

Fizyka

ZAKRES PODSTAWOWY



Zmiana MEN 2024



Oznaczono usunięte
i zmienione treści

3

Podręcznik dla **szkół ponadpodstawowych**

Adam Ogaza

Fizyka

Podręcznik dla **szkół ponadpodstawowych**

3

ZAKRES PODSTAWOWY

 **OPERON**
Edukacja jest podróżą

2024

Projekt okładki: Paweł Kwacz
Redaktor prowadzący: Jarosław Dworowski
Redakcja językowa i korekta techniczna: Marlena Dobrowolska
Redakcja graficzna i skład: Maciej Laska

Zdjęcia: Adam Ogaza, Fizyka LO Turek/Adam Bartczak, Kamioka Observatory/ICRR (Institute for Cosmic Ray Research)/The University of Tokyo, NASA/JPL-Caltech/KSC/DOE, Pixabay, Shutterstock, Wikipedia, Wikipedia/Afrank99/CC BY-SA 2.0, Wikipedia/Amfeli/CC BY 4.0, Wikipedia/André Karwath aka Aka/CC BY-SA 2.5, Wikipedia/Briho/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Chrumps/CC BY 2.5, Wikipedia/Dominik49/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Drahreg01/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Eigenes Werk/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/F1jmm/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Gegik/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Gladson Machado/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Gunnar Ries/CC BY-SA 2.5, Wikipedia/Hannes Grobe/CC BY 3.0, Wikipedia/Hannes Grobe/AWI/CC BY 3.0, Wikipedia/Horst Frank/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Jan Pavelka/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Josh Spradling The Planetary Society/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Kingled/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Kulmalukko/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Mataresephotos/CC BY 3.0, Wikipedia/Mikell Johnson/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/Omegatron/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/PanSG/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Rainer Gutsche/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Rama/CC BY-SA 2.0 fr, Wikipedia/Romesis Panteleimon/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Rswilcox/CC BY-SA 4.0, Wikipedia/Zeltech/CC BY-SA 3.0, Wikipedia/ Σ 64/CC BY 3.0.

OPERON Sp. z o.o. oświadcza, że z należytą starannością podjął wszelkie działania zmierzające do powiadomienia podmiotów majątkowych praw autorskich do utworów słownych i fotograficznych wykorzystanych w podręczniku o zamiarze ich publikacji celem uzyskania od twórców lub ich następców prawnych wymaganej zgody za przysługującym wynagrodzeniem w stosownej wysokości. Osoby, których prawa w sposób niezawiniony przez wydawnictwo zostały naruszone, prosimy o bezpośredni kontakt z wydawcą.

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 w zakresie podstawowym na poziomie szkoły ponadpodstawowej, na podstawie opinii rzeczoznawców: dr. Stanisława Jakubowicza, mgr Teresy Kutajczyk, mgr. Rafała Janusa.

Etap edukacyjny: III

Typ szkoły: szkoła ponadpodstawowa

Zakres kształcenia: podstawowy

Rok dopuszczenia: 2021

Numer dopuszczenia: 1036/3/2021

© OPERON Sp. z o.o. & Adam Ogaza

Gdynia 2021

Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie w całości lub we fragmentach bez zgody wydawcy zabronione.

N7340

Wydawca:

OPERON Sp. z o.o.

81-541 Gdynia, al. Zwycięstwa 96/98

tel. centrali 58 679 00 00

e-mail: info@operon.pl

www.operon.pl

ISBN 978-83-8197-118-8

Zgodnie z decyzją MEN od września 2024 r. obowiązuje zmieniona, uszczuplona o ok. 20% podstawa programowa. W związku z tym w podręczniku znalazły się stosowne oznaczenia.



Takim symbolem oznaczono treści usunięte z podstawy programowej.



Takim symbolem oznaczono treści, które zostały zmienione. Nauczyciel przedstawi uczniowi zmiany i wyjaśni, czego powinien się nauczyć.

Spis treści

1. Prąd elektryczny

1.1. Natężenie prądu	10	
1.2. Napięcie elektryczne	14	
1.3. Moc prądu elektrycznego	18	
1.4. Opór elektryczny. Prawo Ohma	21	
1.5. Przewodnictwo elektryczne ciał stałych	26	
1.6. Obwody elektryczne	33	
1.7. Pierwsze prawo Kirchhoffa	39	
1.8. Ogniwa. Łączenie ogniw	44	
1.9. Dioda półprzewodnikowa	49	
1.10. Tranzystor	57	
Analiza tekstu: Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe	62	

2. Magnetyzm

2.1. Pole magnetyczne	68
2.2. Badanie linii pola magnetycznego	72
2.3. Oddziaływanie pola magnetycznego na przewodniki z prądem	77
2.4. Oddziaływanie pola magnetycznego na poruszające się ładunki	83
2.5. Indukcja elektromagnetyczna	90
2.6. Prądnicą. Prąd przemienny	95
2.7. Zastosowania zjawiska indukcji elektromagnetycznej	100
Analiza tekstu: Nieświadomie stworzyliśmy tarczę chroniącą Ziemię	107

3. Fale i optyka

3.1. Fale mechaniczne	112	
3.2. Rozchodzenie się fal. Dyfrakcja	119	
3.3. Interferencja fal	122	
3.4. Zjawisko Dopplera	128	
3.5. Całkowite wewnętrzne odbicie	132	
3.6. Polaryzacja światła	140	
3.7. Rozszczepienie światła	148	
3.8. Zjawiska optyczne w przyrodzie	153	
Analiza tekstu: Zjawiska optyczne w przyrodzie	160	

4. Fizyka atomowa

4.1. Promieniowanie termiczne	166	
4.2. Foton i jego właściwości	170	
4.3. Widma atomowe	174	
4.4. Model Bohra budowy atomu	180	
4.5. Zjawisko fotoelektryczne i fotochemiczne	186	
Analiza tekstu: Żagiel kosmiczny	194	

5. Fizyka jądrowa

5.1. Odkrycie i właściwości jądra atomowego	198
5.2. Promieniotwórczość naturalna	204
5.3. Rozpady promieniotwórcze	210
5.4. Reakcje jądrowe	216
5.5. Energia jądrowa i deficyt masy	221
5.6. Wpływ promieniowania jonizującego na materię i organizmy żywe	226
5.7. Zastosowania zjawiska promieniotwórczości w technice	232
5.8. Zastosowania zjawiska promieniotwórczości w medycynie	236
5.9. Reakcje rozszczepienia	239
5.10. Energetyka jądrowa	243
5.11. Reakcje termojądrowe	249
5.12. Ewolucja gwiazd	254
Analiza tekstu: Neutrino	261
Odpowiedzi do zadań	269
Indeks	270

Wstęp

Jak jest zbudowany nasz podręcznik

Podręcznik pozwala na pełne wykorzystanie nowoczesnych metod dydaktycznych w nauczaniu fizyki. Zgodnie z założeniami reformy programowej uczniowie liceów i techników będą się uczyć tego przedmiotu w zakresie podstawowym w klasach:

- pierwszej w wymiarze 1 godziny tygodniowo,
- drugiej w wymiarze 1 godziny tygodniowo,
- trzeciej w wymiarze 2 godzin tygodniowo.

Zanim zaczniecie korzystać z podręcznika, zapoznajcie się z jego budową i przyjrzyjcie się wszystkim jego elementom. Zostały one skonstruowane tak, by ułatwić wam naukę i pomóc w błyskawicznym znalezieniu potrzebnych informacji.

Każdy rozdział podręcznika otwiera **spis tematów** z danego obszaru.

Bezpośrednio pod tytułem tematu znajdziecie moduł **„Na tej lekcji”** – jego zadaniem jest ukierunkowanie was na cele realizowane w danym temacie.

Doświadczenia to blok zadań, w których działacie praktycznie. Umożliwi to wam zrozumienie zagadnień fizycznych poprzez działanie. Przekonacie się, że nauka fizyki jest ciekawa.

W tekście pojawiają się **wytłuszczenia**. Dzięki nim łatwiej odnajdziecie istotne zagadnienia, pojęcia i nazwy.



Przykład

Samochód przejeżdża obok nieruchomego obserwatora z prędkością $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oblicz, o ile procent zmieniła się w tym momencie częstotliwość dźwięku samochodowego odgłosu przez obserwatora. Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Rozwiązanie:

W treści zadania nie podano częstotliwości nadawanej przez źródło, ale nie jest ona potrzebna, ponieważ mamy obliczyć jedynie względną zmianę wartości tej częstotliwości.

Dane:

$$v_s = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Szukane:

$$\frac{f_n}{f_o} = ?$$

Prędkość samochodu jest 17 razy mniejsza od prędkości dźwięku, co sprowadza nas do zastosowania wzoru przybliżonego.

Gdy samochód się zbliża, obserwator rejestruje częstotliwość $f_n = f_o \left(1 + \frac{v_s}{v}\right)$.

Gdy samochód się oddala, odbierana częstotliwość zmniejsza się do wartości $f_n = f_o \left(1 - \frac{v_s}{v}\right)$.

Stosunek tych częstotliwości wynosi:

$$\frac{f_n}{f_o} = \frac{f_o \left(1 + \frac{20}{340}\right)}{f_o \left(1 - \frac{20}{340}\right)}, \quad \frac{f_n}{f_o} = \frac{1 + \frac{1}{17}}{1 - \frac{1}{17}} = \frac{18}{16} = 1,125 = 11,25\%$$

Częstotliwość zmieniła zatem o 11,25 w stosunku do wartości odbieranej na początku.

Odpowiedź: Częstotliwość dźwięku odbieranego przez obserwatora podczas przejazdu samochodu zmniejszyła się o 11,25.

Zastosowanie zjawiska Dopplera

Zjawisko Dopplera znalazło liczne zastosowania. Jeśli mamy częstotliwość fali nadawanej i odbieranej, to przekształcając wzór możemy łatwo obliczyć prędkość danego obiektu. W tym celu możemy na przykład wyznaczyć jego stronę i jego zmianę częstotliwości, a następnie zmierzyć częstotliwość fali odbitej. W pomiarach możemy używać zarówno fal dźwiękowych, jak i elektromagnetycznych o różnych zakresach częstotliwości. Jeśli obiekt nie porusza się wprost w kierunku obserwatora, wtedy należy uwzględnić, tak by uwzględniły się składową prędkości, która jest na prostej przechodzącej przez punkt obserwacji.

Często spotykamy w życiu codziennym przykładem użycia wykorzystującego efekt Dopplera jest radar policyjny. Jego najważniejszą częścią jest tak zwany oscylator emitujący mikrofalę fali elektromagnetycznej o długości rzędu milimetrów.

Śledźcie uważnie **rozwiązania przykładów**, a łatwiej zrozumiecie omawiane zagadnienia.



Światło białe

Światło białe – mieszanina fal elektromagnetycznych o długościach z przedziału 380–780 nanometrów, odpowiadających kolorom: czerwony, pomarańczowy, żółty, zielony, błękitny, granatowy i fioletowy.

Tabela 1. Barwy składowe światła

Barwa	λ , nm	Częstotliwość, THz
czerwony	780–630	385–476
pomarańczowy	630–590	476–508
żółty	590–550	508–545
zielony	550–490	545–613
błękitny	490–440	613–682
fioletowy	440–380	682–789

Efekt rozkładu dowolnego promieniowania (np. światła) na poszczególne składowe odpowiadające różnym długościom i częstotliwościom fali nazywamy widzeniem. Typem jest więc widzenie światła białego. Jest to widzenie ciągłe, co oznacza, że nie ma w nim „dziur”. Fale o wszystkich długościach z pewnego przedziału są w nim reprezentowane i każdy płynnie przechodzą jeden w drugi. Wartości graniczne 380 nm i 780 nm nie wynikają z jakichś przesłanek fizycznych, a jedynie z możliwości percepcyjnych ludzkiego oka. Są to wartości przybliżone i indywidualne dla poszczególnych osób. Różne zwierzęta, zwłaszcza polujące w nocy, dostrzegają również fale o innych długościach, niewidoczne dla człowieka.

Spektroskop

Oprócz widma ciągłego istnieje wiele innych rodzajów widm (będzie o nich mowa na lekcjach fizyki atomowej). Ich badaniem zajmuje się dział nauki i techniki zwany analizą widmową. Podstawowym narzędziem badawczym analizy widmowej jest spektroskop.

spektroskop

Spektroskop rozkłada badane światło na elementy składowe i umożliwia wygodną obserwację otrzymanego widma. W centralnej części spektroskopu znajduje się element rozpraszający światło, najczęściej pryzmat. Światło z badanego źródła do pryzmatu jest doprowadzane za pomocą kolimatora, który rozpoczyna się szczeliną i zwierciadłem soczewki skupiającej, że światło ze źródła biegnie dalej równoległe. Światło rozpraszające w pryzmacie trafia następnie do kamery, której skład optyczny doprowadza światło do oka obserwatora. Profesjonalne spektroskopy są wyposażone jeszcze w dodatkowy układ, którego zadaniem jest zachowanie skali na obserwowane widmo. Ponieważ fale o różnych długościach zginają się w pryzmacie pod różnymi kątami, wyniesione elementy są ruchome i dają się obrócić wokół osi z pryzmatem. Obserwacje widma powinny się odbywać w pomieszczeniach zaizolowanych, aby światło zewnętrzne nie zafałszowało badanego obrazu.

Definicje, prawa i zasady wyróżniono kolorową czcionką. Dzięki temu od razu je zauważycie i szybko znajdziecie podczas powtórek.

Tabele i wykresy pomogą wam usystematyzować wiedzę.

Hasła na marginesach to treści obowiązkowe do zapamiętania z lekcji. Zostaną one powtórzone w podsumowaniu lekcji.

W oknach **Chcesz wiedzieć więcej?** znajdziecie dodatkowe treści dla osób interesujących się danym tematem.

Zadania do rozwiązania przećwiczycie w toku lekcji lub wykorzystacie do nauki w domu lub przed kartkówką czy sprawdzianem. Zadania o podwyższonym stopniu trudności oznaczono gwiazdką: 4*.

Uwaga: podręcznik jest przeznaczony do wielokrotnego użytku, dlatego wszystkie odpowiedzi do zadań oraz rozwiązania ćwiczeń zapisujcie w zeszycie.

Podsumowanie lekcji to esencja najważniejszych treści do zapamiętania. Jeśli ich nie pamiętacie, wróćcie na stronę wskazaną obok. Znajdziecie tam na marginesie odpowiednie hasło, a w treści lekcji – jego omówienie.

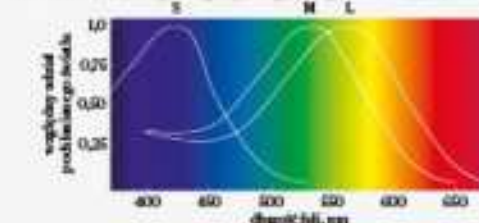
Podsumowanie przed sprawdzianem zawiera najważniejsze treści do zapamiętania z rozdziału. Jeśli ich nie pamiętacie, wróćcie na stronę wskazaną obok i poszukajcie hasła na marginesie.



3. FALE I OPTYKA

Chcesz wiedzieć więcej?

W oko ludzkie wpadają co około 4,5 miliona cząstek rozmiarowych w skąpej-
lerych skupiskach, przy czym najwięcej jest cząstek skupionych na barwę niebieską.



Ryc. 36. Wrażliwość cząstek w oku ludzkim na fale o różnych długościach: S – cząstek
skupionych na barwę niebieską, M – na barwę zieloną, L – na barwę czerwoną.

Niektóre fale rozprzeczają się z dyfrakcją światła, co jest przyczyną tak zwanego efektu barwy (dyspersji) – brakuje wrażliwości rozmiarów
niektórych cząstek, które widać od czasu tej chwili, zależnych od stopnia upodoba-
nia poszczególnych rodzajów cząstek.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyliczając długość fali podane w tabeli, aby obliczyć częstotliwość fali światła odpowia-
jących kolorom światła i składowym kolorom.
2. Dowiedz się, co to jest szerokość promienia i przegięcie światła w tym temacie.
3. Dowiedz się, co to jest szerokość i przegięcie światła w tym temacie i jak wpływa na poszcze-
gólne barwy.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Rozprzeczanie światła (dyspersja) to proces rozdzielania światła na poszczególne składowe od-
powiadające różnym długościom fali.
- Rozprzeczanie światła dokonuje się za pomocą pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej.
- Efektem rozkładu światła na składowe jest widmo tego promieniowania.
- Światło białe jest mieszaniną wszystkich kolorów widzialnych i ma widmo ciągłe – występuje w nim
wszystkie fale elektromagnetyczne o długościach z zakresu od około 380 nm do około 780 nm.
- Do obserwacji widła światła używa się spektroskopu, a do jego rejestracji – spektrogramu.

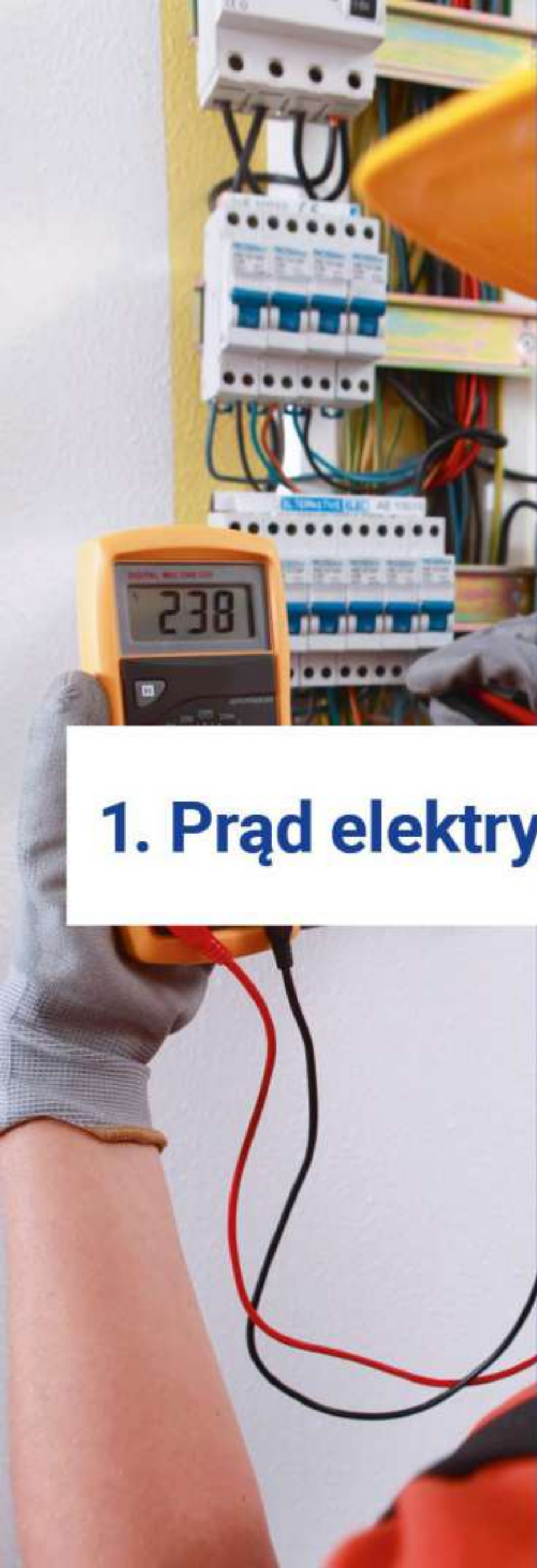
162

PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM



PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

1. Fala, to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie równowagi ośrodka sprężystego. s. 109
2. Fala jest nośnikiem energii i informacji. Wraz z falą nie przenosi się materii. s. 109
3. Właściwości fali opisuje kilka wielkości: długość, okres, częstotliwość i prędkość. s. 109
4. Kierunek i kształt fali opisuje się za pomocą pojęć: promieniowanie fali, czoło fali, promień fali. s. 109
5. Istnieje wiele rodzajów fali. Można je podzielić ze względu na naturę, kierunek drgań cząstek, wy-
miar przestrzeni, w której rozchodzi się fala, oraz kształt czoła fali. s. 109
6. Rozchodzenie się fali zależy przede wszystkim od rodzaju ośrodka, w którym się rozchodzi. s. 109
7. Ugięcie (zwane dyfrakcją) to zjawisko, które polega na rozchodzeniu się fali w kierunku, w którym to-
go nie ma. Jest to zjawisko, które obserwujemy w życiu codziennym. s. 109
8. Interferencja to zjawisko nakładania się na siebie fali. Wynika ona z zasady superpozycji. s. 109
9. Gdy fale spotykają się w tych samych punktach, to następuje wzajemne interferowanie. Jeśli
w przestrzeni – obserwujemy wygaszenie. s. 109
10. Zjawisko Dopplera polega na zmianie częstotliwości fali odbieranej przez obserwatora, wynikają-
cej z ruchu źródła fali lub obserwatora względem ośrodka, w którym rozchodzi się fala. Dotyczy
to wszystkich fali, w szczególności dźwiękowych i elektromagnetycznych. s. 109
11. Gdy źródło i obserwator oddalają się od siebie, częstotliwość odbierana jest większa od nadawanej, a
gdy się oddalają – mniejsza. s. 109
12. Zjawisko Dopplera ma wiele zastosowań m.in. w radiach, przepływowościach, ultraso-
nografii dopplerowskiej oraz w astronomii. s. 109
13. Całkowite wewnętrzne odbicie to zjawisko całkowitego odbicia promienia światła w ośrodku, w
którym prędkość rozchodzenia się światła jest mniejsza, po dotarciu do granicy z ośrodkiem, w
którym prędkość rozchodzenia się światła jest większa, pod kątem większym niż kąt graniczny. s. 109
14. Kąt graniczny zależy od rodzaju ośrodka, z którego światło wychodzi i do jakiego ośrodka. s. 109
15. Wartość kąta granicznego zależy od prędkości światła w rozchodzących się ośrodkach. s. 109
16. Całkowite wewnętrzne odbicie ma wiele zastosowań m.in. w światłowodach, laserach, świa-
tłach włókniowych i w telekomunikacji. s. 109
17. Polaryzacja fali to uprządkowanie kierunku jej drgań. Polaryzacja polega na wyłączeniu fali po-
prosto. s. 109
18. Fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi. Drgania pola elektrycznego i magnetycznego
odbywają się prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali. Jednym z kierunków polaryzacji światła
przebiega kierunek drgań pola elektrycznego. s. 109
19. Światło można polaryzować m.in. przez natężenie światła polaryzacyjnego, kryształów dwój-
światłowych oraz poprzez odbicie od powierzchni dielektrycznych. s. 109
20. Polaryzacja światła ma wiele zastosowań m.in. w słowach statystycznych, fotografii, s. 109
21. Rozprzeczanie światła (dyspersja) to rozdzielanie światła na poszczególne składowe odpowia-
dające różnym długościom fali. Dokonuje go można za pomocą pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej. s. 109



Pod koniec klasy drugiej rozpoczęliśmy naukę o elektryczności. Zajmowaliśmy się ładunkami nieruchomymi, które są przedmiotem badań elektrostatyki. Kolejne tematy będą dotyczyć ładunków poruszających się w sposób uporządkowany. Takie przemieszczanie się ładunków nazywamy prądem elektrycznym.

Prąd elektryczny jest niezwykle ważnym zjawiskiem. Bez niego nasza cywilizacja w ogóle by nie powstała. Nie mogłyby się nawet rozwijać żywe organizmy. Impulsy nerwowe, odbieranie bodźców wzrokowych lub dotykowych lub przesyłanie sygnałów do mięśni, aby się poruszyły, to nic innego jak prądy elektryczne płynące w żywych tkankach. Wyładowanie elektryczne podczas burzy to także przykład prądu elektrycznego. Jest to więc zjawisko powszechne.

Zdobyliście elementarną wiedzę o prądzie elektrycznym w szkole podstawowej. Obecnie będziecie mieli okazję tę wiedzę powtórzyć i rozwinąć.

1. Prąd elektryczny

- ▶ Natężenie prądu
- ▶ Napięcie elektryczne
- ▶ Moc prądu elektrycznego
- ▶ **Opór elektryczny. Prawo Ohma** 
- ▶ Przewodnictwo elektryczne ciał stałych
- ▶ Obwody elektryczne
- ▶ Pierwsze prawo Kirchhoffa
- ▶ Ogniwa. Łączenie ogniw
- ▶ Dioda półprzewodnikowa
- ▶ **Tranzystor** 
- ▶ Analiza tekstu: Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe



1.1. Natężenie prądu

NA TEJ LEKCJI:

- powtórzysz wiadomości o tym, co to jest prąd elektryczny, i uzupełnisz swoją wiedzę w tym zakresie;
- przypomnisz sobie definicję natężenia prądu elektrycznego i jego jednostkę.

Mikroskopowy obraz prądu elektrycznego

Definicję prądu elektrycznego znasz ze szkoły podstawowej. To zjawisko towarzyszy ci na każdym kroku i jest między innymi podstawą działania wszelkich urządzeń elektrycznych w twoim otoczeniu. Najprostszą definicję prądu elektrycznego podano poniżej.

prąd
elektryczny

Prąd elektryczny – uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.

Na tej podstawie można wysnuć wniosek, że w normalnych warunkach ładunki są nieruchome, a jeśli uda się je wprowadzić w ruch, to będą się poruszać jeden za drugim z jednakowymi prędkościami. To przypuszczenie jest błędne.

Zacznijmy od przypomnienia, że cała materia jest zbudowana z atomów, a te są złożone z jąder atomowych i krążących wokół nich elektronów. Jądra atomowe mają ładunek dodatni, gdyż oprócz obojętnych elektrycznie neutronów zawierają również dodatnio naładowane protony. Elektrony mają ładunki ujemne. Ciała obojętne elektrycznie zawierają jednakową liczbę protonów i elektronów. Ich ilość jest ogromna. W każdym gramie dowolnej substancji liczba ładunków elementarnych każdego znaku jest rzędu 10^{23} .

Jądra atomowe są znacznie cięższe od elektronów i decydują o lokalizacji atomu. W ciałach stałych jądra atomowe w zasadzie nie przemieszczają się z miejsca na miejsce, a jedynie drgają wokół położenia równowagi. Elektrony mogą być uwięzione w poszczególnych atomach lub mieć swobodę ruchu. Zostanie to szczegółowo omówione na jednej z najbliższych lekcji. Ciała, w których elektrony mają swobodę ruchu, nazywa się przewodnikami. W przewodnikach właśnie elektrony są nośnikami prądu elektrycznego.

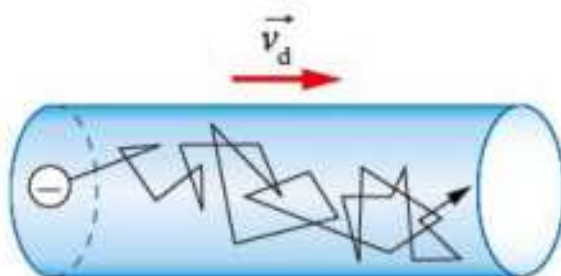
nośniki prądu
elektrycznego
w przewodnikach

Jak pamiętasz ze szkoły podstawowej, cząsteczki wszystkich substancji o temperaturze większej niż zero bezwzględne drgają, a energia kinetyczna tych drgań jest proporcjonalna do temperatury. Dotyczy to w pewnym sensie również swobodnych elektronów. Elektrony są bardzo lekkie, więc ich prędkości przy danej energii kinetycznej muszą być ogromne – w przewodniku o temperaturze pokojowej wynoszą około $100 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Elektrony nieustannie zderzają się ze sobą i odbijają od elementów



sieci krystalicznej, więc kierunki ich prędkości są ułożone przypadkowo – tyle samo elektronów porusza się w górę i na dół, w lewo i prawo itd. Wypadkowa tych prędkości wynosi zero i w normalnych warunkach prąd elektryczny w przewodniku nie płynie.

Gdy umieścimy przewodnik w polu elektrycznym, na poruszające się w ten sposób elektrony zaczyna działać siła elektryczna. Powoduje ona, że do chaotycznych prędkości własnych elektronów dodaje się tak zwana prędkość unoszenia (zwana też prędkością dryfu, v_d), skierowana dla wszystkich elektronów w tę samą stronę. W typowych warunkach jest ona bardzo mała, rzędu ułamków milimetra na sekundę, ale powoduje, że te pędzące w przypadkowych kierunkach elektrony jako całe zbiorowisko przemieszczają się w tę samą stronę (rys. 1). To właśnie nazywamy **prądem elektrycznym**.



Rys. 1. Mikroskopowy obraz prądu elektrycznego w przewodniku.

Chcesz wiedzieć więcej?

Prędkość **dryfu elektronów**, a więc prędkość prądu elektrycznego, jest bardzo mała – około $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Jednak jeśli podłączymy napięcie do przewodnika, prąd zaczyna płynąć w zasadzie natychmiast w całej jego objętości. Dlaczego tak się dzieje? Otóż informacja o tym, że przewodnik został umieszczony w polu elektrycznym rozchodzi się z prędkością światła. Tak więc wszystkie elektrony w przewodniku w zasadzie natychmiast „dowiadują się”, że działa na nie siła elektryczna i ich ruch staje się bardziej uporządkowany. Nie należy mylić prędkości samych ładunków z prędkością impulsu pola elektrycznego, które skłania ładunki do ruchu.

Prąd elektryczny przewodzą również niektóre ciecze oraz – w pewnych warunkach – gazy. Do przewodzących cieczy zalicza się między innymi elektrolity, czyli wodne roztwory kwasów, zasad lub soli. Stosuje się je na przykład w ogniwach i akumulatorach (zostaną omówione w dalszej części podręcznika). Nośnikami prądu w elektrolitach są jony dodatnie i ujemne, czyli atomy lub grupy atomów mające niedomiar lub nadmiar elektronów. Jony również wykonują chaotyczne ruchy, które pod wpływem pola elektrycznego ulegają częściowemu uporządkowaniu.

W gazach również występują jony dodatnie i ujemne oraz swobodne elektrony. Dzięki nim na przykład występują pioruny, dochodzi do przeskoku iskry między elektrodami maszyny elektrostatycznej czy jest możliwe działanie świetłówki.

nośniki prądu
elektrycznego
w cieczach

nośniki prądu
elektrycznego
w gazach





1. PRĄD ELEKTRYCZNY

Rys. 2. Benjamin Franklin (1706–1790) – wybitny uczony i polityk (jeden z ojców założycieli Stanów Zjednoczonych). Odkrył m.in., że istnieją dwa rodzaje ładunków elektrycznych, które nazwał dodatnimi i ujemnymi. Jest jednym z wynalazców piorunochronu (w podobnym czasie niezależnie tego samego odkrycia dokonał w Czechach Václav Prokop Diviš, czytaj: waclaw prokop diwisz). Podobizna Franklina widnieje na banknotach studolarowych.



kierunek
przepływu prądu

W połowie XVIII wieku, gdy jeszcze nie rozumiano istoty elektryczności i sądzono, że atomy są niepodzielne, amerykański uczony i polityk Benjamin Franklin proponował umowę, zgodnie z którą prąd elektryczny płynie od bieguna dodatniego do ujemnego. Ta propozycja przyjęła się na całym świecie i obowiązuje do dziś. Obecnie, gdy znamy już cząstki elementarne będące nośnikami ładunku, wiemy, że kierunek przepływu prądu jest zgodny z kierunkiem ruchu nośników jedynie w przypadku jonów dodatnich. Elektrony w przewodnikach poruszają się przeciwnie niż umowny kierunek przepływu prądu. Nie stanowi to jednak żadnego problemu, gdyż ruch ładunków dodatnich w jedną stronę powoduje identyczne skutki jak ruch ładunków ujemnych w stronę przeciwną. Wobec tego podczas analizy obwodów elektrycznych nie ma znaczenia, że nośnikami prądu są ujemnie naładowane elektrony płynące w przeciwną stronę niż kierunek umowny.

Natężenie prądu elektrycznego

Wielkością fizyczną określającą w sposób ilościowy prąd elektryczny jest jego natężenie. Pojęcie to zostało omówione w szkole podstawowej.

natężenie prądu
elektrycznego

Natężenie prądu elektrycznego – stosunek ładunku, jaki przepłynął przez poprzeczny przekrój przewodnika, do czasu, w którym ten przepływ nastąpił.

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

Jednostką natężenia prądu elektrycznego jest 1 amper (1 A). Jest to jednostka podstawowa SI i ma swoją niezależną definicję opartą na wartościach fundamentalnych stałych fizycznych. Na podstawie powyższego wzoru można określić, że:

jednostka
natężenia prądu
elektrycznego

1 amper – natężenie prądu elektrycznego, który w ciągu sekundy przenosi przez poprzeczny przekrój przewodnika ładunek 1 kulomba.

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

Po przekształceniu wzoru do postaci $q = I \cdot t$ otrzymujemy formalną definicję jednostki ładunku elektrycznego, którą znasz z klasy drugiej:

jednostka ładunku
elektrycznego

1 kulomb – ładunek, jaki prąd o natężeniu 1 ampera przenosi w ciągu 1 sekundy.

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$$



Do pomiaru natężenia prądu elektrycznego służy miernik zwany **amperomierzem**. Ze względu na konstrukcję wyróżnia się amperomierze analogowe (mające wskazówkę) oraz cyfrowe (wyświetlające wynik pomiaru w postaci liczby). Aby zmierzyć natężenie prądu, trzeba podłączyć amperomierz do obwodu w taki sposób, aby prąd płynął przez niego w kierunku zgodnym z oznaczeniami na zaciskach amperomierza.



Rys. 3. Amperomierz analogowy i cyfrowy oraz symbol amperomierza stosowany na schematach obwodów elektrycznych.

Jak pamiętamy z klasy 2, wartość ładunku elementarnego wynosi $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Dzięki temu możemy obliczyć liczbę elektronów przepływających przez przewodnik, gdy znane jest natężenie prądu w tym przewodniku.

Przykład

Miliamperomierz wskazuje przepływ prądu o natężeniu 32 mA. Oblicz, ile elektronów przepływa w ciągu sekundy przez wybrany przekrój przewodnika w obwodzie miliamperomierza.

Rozwiązanie.

Dane:

$$I = 0,032 \text{ A}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

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

Szukane:

$$n = ?$$

Przypomnijmy, że każdy ładunek w przyrodzie jest wielokrotnością ładunku elementarnego:

$$q = n \cdot e$$

n – poszukiwana liczba elektronów

Podstawmy to wyrażenie do wzoru definiującego natężenie prądu:

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

Po przekształceniu otrzymujemy: $n = \frac{It}{e}$,

$$\text{a zatem } n = \frac{0,032}{1,6 \cdot 10^{-19}} = \frac{3,2 \cdot 10^{-2}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2 \cdot 10^{17}.$$

Odpowiedź: W ciągu jednej sekundy przez poprzeczny przekrój przewodnika w obwodzie miliamperomierza przepływa $2 \cdot 10^{17}$ elektronów.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz, ile czasu potrzeba, aby prąd o natężeniu 50 mA przeniósł ładunek 25 C.
2. Przez przekrój przewodnika w ciągu minuty przepłynęło $24 \cdot 10^{18}$ elektronów. Oblicz średnie natężenie prądu w tym przewodniku.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 10 • Prąd elektryczny to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.
- s. 10 • Nośnikami prądu elektrycznego w metalach są elektrony, a w cieczach i gazach – jony dodatnie lub ujemne.
- s. 12 • Umownie przyjmujemy, że prąd płynie od bieguna dodatniego do ujemnego, czyli zgodnie z ruchem ładunków dodatnich. Elektrony poruszają się przeciwnie niż umowny kierunek prądu.
- s. 12 • Wielkością fizyczną opisującą prąd elektryczny jest natężenie prądu elektrycznego. Oznacza ono stosunek ładunku, jaki przepłynął przez poprzeczny przekrój przewodnika do czasu, w którym ten przepływ nastąpił.
- s. 12 • Natężenie prądu elektrycznego wyrażamy w amperach. Jest to jednostka podstawowa SI.
- s. 12 • 1 kulomb to ładunek, jaki prąd o natężeniu 1 ampera przenosi w ciągu 1 sekundy.

1.2. Napięcie elektryczne

NA TEJ LEKCJI:

- powtórzysz wiadomości związane z pojęciem napięcia elektrycznego i jego rolę w przepływie prądu elektrycznego;
- przeciwicysz rozwiązywanie zadań dotyczących napięcia.

Aby w pełni zrozumieć pojęcie napięcia elektrycznego, warto posłużyć się bardziej intuicyjną analogią hydrauliczną. Porównanie przewodników do rur, a przepływu prądu do przepływu wody ma głębszy sens i ułatwia zrozumienie wielu innych zagadnień dotyczących teorii obwodów elektrycznych.

Wyobraźmy sobie dwa zbiorniki wodne połączone u dołu rurą z zamontowanym na niej przepływomierzem (rys. 4a). Od czego zależy przepływ wody, wskazywany przez przepływomierz? Oczywiście będzie to różnica poziomów cieczy w obydwu zbiornikach. Cząsteczki wody znajdujące się na większej wysokości mają większą energię potencjalną. Mogą one wykonać pracę polegającą na przepchnięciu wody przez rurę i pokonaniu związanych z tym sił oporu. Proces ten będzie trwał tak długo, jak długo będzie występować różnica poziomów. Im mniejsza różnica poziomów, tym wolniejszy przepływ wody.



Co zrobić, aby woda płynęła przez rurę w jednakowym tempie? Otóż należy zapewnić stałą różnicę poziomów poprzez zamontowanie w tej instalacji pompy (rys. 4b). Zauważmy, że pompa wykonuje pracę przeciwko sile ciężkości – pobiera wodę ze zbiornika o niższym poziomie i przelewa do zbiornika o wyższym poziomie, dzięki czemu magazynuje energię potencjalną zawartą w wodzie. Dzięki temu woda może niezmiennie przepływać przez rurę i wykonywać pracę, pokonując występujące tam opory, a przepływomierz będzie wskazywać stałą wartość szybkości przepływu. Zauważmy przy tym, że pompa musi być zasilana z zewnątrz. Praca, jaką wykona pompa, będzie równa pracy, jaką potem będzie zdolna wykonać woda.



Rys. 4. Analogia hydrauliczna obwodu elektrycznego: a) dwa zbiorniki wodne połączone u dołu rurą z zamontowanym na niej przepływomierzem, b) instalacja z dołożoną pompą.

Otóż rura jest odpowiednikiem przewodu elektrycznego, a przepływomierz – odpowiednikiem amperomierza. Przepływ wody można potraktować podobnie jak przepływ prądu elektrycznego. Natomiast pompą wprowadzającą układ w ruch jest źródło napięcia.

Źródła napięcia zostaną szczegółowo omówione w dalszej części podręcznika, teraz skupmy się na samej ich idei z punktu widzenia zasady zachowania energii. **Źródło napięcia** musi być zasilane, tak jak zasilana jest pompa tłocząca wodę. W przypadku źródeł przenośnych, takich jak ogniwo elektryczne lub akumulator, energia ta jest czerpana z reakcji chemicznych. W przypadku zasilacza podłączonego do gniazdka elektrycznego, po drugiej stronie kabla znajduje się elektrownia napędzana energią otrzymywaną ze spalania węgla lub w inny sposób. Napięcie między biegunami iskiernika maszyny elektrostatycznej uzyskujemy, kręcąc korbką, czyli poprzez wykonanie pracy mechanicznej. Dzięki tej energii źródło napięcia pobiera elektrony z tego bieguna, gdzie jest ich mniej, i „pompuje je” do tego bieguna, gdzie jest ich więcej. Wykonuje pracę przeciwko siłom pola elektrycznego. Magazynuje się pewien rodzaj energii zawartej w polu elektrycznym, podobnie jak to się dzieje w opisanym w klasie drugiej kondensatorze. Energia ta może zostać następnie wykorzystana na przepływ prądu elektrycznego przez obwód i wydzielenie tam ciepła, światła lub wykonanie pracy mechanicznej.

Napięcie elektryczne jest odpowiednikiem występującej w zbiornikach różnicy poziomów. Dzięki napięciu ładunki mogą przepływać z jednego punktu pola elektrycznego do drugiego, wykonując przy tym pracę. Im wyższe napięcie, tym większą pracę może wykonać dany ładunek. Podobnie im większa różnica poziomów, tym większą pracę może wykonać dana porcja wody.

źródło napięcia



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

napięcie elektryczne

Napięcie elektryczne między dwoma punktami pola elektrycznego – stosunek pracy związanej z przeniesieniem ładunku między tymi punktami do wielkości tego ładunku.

$$U = \frac{W}{q}$$

Zwróćmy uwagę, że napięcie, w przeciwieństwie do prądu elektrycznego, to nie jest coś, co płynie. Jest to pewien stan energetyczny między dwoma punktami pola elektrycznego, na przykład między dwiema dziurkami w gniazdku elektrycznym lub dwoma biegunami bateryjki. Napięcie jest konieczne, by mógł płynąć prąd, ale nie jest to warunek wystarczający. Potrzebne są jeszcze ładunki i muszą mieć one swobodę ruchu. Napięcie w gniazdku elektrycznym występuje niezależnie od tego, czy coś do niego podłączyliśmy. W nieobciążonym gniazdku prąd nie płynie. Jeśli podłączymy do niego na przykład grzałkę, między dziurkami gniazdka, czyli dwoma punktami pola elektrycznego, pojawia się przewodnik ze swobodnymi elektronami i zaczyna płynąć prąd elektryczny.

Jednostką napięcia elektrycznego jest 1 volt.

jednostka napięcia elektrycznego

Napięcie między dwoma punktami pola elektrycznego wynosi **1 volt**, jeśli przeniesienie między nimi ładunku 1 kulomba jest związane z wykonaniem pracy 1 dżula.

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$$

W źródle napięcia to wewnętrzne źródło energii wykonuje pracę przeciwko siłom pola elektrycznego, „zwiększając różnicę poziomów”. Jeśli napięcie na zaciskach źródła wynosi 1 V, to przeniesienie między nimi ładunku 1 C wbrew siłom elektrycznym wymaga wykonania pracy 1 J. Gdy do źródła podłączymy odbiornik energii elektrycznej, na przykład żarówkę, to wtedy pole elektryczne wykonuje pracę w ilości 1 J na każdy kulomb ładunku, który przepłynął między biegunami zgodnie z kierunkiem i zwrotem działania sił elektrycznych.

Napięcie elektryczne mierzymy za pomocą **woltomierzy** (rys. 5). Woltomierze wpiamy w obwód elektryczny w punkty, między którymi występuje napięcie, które chcemy zmierzyć. Woltomierze są tak skonstruowane, że przepływa przez nie prąd o znikomym natężeniu, niezbędnym jedynie do tego, by woltomierz działał. W przybliżeniu można uznać, że prąd elektryczny przez woltomierz nie płynie.

Rys. 5. Woltomierz analogowy i cyfrowy oraz symbol graficzny woltomierza stosowany na schematach.





Przykład

Przez żarówkę pracującą pod napięciem 230 V przepłynął ładunek 5 C. Oblicz wartość energii elektrycznej wydzielonej w żarówce w postaci światła i ciepła.

Rozwiązanie:

Dane:

$$U = 230 \text{ V}$$

$$Q = 5 \text{ C}$$

Szukane:

$$W = ?$$

Przekształcamy wzór na napięcie elektryczne. Energia wydzielona na odbiorniku energii elektrycznej jest równa pracy wykonanej przez pole elektryczne podczas przenoszenia ładunku.

$$U = \frac{W}{q} \Rightarrow W = qU$$

$$W = 5 \text{ C} \cdot 230 \text{ V} = 1150 \text{ J}$$

Odpowiedź: W żarówce wydzielono 1150 dżuli energii w postaci światła i ciepła.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Podczas wyładowania elektrycznego (pioruna) przepłynął ładunek 5 C i wydzielono 600 MJ energii. Oblicz napięcie między chmurami i ziemią, które spowodowało to wyładowanie.
2. Oblicz, jaki ładunek musi przepłynąć przez grzałkę pracującą pod napięciem 230 V, aby wydzielono w niej 100 kJ energii.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- W źródle napięcia dochodzi do wykonywania pracy przeciwko siłom pola elektrycznego, powodującej gromadzenie się na biegunach ładunków przeciwnego znaku. Dzieje się tak kosztem innego rodzaju energii. s. 15
- Napięcie między dwoma punktami pola elektrycznego to stosunek pracy, jaką wykonują siły pola elektrycznego, przemieszczając ładunek między tymi punktami, do wielkości tego ładunku. s. 16
- Jednostką napięcia jest 1 wolt. Jest to napięcie między dwoma takimi punktami pola elektrycznego, że przeniesienie między nimi ładunku 1 kulomba jest związane z wykonaniem pracy 1 dżula. s. 16



1.3. Moc prądu elektrycznego

NA TEJ LEKCJI:

- przypomnisz sobie wiadomości ze szkoły podstawowej dotyczące pracy i mocy prądu elektrycznego;
- będziesz odczytywać istotne dane z tabliczek znamionowych urządzeń;
- rozwiążesz zadania praktyczne dotyczące energii elektrycznej.

Wzór na moc prądu elektrycznego

praca prądu
elektrycznego

Z podanego na poprzedniej lekcji wzoru na napięcie wynika wprost wzór na **pracę prądu elektrycznego**:

$$U = \frac{W}{q} \Rightarrow W = qU$$

Jest to praca wykonana przez ładunek podczas przepływu prądu. Z przepływem prądu związana jest przemiana energii. W zależności od tego, czy jest to silnik, lutownica, radio czy telewizor, energia elektryczna może się zamieniać na pracę mechaniczną, ciepło, dźwięk, promieniowanie elektromagnetyczne itp.

Na lekcjach fizyki w szkole podstawowej i pierwszej klasie szkoły ponadpodstawowej dowiedzieliście się, że każde urządzenie można opisać parametrem zwanym mocą. Jest to stosunek pracy wykonanej przez urządzenie do czasu jej wykonania.

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

W kontekście urządzeń elektrycznych pracę należy rozumieć szerzej – jako dowolną formę energii, na jaką może się zamienić energia elektryczna. Po połączeniu powyższych dwóch wzorów oraz uwzględnieniu definicji natężenia prądu elektrycznego możemy wyprowadzić wzór na moc prądu elektrycznego:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{qU}{t} = I \cdot U$$

moc urządzenia
elektrycznego

Moc urządzenia elektrycznego jest równa iloczynowi napięcia, pod jakim pracuje urządzenie, i natężenia przepływającego przez nie prądu.

$$P = U \cdot I$$

Jak pamiętamy, jednostką mocy jest wat. Na podstawie powyższych wzorów możemy ustalić związek między watem a jednostkami napięcia i natężenia prądu:

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}} = 1 \text{ V} \cdot \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$$



Urządzenie elektryczne ma moc **1 wata**, jeśli pracując pod napięciem 1 wolta, pobiera prąd elektryczny o natężeniu 1 ampera.

$$1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$$

Informacje o parametrach eksploatacyjnych urządzeń, nie tylko elektrycznych, możemy odczytać na umieszczonych na nich tabliczkach znamionowych. Przykładową tabliczkę przedstawiono na rysunku 6.

Przykład 1.

Na podstawie tabliczki znamionowej przedstawionej na rysunku 6 oblicz natężenie prądu elektrycznego przepływającego przez grzałkę pralki podczas jej pracy.

Rozwiązanie:

Odpowiednie dane odczytujemy z tabliczki. Interesuje nas moc nie całej pralki, ale grzałki. Reszta mocy jest zużywana na napędzanie silnika i zaworów oraz funkcjonowanie całego układu elektronicznego.

Dane:

$$U = 230 \text{ V}$$

$$P = 2000 \text{ W}$$

Szukane:

$$I = ?$$

Przekształcamy wzór na moc elektryczną, aby obliczyć natężenie prądu:

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

$$I = \frac{2000 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 8,7 \text{ A}$$

Odpowiedź: Przez grzałkę podczas jej pracy przepływa prąd elektryczny o natężeniu 8,7 ampera.

PRALKA AUTOMATYCZNA

Model: WK55B8D

Numer seryjny 30845900 04

Napięcie: 230 V, ~50 Hz

Moc znamionowa: 2300 W

Moc grzałki: 2000 W



IPX4

Made in Poland

Rys. 6. Przykładowa tabliczka znamionowa urządzenia elektrycznego.

Kilowatogodzina

Grzałka pralki z powyższego przykładu w ciągu każdej sekundy swojej pracy zużywa 2000 J energii elektrycznej. Urządzenie elektryczne w naszym domu zużywa łącznie miliony dżuli energii dziennie. Do rozliczeń finansowych z zakładem energetycznym moglibyśmy zatem używać megadżuli lub gigadżuli. Ponieważ łączna moc urządzeń elektrycznych w naszych domach jest rzędu kilowatów i włączamy je raczej na godziny niż pojedyncze sekundy, wygodniejszą w warunkach domowych jednostką energii elektrycznej jest kilowatogodzina. Nazwa tej jednostki wynika z przekształcenia wzoru na moc:

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow W = P \cdot t$$

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

1 kilowatogodzina – energia elektryczna, jaką urządzenie o mocy 1 kW zużywa w ciągu 1 godziny.

kilowatogodzina



1. PRĄD ELEKTRYCZNY



Rys. 7. Licznik kilowatogodzin energii elektrycznej.

Do pomiaru ilości energii elektrycznej zużywanej w gospodarstwie domowym służy licznik kilowatogodzin energii elektrycznej (rys. 7). Urządzenie to znajduje się w każdym mieszkaniu.

Zauważmy przy okazji, że wzór na pracę prądu elektrycznego możemy też zapisać następująco:

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t$$

Z tego wynika, że $1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$.

Jeśli znamy cenę 1 kilowatogodziny energii elektrycznej, możemy obliczyć koszty eksploatacji różnych urządzeń.

Przykład 2.

Oblicz koszt dwudziestominutowego prasowania żelazkiem, którego tabliczkę znamionową przedstawiono na rysunku 8. Przyjmijmy, że cena 1 kWh energii elektrycznej wynosi 55 gr.

Rozwiązanie:

Dane:

$$P = 2200 \text{ W} = 2,2 \text{ kW}$$

$$t = 20 \text{ min} = \frac{1}{3} \text{ h}$$

$$c = 55 \frac{\text{gr}}{\text{kWh}}$$

W zadaniach, w których występują kilowatogodziny, warto zamieniać waty na kilowaty, a jednostki czasu na godziny. Ponadto zastosujemy dość oczywisty wzór z ekonomii mówiący, że:

$$\text{koszt} = \text{cena jednostkowa} \cdot \text{ilość}$$

W tym przykładzie ilością jest praca prądu elektrycznego W . Zwróćmy uwagę na jednostkę, w której wyraziliśmy cenę jednostkową. W mianowniku zawsze zapisujemy jednostkę miary, do której odnosi się cena. Dzięki temu zgadza się rachunek jednostek. Koszt oznaczamy przez k .

$$W = P \cdot t$$

$$k = c \cdot W = c \cdot P \cdot t$$

$$k = 55 \frac{\text{gr}}{\text{kWh}} \cdot 2,2 \text{ kW} \cdot \frac{1}{3} \text{ h} = 40,3 \text{ gr}$$

Odpowiedź: Koszt energii elektrycznej zużytej podczas 20 minut prasowania żelazkiem o podanej mocy wynosi około 40 groszy.



Rys. 8. Ilustracja do przykładu 2.

Szukane:

$$k = ?$$



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Na rysunku 9 przedstawiono tabliczkę znamionową miksera elektrycznego. Oblicz natężenie prądu elektrycznego płynącego przez uzwojenia silnika miksera podczas pracy.
2. Oblicz, po jakim czasie żelazko z przykładu 2 zużyje energii elektrycznej za złotówkę.
3. Kaskadę w oczku wodnym zasila pompa o mocy 60 W. Oszacuj miesięczne koszty zasilania tej kaskady. Cena 1 kWh energii elektrycznej wynosi 55 gr.
4. Łączna produkcja energii elektrycznej w Polsce w 2018 roku wyniosła 170 039 GWh. Oblicz średnią moc, z jaką pracowały wszystkie polskie elektrownie w 2018 roku.
5. Tradycyjna żarówka o mocy 60 W kosztuje 1,5 zł. Świecąca równie jasno żarówka LED o mocy 9 W kosztuje 6 zł. Żarówka jest używana 3 godziny dziennie. Oblicz, po ilu dniach eksploatacji koszt żarówki LED się zwróci w porównaniu z żarówką tradycyjną. Przyjmij, że cena 1 kWh energii elektrycznej wynosi 55 gr.



Rys. 9. Ilustracja do zadania 1.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Praca prądu elektrycznego w urządzeniu elektrycznym jest równa iloczynowi napięcia i ładunku, jaki przepłynął przez to urządzenie: $W = U \cdot I \cdot t$. s. 18
- Moc urządzenia elektrycznego jest równa iloczynowi napięcia przyłożonego do urządzenia i natężenia przepływającego przez nie prądu: $P = U \cdot I$. s. 18
- Energię elektryczną zużywaną przez gospodarstwo domowe wygodnie wyrażać w kilowatogodzinach. Jednostki tej używa się do rozliczeń finansowych z dostawcą energii elektrycznej. s. 19

1.4. Opór elektryczny. Prawo Ohma

NA TEJ LEKCJI:

- przypomnisz sobie pojęcie oporu elektrycznego i jego jednostkę;
- sprawdzisz doświadczalnie związek między napięciem a natężeniem i oporem.

Opór elektryczny

Istnienie napięcia elektrycznego nie jest warunkiem wystarczającym do przepływu prądu. Jeśli zewrzymy bieguny baterijki kawałkiem drutu z przylutowaną żarówką, popłynie prąd i żarówka będzie świecić. Jeśli zamiast drutu użyjemy sznurka, żarówka nie zaświeci, mimo że napięcie między biegunami baterijki się nie zmieniło. Dlaczego? Bo jak wiesz, drut i sznurek mają inny opór elektryczny.



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

Wartość oporu elektrycznego mówi nam, jak duży prąd może popłynąć przez ciało, jeśli przyłożymy do niego określone napięcie.

opór elektryczny

Opór elektryczny ciała – stosunek napięcia przyłożonego do jego końców do natężenia płynącego w nim prądu.

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

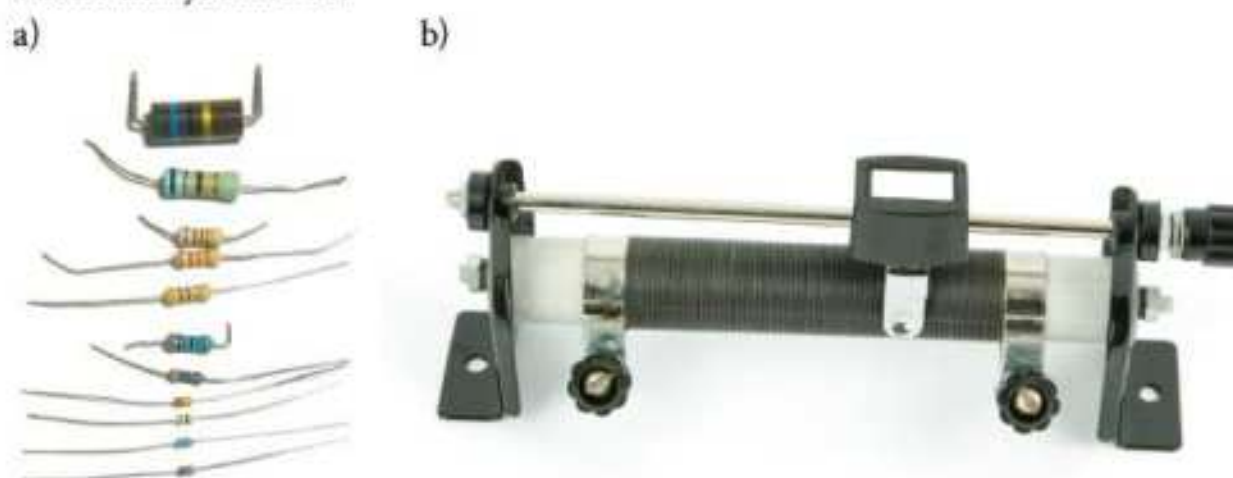
Jednostką oporu elektrycznego jest 1 om. Nazwę tę nadano na cześć niemieckiego fizyka Georga Simona Ohma (1789–1854), zajmującego się badaniem oporu elektrycznego.

jednostka oporu elektrycznego

1 om – opór elektryczny ciała, w którym pod napięciem 1 wolta płynie prąd o natężeniu 1 ampera.

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

Każdy element obwodu elektrycznego stawia pewien opór elektryczny. Gdyby było inaczej, już niewielkie napięcie mogłoby spowodować przepływ prądu o ogromnym natężeniu. Opór stawiają więc żarówka, grzałka, silnik elektryczny i dowolne inne urządzenie elektryczne. Ciała montowane w obwodzie celowo po to, by stawiały opór nazywamy opornikami (rezystorami). Ich rolą jest ograniczanie natężenia prądu płynącego przez poszczególne części obwodu. Przykładowe oporniki przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. a) Oporniki o ustalonym oporze. b) Opornik suwakowy o zmiennym oporze (potencjometr).

Prawo Ohma

Zbadamy obecnie, czy opór elektryczny przewodnika zależy od przyłożonego napięcia oraz jak zależy natężenie prądu w przewodniku od przyłożonego napięcia.

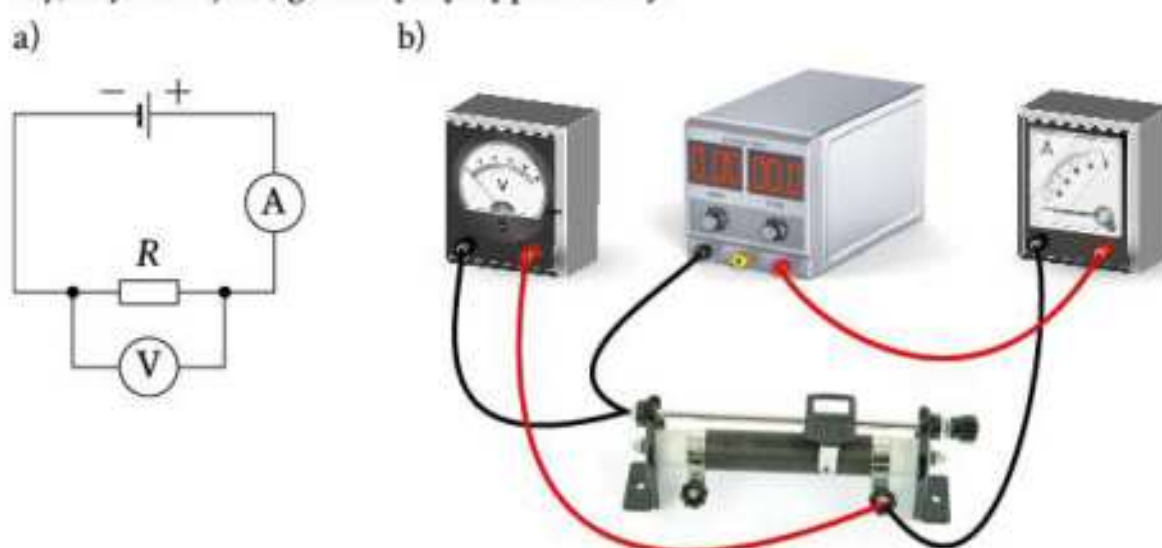
Doświadczenie

Pomoce: zasilacz prądu stałego z regulowanym napięciem, opornik, woltomierz, amperomierz, komplet przewodów zakończonych odpowiednimi wtykami. Podłącz zasilacz do gniazdka, włącz go i ustaw pokrętła tak, by napięcie wyjściowe wynosiło zero. Następnie wyłącz zasilacz i wykonaj dalsze czynności. Dzię-



ki temu po zmontowaniu układu oraz włączeniu zasilacza napięcie i natężenie prądu nie przekroczą zakresów użytych mierników, co mogłoby spowodować uszkodzenie urządzeń.

Zmontuj obwód elektryczny zgodnie z przedstawionym schematem. Zwróć uwagę, by nie pomylić biegunów na miernikach. Amperomierz wepnij do obwodu szeregowo (płyne przez niego mierzony prąd), a woltomierz – równolegle, gdyż prąd płynie przez opornik, a woltomierz mierzy napięcie między jego zaciskami. Jeśli mierniki są wielozakresowe, ustaw je na największy możliwy zakres. Gdy w trakcie doświadczenia okaże się, że wybrany zakres nie jest w pełni wykorzystany, przełącz je na zakres mniejszy. Jeśli zrobisz odwrotnie, może dojść do przekroczenia zakresu już na początku pomiarów. Kropki na schemacie to węzły, czyli miejsca, gdzie łączą się przewody.



Rys. 11. Układ do badania prawa Ohma: a) schemat, b) realizacja praktyczna.

Po zmontowaniu układu i sprawdzeniu go przez nauczyciela włącz ponownie zasilacz i za pomocą pokrętła powoli zwiększaj napięcie. W tym czasie obserwuj wskazania obydwu mierników. Używaj tylko takich napięć, dla których wskazania obu mierników mieszczą się na skali.

Po wstępnym sprawdzeniu, że układ działa i mierniki wskazują właściwe wartości, wykonaj zasadnicze pomiary. Ustaw potencjometrem niewielkie napięcie i w tabeli w zeszycie zapisz kolejno: numer pomiaru, wartość napięcia, natężenie prądu płynącego przez opornik oraz obliczony na podstawie tych danych opór elektryczny. Pomiar powtórz kilkakrotnie dla kolejno wzrastających napięć, tak by w pełni wykorzystać zakres zasilacza lub mierników. Po wykonaniu doświadczenia sporządź w zeszycie wykresy zależności natężenia prądu od napięcia oraz oporu elektrycznego od napięcia. Przeanalizujemy charakter tych zależności.

Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli. Napięcie było mierzone za pomocą woltomierza o zakresie 15 V i dokładności 0,2 V, a natężenie prądu za pomocą amperomierza o zakresie 3 A i dokładności 0,01 A.

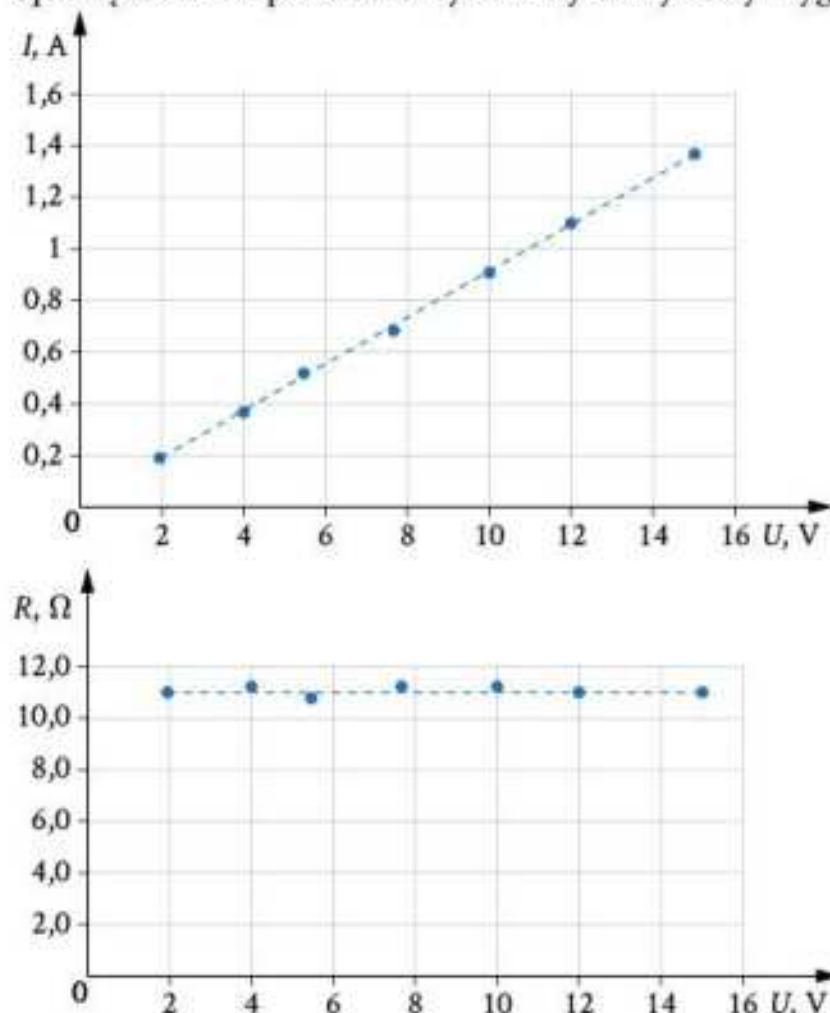
Lp.	U, V	I, A	R, Ω
1.	2	0,18	11,1
2.	4	0,35	11,4
3.	5,5	0,51	10,8
4.	7,5	0,66	11,4
5.	10	0,88	11,4
6.	12	1,07	11,2
7.	15	1,35	11,1
Wartość średnia:			11,2



1. PRĄD ELEKTRYCZNY



Sporządzone na podstawie tych danych wykresy wyglądają następująco:



Rys. 12. Wyniki doświadczenia przedstawione w postaci graficznej.

Jak widać, opór elektryczny okazał się stały, niezależny od przyłożonego napięcia i oscylował wokół wartości 11,2 Ω . Niewielkie wahania wynikają z ograniczonej dokładności przyrządów pomiarowych. Natężenie prądu okazało się proporcjonalne do przyłożonego napięcia. Niewielkie odstępstwa od dopasowanej prostej również mieszczą się w zakresie dokładności użytych mierników.

Do podobnych wniosków w 1827 roku doszedł Ohm. Po przeprowadzeniu wielu podobnych eksperymentów sformułował wówczas swoje słynne prawo:

prawo Ohma

Prawo Ohma – opór elektryczny przewodnika jest stały, niezależny od przyłożonego napięcia. Natężenie prądu elektrycznego w przewodniku jest proporcjonalne do przyłożonego do niego napięcia.

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



Rys. 13. Georg Simon Ohm (1789–1854) – niemiecki matematyk i fizyk. Sformułował prawo nazwane później jego nazwiskiem, badał zależność oporu przewodników od temperatury oraz od ich formy geometrycznej. Dokonał też pewnych odkryć w dziedzinie akustyki.



Na podstawie wzoru opisującego prawo Ohma można dojść do wniosku, że jest on zwykłym przekształceniem podanego wcześniej wzoru definiującego opór elektryczny i w związku z tym nic nowego nie wnosi. Tak jednak nie jest. Poprzedni wzór definiuje opór jako taki – nie wskazuje, od czego on w rzeczywistości zależy. Natomiast prawo Ohma stwierdza, że dla danego przewodnika opór elektryczny jest stały. Odwrotność oporu elektrycznego odgrywa rolę współczynnika proporcjonalności między natężeniem prądu elektrycznego płynącego przez przewodnik a przyłożonym do niego napięciem $\left(I = \frac{1}{R} \cdot U \right)$.

Przykład 1.

Pod napięciem 3,5 V przez przewodnik płynie prąd o natężeniu 150 mA. Jakie będzie natężenie prądu w przewodniku, jeśli napięcie zwiększymy do 15 V?

Rozwiązanie:

Dane:

$$I_1 = 150 \text{ mA}$$

$$U_1 = 3,5 \text{ V}$$

$$U_2 = 15 \text{ V}$$

Szukane:

$$I_2 = ?$$

Opór elektryczny przewodnika w obu przypadkach jest taki sam, co upoważnia nas do ułożenia proporcji:

$$R_1 = R_2 \Rightarrow \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} \Rightarrow I_2 = I_1 \frac{U_2}{U_1}$$

$$I_2 = 150 \text{ mA} \cdot \frac{15 \text{ V}}{3,5 \text{ V}} = 643 \text{ mA}$$

Odpowiedź: Pod napięciem 15 V przez przewodnik będzie płynąć prąd o natężeniu 643 mA.

Korzystając z zależności $I = \frac{U}{R}$ oraz $U = IR$, możemy w inny sposób wyrazić znane nam już wzory na pracę i moc prądu elektrycznego:

$$W = I^2 R t \text{ albo } W = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

$$P = I^2 R \text{ albo } P = \frac{U^2}{R}$$

Przykład 2.

Oblicz moc grzałki elektrycznej o oporze 25 Ω , pracującej pod napięciem 230 V.

Rozwiązanie:

Dane:

$$U = 230 \text{ V}$$

$$R = 25 \Omega$$

Szukane:

$$P = ?$$

Aby rozwiązać to zadanie, nie trzeba znać natężenia prądu, gdyż to wynika z prawa Ohma. Możemy podstawić dane do ostatecznego wzoru zawierającego te zmienne, które występują w naszym zestawie danych.

$$P = \frac{U^2}{R} \qquad P = \frac{230^2 \text{ V}^2}{25 \Omega} = 2116 \text{ W}$$

Odpowiedź: Moc grzałki wyniesie 2116 W.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz napięcie niezbędne do tego, aby przez opornik o oporze $2,2\text{ k}\Omega$ popłynął prąd o natężeniu 110 mA .
2. Oblicz opory elektryczne urządzeń, których tabliczki znamionowe przedstawiono na rysunkach 6 (s. 19), 8 (s. 20) i 9 (s. 21).
3. Oblicz, ile razy zmniejszy się moc grzałki z przykładu 2, jeśli napięcie obniżymy o połowę.
4. Oblicz, ile energii wydzielili się w ciągu 20 s na grocie lutownicy o oporze $0,16\text{ }\Omega$, jeśli płynie przez niego prąd o natężeniu 25 A . Oblicz również napięcie przyłożone do grota lutownicy.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 22 • Każde ciało ma opór elektryczny. Oporem elektrycznym nazywamy stosunek napięcia przyłożonego do ciała do natężenia płynącego w nim prądu.
- s. 22 • Jednostką oporu elektrycznego jest om. 1 om to opór przewodnika, w którym pod napięciem 1 wolta płynie prąd o natężeniu 1 ampera .
- s. 24 • Opór przewodnika jest stały, niezależny od przyłożonego napięcia. Natężenie prądu w przewodniku jest wprost proporcjonalne do przyłożonego napięcia. To prawo nazywa się prawem Ohma.

1.5. Przewodnictwo elektryczne ciał stałych

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, dlaczego niektóre substancje dobrze przewodzą prąd elektryczny, inne słabo, a jeszcze inne – praktycznie wcale;
- dowiesz się, w jaki sposób i dlaczego opór elektryczny ciał zależy od temperatury.

Budowa wewnętrzna przewodników

podział ciał stałych

Z punktu widzenia zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego wszystkie ciała stałe możemy podzielić na trzy kategorie: przewodniki, półprzewodniki i izolatory.

Do **przewodników** zaliczamy wszystkie metale i ich stopy, a dodatkowo grafit – odmianę węgla stosowaną między innymi w elektrodach.

Jeśli spojrzymy na układ okresowy pierwiastków, to zauważymy, że wszystkie metale grupują się po jego lewej stronie, w pierwszych kolumnach. Struktura układu okresowego pierwiastków odzwierciedla strukturę atomu – kolejne wiersze (okresy) układu okresowego odpowiadają pierwiastkom mającym elektrony na kolejnych po-

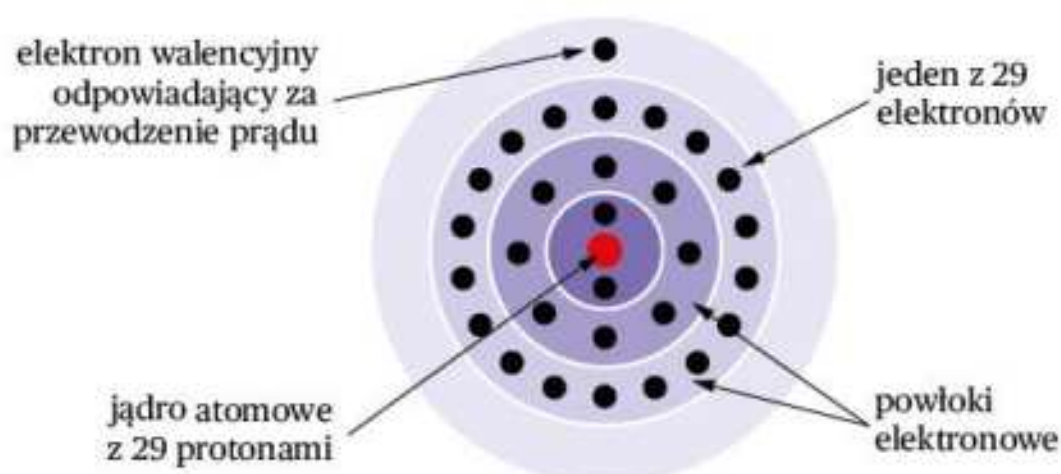


nośniki prądu
elektrycznego
w przewodnikach

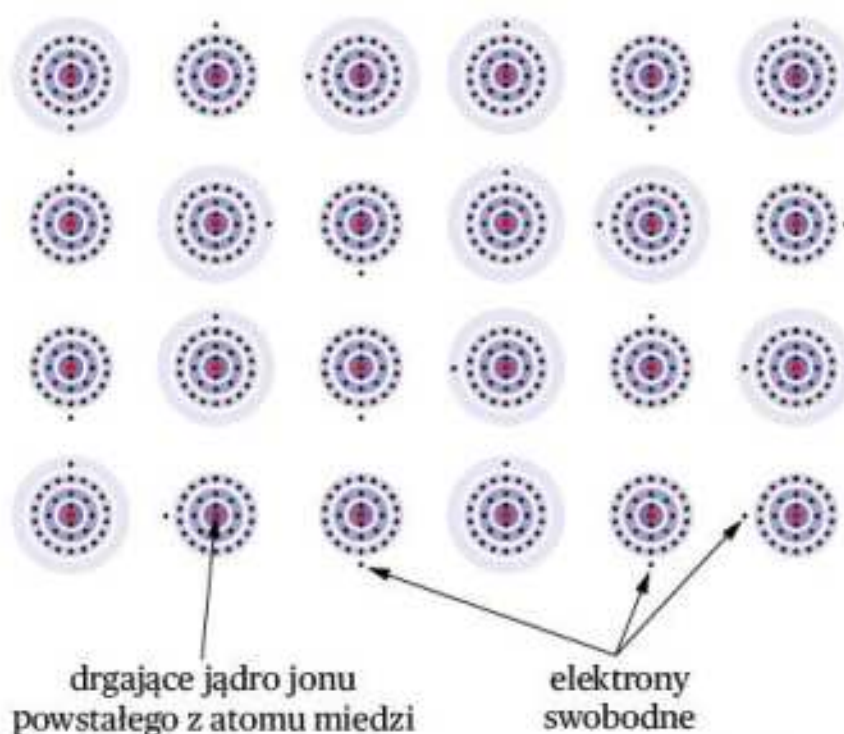
włokach elektronowych. Zatem metale znajdują się na początku kolejnych wierszy układu, a na ostatniej powłoce elektronowej mają pojedyncze elektrony, zwane **elektronami walencyjnymi**. Elektrony te znajdują się dość daleko od jądra atomowego i w związku z tym są słabo przez jądro przyciągane. Jeśli połączymy atomy metalu w strukturę krystaliczną, elektrony walencyjne bez przeszkód mogą opuścić swój macierzysty atom i jako **elektrony swobodne** przemieszczać się między sąsiednimi atomami. Tworzą tak zwany gaz elektronowy wypełniający całą objętość przewodnika. Jak już wspominaliśmy, elektrony swobodne poruszają się w sposób chaotyczny, z wielkimi prędkościami, odbijając się w sposób przypadkowy od atomów i innych elektronów. Przyłożenie napięcia do przewodnika sprawia, że następuje częściowe uporządkowanie kierunku ruchu elektronów i płynie prąd elektryczny.

a)

Budowa atomu miedzi



b)



Rys. 14. a) Budowa wewnętrzna atomu przewodnika. b) Sieć krystaliczna atomów przewodnika.

Gdyby elektrony mogły poruszać się bez przeszkód, pole elektryczne sprawiłoby je w ruch jednostajnie przyspieszony i natężenie prądu mogłoby narastać w sposób nieograniczony. Oddziaływanie ze strukturami sieci krystalicznej ogranicza ten ruch, co wyjaśnia przyczyny istnienia oporu elektrycznego na poziomie atomowym. Szczegółowo tymi zagadnieniami zajmuje się fizyka kwantowa.



izolatory

Budowa wewnętrzna izolatorów

Przeciwnymi właściwościami, jeśli chodzi o przewodnictwo elektryczne, wykazują się **izolatory**, zwane też **dielektrykami**. Są to substancje, które praktycznie nie przewodzą prądu elektrycznego (ich zdolność do przewodzenia prądu jest tryliony razy mniejsza niż u metali). Należą do nich różnorodne materiały, takie jak: parafina, celuloza, papier, drewno, asfalt, guma, szkło, porcelana, azbest oraz wiele różnych minerałów i tworzyw sztucznych. Elektrony w izolatorach są uwięzione w swoich atomach i nie mają swobody ruchu. Izolatory bardzo łatwo naelektryzować przez pocieranie, gdyż wprowadzone w ten sposób na ich powierzchnię ładunki nie mają jak odpłynąć. Z izolatorów wykonuje się między innymi zewnętrzne powłoki kabli elektrycznych, dzięki czemu można ich bezpiecznie dotykać, mimo że w środku może znajdować się przewodnik pod napięciem. Należy jednak pamiętać, że wytrzymałość izolatorów na wysokie napięcie ma swoje granice. Jeśli umieścimy izolator w ekstremalnie silnym polu elektrycznym, będzie ono w stanie wyrwać elektrony z atomów i wtedy może popłynąć prąd nawet o dużym natężeniu. Zjawisko to nazywamy **przebicciem izolatora** i często wiąże się z jego uszkodzeniem, na przykład przepaleniem.

Pamiętaj: nigdy nie używaj urządzeń elektrycznych z uszkodzoną izolacją, gdyż może to spowodować porażenie prądem elektrycznym.

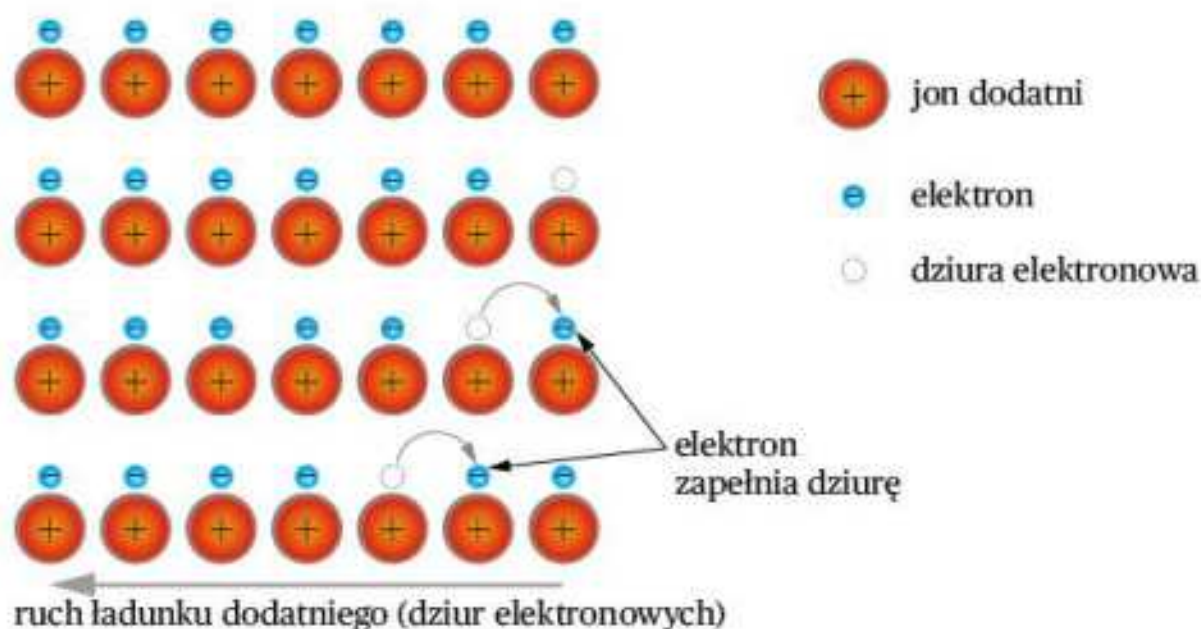
Budowa wewnętrzna półprzewodników

Właściwościami pośrednimi między przewodnikami i izolatorami wykazują się **półprzewodniki**. Do najbardziej znanych półprzewodników zalicza się niektóre pierwiastki: krzem, german, selen, tellur oraz związki chemiczne takie jak arsenek galu czy antymonek indu itp.

Elektrony w półprzewodnikach są w zasadzie uwięzione w swoich atomach, lecz w przeciwieństwie do izolatorów wystarczy stosunkowo niewielka energia, aby je wyswobodzić. Energii tej możemy dostarczyć na przykład poprzez naświetlanie, ogrzewanie, ściskanie lub rozciąganie. Elektrony, które opuszczają swoje atomy, stają się elektronami przewodnictwa. Atomy pozbawione tych elektronów mają nadmiar ładunku dodatniego. Miejsca, w których brakuje elektronów nazywamy **dziurami elektronowymi**. Przypisuje się im ładunek dodatni. Dziura może zostać zapelniona elektronem z sąsiedniego atomu i wtedy w tamtym atomie powstanie dziura. Dziury mogą się więc przemieszczać podobnie jak elektrony (czynią to w odwrotną stronę) i stają się też nośnikami prądu elektrycznego (rys. 15). Z powyższego opisu wynika, że przewodnictwo elektryczne półprzewodników silnie zależy od czynników zewnętrznych, w związku z czym można nim łatwo sterować. Zostało to wykorzystane w wielu współczesnych urządzeniach elektronicznych, o czym jeszcze będzie mowa na kolejnych lekcjach.

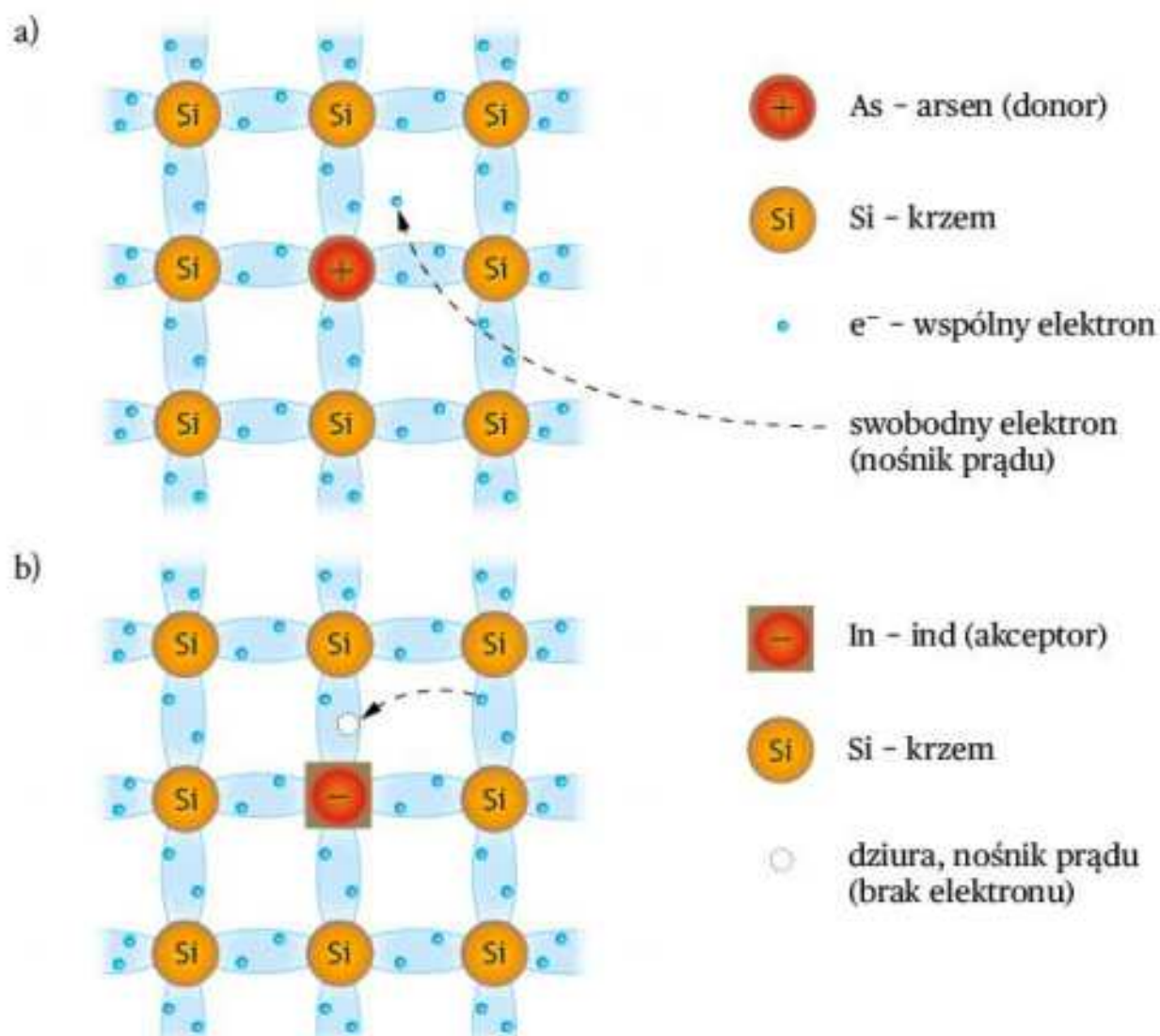
przebiccie izolatora

nośniki prądu
elektrycznego
w półprzewodnikach



Rys. 15. Dziura zachowuje się jak ładunek dodatni równy ładunkowi elektronu. Na miejsce po dziurze może przeskoczyć sąsiedni elektron, pozostawiając po sobie nową dziurę, która może być zapełniona przez kolejny sąsiedni elektron, itd. Jest to równoważne ruchowi dziur w kierunku przeciwnym.

Półprzewodnik zbudowany wyłącznie z atomów jednego pierwiastka nazywamy **półprzewodnikiem samoistnym**. Jego przewodnictwo elektryczne zależy wyłącznie od wymienionych wcześniej czynników. Skutecznym sposobem na zwiększenie ilości nośników prądu elektrycznego w półprzewodniku jest **domieszkowanie**. Polega ono na wprowadzeniu do struktury krystalicznej półprzewodnika atomów innego pierwiastka różniącego się liczbą elektronów na zewnętrznej powłoce, czyli tych biorących udział w wiązaniach atomów w sieci krystalicznej.



Rys. 16. Półprzewodnik domieszkowany: a) typu n, b) typu p.



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

Atom krzemu ma cztery elektrony walencyjne. W czystym chemicznie kryształe krzemu każdy atom łączy się z czterema sąsiadami, uwspólniając z każdym z nich po jednym elektronie walencyjnym. Jeśli w takiej strukturze zamiast jednego atomu krzemu umieścimy jako domieszkę atom o pięciu elektronach na powłoce walencyjnej, na przykład atom arsenu lub fosforu, to jego cztery elektrony utworzą wiązania z czterema sąsiednimi atomami krzemu, a piąty elektron stanie się swobodny i będzie nośnikiem prądu. Atom domieszki stanie się w sieci jonem dodatnim, gdyż oddał elektron. Taki atom nazywamy **donorem**, a domieszkowany w ten sposób półprzewodnik, wykazujący przewodnictwo elektronowe, nazywamy **półprzewodnikiem typu n** (od ujemnego, czyli negatywnego znaku ładunków).

Jeśli w siatce krystalicznej krzemu jeden z atomów zastąpimy atomem mającym trzy elektrony na powłoce walencyjnej (takim jak atom glinu lub indu), to te elektrony utworzą wiązania z trzema sąsiednimi atomami krzemu, a czwarte wiązanie pozostanie nieuzupełnione – powstanie dziura. Jeśli dziura zostanie zapelniona znajdującym się w pobliżu elektronem swobodnym, to atom takiej domieszki stanie się jonem ujemnym. Nazywamy go **akceptorem**. Półprzewodnik wykazujący przewodnictwo dziurowe nazywamy **półprzewodnikiem typu p** od dodatniego (pozytywnego) znaku nośników prądu.

Ilość atomów domieszki typu n lub p decyduje o ilości nośników prądu elektrycznego, a w konsekwencji – o oporze elektrycznym półprzewodnika.



Chcesz wiedzieć więcej?

Wiesz już, że opór elektryczny przewodnika nie zależy od przyłożonego napięcia. Od czego zatem zależy? Okazuje się, że opór elektryczny jest wprost proporcjonalny do długości przewodnika i odwrotnie proporcjonalny do jego pola przekroju. Łatwo to zrozumieć, przywołując poznaną w rozdziale 1.1 analogię hydrauliczną: im dłuższa rura, tym wodzie trudniej przez nią przepłynąć (większy opór), im szersza rura, tym wodzie łatwiej płynąć (mniejszy opór). W oczywisty sposób opór elektryczny ciała zależy też od rodzaju materiału. Sumarycznie powyższe spostrzeżenia można opisać wzorem:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

R – opór przewodnika, l – jego długość, S – pole przekroju, a parametr ρ charakteryzuje rodzaj substancji, z której wykonano przewodnik i jest nazwany oporem właściwym. To właśnie jego wartość informuje, czy dany materiał jest dobrym czy złym przewodnikiem, półprzewodnikiem albo izolatorem.

Po przekształceniu otrzymujemy wzór na opór właściwy i możemy wyliczyć jego jednostkę:

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad [\rho] = \Omega \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \cdot \text{m}$$

Spośród metali najmniejszy opór właściwy mają srebro ($1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) i miedź ($1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$). Stopy oporowe, wykorzystywane do produkcji oporników, mają opór właściwy rzędu $10^{-6} \Omega \cdot \text{m} - 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$. Opór właściwy półprzewodników waha się w szerokich granicach od $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ do $10^6 \Omega \cdot \text{m}$, a dla izolatorów przyjmuje wartości powyżej $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ i może przekraczać nawet $10^{22} \Omega \cdot \text{m}$.



Zależność oporu elektrycznego ciał od ich temperatury

Okazuje się, że opór elektryczny materiałów zależy również od temperatury. Charakter tej zależności jest odmienny dla przewodników i dla półprzewodników.

W metalach jednym z czynników utrudniających uporządkowany ruch elektronów swobodnych są drgania atomów w sieci krystalicznej. Prędkość i amplituda tych drgań wzrastają wraz z temperaturą, więc jest zrozumiałe, że w miarę ogrzewania metalu rośnie jego opór elektryczny.

zależność oporu elektrycznego przewodnika od temperatury

Chcesz wiedzieć więcej?

Zależność oporu elektrycznego przewodników od temperatury wyraża wzór:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \Delta t)$$

R_0 – opór przewodnika w temperaturze 0°C , R_t – opór tego przewodnika w temperaturze t wyrażonej w $^\circ\text{C}$, $\Delta t = t - t_0$ (dla temperatury odniesienia $t_0 = 0^\circ\text{C}$), α – **temperaturowy współczynnik oporu**

W temperaturze pokojowej dla większości metali jego wartość jest zbliżona do $\frac{1}{273} \frac{1}{^\circ\text{C}}$. Stopy oporowe charakteryzują się na ogół mniejszą wartością współczynnika α .

Tab. 1. Wartości temperaturowego współczynnika oporu dla wybranych materiałów

Material	$\alpha, \frac{1}{^\circ\text{C}}$
aluminium	0,0044
miedź	0,0039
srebro	0,0041
wolfram	0,0045
żelazo	0,0065
manganin	0,00003
konstantan	0,00002

Przykład

Oblicz temperaturę, przy której opór drucika wolframowego jest dwa razy większy niż w temperaturze 0°C .

Rozwiązanie:

Dane:

$$\alpha = 0,0045$$

Szukane:

$$t = ?$$

Z treści zadania wynika, że $R_t = 2R_0$. W takim razie:

$$2R_0 = R_0(1 + \alpha t) \Rightarrow 2 = 1 + \alpha t \Rightarrow \alpha t = 1 \Rightarrow t = \frac{1}{\alpha}$$

$$t = \frac{1}{0,0045} = 222^\circ\text{C}$$

Odpowiedź: Temperatura drucika wolframowego wynosi 222°C .





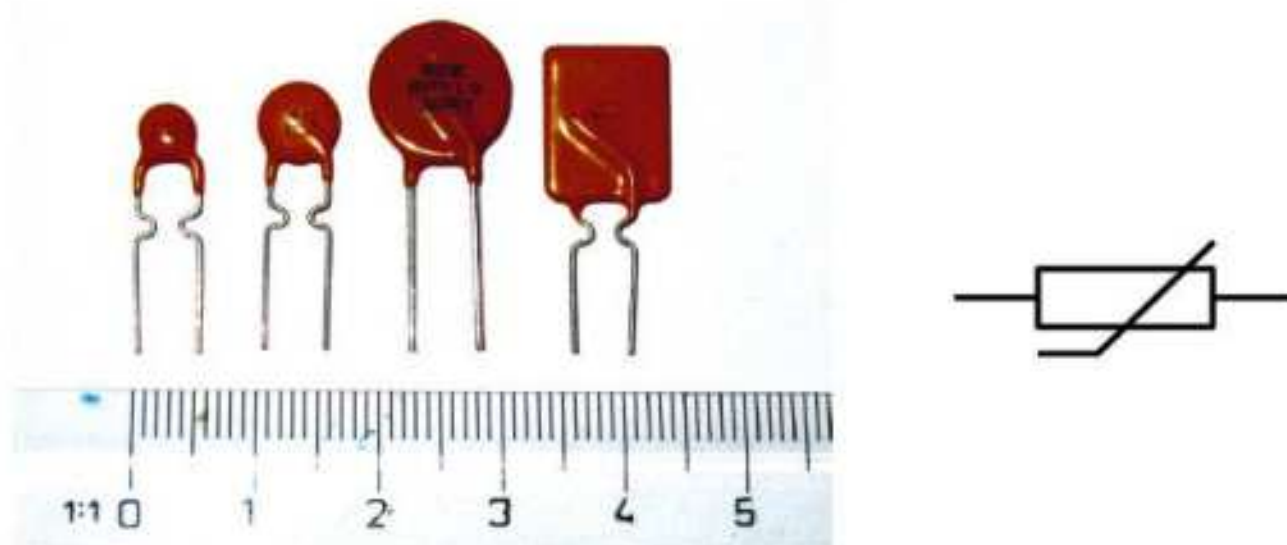
1. PRĄD ELEKTRYCZNY

zależność oporu elektrycznego półprzewodnika od temperatury

Odwrotna sytuacja występuje w półprzewodnikach i izolatorach. Tam elektrony są uwięzione w atomach i potrzebują pewnej energii, aby się wyzwolić. Podgrzewanie półprzewodnika dostarcza tej energii i powoduje wzrost ilości nośników prądu elektrycznego. To natomiast pociąga za sobą spadek oporu elektrycznego półprzewodnika. Zatem im wyższa temperatura, tym mniejszy opór elektryczny półprzewodnika. Postać matematyczna tej zależności wynika z praw mechaniki kwantowej, jest dość skomplikowana i zależy od konkretnych przypadków.

termistor

Zależność oporu elektrycznego ciał od temperatury znalazła liczne zastosowania w elektronice w postaci tak zwanych **termistorów**. Są one używane między innymi jako czujniki temperatury w termometrach elektronicznych i ograniczniki natężenia prądu (bezpieczniki elektroniczne), na przykład w układach akumulatorów telefonów komórkowych, w których zapobiega uszkodzeniu akumulatorów w wyniku zwarcia lub zbyt szybkiego ładowania. Czujniki temperatury są stosowane niemal wszędzie: w motoryzacji (pomiar temperatury oleju i płynu chłodzącego), sprzęcie AGD (piekarniki, lodówki, mikrofalówki) czy w urządzeniach chroniących przed przepięciami.



Rys. 17. Termistory i ich symbol stosowany na schematach elektrycznych.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

- 1*. Drut o oporze $6\ \Omega$ rozciągnięto tak, że jego długość wzrosła dwukrotnie bez zmiany gęstości materiału. Oblicz opór tego drutu po rozciągnięciu.
- 2*. Drut o długości 10 m i polu przekroju $1,5\text{ mm}^2$ ma opór $8\ \Omega$. Oblicz, jaki opór będzie miał drut wykonany z tego samego materiału o długości 10 m i polu przekroju $2,5\text{ mm}^2$.
- 3*. Drut żelazny o temperaturze początkowej 20°C podgrzano o 100°C . Oblicz, o ile procent wzrósł opór elektryczny tego drutu.
4. Na podstawie literatury i źródeł internetowych przygotuj krótki referat o termistorach i ich zastosowaniach.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- Pod względem zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego wszystkie ciała stałe dzielimy na przewodniki, półprzewodniki i izolatory. s. 26
- Nośnikami prądu elektrycznego w metalach są swobodne elektrony, poruszające się chaotycznie w całej objętości przewodnika. s. 27
- Nośnikami prądu w półprzewodnikach są nieliczne swobodne elektrony oraz miejsca po brakujących elektronach, tzw. dziury. Ich ilość mocno zależy od temperatury, oświetlenia oraz domieszek w postaci atomów innego pierwiastka. s. 28
- W izolatorach praktycznie brak swobodnych nośników ładunku, dlatego niemal nie przewodzą one prądu. W ekstremalnych sytuacjach (bardzo silne pole elektryczne) może dojść do przebicia izolatora. s. 28
- Opór elektryczny przewodników wzrasta wraz z temperaturą, natomiast opór elektryczny półprzewodników maleje. s. 31
- Elementy elektroniczne wykorzystujące zależność oporu elektrycznego od temperatury to termistory. Znalazły one liczne zastosowanie w technice i życiu codziennym. s. 32

1.6. Obwody elektryczne

NA TEJ LEKCJI:

- uzupełnisz swoje wiadomości o obwodach elektrycznych, wyniesione ze szkoły podstawowej;
- poznasz zasady funkcjonowania domowej sieci elektrycznej i metody jej zabezpieczania przed awarią i porażeniem.

Podstawowe wiadomości o obwodach elektrycznych

Proste obwody elektryczne znasz już ze szkoły podstawowej. Przypomnijmy:

Obwody elektryczne – połączone za pomocą przewodów w zamknięte pętle źródła napięcia oraz odbiorniki energii elektrycznej, takie jak: oporniki, żarówki czy silniki.

obwody
elektryczne

Sposoby połączenia elementów obwodu przedstawia się graficznie za pomocą schematów. Niektóre symbole stosowane na schematach przedstawiono w tabeli 2.



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

symbole graficzne

Tab. 2. Symbole wybranych elementów obwodu elektrycznego stosowane na schematach

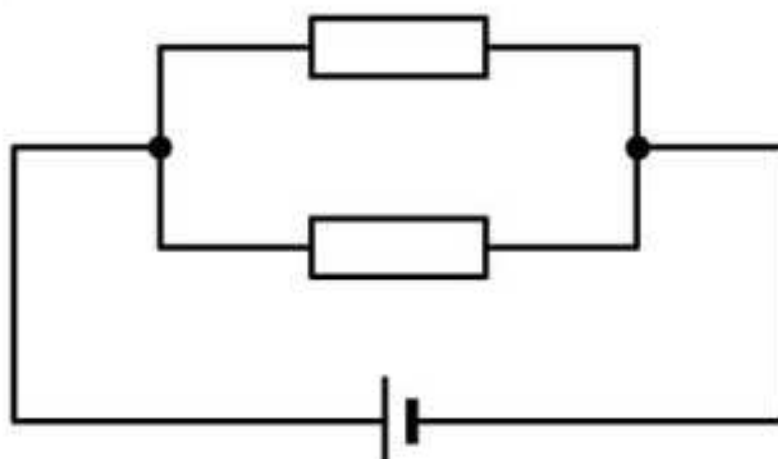
Symbol graficzny	Znaczenie	Symbol graficzny	Znaczenie
	przewód elektryczny		zwojnica (cewka)
	połączenie przewodów (węzeł)		kondensator
	wyłącznik		amperomierz
	ogniwo		woltomierz
	bateria		silnik elektryczny
	źródło prądu przemiennego		bezpiecznik
	regulowane źródło napięcia		termistor
	żarówka		dioda
	opornik		tranzystor
	opornik regulowany (potencjometr)		uziemienie
	głośnik		transformator



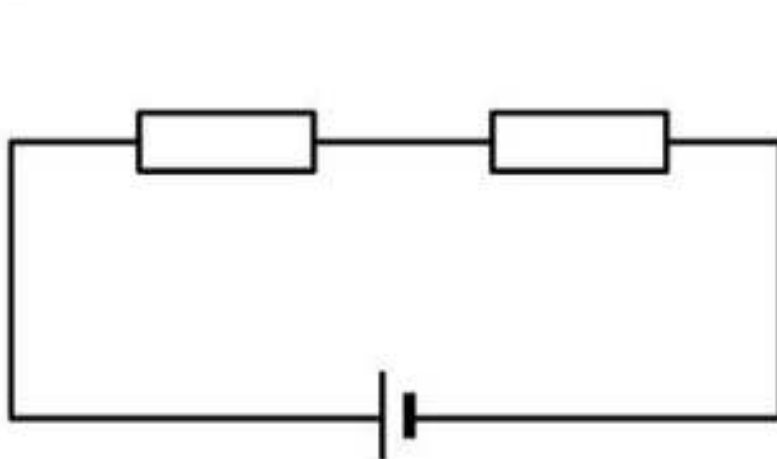
Węzłem obwodu nazywa się punkt, w którym obwód się rozgałęzia, czyli stykają się w nim co najmniej trzy przewody. Punkt taki zaznacza się na schemacie kropką. Brak kropki oznacza, że przewody się krzyżują, ale nie są ze sobą połączone.

Oczkiem obwodu nazywamy dowolną linię zamkniętą w obwodzie, wzdłuż której może płynąć prąd elektryczny. Na przykład obwód przedstawiony na rysunku 18a ma dwa węzły i trzy oczka. Skomplikowany obwód elektryczny zawierający dużo węzłów i oczek nazywa się **siecią elektryczną**.

a)



b)



Rys. 18. Przykładowe obwody elektryczne z opornikami połączonymi: a) równolegle, b) szeregowo.

Elementy obwodu możemy ze sobą łączyć szeregowo, równolegle lub w sposób mieszany – wykorzystujący połączenie równoległe i połączenie szeregowe.

