2 = (V_2 - V_1) + (V_3 - V_2) = V_2 - V_1 + V_3 - V_2 = V_3 - V_1 = U$$

czyli ostatecznie otrzymujemy: $U_1 + U_2 = U$.



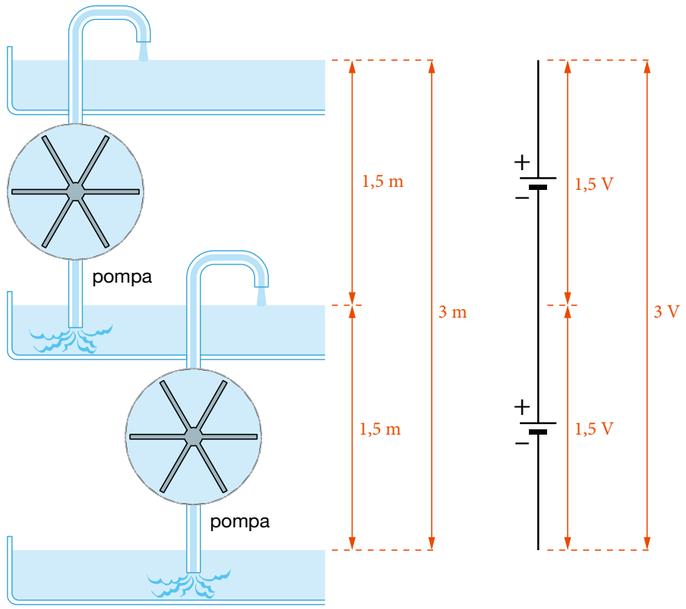
Rys. **15.26.** Dodawanie napięć baterii wynika z definicji napięcia jako różnicy potencjałów

Dodawanie napięć a model wodny

W modelu wodnym bateriom połączonym szeregowo odpowiadają pompy, pozwalające łącznie przenieść wodę na poziom wyższy niż za pomocą każdej z nich z osobna (rys. 15.27). Dodawaniu napięć odpowiada tutaj dodawanie wysokości:

$$1{,}5\ \text{m} + 1{,}5\ \text{m} = 3\ \text{m}$$

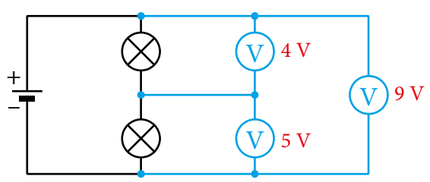
$$1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} = 3\ \text{V}$$



Rys. **15.27.** Porównanie szeregowego łączenia pomp i baterii

Dodawanie napięć na odbiornikach energii

Podobnie dodajemy napięcia na połączonych szeregowo żarówkach lub innych odbiornikach energii elektrycznej (rys. 15.28).

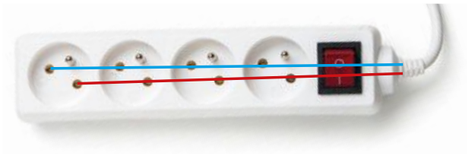


Rys. **15.28.** Przykład dodawania napięć przy szeregowym połączeniu odbiorników energii

Uzasadnienie jest takie samo: na rysunku 15.26 moglibyśmy zastąpić baterie żarówkami, a rozważania dotyczące potencjałów pozostałyby takie same.

Zastosowania połączeń równoległych

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. **15.29.** Gniazdka w przedłużaczu – a w konsekwencji podłączone do nich odbiorniki energii – są połączone równolegle

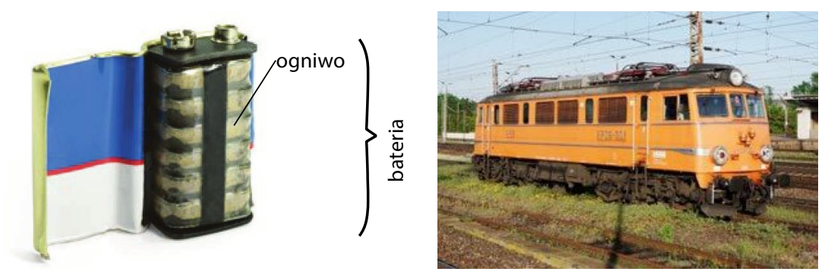
Rys. **15.30.** Połączone równolegle ogniwa D będziemy wykorzystywali w doświadczeniach dotyczących magnetyzmu (patrz → s. 270)

Także źródła napięcia możemy łączyć równolegle. Takie połączenie stosujemy w przypadku źródeł o jednakowym napięciu (rys. 15.30). Pozwala to uzyskać prąd o większym natężeniu.

Zastosowania połączeń szeregowych

Połączenia szeregowe stosujemy m.in. w bateriach i akumulatorach. Wyjaśnijmy przy tej okazji, że pojedyncze źródło napięcia działające dzięki przemianom chemicznym nazywamy tradycyjnie ogniwem, podczas gdy bateria to kilka ogniw połączonych szeregowo (rys. 15.31a). W praktyce jednak rzadko trzymamy się tak ścisłego rozróżnienia i ogniwa także nazywamy bateriami. Prawdopodobnie trudno byłoby nam zrobić zakupy, gdybyśmy poprosili w sklepie o „ogniwo AA”.
Pojedyncze ogniwo ze względu na zachodzące w nim reakcje chemiczne może wytwarzać napięcie między 1,5 V a 2 V. Jeśli potrzebne nam jest napięcie wyższe, ogniwa łączymy szeregowo.
W starszych typach polskich lokomotyw elektrycznych (rys. 15.31b), zasilanych z sieci pod napięciem 3000 V, są stosowane silniki przystosowane do napięcia 1500 V połączone parami szeregowo.

a) **b)**



Rys. **15.31.** Zastosowania połączeń szeregowych

Lampki choinkowe bywają połączone albo równolegle, albo szeregowo. Jak rozpoznać, z którym połączeniem mamy do czynienia?

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) za to, że 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

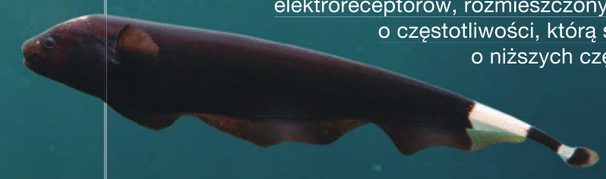
Narządy elektryczne tej ryby mogą wytwarzać napięcie ok. 10 V, służące do elektrolokacji i komunikacji, ale również impulsy o napięciu nawet 600 V i natężeniu prądu poniżej 1 A, dzięki którym są w stanie ogłuszyć lub zabić ofiarę. Strętwa jest nazywana potocznie węgorzem elektrycznym, choć nie jest blisko 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, którą 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 swoich ofiar.

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

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Czy żarówki na rysunku I połączono równolegle czy szeregowo?

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).

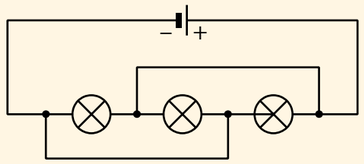
Sporządzanie nowego rysunku rozpoczynamy od narysowania źródła napięcia (rys. III).

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).

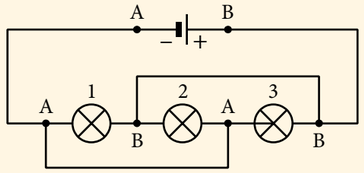
Następnie w analogiczny sposób dorysowujemy kolejne żarówki. Z otrzymanego w ten sposób schematu możemy odczytać, że wszystkie żarówki są połączone równolegle (rys. V).

Odpowiedź: Żarówki są połączone równolegle.

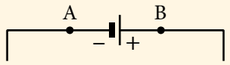
I



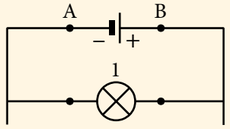
II



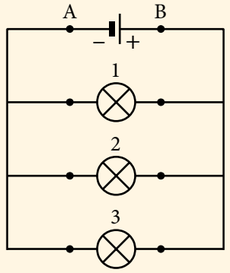
III



IV

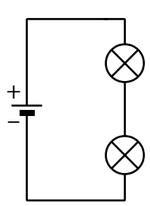


V

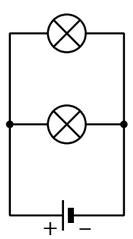


1. Określ, czy żarówki na schematach połączono równolegle czy szeregowo. Pamiętaj, że zależy to od połączeń między nimi, a nie od sposobu rozmieszczenia symboli na rysunku.

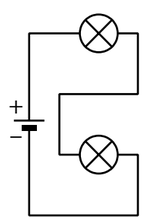
A.



B.

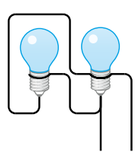


C.

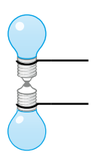


2. Jak połączono żarówki: szeregowo czy równolegle? A może jeszcze inaczej?

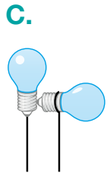
A.



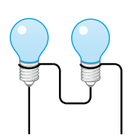
B.



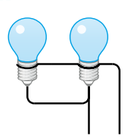
C.



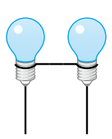
D.



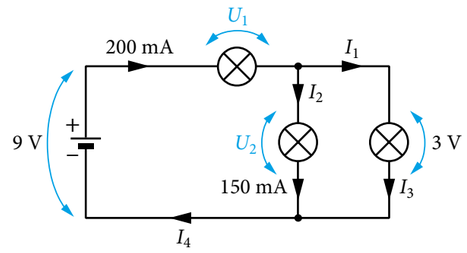
E.



F.

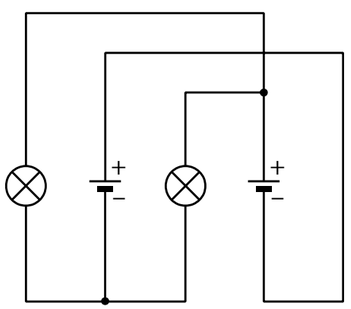


3. Oblicz wartości napięć U_1 i U_2 oraz natężeń I_1, I_2, I_3 i I_4 w obwodzie przedstawionym na schemacie.

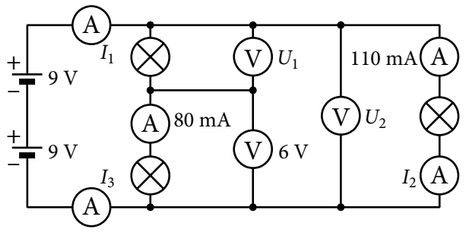


4. Na podstawie wskazań mierników podaj napięcie między biegunami baterii.

5. P 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. Przeanalizuj poniższy schemat. Oblicz brakujące napięcia i natężenia prądu.



7. Stwierdziliśmy, że przy połączeniu szeregowym elementów obwodu natężenie prądu jest takie samo w każdym jego punkcie. Sprawdź to doświadczalnie.

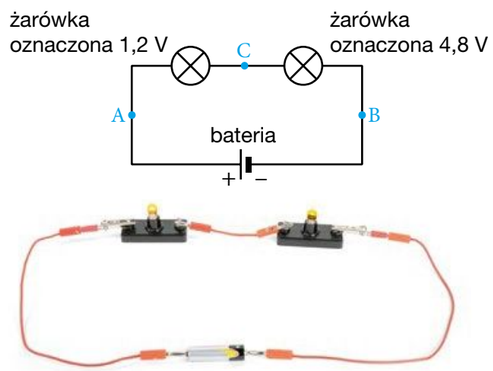
a) Przygotuj baterię AA (o napięciu 1,5 V), dwie żarówki: jedną dostosowaną do napięcia 4,8 V, a drugą do napięcia 1,2 V, amperomierz i przewody.

b) Połącz żarówki szeregowo i podłącz do baterii (patrz schemat i zdjęcie).

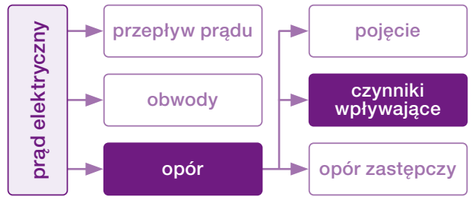
c) Zmierz natężenie prądu w punktach obwodu oznaczonych na schemacie literami. Zapisz w zeszycie wyniki wraz z niepewnością pomiaru.

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.



15.5 Opór a temperatura



Ważne w tej lekcji:
- żarówka a prawo Ohma,
- wpływ temperatury na opór,
- półprzewodniki.

Przypomnij sobie:
- Prawo Ohma: natężenie prądu płynącego przez przewodnik jest wprost proporcjonalne do napięcia między jego końcami.
- Opór elektryczny przewodnika możemy obliczyć jako iloraz napięcia między końcami przewodnika i natężenia prądu przez niego płynącego.

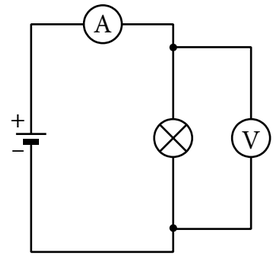
Zależność oporu przewodnika od temperatury

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, oraz takiego, którego temperaturę utrzymujemy na stałym poziomie.

Doświadczenie 13 – obowiązkowe

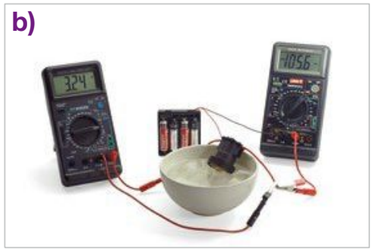
Charakterystyka prądowo-napięciowa żarówki

1. Przygotuj wodę destylowaną lub zdemineralizowaną, 8 ogniw 1,5 V i oprawkę lub magnesy do ich łączenia, tradycyjną żarówkę sieciową i oprawkę, 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.
6. Wyznacz niepewność pomiaru napięcia i natężenia.
7. Na podstawie danych z tabeli sporządź wykres zależności $I(U)$ wraz z zaznaczonymi niepewnościami pomiarowymi.
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. Włóż żarówkę do miski z wodą i lodem (zdjęcie b), a następnie ponownie wyznacz jej charakterystykę prądowo-napięciową metodą opisaną wyżej.



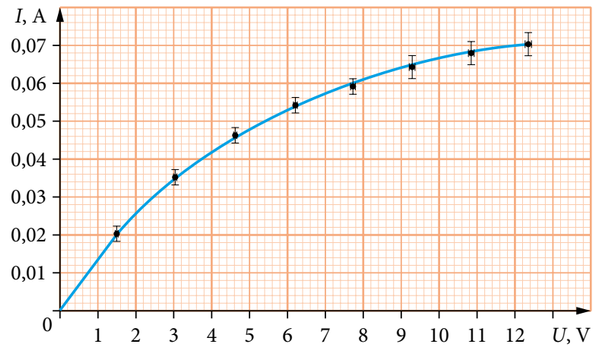
a)

b)



Analiza wyników doświadczenia

Na początek przeanalizujmy wyniki pomiarów opisanych w punktach 3–5, czyli charakterystykę prądowo-napięciową żarówki przed jej rozbiciem. Wyniki pomiarów wraz z niepewnościami pomiarowymi zaznaczyliśmy w układzie współrzędnych (rys. 15.32).



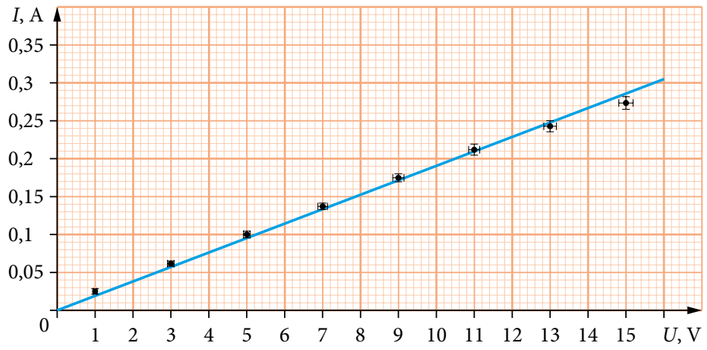
Rys. **15.32.** Wykres zależności natężenia prądu od napięcia, sporządzony dla naszych danych otrzymanych w doświadczeniu 13.

Punkty układają się nie wzdłuż jednej prostej, ale wzdłuż krzywej o zmniejszającym się nachyleniu. Oznacza to, że natężenie prądu

płynącego przez żarówkę nie było wprost proporcjonalne do napięcia na tej żarówce. Żarówka nie spełniała więc prawa Ohma. Innymi słowy, jej opór zmieniał się w kolejnych pomiarach. Im większe napięcie przykładaliśmy do żarówki, tym większy stawał się opór jej włókna.

Użyliśmy wody zdemineralizowanej, czyli pozbawionej jonów, a tym samym – nieprzewodzącej prądu.

Przyczynę tego zjawiska wyjaśnia wynik drugiej części doświadczenia, gdy temperatura włókna żarówki była stała (wydzielane ciepło było oddawane do wody z lodem).
Okazało się, że w tym przypadku natężenie było proporcjonalne do napięcia (rys. 15.33).



Rys. **15.33.** Wykres zależności *I*(*U*) dla włókna żarówki w stałej temperaturze

Widzimy więc, że wolfram, z którego jest wykonane włókno żarówki, w stałej temperaturze spełnia prawo Ohma.
Zmiana oporu zaobserwowana w pierwszej części doświadczenia wynikała nie bezpośrednio ze zwiększania się przyłożonego napięcia, ale ze wzrostu temperatury włókna.

Zależność oporu od temperatury dla różnych substancji

Dla większości metali opór rośnie z temperaturą, podobnie jak to zaobserwowaliśmy w doświadczeniu 13. (rys. 15.32). Dzieje się tak dlatego, że w wyższej temperaturze elektrony poruszają się szybciej, więc częściej zderzają się z jonami i tracą więcej energii. Również szybsze drgania jonów powodują, że te zderzenia następują częściej.

> Opór przewodnika rośnie z temperaturą.

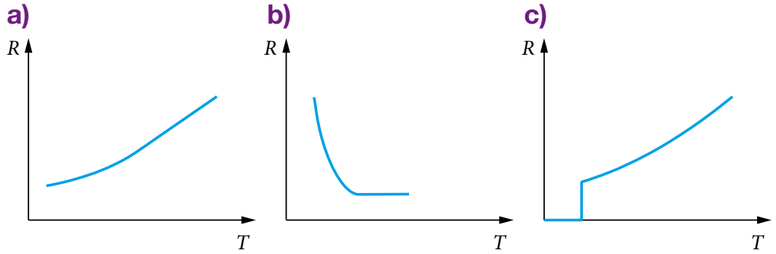
Półprzewodniki

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.

Oprócz tych dwóch grup wyróżniamy jeszcze **półprzewodniki**. Jak łatwo się domyślić, przewodzą one prąd lepiej niż izolatory, ale gorzej niż przewodniki. Najważniejsze jednak, że ich opór może się znacznie zmieniać pod wpływem czynników zewnętrznych, np. światła.
Jak to możliwe? Jak wiesz, w metalach znajdują się swobodne elektrony, których uporządkowany przepływ to prąd elektryczny. 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 większe natężenie prądu może w nim popłynąć pod wpływem przyłożonego napięcia, co oznacza spadek oporu półprzewodnika.
Dlatego opór półprzewodnika wraz z temperaturą maleje aż do granicznej wartości, kiedy wszystkie dostępne ładunki zostaną wykorzystane do przewodzenia prądu.



Rys. **15.34.** Schematyczny wykres zależności oporu od temperatury dla: a) przewodnika, b) półprzewodnika, c) nadprzewodnika

Nadprzewodniki

Niektóre substancje (przewodniki lub półprzewodniki) podczas ochładzania wykazują się nietypową własnością. Otóż gdy temperatura takiej substancji spadnie poniżej pewnej wartości granicznej, jej opór spada do zera w sposób skokowy (rys. 15.34c). Taką substancję nazywamy **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, na przykład takiej jak przedstawiono na rysunku 15.35.

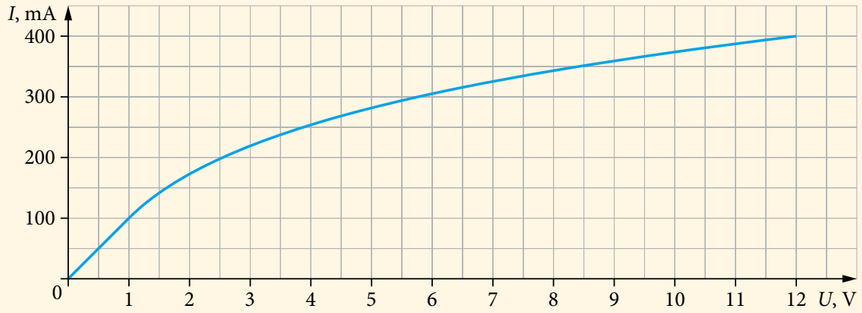
Rys. **15.35.** W aparacie do rezonansu magnetycznego wykorzystujemy cewkę (zwojnicę) z nadprzewodnika

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 podłączono do napięcia 12 V. Przy jakim oporze R napięcie na oporniku będzie równe napięciu na żarówce?



Dane: **wykres $I(U)$**, $U_b = 12$ V – napięcie, do którego został podłączony układ
Szukane: R – opór opornika

Rozwiązanie:

W treści zadania powiedziano, że napięcie na żarówce jest takie samo 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 napięciu 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: Napięcie na oporniku będzie równe napięciu na żarówce, jeżeli opór R wyniesie 20 Ω.

1. P 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 napięcie na oporniku będzie równe połowie napięcia na żarówce?

2. 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?

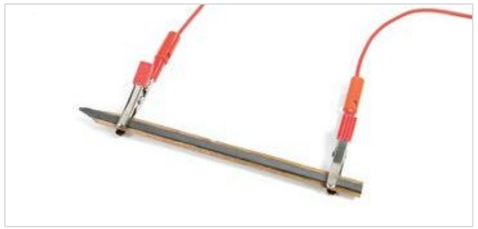
3. Na podstawie wykresu umieszczonego w przykładzie oblicz opór zimnego włókna opisanej tam żarówki.

4. Przygotuj żarówkę 4,8 V. Odczytaj z jej obudowy informację o natężeniu prądu, który płynie przez tę żarówkę po podłączeniu jej do napięcia znamionowego (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.

5. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj bardzo miękki ołówek: B8 albo B9 (w twardszych ołówkach grafit zmieszany jest z glinką, przez co traci interesujące nas właściwości).

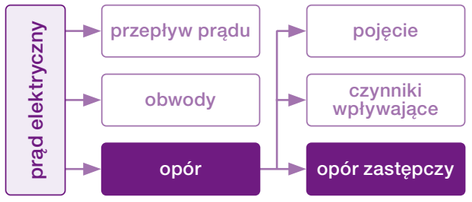
b) Za pomocą nożyka **ostrożnie** usuń drewno z jednej strony ołówka tak, aby grafit lekko wystawał z niego na całej długości (patrz zdjęcie). Podłącz krokodylki do grafitu.

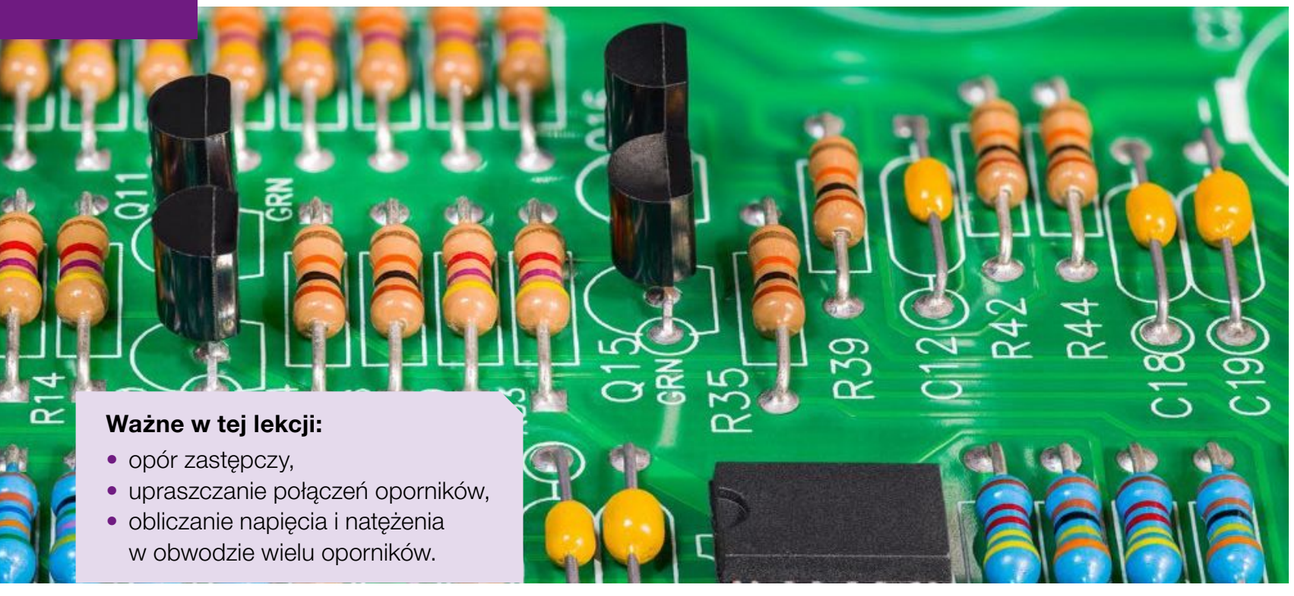


c) Zbadaj charakterystykę prądowo-napięciową grafitu, podobnie jak to robiliśmy dla żarówki w doświadczeniu obowiązkowym na s. 184–185 (ale bez chłodzenia w wodzie).

d) Grafit ma pewne właściwości przewodników oraz pewne właściwości półprzewodników. Czy pod względem zależności oporu od temperatury zachowuje się jak przewodnik czy jak półprzewodnik?

15.6 Łączenie oporników





Ważne w tej lekcji:

- opór zastępczy,
- upraszczanie połączeń oporników,
- obliczanie napięcia i natężenia w obwodzie wielu oporników.

Przypomnij sobie:

- Iloraz napięcia i natężenia nazywamy oporem.
- Natężenia prądów płynących przez elementy połączone szeregowo są jednakowe, a napięcia na takich elementach się sumują.
- Napięcia na elementach połączonych równolegle są jednakowe, a natężenia prądu się sumują.

Opór zastępczy

Układ kilku połączonych oporników zawsze można zastąpić jednym opornikiem o oporze R_Z, nazywanym **oporem zastępczym układu**.
W technice umiejętność wyznaczania oporu zastępczego pozwala nam nie tylko zastąpić kilka oporników jednym, lecz także zbudować układ o oporze, dla którego nie jest dostępny pojedynczy opornik.
W tej lekcji zajmiemy się obliczaniem oporu zastępczego. Odpowiednie wzory wyprowadzimy na podstawie znanych już praw opisujących przepływ prądu. Zaczniemy jednak od doświadczenia.

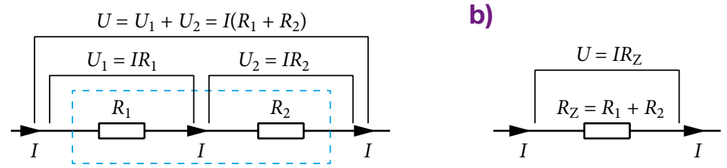
Doświadczenie 14

1. Przygotuj dwa jednakowe oporniki i omomierz.
2. Zastanów się, jaki opór będą miały oporniki wtedy, gdy połączymy je równolegle, a jaki – gdy połączymy je szeregowo.
3. Zapisz swoje przewidywania wraz z uzasadnieniem.
4. Wykonaj odpowiednie pomiary, aby sprawdzić swoje przypuszczenia. Czy się potwierdziły?

Połączenie szeregowe oporników

Przeanalizujmy sytuację, w której dwa oporniki R_1 i R_2 są połączone szeregowo (rys. 15.36a). Płynie przez nie prąd o natężeniu I.

Połączenie szeregowe → s. 174



Rys. **15.36.** Wyznaczanie oporu zastępczego oporników połączonych szeregowo

Ze wzoru $R = \frac{U}{I}$ wyznaczamy napięcie $U = IR$. Spadek napięcia na pierwszym oporniku wynosi więc IR_1, a na drugim IR_2. Wobec tego łączny spadek napięcia na tych opornikach wynosi:

$$U = I(R_1 + R_2)$$

Spadek napięcia na oporniku to napięcie między jego końcówkami.

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. 15.36b). Widzimy też, że gdyby więcej oporników połączono szeregowo, to ich opory także należałoby dodać.

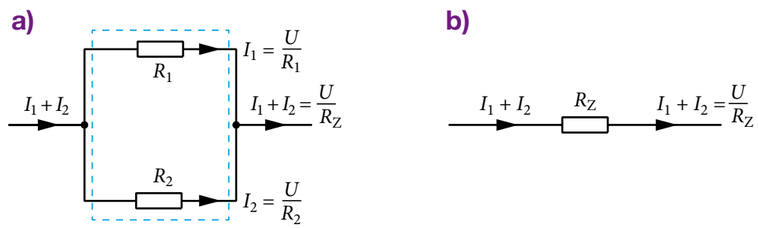
> Opór zastępczy oporników połączonych szeregowo jest równy sumie ich oporów:
>
> $$R_Z = R_1 + R_2 + ... + R_n$$

gdzie: R_1, R_2, ..., R_n – opory poszczególnych oporników.

W doświadczeniu sprawdziłeś, że opór dwóch jednakowych oporników R połączonych szeregowo równy jest $2R$, co jest szczególnym przypadkiem opisanej zależności.

Połączenie równoległe oporników

Przeanalizujmy, co się dzieje w sytuacji, gdy oporniki są połączone równolegle (rys. 15.37a).



Rys. **15.37.** Wyznaczanie oporu zastępczego oporników połączonych równolegle

Napięcie na każdym z nich wynosi U. Płyną przez nie prądy o natężeniach:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad \text{i} \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

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:

$$I = I_1 + I_2$$

$$\frac{U}{R_Z} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Dla większej liczby oporników prąd I rozdzieli się na więcej części – otrzymamy analogiczny wzór z większą liczbą składników po prawej stronie.

Odwrotność oporu zastępczego oporników połączonych równolegle jest równa sumie odwrotności oporów poszczególnych oporników:

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

W szczególności dla dwóch jednakowych oporników R połączonych równolegle mamy:

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{2}{R}$$

czyli $R_Z = \frac{R}{2}$, tak jak powinieneś otrzymać w doświadczeniu.

Porównanie oporu zastępczego z oporem oporników

Zauważmy, że zgodnie z powyższymi wzorami:

- opór zastępczy oporników połączonych szeregowo jest większy niż opór każdego z oporników,
- opór zastępczy oporników połączonych równolegle – mniejszy od oporu każdego z oporników.

Gdy skorzystamy z porównania prądu do przepływu wody, możemy porównać:

- prąd płynący przez oporniki połączone szeregowo do wody płynącej przez kilka rur po kolei,
- prąd płynący przez oporniki połączone równolegle do wody płynącej przez równoległe rury.

Jest jasne, że na większy opór napotka woda w pierwszym przypadku.

Na przykład:
połączenie szeregowe
$4 + 4 = 8$; $8 > 4$,
połączenie równoległe
$\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$; $2 < 4$.

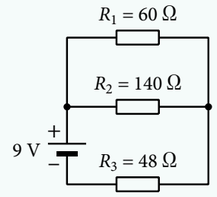
Bardziej złożone układy

Aby obliczyć opór zastępczy bardziej skomplikowanego obwodu, najczęściej możemy go podzielić na mniejsze części, składające się z samych połączeń równoległych lub z samych połączeń szeregowych (patrz „Jest na to sposób” na następnej stronie). W rzadkich sytuacjach, gdy nie jest to możliwe, korzystamy z drugiego prawa Kirchhoffa, o którym powiemy w lekcji 15.10.

JEST NA TO SPOSÓB

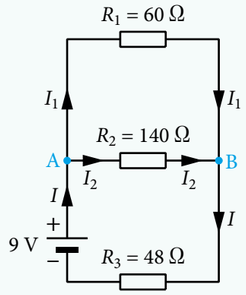
Jak analizować układ wielu oporników

Dla obwodu, którego schemat przedstawiono obok, oblicz napięcie na każdym z oporników i natężenie płynącego przez nie prądu. Napięcie na baterii wynosi 9 V.



PRZEANALIZUJ ROZWIĄZANIE KROK PO KROKU

Krok 1. **Rozkładamy obwód na mniejsze części, połączone równolegle lub szeregowo**

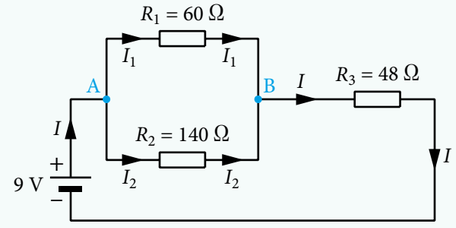


Rodzaj połączenia zależy od tego, jak płynie prąd, a nie od tego, jak oporniki są rozmieszczone na rysunku.

W naszym przypadku prąd wypływający z baterii rozdziela się na dwie części w punkcie A. Jedna z tych części płynie przez R_1, a druga – przez R_2.

Następnie w punkcie B obie części się łączą, więc przez R_3 płynie już cały prąd $I = I_1 + I_2$, czyli taki, jaki wypływał z baterii.

Oporniki R_1 i R_2 są połączone równolegle, ale tworzony przez nie układ jest połączony szeregowo z R_3. Warto, zwłaszcza przy małej wprawie, przerysować obwód tak, aby rodzaj połączeń był oczywisty.



Wygodnie oznaczać natężenia i napięcia tymi samymi numerami co oporniki.

Krok 2. **Obliczamy opór zastępczy układu wszystkich oporników**

Oporniki R_1 i R_2 są połączone równolegle, a więc ich opór zastępczy R_{12} możemy obliczyć z zależności:

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \rightarrow \quad R_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Opór zastępczy oporników R_1 i R_2 wygodnie jest oznaczyć jako R_{12}.

Stąd po podstawieniu danych otrzymamy:

$$R_{12} = \frac{1}{\frac{1}{60\ \Omega} + \frac{1}{140\ \Omega}} = 42\ \Omega$$

Czyli opór zastępczy oporników R_1 i R_2 wynosi:

$$R_{12} = 42\ \Omega$$

Te oporniki można by więc zastąpić jednym opornikiem o oporze 42 Ω, połączonym z R_3 szeregowo. Zatem opór zastępczy wszystkich oporników wynosi:

$$R_Z = R_{12} + R_3 = 42\ \Omega + 48\ \Omega = 90\ \Omega$$

Krok 3. **Obliczamy natężenie prądu wypływającego z baterii**

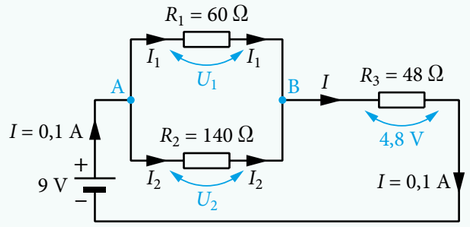
Z baterii wypływa prąd taki, jakbyśmy do niej podłączyli opornik $R_Z = 90\ \Omega$. Natężenie tego prądu wynosi:

$$I = \frac{U}{R_Z} = \frac{9\ \text{V}}{90\ \Omega} = 0{,}1\ \text{A}$$

Krok 4. **Obliczamy napięcia i natężenia dla poszczególnych oporników**

Dla opornika R_3 znamy już natężenie prądu: $I = 0{,}1$ A. Stąd łatwo obliczyć napięcie na tym oporniku:

$$U_3 = I\,R_3 = 0{,}1\ \text{A} \cdot 48\ \Omega = 4{,}8\ \text{V}$$



Kiedy zaznaczymy je na schemacie, łatwo zauważymy, jak obliczyć napięcie na pozostałych opornikach:

$$U_1 = U_2 = 9\ \text{V} - U_3 = 4{,}2\ \text{V}$$

Skoro je znamy, możemy obliczyć natężenia prądów płynących przez poszczególne oporniki:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{4{,}2\ \text{V}}{60\ \Omega} = 0{,}07\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{4{,}2\ \text{V}}{140\ \Omega} = 0{,}03\ \text{A}$$

Warto teraz sprawdzić, czy $I_1 + I_2 = I$.

Odpowiedź: Napięcie na opornikach R_1 i R_2 wynosi 4,2 V, a na oporniku R_3 jest równe 4,8 V. Natężenie prądu płynącego przez opornik R_1 to 70 mA, przez opornik R_2 to 30 mA, a przez opornik R_3 to 100 mA.

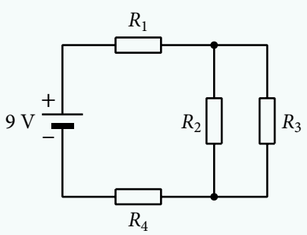
Uwaga. Można też zauważyć, że skoro:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{140\ \Omega}{60\ \Omega} = \frac{7}{3}$$

to prąd $I = 0{,}1$ A dzieli się w stosunku 3 : 7 między te oporniki.

Sprawdź, czy rozumiesz

Zadanie. W obwodzie przedstawionym obok każdy z oporników ma ten sam opór 300 Ω. Oblicz opór zastępczy układu, a następnie napięcie na oporniku R_2 i natężenie prądu, który przez niego płynie.



Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

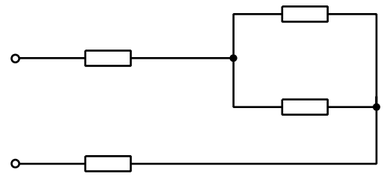
1. Dwa oporniki, z których każdy ma opór 1 kΩ, łączymy:

a) równolegle, **b)** szeregowo.

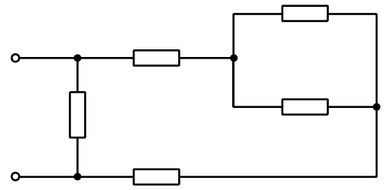
Oblicz opory zastępcze w obu przypadkach.

2. Oblicz opór zastępczy układów przedstawionych na rysunkach, jeśli wiadomo, że każdy z oporników wchodzących w ich skład ma opór 1 kΩ.

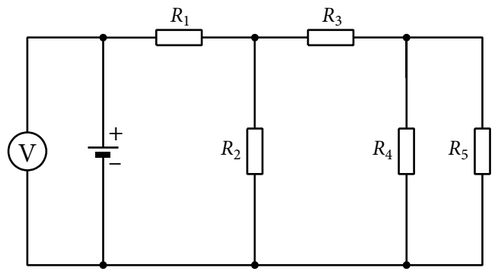
a)



b)



3. 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.



$R_1 = R_2 = 50\ \Omega$, $R_3 = R_4 = R_5 = 100\ \Omega$

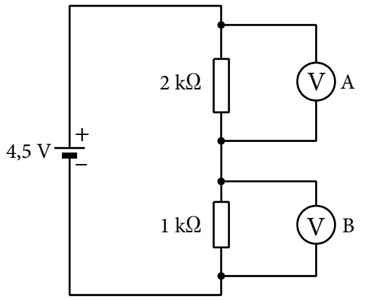
4. Na stronie 128 wśród zasad bezpiecznego zachowania podczas burzy wspominaliśmy o napięciu krokowym. Wyjaśnij sformułowane tam zasady na podstawie wiadomości z tej lekcji.

5. Opór wewnętrzny pewnego amperomierza laboratoryjnego wynosi 0,2 Ω. Mierzymy nim natężenie prądu płynącego przez opornik 20 Ω podłączony do źródła napięcia stałego 9 V. Oblicz, jaki wynik wskaże amperomierz i jaki wynik wskazałby idealny amperomierz o zerowym oporze wewnętrznym. Porównaj różnicę między tymi wielkościami z niepewnością amperomierza wynoszącą 1% zmierzonej wielkości.

6. Przyjrzyj się poniższemu schematowi.

a) Jakie napięcie wskazuje woltomierz A, a jakie woltomierz B?

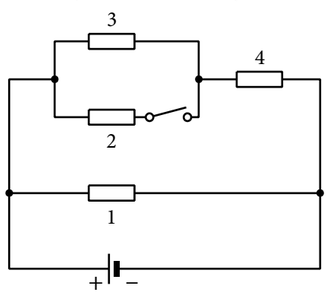
b) Przedstawiony układ nazywamy dzielnikiem napięcia. Wyjaśnij dlaczego.



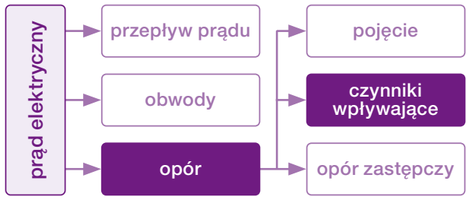
7. Na schemacie przedstawiono układ czterech oporników o oporze 100 Ω każdy, podłączonych do baterii o napięciu $U = 9$ V. Oblicz spadki napięć na opornikach i natężenie prądu płynącego przez każdy opornik w sytuacji, gdy:

a) wyłącznik jest otwarty,

b) wyłącznik jest zamknięty.



15.7 Od czego zależy opór elektryczny



Ważne w tej lekcji:
- opór a rozmiary przewodnika,
- opór właściwy substancji.

Przypomnij sobie:
- 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:
$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

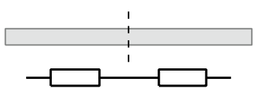
Od czego zależy opór przewodnika

Wiemy już z lekcji 15.5, że opór przewodnika zależy od temperatury. A od czego jeszcze?
Okazuje się, że są trzy czynniki wpływające na opór w stałej temperaturze:
- długość przewodnika,
- pole jego przekroju poprzecznego,
- materiał, z którego został wykonany.

Omówimy teraz te czynniki po kolei.

Długość przewodnika

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. 15.38).

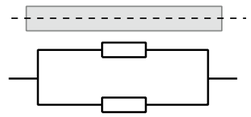


Rys. **15.38.** Dłuższy przewodnik możemy wyobrazić sobie jako dwa krótsze przewodniki (oporniki) połączone szeregowo

Ogólnie można powiedzieć, że opór elektryczny przewodnika jest wprost proporcjonalny do jego długości.

Grubość (przekrój poprzeczny) przewodnika

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. 15.39).
Ze wzoru na opór zastępczy oporników połączonych równolegle wynika, że ten grubszy przewodnik ma dwukrotnie mniejszy opór niż cieńszy.
Ogólnie opór elektryczny przewodnika jest odwrotnie proporcjonalny do pola jego przekroju poprzecznego.

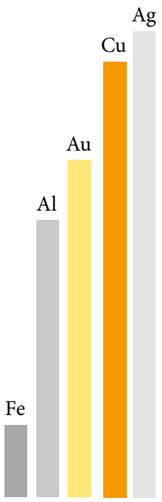


Rys. **15.39.** Grubszy przewodnik możemy wyobrazić sobie jako dwa cieńsze przewodniki połączone równolegle

Substancja i jej opór właściwy

Jeśli przewody aluminiowy i miedziany mają takie same wymiary, to większy opór ma przewód aluminiowy. Wynika to z różnicy w budowie tych metali. W aluminium elektrony swobodne częściej zderzają się z jonami sieci krystalicznej niż w miedzi, przez co tracą na zderzenia większą energię, co obserwujemy jako większy opór. Mówimy, że aluminium ma większy **opór właściwy** niż miedź.

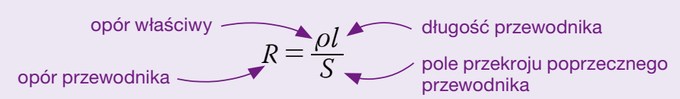
Opór właściwy substancji to wielkość określająca opór wykonanego z tej substancji przewodnika o jednostkowym polu przekroju poprzecznego i jednostkowej długości.



Rys. **15.40.** Przewodniki o tym samym oporze i przekroju poprzecznym wykonane z różnych metali mają różną długość

Wzór na opór przewodnika

Opisane zależności możemy zapisać w postaci jednego wzoru:

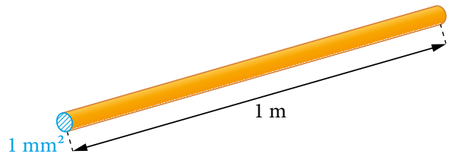


Kiedy powyższy wzór przekształcimy do postaci $\rho = \frac{RS}{l}$ i przeliczymy jednostkę, zobaczymy, że jednostką oporu właściwego jest:

$$[\rho] = 1\,\Omega \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}} = 1\,\Omega \cdot \mathrm{m}$$

ρ – to mała grecka litera ro

Opór właściwy jest więc liczbowo równy oporowi przewodnika o długości 1 m i o polu przekroju poprzecznego 1 m^2.
Przewodniki nie przypominają jednak wyglądem sześcianu o boku 1 m, na ogół są długie i cienkie. Dlatego też często można się spotkać z inną jednostką oporu właściwego: $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$. Wyrażony w niej opór właściwy jest liczbowo równy oporowi przewodnika o długości 1 m i powierzchni przekroju poprzecznego 1 mm^2, czyli bardziej pasuje do wymiarów przewodów używanych w praktyce.
Wartości oporu właściwego wybranych substancji znajdziesz w tabeli 6. na s. 353.



Rys. **15.41.** Ten miedziany przewód ma opór 0,0171 Ω, ponieważ opór właściwy miedzi wynosi 0,0171 $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

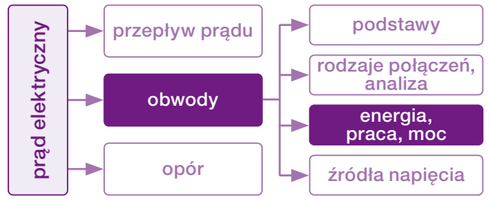
1. Oblicz opór przewodu miedzianego o średnicy 0,3 mm i długości 5 m.

2. Z takiej samej ilości metalu wykonano dwa przewody, przy czym pierwszy z nich jest dwa razy dłuższy od drugiego. Który z nich ma większy opór? Ile razy?

3. Oblicz, jaką średnicę powinien mieć przewód aluminiowy o przekroju kołowym, aby 1 km tego przewodu miał opór 10 Ω.

4*. Dlaczego prąd o dużym natężeniu przesyła się przewodami o dużej średnicy? Wymień dwa powody.

15.8 Praca i moc prądu elektrycznego



Ważne w tej lekcji:
- obliczanie pracy i mocy,
- kilowatogodzina,
- zależność mocy od oporu.

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 i tracą energię, która zmienia się w energię ruchu tych jonów, co obserwujemy jako wzrost temperatury przewodnika.
Nie jest to jednak jedyny możliwy powód utraty energii przez elektrony.
- W silniku elektrycznym hamują one na skutek oddziaływania z magnesem.
- W diodzie świecącej elektron skokowo zmniejsza swoją energię, wypromieniowując ją jako światło.

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, wyzwolona energia zależy wyłącznie od wielkości opisujących przepływ prądu: napięcia, natężenia i czasu.

O działaniu silnika elektrycznego → s. 300–301

Podobnie informacja, że wodospad ma wysokość 12 m, pozwoli stwierdzić, że na każdy litr spadającej wody przypada energia ok. 120 J (dokładniej: $12\ \text{m} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1\ \text{kg} = 117{,}72\ \text{J}$), a jeśli wiemy, ile litrów spada w ciągu sekundy, obliczymy energię wyzwoloną w danym czasie.

Obliczanie pracy

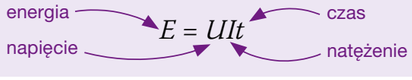
Rozważmy przykład: przez żarówkę podłączoną do napięcia 12 V prąd o natężeniu 2 A przepływał przez czas 30 s.
Na podstawie informacji o natężeniu i czasie przepływu możemy stwierdzić, że przez żarówkę przepłynął ładunek:

$$q = It = 2\ \text{A} \cdot 30\ \text{s} = 2\ \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot 30\ \text{s} = 60\ \text{C}$$

Z kolei informacja o napięciu oznacza, że na każdy 1 C, który przepłynął przez żarówkę, wyzwala się energia 12 J, a więc:

$$E = Uq = 12\ \text{V} \cdot 60\ \text{C} = 12\ \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot 60\ \text{C} = 720\ \text{J}$$

Jak widzisz, pomnożyliśmy napięcie, natężenie i czas przepływu prądu. Obliczenia na symbolach pokazują, że jest to ogólna reguła: $q = It$, $E = Uq$, więc:



Praca wykonana przez prąd elektryczny jest równa przetworzonej energii, a więc również $W = UIt$.

Moc prądu elektrycznego

Moc, podręcznik cz. 1 → s. 204

Jak już wiesz, szybkość wykonywania pracy i ogólnie szybkość przemian energii nazywamy mocą:

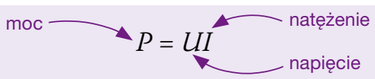
$$P = \frac{E}{t}$$

W przypadku mocy pobieranej przez urządzenia elektryczne:

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

Tak więc:

$\text{V} \cdot \text{A} = \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \frac{\text{C}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$



W układzie SI energię wyrażamy w dżulach, a moc – w watach (przy czym wat to dżul na sekundę).

Kilowatogodzina

Inna jednostka energii elektrycznej to kilowatogodzina, równa energii pobranej przez urządzenie o mocy 1 kW w czasie 1 h:

$$1\ \text{kWh} = 1\ \text{kW} \cdot 1\ \text{h} = 1000\ \text{W} \cdot 3600\ \text{s} = 3\,600\,000\ \text{J}$$

Jest ona używana w energetyce, m.in. przy obliczaniu opłat za energię elektryczną.

Moc a opór – doświadczenie

Zbadamy teraz, jaki związek ma opór elektryczny z mocą.

Doświadczenie 15

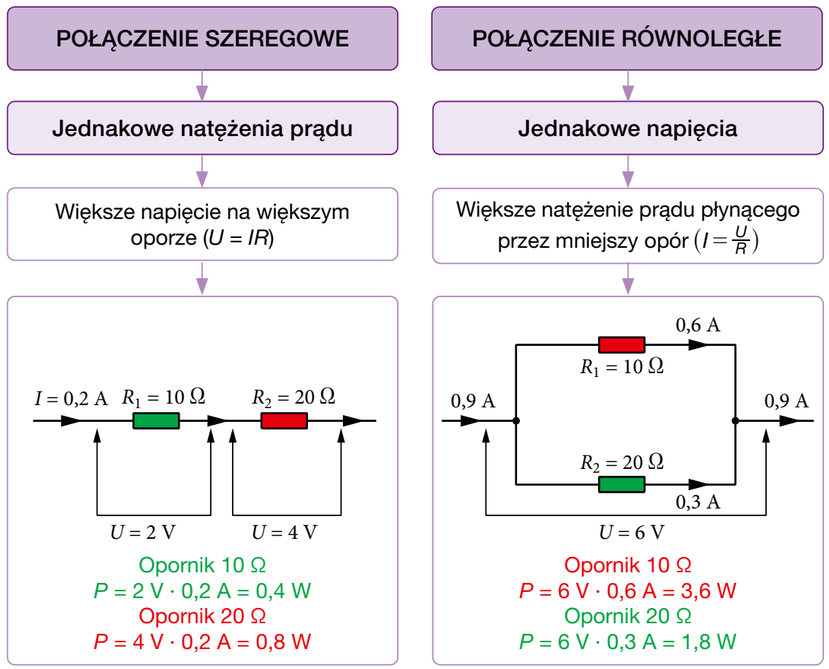
1. Przygotuj dwa ogniwa 1,5 V oraz dwie żarówki: 1,2 V / 0,3 A i 2,2 V / 0,3 A.
2. Połącz żarówki równolegle i podłącz je do baterii zbudowanej z dwóch ogniw 1,5 V połączonych szeregowo (zdjęcie a). Która żarówka świeci jaśniej?
3. Połącz żarówki szeregowo i ponownie podłącz je do tej samej baterii (zdjęcie b). Która żarówka świeci jaśniej?
4. Porównaj wyniki obserwacji i spróbuj na ich podstawie wyjaśnić przebieg doświadczenia.

a)

b)

Napięcie znamionowe – napięcie, do którego jest dostosowane dane urządzenie, np. żarówka.

Przyczyną różnej jasności żarówek (świadczącej o ich różnej mocy) jest różnica ich oporów. Dotyczy to także innych odbiorników energii elektrycznej. Przy połączeniu szeregowym większa moc wydziela się na większym oporze, a przy równoległym – na mniejszym. Wyjaśniamy to dla przykładowych danych na diagramie.



Moc a opór – ogólne wzory

Moc można wyrazić na dwa sposoby: w zależności od napięcia lub od natężenia. Aby to zrobić, ze wzoru $P = UI$ musimy wyeliminować niepotrzebną wielkość. W tym celu wyznaczamy ją z definicji oporu i podstawiamy.

Wzory te opisują w szczególności, ile ciepła wydziela się na skutek przepływu prądu. Nazywamy je ciepłem Joule'a-Lenza.

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

$$P = UI = IR \cdot I \qquad P = UI = \frac{U \cdot U}{R}$$

$$P = I^2R \qquad P = \frac{U^2}{R}$$

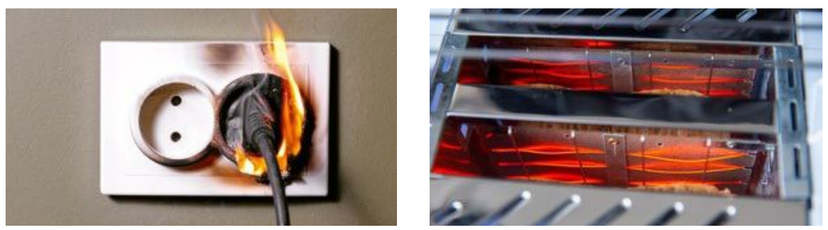
Z pierwszego z tych wzorów wynika, że gdy natężenie prądu jest stałe (np. przy połączeniu szeregowym), moc jest wprost proporcjonalna do oporu.
Drugi wzór możemy zastosować przy połączeniu równoległym – wtedy napięcie jest stałe, a moc jest odwrotnie proporcjonalna do oporu.
Między tymi stwierdzeniami nie ma sprzeczności, ponieważ dotyczą różnych sytuacji.

Przykłady praktyczne

Rozgrzewanie przewodów powoduje ich szybszą korozję, ona natomiast – dalsze zwiększenie oporu i jeszcze szybsze rozgrzewanie przewodów.

Kiedy jakieś urządzenie włączymy do gniazdka, łączący je przewód, styki w gniazdku i samo urządzenie można uważać za połączone szeregowo: prąd płynie przez te elementy kolejno.
Ponieważ jednak w miejscu połączenia wtyczki z gniazdkiem przewodniki nie są nigdy idealnie dopasowane, a do tego mogą być zabrudzone lub skorodowane, więc **mają duży opór**. Dlatego w tych miejscach wydziela się więcej ciepła, co przy przeciążeniu może doprowadzić do pożaru (rys. 15.42a).

a) b)



Rys. **15.42.** Wydzielanie ciepła

Z kolei same urządzenia włączone do sieci domowej są z sobą połączone równolegle, dzięki czemu każde z nich jest podłączone do tego samego napięcia 230 V. Aby elementy grzejne tostera wytwarzały dużo ciepła (rys. 15.42b), muszą mieć **niewielki opór** (choć znacznie większy niż przewody zasilające).

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 (czyli 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 $v = 18\ \frac{km}{h}$.

Dane: $\boldsymbol{m = 150\ kg}$ – masa wózka, $\boldsymbol{U_a = 12\ V}$ – napięcie na akumulatorze,
$\boldsymbol{v_{max} = 30\ \frac{km}{h}} = 8{,}33\ \frac{m}{s}$ – maksymalna prędkość wózka, $\boldsymbol{t = 6\ s}$ – czas rozpędzania,
$\boldsymbol{\eta = 80\%}$ – sprawność wózka, $\boldsymbol{F_{op} = 200\ N}$ – siły oporu,
$\boldsymbol{v = 18\ \frac{km}{h}} = 5\ \frac{m}{s}$ – prędkość wózka, dla której obliczamy natężenie prądu

Szukane: $\boldsymbol{I}$ – natężenie prądu przy prędkości $18\ \frac{km}{h}$

Rozwiązanie:

Ustalamy plan rozwiązania

Plan rozwiązania możemy ustalić „od końca”, to znaczy zastanawiając się, jakie wielkości pozwolą nam znaleźć odpowiedź, co potrzebne jest do wyznaczenia tych wielkości itd.

- Mamy obliczyć natężenie prądu płynącego przez silnik. Umiemy obliczyć napięcie, pod którym pracuje, więc brakuje nam mocy zużywanej energii elektrycznej.
- Tę moc obliczymy na podstawie sprawności, jeśli będziemy znać moc użyteczną.
- Do obliczenia mocy użytecznej przyda nam się siła powodująca rozpędzenie wózka.

Wyznaczamy siłę

Wózek porusza się ze stałym przyspieszeniem:

$$a = \frac{v_{max} - 0}{t} = \frac{v_{max}}{t}$$

co oznacza, że siła wypadkowa ma wartość:

$$F_w = ma = \frac{mv_{max}}{t}$$

Jednak na wózek działają także opory ruchu. Dopiero po ich uwzględnieniu otrzymujemy wzór na siłę F, która równoważy opory i nadaje wózkowi przyspieszenie.

$$F = \frac{mv_{max}}{t} + F_{op}$$

Wyznaczamy moc użyteczną

Patrz podręcznik cz. 1 → s. 206

Wiemy, że wzór na moc można zapisać w postaci:

$$P = Fv = \left(\frac{mv_{max}}{t} + F_{op}\right)v$$

Zauważ, że ta moc (a więc także szukane natężenie prądu) rośnie w miarę rozpędzania wózka.