W **połączeniu szeregowym** elementy układu połączone są jeden za drugim, to znaczy, że wyjście poprzedniego elementu jest połączone z wejściem następnego. Obwód się nie rozgałęzia, więc przez wszystkie elementy obwodu płynie prąd o takim samym natężeniu. Napięcia między zaciskami poszczególnych elementów obwodu sumują się do całkowitego napięcia w oczku. Na tej zasadzie działają na przykład lampki choinkowe. Jeśli połączymy ze sobą szeregowo 23 jednakowe lampki i podłączymy je do gniazdka o napięciu 230 V, to na każdą lampkę będzie przypadać napięcie 10 V. Przepalenie jednej lampki powoduje przerwę w obwodzie i wygaśnięcie wszystkich pozostałych.

połączenie
szeregowe

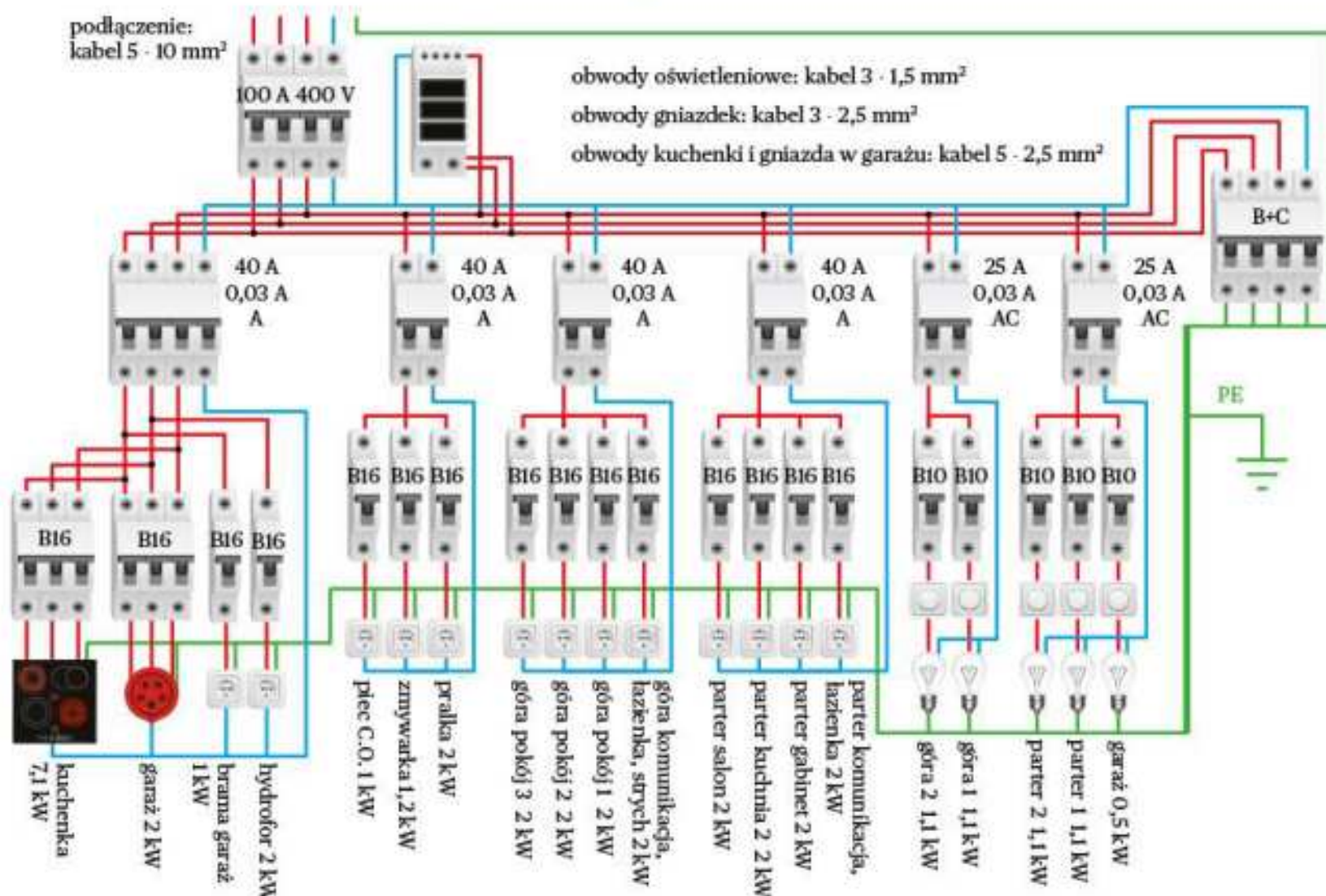
Każdy z elementów stawia dodatkowy opór, więc całkowity opór obwodu jest sumą oporów jego elementów składowych. Nawiązując do analogii hydraulicznej, można stwierdzić, iż dodanie każdego kolejnego odcinka rury powoduje, że wodzie coraz trudniej płynąć.

W **połączeniu równoległym** elementy są połączone ze źródłem napięcia niezależnie, za pomocą oddzielnych przewodów. Napięcie między zaciskami wszystkich elementów obwodu jest takie samo, a natężenie prądu rozdziela się na poszczególne odgałęzienia (co szczegółowo jest omówione w rozdz. 1.7). W układzie równoległym urządzenia można włączać i wyłączać niezależnie, bez wpływu na działanie pozostałych. Opór takiego obwodu jest zawsze mniejszy od najmniejszego oporu składowego. Odwołując się kolejny raz do analogii z układem hydraulicznym, możemy powiedzieć, że odpowiada to sytuacji, gdyby do istniejącej rury z wodą dodano dodatkową rurę biegnącą równolegle. Wodzie będzie wtedy łatwiej przepłynąć niż przez rurę pojedynczą.

połączenie
równoległe



Domowa sieć elektryczna



Rys. 19. Schemat przykładowej domowej instalacji elektrycznej.

złożony obwód
elektryczny

Siecią elektryczną, której używasz na co dzień, jest twoja **domowa instalacja elektryczna**. Służy ona do zasilania wszystkich urządzeń elektrycznych, jakie znajdują się w domu. Z punktu widzenia fizyki są one odbiornikami energii elektrycznej. Każde urządzenie ma swój własny obwód wewnętrzny, który można połączyć ze źródłem energii.

Na terenach o luźnej zabudowie energia elektryczna jest dostarczana do domu z zewnętrznej sieci elektrycznej za pomocą kabli napowietrznych z najbliższego słupa. Na obszarach bardziej zurbanizowanych kable dostarczające energię do domów są zakopane w ziemi. Pierwszym elementem sieci, przez który płynie cały prąd dostarczony do mieszkania, jest bezpiecznik główny i licznik energii elektrycznej. Na ogół

umieszcza się go na klatce schodowej lub w skrzynce na granicy posesji, aby można było odczytać zużycie energii bez angażowania mieszkańców. Prąd, który przepłynął przez bezpiecznik główny i licznik, następnie płynie przez tak zwaną rozdzielnicę elektryczną. Ma ona postać skrzynki z bezpiecznikami, gdzie sieć rozdziela się na dwa typy obwodów. Niektóre z nich zasilają oświetlenie w postaci lamp sufitowych, a inne dostarczają energię do gniazdek elektrycznych. Im większy dom, tym więcej niezależnych obwodów podłączonych do rozdzielnicy. Dzięki



Rys. 20. Domowa rozdzielnica elektryczna.

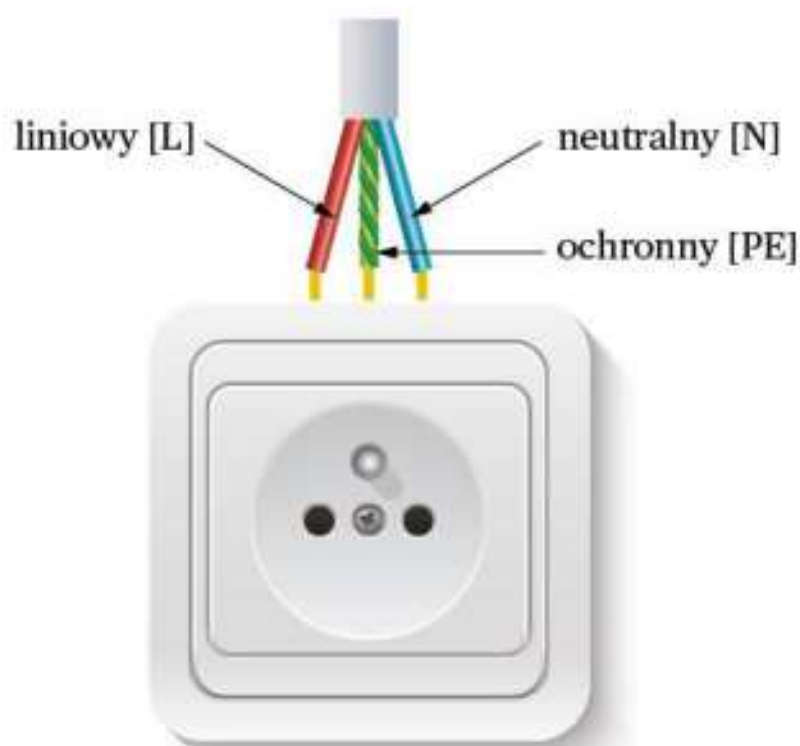


temu w razie awarii i zadziałania bezpiecznika prąd jest odcinany tylko w części domu. Przewody instalacji domowej znajdują się pod tynkiem, a na zewnątrz są dostępne jedynie wyłączniki i gniazdka elektryczne. W całej instalacji prąd elektryczny płynie do konkretnego urządzenia jednym przewodem i powraca do źródła zasilania tak zwanym przewodem zerowym (neutralnym). Wszystkie odbiorniki w mieszkaniu są dostosowane do napięcia 230 V, więc muszą być połączone równolegle. Oznacza to, że natężenia prądów płynących przez odbiorniki sumują się i przez bezpiecznik główny płynie suma tych prądów.

Elementy bezpieczeństwa w domowej sieci elektrycznej

Napięcie 230 V stosowane w sieci domowej może być niebezpieczne dla życia. Przeciążenie instalacji elektrycznej lub zwarcie może doprowadzić do pożaru. Są to podstawowe powody stosowania zabezpieczeń w sieciach elektrycznych.

W starych budynkach można spotkać jeszcze instalacje elektryczne tzw. pierwszej generacji. Zapewniały one jedynie zasilanie urządzeń. Kable poprowadzone w ścianie mają w takiej instalacji dwa przewody: jeden (zazwyczaj brązowy, szary, czarny, biały lub czerwony) doprowadzający napięcie do urządzenia i drugi (niebieski) – przewód zerowy zamykający obwód i umożliwiający przepływ prądu. Obecnie wymagana jest instalacja drugiej generacji z dodatkowym przewodem koloru żółto-zielonego. Pełni on funkcję ochronną. Jeden jego koniec jest podłączony zazwyczaj do metalowej obudowy urządzenia, a drugi jest zakopany w ziemi. Dzięki temu, jeśli nastąpi awaria urządzenia i przebicie izolacji, na zewnętrznych elementach urządzenia nie pojawi się napięcie, gdyż ładunki elektryczne natychmiast popłyną do ziemi. W gniazdku elektrycznym jedna z jego dziurek jest podłączona do przewodu doprowadzającego napięcie, druga do przewodu zerowego, a wystający metalowy bolec – do przewodu uziemiającego.



Rys. 21. Sposób podłączenia gniazdka elektrycznego do przewodów ukrytych w ścianie.

Podstawowym elementem zabezpieczającym obwód przed zniszczeniem jest **bezpiecznik**. Jego rola polega na przerwaniu ciągłości obwodu w przypadku, gdy płynie w nim prąd o zbyt dużym natężeniu, zagrażającym przepaleniem się przewodów w instalacji. Dzieje się tak na przykład w przypadku zwarcia, gdy stykają się ze sobą bez izolacji przewody doprowadzające napięcie i neutralny. Prąd nie dociera wtedy do urządzenia, tylko płynie drogą o małym oporze elektrycznym, zatem może osiągać natężenie o niebezpiecznych wartościach. Przekroczenie dopuszczalnej wartości natężenia prądu ma też miejsce wtedy, gdy do danego obwodu podłączymy zbyt wiele urządzeń o dużej mocy. Inną przyczyną zwarcia może być zamoczenie urządzenia lub dokonywanie w nim nieumiejętnych napraw bez wcześniejszego odłączenia go od zasilania.

bezpiecznik



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

bezpiecznik
topikowy

bezpiecznik
automatyczny

Bezpieczniki dzielimy na topikowe i automatyczne. **Bezpiecznik topikowy** składa się z cienkiego drucika z łatwo topliwego materiału o odpowiednio dobranym oporze, umieszczonego w ceramicznej obudowie i włączonego w obwód. Jeśli w obwodzie płynie zbyt duży prąd, bezpiecznik topi się i przerywa obwód, chroniąc go przed uszkodzeniem. Sam ulega przy tym zniszczeniu. Trzeba go wymienić na nowy, co jest znacznie tańsze niż naprawa całej instalacji lub usuwanie skutków pożaru. **Bezpiecznik automatyczny** pełni podobną funkcję, lecz nic się w nim nie topi i można go ponownie włączyć po usunięciu przyczyny jego zadziałania.

a)



b)



Rys. 22. Bezpieczniki: a) topikowy, b) automatyczne.

bezpiecznik
nadmiarowo-
prądowy

bezpiecznik
różnicowoprądowy



Rys. 23. Wyłącznik różnicowoprądowy.

Wymienione wyżej bezpieczniki nazywamy **nadmiarowoprądowymi (nadprądowymi)**, gdyż działają one w momencie przepływu prądu o zbyt dużym natężeniu. W nowoczesnych instalacjach spotykamy się też z wyłącznikami **różnicowoprądowymi**. Porównują one natężenie prądu wpływającego do obwodu z natężeniem prądu wypływającego. W razie stwierdzenia istotnej różnicy, wyłącznik przerywa obwód. Różnica może być spowodowana tym, że ktoś dotknął nieizolowanego przewodu i prąd przepływa przez jego ciało do ziemi, zamiast wracać przewodem neutralnym. Wyłącznik chroni więc przed porażeniem elektrycznym.

Nie oznacza to, że w instalacjach wyposażonych w takie wyłączniki można śmiało dotykać nieizolowanych przewodów. Wyłącznik nie uratuje na przykład człowieka, który stoi w dobrze izolujących butach, ale jedną ręką dotknął przewodu pod napięciem, a drugą – przewodu neutralnego. Wyłącznik nie wykryje wtedy różnicy w natężeniu prądu wpływającego i wypływającego.

Pamiętaj o podstawowych **zasadach bezpiecznego użytkowania domowej sieci elektrycznej**:

- Nie dotykaj gołymi rękami nieizolowanych części obwodu elektrycznego.
- Wszelkie naprawy zostaw fachowcom. Absolutnie nie dokonuj żadnych napraw, gdy urządzenia lub przewody znajdują się pod napięciem.
- Zanim wykonasz jakieś prace w sieci elektrycznej, wyłącz właściwy bezpiecznik i upewnij się za pomocą odpowiedniego testera, czy napięcie zostało rzeczywiście odłączone.
- Jeśli dokonujesz naprawy, to używaj przeznaczonych do tego celu izolowanych narzędzi.

zasady
bezpieczeństwa



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij różnice między połączeniem szeregowym i równoległym.
2. Wymień elementy zwiększające bezpieczeństwo użytkowania sieci elektrycznej i opisz ich funkcje.
3. Wymień podstawowe zasady bezpiecznego użytkowania sieci elektrycznej.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Obwodem elektrycznym nazywamy połączone za pomocą przewodów w zamkniętą pętlę źródła prądu i odbiorniki energii elektrycznej. s. 33
- Każdy element obwodu elektrycznego ma swój symbol graficzny umieszczany na schematach obwodów elektrycznych. s. 34
- Elementy obwodu elektrycznego mogą być łączone ze sobą szeregowo lub równolegle. s. 35
- Przykładem złożonego obwodu elektrycznego jest domowa instalacja elektryczna. s. 36
- Prąd elektryczny w sieci domowej może spowodować porażenie elektryczne człowieka oraz pożar, dlatego stosuje się zabezpieczenia w postaci przewodów uziemiających, bezpieczników i wyłączników różnicowoprądowych. s. 37
- Dokonując napraw urządzeń i instalacji elektrycznych, należy bezwzględnie przestrzegać zasad bezpieczeństwa. s. 38

1.7. Pierwsze prawo Kirchhoffa

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz jedno z podstawowych praw rządzących obwodami elektrycznymi;
- nauczysz się obliczać natężenia prądów w rozgałęzieniach prostych obwodów elektrycznych.

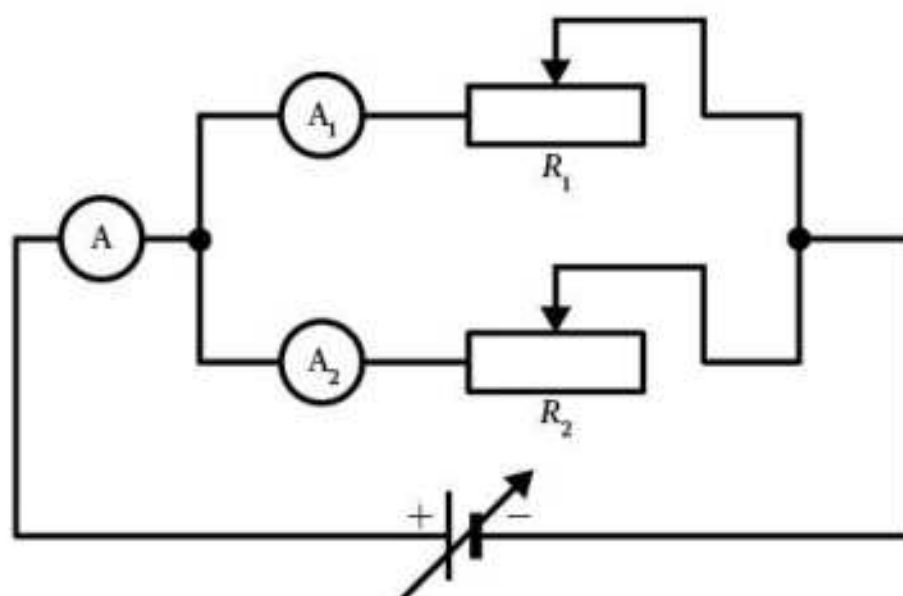
Sformułowanie pierwszego prawa Kirchhoffa

Doświadczenie 1.

Pomoce: zasilacz z regulacją napięcia, trzy amperomierze (lub dwa, jeśli zasilacz ma wbudowany miernik), dwa oporniki suwakowe, komplet przewodów. Zmontuj obwód elektryczny według poniższego schematu. Funkcję amperomierza przed rozgałęzieniem może pełnić miernik wbudowany w zasilacz, o ile taki występuje.



1. PRĄD ELEKTRYCZNY



Rys. 24. Schemat układu do doświadczenia 1.

Pamiętaj, aby przed podłączeniem zasilacza do reszty obwodu ustawić na nim napięcie na 0. Po sprawdzeniu układu przez nauczyciela włącz zasilacz i dla kilku coraz większych napięć odczytaj i zanotuj w zeszycie wskazania wszystkich amperomierzy. Uważaj, by nie przekroczyć zakresów mierników.

Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli:

U, V	I, A	I_1, A	I_2, A	$I_1 + I_2, A$
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
2,0	0,34	0,15	0,20	0,35
4,0	0,70	0,29	0,40	0,69
6,0	1,06	0,45	0,61	1,06
8,0	1,42	0,58	0,82	1,40
10,0	1,73	0,73	1,01	1,74
12,0	2,12	0,88	1,22	2,10
15,0	2,65	1,11	1,52	2,63

Kolejne kolumny zawierają: napięcie zasilania, natężenie prądu przed rozgałęzieniem, natężenia prądu wskazywane przez amperomierze A_1 i A_2 oraz sumę wskazań obu tych amperomierzy.

Wniosek: Po uwzględnieniu dokładności przyrządów pomiarowych suma natężeń prądów w rozgałęzieniach obwodu jest równa natężeniu prądu przed rozgałęzieniem.

Otrzymany wynik nie powinien dziwić. W obwodach elektrycznych, jak wszędzie, obowiązuje zasada zachowania ładunku. Ładunki wpływające do węzła nie mogą się tam gromadzić. Nie mogą również powstawać z niczego. Suma ładunków wpływających do węzła musi być równa sumie ładunków wypływających z węzła. Ponieważ wpływanie i wypływanie ładunków odbywa się w tym samym czasie, a stosunek ładunku do czasu, w którym przepłynął, to natężenie prądu, regułę tę można sformułować następująco:

pierwsze prawo
Kirchhoffa

Pierwsze prawo Kirchhoffa – suma natężeń wszystkich prądów wpływających do węzła równa jest sumie natężeń wszystkich prądów wypływających z tego węzła.



Jest to treść pierwszego prawa Kirchhoffa (czytaj: kirśchofa). Przyjmując oznaczenia takie jak w doświadczeniu 1, zapisalibyśmy to prawo jako: $I = I_1 + I_2$. W przykładzie jak na rysunku 25 napisalibyśmy: $I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$. Aby zapisać to prawo w sposób najbardziej ogólny, możemy się umówić, że prądy wpływające do węzła zapisujemy z plusem, a wypływające z węzła – z minusem. Wtedy suma wszystkich tych prądów wynosi zero i ostateczny ogólny wzór na pierwsze prawo Kirchhoffa przyjmuje postać:

$$\sum_{n=1, 2, 3, \dots} I_n = I_1 + I_2 + I_3 + \dots = 0$$

Rys. 25. Ilustracja do pierwszego prawa Kirchhoffa.

W zapamiętaniu pierwszego prawa Kirchhoffa znowu pomaga analogia hydrauliczna. Wyobraźmy sobie, że przewody elektryczne to rury z wodą łączące się w jednym punkcie. Przez niektóre rury tłoczmy wodę, a z innych pozwalamy wodzie wyciekać. Tyle wody, ile wtłoczmy, musi wycieknąć. Woda nie ma się gdzie gromadzić, nie może zniknąć ani powstać z niczego.

Rys. 26. Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887) – fizyk niemiecki. Sformułował prawo dotyczące promieniowania cieplnego oraz dwa prawa dotyczące obwodów elektrycznych. Razem z Robertem Bunsenem odkrył dwa pierwiastki chemiczne, wynalazł spektroskop i opracował podstawy spektroskopii, pozwalające określać skład chemiczny substancji na podstawie analizy emitowanego przez nią światła.



Natężenia prądów w rozgałęzieniach obwodów

Doświadczenie 2.

Pomoce: obwód elektryczny identyczny jak w doświadczeniu 1.

Ustal napięcie zasilania, ale przesun suwaki na opornikach suwakowych, zmieniając tym samym ich opory. Uwaga: opór będzie się zmieniać, jeśli oporniki będą właściwie podłączone – jeden z kabli musi być doprowadzony do zacisku suwaka. Cały czas obserwuj wskazania mierników. Uważaj, aby któregoś z oporów nie zmniejszyć za bardzo. Mogłoby to spowodować nadmierny wzrost natężenia prądu, przekroczenie zakresów mierników i zadziałanie bezpiecznika w zasilaczu lub przegrzanie opornika.



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

Zmieniając wartości obydwu oporów i odczytując natężenia prądów, można dojść do następujących wniosków:

1. Suma natężeń prądów wypływających z węzła za każdym razem jest równa natężeniu prądu wpływającego do węzła.
2. Poszczególne prądy wypływające z węzła się zmieniają. Ich natężenia są tym wyższe, im mniejszy opór stawia dane rozgałęzienie.

Aby zrozumieć ten efekt, spójrzmy jeszcze raz na schemat na rysunku 24. Zakładamy, że amperomierze są idealne, więc nie stawiają oporu elektrycznego. Możemy je na chwilę potraktować jak kawałki przewodów. Oporniki są połączone równolegle. Lewe strony obydwu oporników są podłączone do dodatniego zacisku zasilacza, a prawe strony obydwu oporników – do ujemnego. Na obydwu opornikach panuje więc takie samo napięcie, równe napięciu ustawionemu na zasilaczu. Możemy więc napisać:

$$U_1 = U_2$$

Do obydwu oporników stosuje się prawo Ohma: $U_1 = I_1 R_1$ oraz $U_2 = I_2 R_2$. Wobec tego:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Otrzymaliśmy ważny wynik będący konsekwencją pierwszego prawa Kirchhoffa i prawa Ohma:

wniosek z prawa
Ohma

Natężenia prądów w rozgałęzieniach obwodu są odwrotnie proporcjonalne do ich oporów.

To wyjaśnia, dlaczego na przykład ptaki mogą bezpiecznie siedzieć na liniach wysokiego napięcia. Ciało ptaka i kawałek przewodu znajdujący się między jego nogami można potraktować jako dwa oporniki połączone równolegle. Opór elektryczny kawałka przewodu jest znikomy, a opór ciała ptaka znacznie większy. Dlatego niemal cały prąd będzie płynąć przewodem, a przez ciało ptaka popłynie prąd o bardzo małym, nieodczuwalnym natężeniu. Prąd najłatwiej płynie przez te elementy obwodu, które stawiają najmniejszy opór.

Z powyższego prawa płynie też wskazówka, jak zachowywać się podczas burzy, jeśli zastanie nas ona na otwartym terenie. Nie należy kłaść się na ziemi, zwłaszcza mokrej, ale przykucnąć tak, by stopy były jak najbliżej ciała. Chodzi o to, aby fragment ziemi między naszymi stopami, traktowany jako opornik, miał jak najmniejszy opór. Jeśli piorun uderzy w pobliżu, przez ziemię popłynie prąd o dużym natężeniu. Nasze ciało będzie wtedy pełniło funkcję opornika włączonego równolegle do ziemi. Aby uchronić się przed porażeniem piorunem, musimy zadbać, by nasze ciało miało opór znacznie większy niż ziemia – wtedy popłynie przez nas prąd o małym natężeniu. Z tego samego powodu nie należy robić dużych kroków, jeśli chcemy się oddalić od przewodów wysokiego napięcia, które w wyniku jakiejś katastrofy spadły na ziemię blisko nas.



Przykład

Prąd o natężeniu 9 A rozgałęzia się i płynie przez dwa oporniki o oporach 10 Ω i 20 Ω, połączone równolegle. Oblicz natężenia prądów w każdym z tych oporników.

Rozwiązanie:

Dane:

$$I = 9 \text{ A}$$

$$R_1 = 10 \text{ } \Omega$$

$$R_2 = 20 \text{ } \Omega$$

Szukane:

$$I_1, I_2 = ?$$

Poszukujemy dwóch niewiadomych, więc musimy zastosować dwa niezależne równania.

Z pierwszego prawa Kirchhoffa mamy: $I = I_1 + I_2$.

Z prawa Ohma wynika, że $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = 2$.

Możemy więc ułożyć układ równań:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = 9 \\ I_1 = 2I_2 \end{cases}$$

Jego rozwiązaniem jest: $I_1 = 6 \text{ A}$ i $I_2 = 3 \text{ A}$.

Odpowiedź: Przez oporniki popłyną prądy o natężeniach odpowiednio 6 A i 3 A.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. W węźle spotyka się pięć przewodów. Przez pierwszy wpływa prąd o natężeniu 0,6 A, a przez drugi – o natężeniu 0,8 A. Przez trzeci wypływa prąd o natężeniu 1,1 A, a przez czwarty – o natężeniu 0,5 A. Oblicz wartość natężenia prądu w piątym przewodniku i podaj kierunek przepływu prądu.
2. W układzie przedstawionym na rysunku 24 napięcie zasilacza wynosi 3 V, a opory oporników to: $R_1 = 5 \text{ } \Omega$ i $R_2 = 6 \text{ } \Omega$. Oblicz natężenia prądów wskazywanych przez każdy z mierników zainstalowanych w tym obwodzie.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Suma natężeń prądów wpływających do węzła obwodu jest równa sumie natężeń prądów wypływających z tego węzła. Jest to treść pierwszego prawa Kirchhoffa, będącego wnioskiem z zasady zachowania ładunku. s. 40
- Natężenia prądów w rozgałęzieniach obwodu są odwrotnie proporcjonalne do ich oporów. Innymi słowy prąd płynie najłatwiej tą drogą, która stawia najmniejszy opór. Jest to wniosek z prawa Ohma. s. 42



1.8. Ogniwa. Łączenie ogniw

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz szczegóły dotyczące budowy i zasady działania ogniw elektrycznych i akumulatorów;
- powiążesz reguły związane z łączeniem ogniw w baterie ze znanymi prawami fizyki.

Budowa i zasada działania ogniwa galwanicznego

Już w 1780 roku włoski fizyk, lekarz i fizjolog Luigi Galvani (czytaj: luidzi galwani; 1737–1798) zauważył, że mięśnie spreparowanej żaby dotknięte w różnych miejscach dwiema połączonymi ze sobą blaszkami różnych metali kurczą się podobnie jak po dotknięciu elektrodami naładowanej maszyny elektrostatycznej. Mylnie zinterpretował to jako tak zwaną elektryczność zwierzęcą, generowaną przez tkanki. Badania Galvaniego kontynuował inny włoski uczoney – Alessandro Volta (czytaj: wolta; 1745–1827). Volta wyjaśnił, że wytwarzanie napięcia nie ma związku z żywymi organizmami, a z metalami zanurzonymi w elektrolicie i w konsekwencji w 1800 roku zbudował pierwsze **ogniwo galwaniczne**.

ogniwo
galwaniczne

Pierwsze konstrukcje Volty były bardzo prymitywne – używał w nich szeregu porcelanowych filiżanek z roztworem soli, w których zanurzał odpowiednio połączone blaszki różnych metali. Uzyskiwane napięcia badał własnym językiem lub porównywał wrażenia doznawane po zanurzeniu rąk w skrajnych filiżankach. Po wielu próbach na tej podstawie ustalił, które metale wywołują najlepszy efekt elektryczny. Filiżanki zastąpił kartonikami nasączonymi roztworem soli i zbudował pierwszy na świecie stos elektryczny zdolny do wytwarzania wysokich stałych napięć. Ogniwo Volty ma dziś znaczenie historyczne – zostało zastąpione nowszymi i doskonalszymi konstrukcjami.

Rys. 27. Alessandro Volta – wybitny fizyk włoski, zajmujący się głównie elektrycznością. Wynalazł elektrofor (przrząd do elektryzowania ciał), elektroskop i kondensator płaski. Odkrył przewodnictwo metali i elektrolitów. Skonstruował stos elektryczny – źródło stałego napięcia, co zapoczątkowało prace nad obwodami elektrycznymi.



Obecnie w życiu codziennym używamy wielu typów ogniw. Najpopularniejsze z nich to **ogniwa Georgesa Leclanchégo** (czytaj: żorża leklanszatego) wynalezione przez tego francuskiego chemika w 1866 roku, rys. 28. Na rynku występują w formatach R3/AAA, R6/AA (baterie „paluszki”), R10, R14, R20, 3R12 (baterie płaskie) i 6F22 (baterie 9-woltowe). Ogniwo jest umieszczone w cynkowym pojemniku odgrywającym rolę elektrody ujemnej. W centralnej części znajduje się elektroda węglowa zakończona metalowym wieczkiem, będąca elektrodą dodatnią. Otoczona jest sproszkowanym tlenkiem manganu. Funkcję elektrolitu pełni wilgotna pasta chlorku amonu. Całość jest zalana masą smolną zapobiegającą wysychaniu wnętrza ogniwa oraz wyciekowi elektrolitu.

budowa ogniwa



Rys. 28. Przekrój ogniwa Leclanchégo.

Dzięki takiemu doborowi substancji we wnętrzu ogniwa dochodzi do reakcji chemicznych powodujących przemieszczanie się elektronów z elektrody dodatniej do ujemnej, wbrew siłom pola elektrycznego. Te reakcje chemiczne są tą opisywaną w temacie dotyczącym napięcia „pompą” zapewniającą różnicę energii potencjalnych. Energia ta może potem zostać wykorzystana w postaci pracy prądu elektrycznego w obwodzie zasilanym ogniwem. W ogniwie Leclanchégo powstaje napięcie o wartości 1,5 V. Maleje ono wraz ze zużywaniem się substancji biorących udział w reakcjach.

Innymi parametrami użytkowymi ogniwa są: pojemność, prąd maksymalny i okres trwałości. Pojemność to inaczej wielkość ładunku, jaki może zostać czerpany z ogniwa do całkowitego zużycia w nim substancji chemicznych. Wyrażamy ją w kulombach lub amperogodzinach. Zależy ona od ilości substancji, a więc od rozmiarów ogniwa. Prąd maksymalny wynika z wartości oporu elektrycznego, jaki stawia wewnątrz ogniwa. Okres trwałości mówi, ile czasu ogniwo może być przechowywane, zanim ulegnie samorozładowaniu. W zależności od rodzaju ogniwa okres ten wynosi od roku do kilkunastu lat.

Oprócz ogniw Leclanchégo są dostępne w sprzedaży też bardziej pojemne **ogniwa alkaliczne**, w których elektrolitem jest roztwór wodorotlenku potasu, oraz **ogniwa litowe**, znacznie trwalsze i pojemniejsze, dające napięcie 3 V.

Akumulatory

Opisane wyżej ogniwa zaliczamy do tak zwanych **ogniw pierwotnych**. Reakcje zachodzące w ich wnętrzach są nieodwracalne i prowadzą do zużycia się substancji biorących udział w reakcjach. Rozładowanych ogniw nie da się z powrotem naładować. Są one jednorazowe i po wykorzystaniu nadają się do wyrzucenia. Z uwagi na użyte w ich budowie substancje, ogniw nie należy wyrzucać do śmieci niesegregowanych, tylko oddawać do recyklingu.

ogniwo pierwotne



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

ogniwo wtórne

cykl pracy
akumulatora

Z przyczyn ekologicznych i ekonomicznych coraz większą popularność zyskują **ogniwa wtórne** dające się wielokrotnie naładować, tak zwane **akumulatory**. Od dziesięcioleci są one wykorzystywane w pojazdach mechanicznych, a w ostatnich dekadach służą powszechnie do zasilania urządzeń elektronicznych: telefonów, laptopów czy aparatów fotograficznych. Dostępne są też na rynku w formatach ogniw jednorazowych, dzięki czemu mogą być wykorzystywane powszechnie. Są droższe od ogniw jednorazowych, ale ich zakup zwraca się po kilku ładowaniach.

Cykl pracy akumulatora składa się z dwóch faz:

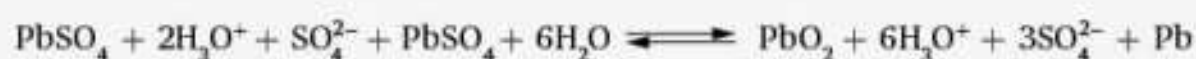
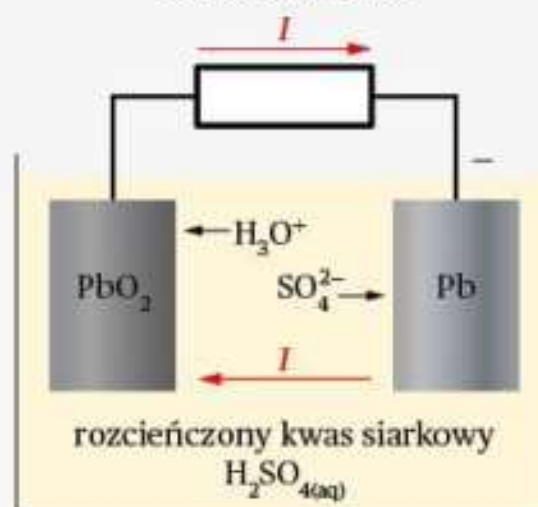
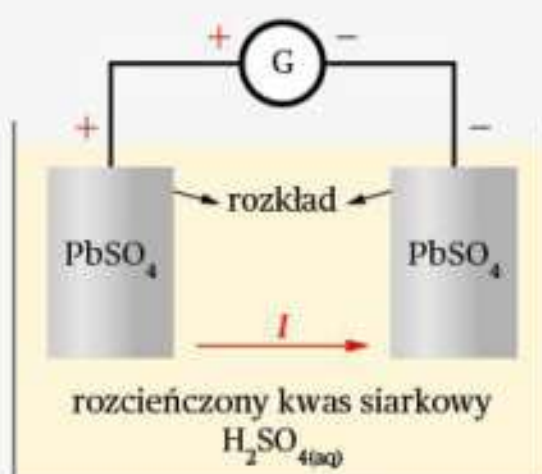
1. ładowanie, podczas którego dostarczana z zewnątrz energia elektryczna zamienia się w energię chemiczną;
2. czerpanie energii z akumulatora – zamiana energii chemicznej w elektryczną. Reakcje chemiczne zachodzą w drugą stronę i prąd płynie w przeciwnym kierunku.

Chcesz wiedzieć więcej?

Pracy akumulatora zawsze towarzyszą także uboczne reakcje nieodwracalne powodujące, że z czasem akumulator traci swoje właściwości.

Ładowanie

Rozładowywanie



Rys. 29. Budowa i zasada działania akumulatora kwasowo-ołowiowego oraz jego wygląd zewnętrzny.

Na rysunku 29 przedstawiono akumulator kwasowo-ołowiowy, wynaleziony w Niemczech w 1850 roku i stosowany powszechnie w samochodach. Naładowany akumulator składa się z dwóch płyt – jednej ołowianej (elektroda ujemna), a drugiej z dwutlenku ołowiu (elektroda dodatnia) – zanurzonych w roztworze wodnym kwasu siarkowego o stężeniu 37%. Gdy podłączymy do akumulatora odbiornik energii elektrycznej, na skutek reakcji chemicznych przez elektrolit zaczyna płynąć prąd, a płyty pokrywają się siarczanem ołowiu. Stężenie elektrolitu maleje. Ładowanie akumulatora następuje poprzez podłączenie go do źródła napięcia stałego, tak aby prąd w elektrolicie płynął w przeciwną stronę niż podczas rozładowywania. Na skutek odwrotnych reakcji chemicznych płyty odzyskują swoją pierwotną postać, a stężenie elektrolitu rośnie do poprzedniej wartości. Napięcie między płytami naładowanego akumulatora wynosi około 2 V.



Łączenie ogniw

Pojedyncze ogniwo akumulatora samochodowego daje napięcie 2 V, a do prawidłowego funkcjonowania układu zapłonowego oraz oświetlenia samochodu potrzeba napięcia 12 V. Podobnie urządzenia codziennego użytku, na przykład latarki, często wymagają napięcia wyższego niż osiągalne przy użyciu pojedynczego ogniwa. Zbadamy, w jaki sposób należy połączyć ze sobą ogniwa, aby otrzymać wyższe napięcie. Grupę połączonych ze sobą ogniw nazywamy **baterią**. Potocznie tą nazwą określa się również pojedyncze ogniwa, ale nie jest to nazwa poprawna.

bateria

Doświadczenie

Pomocze: kilka jednakowych ogniw, woltomierz, komplet przewodów, pudełko z zaciskami do montowania ogniw.

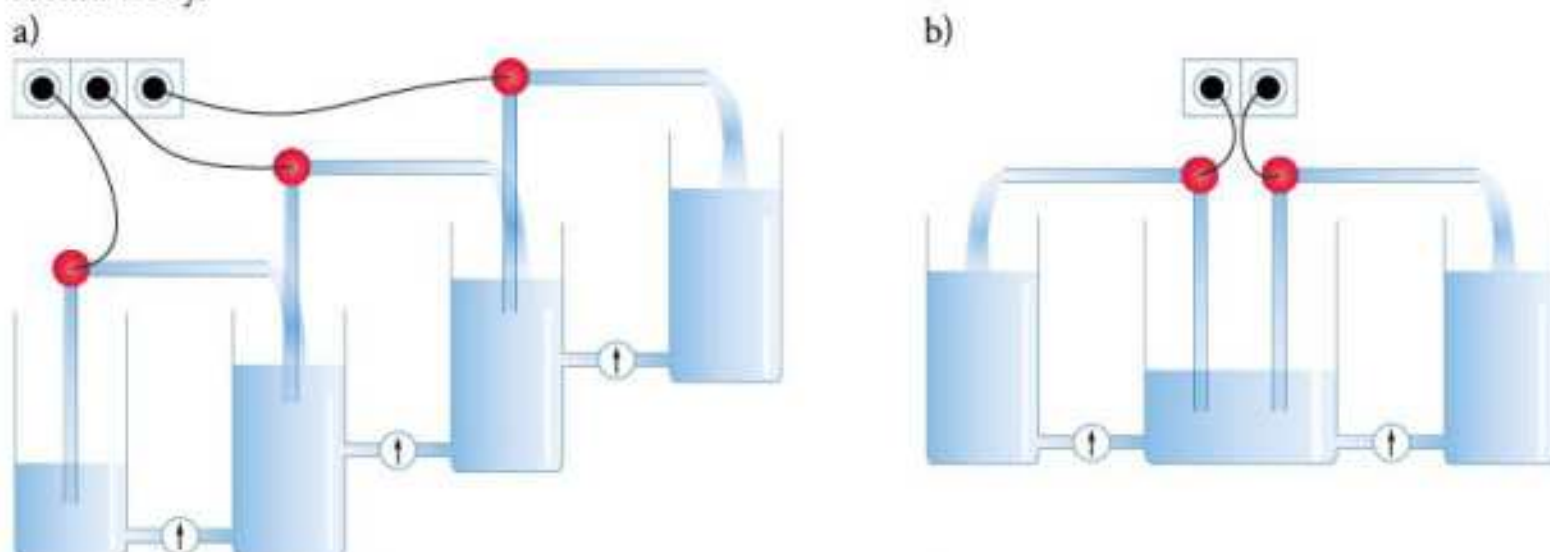
Na początku zmierz napięcie między biegunami każdego z ogniw z osobna i zanotuj wyniki w zeszycie. Następnie połącz kolejno 2, później 3, a następnie 4 ogniwa szeregowo (czyli biegun dodatni danego ogniwa z biegunem ujemnym następnego). Zmierz napięcie między skrajnymi biegunami połączonych ogniw.

Obserwacja: Napięcia ogniw połączonych szeregowo się sumują.

Teraz połącz kolejno 2, później 3, a następnie 4 ogniwa równolegle, czyli zepnij wszystkie bieguny dodatnie razem i wszystkie bieguny ujemne razem. Zmierz napięcie między połączonym biegunem dodatnim a ujemnym.

Obserwacja: Napięcie między biegunami ogniw połączonych równolegle jest takie samo, jak napięcie pojedynczego ogniwa.

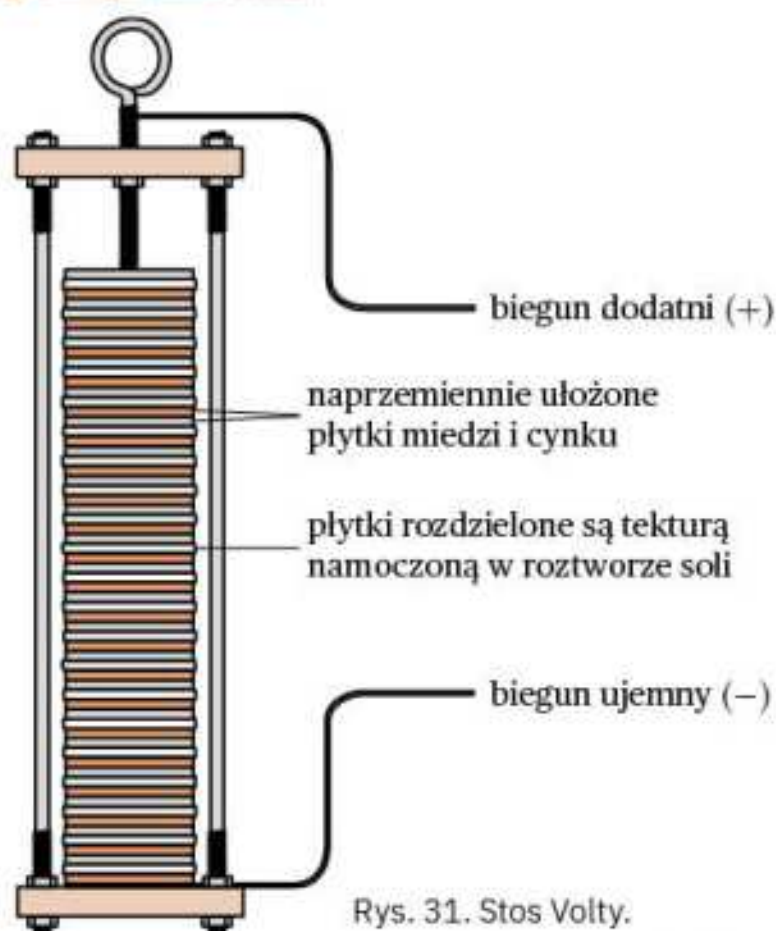
Wyniki tych obserwacji można wyjaśnić na podstawie zasady zachowania energii, a pomocna będzie znowu analogia hydrauliczna (rys. 30). Jeśli zastosujemy układ pomp, z których każda jest w stanie wtłoczyć wodę na określoną wysokość i każda kolejna pompa jako punkt startowy przyjmie poziom osiągnięty przez pompę poprzednią, to ostateczna wysokość, na jaką zostanie wtłoczona woda, będzie sumą wysokości uzyskiwanych przez poszczególne pompy. Pamiętamy, że odpowiednikiem tej wysokości jest napięcie elektryczne. Jeśli wszystkie pompy będą tłoczyć wodę z tego samego poziomu, to co najwyżej zwieliokrotnimy wielkość przepływu (czyli w przypadku elektryczności – natężenie prądu), natomiast nie zwiększymy wysokości poziomu wody.



Rys. 30. Analogia hydrauliczna łączenia ogniw: a) szeregowego i b) równoległego.



1. PRĄD ELEKTRYCZNY



Stos elektryczny skonstruowany w 1800 roku przez Voltę był baterią wielu ogniw połączonych szeregowo. Składał się z naprzemiennie ułożonych jeden na drugim krążków wielkości dużych monet, wykonanych kolejno z miedzi, kartonu nasączonego roztworem soli i z cynku. Każde z takich ogniw dawało napięcie rzędu 1 V. Napięcia te sumowały się, dzięki czemu było możliwe uzyskiwanie napięcia rzędu setek woltów. To z kolei pozwoliło na skonstruowanie obwodów elektrycznych i rozpoczęcie badań naukowych w tej dziedzinie.

Rys. 31. Stos Volty.

szeregowe
i równoległe
łączenie ogniw

Akumulatory samochodowe zapewniają napięcie 12 V, gdyż składają się z sześciu połączonych szeregowo sekcji, z których każda daje napięcie 2 V. Podsumowując: w **szeregowym połączeniu ogniw** sumują się ich napięcia. W **połączeniu równoległym ogniw** sumują się ich pojemności, co pozwala czerpać prąd o większym natężeniu lub przez dłuższy czas.

Uwaga: nigdy nie należy łączyć ze sobą równoległe ogniw różnych producentów lub o różnym stopniu zużycia. Jeśli napięcia ogniw będą się różnić, prąd w obwodzie będzie płynąć mimo odłączenia odbiornika. Ogniwo o większym napięciu będzie bezskutecznie próbowało „naładować” ogniwo słabsze i samo się przez to rozładuje. Zawsze wymieniamy komplet ogniw, używając do tego elementów tego samego typu, zakupionych w tym samym czasie.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij pojęcia *ogniwo* oraz *bateria*.
2. Wymień zalety i wady ogniw pierwotnych i ogniw wtórnych.
3. Oblicz, ile ogniw Leclanchégo znajduje się w:
a) płaskiej baterii (napięcie 4,5 V); b) baterii dziewięciowoltowej.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 44

- Ogniwo galwaniczne nazywamy urządzenie, które na drodze reakcji chemicznych zamienia energię wiązań chemicznych w energię elektryczną.

s. 44

- Każde ogniwo ma dwie elektrody wykonane z różnych materiałów, zanurzone w elektrolicie, czyli wodnym roztworze kwasu, zasady lub soli. Napięcie między biegunami ogniwa zależy od rodzaju substancji, z których wykonano elektrody.



- Ogniwa dzielimy na pierwotne, działające w sposób jednorazowy, oraz wtórne, zwane też akumulatorami, w których zachodzą reakcje odwracalne. s. 45
- Ładowanie akumulatora to proces zamiany energii elektrycznej w energię chemiczną, która może zostać potem wykorzystana z powrotem jako energia elektryczna. s. 46
- Połączone ze sobą ogniwa nazywamy baterią. s. 47
- Łącząc ogniwa szeregowo, sumujemy ich napięcia. Łącząc ogniwa równolegle, sumujemy ich pojemności, co pozwala czerpać prąd o większym natężeniu lub przez dłuższy czas. s. 48

1.9. Dioda półprzewodnikowa

NA TEJ LEKCJI:

- zrozumiesz, jak działa łącze p-n;
- poznasz różne rodzaje diod;
- dowiesz się, jakie zastosowania mają diody półprzewodnikowe.

Budowa i zasada działania diody półprzewodnikowej

Wiesz już, że półprzewodniki są materiałami, których opór elektryczny przyjmuje wartości pośrednie między przewodnikami i izolatorami oraz zależy od wielu czynników, którymi można sterować. W przeciwieństwie do metali, zależność przepływającego przez nie prądu od przyłożonego napięcia nie spełnia prawa Ohma. Natomiast wykazują cechy, dzięki którym można stosować je w bardziej zaawansowanych układach elektronicznych.

Najprostszym elementem półprzewodnikowym jest **dioda** zbudowana ze złączonych ze sobą półprzewodników domieszkowanych typu p i n. Jak pamiętamy, atomy domieszki w półprzewodniku typu p są **akceptorami** – przyłączają elektrony, pozostawiają po nich dziury i stają się jonami ujemnymi. Nośnikami prądu w takim półprzewodniku są więc dodatnie dziury oraz nieliczne wolne elektrony. W półprzewodniku typu n jest na odwrót: atomy domieszki są **donorami** – dostarczają elektronów, które grają rolę większościowych nośników prądu, a same stają się jonami dodatnimi. Oprócz elektronów w takim półprzewodniku występują nieliczne dziury. W obu przypadkach kryształy tych półprzewodników pozostają obojętne elektrycznie – ilość nośników prądu jest równa ilości jonów przeciwnego znaku.

Jeśli doprowadzimy do zetknięcia obu rodzajów półprzewodników powstaje tak zwane **złącze p-n**. Na skutek zwykłej dyfuzji, która zawsze prowadzi do wyrównania koncentracji, elektrony przepływają do obszaru, gdzie jest ich mniej, czyli do półprzewodnika typu p, a dziury na odwrót – dyfundują do obszaru typu p. Elektrony z obszaru

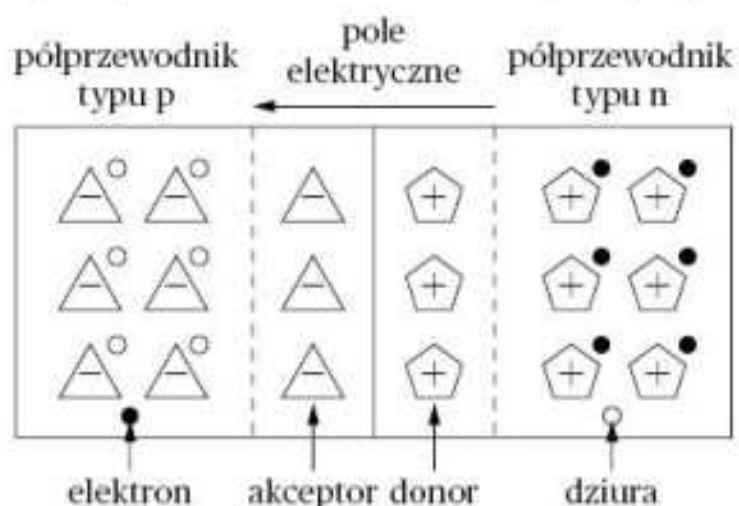
dioda

zjawiska
zachodzące
w diodach



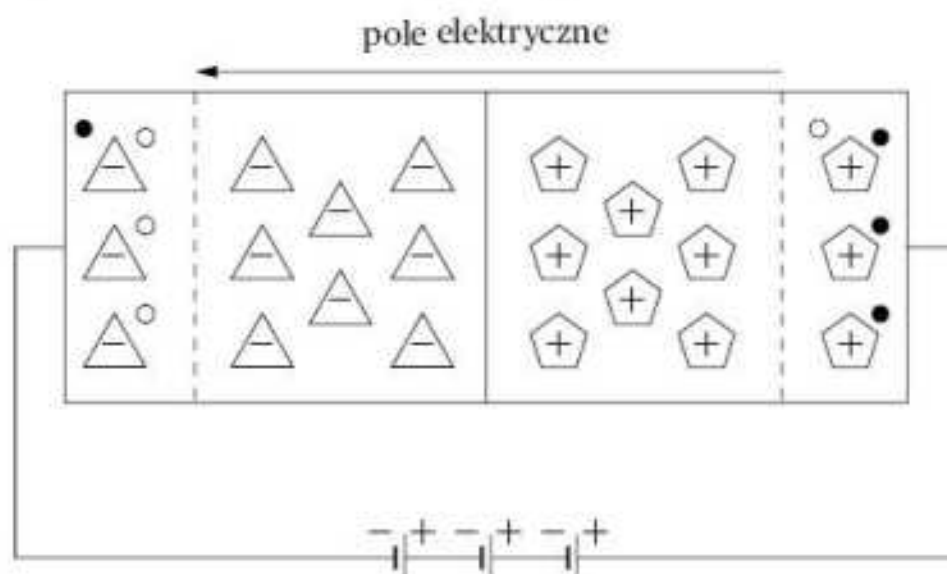
1. PRĄD ELEKTRYCZNY

n zapelniają dziury z obszaru p, a dziury wędrujące do obszaru n zubożniają się ze znajdującymi się tam elektronami. Zjawisko to nazywamy **rekombinacją**. Na jego skutek w cienkiej warstwie półprzewodnika typu p przeważa nadmiar jonów ujemnych (dziury odpłynęły), a w cienkiej warstwie półprzewodnika typu n przeważają jony dodatnie (gdyż elektrony odpłynęły). Obszar ten jest pozbawiony nośników prądu elektrycznego, więc staje się izolatorem. Ponieważ obie warstwy są naładowane ładunkami przeciwnego znaku, pojawia się między nimi pole elektryczne skierowane od obszaru n do obszaru p, przeciwdziałające dalszej dyfuzji. Warstwa ta staje się tak zwaną **warstwą zaporową**. Tę sytuację przedstawiono na rysunku 32. Słowo „nie-spolaryzowane” oznacza, że do diody nie przyłożono zewnętrznego napięcia.



Rys. 32. Złącze p-n niespolaryzowane.

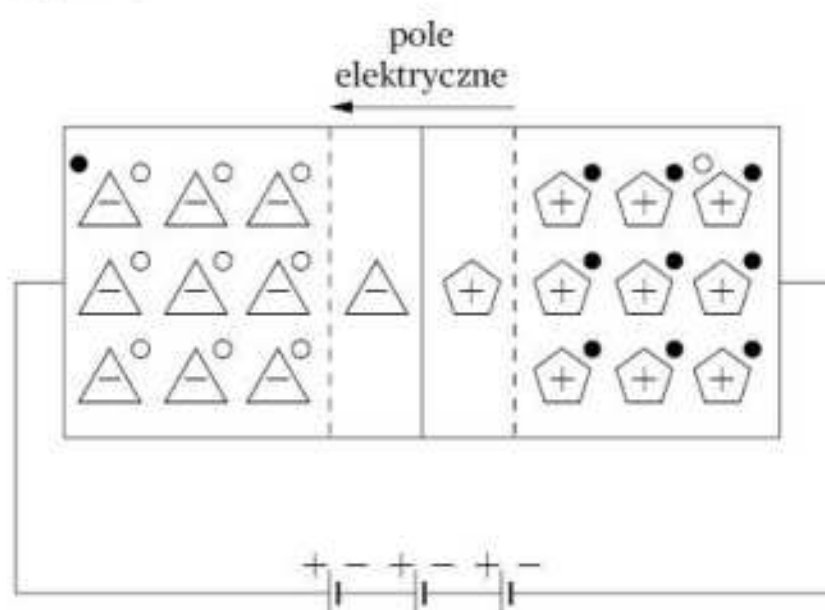
Pod wpływem zewnętrznego napięcia rozmiary warstwy zaporowej mogą rosnąć lub maleć. Jeśli podłączymy biegun ujemny do półprzewodnika typu p, a dodatni do półprzewodnika typu n (rys. 33), to elektrony w obszarze p zubożnią więcej dziur, rozszerzając obszar zajmowany przez nadmiar jonów ujemnych, a odpływ elektronów z obszaru n poszerzy warstwę zajmowaną przez nadmiar jonów dodatnich. Zwiększy się pole elektryczne przeciwstawiające się ruchowi ładunków. Nośniki prądu zostają odciągnięte od złącza, a jego opór rośnie. Dioda w tym kierunku nie przewodzi prądu (właściwie przewodzi bardzo słaby prąd). Mówimy, że jest **spolaryzowana w kierunku zaporowym**.



Rys. 33. Złącze p-n spolaryzowane w kierunku zaporowym.

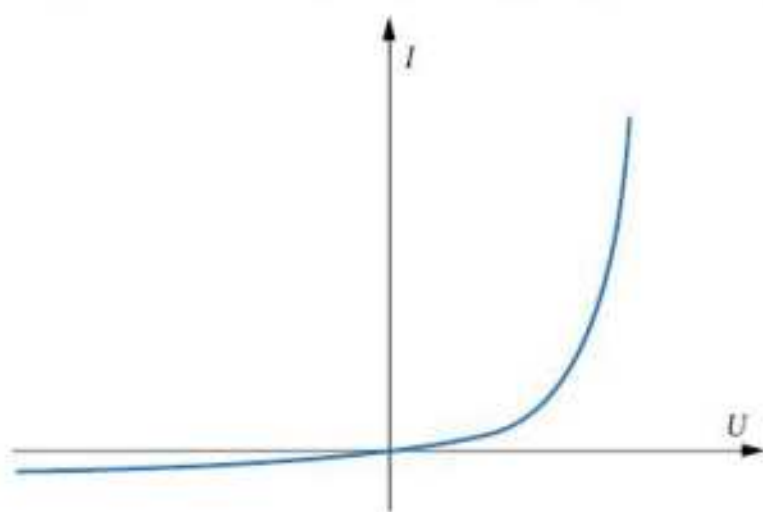


Jeśli diodę podłączymy do obwodu na odwrót, czyli dodatnim biegunem do obszaru p, a ujemnym do obszaru n, to przyłożone napięcie poskutkuje zmniejszeniem pola elektrycznego przeciwstawiającego się ruchowi ładunków. Warstwa zaporowa zwęzi się, gdyż zarówno dziury, jak i elektrony będą się przemieszczać w kierunku granicy złącza. Opór elektryczny warstwy zaporowej zmniejszy się i przez diodę popłynie silny prąd. Mówimy, że dioda została **spolaryzowana w kierunku przewodzenia** (rys. 34).



Rys. 34. Złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia.

Opisane zależności można zilustrować graficznie za pomocą wykresu zwanego **charakterystyką prądowo-napięciową** diody półprzewodnikowej (rys. 35). Jest to wykres zależności natężenia prądu płynącego przez diodę od przyłożonego do niej napięcia. Prawa strona wykresu odpowiada polaryzacji w kierunku przewodzenia, natomiast lewa – w kierunku zaporowym. Można powiedzieć, że dioda ma własności prostownicze: w jedną stronę przepuszcza silny prąd, a w drugą – bardzo słaby.



Rys. 35. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody.



Dioda elektroluminescencyjna (świecąca)

Luminescencją nazywamy zjawisko fizyczne polegające na emitowaniu przez materię promieniowania elektromagnetycznego pod wpływem jakiegoś czynnika pobudzającego, innego niż wysoka temperatura. Jeśli tym czynnikiem jest prąd elektryczny dostarczony z zewnątrz, mamy do czynienia z **elektroluminescencją**. Zjawisko to w niektórych typach diod zaobserwował i opisał już w latach dwudziestych XX wieku rosyjski fizyk i technik radiowy Oleg Łosiew (1903–1942). Wersję diod świecących nadających się do masowej produkcji przemysłowej opracował amerykański uczony i inżynier Nick Holonyak Jr (ur. 1928).

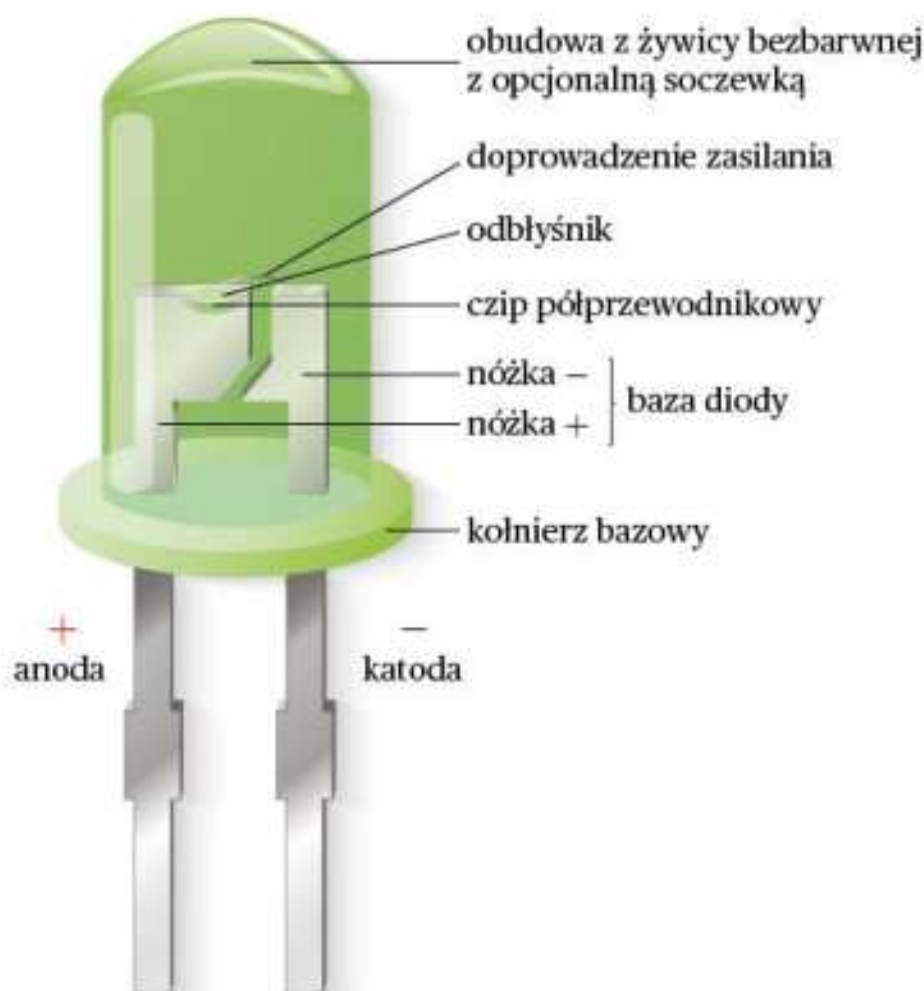


Rys. 36. Wygląd zewnętrzny diody świecącej i jej symbol graficzny.

budowa i zasada
działania diody
świecącej

Budowę wewnętrzną **diody świecącej** przedstawiono na rysunku 37. Centralną i najważniejszą jej częścią jest dioda półprzewodnikowa o specjalnie dobranym składzie chemicznym. Materiałem bazowym diody najczęściej jest arsenek galu (GaAs). Pod wpływem napięcia przyłożonego w kierunku przewodzenia zachodzi w diodzie proces **rekombinacji promienistej**. Polega on na wytwarzaniu światła podczas rekombinacji elektronów napływających z obszaru n z dziurami znajdującymi się w obszarze p. Z procesem tym wiąże się wydzielanie energii o konkretnej wartości – jest to ta sama energia, której trzeba dostarczyć, aby wyrwać elektron ze struktury krystalicznej i wytworzyć parę nośników ładunku elektron-dziura. Energia ta jest emitowana w postaci kwantu światła (to pojęcie zostanie szczegółowo wyjaśnione na lekcjach poświęconych fizyce atomowej) o konkretnej energii, a więc i konkretnej barwie. Barwa ta zależy tylko od składu chemicznego diody, czyli użytego do jej budowy materiału bazowego i rodzaju domieszek. Opracowano wiele rodzajów diod o różnym składzie, świecących różnymi barwami: od podczerwieni, przez wszystkie kolory światła widzialnego, do bliskiego nadfioletu. Sama intensywność świecenia jest w znacznym zakresie proporcjonalna do natężenia prądu przepływającego przez diodę. Oczywiście, jeśli podłączymy diodę do obwodu w kierunku zaporowym, opisane zjawisko nie zachodzi.

Cała struktura urządzenia jest zatopiona w przezroczystej żywicy. Na ogół zabarwia się ją na kolor, jaki emituje dioda. Nie ma to dużego wpływu na efekt końcowy – barwa, z jaką świeci dioda, zależy wyłącznie od konstrukcji jej elementu półprzewodnikowego.



Rys. 37. Budowa wewnętrzna diody elektroluminescencyjnej.

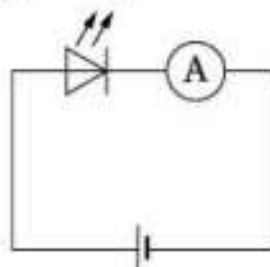
Badanie właściwości diody

Zanim zajmiemy się omówieniem zastosowań praktycznych diod, sprawdźmy doświadczalnie ich właściwości opisane powyżej.

Doświadczenie

Pomoce: bateria lub zasilacz, dioda świecąca lub kilka diod połączonych szeregowo, amperomierz.

Zmontuj układ doświadczalny według schematu. Zwróć uwagę, by napięcie zasilające było zgodne z parametrami diody – zazwyczaj jest to kilka woltów. Diody świeące są wprawdzie bardzo odporne na uszkodzenia mechaniczne, ale łatwo je zniszczyć poprzez przekroczenie dopuszczalnego napięcia. Jeśli nie masz możliwości regulacji napięcia i jest ono za duże, możesz kilka diod połączyć szeregowo lub włączyć w obwód szeregowo opornik o odpowiednio dobranym oporze.



Rys. 38. Układ do badania przewodnictwa diody świecącej.



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

W pierwszej wersji doświadczenia podłącz zasilanie zgodnie z kierunkiem przewodzenia – tak jak na schemacie.

Obserwacja: Dioda świeci, amperomierz wskazuje przepływ prądu.

Następnie zmień polaryzację diody, czyli podłącz źródło napięcia odwrotnie.

Obserwacja: Dioda nie świeci, prąd nie płynie.

Zaawansowana wersja ćwiczenia wymaga użycia zasilacza laboratoryjnego z regulacją napięcia. Spolaryzuj diodę w kierunku przewodzenia i zmień napięcie w granicach dopuszczalnych dla diody. Następnie zanotuj w tabeli w zeszycie wartości ustawionych napięć oraz natężenia prądów płynących przez diodę. Na tej podstawie sporządź w zeszycie wykres – charakterystykę prądowo-napięciową diody elektroluminescencyjnej.

Obserwacja: Wraz ze wzrostem napięcia wzrasta też natężenie prądu płynącego przez diodę, lecz nie jest to zależność liniowa. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody nie spełnia prawa Ohma. Intensywność świecenia diody zależy od natężenia prądu – im więcej elektronów rekombinuje z dziurami, tym więcej powstaje kwantów światła.



Chcesz wiedzieć więcej?

Dioda jako prostownik

Prąd elektryczny wytwarzany w elektrowni jest tak zwanym **prądem przemiennym** – płynie raz w jedną, raz w drugą stronę, a cykl tych przemian ma częstotliwość 50 Hz (zostanie to omówione w dalszej części podręcznika). Większość urządzeń elektrycznych stosowanych w domach i w przemyśle jest dostosowana do prądu przemennego. Są jednak takie zastosowania elektryczności, na przykład ładowanie akumulatorów, które wymagają prądu płynącego w jedną stronę, najlepiej stałego (czyli o niezmiennym napięciu i natężeniu). Urządzenie, które zamienia prąd przemienny w prąd stały, nazywamy **prostownikiem**. Prostownikami są na przykład wszelkie ładowarki do telefonów komórkowych i kamer oraz urządzenia do ładowania akumulatorów samochodowych.

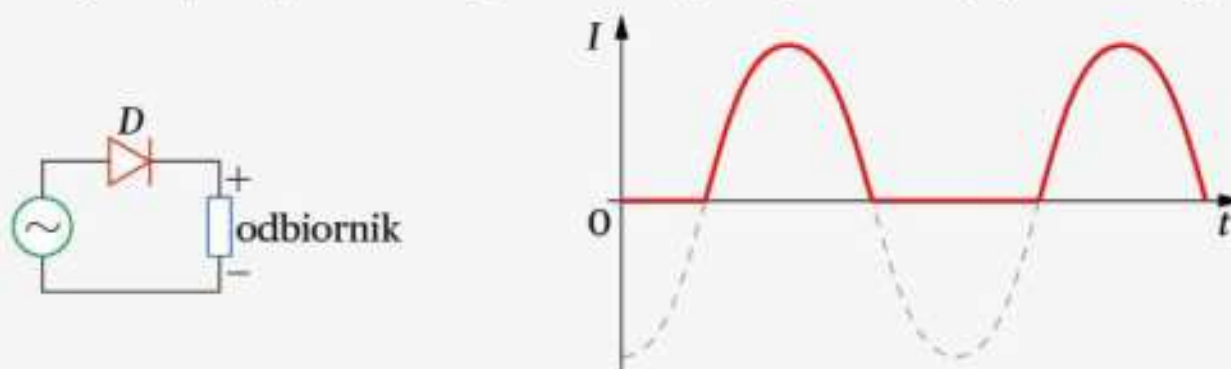
Najważniejszym elementem prostownika jest **dioda prostownicza**. Taka dioda powinna być zdolna do przewodzenia prądu o dużym natężeniu oraz wytrzymywać duże napięcie w kierunku zaporowym, aby nie następowało przebicie. Warunki takie spełniają diody zawierające krzem.



Rys. 39. Przykłady diod prostowniczych.

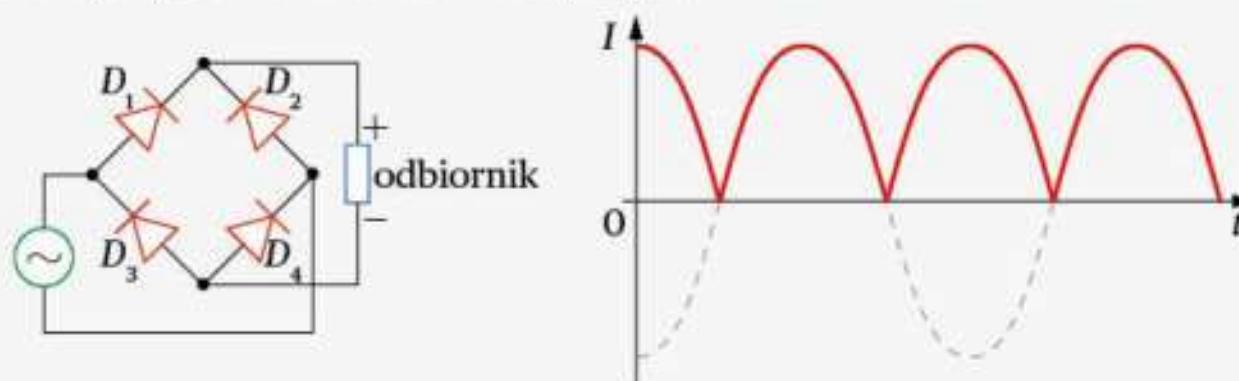


Zastosowanie jednej diody daje efekt połowiczny: prąd płynący we właściwą stronę zostaje przepuszczony, a płynący z powrotem – zatrzymany. Powoduje to zmarnowanie połowy mocy. Tak działa **prostownik jednopółówkowy** (półokresowy).



Rys. 40. Prostownik jednopółówkowy i efekt jego działania (przepuszczony prąd). Opornik symbolizuje odbiornik energii przystosowany do prądu jednokierunkowego.

Aby wykorzystać prąd płynący przeciwnie, należy zmienić jego kierunek. Do tego stosuje się odpowiedni układ diod, na przykład tak zwany **mostek Graetza** (czytaj: greca; rys. 41). Taka konstrukcja jest bardziej skomplikowana, ale pozwala na pełne wykorzystanie mocy prądu elektrycznego. Otrzymane na wyjściu napięcie nadal nie jest stałe (pulsuje w jedną stronę) i dlatego musi zostać dodatkowo wygładzone za pomocą odpowiednich filtrów elektrycznych.



Rys. 41. Prostownik dwupółówkowy (pełnookresowy).

Dioda jako źródło światła

Wykorzystanie diod elektroluminescencyjnych jako źródeł światła zyskuje w ostatnich latach coraz bardziej na popularności. Diody w porównaniu do tradycyjnych żarówek mają niemal same zalety:

- Przekształcają energię elektryczną płynącą przez złącze bezpośrednio w światło. Tradycyjne żarówki wytwarzają głównie ciepło (drucik wolframowy musi się rozgrzać do temperatury ok. 2000°C, aby świecić na białło), a świetlówka dzięki wyładowaniom elektrycznym wytwarza szkodliwe promieniowanie nadfioletowe, które przekształcane jest w światło widzialne w warstwie luminoforu, którą jest pokryta od wewnątrz szklana obudowa świetlówki.
- Dioda świeci światłem od razu o takiej barwie, jaką chcemy. Wynika ona tylko z rodzaju domieszki. Aby otrzymać światło barwne ze źródeł innych typów, konieczne

charakterystyka
diody świecącej



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

jest stosowanie odpowiednich filtrów. Światło diody jest żywe i nasycone, światło uzyskane za pomocą filtrów – bardziej blade.

- Diody elektroluminescencyjne nie zawierają szkodliwych elementów w przeciwieństwie do świetlówek, w których znajduje się trująca rtęć. Utylizacja diod sprawia mniej problemów.
- Diody są bardzo trwałe – mogą świecić bez awarii wiele lat. Zużywają się stopniowo – nie gasną nagle, ale z upływem kolejnych miesięcy świecą coraz słabiej. Są też odporne na uszkodzenia mechaniczne, natomiast wykazują wrażliwość na zbyt duże napięcie.
- Wymagają niewielkiego napięcia i zużywają mało energii. Łatwo nimi sterować.

Do niedawna główną wadą diod była wysoka cena, ale rozwój technologiczny i umiędzianie produkcji spowodowały, że czynnik ten stracił na znaczeniu. Dlatego też ostatnio bardzo upowszechniły się lampy LED w formie dotychczasowych żarówek, zawierających w swojej oprawie diodę elektroluminescencyjną wraz z niezbędną elektroniką dostosowującą napięcie. Są one kilkukrotnie bardziej wydajne od tradycyjnych żarówek, to znaczy świecą równie jasno przy kilkukrotnie mniejszym poborze mocy i mają dłuższą żywotność. W skali świata ich stosowanie przyczynia się do ograniczenia zużycia energii elektrycznej i poprawy stanu środowiska.

Pewnym problemem technicznym było stworzenie lamp LED świecących na białe. Jak wiadomo, światło białe jest mieszaniną wszystkich barw tęczy, natomiast pojedyncza dioda świecąca świeci światłem o jednej konkretnej barwie. Problem rozwiązano w ten sposób, że wewnątrz bańki przypominającej zwykłą żarówkę znajduje się dioda świecąca na niebiesko. Bańka szklana jest pokryta luminoforem, który część światła niebieskiego przekształca w światło żółto-zielone. Do oka użytkownika dociera mieszanina tych trzech barw, zbliżona do światła białego.



Rys. 42. Przykładowe żarówki LED.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, jak działa złącze n-p.
2. Wytlumacz, dlaczego dioda świecąca świeci.
- 3*. Przedstaw zasadę działania prostownika prądu elektrycznego.
4. Wymień zalety oświetlenia opartego na diodach elektroluminescencyjnych.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- Dioda półprzewodnikowa jest zbudowana z dwóch domieszkowanych kryształów półprzewodnika – jednego typu p i drugiego typu n. s. 49
- Zjawiska zachodzące na poziomie atomowym sprawiają, że dioda przewodzi prąd tylko w jednym kierunku, a w drugim zachowuje się niemal jak izolator. s. 49
- W diodach świecących zachodzi zjawisko elektroluminescencji – bezpośredniej zamiany energii pochodzącej z rekombinacji elektronów i dziur na energię świetlną. s. 52
- Diody elektroluminescencyjne są wydajnym, ekologicznym i coraz bardziej popularnym źródłem światła. s. 55

1.10. Tranzystor

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak jest zbudowany tranzystor i na czym polega zasada jego działania;
- poznasz wybrane zastosowania tranzystora we współczesnej elektronice.

Ogólne wiadomości o tranzystorach

Urządzeniem półprzewodnikowym o możliwościach znacznie większych niż dioda półprzewodnikowa jest **tranzystor**. To urządzenie ma dwa złącza półprzewodnikowe i trzy elektrody (końcówki). Służy między innymi do wzmacniania sygnałów elektrycznych. Pierwsze próby skonstruowania tranzystora podjęto już w latach dwudziestych XX wieku, lecz były nieudane z powodu braku możliwości otrzymania kryształów półprzewodnikowych o odpowiedniej czystości. W pełni funkcjonalny tranzystor zbudowano dopiero w 1947 roku w laboratoriach Bella w USA. Był to wynalazek tak przełomowy, że w 1956 roku twórcy tranzystora: John Bardeen (czytaj: dżon bardin), Walter Brattain (czytaj: łolter braten) oraz William Shockley (czytaj: liliam szokli), otrzymali za jego skonstruowanie Nagrodę Nobla z fizyki.

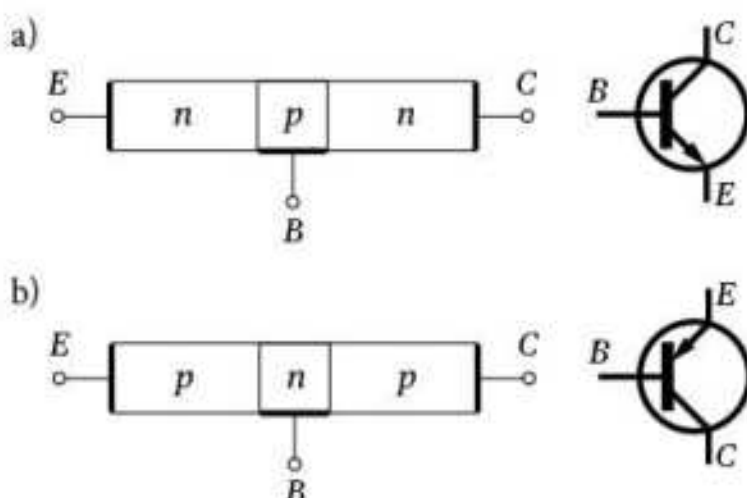
Trudno wyobrazić sobie współczesny świat bez tranzystorów. Dzięki postępującej miniaturyzacji stały się one elementami składowymi wszystkich układów scalonych, a więc procesorów, pamięci półprzewodnikowych i innych chipów sterujących właściwie wszystkimi współczesnymi urządzeniami elektronicznymi. W najbardziej skomplikowanych współczesnych układach scalonych liczba tranzystorów przekracza miliard.

tranzystor

tranzystory
bipolarne

Do tej pory opracowano bardzo wiele różnych typów tranzystorów. Można je podzielić na dwie główne grupy:

- **bipolarne** – prąd płynie w nich przez obszary odmiennie domieszkowane: n-p-n lub p-n-p. Nazwy tych obszarów to **emiter (E)**, **baza (B)** i **kolektor (C)**. W tranzystorach tego typu niewielkie zmiany natężenia prądu między bazą a emitery sterują o wiele większym prądem między emitery a kolektorem;



Rys. 43. Tranzystory bipolarne: a) n-p-n i jego symbol graficzny, b) p-n-p i jego symbol.

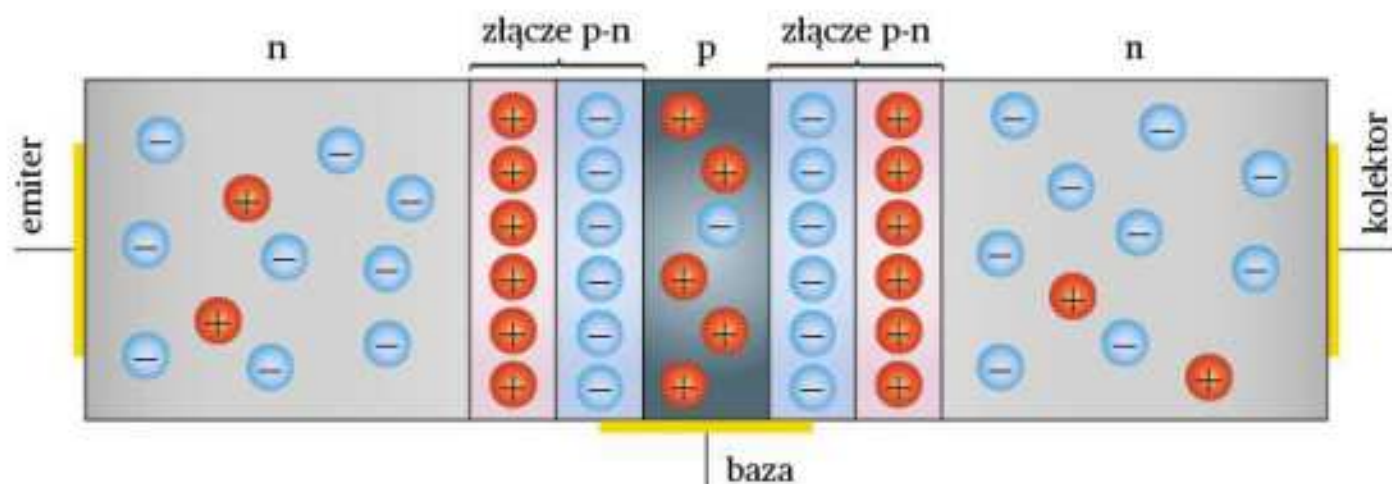
tranzystory
unipolarne

- **unipolarne**, zwane inaczej polowymi – prąd płynie w nich przez półprzewodnik o jednolitym typie przewodnictwa, w obszarze zwanym kanałem. Na jego końcach znajdują się elektrody o nazwach **źródło (S)** i **dren (D)**. Natężeniem prądu płynącego między źródłem a drenem steruje się za pomocą trzeciej, położonej wzdłuż kanału, ale odizolowanej od niego elektrody, zwanej **bramką (G)**. Niewielkie zmiany napięcia na bramce powodują duże zmiany natężenia prądu w kanale. Tranzystory tego typu mają wiele odmian i nadają się szczególnie do budowy układów scalonych.

Zasada działania tranzystora bipolarnego

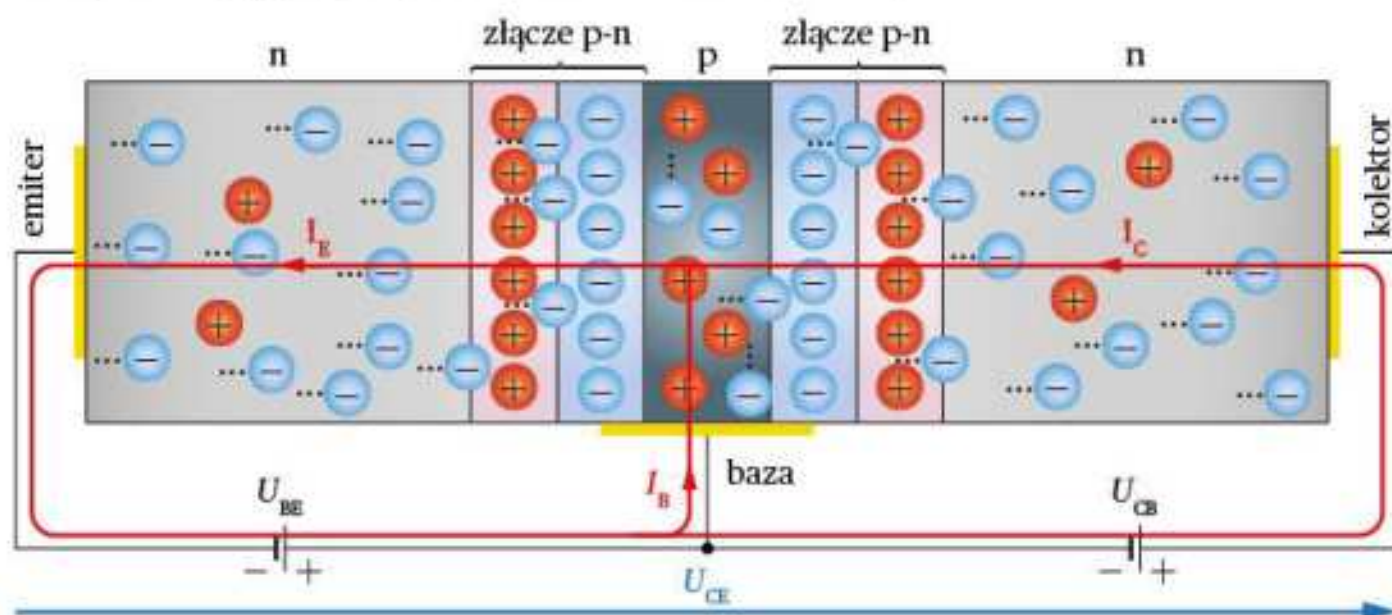
Skupimy się obecnie na zasadzie działania **tranzystora bipolarnego n-p-n**. W **tranzystorach typu p-n-p** zachodzą analogiczne zjawiska, tylko polaryzacja złącz jest przeciwna. Rysunek 44 należy traktować poglądowo – rzeczywisty kształt, rozmiary i rozmieszczenie poszczególnych obszarów są zupełnie inne. Współczesne tranzystory są mikroskopijne, a grubość bazy jest około 10 razy mniejsza od grubości emitery i kolektora. Emiter domieszkowany jest najmocniej, a baza najsłabiej, w związku z czym w jej obszarze znajduje się najmniej swobodnych nośników prądu.

Jeśli tranzystor jest odłączony od źródła zasilania, prąd oczywiście przez niego nie przepływa. Tworzą się w nim dwa złącza p-n o przeciwnych zwrotach. Przyłożenie napięcia o dowolnym zwrocie między emitery a kolektorem spowoduje, że zawsze jedno ze złącz będzie spolaryzowane w kierunku zaporowym i prąd przez tranzystor również nie popłynie. Tak samo podłączenie ujemnego bieguna zasilania do bazy, a dodatniego do kolektora nie spowoduje przepływu dużego prądu, gdyż złącze baza-kolektor będzie spolaryzowane w kierunku zaporowym.



Rys. 44. Tranzystor bipolarny n-p-n odłączony od zasilania.

Sytuacja zmienia się, gdy do tranzystora podłączymy napięcie w sposób pokazany na rysunku 45. Złącze baza-emiter jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a baza-kolektor – w kierunku zaporowym. Z bazy do emitera płyną dziury, a z emitera do bazy – swobodne elektrony. Gdyby baza była szeroka, to napływanie elektronów do bazy nie miałoby wpływu na zjawiska zachodzące między bazą a kolektorem. Ale baza jest bardzo cienka. Elektrony, które dotarły do bazy z emitera, są nierównomiernie rozłożone, koncentrują się bardziej od strony emitera. Nierównomierność koncentracji jest przyczyną dyfuzji, wskutek której duża część elektronów dociera przez cienką bazę w pobliże złącza z kolektorem. Tam elektrony zostają wciągnięte do kolektora przez jony dodatnie znajdujące się na granicy obszaru n. W ten sposób zaczyna płynąć prąd w kolektorze. Jest on znacznie silniejszy od prądu bazy, gdyż elektrony pochodzą z emitera, który jest większy od bazy i silniej domieszkowany. Tak oto powodujemy, że niewielki prąd (przenoszony przez dziury) między bazą a emiterem inicjuje przepływ o wiele silniejszego prądu między kolektorem a emiterem (elektrony płyną oczywiście od emitera do kolektora).



Rys. 45. Tranzystor podłączony do obwodu w sposób umożliwiający jego pracę. Oznaczenia: U_{BE} – napięcie baza-emiter, U_{CB} – napięcie kolektor-baza, U_{CE} – napięcie kolektor-emiter, I_E – prąd emitera, I_B – prąd bazy, I_C – prąd kolektora. Z pierwszego prawa Kirchhoffa wynika, że $I_E = I_B + I_C$. Ponadto $U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$.



Niewielkie zmiany prądu baza-emiter mogą sterować o wiele większymi zmianami prądu kolektor-emiter.

Zjawisko tranzystorowe – proces sterowania prądu kolektorowego za pomocą napięcia pomiędzy emiterem a bazą.

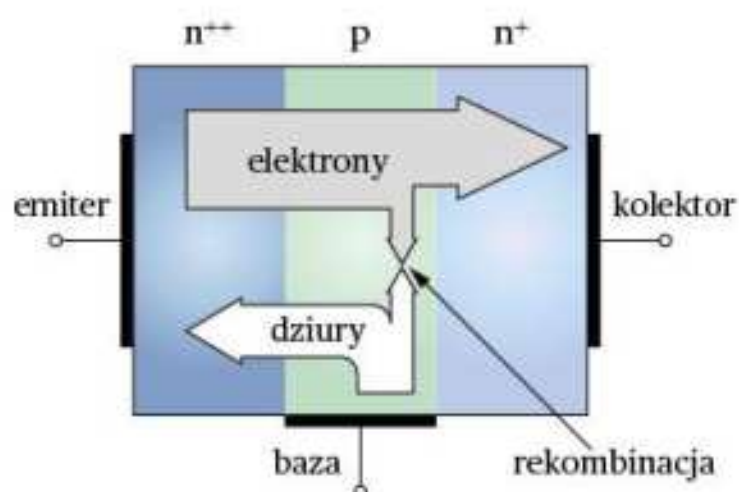
współczynnik
wzmocnienia
prądowego
tranzystora

Stosunek prądu kolektora do prądu bazy nazywamy **współczynnikiem wzmocnienia prądowego tranzystora**:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Dla typowych tranzystorów wartość tego współczynnika dochodzi do kilkuset.

Poglądowo kierunki i charakter prądów płynących w tranzystorze n-p-n można przedstawić, tak jak na rysunku 46. Liczba plusów przy symbolach n i p wskazuje na stopień domieszkowania obszarów półprzewodnika.



Rys. 46. Przeptyw nośników prądu podczas pracy tranzystora bipolarnego n-p-n.

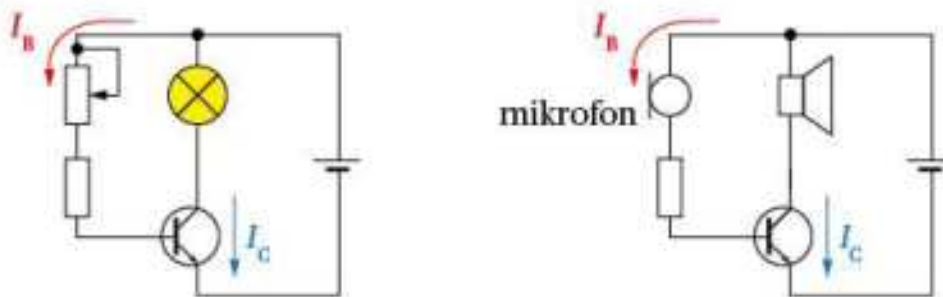
Zastosowania tranzystorów

W zależności od napięć przyłożonych do poszczególnych elektrod tranzystor może znajdować się w jednym z czterech stanów pracy:

- **stan aktywny** – opisany powyżej – prąd kolektora jest β razy większy od prądu bazy i tranzystor pracuje jako wzmacniacz;
- **stan nasycenia** – prąd bazy jest na tyle duży, że obwód kolektora nie jest w stanie dostarczyć prądu β razy większego; natężenie prądu zależy wtedy od możliwości obwodu kolektora, a nie od napięcia baza-emiter; w tej sytuacji nie ma sterowania, a napięcie kolektor-emiter spada do niewielkiej wartości; jest to sytuacja podobna do zwarcia;
- **stan zatkania** – zbyt niskie napięcie przyłożone do złącza baza-emiter powoduje, że nie jest ono spolaryzowane lub jest spolaryzowane zaporowo; prąd kolektora spada wtedy do wartości bliskiej zeru;
- **stan inwersyjny** – napięcia są przyłożone na odwrót; emiter jest spolaryzowany w kierunku zaporowym, a kolektor – w kierunku przewodzenia; w tym stanie tranzystor wykazuje słabe właściwości wzmacniające.

tranzystor jako
wzmacniacz

Aby użyć tranzystora jako **wzmacniacza**, sygnał, który chcemy wzmocnić, musimy doprowadzić do obwodu baza-emiter, a sygnał wzmocniony wyprowadzić w obwodzie kolektor-emiter. Ideę takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 47. Użyte w schemacie oporniki muszą być tak dobrane, aby tranzystor pracował w stanie aktywnym. W przeciwnym wypadku nie będzie miał opisanych powyżej właściwości wzmacniających.



Rys. 47. Przykładowe użycie tranzystora n-p-n jako wzmacniacza.

Tranzystor może też występować w roli **przełącznika (klucza tranzystorowego)**. Wykorzystuje się wtedy przejścia tranzystora między stanem nasycenia a stanem zatkanym (tranzystor przewodzi lub nie). Znajduje to szerokie zastosowanie w układach logicznych, w których stanom tranzystora przypisuje się logiczne wartości „1” i „0”. Dlatego też tranzystory są podstawą funkcjonowania wszystkich komputerów i innych urządzeń elektronicznych opartych na procesorach.

tranzystor jako
przełącznik (klucz)

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Na podstawie źródeł drukowanych lub materiałów dostępnych w Internecie przygotuj prezentację o budowie, zasadzie działania i zastosowaniach tranzystorów unipolarnych.
2. Przygotuj referat lub prezentację multimedialną o aktualnych osiągnięciach w dziedzinie miniaturyzacji tranzystorów.
3. Korzystając z własnej wiedzy, wyjaśnij zasadę działania tranzystora bipolarnego p-n-p.
4. Natężenie prądu emitera wynosi 45 mA, a natężenie prądu kolektora to 43 mA. Oblicz współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Tranzystor to urządzenie trójelektrodowe, w którym natężenie prądu między dwiema skrajnymi elektrodami (w tranzystorach bipolarnych: emiterem i kolektorem, a w unipolarnych: źródłem i drenem) jest sterowane za pomocą prądu lub napięcia między elektrodą wejściową a środkową (w tranzystorach bipolarnych: emiterem a bazą, a w unipolarnych: źródłem a bramką). s. 58
- Ze względu na rodzaj konstrukcji tranzystory dzielimy na bipolarne i unipolarne (polowe). Tranzystor bipolarny składa się z trzech odmiennie domieszkowanych kryształów półprzewodnikowych: n-p-n lub p-n-p, o nazwach: emiter, baza i kolektor. s. 58
- Stosunek prądu kolektora do prądu bazy nazywamy współczynnikiem wzmocnienia prądowego tranzystora. s. 60
- Tranzystory są podstawą współczesnej elektroniki i znalazły powszechne zastosowanie we wzmacniaczach i układach logicznych. s. 60



Analiza tekstu: Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe

Andrzej Wiśniewski, *Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe*

Nadprzewodnictwo, jedno z najbardziej interesujących zjawisk fizycznych, zostało odkryte stosunkowo dawno – w roku 1911. Ciągłe jednak fascynuje wielu fizyków, zarówno eksperymentatorów, jak i teoretyków. Jego istotą jest to, że w nadprzewodniku poniżej pewnej temperatury, nazywanej temperaturą krytyczną (T_c), opór elektryczny oraz indukcja magnetyczna spadają do zera...

Nawet w najlepszych przewodnikach (metalach) przepływowi prądu towarzyszy opór elektryczny, a więc i straty energii. Elektrony – nośniki prądu – są rozpraszane, na skutek zderzeń zmieniają prędkość lub kierunek ruchu. Dlaczego tak się dzieje? Metal możemy sobie wyobrazić jako sieć krystaliczną dodatnio naładowanych jonów, pomiędzy którymi poruszają się elektrony. Jony drgają wokół swoich położeń równowagi. Zderzenia elektronów z drgającymi jonami są podstawową przyczyną rozpraszania elektronów. Amplituda drgań jonów maleje ze spadkiem temperatury. Opór elektryczny maleje, gdy maleje temperatura, jednak może on osiągnąć zerową wartość dopiero w najniższej możliwej w przyrodzie temperaturze: 0 K. Jednak zerowy opór w nadprzewodnikach stwierdza się nawet w tak „wysokich” temperaturach jak 135 K. W tej temperaturze na pewno drgania sieci jonów mają dużą amplitudę i elektrony muszą znaleźć jakiś „chytry” sposób, żeby uniknąć rozpraszania.

Stwierdzenie, na czym polega ten „chytry” sposób, zajęło fizykom ponad 40 lat. Dopiero w połowie lat pięćdziesiątych XX w. została opracowana, przez trzech fizyków amerykańskich: Bardeena, Coopera i Schriffiera, teoria wyjaśniająca mechanizm nadprzewodnictwa (otrzymali za to w 1973 r. Nagrodę Nobla). Nazywa się ją w skrócie teorią BCS, od pierwszych liter nazwisk jej twórców.

Podstawą teorii BCS jest zaskakujący pomysł, że w nadprzewodniku elektrony łączą się w pary. Pomysł ten jest zaskakujący dlatego, że elektrony mają taki sam ujemny ładunek – powinny się więc odpychać, a nie łączyć w pary. Elektrony odpychają się, oczywiście, na skutek oddziaływania kulombowskiego, ale w kryształach istnieje pomiędzy nimi dodatkowe oddziaływanie przyciągające. Jest ono związane z oddziaływaniem elektronów z siecią krystaliczną. Można to sobie wyobrazić w ten sposób, że w trakcie swojego ruchu elektron poprzez oddziaływanie przyciągające deformuje rozkład ładunków dodatnio naładowanych jonów tworzących sieć krystaliczną. Elektron, który znajdzie się w pobliżu, odczuwa to zaburzenie sieci i jest przez nie przyciągany. W ten sposób, za pośrednictwem sieci, dwa elektrony będą się przyciągać. To oddziaływanie może być silniejsze niż oddziaływanie odpychające. Ponieważ drgania sieci krystalicznej nazywamy fononami – taki mechanizm łączenia elektronów w pary nazywamy fononowym.



Zjawisko nadprzewodnictwa występuje w wielu materiałach. W większości przypadków T_c są niskie, często bliskie temperatury 0 K (0 K = $-273,15^\circ\text{C}$). Jakie materiały wykazują nadprzewodnictwo? Wykazuje je większość metali, jednakże dopiero poniżej temperatury rzędu kilku kelwinów. Najwyższą temperaturę krytyczną wśród metali, $T_c = 9,2$ K, ma niob (Nb). Nadprzewodnictwo wykazuje wiele stopów, najwyższą T_c ma stop Nb_3Ge – wynosi ona 23,3 K. Przez wiele lat była to najwyższa temperatura krytyczna. W roku 1986 odkryto nową klasę materiałów wykazujących nadprzewodnictwo. Nazwano te materiały nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi, określenie to należy traktować z pewną rezerwą. Nazywamy tak materiały, których temperatura krytyczna jest znacznie wyższa od temperatury „starych”, konwencjonalnych, nadprzewodników. Ciągłe są to jednak, z punktu widzenia życia codziennego, temperatury niskie. Jak stwierdzono w 1993 roku, najwyższa znana obecnie T_c nadprzewodnika wysokotemperaturowego $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8-x}$ wynosi 135 K, czyli -138°C (pod ciśnieniem atmosferycznym), pod wysokim ciśnieniem T_c tego związku wzrasta do 164 K. Od roku 1993 nie znaleziono materiału, który pod ciśnieniem normalnym wykazywałby wyższą T_c .

Za przełomowe dla nadprzewodników wysokotemperaturowych można uznać dwa odkrycia – pierwsze, dokonane w 1986 roku przez Szwajcarów, Alexa Mullera i Georga Bednorza (Nagroda Nobla w 1987 r.). Stwierdzili oni występowanie nadprzewodnictwa w ceramicznym materiale tlenkowym zawierającym lantan, bar, miedź i tlen – $(\text{La,Ba})_2\text{CuO}_{4-x}$. Temperatura krytyczna wynosiła 35 K, była więc istotnie większa niż poprzedni „rekord”. Znaczenie ich odkrycia polegało jednak przede wszystkim na tym, że zwrócono uwagę na nową grupę materiałów, zupełnie nie „podejrzewaną” o to, że może wykazywać nadprzewodnictwo. W krótkim czasie, na początku roku 1987, Amerykanin Paul Chu odkrył nadprzewodnictwo w związku $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. W tym przypadku kluczowa jest wartość $T_c = 92$ K. Z punktu widzenia zastosowań jest to odkrycie przełomowe. Jest to bowiem temperatura wyższa od temperatury ciekłego azotu, która wynosi 77 K. Aby wykorzystać w praktyce nadprzewodnik (na przykład do przesyłania prądu bez strat), konieczne jest utrzymywanie go przez cały czas w temperaturze niższej od T_c . Oznacza to, że nadprzewodnik konwencjonalny musi być zanurzony w ciekłym helu, natomiast nadprzewodnik $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ może być zanurzony w ciekłym azocie. Jest to różnica zasadnicza. Ciekły hel jest dużo droższy i dużo mniej dostępny od ciekłego azotu, jego wytwarzanie, przechowywanie, przelewanie do zbiorników jest dużo bardziej skomplikowane niż w przypadku azotu.

Zostały przebadane różne materiały wykazujące nadprzewodnictwo w temperaturach wyższych od temperatury ciekłego azotu. Wiemy o tych materiałach już dosyć dużo. Ciągłe jednak nie znamy odpowiedzi na dwa podstawowe, związane zresztą ze sobą, pytania. Jaki jest mechanizm nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego? Wiadomo, że nośnikami prądu są pary elektronów, nie jest jednak jasne, jaki jest mechanizm łączenia się elektronów w pary. Teoria BCS, która tłumaczyła to dobrze w przypadku nadprzewodników klasycznych, nie wystarcza. Drugie pytanie: jaka jest możliwa najwyższa temperatura krytyczna w tej grupie materiałów, czy moż-



1. PRĄD ELEKTRYCZNY

liwe jest nadprzewodnictwo w temperaturze pokojowej? Też na razie pozostaje bez odpowiedzi. A odpowiedzi na te pytania są na wagę Nagrody Nobla.

Eksperyment przeprowadzony w 2015 r. pokazał jednak, że rekordową obecnie temperaturę krytyczną, $T_c = 203 \text{ K}$, wykazuje... siarkowodór (H_2S). Tyle że stan nadprzewodzący obserwuje się tylko pod ogromnymi ciśnieniami około 150 GPa (ciśnienie w jądrze Ziemi wynosi około 360 GPa). Co ciekawe, za nadprzewodnictwo w tak wysokiej temperaturze odpowiedzialny jest klasyczny – fononowy mechanizm łączenia się elektronów w pary Coopera.

Końcowa uwaga: zjawisko nadprzewodnictwa możemy traktować jak coś egzotycznego – niskie temperatury, wysokie ciśnienia... Jednak tak naprawdę, to temperatury i ciśnienia, do których przyzwyczailiśmy się na Ziemi, są wyjątkowo egzotyczne. Stan nadprzewodzący może być więc dużo bardziej fundamentalnym stanem materii, niż się nam wydaje.

Andrzej Wiśniewski, *Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe*, „Delta”, grudzień 2018, <https://bezpiecznylink.pl/n7340a>

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, co to jest nadprzewodnictwo.
2. Określ, co to jest temperatura krytyczna.
3. Wskaż, czym nadprzewodnictwo klasyczne różni się od wysokotemperaturowego.
4. Przedstaw, czym są pary Coopera, i wyjaśnij, jak one powstają.
5. Wymień dziedziny, w których będzie można zastosować nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe.
6. Omów problemy, z jakimi boryka się obecnie fizyka badająca nadprzewodnictwo.



PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

1. Prąd elektryczny to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych. Nośnikami prądu w metalach są elektrony, a w cieczach i gazach – jony dodatnie i ujemne. s. 10
2. Umownie przyjmujemy, że prąd płynie od bieguna dodatniego do ujemnego, czyli zgodnie z ruchem ładunków dodatnich. Elektrony poruszają się przeciwnie niż umowny kierunek prądu. s. 12
3. Wielkością fizyczną opisującą „ilość prądu” jest natężenie prądu elektrycznego. To stosunek ładunku, jaki przepłynął przez poprzeczny przekrój przewodnika, do czasu, w którym ten przepływ nastąpił. s. 12
4. Natężenie prądu elektrycznego wyrażamy w amperach. Jest to jednostka podstawowa SI. s. 12
5. W źródle napięcia dochodzi do wykonywania pracy przeciwko siłom pola elektrycznego, powodującej gromadzenie się na biegunach ładunków przeciwnego znaku. Dzieje się tak kosztem innego rodzaju energii. s. 15
6. Napięcie między dwoma punktami pola elektrycznego to stosunek pracy, jaką wykonują siły pola elektrycznego, przemieszczając między nimi ładunek, do wielkości tego ładunku. Jednostką napięcia jest 1 volt. s. 16
7. Praca prądu elektrycznego w urządzeniu elektrycznym jest równa iloczynowi napięcia i ładunku, jaki przepłynął przez to urządzenie. s. 18
8. Moc urządzenia elektrycznego jest równa iloczynowi napięcia przyłożonego do urządzenia i natężenia przepływającego przez nie prądu. s. 18
9. Każde ciało ma opór elektryczny. Oporem elektrycznym nazywamy stosunek napięcia przyłożonego do ciała do natężenia płynącego w nim prądu. Jednostką oporu elektrycznego jest om. s. 22
10. Prawo Ohma mówi, że opór przewodnika jest stały, niezależny od przyłożonego napięcia. Innymi słowy: natężenie prądu w przewodniku jest wprost proporcjonalne do przyłożonego napięcia. s. 24
11. Pod względem zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego wszystkie ciała stałe dzielimy na przewodniki, półprzewodniki i izolatory. s. 26
12. Nośnikami prądu w półprzewodnikach są swobodne elektrony oraz miejsca po brakujących elektronach, tzw. dziury. Ich ilość mocno zależy od temperatury, oświetlenia oraz domieszek w postaci atomów innego pierwiastka. s. 27
13. Opór elektryczny przewodników wzrasta wraz z temperaturą, natomiast opór elektryczny półprzewodników maleje. s. 32
14. Suma natężeń prądów wpływających do węzła obwodu jest równa sumie natężeń prądów wypływających z tego węzła. Jest to treść pierwszego prawa Kirchhoffa, będącego wnioskiem z zasady zachowania ładunku. s. 40
15. Natężenia prądów w rozgałęzieniach obwodu są odwrotnie proporcjonalne do ich oporów. Innymi słowy: prąd płynie najłatwiej tą drogą, która stawia najmniejszy opór. Jest to wniosek z prawa Ohma. s. 42
16. Ogniwo galwaniczne nazywamy urządzenie, które na drodze reakcji chemicznych zamienia energię wiązań chemicznych w energię elektryczną. Każde ogniwo ma dwie elektrody wykonane z różnych materiałów, zanurzone w elektrolicie, czyli wodnym roztworze kwasu, zasady lub soli. s. 44



- s. 44 17. Napięcie między biegunami ogniwa zależy od rodzaju substancji, z których wykonano elektrody.
- s. 45 18. Ogniwa dzielimy na pierwotne, działające w sposób jednorazowy, oraz wtórne, zwane też akumulatorami, w których zachodzą reakcje odwracalne.
- s. 46 19. Ładowanie akumulatora to proces zamiany energii elektrycznej w energię chemiczną, która może zostać potem wykorzystana z powrotem jako energia elektryczna.
- s. 47 20. Połączone ze sobą ogniwa nazywamy baterią.
- s. 48 21. Łącząc ogniwa szeregowo, sumujemy ich napięcia.
- s. 48 22. Łącząc ogniwa równolegle, sumujemy ich pojemności, co pozwala czerpać prąd o większym natężeniu lub przez dłuższy czas.
- s. 49 23. Dioda półprzewodnikowa jest zbudowana z dwóch domieszkowanych kryształów półprzewodnika – jednego typu p i drugiego typu n. Dioda przewodzi prąd tylko w jednym kierunku – ma właściwości prostownicze.
- s. 49 24. W diodach świecących zachodzi zjawisko elektroluminescencji – bezpośredniej zamiany energii pochodzącej z rekombinacji elektronów i dziur na energię świetlną. Są one wydajnym, ekologicznym i popularnym źródłem światła.
- s. 57 25. Tranzystor to urządzenie trójelektrodowe, w którym natężenie prądu między dwiema skrajnymi elektrodami sterowane jest za pomocą prądu lub napięcia między elektrodą wejściową a środkową.
- s. 58 26. Ze względu na rodzaj konstrukcji tranzystory dzielimy na unipolarne i bipolarne.
- s. 58 27. Tranzystor bipolarny składa się z trzech odmiennie domieszkowanych kryształów półprzewodnikowych: n-p-n lub p-n-p, o nazwach: emiter, baza i kolektor.
- s. 60 28. Stosunek prądu kolektora do prądu bazy nazywamy współczynnikiem wzmocnienia prądowego tranzystora.
- s. 60 29. Tranzystory są podstawą współczesnej elektroniki i są powszechnie stosowane we wzmacniaczach i układach logicznych.



A close-up photograph of a mechanical device, likely a transformer or an induction coil. It features a thick, cylindrical metal core with a copper wire coil wound around it. A metal rod with a threaded section is positioned vertically through the center of the coil. The device is mounted on a base, and the background is a solid dark red color.

Oddziaływania magnetyczne były znane i opisywano je już w czasach starożytnych. Minerale o własnościach magnetycznych wydobywano między innymi w leżącej na terenie obecnej Turcji miejscowości Magnezja (obecnie Manisa), stąd nazwa tego zjawiska. Przez setki lat nie rozumiano natury magnetyzmu. Dopiero w XIX wieku dostrzeżono związek pola magnetycznego z prądem elektrycznym, a fizycy w XX wieku wyjaśnili istotę właściwości magnetycznych ciał. Aby zrozumieć, dlaczego ciała wykazują cechy magnetyczne, należy poznać zasady fizyki kwantowej. My poprzestaniemy na samym opisie magnetyzmu i jego zastosowań.

W szkole podstawowej poznaliście podstawowe informacje o oddziaływaniach magnetycznych. Teraz powtórzycie te wiadomości i je uzupełnicie. Dowiedziecie się też, jak można wytwarzać prąd elektryczny za pomocą pola magnetycznego, co odbywa się w niemal wszystkich elektrowniach świata. Poznacie też cechy prądu przemiennego, który płynie w instalacji elektrycznej w mieszkaniach oraz zasadę działania transformatora i opartych na nim urządzeń.

2. Magnetyzm

- ▶ Pole magnetyczne
- ▶ Badanie linii pola magnetycznego
- ▶ Oddziaływanie pola magnetycznego na przewodniki z prądem
- ▶ Oddziaływanie pola magnetycznego na poruszające się ładunki
- ▶ Indukcja elektromagnetyczna
- ▶ Prądnica. Prąd przemienny
- ▶ Zastosowania zjawiska indukcji elektromagnetycznej
- ▶ Analiza tekstu: Nieświadomie stworzyliśmy tarczę chroniącą Ziemię



2.1. Pole magnetyczne

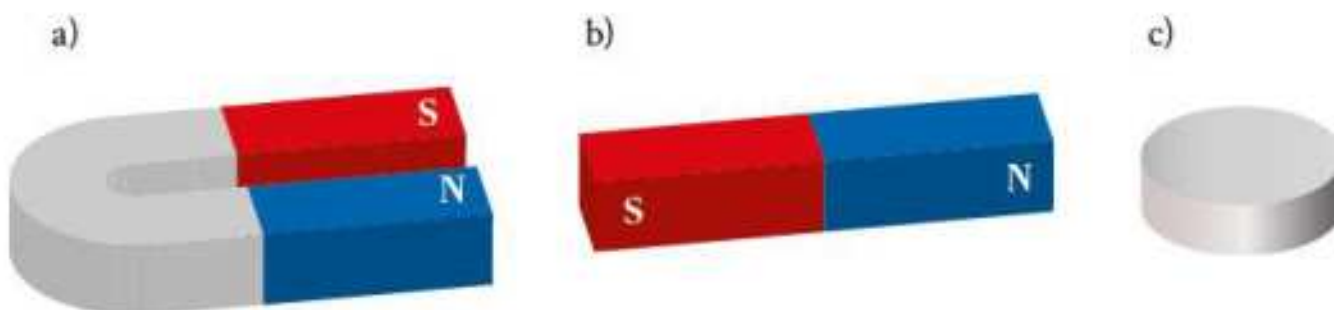
NA TEJ LEKCJI:

- usystematyzujesz swoje wiadomości o źródłach pola magnetycznego;
- przypomnisz sobie podstawowe cechy pola magnetycznego;
- uzupełnisz swoją wiedzę o ziemskim polu magnetycznym.

Magnesy

magnes

Już w starożytności zauważono, że niektóre minerały dziwnie się zachowują. W zależności od tego, jak były względem siebie ustawione, mogły się przyciągać lub odpychać. Przyciągały też przedmioty wykonane z żelaza. Jeśli kawałek takiego minerału położymy na drewnianym i pozwolimy mu swobodnie pływać w wodzie, zawsze ustawi się w jednakowy sposób względem kierunków geograficznych, nawet po wielokrotnej zmianie jego położenia. Przedmioty wykonane z materiałów magnetycznych nazwano **magnesami**. Magnes pływający na drewnianym w naczyniu z wodą stał się pierwowzorem **kompasu** stosowanego powszechnie w nawigacji.



Rys. 1. Przykłady magnesów: a) podkowiasty, b) sztabkowy, c) neodymowy.

Magnesy wykonuje się przeważnie ze stopów lub spieków zawierających takie pierwiastki, jak: żelazo, kobalt lub nikiel, często z różnymi innymi dodatkami. Każdy magnes ma **dwa bieguny**, zwane **północnym** (N) i **południowym** (S) od kierunków geograficznych, ku którym się zwracają, gdy mają swobodę ruchu. Dla łatwiejszej identyfikacji bieguny magnesów stosowanych w celach dydaktycznych często maluje się umownie: na niebiesko biegun północny i na czerwono biegun południowy. Bieguny tego samego rodzaju (dwa północne albo dwa południowe) nazywamy **jednoimiennymi**, a przeciwnego rodzaju – **różnoimiennymi**.

Przypomnijmy ze szkoły podstawowej dwa ważne fakty dotyczące biegunów i ich oddziaływania:

bieguny
magnesu

Bieguny jednoimienne się odpychają, a **bieguny różnoimienne** się przyciągają. Biegunów magnetycznych nie da się rozłączyć. Gdy podzielimy magnes na dwie części, każda z nich będzie miała znowu po dwa bieguny.



Ostatnie spostrzeżenie jest konsekwencją innego istotnego faktu: nie istnieje coś takiego jak ładunek magnetyczny, analogiczny do ładunku elektrycznego. Gdyby istniał, mógłby być odosobnionym biegunem magnetycznym. Jeżeli spojrzymy na to z drugiej strony, zauważymy, że jeśli złączymy ze sobą dwa magnesy, otrzymamy jeden większy, mający znowu dwa bieguny.

Sily magnetyczne działają na odległość. Oddziaływania na odległość tłumaczymy istnieniem odpowiedniego pola sił.

Pole magnetyczne – przestrzeń, w której stwierdza się istnienie sił magnetycznych.

pole magnetyczne

Zatem magnes wytwarza wokół siebie pole magnetyczne sprawiające, że na przykład na opilki żelaza lub inne magnesy działa siła magnetyczna.

Pole magnetyczne wokół przewodników z prądem

Jak już wspomnieliśmy, zjawiska magnetyczne znano od starożytności. Podobnie było z niektórymi zjawiskami elektrycznymi. Przez całe stulecia nie dostrzegano między nimi związku – aż do 1820 roku. Wówczas duński fizyk Hans Christian Ørsted (czytaj: ersted) wykonał eksperyment, który teraz łatwo powtórzyć w każdej pracowni wyposażonej w zasilacz, kabel i igłę magnetyczną.

Rys. 2. Hans Christian Ørsted (1777–1851) – profesor na Uniwersytecie Kopenhańskim. W 1820 roku odkrył oddziaływania elektromagnetyczne oraz skonstruował piezometr (przyrząd do badania poziomu wód gruntowych). Zajmował się też ściśliwością cieczy i gazów.



Doświadczenie

Pomoce: zasilacz prądu stałego lub bateria i wyłącznik, przewód elektryczny, igła magnetyczna.

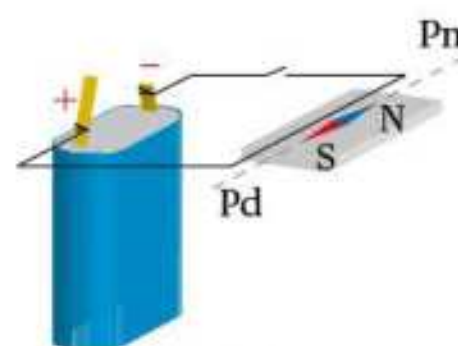
Zmontuj prosty układ elektryczny jak na rysunku. Prostoliniowy odcinek przewodu ustaw w kierunku południkowym, a bezpośrednio pod nim umieść igłę magnetyczną. Gdy prąd nie płynie, igła wskazuje kierunek północ – południe, równoległy do przewodu.

Następnie przełącz wyłącznik, by zaczął płynąć prąd w obwodzie.

Obserwacja: Igła magnetyczna wychyliła się pod pewnym kątem.

Teraz bieguny baterii lub zasilacza podłącz odwrotnie i ponownie włącz przepływ prądu.

Obserwacja: Igła wychyliła się w przeciwną stronę.



Rys. 3. Układ do demonstracji oddziaływania przewodnika z prądem na igłę magnetyczną.

Doświadczenie dowodzi, że prąd płynący w przewodniku wytwarza wokół siebie pole magnetyczne. Teraz wiemy, że to właśnie prąd elektryczny, czyli ruch ładunków elektrycznych, stanowi pierwotną przyczynę występowania pola magnetycznego. Takim **elementarnym prądem** w materii jest ruch elektronu w atomie. Poruszający się wokół jądra elektron wytwarza wokół siebie pole magnetyczne. W większości substancji pola magnetyczne wytwarzane przez poszczególne elektrony znoszą się

elementarny prąd
w materii



wzajemnie. Są jednak takie pierwiastki, w których na skutek pewnych zjawisk tłumaczonych przez fizykę kwantową, pola magnetyczne wytwarzane przez poszczególne elektrony wzajemnie się wzmacniają. Nazywamy je **ferromagnetykami**. Właśnie z nich wykonuje się magnesy i to wyjaśnia, dlaczego magnesy wytwarzają wokół siebie pole magnetyczne.

Pole magnetyczne powstające wokół przewodnika prostoliniowego działa w płaszczyźnie prostopadłej do tego przewodnika. Gdyby nie ziemskie pole magnetyczne, igła w doświadczeniu ustawiałaby się pod kątem prostym do przewodnika. Ponieważ działa na nią jednocześnie pole magnetyczne wytwarzane przez przewodnik i przez Ziemię, igła przekręca się o pewien kąt wynikający z siły wypadkowej pochodzącej od obydwu pól.

Ziemskie pole magnetyczne

Ziemia jako magnes

Ziemia zachowuje się tak, jakby w jej wnętrzu znajdował się ogromny magnes sztabkowy ułożony mniej więcej wzdłuż osi obrotu Ziemi. Jego bieguny są oddalone od biegunów geograficznych o około 11,5 stopnia. Południowy biegun magnetyczny (przyciągający północny biegun igieł kompasów) znajduje się niedaleko północnej Kanady, a północny biegun magnetyczny – u wybrzeży Antarktydy. Bieguny magnetyczne są więc ułożone odwrotnie niż bieguny geograficzne. Na dodatek nie leżą dokładnie na antypodach, a ich lokalizacja zmienia się w czasie w tempie mniej więcej 15 km na rok. W ostatnich latach zaobserwowano przyspieszenie tego tempa. Utrudnia to nawigację i powoduje, że do wskazań kompasu należy stosować poprawki, które zmieniają się w czasie.



Rys. 4. Przemieszczanie się ziemskiego bieguna magnetycznego na przestrzeni lat.

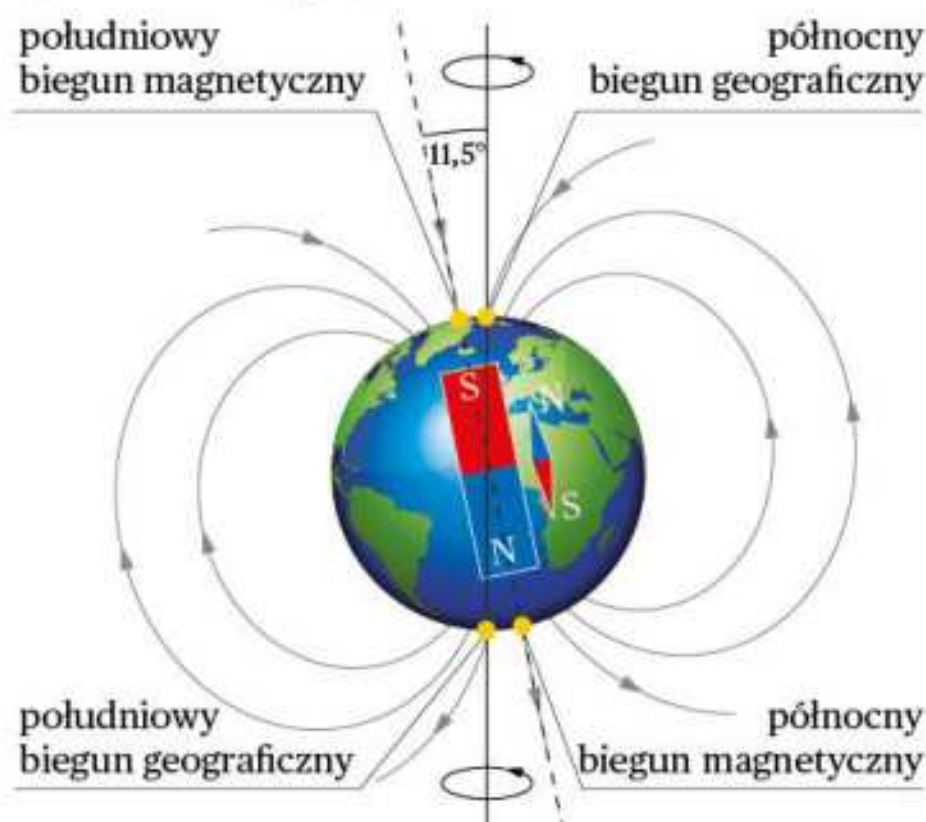


Ziemskie pole magnetyczne sięga w Kosmos na odległość kilkudziesięciu tysięcy kilometrów, dalej jest już bardzo słabe. Obszar, w którym pole jest stosunkowo silne, nazywamy magnetosferą. Magnetosfera ochronia Ziemię przed promieniowaniem kosmicznym (zostanie ono omówione w dalszej części podręcznika).

Wewnątrz Ziemi, bliżej jądra, pole magnetyczne jest o wiele silniejsze niż na jej powierzchni. Ulega też dodatkowemu wzmocnieniu na obszarach bogatych w rudy żelaza.

Mechanizm powstawania ziemskiego pola magnetycznego nie został w szczególności do końca wyjaśniony. Niewątpliwie jego źródłem jest płynne jądro Ziemi. W stopionych metalach pod wpływem ruchu obrotowego naszej planety powstają naelektryzowane wiry, które można potraktować jako prąd elektryczny o ogromnym natężeniu. To one wytwarzają wokół siebie pole magnetyczne o tak wielkim zasięgu.

Sila ziemskiego pola magnetycznego nieustannie się zmienia, na co wpływa wiele czynników. Oprócz tego zauważono długoterminowy trend spadkowy – obecnie pole to jest słabsze o mniej więcej 10–15% niż 150 lat temu, kiedy rozpoczęto regularne pomiary. Badania geologiczne wykazały ponadto, że średnio co kilkaset tysięcy lat dochodzi do przebiegunowania – bieguny magnetyczne zamieniają się miejscami. Po raz ostatni wydarzyło się to około 780 000 lat temu i naukowcy przewidują, że może to nastąpić w niedalekiej przyszłości.



Rys. 5. Poglądowy rysunek przedstawiający ziemskie pole magnetyczne.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, co to jest pole magnetyczne i co jest pierwotnym źródłem pola magnetycznego.
2. Przedstaw, w jaki sposób wykorzystujemy ziemskie pole magnetyczne i czy napotykamy w związku z tym na problemy.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 68 • Niektóre substancje wykazują właściwości magnetyczne, co zostało zauważone już w starożytności.
- s. 68 • Każdy magnes ma dwa bieguny, których nie można rozdzielić. Bieguny jednoimienne się odpychają, a różnoimienne się przyciągają.
- s. 69 • Pole magnetyczne to przestrzeń, w której stwierdzamy istnienie sił magnetycznych. Prawdziwym źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny, co odkrył Ørsted w 1820 roku.
- s. 69 • Magnetyzm materii ma swoje źródło w ruchu elektronów wewnątrz atomów.
- s. 70 • Ziemię okala pole magnetyczne wytwarzane w płynnym jądrze naszej planety.

2.2. Badanie linii pola magnetycznego

NA TEJ LEKCJI:

- przypomnisz sobie, co to są linie pola magnetycznego;
- wykonasz szereg eksperymentów ukazujących kształt pola magnetycznego wokół różnych źródeł.

Badanie linii pola magnetycznego wokół magnesów stałych

linie pola
magnetycznego

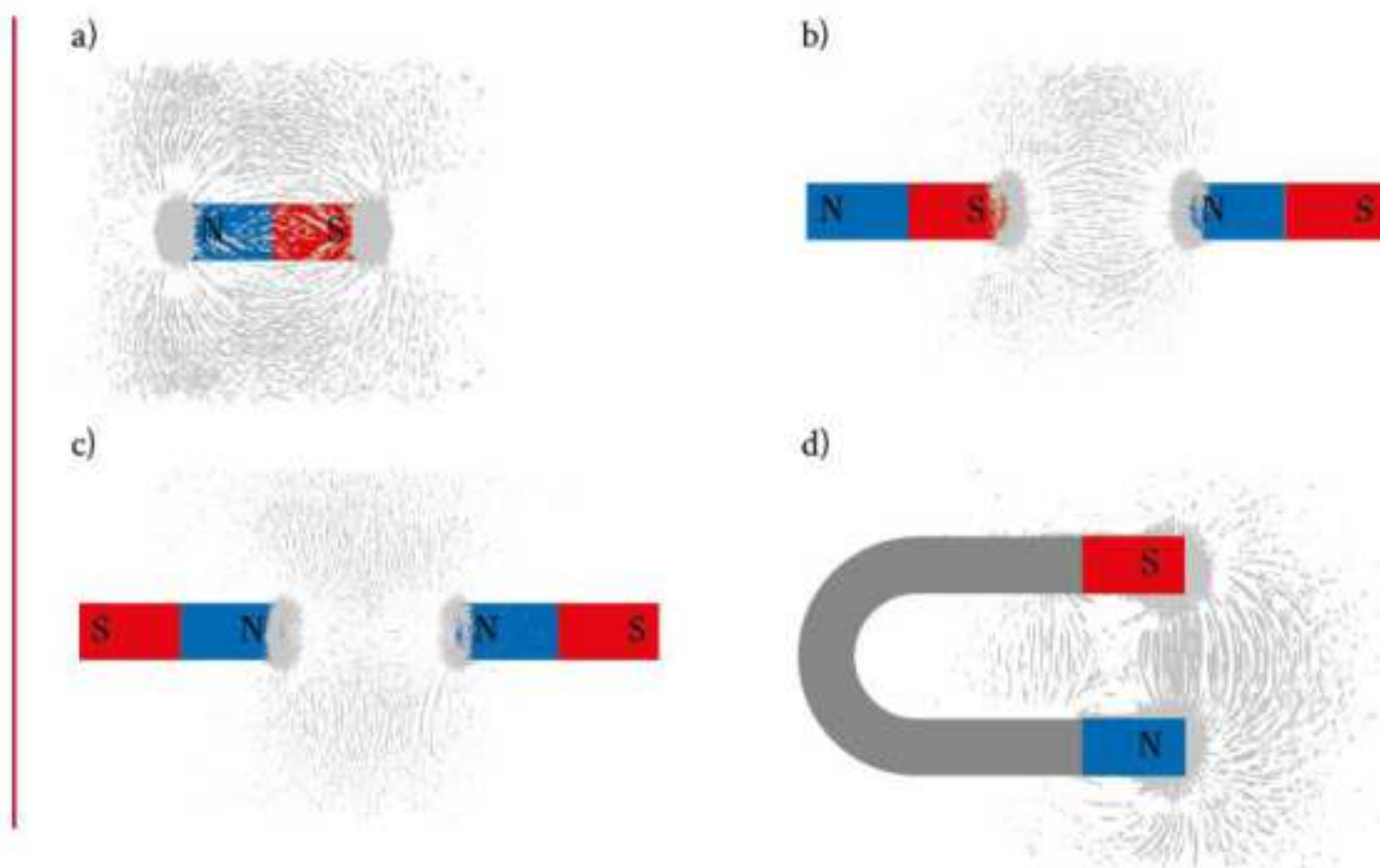
Kształt pola magnetycznego można graficznie zobrazować za pomocą tzw. **linii pola**. Są to linie, wzdłuż których układają się na przykład rozsypane w obszarze pola magnetycznego opilki żelaza i wzdłuż których ustawiają się obracające się swobodnie igły magnetyczne. Opilki żelaza i igły magnetyczne będą więc naszymi podstawowymi narzędziami do badania kierunku pola magnetycznego wytwarzanego przez różne źródła.

Doświadczenie 1.

Pomoce: magnesy sztabkowe, magnes podkowiasty, magnes sztabkowy przelamany na dwie części, opilki żelaza, karton lub arkusz sztywnego przezroczystego tworzywa sztucznego.

Karton lub arkusz tworzywa połóż kolejno na magnesach różnych kształtów, na układach kilku magnesów, na połowce przelamanego magnesu itd. Karton posyp opilkami żelaza. Dla zwiększenia ruchliwości opilków, w karton możemy lekko postukiwać. Obserwujemy kształty, w które układają się opilki.

Obserwacja: Opilki układają się w różne kształty, zależne od rozmieszczenia magnesów. Przykładowe sytuacje zostały przedstawione na zdjęciach.



Rys. 6. Kształt linii pola magnetycznego wskazywany przez opłatki żelaza:

a) magnes sztabkowy, b) zwrócone ku sobie bieguny różnoimienne, c) dwa bieguny jednoimienne, d) magnes podkowiasty.

Liniom pola magnetycznego przypisuje się umownie zwrot od bieguna północnego do bieguna południowego. Można więc powiedzieć, że linie „wychodzą” z magnesu w okolicach bieguna północnego i „wchodzą” do niego w obszarze bieguna południowego. Ale to nie znaczy, że na biegunach te linie się zaczynają i kończą. Wewnątrz magnesu też jest pole magnetyczne – jeśli rozdzielimy magnes na części, będą się one przyciągać. Linie mają więc swoje przedłużenie wewnątrz magnesu i okazuje się, że są one krzywymi zamkniętymi. Tam, gdzie linie przebiegają gęściej, pole jest silniejsze. Wobec tego najsilniejsze pole występuje we wnętrzu magnesu, gdyż wszystkie linie, które widzimy rozproszone na zewnątrz, muszą przejść przez jego wnętrze.

Jeśli przeprowadzimy eksperyment z połówką złamanego magnesu, obraz będzie identyczny jak dla całego magnesu. Każda część podzielonego magnesu zawsze zachowuje obydwa bieguny.

Doświadczenie 2.

Pomoce: magnes sztabkowy, komplet igiełek magnetycznych na podstawkach lub komplet małych kompasów.

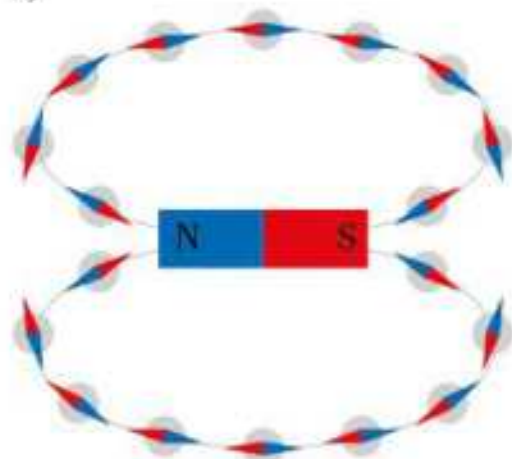
Położ magnes sztabkowy na stole. W okolicy jednego z biegunów ustaw igielkę magnetyczną na podstawce lub kompas. Po drugiej stronie igielki dostaw kolejne igły lub kompas, starając się odtworzyć kształt linii pola. Każdorazowo biegun poprzedniej igielki powinien wskazywać miejsce, gdzie należy postawić kolejną. W ten sposób próbuj zobrazować co najmniej po jednej linii z każdej strony magnesu. Następnie – nie odrywając magnesu od stołu – przekręć go o 180° względem środka symetrii.

charakterystyka
linii pola
magnetycznego

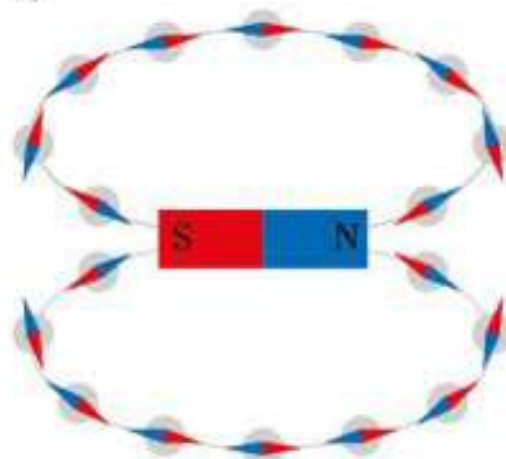


Obserwacja: Wszystkie igły magnetyczne zmieniły zwrot. Kształt wskazywanych linii się nie zmienił.

a)



b)

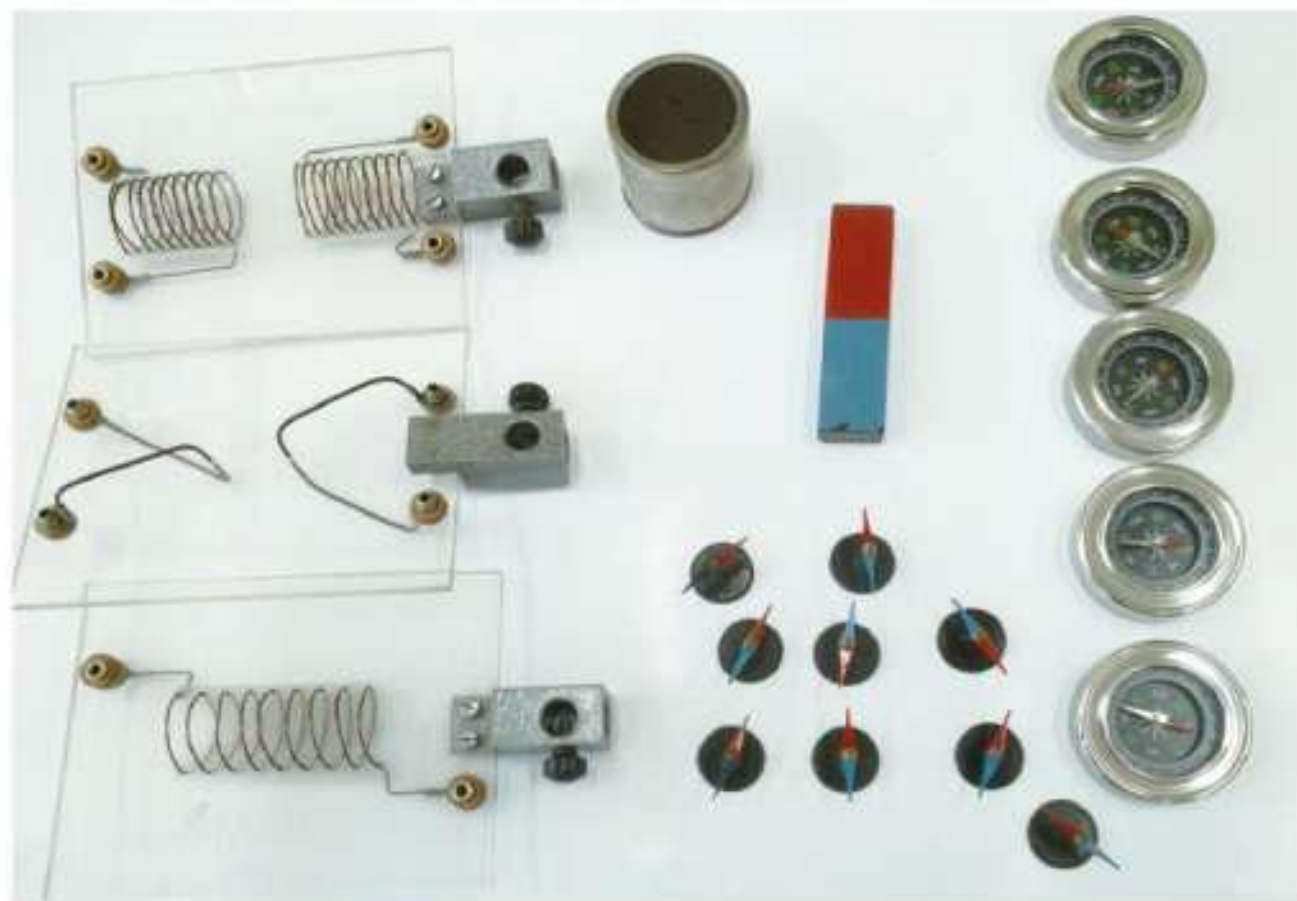


Rys. 7. Ilustracja do doświadczenia 2: a) igły magnetyczne ułożone wzdłuż wybranych linii pola magnetycznego, b) sytuacja po odwróceniu magnesu o 180° .

Powyższe doświadczenie pozwala wyznaczyć zwrot linii pola magnetycznego. Jest on każdorazowo wskazywany przez północny biegun igiełek magnetycznych.

Badanie linii pola magnetycznego wokół przewodników z prądem

W kolejnym doświadczeniu wykorzystamy przyrządy do demonstracji linii pola magnetycznego wokół przewodników o różnych kształtach – można je łatwo wykonać samodzielnie z kartonu i sztywnego drutu. Drutowi nadajemy odpowiedni kształt, przebijając nim karton w odpowiednich miejscach, tak aby stał się on płaszczyzną symetrii ukształtowanego drutu. Napięcie do końców drutu można doprowadzić, używając tak zwanych krokodylków.



Rys. 8. Przyrządy do demonstracji linii pola magnetycznego wokół przewodników.



Doświadczenie 3.

Pomoce: zestaw przyrządów do demonstracji linii pola magnetycznego wokół przewodników z prądem, zasilacz prądu stałego lub bateria z wyłącznikiem, przewody połączeniowe, opilki żelaza.

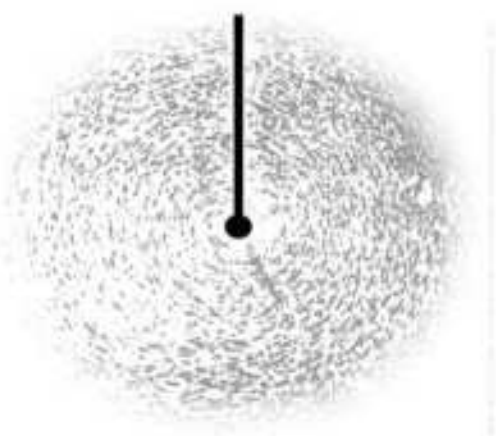
Uwaga 1: Wykonując to doświadczenie, najlepiej podłożyć sobie pod zestaw doświadczalny duży arkusz papieru pakowego albo ceratę. Opilki żelaza na pewno się rozsypią. Dzięki temu łatwiej będzie je potem zebrać.

Uwaga 2: W doświadczeniu jest potrzebny prąd o dużym natężeniu, który rozgrzewa przewody, szybko zużywa ogniwa elektryczne lub może spowodować przegrzanie zasilacza. Włączaj prąd tylko wtedy, gdy jest to potrzebne i nie dopuszczaj do przegrzania układu doświadczalnego.

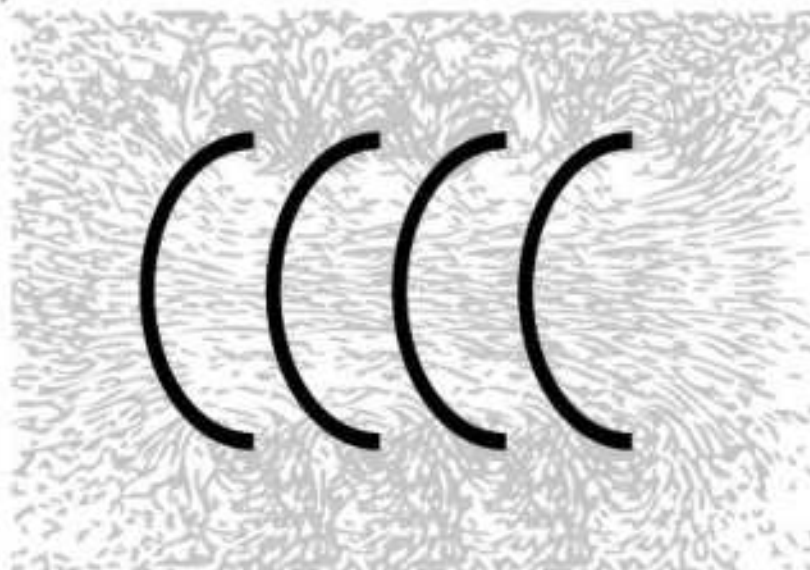
Przebieg doświadczenia: Podłącz napięcie do zacisków przyrządu demonstracyjnego i pilnuj, by nie przekroczyć dopuszczalnych wartości natężenia prądu. Okolicie przewodników posyp opilkami żelaza. Dla zwiększenia ich ruchliwości możesz lekko stukać w podstawkę. Obserwuj, jak układają się opilki w zależności od kształtu przewodnika. Gdy tylko uzyskasz pożądany efekt, wyłącz przepływ prądu.

Obserwacja: Przykładowe kształty linii pola przedstawiono na rysunku 9.

a)



b)



Rys. 9. Linie pola magnetycznego wskazywane przez opilki żelaza: a) wokół przewodnika prostoliniowego, b) wewnątrz zwojnicy (cewki).

Jak widać, linie pola magnetycznego wytwarzanego przez przewodnik prostoliniowy układają się w formie okręgów w płaszczyznach prostopadłych do przewodnika. Wewnątrz cewki linie pola biegną równolegle do siebie. Takie pole nazywamy **polem jednorodnym**. Na zewnątrz cewki pole magnetyczne przypomina kształtem pole wytwarzane przez magnes sztabkowy. Nie jest to przypadek. Jak już wyjaśnialiśmy, źródłem pola magnetycznego w magnesach są elektrony poruszające się w atomach. Skutek ich ruchu jest analogiczny do przepływu prądu elektrycznego przez zwoj cewki. Patrząc na linie pola wewnątrz cewki, możemy sobie wyobrazić, jak wyglądają linie pola wewnątrz magnesu sztabkowego.

Obserwacja linii pola nasuwa jeszcze jeden ważny wniosek: w każdym przypadku są to krzywe zamknięte. Nigdzie się nie zaczynają i nigdzie nie kończą. Gdyby było inaczej, musiałyby się zaczynać i kończyć na ładunkach magnetycznych, a coś takiego nie istnieje. Pole magnetyczne powstaje **wokół** poruszających się ładunków elektrycznych.

linie pola
magnetycznego
wokół przewodnika
z prądem i cewki



Na zakończenie wyznaczmy zwrot linii pola magnetycznego wytwarzanego przez przewodniki. W tym celu opiłki żelaza musimy zastąpić igłami magnetycznymi lub małymi kompasami.

Doświadczenie 4.

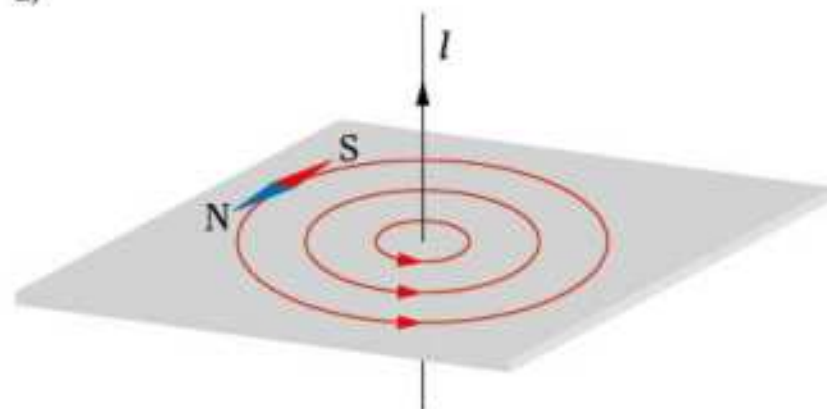
Pomocze: zestaw przyrządów do demonstracji linii pola magnetycznego wokół przewodników z prądem, zasilacz prądu stałego lub bateria z wyłącznikiem, przewody połączeniowe, komplet igieł na podstawkach lub komplet kompasów. Doświadczenie rozpocznij przy odłączonym zasilaniu. Ułóż wokół przewodników igielki magnetyczne wzdłuż domniemanych linii pola magnetycznego, podpatrzonych w poprzednim doświadczeniu. Igiełki powinny pokazywać kierunek ziemskiego pola magnetycznego. Uwaga: jeśli będą zbyt blisko siebie, to będą oddziaływać między sobą i zafalszują wynik doświadczenia. Następnie podłącz napięcie do przewodu, pamiętając o nieprzekraczaniu dozwolonych wartości natężenia prądu. Obserwuj zachowanie igiełek. Zwróć też uwagę, w którą stronę płynie prąd.

Obserwacja: Igiełki wychyliły się wzdłuż linii pola magnetycznego, które obserwowaliśmy poprzednio.

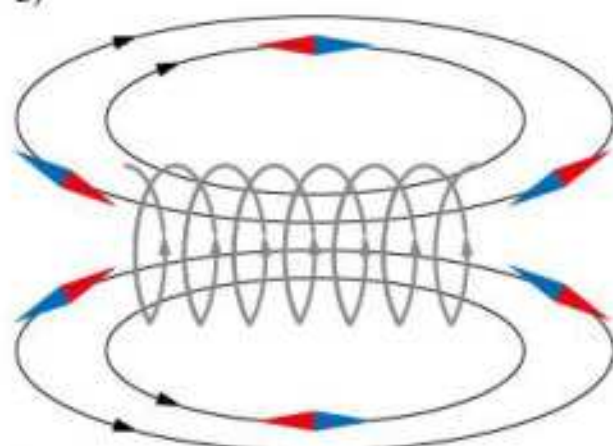
Teraz zmień kierunek przepływu prądu – podłącz na odwrót przewody do źródła napięcia.

Obserwacja: Wszystkie igielki obróciły się o 180° . Linie pola magnetycznego zmieniły zwrot, ale ich kształt pozostał ten sam.

a)



b)



Rys. 10. Linie pola magnetycznego wskazywane przez igły magnetyczne: a) wokół przewodnika prostoliniowego, b) wewnątrz zwojnicy (cewki).



Doświadczenie pokazuje, że zwrot linii pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem zależy od kierunku przepływu tego prądu. Wyraża to reguła prawej dłoni:

Jeżeli kciuk prawej dłoni pokazuje kierunek przepływu prądu elektrycznego, to pozostałe zgięte palce wskazują zwrot linii pola magnetycznego.

reguła prawej dłoni

Rys. 11. Reguła prawej dłoni.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Naskicuj w zeszycie kształt linii pola magnetycznego zaobserwowany w każdym z opisanych doświadczeń. Opisz swoje rysunki i zaznacz zwrot linii pola.
2. Wyjaśnij, dlaczego linie pola magnetycznego muszą być krzywymi zamkniętymi.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Pole magnetyczne można zobrazować graficznie za pomocą linii tego pola. Są to krzywe, wzdłuż których układają się w polu magnetycznym opilki żelaza lub mające swobodę ruchu igły magnetyczne. s. 72
- Linie pola magnetycznego są zawsze krzywymi zamkniętymi, co jest równoważne stwierdzeniu, że nie istnieją ładunki magnetyczne (odosobnione bieguny). s. 73
- Linie pola magnetycznego wokół prostoliniowego przewodnika z prądem leżą w płaszczyźnie prostopadłej do przewodnika i mają postać współśrodkowych okręgów. s. 75
- Wewnątrz zwojnicy, w której płynie prąd, pole magnetyczne jest jednorodne – jego linie są do siebie równoległe. s. 75
- Zwrot linii pola magnetycznego wytwarzanego przez przewodnik z prądem określa reguła prawej dłoni. s. 77

2.3. Oddziaływanie pola magnetycznego na przewodniki z prądem

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz właściwości siły elektrodynamicznej będącej podstawą działania silników elektrycznych i mierników;
- dowiesz się, w jaki sposób przewodniki z prądem oddziałują na siebie siłami magnetycznymi.



Przewodnik w polu magnetycznym magnesu stałego

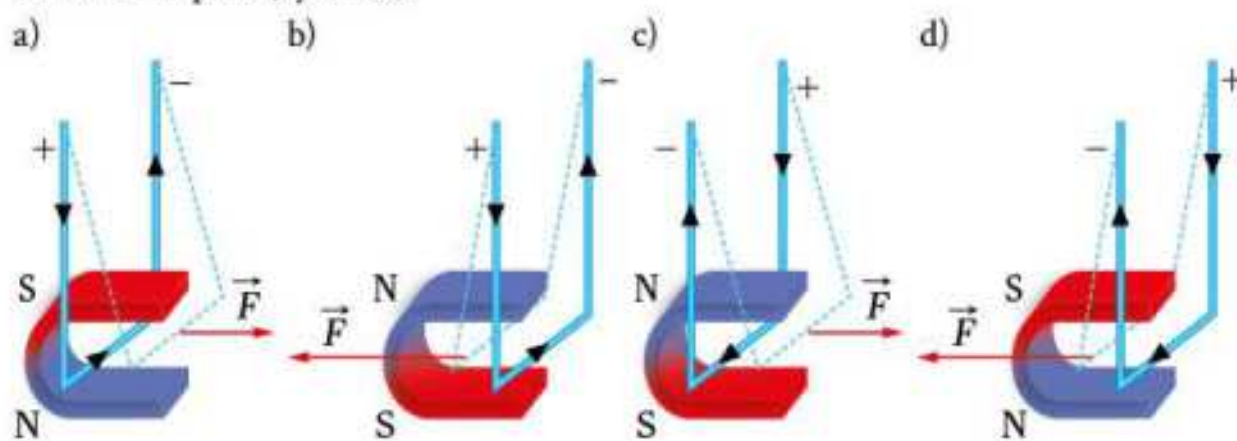
Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki wszystkie oddziaływania w przyrodzie są wzajemne. Skoro przewodnik z prądem oddziałuje siłami magnetycznymi na namagnesowane ciało, jakim jest igła magnetyczna, to można oczekiwać, że magnes powinien oddziaływać na przewodnik z prądem. Zbadajmy sprawę dokładnie.

Doświadczenie 1.

Pomoce: ramka z drutu zawieszona na statywie i mogąca się wahać swobodnie wokół swojej górnej krawędzi, magnes podkowiasty lub neodymowy, zasilacz prądu stałego lub bateria z wyłącznikiem, przewody elektryczne.

Zawieś ramkę na statywie, podepnij przewody w sposób nieutrudniający ruch ramki i połącz je z zasilaczem. Dolna pozioma krawędź ramki powinna się znajdować między biegunami magnesu podkowiastego lub nad biegunem magnesu neodymowego. Przy takim ustawieniu linie pola magnetycznego mają kierunek pionowy. Włącz zasilacz.

Obserwacja: Ramka wychyliła się w bok, prostopadle do swojej krawędzi i do kierunku linii pola (rys. 12a).



Rys. 12. Skutki działania siły elektrodynamicznej na przewodnik z prądem.

Wylącz zasilacz, odwróć magnes tak, by zmienić zwrot linii pola magnetycznego w obszarze, w którym znajduje się dolna krawędź ramki, i włącz zasilacz ponownie.

Obserwacja: Ramka wychyliła się w drugą stronę (rys. 12b).

Teraz, nie zmieniając ustawienia magnesu, zmień kierunek przepływu prądu na przeciwny.

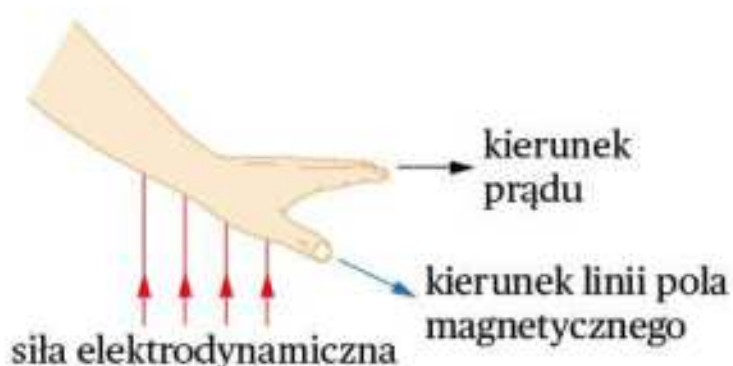
Obserwacja: Ramka wychyliła się znowu w sposób przeciwny, czyli tak, jak za pierwszym razem (rys. 12c).

Wylącz zasilacz, odwróć magnes do takiej pozycji, w jakiej był na początku, i ponownie włącz zasilacz.

Obserwacja: Kierunek wychylenia ramki znowu się zmienił i jest taki sam jak w przypadku b (rys. 12d).

Siła, z jaką pole magnetyczne działa na przewodnik z prądem, nazywamy **siłą elektrodynamiczną**. Powyższe doświadczenie pozwoliło ustalić następujące fakty na jej temat:

- Jest ona prostopadła zarówno do kierunku przepływu prądu, jak i do kierunku linii pola magnetycznego.
- Zmiana tylko kierunku przepływu prądu albo tylko zwrotu linii pola magnetycznego powoduje zmianę zwrotu siły elektrodynamicznej.
- Jednoczesna zmiana kierunku przepływu prądu i zwrotu linii pola nie powoduje zmian w kierunku i zwrocie siły elektrodynamicznej.



Rys. 13. Reguła lewej dłoni.

Jeśli dokładnie prześledzimy kierunek przepływu prądu, zwrot linii pola magnetycznego i zwrot siły elektrodynamicznej, to dojdziemy do wniosku, że spełniają one tak zwaną regułę lewej dłoni (rys. 13).

Jeśli w lewej dłoni cztery wyprostowane palce będą wskazywać kierunek przepływu prądu, a linie pola będą przechodzić prostopadle przez dłoń od jej części wewnętrznej do zewnętrznej, to odgięty kciuk pokaże kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.

reguła lewej dłoni

Gdybyśmy wykonali serię pomiarów wartości siły elektrodynamicznej w zależności od siły pola magnetycznego i kierunku linii pola oraz natężenia prądu, odkrylibyśmy kolejne **cechy siły elektrodynamicznej**:

- Im silniejsze jest pole magnetyczne, tym większa jest wartość siły elektrodynamicznej.
- Wartość siły elektrodynamicznej działającej na przewodnik z prądem jest proporcjonalna do natężenia prądu w tym przewodniku.
- Wartość siły elektrodynamicznej zależy od kąta między przewodnikiem a liniami pola magnetycznego. Jest ona maksymalna, gdy przewodnik jest ustawiony prostopadle do linii sił, i zerowa, gdy jest ustawiony równolegle. Dla pośrednich kątów przyjmuje pośrednie wartości.

Zwłaszcza ta ostatnia cecha pola magnetycznego jest bardzo interesująca. Wynika z niej, że jeśli prąd elektryczny będzie płynąć wzdłuż linii pola, żadna siła na przewodnik nie będzie działać. Im większy kąt między przewodnikiem i liniami pola, tym większa siła działająca na przewodnik. Siła ta w każdym przypadku będzie prostopadła zarówno do przewodnika, jak i do linii pola magnetycznego.

Ta cecha siły elektrodynamicznej została wykorzystana w konstrukcji silnika elektrycznego, o czym była już mowa w szkole podstawowej. Dzięki temu, że siłą działa prostopadle do przewodnika, może ona obracać ramką z prądem oraz wirnikiem silnika elektrycznego.



Oddziaływanie między przewodnikami z prądem

Wiesz już, jak pole magnetyczne wytworzone przez magnes stały oddziałuje na przewodnik z prądem. Ale źródłem pola magnetycznego może być też inny przewodnik z prądem. Wynika z tego, że dwa przewodniki, w których płynie prąd, powinny oddziaływać na siebie siłami magnetycznymi. W 1820 roku dowiódł tego francuski fizyk André Marie Ampère (czytaj: andre mari amper) wkrótce po tym, jak Ørsted odkrył oddziaływanie przewodnika z prądem na igłę magnetyczną.



Rys. 14. André Marie Ampère (1775–1836) – francuski matematyk, fizyk i chemik. Jego największym dziełem jest sformułowanie podstaw elektromagnetyzmu. Postawił i udowodnił tezę, że cewka, przez którą przepływa prąd elektryczny, powinna wykazywać podobne właściwości jak magnes stały. Sformułował słynne prawo wiążące ze sobą zjawiska elektryczne i magnetyczne. Od jego nazwiska pochodzi nazwa jednostki natężenia prądu elektrycznego.

Doświadczenie 2.

Pomocze: dwa lekkie przewody zakończone zaciskami, zamocowane tak, by luźno zwisały równoległe do siebie w niewielkiej odległości (funkcję przewodów mogą też pełnić cienkie i długie równoległe paski folii aluminiowej, luźno zamocowane), źródło prądu stałego umożliwiające czerpanie prądu o możliwie dużym natężeniu, wyłącznik.

Podłącz napięcie do przewodów tak, by przez obydwa przewody popłynął prąd w tym samym kierunku.

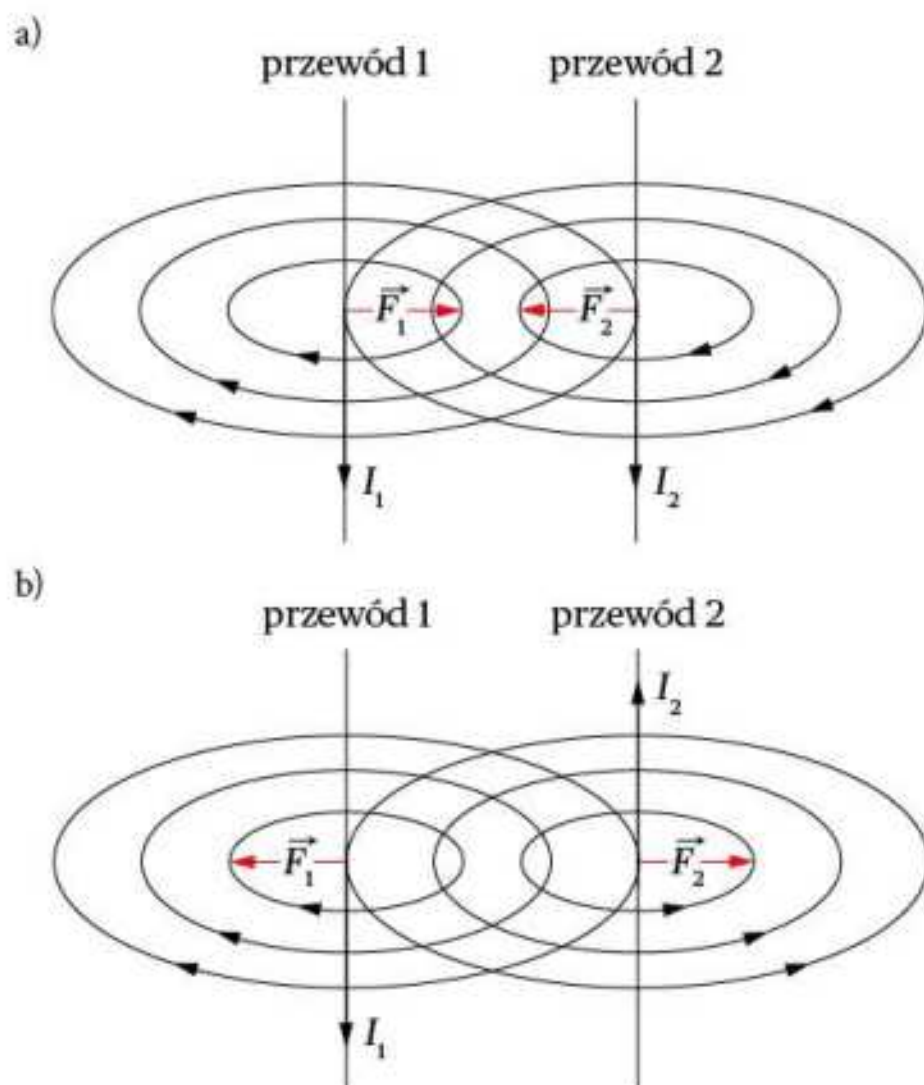
Obserwacja: Przewody się przyciągają.

Następnie zmień sposób podłączenia przewodów tak, by prąd płynął w kierunkach przeciwnych.

Obserwacja: Przewody się odpychają.



Rys. 15. Doświadczalne badanie oddziaływania magnetycznego między dwoma przewodnikami z prądem: a) gdy prądy płyną w tę samą stronę, przewody się przyciągają, b) gdy prądy płyną w przeciwnie strony, przewody się odpychają.



Rys. 16. Wyjaśnienie zachowania się przewodników. Każdy z przewodników jest źródłem pola magnetycznego, które działa na drugi z przewodników siłą elektrodynamiczną.

Spróbujmy wyjaśnić zachowanie się przewodników na podstawie dotychczasowej wiedzy na temat siły elektrodynamicznej. Przewód 1 (rys. 16a) wytwarza wokół siebie pole magnetyczne, którego linie mają kierunek i zwrot zgodny z regułą prawej dłoni. Jak widać, równoległy do niego przewód 2 jest prostopadły do linii pola magnetycznego wytworzonego przez przewód 1. Wobec tego działa na niego siła elektrodynamiczna prostopadła zarówno do przewodu, jak i do linii pola. Zwrot siły elektrodynamicznej określa reguła lewej dłoni. Jak łatwo zauważyć, siła ta będzie zwrócona w stronę przewodu pierwszego. Zgodnie z zasadą wzajemności oddziaływań przewód pierwszy będzie przyciągany w stronę przewodu drugiego. Analogicznie można wykazać, że jeśli prądy w przewodach będą płynąć w przeciwnie strony, to przewody muszą się odpychać.

Dwa równoległe przewodniki, w których płyną prądy elektryczne w tę samą stronę, przyciągają się wzajemnie siłami magnetycznymi. Jeśli prądy płyną w przeciwnie strony, przewodniki się odpychają.

Dokładniejsze badania wykazują, że wartość siły oddziaływania dwóch przewodników jest wprost proporcjonalna do natężeń obu prądów i do długości przewodników oraz odwrotnie proporcjonalna do odległości między tymi przewodnikami. Pomiar tej siły pozwolił na zdefiniowanie jednostki natężenia prądu elektrycznego, czyli 1 ampera, która obowiązywała do maja 2019 roku.

**oddziaływanie
między
przewodnikami
z prądem**



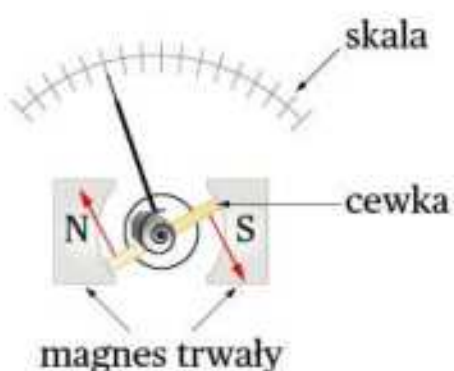
Zastosowania siły elektrodynamicznej

Podstawowym zastosowaniem siły elektrodynamicznej jest omówiony w szkole podstawowej silnik elektryczny. Oprócz tego siła ta jest wykorzystywana między innymi w konstrukcji analogowych **mierników elektrycznych**.

Mechanizm pomiarowy amperomierza składa się z cewki, do której jest przymocowana wskazówka. Cewka ze wskazówką może obracać się wokół osi. Ruchowi temu przeciwstawia się sprężyna. Całość znajduje się między biegunami magnesu stałego. Jeśli przez amperomierz płynie prąd, pole magnetyczne wytwarzane w cewce oddziałuje z polem magnetycznym magnesu stałego. Im większy prąd płynie, tym większa siła oddziaływania. Siła ta równoważy się z siłą sprężystości sprężyny, która jest proporcjonalna do odkształcenia sprężyny. Ostatecznie wartość wychylenia wskazówki na skali jest proporcjonalna do natężenia prądu elektrycznego przepływającego przez amperomierz.

Woltomierz ma podobną budowę, ale o wiele większy opór elektryczny. Płynie przez niego prąd o bardzo małym natężeniu, które zgodnie z prawem Ohma jest proporcjonalne do przyłożonego napięcia. Dzięki temu chociaż mechanizm pomiarowy woltomierza mierzy bezpośrednio natężenie prądu, tarcza woltomierza może być wyskalowana w jednostkach napięcia.

a)



b)



Rys. 17. Budowa wewnętrzna amperomierza: a) schemat, b) zdjęcie.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Przez długi przewodnik ułożony równoleżnikowo płynie stały prąd elektryczny z zachodu na wschód. Wyznacz kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej, z jaką działa na przewodnik ziemskie pole magnetyczne.
2. Wyjaśnij, w jaki sposób można sprawdzić za pomocą magnesu, że w zwisającym luźno giętkim, izolowanym przewodzie płynie prąd elektryczny. Jak można wyznaczyć kierunek przepływu tego prądu?
3. Czy poszczególne zwoje cewki, przez którą płynie prąd elektryczny, przyciągają się wzajemnie, czy odpychają? Odpowiedź uzasadnij.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- Na przewodnik z prądem elektrycznym, umieszczony w polu magnetycznym, działa siła elektrodynamiczna. Jest ona prostopadła do przewodnika i do linii pola magnetycznego, a jej wartość zależy od siły oddziaływania pola magnetycznego, natężenia prądu i od kąta między przewodnikiem a liniami pola magnetycznego.
- Zwrot siły elektrodynamicznej określa reguła lewej dłoni.
- Ponieważ prąd elektryczny płynący w przewodniku wytwarza wokół niego pole magnetyczne, przewodniki z prądem oddziałują na siebie magnetycznie. Jeśli w dwóch równoległych przewodnikach prądy płyną w tę samą stronę, to przewodniki się przyciągają, a jak w strony przeciwnie, to się odpychają.

s. 79

s. 79

s. 81

2.4. Oddziaływanie pola magnetycznego na poruszające się ładunki

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz siłę, która działa na cząstki naładowane poruszające się w polu magnetycznym;
- dowiesz się, po jakich torach poruszają się w polu magnetycznym cząstki naładowane;
- zrozumiesz, na czym polega ochronna rola ziemskiego pola magnetycznego;
- poznasz zasadę działania urządzeń wykorzystujących ruch cząstek naładowanych w polu magnetycznym.

Ruch ładunków swobodnych w jednorodnym polu magnetycznym

Gdy przez przewodnik ustawiony w polu magnetycznym nierównoległe do linii pola płynie prąd, działa na niego siła magnetyczna. Gdy prąd nie płynie, siła nie działa. Ładunki elektryczne są obecne w przewodniku cały czas, ale gdy nie ma prądu – nie poruszają się w sposób uporządkowany. Nasuwa to przypuszczenie, że pole magnetyczne działa nie na samą materię przewodnika ani na znajdujące się tam nieruchome ładunki, ale na ładunki będące w ruchu. Ponieważ ładunki poruszające się w przewodniku są uwięzione w jego obrębie, siła działająca na ładunki będzie się udzielać całemu przewodnikowi.



Aby zbadać sprawę dokładniej, posłużymy się urządzeniem zwanym rurką katodową (rys. 18). Jest to szklana bańka niemal pozbawiona powietrza, w której zatopione są dwie elektrody: katoda i anoda. Niedaleko katody znajduje się przesłona z wąską szczeliną. Wzdłuż bańki jest ustawiona pionowo wstęga metalowa pokryta luminoforem, czyli substancją, która świeci pod wpływem bombardujących ją elektronów. Po podłączeniu do elektrod wysokiego napięcia, elektrony opuszczające katodę przechodzą przez szczelinę i są przyciągane do anody, zostawiając na wstędze ślad w postaci świetlistej smugi. Wskazuje ona tor ruchu elektronów. Niskie ciśnienie wewnątrz rurki jest po to, aby cząsteczki gazu nie przeszkadzały ruchowi rozprędzonych elektronów. Strumień elektronów w takiej rurce nazywamy promieniami katodowymi, stąd nazwa rurki.



Rys. 18. Rurka katodowa.

Doświadczenie

Pomoce: rurka katodowa, induktor lub inne źródło wysokiego napięcia, przewody połączeniowe z krokodylkami, magnes podkowiasty.

Uwaga: Podczas wykonywania doświadczenia zachowaj szczególną ostrożność z uwagi na stosowane wysokie napięcie.

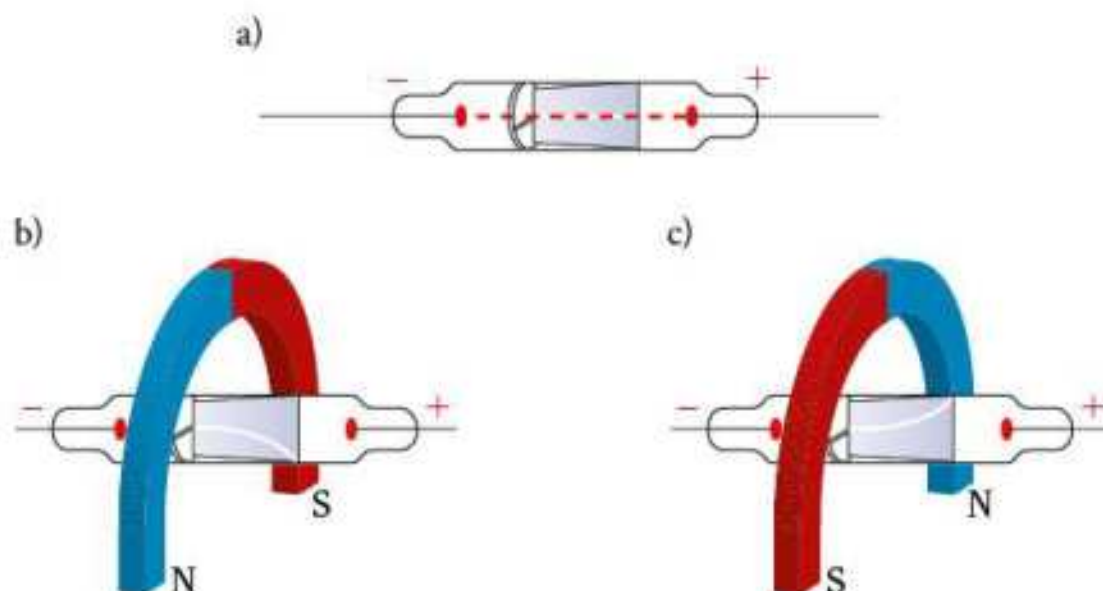
Podłącz rurkę do źródła wysokiego napięcia: katodę do zacisku ujemnego, a anodę do dodatniego. Włącz źródło napięcia.

Obserwacja: Na wstędze z luminoforem świeci wąska smuga o kształcie prostoliniowym (rys. 19a).

Umieść rurkę między biegunami magnesu tak, aby linie pola biegły poziomo, prostopadle do ruchu elektronów.

Obserwacja: Strumień elektronów odchyła się w pionie (rys. 19b). Zwrot siły odchylającej strumień wydaje się na pozór odwrotny, niż by to wynikało z reguły lewej dłoni, ale pamiętamy, że dotyczyła ona umownego kierunku przepływu prądu (ładunków dodatnich), a tu mamy do czynienia z ujemnymi elektronami. Odwróć magnes, zamieniając bieguny miejscami.

Obserwacja: Wiązka elektronów odchyła się teraz w przeciwną stronę (rys. 19c). Jeśli rurka katodowa zostałaby umieszczona między biegunami magnesów tak, aby elektrony poruszały się równolegle do linii pola magnetycznego, to żadnego efektu nie można byłoby zaobserwować.



Rys. 19. Ruch strumienia elektronów swobodnych w polu magnetycznym.

Wyniki tego eksperymentu pozwalają nam doprecyzować definicję pola magnetycznego, podaną na pierwszej lekcji oraz głębiej zrozumieć istotę magnetyzmu:

Pole magnetyczne – właściwość przestrzeni, w której na poruszające się ładunki elektryczne działa siła magnetyczna.

pole magnetyczne

Pierwotnym źródłem pola magnetycznego jest ruch ładunków. Może to być uporządkowany ruch ładunków w postaci prądu elektrycznego w przewodniku albo ruch elektronów w atomach substancji magnetycznych. Z drugiej strony pole magnetyczne działa na poruszające się ładunki. Mogą to być ładunki swobodne, tak jak w opisanym doświadczeniu, i wtedy siła magnetyczna będzie modyfikować tor tych ładunków. Mogą to być ładunki poruszające się w przewodniku. Wtedy oddziaływanie objawia się jako siła elektrodynamiczna działająca na cały przewodnik. Mogą to być wreszcie ruchy elektronów w atomach substancji namagnesowanych. Wtedy mamy do czynienia z działaniem pola magnetycznego na magnes albo igłę magnetyczną. Tym pole magnetyczne różni się od elektrycznego, które działa na ładunki bez względu na ich ruch.

Pole magnetyczne magnesu podkowiastego, użytego w powyższym doświadczeniu, miało charakter lokalny. Elektrony przechodzące przez ten obszar odchyliły się, po czym kontynuowały ruch w nowym kierunku. Gdyby objąć jednorodnym polem magnetycznym całą przestrzeń dostępną elektronom, zmieniałyby one kierunek ruchu cały czas. Siła magnetyczna działająca na elektrony byłaby cały czas prostopadła do kierunku ruchu. Pamiętajmy, że taka siła nosi nazwę siły dośrodkowej i powoduje ruch po okręgu. Odpowiednio modelując pole, moglibyśmy złapać elektrony w pułapkę i zmusić do poruszania się po torze kolistym.

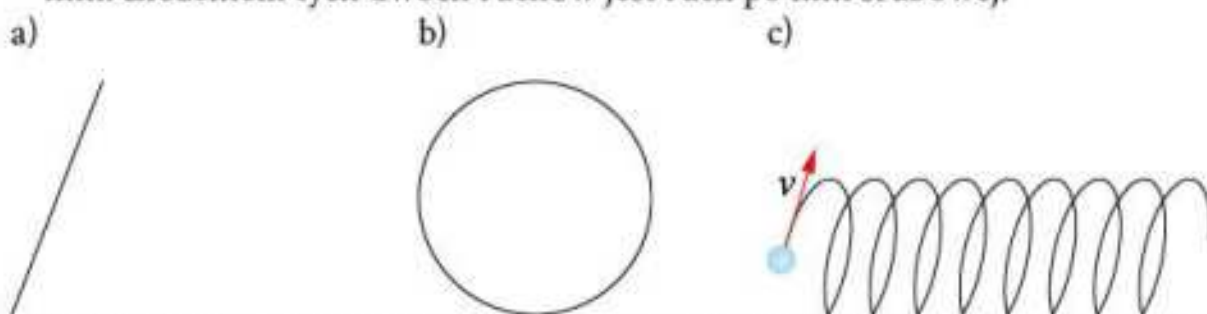
Jeśli cząstka naładowana wpadnie w obszar jednorodnego pola magnetycznego i nie będą na nią działać żadne inne siły, to możliwe są trzy scenariusze jej ruchu:

1. Wektor prędkości cząstki jest równoległy do linii pola magnetycznego i wtedy siła magnetyczna nie działa. Zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki cząstka będzie się poruszać ruchem jednostajnym prostoliniowym.

ruch naładowanej
cząstki w polu
magnetycznym



2. Wektor prędkości cząstki będzie prostopadły do linii pola magnetycznego. Wtedy siła magnetyczna będzie cały czas prostopadła do kierunku ruchu cząstki i będzie pełnić funkcję siły dośrodkowej, powodując zakrzywienie toru cząstki. Cząstka będzie się poruszać po okręgu.
3. Cząstka wpada w obszar pola magnetycznego pod dowolnym innym kątem. Wtedy prędkość tej cząstki można przedstawić jako sumę dwóch składowych: równoległej do linii pola i prostopadłej do nich. Cząstka będzie wtedy wykonywać jednocześnie dwa ruchy: jednostajny wzdłuż linii pola i po okręgu w płaszczyźnie prostopadłej do linii. Złożeniem tych dwóch ruchów jest ruch po linii śrubowej.

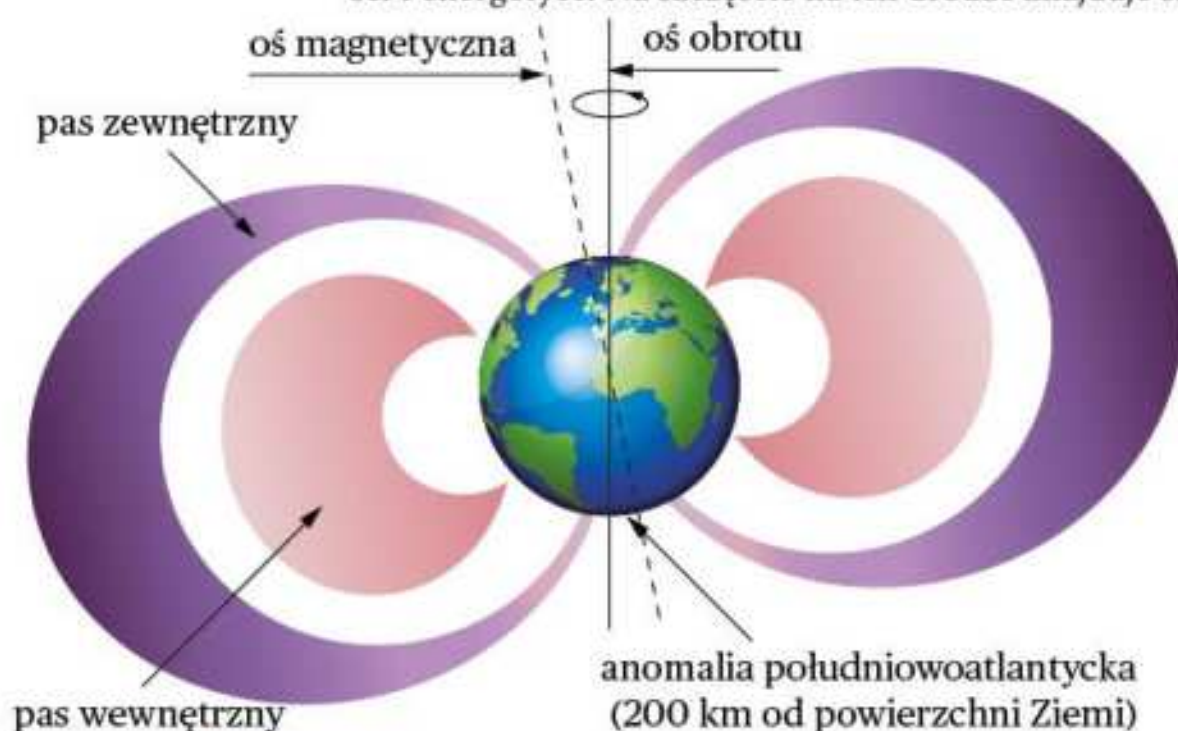


Rys. 20. Możliwe tory ruchu cząstki naładowanej w jednorodnym polu magnetycznym: a) linia prosta, b) okrąg, c) linia śrubowa.

pole magnetyczne
jako tarcza
chroniąca Ziemię

Właściwości ochronne ziemskiego pola magnetycznego

Opisany powyżej wpływ pola magnetycznego na ruch cząstek naładowanych okazuje się zbawienny dla życia na naszej planecie. Atmosfera ziemska jest bombardowana przez śmiertelne promieniowanie kosmiczne oraz wiatr słoneczny – strumień wysokoenergetycznych cząstek naładowanych emitowanych z powierzchni Słońca. Energia tych cząstek zmienia się okresowo i jest szczególnie wysoka podczas tak zwanych rozbłysków. Gdyby cząstki o wielkiej energii mogły docierać bez przeszkód do ziemskiej atmosfery, mogłyby zderzać się z wielkimi prędkościami z cząsteczkami powietrza, wybijając je w Kosmos i powodować różnego rodzaju zakłócenia w łączności i energetyce. Na szczęście na ich drodze znajduje się ziemskie pole magnetyczne.



Rys. 21. Ziemskie pasy radiacyjne.

Cząstki naładowane, które pod różnymi kątami wpadły w obszar pola magnetycznego, zaczynają „ślizgać się” wzdłuż linii pola, wykonując wokół nich ruch po liniach śrubowych. Obszary, w których takich cząstek jest szczególnie dużo, nazywamy pasami radiacyjnymi. Pasy te rozciągają się w obszarze od około 1000 km do około 64 000 km od Ziemi. Są bardzo niebezpieczne dla



międzyplanetarnych statków kosmicznych, które muszą być zaopatrzone w specjalne osłony, aby nie ulec awarii pod wpływem promieniowania. Kosmonauci orbitujący na niskich orbitach są bezpieczniejsi, ponieważ znajdują się poniżej tych pasów.

Schwytane przez pole magnetyczne cząstki elementarne docierają w końcu do górnych warstw atmosfery w okolicach biegunów magnetycznych. Tam zderzają się z cząsteczkami powietrza, wywołując efektowne zjawiska świetlne zwane **zorzą polarną**. Są one widoczne przeważnie za kołem podbiegunowym, ale podczas wzmożonej aktywności słonecznej można je zobaczyć nawet z terenów Polski.

zorza polarna



Rys. 22. Zorza polarna.

Chcesz wiedzieć więcej?

Wyniki współczesnych badań pozwalają przypuszczać, że 4 miliardy lat temu Mars miał płynne jądro wytwarzające magnetosferę podobną do ziemskiej. Atmosfera Marsa była gęsta i o wiele cieplejsza niż obecnie. Wszystko wskazuje na to, że na powierzchni tej planety występowały oceany, a na lądach płynęły rzeki.

Mars w porównaniu z Ziemią ma dwukrotnie mniejszą średnicę i dziesięciokrotnie mniejszą masę, w związku z czym jego wnętrze szybko wystygło i skrzepło. Brak płynnego wirującego jądra spowodował zanik globalnego pola magnetycznego. Od tego czasu tory cząsteczek wiatru słonecznego nie są zakrzywiane w pasach radiacyjnych jak na Ziemi i nie opływają planety po liniach śrubowych w stronę biegunów. Poruszają się po liniach prostych i bez trudu zderzają się z atomami gazów atmosferycznych, nadając im wielką energię kinetyczną. Ponieważ przyciąganie grawitacyjne na Marsie jest niemal trzy razy słabsze niż na Ziemi, energia ta w niektórych przypadkach wystarcza, by cząsteczki gazu opuściły marsjańskie pole grawitacyjne na zawsze. Ten proces sprawił, że w ciągu setek milionów lat Mars utracił niemal całą atmosferę, a jego klimat stał się suchy i zimny.

Niektóre obszary Marsa wykazują lokalne słabe namagnesowanie. Prawdopodobnie jest to pozostałość po wspomnianym globalnym polu magnetycznym istniejącym w czasach formowania się powierzchni Marsa.

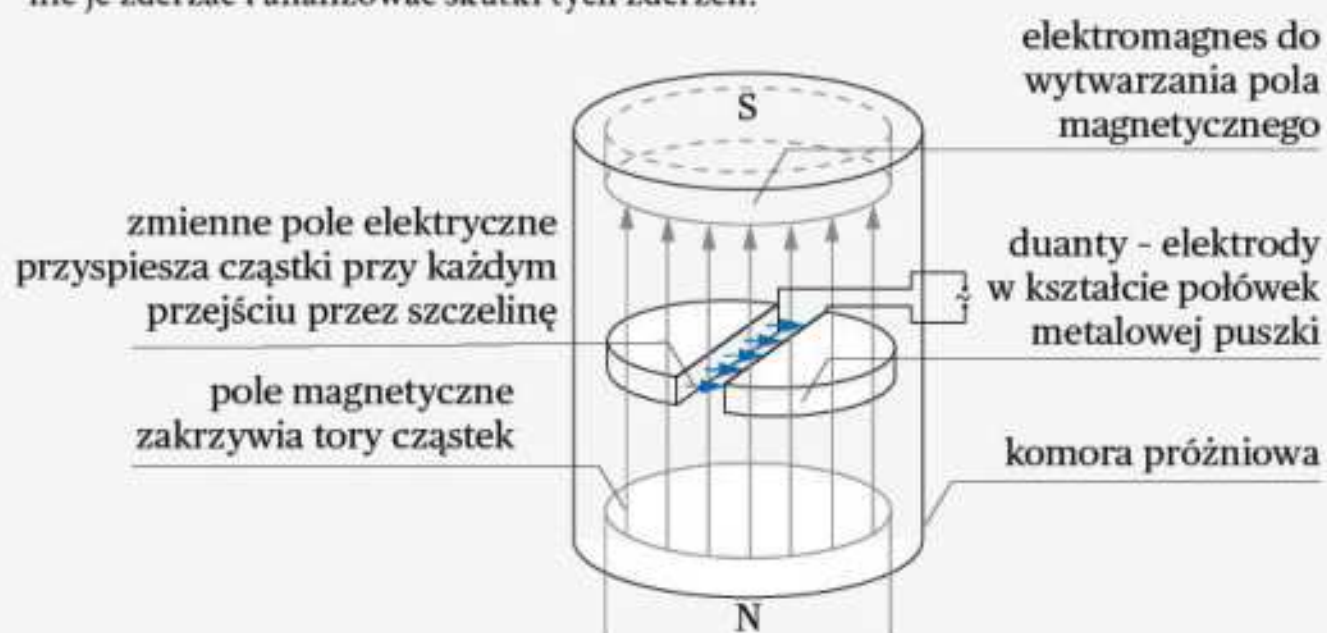




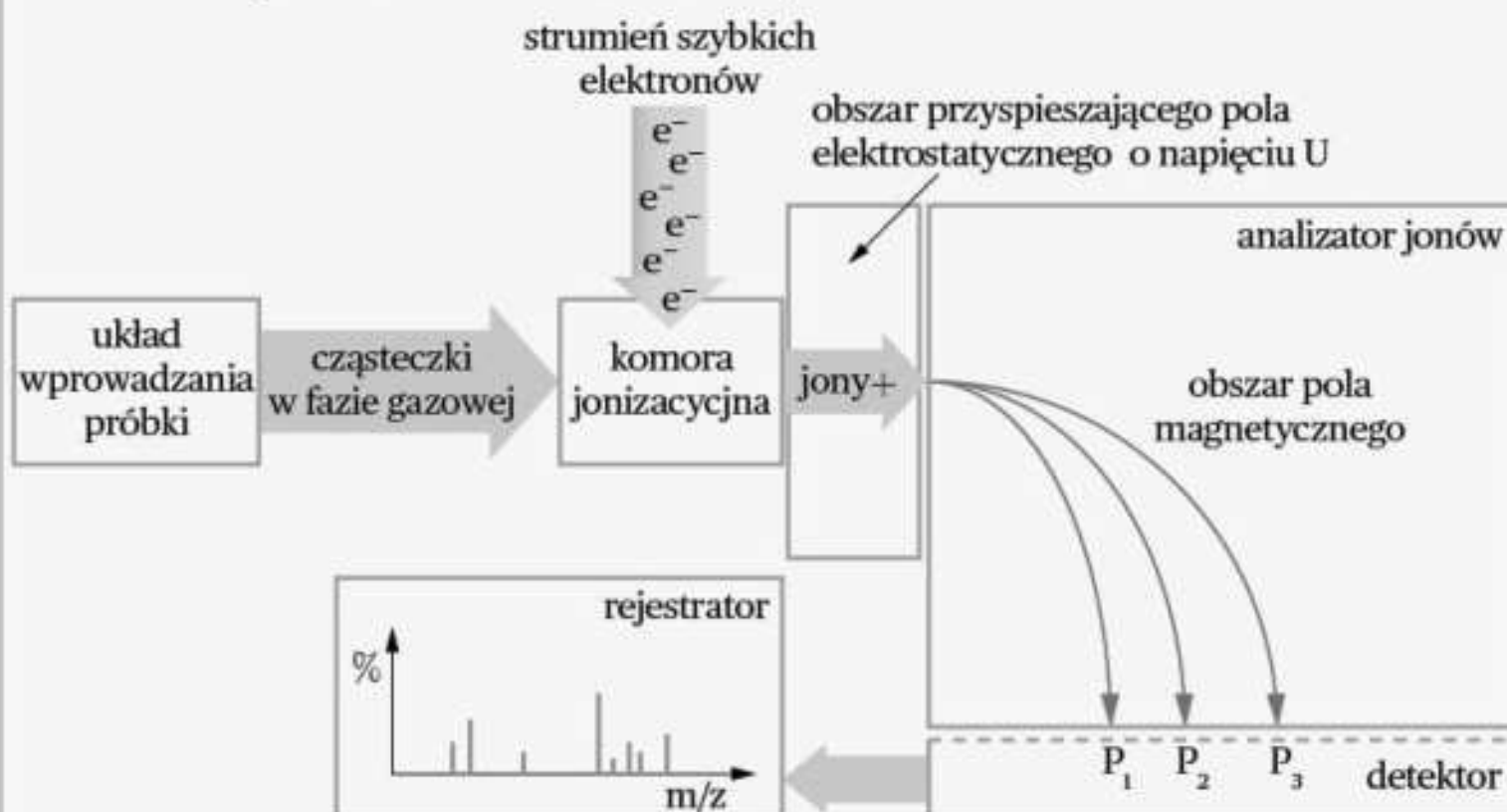
Chcesz wiedzieć więcej?

Inne zastosowania siły magnetycznej działającej na cząstki naładowane

Fakt, że cząstki naładowane poruszają się w polu magnetycznym po okręgach, został wykorzystany praktycznie w cyklotronach. Są to urządzenia przeznaczone do rozpędzania cząstek elementarnych i jonów do wielkich energii w celu przeprowadzania badań w dziedzinie fizyki jądrowej. Cząstkom nadaje się coraz większą prędkość za pomocą pola elektrycznego przełączanego cyklicznie między elektrodami cyklotronu (duantami). Wewnątrz duantów panuje pole magnetyczne, które zakrzywia tor cząstek i pozwala przyspieszać je wielokrotnie. W ten sposób uczeni potrafią przyspieszać cząstki elementarne do prędkości bliskich prędkości światła, a następnie je zderzać i analizować skutki tych zderzeń.



Rys. 23. Schemat i zasada działania cyklotronu.



Rys. 24. Spektrometr masowy.



Innym urządzeniem badawczym wykorzystującym pole magnetyczne jest spektrometr masowy (rys. 24). Służy on do rozdzielania próbki danego pierwiastka na poszczególne izotopy. Izotopy to odmiany atomów tego samego pierwiastka, różniące się ilością neutronów w jądrze, a więc i masą. Mają one identyczne właściwości chemiczne, więc nie można ich rozdzielić za pomocą reakcji chemicznych. Jeśli chcemy zbadać skład izotopowy jakiegoś pierwiastka, to musimy jego atomy zjonizować (czyli pozbawić elektronu), rozpędzić i wpuścić w obszar jednorodnego pola magnetycznego. Atomy poszczególnych izotopów mają różne masy, a więc różną bezwładność i będą się poruszać po torach o różnych promieniach. W konsekwencji trafią w różne miejsca detektora, gdzie będą mogły zostać zliczone.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Jony poruszają się poziomo z lewej strony na prawą. W pewnym momencie włączono poziome pole magnetyczne o zwrocie od obserwatora. Tor jonów został odchylony ku górze. Jaki był znak ładunków tych jonów?
2. Zorze polarne zdarzają się nie tylko na Ziemi, lecz także na planetach zewnętrznych Układu Słonecznego, gdyż mają one pasy radiacyjne i gęste atmosfery. Zostały one uwiecznione na zdjęciach podczas przelotu sond międzyplanetarnych w pobliżu tych planet. Przygotuj pokaz slajdów na ten temat.
- 3*. Przygotuj referat multimedialny o budowie, zasadzie działania i zastosowaniach:
 - a) współczesnych cyklotronów.
 - b) spektrometrów masowych.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Na ciała obdarzone ładunkiem elektrycznym, poruszające się w polu magnetycznym nierównoległe do linii tego pola, działa siła magnetyczna o kierunku prostopadłym zarówno do kierunku ruchu ciała, jak i do linii pola. Powoduje ona zakrzywienie toru ich ruchu. s. 85
- Najogólniejsza definicja pola magnetycznego mówi, że jest to obszar, w którym na poruszające się ładunki elektryczne działają siły. Źródłem pola magnetycznego są również poruszające się ładunki elektryczne. s. 85
- Ziemskie pole magnetyczne chroni nas przed wysokoenergetycznym promieniowaniem docierającym z Kosmosu. s. 86
- Jony uwięzione przez pole magnetyczne Ziemi docierają do górnych warstw atmosfery w okolicach biegunów magnetycznych, gdzie wywołują zjawisko zorzy polarnej. s. 87



2.5. Indukcja elektromagnetyczna

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak za pomocą pola magnetycznego można wzbudzać prąd elektryczny;
- poznasz prawa rządzące zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej;
- zrozumiesz, skąd bierze się energia elektryczna niesiona przez prąd indukcyjny.

Eksperymentalne podstawy zjawiska

Gdy w 1820 roku Ørsted odkrył, że prąd elektryczny wytwarza wokół siebie pole magnetyczne, zaczęto się zastanawiać, czy sytuacja nie jest w jakimś stopniu symetryczna, to znaczy czy za pomocą pola magnetycznego można wytworzyć prąd elektryczny. Po 11 latach poszukiwań, w 1831 roku, twierdzącej odpowiedzi na to pytanie udzielił angielski uczony i wybitny eksperymentator – Michael Faraday (czytaj: majkel faradej; 1791–1867). Poprzez eksperyment w prosty sposób zilustrujemy to zjawisko. Musimy pamiętać, że 200 lat temu wykonywanie doświadczeń było o wiele trudniejsze niż obecnie ze względu na brak odpowiednich przyrządów. Używany współcześnie sprzęt laboratoryjny, na przykład mierniki elektryczne, mógł zostać skonstruowany dopiero po odkryciu praw fizyki, które teraz omawiamy. Dlatego od-

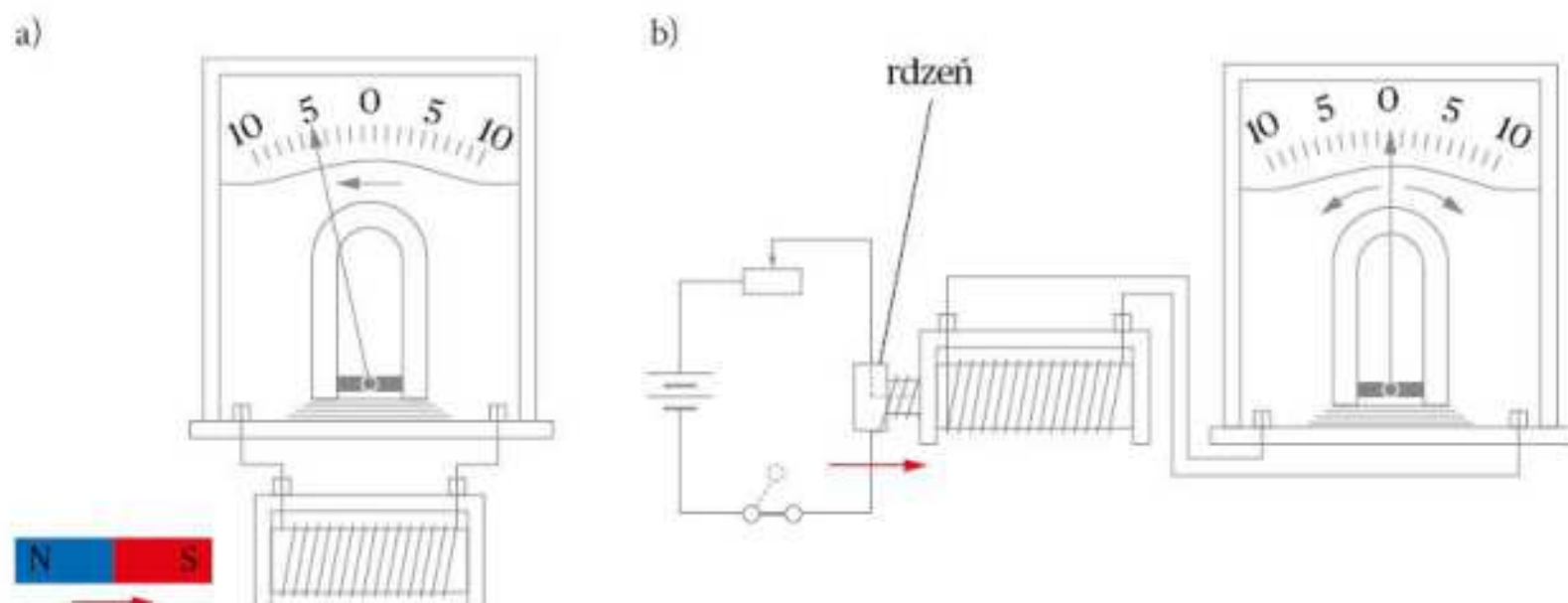


krywanie praw przyrody wymagało niezwyklej pomysłowości oraz zręczności. Faraday wykonał swoje doświadczenie za pomocą pionierskich metod. Przebiegało nieco inaczej niż doświadczenie przedstawione poniżej, lecz prowadziło do identycznych wniosków, jakie za chwilę sformulujemy.

Rys. 25. Michael Faraday – angielski fizyk i chemik samouk, jeden z najwybitniejszych eksperymentatorów wszystkich czasów. Odkrył zjawisko indukcji elektromagnetycznej oraz samoindukcji. Skonstruował pierwszy model silnika elektrycznego oraz prądnicy. Wprowadził do opisu oddziaływań koncepcję linii pola magnetycznego. Sformułował prawa dotyczące elektrolizy.

Doświadczenie

Pomoce: bardzo czuły miernik prądu elektrycznego (tzw. galwanometr lub miliamperomierz o małym zakresie), dwie cewki – szersza i węższa mieszcząca się w szerszej, rdzeń żelazny w postaci dowolnego grubego pręta, magnes sztabkowy, zasilacz regulowany prądu stałego, komplet przewodów połączeniowych.



Rys. 26. Wzbudzenie prądu indukcyjnego: a) za pomocą magnesu, b) za pomocą elektromagnesu.

1. Podłącz szerszą cewkę do galwanometru. Włóż magnes do wnętrza cewki i natychmiast go wyciągnij.

Obserwacja: Wskazówka miernika wychyliła się raz w jedną, raz w drugą stronę.

2. Włóż magnes do wnętrza cewki i pozostaw go nieruchomo.

Obserwacja: Wskazówka początkowo wychyliła się, po czym wróciła do wartości zero.

Wniosek: Za wzbudzenie się prądu elektrycznego odpowiada ruch magnesu, a nie sama jego obecność.

3. Wkładaj magnes do cewki i go wyjmuj, trzymając go teraz za drugi biegun.

Obserwacja: Wskazówka wychyliła się teraz przeciwnie niż poprzednio.

Wniosek: Na kierunek przepływu prądu wpływa zarówno zwrot linii pola magnetycznego, jak i kierunek ruchu magnesu.

4. Wykonaj opisane wyżej czynności raz wolno, raz szybko.

Obserwacja: Do pewnego stopnia im szybszy ruch magnesu, tym szybsze i większe wychylenie wskazówki, świadczące o większym natężeniu prądu. Gdy doświadczenie jest wykonywane zbyt szybko, wskazówka nie jest w stanie prawidłowo zareagować ze względu na swoją bezwładność. Można się domyślić, że natężenie prądu będzie wtedy jeszcze większe.

5. Podłącz węższą cewkę do źródła prądu stałego. Wkładaj ją do szerszej cewki i wyciągaj podobnie jak poprzednio magnes.

Obserwacja: Wskazówka miernika zachowuje się jak w doświadczeniu z magnesem.

6. Podłączoną do zasilacza mniejszą cewkę włóż do szerszej i pozostaw nieruchomo. Zwiększ lub zmniejsz natężenie prądu płynącego z zasilacza. Następnie pozostaw na chwilę natężenie prądu bez zmian.

Obserwacja: Podczas zwiększania natężenia prądu w mniejszej cewce, w większej cewce wzbudza się prąd elektryczny o kierunku przeciwnym niż wtedy, gdy w mniejszej cewce natężenie prądu maleje. Gdy w mniejszej cewce płynie prąd o stałym natężeniu, w cewce szerszej prąd się nie wzbudza.



7. Wykonaj powyższe ćwiczenie z przewodami podłączonymi do mniejszej cewki na odwrót.

Obserwacja: Wskazówka wychyla się przeciwnie niż poprzednio.

8. Wykonaj ćwiczenie z punktu 6 raz szybko, a raz wolno.

Obserwacja: Im szybsze zmiany natężenia prądu w cewce wewnętrznej, tym mocniej wychyla się wskazówka miernika podłączonego do cewki zewnętrznej. Jeśli zmiany będą zbyt szybkie, bezwładność wskazówki nie pozwoli na jej pełne wychylenie się. Natężenie prądu w większej cewce zależy od szybkości zmian natężenia prądu w mniejszej cewce, a nie od samej wartości tego prądu.

9. Włóż węższą cewkę do szerszej i pozostaw nieruchomo. Przez wewnętrzną cewkę przepuść prąd o stałym natężeniu. Do wnętrza wewnętrznej cewki włóż rdzeń żelazny, po czym go wyjmij.

Obserwacja: Wskazówka wychyla się mocno raz w jedną, a raz w drugą stronę. Oprócz tego daje się odczuć opór stawiany przez pole magnetyczne – zarówno wkładanie, jak i wyjmowanie rdzenia z cewki wymaga użycia zauważalnej siły. Natężenie prądu wzbudzanego w ten sposób jest znacznie większe niż we wcześniejszych przypadkach, więc warto poruszać rdzeniem wolniej lub użyć miernika o większym zakresie, aby go nie uszkodzić.

Zaobserwowaliśmy pojawienie się prądu elektrycznego w cewce w wyniku ruchu magnesu lub elektromagnesu wewnątrz tej cewki. Podobny efekt wywołują zmiany pola magnetycznego wytwarzanego przez nieruchomy elektromagnes. Zaobserwowane zjawisko zostało nazwane indukcją elektromagnetyczną.

indukcja
elektromagnetyczna

Indukcja elektromagnetyczna – zjawisko wzbudzania się prądu elektrycznego w obwodzie pod wpływem zmian pola magnetycznego przenikającego ten obwód. Wzbudzony w ten sposób prąd elektryczny nazywamy prądem indukcyjnym.

Użyliśmy cewki zamiast zwykłego obwodu, gdyż pole magnetyczne przenikające cewkę wywołuje efekt tyle razy silniejszy, ile zwojów ma cewka. Jak zauważyliśmy, przyczyną powstawania prądu indukcyjnego jest nie samo istnienie pola magnetycznego, ale jego zmiany. Nieruchomy magnes lub nieruchoma cewka, przez którą płynie prąd o stałym natężeniu, nie wzbudzi prądu indukcyjnego. **Zmiany pola magnetycznego** przenikającego obwód można uzyskać na różne sposoby:

1. poruszając magnesem w bezpośredniej bliskości cewki. Ruch jest względny, więc identyczny efekt uzyskamy, poruszając cewką w bezpośrednim sąsiedztwie nieruchomego magnesu.
2. poruszając cewką z prądem w sąsiedztwie innej cewki. Cewka z prądem zachowuje się identycznie jak magnes, co zauważył już Ampère.
3. zmieniając natężenie prądu w jednej cewce znajdującej się w sąsiedztwie drugiej. Zmiany natężenia prądu powodują zmiany wytwarzanego pola magnetycznego, które przenika przez drugą cewkę.
4. zmieniając materiał wypełniający cewkę z prądem. Użycie rdzenia żelaznego znacząco zwielokrotnia pole magnetyczne wytworzone przez cewkę (powstaje wtedy elektromagnes).

zmiany pola
magnetycznego



Ponadto stwierdzamy, że:

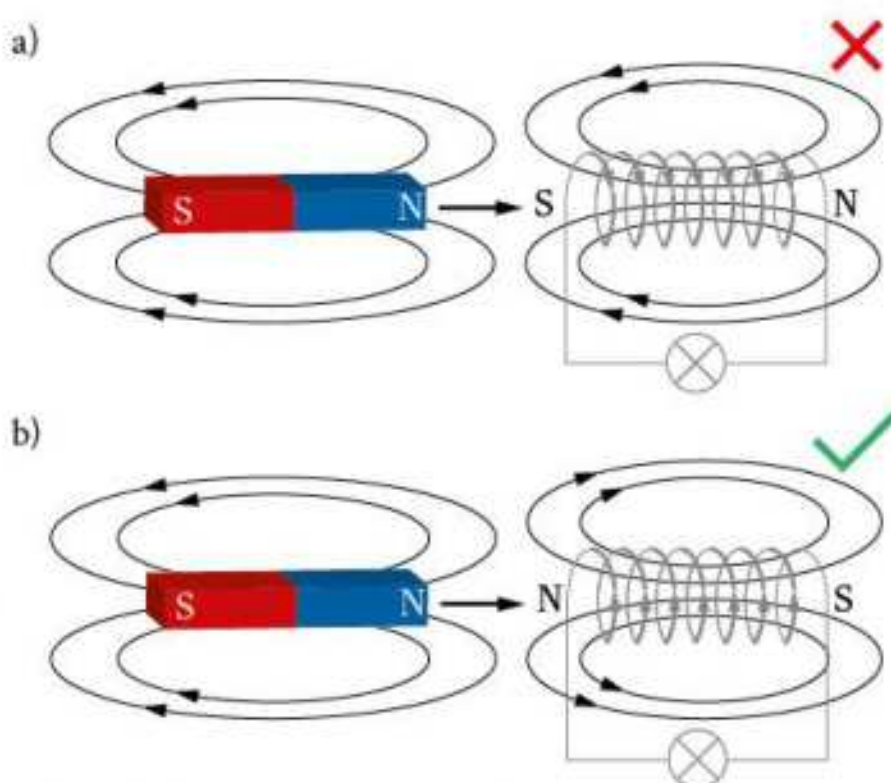
1. Natężenie prądu indukcyjnego jest tym większe, im szybciej zmienia się pole magnetyczne przenikające przez obwód.
2. Kierunek prądu indukcyjnego zależy od kierunku zmian pola magnetycznego przenikającego przez obwód, co zostało dokładnie przeanalizowane poniżej.

Przemiany energii w zjawisku indukcji elektromagnetycznej

Wiemy już, że jeżeli zamknięty obwód elektryczny przenika zmienne pole magnetyczne, to w obwodzie takim wzbudza się prąd indukcyjny. Ale prąd płynący w obwodzie też jest źródłem pola magnetycznego. Mamy więc do czynienia jednocześnie z dwoma polami magnetycznymi: tym pierwotnym, które wzbudziło prąd (jest jego przyczyną), i polem wytworzonym przez prąd indukcyjny (czyli będącym jego skutkiem). Pojawia się więc pytanie: czy źródła obu tych pól się przyciągają, czy odpychają?