Obliczamy moc prądu

Wiemy, że sprawność wózka wynosi $\eta = 80\%$. Moc prądu elektrycznego P_{el} związana jest z nią zależnością:

$$P = \eta P_{el}$$

Stąd po przekształceniu wzoru i podstawieniu danych moc prądu elektrycznego jest równa:

$$P_{el} = \frac{P}{\eta} = \frac{\left(\frac{mv_{max}}{t} + F_{op}\right)v}{\eta}$$

Obliczamy natężenie prądu

Aby obliczyć natężenie, wzór $P_{el} = UI$ przekształcamy do postaci:

$$I = \frac{P_{el}}{U} = \frac{\left(\frac{mv_{max}}{t} + F_{op}\right)v}{\eta U}$$

Wiemy, że wózek był zasilany trzema akumulatorami 12 V, zatem:

$$U = 3 \cdot 12\ \text{V} = 36\ \text{V}$$

Podstawiamy dane liczbowe i wyznaczamy jednostkę:

$$I = \frac{\left(\frac{150\ \text{kg} \cdot 8{,}33\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{6\ \text{s}} + 200\ \text{N}\right) \cdot 5\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0{,}8 \cdot 36\ \text{V}}$$

$$[I] = \frac{\left(\frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{s}} + \text{N}\right) \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{V}} = \frac{\left(\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + \text{N}\right) \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{V}} = \frac{\text{N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{V}} = \frac{\frac{\text{J}}{\text{s}}}{\text{V}} = \frac{\text{W}}{\text{V}} = \text{A}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $I = 71$ A.

Odpowiedź: Przez silnik w opisanej chwili płynie prąd o natężeniu 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, jaki przepływa w czasie 1 h, gdy natężenie prądu wynosi 1 mA.

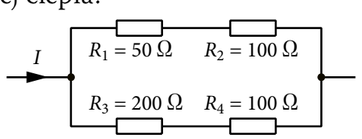
a) Przelicz 5200 mAh na kulomby.

b) Oblicz, ile czasu laptop może pracować bez przerwy od chwili, gdy akumulator był w pełni naładowany.

c) Oblicz energię zgromadzoną we w pełni naładowanym akumulatorze laptopa.

Uwaga. Przyjmij, że napięcie akumulatora nie zmienia się w miarę rozładowywania.

2. Na którym z oporników wydziela się najwięcej ciepła?



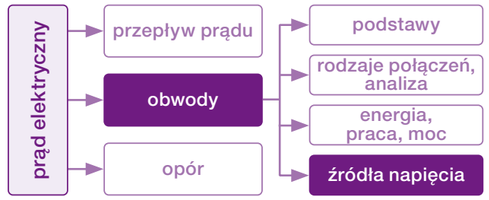
3. P Masa wózka elektrycznego wraz z kierowcą i ładunkiem wynosiła 400 kg. Podczas jazdy ze stałą prędkością 25 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ pojazd pobierał prąd o natężeniu 120 A z akumulatorów o napięciu 36 V. Po wyłączeniu silnika pojazd zatrzymał się bez hamowania po przejechaniu 20 m. Oblicz sprawność pojazdu (silnika i przekładni). Przyjmij, że opory ruchu są stałe.

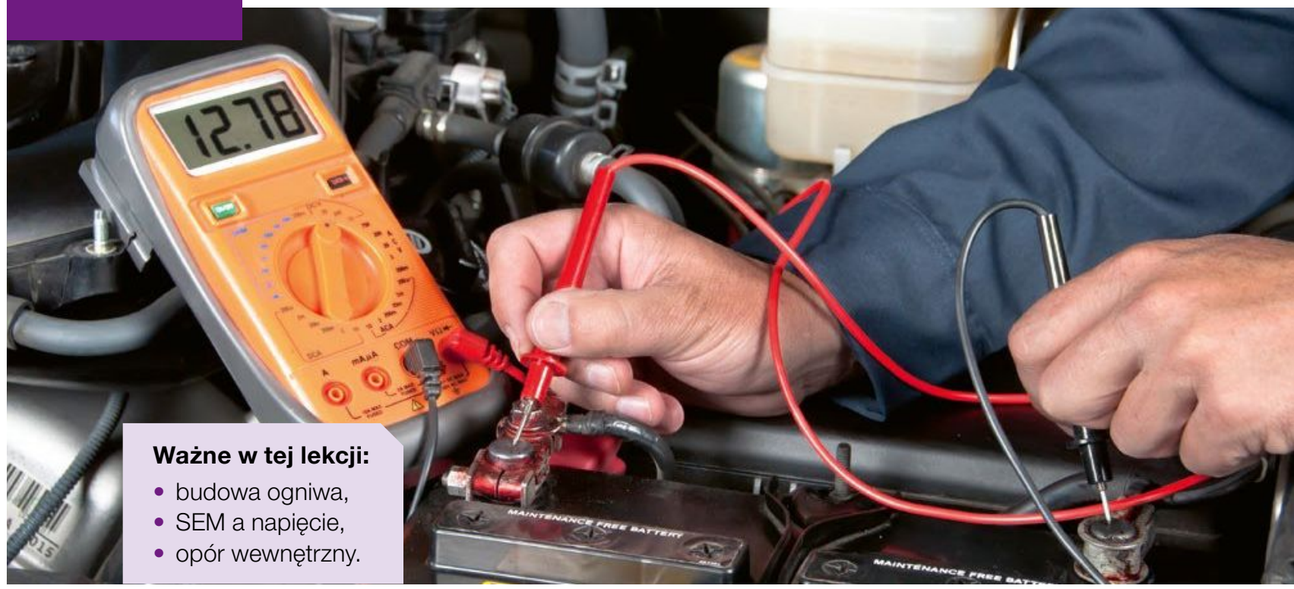
4. Do czajnika elektrycznego o mocy 2 kW nalano 2,5 l wody o temperaturze 10°C. Po włączeniu go do sieci domowej o napięciu 230 V woda zaczęła w nim wrzeć po 10 min.

a) Oblicz sprawność czajnika. Wyjaśnij, dlaczego sprawność czajnika nie jest równa 100%, chociaż grzałka zamienia całą dostarczoną energię elektryczną na ciepło.

b) Oblicz, ile kosztuje zagotowanie 1 litra wody w tym czajniku, jeżeli 1 kWh energii elektrycznej kosztuje 1,20 zł.

15.9 Siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny





Ważne w tej lekcji:
- budowa ogniwa,
- SEM a napięcie,
- opór wewnętrzny.

Przypomnij sobie:
- Kiedy prąd płynie przez przewodnik, napotyka opór.
- Opór przewodnika określamy wzorem $R = \frac{U}{I}$.
- Przy połączeniu szeregowym opory dodajemy.

Ogniwa

O źródłach napięcia wspominaliśmy już w poprzednich lekcjach. Teraz poznamy dokładniej ich właściwości.

Doświadczenie 16

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, aby odczytać napięcie między próbkami dla wszystkich możliwych par. Co zauważyłeś?

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 16. elektrolitem był sok z cytryny.

Rys. **15.43.** W urządzeniach elektrycznych i elektronicznych wykorzystujemy wiele typów ogniw

Fabryczne ogniwa, baterie i akumulatory

Ogniwa wykorzystywane w praktyce (rys. 15.43) 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 (różnica między ogniwem a baterią – patrz → s. 179).
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.

Czy napięcie ogniwa jest stałe

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 17

1. Przygotuj ogniwo 1,5 V, woltomierz i dwie żarówki 1,2 V.
2. Zmierz napięcie między 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)

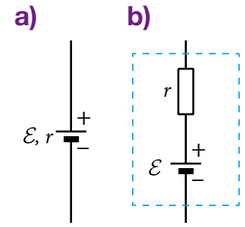
Mogliśmy zaobserwować, że napięcie między biegunami ogniwa zmniejszało się w miarę przepływu przez nie prądu o coraz większym natężeniu.

Z podobnymi spostrzeżeniami mamy do czynienia na co dzień. Jeśli w samochodzie najpierw włączymy reflektory, a dopiero potem będziemy uruchamiać silnik, to zauważymy, że w czasie pracy rozrusznika przygasają światła. Zatem napięcie między biegunami akumulatora się zmniejsza.

Opór wewnętrzny ogniwa

Przyczyną opisanego zjawiska jest to, że prąd napotyka na opór również wtedy, gdy płynie przez ogniwo. Wiąże się z tym pewien spadek napięcia – zupełnie tak, jakby w ogniwie znajdował się dodatkowy opornik (rys. 15.44).

Rzeczywiste źródło napięcia możemy przedstawić jako idealne źródło napięcia stałego połączone szeregowo z opornikiem, zwanym **oporem wewnętrznym**



Rys. **15.44.** Rzeczywiste źródło napięcia (a) i jego schemat zastępczy (b)

Siła elektromotoryczna a napięcie baterii

Idealne źródło wytwarzałoby napięcie, zwane tradycyjnie **siłą elektromotoryczną** (w skrócie SEM, symbol $\mathcal{E}$), które jest niezmienne. Jednak na oporze wewnętrznym następuje spadek napięcia uzależniony od natężenia prądu płynącego w obwodzie, czyli od podłączonego oporu zewnętrznego.

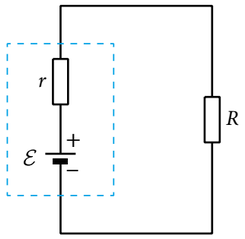
Napięcie między biegunami baterii jest równe różnicy siły elektromotorycznej $\mathcal{E}$ i spadku napięcia na oporze wewnętrznym r:

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

Rozważmy przykład baterii o SEM równej $\mathcal{E} = 9$ V i oporze wewnętrznym $r = 2\ \Omega$:

- Jeżeli z baterii czerpiemy prąd o natężeniu 0,3 A, to spadek napięcia na oporze wewnętrznym wynosi 0,6 V, a napięcie na baterii stanowi pozostałe 8,4 V.
- Jeżeli z baterii czerpiemy prąd o natężeniu 2 A, to spadek napięcia na oporze wewnętrznym wynosi 4 V, a napięcie na baterii to tylko 5 V.
- Kiedy prąd w ogóle nie płynie, nie ma spadku napięcia na oporze wewnętrznym i napięcie na baterii jest równe SEM (rys. 15.45).

Rys. **15.45.** Kiedy podłączamy woltomierz do nieobciążonej baterii, mierzymy jej SEM



Rys. **15.46.** Schemat obwodu z uwzględnieniem oporu wewnętrznego

Natężenie prądu w obwodzie zamkniętym

Kiedy do baterii podłączymy opornik (rys. 15.46), przez układ zacznie płynąć prąd. Jego natężenie możemy obliczyć na dwa sposoby.

Napięcie między biegunami baterii wynosi:

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

ale dla zewnętrznego oporu napięcie to:

$$U = IR$$

a więc:

$$IR = \mathcal{E} - Ir$$

Stąd mamy:

$$I(R + r) = \mathcal{E}$$

czyli:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Opór zewnętrzny i opór wewnętrzny są połączone szeregowo, więc ich opór zastępczy wynosi:

$$R + r$$

Napięcie idealnego źródła napięcia wynosi $\mathcal{E}$, więc powoduje ono przepływ prądu o natężeniu:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Oboma sposobami otrzymaliśmy ten sam wynik:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Wynika z niego, 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 $\frac{\mathcal{E}}{r}$.

SEM jako energia przypadająca na ładunek

Jak już wiesz, napięcie określa, jaka energia elektryczna ulega przekształceniu wtedy, gdy między dwoma punktami przepływa ładunek 1 C.

Podobnie można rozumieć SEM.

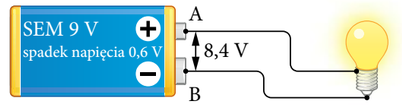
SEM baterii to ilość energii zamienianej z energii chemicznej w elektryczną w przeliczeniu na 1 C ładunku.

Różnica między napięciem a SEM polega na tym, że:

- napięcie dotyczy przepływu ładunku z punktu A do punktu B,
- SEM dotyczy przepływu ładunku po torze zamkniętym, z punktu A do tego samego punktu A.

Przykład znajduje się na rysunku 15.47:

- Napięcie między A i B wynosi 8,4 V. To znaczy, że ładunek 1 C przepływa z A do B i oddaje żarówce energię 8,4 J.
- Ten ładunek przepływa jednak także przez baterię, a tam traci dodatkowe 0,6 J.
- Aby ładunek 1 C przepłynął przez cały obwód z A do A, potrzeba w sumie 9 J. Dlatego SEM baterii wynosi 9 $\frac{\text{J}}{\text{C}}$, czyli 9 V.



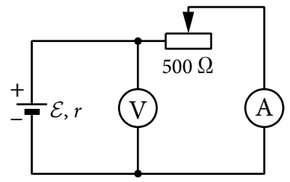
Rys. **15.47.** SEM a napięcie na baterii

Wyznaczanie SEM i oporu wewnętrznego

SEM ogniwa 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 18

1. Przygotuj ogniwo lub baterię, dwa mierniki oraz potencjometr.
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. Kiedy 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 zależności $U(I)$ z uwzględnieniem niepewności pomiarowych. Narysuj prostą przechodzącą przez punkty pomiarowe (z uwzględnieniem niepewności). Wyznacz 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 wartością SEM podaną przez producenta i wynikiem pomiaru SEM jako napięcia na nieobciążonej baterii. Na koniec porównajcie wyniki dla różnych ogniw badanych przez poszczególne osoby.



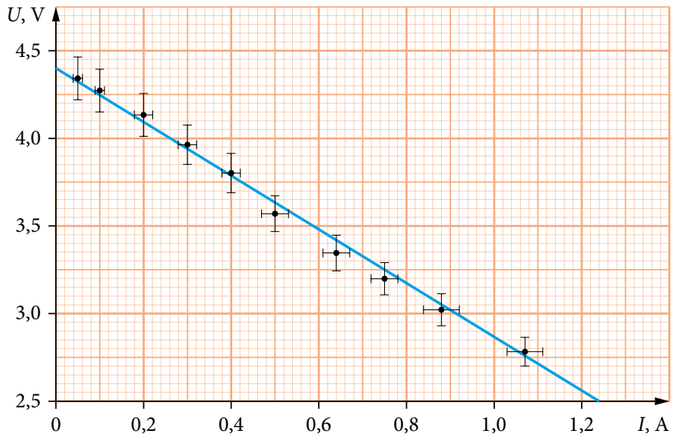
Analiza doświadczenia

W naszym doświadczeniu zmierzyliśmy napięcie i natężenie dla 10 ustawień potencjometru. Wyniki pomiarów zebraliśmy w tabeli 15.4.

Tabela 15.4. Pomiary i niepewności pomiarowe dla doświadczenia 18.

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	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	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	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Po zaznaczeniu punktów pomiarowych wraz z niepewnościami w układzie współrzędnych poprowadziliśmy przez nie prostą. Wyznaczyliśmy jej współczynnik kierunkowy, który wyniósł $-1{,}6\ \frac{\text{V}}{\text{A}}$. Prosta przecięła oś pionową w punkcie o współrzędnej 4,4 V.



Rys. **15.48.** Wykres zależności $U(I)$ dla danych z doświadczenia 18.

Napięcie = SEM minus spadek napięcia na oporze wewnętrznym.

$y = ax + b$
$U = -rI + \mathcal{E}$

Aby zinterpretować te wyniki, korzystamy ze wzoru:

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

Zapiszmy go w postaci:

$$U = -r \cdot I + \mathcal{E}$$

W tym wzorze $-r$ jest współczynnikiem kierunkowym, natomiast $\mathcal{E}$ jest wyrazem wolnym (współrzędną punktu przecięcia z osią pionową).
W takim razie opór wewnętrzny naszego ogniwa wynosi:

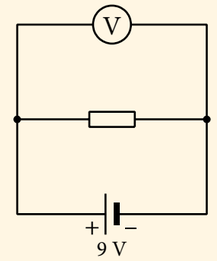
$$1{,}6\ \frac{\text{V}}{\text{A}}, \text{ czyli } 1{,}6\ \Omega$$

a jego SEM to 4,4 V.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Do baterii o sile elektromotorycznej 9 V podłączono opornik 5 Ω, a równolegle z nim – woltomierz, tak jak przedstawiono na rysunku. Woltomierz wskazał napięcie 7,5 V. Oblicz opór wewnętrzny baterii. Opór woltomierza uważamy za nieskończenie duży.



Dane: $\mathcal{E} = 9\ \text{V}$ – siła elektromotoryczna,
$R = 5\ \Omega$ – opór opornika,
$U = 7{,}5\ \text{V}$ – wskazanie woltomierza
Szukane: r – opór wewnętrzny baterii

Rozwiązanie:

Sposób I

Przez opornik (a więc także przez baterię) płynął prąd o natężeniu:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{7{,}5\ \text{V}}{5\ \Omega} = 1{,}5\ \text{A}$$

Skoro SEM baterii była równa 9 V, a napięcie na niej jest równe tylko 7,5 V, to spadek napięcia na jej oporze wewnętrznym wynosi:

$$U_\text{b} = 9\ \text{V} - 7{,}5\ \text{V} = 1{,}5\ \text{V}$$

Oznacza to, że opór wewnętrzny to:

$$r = \frac{U_\text{b}}{I} = 1\ \Omega$$

Sposób II

Spadki napięcia na oporze wewnętrznym i na oporze zewnętrznym są proporcjonalne do tych oporów:

$$\frac{U_\text{b}}{U} = \frac{r}{R}$$

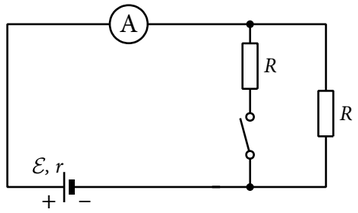
Stąd opór wewnetrzny jest równy:

$$r = \frac{U_\text{b} R}{U} = \frac{1{,}5\ \text{V} \cdot 5\ \Omega}{7{,}5\ \text{V}} = 1\ \Omega$$

Odpowiedź: Opór wewnętrzny ogniwa wynosi 1 Ω.

1. Bezpośrednie zwieranie (np. przewodnikiem o małym oporze) zacisków baterii jest niebezpieczne i może prowadzić do jej eksplozji. Zastanów się dlaczego.
2. 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.
3. P Kiedy do baterii o sile elektromotorycznej 12 V podłączono opornik 22 Ω, popłynął przez niego prąd o natężeniu 0,5 A. Jaki prąd by popłynął, gdyby zwarto bieguny baterii?

4. 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.



5. Porównaj wykresy zależności między napięciem i natężeniem na rysunku 15.15 → s. 167, oraz rysunku 15.48 → s. 210. Zauważ, że różnią się one istotnie. Wyjaśnij, dlaczego nie ma między nimi sprzeczności.

6. Gdy do dwóch stron plasterka cytryny przyłożymy elektrody z folii aluminiowej, nie powstanie między nimi napięcie. Taki układ może jednak być prostym modelem akumulatora.

Gdy elektrody podłączymy do źródła napięcia, przepływ prądu spowoduje reakcje chemiczne. Po odłączeniu źródła napięcia zaczną zachodzić samorzutnie reakcje odwrotne, dzięki czemu na elektrodach pojawi się napięcie.

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 się z sobą nie stykały.

c) Do pasków podłącz na 10 minut bieguny ogniwa D.

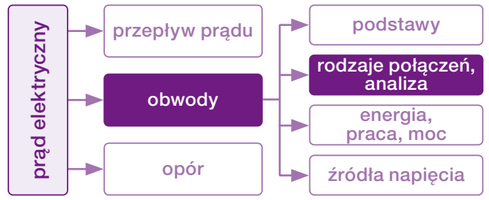
d) Odłącz baterię i zmierz napięcie między paskami folii.

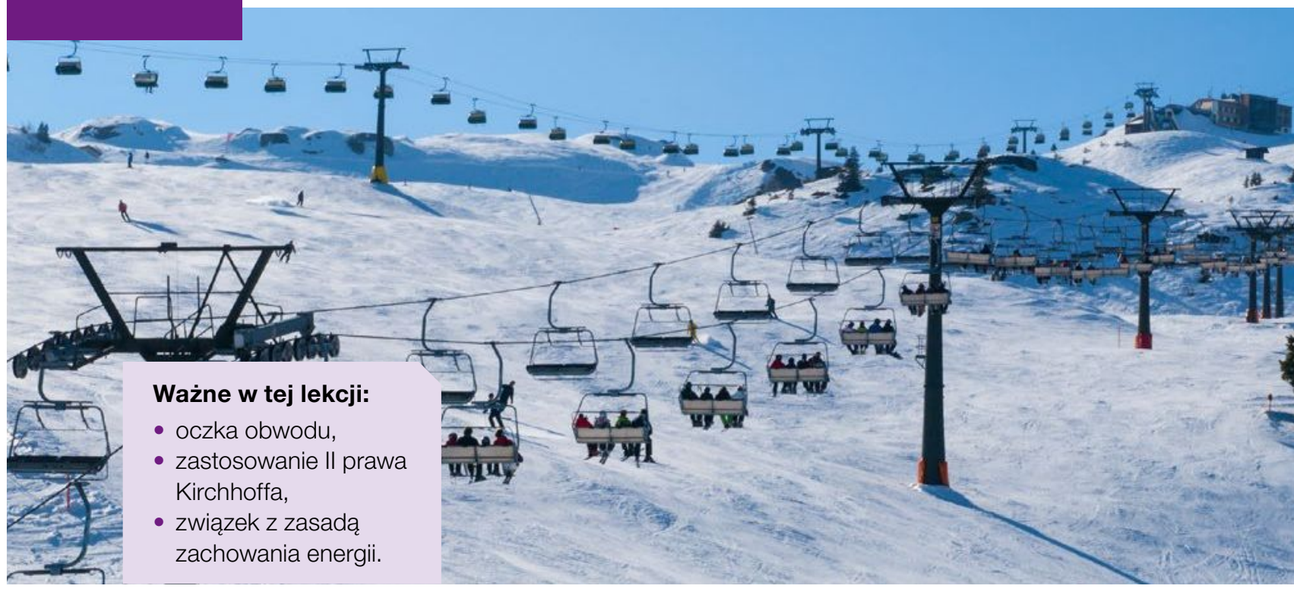
e) Czy reakcje chemiczne podczas ładowania powodują zmiany w elektrodach (folii aluminiowej), czy w cytrynie? Wymyśl, jak to sprawdzić doświadczalnie, i wykonaj takie doświadczenie.

7. Z artykułów spożywczych i przedmiotów codziennego użytku zbuduj baterię, która będzie zasilać zegarek elektroniczny albo kalkulator.

Wskazówka. Kup najtańszy zegarek albo kalkulator. 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!

15.10 Drugie prawo Kirchhoffa

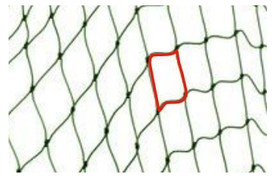




Ważne w tej lekcji:
- oczka obwodu,
- zastosowanie II prawa Kirchhoffa,
- związek z zasadą zachowania energii.

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.

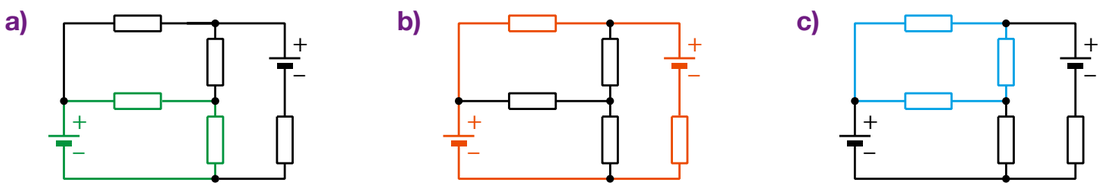
Znasz już pierwsze prawo Kirchhoffa, które jest wnioskiem z zasady zachowania ładunku. Drugie prawo Kirchhoffa jest z kolei wnioskiem z zasady zachowania energii. Mimo że oba są dość oczywiste, za ich pomocą można analizować skomplikowane obwody elektryczne.



Rys. **15.49.** Oczko obwodu elektrycznego możemy kojarzyć z okiem sieci rybackiej

Oczko obwodu

Zacznijmy od wprowadzenia pojęcia, które występuje w tym prawie. **Oczkiem** nazywamy fragment obwodu bez rozgałęzień, który tworzy zamkniętą pętlę (rozpoczyna się i kończy w tym samym węźle, rys. 15.50).



Rys. **15.50.** W skomplikowanym obwodzie elektrycznym można wskazać wiele oczek

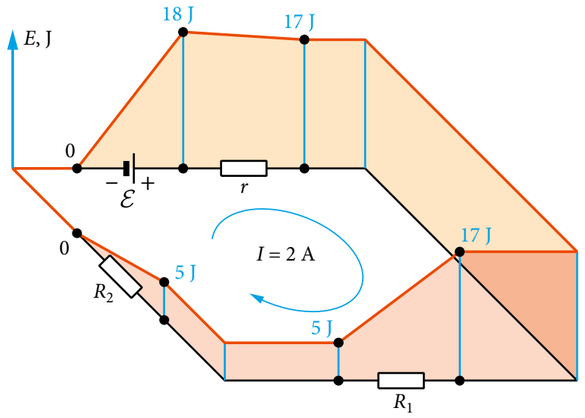
Obliczając te sumy, bierzemy pod uwagę znaki + i – (patrz „Jest na to sposób” → s. 215).

Drugie prawo Kirchhoffa

Teraz możemy sformułować to prawo:

> W każdym zamkniętym oczku obwodu suma spadków napięcia na odbiornikach energii (włącznie z oporami wewnętrznymi) jest równa sumie sił elektromotorycznych.

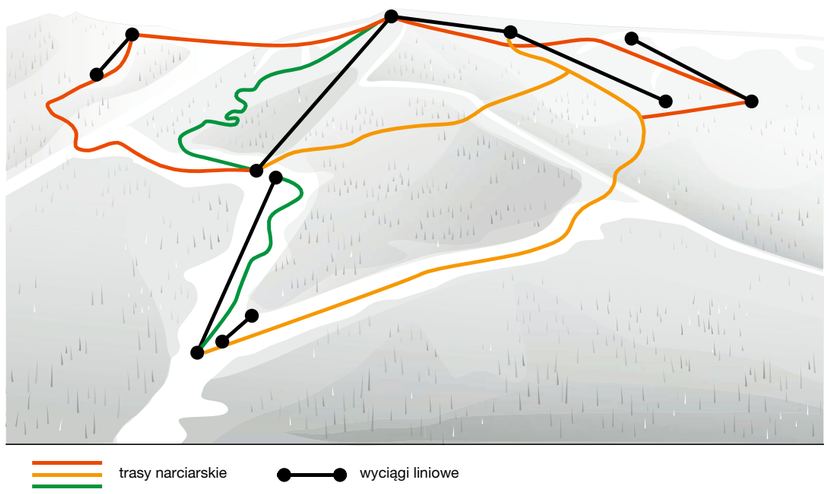
Tak sformułowane prawo jest wnioskiem z zasady zachowania energii. Ładunek traci energię wtedy, gdy przepływa przez opornik, a zyskuje ją w źródle napięcia. Jeśli ładunek okrążył oczko, suma wszystkich zysków i strat energii jest równa zeru (rys. 15.51).



Rys. **15.51.** Zmiany energii ładunku 1 C podczas przepływu przez oczko przykładowego obwodu

Porównanie z wysokością

Ruch ładunku okrążającego oczko można porównać do sytuacji narciarza w dużej stacji narciarskiej (rys. 15.52).



Rys. **15.52.** Zmiany energii ładunku w obwodzie elektrycznym można porównać do zmian energii potencjalnej narciarza przemieszczającego się w obrębie stacji narciarskiej

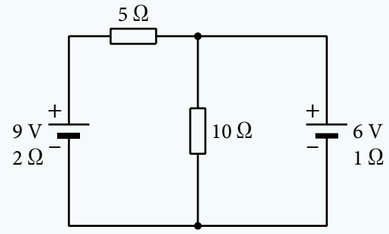
Narciarz może wybrać wiele tras. Jednak gdy powróci do miejsca, z którego wyruszył, stwierdzi, że przemieścił się wyciągami o tyle samo metrów n.p.m. w górę, ile zjechał na nartach.
Jest to porównanie nie tylko obrazowe, lecz także uzasadnione fizycznie: wysokość n.p.m. jest proporcjonalna do energii potencjalnej grawitacji, podobnie jak przyrosty i spadki potencjału są proporcjonalne do zmiany energii potencjalnej ładunku w polu elektrycznym.

JEST NA TO SPOSÓB

Jak wykorzystać prawa Kirchhoffa?

Rozważmy następujący obwód. Przy każdym oporniku podano jego opór, a przy każdej baterii – jej SEM oraz opór wewnętrzny.

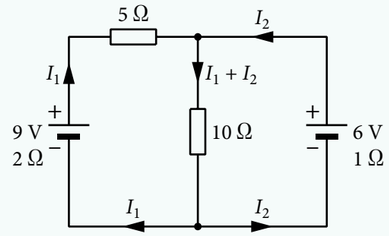
Wyznacz natężenia prądów płynących przez poszczególne oporniki.



PRZEANALIZUJ ROZWIĄZANIE KROK PO KROKU

Krok 1. **Wprowadzamy oznaczenia**

Oznaczmy odpowiednimi symbolami natężenia prądu płynącego przez poszczególne elementy obwodu. Przy wprowadzaniu tych oznaczeń skorzystamy od razu z pierwszego prawa Kirchhoffa, aby zmniejszyć liczbę niewiadomych.



Zaznaczamy strzałkami, w którą stronę płynie prąd. Jeśli tego nie wiemy, to nie szkodzi – zaznaczamy dowolnie, a jeśli się okaże, że prąd płynie w drugą stronę, w wyniku obliczeń uzyskamy liczbę ujemną.

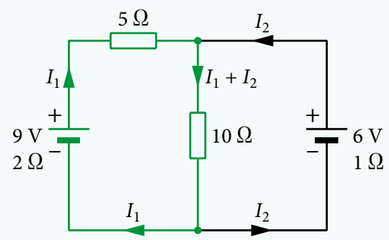
Mamy dwie niewiadome (I_1, I_2), więc potrzebujemy dwóch równań. Każde z nich ułożymy, analizując jedno oczko.

Krok 2. **Analizujemy pierwsze oczko**

Będziemy je obchodzić zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Z drugiego prawa Kirchhoffa:

$$9\ \text{V} = \underbrace{I_1 \cdot 2\ \Omega}_{\text{spadek napięcia na oporze wewnętrznym}} + \underbrace{I_1 \cdot 5\ \Omega + (I_1 + I_2) \cdot 10\ \Omega}_{\text{spadki napięcia na opornikach}}$$

(SEM baterii)



Dla uproszczenia zapiszemy to równanie bez jednostek:

$$9 = 2I_1 + 5I_1 + 10(I_1 + I_2)$$

Po uporządkowaniu otrzymujemy pierwsze z dwóch potrzebnych nam równań:

$$17I_1 + 10I_2 = 9$$

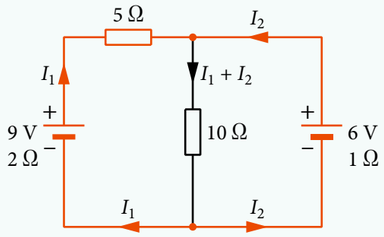
Krok 3. Analizujemy drugie oczko

Ponownie obchodzimy oczko zgodnie z ruchem wskazówek zegara. (Moglibyśmy także wybrać kierunek odwrotny, wtedy w poniższym równaniu wszystkie znaki zmieniłyby się na przeciwne, a więc powstałoby równanie równoważne).

$$9\ \text{V} - 6\ \text{V} = I_1 \cdot 2\ \Omega + I_1 \cdot 5\ \Omega - I_2 \cdot 1\ \Omega$$

minus, ponieważ bateria 6 V „stara się" wywołać przepływ prądu w kierunku odwrotnym do przyjętego przez nas przy obchodzeniu oczka

minus, ponieważ obiegamy obwód zgodnie z ruchem wskazówek zegara, a prąd I_2 zaznaczyliśmy przeciwnie



Strzałki wskazują na przewidywany kierunek prądu, a nie na kierunek obchodzenia oczka!

Po uproszczeniu otrzymujemy równanie:

$$7I_1 - I_2 = 3$$

Krok 4. Rozwiązujemy układ równań

Mamy teraz układ dwóch równań z dwiema niewiadomymi:

$$\begin{cases} 17I_1 + 10I_2 = 9 \\ 7I_1 - I_2 = 3 \end{cases}$$

Jego rozwiązanie to:

$$I_1 = \frac{13}{29} = 0{,}448 \qquad I_2 = \frac{4}{29} = 0{,}138$$

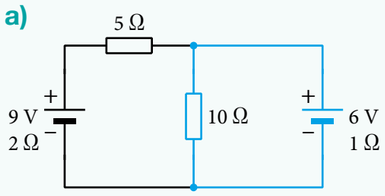
Ponieważ napięcia podstawialiśmy w woltach, a opory w omach, otrzymaliśmy wyniki w amperach, czyli: $I_1 = 0{,}448$ A i $I_2 = 0{,}138$ A.

Odpowiedź: Przez opornik 5 Ω płynie prąd o natężeniu $I_1 = 0{,}448$ A, a przez opornik 10 Ω płynie prąd o natężeniu $I_1 + I_2 = 0{,}586$ A.

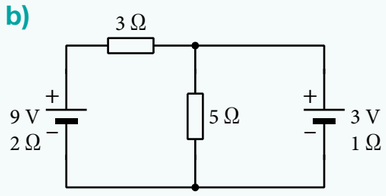
Sprawdź, czy rozumiesz

1. Na podstawie odpowiedzi do przykładu oblicz spadki napięć na opornikach i oporach wewnętrznych. Sprawdź, że wynik zgadza się z drugim prawem Kirchhoffa.
2. Rozwiąż ten sam przykład z drugiego prawa Kirchhoffa dla zielonego oczka z rozwiązania oraz dla oczka zaznaczonego na poniższym rysunku (rys. a).

a)



b)



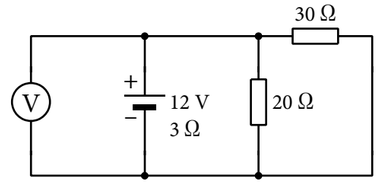
3. Rozważmy następujący obwód – rysunek b). Połączenia elementów są takie same jak w przykładzie, ale inne są wartości liczbowe. Wyznacz natężenia prądów płynących przez baterie.

Pytania i zadania

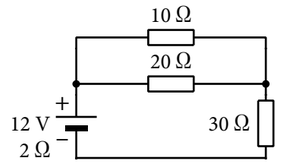
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Przy baterii podano jej SEM i opór wewnętrzny, a przy opornikach – ich opory. Jakie napięcie wskaże woltomierz? Przyjmij, że opór woltomierza jest nieskończony.

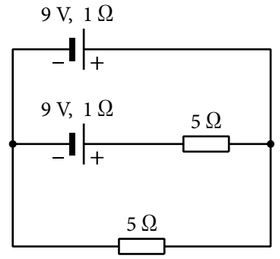
Rozwiąż zadanie dwoma sposobami: ze wzorów na opór zastępczy i z drugiego prawa Kirchhoffa.



2. Przy baterii podano jej SEM i opór wewnętrzny, a przy opornikach – ich opory. Oblicz moc ciepła wydzielanego na oporniku o najmniejszym oporze. Rozwiąż zadanie dwoma sposobami: ze wzorów na opór zastępczy i z drugiego prawa Kirchhoffa.



3. Przy bateriach podano ich SEM i opór wewnętrzny, a przy opornikach – ich opory. Oblicz natężenia prądów płynących przez baterie.



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.

Uwaga. Z wyników tego zadania skorzystamy w następnym dziale, kiedy do doświadczeń będziemy potrzebowali prądu o dużym natężeniu.

Analiza tekstu

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**, natomiast 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.

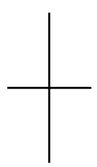
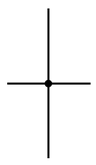
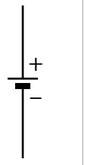
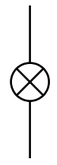
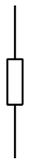
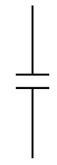
▶ **Dryf** elektronów to uporządkowany ruch elektronów. Elektrony wykonują chaotyczne ruchy, ale średnio wszystkie przemieszczają się w określonym kierunku.

▶ **Natężenie prądu** I: $$I = \frac{Q}{t}$$

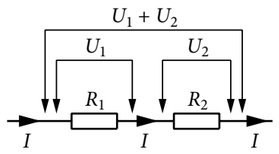
gdzie Q jest ładunkiem przepływającym w czasie t przez wybrane miejsce obwodu.

Jednostką natężenia prądu jest amper: $1\ \text{A} = \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{s}}$.

■ **Symbole elektryczne**

Przewód	Skrzyżowanie przewodów bez połączenia	Skrzyżowanie z połączeniem przewodów	Ogniwo lub bateria	Żarówka	Opornik	Wyłącznik	Kondensator
							

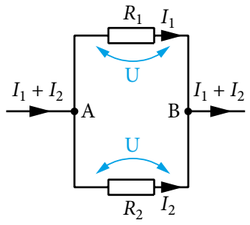
■ **Połączenie szeregowe** – przez wszystkie elementy w takim połączeniu płynie prąd o takim samym natężeniu, natomiast napięcia są sumowane.



▶ **Opór zastępczy** oporników połączonych szeregowo to:

$$R_Z = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$$

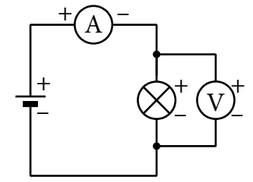
■ **Połączenie równoległe** – napięcie na wszystkich połączonych elementach jest jednakowe. Natomiast suma natężeń prądów po rozdzieleniu jest równa natężeniu prądu przed rozdzieleniem.



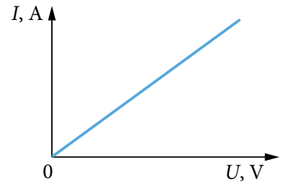
▶ **Opór zastępczy** oporników połączonych równolegle wyznaczamy z zależności:

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

■ **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**: $1\ \Omega = \frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}}$.

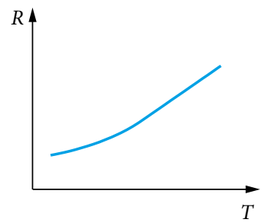
■ **Opór przewodnika**:

$$R = \rho\frac{l}{S}$$

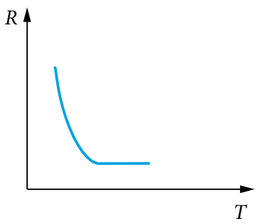
gdzie: ρ – **opór właściwy**, $[\rho] = 1\ \Omega \cdot \text{m}$, l – długość przewodnika, S – pole przekroju poprzecznego przewodnika.

▶ Ze względu na opór właściwy rozróżniamy: **przewodniki** o oporze rzędu $10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$, dobrze przewodzące prąd elektryczny; **izolatory** o oporze ponad $10^{11}\ \Omega \cdot \text{m}$, nieprzewodzące prądu (ściślej: przewodzące bardzo słabo); **półprzewodniki** o oporze między wartościami dla przewodników i izolatorów, który może się znacznie zmieniać pod wpływem czynników zewnętrznych.

■ **Zależność oporu 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.

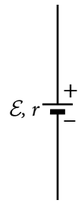
- **Moc *P* prądu** elektrycznego:

$$P = UI$$

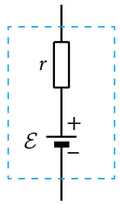
gdzie: U – napięcie, I – natężenie prądu.

- 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)



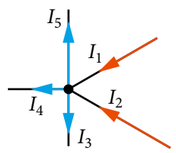
▶ **Siła elektromotoryczna** równa jest napięciu między biegunami źródła, z którego nie pobieramy prądu. SEM baterii można także zdefiniować jako ilość energii zamienianej z energii chemicznej w elektryczną w przeliczeniu na 1 C przepływającego ładunku.

▶ **Napięcie między biegunami baterii** jest równe różnicy siły elektromotorycznej i spadku napięcia na oporze wewnętrznym:

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

gdzie I – natężenie prądu.

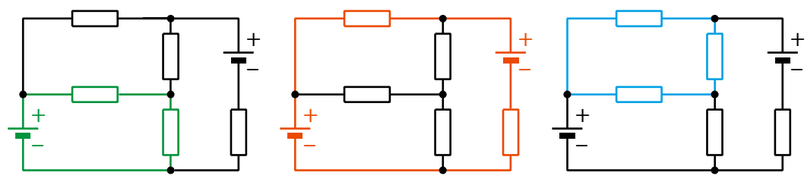
- **Pierwsze prawo Kirchhoffa**: Suma natężeń prądów wpływających do punktu rozgałęzienia (węzła) obwodu jest równa sumie natężeń prądów z niego wypływających.



$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$

- **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:



▶ Można udowodnić, że po rozważeniu wszystkich oczek, zawsze uzyskamy niesprzeczny układ równań pozwalający wyznaczyć wszystkie natężenia prądu w obwodzie.

Sposób na zadanie

Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych

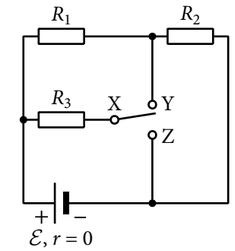
Zauważ, że nie ma danych liczbowych: $\mathcal{E}$ i R mogą się pojawić w odpowiedziach.

Czyli tak małym, że traktujemy go jak zerowy.

Zadanie 1. Schemat obok przedstawia obwód złożony:

- z baterii o sile elektromotorycznej $\mathcal{E}$ i zerowym oporze wewnętrznym,
- z trzech oporników o jednakowym oporze $R_1 = R_2 = R_3 = R$,
- z przełącznika.

Przełącznik może być ustawiony w dwóch pozycjach: tak, że połączone są punkty X i Y, lub tak, że połączone są punkty X i Z.



Zadanie 1.1 (0–1)

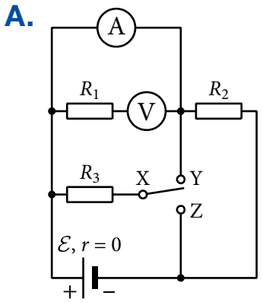
Aby wyznaczyć opór opornika R_1, mierzymy napięcie między jego końcówkami i natężenie płynącego przez niego prądu. **Spośród podanych schematów wybierz <u>wszystkie</u> te,** które poprawnie przedstawiają możliwe sposoby podłączenia mierników.

Załóż, że opór wewnętrzny amperomierza jest zerowy, a woltomierza – nieskończony.

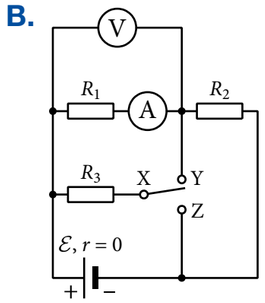
Czyli nie ma na nim spadku napięcia.

Czyli nie płynie przez niego prąd.

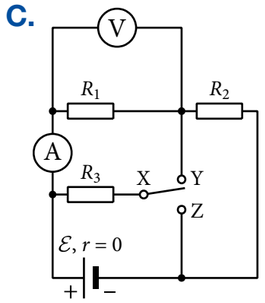
A.



B.



C.



Rozwiązanie:

Na **rysunku A** woltomierz nie tylko nie mierzy napięcia na oporniku R_1, lecz także powoduje, że przez ten opornik nie płynie prąd. Woltomierz ma przecież nieskończony opór.

Na **rysunku B** prąd płynący przez opornik R_1 płynie także przez amperomierz, a więc ten miernik jest dobrze podłączony. Woltomierz mierzy sumę napięć na oporniku R_1 i amperomierzu, ale napięcie na amperomierzu jest zerowe, więc woltomierz jest podłączony poprawnie.

Na **rysunku C** od razu widać, że poprawnie podłączony jest woltomierz. Amperomierz mierzy sumę natężeń prądów płynących przez R_1 i przez woltomierz, ale to drugie natężenie wynosi zero (przyjęliśmy, że opór woltomierza jest nieskończony). A więc również amperomierz jest podłączony poprawnie.

Odpowiedź: Rysunki B i C.

Zadanie 1.2 (0–1)

Dokończ zdanie. Wskaż odpowiedź A, B albo C i jej uzasadnienie 1., 2. albo 3.

Początkowo połączone były punkty X i Y, a następnie przełącznik przełączono tak, że połączone były punkty X i Z. W rezultacie natężenie prądu płynącego przez baterię:

Czyli porównujemy sytuację przed i po.

Równe natężeniu prądu wypływającego z baterii.

A.	zmniejszyło się,	ponieważ	**1.**	w obu położeniach mamy jedno połączenie szeregowe i jedno równoległe.
B.	zwiększyło się,		**2.**	w pierwszym przypadku opór zastępczy był większy niż R, a w drugim – mniejszy niż R.
C.	pozostało bez zmian,		**3.**	natężenie prądu wynika tylko z właściwości baterii.

Rozwiązanie:

Zdania 1. i 2. sugerują, że warto przyjrzeć się połączeniu oporników i ich oporowi zastępczemu. Przerysujmy obwody tak, aby połączenia szeregowe i równoległe były widoczne.

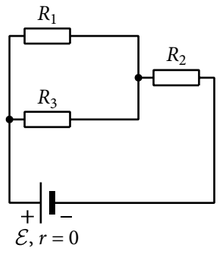
To ułatwia ich analizę, zwłaszcza jeśli nie masz dużej wprawy.

Zdanie 1. jest prawdziwe, ale nic z niego nie wynika, ponieważ co prawda występują oba rodzaje połączeń, ale połączone są inne oporniki.

Zastanówmy się nad zdaniem 2. Rzeczywiście:

- w pierwszym przypadku do opornika R_2 o oporze R podłączono coś (nieważne co) szeregowo, czyli opór zastępczy jest większy niż R,
- w drugim przypadku do opornika R_3 o oporze R podłączono coś (nieważne co) równolegle, czyli opór zastępczy jest mniejszy niż R.

X połączone z Y



W takim razie zdanie 2. jest prawdziwe. Co więcej, jego analiza pozwoliła nam zauważyć, że opór zastępczy był mniejszy w drugim układzie, a zatem płynął prąd o większym natężeniu.

odpowiedź B

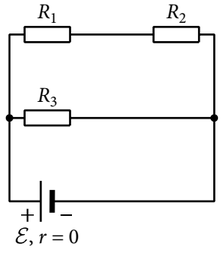
Nawet jeśli sądzimy, że znaleźliśmy odpowiedź, rozważmy pozostałe zdania – pozwoli to uniknąć błędu.

Pozostało nam zdanie 3. Nie jest ono prawdziwe – natężenie prądu płynącego przez baterię zależy od tego, co do niej podłączymy.

Rozważanie skrajnych przypadków często łatwiej pozwala znaleźć rozwiązanie.

W skrajnym przypadku, gdy nic nie podłączymy, prąd w ogóle nie płynie, a więc natężenie jest równe zeru.

X połączone z Z



Odpowiedź: B-2

Zadanie 1.3 (0–3)

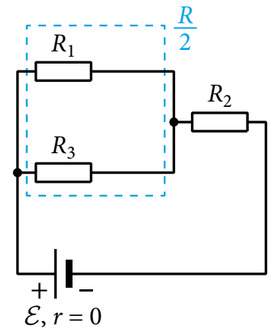
Początkowo były połączone punkty X i Y, a następnie przełącznik przełączono tak, że połączone były punkty X i Z. **Oblicz, jak na skutek tego zmieniła się moc wydzielana na oporniku R_1: określ, czy się zwiększyła czy zmniejszyła i ile razy.**

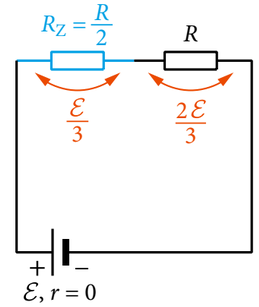
Tak samo jak w zadaniu 1.2.

Rozwiązanie:

Możemy skorzystać z rysunków do rozwiązania zadania 1.2.

Najpierw rozważmy sytuację przed przełączeniem.





Połączone równolegle oporniki R_1 i R_3 możemy traktować łącznie jak opornik o oporze:

$$R_Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{R}{2}$$

Na drugim rysunku widzimy, że przez opór zastępczy R_Z i opornik R płynie prąd o tym samym natężeniu. Napięcie na opornikach jest więc proporcjonalne do ich oporów. W takim razie na oporze zastępczym R_Z napięcie jest równe $\frac{\mathcal{E}}{3}$. Jest to jednocześnie napięcie na oporniku R_1.

napięcie na oporniku = spadek napięcia na oporniku = napięcie między jego końcówkami

Moc ciepła wydzielanego na oporniku możemy obliczyć ze wzoru $P = \frac{U^2}{R}$, a więc:

$$P_{\text{przed}} = \frac{\left(\frac{\mathcal{E}}{3}\right)^2}{R} = \frac{1}{9}\frac{\mathcal{E}^2}{R}$$

Dzięki temu nie musimy osobno wyznaczać natężenia prądu płynącego przez opornik.

Po przełączeniu przełącznika analiza jest jeszcze prostsza. Oporniki R_1 i R_2, o równych oporach, są podłączone szeregowo do baterii. A więc napięcie na każdym z nich to połowa napięcia baterii. Obecność opornika R_3 nic tu nie zmienia.

Opór wewnętrzny baterii = 0, więc napięcie baterii = SEM i nie zależy od oporników.

Wobec tego moc wynosi:

$$P_{\text{po}} = \frac{\left(\frac{\mathcal{E}}{2}\right)^2}{R} = \frac{1}{4}\frac{\mathcal{E}^2}{R}$$

Widzimy, że po przełączeniu przełącznika moc na oporniku R_1 zwiększyła się $\frac{1}{4} : \frac{1}{9} = \frac{9}{4}$ razy.

Odpowiedź: Po przełączeniu przełącznika z punktów X i Y na punkty X i Z moc na oporniku R_1 wzrosła $\frac{9}{4}$ razy.

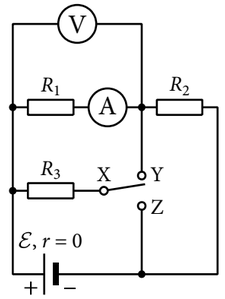
Warto zapamiętać!

- Złożony układ oporników często możemy rozłożyć na połączenia równoległe i szeregowe.
- Warto przerysować obwód tak, aby te połączenia były lepiej widoczne. Jeśli w obwodzie jest przełącznik, rysujemy osobno sytuacje dla jego różnych położeń.
- Przy połączeniu szeregowym opór rośnie, przy równoległym – maleje.
- Amperomierz ma mały opór, a woltomierz – duży. Zwykle zakładamy, że pierwszy jest zerowy, a drugi – nieskończony.

Zadania analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Załóżmy, że przełącznik jest w takim położeniu, że X jest połączone z Z. **Jakie są wskazania mierników w obwodzie z rysunku B w zadaniu 1.1?** Rysunek ten przypominamy obok.



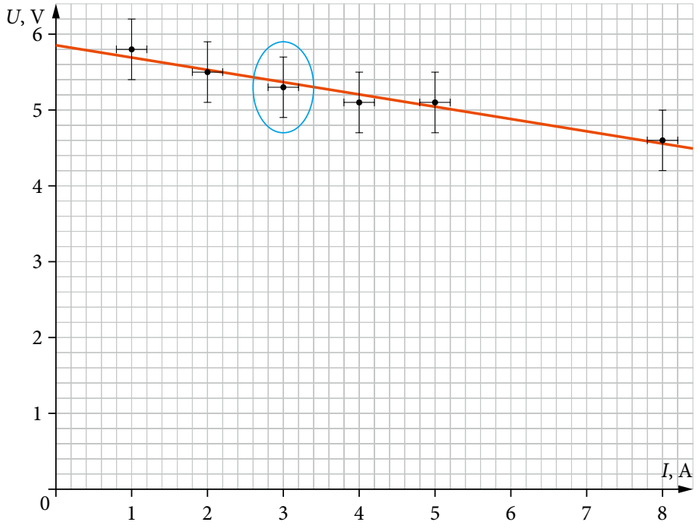
Zadanie 2. Początkowo połączone były punkty X i Y, a następnie przełącznik przełączono tak, że połączone były punkty X i Z. **Oblicz, jak na skutek tego zmieniła się moc wydzielana na oporniku R_2: określ, czy się zwiększyła czy zmniejszyła i ile razy.**

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Pomiar $U(I)$

Badano zależność między napięciem U na baterii a natężeniem czerpanego z niej prądu I. Wyniki pięciu pomiarów przedstawiono w układzie współrzędnych. Do tych punktów dopasowano prostą.



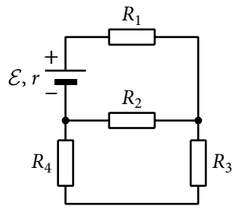
Zadanie 1.1. Zapisz wyniki pomiarów napięcia i natężenia dla punktu pomiarowego zaznaczonego pętlą wraz z niepewnościami.

Zadanie 1.2. Zapisz równanie prostej. Pamiętaj o jednostkach współczynników.

Zadanie 1.3. Wyznacz siłę elektromotoryczną baterii i jej opór wewnętrzny.

Zadanie 2. Moc wydzielana na oporze

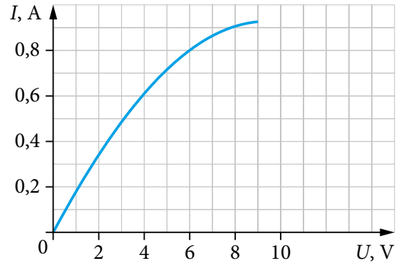
Schemat przedstawia obwód zbudowany z ogniwa o SEM równym 9 V i oporze wewnętrznym wynoszącym 2 Ω. Każdy z czterech oporników ma opór R = 30 Ω.

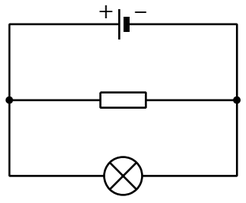


Na którym oporniku wydziela się najwięcej ciepła? Oblicz moc wydzielania tego ciepła. Rozwiąż zadanie dwoma sposobami: ze wzorów na opór zastępczy i z praw Kirchhoffa.

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.

Zadanie 3.1. Czy dla tej żarówki jest spełnione prawo Ohma? Uzasadnij odpowiedź.

Zadanie 3.2. Oblicz opór żarówki podczas przepływu prądu przez obwód.

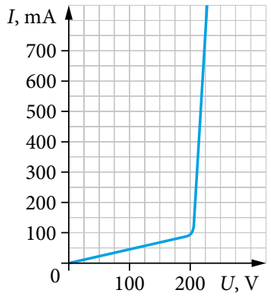
Zadanie 3.3. Jaka moc wydzieli się na żarówce podczas przepływu prądu w obwodzie?

Zadanie 3.4. Oblicz opór opornika.

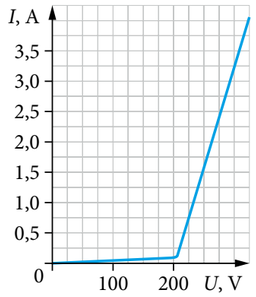
Zadanie 4. Warystor

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.



Zadanie 4.1. **Uzupełnij zdanie.**

Dla niskiego napięcia opór warystora jest **A**/ **B**, ale gdy napięcie przekroczy pewną wartość, opór ten szybko **C**/ **D**.

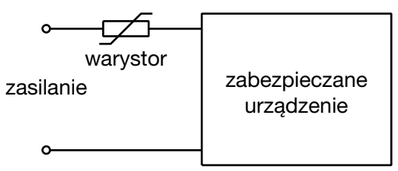
A. duży **B.** mały **C.** rośnie **D.** maleje

Zadanie 4.2. Na podstawie odpowiedniego wykresu **oblicz opór warystora** przy napięciu 100 V i przy napięciu 225 V.

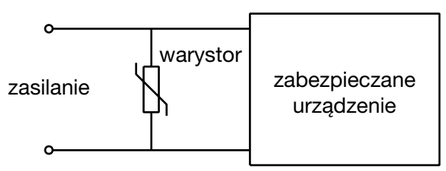
Zadanie 4.3. Na podstawie odpowiedniego wykresu **wyznacz napięcie**, dla którego opór warystora wynosi 150 Ω.

Zadanie 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.



16. Pole magnetyczne

1. Oddziaływania magnetyczne
2. Linie pola magnetycznego
3. Siła Lorentza
4. Ruch w polu magnetycznym
5. Siła elektrodynamiczna
6. Pole wokół przewodnika z prądem

16.1 Oddziaływania magnetyczne

elektromagnetyzm – pole magnetyczne
- oddziaływania
- linie pola
- siła w polu
- pole wokół przewodnika

Ważne w tej lekcji:
- oddziaływanie magnesów,
- pole magnetyczne,
- ferromagnetyki,
- pole wytwarzane przez prąd.

Przypomnij sobie:
- Każdy magnes ma dwa bieguny, umownie nazywane północnym i południowym.
- Magnes silnie przyciąga żelazo i niektóre inne metale.
- Kiedy 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.

Naturalne magnesy

Magnetyt zawiera tlenek żelaza Fe_3O_4.

Oddziaływania magnetyczne są znane już od starożytności, ponieważ w przyrodzie występują naturalne magnesy – bryłki magnetytu. Jednak początkowo oprócz rzetelnej wiedzy opartej na obserwacji przyrody powtarzano wiele przesądów dotyczących magnesów. Uważano na przykład, że magnes traci swoje właściwości pod wpływem czosnku, a krew kozła je wzmacnia.

Pierwsze badania naukowe

Dopiero w średniowieczu uczeni zaczęli zajmować się magnesami w sposób naukowy – badać je doświadczalnie. W ten sposób nie tylko rozwinęli wiedzę o samym magnetyzmie, ale co ważniejsze – wskazali sposób badania przyrody.

W tym czasie w Chinach wynaleziono kompas, który pozwolił żeglować po otwartym morzu, a nie tylko wzdłuż brzegów. Udokumentowane opisy wykorzystania przez Chińczyków kompasu do nawigacji morskiej pochodzą z końca XI w. (rys. 16.1).

Rys. **16.1.** Wygląd chińskiego kompasu z XI/XII w.

Kolejnych ważnych odkryć dokonano w XIX w.: zrozumiano naturę magnetyzmu i jego związki z elektrycznością. O prawach wtedy odkrytych powiemy w działach 16. i 17. Jak zobaczysz, te prawa nie tylko poszerzyły naszą wiedzę o przyrodzie, lecz także pozwoliły na powszechne zastosowanie urządzeń elektrycznych.

Magnesy neodymowe

Podczas omawiania zagadnień z tego działu będziemy wykonywać liczne doświadczenia z zastosowaniem magnesów. Najlepiej sprawdzą się magnesy neodymowe (rys. 16.2), które są stosunkowo silne. Można je kupić między innymi w sklepach internetowych.

Uwaga. Z magnesami neodymowymi należy postępować ostrożnie. Mogą one boleśnie ścisnąć palce, a puszczone swobodnie, przyciągają się z dużej odległości – ich odłamki mogą się wtedy rozprysnąć. Stanowią także śmiertelne niebezpieczeństwo dla dzieci w razie połknięcia.

Rys. **16.2.** Bieguny magnesu neodymowego znajdują się zwykle na płaskich powierzchniach (podstawach walca)

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.

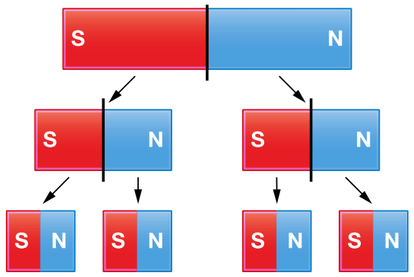
Rys. **16.3.** Bieguny magnesów są umownie oznaczane literami N (*north* – północ) i S (*south* – południe) lub kolorami – w Polsce: niebieskim (N) i czerwonym (S)

Jednakowe bieguny się odpychają, a różne przyciągają.

Używamy także nazw: bieguny jednoimienne i bieguny różnoimienne, od słowa „imię”, które dawniej oznaczało także nazwę.

W odróżnieniu od ładunków elektrycznych, które można łatwo rozdzielić, bieguny magnetyczne zawsze występują parami. Jeśli rozetniemy magnes na dwa kawałki, to na końcach obu uzyskanych w ten sposób

części powstaną nowe bieguny magnetyczne (rys. 16.4). W każdym z nowych magnesów występuje zarówno biegun północny, jak i południowy.



Rys. **16.4.** Bieguny magnetyczne zawsze występują parami. Nawet kiedy przetniemy magnes w połowie, otrzymamy dwa magnesy – każdy z dwoma biegunami

Właściwości magnetyczne różnych substancji

$_{26}$Fe żelazo *55,845*
$_{27}$Co kobalt *58,933*
$_{28}$Ni nikiel *58,693*

Rys. **16.5.** Zarówno żelazo, kobalt, jak i nikiel są ferromagnetykami

Z życia codziennego i ze szkoły podstawowej wiesz, że magnes przyciąga żelazo i stal (która jest stopem żelaza). Równie silnie oddziałuje na kilka innych metali, m.in. na nikiel i kobalt. Z niklu są wykonane zewnętrzne powierzchnie magnesów neodymowych. Substancje silnie przyciągane przez magnes nazywamy **ferromagnetykami** (łac. *ferrum* – żelazo).
Na co dzień nie zauważamy, że magnes działa także na substancje inne niż ferromagnetyki. Jest tak, ponieważ w ich przypadku oddziaływanie magnetyczne jest znacznie słabsze. Okazuje się jednak, że:

- istnieją substancje, które magnes **słabo przyciąga**, np. aluminium, cyna, tlen, wapń,
- substancje, które magnes **słabo odpycha**, np. miedź, srebro, grafit, woda.

Magnetyczne właściwości węgla zbadasz w zadaniu 5. → s. 237.

Jak magnes przyciąga żelazo?

Dlaczego magnes przyciąga nawet nienamagnesowane żelazo? Aby to zrozumieć, wykonajmy prosty eksperyment.

Doświadczenie 19

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 – tak jak pokazano 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 w pobliżu magnesu sam stał się magnesem.

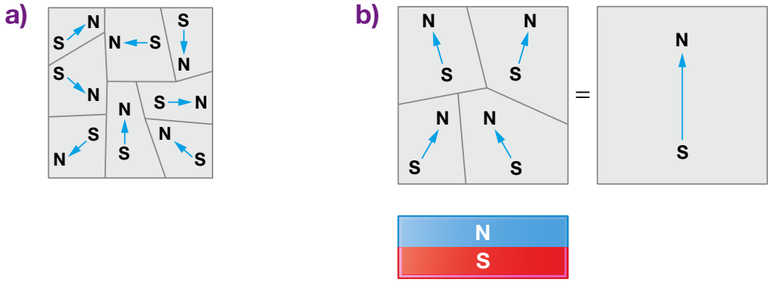
Tak więc magnes nie tyle przyciąga nienamagnesowane żelazo, ile powoduje jego namagnesowanie, a dopiero wtedy je przyciąga. Przypomina to mechanizm przyciągania skrawków papieru przez naelektryzowane ciało.

Przyciąganie skrawków papieru przez naelektryzowane ciało → s. 88

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. Widocznie właściwości ferromagnetyków nie wynikają z właściwości pojedynczych atomów, ale z budowy całego kryształu metalu. Otóż okazuje się, że w ferromagnetykach znajdują się **domeny magnetyczne** – namagnesowane obszary o różnych kierunkach namagnesowania.

W nienamagnesowanym kawałku żelaza kierunki namagnesowania poszczególnych domen są ustawione przypadkowo – skierowane w różne strony, a ich oddziaływania się równoważą (rys. 16.7a).
Kiedy jednak zaczynamy zbliżać do niego magnes, wtedy te domeny, które są ustawione tak samo jak on, powiększają się (kolejne jony tworzące sieć krystaliczną ferromagnetyku ustawiają się we właściwą stronę), a te domeny, które są ustawione w innych kierunkach – maleją (rys. 16.7b).



Rys. **16.7.** Zmiany układu domen w czasie magnesowania ferromagnetyku

Rys. **16.6.** Stalowy spinacz przyczepiony do magnesu sam staje się magnesem i przyciąga kolejne spinacze

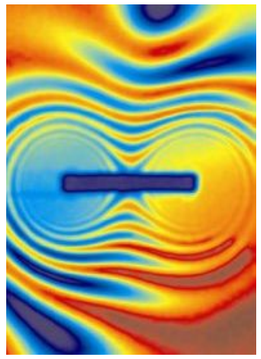
A to ciekawe

Magnes odpycha wodę, a więc również – organizmy żywe, złożone głównie z tej cieczy. W 1997 r. fizyk Andre Geim 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).
Geim jest jedynym uczonym, który zdobył zarówno prawdziwą nagrodę Nobla, jak i jej żartobliwy odpowiednik: nagrodę Ig Nobla (od ang. *ignoble* – niegodny). Pierwszą otrzymał za odkrycie grafenu, czyli nowej formy węgla, a drugą – właśnie za lewitację żaby.

Pole magnetyczne

Pole elektryczne
→ s. 92

Do opisu oddziaływania elektrycznego wprowadziliśmy pojęcie pola. Podobnie jest w przypadku magnetyzmu.
Mówimy, że magnes jest **źródłem pola magnetycznego**. Kiedy w tym polu znajdzie się inny magnes, działają na niego siły magnetyczne.



Rys. **16.9.** Pole magnetyczne zwizualizowane za pomocą tomografii neutronowej

> Jeżeli w jakimś obszarze działają siły magnetyczne, to mówimy, że w tym obszarze istnieje pole magnetyczne.

Rys. **16.8.** Magnesy oddziałują za pośrednictwem pola magnetycznego

Badanie pola magnetycznego

Prostym przyrządem do badania pola magnetycznego jest igła magnetyczna. Stanowi ona zasadniczy element kompasu, dlatego kojarzy się 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.
Igłę magnetyczną wykorzystuje się do rozpoznawania biegunów magnesów, w których nie są one oznaczone. Wystarczy jednym z biegunów zbliżyć magnes do igły.
Jeśli igła odwróci się do niego swoim biegunem północnym, to znaczy, że magnes jest do niej zwrócony biegunem południowym (rys. 16.10), i na odwrót.

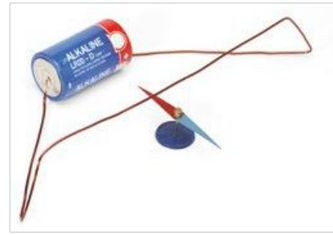
Rys. **16.10.** Rozpoznawanie biegunów magnesu za pomocą igły magnetycznej

Prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne

Właśnie igła magnetyczna pozwoli nam wykonać proste, ale ważne doświadczenie, przekonujące nas o związku między elektrycznością i magnetyzmem.

Doświadczenie 20

1. Przygotuj kompas lub igłę magnetyczną na podstawce, baterię D i przewód miedziany.
2. Ułóż przewód nad igłą kompasu, wzdłuż jej kierunku.
3. Podłącz przewód do baterii. Co się dzieje z igłą?
4. Co się stanie, kiedy zmienisz kierunek prądu (czyli podłączysz baterię odwrotnie)?



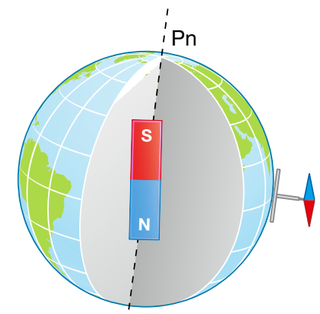
Wynik doświadczenia świadczy o tym, że:

> Poruszające się ładunki elektryczne są źródłem pola magnetycznego.

To odkrycie, dokonane przez Hansa Christiana Ørsteda w 1820 r., zapoczątkowało szybki rozwój nauki o elektryczności i magnetyzmie. Samo doświadczenie Ørsteda jest proste – trudno było wymyślić, jak je wykonać.
Uczeni przypuszczali już wcześniej, że elektryczność może mieć związek z magnetyzmem, ponieważ obserwowali ruch igły magnetycznej podczas burzy. Nie wiedzieli jednak, na czym taki związek może polegać, ponieważ mieli jeszcze dość nieokreślone pojęcie „elektryczności" obejmujące ładunki statyczne, prąd, baterie itd. Sprawdzali więc na przykład, czy pole magnetyczne może być wytwarzane przez naelektryzowane ciało albo przez baterię niepodłączoną do obwodu.

Pole magnetyczne Ziemi

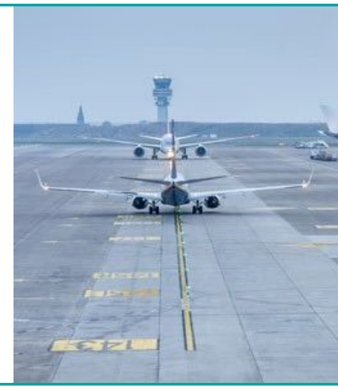
Działanie kompasu, czyli odwracanie się igły magnetycznej na północ, jest dowodem na to, że Ziemia wytwarza pole magnetyczne. Jego źródłem jest ruch konwekcyjny płynnego żelaza w jej wnętrzu (więcej w artykule → s. 340–341). Bieguny magnetyczne Ziemi są położone w pobliżu jej biegunów geograficznych, ale się z nimi nie pokrywają (rys. 16.11).
Przyjęto, że północny biegun magnesu to ten, który kieruje się w stronę północnego bieguna geograficznego Ziemi.



Rys. **16.11.** Ziemia zachowuje się jak wielki magnes i oddziałuje z małym magnesem – igłą magnetyczną

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 numery pasów startowych lotniska w Brukseli (na zdjęciu). Ich oznaczenia 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 przy tym żadnej regularności w odstępach między takimi 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.



Z tej umowy wynika, że w pobliżu północnego bieguna geograficznego Ziemi znajduje się jej **południowy** biegun magnetyczny, ponieważ przyciąga on północny biegun igły kompasu.
W nazewnictwie 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

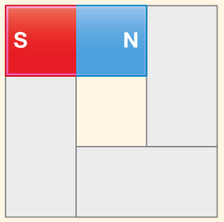
Kiedy odciągamy stalową kulkę od magnesu, wykonujemy pewną pracę. Z kolei kiedy magnes przyciąga kulkę, wykonuje pracę – zwiększa jej energię kinetyczną. Wynika stąd, że z polem magnetycznym jest związana energia potencjalna.
Nie będziemy wyrażać jej ilościowo, ponieważ jest to zbyt skomplikowane, jednak trzeba pamiętać o konieczności uwzględnienia tej formy energii podczas interpretacji wyników doświadczeń.

Pytania i zadania

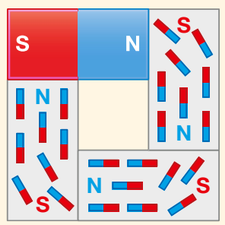
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Magnes sztabkowy i trzy nienamagnesowane sztabki żelaza ustawiono jak na rysunku obok. Jak są ustawione domeny w sztabkach? Gdzie znajdują się bieguny magnetyczne takiego układu trzech żelaznych sztabek i magnesu?

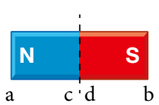


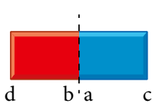
Rozwiązanie:
Sztabki żelaza namagnesują się pod wpływem magnesu. Zatem przy biegunie N powstanie biegun S i na odwrót. Sztabka leżąca naprzeciwko magnesu namagnesuje się od swoich sąsiadek.
Ułożenie domen w sztabkach przedstawiono na rysunku obok.



Taki układ nie ma biegunów. Pojawią się one dopiero wtedy, gdy rozłączymy go w dowolnym miejscu.

1. Magnes sztabkowy rozcięto w połowie długości (rys. A), a powstałe kawałki złączono tak, jak pokazano na rysunku B. Czy powstał magnes czy nienamagnesowana sztabka? Jeśli magnes, to gdzie są jego bieguny?

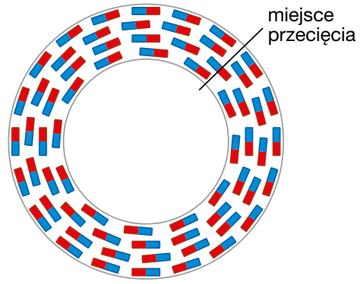
A.


B.


2. Po złączeniu magnesów pokazanych na zdjęciu nakrętka spadnie. Wyjaśnij dlaczego.

3. P Rysunek przedstawia namagnesowany pierścień żelaza i domeny magnetyczne w jego wnętrzu.

Magnes przecięto i rozgięto. Jak ułożyły się bieguny nowo powstałego magnesu?



4. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj duży stalowy gwóźdź i silny magnes (np. neodymowy). Przesuń kilkadziesiąt razy północnym biegunem magnesu po gwoździu, za każdym razem 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 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?

e) Czysty grafit jest odpychany przez magnes. Czy grafit z ołówka w twoim doświadczeniu też był odpychany? A jeśli obserwowałeś przyciąganie, to jaka siła mogła przeważyć odpychającą siłę magnetyczną?

elektromagnetyzm – pole magnetyczne
- oddziaływania
- **linie pola**
- siła w polu
- pole wokół przewodnika

16.2 Linie pola magnetycznego

Ważne w tej lekcji:
- kształt linii,
- linie jako zamknięte pętle,
- zwojnica i elektromagnes.

Przypomnij sobie:
- Oddziaływania magnetyczne możemy opisywać za pomocą pojęcia pola.
- Źródłem pola magnetycznego są magnesy oraz poruszające się ładunki elektryczne.

Linie pola tworzonego przez magnesy

Podobnie jak w przypadku elektrostatyki pole magnetyczne będziemy przedstawiać graficznie za pomocą linii pola. Pomoże to lepiej zrozumieć omawiane zjawiska i rozwiązywać zadania.
Doświadczalne uzyskanie ich obrazu jest jeszcze prostsze niż w przypadku pola elektrycznego.

Doświadczenie 21 – obowiązkowe

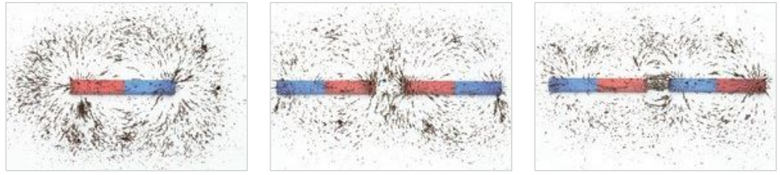
Linie pola magnetycznego wokół magnesów trwałych

1. Przygotuj kawałek sztywnej przezroczystej folii lub tekturki, dwa magnesy sztabkowe (w kształcie podłużnych prostopadłościanów) i stalowe opiłki. Możesz poprosić o opiłki w punkcie dorabiania kluczy – zbierz je magnesem włożonym do odwróconego na lewą stronę woreczka strunowego. Po przewróceniu woreczka na prawą stronę i zamknięciu oderwij od niego magnes.

   Uwaga! W czasie zbierania opiłków i w czasie przeprowadzania doświadczeń używaj okularów ochronnych. Zdejmij je dopiero wtedy, gdy opiłki będą już w zamkniętym opakowaniu, np. w woreczku strunowym, a ty dokładnie umyjesz ręce.

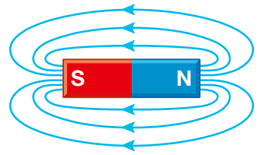
2. Połóż na stole jeden magnes.
3. Tuż nad nim umieść folię lub tekturkę i rozsyp na niej opiłki.
4. Postukaj delikatnie w folię lub tekturkę i obserwuj, jak układają się opiłki (zdjęcie a). Naszkicuj powstałe linie.
5. Połóż na stole dwa magnesy, zbliżone do siebie jednakowymi biegunami (zdjęcie b). Wykonaj czynności opisane w punktach 3. i 4.
6. Odwróć jeden z magnesów tak, aby leżały na stole zbliżone do siebie różnymi biegunami (zdjęcie c). Powtórnie wykonaj czynności opisane w punktach 3. i 4.

a) **b)** **c)**



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. 16.12). Przyjmuje się, że zwrot linii pola magnetycznego jest **od bieguna północnego do południowego**. Na rysunku zaznaczamy ten zwrot za pomocą strzałek (rys. 16.13).
Silniejszemu polu magnetycznemu odpowiadają na rysunku gęściej narysowane linie pola. Na przykład w pobliżu bieguna magnesu linie biegną bliżej siebie, niż ma to miejsce w większej odległości od magnesu.

Rys. **16.12.** Jeśli zamiast opiłków użyjemy igieł magnetycznych, od razu możemy określić zwrot linii pola magnetycznego



Rys. **16.13.** Magnes sztabkowy i linie pola magnetycznego z zaznaczonymi zwrotami

Linie pola wokół prostego przewodnika

Wiesz już, że pole magnetyczne może być wywarzane także przez prąd elektryczny. W jaki sposób są ułożone linie tego pola?

Doświadczenie 22 – obowiązkowe

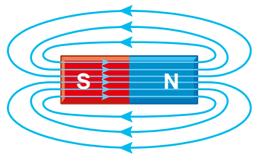
Pole magnetyczne wokół prostego przewodnika z prądem

1. Przygotuj kompas, ogniwo D, 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 prąd płynący w obwodzie nie mają początków i końców, ale przybierają kształt okręgów.

Linie pola magnetycznego są zamknięte

Okazuje się, że linie pola magnetycznego są zamknięte również w przypadku magnesów trwałych. Wiesz już, że te linie biegną na zewnątrz magnesu od bieguna północnego do południowego. Tam jednak się nie kończą, ale biegną wewnątrz magnesu z powrotem do bieguna północnego (rys. 16.14).

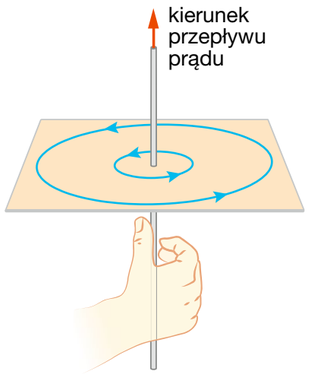


Rys. **16.14.** Pole magnetyczne występuje wewnątrz i na zewnątrz magnesu

Obecność pola magnetycznego wewnątrz magnesu wykażemy pod koniec kolejnej lekcji (w doświadczeniu 27. na s. 250).

Linie pola magnetycznego są zawsze zamknięte.

Jest to jedna z różnic między polem magnetycznym a elektrycznym. Jak pamiętasz, linie pola elektrycznego wychodzą z ładunków dodatnich i kończą się w ładunkach ujemnych. Natomiast nie istnieją ładunki magnetyczne (pojedyncze bieguny), które mogłyby stanowić końce linii pola magnetycznego.



Rys. **16.15.** Wyznaczanie zwrotu linii pola magnetycznego za pomocą reguły prawej ręki

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 wcześniejszej stronie. Możemy posłużyć się też regułą prawej ręki (rys. 16.15). Jeśli wyobrazimy sobie, że obejmujemy przewodnik palcami prawej ręki tak, aby odgięty kciuk wskazywał kierunek przepływu prądu, to zagięte palce wskażą zwrot linii pola.

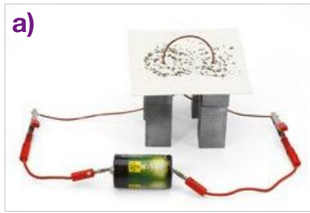
Pole magnetyczne wytwarzane przez pętlę i zwojnicę

Dotąd badaliśmy pole magnetyczne wokół prostego przewodnika. Zbadajmy teraz przypadek, kiedy ma on kształt jednej lub wielu pętli. Wykonajmy doświadczenie analogiczne do poprzedniego.

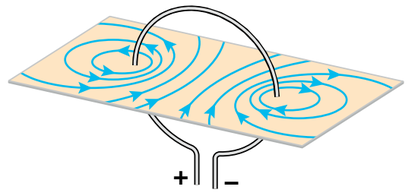
Doświadczenie 23 – obowiązkowe

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.



Jakie tym razem mają kształt linie pola wytwarzane przez przewód? W doświadczeniu 22. przewód był prosty, a teraz zrobiliśmy z niego jedną lub kilka pętli.
Linie pola wytwarzane przez jedną pętlę przedstawia rysunek 16.16. Możemy też zauważyć, że pole uzyskane w tym doświadczeniu jest silniejsze niż w doświadczeniu 22. – opiłki szybciej układały się wzdłuż jego linii.



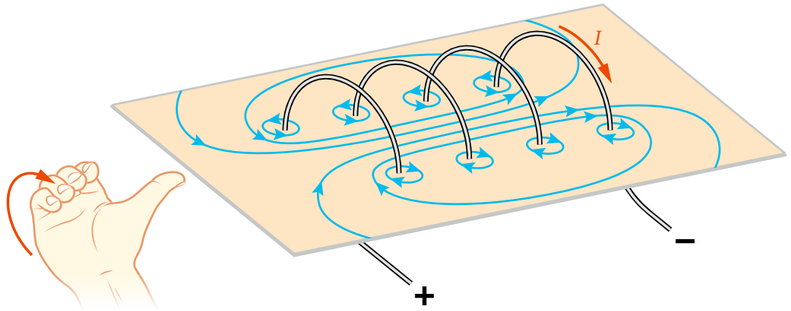
Rys. **16.16.** Pole magnetyczne wytwarzane przez pętlę z prądem

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.

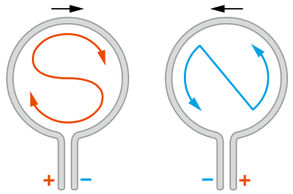
A to ciekawe

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.

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 (rys. 16.17). Zwróć uwagę na to, że wewnątrz zwojnicy pole jest zbliżone do pola jednorodnego. Z kolei z dala od zwojnicy pole jest podobne do pola magnesu trwałego.



Rys. **16.17.** Pole magnetyczne wytwarzane przez zwojnicę



Rys. **16.18.** Określanie biegunów zwojnicy

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 16.18. 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.

Elektromagnes

Wykonamy teraz doświadczenie pokazujące, w jaki sposób można jeszcze bardziej wzmocnić pole magnetyczne wytwarzane przez cewkę.

Doświadczenie 24

1. Przygotuj duży gwóźdź, długi kawałek przewodu w izolacji (najlepiej w emaliowej, czyli 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.

Jeśli do wnętrza zwojnicy wkładamy rdzeń, czyli pręt wykonany ze stali albo innego ferromagnetyku, to magnesuje się on od pola zwojnicy, a łączne pole staje się nawet setki razy większe. W ten sposób powstaje elektromagnes.
Elektromagnesy są silniejsze od magnesów trwałych, a przy tym dają się wyłączyć. Dlatego znalazły wiele zastosowań.

Zastosowania zwojnic i elektromagnesów

Z elektromagnesami i zwojnicami mamy do czynienia na co dzień. Oto niektóre przykłady.

Gdy w mieszkaniu wciskamy przycisk domofonu, elektromagnes otwiera drzwi. Włącza się on także wtedy, gdy układ elektroniczny rozpozna kod wpisany na klawiaturze przez mieszkańców wracających do domu.

Potężny elektromagnes podnosi złom żelazny. Magnes trwały nie może spełniać tej funkcji – gdyby nawet udało się wyprodukować odpowiednio mocny magnes, nie dałoby się go wyłączyć.

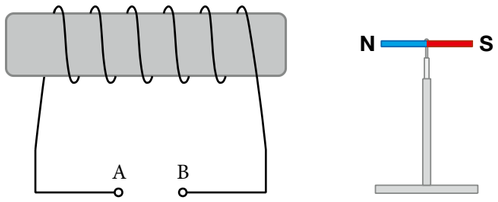
Zwojnica jest ważnym elementem głośnika (także stanowiącego część słuchawek). Dzięki jej oddziaływaniu z magnesem trwałym membrana porusza się i wprawia w ruch powietrze (więcej → s. 302–304).

W urządzeniach medycznych do magnetycznego rezonansu jądrowego (podręcznik cz. 2 → s. 248) wykorzystujemy ogromną zwojnicę, do której wsuwa się pacjenta. Pole magnetyczne jest tam bardzo silne, więc nie można wykonywać tego typu badań na przykład u osób z rozrusznikiem serca.

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.

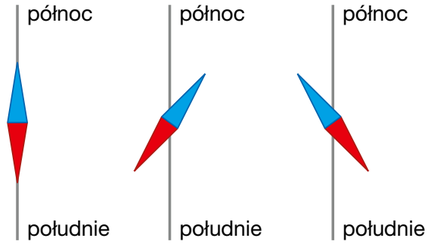


2. Przewodnik ustawiono wzdłuż południka magnetycznego Ziemi, a nad nim umieszczono igłę magnetyczną (rys. a).

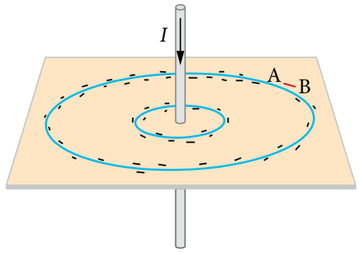
Następnie przewodnik podłączano do źródła napięcia. Początkowo igła magnetyczna odchyliła się w prawo (rys. b), a po zmianie kierunku przepływu prądu – w lewo (rys. c).

Określ kierunek przepływu prądu na rysunkach b) i c).

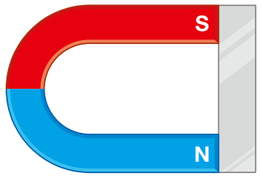
a) b) c)



3. Żelazne opiłki układają się wzdłuż linii pola magnetycznego, ponieważ 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.

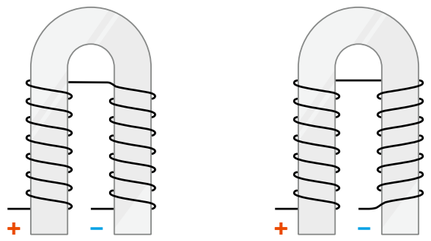


4. Narysuj w zeszycie linie pola magnetycznego w stalowej sztabce przyłożonej do magnesu podkowiastego (jak na poniższym rysunku) oraz ułożenie domen magnetycznych w tej sztabce.

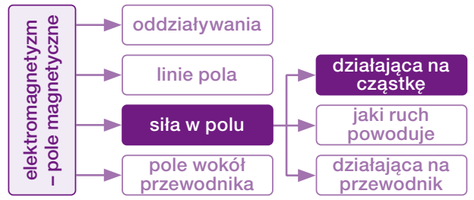


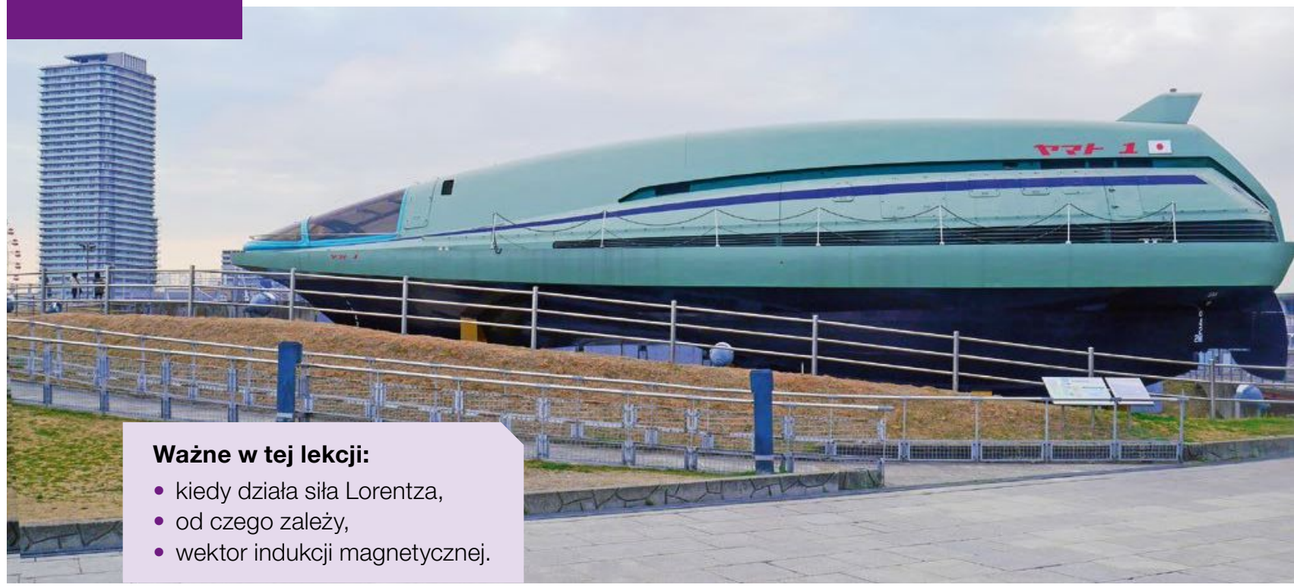
5. Uczniowie chcieli wykonać elektromagnes podkowiasty. W tym celu na rdzeń ze stali miękkiej nawinęli uzwojenie z drutu, a następnie podłączyli go do biegunów ogniwa. Na którym rysunku: a) czy b), poprawnie przedstawiono nawinięte zwoje? Odpowiedź uzasadnij. Wyznacz bieguny elektromagnesu.

a) b)



16.3 Siła Lorentza





Ważne w tej lekcji:
- kiedy działa siła Lorentza,
- od czego zależy,
- wektor indukcji magnetycznej.

Przypomnij sobie:
- Elektrony płynące w przewodzie powodują obrót igły magnetycznej.
- Wszystkie oddziaływania są wzajemne.

Siła działająca na poruszający się ładunek

Zbadamy, co się dzieje, gdy ładunek porusza się w polu magnetycznym.

Doświadczenie 25

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 jednym z biegunów do góry i nalej tyle wody, aby go zakrywała. Rozpuść w wodzie łyżeczkę soli i wysyp na powierzchnię roztworu 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. Aby wyjaśnić to zjawisko, przypomnijmy, że:
- Sól kuchenna to chlorek sodu (NaCl). Ta substancja rozpada się w wodzie na jony Na^+ i Cl^-.
- Dzięki tym jonom przez słoną wodę płynie prąd. Jony Na^+ poruszają się do bieguna ujemnego, a jony Cl^- – do bieguna dodatniego.

Przepływ prądu przez słoną wodę → s. 155

Skąd jednak ruch wody w kierunku poprzecznym? Jak zaobserwowałeś w doświadczeniu 20. s. 235, poruszające się w przewodzie ładunki elektryczne (elektrony) powodują ruch igły magnetycznej (czyli magnesu). To znaczy, że działają na magnes pewną siłą.
Wiemy, że wszystkie oddziaływania są wzajemne, a więc także magnes oddziałuje pewną siłą na poruszające się ładunki elektryczne.
Właśnie ta siła powoduje ruch jonów, a one z kolei wprawiają w ruch cząsteczki wody i pływające na niej drobiny pieprzu.

Na ładunek poruszający się w polu magnetycznym działa siła magnetyczna. Siłę tę nazywamy **siłą Lorentza**.

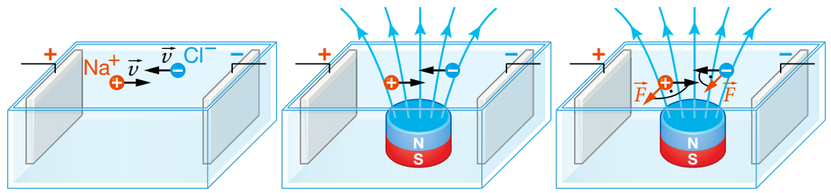
Wyjątkiem jest ruch wzdłuż linii pola → s. 248

Uwaga. W niektórych publikacjach siła Lorentza oznacza wypadkową opisanej tutaj siły oraz siły elektrycznej działającej na ten sam ładunek.

Kierunek siły Lorentza

Zaznaczmy na schemacie doświadczenia kierunek ruchu jonów między elektrodami i linie pola magnetycznego (rys. 16.19).
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. **16.19.** 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^- mają ładunki o przeciwnym znaku, więc pod wpływem pola elektrycznego poruszają się w przeciwne strony. Te dwa czynniki powodują, że siła Lorentza działa w tę samą stronę na oba rodzaje jonów.

Co to jest wektor indukcji magnetycznej

Wprowadzimy teraz pojęcie pozwalające opisywać pole magnetyczne w sposób ilościowy. Jest to **wektor indukcji magnetycznej** oznaczany symbolem $\vec{B}$.

A to ciekawe

Sposób wprawiania wody w ruch zbadany przez nas w doświadczeniu może służyć do napędu łodzi i okrętów. Na górze s. 245 i obok widzisz statek Yamato-1 o napędzie magnetohydrodynamicznym, zbudowany już na początku lat 90. XX wieku. Jednak do dziś nie rozwiązano wielu problemów technicznych mimo zaangażowania przez marynarki wojenne dużych środków. Wojskowych interesuje możliwość budowy okrętów podwodnych bez śruby napędowej, a więc trudniejszych do wykrycia przez nieprzyjaciela.

- Kierunek tego wektora jest styczny do linii pola.
- Przyjęto umownie zwrot taki sam jak zwrot linii pola.
- Wartość opisuje, jak silne jest pole magnetyczne w danym punkcie.

Jak widzisz, w przypadku pola elektrycznego podobną rolę pełni wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$. Jednak ścisła definicja tych wektorów musi być inna. Przecież wektor $\vec{E}$ określaliśmy jako siłę działającą na jednostkowy ładunek elektryczny, tymczasem ładunki magnetyczne nie istnieją.

Natężenie pola elektrycznego → s. 93

Wartość wektora indukcji magnetycznej

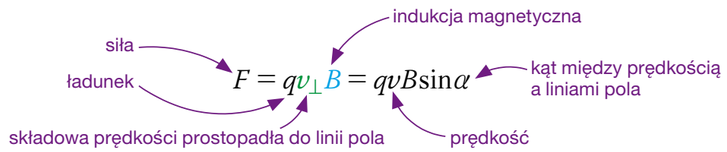
Do definicji wektora indukcji posłuży nam właśnie siła Lorentza.

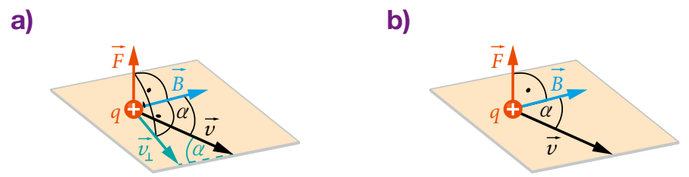
Wartość wektora indukcji jest liczbowo równa sile działającej na ładunek 1 C poruszający się prostopadle do linii pola z prędkością 1 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Aby obliczyć wartość indukcji w innych przypadkach, trzeba wziąć pod uwagę, że:

- siła Lorentza jest proporcjonalna zarówno do ładunku, jak i do prędkości,
- jeśli prędkość nie jest prostopadła do linii pola, to rozkładamy ją na składowe: prostopadłą i równoległą do linii pola, a bierzemy pod uwagę tylko składową prostopadłą.

Możemy więc zapisać wzór:





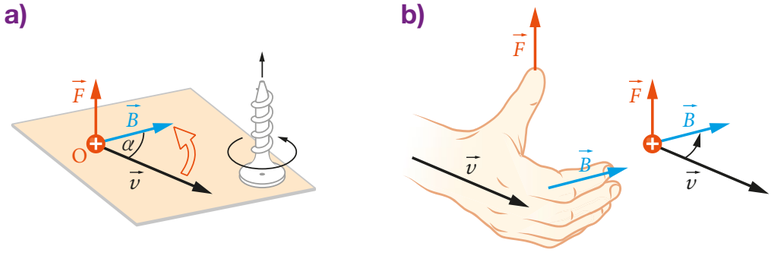
Rys. **16.20.** Położenie wektorów $\vec{F}$, $\vec{B}$ i $\vec{v}$ dla dodatniego q. Na rysunku a) pokazano dodatkowo składową prędkości prostopadłą do linii pola (czyli do wektora $\vec{B}$)

Cząstka poruszająca się wzdłuż linii pola

Z dotychczasowych rozważań wynika, że kiedy cząstka porusza się wzdłuż linii pola, działająca na nią siła Lorentza ma wartość zerową. Jest tak dlatego, że $\sin\alpha = \sin 0° = 0$, czy też równoważnie: składowa prostopadła prędkości ma wartość zerową.

Zwrot siły Lorentza

Na rysunku 16.21 przedstawiono dwa sposoby wyznaczania zwrotu siły Lorentza.



Rys. **16.21.** Wyznaczanie zwrotu siły Lorentza za pomocą reguły śruby prawoskrętnej (a) i reguły prawej ręki (b) dla dodatniego ładunku

Jednostka indukcji magnetycznej

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**:

$$1\ \mathrm{T} = 1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}$$

Tak więc na ładunek 1 C poruszający się z prędkością $1\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ prostopadle do linii pola magnetycznego o indukcji 1 T działa siła 1 N.

Tesla to bardzo duża jednostka (patrz infografika poniżej).

Iloczyn wektorowy dwóch wektorów, podręcznik cz. 2 → s. 392

Wzór z iloczynem wektorowym

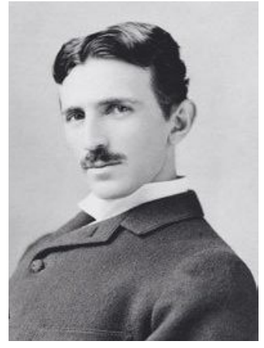
Wzór na siłę Lorentza możemy też zapisać za pomocą iloczynu wektorowego (podobnie jak niektóre wzory dotyczące bryły sztywnej):

$$\vec{F} = q\vec{v}\times\vec{B}$$

Określa on jednocześnie zarówno wartość, jak i kierunek oraz zwrot siły.

Natura siły magnetycznej

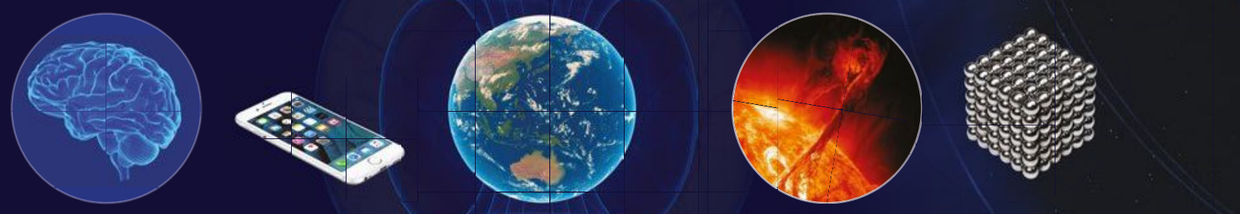
Wiemy, że gdy ładunek elektryczny się porusza, wytwarza pole magnetyczne. Z kolei w tym polu na inne poruszające się ładunki działa



Rys. **16.22.** Nikola Tesla (1856–1943), inżynier i wynalazca

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.



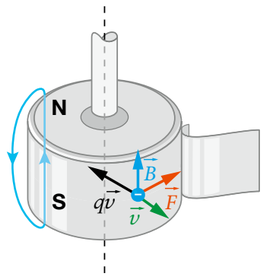
siła magnetyczna. Możemy więc stwierdzić, że poruszające się ładunki oddziałują z sobą siłą magnetyczną. Dawniej uważano, że siła magnetyczna zawsze polega na oddziaływaniu poruszających się ładunków. W przypadku dwóch magnesów trwałych byłoby to oddziaływanie elektronów poruszających się w ich wnętrzu. Dziś jednak wiemy, że nawet pojedynczy nieruchomy elektron 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 26

1. Przygotuj magnes neodymowy w kształcie walca, okrągłe ogniwo, pasek folii aluminiowej o wymiarach ok. 3 cm x 15 cm, stalowy wkręt lub 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). Do magnesu możesz także przymocować kawałek papieru, aby jego obrót był bardziej widoczny.
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.



Rys. **16.23.** Na elektron poruszający się we wnętrzu magnesu działa siła Lorentza

W doświadczeniu mieliśmy do czynienia z zamkniętym obwodem: elektrony płynęły z ujemnego bieguna baterii, przez gwóźdź, magnes i pasek folii, do dodatniego bieguna.

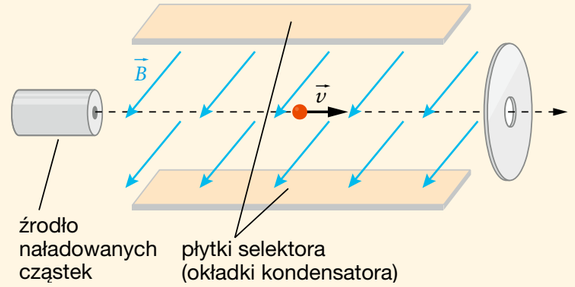
Gdy elektrony płynęły przez magnes, poruszały się prostopadle do linii pola magnetycznego, więc działała na nie siła Lorentza (rys. 16.23). To właśnie ona powodowała obrót magnesu.
Zwróć uwagę na to, że przy wyznaczaniu zwrotu siły Lorentza, działającej na elektrony, musimy wziąć pod uwagę ujemny znak 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 bieguna północnego, a więc odwrotnie niż na zewnątrz magnesu. Linie wewnątrz i na zewnątrz łączą się i tworzą pętle.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

W niektórych doświadczeniach ze strumienia naładowanych cząstek o różnych prędkościach chcemy wybrać tylko cząstki poruszające się z określoną prędkością. W takim przypadku możemy zastosować selektor prędkości – urządzenie, którego schemat przedstawiono na rysunku.
Dwie metalowe płytki tworzące kondensator 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 i kierunku ruchu cząstki.



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 wylotowej. W przypadku innej prędkości siły te się nie równoważą, a 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, a odległość między płytkami selektora wynosi $d = 1$ cm. Do selektora wpada cząstka o prędkości $v = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ i ładunku $q = +2e$.

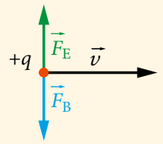
Oblicz wartość i wyznacz zwrot natężenia pola elektrycznego, przy którym ta cząstka nie zostanie odchylona w selektorze, oraz napięcie przyłożone między płytkami selektora. Zbadaj, czy odpowiedzi się zmienią, jeśli zmieni się znak lub wartość ładunku cząstki.

Dane: $\boldsymbol{B = 0{,}1\ \text{T}}$ – indukcja magnetyczna w selektorze,
$\boldsymbol{d = 1\ \text{cm}} = 0{,}01$ m – odległość między płytkami selektora,
$\boldsymbol{v = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$ – prędkość cząstki, $\boldsymbol{q = +2e}$ – ładunek cząstki

Szukane: $\vec{\boldsymbol{E}}$ – natężenie pola elektrycznego, $\boldsymbol{U}$ – napięcie między płytkami

Rozwiązanie:
Wyznaczamy zwrot natężenia pola elektrycznego
Aby naładowana cząstka przeszła przez układ pól w selektorze, siły magnetyczna i elektryczna działające na cząstkę muszą się równoważyć.

Na podstawie zwrotu indukcji magnetycznej i prędkości cząstki ustalamy, że siła Lorentza będzie 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**.



Zauważmy, że w przypadku ładunku ujemnego nie musimy zmieniać zwrotu natężenia pola. W takim przypadku zmienią się zarówno zwrot siły elektrycznej, jak i zwrot siły Lorentza, a to oznacza, że siły nadal będą się równoważyć.

Wyznaczamy wartość natężenia pola elektrycznego

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:

$$E = vB$$

Podstawiamy do niego dane liczbowe i wyznaczamy jednostkę:

$$E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0{,}1\ \text{T} \qquad [E] = \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{N}}{\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{C}} = \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$.

We wzorze na E nie występował ładunek cząstki. Skrócił się on, ponieważ proporcjonalnie do zmian tego ładunku zmieniają się zarówno siła elektryczna, jak i siła magnetyczna. Tak więc wynik nie zależy od tego ładunku.

Obliczamy napięcie

Napięcie przyłożone między płytkami selektora obliczamy ze wzoru na natężenie pola elektrycznego w kondensatorze:

$$E = \frac{U}{d} \quad \rightarrow \quad U = Ed$$

$$U = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}} \cdot 0{,}01\ \text{m} = 2000 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 2\ \text{kV}$$

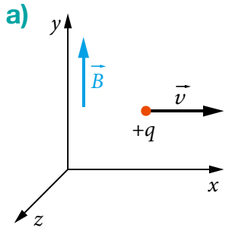
Napięcie a natężenie jednorodnego pola elektrycznego → s. 118.

Odpowiedź: Wektor natężenia pola elektrycznego jest zwrócony w górę i ma wartość $2 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ (czyli $2 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$). Napięcie między płytkami wynosi 2 kV. Te wielkości nie zależą od znaku ani wartości ładunku cząstki.

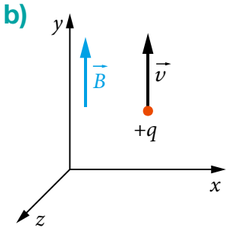
1. W układzie współrzędnych przedstawiono dodatnio naładowaną cząstkę w polu magnetycznym, którego wektor indukcji $\vec{B}$ jest zwrócony zgodnie ze zwrotem osi y. Na rysunkach a) i b) zaznaczono wektor prędkości cząstki. Porusza się ona w płaszczyźnie xy.

Określ kierunek i zwrot siły Lorentza w obu przedstawionych przypadkach.

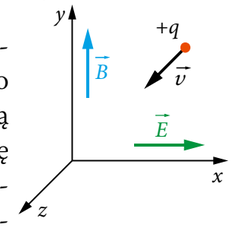
a)



b)



2. W układzie współrzędnych przedstawiono dodatnio naładowaną cząstkę poruszającą się w kierunku osi z w jednorodnych polach: magnetycznym i elektrycznym. Określ kierunki i zwroty siły elektrycznej i siły magnetycznej, które działają na cząstkę.



3. P 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.

4. 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 $F = 6 \cdot 10^{-16}$ N. Oblicz kąt między kierunkiem wektora prędkości elektronu a kierunkiem linii pola magnetycznego.

5. 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 jako x, y, z.

Uwaga! W podpunktach c) i d) nie zbliżaj magnesu do telefonu bardziej niż na 10 cm, aby nie uszkodzić urządzenia.

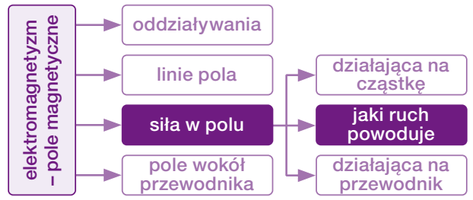
a) Połóż telefon płasko z dala od magnesów i ferromagnetyków. Twój telefon mierzy teraz wektor indukcji ziemskiego pola magnetycznego, który ma składową poziomą (w kierunku północ-południe) oraz składową pionową. Obracaj telefon i obserwuj, jak zmieniają się poszczególne składowe wektora indukcji. Zastanów się, jak na tej podstawie określić ustawienie osi x, y i z magnetometru względem obudowy telefonu.

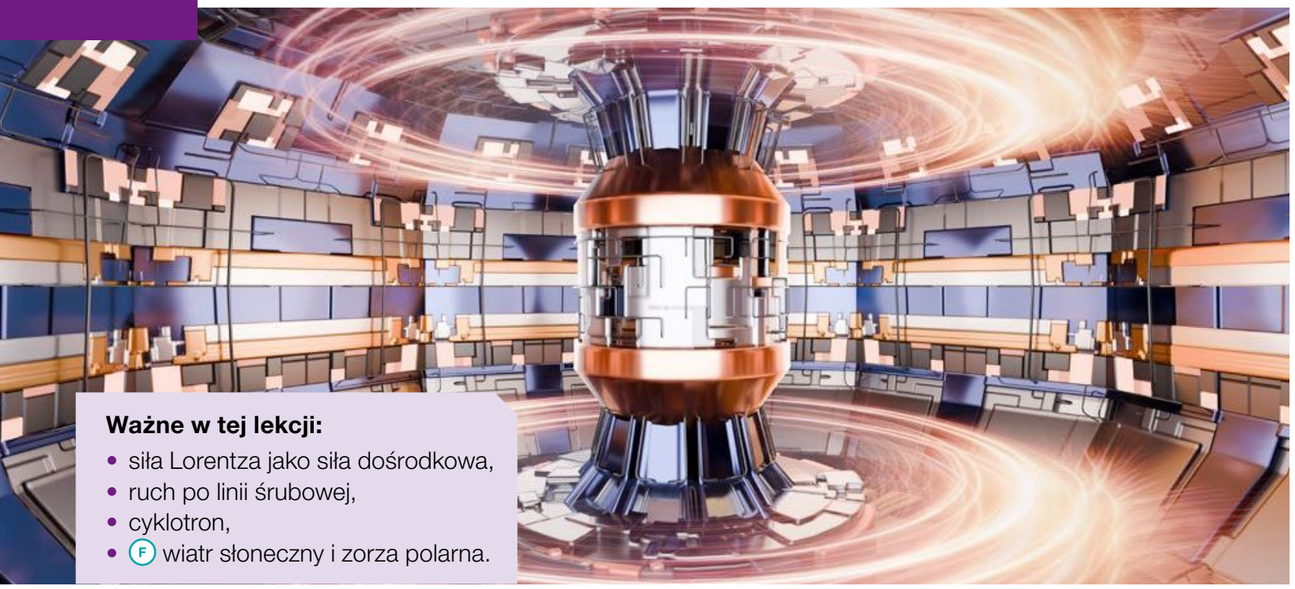
b) Zmierz poziomą i pionową składową indukcji ziemskiego pola magnetycznego. Oblicz wartość wektora indukcji magnetycznej.

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.

16.4 Ruch w polu magnetycznym

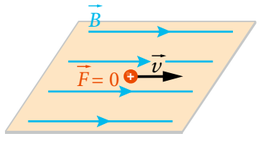




Ważne w tej lekcji:
- siła Lorentza jako siła dośrodkowa,
- ruch po linii śrubowej,
- cyklotron,
- (F) wiatr słoneczny i zorza polarna.

Przypomnij sobie:
- Na ciało naładowane elektrycznie poruszające się w polu magnetycznym działa siła Lorentza.
- Wyjątkiem jest ciało poruszające się wzdłuż linii pola magnetycznego.
- Jeśli na ciało działa siła wypadkowa o niezmiennej wartości i stale prostopadła do jego prędkości, to ciało porusza się po okręgu. Taką siłę nazywamy siłą dośrodkową.

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.
Nie jest to tylko teoretyczne ćwiczenie, ponieważ nasze wnioski pozwolą wyjaśnić zarówno zjawiska zachodzące w przyrodzie, jak i działanie urządzeń technicznych.
Wspomniany ruch może wyglądać różnie w zależności od tego, jak jest skierowana początkowa prędkość cząstki względem kierunku linii pola. Rozważymy więc kilka przypadków.



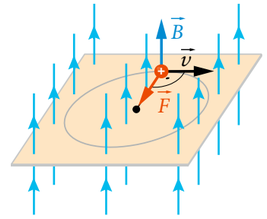
Rys. **16.24.** Siła Lorentza działająca na naładowane ciało poruszające się wzdłuż linii pola ma wartość 0

Ruch wzdłuż linii pola

To najprostszy przypadek. Na ciało poruszające się wzdłuż linii pola magnetycznego nie działa siła Lorentza.
Jeżeli nie działają żadne inne siły, to zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki takie ciało porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym (rys. 16.24).

Prędkość prostopadła do linii pola

Rozważmy teraz przypadek, kiedy w pewnej chwili ciało porusza się **prostopadle do linii pola magnetycznego**. Wtedy działająca na nie siła Lorentza jest prostopadła zarówno do prędkości, jak i do wektora indukcji $\vec{B}$ (rys. 16.25).



Rys. **16.25.** Siła Lorentza działająca na naładowane ciało poruszające się prostopadle do linii pola

Jak wiesz, siła prostopadła do prędkości nie powoduje zmiany jej wartości, a tylko zmianę kierunku ruchu. Ponieważ wraz z jego zmianą zmienia się także kierunek siły $\vec{F}$ (jest on stale prostopadły do prędkości $\vec{v}$), ciało porusza się po okręgu. Siła Lorentza odgrywa więc w tym przypadku rolę siły dośrodkowej.

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,
podręcznik cz. 1 → s. 169

Ponieważ funkcję siły dośrodkowej pełni w tym przypadku siła Lorentza, więc przyrównujemy:

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

$\vec{v} \perp \vec{B}$, czyli $\alpha = 90°$
$\sin\alpha = 1$, stąd $F = qvB$

Z tego wzoru wyznaczamy promień i otrzymujemy:

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

Sprawdźmy, że zgadza się jednostka:

$$[R] = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{C} \cdot \mathrm{T}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{N}} = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}}{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}} = \mathrm{m}$$

Promień okręgu, po którym porusza się naładowane ciało w polu magnetycznym, jest więc wprost proporcjonalny do masy i prędkości oraz odwrotnie proporcjonalny do ładunku i indukcji.

Te zależności można wyjaśnić intuicyjnie:

- im większa masa ciała, tym większa jego bezwładność, a więc tym trudniej zmienić kierunek jego ruchu,
- im większa prędkość ciała, tym większy promień okręgu, po którym ciało się porusza,
- im większy ładunek ciała i im silniejsze pole magnetyczne, tym większa wartość siły Lorentza, a większa siła powoduje większe zakrzywienie toru ruchu ciała (czyli zmniejszenie promienia).

Czas okrążenia toru

Czas jednego pełnego okrążenia możemy obliczyć ze wzoru:

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad \rightarrow \quad T = \frac{2\pi R}{v}$$

Kiedy do tego wzoru podstawimy wyznaczony wcześniej promień R, to otrzymamy wzór:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

Widzimy, że okres, a więc także częstotliwość obiegu ciała w polu magnetycznym **nie zależą od prędkości** tego ciała. Ten fakt bardzo ułatwia sterowanie cyklotronem – urządzeniem do rozpędzania cząstek elementarnych albo jonów (infografika → s. 258–259).

Dowolny kierunek prędkości początkowej

Jeśli wektor prędkości początkowej naładowanego ciała 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.

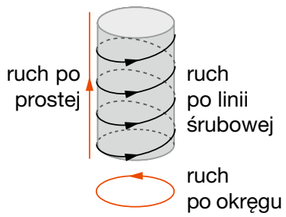
Zasada niezależności ruchów, podręcznik cz. 1 → s. 107

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,
- w płaszczyźnie prostopadłej do linii pola ruch odbywa się po okręgu.

Złożeniem takich dwóch ruchów jest ruch po linii śrubowej (rys. 16.26). Widzimy więc, że torem naładowanego ciała w jednorodnym polu magnetycznym może być:

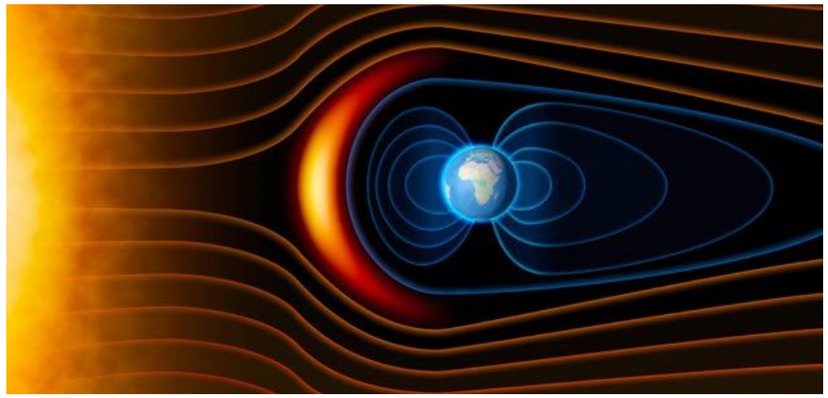
- linia prosta – jeżeli prędkość początkowa jest równoległa do linii pola,
- okrąg – jeżeli prędkość początkowa jest prostopadła do linii pola,
- linia śrubowa – w pozostałych przypadkach.



Rys. **16.26.** Ruch ciała po linii śrubowej to złożenie ruchu po okręgu i ruchu po prostej

(F) Wiatr słoneczny

Omówimy teraz przykład występowania w przyrodzie opisanego wyżej ruchu. Otóż 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. 16.27 na następnej stronie).



Rys. **16.27.** Pole magnetyczne Ziemi chroni Ziemię przed wiatrem słonecznym

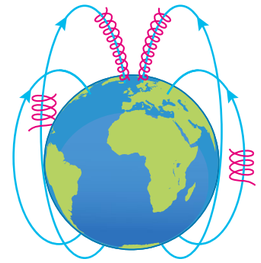
W ten sposób pole magnetyczne chroni naszą planetę przed wiatrem słonecznym. Aby zrozumieć, jakie stanowi on zagrożenie, porównajmy Ziemię z Marsem.

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.

(F) Powstawanie zorzy polarnej

Niektóre cząstki wiatru słonecznego dostają się jednak w pobliże Ziemi. Poruszają się po liniach śrubowych wokół linii ziemskiego pola magnetycznego i razem z tymi liniami skręcają w stronę biegunów magnetycznych naszej planety (rys. 16.28).