Aby na nie odpowiedzieć, rozważmy sytuację zilustrowaną rysunkiem 27. Przedstawiono na nim cewkę, której zaciski są podłączone do żarówki mającej wskazywać ewentualny przepływ prądu, oraz znajdujący się w osi tej cewki magnes sztabkowy. Aby nie wdawać się w szczegóły związane ze sposobem mocowania, eliminacją tarcia itp., założmy, że całość znajduje się w stanie nieważkości. Przyjmijmy też, że biegun północny magnesu jest zwrócony w stronę cewki. Popychamy teraz magnes w stronę cewki. Ponieważ zmienia się pole magnetyczne przenikające przez cewkę, zaczyna w niej płynąć prąd indukcyjny wytwarzający własne pole magnetyczne. Jaki będzie kierunek tego prądu?

Przyjmijmy roboczą hipotezę, że kierunek prądu będzie taki, że od strony magnesu wytworzy się biegun południowy (rys. 27a). Jakie byłyby tego konsekwencje? Otóż magnes zostałby teraz sam wciągnięty do wnętrza cewki, w której pod wpływem jego ruchu płynąłby prąd zasilający żarówkę. W momencie wynurzenia z drugiej strony cewki, magnes zostałby wyhamowany przez pole magnetyczne i wciągnięty z powrotem, a prąd nadal by się indukował. Byłby to klasyczny przykład *perpetuum mobile*. Układ raz wprowadzony w ruch wykonywałby pracę mechaniczną polegającą na rozpędzaniu i hamowaniu magnesu i jeszcze dodatkowo wytwarzałaby się energia elektryczna zasilająca żarówkę. Na tej samej zasadzie rower wyposażony w dynamo wystarczyłoby tylko raz wprowadzić w ruch. Od tej pory dynamo samo by się kręciło, podtrzymując ruch roweru i jeszcze zasilaloby lampkę rowerową. Coś takiego jest niemożliwe.



Rys. 27. Ruch magnesu w pobliżu cewki a kierunek prądu indukcyjnego: a) wnioskowanie niewłaściwe, b) wnioskowanie właściwe – pole magnetyczne prądu indukcyjnego przeszkadza przyczynie wytworzenia tego prądu, czyli ruchowi magnesu.



warunek
wzbudzenia prądu
indukcyjnego

Prawda jest więc taka, że od strony zbliżającego się północnego bieguna magnesu cewka z prądem indukcyjnym wytworzy północny biegun magnetyczny, przeciwdziałający dalszemu ruchowi magnesu (rys. 27b). Energia elektryczna prądu indukcyjnego będzie powstawać kosztem pracy, jaką trzeba wykonać przeciwko siłom pola magnetycznego, aby poruszać w nim magnesem. Zauważyliśmy to w doświadczeniu, poruszając rdzeniem w cewce. Obojętnie w którą stronę próbowaliśmy poruszyć rdzeniem, siły magnetyczne zawsze nam w tym przeszkadzały. Praca, jaką wykonaliśmy przeciwko tym siłom, zamieniała się w energię elektryczną wychylającą wskazówkę miernika i rozgrzewającą przewody.



Chcesz wiedzieć więcej?

Powyższe wnioski są przejawem ogólniejszej reguły sformułowanej w 1834 roku przez rosyjskiego fizyka niemieckiego pochodzenia, Heinricha Lenza (czytaj: hajnrisia lenca; 1804–1865):

Prąd indukcyjny ma zawsze taki kierunek, że wytworzone przez niego pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie, która ten prąd wzbudziła.

Reguła ta dotyczy wszelkich sytuacji, w których powstaje prąd indukcyjny. Jeśli na przykład włączamy prąd w obwodzie, to wokół przewodników pojawia się pole magnetyczne indukujące prąd przeciwnie skierowany, osłabiający prąd, który włączyliśmy. Trwa to chwilę, lecz powoduje, że prąd nie może zacząć płynąć natychmiast, pojawia się pewna bezwładność. Podobnie się dzieje, jeśli chcemy wyłączyć prąd w obwodzie – pole magnetyczne przenikające obwód zmniejsza się, indukując prąd, który stara się podtrzymać przepływ wyłączanego prądu. Zanik prądu w obwodzie również trwa więc pewien czas. Nagłe włączanie i wyłączanie odbiorników energii elektrycznej indukuje napięcia czasami przekraczające normalne napięcia w sieci (tzw. przepięcia). Są one niebezpieczne, zwłaszcza dla urządzeń elektronicznych, i mogą powodować ich awarie. Dlatego drogie i wrażliwe urządzenia, jak komputery, zaleca się podłączać do sieci poprzez listwy ze specjalnymi filtrami redukującymi nagle skoki napięcia spowodowane indukcją elektromagnetyczną.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, od jakich czynników zależą natężenie i kierunek prądu indukcyjnego.
2. Z cewki wchodzącej w skład zamkniętego obwodu elektrycznego wysuwamy magnes skierowany biegunem południowym w stronę cewki. Jaki biegun magnetyczny od strony magnesu wytworzy prąd wyindukowany w cewce?



PODSUMOWANIE LEKCJI

- Indukcja elektromagnetyczna to zjawisko wzbudzania się prądu elektrycznego w obwodzie pod wpływem zmian pola magnetycznego przenikającego ten obwód. Wzbudzony w ten sposób prąd elektryczny nazywamy prądem indukcyjnym. s. 92
- Zmiany pola magnetycznego przenikającego przez obwód mogą wynikać ze względnego ruchu magnesu i obwodu, względnego ruchu obwodów (np. zwojnic) lub zmian natężania prądu w sąsiadującym obwodzie (np. zwojnicy lub elektromagnesie). s. 92
- Wzbudzanie prądu indukcyjnego wymaga dostarczenia energii w formie np. pracy przeciwko siłom pola magnetycznego. s. 94

2.6. Prądnica. Prąd przemienny

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak można wytwarzać energię elektryczną na skalę przemysłową;
- nauczysz się odróżniać pojęcia: *prąd stały*, *zmienny* i *przemienny*;
- poznasz cechy prądu przemiennego, płynącego w sieci elektrycznej w twoim domu.

Budowa i zasada działania prądnicy

Przed 1831 rokiem ludzkość знаła dwa sposoby wytwarzania prądu elektrycznego:

1. za pomocą urządzeń podobnych do maszyny elektrostatycznej, gdzie dochodziło do elektryzowania się ciał (części maszyny); ładunki były gromadzone w kondensatorach i mogły służyć do zasilania prostych obwodów;
2. za pomocą ogniw, które można było łączyć w baterie, czego przykładem był stos Volty.

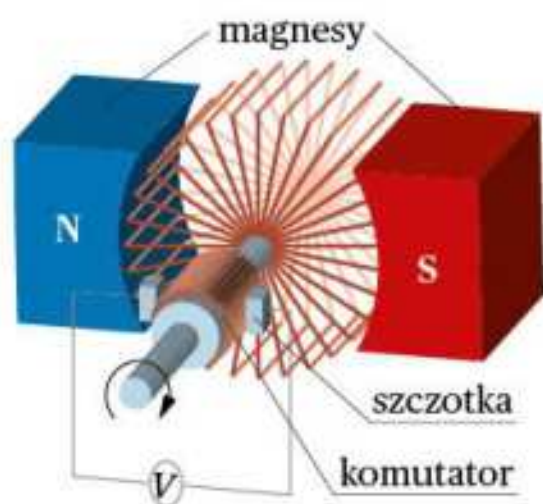
Oba te sposoby były nieefektywne, dostarczały prąd o małym natężeniu i nadawały się co najwyżej do wykonywania doświadczeń w laboratoriach naukowych. Nie było mowy o wytwarzaniu energii elektrycznej na skalę przemysłową i używaniu jej na przykład do oświetlania miast lub napędzania maszyn w fabrykach.



Sytuacja zmieniła się radykalnie wraz z odkryciem zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Był to moment przełomowy w historii naszej cywilizacji, gdyż poznaliśmy prosty i tani sposób na zamianę energii mechanicznej w energię elektryczną. Energia elektryczna daje się bardzo łatwo transportować (wystarczą do tego kable elektryczne) i jest bardzo uniwersalna. Ma wiele różnorodnych zastosowań i łatwo ją zamienić na inne formy energii, takie jak energia promieniowania fal elektromagnetycznych, akustycznych, energia mechaniczna. Dlatego odmieniła oblicze cywilizacji.

Metoda wzbudzania prądu indukcyjnego za pomocą cewki i magnesu, przedstawiona w doświadczeniu w rozdziale 2.5, jest mało wygodna. Magnes wkładany do cewki musi być rozpędzany i hamowany, co jest niekorzystne energetycznie i trudne w realizacji. O wiele prościej i taniej jest wykorzystać ruch obrotowy obwodu elektrycznego w polu magnetycznym. Na tej właśnie zasadzie działa **prądnica** (rys. 28).

prądnica



Rys. 28. Budowa wewnętrzna prądnicy.

Podstawowymi elementami każdej prądnicy są: obudowa z odpowiednio ukształtowanych magnesów, zwana **stożanem**, oraz **wirnik** w postaci ramki z drutu lub zwojnicy (układu ramek). Wirnik znajduje się na osi, a wyindukowany w ramce prąd elektryczny jest odprowadzany do obwodu za pomocą **szczotek**. Jeśli chcemy wytwarzać prąd jednokierunkowy, należy zastosować **komutator** zmieniający cyklicznie bieguny, podobnie jak w silniku prądu stałego.

Zmiany pola magnetycznego przenikającego przez obwód wirnika uzyskujemy, kręcąc tym wirnikiem. Dla uproszczenia przeanalizujemy obracanie się tylko jednej ramki. Gdy płaszczyzna ramki jest równoległa do linii pola magnetycznego, żadna z tych linii nie przecina ramki. Pole magnetyczne przenikające przez ramkę ma wtedy

wartość równą zero. Gdy ramka jest prostopadła do linii pola, przez powierzchnię ramki przechodzi maksymalna liczba linii. Łatwo zauważyć, że gdy ramka znajduje się pod dowolnym kątem, liczba przenikających ją linii pola magnetycznego jest tym większa, im większy jest kąt (dokładniej – jest proporcjonalna do sinusa kąta między płaszczyzną ramki a kierunkiem linii pola). Można wykazać matematycznie, że jeśli pole magnetyczne przenikające przez obwód zmienia się w czasie sinusoidalnie, natężenie wzbudzanego prądu indukcyjnego również będzie zależało od czasu sinusoidalnie. Prąd elektryczny, którego natężenie zmienia się w czasie jak funkcja sinus, nazywamy prądem przemiennym.

prąd indukcyjny
w prądnicy

Prąd indukcyjny wzbudzany w ramce wytwarza wokół siebie pole magnetyczne, które przeciwdziała ruchowi ramki w polu magnetycznym wytworzonym przez stożan. Dlatego utrzymywanie wirnika w ruchu wymaga użycia siły i wiąże się z wykonywaniem pracy mechanicznej. Prądnica jest więc urządzeniem, w którym zachodzi **przemiana energii mechanicznej w energię elektryczną**. Ma ona budowę identyczną jak silnik elektryczny, tylko zachodzą w niej odwrotne zjawiska. Gdybyśmy do szczotek prądnicy doprowadzili napięcie elektryczne, wirnik zacząłby się kręcić i prądnica zadziałałaby jak silnik.

prądnicę rowerową
(dynamo)

W praktyce prądnice różnią się między sobą wielkością, zastosowaniami i szczegółami budowy, w które nie będziemy tu wnikać. Najmniejszą spotykaną powszechnie prądnicą jest **prądnicę rowerową**, zwana też **dynamem**. Jej moc nie przekracza kilku watów. Obrót wirnika dynama następuje poprzez tarcie jego zewnętrznej części o oponę roweru podczas jazdy. Nowoczesne rowery mają dynama zintegrowane z piastą koła, co pozwala im pracować niezawodnie w sposób niezależny od warunków atmosferycznych i stopnia zużycia opony. Energia elektryczna zużywana w lampie rowerowej powstaje kosztem pracy mięśni rowerzysty.

a)



b)



c)



Rys. 29. Prądnice w różnej skali: a) dynamo rowerowe, b) alternator samochodowy, c) turbogenerator w elektrowni.

alternator
samochodowy

Do ładowania akumulatorów w samochodach służą **alternatory** napędzane przez silnik za pomocą paska klinowego. Wytwarzana w nich energia elektryczna powstaje więc kosztem energii chemicznej wyzwolonej podczas spalania benzyny lub oleju napędowego. Alternator jest zbudowany trochę inaczej niż prądnicę rowerową, gdyż wiruje w nim element wytwarzający pole magnetyczne, a prąd indukcyjny powstaje w cewkach wbudowanych do nieruchomego stojana. Takie rozwiązanie zwiększa wydajność i niezawodność urządzenia. Ponieważ akumulator wymaga ładowania prądem jednokierunkowym, na wyjściu alternatora znajduje się układ prostowniczy zbudowany na diodach.

Największe prądnice, o średnicy ponad 2 metrów i długości dochodzącej do kilkunastu metrów, stosuje się w elektrowniach. Ich moc sięga setek megawatów. Prądnice te są napędzane za pomocą turbin i dlatego nazywa się je **turbogeneratorami**. W elektrowniach wodnych turbiny wprawia w ruch przepływająca woda, która zmniejsza jednocześnie swoją energię potencjalną. W elektrowniach wiatrowych czynnikiem dostarczającym energii mechanicznej jest wiatr wiejący na śmigła wiatraka. W elektrowniach węglowych, gazowych i atomowych turbiny są napędzane przez gorącą i bardzo sprężoną parę wodną wytworzoną w kotłach lub reaktorach. Energia elektryczna powstaje więc kosztem energii chemicznej wyzwolonej w reakcjach spalania lub kosztem energii jądrowej wyzwolonej podczas rozszczepiania jąder atomowych.

turbogeneratory

Jak widać, zjawisko indukcji elektromagnetycznej leży u podstaw światowej energetyki. Nasza cywilizacja nie rozwinęłaby się w takim stopniu, gdyby nie odkrycie Faradaya z 1831 roku.



Cechy prądu przemiennego

Uporządkujmy kwestię nazewnictwa różnego rodzaju prądów elektrycznych. Jeżeli natężenie prądu nie zmienia się w czasie, to taki prąd nazywamy **prądem stałym**. Wykresem zależności natężenia prądu stałego od czasu jest prosta równoległa do osi czasu. Jeżeli natężenie prądu zmienia się w sposób dowolny, to mamy do czynienia z **prądem zmiennym**.

prąd przemienny

Prąd przemienny to taki, którego natężenie zmienia się w czasie, jak funkcja sinus.

Ten prąd płynie raz w jedną, raz w drugą stronę i jest wytwarzany w prądnicach, gdzie pole magnetyczne przenikające przez wirnik na przemian rośnie i maleje. Oprócz tego wyróżniamy jeszcze **prąd pulsacyjny**, którego natężenie zmienia się w czasie w sposób powtarzalny, ale płynie zawsze w tę samą stronę.

okres

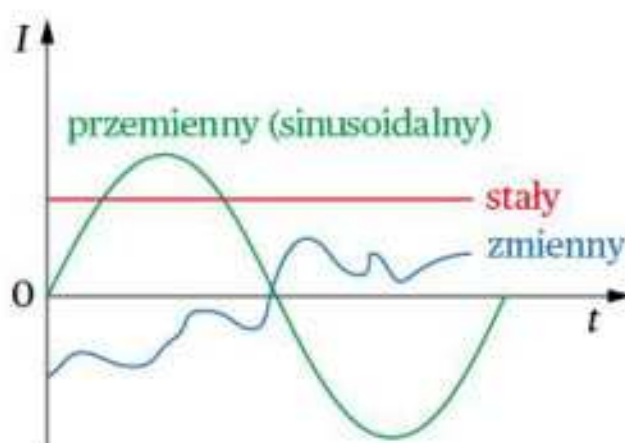
Jeden **okres** to czas jednej pełnej zmiany napięcia i/lub natężenia prądu indukcyjnego. Odpowiada to jednemu obrotowi wirnika typowej prądnicy. Przez połowę okresu prąd płynie w jedną stronę, a przez połowę w przeciwną. Odwrotnością okresu jest **częstotliwość**, czyli liczba pełnych zmian okresów w jednostce czasu. Jak pamiętasz, wyrażamy ją w hercach. W europejskiej sieci energetycznej częstotliwość prądu wynosi 50 Hz, w USA to 60 Hz. Aby wytwarzać prąd o takiej częstotliwości, turbiny generatorów muszą się obracać z wielkimi prędkościami, odpowiednio 50 i 60 obrotów na sekundę. Częstotliwość prądu, do której jest dostosowane dane urządzenie elektryczne, podaje się zazwyczaj na jego tabliczce znamionowej.

częstotliwość

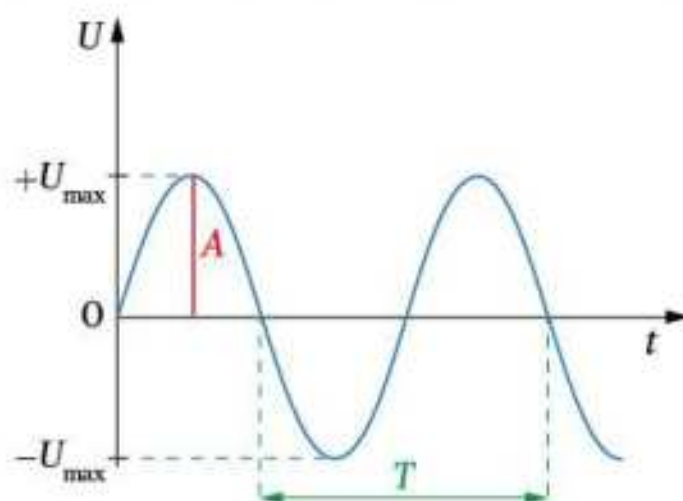
napięcie chwilowe

Napięcie chwilowe prądu przemiennego nieustannie się zmienia, zgodnie z wykresem na rysunku 31, dlatego jego wartość nie ma praktycznego znaczenia. W ciągu jednego okresu dwa razy przyjmuje wartości ekstremalne o przeciwnych znakach, odpowiadające przepływowi największego prądu w jedną i drugą stronę. Maksymalną wartość napięcia nazywamy **amplitudą napięcia** lub napięciem szczytowym. W Polsce wynosi ono 325 V. W ciągu jednego okresu napięcie chwilowe w sieci dwa razy przyjmuje wszystkie wartości pośrednie między +325 V i -325 V. Wraz ze zmianami napięcia chwilowego zmienia się też natężenie chwilowe i moc chwilowa prądu przemiennego. Te wielkości fizyczne również nie mają znaczenia praktycznego.

amplituda napięcia



Rys. 30. Różnice pomiędzy prądem stałym, zmiennym i przemiennym.



Rys. 31. Amplituda i okres prądu przemiennego.



Aby nadać mocy znaczenie praktyczne, należy ją uśrednić po całym okresie. Dzięki temu możliwe staje się na przykład obliczenie energii wydzielonej w danym urządzeniu w dłuższym czasie. Prowadzi to do koncepcji napięcia i natężenia skutecznego.

Napięcie i natężenie skuteczne prądu przemiennego – napięcie i natężenie takiego prądu stałego, który będzie miał tę samą moc, co prąd przemienny.

napięcie i natężenie skuteczne

Między amplitudą napięcia a napięciem skutecznym zachodzi prosty związek: $U_{\max} = U_{\text{sk}} \cdot \sqrt{2}$. W Polsce napięcie skuteczne wynosi 230 V. Posługując się pojęciem napięcia i natężenia skutecznego, możemy do prądu przemiennego zastosować wszystkie wzory na pracę, moc i opór elektryczny, które znamy dla prądu stałego. W życiu codziennym napięcie skuteczne i natężenie skuteczne nazywamy po prostu napięciem i natężeniem. Ich wartości dla urządzeń elektrycznych podaje się zazwyczaj na tabliczkach znamionowych.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz okres prądu elektrycznego w sieci energetycznej w Polsce i w USA.
2. Domowa sieć elektryczna jest zabezpieczona bezpiecznikiem o wartości skutecznej natężenia prądu 16 A. Oblicz maksymalną łączną moc wszystkich urządzeń, które mogą być jednocześnie użytkowane w tym domu.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Prądnica służy do zamiany energii mechanicznej w energię elektryczną. Jest zbudowana tak jak silnik elektryczny, ale zachodzą w niej odwrotne zjawiska. s. 96
- Prąd indukcyjny w prądnicie powstaje na skutek zmian pola magnetycznego przenikającego przez ramkę lub zwojnicę (układ ramek) podczas jej obrotu. s. 96
- Prądnice mogą mieć różne wielkości i zastosowania: od małych dynam rowerowych do turbo-generatorów w elektrowniach. s. 97
- Prąd elektryczny wytwarzany w prądnicie jest prądem przemiennym. Płynie raz w jedną, a raz w drugą stronę. Jego napięcie zmienia się sinusoidalnie. s. 98
- Każdy prąd przemienny charakteryzuje amplituda napięcia i natężenia oraz okres i częstotliwość. s. 98
- Napięcie i natężenie skuteczne prądu przemiennego to napięcie i natężenie takiego prądu stałego, który będzie miał tę samą moc, co prąd przemienny. s. 99
- W domowych sieciach elektrycznych w Polsce częstotliwość prądu wynosi 50 Hz, a napięcie skuteczne to 230 V. s. 98



2.7. Zastosowania zjawiska indukcji elektromagnetycznej

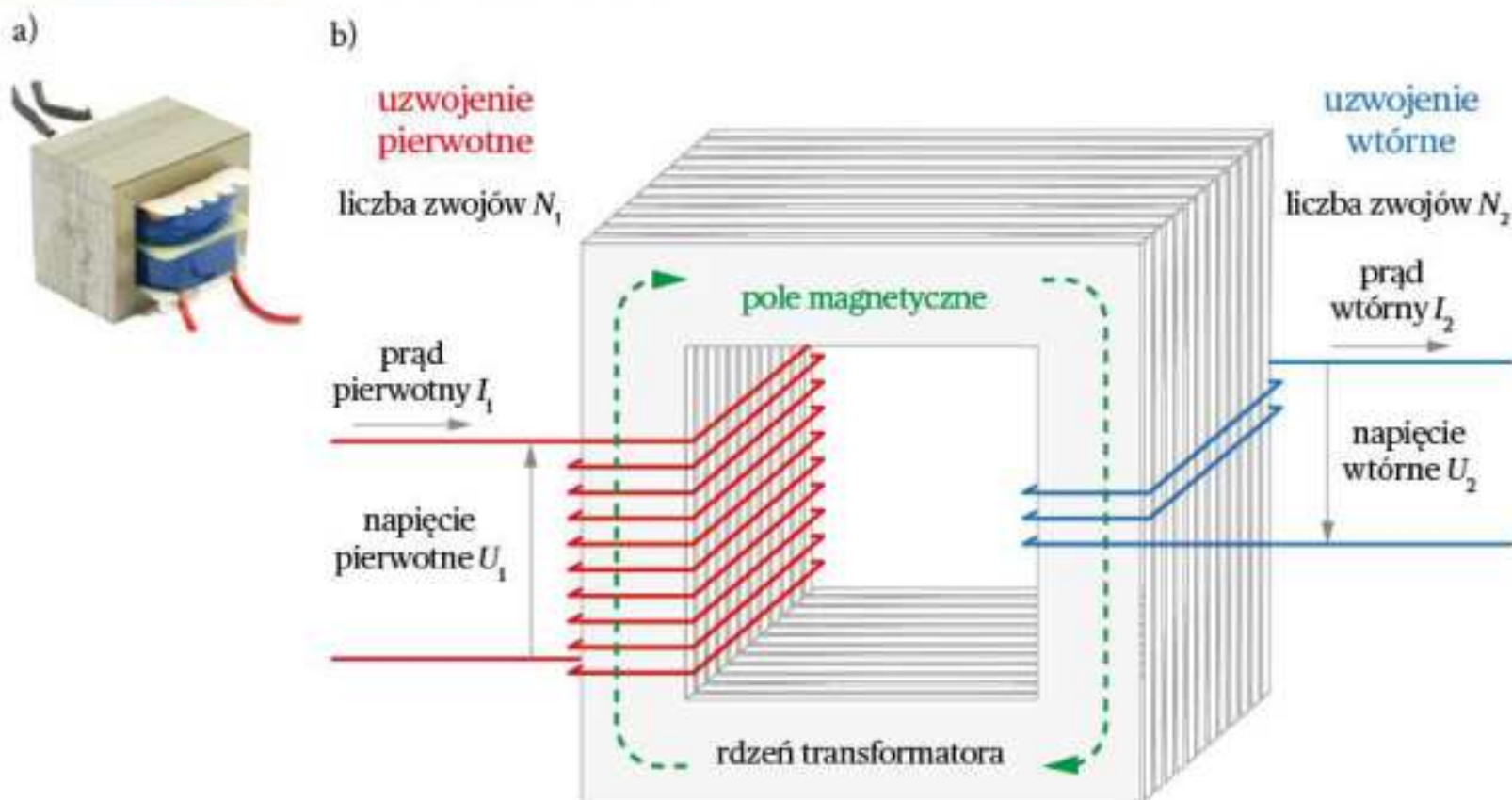
NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak można zmieniać napięcie prądu przemiennego i po co się to robi;
- dowiesz się, w jaki sposób energia elektryczna jest przesyłana z elektrowni do twojego domu;
- poznasz budowę i zasadę działania takich urządzeń, jak: zasilacz, spawarka elektryczna, lutownica, induktor oraz cewka zapłonowa.

Budowa i zasada działania transformatora

Jedną z podstawowych zalet prądu przemiennego w porównaniu z prądem stałym jest łatwość zmiany jego napięcia. Wykorzystujemy do tego to samo zjawisko, które pozwala nam wytwarzać prąd przemienny, czyli indukcję elektromagnetyczną. Urządzenie, za pomocą którego zmieniamy napięcie i natężenie prądu przemiennego, to **transformator**.

transformator



Rys. 32. Transformator: a) wygląd zewnętrzny, b) budowa.

Transformator jest zbudowany z dwóch cewek nawiniętych na wspólny rdzeń z ferromagnetyka, na przykład z żelaza, o zamkniętym kształcie. Jedno z uzwojeń podłączamy do źródła prądu przemiennego i nazywamy je **uzwojeniem pierwotnym**. Drugą cewkę, mającą zazwyczaj inną liczbę zwojów, podłączamy do odbiornika energii elektrycznej i nazywamy **uzwojeniem wtórnym**. Transformator jest urzą-



dzeniem działającym w obydwie strony, czyli każda z jego cewek może pełnić funkcję zarówno uzwojenia pierwotnego, jak i wtórnego, ale skutek będzie odwrotny.

Liczbę zwojów w uzwojeniu pierwotnym oznaczamy jako N_1 , a w uzwojeniu wtórnym – jako N_2 . Napięcie w uzwojeniu pierwotnym oznaczamy jako U_1 , a natężenie płynącego w nim prądu – jako I_1 . Prąd przemienny przepływający przez uzwojenie pierwotne wytwarza w rdzeniu zmienne pole magnetyczne tym silniejsze, im więcej zwojów ma cewka pierwotna. Ponieważ rdzeń wykazuje wielokrotnie większe namagnesowanie niż otaczająca go przestrzeń, linie pola magnetycznego praktycznie nie opuszczają rdzenia, tylko przebiegają po krzywych zamkniętych również przez obszar otoczony uzwojeniem wtórnym. Przez cewkę wtórną przenika więc zmienne pole magnetyczne, które wzbudza w niej prąd indukcyjny o napięciu tym większym, im więcej zwojów ma ta cewka. Ogólnie przez N zwojów przenika N razy większe pole magnetyczne niż przez pojedynczy zwój, dlatego napięcia na uzwojeniach będą proporcjonalne do liczby zwojów:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

k – tzw. przekładnia transformatora. Mówi ona, ile razy transformator podwyższa lub obniża napięcie. Gdy $N_2 > N_1$, to transformator podwyższa napięcie, a gdy $N_2 < N_1$, to obniża.

Z zasady zachowania energii wynika, że moc prądu na wejściu do transformatora musi być równa mocy na wyjściu, czyli uzwojeniu wtórnym. W rzeczywistości niewielka część energii ulega rozproszeniu w transformatorze, ale w przybliżeniu można te straty pominąć. Porównując moc prądu w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym, otrzymujemy:

$$P_1 = P_2 \quad \Rightarrow \quad U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{k}$$

Wynika z tego ciekawy wniosek o ważnym znaczeniu praktycznym: im bardziej transformator podwyższa napięcie, tym bardziej obniża natężenie prądu i na odwrot. Natężenia prądów w uzwojeniach są odwrotnie proporcjonalne do panujących tam napięć.

prąd i napięcie
w transformatorze

Przykład

Uzwojenie pierwotne transformatora ma 110 zwojów, a uzwojenie wtórne – 22 zwoje. W uzwojeniu pierwotnym pod napięciem 230 V płynie prąd przemienny o natężeniu 0,6 A. Oblicz napięcie w uzwojeniu wtórnym i natężenie płynącego w nim prądu.

Rozwiązanie:

Dane:	Szukane:
$N_1 = 110$	$U_2 = ?$
$N_2 = 22$	$I_2 = ?$
$U_1 = 230 \text{ V}$	



$$\begin{aligned} I_1 &= 0,6 \text{ A} \\ \frac{U_2}{U_1} &= \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} \\ U_2 &= 46 \text{ V} \\ \frac{I_2}{I_1} &= \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} \\ I_2 &= 3 \text{ A} \end{aligned}$$

Odpowiedź: Napięcie w obwodzie wtórnym będzie wynosiło 46 V i popłynie w nim prąd o natężeniu 3 A.

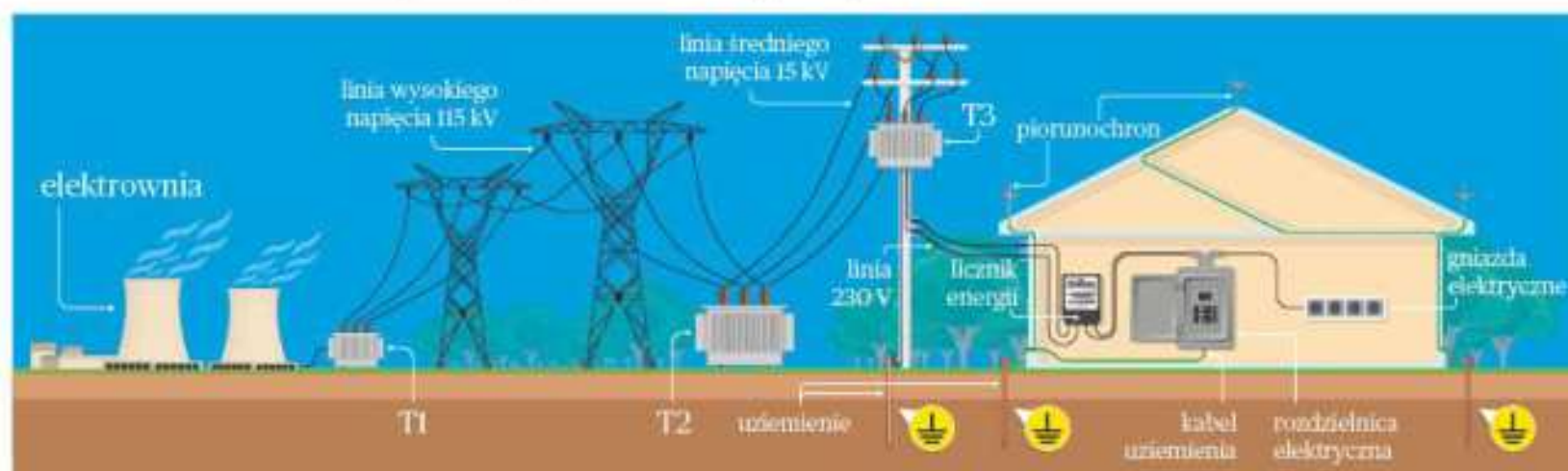
Dostarczanie energii elektrycznej do domu

przesyłanie energii elektrycznej

Omówione powyżej właściwości transformatora sprawiają, że znakomicie ułatwiają **przesyłanie energii elektrycznej** na duże odległości. Typowy turbogenerator w elektrowni pracuje pod napięciem od kilku tysięcy woltów do ponad 20 000 V i wytwarza prąd elektryczny o natężeniu od kilku tysięcy amperów do kilkunastu tysięcy amperów. Prąd o tak wielkim natężeniu nie może płynąć zwykłymi przewodami – uległyby one spaleni. Dlatego wyprowadza się go z budynku elektrowni za pomocą grubych szyn. Wzór na pracę prądu elektrycznego, $W = I^2 R t$, w odniesieniu do przewodów przesyłowych oznacza ciepło wydzielone na tych przewodach, czyli straty energii. Można je ograniczyć na dwa sposoby:

1. obniżając opór elektryczny linii przesyłowej; w tym celu należałoby użyć przewodów bardzo grubych i wykonanych z najlepszych przewodników prądu, takich jak miedź lub srebro, a więc bardzo drogich;
2. obniżając natężenie prądu – ponieważ występuje ono we wzorze w drugiej potęgze, oszczędności będą znaczące.

Aby obniżyć natężenie prądu bez zmiany jego mocy, należy zastosować transformator, który jednocześnie zwiększy napięcie. Efektywne przesyłanie energii elektrycznej polega na tym, by na dużych dystansach stosować jak największe napięcia, a dopiero w pobliżu odbiorcy je odpowiednio obniżyć.



Rys. 33. Droga energii elektrycznej od elektrowni do domu. T1 – transformator podnoszący napięcie do wysokiego (ponad 100 kV), T2 – transformator obniżający napięcie do wartości średnich (3 – 60 kV, przeważnie 15 kV), T3 – transformator obniżający napięcie do wartości niskich (w Europie 230 V).

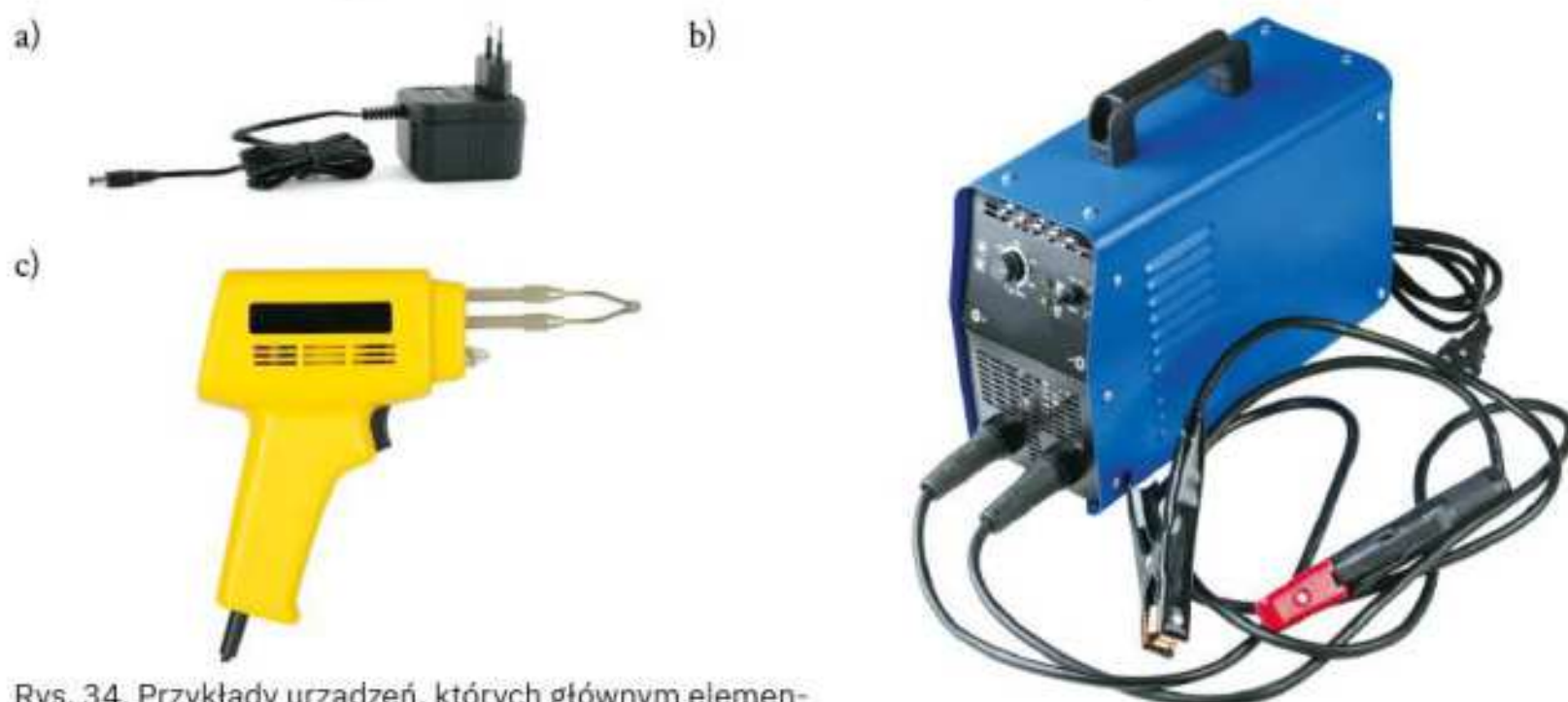


Na drodze między elektrownią a użytkownikiem energii elektrycznej występuje kilka transformatorów. Bezpośrednio w elektrowni znajduje się transformator podnoszący napięcie do kilkuset tysięcy woltów. Zazwyczaj jest to 115 kV, 230 kV lub 400 kV. Następnie energia jest przesyłana na duże odległości liniami wysokiego napięcia, które stanowią szkielet sieci energetycznej kraju. Tak wysokie napięcie wymaga zastosowania specjalnych wysokich słupów i specjalnych izolatorów. Jest oczywiście zabójcze i nieprzydatne dla indywidualnych użytkowników. Dlatego w pobliżu miast i dużych zakładów przemysłowych znajdują się stacje transformatorowe, z których wychodzą linie średniego napięcia (od 3 kV do 60 kV, najczęściej 15 kV). W terenach zurbanizowanych linie te mają postać kabli zakopanych w ziemi, natomiast na obszarach słabo zaludnionych są liniami napowietrznymi, rozpiętymi na charakterystycznych słupach żelbetonowych. Średnie napięcie jest odpowiednie dla dużych maszyn w fabrykach i do napędzania pociągów, natomiast na potrzeby indywidualnych użytkowników napięcie jest po raz kolejny obniżane do wartości 230 V w transformatorach znajdujących się na poszczególnych osiedlach lub w pobliżu wsi. Znajdują się one przeważnie w małych, specjalnie oznakowanych budynkach lub na słupach kończących linie średniego napięcia. Stamtąd, kablami zakopanymi w ziemi lub przewodami napowietrznymi energia elektryczna dociera do poszczególnych odbiorców.

Urządzenia oparte na transformatorze

Transformatory przydają się wszędzie tam, gdzie napięcie 230 V jest nieodpowiednie dla danego urządzenia. Tak jest w przypadku telefonów, komputerów, kamer i wielu innych urządzeń elektronicznych. Urządzenia te wymagają znacznie niższych napięć oraz często prądu stałego. Wszelkiego rodzaju **zasilacze** i **ładowarki** są w istocie transformatorami z wbudowanym prostownikiem w uzwojeniu wtórnym. Transformatory znajdują się też w zasilaczach laboratoryjnych wykorzystywanych podczas doświadczeń z fizyki oraz w ładowarkach akumulatorów samochodowych.

urządzenia
wykorzystujące
transformator



Rys. 34. Przykłady urządzeń, których głównym elementem jest transformator: a) zasilacz (ładowarka), b) spawarka elektryczna, c) lutownica transformatorowa.



Przykładem urządzenia, którego zasadniczy element to transformator, jest **spawarka elektryczna**. Uzwojenie wtórne spawarki ma mało zwojów, więc indukuje się tam prąd o niewielkim napięciu i dużym natężeniu. Jeden zacisk uzwojenia wtórnego podłączamy gdzieś z boku do spawanego przedmiotu, a drugi – do elektrody, którą zbliżamy do miejsca, które chcemy spawać. Między elektrodą a spawem powstaje łuk elektryczny o temperaturze kilku tysięcy stopni, zdolnej stopić żelazo i inne metale.

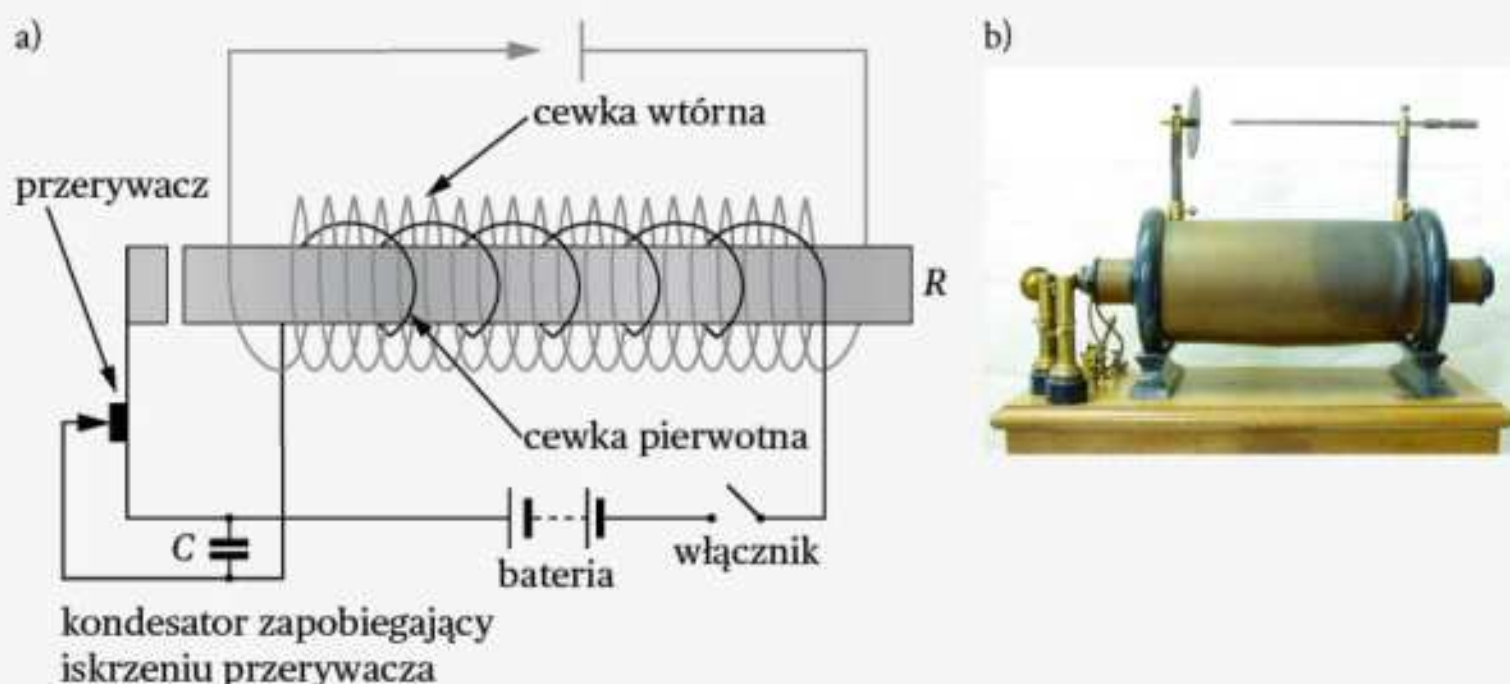
Innym przykładem transformatora jest **lutownica**. To urządzenie przeważnie małej mocy (kilkadziesiąt watów), służące na przykład do łączenia ze sobą elementów elektronicznych za pomocą łatwo topliwych metali (cyny i jej stopów). Istnieją też lutownice większej mocy, stosowane na przykład do łączenia ze sobą blach. Uzwojenie wtórne lutownicy ma bardzo mało zwojów (przeważnie dwa) i jest wyprowadzone na zewnątrz za pomocą grubego kształtownika miedzianego. Na końcu znajduje się grot o dużym oporze elektrycznym. Gdy włączymy lutownicę, przez uzwojenie wtórne płynie prąd o bardzo dużym natężeniu. Energia wydzielą się głównie na elemencie o największym oporze, czyli grocie. Grot rozgrzewa się do temperatury wyższej niż temperatura topnienia stopu lutowniczego i umożliwia spajanie elementów.



Chcesz wiedzieć więcej?

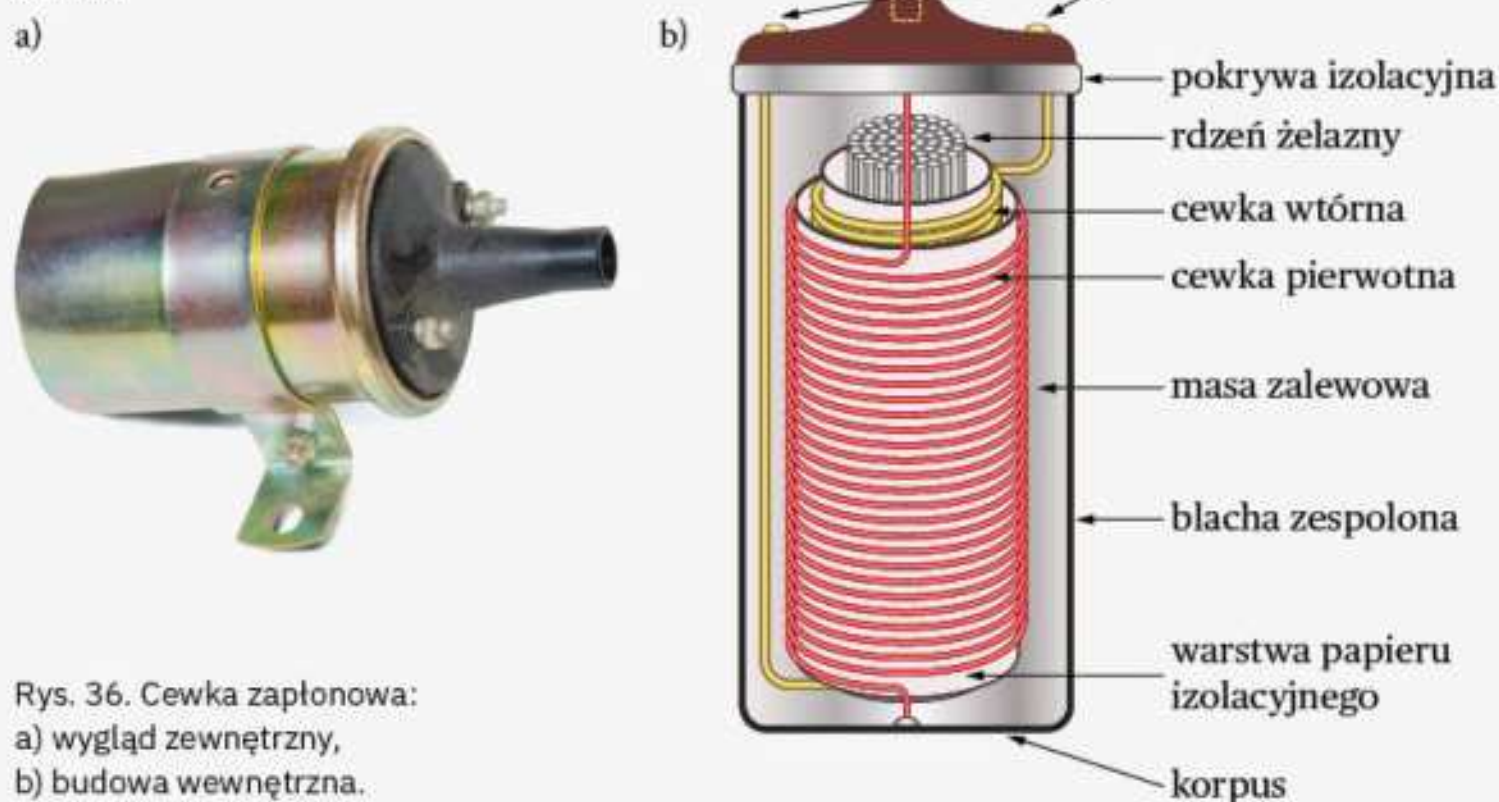
Zjawisko indukcji elektromagnetycznej można wykorzystać również do przekształcania niskonapięciowego prądu stałego w wysokonapięciowy prąd zmienny. Celowi temu służy na przykład induktor Ruhmkorffa wykorzystywany w pracowniach fizycznych do demonstracji wyładowań elektrycznych w gazach oraz cewka zapłonowa służąca do wytwarzania iskry w silniku benzynowym.

Głównym elementem **induktora Ruhmkorffa** jest transformator, którego uzwojenie pierwotne ma niewielką liczbę zwojów, a wtórne – bardzo dużą. Obie cewki nawinięte są na wspólnym rdzeniu żelaznym w kształcie pręta, którego koniec jest wykorzystywany jako elektromagnes do przyciągania kotwy przerywacza obwodu prądu stałego zasilającego uzwojenie pierwotne pod napięciem kilku woltów. W wyniku przerywania obwodu zanika pole magnetyczne odchylające przerywacz, który powraca do pierwotnej pozycji, ponownie zamykając obwód. Po zamknięciu obwodu pierwotnego prąd zaczyna znowu płynąć i pojawia się pole magnetyczne ponownie przerywające obwód. W uzwojeniu wtórnym wzbudza się prąd indukcyjny o napięciu proporcjonalnym do szybkości zmian pola magnetycznego. Zmiany te są szybsze podczas przerywania obwodu niż podczas jego łączenia, dlatego w uzwojeniu wtórnym pojawiają się krótkie jednokierunkowe impulsy wysokiego napięcia, osiągające wartość kilkudziesięciu tysięcy woltów i zachodzące z częstotliwością od kilkunastu do kilkuset herców. Dzięki takiemu mechanizmowi na wyjściu otrzymujemy prąd impulsowy o napięciu kilka tysięcy razy większym niż wynosi napięcie stałe na wejściu. Za pomocą induktora można demonstrować efektowne iskry w powietrzu i łuki elektryczne w gazach pod zmniejszonym ciśnieniem.



Rys. 35. Induktor Ruhmkorffa: a) schemat budowy, b) wygląd zewnętrzny.

Urządzeniem, które dzięki niskonapięciowemu zasilaniu prądem stałym z akumulatora jest zdolne wytwarzać impulsy wysokiego napięcia konieczne do wywołania iskry zapalającej mieszankę w silniku benzynowym jest **cewka zapłonowa**. Ma ona postać transformatora, którego uzwojenie pierwotne zawiera kilkadziesiąt zwojów, a uzwojenie wtórne kilka tysięcy zwojów. Obwód uzwojenia pierwotnego jest w odpowiednich momentach pracy silnika cyklicznie przerywany przez odpowiedni układ. Przerwanie obwodu pierwotnego powoduje gwałtowny zanik pola magnetycznego w rdzeniu, co wywołuje skok napięcia na uzwojeniu wtórnym, dającego iskry na świecy zapłonowej. Skoki napięcia o przeciwnym znaku pojawiają się również w chwilach łączenia obwodu pierwotnego, ale są znacznie słabsze i filtruje się je za pomocą prostownika w postaci diody, aby nie zakłócały pracy silnika.



Rys. 36. Cewka zapłonowa: a) wygląd zewnętrzny, b) budowa wewnętrzna.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Czy można używać transformatora do zmiany napięcia prądu stałego? Odpowiedź uzasadnij.
2. Uzwojenie pierwotne transformatora pracującego pod napięciem 230 V ma 1100 zwojów. Oblicz liczbę zwojów w uzwojeniu wtórnym, jeśli wiadomo, że transformator obniża napięcie do 10 V.
3. Szkolny demonstracyjny transformator rozbieralny ma wiele cewek, które można nakładać na rdzeń, dobierając różne przekładnie transformatora. Można zauważyć, że im mniej zwojów zawiera cewka, tym jest wykonana z grubszego drutu. Wyjaśnij przesłanki, jakimi kierowali się w tym zakresie projektanci tego transformatora.

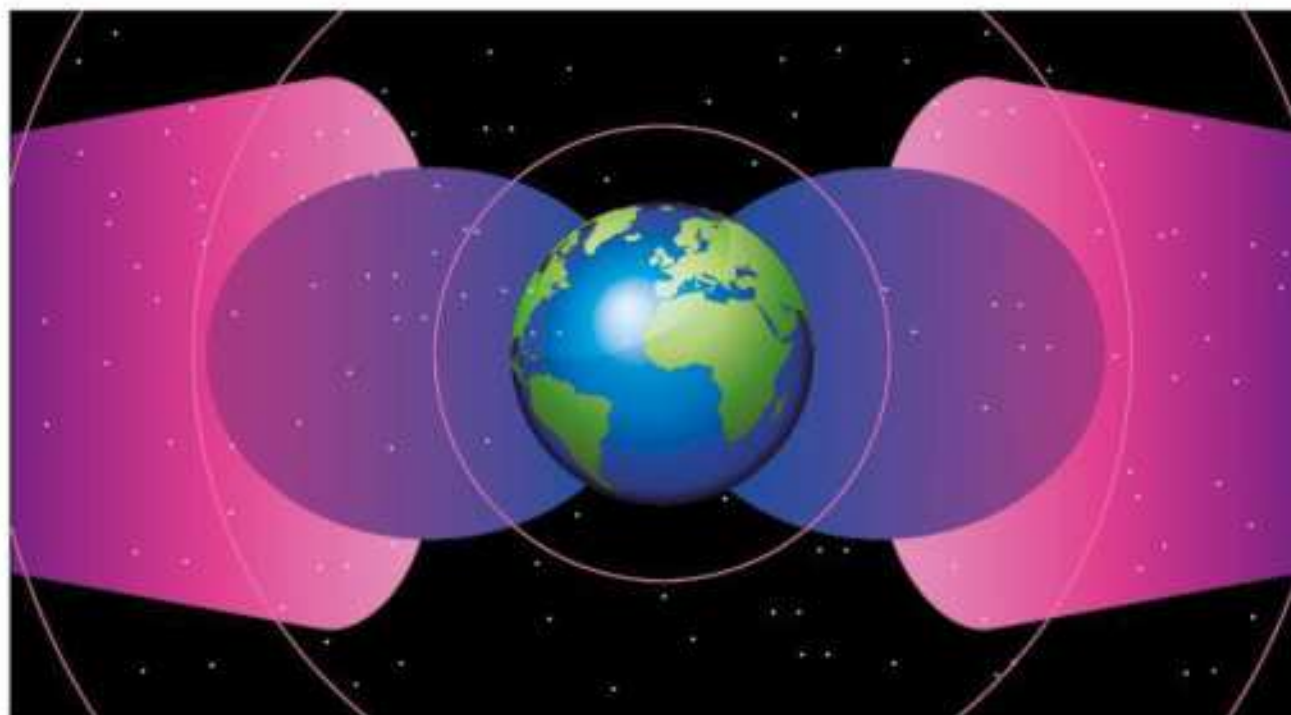
PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 100 • Transformator to układ dwóch cewek umieszczonych na wspólnym rdzeniu z ferromagnetyka. Służy do zmiany napięcia i natężenia prądu przemiennego.
- s. 101 • Napięcie na cewce transformatora jest proporcjonalne do liczby zwojów cewki, a natężenie prądu – odwrotnie proporcjonalne do liczby zwojów.
- s. 102 • Między elektrownią a użytkownikiem energii elektrycznej znajduje się kilka transformatorów, które zmieniają parametry przesyłanego prądu w celu obniżenia strat energii podczas przesyłania oraz dostosowują napięcie końcowe do standardu wymaganego przez urządzenia.
- s. 103 • Transformatory znalazły zastosowanie w wielu urządzeniach powszechnego użytku, a w szczególności w różnego rodzaju zasilaczach, ładowarkach, spawarkach elektrycznych i lutownicach.



Analiza tekstu: Nieświadomie stworzyliśmy tarczę chroniącą Ziemię

Sondy Van Allena wykryły ogromną, stworzoną przez człowieka barierę otaczającą Ziemię. Testy potwierdziły, że ma to wpływ na pogodę kosmiczną i stanowi swoistą tarczę przed wysokoenergetycznym promieniowaniem kosmicznym.



Dane z sond badających pasy radiacyjne Van Allena potwierdziły, że ludzie poza zmienianiem krajobrazu Ziemi, kształtują także jej bezpośrednie otoczenie. Różnica jest taka, że w przeciwieństwie do negatywnego wpływu naszej działalności na Ziemię, osłona, którą nieświadomie stworzyliśmy w przestrzeni kosmicznej, działa na naszą korzyść.

Pasy radiacyjne zwane też pasami Van Allena to obszar intensywnego promieniowania otaczający kulę ziemską. Schwymane w pułapkę ziemskiego pola magnetycznego wysokoenergetyczne cząstki tworzące pasy zostały odkryte w 1958 roku przez amerykańskiego astronoma Jamesa Van Allena. W 2012 roku NASA wystrzeliła dwie sondy, których zadaniem jest badanie pasów.

Ziemia otoczona jest dwoma takimi pasami. Rozciągają się one na odległość od 1000 do 64 000 kilometrów od powierzchni naszej planety. Zdarza się, że powstaje tymczasowy trzeci pas. Został on odkryty przez wspomniane sondy po dużej erupcji słonecznej. Jego istnienie trwało około miesiąca. Sztuczny pas radiacyjny może wywołać także wybuch jądrowy w atmosferze. Miało to miejsce w 1962 roku, kiedy USA zdetonowały na wysokości 400 kilometrów ładunek Starfish Prime.

Ostatnie dane przesłane przez próbniki NASA monitorujące aktywność naładowanych cząstek w polu magnetycznym Ziemi wykryły coś dziwnego. To wysokoenergetyczne promieniowanie było powstrzymywane przez swoistą tarczę. Badacze odkryli, że ta bariera odpycha pasy radiacyjne od naszej planety. Po dokładnym przy-



glądnięciu się danym zaobserwowano, że granica pasów jest znacznie dalej od Ziemi niż w latach 60.

Okazało się, że swoistą bańkę otaczającą naszą planetę tworzą tzw. bardzo długie fale radiowe (*very low frequency* – VLF). Oddziałują one z wysokoenergetycznymi cząsteczkami w przestrzeni kosmicznej, wpływając na ich ruch. Ten typ komunikacji stał się teraz znacznie częstszy niż w latach sześćdziesiątych, a zespół NASA potwierdził, że fale VLF mogą wpływać na właściwości wysokoenergetycznego promieniowania w przestrzeni kosmicznej.

Szereg eksperymentów i obserwacji wykazał, że w odpowiednich warunkach sygnały radiowe w zakresie częstotliwości VLF mogą w rzeczywistości wpłynąć na właściwości środowiska cząstek o wysokiej energii wokół Ziemi – powiedział Phil Ericsson z Obserwatorium Haystack w Westford, Massachusetts.

Większość z nas nie ma wiele wspólnego z sygnałami VLF w naszym codziennym życiu, ale są one podstawą wielu operacji inżynierskich, naukowych i wojskowych. Fale VLF o częstotliwości 3–30 kHz mogą przenikać przez wodę morską, dlatego są wykorzystywane m.in. w komunikacji z okrętami podwodnymi. Przy niskim zasoleniu mogą dotrzeć nawet na głębokość 40 metrów. Są wykorzystywane także w systemach nawigacji dalekiego zasięgu oraz podczas różnych elektromagnetycznych badań geofizycznych. Ale sięgają też poza atmosferę, tworząc tarczę ochronną przed kosmicznym promieniowaniem.

Dane z sond badających pasy Van Allena wykazały, że zewnętrzna krawędź bariery ochronnej tworzonej przez VLF niemal graniczy z wewnętrzną krawędzią pasów radiacyjnych. Nieświadomie stworzona przez nas bariera zwyczajnie odpycha pasy radiacyjne od Ziemi.

Źródło: Dziennik Naukowy, 18 maja 2017 r., <https://bezpiecznylink.pl/n7340b>

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij własnymi słowami, co to są pasy Van Allena i jaki jest ich związek z ziemskim polem magnetycznym.
2. Wyjaśnij własnymi słowami, co to są fale VLF i jakie mają zastosowania.
3. Wymień czynniki, które mają wpływ na ilość i rozmiary pasów Van Allena.
4. Wytłumacz, co mogłoby się stać z Ziemią i ludzkością, gdyby pasy Van Allena z jakichś powodów zanikły.



PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

1. Magnetyzm jest znany już od starożytności. Początkowo wiązano go jedynie z właściwościami niektórych substancji. s. 68
2. Każdy magnes ma dwa niedające się rozdzielić bieguny, zwane północnym i południowym. Bieguny jednoimienne się odpychają, a różnoimienne się przyciągają. s. 68
3. Pierwotnym źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny, co odkrył Ørsted w 1820 roku. Obecnie wiemy, że magnetyzm materii ma źródło w ruchu elektronów wewnątrz atomów. s. 69
4. Ziemię otacza magnetosfera – pole magnetyczne wytwarzane w płynnym jądrze naszej planety. s. 70
5. Pole magnetyczne można zobrazować graficznie za pomocą linii tego pola. Są to krzywe, wzdłuż których układają się opilki żelaza lub mające swobodę ruchu igły magnetyczne. s. 72
6. Linie pola magnetycznego są zawsze krzywymi zamkniętymi, co jest równoważne stwierdzeniu, że nie istnieją ładunki magnetyczne (odosobnione bieguny). s. 73
7. Linie pola magnetycznego wokół prostoliniowego przewodnika z prądem leżą w płaszczyźnie prostopadłej do przewodnika i mają postać współśrodkowych okręgów. Ich zwrot określa reguła prawej dłoni. s. 75
8. Zwojnica wytwarza w swoim wnętrzu jednorodne pole magnetyczne – jego linie są do siebie równoległe. s. 75
9. Na przewodnik z prądem, umieszczony w polu magnetycznym, działa siła elektrodynamiczna. Jest ona prostopadła do przewodnika i do linii pola magnetycznego, a jej wartość zależy od siły oddziaływania pola magnetycznego, natężenia prądu i od kąta między przewodnikiem a liniami pola. Jej zwrot określa reguła lewej dłoni. s. 79
10. Przewodniki z prądem oddziałują na siebie magnetycznie. Jeśli w dwóch równoległych przewodnikach prądy płyną w tę samą stronę, to przewodniki się przyciągają, a jeśli w strony przeciwne, to się odpychają. s. 81
11. Na ciała obdarzone ładunkiem elektrycznym, poruszające się w polu magnetycznym nierównoległe do jego linii, działa siła magnetyczna o kierunku prostopadłym zarówno do kierunku ruchu ciała, jak i do linii pola. Powoduje ona zakrzywienie toru ich ruchu. s. 85
12. Najogólniejsza definicja pola magnetycznego mówi, że jest to obszar, w którym na poruszające się ładunki działają siły. Źródłem pola magnetycznego są również poruszające się ładunki elektryczne. s. 85
13. Ziemskie pole magnetyczne chroni nas przed wysokoenergetycznym promieniowaniem docierającym z Kosmosu. Jony uwięzione przez to pole docierają do górnych warstw atmosfery w okolicach biegunów magnetycznych, gdzie wywołują zjawisko zorzy polarnej. s. 86
14. Indukcja elektromagnetyczna to zjawisko wzbudzania się prądu elektrycznego w obwodzie pod wpływem zmian pola magnetycznego przenikającego ten obwód. Wzbudzony w ten sposób prąd elektryczny nazywamy prądem indukcyjnym. s. 92
15. Zmiany pola magnetycznego przenikającego przez obwód mogą wynikać ze względnego ruchu magnesu i obwodu, względnego ruchu obwodów lub zmian natężenia prądu w sąsiadującym obwodzie. s. 92



- s. 94 16. Wzbudzenie prądu indukcyjnego wymaga dostarczenia energii w formie np. pracy przeciwko siłom pola magnetycznego.
- s. 96 17. Prądnica to urządzenie służące do zamiany energii mechanicznej w energię elektryczną. Prądnica jest odwróceniem silnika elektrycznego, a prąd indukcyjny powstaje w niej na skutek zmian pola magnetycznego przenikającego przez ramkę lub zwojnicę (układ ramek) podczas jej obrotu.
- s. 97 18. Prądnice mogą mieć różne wielkości i zastosowania: od małych dynam rowerowych, poprzez alternatory ładujące akumulatory samochodów, do turbogeneratorów w elektrowniach.
- s. 98 19. Prąd elektryczny wytwarzany w prądnicach jest prądem przemiennym. Płynie raz w jedną, raz w drugą stronę, a jego napięcie zmienia się sinusoidalnie. Uśrednioną wartość napięcia nazywamy napięciem skutecznym.
- s. 98 20. Każdy prąd przemienny charakteryzuje amplituda napięcia i natężenia oraz okres i częstotliwość.
- s. 98 21. W domowych sieciach elektrycznych częstotliwość prądu wynosi 50 Hz, a napięcie skuteczne 230 V.
- s. 100 22. Transformator to układ dwóch cewek umieszczonych na wspólnym rdzeniu z ferromagnetyka. Służy do zmiany napięcia i natężenia prądu przemiennego.
- s. 101 23. Napięcie na cewce transformatora jest proporcjonalne do liczby zwojów cewki, a natężenie prądu – odwrotnie proporcjonalne do liczby zwojów.
- s. 102 24. Między elektrownią a użytkownikiem energii elektrycznej znajduje się kilka transformatorów, których celem jest obniżenie strat podczas przesyłania energii oraz dostosowanie napięcia końcowego do wymagań użytkownika.
- s. 103 25. Transformatory znalazły zastosowanie w wielu urządzeniach powszechnego użytku, a w szczególności w różnego rodzaju zasilaczach, ładowarkach, spawarkach elektrycznych i lutownicach.



Dział 3. dotyczy ruchu falowego. Jest to zjawisko niezwykle powszechne w przyrodzie. Mamy z nim do czynienia wszędzie tam, gdzie drgania, omawiane w klasie drugiej, mogą się rozchodzić w otaczającej przestrzeni dzięki właściwościom sprężystym ośrodka.

Naukę o falach rozpoczniemy od analizy fal mechanicznych, czyli takich, które rozchodzą się w ośrodkach materialnych. Zaliczamy do nich między innymi fale na wodzie oraz fale dźwiękowe. Poznasz podstawową zasadę wyjaśniającą sposób rozchodzenia się fal oraz najważniejsze wielkości fizyczne opisujące ruch falowy. Dowiesz się, jak dzielimy fale ze względu na różne kryteria. Poznasz też podstawowe zjawiska, jakim podlegają fale.

Bardzo ważnym rodzajem fal są fale elektromagnetyczne, które w przeciwieństwie do fal mechanicznych nie potrzebują ośrodka materialnego, aby mogły się rozchodzić i najlepszym ośrodkiem jest dla nich próżnia. W zależności od długości, wyróżniamy różne rodzaje fal elektromagnetycznych: radiowe, mikrofae, podczerwień, światło widzialne, nadfiolet, promienie rentgenowskie i gamma. My skupimy się na falach świetlnych, będących przedmiotem badań optyki. Podstawowe zagadnienia z zakresu optyki znasz ze szkoły podstawowej, a dzięki wiadomościom przedstawionym w tym dziale powtórzysz je i poszerzysz.

3. Fale i optyka

- ▶ Fale mechaniczne
- ▶ Rozchodzenie się fal. Dyfrakcja
- ▶ Interferencja fal
- ▶ **Zjawisko Dopplera**
- ▶ Całkowite wewnętrzne odbicie
- ▶ Polaryzacja światła
- ▶ Rozszczepienie światła
- ▶ Zjawiska optyczne w przyrodzie
- ▶ Analiza tekstu: Zjawiska optyczne w przyrodzie





3.1. Fale mechaniczne

NA TEJ LEKCJI:

- przypomnisz sobie, czym jest fala i w jaki sposób się porusza;
- uzupełnisz swoje wiadomości o wielkościach fizycznych opisujących ruch falowy;
- poznasz klasyfikację fal na podstawie różnych kryteriów.

Podstawowe wiadomości o falach

Doświadczenie 1.

Pomoce: długa sprężyna do demonstracji fal poprzecznych lub sprężysta linka, na przykład gumowa o długości kilku metrów.

Sprężynę lub linkę rozciągnijcie na długość całej klasy. Jeden koniec sprężyny trzyma jedna osoba lub zamocujcie go nieruchomo. Z drugiego końca inna osoba wysyła impuls, wykonując pojedynczy szybki ruch ręką do góry i na dół.

Obserwacja: Impuls falowy w postaci pojedynczego wybrzuszenia porusza się wzdłuż sprężyny lub linki, odbija od drugiego końca, po czym wraca. Wychylenie jest teraz w drugą stronę.



Rys. 1. a) Impuls falowy wygenerowany przez ucznia przemieszcza się wzdłuż sprężyny lub linki. b) Po odbiciu od nieruchomego punktu mocowania sprężyny, impuls biegnie w przeciwną stronę.

Doświadczenie 2.

Pomoce: jak doświadczeniu 1.

Linka lub sprężyna rozciągnięta jest na długość klasy. Jeden koniec jest zamocowany lub trzymany nieruchomo. Uczeń trzymający za drugi koniec sprężyny wykonuje dowolne, krótkie ruchy, na przykład dwa szybkie wychylenia w płaszczyźnie poziomej, szybki ruch po okręgu itd. Pozostali uczniowie obserwują zachowanie się sprężyny.

Obserwacja: Impuls falowy o kształcie nadanym przez ucznia rozchodzi się tam i z powrotem. Kolejne zwoje sprężyny naśladują ruchy wykonywane przez poprzednie zwoje, a wcześniej przez ucznia.

Doświadczenie 3.

Pomoce: długa sprężyna do demonstracji drgań podłużnych. Można też wykorzystać sprężynę do drgań poprzecznych z poprzednich doświadczeń.



Sprężynę rozciągnijcie, a jeden jej koniec zamocujcie lub trzymajcie nieruchomo. Na drugim końcu uczeń przyciąga drugą ręką do siebie fragment sprężyny, powodując, że pewna ilość jej zwojów pozostaje ściśnięta. Następnie uwalnia ściśnięty fragment. Obserwacja: Zagęszczenie zwojów sprężyny biegnie tam i z powrotem. Jak widać, impuls falowy nie musi być prostopadły do sprężyny, drgania mogą się odbywać również wzdłuż sprężyny.

W powyższych doświadczeniach obserwowaliśmy rozchodzenie się impulsów falowych. Powstawały one poprzez zaburzenie ośrodka, w tym przypadku sprężyny lub linki. **Zaburzenie ośrodka** to wytrącenie pewnego jego obszaru z położenia równowagi. Na skutek oddziaływań sprężystych między poszczególnymi punktami ośrodka następowało przekazywanie tego zaburzenia do kolejnych obszarów. Wykonywały one drgania analogiczne do drgań obszarów wcześniej pobudzonych przez falę i analogiczne do ruchów źródła fali, w tym przypadku ręki ucznia. Zatem:

Fala mechaniczna – rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie równowagi ośrodka sprężystego.

fala mechaniczna

Zwróćmy uwagę, że poszczególne punkty ośrodka wykonywały drgania wokół położenia równowagi. Natomiast sprężyna, jako całość, się nie przemieszczała. Uczeń trzymający sprężynę na drugim końcu w momencie dotarcia do niego impulsu odczuwał szarpnięcie, co świadczy o tym, że fala przekazała mu energię.

Wraz z falą jest przekazywana energia, a nie cząstki materii. Te wykonują jedynie drgania wokół położenia równowagi.

fala to nośnik energii

Gdyby było inaczej, fale morskie poruszające się w kierunku lądu zatopilyby go. Tymczasem falująca woda pozostaje w zasadzie w tym samym miejscu, wykonując jedynie ruch drgający.

Uczniowie wykonujący doświadczenie mogliby się umówić, że na przykład pojedyncze drgnięcie w pionie oznacza wiadomość „tak”, podwójne w poziomie – „nie” a okrężne w prawo – „nie wiem” itd. W ten sposób za pomocą tylko drgań sprężyny mogliby przekazywać sobie informacje. Wynika z tego kolejna – niesamowicie ważna – właściwość fal:

Fala może być nośnikiem informacji.

fala to nośnik informacji

Wykorzystujemy ten fakt w każdej chwili swojego życia. Gdy ktoś do ciebie mówi, przekazuje ci informacje za pomocą fal dźwiękowych. To, że czytasz teraz ten tekst i odbierasz zawarte w nim informacje, zawdzięczasz falam świetlnym. Fale radiowe przekazują informacje do telewizorów, telefonów komórkowych i odbiorników radiowych. Fale świetlne i podczerwone, przesyłane w światłowodach, są nośnikiem informacji w sieciach komputerowych. Pilot do telewizora przekazuje mu informacje o wybranych przez nas funkcjach za pomocą fal podczerwonych. Przykładów takiego działania fal jest wiele.



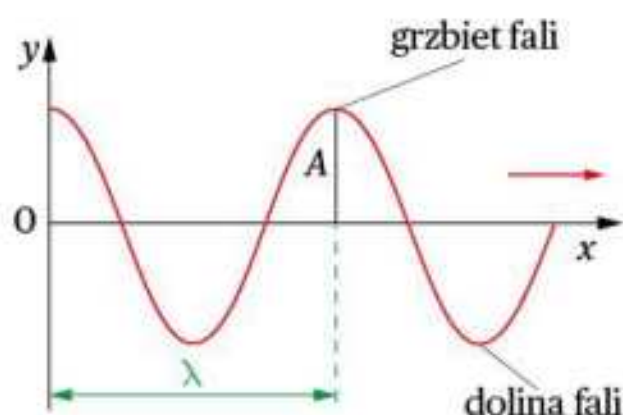
Pojęcia opisujące ruch falowy

Fale można opisywać za pomocą wielkości fizycznych poznanych w szkole podstawowej. Obecnie uzupełnimy wiadomości na ten temat. Rozważania ograniczymy do najczęstszego przypadku fal wytwarzanych przez źródło drgające swobodnie pod wpływem sił sprężystych. Fale takie mają kształt sinusoidalny.

Podstawowy parametr mówiący, jak „silna” lub „intensywna” jest fala, to amplituda fali.

amplituda fali

Amplituda fali – największe wychylenie cząsteczek drgającego ośrodka z położenia równowagi.



Rys. 2. Parametry fali: A – amplituda, λ – długość fali.

W przypadku fal, których kształt widzimy, na przykład fal na wodzie, amplitudę możemy wyrażać bezpośrednio w jednostkach długości, chociażby w metrach. W ogólności to pojęcie należy rozumieć szerzej. Fale dźwiękowe rozchodzą się jako zmiany ciśnienia lub gęstości ośrodka, na przykład powietrza. Bardziej odpowiednie będzie wtedy wyrażanie amplitudy w jednostkach ciśnienia, co z kolei ma związek z głośnością dźwięku. Jeszcze inaczej musimy podejść do fal elektromagnetycznych – w tym przypadku zaburzeniu ulegają pole elektryczne i magnetyczne. Amplituda fal świetlnych będzie skorelowana z jasnością światła.

Każda fala ma określoną długość, którą zwyczajowo oznaczamy grecką literą λ (lambda).

długość fali

Długość fali – odległość między dwoma najbliższymi punktami fali, które drgają jednakowo.

Będzie to więc odległość między dwoma najbliższymi grzbietami fali albo sąsiadującymi ze sobą dolinami, albo na przykład między najbliższymi środkami zbrocza opadającego fali. O punktach, które drgają jednakowo, czyli znajdują się w tej samej odległości od położenia równowagi i wykonują ruch w tę samą stronę, mówimy, że są w tej samej **fazie**. Faza odpowiada więc konkretnemu miejscu sinusoidy i powtarza się co jeden okres sinusoidy. Długość fali zawsze wyrażamy w jednostkach długości.

okres i częstotliwość fali

Kolejnymi wielkościami charakteryzującymi fale są **okres** (T) i **częstotliwość** (f). Są one równe okresowi i częstotliwości drgań źródła fali.

prędkość fali

Każda fala rozchodzi się w danym ośrodku z konkretną prędkością, zależną od właściwości sprężystych ośrodka i od jego gęstości. **Prędkość fali** nazywamy również fachowo **prędkością fazową**. Należy podkreślić, że prędkość fali zależy tylko od właściwości ośrodka. Fali o określonej częstotliwości nie da się przyspieszyć na przykład poprzez zwiększenie jej amplitudy lub wprowadzenie źródła fali w ruch. Prędkość fali związana jest z długością fali, okresem i częstotliwością następującymi zależnościami:

$$v = \frac{\lambda}{T}, \quad v = \lambda f$$



Po przekształceniu pierwszego wzoru otrzymujemy zależność:

$$\lambda = vT$$

Wyraża ona fakt, że długość fali jest odległością, jaką fala przemierza w czasie równym swojemu okresowi.

Do opisu zjawisk falowych przydatne będą także pojęcia powierzchni falowej, czoła fali oraz promienia fali.

Powierzchnia falowa – zbiór wszystkich przylegających do siebie punktów ośrodka, które drgają w tej samej fazie. Jest ona wyznaczona na przykład przez grzbiety lub doliny fal.

powierzchnia
falowa

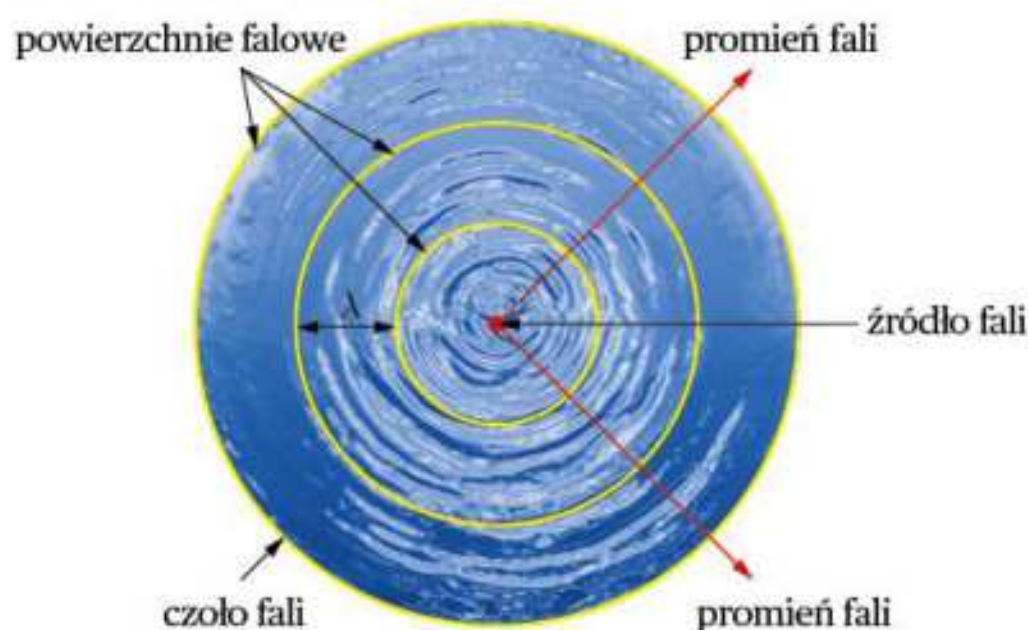
Najbardziej wysuniętą powierzchnię falową nazywamy czołem fali.

Czoło fali – zbiór punktów, do których fala dotarła w danym momencie.

czoło fali

Promień fali – kierunek, w którym rozchodzi się zaburzenie falowe. Promień fali jest zawsze prostopadły do czoła fali.

promień fali



Rys. 3. Czoło i promień fali oraz powierzchnie falowe.

Jeśli więc na przykład wrzucimy kamień do wody i za chwilę ją sfotografujemy, to czołem fali będzie okrąg ograniczający obszar zaburzony przez falę w momencie wykonania zdjęcia.

Podział fal

Fizyka zna wiele rodzajów fal. Można je podzielić ze względu na różne kryteria.

Ze względu na swoją **naturę**, fale dzieli się na:

- **mechaniczne** – rozchodzą się w sprężystych ośrodkach materialnych, wprawiając w drgania cząsteczki tego ośrodka; przykładami fal mechanicznych są fale dźwiękowe, fale sejsmiczne i fale na wodzie;

podział fal
ze względu
na ich naturę

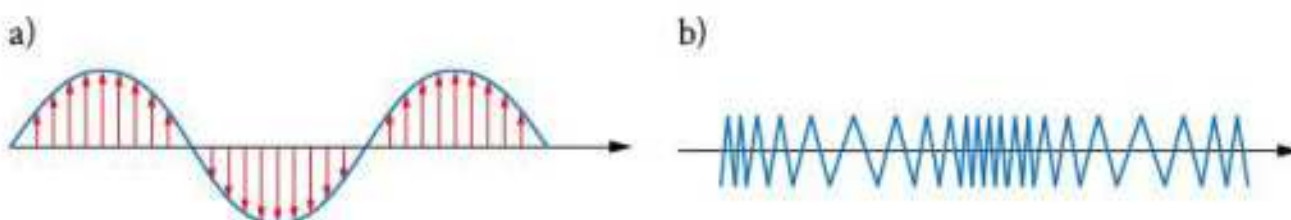


podział fal
ze względu
na kierunek
drgań cząsteczek
ośrodka

- **elektromagnetyczne** – czyli rozchodzące się zaburzenia pola elektrycznego i magnetycznego. Fale elektromagnetyczne najłatwiej rozchodzą się w próżni, natomiast obecność ośrodka materialnego w większym lub mniejszym stopniu utrudnia im przemieszczanie się. Do fal elektromagnetycznych zalicza się: fale radiowe, mikrofae, podczerwień, światło widzialne, nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie i gamma.

Ze względu na **kierunek drgań cząsteczek ośrodka** fale dzieli się na:

- **poprzeczne** – drgania cząsteczek ośrodka mają w nich kierunek prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali (czyli jej promienia). Zostały one pokazane w doświadczeniu 1 i 2. Falami poprzecznymi są na przykład fale na wodzie oraz wszystkie fale elektromagnetyczne;
- **podłużne** – drgania cząsteczek ośrodka odbywają się w nich wzdłuż promienia fali. Zostały one zademonstrowane w doświadczeniu 3. Najbardziej znanym przykładem fal podłużnych są fale dźwiękowe.



Rys. 4. Fala: a) poprzeczna, b) podłużna.

podział fal
ze względu
na wymiar
przestrzeni

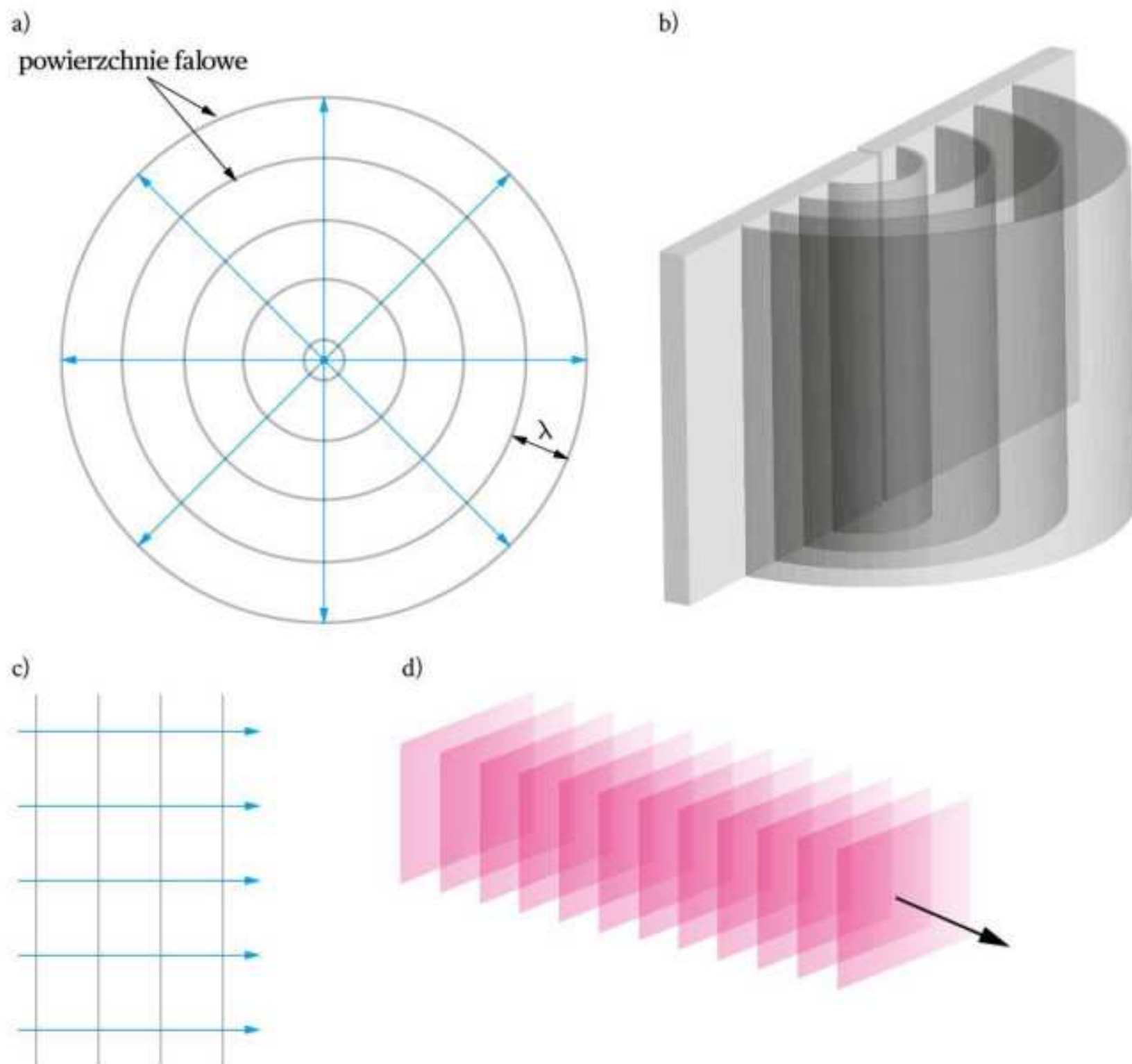
Ze względu na **wymiar dostępnej przestrzeni**, wyróżnia się fale:

- **liniowe** – rozchodzą się w przestrzeni jednowymiarowej, czyli linii prostej. Przykładem jest fala rozchodząca się w napiętej strunie albo prostoliniowy promień światła;
- **powierzchniowe** – rozchodzą się w przestrzeni dwuwymiarowej, na przykład fale na wodzie lub na sprężystej membranie głośnika;
- **przestrzenne** – rozchodzące się we wszystkie strony, na przykład światło z żarówki lub dźwięk rozchodzący się w powietrzu.

Ze względu na **kształt czoła fali** wyróżnia się między innymi fale:

- **koliste** – rozchodzą się na płaszczyźnie z jednakową prędkością we wszystkich kierunkach;
- **kuliste** – rozchodzą się w przestrzeni z jednakową prędkością we wszystkich kierunkach;
- **cyldryczne** – ich źródłem jest na przykład drgająca struna i rozchodzą się w przestrzeni trójwymiarowej;
- **płaskie** – ich źródło ma kształt linii prostej, a fala rozchodzi się na płaszczyźnie lub gdy źródłem jest drgająca płaszczyzna, a fala rozchodzi się w przestrzeni. Falę płaską możemy zobaczyć na przykład, zanurzając rytmicznie długą linijkę w wodzie nalanej do wanny. Każdą falę liniową możemy też formalnie potraktować jako płaską.

podział fal
ze względu
na kształt czoła fali



Rys. 5. Przykłady fal o różnych kształtach: a) kolista, b) cylindryczna, c) płaska dwuwymiarowa, d) płaska trójwymiarowa.

Chcesz wiedzieć więcej?

Fizyka zna jeszcze jeden rodzaj fal, a mianowicie fale materii. W latach dwudziestych XX wieku wykazano, że każde poruszające się ciało jest jednocześnie falą. Długości tych fal są odwrotnie proporcjonalne do masy ciał oraz ich prędkości i dla ciał makroskopowych, z jakimi mamy do czynienia na co dzień, są niezwykle małe i nieistotne. Przyjmują mierzalne wartości dopiero dla cząstek mikroświata, na przykład elektronów. Fale elektronowe wykorzystano praktycznie w mikroskopach elektronowych. Falowym opisem mikroświata zajmuje się dział fizyki zwany mechaniką kwantową.





ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz, jaką długość ma fala dźwiękowa o częstotliwości 440 Hz. Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.
2. Prędkość dźwięku w stali wynosi $5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Oblicz, jaką częstotliwość ma dźwięk o długości fali 80 cm rozchodzący się w szynie kolejowej.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 113 • Fala mechaniczna to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie równowagi ośrodka sprężystego.
- s. 113 • Fala jest nośnikiem energii i informacji. Wraz z falą nie przemieszcza się materia.
- s. 114 • Amplituda fali to największe wychylenie cząsteczek drgającego ośrodka z położenia równowagi.
- s. 114 • Długość fali to odległość między najbliższymi punktami fali o tej samej fazie.
- s. 114 • Okres i częstotliwość fali są równe okresowi i częstotliwości drgań źródła fali.
- s. 114 • Prędkość fali to stosunek długości fali do jej okresu.
- s. 115 • Powierzchnia falowa to zbiór punktów fali o tej samej fazie.
- s. 115 • Czoło fali to zbiór punktów, do których fala dotarła w danym momencie.
- s. 115 • Promień fali to prosta, wzdłuż której rozchodzi się fala.
- s. 115 • Ze względu na naturę fale dzieli się na mechaniczne i elektromagnetyczne.
- s. 116 • Ze względu na kierunek drgań cząsteczek fale dzieli się na podłużne i poprzeczne.
- s. 116 • Ze względu na wymiar przestrzeni fale dzieli się na liniowe, powierzchniowe i przestrzenne.
- s. 116 • Ze względu na kształt czoła fali wyróżnia się m.in. fale koliste, kuliste, cylindryczne i płaskie.



3.2. Rozchodzenie się fal. Dyfrakcja

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz podstawową zasadę rządzącą rozchodzeniem się fal;
- dowiesz się, na czym polega ugięcie fali;
- nauczysz się przewidywać zachowanie fali, która napotkała na przeszkodę.

Zasada Huygensa

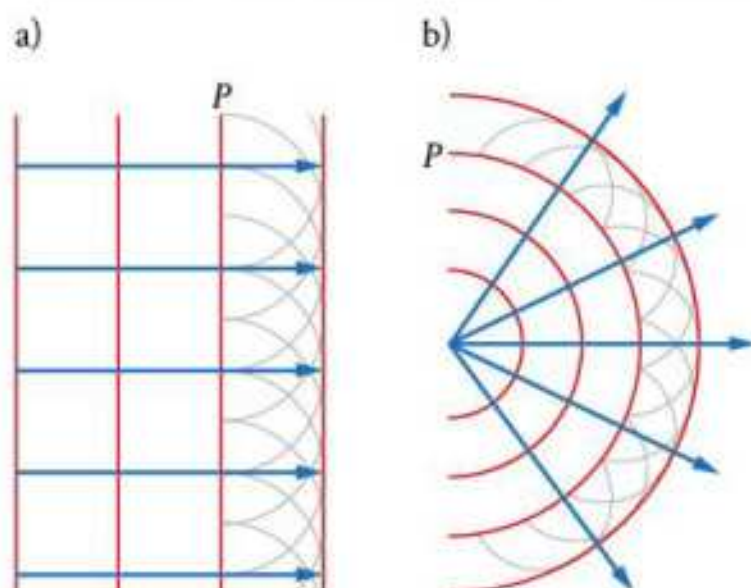
Uczeni od dawna próbowali dociec, jak rozchodzą się fale i dlaczego tak się dzieje. W 1678 roku holenderski uczony Christiaan Huygens (czytaj: kristian hojchens) sformułował prostą zasadę wyjaśniającą tę kwestię:

Każdy punkt ośrodka, do którego dotarło czoło fali, staje się źródłem nowej fali elementarnej.

zasada Huygensa

Pod pojęciem fali elementarnej na płaszczyźnie będziemy rozumieć falę kolistą, a w przestrzeni – falę kulistą.

Zasada Huygensa pozwala przewidywać kształt czoła fali w chwili późniejszej, gdy znany jest kształt tego czoła w chwili wcześniejszej. W tym celu rozważmy falę płaską, która dotarła do powierzchni P (rys 7a). Każdy punkt tej powierzchni staje się źródłem nowej fali elementarnej, w tym przypadku kolistej. Jeśli chcemy więc zbadać, gdzie dotrze fala po upływie kolejnego okresu, musimy wokół punktów powierzchni P zakreślić półokręgi o promieniu równym długości fali i skierowane w stronę, w którą porusza się fala. Obwiednia tych półokręgów wyznacza nowe czoło rozchodzącej się fali. Analogicznie postępujemy z falą kolistą (rys. 7b) oraz z każdą inną.



Rys. 7. Konstrukcja czoła fali: a) płaskiej, b) kolistej na podstawie zasady Huygensa.



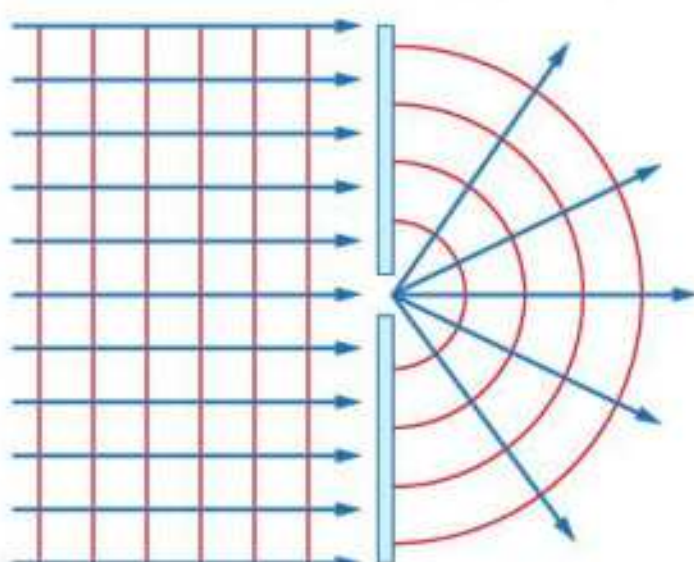
Rys. 6. Christiaan Huygens (1629–1695) – holenderski matematyk, fizyk oraz astronom. Rozwijał rachunek różniczkowy i całkowy oraz był prekursorem teorii prawdopodobieństwa. Sformułował zasadę, zgodnie z którą rozchodzą się fale, udoskonalił mikroskop i lunetę. Konstruował precyzyjne zegary wykorzystujące izochronizm drgań. Badał pierścienie Saturna i odkrył jego największy księżyc – Tytan. Jako pierwszy na świecie próbował oszacować odległości do gwiazd oraz wysunął ideę życia pozaziemskiego.



Dyfrakcja (ugięcie) fal

Zastosowanie zasady Huygensa do fali rozchodzącej się w ośrodku jednorodnym jest mało odkrywcze. Fale nie zmieniają swojego kształtu ani kierunku. Fala płaska w chwili późniejszej okazuje się znowu płaska, a kolista – pozostaje kolista. Sytuacja staje się ciekawsza, gdy na drodze fal zaczynamy stawiać przeszkody.

Zbadajmy zatem, co się stanie, gdy na drodze biegnącej fali płaskiej ustawimy prostopadle do promieni fali ścianę z małym otworem. Ośrodek w otworze, pobudzony do drgań przez falę, stanie się źródłem nowej fali elementarnej, która rozprzestrzeni się we wszystkie strony z drugiej strony ściany. Przed przeszkodą fala była płaska. Po



przejściu przez przeszkodę fala stała się kolista (jeśli rys. 8 zinterpretujemy jako obraz fali na wodzie), kulista (jeśli otwór jest punktowy, a fala rozchodzi się w całej przestrzeni) lub cylindryczna (jeśli przyjmujemy, że fala rozchodzi się w przestrzeni, a otwór ma postać szczeliny prostopadłej do kartki). Zmienił się kształt czoła fali i kierunek jej promieni. Fala uległa ugięciu (dyfrakcji).

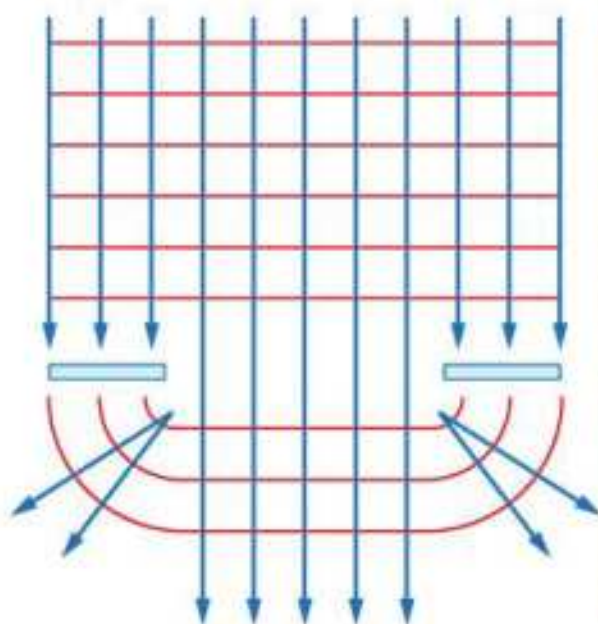
Rys. 8. Ugięcie fali na szczelinie.

ugięcie fali
(dyfrakcja)

Ugięcie (dyfrakcja) – zmiana kształtu czoła fali po przejściu przez przeszkodę.

Dyfrakcję fali na szerokiej szczelinie przedstawiono na rysunku 9. Widać na nim, że ugięciu ulegają jedynie promienie bezpośrednio przylegające do krawędzi przeszkody, a pozostałe biegną dalej na wprost. Im szersza szczelina w stosunku do długości fali, tym mniejszy udział fali ugiętej w stosunku do części fali, która nie uległa ugięciu. Można więc postawić tezę, że dyfrakcja zachodzi w sposób wyraźny, gdy rozmiary przeszkód i szczelin, na które napotyka fala, są porównywalne z długością fali.

cecha dyfrakcji



Rys. 9. Ugięcie fali na szerokiej szczelinie.



O istnieniu dyfrakcji łatwo się przekonać, rozmawiając przez uchylone drzwi z osobą znajdującą się za ścianą. Mimo braku kontaktu wzrokowego jej głos dociera do naszych uszu. Długości fal dźwiękowych są porównywalne z rozmiarami drzwi. Gdy dźwięk rozchodzący się w pomieszczeniu rozmówcy dotrze do drzwi, zgodnie z zasadą Huygensa rozprzestrzeni się we wszystkich kierunkach z drugiej strony ściany. Dlatego rozmowa z osobą zasłoniętą przez przeszkodę jest możliwa.

Rozchodzenie się fal na wodzie oraz ich uginanie na przeszkodach można prześledzić wykonując poniższe doświadczenie.

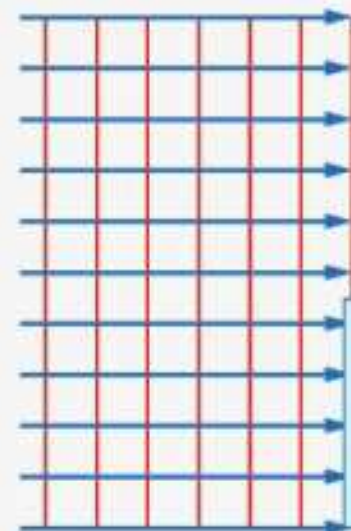
Doświadczenie

Pomoce: duża prostokątna kuweta, miska lub dowolne inne prostokątne naczynie o płaskim dnie, linijka lub listewka o długości nieco mniejszej od krótszego boku naczynia, dowolne przedmioty, z których można zbudować przeszkody dla fal, w tym szczelinę.

Nalej do naczynia niewielką ilość wody. Za pomocą zgromadzonych przedmiotów ustawiaj na dnie przeszkody o różnym kształcie. Posługując się linijką, wzbudź przy jednym z krótszych boków kuwety falę płaską i obserwuj efekty. Postaraj się zbadać wszystkie przypadki omówione na dzisiejszej lekcji.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego przez uchylone drzwi można usłyszeć osobę znajdującą się za ścianą, natomiast nie można jej zobaczyć.
2. Przerysuj do zeszytu rysunek 10 przedstawiający grzbiety i promienie fali, która w pewnym momencie dotarła do przeszkody. Zgodnie z zasadą Huygensa skonstruuj czoło tej fali po czasie równym jednemu i dwóm okresom po chwili dotarcia fali do przeszkody.
3. Wykonaj w domu opisane na tej lekcji doświadczenie i przygotuj dokumentację zdjęciową z jego przebiegu.



Rys. 10. Ilustracja do zadania 2.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Rozchodzeniem się fal rządzi zasada Huygensa, która mówi, że każda cząstka ośrodka pobudzona do drgań przez falę staje się źródłem nowej fali elementarnej. s. 119
- Ugięcie (inaczej dyfrakcja) to zmiana kształtu czoła fali po przejściu przez przeszkodę. s. 120
- Ugięcie jest najbardziej widoczne, gdy rozmiary przeszkód, na jakie napotyka fala, są rzędu długości tej fali. s. 120



3.3. Interferencja fal

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, co to jest interferencja;
- poznasz zasadę superpozycji;
- przeanalizujesz warunki wzmocnienia i wygaszenia fal;
- zrozumiesz, co ma wspólnego interferencja z zasadą działania instrumentów muzycznych.

Pojęcie interferencji

Doświadczenie 1.

Pomoce: kuweta drgań lub dowolne płaskie duże naczynie z małą ilością wody. Jeśli szkoła dysponuje profesjonalną falownicą wodną lub kuwetą drgań, uruchom ją w taki sposób, by źródłami fal były dwa punkty znajdujące się w pewnej odległości od siebie. Jeśli dysponujesz tylko płaskim naczyniem z wodą, maczaj rytmicznie w wodzie dwa palce. Obserwuj zachowanie się wody.

Obserwacja: Fale generowane przez oba źródła nakładają się na siebie, tworząc obraz podobny do przedstawionego na rysunku 11.



Rys. 11. Nakładanie się na siebie dwóch fal kolistych.

W powyższym doświadczeniu zaobserwowaliśmy zjawisko zwane interferencją.

interferencja fal

Interferencja – zjawisko nakładania się na siebie fal.

Jeśli fale mają różne częstotliwości lub ich źródła poruszają się względem siebie, obraz interferencyjny zmienia się w sposób dynamiczny. Jeśli obie fale są **spójne**, czyli mają tę samą częstotliwość i w każdym punkcie występuje taka sama różnica faz, obraz interferencyjny jest statyczny – oznacza to, że obserwujemy nieruchome obszary, w których fale się wzajemnie wygaszają, oraz takie miejsca, gdzie amplituda drgań nałożonych na siebie fal jest szczególnie duża.

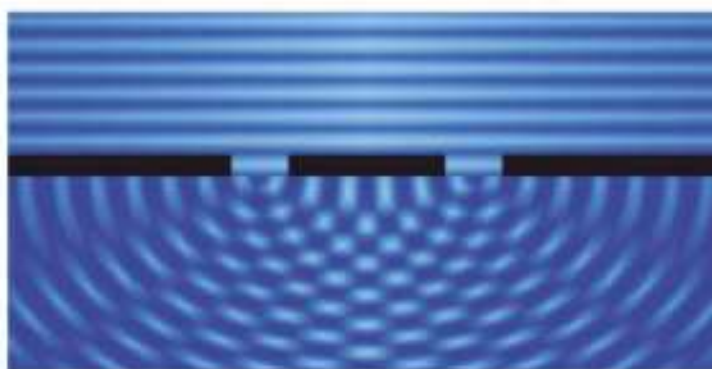


Doświadczenie 2.