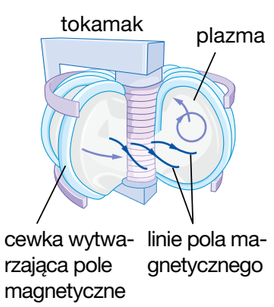
Cząstki te powodują wybijanie elektronów z cząsteczek znajdujących się w górnych warstwach atmosfery, czyli jonizację powietrza. Świecenie zjonizowanego powietrza obserwujemy jako jedno z najpiękniejszych zjawisk w atmosferze – **zorzę polarną** (patrz zdjęcie na początku działu → s. 229).



Rys. **16.28.** Tory naładowanych cząstek promieniowania kosmicznego w polu magnetycznym Ziemi

A to ciekawe

Trwają prace nad wykorzystaniem syntezy termojądrowej – przemiany wodoru w hel – do produkcji energii. Największym problemem jest fakt, że taka przemiana zachodzi tylko w temperaturze milionów stopni. Żadne naczynie nie wytrzymałoby kontaktu z tak gorącą plazmą, dlatego utrzymuje się ją zawieszoną w próżni dzięki sile Lorentza. Na rysunku widzisz schemat tokamaka (ros. toroid**a**lnaja k**a**miera z magn**i**tnymi kat**u**szkami – toroidalna komora z cewkami magnetycznymi) – urządzenia do badań nad taką syntezą. Rysunek tokamaka znajduje się także na górze s. 254.



Cyklotron

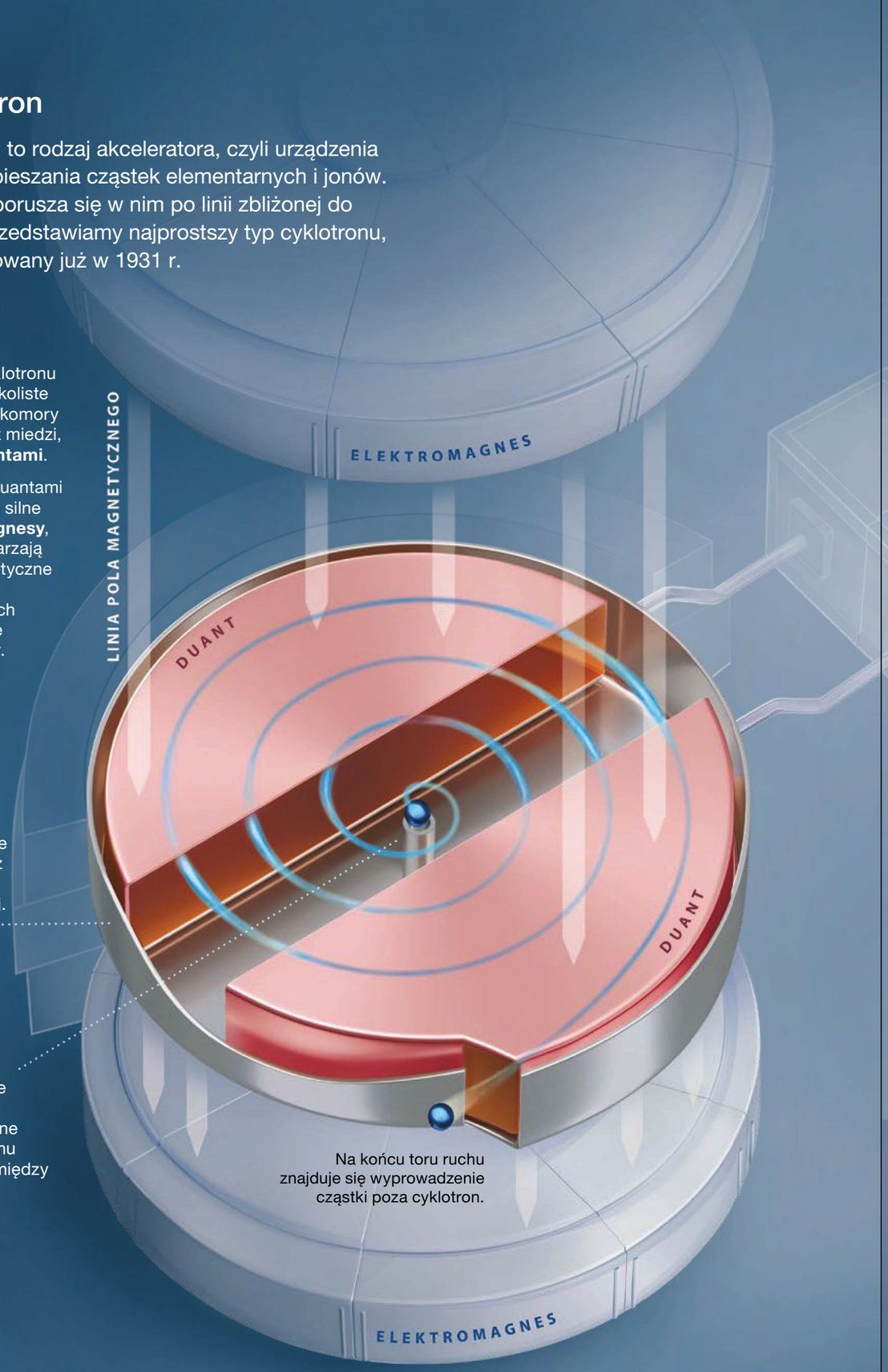
Cyklotron to rodzaj akceleratora, czyli urządzenia do przyspieszania cząstek elementarnych i jonów. Cząstka porusza się w nim po linii zbliżonej do spirali. Przedstawiamy najprostszy typ cyklotronu, skonstruowany już w 1931 r.

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**.

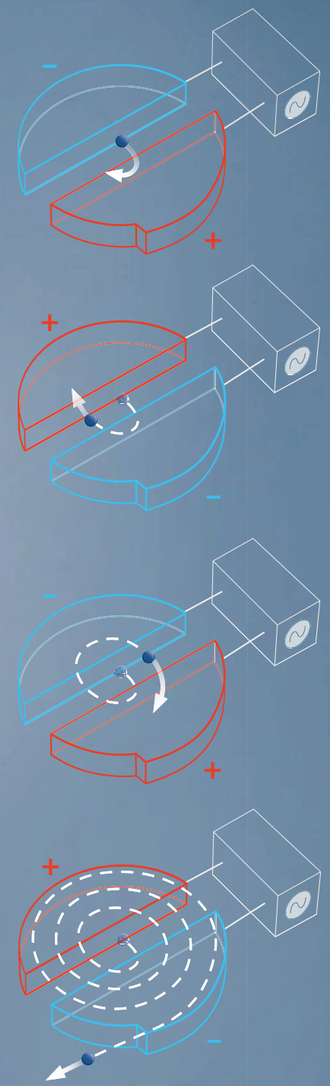
Naładowane cząstki są wprowadzane do cyklotronu pośrodku, między duantami.



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.



Duanty są podłączone do źródła napięcia przemiennego.

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.

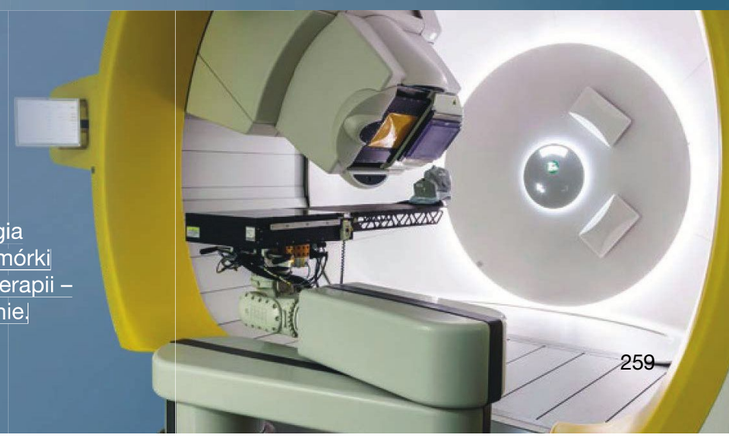
W trakcie ruchu cząstki wewnątrz duantu jej prędkość się nie zmienia. Tor ruchu cząstki jest jedynie zakrzywiany w wyniku oddziaływania pola magnetycznego.

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.



Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

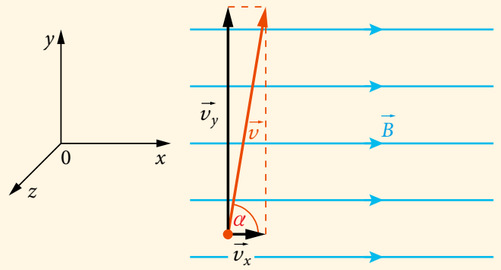
Przykład

Elektron porusza się z prędkością $v = 1\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$ w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $B = 10$ mT. Kąt między wektorem prędkości elektronu a liniami pola wynosi $\alpha = 80°$. Oblicz średnicę i skok linii śrubowej, po której porusza się elektron.

Dane: $\boldsymbol{v = 1\ \frac{\text{km}}{\text{s}}}$ – prędkość elektronu, $\boldsymbol{B = 10\ \text{mT}}$ – indukcja pola magnetycznego, $\boldsymbol{\alpha = 80°}$ – kąt między prędkością elektronu i liniami pola
Szukane: $\boldsymbol{d}$ – średnica linii śrubowej, $\boldsymbol{S}$ – skok linii śrubowej

Rozwiązanie:

Rozkładamy prędkość na składowe
Ponieważ elektron nie porusza się ani równolegle, ani prostopadle do linii pola, więc musimy rozpatrzyć jego ruch oddzielnie w kierunku równoległym do linii pola i w płaszczyźnie prostopadłej do nich.
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 $v_y = v\sin\alpha$.



Ruch wzdłuż osi *x*
Wektor $\vec{v_x}$ jest równoległy do wektora indukcji magnetycznej. Oznacza to, że siła magnetyczna $F_x = 0$. Elektron wzdłuż osi x porusza się więc ruchem jednostajnym prostoliniowym, w którym przebyta droga jest równa:

$$x = v_x t = v\cos\alpha \cdot t$$

Ruch w płaszczyźnie *yz*
W tej płaszczyźnie elektron porusza się początkowo z prędkością skierowaną wzdłuż osi y, 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. 255–256:

$$R = \frac{mv_y}{qB} = \frac{mv\sin\alpha}{qB} \qquad T = \frac{2\pi m}{qB}$$

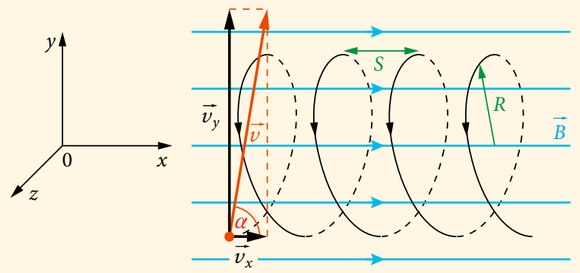
Złożenie ruchów
Wracamy do ruchu cząstki, która wykonuje oba wyżej wymienione ruchy składowe jednocześnie. Porusza się ona po okręgu w płaszczyźnie yz, a zarazem ruchem prostoliniowym wzdłuż osi x. Tor ruchu wypadkowego elektronu jest więc linią śrubową.

Promień śruby R jest równy promieniowi okręgu, po którym porusza się elektron:

$$R = \frac{mv\sin\alpha}{qB}$$

Średnica wynosi $d = 2R$, więc możemy zapisać:

$$d = \frac{2mv\sin\alpha}{qB}$$



Podstawiamy dane liczbowe i wyznaczamy jednostkę:

$$d = \frac{2 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 1000\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sin 80°}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 0{,}01\ \text{T}}$$

$$[d] = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{C} \cdot \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}}} = \text{m}$$

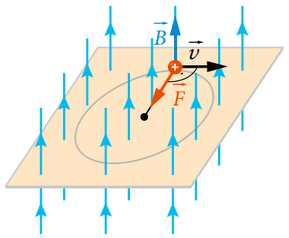
Ostatecznie otrzymujemy: $d = 1{,}12 \cdot 10^{-6}\ \text{m} = 1{,}12\ \mu\text{m}$.
Skok linii śrubowej S jest równy drodze przebytej przez elektron ruchem jednostajnym z prędkością v_x wzdłuż linii pola w czasie okresu T:

$$S = v_x T = v\cos\alpha \cdot T = v\cos\alpha \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

Po podstawieniu danych liczbowych mamy: $S = 6{,}2 \cdot 10^{-7}\ \text{m} = 0{,}62\ \mu\text{m}$.

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 naładowanego dodatnio ciała w polu magnetycznym. Określ, co zmieniłoby się na rysunku, gdyby ładunek ciała był ujemny.



2. Proton porusza się z prędkością 5 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ po okręgu o średnicy 4 m położonym w płaszczyźnie prostopadłej do linii jednorodnego pola magnetycznego. Oblicz indukcję pola magnetycznego.

3. P Proton porusza się z prędkością 2 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $B = 5$ mT. Jego torem jest linia śrubowa o promieniu $R = 3$ mm. Jaki jest jej skok?

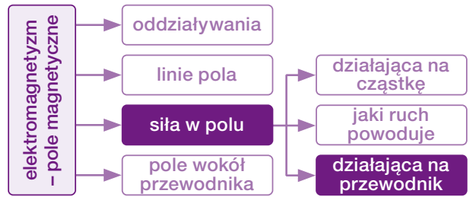
4. Bieguny magnetyczne Ziemi stale się przemieszczają i bywało już w jej historii tak, że znajdowały się z dala od biegunów geograficznych. Gdzie wtedy pojawiały się zorze polarne: przy biegunach geograficznych czy magnetycznych?

5. Elektron i proton promieniowania kosmicznego poruszają się z tą samą prędkością $5 \cdot 10^5\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ prostopadle do linii 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?

16.5 Siła elektrodynamiczna



Ważne w tej lekcji:
- pojęcie siły elektrodynamicznej,
- wyznaczanie wartości, kierunku i zwrotu.

Przypomnij sobie:
- Prąd elektryczny to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.
- Na ładunek poruszający się w polu magnetycznym działa siła zwana siłą Lorentza.

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 27

1. Przygotuj dwa długie gwoździe, baterię D, mocny magnes, 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 (jednym z biegunów w górę). Podłącz gwoździe do baterii.

   Uwaga! Ramka się rozgrzewa, zwłaszcza w miejscach, gdzie dotyka gwoździ. Nie zostawiaj obwodu włączonego na dłużej niż to konieczne.
5. 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. Kiedy odwróciliśmy bieguny magnesu, kierunek odchylenia się przewodu również się zmienił.

Siłę działającą w polu magnetycznym na przewodnik, przez który płynie prąd, nazywamy siłą elektrodynamiczną.

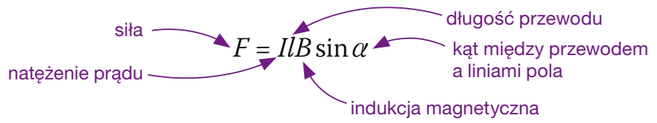
Skąd tyle nazw

Mnogość nazw sił stosowanych w opisie zjawisk związanych z oddziaływaniem magnetycznym wynika z tego, że powstały one w czasach, kiedy 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.

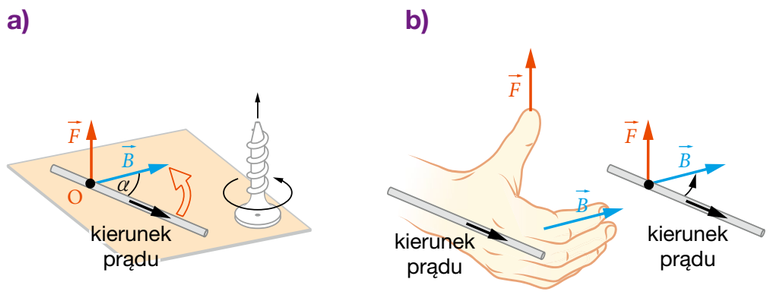
Współczesna fizyka pokazuje, że nawet siła elektrostatyczna i siła magnetyczna są przejawami tego samego oddziaływania elektromagnetycznego.

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.
Wzór na wartość siły elektrodynamicznej ma postać:



Jej kierunek i zwrot wyznaczamy w ten sam sposób co kierunek i zwrot siły Lorenza (rys. 16.29). Pamiętaj, że „kierunek prądu" oznacza tutaj umowny kierunek „od plusa do minusa", przeciwny do rzeczywistego ruchu elektronów w przewodniku.



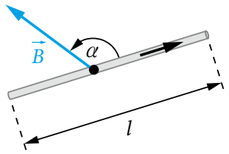
Rys. **16.29.** Wyznaczanie kierunku i zwrotu siły elektrodynamicznej

Skoro poruszają się elektrony (ładunki ujemne), to dlaczego zwrot siły elektrodynamicznej jest taki, jak przedstawiono na rysunku 16.29?

Pełne uzasadnienie wzoru znajdziesz w ramce poniżej. Na razie zwróć uwagę na to, że proporcjonalność tej siły do natężenia prądu i do długości przewodu łatwo zrozumieć intuicyjnie.
Zauważ, że przewód możemy podzielić w myślach na pół i potraktować jak dwa cieńsze (rys. 16.30a). W każdym z nich płynie prąd o takim samym natężeniu I, a na cienki przewód działa siła F. Zatem w całym przewodzie płynie prąd o natężeniu $2I$, a na przewód działa siła $2F$.
Podobnie dłuższy przewód można potraktować jako dwa krótsze o tej samej długości l (rys. 16.30b), na które działa siła F. Zatem na cały przewód o długości $2l$ działa siła $2F$.

Wyprowadzenie wzoru na siłę elektrodynamiczną

Rozważmy przewodnik ustawiony pod kątem α do linii pola magnetycznego o indukcji $\vec{B}$. Płynie w nim prąd o natężeniu I. Chcemy obliczyć, jaka siła działa na odcinek tego przewodu o długości l.



Kiedy prąd nie płynie, elektrony w przewodzie poruszają się ruchem chaotycznym. Działające na nie siły Lorentza mają różne przypadkowe kierunki i wartości. Dlatego się redukują. To przekonuje nas, że gdy prąd płynie, możemy brać pod uwagę tylko dryf elektronów, jakby wszystkie przemieszczały się z jednakową prędkością v wzdłuż przewodu.
Na każdy elektron działa wtedy siła Lorentza o wartości:

$$F_e = evB\sin\alpha$$

Siła działająca na wszystkie elektrony wynosi:

$$F = NevB\sin\alpha$$

gdzie N jest liczbą elektronów. Wiemy, że Ne to łączny ładunek q elektronów swobodnych znajdujących się w przewodzie, więc otrzymujemy wzór:

$$F = qvB\sin\alpha$$

Skoro elektrony poruszają się z prędkością v, to przepłynięcie przez przewód długości l zajmuje im czas t taki, że $v = \frac{l}{t}$. Wobec tego mamy:

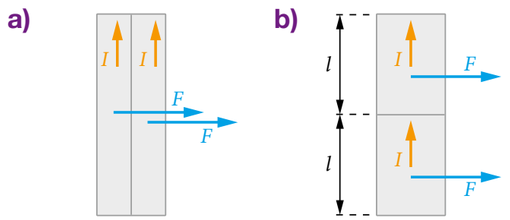
$$F = q\frac{l}{t}B\sin\alpha = \frac{q}{t}lB\sin\alpha$$

Jednak skoro w czasie t przez przewodnik przepływa ładunek q, to stosunek tych dwóch wielkości jest po prostu natężeniem prądu:

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

Ostatecznie otrzymujemy wzór:

$$F = IlB\sin\alpha$$



Rys. **16.30.** Przewód możemy potraktować jako dwa cieńsze przewody (a) lub dwa krótsze przewody (b)

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 dziale.

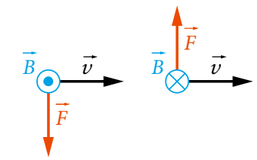
Jak rysujemy strzałki prostopadłe do kartki

Na rysunku 16.31 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 schematyczne przedstawienie strzały z łuku widzianej z przodu lub z tyłu. Podobnie typowa strzałka to schematyczny obraz strzały, tyle że widzianej z boku.



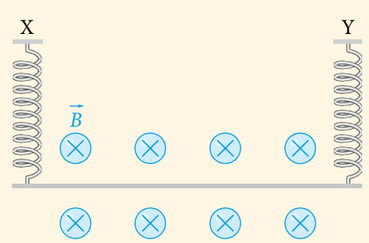
Rys. **16.31.** Ruch ładunku prostopadły do linii pola przedstawiony w płaszczyźnie obserwatora

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.



Dane: $m = 10\ \mathrm{g} = 0{,}01\ \mathrm{kg}$ – masa pręta, $I = 5\ \mathrm{A}$ – natężenie prądu płynącego przez pręt, $l = 20\ \mathrm{cm} = 0{,}2\ \mathrm{m}$ – długość pręta, $k = 50\%$ – o ile wydłużyły się sprężynki
Szukane: **kierunek prądu**, B – indukcja pola magnetycznego

Rozwiązanie:

Ustalamy kierunek przepływu prądu

Na pręt zadziałała siła elektrodynamiczna prostopadła zarówno do kierunku linii pola, jak i do kierunku przepływu prądu. Z treści zadania wiemy, że spowodowała ona wydłużenie sprężynek, zatem była zwrócona w dół.

Natomiast indukcja pola magnetycznego była skierowana prostopadle do rysunku, w głąb kartki (patrz wyjaśnienie symbolu ⊗ nad przykładem).

Zgodnie z regułą prawej ręki oznacza to, że prąd płynął od punktu Y do punktu X (a więc zacisk Y podłączono do dodatniego bieguna źródła prądu, a zacisk X – do ujemnego).

Analizujemy zjawiska

- 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:

$$F_{el} = \frac{1}{2}mg \qquad (1)$$

Do F proporcjonalne jest **wydłużenie**, czyli przyrost długości, a nie sama długość.

- Ponieważ prąd płynie prostopadle do linii pola, siła elektrodynamiczna jest równa:

$$F_{el} = IlB \qquad (2)$$

(sin 90° = 1, więc we wzorze $F_{el} = IlB\sin\alpha$ możemy pominąć sinus).

Wykonujemy obliczenia

Z zależności (2) wyznaczamy indukcję magnetyczną:

$$B = \frac{F_{el}}{Il}$$

i podstawiamy wzór (1):

$$B = \frac{\frac{1}{2}mg}{Il} = \frac{mg}{2Il}$$

Podstawiamy dane i wyznaczamy jednostkę:

$$B = \frac{0{,}01\ \mathrm{kg} \cdot 9{,}81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}}{2 \cdot 5\ \mathrm{A} \cdot 0{,}2\ \mathrm{m}}$$

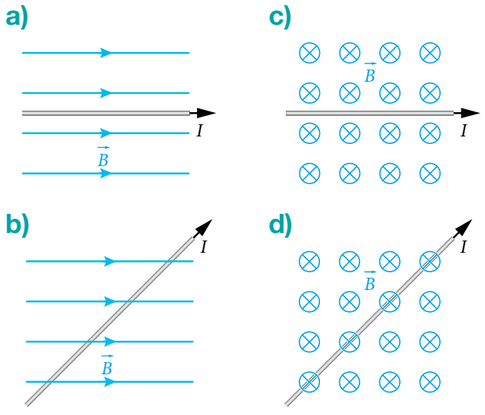
$$[B] = \frac{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}}{\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}} = \frac{\mathrm{N}}{\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}} \cdot \mathrm{m}} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = \mathrm{T}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $B = 0{,}05\ \mathrm{T}$.

Odpowiedź: Prąd płynie od punktu Y do punktu X. Indukcja pola magnetycznego ma wartość 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 a)–d).

Oblicz wartość siły elektrodynamicznej działającej na przewodnik oraz określ jej kierunek i zwrot.



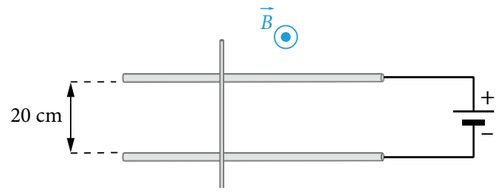
Uwaga. Na rysunkach b) i d) kąt między kierunkiem ułożenia przewodnika a brzegami kartki wynosi 45°.

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. Dwa długie miedziane pręty ustawiono poziomo w odległości $d = 20$ cm od siebie w polu magnetycznym o indukcji $B = 2$ mT (patrz rysunek – widok z góry). Każdy z prętów podłączono do jednego bieguna baterii o sile elektromotorycznej $\mathcal{E} = 9$ V i oporze wewnętrznym $r = 3\ \Omega$. Następnie na prętach położono prostopadle do nich trzeci, mniejszy pręt o masie $m = 1{,}5$ g.

W którą stronę i z jakim przyspieszeniem poruszy się pręt?

Pomijamy tarcie między prętami i ich opór elektryczny.



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.

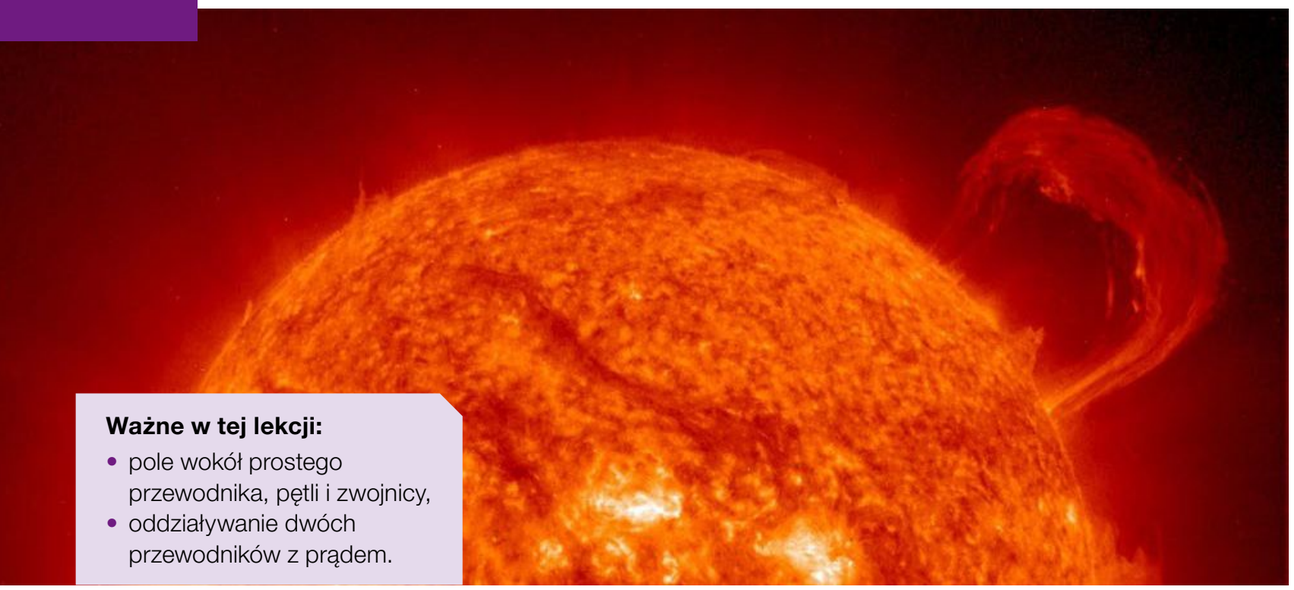
Jeśli nie masz statywu, możesz unieruchomić lupę, wkładając jej rączkę do pustej szklanej butelki.

c) Zbliż magnes do włókna żarówki. Obserwuj, jak zmienia się obraz na ścianie.

d) Wyjaśnij obserwowane zjawisko.

16.6 Pole wokół przewodnika z prądem

elektromagnetyzm – pole magnetyczne
- oddziaływania
- linie pola
- siła w polu
- **pole wokół przewodnika**

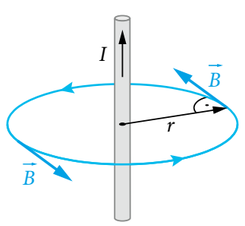


Ważne w tej lekcji:
- pole wokół prostego przewodnika, pętli i zwojnicy,
- oddziaływanie dwóch przewodników z prądem.

Przypomnij sobie:
- Prostoliniowy przewodnik z prądem jest źródłem pola magnetycznego, którego linie są okręgami otaczającymi ten przewodnik.
- Linie pola magnetycznego wokół pętli lub zwojnicy z prądem układają się podobnie do linii pola wokół magnesu, który umieścilibyśmy w ich wnętrzu.

Powiedzieliśmy, że przewodniki z prądem wytwarzają pole magnetyczne. Zbadaliśmy też, jak przebiegają linie takiego pola. W tej lekcji dowiemy się, w jaki sposób obliczyć wartość wektora indukcji pola magnetycznego wytworzonego przez przewodnik z prądem.

Prosty przewód



Rys. **16.32.** Prosty przewodnik z prądem: linie pola magnetycznego, wektor indukcji magnetycznej

Rozważmy pole magnetyczne wytwarzane przez długi prosty przewód (rys. 16.32), w którym płynie prąd o natężeniu I. Załóżmy, że przewód jest nieskończenie długi. 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.

Można wykazać, 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:

$$B = \text{stała} \cdot \frac{I}{r}$$

Jeśli przewód znajduje się w próżni, tę stałą zapisujemy w postaci $\frac{\mu_0}{2\pi}$, stąd:

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

μ to mała grecka litera mi

Sam symbol μ_0 oznacza stałą zwaną przenikalnością magnetyczną próżni. W dobrym przybliżeniu tak samo jest w powietrzu.

Wartość przenikalności magnetycznej próżni wynosi:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

Niezwykła wartość μ_0 wynika z dawnej definicji ampera, pozwala także na uproszczenie niektórych wzorów.

Dlatego wzór na wartość indukcji magnetycznej upraszcza się do wygodnej postaci:

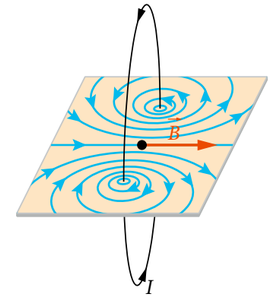
B – indukcja magnetyczna (jednostka, nie symbol wielkości!)

$$B = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot \frac{I}{r}$$

I – natężenie prądu; r – odległość od przewodu

Pojedyncza pętla

Jak silne jest pole magnetyczne wewnątrz pętli (rys. 16.33), 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 I prądu 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, że współczynnikiem proporcjonalności jest $\frac{\mu_0}{2}$, stąd wzór na indukcję w środku pojedynczej pętli ma postać:



Rys. **16.33.** Pętla, w której płynie prąd: linie pola magnetycznego, wektor indukcji magnetycznej w jej środku

B – indukcja magnetyczna; μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

I – natężenie prądu; R – promień pętli

Zwojnica

W przypadku długiej zwojnicy indukcja jest proporcjonalna do:
- natężenia prądu,
- liczby zwojów przypadających na jednostkę długości przewodnika (tego, jak gęsto są nawinięte zwoje).

Założenie, że zwojnica jest długa, oznacza, że jej długość l jest znacznie większa od średnicy i że badamy pole z dala od końców zwojnicy.

Można udowodnić, że współczynnikiem proporcjonalności jest μ_0. Tak więc nasz wzór przyjmuje postać:

indukcja magnetyczna

przenikalność magnetyczna próżni

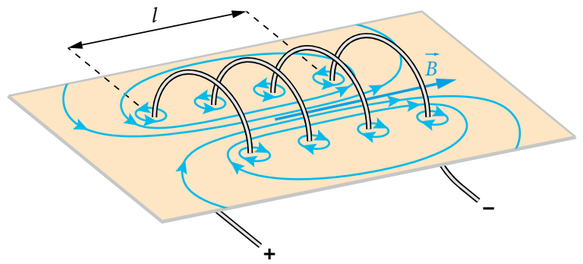
$$B = \mu_0 \left(\frac{n}{l}\right) I = \frac{\mu_0 n I}{l}$$

liczba zwojów

natężenie prądu

długość zwojnicy

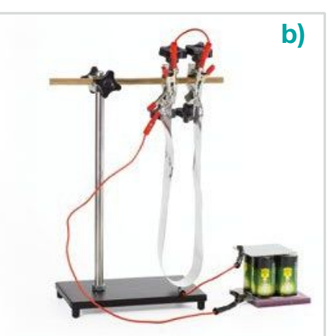
gęstość nawinięcia zwojów



Rys. **16.34.** Zwojnica: linie pola magnetycznego, wektor indukcji magnetycznej w jej środku

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 na siebie oddziaływać. Sprawdzimy to doświadczalnie.



Doświadczenie 28

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. Podłącz go 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 kiedy prąd płynie przez paski folii w tym samym kierunku, paski się przyciągają, a gdy w przeciwnych kierunkach – odpychają.

Siła oddziaływania dwóch przewodników

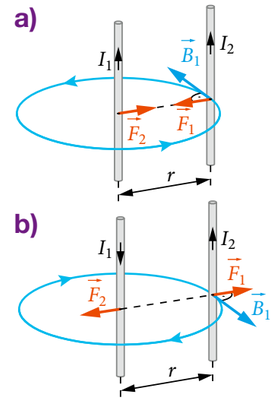
Obliczmy siłę działającą między przewodnikami. Aby to zrobić, rozważmy dwa równoległe przewodniki o długości l, przez które płyną prądy o natężeniach I_1 oraz I_2 (rys. 16.35). Niech odległość r między nimi będzie znacznie mniejsza od ich długości.
Wyznaczmy siłę elektrodynamiczną działającą na drugi przewodnik, znajdujący się w polu wytworzonym przez pierwszy przewodnik. Indukcję pola 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:

$$F_2 = I_2 l B_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$$

Na pierwszy przewodnik działa siła o takiej samej wartości.
Zwrot siły działającej na przewód wyznaczamy z reguły prawej ręki (patrz → s. 263). Dzięki temu wiemy, kiedy przewody się przyciągają, a kiedy odpychają – to nam pozwala wyjaśnić wyniki doświadczenia 28.

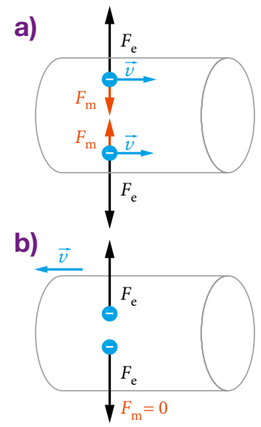


Rys. **16.35.** Siły działające między prostymi równoległymi przewodnikami, w których płynie prąd: a) w tę samą stronę – przyciąganie, b) w przeciwne strony – odpychanie

(F) Pole magnetyczne i względność ruchu

Wyobraźmy sobie dwa elektrony poruszające się obok siebie w tę samą stronę i z taką samą prędkością (rys. 16.36a). Oddziałują one zarówno siłą magnetyczną F_m, jak i siłą elektryczną F_e.
Jeśli jednak popatrzymy na to samo zjawisko w układzie odniesienia elektronów – a możemy to zrobić, ponieważ ruch jest względny – stwierdzimy, że elektrony się nie poruszają, a więc nie działa między nimi siła magnetyczna, a jedynie siła elektryczna (rys. 16.36b).

Jak wyjaśnić tę sprzeczność? Na gruncie znanych ci praw fizyki klasycznej jest to niemożliwe. Rozwiązanie przyniosła teoria względności, opracowana przez Alberta Einsteina.



Rys. **16.36.** Ruch elektronów w rurze próżniowej w różnych układach odniesienia

A to ciekawe

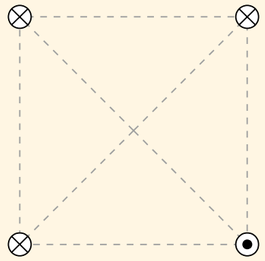
Przykładem oddziaływania magnetycznego pomiędzy poruszającymi się ładunkami jest jedno ze zjawisk obserwowanych w zewnętrznych warstwach Słońca. Temperatura jest tam tak wysoka, że gaz tworzy plazmę składająca się z jonów i elektronów. Plazma porusza się w skomplikowany sposób na skutek konwekcji. Z jednej strony powoduje to wytwarzanie pola magnetycznego, a z drugiej – pole magnetyczne wpływa na ruch plazmy. Linie pola wyginają się, skręcają i plączą.
Czasem pole magnetyczne tworzy ponad powierzchnią Słońca łuk, w którym uwięziona jest gorąca plazma, zwany protuberancją. Białe kółko dorysowane na zdjęciu pokazuje wielkość Ziemi w tej samej skali.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

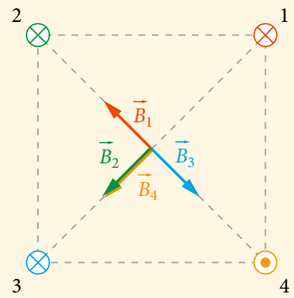
Cztery wzajemnie równoległe prostoliniowe przewodniki są prostopadłe do płaszczyzny rysunku i przecinają go w wierzchołkach kwadratu o boku $a = 10$ cm. W trzech z nich prąd płynie w tę samą stronę, a w czwartym – w przeciwną. Określ kierunek i zwrot wektora indukcji w środku kwadratu oraz oblicz wartość tego wektora. Przyjmij, że w każdym przewodzie płynie prąd o tym samym natężeniu, równym $I = 2$ A.



Dane: $a = 10\ \text{cm} = 0{,}1\ \text{m}$ – bok kwadratu, w którego wierzchołkach są przewodniki,
$I = 2\ \text{A}$ – natężenie prądu w przewodnikach
Szukane: $\vec{B}_{\text{wyp}}$ – indukcja magnetyczna wewnątrz kwadratu

Rozwiązanie:

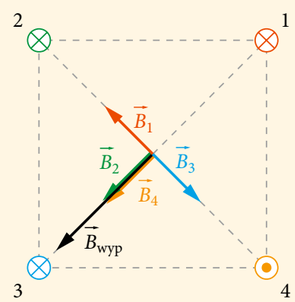
Wyznaczymy najpierw indukcję pola magnetycznego wytworzonego przez każdy przewodnik oddzielnie, a następnie znajdziemy wypadkowy wektor indukcji, będący sumą poszczególnych wektorów:



$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4$$

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:

$$B_2 + B_4 = \frac{\mu_0 I\sqrt{2}}{\pi a}$$

Po podstawieniu danych liczbowych:

$$B_{\text{wyp}} = B_2 + B_4 \approx 1{,}13 \cdot 10^{-5}\ \text{T} = 11{,}3\ \mu\text{T}$$

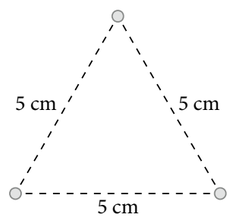
Odpowiedź: Wektor wypadkowy indukcji magnetycznej ma wartość ok. 11,3 μT, leży na przekątnej kwadratu łączącej przewody 1 i 3 oraz jest zwrócony w stronę przewodu 3.

1. W 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 przepływ prądu w kierunku pionowym.

2. 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 $B = 30\ \mu\text{T}$.

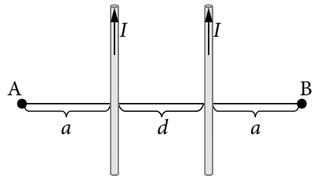
3. Na pustą kartonową rurkę o średnicy 1 cm i długości 10 cm nawinięto 200 zwojów drutu i puszczono przez nią prąd o natężeniu 2 A. Oblicz indukcję pola magnetycznego wewnątrz zwojnicy.

4. Trzy prostoliniowe przewody o długości 2 m są ułożone równolegle, a każdy z nich znajduje się w odległości 5 cm od każdego innego (patrz rysunek wykonany w płaszczyźnie prostopadłej do tych przewodów). W każdym przewodzie prąd o natężeniu 20 A płynie w tym samym kierunku. Wyznacz wartość, kierunek i zwrot wypadkowej siły oddziaływania dwóch z tych przewodów na trzeci.

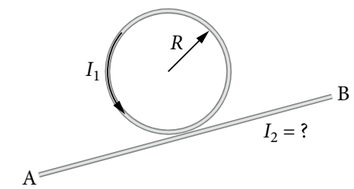


Uwaga. Ponieważ przewody są znacznie dłuższe od dzielącej je odległości, możemy korzystać ze wzoru podanego w tej lekcji.

5. P 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.



6. Z drutu wykonano pętlę o promieniu R i długi prostoliniowy 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?



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 zad. 5. → s. 253). 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

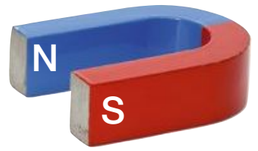
1. Wyznacz za pomocą kompasu strony świata w pomieszczeniu, w którym znajduje się pralka (ewentualnie lodówka).
2. Zbliż kompas do zachodniej lub wschodniej ścianki pralki: raz w pobliżu jej górnego, a raz – dolnego brzegu.
3. Sprawdź, czy tak samo jest namagnesowany duży stalowy garnek stojący długo 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). Jednakowe (jednoimienne) bieguny się odpychają, a różne (różnoimienne) przyciągają.

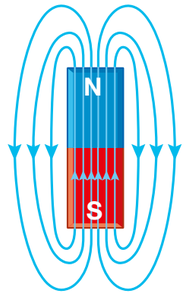


▶ Magnes przyciąga w zauważalny sposób tylko niewiele substancji, zwanych ferromagnetykami, takich jak żelazo, stal, nikiel.

▶ Większość innych substancji także jest przyciągana albo odpychana przez magnes, ale na tyle słabo, że nie zauważamy tego w codziennym życiu.

■ **Pole magnetyczne**

Jeżeli w jakimś obszarze działają siły magnetyczne, to mówimy, że w tym obszarze istnieje **pole magnetyczne**.



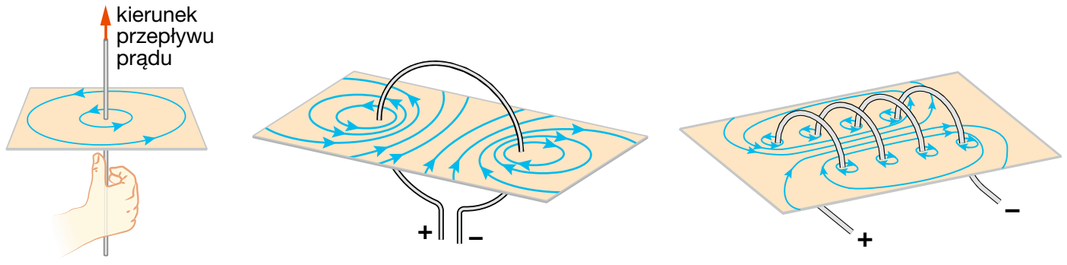
▶ Źródłem pola magnetycznego są m.in. poruszające się ładunki.

▶ Pole magnetyczne przedstawiamy graficznie za pomocą **linii pola**.

▶ Linie pola magnetycznego są zawsze zamknięte i występują zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz magnesu.

▶ 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).

■ **Indukcja magnetyczna $\vec{B}$**

Jest to wielkość wektorowa opisująca, jak silne jest pole magnetyczne w danym punkcie.

▶ Kierunek wektora jest styczny do linii pola magnetycznego, a zwrot – taki sam jak zwrot linii pola.

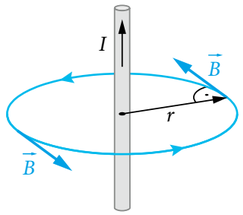
▶ Wartość jest liczbowo równa sile magnetycznej (sile Lorentza) działającej na ładunek 1 C poruszający się w danym punkcie z prędkością 1 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ prostopadle do linii pola.

▶ Jednostką indukcji magnetycznej jest **tesla**:

$$1\,\text{T} = 1\,\frac{\text{N}}{\text{C}\cdot\frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

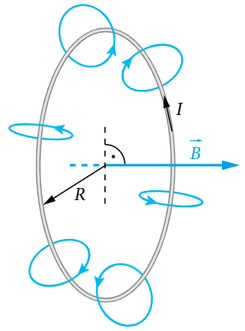
Indukcja pola wytwarzanego przez prąd elektryczny

a) prosty przewodnik



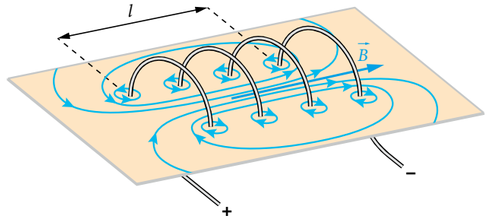
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

b) pętla



$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

c) zwojnica



$$B = \mu_0 I \frac{n}{l}$$

We wzorach $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$ to przenikalność magnetyczna próżni.

Siła Lorentza

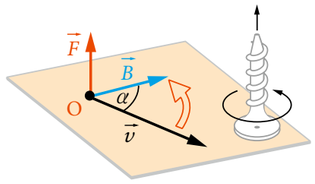
▶ Tak nazywamy siłę magnetyczną działającą na poruszający się ładunek.

▶ Nie działa ona na ładunki poruszające się wzdłuż linii pola magnetycznego.

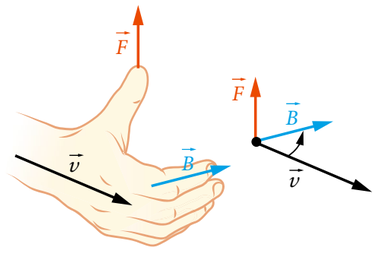
▶ W pozostałych przypadkach jest prostopadła zarówno do linii pola, jak i do prędkości ładunku.

▶ Zwrot siły Lorentza możemy wyznaczać za pomocą reguły śruby prawoskrętnej (rys. a) albo reguły prawej ręki (rys. b).

a)



b)



▶ Wartość siły Lorentza to $F = qvB\sin\alpha$, gdzie α to kąt między wektorem prędkości ładunku i wektorem indukcji magnetycznej.

▶ Wszystkie te własności siły Lorentza można zapisać za pomocą iloczynu wektorowego:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

gdzie: $\vec{v}$ – prędkość poruszającego się ładunku, $\vec{B}$ – indukcja magnetyczna.

Siła elektrodynamiczna

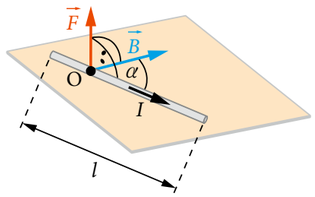
▶ Jest to siła magnetyczna działająca na przewodnik z prądem.

▶ Nie działa, jeśli prąd płynie wzdłuż linii pola. W przeciwnym wypadku jest prostopadła zarówno do kierunku przepływu prądu, jak i do linii pola.

▶ Jej wartość wynosi:

$$F = IlB\sin\alpha$$

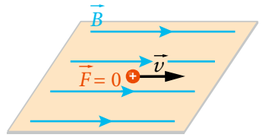
gdzie: B – indukcja magnetyczna, I – natężenie prądu, l – długość przewodu, α – kąt między przewodem a liniami pola magnetycznego.



Ruch naładowanej cząstki w polu magnetycznym

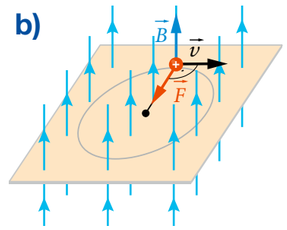
Jeżeli naładowana cząstka porusza się w jednorodnym polu magnetycznym, to w zależności od kąta α między wektorem prędkości początkowej cząstki i wektorem indukcji magnetycznej rozróżniamy następujące sytuacje:

a)



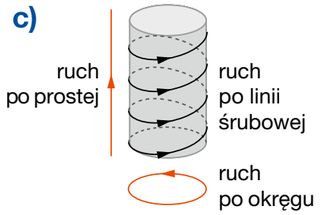
Ruch jednostajny prostoliniowy

b)



Ruch jednostajny po okręgu

c)

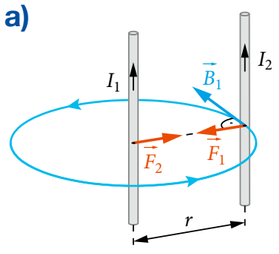


Ich złożenie (rys. a i b) to ruch jednostajny po linii śrubowej

▶ Siła magnetyczna nie zmienia wartości prędkości cząstki, ponieważ działa prostopadle do kierunku jej ruchu.

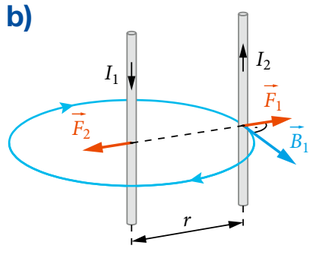
Oddziaływanie równoległych przewodników, w których płynie prąd

a)



Prądy płyną w tę samą stronę – przewodniki się przyciągają

b)



Prądy płyną w przeciwne strony – przewodniki się odpychają

▶ Siła oddziaływania przewodników:

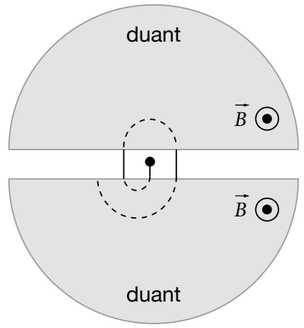
$$F_1 = F_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} l$$

Sposób na zadanie

Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych

Zadanie 1. Na rysunku przedstawiono sposób działania cyklotronu. Jest to urządzenie służące do przyspieszania naładowanych cząstek, np. jonów. Dzięki zastosowaniu pola magnetycznego, na rysunku skierowanego prostopadle do jego płaszczyzny, jon krąży w cyklotronie po torze, który w przybliżeniu będziemy traktować jako złożony z półokręgów wewnątrz duantów i prostych odcinków między nimi.

Stąd oznaczenie: ⊙



Co to jest? Możesz zobaczyć na rysunku.

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.

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 między promieniem półokręgu w dowolnej chwili t a liczbą przejść przez szczelinę od początku ruchu do chwili t istnieje związek $R^2 \sim n$, czyli że kwadrat promienia jest proporcjonalny do liczby przejść.

Czyli że R^2 = stała · n.

Rozwiązanie:

Chcemy poznać zależność promienia półokręgu, po którym porusza się jon, od liczby przejść przez szczelinę. W treści zadania podano wzór na promień. W tym wzorze masa jonu, jego ładunek i indukcja pola są stałe. W takim razie jedyną wielkością po prawej stronie, która zależy od n, jest prędkość v. Wyznaczmy więc wzór na v.

Podczas przejścia między duantami jon rozpędza się w polu elektrycznym. Po każdym przejściu jego energia kinetyczna zwiększa się o qU:

Napięcie to energia na ładunek jednostkowy.

$$\frac{mv^2}{2} = n \cdot qU$$

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:

$$R = \frac{mv}{qB} \quad \rightarrow \quad R^2 = \frac{m^2v^2}{q^2B^2}$$

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.

Warto zapamiętać!

- Czasami w samej treści zadania znajdziesz dużo potrzebnych informacji (a nie tylko dane dotyczące sytuacji z zadania).
- Jeśli w zadaniu masz coś wykazać (uzasadnić, udowodnić), to twoje rozumowanie powinno kończyć się dojściem do tezy (stwierdzenia, które masz udowodnić). Nie pozostawiaj nawet ostatniego kroku jako oczywistego.

Zadanie 1.2 (0–1)

Czy z rysunku do zadania wynika, jaki znak miał ładunek rozpędzany w cyklotronie?

A. Tak, ładunek był dodatni.

B. Tak, ładunek był ujemny.

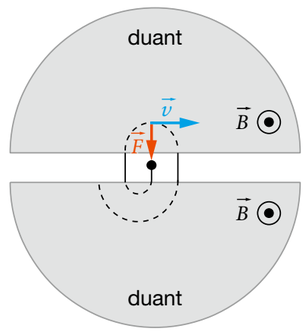
C. Nie, tor jest taki sam niezależnie od znaku ładunku.

Tak się dzieje, kiedy jakieś dwa czynniki zależne od znaku się równoważą.

Rozwiązanie:

W miarę rozpędzania cząstki rośnie promień toru. Pozwala nam to stwierdzić, w którą stronę przemieszcza się jon, oraz zaznaczyć zwrot jego prędkości w wybranym punkcie toru. Zwrot siły łatwo znajdziemy, gdy pomyślimy o jej skutku – skoro powoduje ona ruch po łuku, to jest zwrócona do jego środka.

Często siłę najłatwiej rozpoznać po skutkach jej działania.



Gdy znamy zwroty wektorów indukcji, prędkości i siły, możemy stwierdzić, że taki zwrot siły odpowiada cząstce dodatniej – w przypadku ujemnej byłby on przeciwny.

Odpowiedź: A

Zadanie 1.3 (0–3)

Indukcja pola wewnątrz cyklotronu wynosi $B = 0{,}5$ T. **Oblicz częstotliwość zmian znaku napięcia między duantami potrzebną do tego, aby w cyklotronie rozpędzić jon Ca^{2+}.** Pomiń czas spędzany przez jon pomiędzy duantami.

Rozwiązanie:

W zadaniu podano wzór na promień toru, po którym porusza się jon:

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

Ponieważ tor wewnątrz duantu ma kształt półokręgu, więc jego długość jest równa πR, a czas jego przebiegu to:

$$t = \frac{\pi R}{v} = \frac{\pi m v}{qB} \cdot \frac{1}{v} = \frac{\pi m}{qB}$$

Na s. 256 znajduje się podobny wzór, ale z dwójką na początku – tam jednak chodzi o czas obiegu całego okręgu, a nie połowy.

Jak widać, ten czas nie zależy od prędkości jonu. W takim razie cały obieg cyklotronu trwa:

$$T = 2t = \frac{2\pi m}{qB}$$

Torem są dwa półokręgi o różnych promieniach (oraz fragmenty między duantami, które pomijamy).

Taki sam jest okres zmian napięcia. Zatem częstotliwość tych zmian wynosi:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

Ładunek jonu dwukrotnie zjonizowanego jest równy $2e = 3{,}2 \cdot 10^{-19}$ C.

W układzie okresowym sprawdzamy, że masa atomowa wapnia wynosi 40 u. Przeliczamy ją na kilogramy:

$$m = 40\ \text{u} = 40 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} = 6{,}64 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}$$

Od tej wielkości moglibyśmy teraz odjąć masę dwóch elektronów, ale nie wpłynęłoby to na wynik z przyjętą dokładnością.

Masa elektronu to ok. 10^{-30} kg.

Teraz możemy podstawić dane do wzoru i przeliczyć jednostkę:

$$f = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-19}\,\text{C} \cdot 0{,}5\ \text{T}}{2\pi \cdot 6{,}64 \cdot 10^{-26}\,\text{kg}} = 384\ \text{kHz}$$

$$[f] = \frac{\text{C} \cdot \text{T}}{\text{kg}} = \frac{\text{C} \cdot \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}}{\text{kg}} = \frac{\text{N}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot \frac{1}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot \frac{1}{\text{kg}} = \frac{1}{\text{s}} = \text{Hz}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $f = 384\,000$ Hz $= 384$ kHz.

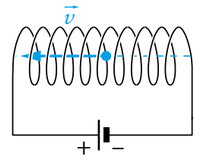
Odpowiedź: Częstotliwość zmian znaku napięcia wynosi 384 kHz.

Warto zapamiętać!

- Do rozwiązywania zadań z fizyki przydają się elementarna wiedza z chemii i umiejętność korzystania z układu okresowego pierwiastków.
- Masa elektronu jest bardzo mała w stosunku do masy atomu i możemy ją pominąć, jeśli nasze obliczenia nie są wyjątkowo dokładne.

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:

Wewnątrz cewki powstaje pole magnetyczne o liniach równoległych do jej osi. Zatem ładunek porusza się wzdłuż linii pola, a na taki ładunek nie działa siła Lorentza.

Możesz także skorzystać ze wzoru na wartość siły:

$$F = qBv\sin\alpha$$

Ponieważ w naszym przypadku $\sin\alpha = \sin 0° = 0$, więc ta siła ma wartość zerową.

Odpowiedź: Nie, 2

Warto zapamiętać!

- 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.

Zadania analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. **Wykaż, że w czasie, gdy jon znajduje się wewnątrz duantu, wartość jego prędkości nie ulega zmianie.**

Zadanie 2. **Oblicz średnicę, jaką musi mieć cyklotron, aby można w nim było rozpędzić jony Ca^{2+} do prędkości 200 $\frac{km}{s}$**, jeśli indukcja pola magnetycznego wynosi $B = 0{,}5$ T.

Zadanie 3. **Dokończ zdanie. Zaznacz odpowiedź A, B albo C i jej uzasadnienie 1., 2. albo 3.**

Jeżeli przy tym samym napięciu między duantami zwiększymy nieco odległość między nimi, to przyrost energii kinetycznej jonu rozpędzanego w czasie pojedynczego przejścia przez tę przerwę

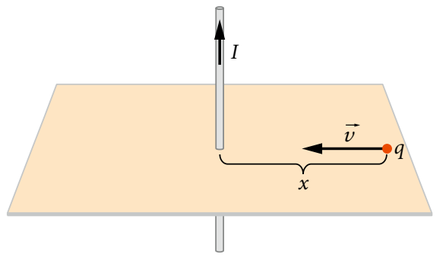
A.	zwiększy się,	ponieważ	**1.**	przy dłuższej drodze rozpędzania większy jest też przyrost prędkości.
B.	zmniejszy się,		**2.**	przyrost energii jest równy iloczynowi napięcia i ładunku.
C.	pozostanie bez zmian,		**3.**	mniejsza siła elektryczna zawsze powoduje mniejszy przyrost energii.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

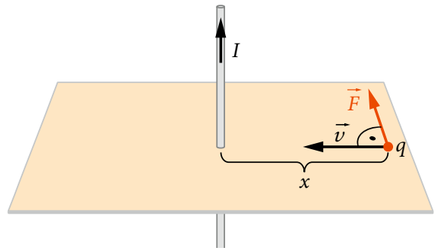
Zadanie 1. Ruch ładunku w pobliżu przewodnika z prądem

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.

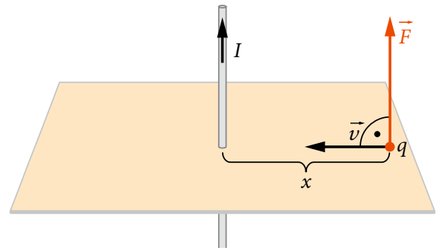


Zadanie 1.1. **Wskaż, na którym rysunku poprawnie przedstawiono kierunek i zwrot siły Lorentza działającej na ładunek.**

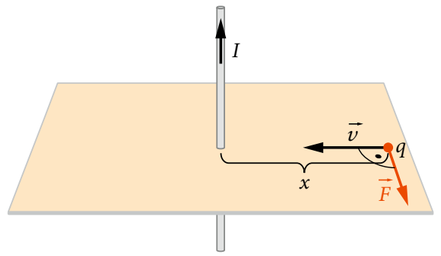
A.



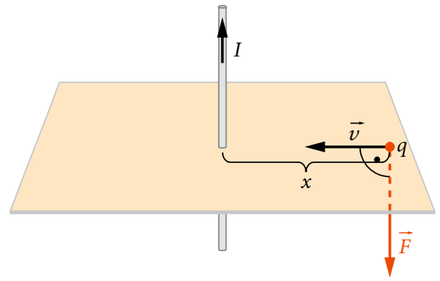
C.



B.



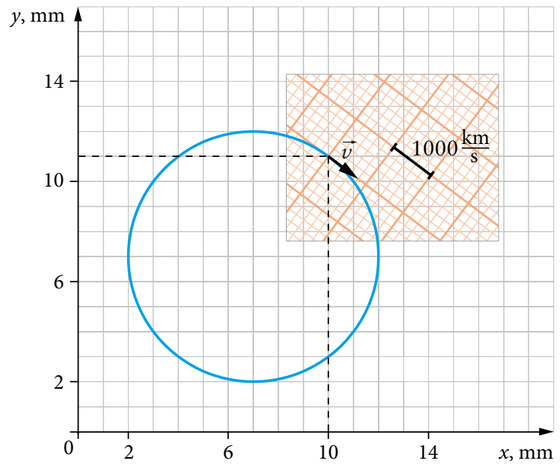
D.



Zadanie 1.2. **Oblicz wartość przyspieszenia**, jakie siła Lorentza nada w opisanej sytuacji jonowi Na^+ znajdującemu się w odległości $x = 20$ cm od przewodnika i poruszającemu z prędkością $v = 1000$ $\frac{km}{s}$ w jego stronę, jeżeli w przewodniku płynie prąd $I = 5$ A.

Zadanie 2. Ruch elektronu

Rysunek przedstawia tor ruchu elektronu poruszającego się tylko pod wpływem siły Lorentza po okręgu oraz wektor jego prędkości.



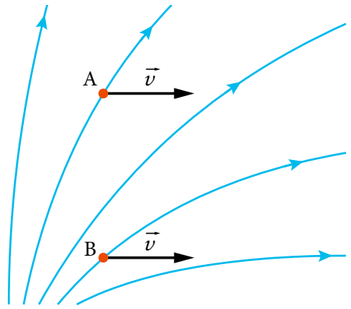
Zadanie 2.1. **Oblicz wartość indukcji magnetycznej pola i określ jego kierunek i zwrot.**

Zadanie 2.2. Elektron mógłby się poruszać po takim samym torze i z taką samą prędkością w polu elektrycznym zamiast magnetycznego. **Określ położenie, znak i wartość ładunku q, który mógłby wytworzyć takie pole. Oceń, czy wynik jest realistyczny.**

Zadanie 2.3. Wyobraźmy sobie, że chcemy spowodować ruch elektronu pod wpływem siły grawitacji po takim samym torze i z taką samą prędkością. W tym celu w środku toru umieszczamy kuliste ciało o masie M. **Oblicz tę masę. Oceń, czy wynik jest realistyczny.**

Zadanie 3. Ładunki w polu magnetycznym

W niejednorodnym polu magnetycznym znalazły się dwa ładunki o wartości $+q$, poruszające się z jednakową prędkością $\vec{v}$.



Zadanie 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.

Zadanie 3.2. Porównaj wartość siły Lorentza działającej na ładunki. **Wybierz zdanie prawdziwe.**

A. W punkcie A na ładunek działa siła Lorentza o większej wartości niż w punkcie B.

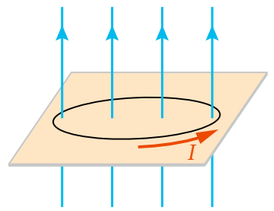
B. W punkcie B na ładunek działa siła Lorentza o większej wartości niż w punkcie A.

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 jednorodnym polu magnetycznym umieszczono pętlę z przewodnika w płaszczyźnie prostopadłej do linii 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.

17. Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej
2. Prawo indukcji Faradaya
3. Silnik elektryczny i prądnica
4. Prąd przemienny
5. Domowa sieć elektryczna
6. Transformator
7. Zastosowania indukcji elektromagnetycznej
8. Dioda i prostowanie prądu

17.1 Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

Ważne w tej lekcji:
- indukcja elektromagnetyczna,
- zmiana liczby linii pola,
- prawo Faradaya,
- reguła Lenza.

Przypomnij sobie:
- Magnes i przewodnik z prądem są źródłami pola magnetycznego.
- Graficzną ilustracją pola magnetycznego są linie pola.

Wiesz już, że prąd elektryczny może wytwarzać pole magnetyczne. Okazuje się, że odwrotne zjawisko także jest możliwe. Jednak aby zaszło, muszą być spełnione pewne warunki. Zbadamy je w doświadczeniu.

Doświadczenie 29 – obowiązkowe

Demonstrowanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej

1. Przygotuj elektromagnes z baterią i przewodami, zwojnicę, magnes neodymowy, nić, taśmę klejącą oraz czuły woltomierz lub galwanometr (galwanometr to rodzaj czułego woltomierza).
2. Umocuj zwojnicę w położeniu pionowym. Podłącz jej końcówki do woltomierza nastawionego na najczulszy zakres.
3. 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 wskazuje woltomierz?
4. Teraz wsuwaj magnes do zwojnicy i wysuwaj go z niej (zdjęcie a). Co wskazuje woltomierz?
5. Przymocuj magnes do nici taśmą klejącą tak, aby linia przechodząca przez bieguny znajdowała się w płaszczyźnie poziomej (zdjęcie b). Zacznij szybko obracać magnesem wokół osi pionowej. Co wskazuje woltomierz?

6. Włóż do zwojnicy wyłączony elektromagnes. Następnie włącz go, przez chwilę potrzymaj włączony i wyłącz. Co wskazuje woltomierz?

a)

b)

Analiza doświadczenia

Oto, co mogliśmy zaobserwować podczas wykonywania poszczególnych punktów doświadczenia.

- Punkt 3: Sam fakt, że cewka znajduje się w polu magnetycznym, nie powoduje powstawania napięcia.
- Punkt 4: Napięcie powstaje tylko podczas ruchu magnesu, a więc podczas zmian pola magnetycznego, w którym zanurzona jest cewka.
- Punkt 5: Jednak nie każdy ruch magnesu powoduje powstawanie napięcia.
- Punkt 6: Także w przypadku elektromagnesu ważna była zmiana pola (włączanie i wyłączanie), a nie sama jego obecność.

Mogliśmy również zaobserwować, że znak napięcia był:
- przeciwny przy wsuwaniu magnesu niż przy jego wysuwaniu ze zwojnicy (na wyświetlaczu miernika pojawiał się znak minus),
- przeciwny przy włączaniu elektromagnesu niż przy jego wyłączaniu.

Indukcja elektromagnetyczna

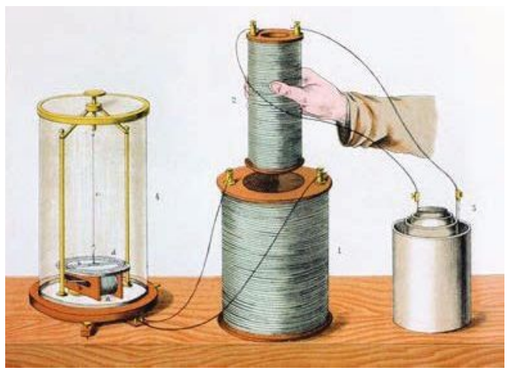
Zjawisko obserwowane w doświadczeniu ma swoją nazwę:

> Powstawanie napięcia podczas zmian pola magnetycznego nazywamy **indukcją elektromagnetyczną**.

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 napięcia na skutek zmian pola magnetycznego. Choć te określenia brzmią podobnie, znaczą zupełnie co innego.

Trudności w odkryciu

Właśnie fakt, że do indukcji elektromagnetycznej jest potrzebna zmiana pola magnetycznego, a nie tylko samo istnienie pola, spowodował tak duże trudności w odkryciu tego zjawiska. 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.
Dzisiaj wiemy, dlaczego jest to niemożliwe: nawet bardzo silne pole magnetyczne nie spowoduje indukcji, jeśli się ono nie zmienia.



Rys. **17.1.** Dziewiętnastowieczna ilustracja indukcji elektromagnetycznej – do dużej zwojnicy podłączonej do galwanometru wsuwamy mniejszą, podłączoną do baterii

Siła elektromotoryczna indukcji

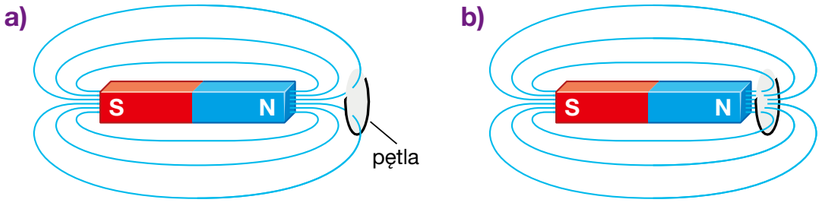
SEM ogniwa → s. 207

Używamy także określeń „prąd indukcyjny" i „napięcie (albo prąd) się indukuje".

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.

Linie pola przechodzące przez pętlę

Do dalszych rozważań potrzebne nam będzie pojęcie linii pola przechodzących przez pętlę z przewodnika. Aby je zrozumieć, możemy sobie wyobrazić, że pętla stanowi obrys papierowego kółka. Wtedy linie, o których mowa, przebijają to kółko na wylot.



Rys. **17.2.** W różnych położeniach pętli względem magnesu różna jest liczba linii pola przechodzących przez pętlę (dwie linie na rys. a, sześć linii na rys. b)

Indukcja a liczba linii pola

Stwierdziliśmy, że **nie każdy** ruch magnesu powoduje indukowanie się napięcia (punkt 5. doświadczenia 29.). Jaki dodatkowy warunek musi być spełniony, aby zachodziło to zjawisko? Mówi o tym **prawo Faradaya:**

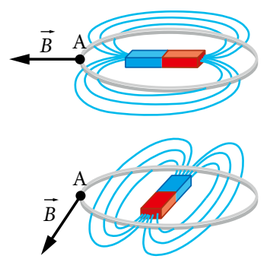
> Zjawisko indukcji elektromagnetycznej zachodzi wtedy, gdy zmienia się liczba linii pola magnetycznego przecinających obszar ograniczony pętlą przewodnika. Indukowana siła elektromotoryczna jest tym większa, im szybciej następują te zmiany.

Zwojnica składa się z wielu pętli i w każdej z nich indukuje się napięcie.

Takie sformułowanie **prawa Faradaya** nie jest całkowicie ścisłe, ponieważ linii pola jest tak naprawdę nieskończenie wiele, a my po prostu rysujemy tylko niektóre z nich. Niemniej pomaga ono szybko się zorientować, czy w danym przypadku zajdzie zjawisko indukcji. Dokładniejszą, matematyczną postać prawa Faradaya omówimy w następnej lekcji.

Linie pola w doświadczeniu 29.

W punkcie 4. doświadczenia przesuwaliśmy magnes. Wtedy liczba linii ulegała zmianie (rys. 17.2). Podobnie w przypadku włączania elektromagnesu liczba linii szybko rosła, a w czasie jego wyłączania – malała. Powodowało to indukowanie się napięcia.
Natomiast w przypadku obrotu w punkcie 5. linie pola nie przecinały obszaru ograniczonego zwojnicą (rys. 17.3. przedstawia to dla jednej z pętli tworzących zwojnicę). Strumień stale wynosił zero, a więc się nie zmieniał, dlatego woltomierz wskazywał zero. Działo się tak, mimo że każdy punkt zwojnicy z osobna znajdował się w zmiennym polu magnetycznym.



Rys. **17.3.** Przy różnych położeniach magnesu wektor indukcji w punkcie A jest różny. Mimo to nie zachodzi zjawisko indukcji

Doświadczenie z hamującym magnesem

Wykonamy teraz kolejne doświadczenie. Jego wyjaśnienie pomoże nam określić kierunek prądu indukcyjnego.

Doświadczenie 30

1. Przygotuj długi, cienki przewód, magnes neodymowy i nić. Usuń izolację z końcówek przewodu.
2. Powieś magnes jednym biegunem w dół.
3. Zwiń przewód tak, aby powstała zwojnica w kształcie pierścienia, złożona z ciasno zwiniętych kilkudziesięciu zwojów.
4. Magnes na nici stanowi wahadło. Sprawdź, jak się kołysze, kiedy:
   a) magnes znajduje się z dala (ok. 1 m) od zwojnicy (sprawdź, czy łączenie końców przewodu tworzącego zwojnicę coś zmienia w tym przypadku),
   b) najniższe położenie jego toru znajduje się tuż nad zwojnicą, a końce przewodu nie są połączone,
   c) najniższe położenie jest takie, jak w podpunkcie b), ale końce przewodu są połączone.

Pole magnetyczne rozchodzi się „tylko” z prędkością światła, co możemy pominąć.

W doświadczeniu obserwujemy, że obecność zamkniętej zwojnicy (punkt 4c) powoduje szybkie zatrzymanie magnesu, jeśli znajduje się on blisko zwojnicy. Dlaczego tak się dzieje? Przedstawia to diagram (strzałki przedstawiają zależności przyczynowo-skutkowe, a nie następstwo w czasie, ponieważ wszystkie opisane zjawiska zachodzą równocześnie).

ruch magnesu → zmiana liczby linii pola magnetycznego → indukowanie się prądu w zwojnicy → wytwarzanie pola magnetycznego przez prąd indukcyjny → hamowanie ruchu magnesu

Miedź nie jest ferromagnetykiem, więc magnes nie hamuje na skutek jej przyciągania.

Skoro pole wytwarzane w zwojnicy powoduje hamowanie magnesu, to widocznie:

- w czasie zbliżania się magnesu pole magnetyczne zwojnicy go odpycha (rys. 17.4a) – czyli prąd płynie w niej tak, że od strony magnesu jest taki sam biegun magnetyczny, jaki się do niej zbliża,
- w czasie oddalania się magnesu pole magnetyczne zwojnicy go przyciąga (rys. 17.4b) – czyli prąd płynie w niej tak, że od strony magnesu jest inny biegun magnetyczny, niż się od niej oddala.

Rys. **17.4.** Oddziaływanie poruszającego się magnesu z polem magnetycznym zwojnicy

Reguła Lenza

Podsumowaniem tych i podobnych obserwacji jest **reguła Lenza**:

> Kierunek przepływu prądu indukcyjnego jest taki, że wytwarzane przez niego pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie, która ten prąd wywołuje.

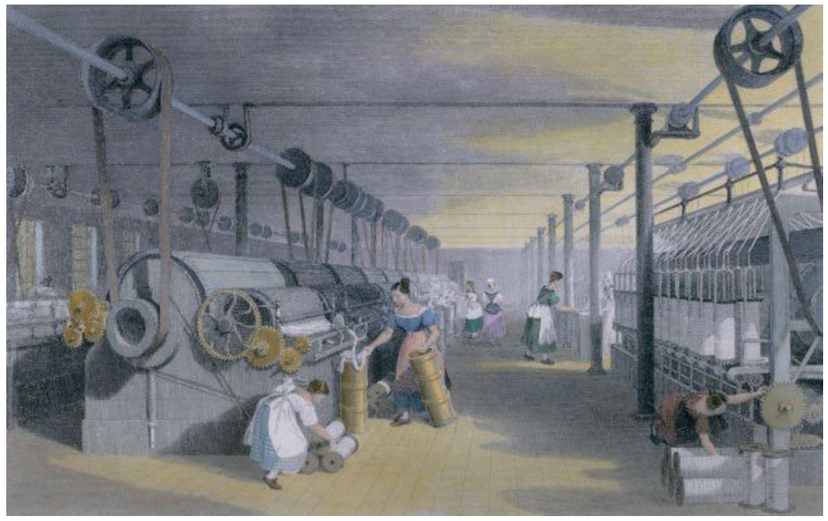
Zauważ, że reguła Lenza jest wnioskiem z zasady zachowania energii. Gdyby pole wytwarzane przez prąd w zwojnicy powodowało dalsze nabieranie prędkości przez magnes, jego energia kinetyczna rosłaby w nieskończoność bez zasilania, mielibyśmy więc do czynienia z perpetuum mobile.
Kiedy natomiast magnes 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.

A to ciekawe

Nadprzewodnik to substancja, która w odpowiednio niskiej temperaturze ma zerowy opór elektryczny. Na zdjęciu obok widzisz nadprzewodnik w naczyniu z ciekłym azotem. Umieszczony nad nim magnes przez chwilę spada. Jednak zmienne pole magnetyczne wytwarzane przez ten ruch wytwarza w nadprzewodniku wirowy prąd elektryczny, który z kolei wytwarza pole magnetyczne, hamujące magnes. Spadający magnes zatrzymuje się i zawisa (lewituje) nad nadprzewodnikiem. Zerowy opór sprawia, że wytworzony prąd nie zanika i magnes może lewitować dowolnie długo (dopóki nie zabraknie chłodzącego ciekłego azotu).

Znaczenie odkrycia indukcji elektromagnetycznej

Odkrycie zjawiska indukcji elektromagnetycznej pozwoliło na zbudowanie prądnicy (patrz temat 17.3), co umożliwiło zastosowanie elektryczności na masową skalę. Trudno sobie przecież wyobrazić zasilanie miast i fabryk z baterii.
Zanim wynaleziono prądnicę, energię poruszającą maszyny w fabryce dostarczano z maszyny parowej za pomocą obracających się wałów i pasów transmisyjnych (rys. 17.5). Było to nie tylko nieefektywne, lecz także – niebezpieczne.



Rys. **17.5.** Angielska przędzalnia ok. 1835 r.

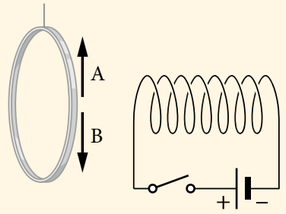
To samo odkrycie pozwoliło zbudować wiele innych urządzeń, o których będziemy mówili w tym dziale.
Badanie indukcji stało się też punktem wyjścia do odkrycia fal elektromagnetycznych (więcej w części 4. podręcznika), a więc również do ich zastosowania w radiu, telewizji, telefonach komórkowych, radarze itd.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Naprzeciwko zwojnicy powieszono miedziany pierścień (patrz rysunek). Początkowo w zwojnicy płynął prąd. W którą stronę popłynie prąd indukcyjny w pierścieniu, gdy wyłączymy prąd? W którą stronę poruszy się wtedy pierścień?

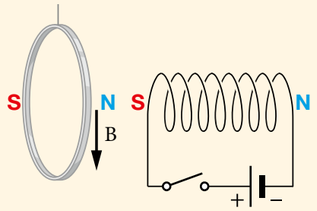


Rozwiązanie:

Analizujemy sytuację
Początkowo przez zwojnicę płynie prąd stały. Wytwarza on stałe pole magnetyczne, które nie wywołuje indukcji elektromagnetycznej. Dopiero kiedy wyłączamy prąd, pole magnetyczne w zwojnicy gwałtownie maleje, a wtedy w pierścieniu indukuje się prąd.

Wyznaczamy bieguny indukowanego pola
Zgodnie z regułą Lenza prąd indukcyjny ma taki kierunek, że wytwarzane przez niego pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie, która go wytworzyła. Tą przyczyną było **osłabienie** pola zwojnicy. Aby tej przyczynie przeciwdziałać, pole wytwarzane przez prąd indukcyjny musi się **dodawać** do pola zwojnicy. A zatem po lewej stronie pierścienia pojawia się taki sam biegun jak po lewej stronie zwojnicy.

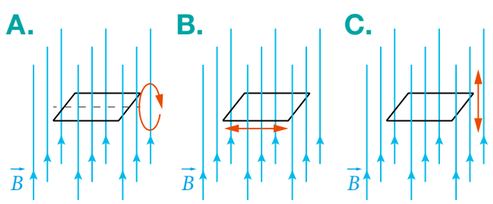
Ustalamy kierunek przepływu prądu
W takim razie:
- prąd w pierścieniu musi płynąć w tę samą stronę, w którą płynął w zwojnicy,
- pierścień i zwojnica się przyciągają.



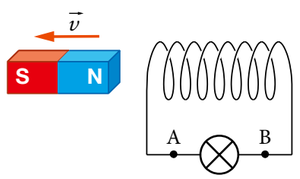
Odpowiedź: Prąd płynie w kierunku B, a pierścień odchyla się w stronę zwojnicy.

Uwaga. Na rysunku opisaliśmy bieguny N i S, ponieważ wiemy, jak płynie prąd w zwojnicy. Jednak nie ma to wpływu na kierunek ruchu pierścienia: ważne jest tylko to, gdzie są bieguny jednakowe, a gdzie – różne.

1. Na rysunkach przedstawiono schematycznie ruch metalowej ramki w jednorodnym polu magnetycznym. W którym z narysowanych przypadków zajdzie zjawisko indukcji? Uzasadnij odpowiedź.

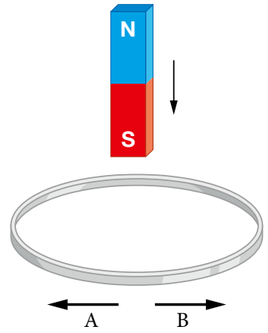


2. Magnes oddala się od zwojnicy w sposób pokazany na rysunku. Określ kierunek przepływu prądu indukcyjnego przez żarówkę. W jaki sposób prąd indukcyjny wpłynie na ruch magnesu?



3. P 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 wtedy, gdy cały magnes znajdzie się poniżej pierścienia? Uzasadnij odpowiedź.

c) Czy w podpunktach a) i b) pole magnetyczne wytwarzane przez prąd indukcyjny będzie hamować czy rozpędzać magnes?

4. Wykonaj poniższe doświadczenie i wyjaśnij jego wyniki.

a) Przygotuj układ doświadczalny zgodnie ze zdjęciem.

b) Umieść magnesy i gumkę z dala od puszki i innych metalowych przedmiotów. Trzymaj gumkę za drugi koniec i skręć ją wielokrotnie, a następnie puść. Obserwuj ruch magnesów.

c) Powtórz czynności opisane w podpunkcie b), tylko tym razem trzymaj gumkę tak, aby magnesy znajdowały się wewnątrz puszki. Obserwuj ruch magnesów oraz ruch puszki. Czy coś się zmieniło?

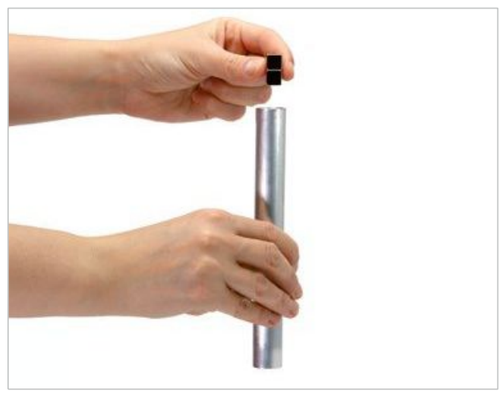
d) W tym doświadczeniu mamy do czynienia z prądami wirowymi. Znajdź informacje o innych przykładach i zastosowaniach prądów wirowych. Zapisz, z jakich źródeł korzystasz.

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.

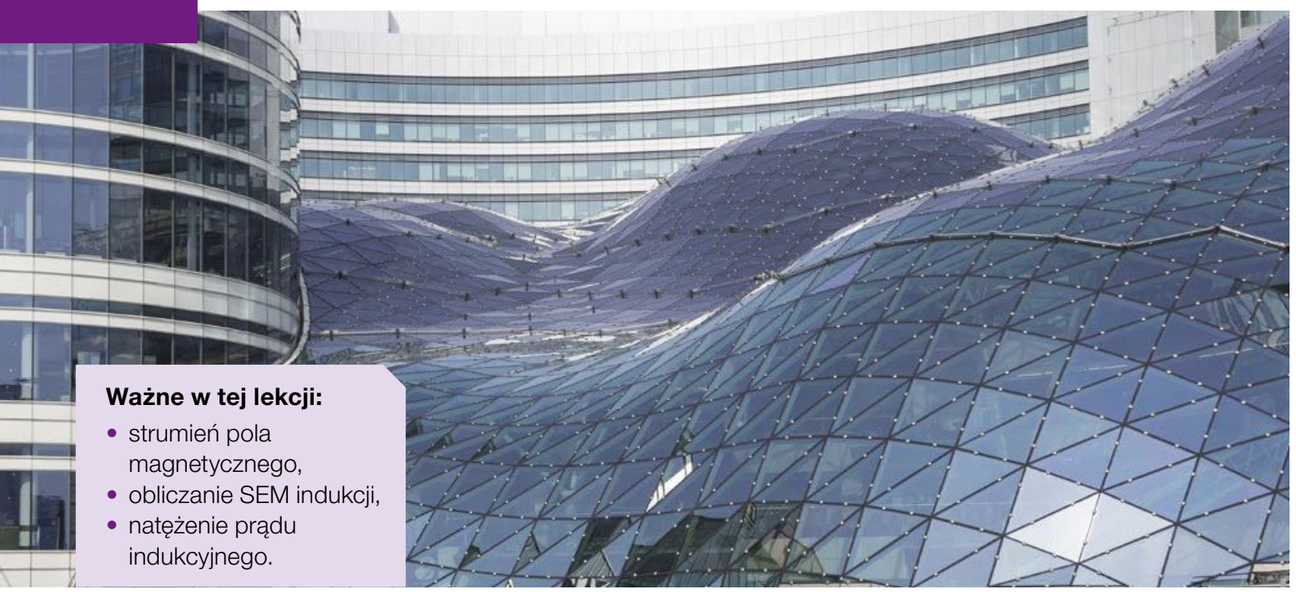
b) Upuść kilkakrotnie magnes z wysokości równej długości rury i oszacuj czas jego spadania. Nie musisz wykonywać dokładnych pomiarów.

c) Umieść magnes nad pionowo ustawioną rurą i go puść. Oszacuj, jak długo spada magnes wewnątrz rury. Wyjaśnij obserwowane zjawisko.



17.2 Prawo indukcji Faradaya

indukcja elektromagnetyczna → opis jakościowy; **opis ilościowy**; zastosowania; dioda



Ważne w tej lekcji:
- strumień pola magnetycznego,
- obliczanie SEM indukcji,
- natężenie prądu indukcyjnego.

Przypomnij sobie:
- Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na powstawaniu napięcia na skutek zmiany liczby linii pola magnetycznego przechodzących przez pętlę z przewodnika.
- Siła elektromotoryczna indukcji jest tym większa, im szybciej zmienia się liczba linii pola magnetycznego przecinających obszar ograniczony przez przewodnik.

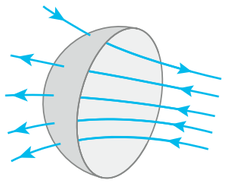
Liczba linii pola

W poprzedniej lekcji sformułowaliśmy prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya w postaci intuicyjnie zrozumiałej, ale nieścisłej. Liczba linii pola magnetycznego nie jest dobrze określonym pojęciem, ponieważ rysujemy tylko niektóre z nich, wybrane, a w rzeczywistości jest ich nieskończenie wiele.

Tymczasem my chcemy opisywać indukcję w sposób ilościowy i obliczać, jakie napięcie powstaje w pętli lub zwojnicy. W tym celu musimy najpierw zdefiniować pojęcie odpowiadające liczbie linii pola: strumień indukcji magnetycznej przez powierzchnię.

Umówmy się najpierw, że linie przechodzące w przeciwne strony traktujemy tak jak liczby z przeciwnymi znakami (rys. 17.6). Możemy wybrać dowolnie, która strona jest dodatnia, a która ujemna, tylko musimy konsekwentnie trzymać się tej umowy.

Wobec tego również strumień indukcji, który wkrótce zdefiniujemy, może być dodatni albo ujemny.



Rys. **17.6.** Przez tę powierzchnię przechodzą 4 linie pola na zewnątrz powierzchni i 1 do wewnątrz, czyli razem 3 na zewnątrz, ponieważ 4 + (–1) = 3

Strumień indukcji magnetycznej

To pojęcie zdefiniujemy w czterech krokach.

1. Umawiamy się, która strona powierzchni jest „prawa”, a która „lewa”. Wybrać możemy dowolnie, musimy się tylko konsekwentnie trzymać przyjętej umowy.

2. W najprostszym przypadku, gdy linie jednorodnego pola magnetycznego są prostopadłe do wybranej przez nas powierzchni (rys. 17.7a), strumień pola, oznaczany jako Φ, jest równy co do wartości bezwzględnej iloczynowi wartości indukcji B oraz powierzchni S:

$$\Phi = \pm BS \quad \text{dla} \quad B \perp S$$

przy czym znak „+” przyjmujemy wtedy, gdy linie pola przechodzą z „prawej” na „lewą” stronę, a znak „–” wtedy, gdy jest odwrotnie.

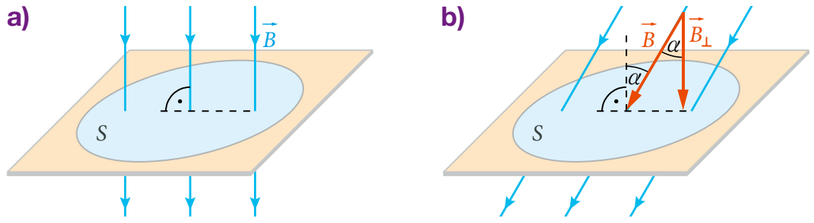
3. Jeśli pole jest jednorodne, ale jego linie nie są prostopadłe do wybranej przez nas powierzchni S, to uwzględniamy wyłącznie składową $B_\perp$ wektora indukcji magnetycznej prostopadłą do tej powierzchni.

Jeśli kąt między wektorem $\vec{B}$ a prostą prostopadłą do powierzchni oznaczymy jako α, to $B_\perp = B\cos\alpha$ (rys. 17.7b). Możemy więc zapisać:

$$\Phi = \pm BS\cos\alpha$$

Znak „+” lub „–” wybieramy tak jak poprzednio.

Litera Φ to wielka grecka litera fi, odpowiednik naszego F.



Rys. **17.7.** Gdy linie pola nie są prostopadłe do powierzchni, uwzględniamy tylko prostopadłą składową wektora indukcji

4. Jeżeli pole nie jest jednorodne, musimy podzielić powierzchnię na fragmenty na tyle małe, aby można było założyć, że każdy z nich jest płaski, a wektor $\vec{B}$ jest dla niego stały (rys. 17.8).

Następnie obliczamy strumień dla każdego fragmentu i sumujemy uzyskane wyniki z uwzględnieniem znaków „+” i „–”. W ten sposób otrzymamy całkowity strumień indukcji magnetycznej.

Rys. **17.8.** Przybliżenie zakrzywionej powierzchni za pomocą figur płaskich przydaje się w architekturze, ale nam przydało się do definicji strumienia indukcji

Jednostka strumienia indukcji

Z powyższych wzorów wynika, że jednostką strumienia indukcji jest $1\ \mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^2$. Ta jednostka ma własną nazwę – **weber**.

$$1\ \mathrm{Wb} = 1\ \mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^2$$

Prawo Faradaya w postaci ilościowej

Dzięki wprowadzeniu pojęcia strumienia indukcji magnetycznej możemy sformułować **prawo Faradaya** ujęte ilościowo:

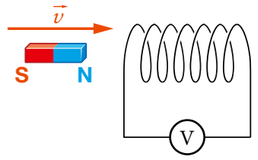
Siła elektromotoryczna indukująca się w pętli jest równa szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej przechodzącego przez powierzchnię ograniczoną tą pętlą:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

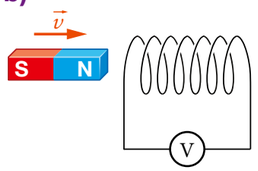
SEM; zmiana strumienia indukcji; czas, w którym nastąpiła ta zmiana

Ujemny znak SEM wiąże się z regułą Lenza: wskazuje kierunek przepływu prądu indukcyjnego. Najczęściej interesuje nas tylko wartość SEM i wartość natężenia prądu – wtedy znak możemy pominąć.

a)



b)



Rys. **17.9.** Kiedy poruszamy słabym magnesem z dużą prędkością (a) możemy wytworzyć taką samą SEM jak silnym magnesem z małą prędkością (b)

Jak uzyskać dużą SEM

Prawo Faradaya pokazuje, jak uzyskać dużą siłę elektromotoryczną: przez dużą szybkość zmiany strumienia indukcji magnetycznej. Od czego zależy szybkość jego zmiany?

- Ważna jest zmiana strumienia, a nie jego wartość. Zmiana z 2,4 Wb do 2,3 Wb ma taki sam skutek, co zmiana z 0,4 Wb do 0,3 Wb, następująca w tym samym czasie.
- Równie ważny jest czas tej zmiany (rys. 17.9). Zmiana o 2 Wb w czasie 1 s spowoduje indukowanie się takiej samej SEM, co zmiana o 4 Wb w czasie 2 s. W drugim przypadku z napięcia będziemy mogli korzystać dłużej, ale nie będzie ono wyższe.

Średnia i chwilowa wartość SEM

Wzór występujący w prawie Faradaya pozwala obliczyć **średnią** wartość SEM w całym przedziale czasu o długości Δt. Jeśli chcemy się dowiedzieć, jaka SEM była indukowana w określonej chwili, powinniśmy wziąć pod uwagę jak najkrótszy przedział czasu Δt.

Prędkość chwilowa, podręcznik cz. 1 → s. 62

Sytuacja jest więc podobna jak z prędkością średnią i chwilową.
Z lekcji matematyki znasz (albo wkrótce poznasz) pojęcie pochodnej funkcji. W fizyce pochodnych używamy m.in. do określania wartości chwilowych wielkości opisujących szybkość zmian w czasie. Tak więc:

- SEM indukcji jest pochodną funkcji $\Phi(t)$, ponieważ opisuje szybkość zmian strumienia indukcji,
- prędkość chwilowa wzdłuż osi x jest pochodną funkcji $x(t)$, ponieważ opisuje szybkość zmian położenia na tej osi.

Czy domyślasz się, jaka wielkość jest pochodną prędkości?

SEM zwojnicy

W praktyce siła elektromotoryczna indukowana w zwojnicy jest niewielka, dlatego używamy zwojnicy złożonej z setek czy nawet tysięcy pętli. Zwoje możemy traktować jak połączone szeregowo źródła napięcia, a więc ich napięcia dodajemy.
Zwykle SEM jest taka sama w każdym zwoju, więc SEM pojedynczego zwoju można pomnożyć przez liczbę zwojów N:

$$\mathcal{E}_{zw} = N\mathcal{E} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Jednostka SEM zwojnicy

Jednostką siły elektromotorycznej jest wolt, niezależnie od tego, czy chodzi o ogniwo czy o zwojnicę. Sprawdźmy, że ze wzoru zawartego w prawie Faradaya rzeczywiście otrzymujemy taką jednostkę.

$$[\mathcal{E}] = \frac{\text{Wb}}{\text{s}} = \frac{\text{T}\cdot\text{m}^2}{\text{s}} = \frac{\text{N}}{\text{C}\cdot\frac{\text{m}}{\text{s}}}\cdot\frac{\text{m}^2}{\text{s}} = \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V}$$

Z tego sprawdzenia widzimy też, że:

$$1\ \text{Wb} = 1\ \text{V}\cdot\text{s}$$

Natężenie prądu indukcyjnego

Kiedy znamy SEM indukcji, możemy obliczyć natężenie prądu indukcyjnego w obwodzie, tak samo jak w przypadku SEM ogniwa:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

natężenie prądu; opór odbiornika energii; SEM; opór wewnętrzny (czyli opór pętli)

Zauważ, że w przypadku zwojnicy o połączonych końcach zmiana liczby zwojów spowoduje jednocześnie proporcjonalne zwiększenie SEM oraz oporu, więc natężenie prądu się nie zmieni:

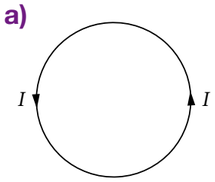
$$I = \frac{N\mathcal{E}}{Nr} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Jeśli jednak do zwojnicy podłączony jest opór zewnętrzny R, to większa liczba zwojów pozwala uzyskać większe natężenie prądu:

$$I = \frac{N\mathcal{E}}{R + Nr} = \frac{\mathcal{E}}{\frac{R}{N} + r}$$

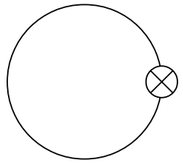
Ten wzór można rozumieć intuicyjnie w następujący sposób: na każdy zwój przypada $\frac{1}{N}$ oporu zewnętrznego.

a)



$$I = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

b)



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Rys. **17.10.** Natężenie prądu indukcyjnego płynącego a) w pętli o oporze r, b) w pętli z odbiornikiem energii (żarówką)

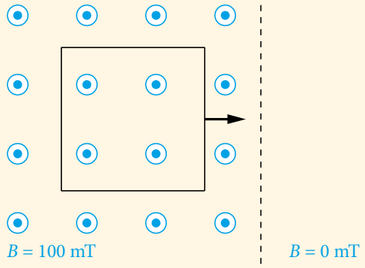
$\mathcal{E}$ – SEM w jednym zwoju, r – opór jednego zwoju, N – liczba zwojów

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Ramka wykonana z miedzianego drutu w kształcie kwadratu o boku 5 cm została 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 sąsiadującego z nim bezpośrednio obszaru, w którym pole magnetyczne było pomijalnie słabe. Opór ramki wynosi 4 mΩ.
Oblicz natężenie prądu indukcyjnego.



Dane: $\boldsymbol{l = 5\ \text{cm}} = 0{,}05$ m – długość boku ramki,
$\boldsymbol{B = 100\ \text{mT}} = 0{,}1$ T – indukcja pola magnetycznego,
$\boldsymbol{v = 10\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 0{,}1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – prędkość ruchu ramki,
$\boldsymbol{r = 4\ \text{m}\Omega} = 4 \cdot 10^{-3}\ \Omega$ – opór ramki
Szukane: I – natężenie prądu indukowanego w ramce

Rozwiązanie:
Aby obliczyć natężenie prądu, najpierw musimy obliczyć SEM indukcji.
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 $\Delta t = \frac{l}{v}$. 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:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{Bl^2}{\frac{l}{v}} = Blv$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$\mathcal{E} = 0{,}1\ \text{T} \cdot 0{,}05\ \text{m} \cdot 0{,}1\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 5 \cdot 10^{-4}\ \text{V}$$

Wobec tego:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r} = \frac{5 \cdot 10^{-4}\ \text{V}}{4 \cdot 10^{-3}\ \Omega} = 0{,}125\ \text{A}$$

Odpowiedź: Natężenie indukowanego prądu wynosiło 125 mA.

Uwagi. Zauważmy, że ze wzoru $\mathcal{E} = Blv$ wynika, że skoro B, l i v się nie zmieniają, to SEM jest stała w czasie wysuwania ramki.
Przykład jednorodnego pola, które urywa się nagle, zamiast maleć stopniowo, jest mało realistyczny i służy jedynie przedstawieniu tego, jak można korzystać z prawa indukcji.

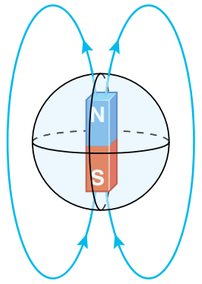
1. Bransoletka o średnicy 6 cm leży poziomo na stole. Linie ziemskiego pola magnetycznego o indukcji 30 μT przechodzą przez nią nachylone pod kątem 65° do poziomu. Oblicz strumień indukcji magnetycznej przez tę bransoletkę.

Wskazówka. Czy kąt 65° dany w zadaniu to kąt z definicji strumienia?

2. Wewnątrz sferycznej powierzchni umieściliśmy magnes (rys. a). Część linii pola wychodzi na zewnątrz tej powierzchni w pobliżu bieguna N, ale następnie wraca w pobliżu bieguna S. Jaki jest strumień indukcji magnetycznej przez powierzchnię sfery? A jaki jest strumień przez powierzchnię sfery, która przecina magnes w połowie (rys. b)?

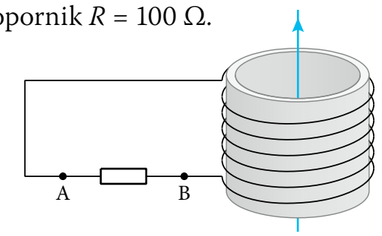
Wskazówka. Skorzystaj z rysunku 16.14 → s. 299.

a)



b)

3. Zwojnica składa się z 1500 zwojów, nawiniętych na plastikową rurkę o powierzchni przekroju poprzecznego 30 cm^2. Opór zwojnicy wynosi 200 Ω. Zwojnica została umieszczona w polu magnetycznym o indukcji B = 5 mT i o liniach równoległych do osi zwojnicy (patrz rys.; ze względu na czytelność przedstawiono na nim tylko kilka zwojów). Do końcówek zwojnicy podłączono opornik R = 100 Ω.



Pole zostało jednostajnie wyłączone, przy czym jego zmiana trwała 0,02 s.

a) Oblicz siłę elektromotoryczną indukowaną w zwojnicy.

b) W którą stronę prąd płynął przez opornik: z A do B czy z B do A?

c) Oblicz natężenie prądu indukcyjnego.

4. Zamkniętą ramkę z drutu umieszczono w polu magnetycznym o liniach prostopadłych do płaszczyzny ramki.

W którym z opisanych przypadków w ramce wyindukuje się siła elektromotoryczna o największej wartości? Uzasadnij swoją odpowiedź.

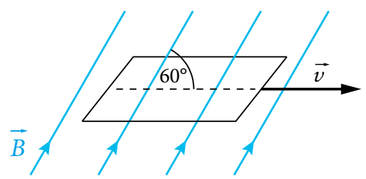
A. Indukcja pola zmienia się od 2 mT do 5 mT w czasie 0,01 s.

B. Indukcja pola zmienia się od 10 mT do 20 mT w czasie 0,02 s.

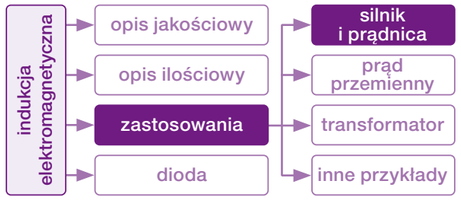
C. Indukcja pola zmienia się od 100 mT do 200 mT w czasie 2 s.

5. P Kwadratowa ramka o boku 20 cm, wykonana z drutu miedzianego o oporze 0,02 Ω, znalazła się w jednorodnym polu magnetycznym. 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 i znalazła się w obszarze, w którym pole magnetyczne było pomijalnie małe. Oblicz natężenie prądu płynącego w ramce w czasie, gdy jeden koniec już znajdował się w obszarze o pomijalnie małym polu magnetycznym, a drugi – jeszcze nie.

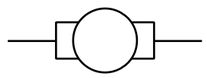


17.3 Silnik elektryczny i prądnica



Ważne w tej lekcji:
- silnik i prądnica z jednej ramki,
- indukcja przy obracaniu ramki,
- (F) mikrofon i głośnik.

Przypomnij sobie:
- W polu magnetycznym na przewodnik, w którym płynie prąd, działa siła magnetyczna.
- Indukcja elektromagnetyczna zachodzi wtedy, gdy zmienia się strumień indukcji pola magnetycznego przez obszar ograniczony ramką lub zwojnicą.

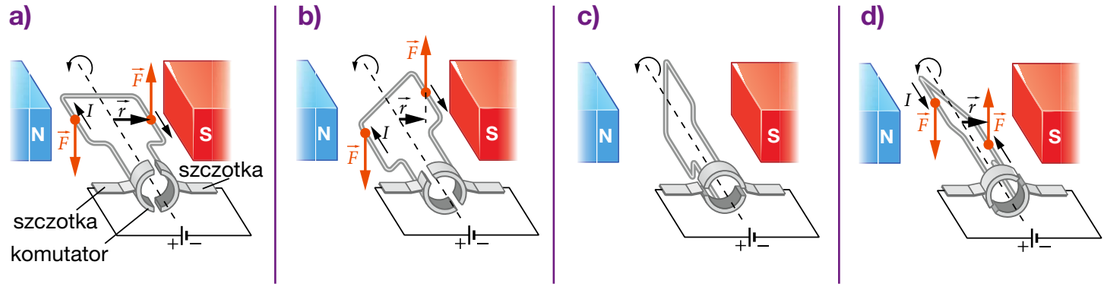


Rys. **17.11.** Symbol silnika elektrycznego

Silnik elektryczny działa dzięki sile elektrodynamicznej i w zasadzie mogliśmy go omówić w poprzednim dziale. Jednak uznaliśmy, że lepiej będzie, gdy od razu porównamy go z prądnicą. Okazuje się, że te dwa urządzenia – chociaż pełnią przeciwstawne funkcje – są zbudowane bardzo podobnie.
W technice stosujemy wiele różnych rodzajów silników i prądnic. Nas jednak interesują fizyczne zasady ich działania, dlatego omówimy tylko najprostsze ich typy.
W tej lekcji zajmiemy się silnikiem i prądnicą prądu stałego.

Silnik z jednej ramki

Najprostszym modelem silnika jest pojedyncza ramka podłączona do zasilania i umieszczona w polu magnetycznym.
Jak widzisz na rysunku 17.12 na następnej stronie, na przeciwległe ramiona ramki działają siły zwrócone przeciwnie, ale ich momenty powodują obrót ramki w tę samą stronę.



Rys. **17.12.** Pojedyncza ramka to najprostszy model silnika elektrycznego

Tylko w położeniu c) siły nie powodują obrotu, ale ramka i tak przechodzi przez to położenie dzięki swojej bezwładności. Kiedy to nastąpi, każda ze szczotek przeskakuje na drugą połowę komutatora. Dzięki temu moment siły działa nadal w tę samą stronę, choć ramka się obróciła.

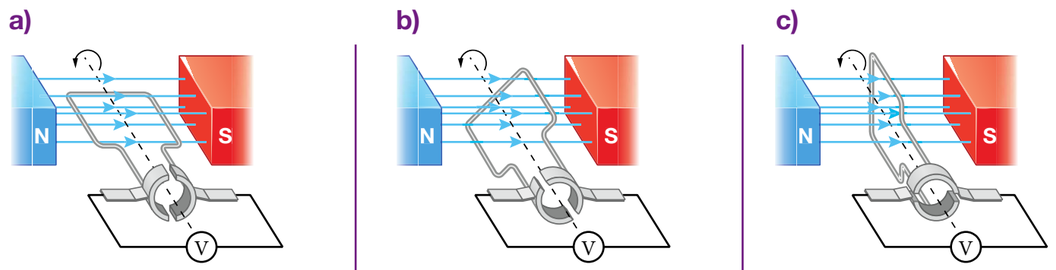
Bardziej realistyczny silnik

Gdyby silnik miał tylko jedną ramkę, moment siły byłby tak mały, że silnik nie mógłby wykonywać użytecznej pracy. Być może moment ten nie pokonałby nawet oporu ruchu ramki i silnik w ogóle nie zacząłby 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 tak jak na rysunku 17.12a, czyli znajdują się w pozycji, w której momenty działających na nie sił są największe.

Na rysunku 17.12a i b siły są jednakowe, ale ramiona sił są większe na 17.12a. Patrz podręcznik, cz. 2 → s. 149.

Silnik działający jako prądnica

Wyobraźmy sobie teraz, że zamiast źródła napięcia do naszego silnika zbudowanego z jednej ramki podłączamy woltomierz (rys. 17.13) i sami obracamy ramką. Co się wtedy dzieje?



Żadne linie pola nie przechodzą przez ramkę.

Część linii pola przechodzi przez ramkę.

Najwięcej linii pola przechodzi przez ramkę.

Rys. **17.13.** Kiedy obracamy ramkę, zmienia się strumień indukcji przez tę ramkę

Jak widać, zmienia się liczba linii pola przechodzących przez ramkę, czyli mówiąc ściślej: zmienia się strumień indukcji przez tę ramkę. Wobec tego w ramce indukuje się napięcie. W ten sposób silnik – bez zmiany konstrukcji, tylko po prostu użyty w inny sposób – stał się prądnicą.

Silnik elektryczny może działać jako prądnica.

Jak wspomnieliśmy wyżej, w prawdziwym silniku ramek jest więcej. Jest to zaletą także w przypadku użycia go jako prądnicy, ponieważ pozwala na wytwarzanie wyższego napięcia.

Fakt, że to samo urządzenie może działać zarówno jako silnik, jak i jako prądnica, jest bardzo korzystny. W samochodach elektrycznych i hybrydowych podczas hamowania silnik działa jako prądnica i doładowuje akumulatory. W przypadku tramwajów i elektrowozów energia jest w tym momencie oddawana do sieci.

Prądnica a przemiany energii

Jeśli do prądnicy mamy podłączoną jedną żarówkę, a potem dołączamy równolegle drugą, to prądnica zaczyna dostarczać więcej energii elektrycznej. Z zasady zachowania energii wynika, że aby obracać ramką prądnicy zasilającej dwie żarówki zamiast jednej, musimy wykonać większą pracę, czyli ciężej jest nią kręcić.

Wciąż jednak nie wyjaśniliśmy mechanizmu zjawiska. Jaką konkretnie siłę musimy dodatkowo pokonywać?

Wyznacz zwrot siły Lorentza działającej na ramkę i sprawdź, że rzeczywiście hamuje ona jej ruch.

Odwołajmy się do reguły Lenza. Prąd indukujący się w prądnicy sam wytwarza pole magnetyczne, i to takie, które przeciwdziała wywołującej go zmianie. Na obracający się wirnik działa moment sił Lorentza hamujących jego ruch.

Przez uzwojenie prądnicy płynie prąd o takim samym natężeniu jak przez zasilane przez nią urządzenie. Zatem im większy prąd czerpiemy z prądnicy, tym silniejsze pole wytwarza prąd w jej uzwojeniach, a więc tym większy jest moment sił hamujących ruch wirnika.

(F) Mikrofon i głośnik

Oprócz silnika i prądnicy istnieje jeszcze jedna para urządzeń, które mogą pełnić przeciwstawne funkcje mimo jednakowej budowy: mikrofon dynamiczny i głośnik.

Istnieją także inne typy mikrofonów, którymi nie będziemy się zajmować.

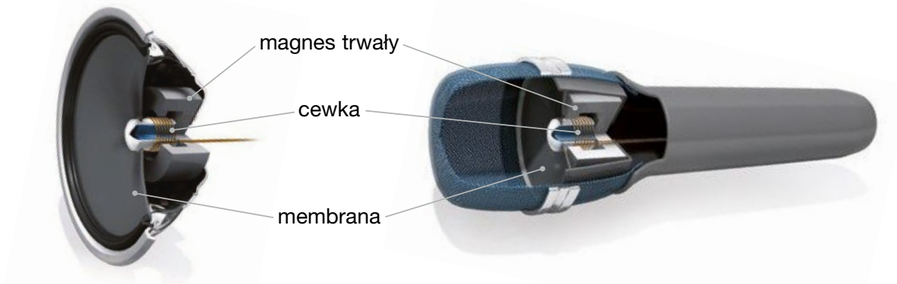
W praktyce oba urządzenia różnią się od siebie jedynie szczegółami technicznymi, pozwalającymi osiągnąć wyższą jakość dźwięku. Aby się o tym przekonać, wykonaj doświadczenie.

Doświadczenie 31

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?

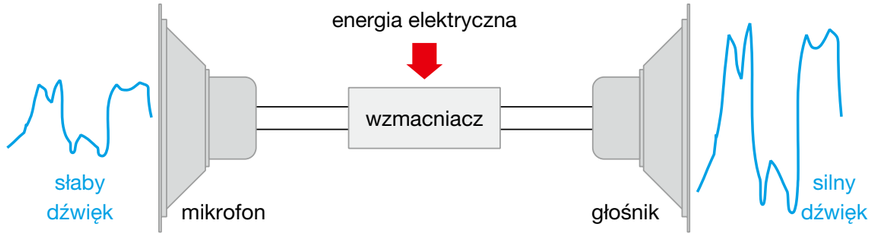


Rys. **17.14.** Budowa mikrofonu i głośnika – oba urządzenia mają podobną konstrukcję

Zarówno mikrofon dynamiczny, jak i głośnik składają się z membrany, przyczepionej do niej zwojnicy (cewki) i magnesu trwałego.

- W mikrofonie drgania powietrza poruszają membraną i zwojnicą w polu magnetycznym. To powoduje indukowanie się napięcia.
- W głośniku zmiany napięcia w cewce umieszczonej w polu magnetycznym powodują jej ruch, a poruszająca się wraz z cewką membrana wprawia w ruch powietrze.

Aby zwiększyć natężenie dźwięku, zwykle stosujemy wzmacniacz (rys. 17.15). Podobnie jest wtedy, gdy głośnik podłączymy do urządzenia elektronicznego, np. odtwarzacza płyt albo komputera.



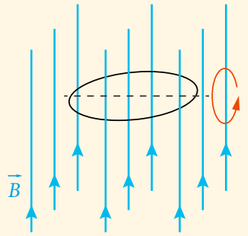
Rys. **17.15.** Schemat przetwarzania dźwięku przez mikrofon i głośnik

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Ramka z drutu ma kształt okręgu o średnicy 10 cm. Jej opór elektryczny wynosi 4 mΩ. Ramka została umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji 100 mT, w płaszczyźnie równoległej do linii pola. Następnie w ciągu 0,02 s ramkę obrócono o kąt 2°, tak jak przedstawiono na rysunku. Oblicz średnie natężenie prądu elektrycznego płynącego w ramce.



Dane: d **= 10 cm** = 0,1 m – średnica ramki,
R **= 4 mΩ** = 0,004 Ω – opór ramki,
B **= 100 mT** = 0,1 T – indukcja pola magnetycznego,
α **= 2°** – kąt, o jaki obróciła się ramka,
t **= 0,02 s** – czas trwania obrotu
Szukane: I – średnie natężenie prądu płynącego w ramce

Rozwiązanie:
Do obliczeń będzie nam potrzebne pole powierzchni ramki:

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot (0{,}05\ \text{m})^2 = 7{,}85 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^2$$

Przed obrotem strumień pola magnetycznego przez ramkę był równy $\Phi_1 = 0$ (ponieważ płaszczyzna ramki była równoległa do linii pola magnetycznego), a po obrocie wynosił:

$$\Phi_1 = BS\cos 88° = 2{,}74 \cdot 10^{-5}\ \text{Wb}$$

Ponieważ cos 88° = –cos 92°, więc kierunek obrotu nie ma znaczenia dla wartości bezwzględnej SEM.

Pamiętaj, że kąt we wzorze definiującym strumień indukcji to kąt między liniami pola i wektorem prostopadłym do powierzchni ramki (a nie między liniami i płaszczyzną ramki). Początkowo miara tego kąta wynosiła 90°, a po obrocie ramki zmalała do 88°.

Minus w prawie indukcji pominiemy, ponieważ w tym zadaniu interesuje nas tylko wartość bezwzględna SEM. Wobec tego podstawiamy dane i wyznaczamy jednostkę:

$$|\mathcal{E}| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - 0}{\Delta t} = \frac{\Phi_1}{\Delta t} = \frac{2{,}74 \cdot 10^{-5}\ \text{Wb}}{0{,}02\ \text{s}}$$

$$[\mathcal{E}] = \frac{\text{Wb}}{\text{s}} = \frac{\text{Tm}^2}{\text{s}} = \frac{\frac{\text{N}}{\text{C}\cdot\frac{\text{m}}{\text{s}}}\cdot\text{m}^2}{\text{s}} = \frac{\frac{\text{Ns}}{\text{C}\cdot\text{m}}\cdot\text{m}^2}{\text{s}} = \frac{\text{Nm}}{\text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $|\mathcal{E}| = 1{,}37 \cdot 10^{-3}$ V.

Na tej podstawie możemy obliczyć natężenie prądu:

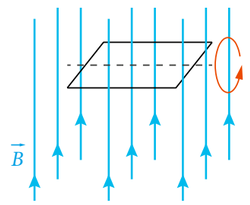
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{1{,}37 \cdot 10^{-3}\ \text{V}}{0{,}004\ \Omega} = 0{,}34\ \text{A}$$

Odpowiedź: Natężenie prądu elektrycznego wynosiło 0,34 A.

1. P Ramka z drutu ma kształt kwadratu o boku 20 cm. Została umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji 100 mT, w płaszczyźnie prostopadłej do linii pola. Następnie obrócono ją o kąt 5°, tak jak przedstawiono na rysunku.

a) Oblicz strumień indukcji magnetycznej przez ramkę przed obrotem i po nim.

b) Oblicz średnie natężenie prądu płynącego w ramce podczas jej obrotu, jeśli trwał on 0,1 s, a opór ramki to 6 mΩ.



2. Omów podobieństwa i różnice między:

a) silnikiem elektrycznym a głośnikiem,

b) prądnicą a mikrofonem,

c) prądnicą a silnikiem elektrycznym,

d) mikrofonem a głośnikiem.

3. Ramka najprostszego modelu silnika elektrycznego jest wykonana z drutu i ma kształt kwadratu o boku $l = 5$ cm. Przez ramkę płynie prąd o natężeniu $I = 1{,}5$ A, a magnes wytwarza jednorodne pole magnetyczne o indukcji $B = 0{,}05$ T.

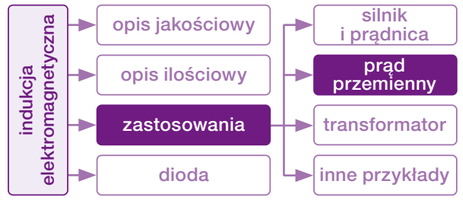
Oblicz łączny moment sił elektrodynamicznych działających na ramkę względem jej osi obrotu, kiedy znajduje się ona w płaszczyźnie nachylonej do linii pola pod kątem $\alpha = 45°$.