Pomoce: kuweta drgań lub dowolne płaskie duże naczynie z małą ilością wody. Przeszkoda w kształcie ściany z dwiema szczelinami. Liniowe źródło fal, czyli takie, które wytwarza falę płaską.

Ustaw ścianę ze szczelinami tak, by rozgraniczała obszar dostępny falom. Z jednej strony wzbudź falę płaską za pomocą źródła równoległego do ściany. Obserwuj obraz interferencyjny po jej drugiej stronie.

Obserwacja: W obrazie interferencyjnym widać nieruchome smugi, w których woda nie drga. Między nimi widać falowanie wody. Amplituda drgań jest największa mniej więcej w połowie odległości między obszarami „ciszy” (rys. 12).



Rys. 12. Interferencja dwóch fal spójnych emitowanych przez szczeliny.

Grzbiety fali płaskiej wytwarzane na górze rysunku były równoległe do ściany ze szczelinami. Fala docierała więc jednocześnie do obydwu szczelin i zgodnie z zasadą Huygensa wytwarzała w nich fale koliste, widoczne na dole rysunku. Częstotliwość obu tych fal jest jednakowa i równa częstotliwości fali płaskiej. Różnica faz między obydwo ma źródłami jest równa zero, gdyż fala płaska dociera tam równocześnie. Obserwujemy więc obraz interferencyjny dwóch fal spójnych generowanych przez źródła punktowe.

Warunki wzmocnienia i wygaszenia

Aby zrozumieć wynik doświadczenia 2, musimy uświadomić sobie, że ruch falowy, podobnie jak każdy inny, podlega tak zwanej **zasadzie superpozycji**:

Jeżeli w ośrodku rozchodzi się jednocześnie kilka fal wysyłanych przez różne źródła, to cząstki ośrodka wykonują ruch będący wypadkową ruchów, jakie wykonywałyby pod wpływem każdej z tych fal z osobna.

zasada superpozycji

Jeśli więc do konkretnego miejsca na powierzchni wody docierają dwie fale, to znajdujące się tam cząsteczki wody wykonują drgania o amplitudzie wynikającej z amplitud każdej z tych fal z osobna i z różnicy ich faz.

Wybermy sobie zatem dowolny punkt obrazu interferencyjnego utworzonego z drugiej strony ściany. Oznaczmy jako x_1 odległość tego punktu od jednej ze szczelin, a jako x_2 odległość od drugiej szczeliny. Cząsteczki w obydwu szczelinach drgają w tej samej fazie. Gdyby więc $x_1 = x_2$, fale spotykałyby się w tym punkcie w zgodnych fazach. W ogólnym przypadku odległości te są dowolne, więc spotykające się fale

wzmocnienie
i wygaszenie
interferencyjne

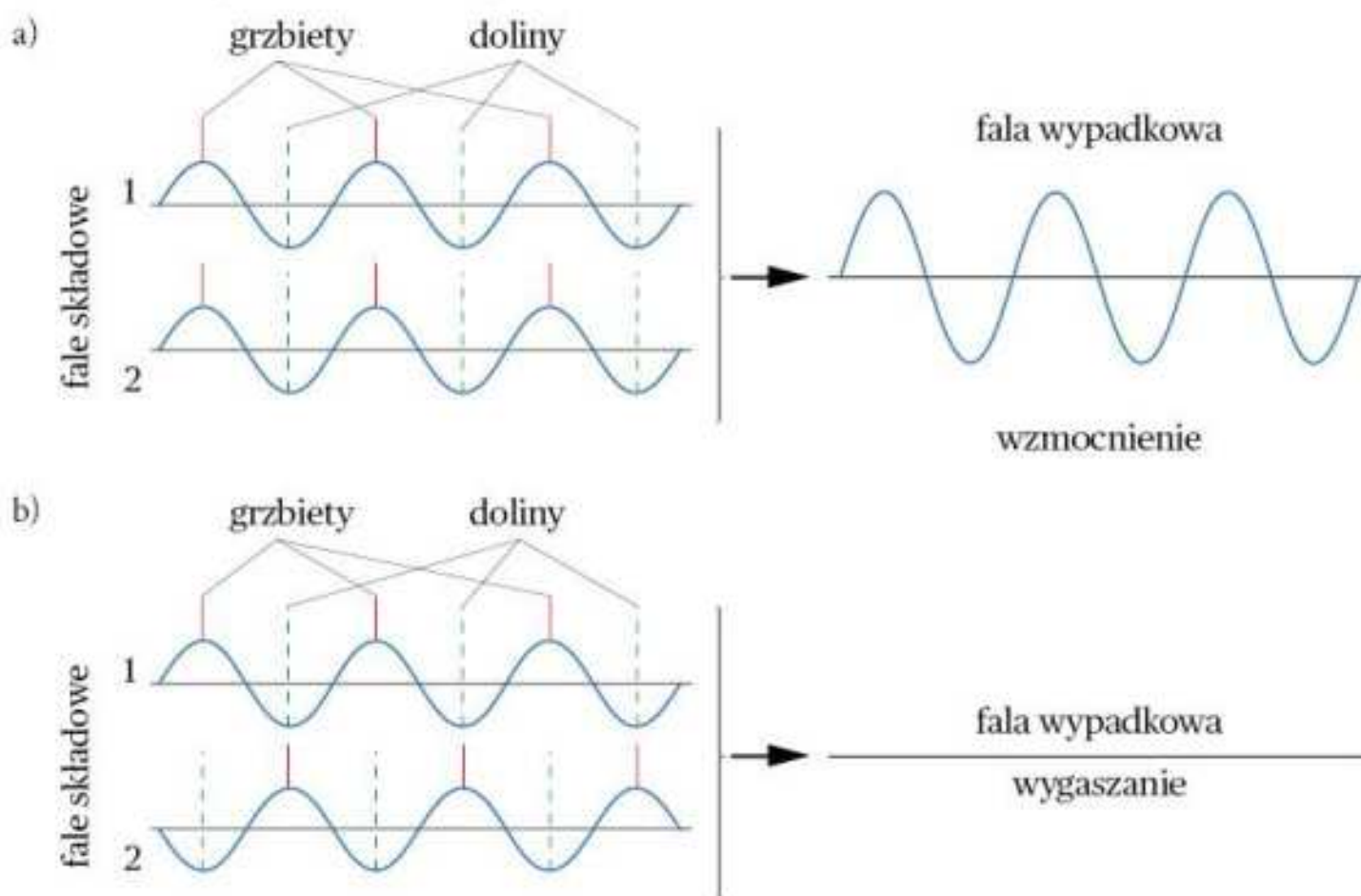


będą wykazywały różnicę faz równą $\Delta x = x_2 - x_1$. W zależności od wartości Δx są możliwe różne sytuacje:

a) $\Delta x = n\lambda$, n jest – dowolna liczba całkowita (rys. 13a). Gdy $n = 0$, fale mają do przebycia jednakowe odległości. Gdy $n \neq 0$, są przesunięte względem siebie o całkowitą liczbę okresów, co niczego nie zmienia. Fale spotykają się w tej samej fazie: grzbiet z grzbietem, dolina z doliną. Następuje wzmocnienie interferencyjne, a amplituda fali wypadkowej jest równa sumie amplitud fal składowych. Podany wzór stanowi tak zwany **warunek wzmocnienia** (maksimum interferencyjnego). W punktach, w których jest on spełniony, występuje falowanie z maksymalną amplitudą.

b) $\Delta x = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$ (rys. 13b). Jest to tak zwany **warunek wygaszenia** (minimum interferencyjnego). Fale przesunięte są względem siebie o połowę swojej długości, więc spotykają się w przeciwnych fazach: grzbiet z doliną, a dolina z grzbietem. Suma wychyleń w każdej chwili jest równa zero, więc amplituda fali złożonej też jest równa zero. W obszarach, w których ten warunek jest spełniony, obserwujemy zanik ruchu falowego.

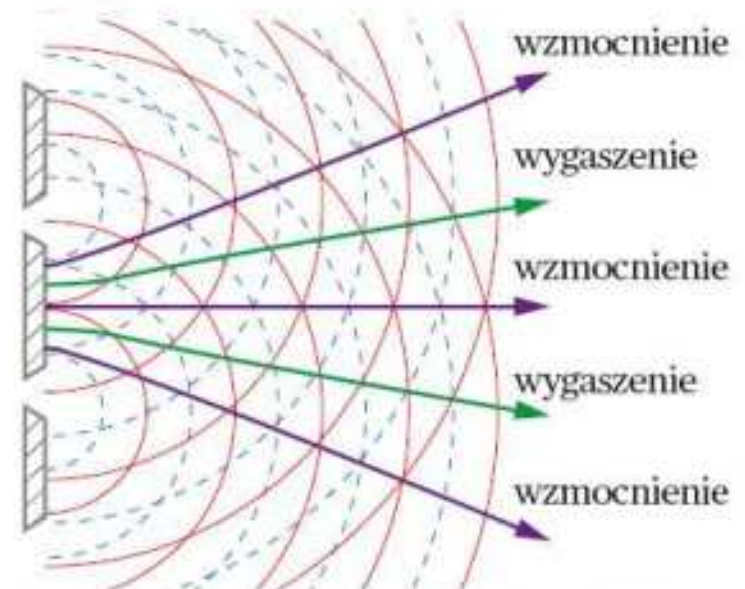
c) W każdym innym przypadku nastąpi częściowe wzmocnienie lub częściowe wygaszenie. Amplituda fali złożonej będzie większa od zera, ale mniejsza od sumy amplitud fal składowych.



Rys. 13. Interferencja fal: a) wzmocnienie interferencyjne, b) wygaszenie.



Na rysunku 14 przedstawiono obraz interferencyjny fal przechodzących przez dwie szczeliny. Zaznaczono na nim grzbiety i doliny fal składowych. Widać, że wzdłuż pewnych prostych fale spotykają się zawsze w tej samej fazie: grzbiety z grzbietami, a doliny z dolinami. Są to miejsca, gdzie amplituda fali złożonej jest największa. Między nimi występują pasy, gdzie fale spotykają się w fazach przeciwnych i ulegają wzajemnemu wygaszeniu. W ten sposób wyjaśniliśmy powstawanie obrazu interferencyjnego otrzymanego w doświadczeniu 2.



Rys. 14. Obraz przestrzenny interferencji fal spójnych. Grzbiety zaznaczono czerwoną linią, a doliny – niebieską.

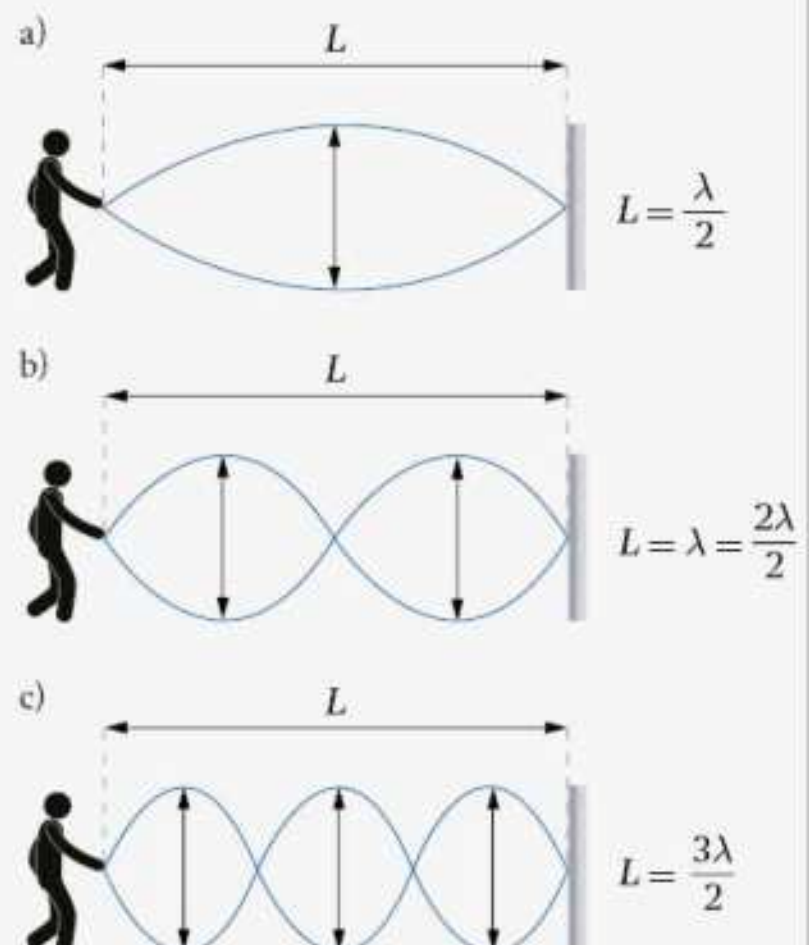
Chcesz wiedzieć więcej?

Fale stojące

Dlaczego płytka cymbałków uderzona z dowolną siłą wydaje zawsze dźwięk o takiej samej częstotliwości? Dlaczego struna gitary, o ile nie będziemy zmieniać jej naprężenia, zawsze brzmi tak samo? Dlaczego jeśli będziemy pukać w konkretne drzwi lub blat konkretnego stołu, to zawsze usłyszymy dźwięk o takiej samej wysokości? Otóż mamy tu do czynienia z kolejnym przejawem interferencji, która prowadzi do powstawania tak zwanej **fali stojącej**.

Doświadczenie 3.

Pomoce: długa sprężyna do demonstracji fal poprzecznych lub sprężysta linka. Doświadczenie wymaga umiejętności dopasowania się do odpowiedniej częstotliwości drgań. Jeden koniec sprężyny lub linki mocujemy nieruchomo do ściany. Może być też trzymany nieruchomo przez ucznia. Drugi koniec wprawiamy w drgania o odpowiednio dobranej częstotliwości, tak by sprężyna zachowywała się w sposób pokazany na rysunku 15a. Podwajając lub potrajjając częstotliwość, możemy uzyskać efekty przedstawione na rysunkach 15 b i c.

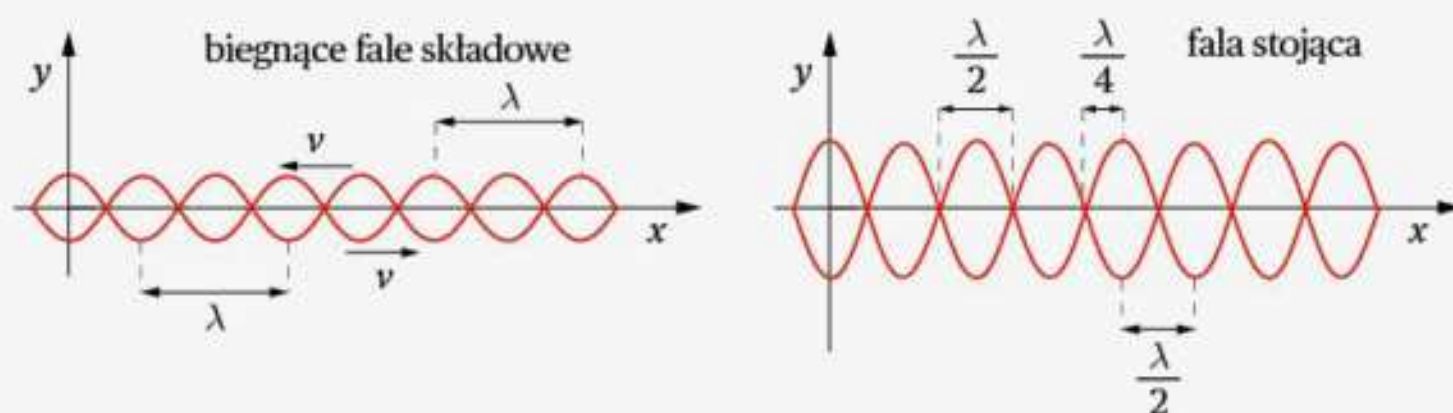


Rys. 15. Demonstracja fali stojącej.





Fale wygenerowane podczas wykonywania doświadczenia 3 sprawiają wrażenie, jakby się nie przemieszczały, dlatego nazywamy je falami stojącymi. W pewnych punktach, zwanych węzłami, amplituda drgań wynosi zero. W innych, zwanych strzałkami, amplituda fali jest maksymalna. Aby wytworzyć falę stojącą, należy tak dobrać częstotliwość drgań, by połowa długości fali mieściła się całkowitą liczbą razy w długości linki lub sprężyny. Wytworzone dla kolejno wzrastających częstotliwości fale stojące nazywamy odpowiednio pierwszą, drugą itd. harmoniczną.



Rys. 16. Sposób powstawania fali stojącej.

Mechanizm powstawania fali stojącej przedstawiono na rysunku 16. Jak pamiętasz z doświadczenia przeprowadzonego na pierwszej lekcji poświęconej falom, impuls falowy wysłany wzdłuż linki trzymanej nieruchomo odbił się od jej końca i wrócił, przy czym faza fali zmieniła się na przeciwną. Jeśli regularnymi ruchami ręki wyślemy wzdłuż linki falę sinusoidalną, to będzie się ona odbijać na drugim końcu i wracać. Fala powracająca będzie interferować z falą biegnącą, a efektem tej interferencji jest właśnie fala stojąca.

Fala stojąca jest skutkiem interferencji dwóch fal spójnych biegnących w przeciwne strony.

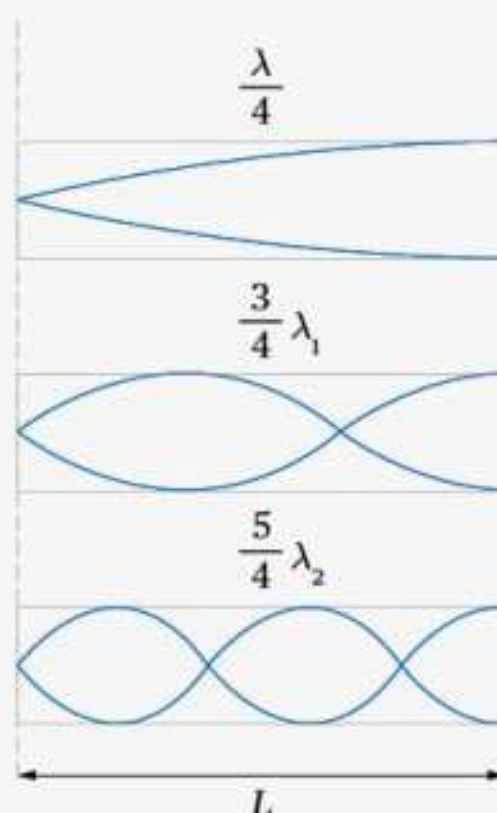
Odległość między sąsiednimi węzłami, podobnie jak odległość między sąsiednimi strzałkami, okazuje się równa połowie długości fali biegnącej. Odległość między węzłem i najbliższą strzałką jest równa 1/4 długości fali biegnącej.

Fale stojące są powszechne. Powstają, ilekroć pobudzimy do drgań jakiegokolwiek przedmiot sprężysty. Występują między innymi w rurach, strunach, prętach, membranach, słupach powietrza itd. Jeśli końce przedmiotu są przytwierdzone na sztywno, w miejscach łączenia występują węzły. Jeśli końce przedmiotu mogą drgać swobodnie, fale biegnące odbijają się od nich bez zmiany fazy i powstaje tam strzałka fali stojącej. Zatem gdy uderzymy na przykład w blat stołu, powstaną w nim fale stojące o takich długościach, by na krawędziach blatu wystąpiły strzałki. Długości tych fal, a więc również ich częstotliwości, będą zdeterminowane przez rozmiary geometryczne stołu. Spośród wszystkich fal dominującą rolę będzie odgrywać pierwsza harmoniczna. Jej częstotliwość będzie zarazem częstotliwością dźwięku, który dotrze do naszych uszu po uderzeniu stołu. Kolejne harmoniczne wpłyną na barwę dźwięku, po której poznamy, że został uderzony właśnie stół, a nie szyba czy arkusz blachy.



Jak się łatwo domyślić, fale stojące są podstawą działania wszelkich instrumentów strunowych, dętych i perkusyjnych. Elementami drgającymi są w nich struny, słupy powietrza i membrany. Rozmiar elementu drgającego (wibratora) zawsze determinuje podstawową częstotliwość dźwięku emitowanego przez instrument, a wyższe harmoniczne określają jego barwę.

Rys. 17. Fale stojące powstające w piszczalce zamkniętej. Na zamkniętym końcu piszczalki tworzy się węzeł fali, a na otwartym końcu – strzałka. Długości fal stojących w piszczalce są takie, by ich ćwiartki mieściły się nieparzystą ilość razy w długości piszczalki. Pierwsza harmoniczna nadaje ton podstawowy, a wyższe wpływają na barwę dźwięku.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Dwaj chłopcy, podskakując jednocześnie w dużym basenie w pewnym oddaleniu od siebie, wytwarzają fale o długości 2 metrów. Amplituda fali wytwarzanej przez jednego chłopca wynosi 20 cm, a przez drugiego – 30 cm. Obie fale ze sobą interferują. Oblicz amplitudę fali złożonej w miejscu oddalonym o 6 m od pierwszego chłopca i 3 m od drugiego.
2. Obserwując falowanie wody w porcie, często można zauważyć, że w pewnych jego miejscach amplituda fal jest szczególnie wysoka. Jak wyjaśnić to zjawisko?
- 3*. Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Jakiej częstotliwości dźwięk powstaje w piszczalce zamkniętej o długości 12 cm?

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Interferencja to zjawisko nakładania się na siebie fal. s. 122
- Zgodnie z zasadą superpozycji, jeśli w ośrodku rozchodzi się jednocześnie kilka fal wysyłanych przez różne źródła, to cząstki ośrodka wykonują ruch będący wypadkową ruchów, jakie wykonywałyby pod wpływem każdej z tych fal z osobna. s. 123
- Gdy fale spotykają się w tych samych fazach, to następuje wzmocnienie interferencyjne. Jeśli w przeciwnych – obserwujemy wygaszenie. s. 123



3.4. Zjawisko Dopplera

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, dlaczego dźwięk emitowany przez jadący pojazd zmienia ton, gdy pojazd mija obserwatora;
- poznasz zastosowania zjawiska Dopplera w różnych dziedzinach nauki i techniki.

Istota zjawiska Dopplera



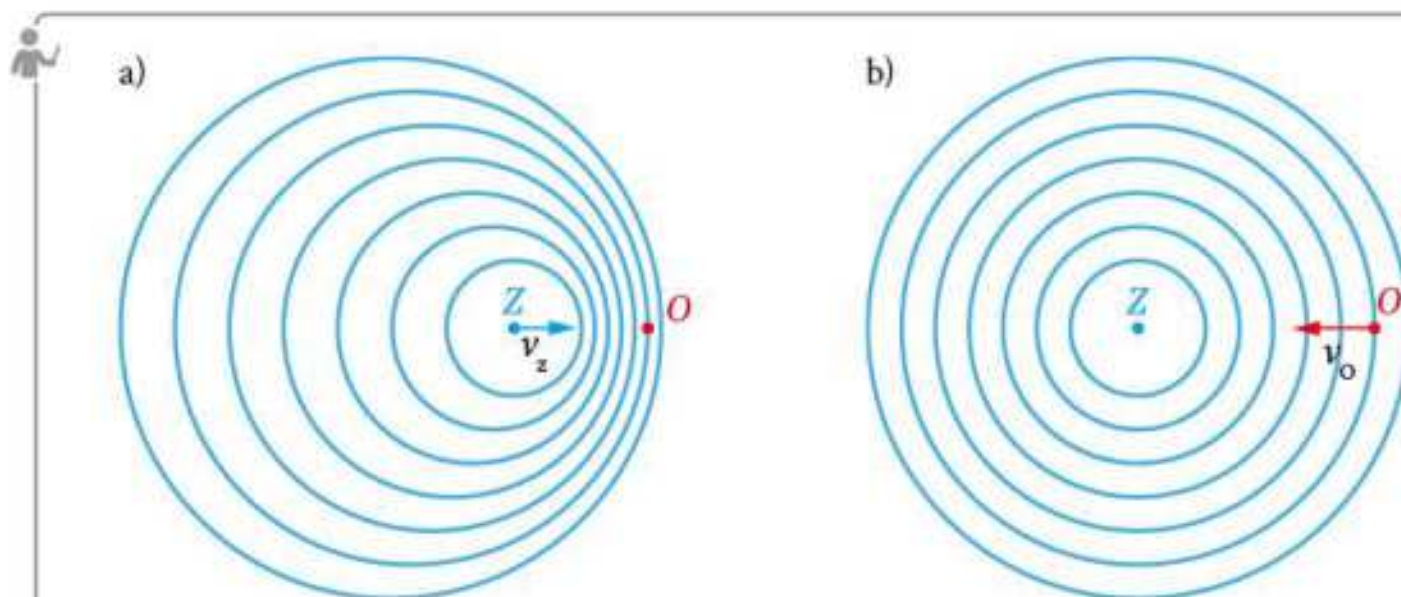
Stojąc przy ruchliwej szosie, możemy zauważyć, że ton dźwięków pochodzących od samochodów i rejestrowanych przez ucho zmienia się w momencie, gdy przejeżdżają one obok nas. Dźwięk odbierany od samochodu zbliżającego się ma wyższą częstotliwość niż dźwięk odbierany od tego samego samochodu podczas oddalania się. Obroty silnika, a więc i częstotliwość emitowanego dźwięku, nie zmieniają się podczas mijania obserwatora, zatem zjawisko musi mieć związek z wzajemnym ruchem źródła dźwięku i obserwatora. Sprawę tę po raz pierwszy zbadał dokładnie austriacki fizyk Christian Doppler (1803–1853).

zjawisko Dopplera

Zjawisko Dopplera polega na zmianie częstotliwości fali odbieranej przez obserwatora wynikającej z ruchu źródła fali lub obserwatora względem ośrodka, w którym rozchodzi się fala.

Zjawisko Dopplera dotyczy wszystkich rodzajów fal, ale omówimy je na przykładzie dźwięku, który jest dla nas najbardziej intuicyjny i łatwy do obserwacji. Wynikające z tych rozważań wnioski i wzory możemy tak samo stosować dla innych rodzajów fal, na przykład elektromagnetycznych.

Na początku rozważmy przypadek, w którym obserwator jest nieruchomy, a źródło dźwięku porusza się z prędkością v_s względem obserwatora (rys. 18a). Odpowiada to sytuacji, gdy człowiek stoi na poboczu drogi, po której porusza się samochód. Jak już wiesz, fala w danym ośrodku porusza się z prędkością charakterystyczną dla tego ośrodka. Prędkość ta nie zależy od innych czynników, w tym od ruchu źródła fali. Niezależnie więc od tego, z jaką prędkością jedzie samochód, będzie on wysyłał we wszystkich kierunkach fale dźwiękowe z jednakową prędkością względem powietrza. Jadący samochód „goni” te fale, które wysłał do przodu, i „ucieka” od tych, które wysłał do tyłu. Fale z przodu samochodu sprawiają wrażenie krótszych, a więc mających większą częstotliwość, a fale za samochodem będą dłuższe, o niższej częstotliwości. Te zmodyfikowane częstotliwości będą odbierane przez obserwatora, który usłyszy wyższy ton, gdy samochód się zbliża, i niższy, gdy samochód będzie się oddalać.



Rys. 18. Wyjaśnienie zjawiska Dopplera: a) obserwator nieruchomy, źródło porusza się z prędkością v_z , b) źródło nieruchome, obserwator porusza się z prędkością v_o .

Inaczej jest w przypadku nieruchomego źródła i ruchomego obserwatora (rys. 18b). Źródłem może być na przykład nieruchoma syrena, a obserwatorem – człowiek przejeżdżający obok samochodem. Źródło wysyła fale o tej samej długości, prędkości i częstotliwości we wszystkie strony. Gdy obserwator zbliża się do źródła, wychodzi naprzeciw tym falom. Wprawdzie mają one niezmienną długość, ale wzrosła względna prędkość między falami i obserwatorem, zatem będzie on napotykał grzbiety kolejnych fal z większą częstotliwością i usłyszy wyższy ton. Gdy obserwator będzie się oddalać od nieruchomego źródła, jego prędkość będzie miała ten sam zwrot, co uciekające przed nim fale. Kolejne grzbiety fali będą go wyprzedzać z mniejszą częstotliwością i usłyszy dźwięk o niższym tonie.

Układając odpowiednie proporcje między długościami fal w pierwszym przypadku oraz częstotliwościami w drugim, można wyprowadzić zależność między częstotliwością odbieraną przez obserwatora f_o a częstotliwością nadawaną przez źródło f_z z uwzględnieniem prędkości źródła w stosunku do powietrza v_z , prędkości obserwatora w stosunku do powietrza v_o oraz prędkości samego dźwięku w powietrzu v :

$$f_o = f_z \frac{v \pm v_o}{v \mp v_z}$$

Górne znaki przy prędkościach stosuje się w sytuacji, gdy oba wektory są skierowane ku sobie, a dolne – gdy mają przeciwne zwroty.

Jeśli prędkości źródła i obserwatora są małe w porównaniu z prędkością dźwięku, powyższa zależność upraszcza się do wzoru przybliżonego:

$$f_o = f_z \left(1 \pm \frac{v_{oz}}{v} \right)$$

v_{oz} – prędkość obserwatora względem źródła

zależność
częstotliwości
odbieranej
od prędkości źródła
fali lub obserwatora

**Przykład**

Samochód przejeżdża obok nieruchomego obserwatora z prędkością $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oblicz, o ile procent zmieniła się w tym zdarzeniu częstotliwość dźwięku samochodu odbierana przez obserwatora. Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Rozwiązanie:

W treści zadania nie podano częstotliwości emitowanej przez źródło, ale nie jest ona potrzebna, ponieważ mamy obliczyć jedynie względną zmianę wartości tej częstotliwości.

Dane:

$$v_z = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Szukane

$$\frac{f_{01}}{f_{02}} = ?$$

Prędkość samochodu jest 17 razy mniejsza od prędkości dźwięku, co upoważnia nas do zastosowania wzoru przybliżonego.

Gdy samochód się zbliża, obserwator rejestruje częstotliwość $f_{01} = f_z \left(1 + \frac{v_z}{v} \right)$.

Gdy samochód się oddala, odbierana częstotliwość maleje do wartości $f_{02} = f_z \left(1 - \frac{v_z}{v} \right)$.

Stosunek tych częstotliwości wynosi:

$$\frac{f_{02}}{f_{01}} = \frac{f_z \left(1 - \frac{20}{340} \right)}{f_z \left(1 + \frac{20}{340} \right)}, \quad \frac{f_{02}}{f_{01}} = \frac{1 - \frac{1}{17}}{1 + \frac{1}{17}} = \frac{16}{18} = \frac{16}{18} = 0,889 = 88,9\%$$

Częstotliwość zmalała zatem o 11,1% w stosunku do wartości odbieranej na początku.

Odpowiedź: Częstotliwość dźwięku odbieranego przez obserwatora podczas przejazdu samochodu zmniejszyła się o 11,1%.

Zastosowania zjawiska Dopplera

**zastosowania
zjawiska Dopplera**

Zjawisko Dopplera znalazło liczne zastosowania. Jeśli znamy częstotliwość fali nadawanej i odbieranej, to przekształcając wzór możemy łatwo obliczyć prędkość danego obiektu. W tym celu możemy na przykład wysłać w jego stronę falę o znanej częstotliwości, a następnie zmierzyć częstotliwość fali odbitej. W pomiarach możemy używać zarówno fal dźwiękowych, jak i elektromagnetycznych o różnych zakresach częstotliwości. Jeśli obiekt nie porusza się wprost w kierunku obserwatora, wzory należy zmodyfikować, tak by uwzględniały tę składową prędkości, która leży na prostej przechodzącej przez punkt obserwacji.

Często spotykanym w życiu codziennym przykładem urządzenia wykorzystującego efekt Dopplera jest **radar policyjny**. Jego najważniejszą częścią jest tak zwany oscylator emitujący mikrofały (fale elektromagnetyczne o długości rzędu milimetrów).



Fale te, odbijając się od ruchomego samochodu wracają ze zmienioną częstotliwością: większą, gdy pojazd zbliża się do radaru, i mniejszą, gdy się oddala. Różnica częstotliwości jest proporcjonalna do wartości prędkości, którą można w ten sposób obliczyć i wyświetlić na ekranie.



Rys. 19. Przykładowe zastosowania zjawiska Dopplera: a) radar policyjny, b) przepływomierz ultradźwiękowy, c) przepływ krwi w tętnicy zbadany za pomocą ultrasonografu dopplerowskiego.

Fakt, że prędkość fali względem danego ośrodka jest stała, może służyć do badania ruchu tego ośrodka. Jeśli na przykład w rurze płynie jakaś ciecz, to dźwięk rozchodzący się w tej cieczy będzie dodatkowo unoszony przez ruch cieczy. Dla obserwatora zewnętrznego prędkość dźwięku płynącego z prądem cieczy będzie większa niż podczas rozchodzenia się pod prąd. Na tej zasadzie działa **przepływomierz ultradźwiękowy**, wyposażony w dwie głowice montowane bezpośrednio na rurze. Głowice emitują sygnał ultradźwiękowy i mierzą czas jego rozchodzenia się w jedną i drugą stronę. Różnica tych czasów z uwzględnieniem odległości między głowicami i kąta, pod jakim do rury wysyłany jest sygnał, pozwala na bezinwazyjne i bezkontaktowe określenie prędkości cieczy w rurze. Te cechy są szczególnie ważne przy pomiarach prędkości cieczy agresywnych, które mogłyby uszkodzić przepływomierze innych typów.

Stosowany szeroko w diagnostyce medycznej **ultrasonograf dopplerowski** służy do badania prędkości przepływu krwi w naczyniach krwionośnych. Działa podobnie jak radar, mierząc częstotliwość fali ultradźwiękowej odbitej od krwinek. Badanie takie pozwala wykrywać nieszczelności zastawek serca, zmiany miażdżycowe w żyłach i inne patologie powodujące zatory krwi, na przykład guzy.

Meteorologiczne radary dopplerowskie służą do wykrywania ruchu chmur i mas powietrza. Pozwalają przewidywać gwałtowne burze i tornada oraz ostrzegać ludność przed ekstremalnymi zjawiskami pogodowymi.

W astronomii zjawisko Dopplera jest stosowane do pomiaru prędkości obiektów kosmicznych. Wykorzystuje się tutaj zmiany długości fal linii widmowych emitowanych przez gwiazdy. Dzięki badaniu długości linii widmowych zmierzono nie tylko prędkości pojedynczych gwiazd, ale wykryto również ekspansję całego Wszechświata!



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

W rozwiązaniach zadań przyjmij, że prędkość dźwięku w powietrzu wynosi $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

1. Samochód emitujący dźwięk o częstotliwości 450 Hz zbliża się do nieruchomego obserwatora z prędkością $54 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oblicz częstotliwość dźwięku samochodu, którą usłyszy obserwator.
2. Oblicz, z jaką prędkością i w którą stronę powinien poruszać się obserwator względem nieruchomej syreny, aby częstotliwość odbieranego przez niego dźwięku była:
 - a) o 5% wyższa,
 - b) o 5% niższaod częstotliwości nadawanej przez syrenę.
3. Dwa samochody jadą po prostej drodze z prędkościami o wartościach $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Jeden z nich zatrzymał się, emitując dźwięk o częstotliwości 800 Hz. Jaka będzie częstotliwość tego dźwięku słyszana przez pasażerów drugiego samochodu w przypadku gdy:
 - a) samochody zbliżają się do siebie,
 - b) samochody oddalają się od siebie,
 - c) oba samochody jadą w tę samą stronę.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 128 • Zjawisko Dopplera polega na zmianie częstotliwości fali odbieranej przez obserwatora, wynikającej z ruchu źródła fali lub obserwatora względem ośrodka, w którym rozchodzi się fala.
- s. 129 • Gdy źródło i obserwator zbliżają się do siebie, częstotliwość odbierana jest wyższa od nadawanej, a gdy się oddalają – niższa.
- s. 130 • Zjawisko Dopplera znalazło zastosowania m.in. w: radarach, przepływomierzach, ultrasonografach dopplerowskich oraz w astronomii.

3.5. Całkowite wewnętrzne odbicie

NA TEJ LEKCJI:

- przypomnisz sobie i uzupełnisz wiadomości o odbiciu i załamaniu światła;
- poznasz istotę zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia oraz jego zastosowania.



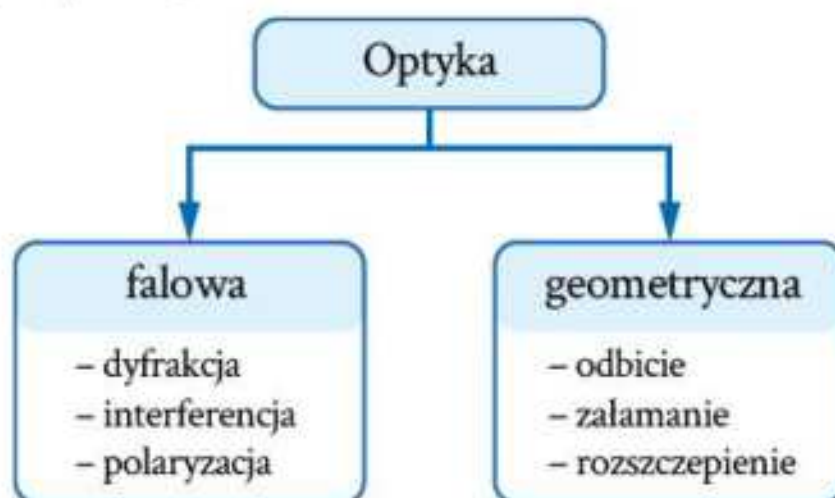
Przypomnienie wiadomości z optyki geometrycznej

Dalsze rozważania o falach zawężymy teraz konkretnie do fal świetlnych. Badaniem właściwości światła i jego zastosowaniami zajmuje się dział fizyki zwany optyką.

Całą optykę można podzielić na dwie gałęzie: optykę falową i geometryczną. **Optyka falowa** zajmuje się zjawiskami charakterystycznymi wyłącznie dla fal. Są nimi: ugięcie (dyfrakcja), interferencja i polaryzacja (patrz rozdz. 3.6). Wiesz już, że zjawiska typowo falowe zachodzą w sposób zauważalny, gdy przeszkody stawiane falom mają rozmiary rzędu długości fali. W przypadku fal świetlnych są to ułamki mikrometra. Dlatego falową naturę światła można dostrzec tylko w specjalnych warunkach. W kontakcie z dużymi przeszkodami światło nie wykazuje wyraźnych efektów typowo falowych.

Gdy światło odbija się od dużej płaskiej powierzchni, podlega prawu odbicia, które można wyprowadzić z zasady Huygensa. Ale prawu odbicia podlega też na przykład pileczka odbijająca się od ściany. Jej zachowanie można przewidzieć również na podstawie zasad dynamiki. To, że światło ulega odbiciu i załamaniu, nie rozstrzyga, czy światło jest falą czy strumieniem cząstek. Dlatego przez setki lat nie wiadano, czym tak naprawdę jest światło. Zmieniło się to w XIX wieku, gdy udowodniono eksperymentalnie, że światło ulega ugięciu i interferencji.

Zjawiskami, które są wspólne dla fal i strumieni cząstek, zajmuje się **optyka geometryczna**. Zakłada ona, że w ośrodkach jednorodnych światło rozchodzi się prostoliniowo. Do podstawowych zjawisk badanych przez optykę geometryczną należą odbicie i załamanie, a podstawowym pojęciem optyki geometrycznej jest **promień świetlny**, czyli wąska wiązka światła.



Rys. 20. Działy optyki i zjawiska przez nią badane.

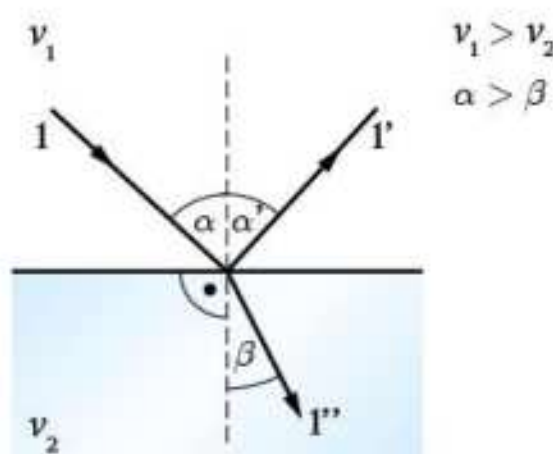
Przypomnijmy zatem poznane w szkole podstawowej prawa rządzące odbiciem i załamaniem światła.

Prawo odbicia – kąt odbicia fali jest równy kątowi padania, $\beta = \alpha$. Promień fali padającej, promień fali odbitej i prosta prostopadła do powierzchni odbijającej, wystawiona w punkcie padania, leżą w tej samej płaszczyźnie.



Przypomnijmy, że kąt padania i kąt odbicia mierzone są od prostej prostopadłej do powierzchni odbijającej.

Załamanie światła zachodzi na granicy dwóch ośrodków przezroczystych, w których światło rozchodzi się z różnymi prędkościami i polega na zmianie kierunku biegu promieni świetlnych. Jeśli światło przechodzi z ośrodka, w którym porusza się z większą prędkością, do ośrodka, w którym porusza się z mniejszą prędkością, to kąt załamania jest mniejszy od kąta padania. Jeśli przechodzi z ośrodka, w którym rozchodzi się wolniej, do ośrodka, w którym rozchodzi się szybciej, kąt załamania jest większy od kąta padania. Promień padający, promień załamany i prosta prostopadła do powierzchni załamującej wystawiona w punkcie padania zawsze leżą w tej samej płaszczyźnie.



Rys. 21. Ilustracja jednoczesnego odbicia i załamania światła na granicy dwóch ośrodków: 1 – promień padający, 1' – promień odbity, 1'' – promień załamany, v_1 – prędkość światła w pierwszym ośrodku, v_2 – prędkość światła w drugim ośrodku, α – kąt padania, α' – kąt odbicia, β – kąt załamania.



Chcesz wiedzieć więcej?

Pełne brzmienie prawa załamania jest następujące:

Prawo załamania (prawo Snelliusa) – stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest równy stosunkowi prędkości v_1 fali w ośrodku pierwszym do prędkości v_2 fali w ośrodku drugim. Stosunek ten jest stały i równy współczynnikowi załamania ośrodka drugiego względem pierwszego $n_{2,1}$.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{2,1}$$

Promień fali padającej, promień fali załamanej i prosta prostopadła do powierzchni załamującej w punkcie padania leżą w tej samej płaszczyźnie.

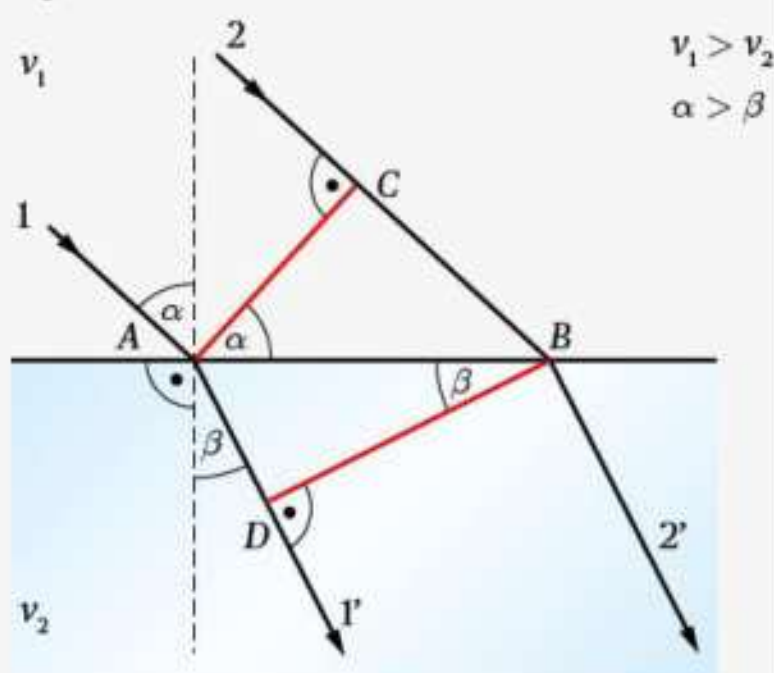


Prawo Snelliusa łatwo wyprowadzić według rysunku 22. Odcinek CB jest to dystans, jaki promień 2 z prędkością v_1 przebywa w pewnym czasie t . W tym samym czasie promień 1 z prędkością v_2 przebywa w drugim ośrodku dystans AD . Ze względu na prostopadłość odpowiednich ramion kąty α i β występują również wewnątrz trójkątów ACB i ABD . Możemy więc ułożyć następujące dwa równania:

$$\begin{cases} BC = AB \sin \alpha = v_1 t \\ AD = AB \sin \beta = v_2 t \end{cases}$$

Po podzieleniu stronami pierwszego równania przez drugie otrzymujemy wzór opisujący prawo załamania.

Rys. 22. Załamanie światła na granicy dwóch ośrodków przezroczystych, przy czym w dolnym ośrodku światło porusza się z mniejszą prędkością (v_2). 1, 2 – promienie fali padającej. 1', 2' – promienie fali załamanej. α – kąt padania, β – kąt załamania. AC – czoło fali padającej. Zanim promień 2 dotrze do punktu B , fala elementarna z punktu A rozejdzie się w ośrodku drugim na odległość $AD < BC$. BD – czoło fali załamanej. Promienie fali załamanej są prostopadłe do czoła fali załamanej. Ponieważ $AD < BC$, to $\beta < \alpha$.



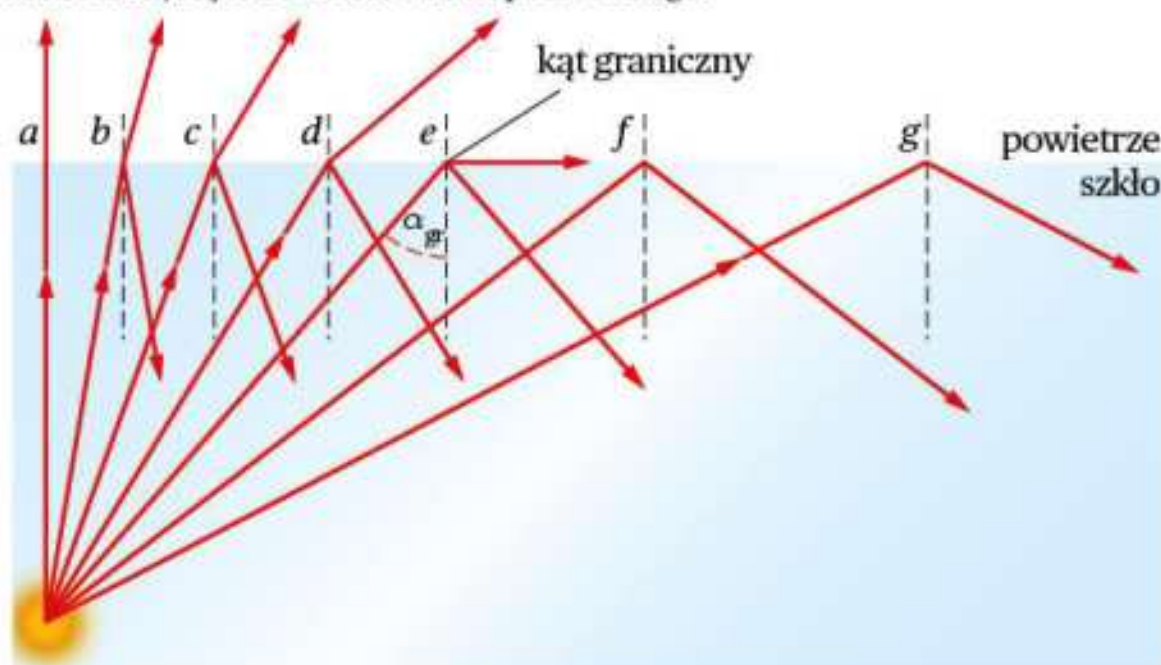
Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia

Gdy światło napotyka na granicę dwóch ośrodków, odbija się zawsze. Jeśli drugi ośrodek jest przezroczysty, światło może ulec również załamaniu. Zbadajmy, na razie teoretycznie, czy załamanie zawsze jest możliwe. W tym celu wyobraźmy sobie źródło światła wysyłające promienie we wszystkie strony, umieszczone w ośrodku takim jak szkło lub woda, w którym światło porusza się wolniej niż w powietrzu.

Światło wychodzące z ośrodka, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest mniejsza do ośrodka, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest większa, będzie się załamywać pod kątem nie mniejszym niż kąt padania. Gdy kąt padania wynosi 0° , czyli promień pada prostopadłe na granicę ośrodków, kąt załamania również będzie wynosić 0° i światło będzie wychodzić na wprost bez załamywania się (rys. 23, promień a). W miarę zwiększania się kąta padania (promienie b , c , d) zwiększa się kąt załamania i jest on większy od kąta padania. Energia padającego promienia zostanie rozdzielona na wiązkę odbitą i załamaną. Przy pewnej wartości kąta padania, zwanej kątem granicznym, kąt załamania przyjmie wartość 90° i promień załamany (e) będzie się ślizgać po powierzchni rozgraniczającej ośrodki. Przekroczenie przez kąt padania wartości granicznej spowoduje, że załamanie nie będzie już możliwe i promień napotykający na granicę ośrodków będzie się już tylko odbijać (promienie f , g). Dla kątów większych od granicznego następuje więc całkowite wewnętrzne odbicie. Ryba patrząca w górę zobaczy świat zewnętrzny jedynie przez ograniczony obszar powierzchni



wody o kształcie kolistym. Gdy spojrzysz na powierzchnię wody pod większym kątem, dostrzeżesz tam jedynie odbicie światła podwodnego.



Rys. 23. Zachowanie się promienia wychodzącego z ośrodka, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest mniejsza, do ośrodka, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest większa, w zależności od kąta padania.

całkowite
wewnętrzne odbicie

kąt graniczny

Całkowite wewnętrzne odbicie – zjawisko całkowitego odbicia promienia biegnącego w ośrodku, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest mniejsza, po dotarciu do granicy z ośrodkiem, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest większa, pod kątem większym niż kąt graniczny.

Kąt graniczny – taki kąt padania, dla którego kąt załamania jest kątem prostym. Wartość kąta granicznego zależy od prędkości światła w stykających się ośrodkach.

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia bardzo łatwo zaobserwować za pomocą stolika optycznego. Jest on wyposażony w źródło światła emitującego wyraźne równoległe promienie oraz tarczę, na której można kłaść różne przedmioty, jak zwierciadła, przekroje soczewek oraz **pryzmaty**, czyli bryły przezroczyste ograniczone dwiema powierzchniami przecinającymi się wzdłuż prostej zwanej krawędzią łamiącą pryzmatu. Tarcza jest wyposażona w podziałkę kątową oraz daje się obracać wokół osi. Jeśli na tarczy położymy na przykład pryzmat i skierujemy na niego wiązkę promieni ze źródła światła, możemy zaobserwować promienie padające, odbite i załamane oraz zmierzyć kąty padania, odbicia i załamania.

Doświadczenie

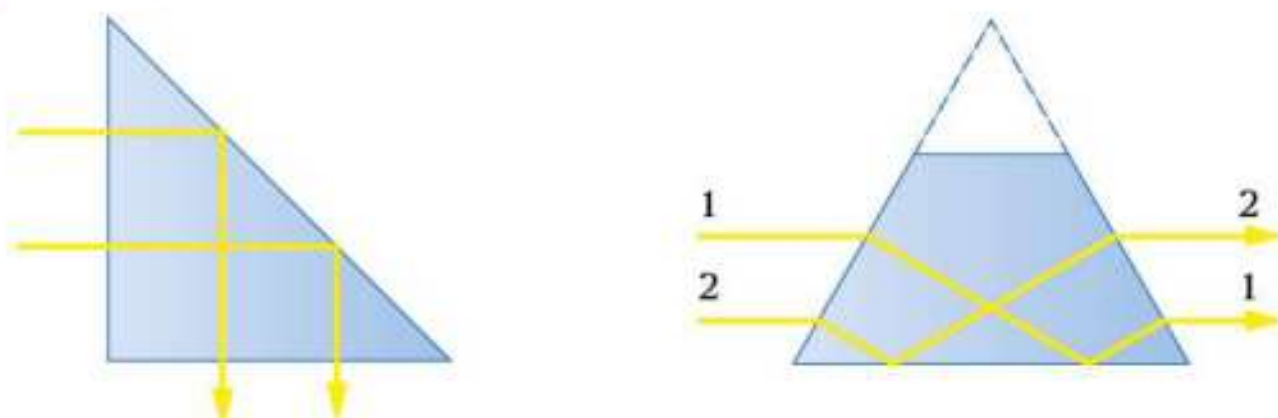
Pomoce: stolik optyczny z kompletem pryzmatów.

Doświadczenie powinno być wykonywane w ciemności. Na oświetloną przez źródło światła tarczę połóż pryzmat. Obserwuj promienie padające oraz odbite i załamane w pryzmacie. Zmierz kąty padania, odbicia i załamania dla poszczególnych powierzchni pryzmatu. Kręć tarczą i obserwuj, jak zmieniają się te kąty. Obserwacje:

1. Podczas odbicia od powierzchni szkła kąt odbicia jest zawsze równy kątowi padania.



2. Gdy promień światła wchodzi do szkła, kąt załamania jest zawsze mniejszy od kąta padania. Gdy światło wychodzi z pryzmatu, kąt załamania jest większy od kąta padania.
3. Po przekroczeniu przez kąt padania wewnątrz pryzmatu wartości granicznej promień załamany na zewnątrz pryzmatu znika i następuje całkowite wewnętrzne odbicie.



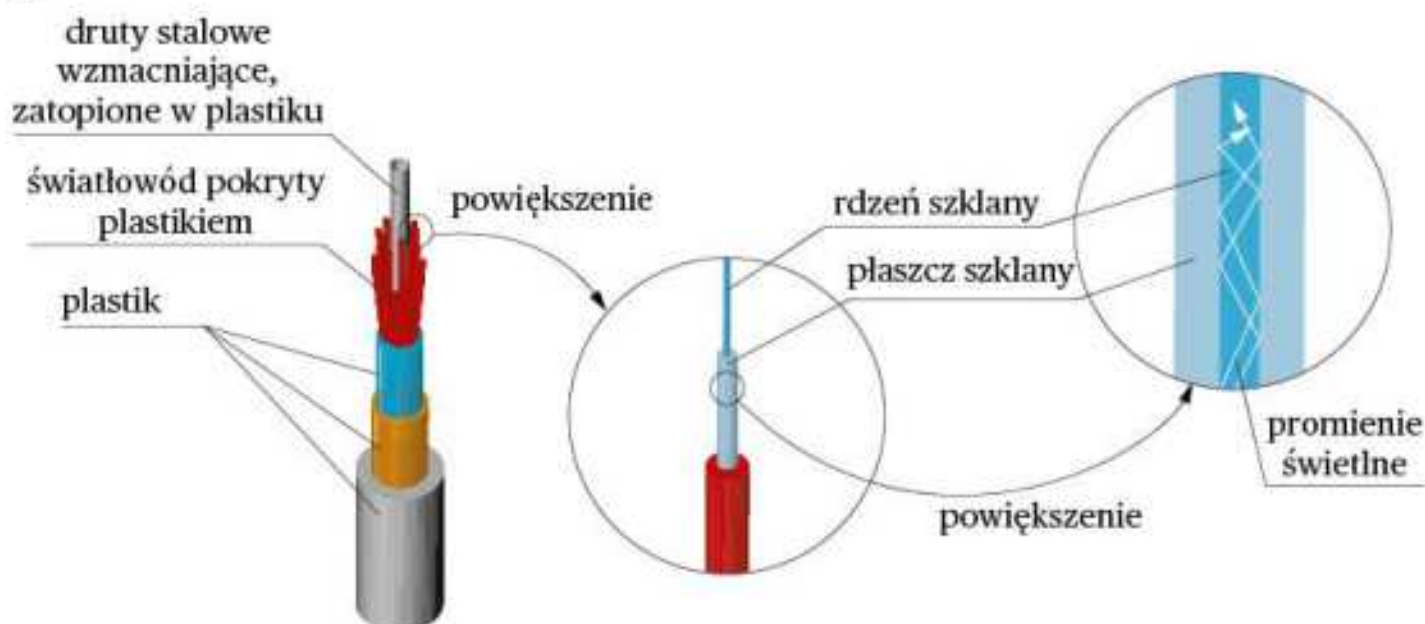
Rys. 24. Przykładowe ustawienie pryzmatu, przy którym zachodzi całkowite wewnętrzne odbicie.

Zastosowania zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia

Całkowite wewnętrzne odbicie ma liczne zastosowania, z których najważniejszym jest **światłowód**. Jest to giętkie włókno szklane lub plastikowe, służące do przewodzenia światła.

światłowód

a)



b)



Rys. 25. Światłowód: a) budowa wewnętrzna i zasada działania, b) wygląd kabla światłowodowego.

Poszczególne światłowody różnią się szczegółami budowy oraz zastosowaniami. Zasadniczo są zbudowane tak, aby światło, które wniknęło do światłowodu na jednym końcu, bez dużych strat dotarło na drugi koniec. Centralną część światłowodu zajmuje rdzeń o stosunkowo małej prędkości rozchodzącego się w nim światła. W przypadku światłowodów telekomunikacyjnych średnica rdzenia porównywalna jest ze średnicą ludzkiego włosa. Wokół rdzenia znajduje się przezroczysty płaszcz,



w którym światło rozchodzi się nieco szybciej. Całość jest otoczona powłokami zabezpieczającymi. Ze względu na małą średnicę światło biegnie w światłowodzie niemal równoległe do granicy ośrodków, dlatego odbija się od niej zawsze pod kątem znacznie większym od granicznego i nie może wydostać się na zewnątrz. Jeśli zapewnimy doskonałą czystość materiału rdzenia i nie dopuścimy do uszkodzeń, światło w światłowodzie może przebiegać ogromne dystanse (nawet tysiące kilometrów) z niewielkimi stratami.

Światłowody stosuje się przede wszystkim:

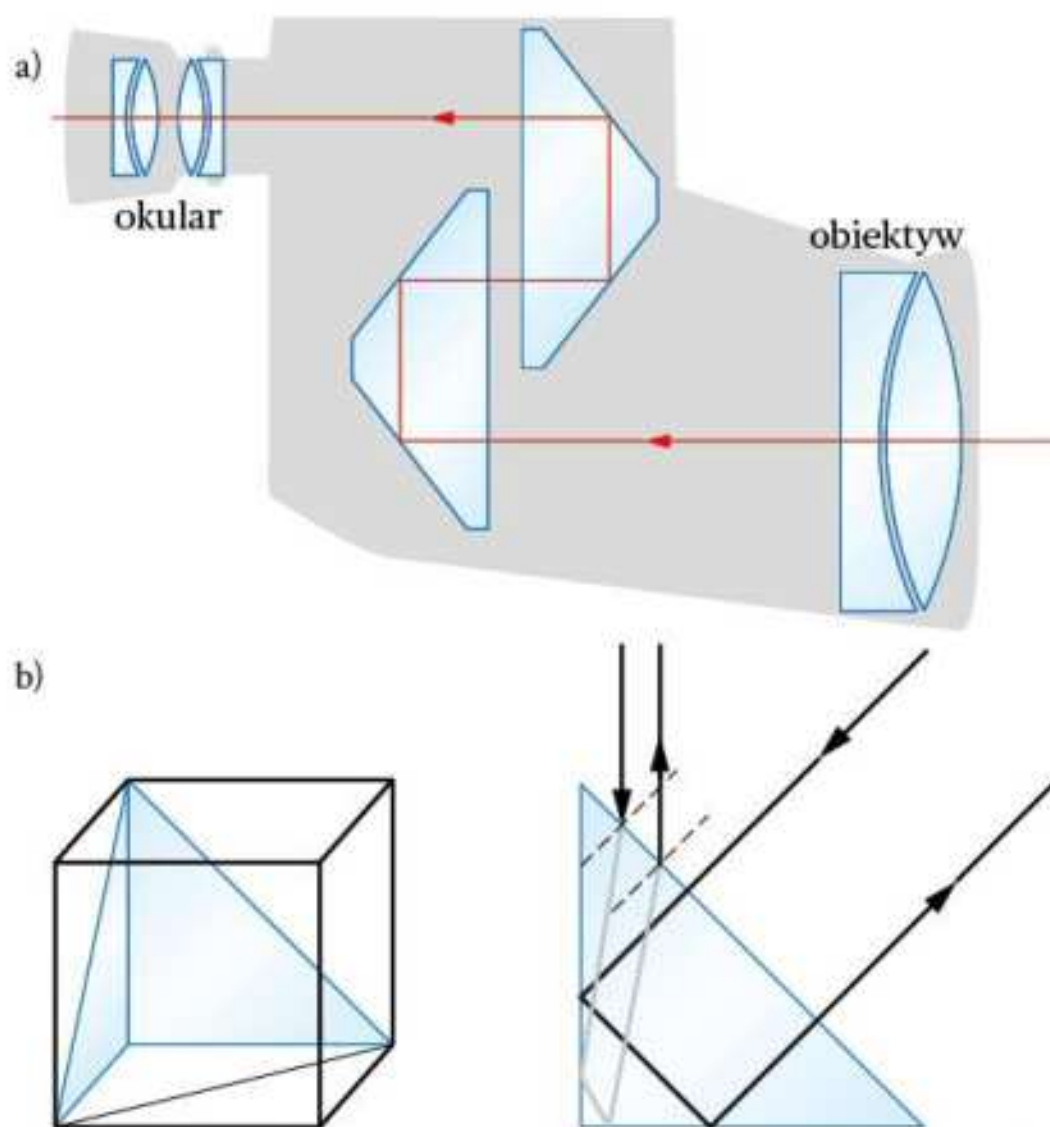
- w **telekomunikacji** – częstotliwość światła jest setki tysięcy razy większa niż częstotliwość sygnałów przenoszonych przez prąd elektryczny, dlatego światło może przenosić informacje bez porównania szybciej; osłabienie sygnału świetlnego jest znacznie mniejsze niż straty energii elektrycznej wynikające z istnienia oporu elektrycznego; w odróżnieniu od sygnału elektrycznego wiązka światła nie wytwarza wokół siebie pola magnetycznego, więc jest niemożliwa do podsłuchania i odporna na zakłócenia elektromagnetyczne; dlatego kable światłowodowe oplatają obecnie cały świat i są szkieletem sieci komputerowych, telewizji kablowej i wszelkiego rodzaju łączów telekomunikacyjnych;
- w **medycynie** – podczas badań endoskopowych można za pomocą światłowodu wprowadzić oświetlenie do wewnętrznych jam ciała i badać je za pomocą kamery;
- w **optoelektronice** – jest to dział techniki zajmujący się pozyskiwaniem, gromadzeniem, przechowywaniem, przetwarzaniem i prezentowaniem informacji za pomocą światła; optoelektronika stworzyła wiele urządzeń, a światłowody pełnią w nich funkcję podobną do funkcji kabli przesyłających dane w urządzeniach elektrycznych;
- do **dekoracji** – światłowody wykorzystuje się do konstrukcji efektownych wizualnie źródeł światła.

Całkowite wewnętrzne odbicie jest wykorzystywane ponadto w urządzeniach optycznych do odwracania biegu promieni świetlnych. Zwykła luneta zbudowana z dwóch soczewek skupiających, zwanych obiektywem i okulem, daje obraz odwrócony. Nie stanowi to przeszkody w obserwacjach astronomicznych, ale zasadniczo utrudnia oglądanie obiektów na Ziemi. Problem ten rozwiązuje się w **lornetkach** poprzez zastosowanie dwóch pryzmatów odwracających obraz. Dlatego tubusy lornetki nie są proste, tylko mają kształt lamany. Dodatkową korzyścią takiego rozwiązania jest mniejsza długość lornetki w porównaniu do lunety.

lornetka

światła odbłaskowe

Innym powszechnym zastosowaniem całkowitego wewnętrznego odbicia są **światła odbłaskowe**. Są one tak skonstruowane, że padające na nie światło ulega dwukrotnemu całkowitemu wewnętrznemu odbiciu oraz dwukrotnemu załamaniu. Niezależnie od kierunku, z którego pada światło, wraca ono w tę samą stronę, z której zostało wysłane (rys. 26b). Dlatego światło emitowane przez reflektory pojazdu, natrafiając na światelko odbłaskowe, nie odbija się w przypadkowym kierunku, tylko wraca do oczu kierowcy. Poruszając się w nieoświetlonym terenie, powinniśmy zawsze być wyposażeni w elementy odbłaskowe, gdyż w znacznym stopniu zwiększają one nasze bezpieczeństwo.



Rys. 26. Przykładowe zastosowania całkowitego wewnętrznego odbicia: a) odwracanie biegu promieni świetlnych w lornetce, b) światłokodownik.

Całkowite wewnętrzne odbicie wykorzystujemy również w **jubilerstwie**. Dzięki niemu można dostrzec refleksy świetlne, obracając w palcach odpowiednio oszlifowany diament (czyli brylant).

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Narysuj w zeszycie bieg promienia świetlnego, który pada pod pewnym kątem na płaską szybę.
- 2*. Współczynnik załamania światła dla wody wynosi 1,33. Światło pada na powierzchnię wody pod kątem 45° . Oblicz kąt załamania tego światła w wodzie.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Całkowite wewnętrzne odbicie to zjawisko całkowitego odbicia promienia biegnącego w ośrodku, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest mniejsza, po dotarciu do granicy z ośrodkiem, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest większa, pod kątem większym niż kąt graniczny. s. 136
- Kątem granicznym nazywamy taki kąt padania, dla którego kąt załamania jest kątem prostym. Wartość kąta granicznego zależy od prędkości światła w stykających się ośrodkach. s. 136



s. 137

- Światłowody to giętkie włókna zbudowane z dwóch warstw materiałów przezroczystych. Wykorzystują całkowite wewnętrzne odbicie do przesyłania światła na znaczne odległości. Używa się ich głównie do przesyłania danych, a ponadto w medycynie, optoelektronice i oświetleniu.

s. 138

- Oprócz światłowodów całkowite wewnętrzne odbicie zostało wykorzystane m.in. w lornetkach, światłokach odbłaskowych i w jubilerstwie.

3.6. Polaryzacja światła

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, co to jest polaryzacja fal i jakiego rodzaju fal dotyczy;
- przekonasz się, w jaki sposób można spolaryzować światło;
- poznasz zastosowania praktyczne zjawiska polaryzacji.

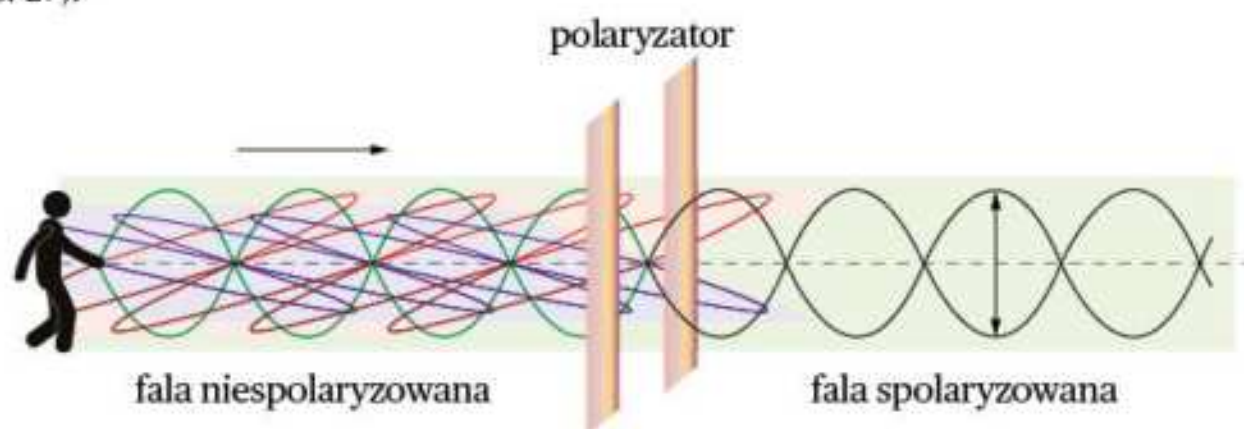
Polaryzacja fal

Doświadczenie 1.

Pomoce: długa sprężyna do demonstracji fal poprzecznych, podłużna szczelina o takiej szerokości, by sprężyna mieściła się w niej bez zacinania się, przygotowana z odpowiednio połączonych listewek.

Sprężynę przewlec przez jedną szczelinę i jej drugi koniec zamocuj do ściany. Może też być trzymana nieruchomo przez drugiego ucznia. Pierwszy koniec wpraw w drgania o różnej amplitudzie i różnych kierunkach. Szczelinę trzymaj nieruchomo.

Obserwacja: Przed szczeliną sprężyna drga w dowolnych płaszczyznach. Za szczeliną sprężyna drga wyłącznie w płaszczyźnie wyznaczonej przez szczelinę (rys. 27).



Rys. 27. Przejście fali niespolaryzowanej przez polaryzator.

Falę, która drga jednocześnie w dowolnych płaszczyznach, nazywamy falą **niespolaryzowaną**. Jeśli płaszczyzna drgań fali jest ściśle określona, to taką falę nazywamy **spolaryzowaną**. Dowolne urządzenie, które przekształca falę niespolaryzowaną



w falę spolaryzowaną nazywamy **polaryzatorem**. W naszym przypadku rolę polaryzatora odgrywa szczelina zbudowana z listewek.

polaryzator

Doświadczenie 2.

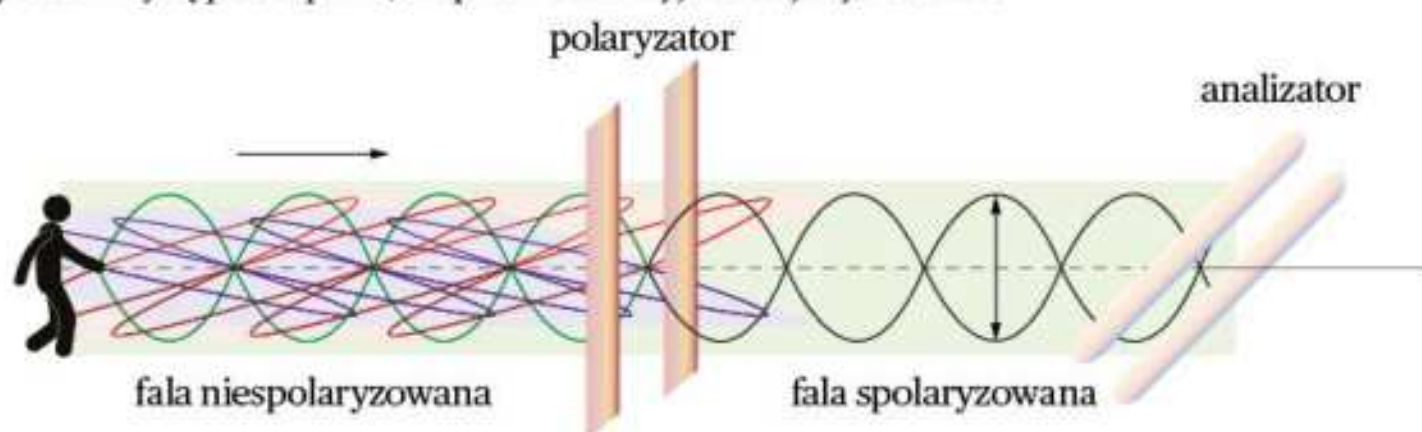
Pomoce: długa sprężyna do demonstracji fal poprzecznych, dwie podłużne szczeliny jak w poprzednim doświadczeniu.

Sprężynę przewlec przez drugą szczelinę (drugi polaryzator) i trzymaj te szczeliny w pewnym oddaleniu równolegle. Jeden koniec sprężyny wpraw w drgania o dowolnym, zmiennym charakterze, drugi koniec pozostaw zamocowany nieruchomo. Obserwuj zachowanie fali po przejściu przez polaryzatory.

Obserwacja: Fala niespolaryzowana po przejściu przez pierwszą szczelinę ulega polaryzacji. Druga szczelina, ustawiona równolegle do pierwszej, nie powoduje żadnych dalszych skutków.

Następnie drugą szczelinę stopniowo przekręcaj w płaszczyźnie pionowej, zwiększając kąt między szczelinami. Obserwuj zachowanie się fali po przejściu przez drugi polaryzator. Doświadczenie kontynuuj do momentu, gdy szczeliny staną się wzajemnie prostopadłe.

Obserwacja: W miarę wzrostu kąta między szczelinami fala wychodząca z drugiego polaryzatora zmienia płaszczyznę drgań, a jej amplituda stopniowo maleje. Gdy szczeliny są prostopadłe, amplituda fali wyjściowej wynosi zero.



Rys. 28. Przejście fali przez dwa polaryzatory skrzyżowane prostopadle.

W doświadczeniu zbadaliśmy działanie polaryzatora na falę już spolaryzowaną. Jeśli polaryzator jest ustawiony w płaszczyźnie polaryzacji fali, nie powoduje żadnych skutków. Fala przechodzi bez przeszkód. Gdy znajduje się pod pewnym kątem, fala ulega osłabieniu. Przechodzi ta składowa fali pierwotnej, która ma kierunek drugiego polaryzatora. Drugim polaryzatorem możemy więc analizować, czy fala jest spolaryzowana, dlatego nazywamy go **analizatorem**.

Doświadczenie 3.

Pomoce: jak w poprzednich doświadczeniach.

W sprężynie wzbudź falę podłużną i obserwuj jej przejście przez polaryzatory.

Obserwacja: Obecność polaryzatorów nie ma wpływu na rozchodzenie się fali podłużnej.

Wniosek: Polaryzacji ulegają wyłącznie fale poprzeczne.



polaryzacja fali

Na podstawie wykonanych eksperymentów możemy sformułować definicję polaryzacji fali.

Polaryzacja fali – uporządkowanie kierunku jej drgań. Polaryzacji ulegają wyłącznie fale poprzeczne.

W doświadczeniu posługiwaliśmy się falą mechaniczną, którą mogliśmy obserwować bezpośrednio. W związku z tym widzieliśmy od razu, czy jest to fala podłużna czy poprzeczna. Ale istnieją fale, których drgań bezpośrednio nie dostrzegamy, na przykład fale dźwiękowe lub elektromagnetyczne. Wprawdzie widzimy światło, ale jest to efekt jego działania na siatkówkę naszego oka – nie widzimy bezpośrednio drgań pola elektrycznego ani magnetycznego i dlatego nie możemy określić ich kierunku. Zbadanie, czy dany rodzaj fali ulega polaryzacji, pozwala zatem rozstrzygnąć, czy dana fala jest podłużna czy poprzeczna.

**Chcesz wiedzieć więcej?**

Aby opisać ilość energii niesionej przez falę w jednostce czasu, posługujemy się pojęciem natężenia fali. Jest to wielkość fizyczna proporcjonalna do kwadratu amplitudy drgań fali. Oznaczamy ją literą I . Posługując się natężeniem, możemy obliczyć, jaką część energii fali przepuszczają polaryzatory ustawione pod różnymi kątami.

Jeśli falę niespolaryzowaną przepuścimy przez pojedynczy polaryzator, osłabi on jej natężenie o połowę, gdyż przejdą tylko składowe drgań zgodne z kierunkiem polaryzatora. Przekręcanie polaryzatora nie zmieni natężenia fali wychodzącej – zmieni się wprawdzie płaszczyzna jej polaryzacji, ale energia przenoszona przez falę w jednostce czasu pozostanie zawsze taka sama, gdyż fala niespolaryzowana ma symetrię obrotową.

Sytuacja zmienia się, gdy polaryzator ustawimy na drodze fali spolaryzowanej. Wtedy natężenie fali wychodzącej I będzie zależało od kąta θ między płaszczyzną polaryzacji fali a kierunkiem polaryzatora zgodnie ze wzorem Malusa:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

I_0 – natężenie fali wchodzącej do polaryzatora

Jak widać, dla kąta $\theta = 90^\circ$ natężenie fali wychodzącej wynosi zero. Aby zbadać, czy dana fala jest spolaryzowana, należy na jej drodze umieścić polaryzator i go przekręcać. Jeśli dostrzeżemy zmiany w natężeniu fali wychodzącej, to znaczy, że fala jest spolaryzowana. Płaszczyznę polaryzacji wskaże kierunek polaryzatora, dla którego wystąpi maksimum natężenia fali wychodzącej.

Światło jako fala poprzeczna**Doświadczenie 4.**

Pomoce: dwa polaryzatory światła.

Patrz na otaczający świat przez polaryzator.

Obserwacja: Można zobaczyć wszystko, lecz obraz jest trochę przyciemniony.

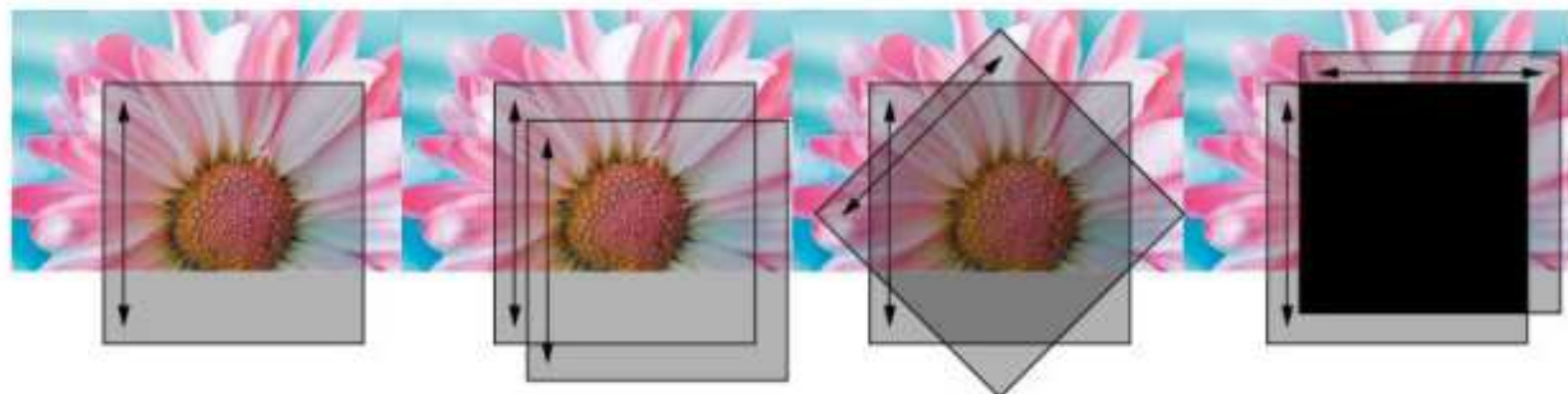


Światło dochodzące do oczu z polaryzatora przepuść przez drugi polaryzator (analizator) ustawiony równolegle do pierwszego.

Obserwacja: Światło przechodzące przez analizator nie zmieniło już swojej intensywności.

Przekręcaj analizator o coraz większy kąt i obserwuj przechodzące przez niego światło.

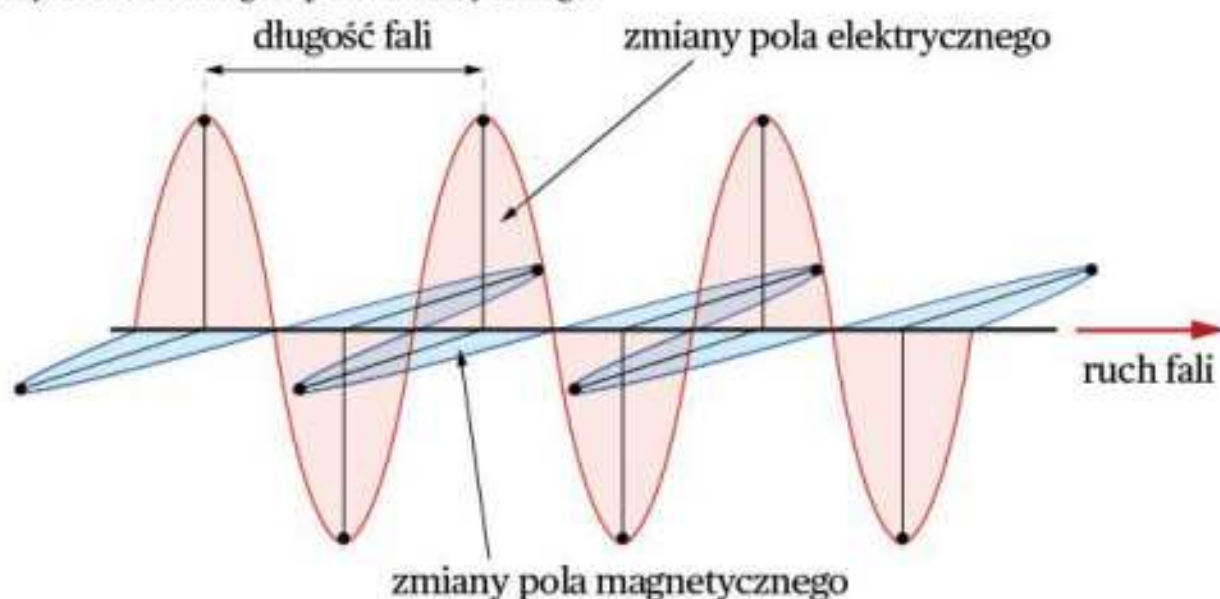
Obserwacja: W miarę zwiększania kąta między polaryzatorem a analizatorem obserwowany obraz ciemnieje, a dla kąta prostego znika całkowicie.



Rys. 29. Świat obserwowany przez polaryzatory: a) pojedynczy polaryzator zmniejsza nieco jasność światła, b) dodanie równolegle skierowanego analizatora nie zmienia obrazu, c) zwiększając kąt między polaryzatorem i analizatorem, osłabiamy wiązkę przechodzącego światła, d) gdy analizator jest prostopadły do polaryzatora, światło nie przechodzi.

Powyższe doświadczenie wykazało, że światło ulega polaryzacji, co dowodzi, że jest **falą poprzeczną**. Zmienne pole elektryczne (podobnie jak zmienny prąd elektryczny) wzbudza wokół siebie zmienne wirowe pole magnetyczne. Zmiany pola magnetycznego wywołują wokół siebie zmiany wirowego pola elektrycznego (dzięki temu, na zasadzie indukcji elektromagnetycznej, zmienne pole magnetyczne wzbudza w otaczającej je cewce prąd elektryczny). Zmiany pola elektrycznego są prostopadłe do zmian pola magnetycznego i rozchodzą się w pustej przestrzeni z prędkością światła w kierunku prostopadłym do kierunków obu tych drgań. Za percepcję światła w oku odpowiada zmienne pole elektryczne wywołujące w receptorach impulsy przewodzone potem do mózgu. Dlatego jako kierunek polaryzacji światła przyjmujemy kierunek drgań pola elektrycznego.

fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną



Rys. 30. Schemat rozprzestrzeniania się zmian pola elektrycznego i pola magnetycznego.



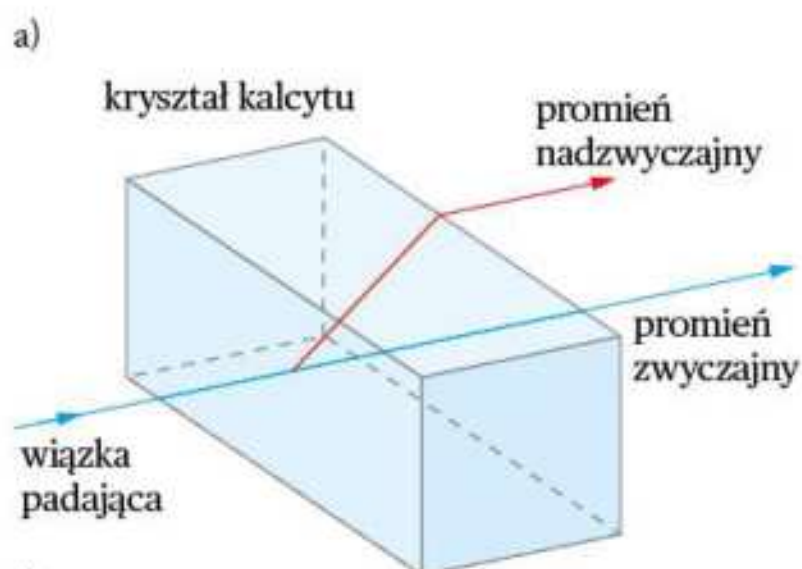
światło
naturalne jest
niespolaryzowane

Pojedyncza fala elektromagnetyczna jest więc spolaryzowana, a kierunek jej polaryzacji jest zgodny z kierunkiem drgań pola elektrycznego. Typowe źródło światła, jak płomień lub żarówka, wysyła we wszystkie strony ogromne ilości takich elementarnych fal, z których każda jest spolaryzowana w innym, zupełnie przypadkowym kierunku. Dlatego jako całość światło nie jest spolaryzowane. Aby dokonać jego polaryzacji, należy zastosować specjalne metody.

Metody polaryzowania światła

Istnieje kilka znanych sposobów polaryzowania światła. Służą do tego **filtry polaryzacyjne**, nazywane potocznie **polaroidami**. Są to błony z tworzyw sztucznych (polimerów) o odpowiednio dobranym składzie chemicznym i rozciągane w wybranym kierunku w procesie zastygania. Dzięki temu włókna polimerowe orientują się w kierunku rozciągania i pełnią podobną funkcję jak listewki w doświadczeniu z polaryzacją fali mechanicznej. Rozmiary włókien są rzędu długości fali światła, przez co filtry absorbują fale o polaryzacji prostopadłej do kierunku ułożenia włókien.

Naturalnymi substancjami polaryzującymi światło są **kryształy dwójłomne**. Są to kryształy, których struktura wewnętrzna sprawia, że światło w różnych kierunkach biegnie w nich z różnymi prędkościami. Dwójłomność jest cechą wielu substancji, na przykład lodu, ale najwyraźniej występuje w takich kryształach, jak kalcyt i turmalin. Światło wpadające do takiego kryształu rozdziela się na dwie wiązki: zwyczajną i nadzwyczajną. Wiązka zwyczajna podlega prawu załamania, natomiast wiązka nadzwyczajna zachowuje się odmiennie. Oba te promienie są spolaryzowane zazwyczaj w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Jeśli promień nadzwyczajny ulega silnemu pochłanianiu (tak się dzieje np. w turmalinie), przez kryształ przechodzi wyłącznie spolaryzowany promień zwyczajny i taki kryształ może pełnić funkcję filtra polaryzacyjnego.



Rys. 31. Kryształy dwójłomne: a) bieg promieni świetlnych w kryształ dwójłomnym, b) fotografia biegu promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego, c) na skutek istnienia dwóch promieni obraz w kryształ dwójłomnym widzimy podwójnie.



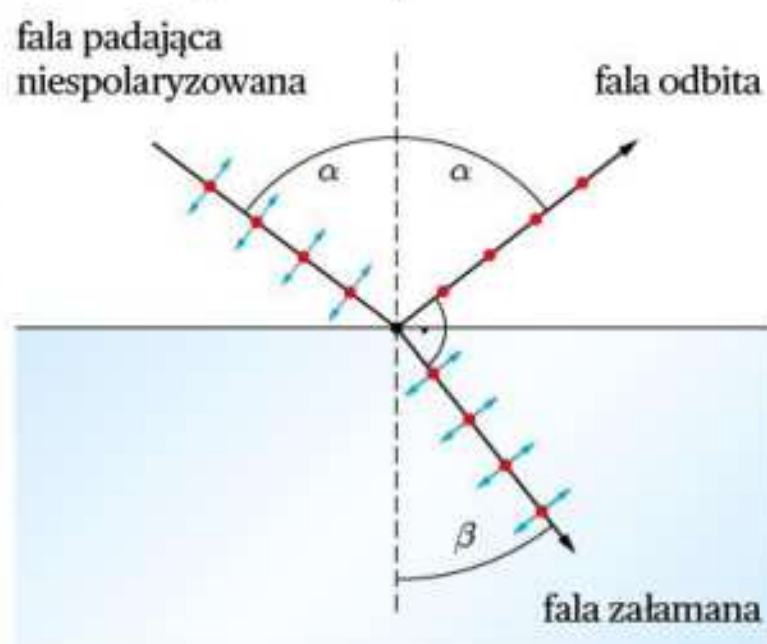
Doświadczenie 5.

Pomoc: filtr polaryzacyjny.

Wybierz jakiś refleks świetlny, na przykład światło słoneczne lub pochodzące od lampy, odbite od blatu ławki albo od podłogi. Spójrz na niego przez filtr polaryzacyjny tak, aby widzieć promienie odbite pod różnymi kątami. Jednocześnie kręć polaroidem.

Obserwacja: Podczas kręcenia polaroidem jasność obrazu się zmienia. Świadczy to o tym, że światło odbite od powierzchni jest częściowo spolaryzowane. Efekt ten jest szczególnie wyraźny dla niektórych kątów padania światła na powierzchnię.

Mamy tutaj do czynienia z polaryzacją przez odbicie. Zachodzi ono, gdy światło odbija się od powierzchni dielektryka (izolatora), na przykład: szkła, wody, lakieru na blacie ławki, gumolitu na podłodze. Okazuje się, że wiązka odbita ulega częściowej polaryzacji, a jej stopień zależy od kąta padania światła na powierzchnię. Największy efekt uzyskujemy przy takim kącie padania, dla którego promień odbity jest prostopadły do załamanego.



Rys. 32. Polaryzacja światła przez odbicie.

Zastosowania polaryzatorów

Doświadczenie 6.

Pomoce: filtr polaryzacyjny, zegarek elektroniczny, ekran smartfonu, monitor komputera.

Spójrz przez polaryzator na świecący ekran zegarka, telefonu i komputera. Obracaj przy tym polaryzatorem. Obserwuj jasność obrazu przechodzącego przez polaroid.

Obserwacja: Jasność światła emitowanego przez ekran ciekłokrystaliczny i przechodzącego przez filtr polaryzacyjny zależy od ustawienia filtra.

Wniosek: Monitory ciekłokrystaliczne emitują światło spolaryzowane.

Do substancji polaryzujących światło należą również **ciekle kryształy**. Jest to stan skupienia, w którym cząsteczki o znacznych długościach są częściowo uporządkowane, lecz mają pewną swobodę ruchu. Na orientację molekuł ciekłego kryształu można wpływać między innymi za pośrednictwem zewnętrznego pola elektrycznego. Dzięki temu, przykładając napięcie do odpowiednich elektrod, można decydować, czy ciekły kryształ ma polaryzować światło, czy też nie. Ta możliwość została wykorzystana w konstrukcji ekranów ciekłokrystalicznych. Ich punkty są jasne lub ciemne w zależności od tego, czy kierunki polaryzacji pozwalają na przejście światła przez warstwy ciekłego kryształu, czy też nie. Poszczególne kolory uzyskuje

zastosowanie
polaryzacji światła



się za pomocą odpowiednich filtrów. **Ekrany ciekłokrystaliczne** są współcześnie najbardziej rozpowszechnionym urządzeniem wyświetlającym obrazy i informacje w urządzeniach elektronicznych.

Filtry polaryzacyjne są powszechnie stosowane w **fotografice**. Ponieważ światło polaryzuje się przez odbicie od powierzchni dielektryków, zastosowanie odpowiednich filtrów polaryzacyjnych pozwala na eliminację szkodliwych refleksów świetlnych i uzyskanie lepszej głębi kolorów. Dotyczy to zwłaszcza fotografii powierzchni wody oraz nieba, z którego dociera do nas światło częściowo spolaryzowane. Zastosowanie polaryzatorów w szybach samochodowych sprawia, że kierowca nie jest oślepiany przez światło odbite od jezdni i dzięki temu lepiej widzi nadjeżdżające samochody, przechodniów i inne przeszkody. Polaryzatory można również zastosować w **okularach**. Dzięki nim widzimy obrazy bardziej kontrastowe i pozbawione niepożądanych refleksów.



Rys. 33. Przykłady eliminacji niepożądanych odbić za pomocą filtrów polaryzacyjnych.

Zjawisko polaryzacji zostało wykorzystane przy wyświetlaniu **obrazów 3D**, na przykład w kinach IMAX. Dwa niezależne projektory rzucają na ekran dwa obrazy o polaryzacji wzajemnie prostopadłej. Taki obraz oglądany nieuzbrojonym okiem jest rozmyty i nieczytelny. Jeśli włożymy okulary wyposażone w dwa ustawione wzajemnie prostopadle polaryzatory, zobaczymy jeden obraz jednym okiem, a drugi – drugim. Obrazy te są tak skonstruowane, by mózg zinterpretował je jako wyświetlane w przestrzeni trójwymiarowej.



Istnieją w przyrodzie substancje, które nazywamy optycznie czynnymi. Należy do nich na przykład roztwór cukru. Jeśli przechodzi przez te substancje światło spolaryzowane, to kierunek polaryzacji zmienia się w sposób zależny od stężenia tej substancji oraz grubości jej warstwy. Dzięki pomiarowi kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji możemy więc wyznaczyć stężenie danej substancji. Urządzenia służące do tych celów nazywamy **polarymetrami**.

Wymieniono tutaj tylko niektóre z wielu zastosowań praktycznych zjawiska polaryzacji.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Przygotuj szczegółową prezentację multimedialną na temat budowy i zasady działania monitora ciekłokrystalicznego. Wyjaśnij rolę polaryzacji światła w tym urządzeniu.
- 2*. Pod jakim kątem należy ustawić analizator względem polaryzatora, aby natężenie światła podczas przechodzenia przez analizator zmalało o połowę?
3. Między dwa polaryzatory skrzyżowane prostopadle wstawiono trzeci, pod kątem 45° względem nich.
 - a) Czy światło będzie przechodzić przez taki układ polaryzatorów? Odpowiedź uzasadnij.
 - b*) Jeśli odpowiedź jest twierdząca, oblicz, ile procent światła, które przeniknęło przez pierwszy polaryzator, przejdzie przez cały układ.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Polaryzacja fali to uporządkowanie kierunku jej drgań. Polaryzacji ulegają wyłącznie fale poprzeczne. s. 142
- Dowolne urządzenie polaryzujące falę nazywamy polaryzatorem. Jeśli do badań używamy dwóch polaryzatorów, to drugi z nich nazywamy analizatorem. s. 141
- Fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi. Drgania pola elektrycznego i magnetycznego odbywają się prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali. Jako kierunek polaryzacji światła przyjmujemy kierunek drgań pola elektrycznego. s. 143
- Światło naturalne jest niespolaryzowane. Światło można spolaryzować m.in. przez zastosowanie filtrów polaryzacyjnych, kryształów dwójłomnych oraz poprzez odbicie od powierzchni dielektryka. s. 144
- Polaryzacja światła znalazła zastosowanie m.in. w ekranach ciekłokrystalicznych, fotografice, okularach, kinach 3D i polarymetrii. s. 145



3.7. Rozszczepienie światła

NA TEJ LEKCJI:

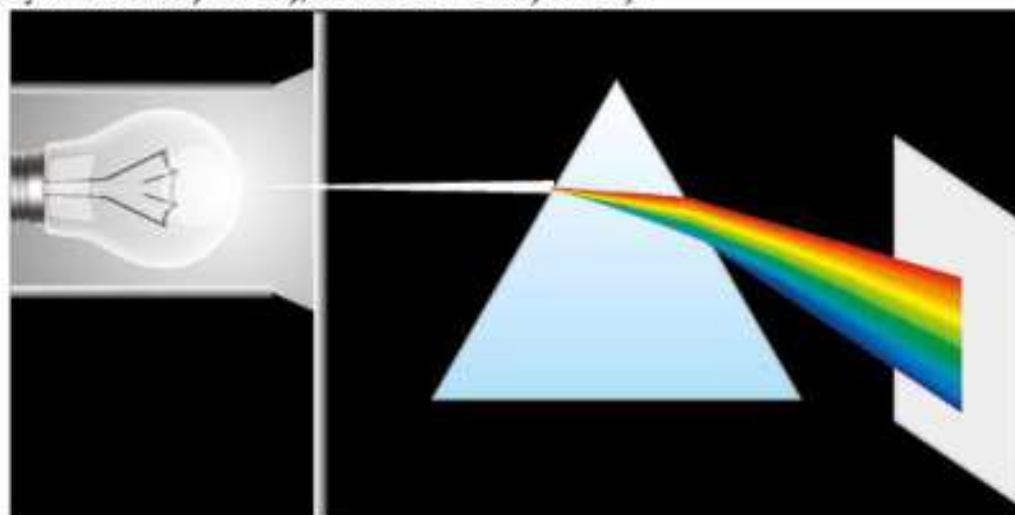
- dowiesz się, czym jest światło białe;
- poznasz metody rozszczepiania światła na poszczególne składowe;
- zrozumiesz mechanizm widzenia barwnego.

Rozszczepienie światła białego w pryzmacie

Doświadczenie 1.

Pomoce: źródło światła białego, np. zwykła żarówka lub Słońce, pryzmat, ekran. Skieruj wąską wiązkę światła białego na pryzmat szklany pod odpowiednim kątem, tak aby światło załamało się w pryzmacie. Światło wychodzące z pryzmatu skieruj na ekran.

Obserwacja: Z pryzmatu wychodzi smuga światła we wszystkich kolorach tęczy. Kolory przechodzą płynnie jeden w drugi w kolejności: czerwony, pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski, granatowy i fioletowy. Światło czerwone załamuje się w pryzmacie najslabiej, a fioletowe najsilniej.



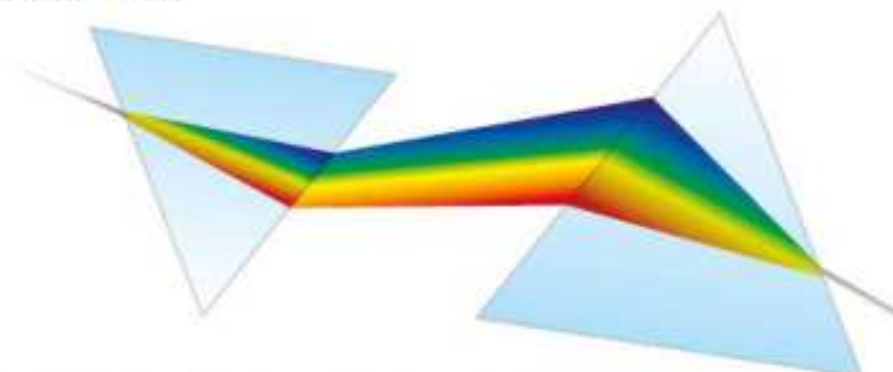
Rys. 34. Rozszczepienie światła żarówki w pryzmacie.

Doświadczenie 2.

Pomoce: źródło światła białego, dwa jednakowe pryzmaty, ekran.

Rozszczep światło białe za pomocą pryzmatu jak w doświadczeniu 1. Światło wychodzące z pierwszego pryzmatu skieruj na drugi ustawiony odwrotnie.

Obserwacja: Światło rozszczepione w pierwszym pryzmacie łączy się w drugim, tworząc światło białe.



Rys. 35. Rozkładanie i składanie światła białego.



Doświadczenie 2 można też wykonać, wykorzystując tak zwany krążek Newtona. Jest to tarcza z sektorami zamalowanymi wszystkimi kolorami tęczy, osadzona na osi i dająca się wprowadzić w ruch obrotowy za pomocą korbki lub silnika elektrycznego.

Doświadczenie 3.

Pomoce: krążek Newtona.

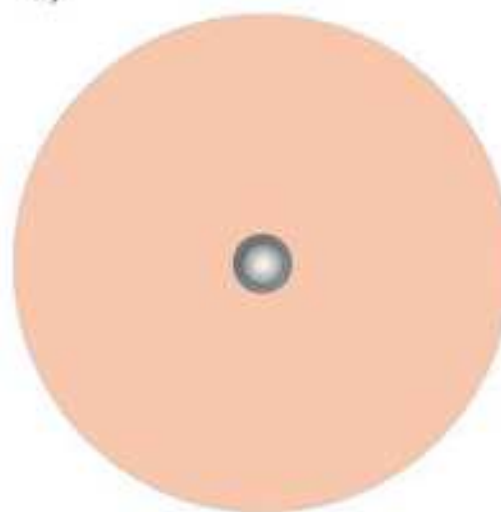
Wpraw krążek Newtona w ruch obrotowy, stopniowo zwiększając jego prędkość. Obserwuj powierzchnię krążka.

Obserwacja: Po przekroczeniu pewnej prędkości kolory namalowane na tarczy zlewają się i tarcza sprawia wrażenie, że jest jednolicie biała.

a)



b)



Rys. 36. Krążek Newtona: a) nieruchomy, b) wirujący.

Wykonane doświadczenia przekonują nas, że światło białe jest mieszaniną wszystkich kolorów tęczy. Proces rozdzielania światła białego na poszczególne składowe nazywamy **rozszczerpieniem** lub **dyspersją**. Można pokazać, że uzyskanych w ten sposób barw składowych nie da się już bardziej rozszczepić. Rozszczepienie jest procesem odwracalnym. Wszystkie kolory tęczy można z powrotem złożyć w światło białe, posługując się drugim pryzmatem lub krążkiem Newtona.

rozszerpienie
światła (dyspersja)

Dlaczego światło białe ulega rozszczepieniu w pryzmacie? Otóż poszczególne kolory tęczy odpowiadają falom o różnej długości i częstotliwości. Okazuje się, że w materialnych ośrodkach przezroczystych prędkości fal świetlnych o różnych częstotliwościach różnią się nieco między sobą. To powoduje, że załamują się w różnym stopniu. Najslabiej załamuje się barwa czerwona, a najsilniej – fioletowa.

Rozszczepienie światła można też przeprowadzić za pomocą **siatki dyfrakcyjnej**, czyli przezroczystej płytki z naciętymi równoległymi mikroskopijnymi rysami nieprzepuszczającymi światła. Przezroczyste obszary między rysami, o grubości porównywalnej z długością fali światła, pełnią funkcję szczelin, na których dochodzi do dyfrakcji i interferencji światła. Z drugiej strony siatki obserwujemy na ekranie obraz interferencyjny w postaci tęczy. Istnieje matematyczny związek między rozmiarami tego obrazu, odległością siatki od ekranu, szerokością szczelin i długością fali światła. Na tej podstawie można zmierzyć długości fali światła dla poszczególnych kolorów. Okazało się, że należą one do przedziału od około 380 nm dla światła fioletowego do około 780 nm dla światła czerwonego.

siatka dyfrakcyjna



światło białe

Światło białe – mieszanina fal elektromagnetycznych o długościach z przedziału 780–380 nanometrów, odpowiadających kolejno barwom: czerwonej, pomarańczowej, żółtej, zielonej, błękitnej, granatowej i fioletowej.

Tab. 1. Barwy składowe tęczy

Barwa	λ , nm	Częstotliwość, THz
czerwona	780–630	385–476
pomarańczowa	630–590	476–508
żółta	590–550	508–545
zielona	550–490	545–612
niebieska	490–440	612–682
fioletowa	440–380	682–789

widmo
promieniowania

Efekt rozkładu dowolnego promieniowania (np. światła) na poszczególne składowe odpowiadające różnym długościom i częstotliwościom fali nazywamy **widmem**. Tęcza jest więc widmem światła białego. Jest to **widmo ciągłe**, co oznacza, że nie ma w nim „dziur”. Fale o wszystkich długościach z pewnego przedziału są w nim reprezentowane i kolory płynnie przechodzą jedne w drugie. Wartości graniczne 780 nm i 380 nm nie wynikają z jakichś przesłanek fizycznych, a jedynie z możliwości percepcyjnych ludzkiego oka. Są to wartości przybliżone i indywidualne dla poszczególnych osób. Różne zwierzęta, zwłaszcza polujące w nocy, dostrzegają również fale o innych długościach, niewidoczne dla człowieka.

Spektroskop

Oprócz widma ciągłego istnieje wiele innych rodzajów widm (będzie o nich mowa na lekcjach fizyki atomowej). Ich badaniem zajmuje się dział nauki i techniki zwany analizą widmową. Podstawowym narzędziem badawczym analizy widmowej jest **spektroskop**.

spektroskop

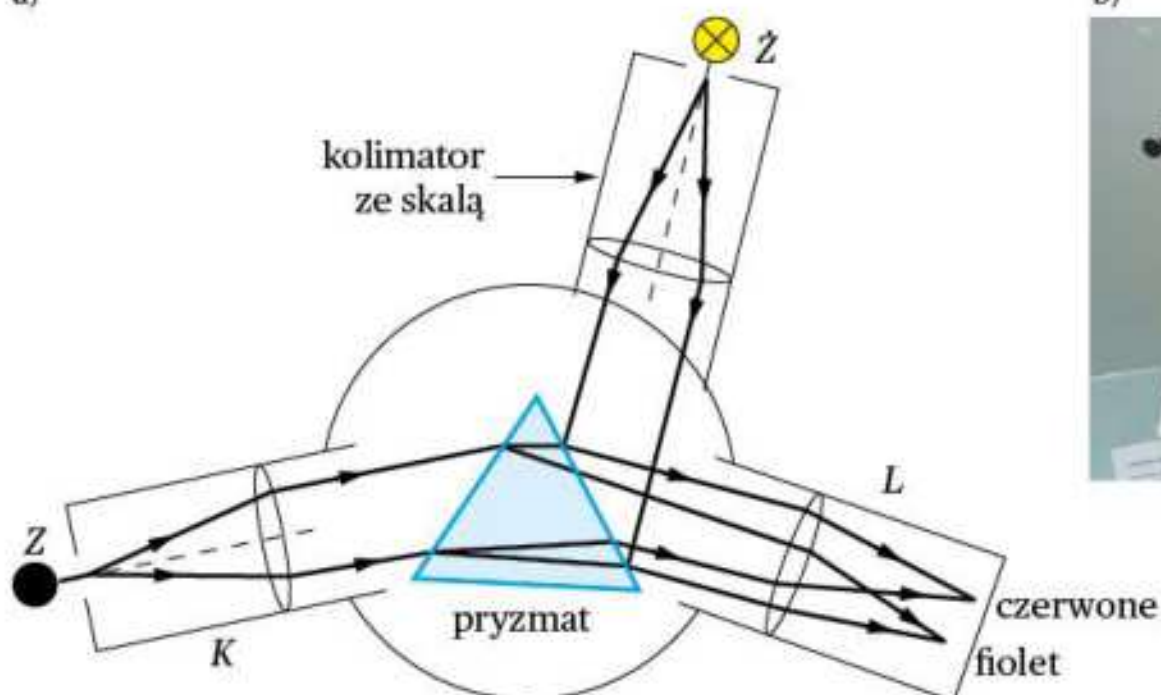
Spektroskop rozszczepia badane światło na elementy składowe i umożliwia wygodną obserwację otrzymanego widma. W centralnej części spektroskopu znajduje się element rozszczepiający światło, najczęściej pryzmat. Światło z badanego źródła do pryzmatu jest doprowadzane za pomocą kolimatora, który rozpoczyna się szczeliną i zawiera soczewki sprawiające, że światło ze źródła biegnie dalej równolegle. Światło rozszczepione w pryzmacie trafia następnie do lunetki, której układ optyczny doprowadza światło do oka obserwatora. Profesjonalne spektroskopy są wyposażone jeszcze w dodatkowy układ, którego zadaniem jest nałożenie skali na obserwowane widmo. Ponieważ fale o różnych długościach załamują się w pryzmacie pod różnymi kątami, wymienione elementy są ruchome i dają się obracać wokół stolika z pryzmatem. Obserwacje widma powinny się odbywać w pomieszczeniach zaciemnionych, aby światło zewnętrzne nie zagłuszało badanego obrazu.



Analogiczne urządzenie, w którym w miejscu obserwacji zamiast oka obserwatora znajduje się urządzenie rejestrujące, na przykład klisza fotograficzna, to **spektrograf**.

spektrograf

a)



b)



Rys. 37. Spektroskop: a) bieg promieni świetlnych. Z – źródło badanego światła, K – kolimator, L – lunetka, Z' – żarówka oświetlająca dodatkowy kolimator ze skalą (element nieobowiązkowy), b) wygląd zewnętrzny.

Widzenie barwne

O tym, że światło białe jest mieszaniną różnych kolorów, możemy się łatwo przekonać, patrząc na biały ekran komputera przez silną lupę. Dostrzeżemy wtedy regularny układ kropek, zwanych plamkami, świecących na czerwono, zielono i niebiesko. Światło emitowane przez wszystkie plamki z maksymalną intensywnością zlewają się w naszym oku, dając wrażenie światła białego. Deficyt któregoś z kolorów składowych daje wrażenie barwy dopełniającej. Kolor czarny (brak światła) postrzegamy wtedy, gdy wszystkie plamki na danym obszarze są wygaszone. Opisany schemat składania barw nazywamy w skrócie RGB (z ang. *red* – czerwony, *green* – zielony, *blue* – niebieski). Mieszając w odpowiednich proporcjach składowe RGB, można uzyskać miliony kolorów dostępnych na współczesnych monitorach.

światło białe
na ekranie



Rys. 38. Składanie barw RGB.

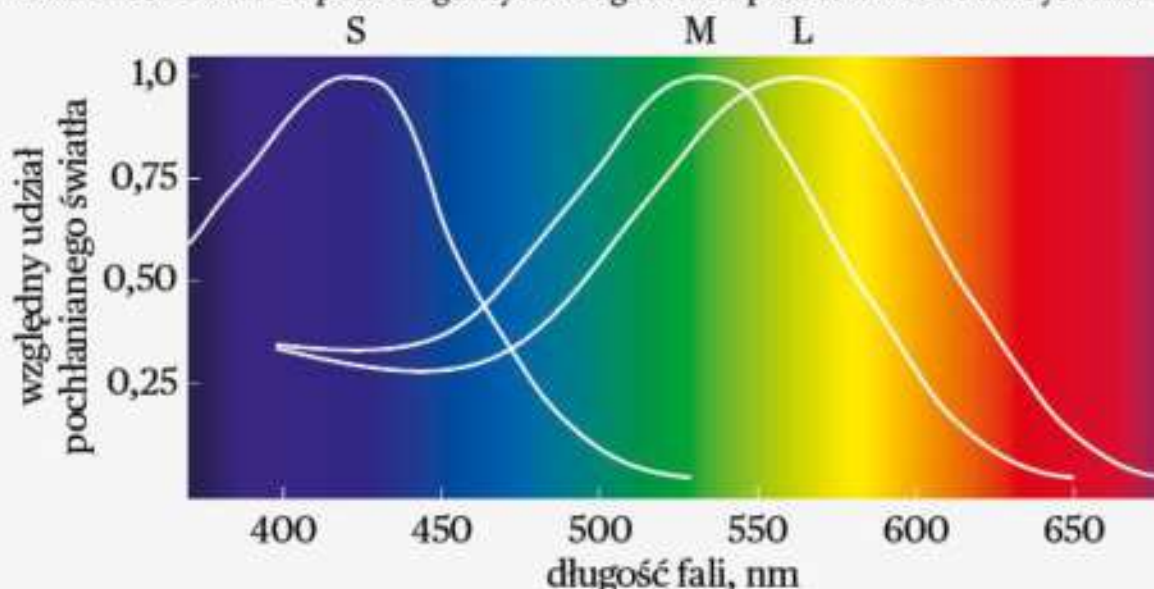
właściwości
ludzkiego oka

Metoda RGB opiera się na właściwościach ludzkiego oka. Za rozróżnianie kolorów odpowiadają receptory znajdujące się na siatkówce naszego oka, zwane czopkami. Są one trojakiiego rodzaju, a każdy z nich reaguje najbardziej na fale odpowiadające innej barwie podstawowej. Intensywność bodźców odbieranych przez poszczególne rodzaje czopków jest następnie przetwarzana przez mózg, w efekcie czego powstaje w naszej świadomości wrażenie barwy.



Chcesz wiedzieć więcej?

W oku ludzkim znajduje się około 4,5 miliona czopków rozmieszczonych w nieregularnych skupiskach, przy czym najmniej jest czopków reagujących na barwę niebieską. Ich wrażliwość na fale o poszczególnych długościach przedstawiono na rysunku 39.



Rys. 39. Wrażliwość czopków w ludzkim oku na fale o różnych długościach: S – czułość czopków reagujących na fale krótkie, M – na średnie, L – na długie.

Niektórzy ludzie rodzą się z dysfunkcją niektórych rodzajów czopków, co jest przyczyną tak zwanej ślepoty barw (daltonizmu) – brakiem umiejętności rozróżnienia niektórych kolorów. Istnieje wiele odmian tej choroby, zależnych od stopnia upośledzenia poszczególnych rodzajów czopków.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wykorzystaj długości fal podane w tabeli, aby obliczyć częstotliwości fal świetlnych odpowiadających skrajnej czerwieni i skrajnemu fioletowi.
2. Dowiedz się, co to jest tetrachromatyzm i przygotuj krótką wypowiedź na ten temat.
- 3*. Dowiedz się, co to jest afakia i przygotuj krótką wypowiedź na temat jej wpływu na postrzeganie barw.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 149 • Rozszczepienie światła (dyspersja) to proces rozdzielania światła na poszczególne składowe odpowiadające różnym długościom fal.
- s. 149 • Rozszczepienia można dokonać za pomocą pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej.
- s. 150 • Efektem rozkładu dowolnego promieniowania na składowe jest widmo tego promieniowania.
- s. 150 • Światło białe jest mieszaniną wszystkich kolorów tęczy i ma widmo ciągłe – występują w nim wszystkie fale elektromagnetyczne o długościach z zakresu od około 380 nm do około 780 nm.
- s. 150 • Do obserwacji widma światła służy spektroskop, a do jego rejestracji – spektrograf.



- Fakt, że światło białe jest mieszaniną barw składowych wykorzystujemy w konstrukcji monitorów. s. 151
- Oko ludzkie rozróżnia barwy, analizując siłę bodźców działających na czopki reagujących na różne składowe widma światła. s. 151

3.8. Zjawiska optyczne w przyrodzie

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz mechanizm powstawania tęczy;
- dowiesz się, dlaczego niebo za dnia wydaje się niebieskie, a wieczorem – czerwone;
- zrozumiesz mechanizm powstawania złudzeń optycznych typu fatamorgana;
- dowiesz się, dlaczego bańki mydlane, łuski ryb i muszle mienią się wszystkimi kolorami.

Tęcza

Tęcza jest jednym z najbardziej widowiskowych zjawisk w przyrodzie. Ilekroć się pojawi, zawsze wzbudza zainteresowanie i zachwyt. W warunkach naturalnych pojawia się wtedy, gdy za obserwatorem świeci Słońce, a przed nim w powietrzu znajdują się krople wody pochodzące z deszczu, bryzy w okolicy wodospadu czy fontanny. W każdy słoneczny dzień możemy ją stworzyć, stojąc plecami do Słońca i rozpryskując przed sobą wodę.

tęcza

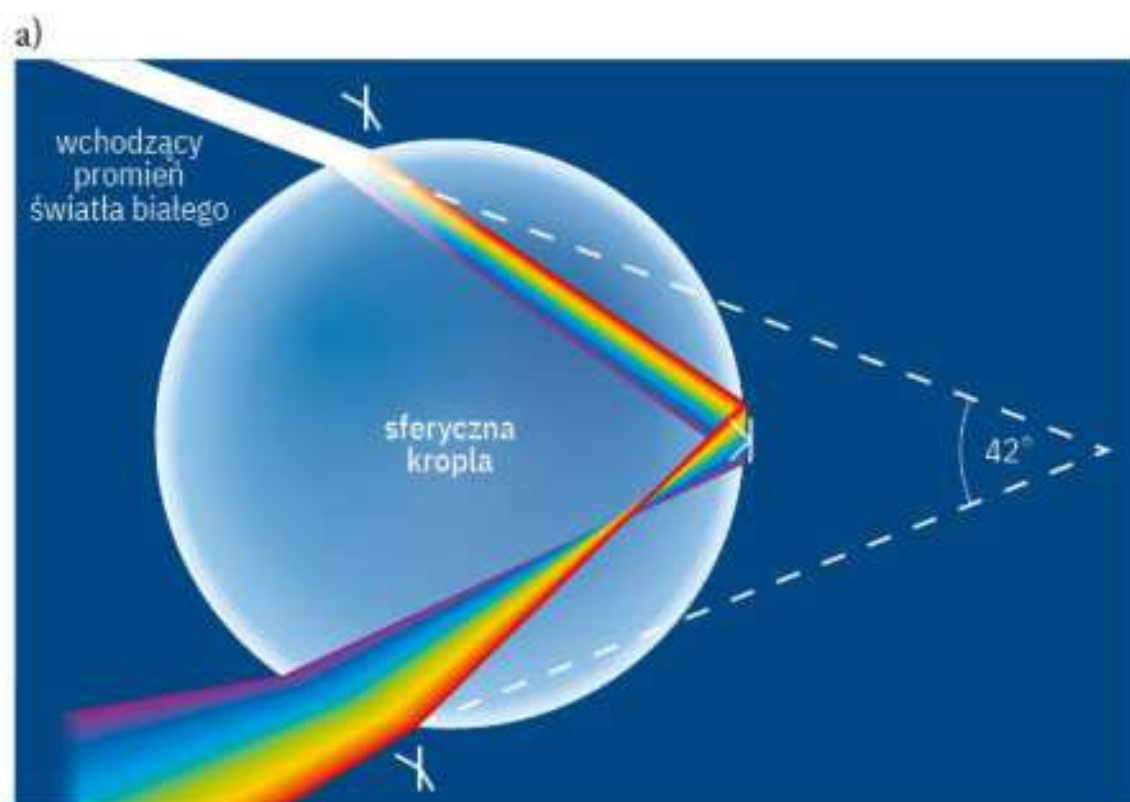
a)



b)



Rys. 40. Tęcza: a) na horyzoncie spowodowana deszczem, b) w kroplach wody z węża ogrodowego.



Rys. 41. Mechanizm powstawania tęczy: a) głównej, b) wtórnej.

tęcza to łuk okręgu
widoczny pod
kątem około 42°

Tęcza jest zjawiskiem optycznym wywołanym rozszczepieniem światła słonecznego odbijającego się i załamującego w licznych kroplach wody znajdujących się z jakiegoś powodu w powietrzu. Zazwyczaj obserwujemy tak zwaną tęczę główną, ale czasami towarzyszą jej tęcze dodatkowe. Najlepsze warunki do obserwacji tęczy występują wtedy, gdy Słońce znajduje się nisko nad horyzontem, światło słoneczne jest jasne i nierozpro-

szone, a tło – ciemne, co jest spowodowane na przykład intensywnymi opadami. Gdy Słońce znajduje się wyżej niż 40° nad horyzontem, tęczę widać tylko wtedy, gdy krople, w których powstaje, znajdują się poniżej horyzontu.

Mechanizm powstawania tęczy wyjaśniono na rysunku 41. Światło białe, wchodząc do kropli, ulega załamaniu, potem odbiciu od przeciwległej strony kropli, a następnie powtórnemu załamaniu podczas wychodzenia z kropli. Kąt załamania nie zależy od wielkości kropli, ale od jej kształtu oraz od długości fali świetlnej, w wyniku czego dochodzi do rozszczepienia światła podobnie jak w pryzmacie. Wszystkie oświetlone krople, przy założeniu, że są idealnie kuliste, rozszczepiają i odbijają światło w ten sam sposób, ale do oka obserwatora dociera tylko światło biegnące w jego kierunku. Po wewnętrznej stronie tęczy występuje barwa fioletowa.

Maksimum jej intensywności występuje pod kątem $40,3^\circ$ względem kierunku padającego światła białego. Po zewnętrznej stronie tęczy znajduje się barwa czerwona, dla której ten kąt wynosi 42° . Tęczę widzimy więc zawsze jako łuk okręgu, którego promień jest widoczny pod kątem około 42° . W sprzyjających okolicznościach, gdy na przykład lecimy samolotem lub obserwujemy wodospad ze szczytu góry i krople występują w szerokim polu widzenia, możemy zobaczyć całą tęczę w postaci pełnego okręgu.

Tęcze wtórne, o ile występują, są zazwyczaj o wiele słabiej widoczne. Powstają pod innymi kątami w wyniku wielokrotnych odbić światła wewnątrz kropli.



Kolor nieba

Doświadczenie

Pomoce: szeroka zlewka, woda, olej jadalny, płyn do mycia naczyń, laser czerwony, laser zielony.

Nalej wody do zlewki. Skieruj w stronę zlewki poziomo promień światła lasera czerwonego.

Obserwacja: Promień jest niemal niewidoczny. Widać tylko punkciki świetlne na granicy ze szkłem.

Skieruj przez zlewkę z wodą promień lasera zielonego.

Obserwacja: Promień jest słabo widoczny.

a)



b)



c)



d)



Rys. 42. Rozpraszanie światła: a) laser czerwony w czystej wodzie, b) laser zielony w czystej wodzie, c) laser czerwony w roztworze koloidalnym, d) laser zielony w roztworze koloidalnym.

Dodaj do wody niewielką ilość oleju i płynu do mycia naczyń. Całość dokładnie wymieszaj. Powstaje w ten sposób tzw. roztwór koloidalny, będący czymś pośrednim między zwykłym roztworem a zawiesiną. Roztwór koloidalny sprawia wrażenie cieczy jednorodnej, jednak zawiera elementy rozpraszające, w tym przypadku kropelki oleju, o rozmiarach znacznie przekraczających rozmiary typowych cząsteczek chemicznych.

Skieruj na otrzymany roztwór promień światła laserowego: najpierw czerwonego, a następnie zielonego.

Obserwacja: Promień jest teraz dobrze widoczny i towarzyszy mu poświata w całej objętości cieczy. W przypadku światła zielonego efekt jest wyraźniejszy niż dla światła czerwonego.

rozpraszanie
światła

Zaobserwowane zjawisko to **rozpraszanie światła**. Jest to zjawisko oddziaływania światła z materią powodujące przypadkowe zmiany kierunku rozchodzenia się poszczególnych fal. Wywołuje złudzenie świecenia ośrodka, w którym rozchodzi się światło.

Mechanizm rozpraszania światła jest wieloraki i bardzo skomplikowany, dlatego porzucimy na stwierdzeniu, że:

- światło o krótszych falach ulega silniejszemu rozproszeniu niż światło o dłuższych falach, dlatego zielony promień lasera był lepiej widoczny w ośrodku niż promień czerwony;
- rozpraszanie światła jest tym silniejsze, im więcej zanieczyszczeń znajduje się w ośrodku, dlatego roztwór koloidalny bardziej rozpraszał światło lasera niż czysta woda.

kolor nieba

Stwierdzono, że rozproszenie światła zachodzi również na cząsteczkach znacznie mniejszych od długości fali światła, na przykład na cząsteczkach azotu i tlenu znajdujących się w ziemskiej atmosferze. To tłumaczy, dlaczego niebo ma kolor taki, jaki widzimy.

Gdyby Ziemia była pozbawiona atmosfery, niebo byłoby czarne i widzielibyśmy gwiazdy również w dzień. Taki widok mają kosmonauci przebywający na orbicie. Gdy atmosfera jest zamglona lub zanieczyszczona, na przykład smogiem, kolor nieba jest biały lub szary. Fale światła słonecznego o wszystkich długościach są wtedy rozpraszane w równym stopniu i kolor światła rozproszonego jest taki sam jak kolor światła padającego, czyli biały.

W przypadku czystego nieba doświadczamy selektywnego rozpraszania poszczególnych składowych światła białego na cząsteczkach atmosfery. Rozpraszanie jest silniejsze dla fal krótszych, czyli niebieskich i fioletowych. Jeśli więc nie patrzymy wprost na Słońce, widzimy tę część światła, która uległa silniejszemu rozproszeniu i dlatego dociera do nas z innego kierunku niż Słońce. Atmosfera świeci dla nas na niebiesko, gdyż czułość ludzkiego oka na barwę fioletową jest mniejsza niż na barwę niebieską (mamy czopki reagujące wprost na kolor niebieski, a nie fioletowy). Ponadto udział składowej fioletowej w widmie światła słonecznego jest mniejszy niż barwy niebieskiej.

Podczas wschodu lub zachodu Słońca promienie słoneczne biegną niemal równolegle do powierzchni Ziemi i muszą przebyć długą drogę w atmosferze, zanim dotrą do naszego oka. Składowe o krótszych falach ulegają przez to znacznemu rozproszeniu, a do obserwatora docierają wprost ze Słońca fale najmniej rozproszone, o największej długości, czyli czerwone. W podobny sposób świecą obszary nieba przylegające bezpośrednio do Słońca. W okolicach zenitu i linii łączącej na niebie północ z południem niebo pozostaje niebieskie, gdyż docierają stamtąd promienie rozproszone prostopadle do pierwotnego ich biegu ze Słońca.



a)



b)



Rys. 43. Widok nieba: a) w ciągu dnia, b) podczas zachodu Słońca.

Miraże

Na obszarach, na których temperatura powietrza, a więc i jego gęstość, silnie zmienia się wraz z wysokością, często mamy do czynienia z **mirażem**, zwanym też **fatamorganą**. Płynna zmiana gęstości powietrza powoduje płynną zmianę prędkości rozchodzącego się w nim światła, przez co światło porusza się po liniach krzywych. Jeśli teren jest mocno nagrzany, na przykład na pustyniach lub drogach asfaltowych, powietrze tuż przy gruncie jest najbardziej nagrzane i ochładza się wraz z wysokością. Z tego też powodu światło ma tendencję do odginania się ku górze. Patrząc na wprost na rozgrzany asfalt widzimy wtedy promienie świetlne wyemitowane z nieba i sprawiające wrażenie kałuż. Jest to tak zwany miraż dolny. Jest on szczególnie zwodniczy na pustyni. Wędrowcy widzą daleko na piasku zbiorniki wodne, które po zbliżeniu się znikają, gdyż jest to zwykle odbicie nieba.

miraż
(fatamorgana)

Przy odwrotnym rozkładzie temperatury może powstać miraż górny. Zdarza się to na ogół nad zbiornikami chłodnej wody, nad którymi występuje powietrze o temperaturze rosnącej wraz z wysokością. Promienie świetlne zakrzywiają się wtedy ku dołowi. Patrząc na przykład na statek, ujrzymy go w miejscu, skąd pochodzą przedłużenia promieni wpadających do naszego oka, a więc nad horyzontem. Odległe przedmioty, budynki i góry zdają się unosić w powietrzu. Widzimy je w zupełnie innych miejscach, niż są naprawdę.

a)



b)



Rys. 44. Miraż: a) dolny, b) górny.



Chcesz wiedzieć więcej?

Zjawiska związane z interferencją

Gdy spojrzymy na bańkę mydlaną, kroplę benzyny rozlanej na powierzchni wody lub wewnętrzną powierzchnię muszli małża, dostrzeżemy, że mienia się one wszystkimi kolorami tęczy. Zjawisko to nazywamy **iryzacją**, a jego przyczyną jest **interferencja fal świetlnych** odbitych od powierzchni cienkich warstw.

a)



b)



c)



Rys. 45. Iryzacja w: a) bańce mydlanej, b) kropli benzyny, c) atmosferze.

Gdy światło odbija się od granic cienkich błon lub innych przezroczystych struktur o grubościach rzędu długości fali światła, dochodzi do interferencji – jak podczas przechodzenia światła przez blisko położone szczeliny. Fale odbite od kolejnych warstw mają do pokonania nieco inną drogę, a różnica ta zależy od kąta padania światła. Dodatkowo podczas odbicia od powierzchni wewnętrznej, fala świetlna zmienia fazę. W miejscach, gdzie spełniony będzie warunek wzmocnienia dla konkretnej długości fali, zobaczymy refleks świetlny o odpowiednim kolorze. Zmieniając kąt patrzenia, natrafiamy na obszary, w których warunek wzmocnienia jest spełniony dla fal o innej długości, dlatego kolory się zmieniają. Na zmianę kolorów ma też wpływ zmiana grubości warstwy, na przykład błonki w bańce mydlanej. Iryzację można zauważyć na płytach CD, skrzydłach motyli, pancerzach owadów i łuskach gadów mieniących się różnymi barwami. Występuje ona także na powierzchni wielu mineralów. Można ją wywołać też sztucznie w celach zdobniczych na wyrobach szklanych i ceramicznych. Szkło pokryte cienką warstwą materiału przezroczystego o innym współczynniku załamania zachowuje przezroczystość, natomiast mieni się światło odbite od jego powierzchni.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego czasami widzimy tylko fragment łuku tęczy.
2. Czy można zobaczyć tęczę, patrząc w stronę Słońca? Odpowiedź uzasadnij.
3. Wymień czynniki, od których zależy stopień rozpraszania światła.
4. Czy w przestrzeni kosmicznej można zobaczyć promień lasera „z boku”? Odpowiedź uzasadnij.
5. Narysuj w zeszycie bieg promieni świetlnych wyjaśniający mechanizm powstawania mirażu dolnego i górnego.
- 6*. Wyjaśnij, dlaczego skrzydła niektórych owadów błyszczą w różnych kolorach tęczy.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Tęcza powstaje w wyniku dwukrotnego załamania i przynajmniej jednokrotnego odbicia światła od kropeł wody zawieszonych w powietrzu. s. 153
- Tęcza jest widoczna po przeciwnej stronie niż Słońce, zawsze pod kątem około 42° . s. 154
- Światło przechodzące przez ośrodek materialny podlega rozpraszaniu. Jest ono tym silniejsze, im krótsza jest długość fali i większa niejednorodność materiału. s. 156
- Kolor nieba jest wynikiem rozpraszania promieni słonecznych w atmosferze. s. 156
- Miraże (fatamorgana) są skutkiem zakrzywienia promieni świetlnych w powietrzu nierównomiernie nagrzanym, np. nad powierzchnią pustyni lub zbiornika wodnego. s. 157



Analiza tekstu: Zjawiska optyczne w przyrodzie

Danuta Majewska, *Zjawiska optyczne w przyrodzie*

[...] W wyniku dyfrakcji i odbicia światła na kroplach wody lub kryształkach lodu spotyka się w przyrodzie kolejne zjawisko optyczne zwane GLORIĄ. Polega ono na wystąpieniu barwnych pierścieni wokół cienia człowieka widocznego na tle np. chmury, mgły. Barwy rozłożone są tak, że pierścień niebieski ma średnicę mniejszą od czerwonego. Zjawisko to występuje często w górach bądź w czasie lotów samolotem nad chmurami.



Rys. 46. Zjawisko optyczne gloria.

Zjawisko to daje efekt pozornego powiększenia cienia człowieka. Jeśli człowiek poruszy rękoma, wtedy widmo także je powtórzy. Ruch ten jest wolniejszy, ale sprawia, że razem z cieniem przypomina machającego skrzydłami anioła.



Rys. 47. Zjawisko optyczne widmo Brockenu.

Gloria wizualnie podobna jest do kolorowego wieńca i powstaje dookoła punktu. Możemy zaobserwować ją wokół cienia naszej głowy wytworzonego przez Słońce na zroszonej trawie w wyniku odbicia światła na kropelkach rosy, wokół samolotu [...].

Rzadkie zjawisko optyczne spotykane w wysokich górach to WIDMO BROCKENU. Jeśli poniżej miejsca, w którym znajduje się człowiek, rozciągają się chmury, a za jego plecami Słońce jest nisko, to na powłoce chmur rozciąga się ogromny cień człowieka, którego głowa może być otoczona barwną aureolą (gloria).

Zjawisko zwane widmem Brockenu jest bardzo widowiskowe i niezwykle rzadkie, a ciekawostką jest fakt, że może zaobserwować je tylko osoba, której cień został rzucony na chmurę.

[...]

Inne zjawisko optyczne obserwowane wokół tarczy słonecznej lub księżycowej występujące w atmosferze ziemskiej to HALO. Jest to pierścień świetlisty, biały lub zawierający tęcze kolory, wewnątrz czerwony, na zewnątrz fioletowy. Zjawisko to wywołane jest załamaniem na kryształkach lodu i odbiciem wewnątrz kryształów lodu znajdujących się



w chmurach pierzastych piętra wysokiego lub we mgle lodowej. Gdy obserwator znajduje się np. w samolocie, nad powierzchnią Ziemi, może zobaczyć jasną plamę poniżej Słońca, która jest skutkiem odbijania się promieni słonecznych od górnych powierzchni płaskich kryształków lodu. Tworzy się w ten sposób pozorny obraz Słońca poniżej horyzontu, tzw. podsłońce. Gdy promienie słoneczne załamują się na kryształkach lodu w kształcie sześciokątnych płytek, to po jednej lub częściej po obu stronach powstają słońca poboczne [...].

Jeśli jest zimno, to w atmosferze powstaje większa ilość cząsteczek lodu i wtedy coraz częściej można zaobserwować różne interesujące zjawiska optyczne, takie jak ww. halo słoneczne albo słońca poboczne.

Zjawisko powstałe w wyniku odbicia światła, pochodzącego od nisko położonego Słońca, od powierzchni kryształów lodu w kształcie płatków, które zostały uporządkowane swobodnym opadaniem, określamy jako **SŁUP SŁONECZNY**. Polega na ukazaniu się kolumny świetlnej pod zachodzącym Słońcem, na ogół o zabarwieniu czerwonym, pochodzącym od zachodzącego Słońca. Zjawisko to można zaobserwować tuż przed wschodem Słońca lub tuż po zachodzie. Słup światła występuje przy chmurach typu Cirrus i Altocumulus. Słupy świetlne bywają także czasami widoczne podczas bezwietrznej, mroźnej pogody nad latarniami. Pojawienie się tych słupów związane jest z odbiciem promieni od ścian unoszących się w powietrzu kryształków lodu.

Podczas załamania światła w kryształkach lodu o kształcie płytki zawartych w chmurach pierzastych tworzy się **ŁUK OKOŁOHORYZONTALNY**. Promień słoneczny wchodzący z bocznej powierzchni płytki położonej poziomo załamuje się i wychodzi dolną powierzchnią. Łuk ten obserwowany bywa na średnich szerokościach geograficznych, a nigdy na dużych, w Polsce spotyka się go rzadko od połowy maja do początku sierpnia. Występuje w postaci położonego blisko horyzontu i niemal równoległego do niego barwnego łuku z kolorem czerwonym u góry [...].



Rys. 48. Zjawisko optyczne *halo*.



Rys. 49. Zjawisko optyczne *słup słoneczny*.



Rys. 50. Zjawisko optyczne *łuk okołohoryzontalny*.

Rys. 51. Zjawisko optyczne *wieniec*.

Jeśli warstwa półprzezroczystych cienkich chmur zbudowanych z drobnych kropelek wody przesłania Słońce czy Księżyc lub warstwa mgły występuje dookoła sztucznych źródeł światła, to obserwujemy zjawisko optyczne zwane WIENCEM. Ma on postać barwnej poświaty, przy czym od strony źródła światła występuje zabarwienie niebieskie, a na zewnątrz czerwone. Poświata jest często otoczona słabo zabarwionymi pierścieniami o tym samym układzie barw [...].

Wienice powstają wskutek dyfrakcji światła w warstwach chmur lub mgły. Światło zostaje ugięte przez drobne kropelki chmur lub mgły, które tworzą siatkę dyfrakcyjną. Dookoła każdego punktu tarczy ciała niebieskiego powstaje jedno lub kilka widm dyfrakcyjnych mających kształt kręgów. Nakładają się one na siebie, a barwy ich zlewają się, co daje w wyniku odcień niebieskawy, natomiast widma na skrajach tarczy ciała niebieskiego tworzą po zewnętrznej stronie otoczkę pierścienia o zabarwieniu czerwonym.

W wienicach powstających dookoła sztucznych źródeł światła, które mają małe rozmiary w porównaniu z rozmiarami ciał niebieskich, można zauważyć bardziej bogate barwy tęczy. Wienice od halo różnią się mniejszymi rozmiarami oraz odwrotną kolejnością występowania barw.

[...]

Źródło: Danuta Majewska, *Zjawiska optyczne w przyrodzie*,
<https://bezpiecznylink.pl/n7340c>

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wskaż podstawowe zjawiska falowe odpowiedzialne za powstawanie poszczególnych zjawisk przyrodniczych opisanych w powyższym tekście.
2. Wymień substancje znajdujące się w atmosferze, które są niezbędne do wywoływania opisanych zjawisk.
3. Wyjaśnij, dlaczego gloria i widmo Brockenu są widoczne po przeciwnej stronie niż Słońce.
4. Wytłumacz, dlaczego w wienicu kolory występują w odwrotnej kolejności niż w halo.



PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

1. Fala, to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie równowagi ośrodka sprężystego. s. 113
2. Fala jest nośnikiem energii i informacji. Wraz z falą nie przemieszcza się materia. s. 113
3. Wielkości fizyczne opisujące każdą falę to: amplituda, długość, okres, częstotliwość i prędkość. s. 114
4. Kierunek i kształt fali opisuje się za pomocą pojęć: powierzchnia falowa, czoło fali, promień fali. s. 115
5. Istnieje wiele rodzajów fal. Można je podzielić ze względu na naturę, kierunek drgań cząsteczek, wymiar przestrzeni, w której rozchodzi się fala, oraz kształt czoła fali. s. 115
6. Rozchodzeniem się fal rządzi zasada Huygensa, która mówi, że każda cząstka ośrodka pobudzona do drgań przez falę staje się źródłem nowej fali elementarnej. s. 119
7. Ugięcie (inaczej dyfrakcja) to zmiana kształtu czoła fali po przejściu przez przeszkodę. Zjawisko to jest szczególnie widoczne, gdy rozmiary przeszkód, na jakie napotyka fala, są rzędu długości tej fali. s. 120
8. Interferencja to zjawisko nakładania się na siebie fal. Wynika ono z zasady superpozycji. s. 122
9. Gdy fale spotykają się w tych samych fazach, to następuje wzmocnienie interferencyjne. Jeśli w przeciwnych – obserwujemy wygaszenie. s. 123
10. Zjawisko Dopplera polega na zmianie częstotliwości fali odbieranej przez obserwatora, wynikającej z ruchu źródła fali lub obserwatora względem ośrodka, w którym rozchodzi się fala. Dotyczy to wszelkich fal, w szczególności dźwiękowych i elektromagnetycznych. s. 128
11. Gdy źródło i obserwator zbliżają się do siebie, częstotliwość odbierana jest wyższa od nadawanej, a gdy się oddalają – niższa. s. 129
12. Zjawisko Dopplera znalazło liczne zastosowania m.in. w: radarach, przepływomierzach, ultrasonografach dopplerowskich oraz w astronomii. s. 130
13. Całkowite wewnętrzne odbicie to zjawisko całkowitego odbicia promienia biegnącego w ośrodku, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest mniejsza, po dotarciu do granicy z ośrodkiem, w którym prędkość rozchodzenia się światła jest większa, pod kątem większym niż kąt graniczny. s. 136
14. Kątem granicznym nazywamy taki kąt padania, dla którego kąt załamania jest kątem prostym. Wartość kąta granicznego zależy od prędkości światła w stykających się ośrodkach. s. 136
15. Całkowite wewnętrzne odbicie znalazło zastosowanie m.in. w światłowodach, lornetkach, światłokach odblaskowych i w jubilerstwie. s. 137
16. Polaryzacja fali to uporządkowanie kierunku jej drgań. Polaryzacji ulegają wyłącznie fale poprzeczne. s. 142
17. Fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi. Drgania pola elektrycznego i magnetycznego odbywają się prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali. Jako kierunek polaryzacji światła przyjmujemy kierunek drgań pola elektrycznego. s. 143
18. Światło można spolaryzować m.in. przez zastosowanie filtrów polaryzacyjnych, kryształów dwójłomnych oraz poprzez odbicie od powierzchni dielektryka. s. 142
19. Polaryzacja światła znalazła zastosowanie m.in. w ekranach ciekłokrystalicznych, fotografiach, okularach, kinach 3D i polarymetrii. s. 145
20. Rozszczepienie światła (dyspersja) to rozdzielenie światła na poszczególne składowe odpowiadające różnym długościom fal. Dokonać go można za pomocą pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej. s. 149



- s. 150 21. Widmo dowolnego promieniowania to rozkład tego promieniowania na poszczególne składowe odpowiadające różnym długościom fal, częstotliwościom, energiom lub rodzajom cząstek.
- s. 150 22. Światło białe jest mieszaniną wszystkich kolorów tęczy i ma widmo ciągłe – występują w nim wszystkie fale elektromagnetyczne o długościach z zakresu od około 380 nm do około 780 nm i częstotliwościach od 385 THz do 790 THz.
- s. 150 23. Do obserwacji widma światła służy spektroskop, a do jego rejestracji – spektrograf.
- s. 151 24. Fakt, że światło białe jest mieszaniną barw składowych, wykorzystujemy w konstrukcji monitorów.
- s. 151 25. Oko ludzkie rozróżnia barwy, analizując siłę bodźców działających na czopki reagujące na różne składowe widma światła. To dlatego jest możliwe mieszanie barw.
- s. 153 26. Tęcza powstaje w wyniku dwukrotnego załamania i przynajmniej jednokrotnego odbicia światła od kropeł wody zawieszonych w powietrzu. Widoczna jest po przeciwnej stronie niż Słońce, pod kątem około 42° .
- s. 156 27. Światło przechodzące przez ośrodek materialny podlega rozpraszaniu. Jest ono tym silniejsze, im krótsza jest długość fali i większa niejednorodność materiału.
- s. 156 28. Kolor nieba jest wynikiem rozpraszania promieni słonecznych w atmosferze.
- s. 157 29. Miraże (fatamorgany) są skutkiem zakrzywienia promieni świetlnych w powietrzu nierównomiernie nagrzanym, np. nad powierzchnią pustyni lub zbiornika wodnego. Wyróżniamy miraże dolne i górne.



Niemal do końca XIX wieku dominował pogląd, że świat jest zbudowany z atomów, które z założenia są niepodzielne (po grecku $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ – *átomos* oznacza niepodzielny). Nikt nie stawiał sobie zatem pytania, jak atomy są zbudowane. Sytuacja zmieniła się radykalnie pod wpływem odkryć z przełomu XIX i XX wieku. Okazało się, że atomy mają bardzo skomplikowaną strukturę, a do jej opisu nie można wprost zastosować znanych wcześniej praw fizyki. Tak narodziła się nowa, nieznana wcześniej dziedzina nauki – mechanika kwantowa. Obecnie jest ona trzonem całej fizyki współczesnej.

Dopiero zrozumienie struktury atomu pozwoliło wyjaśnić, dlaczego poszczególne pierwiastki mają takie, a nie inne właściwości, dlaczego zachodzą reakcje chemiczne, dlaczego jedne substancje przewodzą prąd elektryczny, a inne nie, jedne są twarde, inne miękkie lub kruche, lekkie lub ciężkie, przezroczyste albo dają się namagnesować. Są to cechy materii, które badano od setek lat, ale dopiero fizyka współczesna pozwoliła zrozumieć ich źródło i istotę.

Najprostsza z metod badania atomów opiera się na analizie światła emitowanego przez atom, dlatego poznawanie fizyki współczesnej rozpoczniemy od zagadnień związanych ze światłem. Następnie omówimy budowę samego atomu oraz zjawisko fotoelektryczne, którego odkrycie i wyjaśnienie stanowiło przełomowy moment w rozwoju całej fizyki.

4. Fizyka atomowa

- ▶ Promieniowanie termiczne
- ▶ Foton i jego właściwości
- ▶ Widma atomowe
- ▶ Model Bohra budowy atomu
- ▶ Zjawisko fotoelektryczne i fotochemiczne
- ▶ Analiza tekstu: Żagiel kosmiczny





4.1. Promieniowanie termiczne

NA TEJ LEKCJI:

- uzupełnisz swoje wiadomości na temat widma promieniowania;
- dowiesz się, dlaczego ciała mają określone kolory;
- zrozumiesz, w jaki sposób rozgrzane ciała emitują energię w formie promieniowania.

Widmo fal elektromagnetycznych

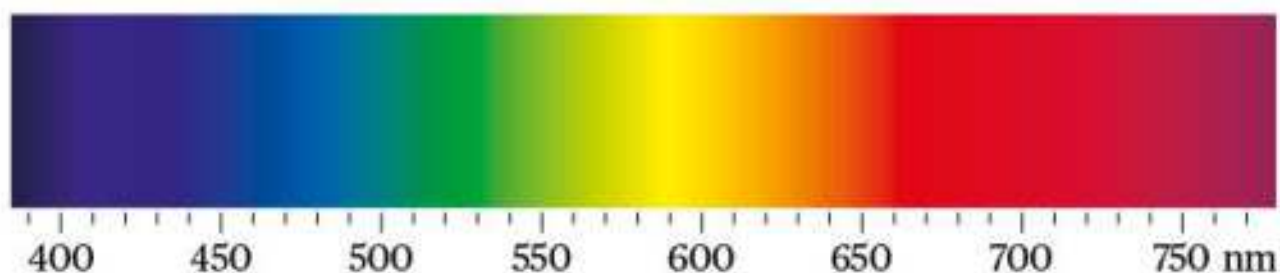
Pojęcie widma znasz już z lekcji dotyczących optyki i analizy rozszczepienia światła. Przypomnijmy:

widmo dowolnego promieniowania

Widmo dowolnego promieniowania – rozkład tego promieniowania na poszczególne składowe ze względu na długości fal, częstotliwości, energie lub rodzaj cząstek.

widmo ciągłe

Widmo może mieć postać na przykład wykresu zależności natężenia fali od częstotliwości („skaczące słupki” na wyświetlaczu sprzętu odtwarzającego muzykę, to widmo emitowanego dźwięku w formie histogramu), opisu słownego lub zdjęcia. Jeśli w widmie nie ma „dziur”, czyli w pewnym zakresie wszystkie długości fal lub częstotliwości są reprezentowane, a wykres ma łagodny przebieg, mówimy, że **widmo jest ciągłe**. Przykładem widma ciągłego jest poznane już widmo światła białego. W sposób opisowy przedstawiono je w tabeli 1 „Barwy składowe tęczy” na stronie 150, a postać wizualną pokazano na rysunku 1.



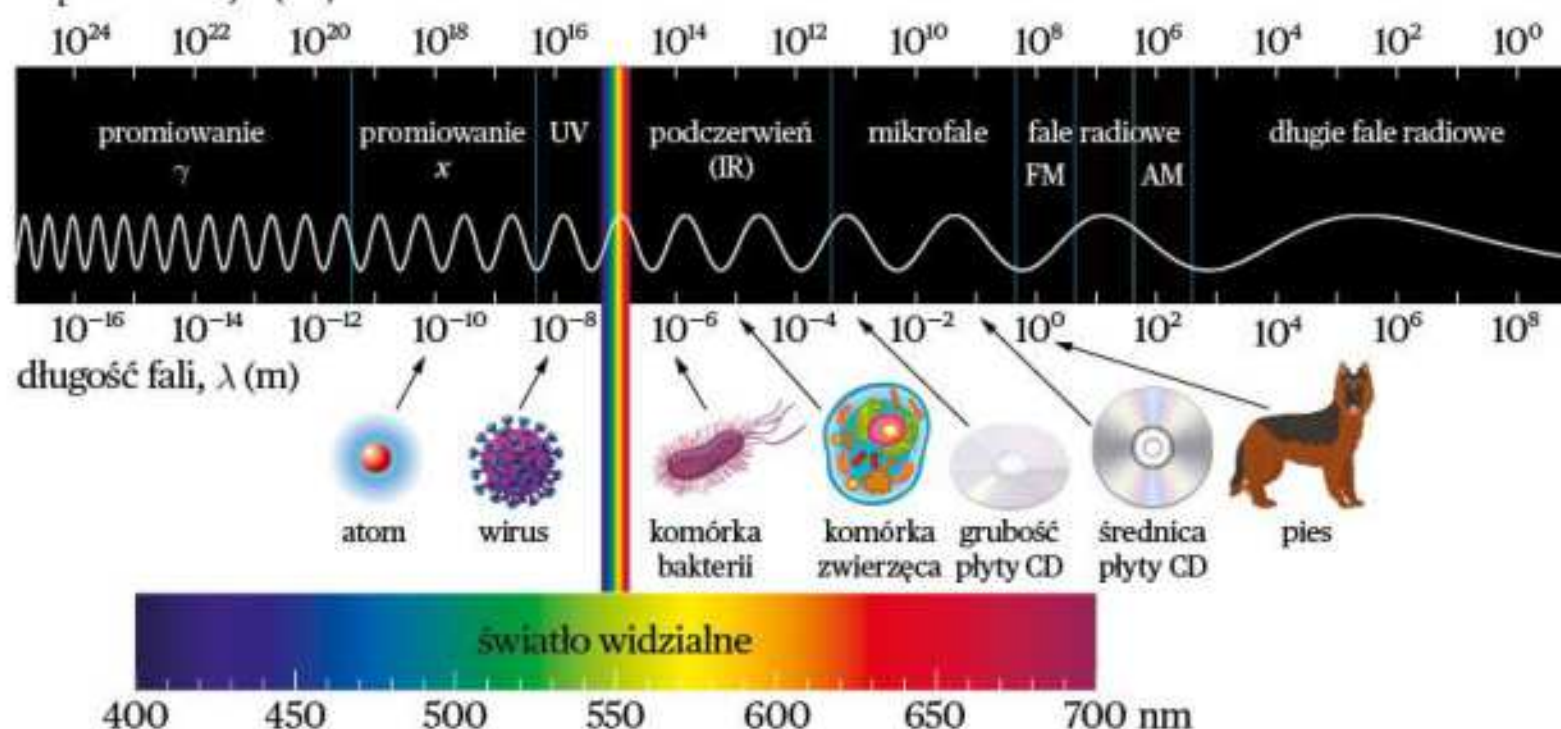
Rys. 1. Widmo światła białego.

Widmo światła widzialnego jest niewielkim fragmentem widma wszelkich fal elektromagnetycznych poznanych w szkole podstawowej. Widmo to nie ma żadnych ograniczeń zakresu długości fali ani częstotliwości. Fale o różnych długościach różnią się sposobem powstawania i zastosowaniami. W związku z tym mają różne nazwy. Od fal najkrótszych do najdłuższych wyróżniamy kolejno: promieniowanie gamma, promieniowanie rentgenowskie, nadfiolet, światło widzialne, podczerwień, mikrofae i fale radiowe. Właściwości tych fal zmieniają się wraz z długością w sposób płynny i nie ma na przykład żadnej różnicy (poza sposobem powstawania) pomiędzy promieniami gamma i promieniami rentgenowskimi o tej samej długości. Tak samo nie ma dużej różnicy między światłem fioletowym i bliskim nadfioletem



oraz między światłem czerwonym i bliską podczerwienią. Właściwości fizyczne tych fal są niemal identyczne, a różnice w nazwach wynikają w tym przypadku jedynie z możliwości percepcyjnych ludzkiego oka.

częstotliwość, ν (Hz)



Rys. 2. Widmo fal elektromagnetycznych – rysunek poglądowy.

Kolory ciał

Dlaczego jedne przedmioty są jasne, a inne ciemne, mimo że zostały oświetlone z jednakową intensywnością? Wyjaśnienie jest proste – ciała jasne odbijają większość padającego na nie światła, a ciała ciemne większość światła pochłaniają. Dotyczy to nie tylko światła widzialnego, lecz także jego sąsiadów w widmie fal elektromagnetycznych – podczerwieni i nadfioletu. Miarą zdolności ciała do pochłaniania padającego na nie promieniowania jest zdolność absorpcyjna.

Zdolność absorpcyjna może być selektywna, czego skutkiem jest występowanie kolorów ciał oświetlonych światłem białym. Jeśli jakiś przedmiot oświetlony światłem białym jest na przykład czerwony, to oznacza, że odbija on fale czerwone, a pochłania wszystkie inne odpowiadające pozostałym kolorom tęczy. Pochłonięte fale będą zwiększać energię wewnętrzną ciała i powodować wzrost jego temperatury.

Ciało całkowicie pochłaniające padające na nie promieniowanie nazywamy **ciałem doskonale czarnym** (lub **promiennikiem zupełnym**). Jest to pewne uproszczenie, jednak w praktyce okazuje się, że wiele ciał spełnia prawa dotyczące ciał doskonale czarnych z dużą dokładnością (w tym Słońce i inne gwiazdy). Z powodu dużej zdolności absorpcyjnej trudno jest chodzić w upalny dzień boso po czarnym asfalcie, a zabrudzony sadzą śnieg topi się w promieniach Słońca szybciej niż czysty.



Promieniowanie emitowane przez rozgrzane ciała

Okazuje się, że ciała czarne nie tylko łatwo pochłaniają energię, lecz także łatwo ją emitują. Miarą ilości energii emitowanej w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni ciała jest tak zwana **zdolność emisyjna**. Emitowanie promieniowania przez rozgrzane ciała jest czymś innym niż świecenie światłem odbitym. Nazywamy je **promieniowaniem termicznym**.

Doświadczenie

Przygotuj dwa termometry o zakresie co najmniej 100°C : jeden z bańką rtęci pomalowaną na białą, a drugi – z pomalowaną na czarno. Zanurz je we wrzącej wodzie i zaczekaj na ustalenie wskazań temperatury. Następnie wyjmij termometry z wody i wytrzyj do sucha (parująca woda pobiera ciepło, co zaburzyłoby wynik). Obserwuj wskazania obu termometrów i zapisuj je co minutę.

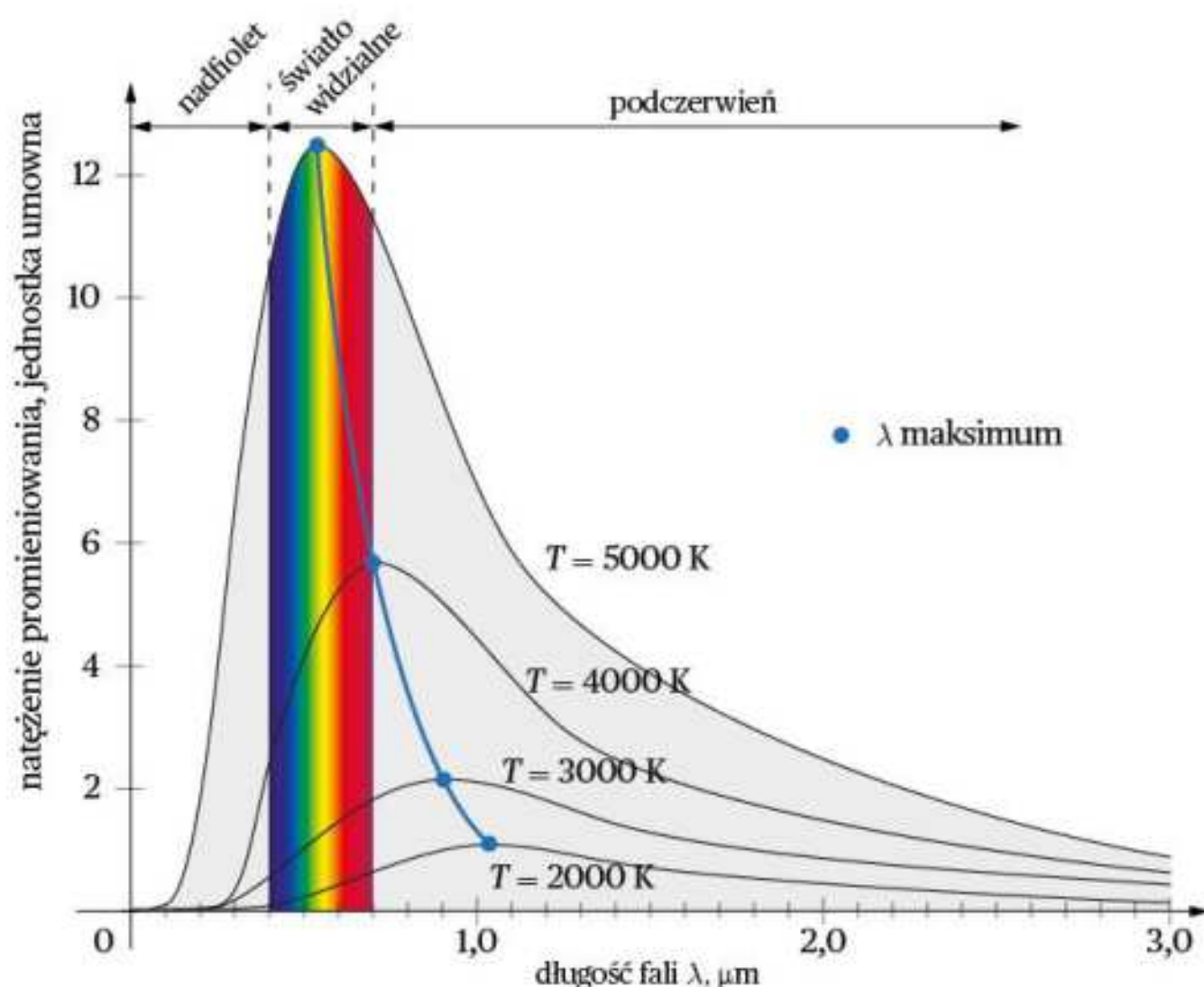
Obserwacja: Czarny termometr stygnie szybciej.

Wynik obserwacji tłumaczymy większą zdolnością emisyjną bańki pomalowanej na czarno. Tak więc zdolność ciała do emitowania energii w postaci promieniowania wiąże się ze zdolnością tego ciała do pochłaniania energii. Odpowiednio rozgrzane ciała czarne będą więc intensywnie świecić.

Aby prześledzić zależność promieniowania ciał od ich temperatury, wyobraź sobie, że siedzisz w całkowicie zaciemnionym pokoju, a przed tobą stoi grzejnik o stopniowo wzrastającej temperaturze. Początkowo nie będziesz nic widzieć, tylko czuć promieniujące ciepło – fale podczerwone docierające do twojego ciała. W miarę wzrostu temperatury spirali grzejnej zacznie ona majaczyć w ciemności słabym światłem ciemnoczerwonym, a następnie świecić coraz jaśniej w kolorze pomarańczowym, a później żółtym. Gdyby osiągnęła temperaturę taką jak włókno w żarówce, świeciłaby jasno na białą. Oznaczałoby to, że w widmie światła emitowanego przez spiralę występują już wszystkie barwy tęczy. Łuk elektryczny o temperaturze około 6000 K ma kolor niebieski, a zakres jego promieniowania wykracza poza barwę fioletową. Spawacze stosują maski ochronne zarówno na oczy, jak i na całą twarz oraz ręce, gdyż emitowane przez łuk promienie nadfioletowe poparzyłyby im skórę, podobnie jak nadmiar promieniowania słonecznego.

Z powyższego opisu wynika, że ze wzrostem temperatury zmienia się charakter promieniowania – jego maksimum przypada na zakres fal coraz krótszych. Wykres zależności natężenia promieniowania emitowanego w postaci fal od ich długości nazywamy **krzywą emisji**. Kształt krzywych emisji został ustalony na podstawie wielu pomiarów. Krzywe emisji dla kilku przykładowych temperatur przedstawiono na rysunku 3. Jak widać, im wyższa temperatura, tym krzywa emisji znajduje się wyżej, a jej maksimum jest przesunięte w stronę fal krótszych. Całkowita moc promieniowania ciała odpowiada polu powierzchni pod krzywą emisji. Badania wykazały, że jest ona proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury ciała wyrażonej w kelwinach. Ciało o dwukrotnie wyższej temperaturze emituje więc w tym samym czasie szesnastokrotnie więcej energii na drodze promieniowania.

krzywa emisji



Rys. 3. Krzywe emisji ciała doskonale czarnego dla kilku wybranych temperatur.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Jaki kolor będzie mieć: czerwony pomidor oświetlony światłem niebieskim, biała kartka oświetlona światłem zielonym, czarny przedmiot oświetlony światłem żółtym? Odpowiedzi uzasadnij.
2. Jaki kolor powinny mieć kaloryfery, aby grzać najskuteczniej? Odpowiedź uzasadnij.
3. Przyglądając się dokładnie gwiazdom, można zauważyć, że mają one różne kolory. Temperatura których gwiazd jest wyższa: niebieskich czy czerwonych? Odpowiedź uzasadnij.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Widmem dowolnego promieniowania nazywamy rozkład tego promieniowania na poszczególne składowe ze względu na długości fal, częstotliwości, energie lub rodzaj cząstek. s. 166
- Rozgrzane ciała stale emitują promieniowanie, którego widmo ma charakter ciągły – obejmuje pewien zakres długości fal i częstotliwości. s. 166
- Wykresem zależności natężenia promieniowania od długości fali jest krzywa emisji. s. 168
- Im wyższa temperatura, tym silniejsze promieniowanie, a jego maksimum jest przesunięte w stronę fal krótszych. s. 168



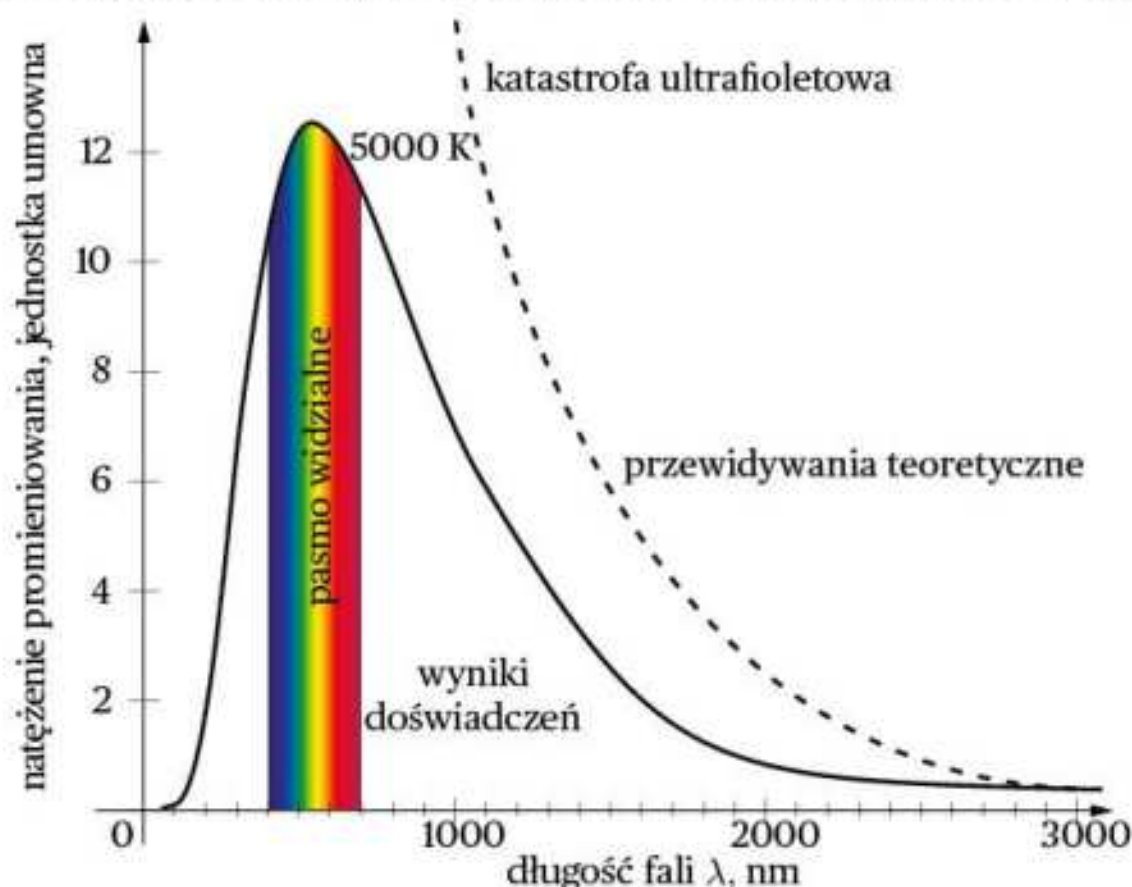
4.2. Foton i jego właściwości

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, czym jest kwant energii;
- poznasz pojęcie dualizmu korpuskularno-falowego w odniesieniu do światła;
- zapoznasz się z kilkoma innymi niezwykłymi cechami światła.

Pojęcie kwantu promieniowania

Promieniowanie termiczne ciał było intensywnie badane już w XIX wieku. Skrupulatnie mierzono ilość energii emitowanej za pomocą fal o różnej długości przez ciała o różnej temperaturze. Na tej podstawie ustalono kształty krzywych emisji i dopasowano do nich wzory matematyczne. Wzory te, podobnie jak każdy fakt doświadczalny, powinny wynikać z ogólniejszej teorii. Podjęto więc szereg prób wyprowadzenia tych wzorów z rozważań o charakterze podstawowym. Obliczenia prowadzone na gruncie klasycznej termodynamiki prowadziły do absurdalnego wniosku, że każde ciało podgrzane do temperatury większej niż 0 K powinno świecić bardzo jasno w zakresie bardzo krótkich fal (nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie) i natychmiast wypromieniować całą posiadaną energię. Zgodnie z tą teorią krzywa emisji powinna mieć kształt przedstawiony na rysunku 4 linią przerywaną. Tę zasadniczą sprzeczność praw klasycznej termodynamiki z wynikami doświadczeń w zakresie promieniowania termicznego nazwano paradoksem katastrofy ultrafioletowej.



Rys. 4. Niezgodność przewidywań klasycznej termodynamiki z kształtem krzywej emisji ustalonej na drodze doświadczeń.



Prawidłowy wzór opisujący krzywą emisji podał w 1900 roku niemiecki fizyk Max Planck (czytaj: maks plank; 1858–1947). Wcześniej twierdzono, że energia promieniowania jest fluidem ciągłym, to znaczy dającym się dzielić na nieskończenie małe części. Natomiast Planck przyjął w swoich obliczeniach, że energia może być emitowana tylko w określonych porcjach zwanych **kwantami**, których wartość (energii) jest proporcjonalna do ich częstotliwości. To założenie zapoczątkowało rozwój najważniejszej dziedziny fizyki współczesnej – mechaniki kwantowej.

Rys. 5. Max Ernst Planck – jeden z najbardziej uznanych fizyków niemieckich. Za swoje epokowe odkrycie i zapoczątkowanie teorii kwantów otrzymał w 1918 r. Nagrodę Nobla.



emisja energii
w postaci kwantów

Energia promieniowania nie jest emitowana w sposób ciągły, ale za pomocą porcji zwanych kwantami. Energię kwantu wyraża wzór:

$$E = h\nu \text{ lub } E = hf$$

E – energia kwantu, ν (grecka litera ni) lub f – częstotliwość promieniowania, $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ – współczynnik proporcjonalności zwany **stałą Plancka**

Stała Plancka jest (obok stałej grawitacji i prędkości światła w próżni) jedną z najważniejszych stałych w fizyce i decyduje o skali wszystkich zjawisk kwantowych na świecie.

Przykład

Oblicz energię kwantu światła o długości fali 500 nm.

Rozwiązanie:

Dane:

$$\lambda = 500 \text{ nm} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (prędkość światła w próżni)}$$

Szukane:

$$E = ?$$

Jak pamiętamy ze szkoły podstawowej, związek między częstotliwością promieniowania a długością fali można wyprowadzić ze wzoru na drogę w ruchu jednostajnym. Długość fali jest drogą, jaką fala przebywa w czasie równym swojemu okresowi:

$$\lambda = cT, \quad T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\nu}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$$

Energię kwantu można obliczyć ze wzoru:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad E = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 3,975 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Odpowiedź: Energia kwantu o długości fali 500 nm wynosi $3,975 \cdot 10^{-19}$ dżuli.

Dżul w fizyce atomowej nie jest wygodną jednostką energii. Energie pojedynczych kwantów i innych cząstek elementarnych podawane w dżulach są tak małymi liczbami, że zupełnie wymykają się naszej intuicji. Dlatego w mikroświecie o wiele wygodniejszą jednostką jest **elektronowolt**.



Przypomnijmy wzór na pracę prądu elektrycznego:

$$W = qU$$

Wynika z niego, że 1 dżul jest to energia, jaka wydzieli się podczas przepływu ładunku 1 kulomba między dwoma punktami pola elektrycznego, między którymi występuje napięcie 1 volt. Jeden kulomb zawiera ogromną liczbę ładunków elementarnych, natomiast w atomach mamy do czynienia z pojedynczymi elektronami. Jeśli więc kulomb zastąpimy jednym elektronem, to energia, jaką on uzyska, przepływając pod napięciem jednego wolta, wyniesie:

$$W = qU = 1e \cdot 1V = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Tę energię nazywamy 1 elektronowoltem i oznaczamy 1 eV. Energia kwantów i elektronów wyraża się w elektronowoltach łatwymi do wyobrażenia liczbami.

Dualizm korpuskularno-falowy

kwanty energii

Wprowadzenie przez Plancka pojęcia kwantu energii było początkowo zwykłym trikiem matematycznym, któremu nie umiano nadać właściwej interpretacji. W 1905 roku Albert Einstein wyjaśnił istotę zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego (o którym będziesz się uczyć niebawem). Stwierdził, że **kwanty energii** są realnymi bytami – cząstkami elementarnymi. Kwanty światła nazywamy też **fotonami**. Obie te nazwy możemy stosować zamiennie.

Foton jest cząstką niezwykłą, gdyż porusza się z prędkością światła. Zgodnie z przewidywaniami szczególnej teorii względności jest to prędkość nieosiągalna przez żaden obiekt mający masę. Wynika stąd, że spoczywający foton nie ma masy, bo po prostu nie istnieje. Światła nie można zatrzymać w miejscu. Jeśli foton się porusza, staje się nośnikiem energii o wartości wprost proporcjonalnej do częstotliwości fali, którą reprezentuje.

Z biegiem lat odkryto inne zjawiska świadczące o tym, że światło jest **strumieniem fotonów**. W 1917 roku amerykański fizyk Arthur Compton (czytaj: kompton; 1892–1962), rozpraszając promienie rentgenowskie na strukturze krystalicznej bloku grafitowego, zauważył dziwną niezgodność natężenia fali odbitej z przewidywaniami teoretycznymi. Dokładniejsze badania wykazały, że rozproszone promienie mają większą długość fali (mniejszą energię) niż promienie padające, a zmiana długości fali zależy od kąta rozproszenia. Kilkuletnie próby zinterpretowania tego zjawiska doprowadziły do wniosku, że jest to efekt zderzania się fotonów z elektronami, które w luźnej strukturze grafitu można potraktować jako niemal swobodne. Okazało się, że fotony zderzają się sprężysto z elektronami, tak samo, jak kule na stole bilaradowym, i przekazują im część swojej energii. Stosując zwykłe zasady zachowania, można wyprowadzić wzór otrzymany wcześniej jako wynik pomiarów. Efektu tego nie da się wytłumaczyć, przyjmując falową naturę promieniowania rentgenowskiego. Zjawisko Comptona stało się ostatecznym dowodem na realność istnienia kwantu energii promieniowania elektromagnetycznego. Compton opublikował wyniki swoich rozważań w 1923 roku, za co w 1927 roku otrzymał Nagrodę Nobla.

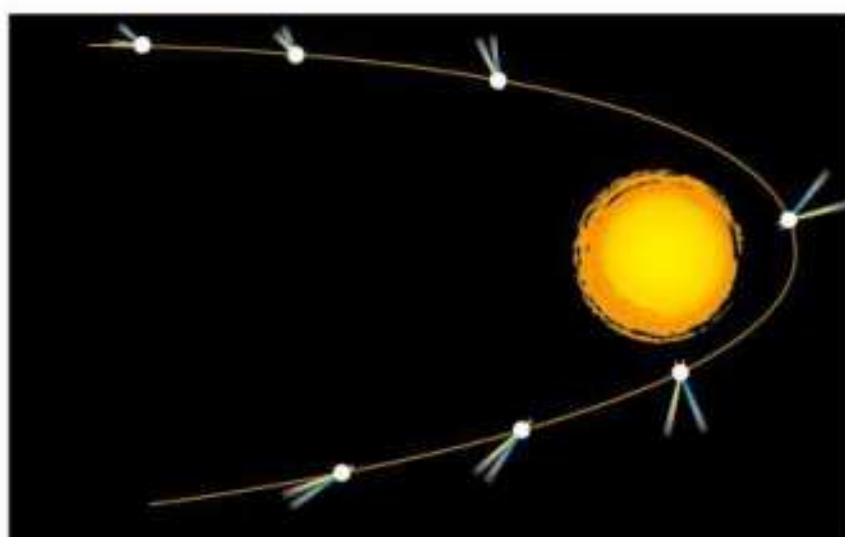


Za pomocą fotonów można również wyjaśnić fakt, że światło wywiera ciśnienie. Fotony, zderzając się z materią, wywołują podobny efekt jak cząsteczki gazu uderzające w ścianki naczynia. Ciśnienie światła jest bardzo małe, ale powoduje widowiskowe efekty w postaci ogonów komet. Kometę jest małym obiektem kosmicznym poruszającym się w Układzie Słonecznym po bardzo wydłużonej orbicie. Jest zbudowana z materiału skalnego oraz zamrożonych gazów. Gdy zbliża się do Słońca, wzrost temperatury powoduje odmrożenie gazów, które tworzą bardzo rozrzedzoną atmosferę wokół jądra. Siła ciężenia na komecie jest zbyt słaba, by tę atmosferę utrzymać. Dlatego jest ona wymiatana przez wiatr słoneczny i ciśnienie światła słonecznego, przez co powstaje ogon skierowany zawsze przeciwnie względem Słońca.

a)



b)



Rys. 6. a) Kometę Halleya. b) Kształtowanie się ogona komety w pobliżu Słońca. Kolorem niebieskim oznaczono ogon gazowy, a żółtym – pyłowy, niewidoczny i niewrażliwy na ciśnienie światła.

Czym wobec tego jest światło, strumieniem cząstek czy falą? Odpowiedź może wydać się zaskakująca – jednym i drugim! Przed XX wiekiem ludzkość żyła w przeświadczeniu, że światło ma naturę falową. Świadczą o tym niezbieżne zjawiska falowe, którym podlega światło, takie jak dyfrakcja, interferencja i polaryzacja (patrz rozdz. dotyczące optyki). Dopiero na przełomie XIX i XX wieku odkryto nowe zjawiska, które zaprzeczyły przyjętym poglądom.

Okazało się, że światło ma **naturę dwoistą (dualną)**. W niektórych sytuacjach objawia się nam jako fala, podczas gdy w innych zachowuje się jak strumień cząstek materialnych (korpuskuł). Jeśli na drodze światła ustawimy siatkę dyfrakcyjną, światło wykaże właściwości falowe i się ugnie. Jeśli na drodze światła umieścimy elektrony, światło wykaże własności korpuskularne – kwanty światła będą się z tymi elektronami zderzać. Tę niezwykłą cechę światła nazywamy dualizmem korpuskularno-falowym.

Dualizm korpuskularno-falowy – cecha światła polegająca na przejawianiu, w zależności od sytuacji, właściwości falowych (dyfrakcja, interferencja, polaryzacja) lub korpuskularnych (cząsteczkowych).

dualizm
korpuskularno-
falowy



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, co to jest foton i jakie ma właściwości.
2. Oblicz długość fali i częstotliwość kwantu światła o energii $2 \cdot 10^{-19}$ J.
3. Wymień argumenty świadczące o tym, że światło jest falą, oraz argumenty mówiące, że jest strumieniem cząstek.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 171 • Energia rozgrzanego ciała nie jest emitowana w sposób ciągły, tylko za pomocą porcji zwanych kwantami, o wartości wprost proporcjonalnej do częstotliwości fali.
- s. 172 • Kwanty są rzeczywistymi cząstkami elementarnymi, które mogą się na przykład zderzać z elektronami.
- s. 173 • W zależności od sytuacji światło zachowuje się albo jak fala, albo jak strumień cząstek (fotonów). Cechę tę nazywamy dualizmem korpuskularno-falowym.

4.3. Widma atomowe

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak świecą rozrzedzone gazy;
- przeanalizujesz, jak przebiega selektywna absorpcja promieniowania;
- przekonasz się, do czego służy analiza widmowa i jakie ma zalety;
- poznasz widmo wodoru, którego analiza stała się podstawą rozwoju fizyki atomowej.

Atomowe widma emisyjne

Podgrzane do niezbyt wysokich temperatur ciała stałe, ciecze i sprężone gazy emitują promieniowanie, którego widmo ma charakter ciągły, podobny do przedstawionego na rysunkach 3 i 4. Jeśli jednak pobudzimy do świecenia swobodne atomy (np. w rozrzedzonym gazie, za pomocą łuku elektrycznego lub płomienia), charakter widma zmienia się radykalnie.

Doświadczenie 1.

Zapał palnik gazowy, weź szczyptę soli i posyp nią płomień. Co zauważasz?

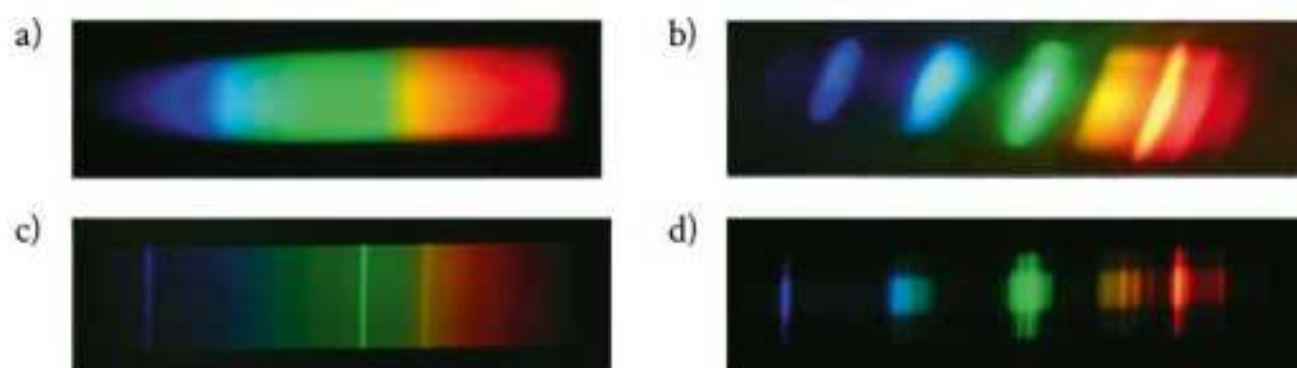
Doświadczenie 2.

Spójrz przez prosty spektroskop szkolny (siatkowy lub pryzmatyczny) na zapaloną świetlówkę. Co zauważasz?



Pierwsze doświadczenie pokazuje, że płomień gazowy barwi się na żółto. Kolor ten nie ma związku z temperaturą płomienia, ale ze składem chemicznym soli (z obecnością w niej sodu). Po rozszczepieniu światła emitowanego przez ten płomień za pomocą pryzmatu ujrzelibyśmy w widmie tego światła jasną kreskę koloru żółtego – linię emisyjną sodu.

Do obserwacji widma światła służy **spektroskop**, opisany na stronach 150–151. Oglądając przez spektroskop światło świetłówki, dostrzegamy jaśniejsze, wyraźne kreski, podobne jak na rysunku 7. Są to linie widmowe gazów zawartych w jarzeniówce i pobudzonych do świecenia przez łuk elektryczny.



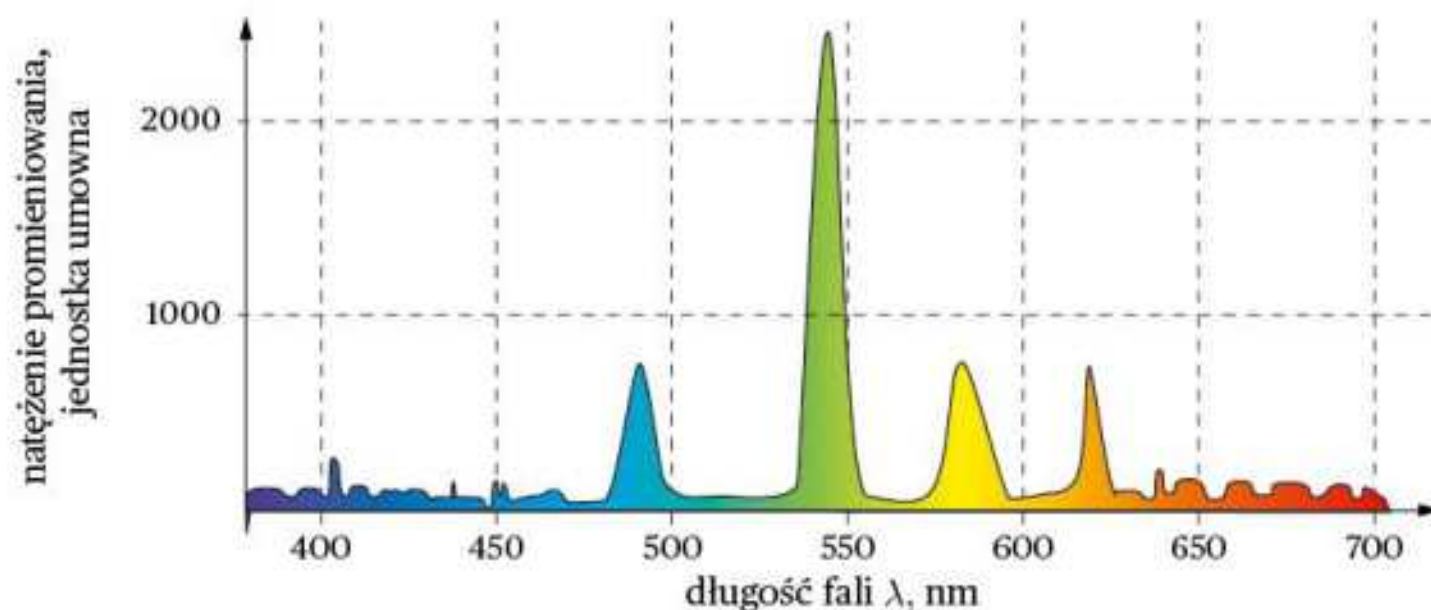
Rys. 7. Przykładowe widmo emisyjne: a) żarówki (starego typu), b) żarówki energooszczędnej, c) świetłówki tradycyjnej (starego typu), d) świetłówki nowoczesnej.

Jeszcze wyraźniej linie widmowe zobaczymy, obserwując w zupełnej ciemności przez spektroskop światło emitowane przez rurki Geisslera lub Plückera. Zawierają one konkretny gaz pod zmniejszonym ciśnieniem i są zasilane wysokim napięciem, na przykład z induktora Ruhmkorffa.

Rozrzedzone gazy emitują światło złożone z wąskich, barwnych, dobrze wyodrębnionych linii. Widmo takie nazywamy **liniowym widmem emisyjnym**.

liniowe widmo emisyjne

Każdy pierwiastek ma własny, niepowtarzalny układ linii widmowych, po których możemy go zidentyfikować. Przykładowy wykres zależności natężenia promieniowania od długości fali (czyli odpowiednik krzywej emisji) dla widma liniowego przedstawiono na rysunku 8.

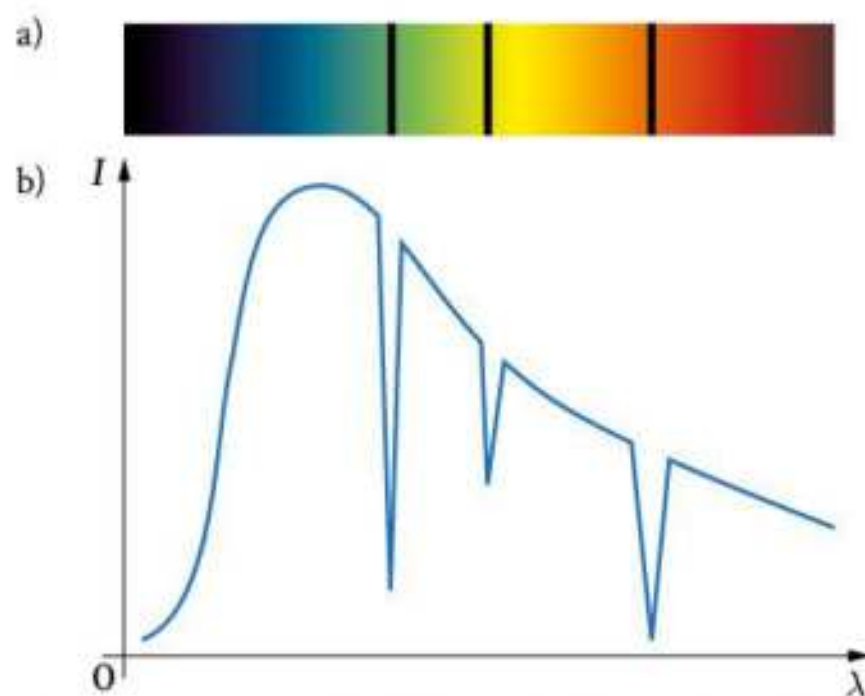


Rys. 8. Liniowe widmo emisyjne.



Widma absorpcyjne

Okazuje się, że gazy, które emitują światło w postaci konkretnych linii widmowych, potrafią również takie światło pochłaniać. Jeśli na drodze światła białego znajdzie się gaz o temperaturze niższej niż źródło tego światła, pochłonie on fale o charakterystycznej dla siebie długości – tej samej co w jego widmie emisyjnym. Światło to zostanie przez atomy niemal natychmiast z powrotem wyemitowane, ale w przypadkowych kierunkach, zazwyczaj niepokrywających się z pierwotnym kierunkiem światła. Obserwując widmo takiego światła, zauważymy deficyt natężenia dla konkretnych długości fal, objawiający się wizualnie jako czarne kreski na tle widma światła białego (rys. 9).

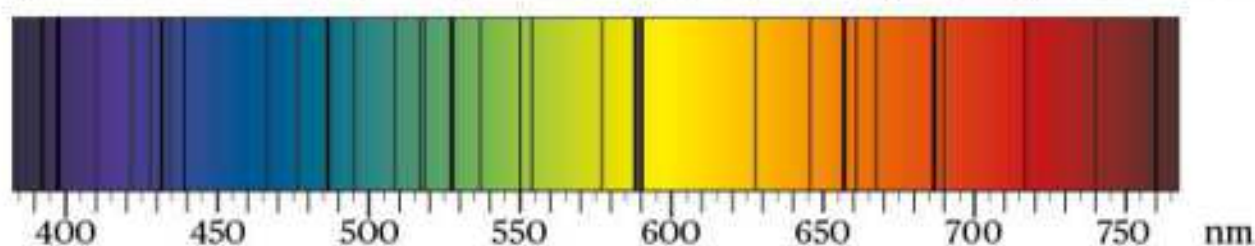


Rys. 9. Liniowe widmo absorpcyjne: a) widok spektroskopowy, b) zależność natężenia światła I od długości fali λ .

liniowe widmo
absorpcyjne

Liniowe widmo absorpcyjne – widmo złożone z czarnych linii na tle widma ciągłego.

Najsłynniejszym widmem absorpcyjnym jest **widmo słoneczne**, zwane też **widmem Fraunhofera** (rys. 10). Każdy z łatwością może mu się przyjrzeć, kierując spektroskop w stronę Słońca (aby nie uszkodzić wzroku, należy zastosować odpowiednią przesłonę). Powstaje ono w wyniku przejścia światła wyemitowanego przez gęste warstwy Słońca poprzez jego rzadszą atmosferę. Analizując rozkład linii widmowych, można ustalić skład chemiczny zewnętrznych warstw naszej życiodajnej gwiazdy, co z kolei jest podstawą do tworzenia modelu Słońca i tworzenia teorii na temat procesów, jakie w nim zachodzą. W podobny sposób można rozszczepić światło każdej gwiazdy i na tej podstawie określić, z jakich pierwiastków (i w jakich proporcjach) jest zbudowana.



Rys. 10. Widmo słoneczne (linie Fraunhofera).



Chcesz wiedzieć więcej?

Podczas zaćmienia Słońca w 1868 roku astronom Pierre Jansen analizował widmo korony słonecznej. Zaobserwował pomarańczowy prążek, którego nie można było przypisać do żadnego ze znanych wówczas pierwiastków. Inni badacze, którzy również dokonali tego odkrycia, nadali nowemu pierwiastkowi nazwę helium – od imienia greckiego boga Słońca – Heliosa.

Przez wiele lat uważano, że hel występuje na Słońcu, ale nie na Ziemi. W ziemskim laboratorium ten pierwiastek wyodrębnił Wiliam Ramsay dopiero w 1895 roku. Jest to jedyny pierwiastek odkryty najpierw w Kosmosie, a potem na Ziemi. Kolejność ta nie dziwi, gdyż zawartość helu w Słońcu wynosi około 25%, a w ziemskiej atmosferze – około 0,0005% i hel nie poddaje się żadnym reakcjom chemicznym, dzięki którym można by go było zidentyfikować.

Analiza widmowa

Widma atomowe są dla pierwiastków jak linie papilarne. Wspomniano już, że badanie widm gwiazd pozwala określić ich skład chemiczny. Podobnie można postąpić z dowolną substancją na Ziemi. Zamiast przeprowadzać złożone reakcje chemiczne, aby wykryć różne pierwiastki i związki chemiczne w badanej próbce, można pobudzić ją do świecenia i zbadać jej widmo emisyjne. Można też ją rozpylić, przepuścić przez aerozol światło białe i zbadać widmo absorpcyjne. Dział nauki i techniki zajmujący się badaniem widm substancji nazywa się **analizą widmową**.

analiza widmowa

Jako metoda badawcza, analiza widmowa jest wygodna, tania i uniwersalna. Jej czułość wykrywania składników w przypadku sodu dochodzi nawet do $10^{-7}\%$. Wystarczy znikoma ilość badanej substancji. Pierwiastki i związki chemiczne są identyfikowane na podstawie obecności w widmie linii o określonej długości fali, natomiast ich procentową zawartość oblicza się na podstawie intensywności tych linii.

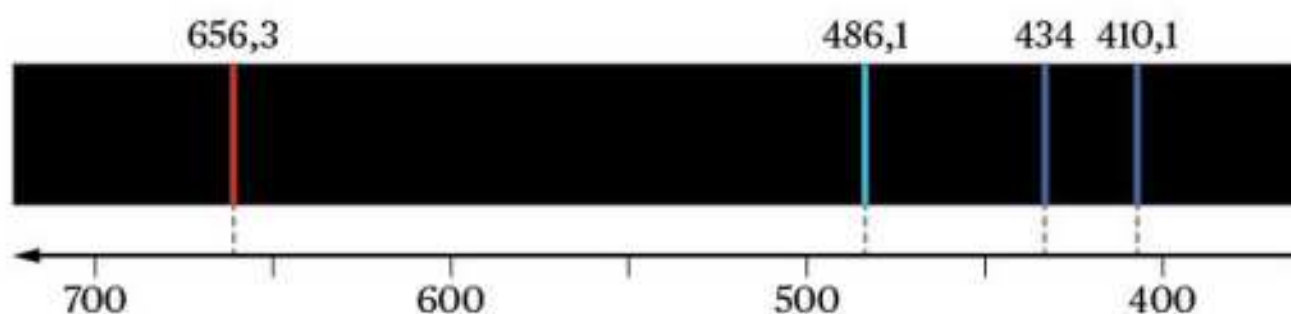
Widmo wodoru

Spośród widm wszystkich pierwiastków historycznie najważniejsze dla fizyków było widmo wodoru. Jest to pierwiastek o najprostszej budowie – składa się z pojedynczego protonu obieganego przez pojedynczy elektron. W pewnym momencie zdano sobie sprawę, że światło pobudzonego gazu jest emitowane z wnętrza atomów. Dokładna analiza widma wodoru mogłaby wyjaśnić, jak atom jest zbudowany i co się dzieje w jego środku. Wnioski wypływające z przypadku najprostszego można by potem uogólnić na atomy bardziej skomplikowane.





Wygląd widzialnej części widma wodoru przedstawiono na rysunku 11, natomiast długości fal odpowiadające poszczególnym prążkom – w tabeli 1.



Rys. 11. Widmo wodoru.

Tab. 1. Widmo wodoru

Nr	Długość fali [nm]	Barwa linii
1	656,27	czerwień
2	486,13	błękit
3	434,04	fiolet
4	410,17	fiolet
5	397,00	nadfiolet



Chcesz wiedzieć więcej?

Liczby przedstawione w tabeli 1 znano już w XIX wieku, lecz nie dostrzegano między nimi żadnego związku. Dopiero w 1885 roku szwajcarski fizyk i matematyk, a do tego słynny numerolog, Johann Balmer (1825–1898) wykrył między nimi zależność. Później została ona przekształcona przez Szweda Johanna Rydberga (1854–1919) do postaci:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

$R = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ – współczynnik liczbowy nazwany stałą Rydberga

Wkrótce okazało się, że wodór emituje też linie w niewidzialnej części widma, które układają się w serie dające się opisać wzorem ogólniejszym:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad n > m$$

Litera m oznacza numery serii. Szczegóły dotyczące tych serii przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Serie widmowe atomu wodoru

Nazwa serii	Data odkrycia	Zakres	m	n
Lymana	1906	nadfiolet	1	2, 3, 4, ...
Balmera	1885	światło widzialne	2	3, 4, 5, ...
Paschena	1908	podczerwień	3	4, 5, 6, ...
Bracketta	1922	podczerwień	4	5, 6, 7, ...
Pfunda	1924	podczerwień	5	6, 7, 8, ...
Humphreysa	1952	podczerwień	6	7, 8, 9, ...



Przykład

Oblicz długość najdłuższej i najkrótszej fali serii Lymana.

Rozwiązanie:

Dane:

$$R = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$m = 1$$

Po podstawieniu $m = 1$ do wzoru Rydberga otrzymujemy zależność opisującą serię Lymana:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(1 - \frac{1}{n^2} \right), n = 2, 3, 4, \dots$$

Największą długość fali uzyskamy w przypadku, gdy wyrażenie w nawiasie będzie możliwie najmniejsze. Zachodzi to dla $n = 2$. Wobec tego:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(1 - \frac{1}{4} \right) = \frac{3R}{4} \Rightarrow \lambda = \frac{4}{3R}$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy

$$\lambda = \frac{4}{3 \cdot 1,0974 \cdot 10^7} \text{ m} = 1,215 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 121,5 \text{ nm}.$$

Drugim skrajnym przypadkiem jest $n \rightarrow \infty$, kiedy to drugi wyraz w nawiasie znika. Mamy wtedy:

$$\frac{1}{\lambda} = R \Rightarrow \lambda = \frac{1}{R} = \frac{1}{1,0974} \cdot 10^{-7} \text{ m} = 91,1 \text{ nm}$$

Odpowiedź: Linie widmowe serii Lymana mają długości fali zawarte w granicach od 91,1 do 121,5 nanometrów. Leżą więc w głębokim nadfiolecie.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, czym widma atomowe różnią się od widma ciała doskonale czarnego.
2. Przedstaw, jak powstają widma absorpcyjne.
3. Określ, jakich informacji może nam dostarczyć obserwacja widma danej substancji.
- 4*. Oblicz graniczne długości fal linii widmowych wodoru należących do serii Paschena.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Rozrzedzone gazy emitują światło złożone z wąskich, barwnych i dobrze wyodrębnionych linii. Widmo takie nazywamy liniowym widmem emisyjnym. s. 175
- Widmo złożone z czarnych linii na tle widma ciągłego nazywamy liniowym widmem absorpcyjnym. Powstaje ono w wyniku przejścia światła białego przez obszar zawierający gaz. s. 176
- Badaniem składu chemicznego substancji na podstawie widma emitowanego lub absorbowanego przez nią światła zajmuje się dział nauki i techniki zwany analizą widmową. s. 177



4.4. Model Bohra budowy atomu

NA TEJ LEKCJI:

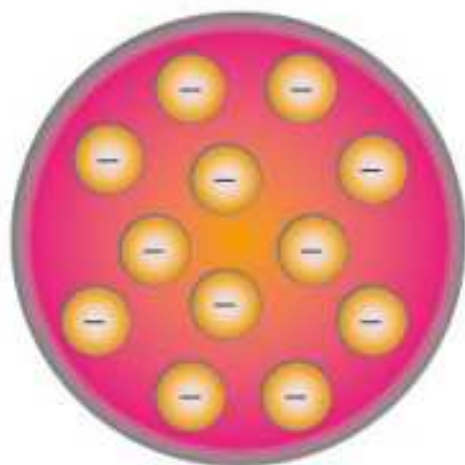
- poznasz podstawowy model budowy atomu stworzony ponad 100 lat temu przez Bohra;
- zrozumiesz, skąd się biorą widma atomowe emisyjne i absorpcyjne.

historia poglądów
na budowę atomu

Historia poglądów na budowę atomu

Demokryt (ok. 460 – ok. 370 p.n.e.) sformułował postulat istnienia atomów ponad dwa tysiące lat temu. Jego tezy były spekulacjami filozoficznymi, niepopartymi żadnymi naukowymi dowodami. Demokryt uważał, że materia jest zbudowana z wielkiej ilości różnorodnych i niepodzielnych cząstek o różnych kształtach i kolorach. Twierdził, że od własności atomów i ich wzajemnego usytuowania przestrzennego zależą takie cechy materii, jak: twardość, kolor, smak, zapach, a nawet temperatura. Wszelkie zmiany, jakim podlega materia, miały wynikać z ruchu tych atomów, ich wzajemnego łączenia i rozdzielania.

Teoria atomistyczna była odrzucana przez większość uczonych aż do XVIII wieku. Wówczas odkrycia w dziedzinie chemii, zwłaszcza dotyczące stosunków ilościowych w reakcjach chemicznych, doprowadziły do powszechnego przekonania, że atomy istnieją naprawdę.



Rys. 12. Model budowy atomu wg Thomsona.

Przekonanie o niepodzielności atomów zmieniono w 1897 roku. Joseph Thomson (1856–1940) wykazał wtedy, że znane od połowy XIX wieku promienie katodowe są strumieniem cząstek (elektronów), emitowanych właśnie przez atomy (te wiadomości znasz z klasy drugiej). Skoro elektron potrafi opuścić atom, to znaczy, że jest jego składnikiem. Atom pozbawiony elektronu staje się tworem naładowanym dodatnio i musi mieć strukturę zawierającą między innymi wolne miejsce po elektronie.

Od tego czasu zastanawiano się, jak jest zbudowany atom. W początkach XX wieku zaproponowano wiele hipotez, lecz żadna z nich nie okazała się prawdziwa. Thomson głosił teorię „ciasta z rodzynkami”. Według niej atom składa się z rozciąglej materii naładowanej dodatnio, w której ujemne elektrony są rozmieszczone niczym rodzynki w cieście (rys. 12). Teoria ta wyjaśniała wiele zjawisk, między innymi przewodnictwo elektryczne, lecz ostatecznie okazała się błędna.

Poznanie budowy atomu przybliżyły wyniki eksperymentów przeprowadzonych w 1911 roku przez Ernesta Rutherforda (czytaj: radeforda; 1871–1937). Eksperyment ten zostanie szczegółowo opisany w rozdziale 4.5. W wyniku tego eksperymentu stwierdzono, że atom jest prawie pusty, a jego centralne miejsce zajmuje małe jądro skupiające w sobie prawie całą masę atomu, które jest otoczone lekkimi elektronami.



Początkowo sądzono, że elektrony obiegają jądro niczym planety Słońce (tzw. model planetarny). Jednak na podstawie obliczeń przeprowadzanych na gruncie klasycznej elektrodynamiki wysnuto wniosek, że zachowujące się tak elektrony powinny bardzo szybko (w ciągu milionowej części sekundy) wypromieniować całą energię i spaść na jądro, a atomy powinny przestać istnieć. Ponieważ materia jest raczej trwała, zaistniała konieczność stworzenia zupełnie nowej teorii. Przypuszczano, że może się ona opierać na zupełnie innych założeniach.

Założenia modelu Bohra

Dziela tego dokonał w 1913 roku duński fizyk Niels Bohr (czytaj: bor; 1885–1962). Tworząc swój model, kierował się następującymi przesłankami:

- Dzięki eksperymentowi Rutherforda wiedział, że atom jest niemal pusty, zawiera w środku bardzo małe i ciężkie jądro oraz w jakiś sposób krążą wokół niego elektrony. Dziewiętnastowieczna fizyka nie była w stanie wyjaśnić, w jaki sposób i dlaczego elektrony w atomie się poruszają.
- Dzięki pracom Plancka, a następnie Einsteina wiedział, że energia jest emitowana i absorbowana w postaci kwantów (fotonów).
- Wiedział, że długości fal elektromagnetycznych emitowanych przez atomy poszczególnych pierwiastków są ściśle określone, a więc energie odpowiadających im kwantów również są ściśle określone.
- Skoro atomy są trwałe, to znaczy, że poruszające się w zwykły sposób elektrony nie powinny promieniować energii. Powinny to natomiast robić, gdy w ich ruchu zachodzą jakieś zmiany. Energia wyemitowanego lub zaabsorbowanego fotonu powinna przy tym być równa zmianie energii poruszającego się elektronu.
- Ponieważ energie kwantów emitowanych przez dany pierwiastek są ściśle określone, to energie poruszających się elektronów też muszą być ściśle określone, co oznacza, że elektrony w atomie nie mogą się poruszać w sposób dowolny, tylko ściśle określony.

Rys. 13. Niels Bohr – wybitny fizyk duński, twórca pierwszego modelu budowy atomu, w którym wykorzystano postulaty kwantowe. Otrzymał za to Nagrodę Nobla w 1922 r. Zorganizował w Kopenhadze instytut fizyczny, który przez długie lata odgrywał rolę europejskiego centrum rozwoju mechaniki kwantowej. Przyczynił się do rozwoju fizyki jądrowej. W czasie wojny udało mu się uciec z okupowanej Danii do USA, gdzie pracował w projekcie Manhattan. Po wojnie był orędownikiem rozbrojenia nuklearnego.





Ostatecznie Bohr przyjął dwa założenia, które w połączeniu ze znanymi wcześniej prawami fizyki pozwoliły mu sformułować pierwszy spójny model budowy atomu. Założenia te określa się mianem postulatów Bohra:

postulaty Bohra

1. Elektron nie może krążyć po dowolnej orbicie. Dozwolone są tylko takie orbity, na których iloczyn masy i prędkości elektronu oraz promienia jego orbity wokół jądra jest wielokrotnością stałej Plancka podzielonej przez 2π .

$$rmv = n \frac{h}{2\pi}, n = 1, 2, 3, \dots$$

2. Kiedy elektron krąży po jednej z dozwolonych orbit, nie promieniuje energii. Elektron emituje (lub pochłania) kwant energii podczas przeskoku z jednej dozwolonej orbity na drugą.

Wnioski z modelu Bohra

Możemy przyjąć do wiadomości postulaty Bohra i założyć, że elektrony poruszają się po orbitach kołowych. Wówczas po potraktowaniu siły oddziaływania kulombowskiego między jądrem atomowym i elektronem jako siły dośrodkowej oraz po zastosowaniu wzorów na energię kinetyczną i potencjalną elektronu, dochodzimy do wniosku, że promień orbity, po której porusza się elektron, nie może być dowolny, tylko wyraża się wzorem:

$$r_n = r_1 \cdot n^2$$

$r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 53 \text{ pm}$ – promień najmniejszej orbity w atomie wodoru, tak zwany promień Bohra, n – numer orbity

O wielkości fizycznej, która nie może przyjmować dowolnych wartości, tylko ściśle określone, mówimy, że jest **skwantowana**. Liczba n numerująca te wartości nosi nazwę liczby kwantowej. Jak widać, promienie dozwolonych orbit elektronów, tak zwanych orbit stacjonarnych, wzrastają proporcjonalnie do kwadratów ich numerów. Gdy elektron znajduje się na najniższej orbicie, mówimy, że atom jest w stanie podstawowym, a w pozostałych przypadkach – że w stanie wzbudzonym.

Również energia elektronu na orbitach stacjonarnych jest skwantowana, a obliczyć ją można ze wzoru:

$$E_n = -A \cdot \frac{1}{n^2}$$

A jest stałą, równą $2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13,6 \text{ eV}$.

Energia ta jest ujemna, bo elektron jest w atomie uwięziony. Najniższą jej wartość otrzymujemy dla stanu podstawowego ($n = 1$) i dla atomu wodoru wynosi ona:

$$E_1 = -A = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,6 \text{ eV}$$

Jest to tzw. **energia jonizacji**, którą należy dostarczyć elektronowi, aby go wyrwać z atomu. Elektronowi swobodnemu, znajdującemu się daleko od jądra i nieporuszającemu się, przypisujemy energię równą zero. Atom pozbawiony elektronu nazywamy **jonem** – w tym przypadku – dodatnim.

**Przykład 1.**

Oblicz promień orbity stacjonarnej i energię elektronu opisanego liczbą kwantową $n = 2$.

Rozwiązanie:

Dane:

$$n = 2$$

$$r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$A = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13,6 \text{ eV}$$

Promień orbity wyznaczymy ze wzoru $r_n = r_1 n^2$. Po podstawieniu do wzoru otrzymujemy:

$$r_2 = r_1 2^2 = 4r_1 = 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

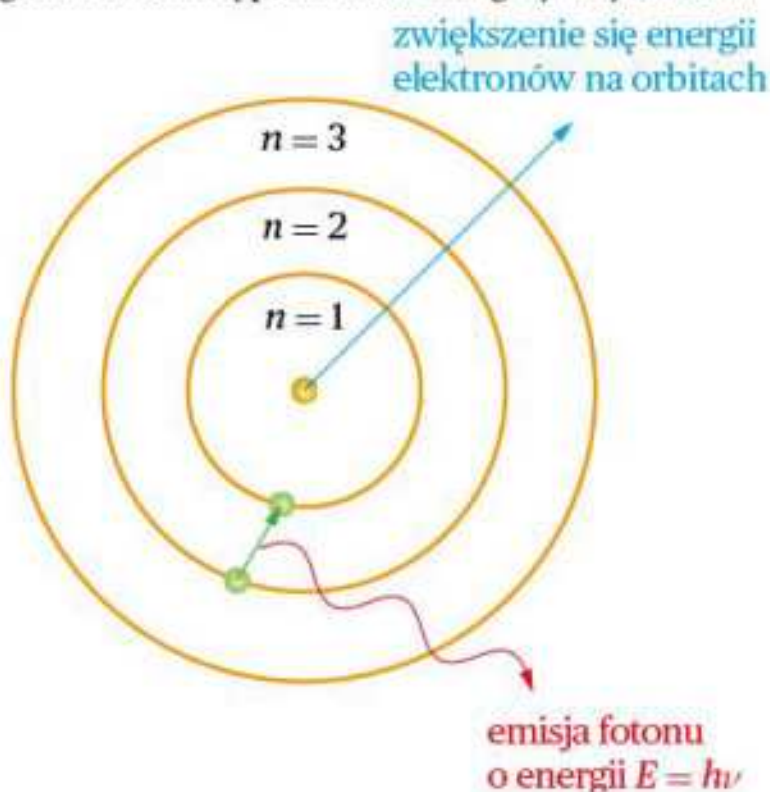
Energię najłatwiej będzie obliczyć ze wzoru $E_n = -A \cdot \frac{1}{n^2}$. Wynik liczbowy jest równy:

$$E_2 = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{2^2} = -3,4 \text{ eV}$$

Odpowiedź: Promień drugiej orbity modelu Bohra wynosi 212 pm, natomiast odpowiadająca tej orbicie energia elektronu jest równa $-3,4 \text{ eV}$.