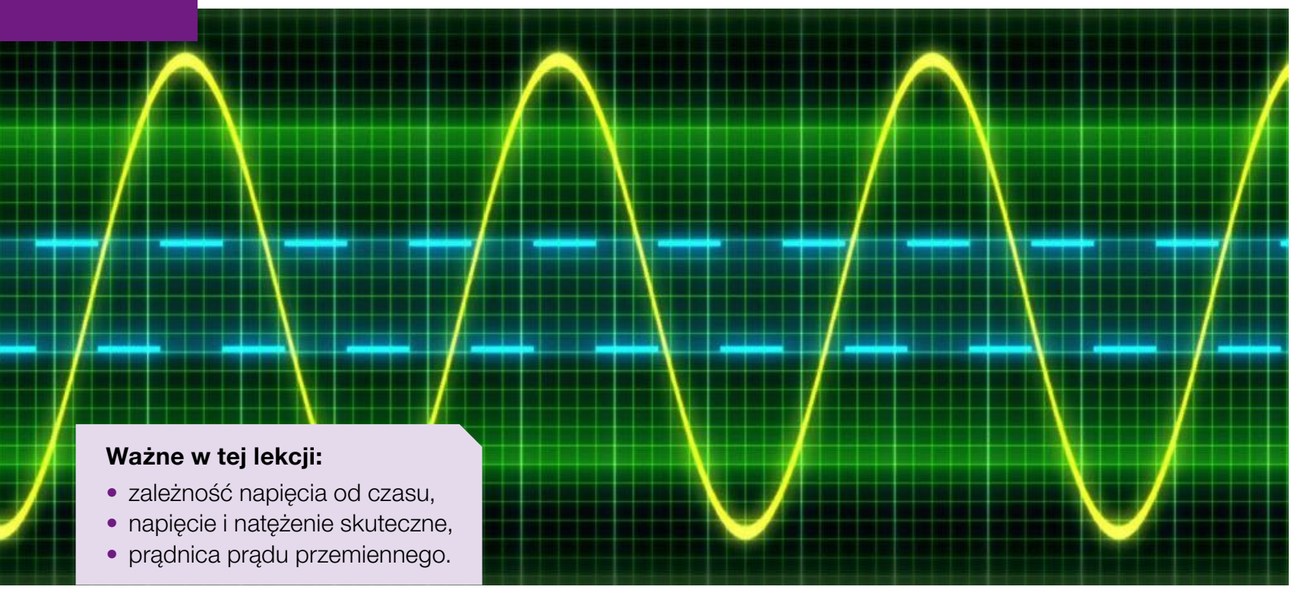
4. Zbuduj działający model silnika elektrycznego zasilanego jednym lub kilkoma ogniwami.

Wskazówka. Możesz skorzystać z projektów zamieszczonych w internecie, np. w serwisie YouTube. Postaraj się je udoskonalić.

Przydatne hasła do wyszukiwania 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.

17.4 Prąd przemienny





Ważne w tej lekcji:
- zależność napięcia od czasu,
- napięcie i natężenie skuteczne,
- prądnica prądu przemiennego.

Przypomnij sobie:
- Siła elektromotoryczna indukująca się w pętli z przewodnika jest równa szybkości zmian strumienia indukcji.
- Najprostszym modelem prądnicy jest pojedyncza ramka z przewodnika obracająca się w polu magnetycznym.
- Pracę prądu elektrycznego obliczamy ze wzoru $W = UIt$.

Napięcie w sieci domowej

Jak wiadomo, na gniazdkach elektrycznych nie ma znaków + i –, jakie są na baterii, a wiele wtyczek można wkładać w dowolną stronę. Jest tak dlatego, że w sieci domowej występuje napięcie przemienne – zmienia się zarówno jego biegunowość, jak i wartość.

Porównaj ten wzór ze wzorem na położenie ciała w ruchu harmonicznym (podręcznik, cz. 2 → s. 204)

Te zmiany możemy opisać za pomocą funkcji sinus:

napięcie w chwili t — maksymalna wartość napięcia — czas — okres zmian napięcia

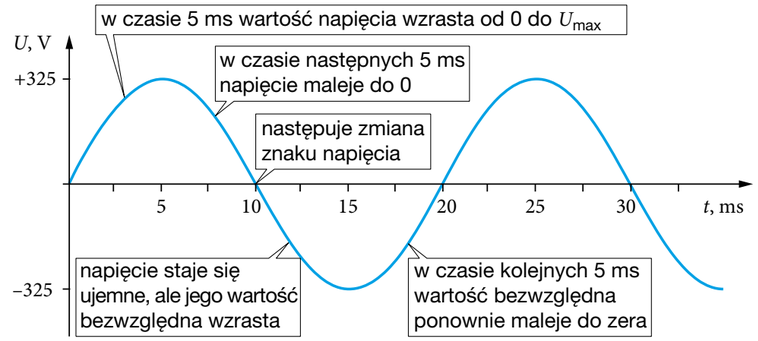
$$U(t) = U_{max}\sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right)$$

W innych częściach świata napięcie i częstotliwość bywają inne.

W Europie napięcie w sieci domowej zmienia się od U_{max} = 325 V do $-U_{max}$ = –325 V. Częstotliwość zmian wynosi natomiast 50 Hz, a więc okres zmian to:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50}\ \text{s} = 0{,}02\ \text{s} = 20\ \text{ms}$$

Graficznym przedstawieniem napięcia w sieci domowej jest więc sinusoida o okresie 20 ms i zmianach napięcia w przedziale [–325 V, 325 V]. Wykres zależności $U(t)$ pokazaliśmy na rysunku poniżej.



Rys. **17.16.** Zależność napięcia od czasu w sieci prądu przemiennego

Napięcie skuteczne

Być może zaskoczyła cię informacja, że w polskiej sieci napięcie to U_{max} = 325 V. Przecież wszyscy wiedzą, że napięcie sieciowe wynosi 230 V. Jednak 230 V to **napięcie skuteczne**, co oznacza, że żarówka podłączona do sieci 230 V świeci tak samo jasno jak żarówka podłączona do napięcia stałego 230 V.

Okazuje się, że między amplitudą zmian napięcia, inaczej: napięciem maksymalnym U_{max}, a napięciem skutecznym U_{sk} dla zmian sinusoidalnych zachodzi zależność:

$$U_{sk} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Rys. **17.17.** Z miernika włączonego jako woltomierz napięcia przemiennego (ACV) odczytujemy napięcie skuteczne

(F) Uzasadnienie wzoru na napięcie skuteczne

Jak uzasadnić tę zależność? Jeśli opornik podłączamy do napięcia przemiennego o wartości skutecznej U_{sk}, to w całym okresie zmian napięcia praca prądu W jest taka sama jak wtedy, gdy podłączamy go do stałego napięcia równego U_{sk}.

Aby ją obliczyć, skorzystamy ze związanej z nią wielkości – mocy prądu. Zapiszmy wzór na moc prądu:

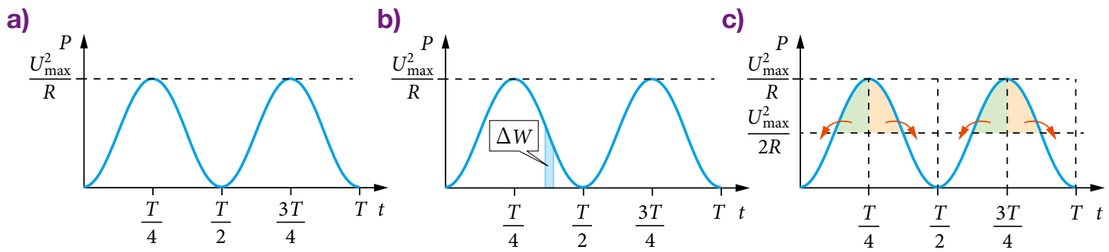
$$P = \frac{U^2}{R}$$

Ponieważ napięcie zmienia się w czasie zgodnie ze wzorem zapisanym na początku lekcji $U(t) = U_{max}\sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right)$, 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, podręcznik cz. 1 → s. 84

Na rysunku 17.18a 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. 17.18b).



Rys. **17.18.** 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

To samo pole można obliczyć również inaczej. Zauważ, że jeśli narysujemy poziomą linię na wysokości $\frac{U^2_{max}}{2R}$, czyli w połowie maksymalnej wysokości wykresu, a następnie część wykresu ponad tą linią podzielimy na fragmenty, to będą one mogły wypełnić puste miejsca między tą linią a wykresem (rys. 17.18c). Praca prądu w czasie T jest równa polu powstałego prostokąta o pionowym boku $\frac{U^2_{max}}{2R}$ i poziomym boku T, zatem:

$$W = \frac{U^2_{max}}{2R} \cdot T, \quad \text{czyli} \quad P = \frac{U^2_{max}}{2R}$$

Taką samą moc miałby prąd stały o napięciu U_{sk}, a ponieważ jego moc wynosiłaby:

$$P = \frac{U^2_{sk}}{R}$$

więc z porównania ostatnich dwóch wzorów otrzymujemy:

$$\frac{U^2_{sk}}{R} = \frac{U^2_{max}}{2R}, \quad \text{czyli:} \quad U_{sk} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Natężenie skuteczne

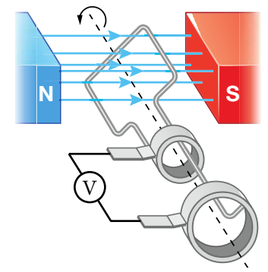
Skoro w obwodzie prądu przemiennego zmienia się napięcie, to natężenie tego prądu także ulega zmianom. Wartość skuteczna natężenia wyraża się wzorem analogicznym do wzoru na napięcie skuteczne:

$$I_{sk} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

który podobnie jak w przypadku napięcia można uzasadnić na podstawie wzoru $P = I^2R$. Wartości skuteczne to bardzo użyteczne wielkości, ponieważ 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.

Prądnica prądu przemiennego

W poprzedniej lekcji mówiliśmy o najprostszym modelu prądnicy złożonej z jednej ramki. Wyobraźmy sobie teraz podobną prądnicę, ale zbudowaną tak, aby każdy z końców ramki był stale podłączony do tego samego wyprowadzenia (rys. 17.19).



Rys. **17.19.** Najprostszy model prądnicy

Opisywana przez nas ramka to najprostsza **prądnica prądu przemiennego**. Okazuje się, że taka prądnica wytwarza napięcie przemienne o sinusoidalnym przebiegu, takie jak używane w energetyce i w sieci domowej. W ramce na następnej stronie wyjaśniamy, dlaczego tak jest.

Zwróć uwagę na podobieństwo do ruchu harmonicznego:

- tam największa prędkość odpowiadała najmniejszemu wychyleniu,
- tutaj największa szybkość zmian (więc także największa wartość SEM) odpowiada najmniejszemu strumieniowi.

W jednym i drugim przypadku można to uzasadnić matematycznie za pomocą pojęcia pochodnej.

SEM jako pochodna → s. 296

SEM prądnicy

Powiedzieliśmy już, że chwilowa wartość SEM prądnicy zmienia się sinusoidalnie. Okazuje się, że dokładny wzór na SEM ma postać:

$$\mathcal{E}_1 = BS\omega\sin(\omega t)$$

Natomiast jeśli zamiast jednej ramki mamy ich N, to SEM jest N razy większa:

$$\mathcal{E} = NBS\omega\sin(\omega t)$$

SEM – liczba zwojów (ramek); prędkość kątowa; indukcja magnetyczna

Wynika stąd, że maksymalna wartość SEM wynosi:

$$\mathcal{E}_{max} = NBS\omega$$

Maksymalną SEM nazywamy także amplitudą zmian napięcia.

Natomiast wartość skuteczna jest $\sqrt{2}$ razy mniejsza.

Częstotliwość obrotu prądnicy a częstotliwość prądu

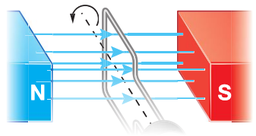
Zarówno z naszych jakościowych rozważań, jak i ze wzoru na wartość SEM w postaci $\mathcal{E} = NBS\omega\sin(\omega t)$ wynika, że okres obrotu prądnicy jest równy okresowi zmian napięcia, a więc częstotliwość obrotu prądnicy jest równa częstotliwości zmian napięcia.

Pomyśl, że w takim razie wszystkie prądnice w elektrowniach muszą zachowywać stałą częstotliwość obrotu: 50 razy na sekundę, i to mimo zmiany obciążenia wynikającego z różnego zapotrzebowania na energię.

Zmiany strumienia indukcji i SEM prądnicy

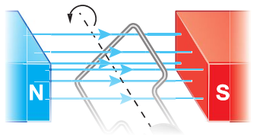
Na wykresie kolorami zaznaczyliśmy dwie połowy okresu obrotu ramki. Zaczynamy od chwili, kiedy jest ona prostopadła do linii pola, a więc kiedy strumień indukcji jest największy. Później kąt ustawienia ramki względem linii pola $\alpha = \omega t$ się zmienia, a wraz z nim zmienia się strumień $\Phi = BS\cos\alpha = BS\cos(\omega t)$.

Najwięcej linii pola przechodzi przez ramkę.



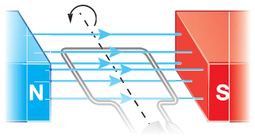
Strumień jest duży, ale podczas ruchu wokół tego położenia jego zmiany są bardzo małe.

Część linii pola przechodzi przez ramkę.

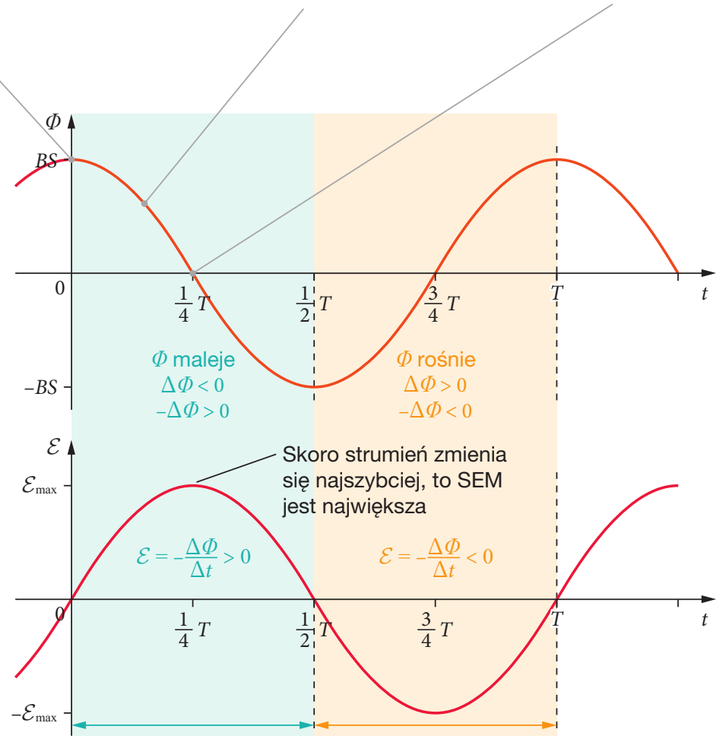


Strumień jest średni, za to podczas ruchu wokół tego położenia zmienia się szybciej.

Linie pola nie przechodzą przez ramkę.



Strumień jest zerowy, ale podczas ruchu wokół tego położenia zmienia się najszybciej.



Z górnego wykresu widzimy następującą własność zależności strumienia od czasu:
- kiedy wartość bezwzględna strumienia jest duża, jego zmiany następują bardzo powoli,
- z kolei w okolicy wartości zerowej jego zmiany są najszybsze.

A przecież od szybkości zmian zależy indukowana SEM.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Prądnicę prądu przemiennego zbudowano z 200 prostokątnych ramek o wymiarach 10 cm × 5 cm, umieszczonych w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji 20 mT. Do prądnicy podłączono opornik 470 Ω, a opór wewnętrzny prądnicy wynosi 5 Ω. Oblicz, przy jakiej częstotliwości obrotów prądnicy przez opornik popłynie prąd o natężeniu skutecznym 12 mA. Jaka będzie częstotliwość tego prądu?

Dane: $N = 200$ – liczba ramek, $a = 10\ \text{cm} = 0{,}1\ \text{m}$ – jeden wymiar ramki, $b = 5\ \text{cm} = 0{,}05$ m – drugi wymiar ramki, $R = 470\ \Omega$ – opór opornika, $B = 20\ \text{mT}$ – indukcja pola magnetycznego, $r = 5\ \Omega$ – opór wewnętrzny prądnicy, $I_{sk} = 12\ \text{mA}$ – natężenie skuteczne

Szukane: f – częstotliwość obrotów prądnicy oraz częstotliwość prądu

Rozwiązanie:

Wielkością, którą umiemy powiązać zarówno z indukcją pola magnetycznego, jak i z natężeniem prądu płynącego przez opornik podłączony do prądnicy, jest SEM indukcji:

$$\mathcal{E}_{max} = NBS\omega \quad \text{oraz} \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Interesuje nas natężenie skuteczne, a nie maksymalne, więc musimy wziąć pod uwagę wartość skuteczną SEM:

$$\mathcal{E}_{sk} = \frac{NBS\omega}{\sqrt{2}} \quad \text{oraz} \quad I_{sk} = \frac{\mathcal{E}_{sk}}{R + r}$$

Po połączeniu tych dwóch wzorów mamy:

$$I_{sk} = \frac{NBS\omega}{\sqrt{2}\,(R + r)}$$

a więc:

$$\omega = \frac{\sqrt{2}(R + r)I_{sk}}{NBS}$$

W zadaniu zapytano o częstotliwość (liczbę obrotów na sekundę), a nie o prędkość kątową, dlatego musimy skorzystać z zależności:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{2}(R + r)I_{sk}}{2\pi NBS}$$

Na jeden obrót przypada kąt 2π radianów.

$$[f] = \frac{\Omega \cdot \text{A}}{\text{T} \cdot \text{m}^2} = \frac{\frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \text{A}}{\frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{V}}{\frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot \text{m}^2} = \text{V} \cdot \frac{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{N} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \frac{\text{C} \cdot \frac{1}{\text{s}}}{\text{Nm}} = \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \frac{\text{C} \cdot \frac{1}{\text{s}}}{\text{J}} = \frac{1}{\text{s}} = \text{Hz}$$

Po podstawieniu danych (w tym $S = 0{,}1\ \text{m} \cdot 0{,}05\ \text{m} = 0{,}005\ \text{m}^2$) otrzymujemy:

$$f = \frac{\sqrt{2}(470\ \Omega + 5\ \Omega) \cdot 0{,}012\ \text{A}}{2\pi \cdot 200 \cdot 0{,}02\ \text{T} \cdot 0{,}005\ \text{m}^2} = 64\ \text{Hz}$$

Odpowiedź: Prądnicę należy obracać z częstotliwością 64 Hz (czyli 64 obroty na sekundę). Powstanie prąd o takiej samej częstotliwości.

Zadania s. 312

Pytania i zadania

1. Mała żarówka montowana w podwieszanym suficie ma moc 35 W i jest zasilana napięciem przemiennym o wartości skutecznej 12 V. Oblicz:

a) amplitudę napięcia U_{max},

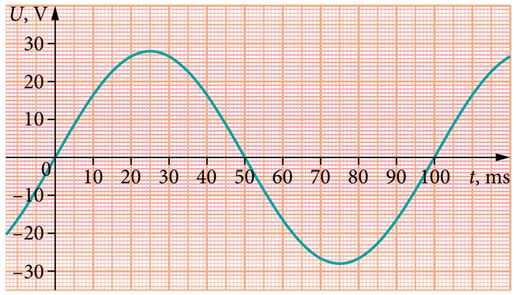
b) wartości skutecznego natężenia prądu i maksymalnego natężenia prądu płynącego przez żarówkę,

c) opór żarówki, gdy jest włączona.

2. Wykres przedstawia zmiany napięcia przemiennego. Na jego podstawie oblicz:

a) częstotliwość,

b) ciepło wydzielone na oporniku 100 Ω w czasie 1 minuty.



3. P Prądnica składa się z 500 kwadratowych ramek o powierzchni 300 cm^2, obracających się 6000 razy na minutę. Jej opór wewnętrzny pomijamy.

Ile powinna wynosić indukcja pola magnetycznego, w którym są umieszczone ramki prądnicy, aby na podłączonej do niej grzałce o oporze 10 Ω wydzielało się ciepło z mocą 300 W? Linie pola są prostopadłe do osi obrotu.

4. Miedziana ramka w kształcie kwadratu o boku x = 20 cm była ustawiona w płaszczyźnie prostopadłej do linii pola magnetycznego o indukcji B = 0,2 T. Następnie ramkę zaczęto obracać z częstotliwością 50 Hz. Symbolem α oznaczamy kąt między płaszczyzną ramki w danej chwili a płaszczyzną prostopadłą do linii pola

Oblicz, jaka średnia siła elektromotoryczna indukuje się w ramce, gdy kąt α zmienia się o 1°:

a) od 0° do 1°,

b) od 40° do 41°,

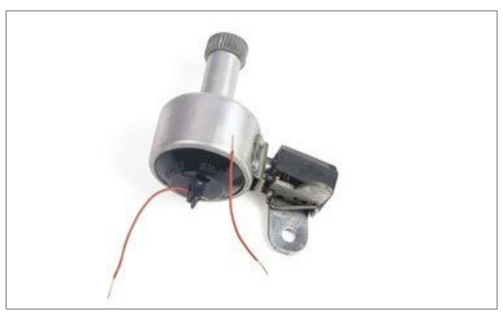
c) od 89° do 90°.

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 dotykałoby koła rowerowego, nawiń metr grubej nici. W ten sposób możesz obracać tym kółkiem, ciągnąc za nić.

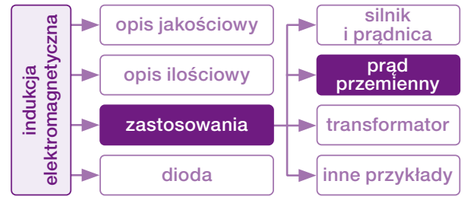
b) Do końcówek dynama podłącz woltomierz ustawiony na najczulszy zakres napięcia stałego. Jeśli jest tylko jedna końcówka, drugą stanowi obudowa (patrz zdjęcie).

c) Obracaj powoli kółkiem dynama – jeden obrót powinien przypadać na ok. 2 s. Obserwuj wskazania woltomierza. Co zauważasz?



F

17.5 Domowa sieć elektryczna

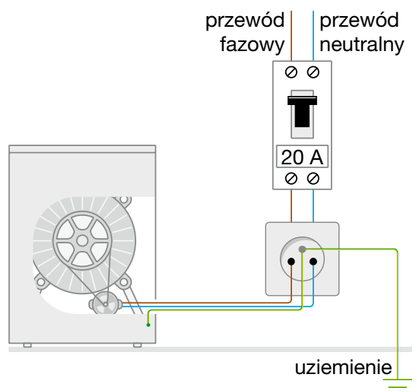


Ważne w tej lekcji:
- faza, zero, uziemienie,
- bezpieczniki i wyłączniki różnicowoprądowe,
- pierwsza pomoc,
- kilowatogodzina i opłaty za energię.

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 $P = I^2R$.

Rola przewodów w sieci domowej

W domowym gniazdku sieciowym do otworów prowadzą dwa przewody służące do zasilania podłączonego urządzenia (rys. 17.20).

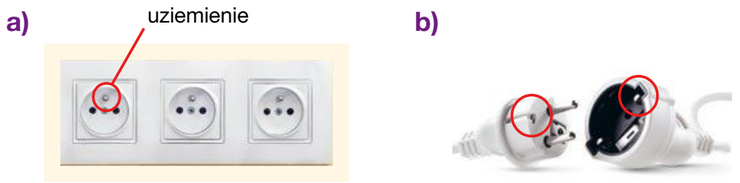


Rys. **17.20.** Przewody w gniazdku sieciowym

- Jeden z nich ma potencjał taki jak ziemia, czyli 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 230 V. Jest to przewód fazowy, zwany „fazą”.

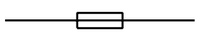
Nazwa *faza* pochodzi stąd, że jest to jedna z faz prądu trójfazowego.

Jeśli przewody są założone prawidłowo, to przewód fazowy prowadzi do lewego otworu gniazdka (rys. 17.20). Jednak w żadnym wypadku nie wolno sprawdzać gołymi rękami, czy elektryk się nie pomylił!
Z kolei bolec (rys. 17.21a) lub styki z boku wtyczki (rys. 17.21b) to **uziemienie**, czyli bezpośrednie połączenie z ziemią. O jego funkcji powiemy w dalszej części lekcji.



Rys. **17.21.** Uziemienie: a) w bolcu wystającym z gniazdka, b) w styku z boku wtyczki

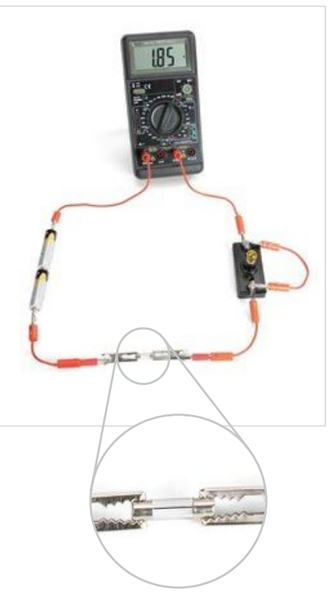
Badanie bezpiecznika



Rys. **17.22.** Symbol bezpiecznika

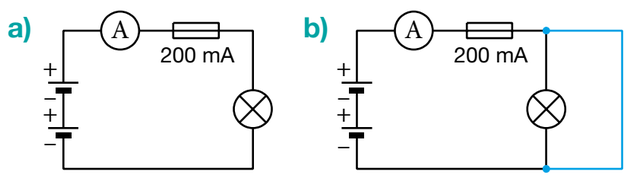
Zajmiemy się teraz bezpiecznikiem – jednym z urządzeń zabezpieczających urządzenia elektryczne. Najprostszy bezpiecznik składa się z cienkiego drutu umieszczonego w szklanej lub plastikowej obudowie. Zbadamy teraz jego działanie.

Doświadczenie 32



Uwaga. Doświadczenie wykonajcie w grupie 3–4 osób.

1. Przygotujcie: bezpiecznik 200 mA, żarówkę 2,2 V, dwie baterie AA, 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 $P = I^2R$ wzrost natężenia prądu spowodował też wzrost ciepła wydzielanego w czasie przepływu prądu przez bezpiecznik (R jest tutaj oporem drucika w bezpieczniku).
Drucik rozgrzał się tak bardzo, że się stopił i przestał przewodzić prąd. Potocznie powiemy, że bezpiecznik się „przepalił”.

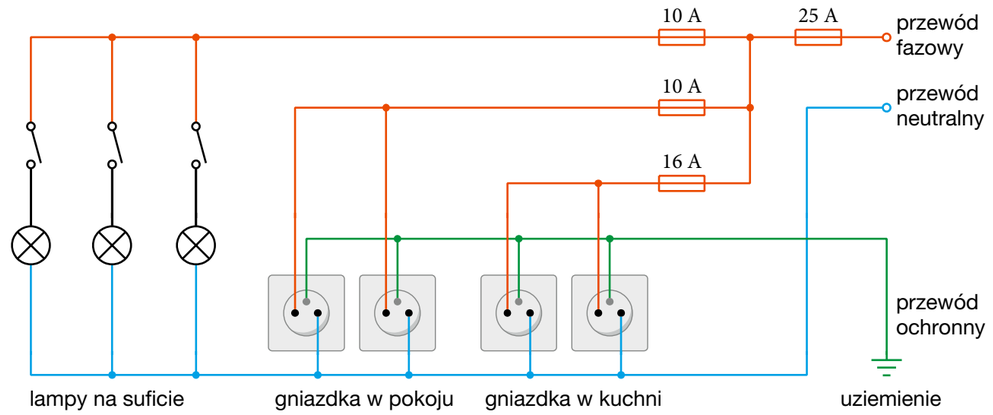
> Bezpiecznik to urządzenie rozłączające obwód, kiedy natężenie prądu przekroczy dopuszczalną wartość.

Teraz możemy wyjaśnić, jakie jest zastosowanie bezpieczników w domowej sieci elektrycznej.

Bezpieczniki w sieci domowej

Jedną z sytuacji, w których bezpiecznik wyłącza napięcie, jest zwarcie – podobnie jak w doświadczeniu 32. Jest to bardzo ważne, ponieważ duży prąd płynący w razie zwarcia może być przyczyną pożaru.
Jednak jest jeszcze druga możliwość. Wszystkie urządzenia w sieci domowej są połączone równolegle. Zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa to oznacza, że natężenie prądu wpływającego do sieci jest równe sumie natężeń prądów płynących przez poszczególne urządzenia.
Zatem jeśli włączymy jednocześnie wiele urządzeń o dużej mocy, to przewodami doprowadzającymi prąd do mieszkania popłynie prąd o bardzo dużym natężeniu. Wtedy przewody zaczną się rozgrzewać, a to może doprowadzić do ich zniszczenia, a co gorsza – do pożaru. Aby zapobiec takiej sytuacji, w sieci domowej stosuje się bezpieczniki.

Dzięki połączeniu równoległemu wszystkie urządzenia są zasilane tym samym napięciem (o wartości skutecznej 230 V).



Rys. **17.23.** Przykład użycia bezpieczników w sieci domowej

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.

Przeciążenie rozgałęźnika

Rys. **17.24.** Przeciążenie rozgałęźnika może doprowadzić do pożaru

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 na przykład 3450 W, będzie do niego wpływał prąd o natężeniu $I = \frac{3450\ \text{W}}{230\ \text{V}} = 15\ \text{A}$.
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. 17.24).

> 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, czajnik, toster, lub chłodzą, np. lodówka. Każde z takich urządzeń należy włączać do oddzielnego gniazdka.

Współczesne bezpieczniki

Aby włączyć bezpiecznik, przesuwamy dźwignię w górę albo wciskamy czarny przycisk.

Bezpieczniki z cienkim drucikiem są jednorazowe – po przepaleniu trzeba je wymieniać na nowe. Obecnie używamy ich głównie w samochodach i niewielkich urządzeniach elektronicznych.
Natomiast w sieci domowej stosujemy nowszego typu bezpieczniki, które tylko się wyłączają, a po usunięciu zwarcia albo odłączeniu części urządzeń możemy je z powrotem włączyć.

Wyłączniki różnicowoprądowe

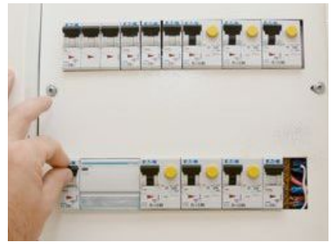
Jeżeli ktoś niechcący dotknie przewodu pod napięciem 230 V i przez jego ciało przepłynie do ziemi prąd o natężeniu np. 0,5 A, to taki człowiek dozna porażenia elektrycznego, które może być nawet śmiertelne. Jednak bezpiecznik dostosowany do prądu 10 A albo 16 A nie rozłączy w tej sytuacji obwodu. Dlatego 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.

Zatem wyłącznik różnicowy porównuje prądy w przewodzie fazowym i zerowym. W razie różnicy – odłącza zasilanie.
Istnienie takiej różnicy oznacza, że prąd musi odpływać z sieci do ziemi (być może przez ciało użytkownika), ponieważ zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa w obu przewodach dochodzących do domowej sieci powinien płynąć prąd o tym samym natężeniu.

Rys. **17.25.** Wyłącznik różnicowoprądowy odcina dopływ prądu, jeśli natężenie prądu wpływającego do domowej sieci elektrycznej jest inne niż natężenie prądu z niej wypływającego

a)



b)

Rys. **17.26.** a) skrzynka rozdzielcza (tablica bezpieczników i wyłączników różnicowoprądowych), b) wyłączniki różnicowoprądowe

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.

> Urządzenie wyposażone we wtyczkę z uziemieniem włączaj tylko do gniazdka z uziemieniem.

Obecnie wszystkie gniazdka sieciowe powinny być wyposażone w uziemienie. Wyjątek stanowią niektóre stare budynki i gniazdka samodzielnie wymieniane przez osoby niekompetentne.

Uwaga. W niektórych starszych budynkach nie ma odrębnego przewodu uziemienia. W takim przypadku bolec uziemienia w gniazdku łączy się z przewodem zerowym. Takie rozwiązanie jest bezpieczniejsze niż całkowity brak uziemienia, ale gorsze niż odrębny przewód (patrz zad. 5. na końcu lekcji). Warto więc zadbać o zainstalowanie uziemienia przy najbliższym większym remoncie budynku.

Uziemienie i rozgałęźniki

Rys. **17.27.** Przewód zasilający z płaską wtyczką

Również większość produkowanych współcześnie rozgałęźników jest wyposażona w przewód uziemienia. Jednak jeśli masz rozgałęźnik bez uziemienia, to używaj go tylko do urządzeń z wtyczką bez uziemienia.

Na ogół urządzenia niewymagające uziemienia są zaopatrzone w przewód zasilający z płaską wtyczką (rys. 17.27), dzięki czemu można je podłączać także do gniazdka z bolcem.

Pierwsza pomoc w przypadku porażenia elektrycznego

Prąd płynący przez serce może zatrzymać jego pracę.

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 przewodu pod napięciem i jednocześnie rury wodociągowej prowadzącej do ziemi.

Z tego samego powodu nie wolno używać urządzeń elektrycznych w czasie kąpieli ani przechowywać ich nad wanną, gdy są włączone do gniazdka (ponieważ mogą do niej spaść).
Zapamiętaj zasady postępowania – w razie wypadku nie będzie czasu na szukanie podręcznika! Zasady te przedstawiliśmy na infografice na s. 320–321.

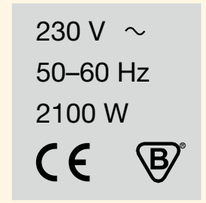
Kilowatogodzina

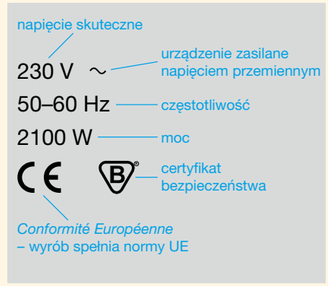
Przypomnijmy, że w przypadku sieci domowej jako jednostki energii używamy kilowatogodziny (patrz → s. 200). W przykładzie na końcu lekcji zobaczysz, jak posługujemy się nią przy obliczaniu opłat za energię.

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 1,20 zł za 1 kWh.
Czy taki czajnik można włączyć do instalacji z bezpiecznikiem 16 A? A dwa takie czajniki jednocześnie?





Dane: $t = 5$ **min** – czas pracy, **cena** $= 1{,}20\ \frac{\text{zł}}{\text{kWh}}$ – cena energii elektrycznej, **dane z tabliczki**
Szukane: R – opór spirali, **koszt pracy**

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 (mówimy tu o wartościach skutecznych):

$$I = \frac{P}{U}, \text{ stąd } I = \frac{2100\ \text{W}}{230\ \text{V}} \approx 9{,}1\ \text{A}$$

Natężenie pozwala nam od razu stwierdzić, że taki czajnik nie wyłączy bezpiecznika 16 A. Natomiast dwa czajniki, pobierające łącznie 18,2 A, spowodują jego wyłączenie.
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 $0{,}175\ \text{kWh} \cdot 1{,}20\ \frac{\text{zł}}{\text{kWh}} = 0{,}21$ zł.

Odpowiedź: Opór spirali podczas pracy wynosi ok. 25 Ω. Za energię potrzebną na działanie czajnika przez 5 min zapłacimy 21 gr. Jeden taki czajnik można włączyć do instalacji z bezpiecznikiem 16 A, ale dwóch już nie.

Zadania s. 322

Porażenie prądem elektrycznym

Pamiętaj, że napięcie 230 V w sieci domowej jest bardzo niebezpieczne. Warto znać zasady udzielania pierwszej pomocy, aby umieć skutecznie zareagować w razie wypadku.

Zadbaj o własne bezpieczeństwo

Jeśli nie możesz pomóc poszkodowanemu w bezpieczny dla siebie sposób – zadzwoń pod 112 i wezwij fachową pomoc.

Nigdy nie dotykaj osoby porażonej prądem, zanim nie zostanie ona odłączona od źródła napięcia.

- Wyłącz bezpieczniki.
- Wyjmij z gniazdka wtyczkę urządzenia, które było przyczyną wypadku.
- **Za pomocą izolatora**, np. kija, oddziel poszkodowanego od źródła napięcia (odsuń kabel, przesuń poszkodowanego).
- Nie wchodź bezpośrednio do rozlanej wody – wejdź na skrzynię albo stół, włóż gumowe kalosze.

Gdy miejsce zdarzenia jest bezpieczne

Sprawdź, czy poszkodowany jest przytomny. Delikatnie złap go za ramię i wyraźnie zapytaj: Czy mnie słyszysz?

Jeśli poszkodowany jest przytomny

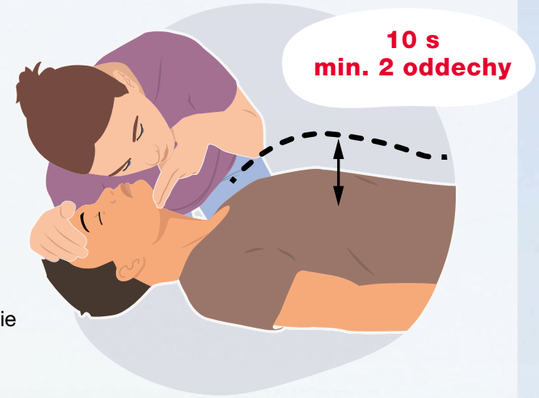
Wezwij pogotowie ratunkowe.
Ułóż poszkodowanego w pozycji półsiedzącej.

- Zapewnij mu ciepło – okryj go kocem lub kurtką.
- Pozostań z nim do czasu przyjazdu pogotowia, uspokajaj go, zadbaj, aby nie zasnął.

Jeśli poszkodowany nie reaguje, jest nieprzytomny

Sprawdź, czy oddycha.

- Ułóż poszkodowanego na plecach.
- Jedną ręką przytrzymaj mu czoło, a palcami drugiej ręki złap za podbródek i odchyl jego głowę do tyłu tak, aby broda była zwrócona w górę.
- Zbliż ucho do nosa i ust poszkodowanego i obserwuj klatkę piersiową. Sprawdź, czy słyszysz i wyczuwasz oddech oraz czy widzisz ruch klatki piersiowej. W czasie 10 sekund poszkodowany powinien wykonać przynajmniej dwa oddechy.



Jeśli poszkodowany jest nieprzytomny, ale oddycha

Ułóż go w pozycji bezpiecznej.
Wezwij pogotowie ratunkowe.

- W miarę możliwości okryj go kocem lub kurtką.
- Pozostań z nim do czasu przyjazdu karetki.
- Regularnie oceniaj oddech poszkodowanego.

Jeśli poszkodowany nie oddycha lub oddycha nieprawidłowo

Wezwij pogotowie ratunkowe.

Jeśli ktoś jest w pobliżu, poproś go głośno o wezwanie karetki, np.: „Niech pan w czerwonej kurtce natychmiast wezwie pogotowie!”.

Rozpocznij resuscytację krążeniowo-oddechową.

- Uklęknij obok poszkodowanego.
- Oprzyj podstawę zaplecionych dłoni pośrodku klatki piersiowej poszkodowanego. Pochyl się nad nim i wyprostuj ręce w łokciach.
- Uciskaj klatkę piersiową na 5–6 cm z częstotliwością 120 razy na minutę (dwóch na sekundę). **Koniecznie wykonuj tę czynność do czasu przyjazdu pogotowia.**
- W przypadku dzieci, osób, które tonęły, nadużywały narkotyków lub miały problemy z oddychaniem, zastosuj – jeśli umiesz – sztuczne oddychanie.

Pytania i zadania

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. P Termowentylator zasilany z sieci domowej ma moc 1800 W.

a) Oblicz natężenie skuteczne prądu pobieranego przez to urządzenie z sieci oraz koszt energii elektrycznej zużywanej przez nie w ciągu 2 h. Przyjmij cenę 1,20 zł za 1 kWh energii.

b) Czy taki termowentylator można włączyć do gniazdka, jeśli do tego samego obwodu zabezpieczonego bezpiecznikiem 10 A jest już włączona lampa o mocy 50 W?

4. 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.

5. 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.

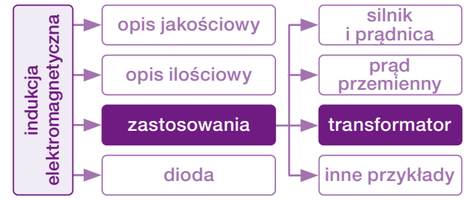
b) Nieostrożna osoba dotknęła przewodu pod napięciem.

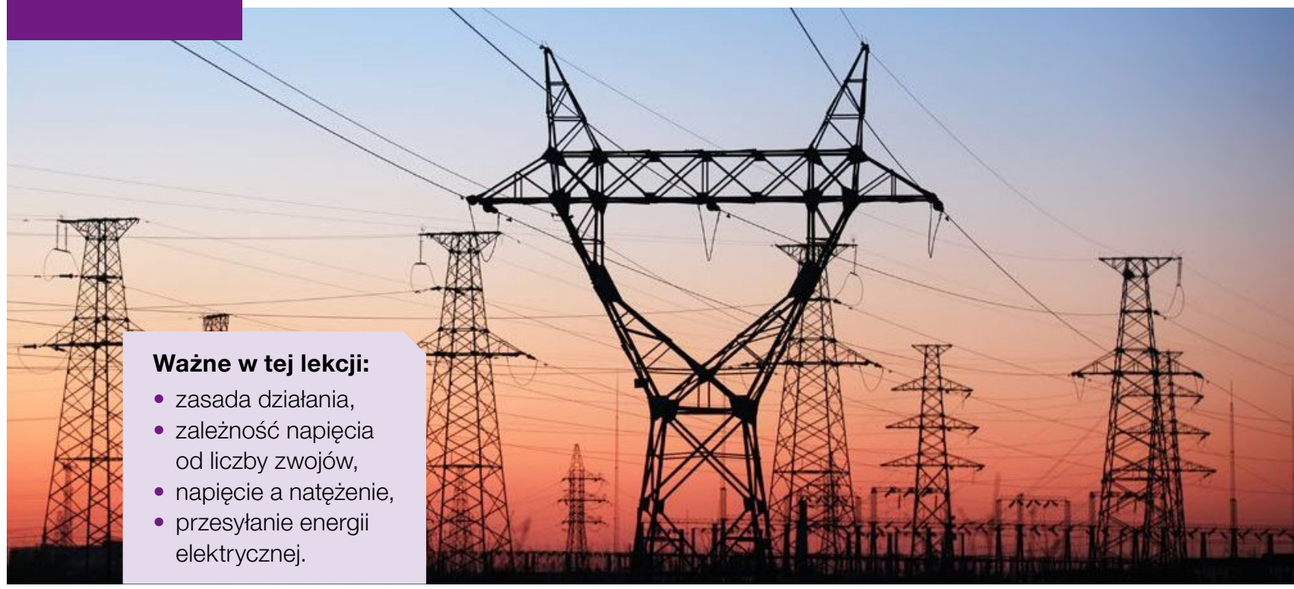
c) Nieostrożna osoba dotknęła równocześnie przewodu fazowego i zerowego.

6. Wyjaśnij, kiedy porażenie elektryczne jest groźniejsze: gdy prąd przepłynął między stopą a kolanem poszkodowanego czy między jedną a drugą dłonią. Dlaczego?

7. 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 1,20 zł za 1 kWh.

17.6 Transformator





Ważne w tej lekcji:
- zasada działania,
- zależność napięcia od liczby zwojów,
- napięcie a natężenie,
- przesyłanie energii elektrycznej.

Przypomnij sobie:
- Elektromagnes to zwojnica nawinięta na rdzeń z ferromagnetyka. Rdzeń pozwala uzyskać znacznie silniejsze pole magnetyczne.
- Indukcję elektromagnetyczną możemy wywołać przez włączanie i wyłączanie elektromagnesu.

W doświadczeniu 29. ze s. 286 sprawdziliśmy, że kiedy włączamy i wyłączamy prąd zasilający elektromagnes, to w zwojnicy znajdującej się w pobliżu indukuje się napięcie. Wykonamy teraz podobne doświadczenie, ale tym razem podłączymy elektromagnes do napięcia przemiennego.

Doświadczenie 33

1. Przygotuj cewkę podłączaną do sieci 230 V, nakładaną na stalowy rdzeń w kształcie ramki, woltomierz i 1–2 m przewodu w izolacji.

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. 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?

Zasada działania transformatora

W doświadczeniu użyliśmy dwóch zwojnic na wspólnym rdzeniu. Jedna z nich, podłączona do sieci elektrycznej, była źródłem zmiennego pola magnetycznego. Z kolei to zmienne pole powodowało indukowanie się napięcia w drugiej cewce.
Możemy to podsumować za pomocą schematu.

Prąd przemienny w pierwszej zwojnicy → Zmienne pole magnetyczne w rdzeniu → Prąd przemienny w drugiej zwojnicy

Urządzenie złożone z dwóch zwojnic na wspólnym rdzeniu nazywamy transformatorem.

Zastosowania transformatora

W pierwszej chwili może się wydawać, że urządzenie zamieniające prąd przemienny na prąd przemienny jest do niczego nieprzydatne. Jednak w doświadczeniu stwierdziliśmy, że napięcie indukowane w drugiej zwojnicy:
- nie musi być równe napięciu w pierwszej,
- zależy od liczby zwojów.

Tak więc transformator może służyć do zmiany napięcia (patrz infografika → s. 326).

Transformator a natężenie prądu

Transformator nie ma żadnego dodatkowego źródła energii, więc podnoszeniu napięcia musi towarzyszyć proporcjonalne zmniejszenie natężenia prądu. Moc na wyjściu (uzwojeniu wtórnym) jest równa mocy na wejściu (uzwojeniu pierwotnym):

$$P_w = P_p$$

$$U_w I_w = U_p I_p$$

co możemy zapisać jako proporcję:

$$\frac{U_w}{U_p} = \frac{I_p}{I_w}$$

Straty energii w transformatorze są niewielkie.

Przesyłanie energii elektrycznej

Możliwość zmiany napięcia jest jednym z głównych powodów stosowania w sieci energetycznej prądu przemiennego. Napięcie wytwarzane w elektrowni przez prądnice wynosi od kilku do kilkudziesięciu tysięcy woltów. Jednak bardziej opłaca się przesyłać energię pod dużo wyższym napięciem, wynoszącym nawet 400 kV.
Wtedy 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?

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 pozwala podwyższyć napięcie, co z kolei umożliwia przesłanie tej samej mocy przy mniejszym natężeniu prądu, a tym samym – zmniejszenie strat energii. 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.

Prądnica w elektrowni wytwarza napięcie kilku lub kilkudziesięciu kV.

Stacja transformatorowa podwyższa napięcie do 400 000 V.

Energia jest przesyłana **liniami wysokiego napięcia** 400 000 V.

Stacja transformatorowa obniża napięcie do 30 000 V lub 6000 V na potrzeby zakładów przemysłowych.

Energia jest przesyłana pod napięciem 30 000 lub 6000 V.

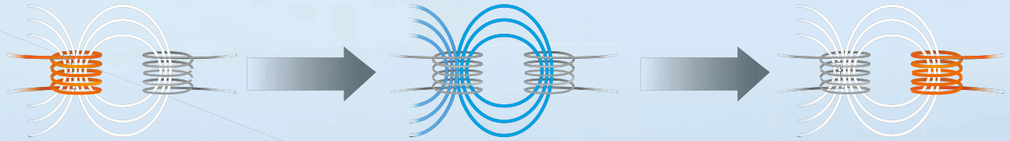
Transformatory osiedlowe obniżają napięcie do 230 V, m.in. na potrzeby domowej sieci elektrycznej.

Transformatory w zasilaczach obniżają napięcie na dopasowane do potrzeb poszczególnych urządzeń.

Transformator

Transformator zmienia energię elektryczną pierwszego obwodu na energię pola magnetycznego, a następnie – energię pola magnetycznego znowu na energię elektryczną w drugim obwodzie.

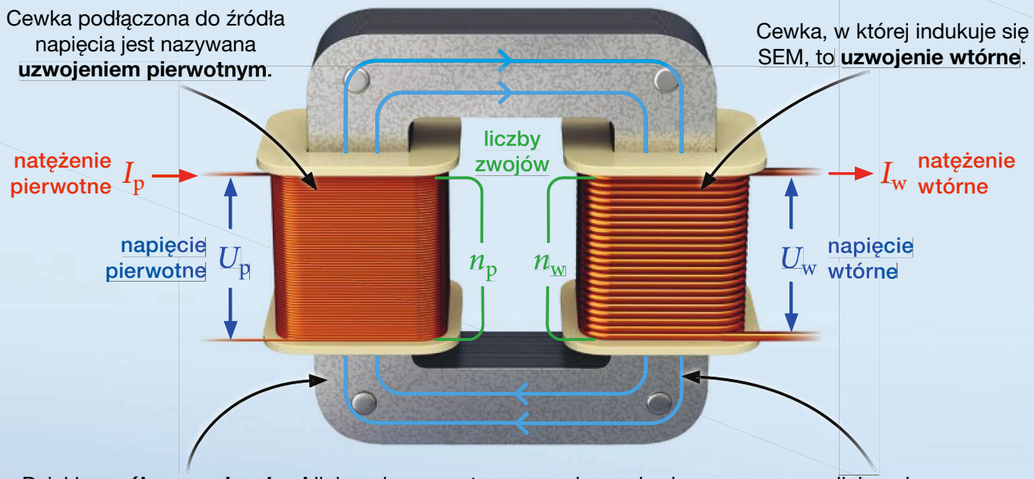
ZJAWISKA ZACHODZĄCE W TRANSFORMATORZE



1. zmiana natężenia prądu w pierwszej cewce
2. zmiana strumienia pola magnetycznego wytwarzanego przez pierwszą cewkę
3. indukowanie się SEM w drugiej cewce

BUDOWA TRANSFORMATORA

Transformator jest zbudowany z dwóch cewek nawiniętych na wspólny rdzeń.



RÓWNANIE TRANSFORMATORA

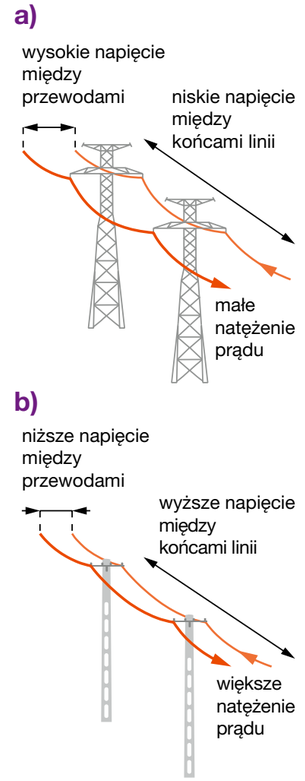
Jeśli cewki uzwojenia pierwotnego i uzwojenia wtórnego mają różną liczbę zwojów, to napięcie na uzwojeniu wtórnym jest inne niż napięcie na uzwojeniu pierwotnym. Również natężenia prądów płynących w pierwszym i drugim uzwojeniu są różne.
Zależność tę opisuje **równanie transformatora**.

więcej zwojów n_p — wyższe napięcie U_p — mniejsze natężenie I_p

$$\frac{n_p}{n_w} = \frac{U_p}{U_w} = \frac{I_w}{I_p}$$

mniej zwojów n_w — niższe napięcie U_w — większe natężenie I_w

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.
Wystarczy jednak stanąć w cichym miejscu pod linią wysokiego napięcia 400 kV, aby usłyszeć charakterystyczny świergot – odgłos niewielkich wyładowań, zwanych koronowymi. Do przesyłania prądu wybrano napięcie 400 kV, ponieważ przy takiej wartości łączne straty energii na ciepło i na wyładowania są najmniejsze.



Rys. **17.28.** 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, ponieważ 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 napięcie **między końcami przewodu**, którym płynie prąd.
W opisanej sytuacji jeden z końców przewodu znajduje się w elektrowni, natomiast drugi u odbiorcy prądu. Napięcia między dwoma końcami przewodu nie należy mylić z napięciem **między dwoma przewodami**.
Nazwa „linia wysokiego napięcia" oznacza, że wysokie jest napięcie między przewodami (rys. 17.28a), a ponieważ wtedy niższe jest natężenie prądu, to niższe jest również (zgodnie ze wzorem $U = IR$) napięcie U między końcami przewodu.
Odwrotnie w linii niskiego napięcia (rys. 17.28b). Tam niższe jest napięcie między przewodami, ale ze względu na większe natężenie prądu wyższe jest napięcie między końcami przewodu.

Pytania i zadania — ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Transformator zamienia napięcie sieciowe 230 V na napięcie o wartości skutecznej 12 V, służące do zasilania lampek oświetlenia sufitowego. Lampek jest 10, są połączone równolegle, a każda ma moc 5 W. Pomijamy straty energii.
a) Uzwojenie pierwotne ma 2000 zwojów. Ile zwojów ma uzwojenie wtórne?
b) Oblicz natężenie prądu płynącego przez każde z uzwojeń.

Dane: $U_p = 230\ \text{V}$ – skuteczne napięcie sieciowe, $U_w = 12\ \text{V}$ – skuteczne napięcie do zasilania lampek, $k = 10$ – liczba lampek, $P_1 = 5\ \text{W}$ – moc jednej lampki, $n_p = 2000$ – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego
Szukane: n_w – liczba zwojów uzwojenia wtórnego, I_p – natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym, I_w – natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym

Rozwiązanie:

a) Transformator obniża napięcie $\frac{U_p}{U_w} = \frac{230}{12} = 19{,}17$ razy. W takim razie w uzwojeniu wtórnym powinno być 19,17 razy mniej zwojów niż w uzwojeniu pierwotnym:

$$n_w = \frac{n_p}{19{,}17} \approx 104$$

Zaokrąglamy do liczby całkowitej.

b) Łączna moc lampek wynosi 50 W, a więc są one zasilane prądem o łącznym natężeniu:

$$I_w = \frac{50\ \text{W}}{12\ \text{V}} = 4{,}2\ \text{A}$$

Prąd o takim samym natężeniu płynie przez uzwojenie wtórne transformatora.
Natężenie prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne można obliczyć na dwa sposoby.

Sposób I

Pomijamy straty energii, więc transformator pobiera z sieci domowej moc 50 W. W takim razie:

$$I_p = \frac{50\ \text{W}}{230\ \text{V}} = 0{,}22\ \text{A}$$

Sposób II

Napięcie w uzwojeniu pierwotnym jest 19,17 razy wyższe niż we wtórnym, więc natężenie prądu jest tam 19,17 razy mniejsze:

$$I_p = \frac{4{,}2\ \text{A}}{19{,}17} = 0{,}22\ \text{A}$$

Odpowiedź: Uzwojenie wtórne ma 104 zwoje. Przez uzwojenie pierwotne płynie prąd o natężeniu 0,22 A, przez wtórne – aż 4,2 A.
Uwaga. Prąd o większym natężeniu w uzwojeniu wtórnym oznacza, że transformator musimy łączyć z lampkami przewodami grubszymi niż z siecią.

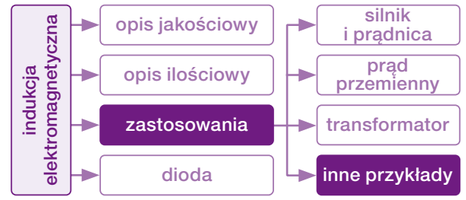
1. P Transformator pozwala podłączać amerykańskie urządzenia przystosowane do napięcia 115 V do europejskiej sieci 230 V. Jego uzwojenie pierwotne ma 1000 zwojów.
- **a)** Ile zwojów ma uzwojenie wtórne?
- **b)** Toster pobiera z takiego transformatora prąd o natężeniu 14 A. Jakie jest natężenie prądu, który transformator pobiera z polskiej sieci?
- **c)** Które uzwojenie powinno być wykonane z grubszych przewodów?

2. Napięcie w sieci wysokiego napięcia zmieniono za pomocą transformatora z 400 kV na 40 kV. Czy straty energii wynikające z oporu przewodów powiększą się 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. Zdjęcie przedstawia autotransformator zmienny, pozwalający regulować uzyskiwane napięcie wyjściowe. Dowiedz się, w jaki sposób jest zbudowany taki transformator.

17.7 Zastosowania indukcji elektromagnetycznej



Ważne w tej lekcji:
- prąd płynący przez cewkę i transformator,
- zastosowania reguły Lenza,
- indukcja elektromagnetyczna w technice.

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.

Dlaczego nie sprawdza się wzór $I = \frac{U}{R}$

W poprzedniej lekcji opisaliśmy działanie transformatora. Powiedzieliśmy, że prąd przemienny w uzwojeniu pierwotnym powoduje powstawanie w rdzeniu zmiennego pola magnetycznego, które z kolei powoduje indukowanie się napięcia w uzwojeniu wtórnym.

W tej sytuacji można podejrzewać:

- że to samo zmienne pole magnetyczne powoduje indukowanie się napięcia również w uzwojeniu pierwotnym,
- że jeśli w uzwojeniu wtórnym płynie przemienny prąd indukcyjny, to on również wytwarza zmienne pole magnetyczne w rdzeniu, które z kolei powoduje indukowanie się napięcia w każdym z uzwojeń.

Tak rzeczywiście jest, jednak aby się o tym przekonać, wykonamy proste doświadczenie.

Doświadczenie 34

1. Przygotuj telefon komórkowy wraz z ładowarką i watomierz (patrz zdjęcie).
2. Zmierz opór między bolcami wtyczki ładowarki, gdy jest ona wyłączona z gniazdka.
3. Czy wynik tego pomiaru zmienia się wtedy, gdy do ładowarki podłączamy telefon?
4. Włącz ładowarkę do gniazdka za pośrednictwem watomierza.
5. Ustaw przyrząd na pomiar natężenia prądu i odczytaj wynik.
6. Sprawdź, jak zmieni się wynik, gdy do ładowarki podłączymy telefon.