Bohr wyobrażał sobie **atom wodoru** w sposób przedstawiony na rysunku 14. W środku atomu znajduje się dodatnio naładowane, ciężkie jądro. Wokół jądra, po orbicie kołowej, krąży elektron. Gdy to tylko możliwe, energia elektronu przyjmuje najniższą dozwoloną wartość, co oznacza, że atom znajduje się w **stanie podstawowym**. W stanie tym elektron może się znajdować nieskończenie długo. Zmiana energii elektronu jest możliwa jedynie w wyniku pochłonięcia fotonu. Ponieważ zarówno promienie orbit stacjonarnych, jak i dozwolone na nich wartości energii są ściśle określone, elektron może pochłonąć tylko takie fotony, których energia odpowiada różnicy energii stanów stacjonarnych. Tak powstaje liniowe widmo absorpcyjne – spośród wszystkich możliwych długości fal widma światła białego gaz wybiera te fale, których energia jest zgodna z różnicą poziomów energetycznych orbit.

W momencie pochłonięcia fotonu atom przechodzi do **stanu wzbudzonego** – jego elektron krąży po jednej z dalszych orbit. Jest to stan niekorzystny energetycznie – w krótkim czasie elektron „spada” na niższą orbitę, emitując kwant o energii równej różnicy poziomów energetycznych orbit. Tak powstaje liniowe widmo emisyjne.



Rys. 14. Schemat atomu wodoru według Bohra.

atom wodoru
według Bohra

Przykład 2.

Oblicz długość fali i energię kwantu wyemitowanego przez atom wodoru podczas przeskoku z trzeciej orbity na drugą.

Rozwiązanie:

Na trzeciej orbicie elektron ma energię $E_3 = -A \cdot \frac{1}{3^2} = -\frac{1}{9}A$, natomiast na dru-

giej ma $E_2 = -A \cdot \frac{1}{2^2} = -\frac{1}{4}A$.

Różnica tych energii wynosi:

$$E_3 - E_2 = A \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right) = \frac{5}{36}A = 3,06 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,89 \text{ eV}$$

Długość fali możemy obliczyć po przekształceniu wzoru na energię kwantu:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,06 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 650 \text{ nm}$$

Odpowiedź: Podczas przeskoku elektronu w atomie wodoru z trzeciej orbity na drugą zostanie wyemitowany kwant światła o energii 1,89 eV i długości fali 650 nm.

**Chcesz wiedzieć więcej?****Budowa atomu w ujęciu falowym**

Przedstawiony model budowy atomu nie jest teorią ostateczną ani doskonałą. Model Bohra powstał ponad 100 lat temu, gdy panowało zupełnie inne wyobrażenie o mikroświecie. Model wprowadził przewidywanie prawidłowych długości fal linii emisyjnych wodoru, ale ma wiele wad, z których zdawał sobie sprawę już sam twórca modelu:

1. Postulaty Bohra zostały przyjęte *ad hoc*. Oznacza to, że nie wynikają one z żadnych głębszych przesłanek, a jedynie zostały doraźnie dopasowane, aby uzyskać określony wynik. W czasie ich formułowania były wręcz sprzeczne z ówczesnym stanem wiedzy.
2. Model Bohra zawodzi przy próbie opisu atomów zawierających więcej elektronów.
3. Model ten nie wyjaśnia, skąd się biorą wiązania chemiczne ani właściwości pierwiastków.

W latach dwudziestych XX wieku okazało się, że dualizm korpuskularno-falowy jest zjawiskiem powszechnym i dotyczy nie tylko fotonów, lecz także wszelkich innych form materii. Wraz z tym odkryciem stało się jasne, że elektrony nie mogą być traktowane jak „twarde kuleczki” poruszające się po ściśle określonych orbitach. Raczej należy je rozpatrywać jako fale zajmujące określone obszary z pewnym prawdopodobieństwem.



We właściwy sposób wnętrze atomu przedstawił austriacki fizyk teoretyk Erwin Schrödinger (czytaj: szrydinger; 1887–1961). Opisał on rzeczywistość mikroświata w sposób całkowicie falowy. Równanie nazwane jego nazwiskiem jest odpowiednikiem drugiej zasady dynamiki Newtona obowiązującym w mikroświecie i stanowi podstawę każdego współczesnego podręcznika mechaniki kwantowej.

Schrödinger przedstawił elektron jako falę materii obiegającą jądro. Jeśli stan elektronu jest stabilny w określonym odcinku czasu, to znaczy, że nie zmienia się również kształt tej fali, a więc jest ona falą stojącą. Narzuca to określone warunki na długość tej fali, a w konsekwencji na promień orbity i energię elektronu. Postulaty Bohra okazały się naturalną konsekwencją faktu, że elektron, podobnie jak foton, ma naturę falową.

Rys. 15. Erwin Schrödinger – wybitny fizyk austriacki, jeden ze współtwórców nowoczesnej mechaniki kwantowej, za co otrzymał w 1933 r. Nagrodę Nobla (wraz z Paulem Diracem). Sformułował równanie falowe, które do dziś stanowi podstawowe narzędzie do rozwiązywania wszelkich zagadnień mikroświata.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz, do jakiego poziomu musiałby zostać wzbudzony atom wodoru, aby jego średnica przekroczyła 1 nm.
2. Oblicz, jaką pracę należy wykonać, aby elektron z piątej orbity w atomie wodoru odsunąć do nieskończoności.
3. Oblicz częstotliwość promieniowania wyemitowanego przez atom wodoru, w którym elektron przeskoczył z czwartej orbity na pierwszą.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Pojęcie atomu zostało wprowadzone do języka nauki już w starożytności, ale dopiero na przełomie XVIII i XIX wieku udowodniono ich istnienie. Do końca XIX wieku sądzono, że atomy są niepodzielne. s. 180
- Pierwszą spójną teorię budowy atomu sformułował Bohr na podstawie analizy widm emisyjnych atomów. s. 182
- Atom jest zbudowany z jądra i obiegających go elektronów. Zarówno promienie orbit, jak i energie elektronów są skwantowane, tzn. mogą przyjmować tylko ściśle określone wartości. s. 183
- Elektron podczas przeskoku z jednej dozwolonej orbity na drugą emituje lub pochłania foton o ściśle określonej energii, dlatego w widmach emisyjnych i absorpcyjnych występują prążki o ściśle określonej długości fali i częstotliwości. s. 183



4.5. Zjawisko fotoelektryczne i fotochemiczne

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz jedno z najdonioślejszych odkryć, które zapoczątkowało rozwój mechaniki kwantowej;
- przeanalizujesz kolejne fakty dotyczące oddziaływania fotonów z materią.

Doświadczenie Hertza

W 1887 roku fizyk niemiecki Heinrich Hertz (czytaj: hajnriś herc; 1857–1894) w czasie badań nad falami radiowymi odkrył przypadkowo, że oświetlenie przerwy iskiernika lampą ultrafioletową powoduje łatwiejszy przeskok iskry. Zjawisko to nazwano **fotoemisją**, **fotoefektem** lub **zjawiskiem fotoelektrycznym zewnętrznym**. Dysponując lampą kwarcową lub jasno świecącym łukiem elektrycznym, można w warunkach szkolnych przeprowadzić inną wersję tego doświadczenia.

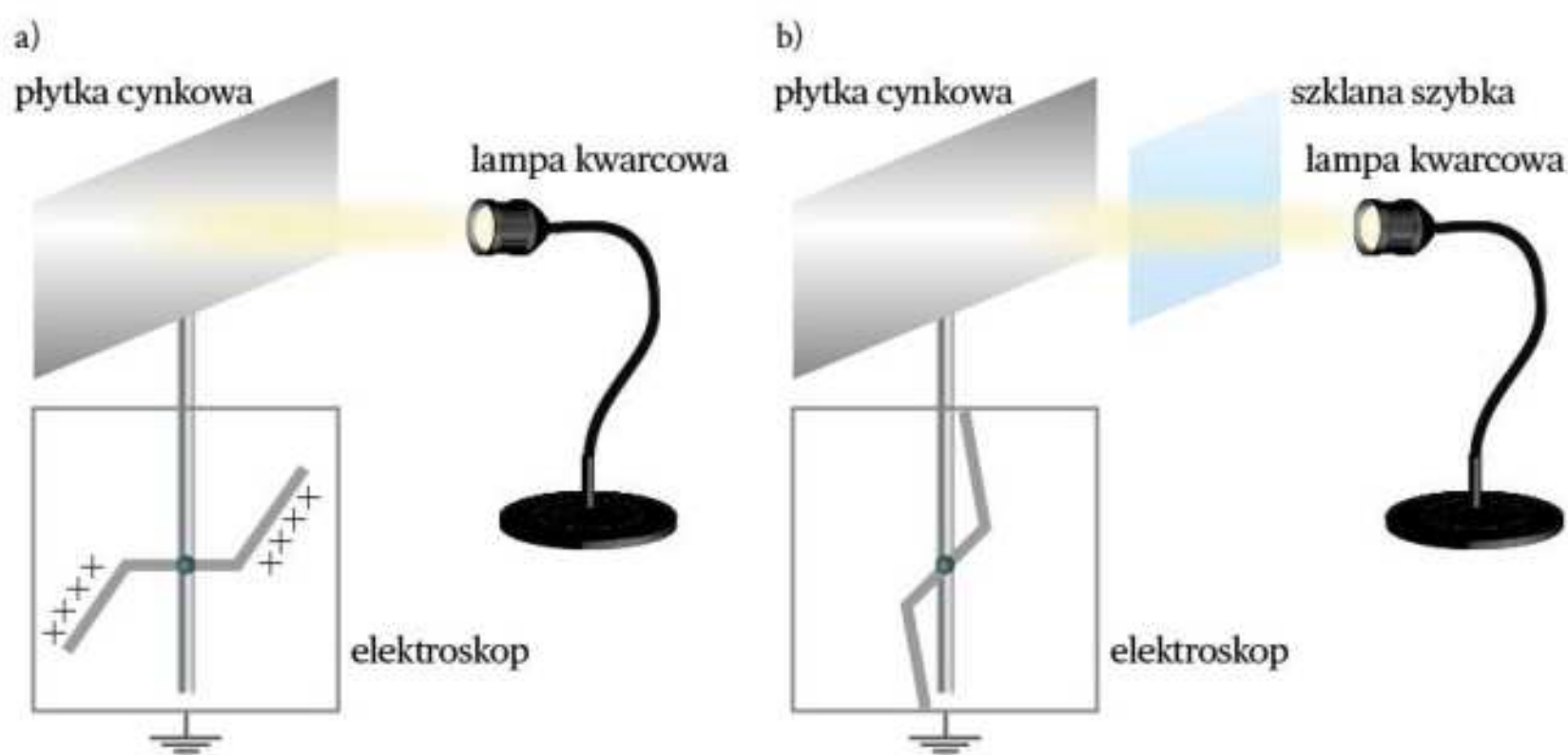
zjawisko
fotoelektryczne
zewnętrzne

Doświadczenie

Pomocze: czuły elektroskop, płytka cynkowa, lampa kwarcowa, szyba szklana.

1. Do czułego elektroskopu przymocuj płytkę cynkową starannie oczyszczoną z warstwy tlenku cynku. Na płytkę skieruj silny strumień światła z lampy kwarcowej lub łuku elektrycznego (rys. 16).

Obserwacja: Elektroskop w krótkim czasie się ładuje. Można wykazać, że ładunek na elektroskopie jest dodatni.



Rys. 16. Doświadczenie Hertza: a) oświetlony lampą kwarcową elektroskop ładuje się dodatnio; b) umieszczenie na drodze światła płytki szklanej niweczy ten efekt.



2. Naładuj elektroskop ujemnie i ponownie oświetl płytkę.

Obserwacja: elektroskop szybko się rozładowuje.

3. Między źródło światła a płytkę wstaw szybę szklaną i powtórz czynności opisane w punktach 1 i 2.

Obserwacja: Żadne z wymienionych wyżej zjawisk nie zachodzi.

Jakościowe wyjaśnienie tego zjawiska jest dość proste: padające na płytkę światło powoduje wybijanie elektronów z powierzchni metalu. Uwolnione w ten sposób elektrony nazywamy **fotoelektronami**. Za efekt odpowiada nadfioletowa część widma promieniowania źródła światła, której płytka szklana nie przepuszcza.

fotoelektron

Wyniki dalszych badań

Opublikowanie przez Hertza swojego odkrycia skłoniło wielu badaczy do szczegółowego zajęcia się tym zjawiskiem. Szybko stwierdzono, że zjawisko fotoelektryczne zachodzi również dla innych metali, a w niektórych przypadkach powoduje je również światło widzialne. Okazało się, że każdy metal charakteryzuje się pewną **graniczną** wartością długości fali światła zdolnej wywołać to zjawisko. Fale krótsze powodują fotoefekt natychmiast, a fale dłuższe – wcale, nawet po długotrwałym naświetlaniu. Długości graniczne fal powodujących fotoemisję podano w tabeli. Wymieniono w niej tylko metale, niemniej stwierdzono, że fotoemisja możliwa jest w dowolnych substancjach.

Tab. 3. Graniczne długości i częstotliwości fal powodujących fotoefekt i prace wyjścia elektronów z niektórych metali

Nazwa pierwiastka	λ_g, nm	ν_g, THz	Zakres	Praca wyjścia, eV
cez (Cs)	580	517	widzialny	2,14
potas (K)	539	557	widzialny	2,30
sód (Na)	451	665	widzialny	2,75
wapń (Ca)	432	694	widzialny	2,87
magnez (Mg)	339	885	nadfiolet	3,66
srebro (Ag)	291	1031	nadfiolet	4,26
cynk (Zn)	287	1045	nadfiolet	4,33
wolfram (W)	273	1099	nadfiolet	4,55
miedź (Cu)	267	1124	nadfiolet	4,65
platyna (Pt)	220	1364	nadfiolet	5,65

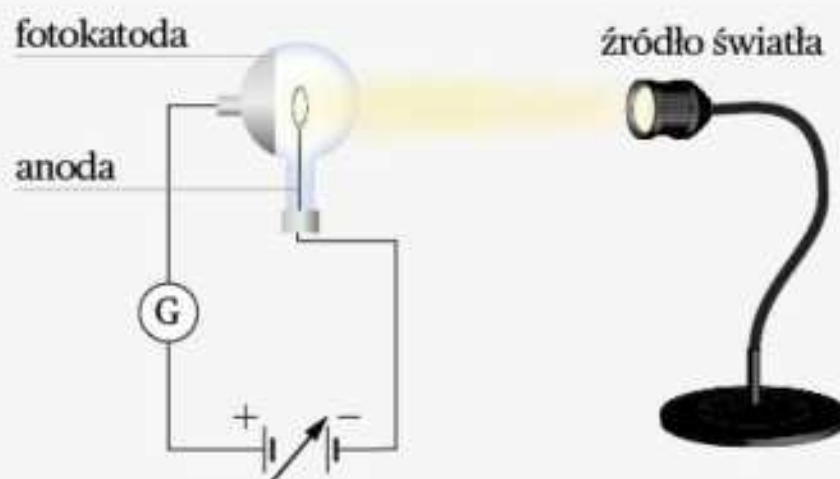
Uczonym, który najbardziej przyczynił się do zbadania natury zjawiska fotoelektrycznego, był niemiecki fizyk Philipp Lenard (1862–1947).

Chcesz wiedzieć więcej?

W 1902 roku Philipp Lenard skonstruował aparaturę do pomiaru energii kinetycznej fotoelektronów (rys. 17).



Urządzenie składa się z dwóch elektrod: katody w kształcie bańki pokrytej wewnątrz badanym metalem oraz umieszczonej centralnie anody, która zbiera uwolnione z katody fotoelektrony. W katodzie znajduje się kwarcowe okienko, pozwalające na

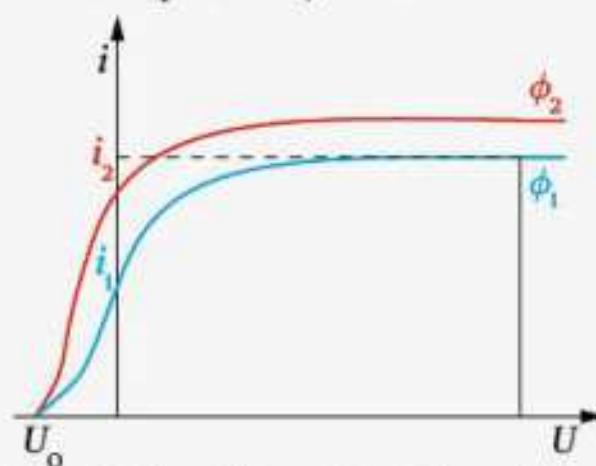


Rys. 17. Schemat aparatury Lenarda.

oświetlenie bańki od wewnątrz różnymi rodzajami światła, w tym ultrafioletowym. Wewnątrz bańki panuje próżnia, aby powietrze nie przeszkadzało w ruchu swobodnych elektronów.

W omawianej aparaturze katoda i anoda są połączone z regulowanym źródłem napięcia. Natężenie ewentualnego prądu elektrycznego w obwodzie mierzy bardzo czuły miernik – galwanometr. Całość stanowi pierwowzór współczesnej fotokomórki.

Gdy urządzenie znajduje się w ciemności, obwód jest rozarty i galwanometr nie rejestruje przepływu prądu. Po oświetleniu katody światłem o odpowiedniej długości fali płynie prąd nawet wtedy, gdy nie przyłożymy napięcia między katodą i anodą (rys. 18). Przyłożenie ujemnego potencjału do katody zwiększa natężenie prądu fotoelektrycznego, ale jedynie do pewnej wartości, zwanej prądem nasycenia. Interpretujemy go jako stan, w którym wszystkie elektrony wyemitowane przez katodę docierają do anody. Przyłożenie napięcia



Rys. 18. Charakterystyka fotokomórki, czyli zależność natężenia prądu fotoelektrycznego od przyłożonego napięcia dla dwóch różnych strumieni światła Φ_1 i $\Phi_2 > \Phi_1$.

przeciwnie skierowanego (czyli hamującego fotoelektrony) powoduje zmniejszenie natężenia fotoprądu, a przy pewnej wartości U_0 – jego zanik. Zauważmy przy okazji, że do natężenia prądu fotoelektrycznego zupełnie nie stosuje się prawo Ohma.

Mierząc prąd nasycenia, możemy określić związek między natężeniem światła padającego na fotokatodę i ilością wyemitowanych fotoelektronów. Z kolei pomiar napięcia blokującego U_0 dostarcza nam informacji o maksymalnej energii kinetycznej fotoelektronów. Zgodnie z zasadą zachowania energii maksymalna energia kinetyczna elektronów jest równa pracy, jaką muszą one wykonać przeciwko siłom pola elektrycznego, aby dotrzeć do ujemnie naładowanej (a więc odpychającej je) elektrody. Przemieszczenie ładunku elementarnego e między punktami pola elektrycznego o napięciu U wymaga wykonania pracy $W = eU$. Zatem maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów wynosi:

$$\frac{m_e v_{\max}^2}{2} = eU_0$$



Doświadczenia przeprowadzone na początku XX wieku doprowadziły do sformułowania podstawowych praw dotyczących zjawiska fotoelektrycznego:

1. Zjawisko fotoelektryczne jest natychmiastowe.
2. Maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów nie zależy od natężenia światła padającego na powierzchnię metalu, a jedynie od długości fali tego światła.
3. Liczba fotoelektronów jest proporcjonalna do natężenia światła.

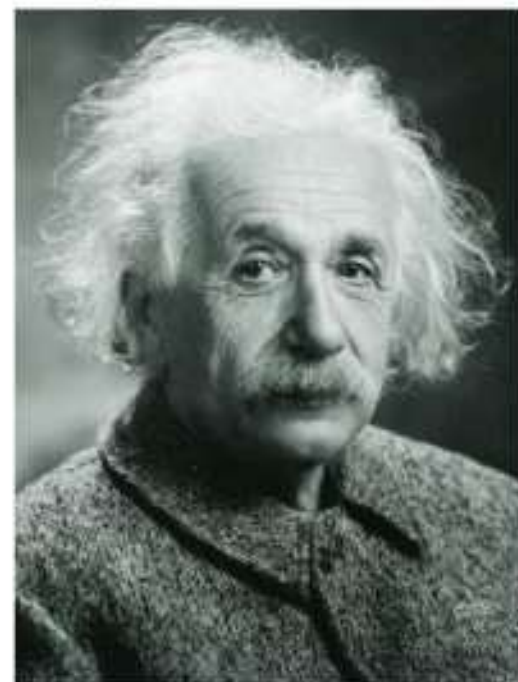
podstawowe prawa
dotyczące zjawiska
fotoelektrycznego

Kwantowa interpretacja zjawiska fotoelektrycznego

Otrzymanych rezultatów nie potrafiono wyjaśnić zgodnie z ówczesną wiedzą. Pod koniec XIX wieku sądzono, że promieniowanie/światło ma charakter wyłącznie falowy i jest fluidem rozciąglwym w czasie i przestrzeni. Zgodnie z tym przekonaniem energia promieniowania padającego na płytkę metalową powinna się magazynować w elektronach, a te po nabyciu odpowiedniego zapasu energii, powinny po pewnym czasie osiągnąć zdolność wydobywania się ze struktury krystalicznej metalu. Zjawisko to powinno mieć związek jedynie z szybkością przekazu energii, a więc z natężeniem padającego promieniowania. Tymczasem okazało się, że wystarczy słaby strumień światła o odpowiedniej długości fali i fotoefekt występuje natychmiast. Natomiast nawet silne światło, ale o zbyt dużej długości fali, czyli zbyt małej częstotliwości, nie wywołuje fotoefektu w ogóle. Elektrony są więc zupełnie nieczule na zbyt długie fale, a fale odpowiednio krótkie potrafią wywołać piorunujący efekt, jakim jest wybite elektronu uwięzionego wcześniej w metalu.

Prawidłową interpretację zjawiska fotoelektrycznego podał w 1905 roku Albert Einstein. Doszedł on do wniosku, że energia jest nie tylko emitowana, lecz także absorbowana w postaci kwantów. Wprawdzie świat naukowy znał już wtedy (i akceptował) teorię kwantów sformułowaną przez Plancka, ale sądzono, że pojęcie kwantu wiąże się wyłącznie z procesem emitowania energii przez rozgrzane ciała. Przekonanie o falowej naturze promieniowania elektromagnetycznego było tak silne, że sam Planck nie dopuszczał myśli, że energia może być transportowana i pochłaniana w postaci kwantów. Idea Einsteina była tak rewolucyjna, że początkowo prawie nikt w nią nie wierzył. Dopiero dokładne pomiary przeprowadzone w 1916 roku przez jednego z największych sceptyków – Roberta Millikana (1868–1953) rozwiały wszelkie wątpliwości i potwierdziły słuszność równania zaproponowanego przez Einsteina. Nie za teorię względności, ale właśnie za wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego Einstein otrzymał w 1921 roku Nagrodę Nobla (a Millikan w 1923 roku).

Rys. 19. Albert Einstein – jeden z najgenialniejszych uczonych wszech czasów, twórca fundamentów całej współczesnej fizyki. Sformułował podstawy teorii kwantów, utrwalił (wyjaśniając ruchy Browna) wyobrażenia o atomistycznej strukturze materii oraz ogłosił szczególną i ogólną teorię względności, w których dokonał syntezy całej elektrodynamiki, mechaniki klasycznej oraz teorii grawitacji. W życiu codziennym był niezwykle skromny, miał wiele pasji. Gdy uświadomił sobie, że jego równania zostały wykorzystane do budowy broni jądrowej, ostatnie lata życia poświęcił działaniom na rzecz pokoju.



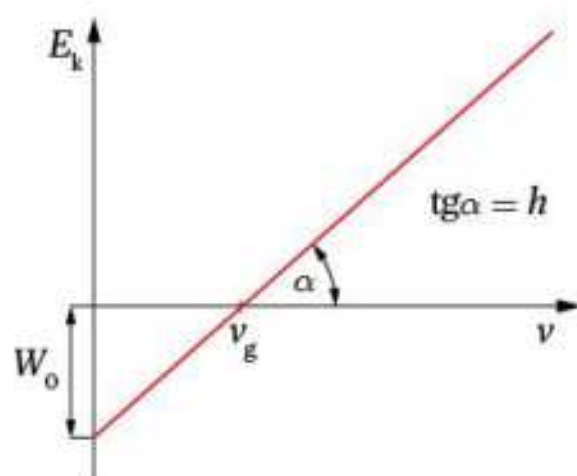
To odkrycie jest niezwykle ważne, dlatego zatrzymamy się przy nim przez chwilę. Zgodnie z teorią Plancka energia jest emitowana w postaci porcji o wartości $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, h – stała Plancka, ν – częstotliwość promieniowania, c – prędkość światła w próżni, λ – długość fali. Einstein twierdził, że kwanty są bytem realnym i światło, oprócz tego, że jest falą, ma naturę ziarnistą i polega na rozchodzeniu się fotonów, czyli kwantów światła. Jeśli foton ma zbyt małą energię (a więc zbyt małą częstotliwość, a co za tym idzie – zbyt dużą długość fali), jego uderzenie w powierzchnię metalu nie powoduje fotoemisji. Jeśli foton jest obdarzony odpowiednio dużą energią i zderzy się z elektronem sieci krystalicznej metalu, istnieje niezerowe prawdopodobieństwo, że spowoduje oderwanie się tego elektronu. Energia fotonu zostanie w takim przypadku częściowo zużyta na oswobodzenie się elektronu (tzw. praca wyjścia), a reszta objawi się jako energia kinetyczna elektronu swobodnego. W ten sposób dochodzimy do **wzoru Einsteina–Millikana**, za który obaj uczeni dostali Nagrodę Nobla:

wzór Einsteina–
–Millikana

Maksymalna energia kinetyczna fotoelektronu jest równa energii padającego kwantu promieniowania pomniejszonej o pracę wyjścia elektronu z danej substancji:

$$E_{k,max} = h\nu - W_0$$

W ten sposób zagadka praw związanych z fotoemisją została wyjaśniona: dowolna ilość fotonów o zbyt małej energii nie powoduje fotoemisji, podczas gdy niewielka ilość fotonów o energii wystarczającej wywołuje to zjawisko natychmiast. Im więcej odpowiednich fotonów, tym więcej wybitych elektronów. W równaniu widać też proporcjonalność maksymalnej energii kinetycznej fotoelektronów do częstotliwości promieniowania.



Rys. 20. Wykres równania Einsteina–Millikana. Energia wybitych elektronów jest proporcjonalna do częstotliwości fali światła.

Z matematycznego punktu widzenia równanie Einsteina–Millikana to równanie prostej (rys. 20). Współczynnik kierunkowy tej prostej jest równy stałej Plancka. Millikan, wyznaczając doświadczalnie przebieg tej prostej, przy okazji zmierzył stałą Plancka.

Praca wyjścia elektronu jest indywidualną cechą każdej substancji świadczącą o sile, z jaką elektron jest utrzymywany w strukturze krystalicznej. Przyjmując energię kinetyczną równą zero, możemy powiązać wartość pracy wyjścia z granicznymi wartościami częstotliwości i długości fotonu, który jest zdolny wywołać fotoefekt – w takim przypadku energia fotonu ledwo wystarcza na wybite elektronu:

$$h\nu_{gr} - W_0 = 0 \Rightarrow h\nu_{gr} = W_0 \Rightarrow \nu_{gr} = \frac{W_0}{h}$$

Częstotliwość graniczna promieniowania:

$$\nu_{gr} = \frac{c}{\lambda_{gr}} \Rightarrow \lambda_{gr} = \frac{c}{\nu_{gr}} = \frac{hc}{W_0}$$

Obliczona w ten sposób długość fali λ_{gr} nosi nazwę **długofalowej granicy zjawiska fotoelektrycznego**. Tylko fale świetlne o mniejszej długości, czyli większej częstotliwości, są w stanie wywołać fotoemisję.

**Przykład 1.**

Oblicz maksymalną długość fali światła zdolnego wywołać fotoemisję z powierzchni platyny. Praca wyjścia dla platyny wynosi 5,65 eV.

Rozwiązanie:

Dane:

$$W_0 = 5,65 \text{ eV} = 5,65 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 9,05 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Szukane:

$$\lambda_{\text{gr}} = ?$$

Po podstawieniu do wzoru na długofalową granicę zjawiska fotoelektrycznego otrzymujemy:

$$\lambda_{\text{gr}} = \frac{hc}{W_0} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{9,05 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 220 \text{ nm}$$

Odpowiedź: Fotoemisję z powierzchni platyny mogą wywołać fale świetlne o długości nie większej niż 220 nm, co odpowiada nadfioletowi. Jest to wynik zgodny z wartościami podanymi w tabeli.

Przykład 2.

Na płytkę cezu pada światło o energii kwantów 3 eV. Oblicz maksymalną prędkość emitowanych fotoelektronów.

Rozwiązanie:

Dane:

$$h\nu = 3 \text{ eV}$$

$$W_0 = 2,14 \text{ eV (wartość odczytana z tabeli)}$$

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg (stała fizyczna)}$$

Stosując wzór na energię kinetyczną, równanie Einsteina–Millikana zapisujemy jako:

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - W_0$$

Po przekształceniach otrzymujemy:

$$v_{\text{max}}^2 = \frac{2(h\nu - W_0)}{m} \Rightarrow v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(h\nu - W_0)}{m}}$$

Podstawiamy do wzoru, pamiętając o zamianie elektronowoltów na dżule:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(3 - 2,14) \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = \sqrt{0,302 \cdot 10^{12} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 0,55 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

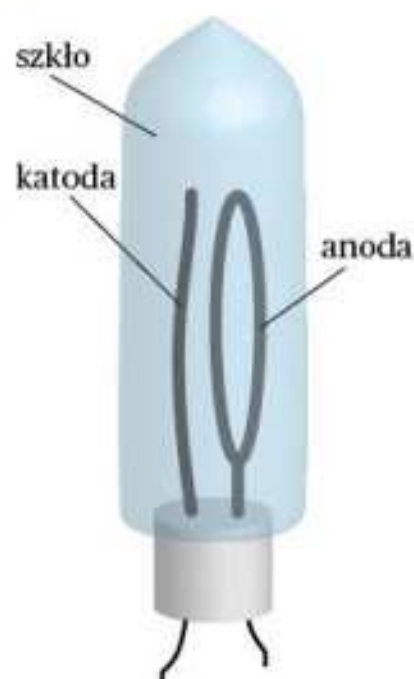
Odpowiedź: Maksymalna prędkość fotoelektronów w opisanym zjawisku wynosi $550 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.



fotokomórka

Zastosowania zjawiska fotoelektrycznego

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne powszechnie wykorzystuje się w bateriach słonecznych, noktowizorach czy też w obwodach elektrycznych sterowanych światłem, których zasadniczym elementem jest **fotokomórka** (rys. 21). Składa się ona z bańki kwarcowej (próżniowej lub wypełnionej gazem), której jedną połowę (katodę) pokrywa substancja światłoczuła o małej pracy wyjścia (np. cez), a naprzeciwko znajduje się elektroda zbierająca (anoda). Obie elektrody mają wtopione w szkło druty doprowadzające napięcie. Oświetlenie fotokomórki powoduje przepływ prądu, który można wykorzystać do różnych celów.



Rys. 21. Budowa fotokomórki.

Główne zastosowania fotokomórek to: sterowanie systemami alarmowymi (intruz przecinający wiązkę światła włącza prąd fotoelektryczny, co włącza alarm), układy liczące, układy mierzące czas podczas zawodów sportowych (fotokomórka sprzężona z zegarem kwarcowym), odtwarzanie dźwięku podczas wyświetlania filmu z taśmy itp.



Chcesz wiedzieć więcej?

Oprócz zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego znamy też zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne. Polega ono na przechodzeniu elektronów (pod wpływem światła) na wyższy poziom energetyczny w kryształach, bez opuszczania jego struktury, co skutkuje pojawieniem się nośników prądu. Dzięki temu substancje, które w ciemności są izolatorami, po oświetleniu mogą przewodzić prąd, a nawet go wytwarzać. Na tej zasadzie działają tak zwane ogniwa słoneczne i fotorezystory. Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne wymaga mniejszych energii kwantów, dzięki czemu może być wygodnie wykorzystywane już w zakresie światła widzialnego. Dlatego znajduje coraz liczniejsze zastosowania i stopniowo wypiera z użycia tradycyjną fotokomórkę.

zjawisko
fotochemiczne

Zjawisko fotochemiczne

Padający na materię kwant promieniowania elektromagnetycznego może nie tylko wyrwać z niej elektron, lecz także zainicjować zajście reakcji chemicznej. Proces ten nazywamy **zjawiskiem fotochemicznym**. Częsteczką substratu po zaabsorbowaniu fotonu o odpowiedniej energii przechodzi w stan wzbudzony lub wolny rodnik – twór o nieparzystej liczbie elektronów na orbicie. W obu przypadkach reaktywność substancji znacznie wzrasta, przez co może dochodzić do reakcji chemicznej lub całego ich łańcucha.

Zjawiskiem fotochemicznym rządzą dwa prawa, przypominające prawa zjawiska fotoelektrycznego:



Prawo Grotthusa–Drapera: tylko promieniowanie zaabsorbowane przez cząsteczkę może powodować przemianę fotochemiczną tej cząsteczki.

Prawo Starka–Einsteina: wzbudzenie jednej cząsteczki dokonuje się przez absorpcję jednego kwantu promieniowania.

Wynika z nich, że warunkiem koniecznym zajścia reakcji jest absorpcja fotonu o odpowiedniej energii, czyli częstotliwości większej od granicznej, zaś tempo zachodzenia reakcji uzależnione jest od ilości padających kwantów.

Ze zjawiskiem fotochemicznym mamy do czynienia w wielu dziedzinach. W przyrodzie najważniejsza jest reakcja fotosyntezy zachodząca w roślinach. Dzięki energii kwantów światła, cząsteczki wody i dwutlenku węgla łączą się ze sobą, tworząc glukozę i tlen. W ten sposób rośliny mogą w ogóle rosnąć i dostarczać tlenu zwierzętom. Reakcje fotochemiczne zachodzące na siatkówce oka są niezbędnym etapem w procesie widzenia.

Z reakcjami fotochemicznymi mamy do czynienia w fotografii (reakcje zachodzące w błonie fotograficznej), chemii (fotopolimeryzacja, fotoutlenianie, fotoredukcja itp.) i wielu gałęziach techniki.

przykłady zjawisk
fotochemicznych

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, jak można się przekonać, że fotoefekt w cynku może być wywołany tylko światłem ultrafioletowym.
- 2*. Przedstaw, jak można zmierzyć energię kinetyczną fotoelektronów.
3. Wytłumacz, w jaki sposób mechanika kwantowa wyjaśnia mechanizm zjawiska fotoelektrycznego.
4. Wymień znane ci zastosowania zjawiska fotoelektrycznego.
5. Na płytkę z pewnego metalu pada światło nadfioletowe o długości fali 150 nm. Maksymalna energia kinetyczna uwalnianych tym światłem fotoelektronów wynosi 2 eV. Oblicz pracę wyjścia elektronów z tego metalu.
6. Oblicz częstotliwość światła, które padając na starannie oczyszczoną płytkę miedzianą, spowoduje fotoefekt w taki sposób, że maksymalna energia kinetyczna uwolnionych elektronów wyniesie 1,5 eV. Jaka będzie maksymalna prędkość tych elektronów?

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Zjawisko fotoelektryczne to proces wybijania elektronów z powierzchni substancji pod wpływem padającego na nią promieniowania elektromagnetycznego. Uwolnione w ten sposób elektrony nazywamy fotoelektronami. s. 186
- Zjawisko fotoelektryczne jest natychmiastowe – następuje bez jakiejkolwiek zwłoki. s. 189
- Maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów nie zależy od natężenia promieniowania, a jedynie od długości jego fali. s. 189



- s. 189 • Ilość fotoelektronów jest proporcjonalna do natężenia promieniowania padającego na substancję.
- s. 190 • Einstein odkrył, że za zjawisko fotoelektryczne odpowiedzialne są fotony o odpowiednio dużej energii zderzające się z elektronami.
- s. 192 • Podstawowym urządzeniem wykorzystującym fotoefekt jest fotokomórka, która ma wiele zastosowań.
- s. 192 • Oprócz wybijania elektronów fotony mogą również inicjować reakcje fotochemiczne.
- s. 193 • Przykładami reakcji fotochemicznych są: reakcja fotosyntezy i reakcje zachodzące pod wpływem światła na błonie fotograficznej.



Analiza tekstu: Żagiel kosmiczny

Satelita LightSail 2 pomyślnie rozłożył żagiel słoneczny

Znajdujący się na orbicie eksperymentalny statek kosmiczny LightSail 2, opracowany przez Planetary Society, rozwinął swój żagiel słoneczny. Celem przedsięwzięcia jest zademonstrowanie technologii wykorzystania promieniowania słonecznego jako napędu.



LightSail 2 to trzeci statek kosmiczny w programie LightSail. Został wyniesiony na orbitę 25 czerwca 2019 r. na pokładzie rakiety Falcon Heavy firmy SpaceX i od tego czasu jego operatorzy przygotowywali się do rozwinięcia żagla. Wczoraj późnym wieczorem otworzyły się małe pudełka na satelicie, z których wysunął się materiał żagla. Cała operacja przebiegła pomyślnie.

Materiał, z którego zrobiony jest żagiel, ma grubość zaledwie 4,5 mikrometra – jest cieńszy niż ludzki włos. Sam żagiel to w rzeczywistości układ czterech mniejszych trójkątnych żagli, które razem tworzą duży kwadrat o powierzchni 32 metrów kwadratowych. Po jego rozwinięciu kontrolerzy statku będą chcieli wykorzystać go do podniesienia orbity, demonstrując moc i użyteczność koncepcji żagli słonecznych.

Żagiel słoneczny wykorzystuje pęd fotonów pochodzących ze Słońca, podobnie jak żaglówka wykorzystuje energię wiatru. Lekki żagiel nie wychwytyje fotonów. Fotony odbijają się od jego powierzchni i przekazują tym samym niewielką ilość energii, która napędza statek. To lekka, prosta technologia, która ma ogromny potencjał.



W próżni przestrzeni kosmicznej nie ma oporu powietrza, więc z czasem, gdy coraz więcej fotonów odbija się od żagla, prędkość statku wzrasta. Wszystko bez przenoszenia paliwa lub innego układu napędowego.

W pewnym sensie żagiel słoneczny jest dokładnie jak żagiel na łodzi. Zmiana kąta żagli pozwala na sterowanie statkiem kosmicznym.

Dopóki fotony będą uderzać w żagiel, statek będzie przyspieszać. Teoretycznie statek z takim napędem może osiągnąć prędkość, której rakietę chemiczną nigdy nie osiągnie. Oczywiście przyspieszenie nie będzie rosło cały czas w tym samym tempie. Im dalej od Słońca, tym przyspieszenie będzie się zmniejszać.

Poprzednik konstrukcji, która obecnie znajduje się na orbicie okołoziemskiej, LightSail 1, rozwinął swój żagiel w 2015 roku, ale nie wykonał żadnych kontrolowanych manewrów, wpadł w atmosferę Ziemi i spłonął. LightSail 2 został wyniesiony na wyższą orbitę, więc doświadczy mniej tarcia, co ma umożliwić manewry. Kontrolerzy misji zakładają, że LightSail 2 będzie funkcjonował przez rok.

W przyszłości lekkie żagle takie jak ten mogą być realnym sposobem napędzania małych satelitów przez Układ Słoneczny, a być może nawet poza nim, bez konieczności stosowania ogromnej ilości paliwa, której potrzebuje tradycyjny statek kosmiczny. Nawet jeśli przyspieszenie jest powolne, światło słoneczne jest stałe i teoretycznie może doprowadzić statek kosmiczny do imponujących prędkości.

A lekkie żagle niekoniecznie muszą być zasilane energią słoneczną. Powstał pomysł, by takie żagle napędzać potężnymi laserami, które mogą zwiększyć przyspieszenie, może nawet wystarczająco do podróży międzygwiazdnych. [...]

Źródło: *Satelita LightSail 2 pomyślnie rozłożył żagiel słoneczny*, Dziennik Naukowy, <https://bezpiecznylink.pl/n7340d>

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, na czym polega idea żagla kosmicznego.
2. Wymień zalety i wady żagla kosmicznego.
3. Wskaż potencjalne zastosowania żagla kosmicznego.
4. W takiej odległości od Słońca, w jakiej znajduje się Ziemia, ciśnienie światła słonecznego wynosi $4,6 \mu\text{Pa}$ przy pochłonięciu światła i dwa razy tyle przy całkowitym odbiciu.
 - a) Oblicz maksymalną siłę ciągu, jaką może zapewnić żagiel opisany w artykule.
 - b) Przyjmij, że masa statku kosmicznego napędzanego takim żaglem wynosi 100 kg. Oblicz jego przyspieszenie.
5. Wymień, w jaki sposób można zapewnić większe przyspieszenie statków kosmicznych napędzanych żaglami.

PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

- s. 166 1. Widmem dowolnego promieniowania nazywamy rozkład tego promieniowania na poszczególne składowe, ze względu na długości fal, częstotliwości, energie lub rodzaj cząstek.
- s. 166 2. Rozgrzane ciała stałe emitują promieniowanie, którego widmo ma charakter ciągły – obejmuje pewien zakres długości fal i częstotliwości.
- s. 168 3. Wykresem zależności natężenia promieniowania rozgrzanego ciała od długości fali jest krzywa emisji. Im wyższa temperatura, tym krzywa emisji znajduje się wyżej, a jej maksimum przesunięte jest w stronę fal krótszych.
- s. 171 4. Energia rozgrzanego ciała nie jest emitowana w sposób ciągły, tylko za pomocą pewnych porcji, zwanych kwantami, o wartości wprost proporcjonalnej do częstotliwości fali. Kwanty są rzeczywistymi cząstkami elementarnymi, które mogą się na przykład zderzać z elektronami.
- s. 173 5. W zależności od sytuacji światło zachowuje się albo jak fala, albo jak strumień cząstek (fotonów). Cechę tę nazywamy dualizmem korpuskularno-falowym.
- s. 175 6. Rozrzedzone gazy zachowują się odmiennie niż ciała stałe. Pobudzone do świecenia emitują światło o widmie złożonym z wąskich, barwnych, dobrze wyodrębnionych linii. Ze światła białego wychwytyują fale o określonych częstotliwościach. Mówimy, że ich widmo jest liniowe (emisyjne lub absorpcyjne).
- s. 177 7. Badaniem składu chemicznego substancji na podstawie widma emitowanego lub absorbowanego przez nią światła zajmuje się dział nauki i techniki zwany analizą widmową.
- s. 180 8. Do końca XIX wieku sądzono, że atomy są niepodzielne.
- s. 182 9. Pierwszą spójną (lecz nieostateczną) teorię budowy atomu sformułował Bohr na podstawie analizy widm emisyjnych atomów.
- s. 183 10. Atom zbudowany jest z jądra i obiegających go elektronów. Zarówno promienie orbit, jak i energie elektronów są skwantowane, tzn. mogą przyjmować tylko ściśle określone wartości.
- s. 183 11. W stanie podstawowym atom może trwać dowolnie długo. Nie promieniuje wtedy energii.
- s. 183 12. Elektron podczas przeskoku z jednej dozwolonej orbity na drugą emituje lub pochłania foton o ściśle określonej energii, dlatego w widmach emisyjnych i absorpcyjnych występują prążki o ściśle określonej długości fali i częstotliwości.
- s. 186 13. Zjawisko fotoelektryczne to proces wybijania elektronów z powierzchni substancji pod wpływem padającego na nią promieniowania elektromagnetycznego. Uwolnione w ten sposób elektrony nazywamy fotoelektronami.
- s. 189 14. Na drodze doświadczeń ustalono, że zjawisko fotoelektryczne jest natychmiastowe, maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów nie zależy od natężenia promieniowania, a jedynie od długości jego fali oraz że ilość fotoelektronów jest proporcjonalna do natężenia promieniowania padającego na substancję. Wyniki te były sprzeczne z przewidywaniami fizyki dziewiętnastowiecznej.
- s. 190 15. Prawidłową interpretację zjawiska fotoelektrycznego podał Einstein. Stwierdził on, że za to zjawisko odpowiadają fotony o odpowiednio dużej energii zderzające się z elektronami.
- s. 192 16. Zjawisko fotoelektryczne jest powszechnie używane w fotokomórkach.
- s. 192 17. Inicjowanie reakcji chemicznych przez fotony o odpowiedniej energii to zjawisko fotochemiczne.
- s. 192 18. Przykładami reakcji fotochemicznych są reakcja fotosyntezy i reakcje zachodzące pod wpływem światła na błonie fotograficznej.



Aby poznać jeszcze głębiej strukturę materii, przyjrzymy się jądro atomowemu. Jak się okazuje, jest ono około 10 000 razy mniejsze od samego atomu. Z jądrem atomowym wiąże się zjawisko promieniotwórczości, której mechanizmu początkowo nie rozumiano. Z uwagi na znikome rozmiary jąder i trudności eksperymentalne, koncepcje dotyczące budowy tego centralnego elementu atomu kształtowały się przez kilkadziesiąt lat.

Dział 5 poświęcono historii najważniejszych odkryć w dziedzinie fizyki jądrowej, zjawiskom zachodzącym w jądrze atomowym oraz metodom badawczym stosowanym przez fizyków jądrowych. Ponadto przedstawiono w tym dziale liczne zastosowania tej dziedziny nauki w medycynie, technice, życiu codziennym i wyjaśnianiu zjawisk zachodzących w Kosmosie.

5. Fizyka jądrowa



- ▶ Odkrycie i właściwości jądra atomowego
- ▶ Promieniotwórczość naturalna
- ▶ Rozpady promieniotwórcze
- ▶ Reakcje jądrowe
- ▶ Energia jądrowa i deficyt masy
- ▶ Wpływ promieniowania jonizującego na materię i organizmy żywe
- ▶ Zastosowania zjawiska promieniotwórczości w technice
- ▶ Zastosowania zjawiska promieniotwórczości w medycynie
- ▶ Reakcje rozszczepienia
- ▶ Energetyka jądrowa
- ▶ Reakcje termojądrowe
- ▶ Ewolucja gwiazd
- ▶ Analiza tekstu



5.1. Odkrycie i właściwości jądra atomowego

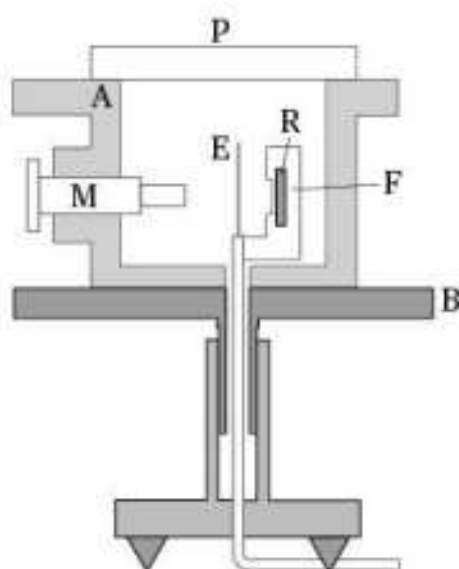
NA TEJ LEKCJI:

- poznasz historię odkrycia jądra atomowego;
- przeanalizujesz skład jądra atomowego i jego podstawowe właściwości;
- dowiesz się, co to jest deficyt masy.

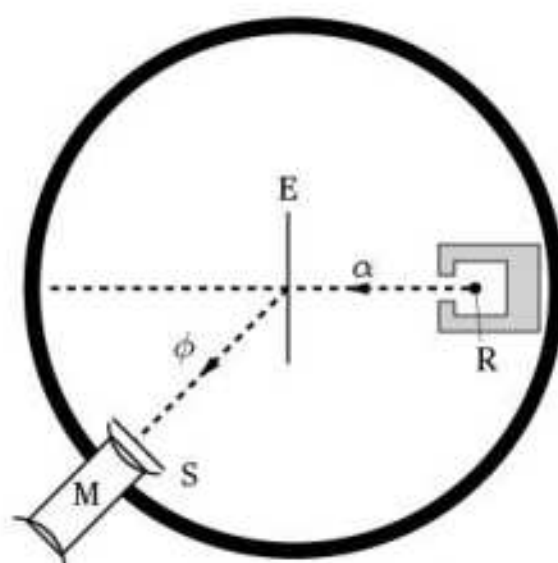
Doświadczenie Rutherforda

odkrycie jądra atomowego

Jak już wspomniano na lekcji o budowie atomu, za odkrywcę jądra atomowego uważa się Ernesta Rutherforda. W 1911 roku ten fizyk prawidłowo zinterpretował doświadczenie (rys. 1) wykonane przez swoich asystentów: Hansa Geigera (1882–1945) i Ernesta Marsdena (1889–1970). Doświadczenie to polegało na rozpraszaniu cząstek α , pochodzących ze źródła promieniotwórczego (R), na bardzo cienkiej (ok. $0,4 \mu\text{m}$ grubości) folii ze złota (E). O cząstkach α wiadano wówczas jedynie tyle, że są one podwójnie zjonizowanymi atomami helu i mają ładunek równy ładunkowi dwóch protonów. Przechodzące przez folię cząstki wywoływały scyntylacje (mikroskopijne błyski świetlne) na ekranie i były obserwowane przez obrotową lunetkę (M). Doświadczenie było bardzo żmudne, gdyż w tamtych czasach nie znano żadnych metod automatycznej rejestracji promieniowania i rozbłyski cząstek pod różnymi kątami (były ich dziesiątki tysięcy) trzeba było zliczać ręcznie, przyzwyczajając najpierw oko do ciemności.



eksperyment Marsdena-Geigera

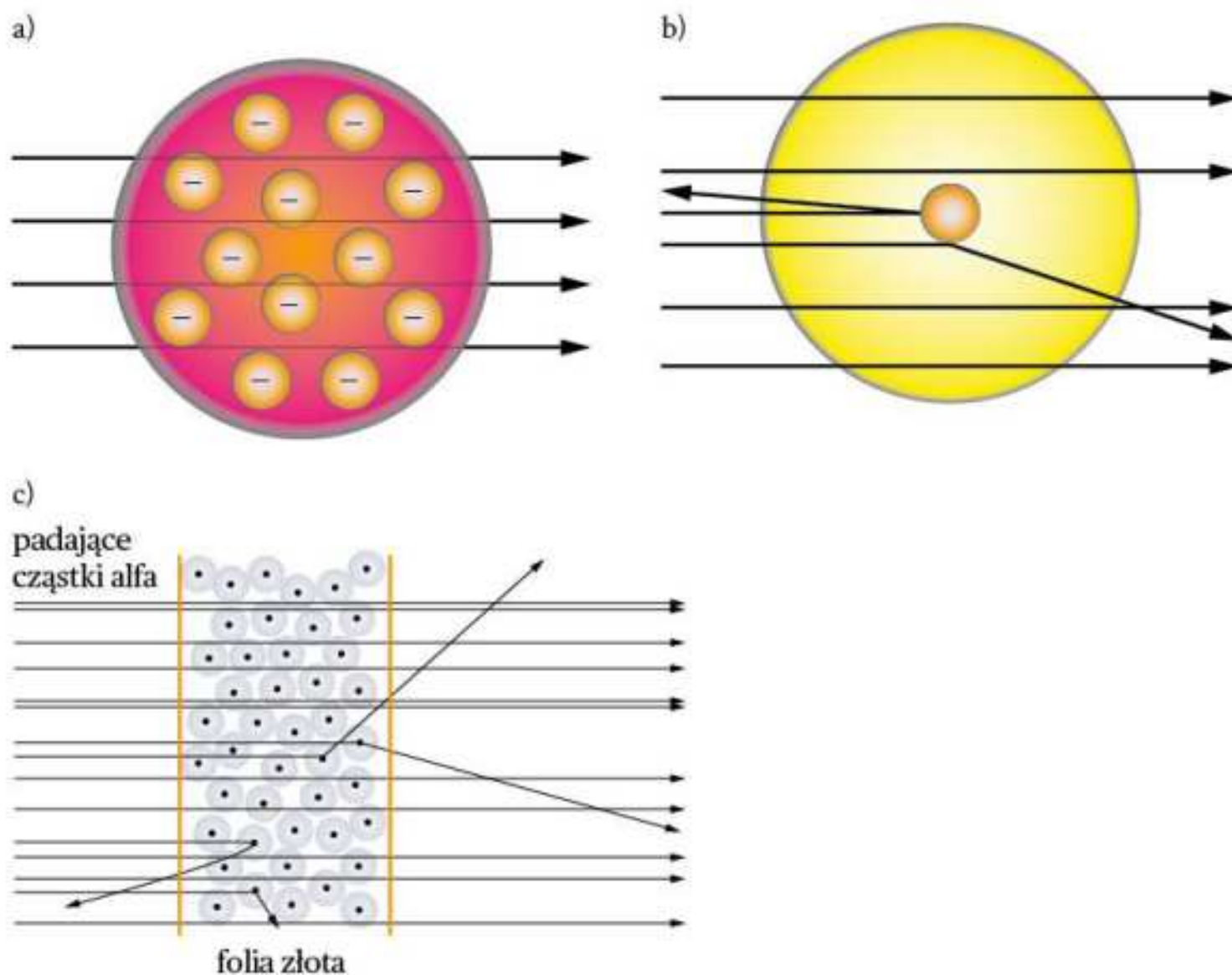


schemat aparatury Rutherforda

Rys. 1. Schemat aparatury Rutherforda: widok z boku i z góry. A – obudowa, B – podstawka, R – źródło promieniotwórcze, E – folia złota, F – osłona źródła, S – ekran scyntylatora, M – lunetka, P – pokrywa szklana.



Otrzymane wyniki zdumiały uczonych. Gdyby obowiązujący wtedy model Thomsona był słuszny, cząstki α powinny przechodzić przez folię podobnie jak kule karabinowe przez blachę. To znaczy powinny zostać częściowo wyhamowane przez materię dodatnią atomu i wyjść z drugiej strony, poruszając się wolniej w prawie niezmiennym kierunku (wiedziano już, że elektrony są kilka tysięcy razy lżejsze od cząstek α , więc nie mogły zbyt mocno wpływać na tory tych cząstek). Ewentualnie, cząstki powinny ugrzęznąć wewnątrz folii lub wszystkie się od niej jednakowo odbić. Tymczasem prawie wszystkie cząstki przeszły przez folię w sposób niezakłócony, nieliczne uległy nieznacznemu odchyleniu, a bardzo nieliczne (jedna na kilka tysięcy) wracały tam, skąd zostały wysłane, zupełnie jakby się odbiły od ściany (rys. 2).



Rys. 2. a) Przenikanie cząstek α przez atom wg modelu Thomsona. b) Rozpraszanie cząstek α w modelu Rutherforda. c) Rozpraszanie cząstek na warstwie atomów (folii).

Po 18 miesiącach żmudnych obliczeń Rutherford opublikował wnioski z tych doświadczeń. Stwierdził, że atom (którego średnicę oszacował na ok. 10^{-10} m) jest prawie pusty. Jego centralne miejsce zajmuje dodatnio naładowane **jądro atomowe** o średnicy rzędu 10^{-14} m (a więc o cztery rzędy wielkości mniejsze), skupiające praktycznie całą masę atomu. Wokół jądra poruszają się lekkie elektrony.

rozmiar atomu
i jego jądra



Jądra są tak małe, że chociaż w grubości folii mieści się kilka tysięcy warstw atomów, prawdopodobieństwo natknięcia się cząstki α na jądro jest znikome. W większości przypadków cząstki α przenikają więc przez folię jak przez próżnię. Jeśli jednak jakaś cząstka zbliży się do jądra, na skutek oddziaływania elektrycznego, zostaje od niego odepchnięta pod pewnym kątem. W szczególnym przypadku, gdy cząstka biegnie wprost na jądro, zostaje rozproszona pod kątem około 180° , czyli po prostu odbita. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy założymy, że masa jądra jest znacznie większa od masy cząstki α . W przeciwnym wypadku cząstka, zamiast się odbijać, wypchnęłaby jądro z dotychczasowego położenia.

Rys. 3. Ernest Rutherford (1871–1937) – wybitny fizyk nowozelandzki, pracujący głównie w Anglii. Badając promieniowanie jądrowe, wyodrębnił promienie α i β . Odkrył, że promieniotwórczość polega na rozpadzie pierwiastków, za co w 1908 r. otrzymał Nagrodę Nobla z chemii. Odkrył jądro atomowe oraz przeprowadził pierwszą na świecie reakcję jądrową. Jego podobiznę umieszczono na studolarowych banknotach nowozelandzkich.



Składniki jądra atomowego

składniki jądra

Analizując dynamikę zderzeń cząstek α z jądrami atomów różnych pierwiastków, szybko uświadomiono sobie, że jądra te są znacznie cięższe (przeważnie co najmniej dwukrotnie), niż wynikałoby to z ilości zawartych w nich **protonów**. Fakt ten próbowano interpretować na różne sposoby, często błędne z punktu widzenia dzisiejszej wiedzy. Problem rozwiązano dopiero w 1932 roku, gdy odkryto **neutron**. To cząstka obojętna elektrycznie i mająca masę niemal równą masie protonu. Od tej pory wiadomo, że w skład jądra wchodzi protony i neutrony utrzymywane razem za pomocą nieznanego wcześniej pola sił – oddziaływania jądrowego silnego.

Masy protonu i neutronu okazują się następujące:

$$m_p = 1,672622 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,674927 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Jak widać, ani kilogramy, ani jednostki podwielokrotne SI nie są wygodne do wyrażania mas atomów i cząstek elementarnych. Ponadto zauważmy, że proton i neutron ważą prawie tyle samo. Ponieważ są to elementarne składniki atomu, wygodnie byłoby wyrażać masy atomów w jednostkach zbliżonych do masy protonu lub neutronu. Dlatego w fizyce atomowej i chemii stosuje się tak zwaną atomową jednostkę masy (skrót u).

Jednostka masy atomowej to $1/12$ masy atomu węgla $^{12}_6\text{C}$ (w którego jądrze znajduje się 6 protonów i 6 neutronów):

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} M_{^{12}_6\text{C}} = 1,660539 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



W takich jednostkach masy poszczególnych jąder atomowych powinny się wyrażać liczbami całkowitymi, oznaczającymi łączną liczbę protonów i neutronów w jądrze. Protony i neutrony jako składniki jądra określamy wspólnym mianem **nukleonów**.

Podstawowymi parametrami opisującymi jądro atomowe są: liczba masowa A oraz liczba atomowa Z . Liczba masowa A jest równa liczbie wszystkich nukleonów. Natomiast liczba atomowa Z , nazywana też porządkową, odpowiada liczbie protonów. Jest ona zarazem ładunkiem jądra wyrażonym w jednostkach ładunku elementarnego e . Pierwiastek X o liczbie masowej A i liczbie atomowej Z zapisujemy jako A_ZX . Liczbę neutronów w jądrze obliczamy jako $A - Z$. W obojętnym elektrycznie atomie liczba elektronów krążących wokół jądra jest równa liczbie protonów w jądrze.

Przykład

Określ skład jądra atomu uranu ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Rozwiązanie:

Liczbę protonów odczytujemy wprost jako liczbę atomową i wynosi ona 92. Liczba neutronów jest równa $N = A - Z = 238 - 92 = 146$.

Odpowiedź: Jądro uranu ${}^{238}_{92}\text{U}$ zawiera 92 protony i 146 neutronów.

Izotopy

Liczby masowej jądra nie należy mylić z masą atomową, czyli właściwością pierwiastka zapisaną w układzie okresowym pierwiastków i wyznaczoną metodami chemicznymi. W układzie okresowym można zauważyć wiele pierwiastków, których masa atomowa daleka jest od liczby całkowitej. Na przykład masa atomowa chloru wynosi 35,453 u, cynku – 65,37 u, miedzi – 63,54 u, a rtęci – 200,59 u. Jak to możliwe, skoro jądro musi się składać z całkowitej liczby nukleonów? Otóż pierwiastki występujące w przyrodzie często stanowią mieszaninę różnych izotopów.

Izotop – odmiana danego pierwiastka o danej liczbie neutronów w jądrze, różniąca się tą liczbą od innych izotopów tego pierwiastka.

izotop

Dla przykładu: chlor występuje jako mieszanina dwóch izotopów: ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ (75,53%) i ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ (24,47%). Aby wyznaczyć przybliżoną masę atomową takiego pierwiastka, należy obliczyć średnią ważoną:

$$A = \frac{35 \cdot 75,73\% + 37 \cdot 24,47\%}{100\%} = 35,49 \text{ u}$$

Wynik ten nieznacznie różni się od podanego wcześniej, do czego za chwilę wrócimy.

Atomy różnych izotopów tego samego pierwiastka mają tę samą liczbę protonów w jądrze i identyczną konfigurację elektronową. Pod względem chemicznym niczym się więc nie różnią. W związku z tym nie istnieją żadne reakcje chemiczne, które pozwoliłyby je rozdzielić. Niemal identyczne są też właściwości fizyczne – nieznaczne różnice występują tylko tam, gdzie dana właściwość zależy bezpośrednio od masy atomu. Dlatego rozdzielanie pierwiastka na poszczególne izotopy jest zadaniem dość trudnym.



Chcesz wiedzieć więcej?

Pierwszego w historii rozdzielenia izotopów pierwiastka dokonał Joseph John Thomson – odkrywca elektronu – w 1912 roku. Wykorzystał on fakt, że strumień zjonizowanych (a więc pozbawionych jednego elektronu) atomów tego samego pierwiastka, ale różniących się masą, będzie się w różnym stopniu odchyłał w polu magnetycznym. Dzięki temu rozdzielił neon na dwa izotopy: $^{20}_{10}\text{Ne}$ (ok. 91%) i $^{22}_{10}\text{Ne}$ (ok. 9%). Później okazało się, że istnieje jeszcze trzeci izotop – $^{21}_{10}\text{Ne}$ – ale o bardzo małej zawartości (0,26%).

Aparatura Thomsona była pierwowzorem spektrografu masowego, którego budowę i zasadę działania opisywaliśmy w rozdziale 2.4.



Rys. 4. Spektrograf masowy.

Deficyt masy

Istnienie izotopów nie tłumaczy do końca faktu, że masy atomowe nie są idealnie liczbami całkowitymi. Zauważmy, że atomowa jednostka masy nie jest (jak moglibyśmy się tego spodziewać) średnią arytmetyczną masy protonu i neutronu, ale jest od obydwu mas mniejsza. Masy protonu i neutronu wyrażają się w jednostkach masy atomowej następującymi liczbami:

$$m_p = 1,007276 \text{ u}$$

$$m_n = 1,008665 \text{ u}$$

Obliczając masę atomu węgla $^{12}_6\text{C}$ jako sumę mas składników, otrzymujemy:

$$m = 6m_p + 6m_n = 12,096 \text{ u}$$



Dodatkowo należałoby jeszcze uwzględnić masę sześciu elektronów. Atom węgla z definicji waży 12 u. Okazuje się więc, że jądra atomowe są nieznacznie lżejsze od sumy mas ich składników. Podobny efekt uzyskaliśmy, obliczając masę atomową chloru.

Deficyt (defekt, niedobór) masy – różnica między sumą mas składników jądra a masą samego jądra, czyli:

deficyt masy

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)$$

m_p – masa protonu, m_n – masa neutronu, $M(A, Z)$ – masa jądra o liczbie masowej A i liczbie atomowej Z

To niezwykle zjawisko możemy wyjaśnić, opierając się na szczególnej teorii względności. Nukleony znajdujące się w jądrze są mocno ze sobą powiązane siłami jądrowymi. Aby wydobyć nukleon z jądra (a więc spowodować przemianę jądrową), należy mu dostarczyć znacznej energii. Energia ta, zgodnie ze słynnym wzorem $E = mc^2$, wiąże się z brakującą masą. Nazywamy ją **energią wiązania**. Jej dostarczenie uwalnia cząstkę z jądra i uzupełnia jej masę i odwrotnie – dokonując syntezy pierwiastków (np. tak jak to się dzieje w Słońcu), wyzwalamy energię promienistą, ale powodujemy, że cząstki elementarne, które weszły w skład utworzonych jąder, stały się lżejsze (więcej na ten temat w rozdz. 5.5).

energia wiązania

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wymień fakty, które skłoniły Rutherforda do sformułowania tezy o istnieniu jąder atomowych
2. Podaj skład jąder następujących pierwiastków: $^{22}_{10}\text{Ne}$, $^{14}_6\text{C}$, $^{45}_{20}\text{Ca}$, $^{210}_{84}\text{Po}$, $^{226}_{88}\text{Ra}$.
3. Wymień i omów powody, dla których masy atomowe wielu pierwiastków nie są liczbami całkowitymi.
4. Neon (liczba atomowa 10) występuje w przyrodzie w postaci mieszaniny izotopów mających 10, 11 i 12 neutronów w jądrze w ilości odpowiednio: 90,92%, 0,26% i 8,82%. Oblicz przybliżoną masę atomową neonu.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Jądro atomowe w 1911 roku odkrył Ernest Rutherford. Później stało się to podstawą do utworzenia przez Nielsa Bohra modelu atomu. s. 198
- Jądro jest dziesiątki tysięcy razy mniejsze od samego atomu i skupia niemal całą jego masę. s. 199
- Jądro składa się z protonów, których liczba decyduje o tym, jaki to jest pierwiastek i z neutronów, których liczba może być różna. s. 200
- Atomy tego samego pierwiastka różniące się liczbą neutronów w jądrze nazywamy izotopami. s. 201
- Deficytem masy nazywamy różnicę pomiędzy sumą mas składników jądra a masą samego jądra. s. 203
- Nukleony w jądrze okazują się lżejsze niż w stanie swobodnym z powodu energii wiązania. s. 203



5.2. Promieniotwórczość naturalna

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak doszło do odkrycia promieniotwórczości;
- poznasz podstawowe rodzaje i właściwości promieniowania jądrowego;
- przeanalizujesz prawa rządzące rozpadem promieniotwórczym.

Historia odkrycia promieniotwórczości

Wiele rzeczy w historii fizyki odkryto przypadkowo, zwłaszcza w dziedzinach, w których nikt się nie spodziewał nowości. Tak było z omawianym wcześniej zjawiskiem fotoelektrycznym. Podobnie stało się w przypadku promieniotwórczości.

odkrycie
promieniowania
jądrowego

W 1896 roku słynny francuski uczony Henri Becquerel (czytaj: ąri bekerel; 1867–1934) przeprowadzał serię doświadczeń z fluorescencją soli uranowej. Polegały one na wystawianiu tej soli na działanie promieni słonecznych, a następnie na umieszczaniu jej w ciemności w pobliżu kliszy fotograficznej, w celu rejestrowania słabego światła emitowanego przez sól. Była to część większego projektu mającego zbadać właściwości dopiero co odkrytych promieni Roentgena, które również wywołują fluorescencję (czyli świecenie pod wpływem wcześniej pochłoniętego promieniowania). Ponieważ pewnego dnia pogoda się popsula i nie można było przeprowadzać eksperymentów ze słońcem, Becquerel schował do jednej szuflady sól uranową i zapas klisz fotograficznych, owiniętych szczelnie w czarny papier, po czym wyjechał na kilka dni. Gdy wrócił, ze zdziwieniem stwierdził, że grudki soli same zrobiły sobie zdjęcie, mimo że ich wcześniej nie naświetlał, a papier fotograficzny był szczelnie zapakowany. Uznał, że sól uranowa samoistnie emituje nowy rodzaj przenikliwego światła, niewidzialnego dla oka, ale działającego na błonę fotograficzną. Przeprowadził szereg dalszych eksperymentów, ale błędnie zinterpretował ich rezultaty i doszedł do wniosku, że te promienie (zwane wówczas promieniami Becquerela) są mniej ciekawe od promieni Roentgena i przestał się nimi zajmować.



Rys. 5. Henri Becquerel – wybitny fizyk francuski, podobnie jak jego dziadek, ojciec, a następnie syn. Zajmował się badaniem fluorescencji, magnetyzmu i polaryzacji światła. Za odkrycie promieniotwórczości naturalnej otrzymał w 1903 r. Nagrodę Nobla wraz z małżeństwem Curie.



Rys. 6. Słynna błona fotograficzna, dzięki której Becquerel odkrył promieniotwórczość. Widnieją na niej oryginalne zapiski uczonego.



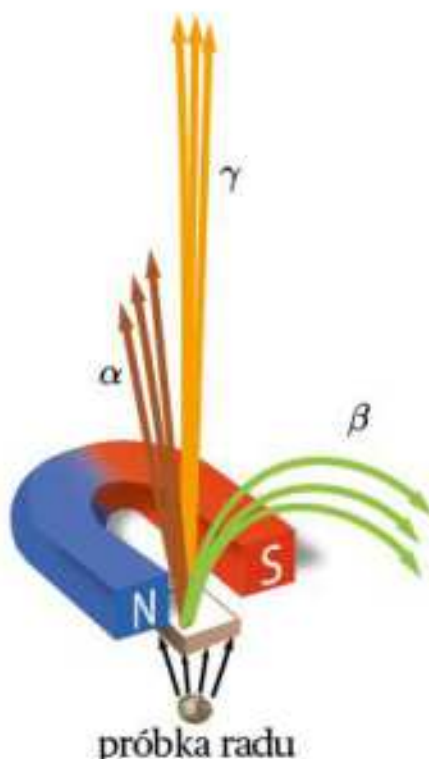
Wynikami tych badań zainteresowała się Maria Skłodowska-Curie. Wraz z mężem Pierrem Curie przeprowadziła szereg dalszych doświadczeń. Ich efektem było wyodrębnienie z soli uranowej dwóch nieznanych wcześniej pierwiastków: polonu i radu, odpowiedzialnych za to zjawisko. W 1903 roku Becquerel i małżeństwo Curie otrzymali za swoje odkrycia Nagrodę Nobla.

Rys. 7. Maria Skłodowska-Curie (1867–1934) – wybitna uczona, fizyczka i chemiczka. Urodziła się w Warszawie, gdzie ukończyła gimnazjum, a następnie kontynuowała naukę w nielegalnym Uniwersytecie Latającym. W 1891 r. wyjechała na studia do Paryża, gdzie poznała znanego fizyka Pierra Curie, swojego późniejszego męża. Była pierwszą kobietą w historii, która uzyskała doktorat z fizyki. Dwukrotnie została uhonorowana Nagrodą Nobla: w 1903 r. z fizyki za prace nad promieniotwórczością i w 1911 z r. chemii za badania dotyczące radu. Po tragicznej śmierci męża w 1906 r. objęła po nim katedrę fizyki na Sorbonie. Zmarła w Paryżu na białaczkę, będącą następstwem długotrwałego napromieniowania. Miała dwie córki – Ewę i Irenę, która również została słynną fizyczką.



Własności promieniowania jądrowego

Przez wiele lat nie rozumiano istoty tego promieniowania. Nie przypuszczano, że jest emitowane przez jądra atomowe, gdyż nie było wiadomo, że takie w ogóle istnieją (przypomnijmy: Rutherford odkrył jądro atomowe dopiero w 1911 r.). Jednak ustalono kilka jego właściwości:



- jonizuje powietrze – w obecności promieniowania naładowany elektroskop szybko się rozładowuje;
- przenika przez lekkie przeszkody, takie jak papier i blacha aluminiowa;
- powoduje fluorescencję wielu substancji;
- działa na emulsję fotograficzną podobnie jak światło.

Do zbadania natury tego promieniowania najbardziej przyczynił się Ernest Rutherford. Podał promienie Becquerela działaniu pola elektrycznego i magnetycznego oraz wykazał, że jest ono złożone z trzech składników różniących się właściwościami, które oznaczono kolejnymi literami alfabetu greckiego (rys. 8).

Rys. 8. Rozszczepienie promieniowania jądrowego w polu magnetycznym.

rodzaje promieniowania

Promieniowanie alfa jest słabo przenikliwe, zatrzymuje je nawet papier lub naśkórek. Ulega słabemu odchyleniu w polu elektrycznym i magnetycznym. Analiza zakrzywienia toru wykazuje, że ma dodatni ładunek i dużą masę. Okazuje się, że jest to rozpędzony strumień podwójnie zjonizowanych atomów helu, czyli jąder helu – złożonych z 2 protonów i 2 neutronów.

Promieniowanie beta jest bardziej przenikliwe – przechodzi przez papier i naśkórek, ale nie przez płytkę metalową czy skórę. Ulega silnemu odchyleniu w polu elektrycznym i magnetycznym w przeciwną stronę niż promienie α , co świadczy o ujemnym ładunku i małej masie. Okazało się, że jest to strumień rozpędzonych elektronów.

Promieniowanie gamma nie ulega odchyleniu w polu elektrycznym ani magnetycznym. Badania wykazały, że jest to fala elektromagnetyczna o bardzo małej długości i wielkiej energii. Jest bardzo przenikliwe – aby je zatrzymać, potrzebne są grube ściany z betonu, stali lub ołowiu.

Dzisiaj wiemy, że radioaktywność wiąże się z rozpadem jąder atomowych. Jeśli jądro ma zbyt dużą średnicę (jak w przypadku najcięższych pierwiastków układu



okresowego) albo ma niewłaściwą proporcję protonów i neutronów (izotopy promieniotwórcze lżejszych pierwiastków), siły jądrowe są zbyt słabe, aby w 100% przewyciężyć siłę odpychania kulombowskiego między nukleonami. Zgodnie z prawami mechaniki kwantowej, która rządzi mikroświatem, istnieje pewne prawdopodobieństwo, że składniki jądra przenikną barierę przyciągania jądrowego i opuszczą je w postaci promieniowania α lub β . Promieniowanie γ ma charakter towarzyszący i unosi nadmiar energii wyzwolonej w trakcie rozpadu.

Aktywność i prawo rozpadu promieniotwórczego

Ponieważ rozpadem promieniotwórczym rządzi rachunek prawdopodobieństwa, patrząc na atomy substancji promieniotwórczej, nigdy nie zgadniemy, który się kiedy rozpadnie. Jednak w makroskopowej próbce ilość atomów jest ogromna, więc możemy zastosować prawa statystyki i z dużą dokładnością określić, ile atomów rozpadnie się w jednostce czasu (bez wskazania które).

Aktywność substancji promieniotwórczej – ilość rozpadów promieniotwórczych w ciągu sekundy.

aktywność
substancji
promieniotwórczej

Jednostką aktywności jest **1 bekerel**, czyli 1 rozpad na sekundę $\left(1 \text{ Bq} = \frac{1}{\text{s}}\right)$. To bardzo mała jednostka. Kilogram dowolnej substancji z naszego otoczenia (np. mleka czy cegły) ma aktywność od kilku do nawet kilkuset bekereli – izotopy promieniotwórcze są wszechobecne. Substancje niebezpiecznie promieniotwórcze mają aktywność mierzona w kilo- i megabekerelach.

Chcesz wiedzieć więcej?

Przed wprowadzeniem SI używano innej jednostki o nazwie *curie* lub *kiur* (Ci). Odpowiadała ona aktywności jednego grama czystego radu. To z kolei jednostka ogromna, gdyż w gramie radu zachodzi średnio 37 miliardów rozpadów na sekundę. Zatem: $1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$.

Ciało typowego człowieka zawiera promieniotwórczy potas 40 o łącznej aktywności około $0,1 \mu\text{Ci} = 3,7 \text{ kBq}$.

Z aktywnością promieniotwórczą wiąże się kolejna wielkość fizyczna opisująca daną substancję – czas połowicznego rozpadu, zwany też okresem połowicznego rozpadu.

Czas (okres) połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ danego pierwiastka – czas, po którym połowa jąder tego pierwiastka ulegnie rozpadowi.

czas (okres)
połowicznego
rozpadu

Czasy połowicznego rozpadu niektórych izotopów przedstawiono w tabeli 1.





Tab. 1. Czasy połowicznego rozpadu wybranych izotopów

Izotop promieniotwórczy	Emitowana cząstka	Czas połowicznego rozpadu
tor ^{232}Th	α	14 000 000 000 lat
uran ^{238}U	α	4 510 000 000 lat
węgiel ^{14}C	β	5730 lat
rad ^{226}Ra	α	1590 lat
pluton ^{238}Pu	α	87 lat
jod ^{131}I	β	8 dni
radon ^{222}Rn	α	3,8 dnia
frans ^{223}Fr	α, β	21,8 min
krypton ^{99}Kr	β	1,3 sekundy

Jak widać, jądra niektórych izotopów ulegają rozpadowi błyskawicznie, podczas gdy inne nie zdążyły się jeszcze rozpaść od początku istnienia Ziemi.

Skoro z czasem zmniejsza się liczba jąder substancji promieniotwórczej, to co dzieje się z jej aktywnością? Jest dość oczywiste, że pół grama radu będzie miało dwa razy mniejszą aktywność niż cały gram. Aktywność substancji promieniotwórczej będzie się więc zmieniać w czasie analogicznie jak ilość jąder tej substancji. Na podstawie licznych obserwacji i analiz sformułowano prawo rozpadu promieniotwórczego:

prawo rozpadu
promieniotwórczego

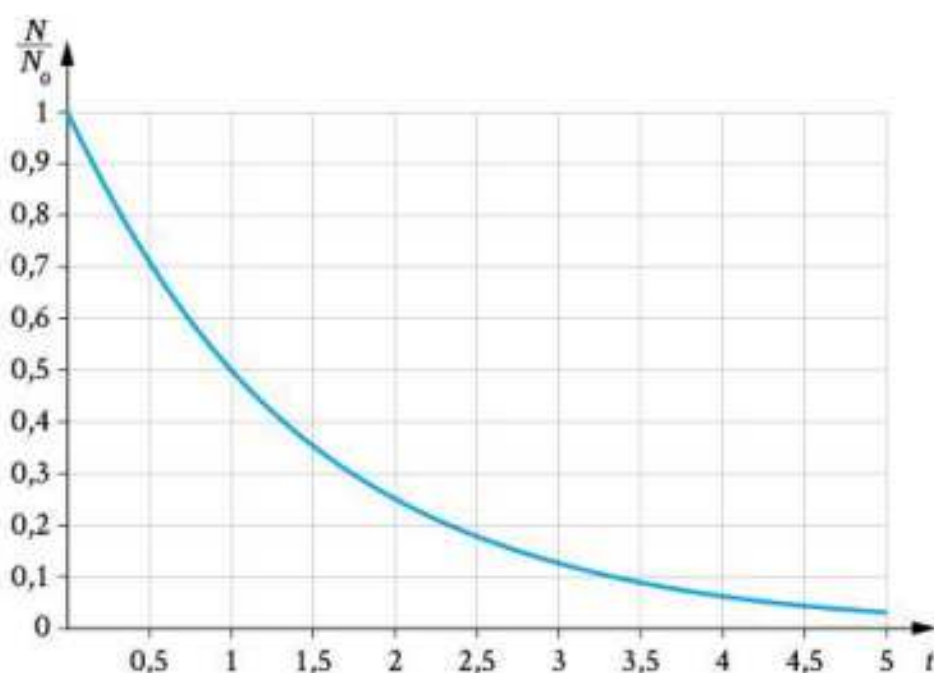
Aktywność substancji promieniotwórczej jest proporcjonalna do liczby jąder, które jeszcze nie uległy rozpadowi.

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

t – upływający czas

$N(t)$ – liczba jąder (lub aktywność substancji) po czasie t

N_0 – liczba jąder (aktywność) na początku



Z powyższego wzoru wynika, że po jednym półokresie z początkowej ilości pierwiastka promieniotwórczego pozostaje połowa, po dwóch półokresach – jedna czwarta, po trzech – $\frac{1}{8}$ itd. (rys. 9).

Rys. 9. Ilustracja przedstawiająca prawo rozpadu promieniotwórczego. Na osi poziomej pokazano czas mierzony w okresach połowicznego rozpadu, a na pionowej – ilość pozostających jąder w stosunku do ilości początkowej.



Przykład

Czas połowicznego rozpadu pewnego izotopu wynosi 12 godzin. Ile pozostanie z 8 gramów tego izotopu po upływie 3 dób?

Rozwiązanie:

Masa substancji promieniotwórczej jest proporcjonalna do ilości jąder, więc we wzorze zamiast ilością jąder możemy się posługiwać masą.

$$T_{1/2} = 12 \text{ h}$$

$$t = 72 \text{ h} = 6T_{1/2}$$

3 doby to w naszym przypadku 6 okresów połowicznego rozpadu, więc:

$$N = 8 \text{ g} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^6 = 8 \text{ g} \cdot \frac{1}{2^6} = \frac{8 \text{ g}}{64} = \frac{1}{8} \text{ g}$$

Odpowiedź: Z 8 gramów substancji o czasie połowicznego rozpadu 12 godzin po upływie 3 dób pozostanie $\frac{1}{8}$ grama.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wymień wspólne cechy wszystkich rodzajów promieniowania jądrowego i te, którymi się różnią.
2. Oblicz, o ile procent zmniejszy się aktywność pewnej substancji promieniotwórczej po upływie dwukrotności okresu połowicznego rozpadu.
3. Po 165 godzinach pozostało 12,5% początkowej ilości pierwiastka promieniotwórczego. Oblicz jego okres połowicznego rozpadu.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Promieniowanie jądrowe odkryto przypadkowo. Powoduje ono zaczernienie kliszy fotograficznej, jest przenikliwe, a dodatkowo jonizuje ośrodek i powoduje fluorescencję niektórych minerałów. s. 204
- Znamy trzy główne rodzaje promieniowania jądrowego: α , β i γ . Różnią się one naturą oraz właściwościami. s. 206
- Aktywność substancji promieniotwórczej to ilość rozpadów promieniotwórczych w ciągu sekundy. s. 207
- Okresem połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ danego pierwiastka nazywamy czas, po którym połowa jąder tego pierwiastka ulegnie rozpadowi. s. 207
- Prawo rozpadu mówi, że aktywność substancji promieniotwórczej jest proporcjonalna do liczby jąder, które jeszcze nie uległy rozpadowi. s. 208



5.3. Rozpady promieniotwórcze

NA TEJ LEKCJI:

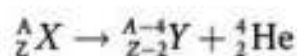
- poznasz szczegóły dotyczące rozpadów alfa i beta;
- prześledzisz mechanizm powstawania promieniowania gamma;
- dowiesz się, dlaczego pierwiastki promieniotwórcze wciąż występują w skorupie ziemskiej, mimo że czas ich połowicznego rozpadu jest zazwyczaj krótki.

Jak wynika z dotychczasowych rozważań, z emisją cząstki α lub β wiąże się zmiana składu jądra, a co za tym idzie – następuje przemiana jednego pierwiastka w drugi. W każdym rozpadzie promieniotwórczym musi zostać zachowana liczba nukleonów oraz sumaryczny ładunek. Przyjrzymy się obecnie dokładniej poszczególnym typom rozpadów i nauczymy się zapisywać je w postaci odpowiednich równań.

Rozpad α

rozpad α

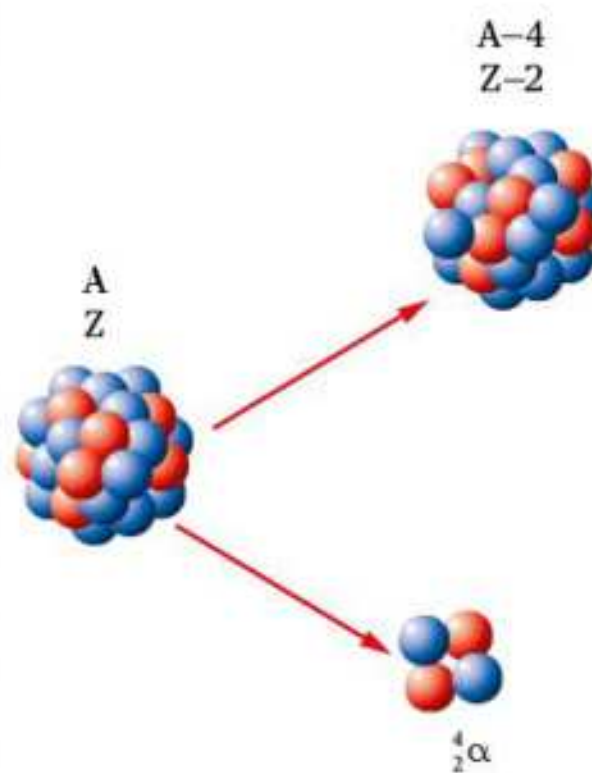
Ponieważ cząstka α (czyli jądro helu) składa się z 2 protonów i 2 neutronów, jej masa wynosi 4, a ładunek 2. **Rozpad α** zachodzi więc według schematu:



X – pierwiastek rozpadający się

Y – nowy pierwiastek, który powstał w wyniku rozpadu

Górne wskaźniki przy symbolach pierwiastków oznaczają masę atomową, a dolne – liczbę atomową. Liczba masowa pierwiastka przed rozpadem jest równa sumie liczb masowych produktów tego rozpadu. Identyczna reguła dotyczy ładunków zapisanych jako liczby atomowe. Jest to konsekwencja zasady zachowania ładunku.



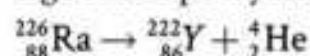
Rys. 10. Schemat rozpadu α .

Przykład 1.

Jądro radu 226 uległo rozpadowi α . Zapisz równanie reakcji i określ, jaki pierwiastek powstał w wyniku rozpadu.

Rozwiązanie:

Zgodnie z powyższym schematem zapiszemy:



Pierwiastkiem o liczbie porządkowej 86 jest promieniotwórczy gaz szlachetny – radon ${}_{86}^{222}\text{Rn}$.

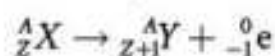
Odpowiedź: W wyniku rozpadu α radu 226 powstaje radon 222.



Na skutek rozpadu α powstaje izotop pierwiastka przesuniętego w układzie okresowym o dwie pozycje w lewo w stosunku do pierwiastka wyjściowego, a jego masa jest o cztery atomowe jednostki masy mniejsza.

Rozpad β

Rozpad β , polegający na emisji elektronu, zachodzi według schematu:

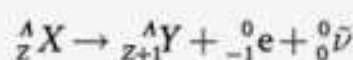


rozpad β

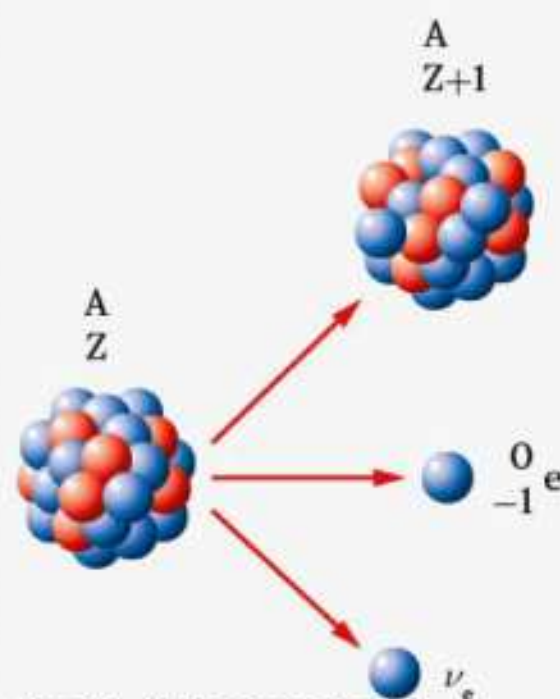
Skąd bierze się elektron w jądrze, skoro w jego skład wchodzi wyłącznie protony i neutrony? Otóż neutron w jądrach niektórych pierwiastków jest cząstką niestabilną i ulega rozpadowi na proton i elektron. W wyniku rozpadu beta powstaje zatem izotop pierwiastka przesuniętego w układzie okresowym o jedno miejsce w prawo. Liczba masowa pierwiastka się nie zmienia. Zauważmy, że liczbę masową elektronu zapisujemy jako zero. Jest ona niemal 2000 razy mniejsza od masy protonu, więc w naszej notacji można ją pominąć.

Chcesz wiedzieć więcej?

Przedstawiony powyżej schemat rozpadu jest niekompletny. Z uwzględnieniem wszystkich elementów wygląda on następująco:



Ostatni składnik równania to antyneutrino elektronowe, cząstka o znikomej masie i pozbawiona ładunku, bardzo trudna do obserwacji ze względu na swoją „niechęć” do oddziaływania z materią. Jest ona tak przenikliwa, że cała Ziemia wydaje się być dla niej przezroczysta. W każdej sekundzie twoje ciało przenikają setki milionów neutrin, nie wywołując żadnych skutków. Istnienie neutrin wynika z zasady zachowania ilości cząstek lekkich. Jeśli w jakimś procesie powstaje cząstka lekka, taka jak elektron, musi również powstać odpowiednia antycząstka, w tym przypadku antyneutrino, aby sumaryczna ilość cząstek lekkich we Wszechświecie się zgadzała.



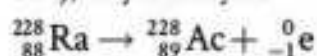
Rys. 11. Schemat rozpadu β .

Przykład 2.

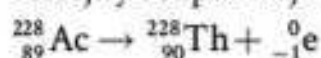
Jądro radu 228 uległo dwóm rozpadom β . Zapisz reakcje i określ pierwiastek, jaki powstał na końcu tego procesu.

Rozwiązanie:

Po pierwszym rozpadzie powstanie pierwiastek o liczbie porządkowej o 1 większej, czyli aktyn:



Kolejny rozpad daje w rezultacie jądro toru:

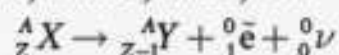


Odpowiedź: W wyniku podwójnego rozpadu β jądra radu powstanie jądro toru 228. Zauważmy przy tym, że pomimo dwóch rozpadów, liczba masowa jądra (równa 228) nie uległa zmianie.



**Chcesz wiedzieć więcej?**

Fizyka zna również rozpad β^+ , w którym proton ulega przemianie w neutron, a jego dodatni ładunek jest unoszony przez pozyton (czyli antyelektron). Dodatkowo powstaje neutrino elektronowe (jak wspomniano, zasady zachowania i symetrii wymagają, by powstawaniu każdej cząstki elementarnej towarzyszyła kreacja odpowiedniej antycząstki). W wyniku tego rozpadu powstaje jądro o tej samej liczbie masowej, ale liczbie porządkowej zmniejszonej o 1.

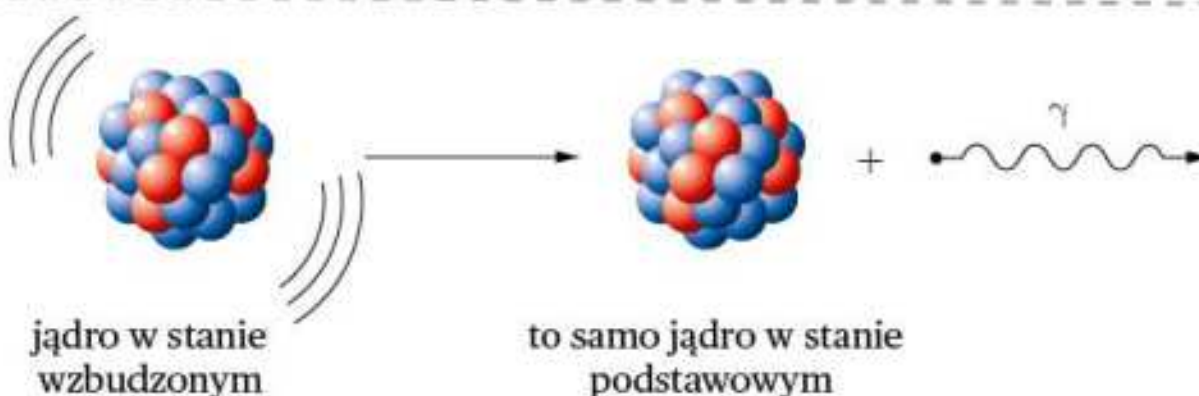


${}_0^0\nu$ – neutrino elektronowe, czyli cząstka niezwykle lekka, przenikliwa i pozbawiona ładunku

Odwrotnością rozpadu β jest tak zwany wychwyt elektronu. Polega on na wchłonięciu przez jądro elektronu z wewnętrznej powłoki. Liczba masowa pierwiastka nie zmienia się, ale jego liczba atomowa (podobnie jak w rozpadzie β^+) zmniejsza się o 1. Jądro emituje neutrino elektronowe i kwant gamma. Miejsce po elektronie zostaje natychmiast zapelnione przez elektron z wyższej powłoki, czemu towarzyszy emisja promieniowania rentgenowskiego. Reakcję tę można zapisać następująco:

**Promieniowanie γ**

Wyniki badań w zakresie fizyki jądrowej pozwalają przypuszczać, że nukleony w jądrze układają się na powłokach, podobnie jak elektrony w atomie. Ich energie są skwantowane. Jeśli wszystkie nukleony znajdują się na najniższych możliwych poziomach energetycznych, mówimy, że jądro jest **stabilne**. Rozpady promieniotwórcze wiążą się z przebudową struktury jądra, co prowadzi do stanu niestabilnego (wzbudzonego). Powrót nukleonów na najniższe powłoki wiąże się, podobnie jak w modelu Bohra, z emisją kwantu promieniowania. Tak więc **promieniowanie γ** jest zawsze promieniowaniem towarzyszącym innym zjawiskom, na skutek których jądro staje się **niestabilne**. Ponieważ siły jądrowe są bez porównania mocniejsze od sił elektrycznych, energia kwantu γ jest znacznie większa od energii kwantu światła.

promieniowanie γ Rys. 12. Schemat emisji kwantu γ .

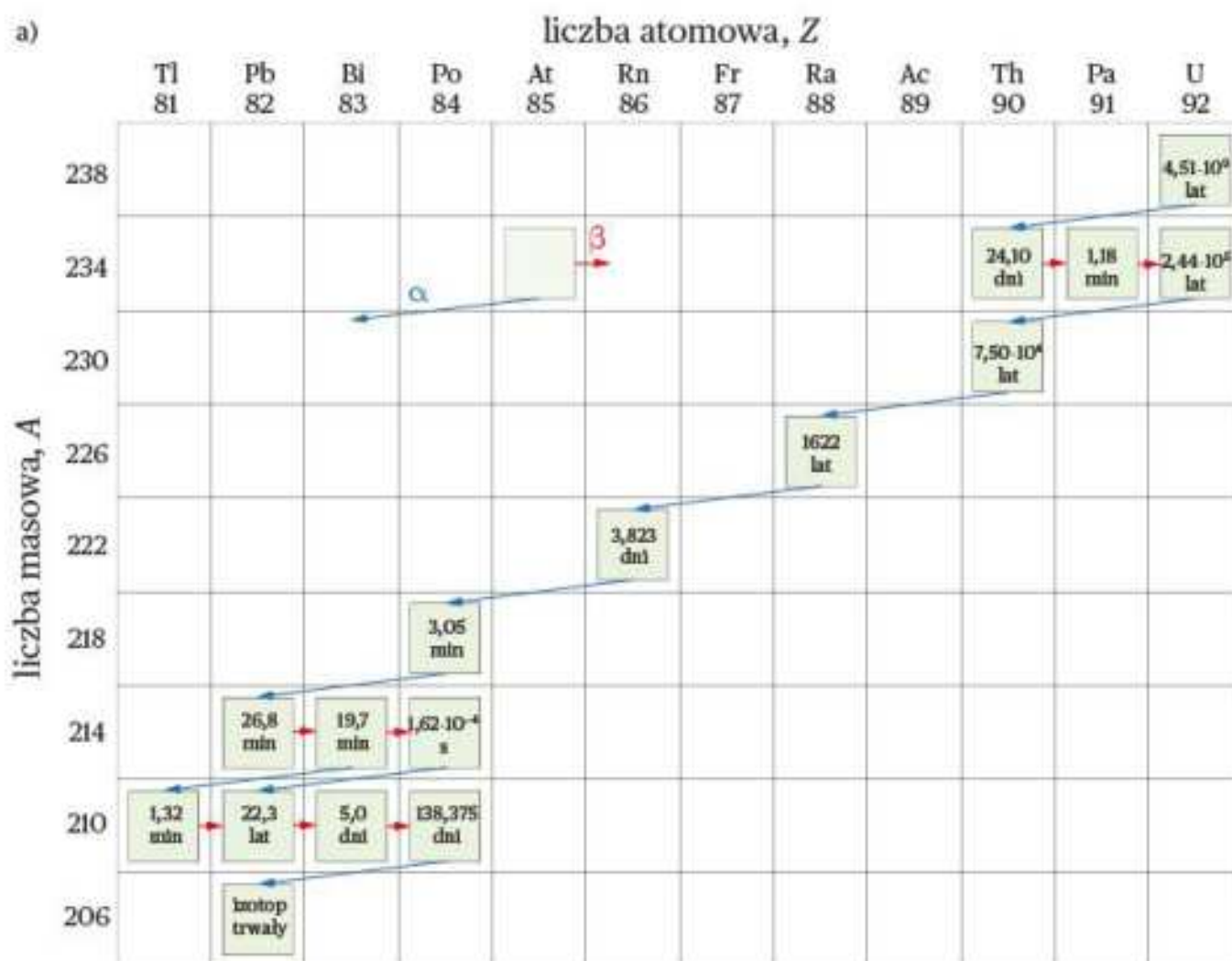


Szeregi promieniotwórcze

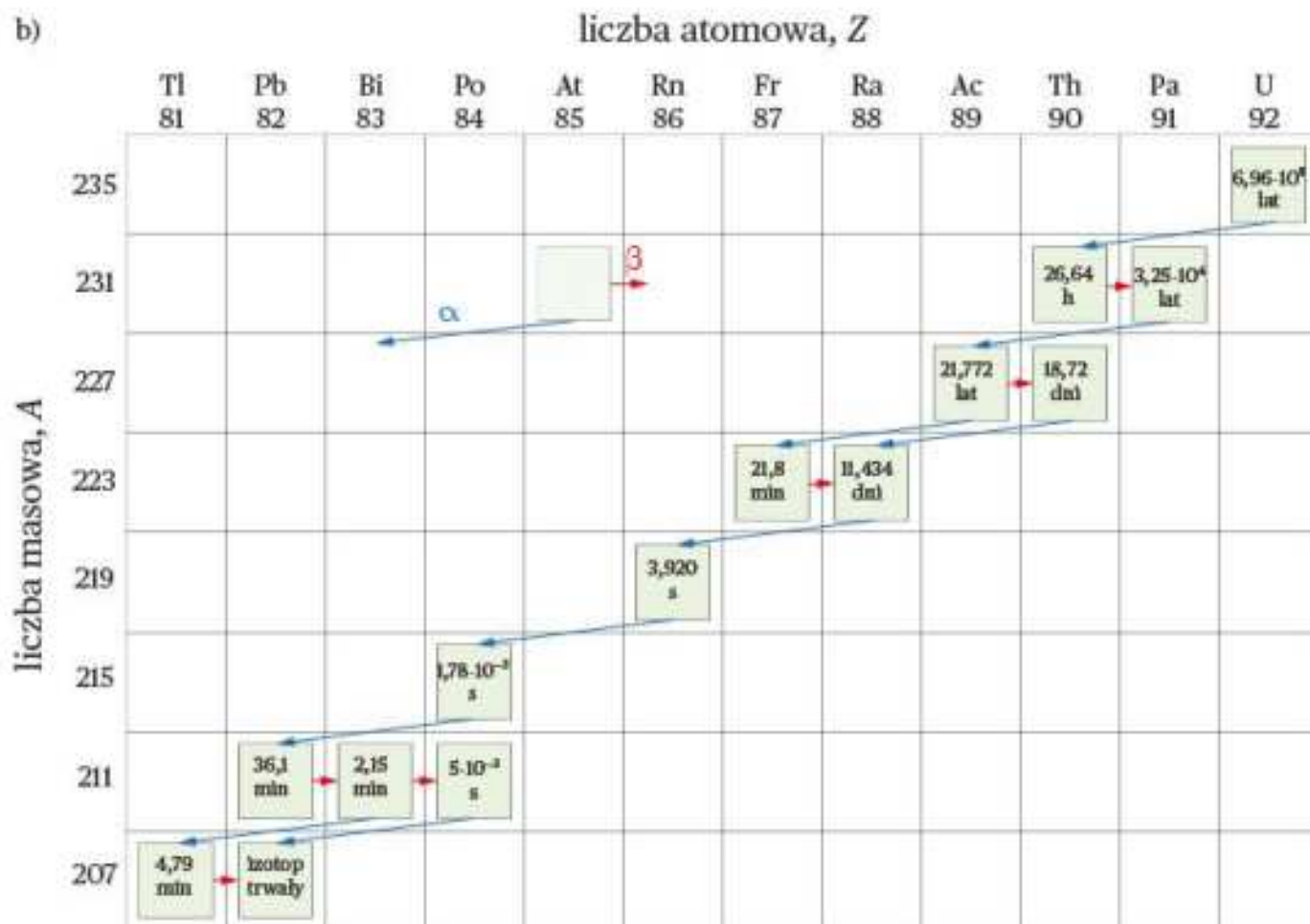
Przykład 2 dowodzi, że kolejne reakcje rozpadu mogą być połączone w łańcuchy. Tak się dzieje w rzeczywistości. Efektem rozpadu ciężkiego pierwiastka może być inny pierwiastek promieniotwórczy, który znowu się rozpada (z innym czasem połowicznego rozpadu, emitując być może inne cząstki) itd., aż powstanie jądro pierwiastka stabilnego: ołowiu lub bizmutu – są to dwa najcięższe pierwiastki niepromieniotwórcze (w 2003 r. udowodniono, że bizmut jest nietrwały, ale jego aktywność okazała się niezwykle mała – czas połowicznego rozpadu jest ponad miliard razy większy od szacowanego wieku Wszechświata). Znane są cztery rodziny (szeregi) promieniotwórcze pierwiastków powstających jedne z drugich (rys. 13). Liczby masowe izotopów pierwiastków należących do poszczególnych szeregów wyrażają się odpowiednio wzorami $A = 4n + 0$ (szereg torowy), $A = 4n + 1$ (szereg neptunowy), $A = 4n + 2$ (szereg uranowo-radowy) i $A = 4n + 3$ (szereg uranowo-aktynowy), n – liczba naturalna. Ponieważ w wyniku rozpadu α masa pierwiastka zmienia się o 4, a w rozpadzie β się nie zmienia, pierwiastek nie może „przeskoczyć” do innego szeregu – są to zbiory rozłączne.

efekt rozpadu
promieniotwórczego

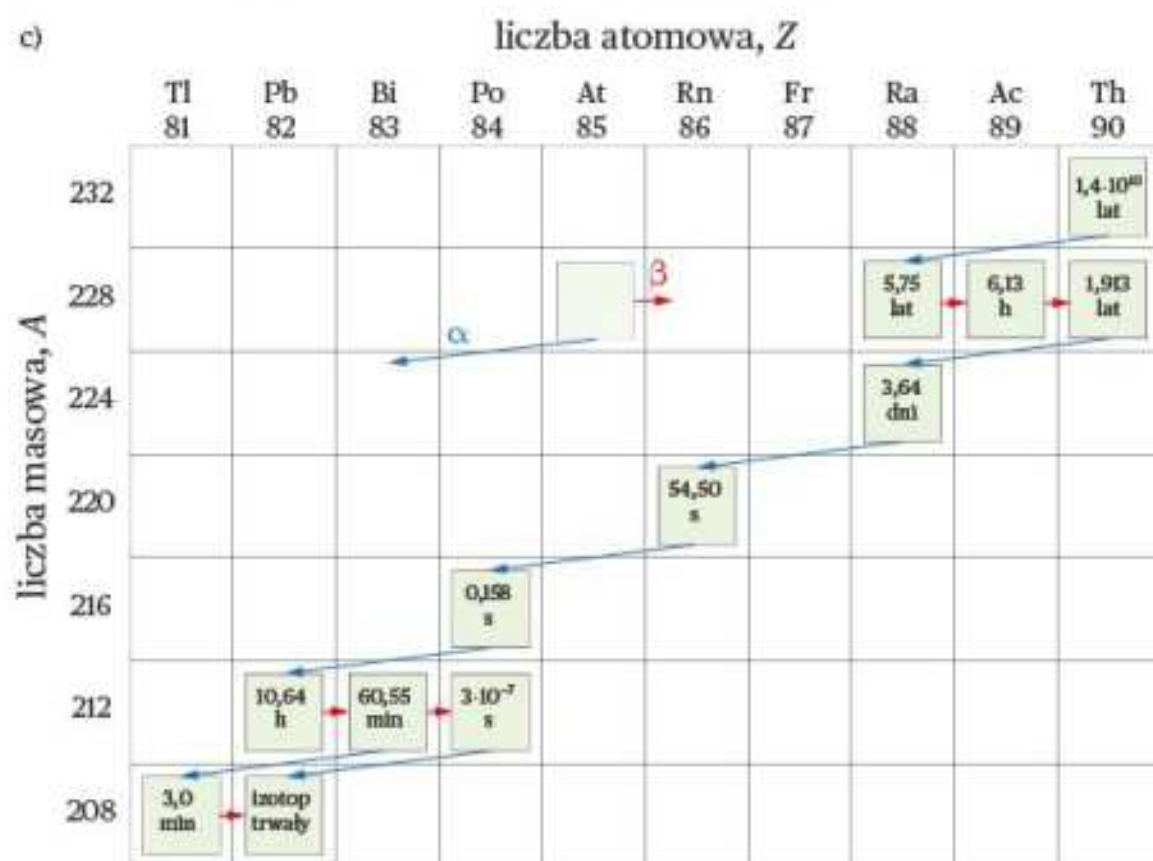
Istnienie szeregów promieniotwórczych wyjaśnia, skąd się biorą na Ziemi pierwiastki o krótkim czasie życia, jak radon (czas połowicznego rozpadu to niecałe 4 dni) lub frans (liczne izotopy mają czas połowicznego rozpadu od ułamków milisekund do 22 minut). Po prostu są one na bieżąco produkowane – jako efekt przejściowy rozpadu pierwiastków jeszcze cięższych – uranu i toru – których czasy połowicznego rozpadu są mierzone w miliardach lat i ich ziemskie zapasy nie zdążyły się jeszcze wyczerpać.