Wtyczka ładowarki jest podłączona do uzwojenia pierwotnego transformatora obniżającego napięcie. Takie uzwojenie to po prostu zwojnica, czyli zwinięty przewód.
Na podstawie wiedzy o prądzie **stałym** moglibyśmy przypuszczać, że jeśli taki przewód podłączymy do napięcia U, to przez ten przewód popłynie prąd o natężeniu $\frac{U}{R}$, gdzie R jest oporem przewodu.
Moglibyśmy też przewidywać, że podłączenie czegokolwiek do **innego** zwiniętego przewodu, jakim jest uzwojenie wtórne, nic tu nie zmieni.

Jednak w wykonanym właśnie doświadczeniu te przypuszczenia okazały się niesłuszne. Przyczyną jest fakt, że badamy teraz prąd przemienny i musimy wziąć pod uwagę zjawisko indukcji elektromagnetycznej.
Wyjaśnijmy po kolei oba przypadki badane w doświadczeniu.

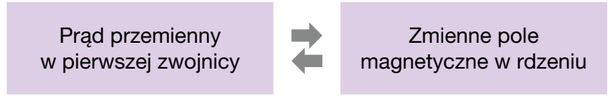
Bez telefonu

Jak zaobserwowaliśmy w doświadczeniu, zanim podłączyliśmy telefon, ładowarka pobierała z sieci prąd o minimalnym natężeniu (wynikiem twojego pomiaru mogło być nawet zero).
Dzieje się tak dlatego, że również w uzwojeniu pierwotnym indukuje się siła elektromotoryczna, która w znacznej mierze równoważy napięcie sieciowe. Przepływ prądu nie jest wywołany przez napięcie 230 V, ale przez różnicę między 230 V a SEM, a ta różnica jest niewielka.

Dlaczego równoważy, a nie wzmacnia? To wynika z reguły Lenza.

Zauważ, że prąd wytwarzający pole magnetyczne i prąd indukcyjny płyną w tym samym uzwojeniu. W uzwojeniu wtórnym wprawdzie indukuje się napięcie, ale nie płynie tam prąd, ponieważ obwód nie jest zamknięty. Dlatego uzwojenie wtórne wcale nie jest potrzebne, o czym więcej powiemy dalej.

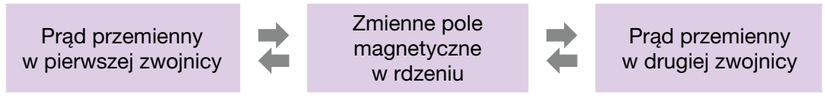
Część diagramu ze s. 324 przyjmuje więc postać:



Z telefonem

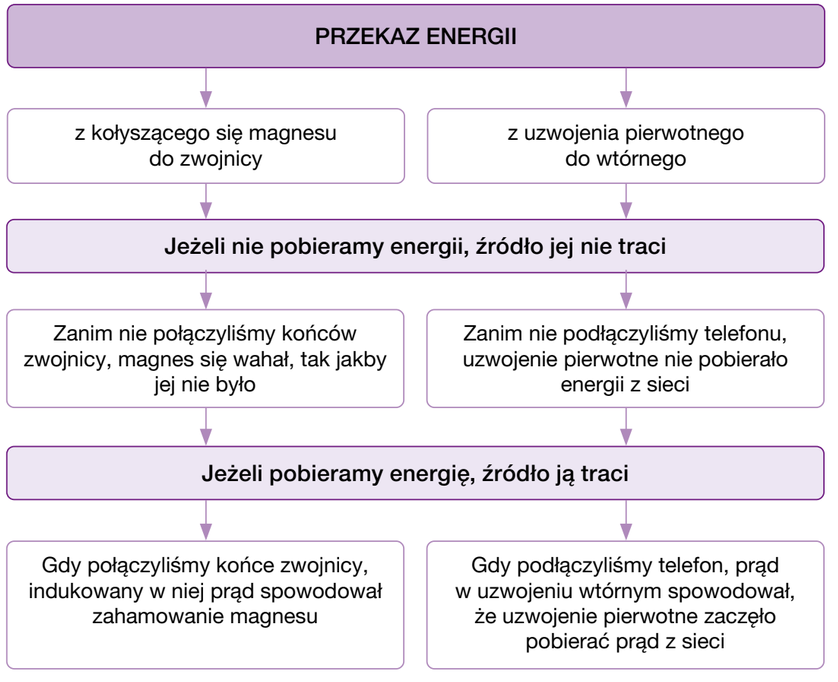
Gdy czerpiemy prąd z ładowarki, prąd w uzwojeniu wtórnym wytwarza własne pole magnetyczne, które powoduje osłabienie pola magnetycznego w rdzeniu. W tej sytuacji SEM indukująca się w uzwojeniu pierwotnym jest mniejsza i nie równoważy już napięcia sieciowego.
Zatem w transformatorze nie tylko prąd w uzwojeniu pierwotnym powoduje wywołanie przepływu prądu w uzwojeniu wtórnym, lecz także na odwrót. Diagram ze s. 324 możemy teraz uzupełnić:

Dlaczego osłabienie, a nie wzmocnienie? Tu także powołujemy się na regułę Lenza.



Analogia do hamowania magnesu

Przypomnij sobie doświadczenie 30. ze s. 289. Choć na pierwszy rzut oka wyglądało zupełnie inaczej niż omawiane teraz doświadczenie z ładowarką, możemy zauważyć między nimi podobieństwa.



Rys. **17.29.** Zdjęcie z doświadczenia 30., zwojnica i magnes

Indukcja i wytwarzanie wysokiego napięcia

Powiedzieliśmy, że gdy do wtórnego uzwojenia transformatora nic nie jest podłączone, to równie dobrze tego uzwojenia mogłoby nie być. Wykonajmy więc doświadczenie z pojedynczą zwojnicą.

Doświadczenie 35

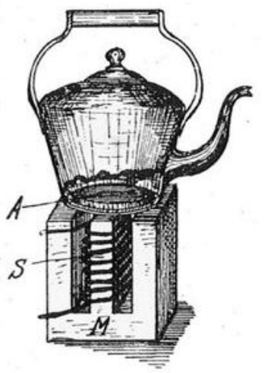
Uwaga. Mimo zasilania ogniwem 1,5 V w obwodzie może się indukować wysokie napięcie. Wykonuj doświadczenie ostrożnie, pod kontrolą nauczyciela i nie dotykaj nieizolowanych przewodów!

1. Przygotuj zwojnicę, woltomierz, ogniwo D 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 (ale nie odłączaj miernika od cewki). Co wskazuje woltomierz w chwili odłączania ogniwa?

W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować, że w chwili odłączania przewodu od baterii woltomierz wskazał skok napięcia. Stało się tak, ponieważ zmiana natężenia prądu płynącego przez cewkę powoduje zmianę pola magnetycznego, a ta z kolei – indukowanie się SEM.

Prawo Faradaya → s. 289

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.



Rys. **17.30.** Pierwszy patent na czajnik indukcyjny z 1909 r. zakładał użycie cewki podłączonej do sieci elektrycznej. Dzisiaj w kuchenkach używamy wyższych częstotliwości, co jest bardziej efektywne

W naszym doświadczeniu pole magnetyczne wytwarzane przez cewkę nie było zbyt silne, ale w chwili wyłączania napięcia zmieniało się bardzo szybko i dlatego powstała duża siła elektromotoryczna. To wyjaśnia, dlaczego tego sposobu używamy do wytwarzania wysokiego napięcia (patrz „A to ciekawe" poniżej).

Praktyczne zastosowania indukcji

Znasz już niektóre zastosowania indukcji elektromagnetycznej. Wspomnimy teraz o kilku innych. Wszystkie one wykorzystują fakt, że zmienny prąd elektryczny wytwarza zmienne pole magnetyczne, które z kolei powoduje indukowanie się prądu. Schemat zjawiska jest więc podobny jak w przypadku transformatora, ale praktyczne zastosowania są bardzo różne.

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.

- W dnie garnka postawionego na kuchence indukcyjnej indukuje się prąd, który powoduje rozgrzewanie dna naczynia.
- Bezprzewodowa ładowarka do telefonu (zdjęcie → s. 329) zawiera cewkę wytwarzającą zmienne pole magnetyczne. W telefonie znajduje się druga cewka, w której indukuje się prąd.
- W podobny sposób można ładować samochody elektryczne, nawet w czasie jazdy (patrz zdjęcie na stronie działowej → s. 285).
- Przezczaszkowa stymulacja magnetyczna pozwala neurologom uniknąć rozcinania czaszki i wkładania do niej elektrod (rys. 17.31).

Rys. **17.31.** Zamiast wkładać elektrody do mózgu, można w nim wywoływać prąd przez indukcję

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Co by się stało, gdyby ładowarkę do telefonu podłączyć do gniazdka, w którym jest napięcie stałe 230 V?
2. Kiedy wiercimy w betonie, silnik wiertarki obraca się znacznie wolniej niż wtedy, gdy włączamy wiertarkę bez obciążenia.

Wyjaśnij, dlaczego w takim przypadku silnik pobiera prąd o większym natężeniu. Co by się działo, gdyby silnik całkowicie zatrzymać?

3. W niektórych kinach, teatrach i innych miejscach publicznych instaluje się pętle indukcyjne dla osób o słabym słuchu.

   Dowiedz się więcej na ten temat i sporządź krótką notatkę.

   Pamiętaj, aby korzystać z wiarygodnych źródeł. Zapisz, jakie to źródła.

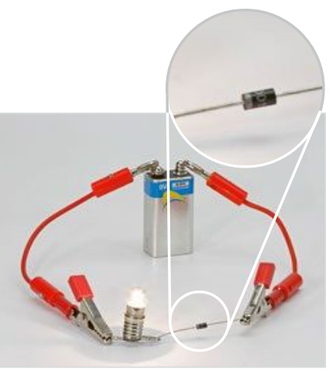
17.8 Dioda i prostowanie prądu

Ważne w tej lekcji:
- prostowanie prądu,
- obwody z diodami,
- sprawność różnych źródeł światła.

Przypomnij sobie:
- Ogniwa i baterie wytwarzają napięcie stałe.
- W sieci domowej wykorzystujemy napięcie przemienne.

Prostownik

W sieci energetycznej i w sieci domowej wykorzystujemy prąd przemienny. Jednak urządzenia elektroniczne, takie jak telewizor czy komputer, wymagają zasilania prądem stałym.
Dlatego tak ważnym urządzeniem jest **prostownik**, który zamienia napięcie przemienne na stałe.



Dioda

Jednym z najważniejszych elementów prostownika jest dioda lub – częściej – kilka diod. Zbadajmy właściwości tego elementu.

Doświadczenie 36 – obowiązkowe

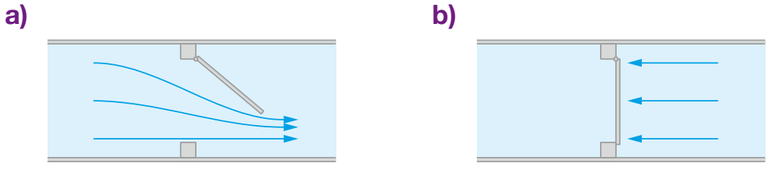
Dioda jako element składowy prostownika

1. Przygotuj diodę, baterię 9 V, żarówkę 6,3 V i przewody.
2. Podłącz diodę i żarówkę szeregowo do baterii. Czy żarówka świeci?
3. Zamień miejscami końcówki diody. Czy coś się zmieniło?

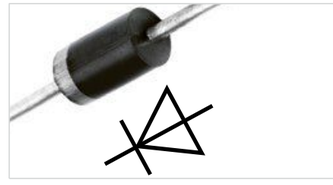
W doświadczeniu zaobserwowaliśmy, że żarówka świeci wtedy, gdy dioda jest podłączona do odpowiednich biegunów baterii. Oznacza to, że dioda przewodzi prąd tylko w jedną stronę.

> 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. 17.33).



Rys. **17.33.** Zawór, który przepuszcza wodę w jedną stronę (a), natomiast zamyka jej przepływ w przeciwnym kierunku (b). Jego odpowiednikiem dla prądu elektrycznego jest dioda



Rys. **17.32.** Przykładowa dioda oraz symbol diody – grot strzałki i jasny pasek na obudowie wskazują kierunek przepływu prądu

Dioda świecąca

Niektóre diody nie tylko spełniają funkcję zaworu, ale do tego świecą – nazywamy je **diodami świecącymi** albo **LED** (ang. *light emitting diode*). Zbadajmy doświadczalnie właściwości takiej diody.

Doświadczenie 37 – 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.

Oświetlenie diodowe jest coraz popularniejsze. Dawniej diody stosowano głównie jako lampki do wskazań działania urządzeń. Jednak koszt ich produkcji spadł, a sprawność jest dużo wyższa niż innych źródeł światła. Sprawność LED osiąga 40%, podczas gdy dla świetlówki to 25%, a dla tradycyjnej żarówki z rozgrzanym włóknem – zaledwie 4%. Tak więc LED zużywa 10 razy mniej energii elektrycznej niż tradycyjna żarówka i prawie dwa razy mniej niż świetlówka, jeśli wszystkie te lampy świecą równie jasno.
W przypadku latarek diody są najczęściej stosowanym źródłem światła, ponieważ przy niskim napięciu nie jest możliwe stosowanie świetlówek, a zwykła żarówka powoduje szybkie wyczerpanie baterii.
Głównym zastosowaniem tradycyjnych żarówek pozostały dziś reflektory samochodów.

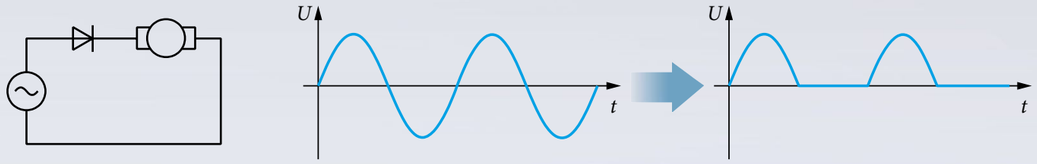
Rys. **17.34.** Przez diodę LED prąd płynie tylko wtedy, gdy dłuższa końcówka jest podłączona do bieguna dodatniego

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

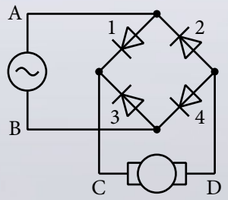
Pojedyncza dioda umożliwia przepływ prądu tylko w jednym kierunku. Wpięcie jej w obwód umożliwia uzyskanie napięcia niezmieniającego znaku, ale zmieniającego się w czasie. Co więcej, przez połowę czasu napięcie wynosi zero, ponieważ dioda uniemożliwia przepływ prądu w przeciwnym kierunku. Na wykresie odpowiada to odcięciu jego dolnych połówek.



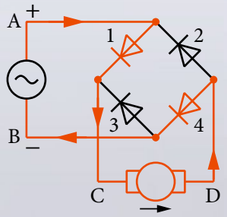
2 Mostek prostowniczy

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), a 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.

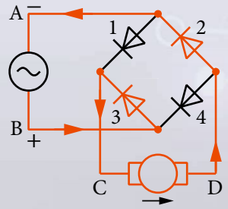
a)

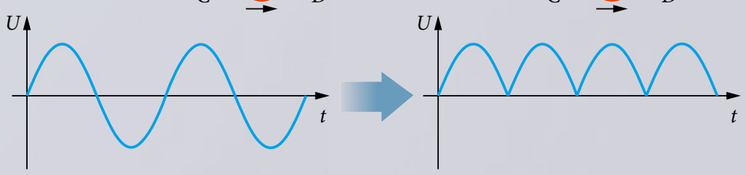


b)



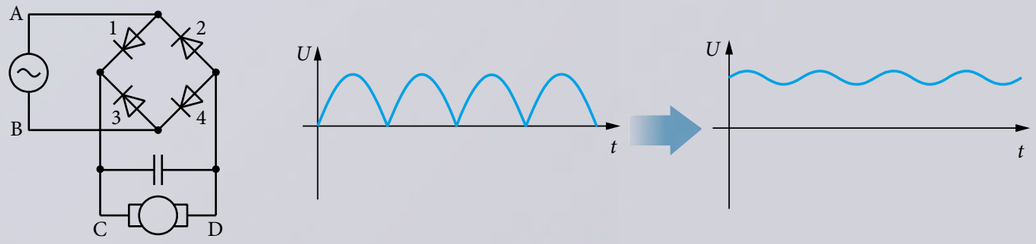
c)





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 wtedy, gdy jego wartość jest mała.



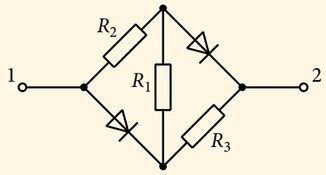
Prostowanie prądu

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.

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, gdy prąd płynie przez nie w kierunku przewodzenia.



Dane: $U = 120$ V – napięcie podłączone do zacisków 1 i 2,
$R_1 = R_2 = R_3 = 30\ \Omega$ – oporów oporników
Szukane: $P_{śr}$ – średnia moc w obwodzie

Rozwiązanie:

Aby obliczyć moc, należy znać napięcie skuteczne i opór zastępczy obwodu:

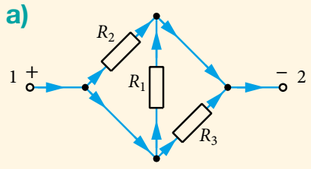
$$P = \frac{U_{sk}^2}{R}$$

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.

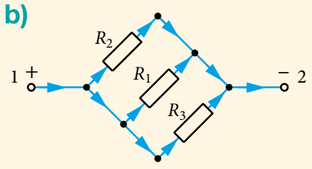
Gdy napięcie na wejściu 1–2 jest dodatnie (w punkcie 1 jest plus), prąd płynie przez obydwie diody i wszystkie oporniki. Ponieważ pomijamy spadek napięcia na diodach, możemy je na schemacie zastąpić przewodami.
Prąd płynący przez obwód w takiej sytuacji zaznaczono na niebiesko na rys. a). Obwód możemy przerysować w czytelniejszy sposób bez zmiany połączeń (rys. b) – okazuje się, że oporniki są połączone równolegle. Obliczamy opór zastępczy:

$$\frac{1}{R_{rów}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{3}{R}, \text{ stąd } R_{rów} = \frac{R}{3} = 10\ \Omega$$

a)



b)

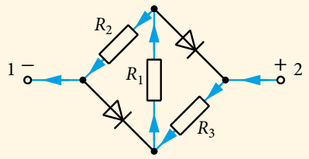


Zatem moc dla jednego półokresu wynosi:

$$P_1 = \frac{U^2}{R_{\text{rów}}} = 1440\ \text{W}$$

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).

c)



$$P_2 = \frac{U^2}{R_{\text{sz}}} = \frac{U^2}{3R} = 160\ \text{W}$$

Moc średnią w obwodzie obliczamy jako średnią arytmetyczną poszczególnych mocy, ponieważ czas przepływu prądu był taki sam w obu przypadkach.

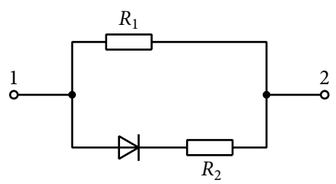
$$P_{\text{śr}} = \frac{P_1 + P_2}{2} = 800\ \text{W}$$

Odpowiedź: Średnia moc w obwodzie wynosi 800 W.

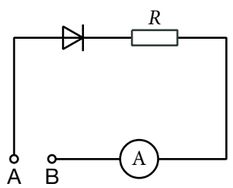
1. W ładowarce do telefonu najpierw transformator obniża napięcie, a potem diody prostują prąd. Czy można by postąpić odwrotnie – najpierw prostować prąd pod napięciem 230 V, a dopiero potem zmieniać napięcie?

2. P 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, gdy prąd płynie przez nią w kierunku przewodzenia.

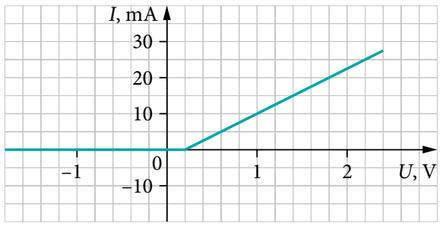


3*. Opornik, diodę i amperomierz o bardzo małym oporze wewnętrznym połączono tak, jak pokazano na schemacie poniżej.

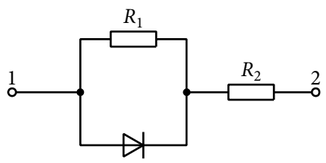


Do zacisków A i B podłączamy napięcie U. Zależność natężenia I wskazywanego przez amperomierz od napięcia U przedstawia wykres. Na podstawie wykresu określ spadek napięcia na diodzie oraz opór opornika R.

Uwaga. Dowiedz się, co to jest *napięcie progowe diody*.



4. Obwód przedstawiony na schemacie jest zasilany napięciem przemiennym $U(t)$ o wartości skutecznej 12 V i częstotliwości 50 Hz. Oba oporniki mają ten sam opór $R_1 = R_2 = 100\ \Omega$. Pomijamy spadek napięcia na diodzie, gdy prąd płynie przez nią w kierunku przewodzenia.

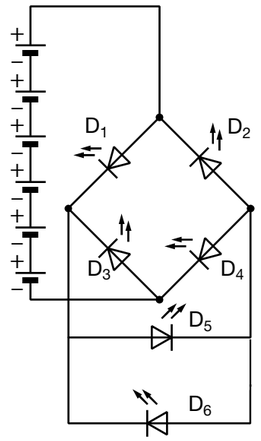


Narysuj wykres przedstawiający zależność natężenia prądu $I(t)$ płynącego przez opornik R_2. Przyjmij, że napięcie jest dodatnie, kiedy plus jest na zacisku 1, czyli kiedy potencjał zacisku 1 jest wyższy niż potencjał zacisku 2. Wykres powinien przedstawiać dwa pełne okresy zmian napięcia. Za chwilę $t = 0$ przyjmij moment, w którym napięcie zasilające jest równe zeru i zmienia się z ujemnego na dodatnie.

5. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj sześć diod świecących (najlepiej, aby dwie miały kolor inny 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.

6. 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 wtedy, gdy jest ona umieszczona w normalnie oświetlonym pokoju, a jakie wtedy, 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 wtedy, gdy oświetlamy ją światłem o poszczególnych barwach. Co zauważasz?

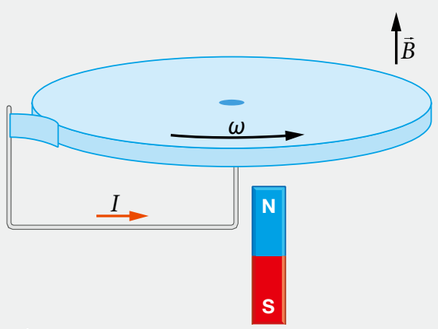
Analiza tekstu

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.

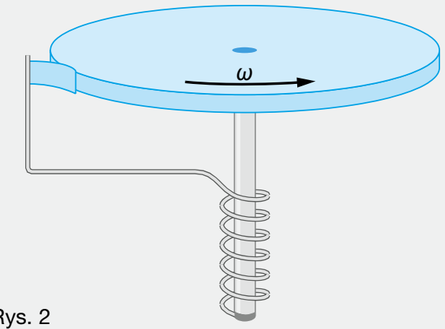
Jedno z pierwszych urządzeń tego typu zbudowanych przez Faradaya przedstawia rysunek 1: wirujący metalowy dysk umieszczony jest w polu magnetycznym stałego magnesu. Do brzegu dysku dotyka kontakt (np. metalowa szczotka), drugi przyłączony jest do środka dysku. Ruch wirowy dysku powoduje powstanie różnicy 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.

Mikołaj Korzyński
(skrócona wersja artykułu z czasopisma „Delta" 2005, nr 11)*

* Cały tekst można znaleźć na portalu czasopisma – adres strony podaliśmy na s. 367.

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Co to jest geodynamo?
2. W artykule pojawia się pojęcie równowagi niestabilnej. Przypomnij, jak tego samego pojęcia używaliśmy w mechanice bryły sztywnej (podręcznik, cz. 2 → s. 157). Co wspólnego mają obie te sytuacje?
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 dziale tej książki.

Podsumowanie
Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

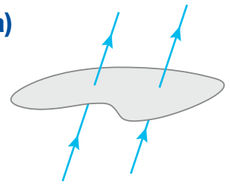
■ W tym dziale przydatne jest pojęcie liczby **linii pola przechodzących przez powierzchnię**.

▶ Przyjmujemy, że jeden ze zwrotów linii pola magnetycznego jest dodatni. Gdy linie są zwrócone przeciwnie, ich liczbę traktujemy jako ujemną.

▶ Przykłady

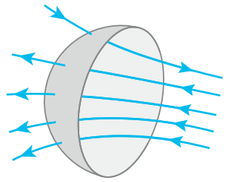
Przez powierzchnię przechodzą:

a)



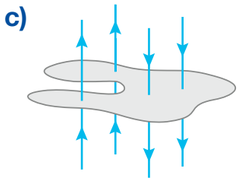
dwie linie pola (obie w tę samą stronę),

b)



trzy linie pola (cztery w jedną stronę minus jedna w drugą stronę),

c)

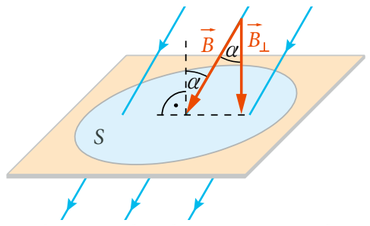


zero linii pola (tyle samo w jedną stronę, ile w drugą).

■ Ścisłym pojęciem odpowiadającym liczbie linii pola jest **strumień indukcji pola magnetycznego przez powierzchnię**.

$$\Phi = BS\cos\alpha = B_\perp S$$

gdzie: B – wartość indukcji magnetycznej, S – powierzchnia, α – kąt między $\vec{B}$ i prostą prostopadłą do powierzchni.



▶ Jeśli wektor B albo kąt α są różne dla różnych części powierzchni, to dzielimy ją na małe części, dla których można przyjąć, że wielkości te są stałe – wtedy sumujemy otrzymane wielkości Φ (z uwzględnieniem ich znaków + lub –).

▶ Jednostką strumienia indukcji magnetycznej jest weber: $[\Phi] = 1\ \mathrm{Wb} = 1\ \mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^2$.

■ Powstawanie napięcia (siły elektromotorycznej) podczas zmian pola magnetycznego nazywamy **indukcją elektromagnetyczną**.

▶ Prąd powstający dzięki temu zjawisku nazywamy **prądem indukcyjnym**.

■ O zjawisku indukcji elektromagnetycznej mówi **prawo Faradaya**.

▶ Ujęcie jakościowe

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej zachodzi wtedy, gdy zmienia się liczba linii pola magnetycznego przechodzących przez obszar ograniczony pętlą z przewodnika. Indukowana siła elektromotoryczna jest tym większa, im szybciej następują te zmiany.

▶ Ujęcie ilościowe

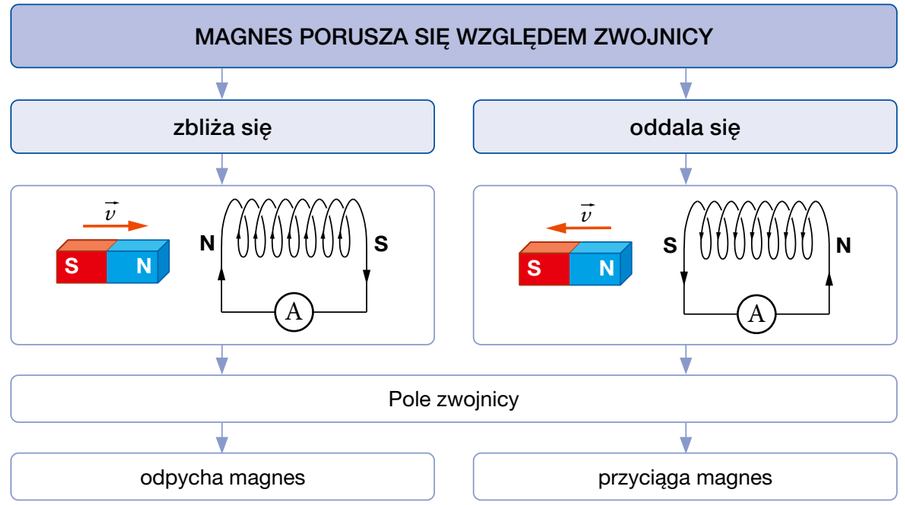
Siła elektromotoryczna indukująca się w pętli jest równa szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej $\Delta\Phi$ przechodzącego przez powierzchnię ograniczoną tą pętlą:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

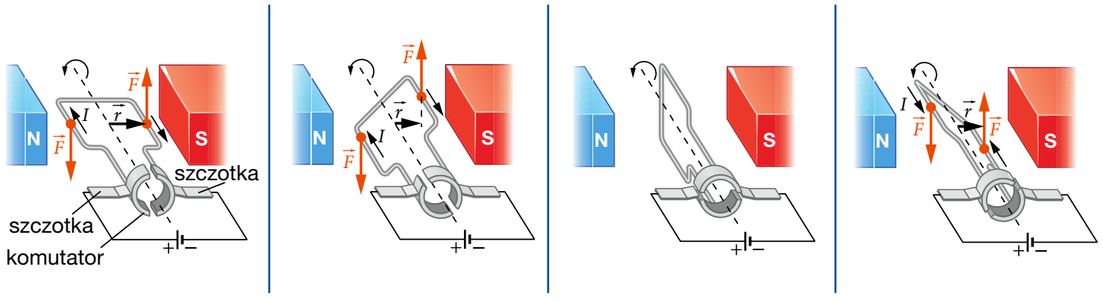
Wartość bezwzględna SEM jest tym większa, im szybciej zmienia się strumień indukcji. Minus we wzorze oznacza tylko kierunek prądu indukcyjnego zgodny z regułą Lenza (patrz niżej), nie ma związku z wartością bezwzględną SEM.

■ **Reguła Lenza**

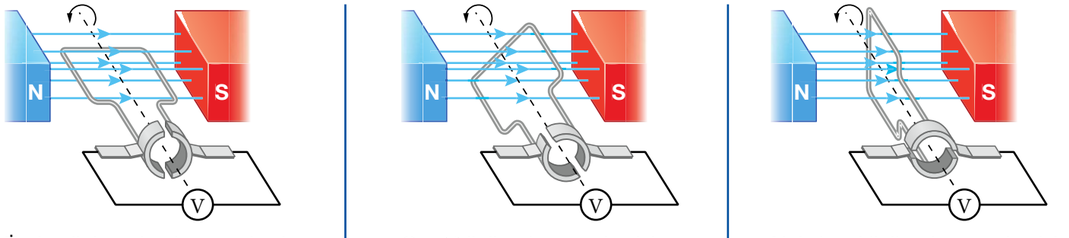
Kierunek przepływu prądu indukcyjnego jest taki, że wytwarzane przez niego pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie, która ten prąd wywołuje.



■ Najprostszym modelem silnika jest pojedyncza ramka zamocowana w polu magnetycznym tak, aby mogła się obracać, i podłączona do źródła napięcia.



▶ Taki silnik może działać również jako prądnica. Trzeba go tylko podłączyć do odbiornika energii zamiast do źródła napięcia i obracać ramką.



Żadne linie pola nie przechodzą przez ramkę.

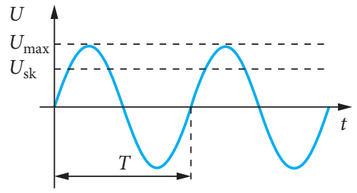
Część linii pola przechodzi przez ramkę.

Najwięcej linii pola przechodzi przez ramkę.

■ **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 zmieniają 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.

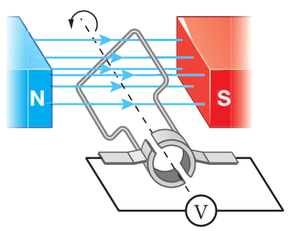
Spośród dwóch przewodów w gniazdku jeden jest stale pod napięciem równym 0 względem ziemi, a drugi pod napięciem zmieniającym się okresowo.

▶ Wśród zabezpieczeń sieci domowej mamy bezpieczniki, wyłączniki różnicowoprądowe oraz uziemienie.

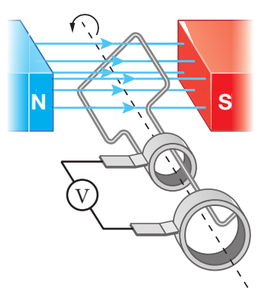
▶ Porażenie prądem z sieci domowej może być bardzo groźne, dlatego warto znać zasady udzielania pierwszej pomocy w takim przypadku (patrz → s. 320–321).

■ Najprostszą **prądnicą** prądu przemiennego jest ramka obracająca się w jednorodnym polu magnetycznym. Od prądnicy prądu stałego różni się ona tym, że końcówki ramki są podłączone stale do tych samych przewodów.

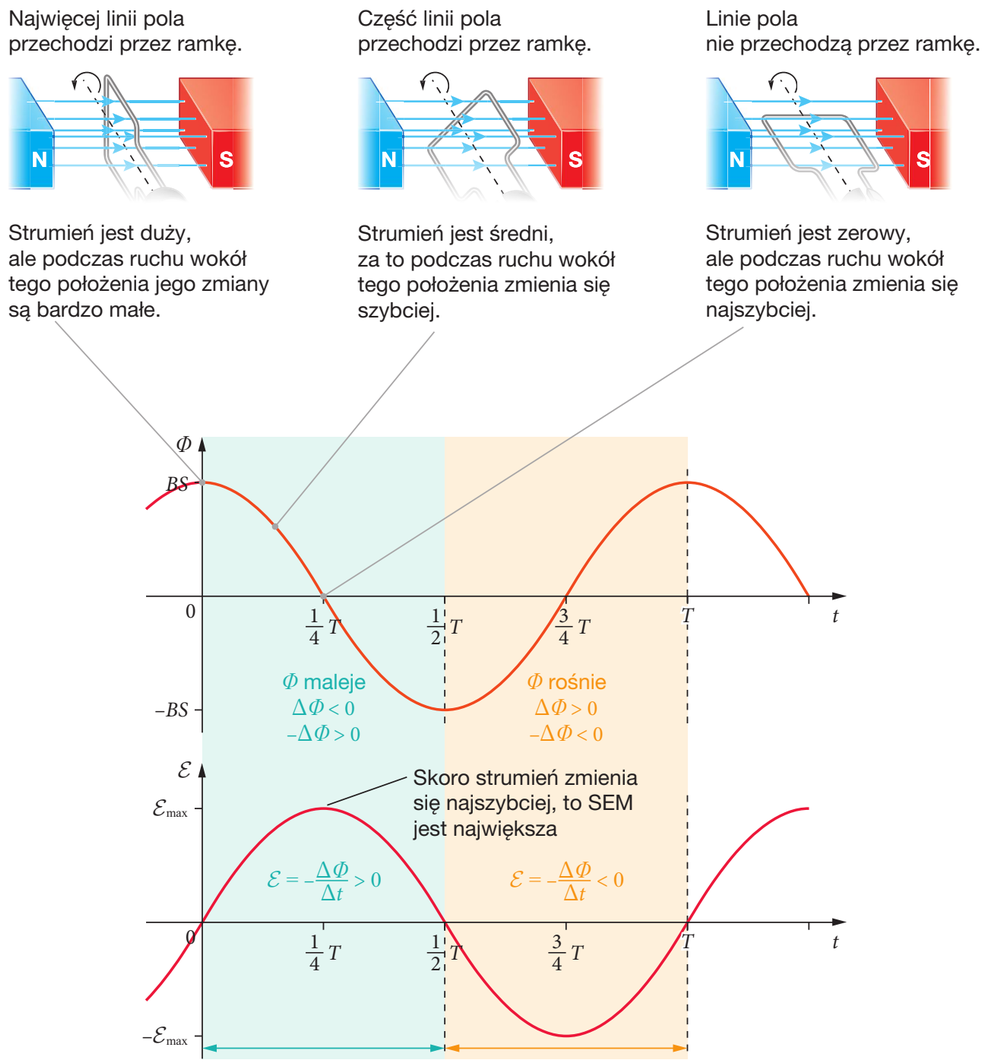
Prąd stały



Prąd przemienny



■ Zmiany strumienia indukcji i SEM prądnicy



■ SEM prądnicy prądu przemiennego wynosi:

$$\mathcal{E} = NBS\omega \sin \omega t$$

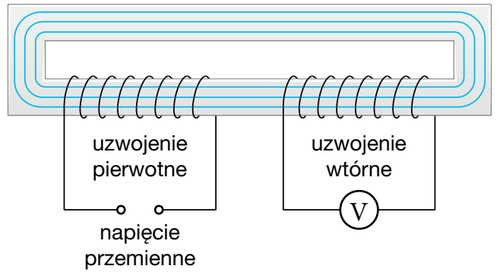
gdzie: N – liczba zwojów (ramek), B – indukcja pola, S –powierzchnia ramki, ω – prędkość kątowa obrotu prądnicy.

▶ Maksymalna wartość SEM (amplituda zmian SEM) wynosi:

$$\mathcal{E}_{max} = NBS\omega$$

natomiast wartość skuteczna jest $\sqrt{2}$ raza mniejsza.

- 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):

$$\frac{U_w}{U_p} = \frac{n_w}{n_p} = \frac{I_p}{I_w}$$

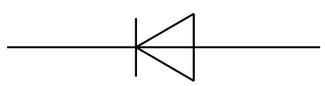
gdzie:

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_w – natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym, I_p – natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym.

- W transformatorze prąd zmienny w każdym z uzwojeń powoduje powstawanie zmiennego pola magnetycznego w rdzeniu, a ono powoduje indukowanie się napięcia w obu uzwojeniach.

prąd przemienny w uzwojeniu pierwotnym ⇄ zmienne pole magnetyczne w rdzeniu ⇄ prąd przemienny w uzwojeniu wtórnym

- Zmienne pole magnetyczne wytwarzane przez cewkę powoduje indukowanie się napięcia w niej samej.
- **Dioda** (symbol diody na rysunku poniżej) jest elementem elektronicznym, który przewodzi prąd elektryczny tylko w jedną stronę.



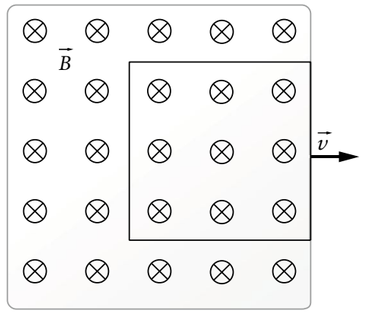
Różne typy diod mają zastosowanie w prostownikach oraz jako źródło światła.

Sposób na zadanie

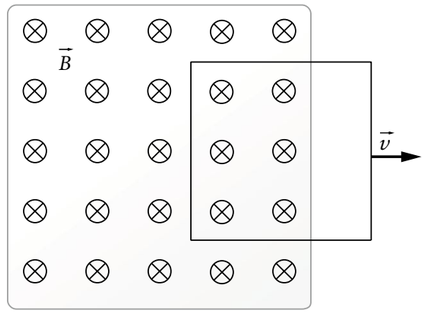
Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Kwadratowa miedziana ramka z drutu o boku 50 cm, początkowo w całości znajdująca się w jednorodnym polu magnetycznym prostopadłym do jej powierzchni (rys. a), została wyciągnięta z obszaru pola ruchem jednostajnym (rys. b).

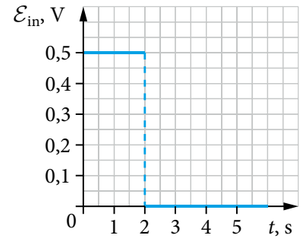
a)



b)



Wykres zależności SEM indukowanej w ramce od czasu przedstawiono na wykresie.



Zadanie 1.1 (0–1)

Wybierz właściwe uzupełnienia zdania A lub B oraz C lub D.

Pole wytwarzane przez prąd indukcyjny w ramce **A**/ **B** pola zewnętrznego, a kierunek prądu indukcyjnego był z punktu widzenia osoby patrzącej na rysunek **C**/ **D**.

Z drugiej strony wyglądałby odwrotnie.

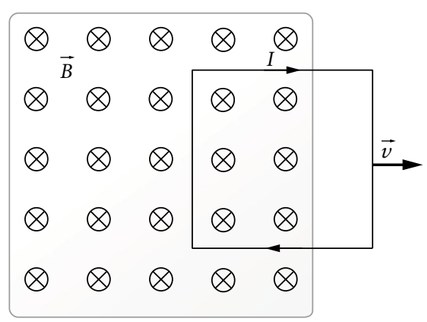
A. dodawało się do
B. odejmowało się od
C. zgodny z ruchem wskazówek zegara
D. przeciwny do ruchu wskazówek zegara

Rozwiązanie:

Ramka była wysuwana z pola magnetycznego, a więc strumień pola przechodzący przez tę ramkę się zmniejszał.

Zawsze zastanów się, jaka jest ta przyczyna.

Zgodnie z regułą Lenza pole wytwarzane przez prąd indukcyjny przeciwdziała przyczynie indukcji, czyli przeciwdziała zmniejszaniu się strumienia. Aby mu przeciwdziałać, musi zwiększać strumień, a to oznacza, że to pole dodawało się do pola zewnętrznego.



To oznacza symbol strzały widzianej od tyłu: ⊗.

Indukcja pola zewnętrznego była zwrócona w głąb kartki i tak samo była zwrócona indukcja pola wytworzonego przez prąd indukcyjny. Płynął on więc zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara.

Mówi o tym reguła śruby prawoskrętnej.

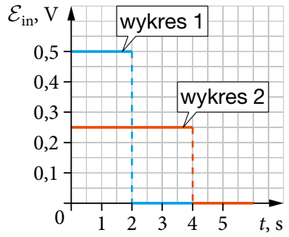
Odpowiedź: A-C

Zadanie 1.2 (0–2)

Narysuj wykres SEM indukowanej w ramce w sytuacji, gdy ramka porusza się z dwa razy mniejszą prędkością.

Rozwiązanie:

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 wtedy dwa razy mniejsza. Na podstawie tych informacji wykonaliśmy czerwony wykres (dla porównania przedstawiamy go w tym samym układzie współrzędnych co wyjściowy wykres niebieski).



Zadanie 1.3 (0–3)

Oblicz indukcję pola magnetycznego, w którym znajdowała się ramka.

Rozwiązanie:

Ponieważ w zadaniu mowa o indukcji elektromagnetycznej, przydatne może się okazać prawo Faradaya:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{BS}{\Delta t}$$

gdzie czas wysuwania $\Delta t = 2$ s odczytujemy z wykresu.

Czasami danych trzeba poszukać!

Wyznaczamy stąd indukcję B:

$$B = \frac{\mathcal{E}\Delta t}{S}$$

Podstawiamy dane i wyznaczamy jednostkę:

$$B = \frac{0{,}5\ \text{V} \cdot 2\ \text{s}}{0{,}25\ \text{m}^2}$$

$$[B] = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{\frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{C} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{C} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{C} \cdot \text{m}} = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \text{T}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $B = 4$ T.

Odpowiedź: Indukcja pola magnetycznego, w którym znajdowała się ramka, wynosiła 4 T.

Warto zapamiętać!

- SEM indukuje się tylko przy zmianie strumienia magnetycznego.
- SEM indukcji ma większą wartość wtedy, gdy ta zmiana następuje szybciej.
- Aby określić kierunek prądu indukcyjnego, możemy posłużyć się regułą Lenza.

Zadanie analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie. Jak zmieniłoby się rozwiązanie zadań 1.1, 1.2, 1.3 w „Sposobie na zadanie” (s. 347–348), gdyby ramka z tą samą prędkością wsuwała się w obszar pola zamiast z niego wysuwać?

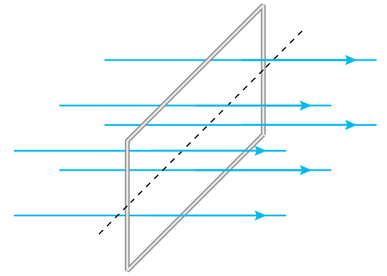
Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Kąt obrotu

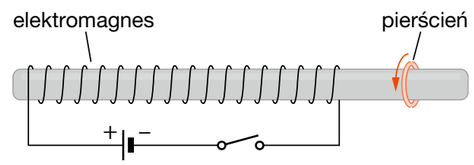
Prostokątna ramka z drutu jest umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym prostopadle do linii pola.

Oblicz, o jaki kąt należy ją obrócić, aby strumień indukcji pola magnetycznego przechodzącego przez ramkę zmniejszył się 8 razy.



Zadanie 2. Elektromagnes

Na ustawiony poziomo rdzeń elektromagnesu założono miedziany pierścień. Strzałką zaznaczono jeden z możliwych kierunków przepływu prądu w pierścieniu.



Wskaż właściwe uzupełnienia zdania spośród A lub B oraz spośród C i D.

Gdy włączymy zasilanie, prąd indukcyjny w pierścieniu popłynie w kierunku **A**/ **B**, a pierścień poruszy się w stronę **C**/ **D**.

A. pokazanym strzałką

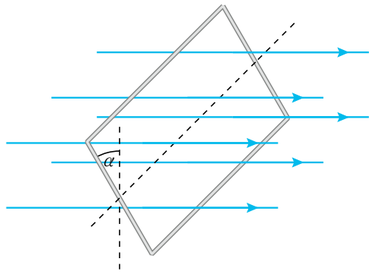
B. przeciwnym do pokazanego strzałką

C. do elektromagnesu

D. od elektromagnesu

Zadanie 3. Ruch ramki w polu magnetycznym

Prostokątną ramkę z drutu umieszczono w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $B = 200$ mT. Ramka jest nachylona pod kątem α do płaszczyzny prostopadłej do linii pola (tak więc kąt $\alpha = 0°$ odpowiadałby sytuacji, gdy ramka leży w płaszczyźnie prostopadłej do linii pola).



Zadanie 3.1. Obracamy ramkę tak, że kąt α zmienia się o 1°. Obrót trwa 0,2 s.

Wskaż właściwe dokończenie zdania A, B lub C oraz jego uzasadnienie 1, 2 lub 3.

W ramce popłynie prąd indukcyjny o największym natężeniu, jeśli kąt α zmienia się:

A.	z 0° do 1°,	ponieważ	**1.**	strumień indukcji jest największy wtedy, gdy linie pola są prostopadłe do ramki.
B.	z 45,5° do 46,5°,		**2.**	zarówno zmiana kąta, jak i czas tej zmiany były jednakowe.
C.	z 89° do 90°,		**3.**	zmiana strumienia magnetycznego przez ramkę była wtedy największa.

Zadanie 3.2. Opisana ramka obracana ze stałą prędkością kątową stanowi model najprostszej prądnicy prądu przemiennego.

Oblicz napięcie skuteczne indukujące się w ramce o wymiarach 20 cm x 30 cm, która obraca się z częstotliwością 3000 obrotów na minutę.

Zadanie 3.3. Prądnica złożona z pewnej liczby ramek opisanych we wstępie do zadania obracała się i wytwarzała napięcie o wartości skutecznej 230 V i częstotliwości 50 Hz.

Jak zmieni się napięcie skuteczne i częstotliwość wtedy, gdy prądnica zacznie się obracać z trzy razy większą prędkością kątową?

Zadanie 3.4. Prądnica złożona z pewnej liczby ramek opisanych we wstępie do zadania obracała się i wytwarzała napięcie o wartości skutecznej 230 V i częstotliwości 50 Hz.

Uzasadnij, że na podstawie tych danych nie jest możliwe obliczenie liczby ramek.

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		$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$
Jednostka astronomiczna		1 au = 149,6 mln km = $1{,}496 \cdot 10^{11}$ m ≈ 150 mln km
Jednostka masy atomowej		1 u = 1,660 538 $\cdot 10^{-27}$ kg ≈ $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg
Masa Słońca		$M_S = 1{,}988 \cdot 10^{30}$ kg ≈ $2 \cdot 10^{30}$ kg
Masa Ziemi		$M_Z = 5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg ≈ $6 \cdot 10^{24}$ kg
Promień Ziemi	**średni**	6370 km
	równikowy	6378,1 km
	biegunowy	6356,8 km
Przenikalność elektryczna próżni		$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$
Stała elektryczna		$k = 8{,}988 \cdot 10^9 \cdot \frac{N \cdot m^2}{C^2} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$
Przenikalność magnetyczna próżni		$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$
Ładunek elementarny		$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C
Masa protonu		$m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg
Masa neutronu		$m_n = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg
Masa elektronu		$m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg
Prędkość światła w próżni		$c = 299\,792\,458 \frac{m}{s} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

Tabela 3. Układ Słoneczny

Nazwa	Masa, $\cdot 10^{24}$ kg	Średnica, km	Wielka półoś orbity, mln km	Okres obiegu wokół Słońca, dni	Okres obrotu wokół własnej osi, godziny	Liczba znanych księżyców	Średnia gęstość, $\frac{kg}{m^3}$
GWIAZDA							
Słońce	1 988 400	1 391 000			609,12		1408
PLANETY							
Merkury	0,330	4880	57,9	88,0	1407,6	0	5429
Wenus	4,87	12 104	108,2	224,7	5832,6	0	5243
Ziemia	5,97	12 742	149,6	365,2	23,9	1	5513
Mars	0,642	6779	228,0	687,0	24,6	2	3934
Jowisz	1898,1	139 822	778,5	4332,6	9,9	95	1326
Saturn	568,3	116 464	1432,0	10 755,7	10,7	146	687
Uran	86,8	50 724	2867,0	30 685,4	17,2	28	1270
Neptun	102,4	49 244	4515,0	60 189,0	16,1	16	1638
PLANETY KARŁOWATE							
Ceres	0,000938	960	414,0	1680	9,074	0	2080
Pluton	0,01303	2376	5869,7	90 465	153,3	5	1854
Eris	0,017	2300	10 180	205 044	25,9	1	2400

Źródło: NASA, luty 2025.

Uwaga. Liczba znanych księżyców planet-olbrzymów zwiększa się, ponieważ stale są odkrywane nowe. Pozostałe dane są korygowane w miarę postępu badań, ale nie są to duże zmiany.

Tabela 4. Wybrane księżyce planet i planet karłowatych

Planeta lub planeta karłowata	Nazwa księżyca	Masa, $\cdot 10^{21}$ kg	Średnica, km	Wielka półoś orbity, tys. km	Okres obiegu wokół planety, dni	Okres obrotu wokół własnej osi, dni	Średnia gęstość, $\frac{kg}{m^3}$
Ziemia	Księżyc	73,5	3480	384	27,3	27,3	3350
Mars	Dejmos	0,0000024	15	23,5	1,26	1,26	1750
	Fobos	0,0000106	26,8	9,38	0,32	0,32	1900
Jowisz	Io	89,3	3640	422	1,77	1,77	3530
	Europa	48,0	3120	671	3,55	3,55	3010
	Ganimedes	148	5260	1070	7,15	7,15	1940
	Kallisto	108	4820	1880	16,7	16,7	1830
Saturn	Tytan	135	5150	1220	15,9	15,9	1880
Uran	Tytania	3,52	1600	436	8,7	8,7	1710
Neptun	Tryton	21,4	2710	355	5,88	5,88	2050
Pluton	Charon	1,59	1210	19,6	6,39	6,39	1700
Eris	Dysnomia	0,082	615	37	15,7	15,7	670

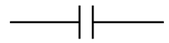
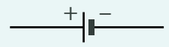
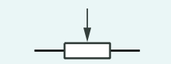
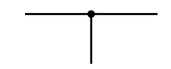
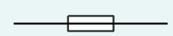
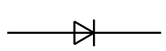
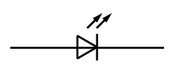
Tabela 5. Wartości pierwszej i drugiej prędkości kosmicznej dla wybranych ciał niebieskich

Nazwa	Pierwsza prędkość kosmiczna, $\frac{km}{s}$	Druga prędkość kosmiczna, $\frac{km}{s}$
Słońce	437	618
Merkury	3,04	4,3
Wenus	7,33	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	0,86	1,21
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

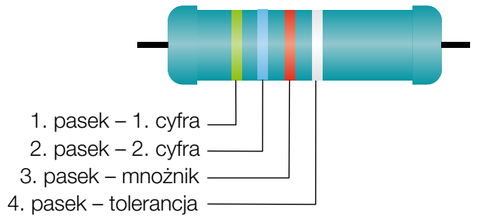
Tabela 6. Opór właściwy wybranych substancji w temperaturze 25°C

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	$5 \cdot 10^{14}$

Tabela 7. 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		dioda świecąca	

Oznaczenia na opornikach z barwnym kodem paskowym

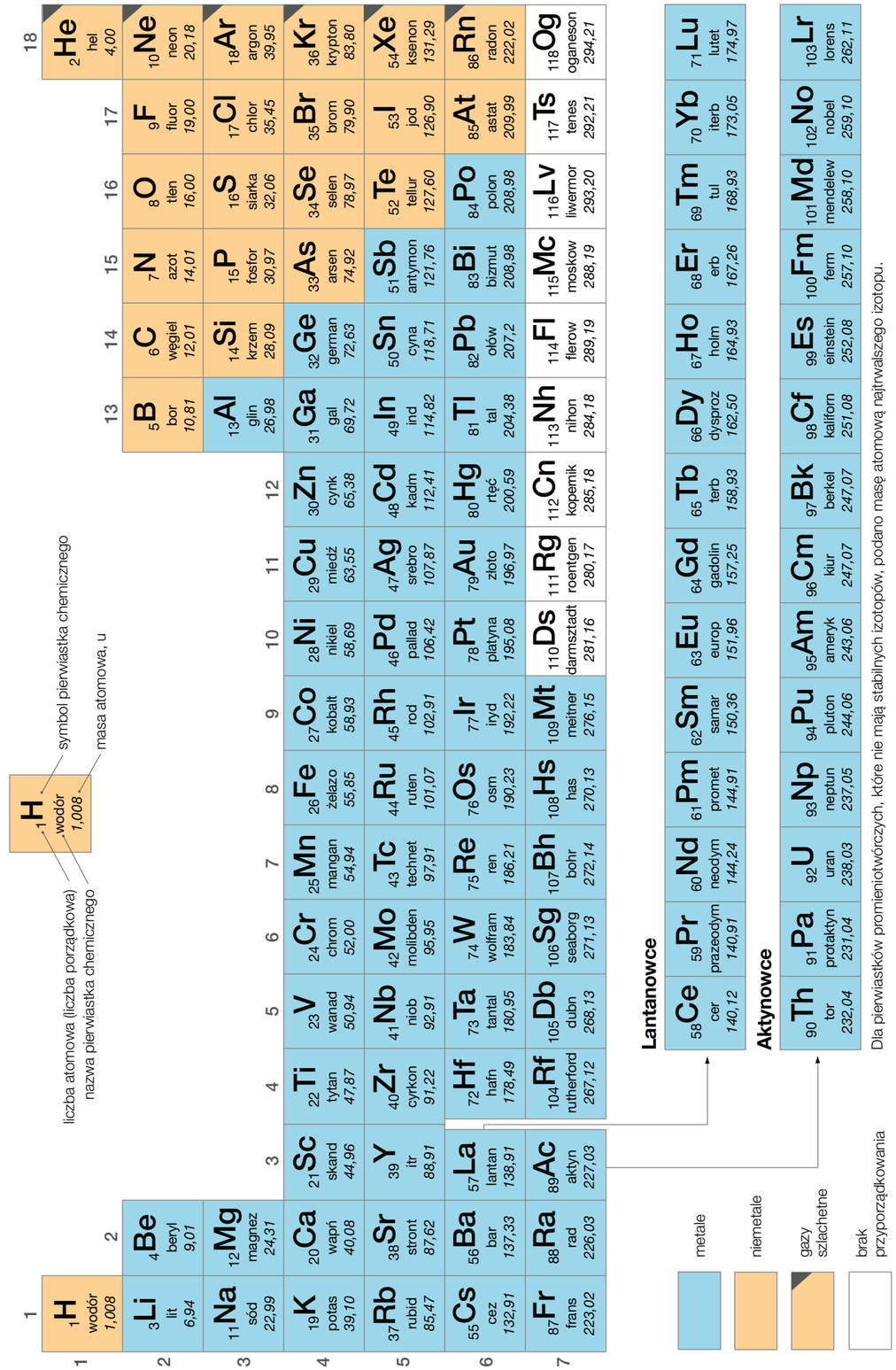


Kolor	Wartość		Mnożnik	Tolerancja ± %
	1. pasek	2. pasek	3. pasek	4. pasek
czarny	0	0	10^0	–
brązowy	1	1	10^1	1
czerwony	2	2	10^2	2
pomarańczowy	3	3	10^3	15
żółty	4	4	10^4	–
zielony	5	5	10^5	0,5
niebieski	6	6	10^6	1,25
fioletowy	7	7	10^7	0,1
szary	8	8	10^8	–
biały	9	9	10^9	–
złoty	–	–	10^{-1}	5
srebrny	–	–	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 dwa pierwsze oznaczają cyfry, trzeci – mnożnik, a tolerancja wynosi ±20%,
  - jeśli są cztery paski – wtedy dwa pierwsze oznaczają cyfry, trzeci – mnożnik, a czwarty – tolerancję,
  - jeśli jest pięć pasków – wtedy pierwsze trzy oznaczają cyfry, czwarty – mnożnik, a piąty – tolerancję.

Układ okresowy pierwiastków chemicznych



Dla pierwiastków promieniotwórczych, które nie mają stabilnych izotopów, podano masę atomową najtrwalszego izotopu.

Na podstawie: *CRC Handbook of Chemistry and Physics 97th Edition*, CRC Press 2017, https://www.nist.gov/pml/atomic-weights-and-isotopic-compositions-relative-atomic-masses oraz CKE 2021, *Wybrane wzory i stałe fizykochemiczne na egzamin maturalny z biologii, chemii i fizyki, marzec 2021* [dostęp: 4.01.2025].

Spis doświadczeń obowiązkowych

Doświadczenia	Numer doświadczenia	Strona
Badanie kształtu linii pola elektrycznego	5	95
Przekaz energii podczas rozładowania kondensatora	8	137
Pierwsze prawo Kirchhoffa	11	175
Pomiar napięcia baterii połączonych szeregowo	12	177
Charakterystyka prądowo-napięciowa żarówki	13	184
Linie pola magnetycznego wokół magnesów trwałych	21	238
Pole magnetyczne wokół prostego przewodnika z prądem	22	239
Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem w kształcie pętli lub zwojnicy	23	241
Demonstrowanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej	29	286
Dioda jako element składowy prostownika	36	334
Dioda jako źródło światła	37	335

Spis infografik

1. Jak odkrywano mechanikę nieba 10–11
2. Amatorskie obserwacje astronomiczne 12
3. Układ Słoneczny 18–19
4. Powstanie Układu Słonecznego 49
5. Drukarka laserowa i kserokopiarka 82–83
6. Siły elektrostatyczne w elektrofiltrach 97
7. Powstawanie pioruna 126–127
8. Ochrona przed burzą 128
9. Zmysł elektryczny 180–181
10. Pole magnetyczne w przyrodzie i technice 248–249
11. Cyklotron 258–259
12. Porażenie prądem elektrycznym 320–321
13. Transformatory i przesyłanie energii 324–325
14. Transformator 326
15. Prostowanie prądu 336

Odpowiedzi i wskazówki do wybranych zadań

13. Grawitacja i elementy astronomii

13.1. Gwiazdy i planety

Zadanie 2. A – III, B – III, C – IV, D – II, E – I

Zadanie 3. a) karuzela: $v = 1{,}7\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $a_\text{d} = 3{,}5\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$,
Ziemia: $v = 463\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $a_\text{d} = 0{,}034\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Zadanie 4. a) $6{,}37 \cdot 10^6$ m, b) $3{,}84 \cdot 10^8$ m,
c) $1{,}5 \cdot 10^{11}$ m, d) $5{,}9 \cdot 10^{12}$ m

13.2. Układ Słoneczny

Zadanie 2. a) $\frac{M_\text{J}}{M_\text{M}} = 5745$, b) $\frac{2R_\text{J}}{2R_\text{M}} = 29$, c) $\frac{d_\text{J}}{d_\text{M}} = 0{,}24$,
Merkury ma ponad 4 razy większą gęstość

Zadanie 3. a) $r_1 = 4{,}4 \cdot 10^9$ km, $r_2 = 7{,}3 \cdot 10^9$ km,
b) $t_1 = \frac{r_1}{c} = 4{,}1$ h, $t_2 = \frac{r_2}{c} = 6{,}8$ h

Zadanie 4. a) ok. 70 cm, b) ok. 7 cm, c) ok. 2 mm

Zadanie 5. a) 75 m, 2,26 km, b) 19 cm

13.4. Prawo powszechnego ciążenia

Zadanie 1. $\frac{F_{\text{Z-J}}}{F_{\text{Z-M}}} = \frac{M_\text{J}}{M_\text{M}} \cdot \left(\frac{r_\text{M} - r_\text{Z}}{r_\text{J} - r_\text{Z}}\right)^2 = 46$,
a więc przy opisanym ułożeniu planet Jowisz przyciągał Ziemię 46 razy silniej niż Mars

Zadanie 2. a) $F_1 = 360$ pN, $F_2 = 10$ pN,
b) $r_1 = 6$ cm, $r_2 = 48$ cm

Zadanie 3. a) 0,3%, b) 3%, c) 12%

Zadanie 5. $R = \sqrt[4]{\frac{9F}{4\pi^2 G d^2}} = 2{,}3$ m

Zadanie 6. a) $F = \frac{G(2m)^2}{r^2} = 1{,}04 \cdot 10^{-6}$ N,
b) $F = 2Gm^2\left[\frac{1}{r^2} + \frac{r}{(r^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}\right] = 6 \cdot 10^{-7}$ N
Drugi sposób daje dokładniejszy wynik. Ciężarek jest lepszym przybliżeniem punktu materialnego niż cała sztanga.

13.5. Siła grawitacji jako siła dośrodkowa

Jest na to sposób

Zadanie 1. $t_1 = \frac{2}{7}\,T_1$

Zadanie 2. $t_1 \approx 2{,}01\,T_1$

Zadanie 1. $v = \sqrt{\frac{GM_\text{Z}}{2R_\text{Z}}} = \frac{v_\text{I}}{\sqrt{2}} = 5{,}6\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$,
$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{4\pi R_\text{Z}}{v} = 14\,300$ s $= 4$ h

Zadanie 2. $h = r - R_\text{Z} = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} - R_\text{Z} = 17\,200$ km

Zadanie 3. $T = \frac{2\pi R}{v} = 93$ min, gdzie $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$

Zadanie 4. $v_\text{IK} = \sqrt{\frac{GM_\text{K}}{R_\text{K}}} = 1680\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Zadanie 5. $\frac{F_\text{S}}{F_\text{Z}} = \frac{\frac{GM_\text{S}M_\text{K}}{r_\text{S}^2}}{\frac{GM_\text{Z}M_\text{K}}{r_\text{Z}^2}} = \frac{M_\text{S}}{M_\text{Z}} \cdot \left(\frac{r_\text{Z}}{r_\text{S}}\right)^2 = 2{,}2$,
gdzie: r_S – odległość Ziemia–Słońce, r_Z – odległość Ziemia–Księżyc

13.6. Pierwsze i drugie prawo Keplera

Zadanie 1. a) niebieska, b) czerwona, c) czerwona

Zadanie 2. a) równo, b) z B do D dłużej, c) równo, d) od A do B krócej

Zadanie 3. a) $v_\text{min} = v_\text{max}\,\frac{r_\text{min}}{r_\text{max}} = 3{,}7\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Zadanie 5. $v_\text{Q} = \frac{2r_\text{P}}{r_\text{Q}}\,v_\text{P} = 33\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$

13.7. Trzecie prawo Keplera

Zadanie 1. $a_\text{H} = a_\text{Z}\sqrt[3]{\left(\frac{T_\text{H}}{T_\text{Z}}\right)^2} = 17{,}9$ au, gdzie a_Z, T_Z dane dla Ziemi

Zadanie 2. $a_2 = a_\text{Z}\sqrt[3]{\frac{T_2^2}{T_\text{Z}^2}} = 1{,}59$ au, gdzie a_Z, T_Z dane dla Ziemi

Zadanie 3. $h = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} - R_\text{Z} = 35\,800$ km,
drugi sposób: $h = \sqrt[3]{\frac{v_\text{I}^2 T^2 R}{4\pi^2}} - R = 35\,800$ km

Zadanie 4.
$a = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} = 7{,}92 \cdot 10^9$ m $= 0{,}053$ au

13.8. Energia potencjalna grawitacji

Zadanie 1. a) $E_\text{k} = 1{,}23 \cdot 10^{13}$ J, b) $E_\text{pZ} = 1{,}62 \cdot 10^{12}$ J, c) ok. 6%, d) $E_\text{p} = -2{,}46 \cdot 10^{13}$ J

Zadanie 2. $v_\text{II} = \sqrt{\frac{2GM_\text{Sat}}{R_\text{Sat}}} \approx 36\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Zadanie 3. $E = GM_\text{Z}M_\text{K}\left(\frac{1}{R_\text{Z} + R_\text{K}} - \frac{1}{r_\text{ZK}}\right) = 3{,}6 \cdot 10^{30}$ J

Zadanie 4. b) $\Delta E = -\frac{GMm}{2{,}004r} + \frac{GMm}{2r} = 5{,}3 \cdot 10^{30}$ J

Zadanie 5. $r = \frac{2GM_\text{Z}}{c^2}$, $2r = 18$ mm

Zadanie 6. a) Z zasady zachowania energii:
$\frac{mv_\text{a}^2}{2} - \frac{GM_\text{S}m}{r_\text{a}} = \frac{mv_\text{p}^2}{2} - \frac{GM_\text{S}m}{r_\text{p}} \rightarrow v_\text{p} = 55\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$,

b) $v_N = \sqrt{v_a^2 + 2GM_S\left(\frac{1}{r_N} - \frac{1}{r_a}\right)} = 3\ \frac{km}{s}$

Zadania analogiczne

Zadanie 1. $\frac{a_C}{a_A} = \frac{1}{81}$

Zadanie 2. $v_2 = \frac{r_1}{r_2}v_1 = 29{,}29\ \frac{km}{s}$

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.1. $h = R_K\sqrt{\frac{M_Z}{M_K}} - R_Z = 9300$ km

Zadanie 1.2. $x = \frac{d}{1+\sqrt{\frac{M_K}{M_Z}}} = 0{,}9d = 346\,000$ km,

gdzie: x – odległość szukanego punktu od środka Ziemi, d – odległość Ziemia–Księżyc

Zadanie 1.3.

$F = F_Z - F_K = \frac{4Gm}{d^2}(M_Z - M_K) = 0{,}011$ N,

zwrot w stronę Ziemi

Zadanie 2.1. najbliższe: 3,6 y, najdalsze: 6,1 y

Zadanie 2.2.

$E_1 = \frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{R} = -\frac{GMm}{2R} = -880$ J

Zadanie 3.1. D

Zadanie 3.2. A-2

Zadanie 4.1. 1. P, 2. F, 3. P

Zadanie 4.3. $M = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2} = 1{,}67\cdot 10^{30}$ kg,

gdzie a i T to dane dla planety

14. Pole elektryczne

14.1. Ładunki elektryczne i ich oddziaływanie

Zadanie 1. **Wskazówka.** Jaki ładunek mają protony i elektrony? Zastanów się, których cząstek jest więcej, a których mniej w ciałach makroskopowych. A może ich liczba jest zbliżona?

Zadanie 2. a) $6{,}25\cdot 10^9$, b) –16 nC

Zadanie 3. a) 30 μN, b) z B do A, c) $q = 2$ nC, d) zaczną się odpychać

Zadanie 4. a) $\alpha = 1{,}6\cdot 10^{-10}$ stopnia,

b) $s \approx 10^{-13}$ m, ok. 100 razy mniej od rozmiaru atomu

14.2. Prawo Coulomba

Zadanie 1. a) $F = 13$ μN,

b) $r = \sqrt{\frac{k|q_1 q_2|}{F}} = 0{,}2$ m $= 20$ cm,

c) $|q_1| = \frac{Fr^2}{k|q_2|} = 0{,}56$ nC, ale ładunki się przyciągają,

więc szukany ładunek jest ujemny: $q_1 = -0{,}56$ nC.

Zadanie 2. a) Aby siła była 16 razy mniejsza, odległość musi być 4 razy większa: 120 cm.

b) W odległości 10 razy mniejszej siła będzie 100 razy większa: 1600 μN = 1,6 mN.

Zadanie 3. x – odległość szukanego punktu od ładunku $Q_1 = 5$ μC, $x = 0{,}141$ m

Zadanie 4. $F = 6{,}9$ μN i jest skierowana wzdłuż przedłużenia przekątnej na zewnątrz kwadratu.

14.3. Pole elektryczne

Zadanie 1. a) $E = 2\cdot 10^6\ \frac{N}{C}$, b) $F' = 2$ mN

Zadanie 2. b) pole centralne, c) $E = 450\ \frac{N}{C}$

Zadanie 3.

$E = \frac{mg}{q}\operatorname{tg}\alpha = 7{,}1\cdot 10^4\ \frac{N}{C}$

Zadanie 4. $a = 3{,}5\cdot 10^{15}\ \frac{m}{s^2}$

14.4. Pole elektryczne wielu źródeł

Jest na to sposób

Zadanie 1. $E' = 4E = 3720\ \frac{N}{C}$, kierunki i zwrot wektora nie uległyby zmianie

Zadanie 2. $E = E_{23} + E_1 = 5430\ \frac{N}{C}$

Zadanie 3. $E = 0$

Zadanie 1. **Wskazówka.** W punkcie b) możesz postępować podobnie jak w przykładzie na s. 90.
a) $E = 9\ \frac{N}{C}$, b) odległość od ładunku 0,25 nC to 0,414 m

Zadanie 2. $E_A = (28\,125 - 1875)\ \frac{N}{C} = 26\,250\ \frac{N}{C}$ i jest skierowane w prawo,
$E_B = (112\,500 + 7500)\ \frac{N}{C} = 120\,000\ \frac{N}{C}$ i jest skierowane w lewo

Zadanie 3. a) $E = 2\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}E_1 = 18\,700\ \frac{N}{C}$ w dół,

b) $E = E_1 = E_2 = 10\,800\ \frac{N}{C}$, w prawo

Zadanie 4. $E = 2\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}E_3 = 3100\ \frac{N}{C}$, w górę

14.5. Elektrostatyczna energia potencjalna

Zadanie 1. a) kulka może wykonać pracę W, b) siła zewnętrzna musi wykonać pracę W nad kulką, $W = 3{,}2$ μJ

Zadanie 2. $W = 1{,}3$ μJ

Zadanie 3. Na proton działa siła o wartości $F = E\cdot e$.

a) $v_k = 190\ \frac{km}{s}$, b) $v_k = 78\ \frac{km}{s}$

Zadanie 4. b) $v = 14\,000\ \frac{km}{s}$

Zadanie 5. $kQq\left(\frac{1}{\frac{d}{2}+x} + \frac{1}{\frac{d}{2}-x} - \frac{4}{d}\right) = 0{,}46$ nJ

14.6. Potencjał i napięcie

Zadanie 2. wyższy potencjał (plus) jest w punkcie B, $U = 1$ V

Zadanie 3. $U = 6300$ V, plus znajduje się w punkcie A

Zadanie 4. $U = \frac{mgd}{q} = 2500$ V

Zadanie 5. $d = \frac{kQ}{RE} = 15$ cm

14.7. Ładunki w przewodniku

Zadanie 3. $Q_1' = -\frac{6}{5}q$, $Q_2' = -\frac{9}{5}q$

Zadanie 4. a) $n = 3{,}42\cdot 10^{21}$, b) $F = 2{,}7\cdot 10^{11}$ N (kilka razy więcej niż ciężar piramidy Cheopsa)

14.8. Ruch naładowanej cząstki w polu elektrycznym

Zadanie 1. a) dla elektronu $\frac{F_e}{F_g} = 1{,}8\cdot 10^{14}$,

b) dla protonu $\frac{F_e}{F_g} = 9{,}8\cdot 10^{10}$

Zadanie 2. $E = \frac{mv^2}{4es} = 206$ kV

Zadanie 3. b) **Wskazówka.** Skorzystaj z II zasady dynamiki. Pamiętaj, że mówi ona nie tylko o wartości przyspieszenia, lecz także o jego kierunku i zwrocie.

Zadanie 4. $Q = \frac{mv^2 r}{ke} = 51$ pC

Zadanie 5. $q = \frac{GMm}{kQ} = -4450$ C

14.9. Kondensatory

Zadanie 2. C

Zadanie 4. $\Delta E = E_+ - E_- = q\Delta V$,

$\Delta E = -1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{C}\cdot 300\ \text{V} = -4{,}8\cdot 10^{-17}$ J, większa energia – na płytce ujemnej

Zadania analogiczne

Zadanie 1.1. A-3

Zadanie 1.2. $v = \sqrt{\frac{2kQe}{mR}} = 1310\ \frac{km}{s}$

Zadanie 2. Q – pozostanie bez zmian, V – maleje

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.1. P, F, F

Zadanie 1.2. $E = \frac{9kq_1}{d^2} = 9000\ \frac{N}{C}$, zwrócony w stronę ładunku q_3

Zadanie 2. $|q| = \sqrt{\frac{d^3 mg}{3kl}} = 43$ nC, a więc $q = -43$ nC

Zadanie 3.1. F, F, P

Zadanie 3.2. $U = \frac{m}{e}(v_1^2 - v_0^2) = 68$ V

Zadanie 3.3. B-3

15. Prąd stały

15.1. Prąd elektryczny i jego natężenie

Zadanie 1. a) $Q = It = 1500$ C,
b) $t = \frac{Q}{I} = \frac{100\ \text{C}}{5\ \text{A}} = 20$ s

Zadanie 2. $t = \frac{Q}{I} = \frac{ne}{I} \approx 2{,}2$ h

Zadanie 3. 4 cm, np. długość dużego spinacza biurowego.

Zadanie 4. Woda destylowana nie przewodzi prądu elektrycznego, ponieważ nie ma w niej jonów, nośników prądu.

Zadanie 5. A. $1\ \frac{C}{\text{tydzień}} = 1{,}65\cdot 10^{-6}$ A,

B. $1\ \frac{e}{s} = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ A, E. $1\ \frac{6{,}022\cdot 10^{23} e}{\text{minuta}} = 1{,}6\cdot 10^3$ A

15.2. Obwody elektryczne

Zadanie 1. a) A, D

Zadanie 4. a) 20 V napięcia stałego (jeśli mierzymy napięcie na akumulatorze, jak to zwykle robimy w praktyce; sama prądnica wytwarza napięcie przemienne), b) 200 V, c) 2000 mV, d) 10 A, e) 10 A

Zadanie 5. a) $I = (650 \pm 20)$ mA, b) $I = (2{,}3 \pm 0{,}1)$ A, c) $I = (0{,}2 \pm 0{,}1)$ A, d) $I = (0{,}20 \pm 0{,}01)$ A

15.3. Opór elektryczny

Zadanie 1. $I = \frac{U}{R} = 0{,}23$ A

Zadanie 2. a) największy opór ma R_1, b) $R_1 = 400\ \Omega$, $R_2 = 133\ \Omega$, $R_3 = 66{,}7\ \Omega$

15.4. Połączenia szeregowe i równoległe

Zadanie 1. A, C: szeregowo, B: równolegle

Zadanie 2. A, E: równolegle, B, C, D, F: szeregowo; w przypadku dwóch żarówek nie ma innych połączeń

Zadanie 3. $U_1 = 9\ \text{V} - 3\ \text{V} = 6$ V (połączenie szeregowe), $U_2 = 3$ V (połączenie równoległe),

$I_1 = I_3 = 50$ mA (pierwsze prawo Kirchhoffa), $I_2 = 150$ mA, $I_4 = 200$ mA

Zadanie 4. $U = 2{,}89$ V

Zadanie 5. Baterie – szeregowo, żarówki – równolegle.

Zadanie 6. $U_2 = 18$ V, $U_1 = 12$ V, $I_1 = I_3 = 190$ mA, $I_2 = 110$ mA

15.5. Opór a temperatura

Zadanie 1. $R = \frac{U_R}{I_R} = 10\ \Omega$

Zadanie 2. a) 100 mA, b) większe niż 100 mA

15.6. Łączenie oporników

Jest na to sposób

Zadanie. $R_Z = 750\ \Omega$, $I_2 = \frac{1}{2}\frac{U}{R_Z} = 6$ mA, $U_2 = I_2 R = 1{,}8$ V

Zadanie 1. a) $R_Z = \frac{R}{2} = 500\ \Omega$, b) $R_Z = 2$ kΩ

Zadanie 2. a) $R = 2{,}5$ kΩ, b) $R = 0{,}714$ kΩ

Wskazówka. Aby uprościć obliczenia w punkcie b), możesz porównać go z a).

Zadanie 3. $R_Z = 87{,}5\ \Omega$, $I_1 = \frac{U}{R_Z} = 0{,}103$ A, $U_1 = I_1 R_1 = 5{,}14$ V, $U_2 = U - U_1 = 3{,}86$ V, $I_2 = \frac{U_2}{R_2} = 0{,}077$ A, $I_3 = I_1 - I_2 = 0{,}026$ A, $U_3 = I_3 R_3 = 2{,}6$ V, $U_4 = U_5 = U - U_1 - U_3 = 1{,}26$ V, $I_4 = \frac{U_4}{R_4} = 0{,}013$ A, $I_5 = \frac{U_5}{R_5} = 0{,}013$ A

Zadanie 6. a) $U_A = 3$ V, $U_B = 1{,}5$ V

Zadanie 7. 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 lub $U_2 = U_3 = I_2 R = I_3 R = 3$ V

15.7. Od czego zależy opór elektryczny

Zadanie 1. $R = 1{,}2\ \Omega$

Zadanie 2. $R_2 = 4R_1$. **Wskazówka.** Weź pod uwagę nie tylko długość, lecz także pole przekroju poprzecznego.

Zadanie 3. $d = \sqrt{\frac{4\rho l}{\pi R}} = 1{,}9$ mm

15.8. Praca i moc prądu elektrycznego

Zadanie 1. a) $Q = 18\,720$ C,

b) $t = 12\,500$ s $= 3{,}5$ h, c) $E = 356$ kJ

Zadanie 2. R_2. **Wskazówka.** Jaka jest zależność między natężeniami prądu płynącego przez obie gałęzie obwodu?

Zadanie 3. Moc użyteczna: $P = Fv = \frac{mv^3}{2s}$.

Moc dostarczana z akumulatora: $P_{el} = UI$. Stąd sprawność silnika: $\eta = \frac{P}{P_{el}} = \frac{mv^3}{2sUI} \approx 0{,}78$, czyli 78%.

Wskazówka. Aby obliczyć wartość siły F, najłatwiej zauważyć, że na drodze 20 m wykonuje ona pracę równą co do wartości bezwzględnej początkowej energii kinetycznej wózka.

Zadanie 4. 1 litr wody ma masę 1 kilograma.

a) $\eta = 0{,}79$, czyli 79%, b) 16 gr

15.9. Siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny

Zadanie 2. $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = 20$ A, $U = 10$ V, $P = 200$ W

Zadanie 3. $I = 6$ A

Zadanie 4. $r = 1{,}25\ \Omega$, $\mathcal{E} = 5{,}625$ V

15.10. Drugie prawo Kirchhoffa

Jest na to sposób

Zadanie 1. **Wskazówka.** Drobne rozbieżności przy sprawdzaniu II prawa Kirchhoffa wynikają z zaokrąglania. Jeśli chcesz się upewnić, możesz użyć ułamków zwykłych.

Zadanie 3. Przez baterię 9 V płynie prąd 1,11 A, przez baterię 3 V płynie prąd 0,43 A w stronę przeciwną niż normalnie. (W zależności od budowy ta druga bateria może się ładować albo ulec uszkodzeniu).

Zadanie 1. $U = 9{,}6$ V

Zadanie 2. $P = 0{,}428$ W

Zadanie 3. górna bateria: $I_1 = 1{,}32$ A, dolna bateria: $I_2 = 0{,}22$ A

Zadanie 4. a) $I_a = 6$ A, b) $I_b = 3$ A

Zadania analogiczne

Zadanie 1.1. $U_V = \frac{\mathcal{E}}{2}$, $I_A = \frac{\mathcal{E}}{2R}$

Zadanie 1.2. Moc zmniejszyła się $\frac{16}{9}$ razy.

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.1. $I = 3$ A ± 0,2 A, $U = 5{,}3$ V ± 0,4 V

Zadanie 1.2. $U = -0{,}16\ \Omega \cdot I + 5{,}9$ V

Uwaga. Ze względu na niedokładność odczytywania z wykresu możesz otrzymać nieco inne współczynniki.

Zadanie 1.3. $r = 0{,}16\ \Omega$, $\mathcal{E} = 5{,}9$ V

Zadanie 2. Najwięcej ciepła wydziela się na R_1, a moc jest równa: $P = 0{,}9$ W. **Uwaga.** Nie musisz obliczać wszystkich mocy, aby wskazać największą.

Zadanie 3.1. Prawo Ohma nie jest spełnione. Wyjaśnij, dlaczego!

Zadanie 3.2. **Wskazówka.** Najpierw oblicz spadek napięcia na baterii. $R_ż = \frac{U_ż}{I_ż} = 7{,}5\ \Omega$

Zadanie 3.3. $P_ż = U_ż I_ż = 4{,}8$ W

Zadanie 3.4. $R = \frac{U_R}{I_R} = 5\ \Omega$

Zadanie 4.1. A, D

Zadanie 4.2. $R_{100} = \frac{100\text{ V}}{0{,}05\text{ A}} = 2000\ \Omega$,

$R_{225} = \frac{225\text{ V}}{0{,}75\text{ A}} = 300\ \Omega$

Zadanie 4.3. $U \approx 260$ V. **Wskazówka.** Zadanie można rozwiązać graficznie.

Zadanie 4.4. Rys. B. Uzasadnij dlaczego.

16. Pole magnetyczne

16.1. Oddziaływania magnetyczne

Zadanie 1. d – N, c – S

16.2. Linie pola magnetycznego

Zadanie 1. **Wskazówka.** Zwojnica wytwarza pole podobne do pola magnesu. Jaki biegun jest od strony igły magnetycznej?

Zadanie 2. b) z południa na północ

Zadanie 3. A – biegun południowy, B – biegun północny

Zadanie 4. **Wskazówka.** Magnes podkowiasty ma bieguny na płaskich powierzchniach (na naszym rysunku – na dole).

16.3. Siła Lorentza

Zadanie 1. a) równoległa do osi z i ze zwrotem zgodnym z tą osią, b) ma wartość zero

Zadanie 3. $v = \frac{E}{B} = 2 \cdot 10^5\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ dla protonu i elektronu

Zadanie 4. $\sin\alpha = \frac{F}{evB} = 0{,}536$, czyli $\alpha = 32°$

16.4. Ruch w polu magnetycznym

Zadanie 2. $B = \frac{mv}{qR} = 13\ \mu\text{T}$

Zadanie 3. $S = v_{\parallel} T = 18$ mm, gdzie: $T = \frac{2\pi m}{qB}$, $v_{\parallel} = \sqrt{v^2 - v_{\perp}^2}$, $v_{\perp} = \frac{qBR}{m}$

Zadanie 5. a) $R_p = \frac{m_p v}{eB} = 350$ m, $R_e = \frac{m_e v}{eB} = 19$ cm,

b) $\frac{T_p}{T_e} = \frac{m_p}{m_e} \approx 1800$

16.5. Siła elektrodynamiczna

Zadanie 1. $F = IlB\sin\alpha$, a) $F = 0$, bo $\alpha = 0°$, b) $F = 0{,}141$ N, $\alpha = 45°$, c) $F = 0{,}2$ N, bo $\alpha = 90°$, d) $F = 0{,}2$ N, bo $\alpha = 90°$

Zadanie 2. $\sin\alpha = \frac{F}{IlB} = \frac{1}{3}$, $\alpha = 19{,}5°$

Zadanie 3. $a = \frac{IlB}{m} = 0{,}8\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

16.6. Pole wokół przewodnika z prądem

Zadanie 1. $B_{min} = \frac{\mu_0 I_{min}}{2\pi r} = 60\ \mu\text{T}$,

$B_{max} = \frac{\mu_0 I_{max}}{2\pi r} = 300\ \mu\text{T}$

Zadanie 2. $I = \frac{2Br}{\mu_0} = 4{,}8$ A

Zadanie 3. $B = \frac{\mu_0 nI}{l} = 5{,}03$ mT

Zadanie 4. $F_{wyp} = \frac{\sqrt{3}\,\mu_0 I^2 l}{2\pi r} = 5{,}5$ mN, siła działająca na dany przewód jest zwrócona w stronę punktu leżącego pośrodku pomiędzy pozostałymi dwoma przewodami.

Zadanie 5. $B_A = B_B = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{a+d}\right) = 30\ \mu\text{T}$

Zadanie 6. $I_2 = \pi I_1 = 31{,}4$ A, prąd płynie od B do A

Zadania analogiczne

Zadanie 2. $2R = \frac{2mv}{qB} = 16{,}6$ cm

Zadanie 3. C-2

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.1. D

Zadanie 1.2. $a = \frac{\mu_0 qIv}{2\pi xm} = 21\,000\ \frac{\text{km}}{\text{s}^2}$

Zadanie 2.1. $B = \frac{mv}{Re} = 0{,}9$ mT

Zadanie 2.2. $q = \frac{mv^2 R}{ke} = 2$ pC

Zadanie 2.3. $M = \frac{v^2 R}{G} = 4{,}8 \cdot 10^{19}$ kg

Zadanie 3.1. TAK, 3

Zadanie 3.2. B

Zadanie 4. NIE, 2

17. Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

17.1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

Zadanie 1. A

Zadanie 2. od punktu A do punktu B

Zadanie 3. b) Zmieni się na przeciwny.

17.2. Prawo indukcji Faradaya

Zadanie 1. $\Phi = SB\cos\alpha = 7{,}7 \cdot 10^{-8}$ Wb, gdzie $\alpha = 90° - 65° = 25°$

Zadanie 3. a) $\mathcal{E} = N \cdot \left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right) = \frac{NBS}{\Delta t} = 1{,}125$ V,

c) $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = 3{,}75$ mA

Zadanie 4. w B największa

Zadanie 5. $I = \frac{\mathcal{E}}{r} = 43$ mA

17.3. Silnik elektryczny i prądnica

Zadanie 1. a) $\Phi_1 = Bl^2 = 4$ mWb,

$\Phi_2 = Bl^2\cos\alpha = 3{,}985$ mWb,

b) $I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R\Delta t} = 25$ mA

Zadanie 3. $M = \frac{\sqrt{2}}{2} BIl^2 = 1{,}32 \cdot 10^{-4}$ N · m

17.4. Prąd przemienny

Zadanie 1. a) $U_{max} = \sqrt{2}\ U_{sk} = 17$ V,

b) $I_{sk} = \frac{P}{U_{sk}} = 2{,}9$ A, $I_{max} = \sqrt{2}\ I_{sk} = 4{,}1$ A,

c) $R = \frac{U_{sk}}{I_{sk}} = \frac{U_{sk}^2}{P} = 4{,}1\ \Omega$

Zadanie 2. a) $f = 10$ Hz, b) $E = \frac{U_{max}^2 t}{2R} = 235$ J

Zadanie 3. $B = \sqrt{2PR} \cdot \frac{1}{2\pi fNS} = 8{,}2$ mT, gdzie

$P = 300$ W, $R = 10\ \Omega$, $f = 100$ Hz, $N = 500$,

$S = 0{,}03$ m^2

Zadanie 4. O 1° ramka obraca się w czasie

$\Delta t = 5{,}56 \cdot 10^{-5}$ s, $\frac{BS}{\Delta t} = 144$ V,

a) $\mathcal{E} = 0{,}022$ V, b) $\mathcal{E} = 1{,}63$ V, c) $\mathcal{E} = 2{,}51$ V

17.5. Domowa sieć elektryczna

Zadanie 1. a) nie, b) tak

Zadanie 2. $P_{max} = UI_{max} = 24$ W

Zadanie 3. a) 7,8 A; 4,32 zł, b) tak, można podłączyć

Zadanie 7. 500 razy

17.6. Transformator

Zadanie 1. a) $n_w = \frac{n_p}{2} = 500$, b) $I_p = \frac{I_w}{2} = 7$ A

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

17.7. Zastosowania indukcji elektromagnetycznej

Zadanie 1. **Wskazówka.** Jaki element ładowarki jest podłączony bezpośrednio do wtyczki?

Zadanie 2. Dla uproszczenia możesz rozważać wiertarkę z silnikiem prądu stałego, a nie przemiennego.

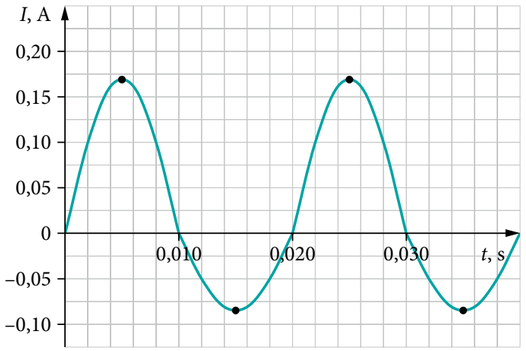
17.8. Dioda i prostowanie prądu

Zadanie 2. $P_1 = \frac{U^2}{R_Z} = \frac{2U^2}{R_1} = 1440$ W,

$P_2 = \frac{U^2}{R_1} = 720$ W, $P_{śr} = \frac{P_1 + P_2}{2} = 1080$ W

Zadanie 3. $R = 80\ \Omega$

Zadanie 4.



Zadanie analogiczne

Zadanie. 1.1. B-D

Zadanie. 1.2. Zmieniłaby się tylko biegunowość.

Zadanie. 1.3. $B = 4$ T

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1. $\alpha = 83°$

Zadanie 2. A-D

Zadanie 3.1. C-3

Zadanie 3.2. $U_{sk} = \frac{\mathcal{E}}{\sqrt{2}} = 2{,}7$ V

Zadanie 3.3. każda z tych wielkości wzrośnie 3 razy

Indeks

A

AED → defibrylator
alternatywne źródła wysokiego napięcia 95
amper 157
amperomierz 161
aplikacje astronomiczne 12

B

bezpiecznik 315
bieguny magnesów 231

C

Cavendish, H. 32
cewka 242
charakterystyka prądowo-napięciowa 167
ciężar 29, 31
Coulomb, Ch. 85, 89
cyklotron 258–259
czarna dziura 62

D

defibrylator 140
dioda 334, 335
– świecąca 335
domeny magnetyczne 233
druga prędkość kosmiczna 60, 61
drugie prawo Keplera 44–47
– – Kirchhoffa 214
drukarka laserowa 82–83
dryf elektronów 154
działo Newtona 36

E

egzoplanety → planety pozasłoneczne
Einstein, A. 62, 271
ekranowanie pola 124
elektrofiltry 97
elektromagnes 242, 243
elektroskop 80
elektryzowanie przez indukcję 80, 81
– – potarcie 79
elipsa 43
energia potencjalna grawitacji 57–59
– – w centralnym polu elektrycznym 110–112
– – w jednorodnym polu elektrycznym 109
– – w polu elektrycznym 108
– – w polu magnetycznym 236
– zgromadzona w kondensatorze 137

F

Faraday, M. 124
fazy Księżyca 21, 22
ferromagnetyki 232, 233

G

galaktyki 6
Galileusz 11
gazowe olbrzymy 16
generator Kelvina 141, 142
głośnik 302–304
grawitacja 28
gwiazdy 6

H

hiperbola 48

I

indukcja elektromagnetyczna 287
– elektrostatyczna 81
– magnetyczna 246, 247, 249
– –, pojedyncza pętla 269
– –, prosty przewodnik 268, 269
– –, zwojnica 269, 270
izolator 76, 186

J

jednostka astronomiczna 17
jon 76
jonizacja 126

K

Kepler, J. 11, 42, 52
kilowatogodzina 200
klatka Faradaya 124, 128
komety 17
komutator 301
kondensator 136–139
Kopernik, M. 10, 51, 52
kserokopiarka 82–83
Księżyc 7, 17, 21
księżyce 17
kulomb 77
kwadra 21

L

LED → dioda świecąca
linie pola elektrycznego 94
– – magnetycznego 238, 239, 240

– – – wokół prostego przewodnika 239, 240
– – – wytwarzane przez pętlę 241
– – – wytwarzane przez zwojnicę 241, 242
lodowe olbrzymy 16

Ł
ładunek elektryczny 76
– elementarny 76, 77
– próbny 93

M
magnes 230, 231, 232
– neodymowy 231
mapa nieba 12
masa gwiazdy 53–54
meteoroidy 17
miernik uniwersalny 161, 162
mikrofon 302–304
moc prądu elektrycznego 200
moment pędu planety 46
morza księżycowe 26

N
nadprzewodniki 187
napięcie 116, 159
– krokowe 128
– przemienne 306, 307
– skuteczne 307
natężenie pola elektrycznego 93, 94
– – – między okładkami kondensatora 139
– prądu 157
– skuteczne 308
Newton, I. 11, 28, 36, 42
niepewność pomiaru miernikiem cyfrowym 162–163
nów 21

O
ochrona przed burzą 128
odbiornik energii elektrycznej 158
oddziaływanie przewodów z prądem 271
ognisko elipsy 43
ogniwo 179, 205
okładki kondensatora 136
om 168
omomierz 170
opór a temperatura 184
– elektryczny 168
– wewnętrzny 207
– właściwy 197, 198
– zastępczy oporników połączonych szeregowo 190
– – – – równolegle 191, 192
ostatnia kwadra 22

P
parabola 48
pełnia 21
pierwsza kwadra 21
pierwsza prędkość kosmiczna 37
pierwsze prawo Keplera 42
– – Kirchhoffa 176
piorun 126–127
piorunochron 126
planetoidy 16
planety 7, 15, 16
– karłowate 16
– pozasłoneczne 17
Platon 10
pole centralne 96
– elektryczne 92
– – wokół naładowanego ciała sferycznie symetrycznego 105
– – wytwarzane przez dwa ładunki 101, 102
– – – kilka ładunków 102
– jednorodne 109
– magnetyczne 234
– – Ziemi 235
połączenia równoległe 174
– szeregowe 174
pomiar napięcia 161
– natężenia 161
porażenie elektryczne 320–321
potencjał pola elektrycznego 115
– w polu centralnym 119
– w polu jednorodnym 117
potencjometr 170
powstanie Układu Słonecznego 49
pozorny ruch Słońca 8, 9
półprzewodnik 186, 187
praca przeciwko sile grawitacji 57, 58
– prądu elektrycznego 199, 200
– w polu elektrycznym 107
prawo Coulomba 85
– Faradaya 289, 296
– Keplera, drugie 44–47
– –, pierwsze 42
– –, trzecie 52, 53
– Kirchhoffa, drugie 214
– –, pierwsze 176
– Ohma 167, 168, 186
– powszechnego ciążenia 29
prąd elektryczny 152
– przemienny 306
– stały 157
– w cieczach 155
– w gazach 156
prądnica 301, 302
– prądu przemiennego 309
prędkość satelity 36–37
prędkość ucieczki 61
promień wodzący 45, 46
prostowanie prądu 336
prostownik 334
przenikalność magnetyczna próżni 269
przewodnik 76, 152
– z ostrzem 125
przyciąganie ciał nienaelektryzowanych 88
przyspieszenie grawitacyjne 29, 31
– ziemskie 29
Ptolemeusz, K. 10
pył międzyplanetarny 17

R
reguła Lenza 290
– prawej ręki dla pętli i zwojnicy 242
– – – dla prostego przewodnika 240
– – – dla siły elektrodynamicznej 263
– – – dla siły Lorentza 248
reguła śruby prawoskrętnej 248, 263
równanie transformatora 326
różnica potencjałów → napięcie
ruch ładunku w jednorodnym polu elektrycznym 131–133
– – – – magnetycznym 254–256
ruch po linii śrubowej 256

S
SEM → siła elektromotoryczna
sfera niebieska 7, 8
sierp Księżyca 21
silnik elektryczny 301
siła elektrodynamiczna 263
– elektromotoryczna indukcji 288, 289, 296
– – prądnicy 309
– – zwojnicy 197
– elektrostatyczna 86
– elektryczna 86
– grawitacji 28, 29, 35
– Lorentza 246, 247
Słońce 15
spadek swobodny 29
stała elektrostatyczna 85, 86
– elektryczna 85, 86
– grawitacji 29–32
strumień indukcji magnetycznej 295
swobodne elektrony 152
symbole elektryczne 159
szczotki 301

T
tesla 249
Tesla, N. 249
tokamak 257
transformator 326
trzecie prawo Keplera 52, 53

U
umowny kierunek przepływu prądu 156
uziemienie 127, 314, 317, 318

W
weber 295
wiatr słoneczny 256, 257
Wolszczan, A. 17, 55
wolt 116
woltomierz 161
wyłączniki różnicowoprądowe 316

Z
zaćmienie Księżyca 24
– – całkowite 25
– – częściowe 25
– Słońca 25
zasada zachowania ładunku 79
zastosowanie zwojnic i elektromagnesów 243
zmysł elektryczny 180–181
– magnetyczny 241
zorza polarna 257
zwarcie 315
zwojnica 242

Ź
źródło pola elektrycznego 93
– napięcia 205, 206, 207

Indeks nazw obcojęzycznych z wymową

alternating current amperage, czyt. alterne**t**ing k**a**rent **a**mperidż 162
alternating current voltage, czyt. alterne**t**ing k**a**rent w**o**ltidż 162
astronomical unit, czyt. astron**o**mikal j**u**nit 17
Andre Geim, czyt. andr**e** gejm 233
Cavendish, czyt. k**a**wendysz 32
Charles Coulomb, czyt. szarl kul**o**mb 85
Comets Fact Sheet, czyt. k**o**mets fakt szīt 55
DC motor (direct current motor), czyt. di si m**o**tor (d**a**jrekt k**a**rent m**o**tor) 305
direct current amperage, czyt. d**a**jrekt k**a**rent **a**mperidż 162
direct current voltage, czyt. d**a**jrekt k**a**rent w**o**ltidż 162
DIY (do it yourself), czyt. di aj łaj (du it jorself) 305
electric field lines, czyt. el**e**ktrik fild lajns 106
Heavens Above, czyt. h**e**wenz eb**a**w 41
Homemade, czyt. h**o**łmejd 305
James Joule, czyt. dżejms dżul 202
Kirchhoff, czyt. kirhof 173
Lawrence Stephenson, czyt. l**o**łrens st**i**wenson 32
Lenz, czyt. **l**enc 290
light emitting diode, czyt. lajt em**i**ting d**a**jołd 335
Lorentz, czyt. l**o**renc 245
Michael Faraday, czyt. m**a**jkel f**a**radaj 124
Ohm, czyt. om 167
Ørsted, czyt. **e**rsted 89
Siding Spring, czyt. s**a**jding spryng 48
Verne, czyt. wern 73

Pełny tekst artykułu ze s. 65–66 jest na stronie:
https://www.deltami.edu.pl/1991/11/sily-plywowe-na-ziemi-i-w-ukladzie-slonecznym/
Pełny tekst artykułu ze s. 340–341 jest na stronie:
https://www.deltami.edu.pl/2005/11/mala-delta-dynamo-we-wnetrzu-ziemi/

Spis działów w pozostałych częściach

Część 1
1. Wprowadzenie
2. Ruch prostoliniowy
3. Ruch krzywoliniowy
4. Ruch i siły
5. Energia i pęd
6. Hydrostatyka

Część 2
7. Wstęp do zjawisk cieplnych
8. Termodynamika
9. Bryła sztywna
10. Ruch drgający
11. Fale
12. Zjawiska falowe

Część 4
18. Optyka
19. Fizyka atomowa
20. Izotopy i promieniowanie
21. Energia jądrowa

Ilustracje:
Ewelina Baran – s. 301, 309, 310 (prądnice), 343ś,d, 344d, 345 (prądnice), **Elżbieta Buczkowska** – s. 22d (Ziemia), 24 i 25 (Ziemia), 30 (Ziemia), 40, 68 (Ziemia), 156m i 158 (bateria), **Rafał Buczkowski** – s. 119 (piłka), 258 (model 3D), **Marta Długokęcka** – s. 128l (postać), **Zuzanna Dudzic** – s. 40 i 59 i 61 (satelita), 110m (satelita), **Andrzej Dukata** – s. 29, 32, 34, 43, 44p, 45, 47, 48, 57, 59d, 60p, 69, 81 i 88 (układ), 89, 96, 99, 102, 110m, 112g, 118, 128m, 128 (auto), 129, 132, 133, 144, 145, 146ś, 152, 154d, 156, 159, 160ś, 161, 163p, 166, 168, 171, 172, 174, 175g, 176, 177g,d, 178, 182ld, 183p, 185–188, 191, 195, 196, 197g, 201, 204, 207, 208, 209m, 210, 212, 213, 214g, 220–222, 227d, 228, 237, 239, 240g, 252, 253, 260, 261g, 265m, 267l, 268, 271g, 272, 273p, 275g, 276g (a,b), 277d, 278, 279, 282, 283g, 284g, 288, 292ld, 297, 299p, 304–308, 313–315, 319, 335–337, 338g,łś, 339, 344g, 347ś, 348–350, 353, **Paulina Jarmusik** – s. 136, 146d, 233, 256, 265d, 277ś (c), **Adam Król** – s. 258 (render 3D), **Laura Maziewska** – s. 97 (filtry), 317 (pralka), 320–321, 326g, 354 (korekta), **Krzysztof Mrawiński** – s. 92, 105d, 106, 108g, 114, 119, 138 (korekta), 150, **Marek Nawrocki** – s. 14, 55, **Paulina Podolska** – s. 240m, 241, 242g, 244pg, 246, 248, 250, 254, 255, 261ś, 263, 270, 271ś, 275d, 276d,g (c), 277g,ś (a,b), 347g,d, **Joanna Ptak** – s. 9g (Słońce), 13g, 22–25, 26 (Słońce, Księżyc), 27, 36p, 43–45 i 47 (Słońce), 50 (Ziemia), 59 i 60 (Słońce), 61 i 65–66 (Ziemia), 69 (Słońce), 81, 84, 88, 94l, 108d, 110m (Ziemia), 111, 120, 126–127d, 143 (ładunki), 149 i 152 (ładunki), 236 (magnes), 244ś (magnes), 264, 265g, 267p, 282, 283d, 289 i 290 (magnes), 292 i 343g (magnes), **Marcin Ptak** – s. 9d (postać), 38, 39, 44l, 46, 50l, 50pd, 54, 65, 66, 70, 71, 74, 82–83, 86, 90, 91, 94p, 103, 104, 107, 111 (układ), 112d, 117m, 118m (lifting), 123–125, 127ś, 135, 138, 140, 141, 149, 154ś, 158, 160ś (lifting), 163l, 167–169, 175d, 177m, 182pd (żarówka), 193, 194, 198, 209g, 211, 215–217, 223–226, 227g, 232g, 234, 235 (magnes), 242g (dłoń), 246 (korekta), 248 i 263 (dłoń), 269, 273l, 276d (dłoń), 284d, 288 (lifting), 296, 298, 299l, 301 i 309 (korekta), 310 (wykresy), 312, 317 (lifting), 338d i (wykres), 343ś,d i 344 (korekty), 345 (wykresy), 362, **Ewa Sowulewska** – s. 9, 13d, 26, 30, 36lg, 37, 50pg, 59ś, 60l, 68, 79, 99g (lifting), 105g, 109, 110ś, 118p (lifting), 128, 129 (lifting), 134, 143, 144g (lifting), 157, 160d, 170m, 182 (I–V), 183l, 197m, 214d, 235, 236g, 242m, 244, 247, 251, 257m, 258–259, 281, 289, 290, 292p, 293–295, 300, 317 (postać), 327, 340, 342, 343g, 346g, **Zuzanna Sri** – s. 10–11, 324–325, **archiwum Nowej Ery** – s. 232m.

Infografiki:
Laura Maziewska – s. 320–321, **Agata Muszyńska** – s. 18–19, 49, 180–181, 248–249, 258–259, 324–325, 336, **Marcin Ptak** – s. 82–83, **Zuzanna Sri** – s. 10–11, 12, 97, 126–127, 128, 326.

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 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.

Zdjęcie na okładce: **Getty Images:** The Image Bank/Adastra.

Zdjęcia: **Agencja Wyborcza.pl:** Mieczysław Michalak s. 25 (zaćmienie Księżyca); **Archiwum Wydawnictwa:** s. 36, 52, 77 (elektroskop), s. 179 (ogniwa); **BE&W:** Alamy Stock Photo - Ali Çobanoğlu s. 198, Antiqua Print Gallery s. 10 (Ptolemejski system słoneczny), B.A.E. Inc. s. 249 (plamy na Słońcu), blickwinkel s. 181 (duch brazylijski), Dominika Zarzycka s. 259, Grant Kennedy s. 334 (diody), hamid sedehee s. 41, Historic Images s. 332 (pierwszy czajnik indukcyjny), Itsik Marom s. 241 (żółw), Malcolm Fairman s. 247, Naeblys s. 257, NASA Image Collection s. 73, Niday Picture Library s. 127 (ognie Św. Elmosa), PA Images s. 122, Prisma by Dukas Presseagentur GmbH s. 181 (strętwa), Richard Wainscoat s. 64, Science History Images s. 10–11 (układ heliocentryczny), s. 11 (armata Newtona), Stocktrek Images, Inc. S. 249 (Tesla), The Print Collector s. 288, www.pqpictures.co.uk s. 115, GRANGER COLLECTION s. 16, 85 (Coulomb), HERITAGEIMAGES/Ann Ronan Pictures s. 51 (dzieło Kopernika), Science Source s. 51 (rycina Układu Słonecznego Kopernika), Rick Browne s. 181 (nożowiec zielonkawy), Science Stock Photography s. 80 (elektroskop); **East News:** Marek BAZAK s. 179 (lokomotywa); **Fotolia:** lifeonwhite.com s. 82–83 (papuga); **Getty Images:** 500Px Plus - AS Photovisions s. 229, Brice Moreau s.75, Gerwyn Davies s. 78 (trzmiel), Brand X Pictures/Science Photo Library - NASA EARTH OBSERVATORY s. 18 (Ziemia), Cultura/Monty Rakusen s. 249 (magnes nadprzewodzący), DigitalVision Vectors - clu s. 10 (Platon), ilbusca s. 11 (Galileusz, Newton), ZU_09 s. 11 (Kepler), E+ - bjdlzx s. 6 (obserwacja nieba), FrancescoCorticchia s. 243 (dziewczyna ze słuchawkami), FreshSplash s. 92, imantsu s. 262 (silnik), jxfzsy s. 12 (obserwacja nieba), malerapaso s. 314 (wtyczka z blaszką), sololos s. 49 (gwiazdy), imageBROKER/Michael Runkel s. 180 (delfin gujański), iStock/Getty Images Plus - AndreiZ s. 317 (wyłączniki różnicowoprądowe), arfo s. 76, Arkadiusz Zajac s. 100, denisk0 s. 32 (Cavendish), eternalcreative s. 333 (wiertarka), Funnycreature s. 248 (magnes neodymowy), Horst Gerlach s. 56 (dźwig), koto_feja s. 254, Llepod s. 306, mipan s. 326 (uzwojenie) olegback s. 9 (gwiazdozbiór), OlegKov s. 230, olejx s. 26 (Księżyc), Piotr Mitelski s. 17, StanRohrer s. 162, Trifonov_Evgeniy s. 42 (kometa), xenotar s. 131, zhengzaishuru s. 323 (linie wysokiego napięcia), Moment - Cigdem Uzun s. 180 (ryba drętwokształtna), mikroman6 s. 10 (Kopernik), Pakin Songmor s. 18–19 (niebo z gwiazdami), Philipp Klinger s. 324–325 (słupy wysokiego napięcia), Santiago Urquijo s. 235 (lotnisko), Science Photo Library/SCIEPRO s. 18 (Mercury, Wenus, Mars, Jowisz), s. 18–19 (Saturn), s. 19 (Neptun), Stocktrek Images s. 19 (Uran), s. 248–249 (gwiazdy neutronowe); **Indigo:** NHPA/Paulo de Oliveira s. 181 (rekinek psi); **NASA:** ESA/NASA/SOHO s. 268 (wybuchy na Słońcu), s. 271 (wybuchy na Słońcu), JPL-Caltech/UCLA s. 48, NASA s. 5, 25 (Księżyc), s. 63, NASA/JPL-Caltech s. 56 (czarna dziura); **Shutterstock:** AaronChenPS2 s. 174 (wodospad), agsandrew s. 49 (obłok molekularny), Alexey Boldin s. 248 (smartfon), Alice July s. 180–181 (ikona kuli ziemskiej), Andrey_Popov s. 158, AntonKhrupinArt s. 326 (układ scalony), Aphelleon s. 18 (Słońce), BAIVECTOR s. 336, BGSmith s. 35, Bilanol s. 97, bloomua s. 12 (smartfon), BobNoah s. 15 (Saturn), Castleski s. 26 (odcisk buta na Księżycu), Christos Belesis s. 126–127 (piorun), Ciro Orabona Creative s. 273, Collection Maykova s. 166 (rzeka), Cristian Storto s. 117 (bateria), Danny Ye s. 152, Dariusz Banaszuk s. 126–127 (pole), Darren Tierney s. 160, Deian Hughes s. 62, Digital Images Studio s. 248 (wybuchy na Słońcu), Dima Zel s. 51 (Międzynarodowa Stacja Kosmiczna), Dmitry Kalinovsky s. 199, Dragon Images s. 332 (lampa błyskowa), dvande s. 243 (elektromagnes), Ekaterina43 s. 190 (miernik), Everett Collection s. 10 (Ptolemeusz), s. 291 (stara fabryka), Evgeniy pavlovski s. 165, Fabian Montano Hernandez s. 12 (zaćmienie Słońca), FabrikaSimf s. 76, Fabrizio Maffei s. 151, Fagreia s. 12 (ikona oka), Forance s. 286, 291 (lewitujący magnes), Francescomoufotografo s. 313, Francisco Javier Gil s. 169, Hero Images on Offset s. 243 (rezonans), hjochen s. 231 (chiński kompas), hsagencia s. 335 (dioda), Hsyn20 s. 190 (oporniki), J. Helgason s. 30 (parking dla samochodów), Jacky Co s. 324 (ikonka fabryki), Jan von nebenan s. 9 (autobus), Jasmina Andonova s. 85 (naelektryzowane włosy), Jne Valokuvaus s. 7, Joe Belanger s. 205 (pomiar napięcia akumulatora), KaliAntye s. 249 (rezonans magnetyczny), Kangsadarn.S s. 245 (Yamato), KPixMining s. 190 (układ scalony), Lifestyle Travel Photo s. 128, Lina Keil s. 12 (gwiazdozbiór), Longfin Media s. 117 (tablica ostrzegająca przed napięciem), Lucky Business s. 173, Lynn Watson s. 156, Mariana Serdynska s. 307, marianoarias.soy (Wenus i Księżyc), Mihancea Petru s. 328, Mike Mareen s. 139, MikhailSh s. 107, Mopic s. 248 (pole magnetyczne Ziemi), Morphart Creation s. 42 (Kepler), mpohodzhay s. 164, Muratart s. 21, narin phapnam s. 136, New Africa s. 212 (sieć), s. 238, 322, Number One s. 117 (wróble na liniach wysokiego napięcia), Oasishifi s. 139 (kondensatory), s. 335 (diody LED), Osetrik s. 46, Palau s. 325 (ikonka miasta), petrmalinak s. 218, Piotr Krzeslak s. 174 (rzeka), piotr szczepanek s. 179 (rozgałęźnik), pryzmat s. 314 (gniazdo z uziemieniem), Pyty s. 213 (stok narciarski), Quality Stock Arts s. 202 (toster), Radovan1 s. 317 (tablica z bezpiecznikami), Rainer Fuhrmann s. 155 (wiatr), Rhea Khoiri s. 180–181 (ikona ryby), ronstik s. 202 (palące się gniazdko elektryczne), RossHelen s. 243 (rozmowa przez domofon), Sakkmesterke s. 101 (pole elektryczne), SARIN KUNTHONG s. 196, Scharfsinn s. 285, SciePro s. 248 (mózg), Sena Ture s. 184, Set Line Vector Icon s. 325 (ikonka komputera), sirtravelalot s. 87, skimin0k s. 329, Stepniak s. 294, 295, SURKED s. 140, Triff s. 28, Vadim Sadovski s. 49 (Układ Słoneczny), vectorwin s. 324–325 (ikonki transformatorów), VesnaArt s. 187, View Factor Images s. 157, Vladi333 s. 15 (Słońce), Wirestock Creators s. 300, Witthaya Silaphong s. 318, wizdata s. 30 (parking dla autobusów), wk1003mike s. 316, Yiistocking s. 333 (stymulacja mózgu); **Anna Budzyńska:** s. 77 (doświadczenie), s. 78 (doświadczenie), s. 80 (doświadczenia), s. 84, 86, 95 (doświadczenie), s. 96, 98, 101 (doświadczenie), s. 124 (doświadczenie), s. 125, 127 (doświadczenie), s. 130, 142, 153, 155 (doświadczenie), s. 166 (doświadczenie), s. 170, 172, 174, 177, 179 (bateria), 183, 185, 189, 201, 205 (doświadczenie), s. 206, 209, 212, 231 (doświadczenie), s. 232, 234 (doświadczenie), s. 235 (doświadczenie), s. 236, 237, 239, 241 (doświadczenia), s. 242, 245 (doświadczenie), s. 250, 253, 262 (doświadczenie), s. 267, 270, 274, 275, 287, 289, 293, 303, 312, 314 (bezpiecznik), s. 323 (doświadczenie), s. 330, 331, 332 (doświadczenie), s. 334 (doświadczenie), s. 335 (doświadczenie); **Miłosz Budzyński:** s. 23, 95 (rakieta na komary), s. 137, 207, 232 (magnes neodymowy), s. 233 (doświadczenie); **Maciej Wróbel:** s. 25 (doświadczenie), s. 43; **Aspelmeyer group**: University of Vienna s. 32 (moneta); **ESO:** European Southern Observatory/L. Calçada s. 49 (dysk protoplanetarny); **HZB:** Helmholtz-Zentrum Berlin for Materials and Energy s. 234 (zdjęcie pola magnetycznego zwizualizowanego za pomocą tomografii neutronowej); **National Photo Company Collection:** Library of Congress Prints and Photographs Division Washington (Narodowe Biuro Standaryzacji w Waszyngtonie); **Teleskopy.pl** s. 12 (obrotowa mapa nieba); **Tunç Tezel** s. 8 (pętla zakreślona przez planetę Mars); **Wikipedia:** Wikimedia Commons/Lijnis Nelemans/Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license (CC BY-SA 3.0) s. 233 (lewitująca żaba).

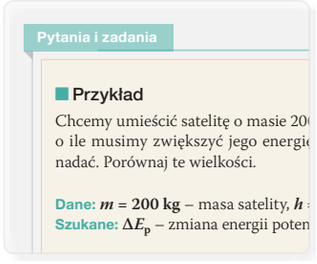
nowa era *Twoje mocne strony*

NOWE
Zrozumieć fizykę

Za co polubisz podręcznik *NOWE Zrozumieć fizykę 3*?

Powód 1

Dużo przykładów rozwiązanych zadań. Czy to przydatne? Tak. Łatwiej poradzisz sobie z samodzielnym rozwiązaniem podobnych zadań.



Powód 2

***Ważne w tej lekcji* i podsumowania po działach.** Wiesz, czego się nauczyć na kartkówkę i sprawdzian. Łatwo możesz sobie przypomnieć i przećwiczyć to, co najważniejsze.

Powód 3

Matura. Dobrze jest mieć podręcznik, który uczy rozwiązywania takich zadań, jakie pojawiają się na maturze. Dzięki temu możesz mieć pewność, że **Wiesz, umiesz, zdasz**.

Nowa Era Sp. z o.o.
www.nowaera.pl nowaera@nowaera.pl
Centrum Kontaktu: 58 721 48 00

ISBN 978-83-267-5348-0