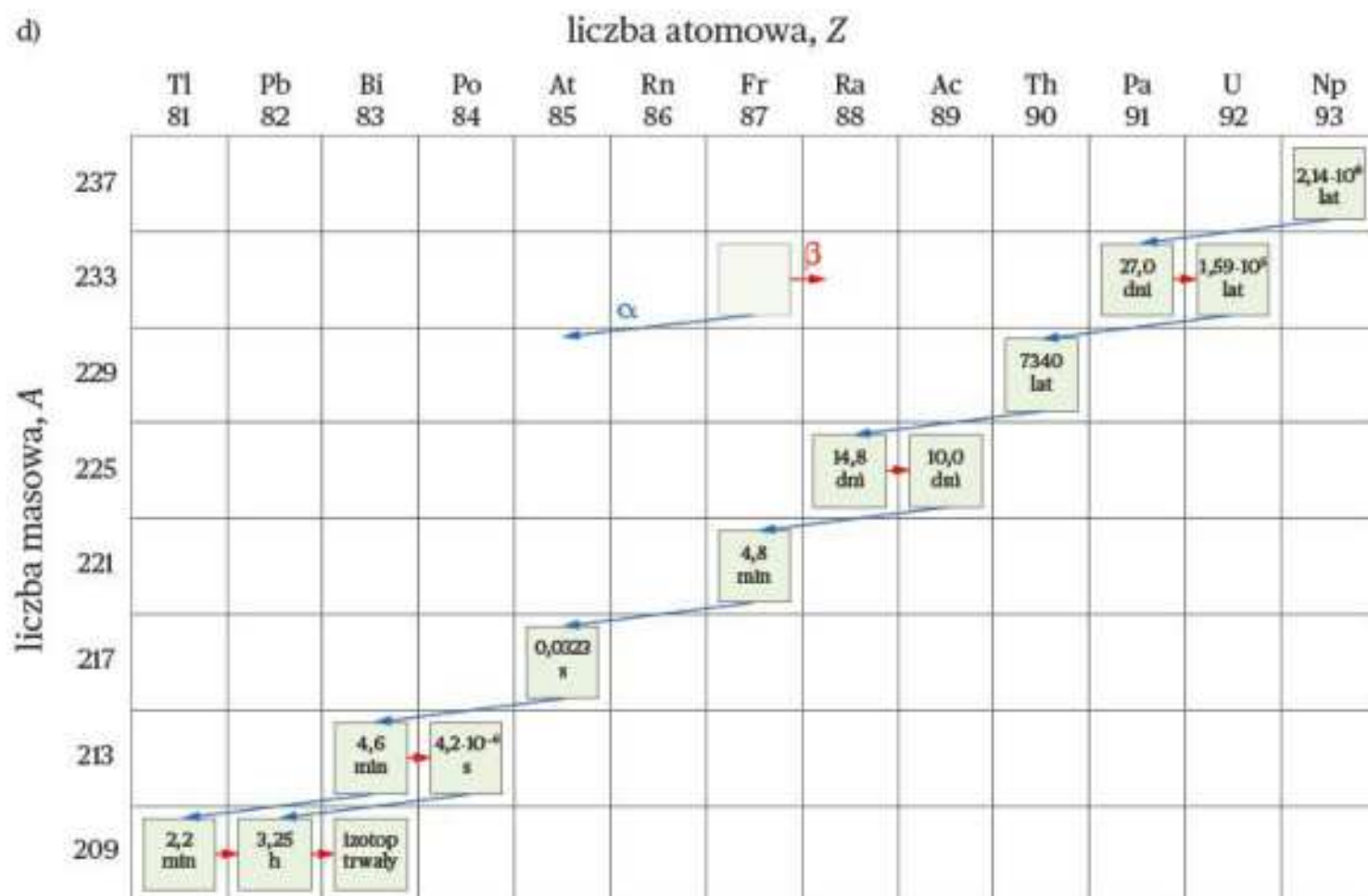
Rys. 13. a) Szereg promieniotwórczy uranowo-radowy.



Rys. 13. b) Szereg promieniotwórczy uranowo-aktynowy.



Rys. 13. c) Szereg promieniotwórczy torowy.



Rys. 13. d) Szereg promieniotwórczy neptunowy.

Chcesz wiedzieć więcej?

Tak jak atomy o całkowicie zapelnionych powłokach elektronowych (gazy szlachetne) są niezwykle odporne (obojętne chemicznie), tak też przypuszcza się, że jądra o całkowicie zapelnionych powłokach protonowych i neutronowych będą wyjątkowo stabilne. Obecnie trwają intensywne prace nad wytworzeniem na drodze syntezy nieistniejącego w przyrodzie pierwiastka mającego w jądrze 114 protonów i 184 neutrony. Przypuszcza się, że ten pierwiastek będzie znacznie trwalszy od innych ostatnio wytworzonych pierwiastków cięższych od uranu.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Jądro aktynu 225 wyemitowało w kolejnych etapach rozpadu trzy cząstki α i cząstkę β . Jaki pierwiastek powstał w wyniku tego rozpadu? Jaka jest masa powstałego izotopu?
2. Zidentyfikuj (posługując się wzorem na masy izotopów) szeregi promieniotwórcze, do których należą następujące izotopy: $^{212}_{82}\text{Pb}$, $^{218}_{84}\text{Po}$, $^{231}_{90}\text{Th}$ i $^{233}_{91}\text{Pa}$.





PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 210 • W wyniku rozpadu α powstaje nowy pierwiastek, którego jądro ma masę mniejszą o 4 i ładunek mniejszy o 2 od pierwiastka wyjściowego. Rozpad taki powoduje przesunięcie się pierwiastka o dwie pozycje w lewo w układzie okresowym.
- s. 211 • Rozpad β nie zmienia liczby masowej pierwiastka, natomiast zwiększa ładunek jądra o 1. Nowy pierwiastek zajmuje pozycję o jeden w prawo w układzie okresowym.
- s. 212 • Emisja kwantu γ towarzyszy zjawiskom powodującym przechodzenie jądra w stan wzbudzony i unosi nadmiar energii jądra.
- s. 213 • Pierwiastek powstały w wyniku rozpadu promieniotwórczego może być również promieniotwórczy. W przyrodzie znamy cztery naturalne szeregi promieniotwórcze złożone z pierwiastków powstających jedno z drugich. Niektóre z nich są bardzo nietrwałe i istnieją na Ziemi tylko dlatego, że są na bieżąco produkowane.

5.4. Reakcje jądrowe

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak przebiegają reakcje jądrowe;
- poznasz podstawowe typy reakcji jądrowych;
- nauczysz się zapisywać równania reakcji jądrowych z uwzględnieniem zasady zachowania ładunku oraz zasady zachowania liczby masowej.

Opisane na poprzednich lekcjach rozpady promieniotwórcze były przykładami zjawisk zachodzących samorzutnie. Okazuje się, że można celowo doprowadzić do zmiany składu jądra atomu pierwiastka, uderzając je innym jądrem lub cząstką elementarną. Zjawisko takie nazywamy reakcją jądrową. W wyniku reakcji otrzymujemy większość izotopów promieniotwórczych wykorzystywanych w technice i medycynie.

Pojęcie reakcji jądrowej

reakcja jądrowa

Reakcja jądrowa – przemiana jąder atomowych spowodowana ich wzajemnym oddziaływaniem lub ich oddziaływaniem z cząstkami elementarnymi.

reakcja cząstki z jądrem

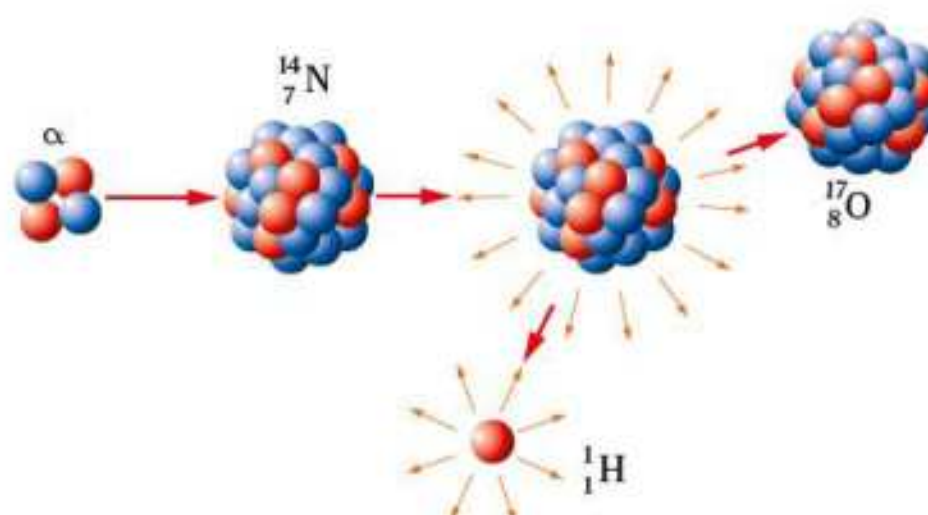
Oczywiście, aby jakaś cząstka lub jądro weszły w reakcję z innym jądrem, muszą być odpowiednio rozpędzone, by pokonać siłę odpychania kulombowskiego. Nie dotyczy to neutronów, na które nie działają siły elektrostatyczne. Zazwyczaj jądra, których skład chcemy zmienić, traktujemy jako nieruchome tarcze i bombardujemy je cząstkami pochodzącymi ze źródła promieniotwórczego lub rozpędzonymi w akceleratorze.



Do obserwacji reakcji jądrowych służą tak zwane detektory śladowe, w których rozpędzone cząstki pozostawiają ślady podobnie, jak czyni to samolot na niebie. Fakt zajścia reakcji rozpoznajemy po tym, że ślad rejestrowanej cząstki się rozwidla. Poszczególne produkty reakcji identyfikujemy po grubości i zasięgu śladu, kącie rozproszenia i krzywiznie toru w polu magnetycznym.

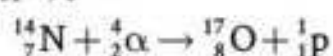


Rys. 14. a) Zarejestrowany na kliszy jądrowej efekt oddziaływania promieniowania kosmicznego z materią. b) Fotografia torów cząstek zarejestrowana w innym typie detektora śladowego: komorze pęcherzykowej.



Rys. 15. Pierwsza reakcja jądrowa zaobserwowana kiedykolwiek przez człowieka (konkretnie przez Ernesta Rutherforda) – przemiana azotu w tlen po zderzeniu z cząstką alfa.

Pierwszą reakcją jądrową zaobserwowaną przez człowieka była przemiana azotu w tlen pod wpływem zderzenia z cząstką α pochodzącą ze źródła promieniotwórczego (rys. 15). W wyniku zderzenia powstaje również jądro wodoru, czyli proton. Reakcję tę można zapisać następująco:



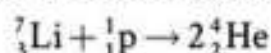
Zwróćmy uwagę, że suma liczb masowych (liczby nukleonów) wszystkich jąder przed reakcją i po niej wynosi niezmiennie 18, natomiast suma ładunków też się nie zmieniła i jest równa 9.

Stosowanie substancji promieniotwórczych jako źródła rozpędzonych cząstek wiąże się z wieloma ograniczeniami. Po pierwsze, repertuar samych cząstek jest dość ubogi, a po drugie, ich energie są stosunkowo niewielkie, niewystarczające do pokonania bariery oddziaływań większości jąder. Dużym postępem było wprowadzenie pierwszych

zachowanie
ładunku i liczby
masowej
w reakcjach
jądrowych



akceleratorów cząstek, za pomocą których można przyspieszać do dowolnych energii cząstki nieemitowane przez źródła naturalne – protony i jony cięższych pierwiastków. Pierwszą reakcją jądrową z udziałem protonu rozpędzonego za pomocą akceleratora zaobserwowano w 1932 roku. Było to rozbitcie jądra litu na dwa jądra helu:



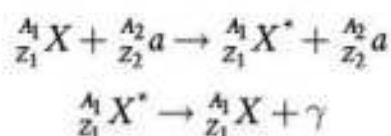
Zauważmy ponownie, że suma mas i ładunków w wyniku reakcji się nie zmieniła. Suma liczb masowych po obu stronach wynosi 8, a suma liczb atomowych to 4.

Typy reakcji jądrowych

Dzięki reaktorom jądrowym oraz cyklotronom przyspieszającym cząstki naładowane do ogromnych energii, potrafimy obecnie przeprowadzać niemal dowolne reakcje jądrowe, w tym takie, w wyniku których powstają pierwiastki nieznane wcześniej w przyrodzie. Ze względu na energie cząstek uczestniczących w reakcjach oraz charakter dokonywanych w jądrach przemian wszystkie reakcje jądrowe możemy podzielić na kilka typów.

Jeśli cząstka a uderza w jądro X ze zbyt małą energią, by dokonać zmian w jego strukturze, mówimy o **rozpraszaniu elastycznym**. W wyniku zderzenia skład elementów biorących udział w reakcji się nie zmienia, a całe zjawisko przypomina sprężyste zderzenie dwóch kul bilardowych (i tak też wygląda w detektorze śladowym).

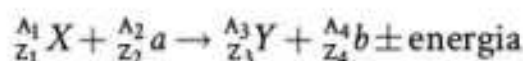
Nieco silniejsze uderzenie może zamienić część energii kinetycznej cząstki w energię potencjalną składników jądra, powodując ich przegrupowanie. Jest to tak zwane **rozpraszanie nieelastyczne**. W jego wyniku jądro przechodzi w stan wzbudzony, podobnie jak elektron, który pochłonął kwant światła. Stan wzbudzony (oznaczony w równaniu reakcji gwiazdką) jest niekorzystny energetycznie, dlatego po krótkiej chwili jądro przechodzi w stan podstawowy, emitując nadmiar energii za pomocą kwantu γ . Całą reakcję można zapisać za pomocą następującego schematu:



X – jądro, a – zderzająca się z nim cząstka

Ostateczny efekt reakcji jest taki, że początkowa energia kinetyczna pędzącej cząstki częściowo zamieniła się w energię kwantu promieniowania.

Uderzenie jądra tarczy cząstką o tak wielkiej energii, że może ona wniknąć do jego środka, prowadzi do **przemiany jądrowej**. W rezultacie powstaje zupełnie nowe jądro, czemu na ogół towarzyszy emisja zupełnie innej cząstki. Z przemianą jądrową wiąże się zawsze pochłonięcie lub wydzielenie pewnej ilości energii (por. rozdz. 5.5). Schematyczny zapis równania przemiany jądrowej jest następujący:



$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \text{ oraz } Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

Y – nowe jądro, b – nowa cząstka

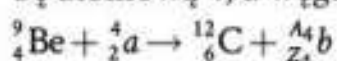


Przykład 1.

W wyniku bombardowania berylu 9 cząstkami α powstaje węgiel 12. Zapisz schemat reakcji i określ, czy (i jaka) cząstka zostanie wyemitowana podczas tej reakcji.

Rozwiązanie:

Z układu okresowego pierwiastków chemicznych odczytujemy, że beryl ma liczbę atomową 4, a węgiel – 6. Zatem:



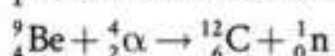
Zgodnie z zasadą zachowania liczby masowej możemy zapisać:

$$9 + 4 = 12 + A_4 \Rightarrow A_4 = 1$$

Zgodnie z zasadą zachowania ładunku możemy zapisać:

$$4 + 2 = 6 + Z_4 \Rightarrow Z_4 = 0$$

Wyemitowana cząstka ma masę 1 i ładunek 0, więc jest to neutron. Ostateczna postać równania reakcji wygląda więc następująco:

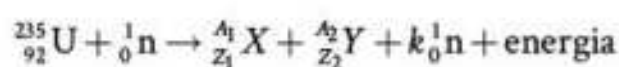


Odpowiedź: Przemianie berylu 9 w węgiel 12 pod wpływem cząstek α towarzyszy emisja neutronów.

Spośród różnych przemian jądrowych na szczególną uwagę zasługują **reakcje rozszczepienia**. Odkryli je Otto Hahn i Fritz Strassmann (czytaj: fric sztrasman) w 1938 roku. Polegają one na rozpadzie jąder uranu (i kilku innych ciężkich pierwiastków) na dwa mniejsze fragmenty (zazwyczaj o podobnych masach) po pochłonięciu neutronu. Rozszczepieniu towarzyszy emisja kilku (na ogół 2 lub 3) neutronów, które mogą wywołać rozszczepienie kolejnych jąder uranu. Prowadzi to do reakcji łańcuchowej stanowiącej podstawę działania reaktora jądrowego i bomby atomowej. Reakcje rozszczepienia zostały przedstawione w rozdziale 5.9. Obecnie ograniczymy się do przeanalizowania jednego przykładu.

reakcja
rozszczenia

W przypadku uranu 235 reakcję rozszczepienia możemy zapisać następująco:



Z zasady zachowania liczby masowej wynika: $235 + 1 = A_1 + A_2 + k$, natomiast z zasady zachowania ładunku: $92 = Z_1 + Z_2$.

Przykład 2.

Uzupełnij równanie reakcji ${}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{130}_{51}\text{Sb} + {}^{107}_{Z_2}\text{Y} + k {}^1_0\text{n} + \text{energia}$.

Rozwiązanie:

Liczbę porządkową nieznanego pierwiastka Y obliczymy z zasady zachowania ładunku:

$$94 = 51 + Z_2 \Rightarrow Z_2 = 43$$

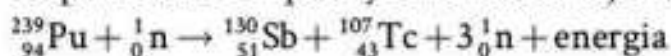
Na podstawie okresowego układu pierwiastków stwierdzamy, że liczbę atomową równą 43 ma technet. To pierwiastek niewystępujący w przyrodzie, gdyż wszystkie jego izotopy są promieniotwórcze i mają krótki czas połowicznego rozpadu (śladowe ilości technetu w skorupie ziemskiej pochodzą z prób z bronią



nuklearną – powstał m.in. w takich reakcjach, jak rozpatrywana w tym zadaniu).
Liczbę neutronów obliczymy z zasady zachowania liczby masowej:

$$239 + 1 = 130 + 107 + k \Rightarrow k = 3$$

Odpowiedź: Kompletny schemat reakcji ma postać:



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. W wyniku zderzenia sodu 23 z cząstką α mogą powstać (z różnym prawdopodobieństwem) następujące izotopy: a) magnez 25, b) magnez 26, c) aluminium 26. W każdym z tych przypadków jest emitowana jakaś cząstka (za każdym razem inna) i wydzielana energia. Określ, jakie to są cząstki, i zapisz w zeszycie kompletne równania reakcji dla wszystkich trzech przypadków.
2. Jądro uranu 235 po pochłonięciu neutronu rozpadło się na jądro molibdenu 98 i jądro pewnego innego pierwiastka, emitując przy tym 2 neutrony i 4 elektrony. Podaj nazwę tego drugiego pierwiastka i oblicz masę jego jądra.
3. Oblicz, ile neutronów uwalnia się w wyniku rozszczepienia jądra plutonu 239 na jądra baru 144 i strontu 94. Żadne inne cząstki (poza kwantami γ) w tym procesie nie powstają.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 216 • Reakcją jądrową nazywamy przemianę jąder atomowych spowodowaną ich wzajemnym oddziaływaniem lub ich oddziaływaniem z cząstkami elementarnymi.
- s. 216 • Aby cząstka naładowana mogła się zderzyć z jądrem, musi mieć odpowiednio dużą energię kinetyczną, w przeciwieństwie do neutronu, który nie musi pokonywać odpychania kulombowskiego.
- s. 217 • We wszystkich reakcjach jądrowych obowiązuje zasada zachowania ładunku oraz zasada zachowania liczby masowej.
- s. 219 • Wniknięcie neutronu do jądra niektórych izotopów uranu, plutonu i kilku innych ciężkich pierwiastków może spowodować reakcję rozszczepienia, czyli rozpadu jądra na dwa fragmenty o podobnej wielkości, z jednoczesną emisją kilku dodatkowych neutronów.



5.5. Energia jądrowa i deficyt masy

NA TEJ LEKCJI:

- zrozumiesz istotę energii jądrowej;
- nauczysz się stosować bilans energetyczny reakcji jądrowych.

Skąd się bierze energia jądrowa?

Przez całe stulecia zarówno w fizyce, jak i w chemii wierzono w słuszność zasady zachowania masy. Pomiary zdawały się wskazywać, że jeśli na przykład spalimy określoną ilość węgla w odpowiedniej ilości tlenu, to powstały dwutlenek węgla będzie ważyć tyle, co użyty do reakcji węgiel i tlen. Dzięki Einsteinowi wiemy, że to nieprawda. Dwutlenek węgla jest w znikomym stopniu lżejszy od węgla i tlenu, z których powstał, a brakująca masa zamieniła się na energię wyzwoloną w procesie spalania. Atomy węgla i tlenu są ze sobą połączone siłami elektrycznymi. Energia potencjalna ciał związanych ze sobą jest ujemna, podobnie jak ujemna jest energia elektronu krążącego w atomie.

Związek między masą i energią opisuje najsłynniejszy wzór w fizyce: $E = mc^2$, E – energia, m – masa, c – prędkość światła w próżni, wynosząca około $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Wynika z niego, że masa jest równoważna energii, a energia – masie. Jeśli więc w jakimś układzie wydzielą się energia, to znaczy, że masa tego układu musi zmaleć.

Dlaczego ubytek masy w reakcjach chemicznych tak długo uchodził uwadze uczonych? Obliczmy, ile energii wydzieliliby się podczas „zniknięcia” 1 kilograma masy:

$$E = mc^2, \quad E = 1 \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

Jest to niewyobrażalna ilość energii, zdolna podgrzać do wrzenia wodę w sporym jeziorze albo dokonać totalnych zniszczeń na znacznym obszarze. Taka energia wydzieliliby się podczas wybuchu ponad 140 bomb podobnych do tej zrzuconej na Hiroszimę. Odwróćmy zatem problem i obliczmy, ile „waży” 1 dżul energii:

$$m = \frac{E}{c^2}, \quad m = 1,11 \cdot 10^{-17} \text{ kg} = 1,11 \cdot 10^{-14} \text{ g}$$

Jest to wartość znikoma. Ze względu na ogromną wartość czynnika c^2 mała masa jest równoważna wielkiej ilości energii, a energia odpowiada bardzo niewielkiej masie.

Nukleony w jądrze są powiązane potężnymi siłami jądrowymi, wielokrotnie przewyższającymi siłę odpychania kulombowskiego protonów. Rozdzielenie jądra na poszczególne składniki wymaga zatem dostarczenia energii znacznie większej od tej, z jaką mamy do czynienia w reakcjach chemicznych. Nazywamy ją **energią wiązania**. Łącząc protony i neutrony w jądro, wyzwalamy tę energię i powodujemy, że nukleony stają się lżejsze. Zasady zachowania liczby masowej (liczby nukleonów) nie należy w żadnym wypadku utożsamiać z zasadą zachowania masy, która w reakcjach jądrowych nie jest spełniona.

zasada zachowania
liczby masowej
a deficyt masy



Ponieważ będziemy się zajmować reakcjami jądrowymi z udziałem pojedynczych jąder o masach wyrażonych w jednostkach masy atomowej, obliczmy, ile energii wydzieliliby się w procesie, w którym masa zmniejszyłaby się o jedną jednostkę masy atomowej:

$$E = mc^2$$

$$E = 1 \text{ u} \cdot \left(299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \approx 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 8,98755 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \approx 1,492 \cdot 10^{-10} \text{ J} \approx$$

$$\approx \frac{1,492 \cdot 10^{-10} \text{ J}}{1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}} \approx 0,9315 \cdot 10^9 \text{ eV} = 931,5 \text{ MeV}$$

Użyliśmy tutaj dokładnej wartości prędkości światła, gdyż rachunki muszą być precyzyjne. Energię wyraziliśmy również w jednostkach odpowiednich do skali atomowej, czyli w elektronowoltach. Definicja elektronowolta została przedstawiona w rozdziale 4.2.

Powróćmy do naszego przykładu z deficytem masy węgla, rozpatrywanym w rozdziale 5.1.

Jak pamiętamy, deficyt masy obliczamy według wzoru:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)$$

m_p – masa protonu, m_n – masa neutronu, $M(A, Z)$ – masa jądra o liczbie masowej A i liczbie atomowej Z

W naszym przypadku:

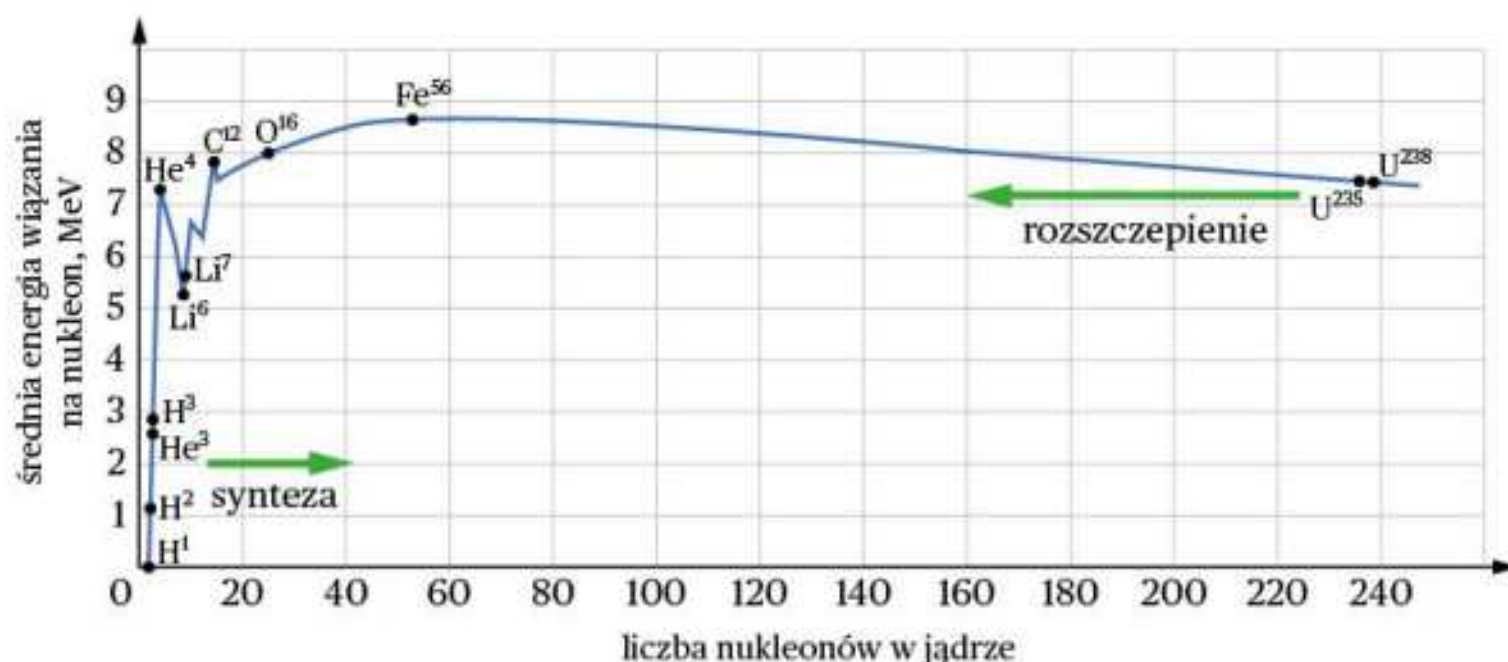
$$\Delta m = 6m_p + 6m_n - M(6, 6) = 12,096 \text{ u} - 12 \text{ u} = 0,096 \text{ u}$$

Po przeliczeniu tego na energię otrzymujemy:

$$E = \Delta mc^2 = 0,096 \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = 89,424 \text{ MeV} = 1,43 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

Taka energia wydzieliliby się, gdybyśmy połączyli ze sobą 6 protonów i 6 neutronów, czyli dokonali syntezy węgla. Po podzieleniu tej wartości przez liczbę nukleonów w jądrze (czyli 12) otrzymujemy energię wiązania przypadającą na jeden nukleon (w naszym przypadku będzie to ok. 7,45 MeV). Każdy z protonów i neutronów po wejściu w skład jądra węgla staje się lżejszy o wartość odpowiadającą tej energii. Zauważmy przy okazji, że deficyt masy dla węgla wynosi mniej niż 1% masy całkowitej węgla.

Identyczne rachunki można przeprowadzić dla dowolnego jądra. Okazuje się, że deficyt masy przypadający na 1 nukleon jest dla każdego pierwiastka inny, co pokazano na wykresie na rysunku 16. Odnajdziemy na nim otrzymany przed chwilą wynik dla węgla. Widzimy, że ze wzrostem liczby masowej energia wiązania najpierw gwałtownie rośnie, dla żelaza osiąga maksimum, po czym wolno spada. Oznacza to, że żelazo 56 jest najtrwalszym pierwiastkiem w przyrodzie, gdyż aby rozdzielić jego jądro na elementy składowe, trzeba zużyć (w przeliczeniu na 1 nukleon) najwięcej energii.



Rys. 16. Energia wiązania przypadająca na nukleon w funkcji masy atomowej pierwiastka.

Wykres ten wskazuje potencjalne metody pozyskiwania energii jądrowej. Trzeba dokonywać takich przemian jądrowych, aby uzyskiwać w ich wyniku izotopy o większym deficycie masy. Można więc albo syntetyzować pierwiastki lekkie (aby zbliżyć się do żelaza od lewej strony wykresu), albo rozszczepiać pierwiastki ciężkie – zbliżając się do maksimum wykresu od strony prawej. Ilość uzyskanej w wyniku reakcji energii obliczamy w ten sposób, że od masy substratów (jąder i cząstek, które wchodzi do reakcji) odejmujemy masę produktów i mnożymy otrzymaną różnicę przez c^2 . Wszelkie reakcje, w których wydzielą się energia, nazywamy **reakcjami egzoenergetycznymi**.

Pobieżne spojrzenie na rysunek 16 przekonuje, że najwięcej energii można uzyskać w reakcji syntezy pierwiastków lekkich. Krzywa z lewej strony jest bardzo stroma i każdy następny pierwiastek ma znacznie większą energię wiązania. W reakcji rozszczepienia otrzymamy relatywnie dużo mniej energii (energia wiązania dla ciężkich pierwiastków różni się stosunkowo nieznacznie). Problem w tym, że reakcje rozszczepienia potrafimy ściśle kontrolować, podczas gdy reakcje syntezy wymagają ekstremalnych temperatur i ciśnień – takich jak we wnętrzach gwiazd lub podczas wybuchów nuklearnych. Dlatego też obecny stan wiedzy pozwala na pozyskiwanie energii na skalę przemysłową jedynie w reaktorach, w których zachodzą reakcje rozszczepienia.

sposoby
uzyskiwania energii

wydajność
reakcji syntezy
i rozszczepienia

Bilans energetyczny reakcji jądrowej

Aby obliczyć energię wyzwalaną (lub konieczną do dostarczenia) podczas reakcji jądrowych, należy dokładnie znać masy substratów, czyli cząstek wchodzących do reakcji oraz produktów tej reakcji. P obliczeniu deficytu masy dla węgla przekonaliśmy się, że jest on mniejszy niż 1% masy całkowitej. Z tego powodu obliczenia muszą być prowadzone bez zaokrągleń, gdyż istotna informacja o deficycie masy znajduje się na dalszych miejscach po przecinku. Jak wspomnieliśmy, reakcja jądrowa, w wyniku której wydzielą się energia, nazywa się reakcją egzoenergetyczną. Reakcja wymagająca dostarczenia energii nazywa się **endoenergetyczną**.



obliczanie energii
wyzwolonej lub
pochłoniętej
w wyniku reakcji

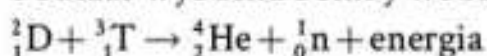
Stosowanie bilansu energetycznego reakcji jądrowej przebiega zawsze tak samo. Sumujemy masę substratów oraz masę produktów i obliczamy ich różnicę. Rachunki możemy prowadzić zarówno dla pojedynczych jąder, jak i dla całych gramów substratów. Obliczona różnica mas jest zarazem różnicą deficytów mas substratów i produktów. Wystarczy ją teraz pomnożyć przez kwadrat prędkości światła, by otrzymać ilość wydzielonej lub pochłoniętej energii.

Tab. 2. Masy atomowe wybranych izotopów

Nazwa	Symbol	Liczba protonów	Liczba neutronów	Masa atomowa, u
wodór	${}^1_1\text{H}$	1	0	1,00727
deuter	${}^2_1\text{D}$	1	1	2,01355
tryt	${}^3_1\text{T}$	1	2	3,01646
hel 3	${}^3_2\text{He}$	2	1	3,01603
hel 4	${}^4_2\text{He}$	2	2	4,00260
lit 6	${}^6_3\text{Li}$	3	3	6,01505
lit 7	${}^7_3\text{Li}$	3	4	7,016005
beryl 8	${}^8_4\text{Be}$	4	4	8,005308
węgiel 12	${}^{12}_6\text{C}$	6	6	12,00000
azot 14	${}^{14}_7\text{N}$	7	7	14,003074
tlen 17	${}^{17}_8\text{O}$	8	9	16,999133

Przykład

Podczas wybuchu bomby wodorowej dochodzi do reakcji:



Na podstawie danych z tabeli 2 oblicz, ile energii można uzyskać z 1 grama mieszanki deuteru i trytu o optymalnym składzie. Ile węgla o wartości opalowej 30 MJ/kg trzeba by spalić, aby uzyskać taki sam efekt cieplny?

Rozwiązanie:

Obliczenia wykonamy najpierw dla 1 mola deuteru i 1 mola trytu. Jeden mol dowolnej substancji zawiera $6,02 \cdot 10^{23}$ cząstek (to tzw. liczba Avogadra) i waży tyle gramów, ile wynosi masa pojedynczej cząsteczki tej substancji wyrażona w jednostkach masy atomowej.

Obliczmy sumę mas substratów:

$$m_{\text{D}} + m_{\text{T}} = 2,01355 \text{ g} + 3,01646 \text{ g} = 5,03001 \text{ g}$$

Masa produktów jest równa:

$$m_{\text{He4}} + m_{\text{n}} = 4,00260 \text{ g} + 1,00866 \text{ g} = 5,01116 \text{ g}$$

Produkty reakcji okazują się więc być lżejsze od substratów o:

$$\Delta m = 5,03001 \text{ g} - 5,01116 \text{ g} = 0,01885 \text{ g}$$

Brakująca masa zamieniła się w energię o wartości:

$$E = \Delta mc^2 = 0,00001885 \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1,6965 \cdot 10^{12} \text{ J}$$



Nasze rachunki były odniesione do jednego mola mieszanki ważącego 5,03 g. Wobec tego jeden gram substratów da nam energię:

$$E = \frac{1,6965 \cdot 10^{12} \text{ J}}{5,03} = 3,37 \cdot 10^{11} \text{ J} = 337000 \text{ MJ}$$

Aby uzyskać tyle ciepła, trzeba spalić $M = \frac{337000 \text{ MJ}}{30 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 11233 \text{ kg}$ węgla.

Odpowiedź: Synteza helu z 1 grama mieszaniny deuteru i trytu daje 337 GJ energii – tyle samo, co spalenie ponad 11 ton węgla.

Należy przyznać, że jest to wynik działający na wyobraźnię. Po podzieleniu wyniku uzyskanego dla 1 mola przez liczbę Avogadra i przekształceniu go na elektronowolty uzyskujemy energię wydzieloną w trakcie połączenia 1 jądra deuteru z 1 jądrem trytu. Wynosi ona 17,6 MeV. Tak więc kompletny bilans reakcji z treści przykładu wygląda tak:



Po podzieleniu tej wartości przez liczbę nukleonów substratów (jest ich 5) otrzymamy wartość około 3,5 MeV. Przeprowadzenie podobnych rachunków bilansu energetycznego w reakcji rozszczepienia da dla 1 jądra uranu wartość nieco ponad 200 MeV, czyli mniej niż 1 MeV na nukleon (uran jest ciężki). Widzimy więc, że reakcja syntezy jest kilkakrotnie wydajniejsza energetycznie niż reakcja rozszczepienia. Rozszczepienie 1 grama uranu daje tyle energii, co spalenie około 3 ton węgla.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Energia wyzwolona podczas wybuchu bomby atomowej w Hiroszimie wynosiła 15 kiloton, czyli odpowiadała wybuchowi 15 000 ton trotylu. Wybuch 1 grama trotylu wyzwala 4200 J energii. Oblicz, jaka masa substratów reakcji jądrowych podczas wybuchu bomby została zamieniona na energię promienistą.
2. Oblicz, ile wody o temperaturze początkowej 20°C można podgrzać do temperatury wrzenia i odparować, zamieniając na energię 1 gram masy substancji. Ciepło właściwe wody wynosi $4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, ciepło parowania to $2,26 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$.
3. Na podstawie danych zawartych w tabeli 2 wykonaj obliczenia, posługując się bilansem energetycznym dla 1 grama substratów w podanych reakcjach jądrowych.

a) ${}^{12}_6\text{C} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$	b) ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He} + \text{energia}$
c) ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + \text{energia}$	d) ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{D} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He} + \text{energia}$
e) ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be}^* \rightarrow {}^8_4\text{Be} + \gamma$	f) ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^3_1\text{T} + \text{energia}$
g) ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p} + \text{energia}$	

Masa neutronu wynosi $m_n = 1,008665 \text{ u}$. $1 \text{ u} = 1,660539 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 221 • W reakcjach jądrowych obowiązuje zasada zachowania liczby masowej, ale sama masa ulega zmianie z powodu zmiany deficytu masy.
- s. 224 • Mnożąc różnicę mas produktów i substratów reakcji jądrowej przez kwadrat prędkości światła, obliczamy energię wyzwoloną lub pochłoniętą w wyniku tej reakcji.
- s. 223 • Naturalnymi sposobami uzyskiwania energii jądrowej są reakcje syntezy jąder lekkich w nieco cięższe oraz rozszczepienia jąder ciężkich na lżejsze.
- s. 223 • Reakcje syntezy są wydajniejsze energetycznie, ale wymagają ekstremalnych ciśnień i temperatur.

5.6. Wpływ promieniowania jonizującego na materię i organizmy żywe

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jakie zjawiska zachodzą w materii pod wpływem przenikającego ją promieniowania;
- poznasz miary ilości energii pochłoniętej przez materię;
- poznasz skutki biologiczne promieniowania jonizującego.

Działanie promieniowania jonizującego na materię

Do tej pory poznaliśmy trzy rodzaje promieniowania jądrowego: α , β i γ . Każde z nich ma inny charakter i różnią się one przenikliwością. Łączy je wspólna cecha – zdolność do wyrywania elektronów z napotykanym po drodze atomów. Zjawisko to nazywamy **jonizacją**, a każdy rodzaj promieniowania zdolny do wywoływania jonizacji określamy mianem **promieniowania jonizującego**. Znamy wiele zjawisk towarzyszących przenikaniu promieniowania przez materię i powodujących jonizację. Wybrane opisano poniżej.

jonizacja

jonizacja
bezpośrednia

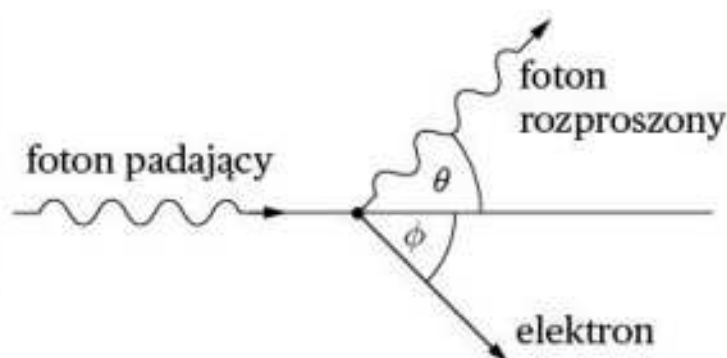
zjawisko
fotoelektryczne
zewnętrzne

- **Jonizacja bezpośrednia** wiąże się ze strumieniem cząstek naładowanych (α i β), które oddziałują z materią za pomocą sił kulombowskich. Przelatujące cząstki, oddziałując elektrycznie z elektronami, wyrywają je z powłok elektronowych i często nadają im energię kinetyczną wystarczającą do dokonywania dalszych jonizacji.
- **Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne** (por. rozdz. 4.5) zachodzi, gdy kwant promieniowania elektromagnetycznego ma energię większą od pracy wyjścia elektronu z danej substancji. U niektórych substancji do wywołania zjawiska wystarczą fotony światła widzialnego. Pozostałe ulegają temu zjawisku pod wpływem bliskiego



nadfioletu. Kwanty γ mają energię tysiące razy przekraczającą pracę wyjścia elektronów z dowolnej substancji, dlatego z łatwością wywołują zjawisko fotoelektryczne w całej objętości materii, którą przenikają.

- **Zjawiska Comptona** (por. rozdz. 4.2) polega na zderzeniu się kwantów γ ze swobodnymi elektronami i przekazywaniu im energii. Rozpędzone w ten sposób elektrony mogą potem dokonywać jonizacji bezpośredniej.

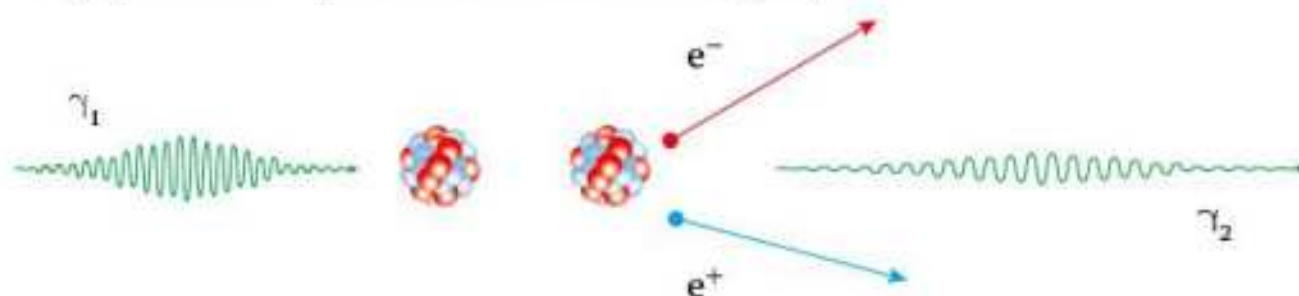


zjawisko Comptona

- **Kreacja par elektron-pozyton** Rys. 17. Schemat zjawiska Comptona.

to tworzenie materii i antymaterii z energii. Aby tak się stało, kwant γ o energii większej niż $2mc^2$ (m – masa elektronu) musi się z czymś zderzyć, na przykład z jądrem atomowym. Do zjawisk takich dochodzi między innymi w górnych warstwach naszej atmosfery pod wpływem promieniowania kosmicznego. Powstający pozyton (antyelektron) ma niemal identyczne właściwości jak zwykły elektron, ale ładunek dodatni. Po zetknięciu ze zwykłym elektronem anihiluje, czyli zamienia się z powrotem w promieniowanie elektromagnetyczne.

kreacja par elektron-pozyton



Rys. 18. Tworzenie materii i antymaterii z energii. Kwant promieniowania γ_1 uderza w jądro atomowe i traci część energii. Zgodnie ze wzorem $E = mc^2$ zostaje ona zamieniona na masę cząstki i antycząstki. Reszta energii jest przekazywana jądro atomowemu i wypromieniowana w postaci kwantu o mniejszej częstotliwości.

Oddzielnego omówienia wymaga **promieniowanie neutronowe** będące następstwem rozszczepienia ciężkich jąder (np. podczas wybuchu bomby atomowej) lub niektórych reakcji jądrowych. Neutrony nie mają ładunku elektrycznego, więc nie oddziałują siłami elektrycznymi ani z jądrami atomowymi, ani z elektronami na powłokach. Są więc niezwykle przenikliwe – nie powstrzymują ich nawet ściany z betonu i ołowiu, skuteczne w przypadku promieniowania γ . Istnieje jednak pewne prawdopodobieństwo mechanicznego zderzenia się neutronów z jądrami lub elektronami. Uderzony proton lub elektron zyskuje wielką energię kinetyczną i staje się cząstką jonizującą bezpośrednio. Lżejszym jądrom łatwiej jest odbierać energię kinetyczną rozpędzonym neutronom, dlatego materiały z lekkich atomów (wodór, tlen, węgiel) stanowią skuteczniejszą ochronę przed neutronami. Jednym z najlepszych zabezpieczeń jest parafina, zawierająca wszystkie te pierwiastki.

Jest też druga możliwość. Jeśli neutron natrafi na jądro atomowe, może wniknąć do jego środka, podobnie jak piłka golfowa wpada do dołka. W ten sposób powstaje

promieniowanie
neutronowe

nowy izotop danego pierwiastka, o liczbie masowej zwiększonej o jeden. Izotop taki może się okazać promieniotwórczy i rozpaść się, emitując promieniowanie α , β lub γ . Jest to tak zwana **promieniotwórczość wzbudzona**. Człowiek naświetlony strumieniem neutronów (np. po wybuchu bomby jądrowej) sam staje się radioaktywny i po jakimś czasie może umrzeć pod wpływem promieniowania emitowanego przez własny organizm.

Wpływ promieniowania na tkanki

destrukcyjny
wpływ
promieniowania
na materię

Wyrывая elektrony z wiązań chemicznych cząsteczek i rozkładając wodę, promieniowanie jonizujące wywiera destrukcyjny wpływ na materię. Szczególnie szkodliwie oddziałuje na żywe tkanki, gdyż ich struktura chemiczna jest bardzo skomplikowana. Uszkodzone komórki nie mogą pracować prawidłowo – mają zaburzony metabolizm. Najbardziej niebezpieczne jest naruszenie kodu genetycznego zapisanego w łańcuchach DNA. Prowadzi ono do mutacji, która często skutkuje chorobą nowotworową.

Badania wykazują, że promieniowanie o niewielkim natężeniu (takim, jakie występuje normalnie w skorupie ziemskiej i w atmosferze) jest korzystne dla organizmów. Utrzymuje ono w gotowości „siły naprawcze” komórek i może być przyczyną pozytywnych mutacji, które są siłą napędową ewolucji życia na Ziemi. Korzystny wpływ małych dawek promieniowania na organizm ludzki wykorzystujemy też w radonoterapii. Kąpiele w źródłach wody zawierającej rozpuszczony promieniotwórczy radon są zalecane zwłaszcza osobom starszym, ponieważ między innymi łagodzą bóle, poprawiają krążenie czy wzmacniają odporność. Stwierdzono też, że słabe promieniowanie poprawia zdolność nasion do kiełkowania.

Elementy dozymetrii

dozymetria

Aby ocenić skutki oddziaływania promieniowania na organizm człowieka, należy wprowadzić miary tego promieniowania. Zagadnieniem tym zajmuje się dział fizyki jądrowej zwany **dozymetrią**.

Jedną z podstawowych wielkości fizycznych definiowanych przez dozymetrię jest dawka pochłonięta. Stwierdzono, że skutki wywołane przez promieniowanie przechodzące przez materię są proporcjonalne do energii zaabsorbowanej przez tę materię.

dawka pochłonięta

Dawka pochłonięta – stosunek energii przekazanej ciału przez promieniowanie jonizujące do masy tego ciała

$$D = \frac{E}{m}$$

D – dawka pochłonięta, E – energia pochłonięta przez ciało, m – masa ciała

jednostka dawki
pochłoniętej

Jednostką dawki pochłoniętej jest 1 **grej**, zdefiniowany jako $1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}}$.



Okazuje się, że poszczególne rodzaje promieniowania o tej samej energii wywołują różne skutki w żywym organizmie. Z drugiej strony, to samo promieniowanie odmiennie działa na poszczególne tkanki. Dlatego też wprowadzono kolejną wielkość fizyczną – równoważnik dawki pochłoniętej. Zawiera ona informację zarówno o energii promieniowania, jak i jego skuteczności.

Równoważnik dawki pochłoniętej – ilość energii przekazanej jednostce masy ciała przez promieniowanie, z uwzględnieniem skutków wywołanych przez dany rodzaj promieniowania w danej tkance.

$$H_{TR} = Q_R D_{TR}$$

H_{TR} – równoważnik dawki dla rodzaju promieniowania R i rodzaju tkanki T

Q_R – współczynnik wagowy promieniowania R

D_{TR} – średnia dawka promieniowania R pochłonięta przez tkankę T

równoważnik
dawki pochłoniętej

Po zsumowaniu równoważników dawki pochłoniętej dla wszystkich tkanek organizmu otrzymujemy kolejną wielkość fizyczną – **dawkę skuteczną**. To miara napromieniowania całego ciała. Jednostką równoważnika dawki pochłoniętej oraz dawki skutecznej jest **siwert** (1 Sv). Jest to jednostka względnie duża, dlatego używamy jednostek podwielokrotnych. Na skutek naturalnego promieniowania pochodzącego z otaczającej nas materii i z Kosmosu mieszkańcy Polski pochłaniają średnio rocznie dawkę 2,4 mSv. Pracownicy mający kontakt zawodowy ze źródłami promieniotwórczymi nie powinni przekraczać dawki 100 mSv w ciągu 5 kolejnych lat. Prześwietlenie płuc wiąże się z pochłonięciem dawki w granicach 0,1–1 mSv.

dawka skuteczna

Pracę w warunkach napromienienia uregulowano licznymi przepisami, a narażonych na promieniowanie ludzi objęto ochroną radiologiczną. Prawo nakazuje, by nie używać substancji promieniotwórczych, gdy nie jest to bezwzględnie konieczne, oraz by dołożyć wszelkich starań, aby dawki pochłonięte przez ludność były jak najmniejsze. Służy temu między innymi nakaz stosowania osłon na źródła promieniotwórcze oraz obowiązek noszenia przez narażone osoby **osobistych dozymetrów**, które rejestrują skumulowaną dawkę pochłoniętego promieniowania.



Rys. 19. Symbol ostrzegawczy umieszczony na źródłach promieniowania jonizującego.

dozymetr osobisty

Choroba popromienna

Pochłonięcie nadmiernej dawki promieniowania na skutek braku ostrożności w posługiwaniu się materiałami radioaktywnymi, awarii reaktorów atomowych lub wybuchów jądrowych prowadzi do **choroby popromiennej**. Jej przebieg zależy od wielkości pochłoniętej dawki i ma dwie fazy: ostrą i przewlekłą.

choroba
popromienna

Faza ostra jest bezpośrednią reakcją organizmu na pochłonięte promieniowanie i występuje tym szybciej, im większą dawkę pochłonięto. Jeśli napromienienie nie przekracza 2 Sv, po kilkunastu dniach obserwuje się zmiany w obrazie krwi oraz ogólne osłabienie. Choroba jest w 100% uleczalna. Przy dawce 2–4 Sv po kilku dniach



występuje wyraźna niedokrwistość spowodowana uszkodzeniem szpiku, obniżenie odporności, czasami skaza krwotoczna, czyli skłonność do krwawień w obrębie tkanek, narządów i układów wewnętrznych organizmu. Ryzyko śmierci wynosi 25%. Dawka 4–8 Sv wywołuje najpóźniej po kilkunastu godzinach ostrą reakcję ze strony układu pokarmowego i limfatycznego, skazę krwotoczną oraz zaburzenie gospodarki wodno-elektrolitowej. Śmiertelność wynosi od 50% do 100%. Jeszcze większe napromienienie powoduje drgawki, szybką utratę przytomności i pewną śmierć, tym szybszą, im większa była dawka.

U człowieka, który przeżył ostrą fazę choroby popromiennej, mogą (nawet po kilkunastu latach) wystąpić objawy **fazy przewlekłej**. Zalicza się do nich: przyspieszone starzenie, przedwczesną śmierć, bezpłodność, niedokrwistość, białaczkę, zwiększoną zapadalność na nowotwory złośliwe, zaburzenia hormonalne i zaćmę. U dzieci napromieniowanych osób obserwuje się zwiększony odsetek wad genetycznych spowodowanych uszkodzeniem DNA.



Chcesz wiedzieć więcej?

Tragicznych skutków choroby popromiennej w pełnym zakresie doznał kanadyjski fizyk i chemik Louis Slotin. Brał on udział w projekcie Manhattan, którego rezultatem była między innymi bomba atomowa zrzucona na Hiroszimę. Slotin zajmował się wyznaczeniem masy krytycznej materiałów rozszczepialnych, przekroczenie której powoduje niekontrolowane przyspieszenie reakcji łańcuchowej. Z powodu niezachowania ostrożności w laboratorium niemalże w rękach Slotina doszło do wybuchu jądrowego. Gdy Slotin zobaczył błysk, rozdzielił rękami reagujące elementy, dzięki czemu uratował życie współpracowników i laboratorium przed katastrofą. Świadkowie ujrzeni wokół Slotina błękitną poświatę zjonizowanego powietrza oraz poczuli falę ciepła.

Slotin pochłonął śmiertelną dawkę 21 Sv. Już w chwili zdarzenia poczuł kwaśny smak w ustach i piekący ból ręki, a po wyjściu z pomieszczenia gwałtownie wymiotował. Był świadomy, jakie skutki przyniesie ten wypadek, więc pożegnał się z kolegami. Zmarł po 9 dniach pobytu w szpitalu, mimo licznych transfuzji krwi. Współpracownicy, którzy w chwili zdarzenia przebywali w laboratorium w większej odległości, dzięki szybkiej reakcji Slotina nie doznali poważniejszego uszczerbku na zdrowiu.



Rys. 20. Louis Slotin (1910–1946) – fizyk i chemik kanadyjski, uczestnik projektu Manhattan. Zginął tragicznie podczas wypadku radiacyjnego w laboratorium w Los Alamos.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wymień i scharakteryzuj zjawiska, które powodują jonizację ośrodka przez promieniowanie.
2. Wyjaśnij, dlaczego promieniowanie jest szczególnie groźne dla żywych organizmów.
3. Dowiedz się więcej na temat metod ochrony radiologicznej i przedstaw zdobyte wiadomości w formie krótkiego referatu.
4. W instytucie biofizyki napromieniowano nasiona pewnej rośliny dawką $600 \mu\text{Gy}$. Oblicz, jaką energię pochłonęło każde z nasion, jeśli ich masy były w przybliżeniu równe 50 mg .

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Promieniowanie jonizujące, przenikając przez materię, powoduje jonizację atomów i cząstek poprzez wybijanie z nich elektronów. s. 226
- Do podstawowych zjawisk zachodzących w materii pod wpływem promieniowania należą: jonizacja bezpośrednia, zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne, zjawisko Comptona i kreacja pary elektron-antyelektron. s. 226
- Neutrony przenikające przez materię mogą dodatkowo wywoływać reakcje jądrowe, których skutkiem może być powstawanie izotopów promieniotwórczych. s. 228
- Promieniowanie jonizujące o wielkiej energii ma zdolność niszczenia struktur materii i rozrywania wiązań cząsteczkowych. Jest to szczególnie groźne w odniesieniu do żywych tkanek. s. 228
- Pomiar ilości promieniowania zajmuje się dozymetria. Podstawowymi wielkościami fizycznymi stosowanymi w dozymetrii są: dawka pochłonięta, równoważnik dawki i dawka skuteczna. s. 228
- Dawkę pochłoniętą mierzy się w grejach, a równoważnik dawki i dawkę skuteczną – w siwertach. s. 228
- Ludzie mający kontakt z promieniowaniem ze względu na wykonywaną pracę są objęci ochroną radiologiczną, a pochłaniane przez nich dawki mierzy się za pomocą osobistych dozymetrów. W Polsce obowiązują surowe normy dotyczące dopuszczalnych dawek promieniowania. s. 229
- Pochłonięcie nadmiernej dawki promieniowania jonizującego prowadzi do choroby popromiennej, która może zakończyć się śmiercią lub w późniejszym czasie wywołać niepożądane reakcje organizmu. Znikome dawki promieniowania są na ogół korzystne dla żywego organizmu. s. 229



5.7. Zastosowania zjawiska promieniotwórczości w technice

NA TEJ LEKCJI:

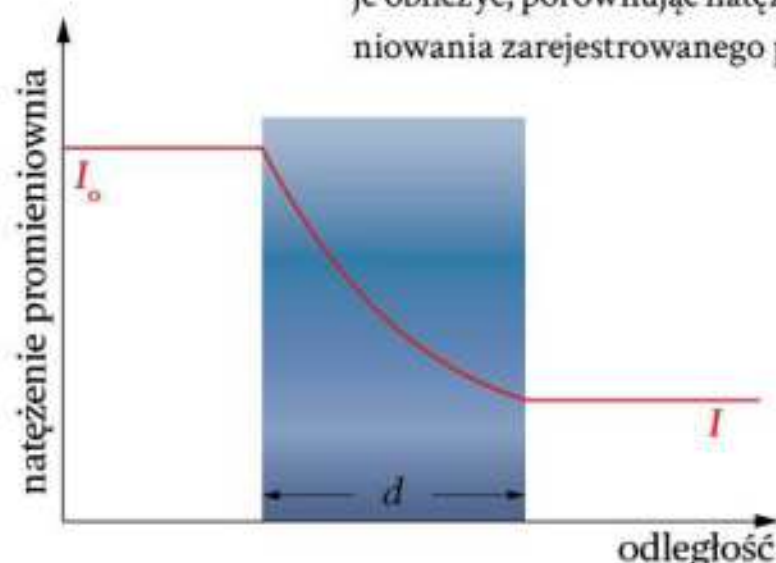
- dowiesz się, w jakich obszarach nauki, techniki i przemysłu jest wykorzystywane promieniowanie jonizujące;
- poznasz zasadę działania wybranych urządzeń technicznych, w których zastosowano izotopy promieniotwórcze.

Różnorodnych zastosowań promieniotwórczości w instalacjach przemysłowych jest bardzo dużo. Dlatego przedstawimy tylko niektóre z nich.

Urządzenia wykorzystujące osłabienie promieniowania przez materię

natężenie
promieniowania

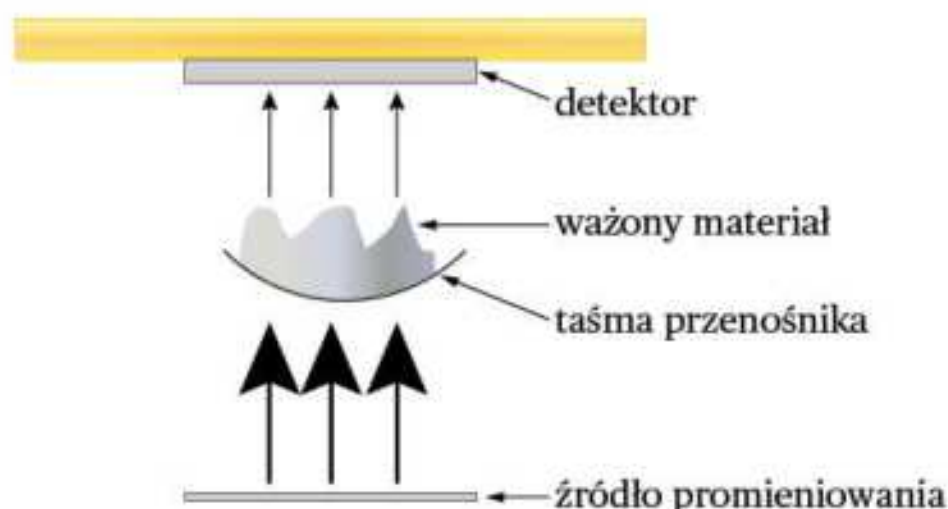
Gdy promieniowanie przenika przez jakiś ośrodek, jego natężenie maleje wraz z grubością przenikanej warstwy. Istnieje ścisły wzór uzależniający natężenie promieniowania, które przeszło przez daną przeszkodę od jej grubości i zdolności pochłaniających. Jeśli więc grubość przeszkody lub jej gęstość nie są z jakichś powodów znane, możemy je obliczyć, porównując natężenie emitowanego promieniowania z natężeniem promieniowania zarejestrowanego po drugiej stronie badanej warstwy materiału.



Rys. 21. Natężenie promieniowania przenikającego przez warstwę maleje wykładniczo wraz z grubością warstwy i zależy od jej gęstości. Porównując natężenie po obu stronach warstwy, możemy obliczyć jej grubość lub gęstość. I_0 – natężenie promieniowania emitowanego przez źródło, I – natężenie rejestrowane z drugiej strony przez detektor, d – grubość przeszkody.

waga izotopowa

Na tej zasadzie działają różne odmiany **wag izotopowych** (rys. 22). Składają się one ze źródła promieniowania o znanym natężeniu i miernika natężenia promieniowania. Między nimi znajduje się badana warstwa. Może nią być kruszywo transportowane taśmociągami, rurociąg z cieczą, której poziom lub gęstość zmieniają się w czasie, blacha, której grubość chcemy kontrolować, lub dowolna inna przemieszczająca się substancja biorąca udział w dowolnym procesie technologicznym, którego parametry nas interesują. Układ pomiarowy w czasie rzeczywistym przelicza rejestrowane natężenie promieniowania na grubość lub gęstość warstwy materiału. Na tej podstawie jest w stanie obliczyć całkowitą masę substancji przetransportowanej taśmociągami lub rurociągami albo sterować parametrami procesu na zasadzie sprzężenia zwrotnego (np. otworzyć zawór lub wszczać alarm i wyłączyć linię produkcyjną, gdy rurociąg jest pusty).



Rys. 22. Waga izotopowa – zasada działania.

Na podobnej zasadzie działają izotopowe **czujniki poziomu** montowane od zewnątrz na zbiornikach, których z pewnych powodów nie chcemy otwierać (np. zawierających niebezpieczne substancje). Gdy poziom cieczy podniesie się powyżej poziomu czujnika, promieniowanie będzie intensywniej absorbowane, co natychmiast wykaże detektor.

izotopowy czujnik poziomu

Metodami izotopowymi bada się też stopień zagęszczenia materiału, na przykład kruszywa w ubitym nasypie drogi. W tym celu wierce się mały otwór w nasypie i umieszcza na pewnej głębokości źródło promieniotwórcze. Jeśli nasyp jest źle ubity, między ziarnami kruszywa występuje powietrze, które słabiej absorbuje promieniowanie. Czujnik umieszczony w pewnym oddaleniu od źródła natychmiast to wykryje.

Ważnym działem techniki, wykorzystującym radioizotopy, jest **defektoskopia**. Zmiany w natężeniu promieniowania przenikającego przez badany materiał umożliwiają wykrywanie pęknięć, nieszczelnych spawów czy bąbelków powietrza w metalowych odlewach. Izotop ameryk 241 jest wykorzystywany powszechnie w **czujnikach dymu** (przeciwpożarowych) oraz w detektorach metali ciężkich w roztworze.

defektoskopia

czujniki dymu

Zastosowanie znaczników izotopowych

Odrębną dziedzinę stanowi wykorzystanie **znaczników izotopowych** do śledzenia ruchów substancji ciekłych i gazowych. Znacznikiem nazywamy radioaktywny izotop danego pierwiastka wmieszany między atomy izotopów trwałych. Aby na przy-

znaczniki izotopowe



Rys. 23. Licznik Geigera–Müllera – detektor służący do wykrywania promieniowania w terenie.

kład wykryć nieszczelność rurociągu zakopanego w ziemi, napełnia się go wodą z dodatkiem substancji promieniotwórczych. Następnie przepłukuje się go czystą wodą. W miejscu wystąpienia nieszczelności radioaktywna woda przedostaje się do gleby i tam pozostaje. Wystarczy teraz przejść z detektorem promieniowania wzdłuż rurociągu, aby zlokalizować miejsce awarii. Można też śledzić wędrówkę zanieczyszczeń pochodzących z konkretnego



komina, znacząc atomy wchodzące w skład dymu. W podobny sposób biolodzy i ekolodzy potrafią zbadać obieg dowolnej substancji w przyrodzie – wystarczy zwykle jej atomy domieszkować atomami tego samego pierwiastka, ale emitującymi promieniowanie, a następnie rozstawić w okolicy odpowiednie czujniki.

Inne zastosowania promieniotwórczości

Ponieważ emisji promieniowania towarzyszy wydzielanie się energii, substancje radioaktywne wykorzystuje się też w zasilaczach izotopowych. Stosuje się je wszędzie tam, gdzie zasilanie w energię elektryczną musi być niezawodne i nieprzerwane, a jednocześnie z uwagi na lokalizację nie ma innej możliwości dostarczenia energii. Dlatego wykorzystuje się je na przykład w: rozrusznikach serca, sondach międzyplanetarnych czy odosobnionych stacjach meteorologicznych.

Napromieniowanie przechowywanej żywności dezynfekuje ją i przedłuża jej trwałość. Badania wykazują, że zakonserwowana w ten sposób żywność nie jest promieniotwórcza, ale na skutek działania jonizującego zawiera więcej wolnych rodników i mniej witamin (zwłaszcza A, B1, C i E). Dlatego zdrowsze są produkty świeże.

Chemicy używają izotopów do modyfikacji właściwości prześwietlanych substancji. Geolodzy posługują się izotopami, aby zlokalizować złoża surowców naturalnych. Biolodzy wykorzystują promieniowanie do wywoływania celowych mutacji i hodowli nowych odmian roślin i zwierząt. Promieni gamma używa się do sterylizacji narzędzi chirurgicznych – promieniowanie skuteczniej zabija bakterie i grzyby niż wysoka temperatura.

Ten bardzo wyrywkowy przegląd zastosowań daje wyobrażenie, jak ważną dla cywilizacji dziedziną nauki jest fizyka jądrowa.

Chcesz wiedzieć więcej?

Datowanie metodą ^{14}C

Pierwiastki promieniotwórcze znajdują się wokół nas. Jedne z nich powstają na skutek rozpadu pierwiastków o długim okresie życia, które „od zawsze” były zawarte w skorupie ziemskiej. Inne są efektem działalności człowieka, prób z bronią jądrową, pozostałością po wyciekach i awariach reaktorów. Jeszcze inne powstają na bieżąco w ziemskiej atmosferze pod ostrzałem wysokoenergetycznych cząstek promieniowania kosmicznego, powstającego w dramatycznych procesach katastroficznych towarzyszących życiu gwiazd i galaktyk. Do tej ostatniej grupy należy radioaktywny węgiel ^{14}C .

Ten izotop powstaje wskutek zderzeń swobodnych neutronów z atomami azotu. Mamy prawo przypuszczać, że proces ten na przestrzeni tysiącleci zachodzi ze stosunkowo niezmienną wydajnością. Oznacza to, że stężenie węgla radioaktywnego w ogólnej masie węgla będącego w obiegu w przyrodzie nie zmienia się zbyt drastycznie (na skutek zmian klimatu i innych czynników występują okresowe wahania ilości





„normalnego” węgla w atmosferze) i wynosi około jednego atomu węgla ^{14}C na bilion „zwykłych” atomów ^{12}C .

Pod względem chemicznym radioaktywny węgiel ^{14}C niczym nie różni się od węgla ^{12}C . Tworzy identyczne związki chemiczne, w tym dwutlenek węgla, oraz włącza się w metabolizm żywych organizmów. Dopóki roślina żyje i przeprowadza fotosyntezę, pobiera z atmosfery dwutlenek węgla z ustaloną zawartością izotopu ^{14}C . Gdy roślina obumrze, zawartość radioaktywnego węgla zaczyna w niej maleć zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego. Co około 5700 lat stężenie węgla ^{14}C w węglu ^{12}C maleje o połowę. Stanowi to podstawę określania wieku skamielin zawierających elementy organiczne (starożytnych drewnianych budowli, szczątków ludzkich, skóry czy narzędzi).

Aby przeprowadzić procedurę datowania metodą węgla ^{14}C , należy najpierw metodami chemicznymi wyodrębnić z badanej próbki sam węgiel (np. poprzez spalenie próbki i rozkład powstałego dwutlenku węgla). Następnie za pomocą spektrometru masowego określa się zawartość procentową węgla ^{14}C . Znając obecne stężenie ^{14}C i te zmierzone w próbce, można (po odpowiednim przekształceniu wzoru na prawo rozpadu promieniotwórczego) obliczyć czas, przez który badany organizm był martwy. Maksymalny wiek szczątków, który wyznacza się tą metodą, wynosi około 60 000 lat. Pozostałości starsze mają zbyt małą zawartość radiowęglu, by ją zmierzyć z dopuszczalnym błędem. Dokładność samej metody jest problematyczna również ze względu na możliwe wahania ilości dwutlenku węgla w atmosferze na przestrzeni dziejów. Dlatego równolegle stosuje się inne metody porównawcze i na tej podstawie wyznacza się tak zwane krzywe kalibracji, które wnoszą stosowne poprawki do obliczeń.

Twórca tej metody – Willard Libby – otrzymał w 1960 roku Nagrodę Nobla z chemii.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Przygotuj referat multimedialny o zastosowaniach promieniotwórczości w przemyśle innych niż wymienione w podręczniku.
2. Przygotuj referat o zastosowaniach promieniotwórczości w biologii i ekologii.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Natężenie promieniowania przenikającego przez przeszkodę maleje wykładniczo wraz z grubością tej przeszkody. Zjawisko to zostało wykorzystane w urządzeniach, jak waga izotopowa i izotopowy czujnik poziomu, oraz w defektoskopii i badaniu gęstości materiałów. s. 232
- Znaczniki izotopowe umożliwiają m.in. wykrywanie nieszczelności rurociągu i badanie obiegu pierwiastków i zanieczyszczeń w przyrodzie. s. 233
- Substancje radioaktywnych używa się jako źródła energii elektrycznej w trudno dostępnych urządzeniach. Promieniotwórczość jest wykorzystywana także do sterylizacji narzędzi oraz konserwacji żywności. s. 234



5.8. Zastosowania zjawiska promieniotwórczości w medycynie

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz metody wykrywania patologii w organizmie człowieka za pomocą substancji promieniotwórczych;
- poznasz podstawowe metody leczenia schorzeń przy użyciu narzędzi fizyki jądrowej.

Diagnostyka

medycyna
nuklearna

Dziedzina zajmująca się wykrywaniem i leczeniem chorób z wykorzystaniem izotopów promieniotwórczych (zwanych też radioizotopami) nosi nazwę **medycyny nuklearnej**. Jej podstawowe gałęzie to diagnostyka oraz terapia. Zadaniem diagnostyki jest ustalenie stanu zdrowia pacjenta i wykrycie ewentualnych schorzeń. Terapia zajmuje się leczeniem pacjenta.



Rys. 24. Gammakamera.

W diagnostyce medycznej wykorzystuje się następujące własności radioizotopów:

- niektóre pierwiastki mają skłonność do gromadzenia się w określonych tkankach i narządach; organizm nie rozpoznaje, czy dany atom pierwiastka jest trwały czy promieniotwórczy, gdyż jego właściwości chemiczne są identyczne;
- promieniowanie gamma emitowane przez wprowadzone do organizmu izotopy bez trudu przenikają całe ciało i mogą być rejestrowane na zewnątrz;
- do wykrycia radioizotopu w organizmie wystarcza znikoma jego ilość, nieszkodliwa dla zdrowia.

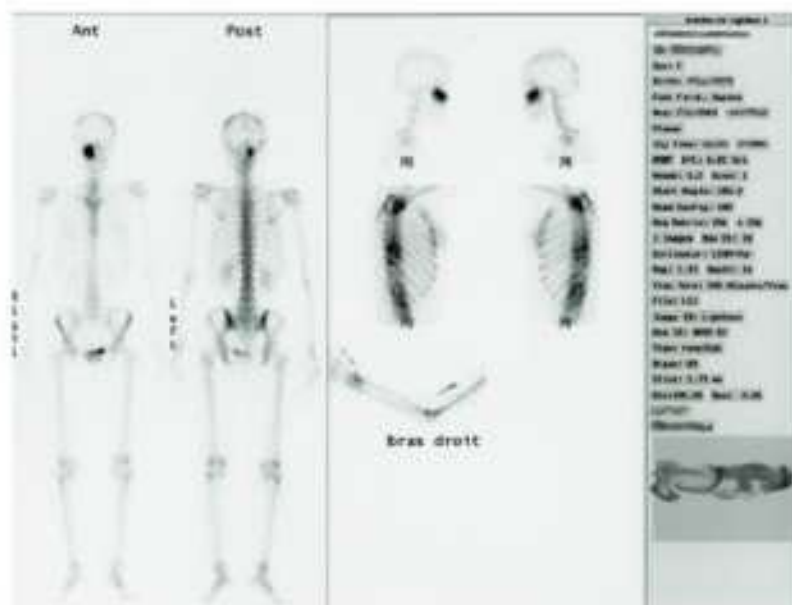
scyntygrafia

Aby więc wykryć patologię w organizmie (np. w układzie kostnym, krwionośnym, oddechowym, wydalniczym lub w tarczycy), należy przygotować izotop promieniotwórczy pierwiastka – tak zwany **znacznik** lub **pierwiastekznaczony**, który w sposób naturalny odkłada się w danej tkance. Z tego izotopu tworzy się preparat przyswajalny dla organizmu i wprowadza się go do ciała pacjenta (dożylnie lub doustnie). Po jakimś czasie należy zeskanować ciało za pomocą **gammakamery** (rys. 24). Jest to kamera, w której funkcję substancji światłoczułej pełni matryca detektorów promieniowania, zdolna precyzyjnie określić miejsce, z którego dochodzi promieniowanie. Tę metodę nazywa się **scyntyografią**. Na otrzymanym obrazie (**scyntygramie**, rys. 25) widzimy dokładnie kształt interesujących nas narządów, które „świecą” w promieniach γ dzięki nagromadzonemu tam radioizotopom. Na jego podstawie lekarze wyciągają



wnioski diagnostyczne. Scyntygrafia daje inne informacje o budowie organów wewnętrznych niż badanie zwane prześwietleniem, wykorzystujące promienie Roentgena. Dzieje się tak, gdyż źródło owego „światła” znajduje się wewnątrz badanego narządu, co daje inną perspektywę obserwacji.

Promieniowanie wewnątrz ciała pacjenta powinno trwać jak najkrócej oraz nie powodować skutków ubocznych. Dlatego do scyntygrafii dobiera się izotopy o krótkim czasie życia i rozpadające się na pierwiastki nieszkodliwe dla zdrowia. Dawka pochłonięta przy takim badaniu zależy od diagnozowanego narządu i zastosowanego izotopu. Mieści się w granicach od ułamka do kilkudziesięciu milisiwertów.



Rys. 25. Scyntygram układu kostnego młodej kobiety.

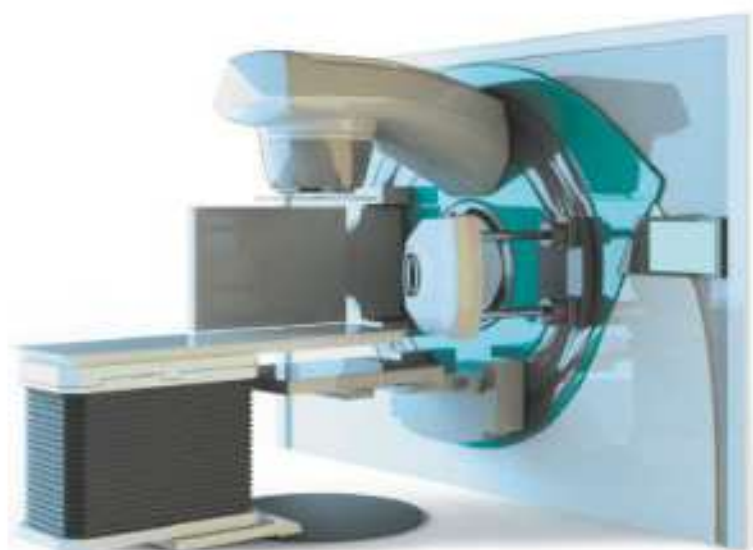
Terapia

Leczenie za pomocą promieniowania nazywamy radioterapią. W odniesieniu do nowotworów metoda ta wykorzystuje niszczące działanie promieniowania na żywe tkanki. Okazuje się, że komórki nowotworowe są bardziej wrażliwe na promieniowanie niż komórki zdrowe. Jeśli więc silna wiązka promieniowania (o dawce dochodzącej do 20 Gy) zostanie skierowana w ściśle określony punkt ciała zawierający komórki rakowe, jest duża szansa, że dojdzie do obumarcia nowotworu lub upośledzenia możliwości jego rozwoju bez zbytniego uszkodzania sąsiednich zdrowych komórek.

Ze względu na sposób dostarczania promieniowania do miejsca przeznaczenia **radioterapię** dzielimy na:

radioterapia

- **brachyterapię** – izotop promieniotwórczy bezpośrednio przylega do chorego narządu lub jest wprowadzony w jego obręb. Dokonuje się tego za pomocą cewników nazywanych aplikatorami. Substancja promieniotwórcza wprowadzona do narządu po określonym czasie zostaje z niego usunięta. Zaletą tej metody jest jej lokalność – przy działaniu miejscowym można użyć większych dawek promieniowania. Do wad należą trudność w dostarczeniu radioizotopów do niektórych jam ciała (np. do wnętrza czaszki) i zagrożenie uszkodzenia sąsiednich narządów w przypadku nieprecyzyjnego zaaplikowania izotopów;



Rys. 26. Aparat do radioterapii.

- **teleradioterapię** – promieniowanie jest kierowane na nowotwór z zewnątrz ciała pacjenta za pomocą odpowiednich przyrządów do naświetlania (rys. 26). Jest to metoda nieinwazyjna, ale wiąże się z napromieniowaniem (i potencjalnym uszkodzeniem) skóry i innych tkanek znajdujących się na drodze promieni. Jako źródeł

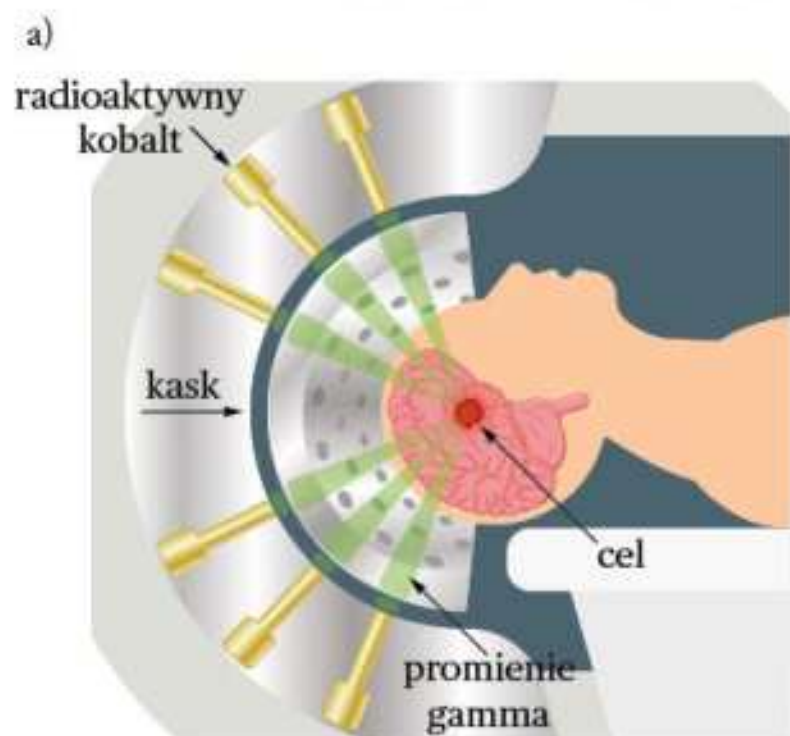


promieniowania używa się radioizotopów (na ogół kobaltu 60) lub – coraz częściej – cząstek naładowanych przyspieszanych w silnym polu elektrycznym, na przykład protonów;

- **radioterapię systemową** – substancję promieniotwórczą wprowadza się do organizmu doustnie lub dożylnie, podobnie jak w metodach diagnostycznych. Odpowiednio dobrane radioizotopy same odnajdują chorą tkankę i – przebywając w jej obrębie – zabijają komórki rakowe.

Jednym z ciekawszych urządzeń teleradioterapii jest **nóż gamma**. Umożliwia on operowanie niektórych typów guzów mózgu bez konieczności otwierania czaszki. W trakcie zabiegu głowa pacjenta zostaje unieruchomiona, a w stronę zlokalizowanego wcześniej guza jest kierowanych około 200 wiązek promieniowania z kapsuł rozmieszczonych naokoło głowy i zawierających promieniotwórczy kobalt 60. Pojedyncze wiązki – słabe i nieszkodliwe – są tak skierowane, że przecinają się wszystkie w jednym punkcie – tym, który ma być zoperowany. Moc tych wiązek sumuje się i wystarcza, by zniszczyć chorą tkankę.

Opisana metoda ma wiele zalet. Jest bardzo precyzyjna (dokładność dochodząca do 0,5 mm). W porównaniu z klasyczną chirurgią nie powoduje praktycznie żadnych skutków ubocznych. Jest bezbolesna i nie zostawia żadnych ran wymagających gojenia. Trwa krótko, a następnego dnia pacjent może wrócić do normalnego życia. Wadą tej metody są ograniczenia w jej stosowaniu – nadaje się tylko do niektórych typów guzów: małych i łagodnych.



Rys. 27. Nóż gamma: a) zasada działania, b) wygląd urządzenia.

Radioterapię uważa się za skuteczną metodę walki z rakiem. Jest bezbolesna, ale wiąże się ze skutkami ubocznymi. Promieniowanie uszkadza sąsiednie tkanki i organizm musi je naprawiać. Wywołuje to objawy podobne do łagodnej choroby popromiennej – ogólne osłabienie organizmu, obniżenie odporności czy wypadanie włosów. Po leczeniu następuje długotrwałe gojenie się leczonych tkanek.



Radioterapia jest stosowana również w przypadku pacjentów nieuleczalnie chorych, na przykład z powodu licznych przerzutów w późnym stadium choroby. To leczenie określa się jako **radioterapię paliatywną**. Stosuje się w niej mniejsze dawki promieniowania, aby ograniczyć skutki uboczne. Jej celem nie jest likwidacja nowotworu, ale powstrzymanie jego wzrostu. Pozwala przedłużyć życie, poprawić jego komfort i uśmierzyć ból oraz złagodzić stany zapalne w organizmie.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Scharakteryzuj podstawowe metody diagnostyczne medycyny nuklearnej.
2. Wymień zalety i wady radioterapii w porównaniu z innymi metodami walki z nowotworami.
3. Wyjaśnij, jak działa nóż gamma.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Stosowaniem narzędzi fizyki jądrowej w medycynie zajmuje się medycyna nuklearna. s. 236
- Podstawową techniką diagnostyczną medycyny nuklearnej jest stosowanie znaczników izotopowych i skanowanie ciała pacjenta za pomocą gammakamery. s. 236
- Podstawowe metody leczenia pacjentów za pomocą promieniowania to brachyterapia, telera-dioterapia, radioterapia systemowa oraz radioterapia paliatywna. s. 237

5.9. Reakcje rozszczepienia

NA TEJ LEKCJI:

- przeanalizujesz reakcję rozszczepienia;
- dowiesz się, czym są reakcja łańcuchowa i masa krytyczna;
- poznasz budowę i zasadę działania bomby atomowej.

Warunki zajścia i przebieg reakcji rozszczepienia

Przyroda zna dwa typy reakcji jądrowych zachodzących samoistnie. Są to reakcje syntezy zachodzące w gwiazdach oraz reakcje rozpadu jąder pierwiastków ciężkich. Wszystkie inne reakcje zachodzące pod wpływem zderzeń jąder i cząstek elementarnych (w tym sprowokowane przez człowieka) nazywamy **reakcjami wymuszonymi**. Poniżej dokładniej przedstawiono szczególny rodzaj reakcji rozpadu, jakim jest **reakcja rozszczepienia**.

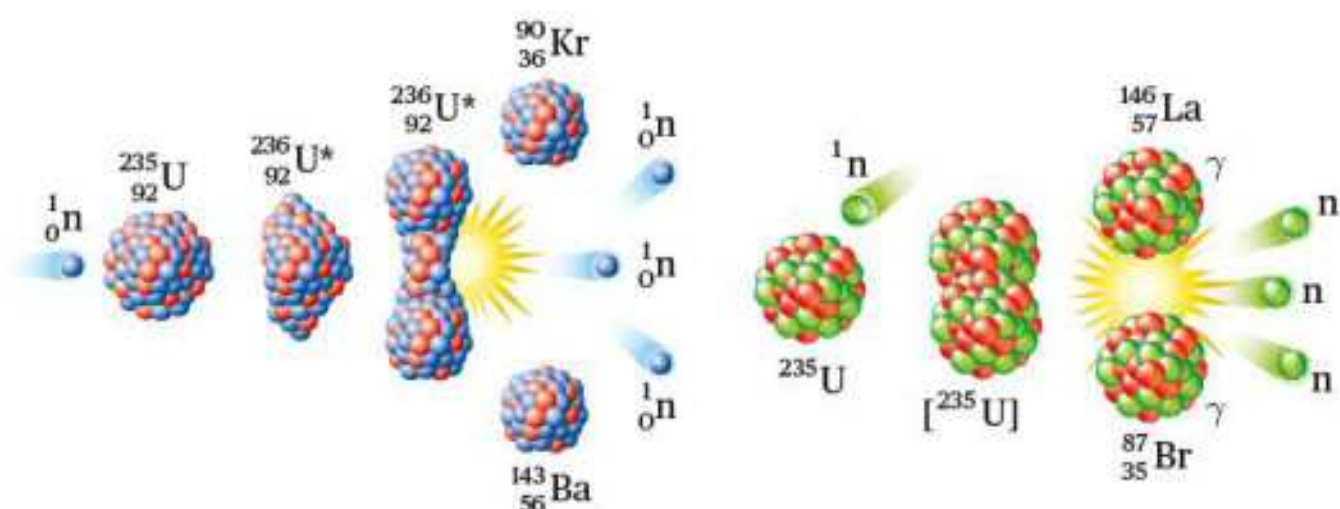
Rozszczepieniu podlegają tylko niektóre izotopy niektórych pierwiastków znajdujących się na końcu układu okresowego, a pierwszym z nich jest uran. Z rozdziału 5.4,

reakcja
rozszczenia

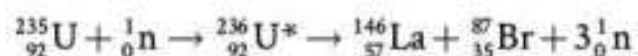
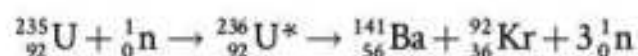
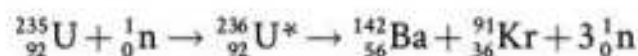


w którym przedstawiono reakcje jądrowe, wiesz, że warunkiem zajścia reakcji rozszczepienia jest pochłonięcie neutronu przez jądro ciężkiego pierwiastka. Ponieważ neutrony nie mają ładunku elektrycznego, nie są przez jądro odpychane. Dlatego też nie potrzebują dużej energii kinetycznej, aby się do jądra zbliżyć. Wręcz prawdopodobieństwo pochłonięcia neutronu przez jądro wzrasta, gdy neutrony poruszają się powoli. Dlatego też w energetyce jądrowej stosuje się specjalne metody spowalniania neutronów używanych w reakcjach rozszczepienia.

Na skutek pochłonięcia neutronu powstaje izotop niestabilny, mający o jeden neutron za dużo. Taki twór jest nietrwały i w krótkim czasie rozpada się na dwa inne jądra, emitując przy tym inne cząstki elementarne. Liczba sposobów, na jakie może się rozpaść jądro danego pierwiastka rozszczepialnego, jest bardzo duża. W praktyce zachodzą one z różnym prawdopodobieństwem. Poniżej wypisano kilka przykładów. Wszystkie dotyczą uranu 235.

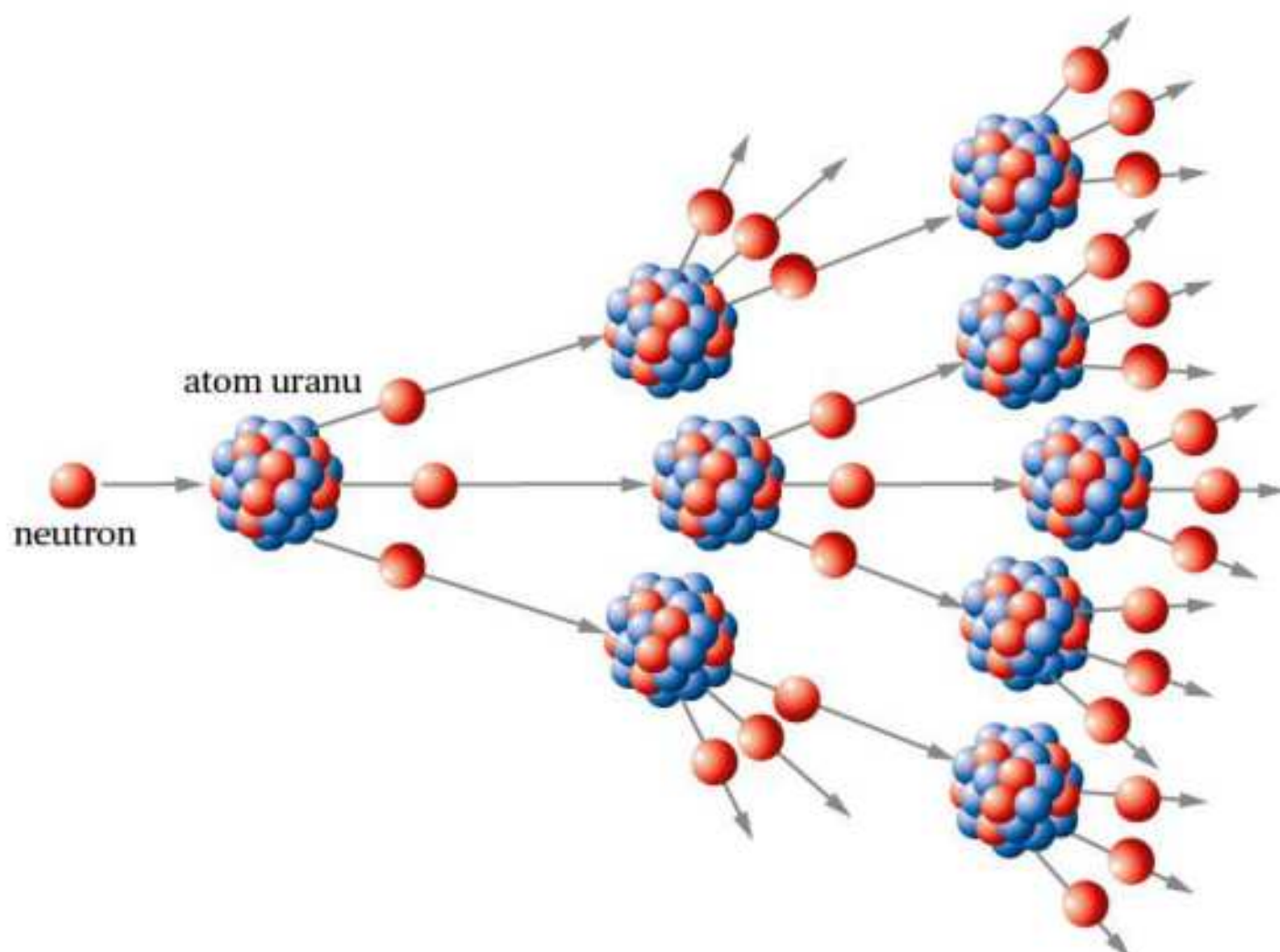


Rys. 28. Wizualizacja przykładowych reakcji rozszczepienia. Gwiazdka oznacza jądro niestabilne.



Pierwsze trzy przykłady pokazują, że w wyniku rozszczepienia mogą powstać różne izotopy tych samych pierwiastków.

Podczas każdego aktu rozszczepienia uwalnia się pewna liczba neutronów, zazwyczaj 2 lub 3. Jeżeli w pobliżu znajdują się kolejne atomy uranu 235 lub innego izotopu rozszczepialnego, neutrony te mogą zainicjować następne reakcje rozszczepienia. Taki ciąg następujących po sobie reakcji, w których produkty poprzednich inicjują zachodzenie następnych, nazywamy **reakcją łańcuchową**.



Rys. 29. Reakcja łańcuchowa.

Zastanówmy się, w jakich warunkach reakcja łańcuchowa może w ogóle zachodzić. Pamiętajmy, że atomy są prawie puste, a jądra atomowe są bardzo małe, więc prawdopodobieństwo trafienia w nie neutronem jest znikome. Wbrew temu, co pokazano na rysunku, to nie jest tak, że neutrony trafiają w jądra sąsiadujących atomów. W rzeczywistości zanim ewentualnie spowodują kolejne rozszczepienie, przemierzają całe centymetry, mijając w pewnym oddaleniu jądra setek tysięcy atomów.

Jeśli ilość materiału rozszczepialnego jest mała, większość emitowanych neutronów opuści go, zanim zdąży zainicjować kolejne rozszczepienie i reakcja wygaśnie. W przeciwnym wypadku ilość neutronów w próbce będzie wzrastać, powodując (być może gwałtowne) przyspieszenie reakcji. Dzieje się tak po przekroczeniu pewnej masy materiału rozszczepialnego.

Masa krytyczna – minimalna ilość substancji rozszczepialnej, dla której reakcja łańcuchowa nie wygasa.

masa krytyczna

Masa krytyczna zależy od kształtu odlewu pierwiastka i obecności w sąsiedztwie substancji odbijających lub spowalniających neutrony (czyli reflektorów i moderatorów). Masy krytyczne dla wybranych izotopów rozszczepialnych odlanych w kształcie kuli, bez reflektorów, przedstawiono w tabeli 3.



Tab. 3. Masy krytyczne wybranych izotopów rozszczepialnych

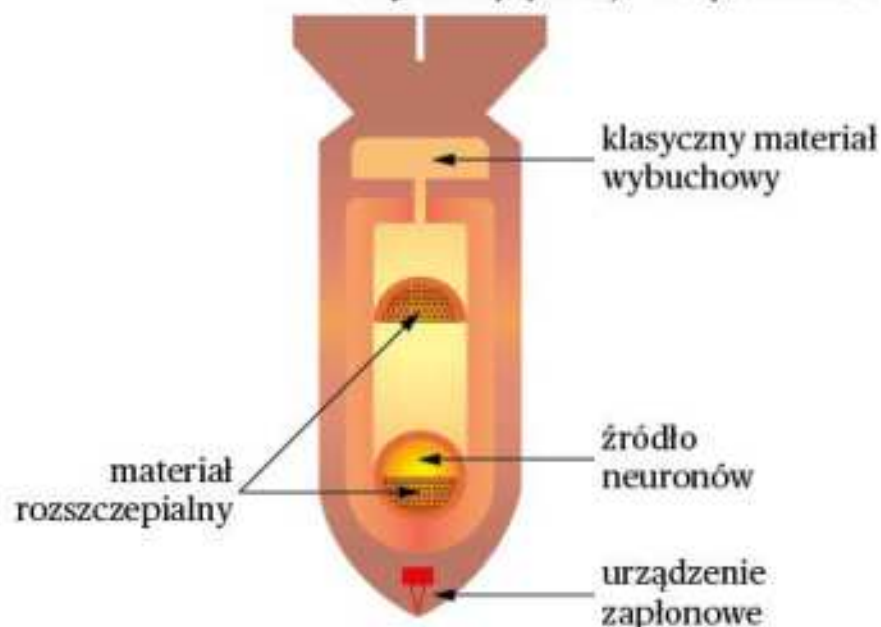
Izotop	Masa krytyczna, kg
uran 233	16
uran 235	52
neptun 237	60
pluton 239	10
pluton 240	40
pluton 242	100
ameryk 242	9–18
kiur 247	7
kaliforn 251	9

Bomba atomowa

bomba atomowa

Opisana powyżej reakcja łańcuchowa znalazła niechlubne zastosowanie w konstrukcji **broni masowego rażenia**. Rozwój badań naukowych niestety często jest związany z celami militarnymi czy obronnymi. Pierwszy reaktor jądrowy nieprzypadkowo powstał w czasie drugiej wojny światowej – zwiększono wtedy środki na badania naukowe, których celem miało być szybsze i skuteczniejsze wyeliminowanie przeciwnika. **Bomba atomowa** powstała w ramach tajnego projektu naukowego o nazwie Manhattan. Pierwszego próbnego wybuchu jądrowego dokonano 16 lipca 1945 roku w USA na pustyni w stanie Nowy Meksyk. Następne dwie detonacje (6 i 9 sierpnia 1945 r.) miały już charakter bojowy i zniszczyły miasta Hiroszimę i Nagasaki w Japonii. Wybuch tych bomb doprowadził do śmierci około 200 000 ludzi. Był to najtragiczniejszy w dziejach sposób wykorzystania najsłynniejszego wzoru w fizyce: $E = mc^2$.

Zasada działania bomby atomowej opiera się na zjawisku **niekontrolowanej reakcji łańcuchowej**. Jak już wiesz, aby do niej doszło, masa materiału rozszczepialnego musi przekroczyć masę krytyczną. Osiąga się to poprzez szybkie złączenie ze sobą kawałków uranu lub plutonu, przy czym każdy kawałek z osobna ma masę mniejszą od krytycznej. Wszystko musi się dzieć w ułamku sekundy, dlatego do złączenia



elementów rozszczepialnych wykorzystuje się jako zapalnik konwencjonalny materiał wybuchowy. Na rysunku 30 przedstawiono jedną z możliwych realizacji tej koncepcji. Po scaleniu substancji rozszczepialnych pod wpływem neutronów lawinowa reakcja łańcuchowa rozprzestrzeni się w ciągu 1 mikrosekundy w obrębie całej bomby, wyzwalając ogromną energię, równoważną wybuchowi tysięcy ton trotylu.

Rys. 30. Schemat bomby atomowej.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Przepisz do zeszytu schemat reakcji: ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{54}^{139}\text{Xe} + {}_{38}^{94}\text{Mo} + 2{}_0^1\text{n} + 4{}_0^0\text{e} + \gamma$, zastępując znaki zapytania odpowiednimi liczbami.
2. Wyjaśnij, jakie warunki muszą być spełnione, aby zainicjować i podtrzymać reakcję łańcuchową.
3. Przygotuj referat multimedialny na temat okoliczności powstania bomby atomowej i czynników jej rażenia.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Rozszczepienie jądra polega na rozpadzie tego jądra na dwa fragmenty po pochłonięciu neutronu. Rozszczepieniu podlegają tylko niektóre izotopy najcięższych pierwiastków. Towarzyszy temu procesowi emisja kolejnych neutronów. s. 239
- Jeśli neutrony wyemitowane podczas rozszczepienia jednego jądra powodują rozszczepienie następnych jąder, mamy do czynienia z reakcją łańcuchową. s. 240
- Warunkiem podtrzymania reakcji łańcuchowej jest odpowiednia masa substancji rozszczepialnej, która musi być większa od masy krytycznej. s. 241
- Niekontrolowaną reakcją łańcuchową wykorzystano w konstrukcji bomby atomowej. s. 242

5.10. Energetyka jądrowa

NA TEJ LEKCJI:

- przekonasz się, jak można sterować reakcją rozszczepienia i pozyskiwać dzięki niej energię w kontrolowany sposób;
- dowiesz się, jak jest zbudowana i jak działa elektrownia jądrowa,
- poznasz zalety i wady energetyki jądrowej.

Budowa i zasada działania reaktora jądrowego

Energia jądrowa wyzwala się w reakcjach, w wyniku których powstają jądra atomowe o większym deficycie masy, czyli ważące mniej niż substraty, z których powstały. Ubytek masy pomnożony przez kwadrat prędkości światła stanowi właśnie tę wyzwoloną energię. Największy deficyt masy mają pierwiastki znajdujące się mniej więcej w połowie układu okresowego, w okolicach żelaza. Energię jądrową można pozyskiwać w trakcie syntezy pierwiastków lekkich lub rozszczepiając pierwiastki ciężkie. Synteza jądrowa zostanie przedstawiona w rozdziale 5.11, a obecnie skupimy się na wykorzystaniu reakcji rozszczepienia.



Jak wiesz, w wyniku rozszczepienia ciężkiego jądra powstają dwa lżejsze jądra oraz 2 lub 3 neutrony, które mogą zainicjować kolejne reakcje rozszczepienia. Taki ciąg reakcji nazywamy reakcją łańcuchową. Niekontrolowana, lawinowa reakcja łańcuchowa prowadzi do wybuchu jądrowego, co zostało wykorzystane w konstrukcji bomb atomowych. Na szczęście przebieg reakcji łańcuchowej można ściśle kontrolować i w ten sposób określać tempo pozyskiwania energii. Historycznie pierwszym urządzeniem, w którym nauczono się otrzymywać energię jądrową na skalę przemysłową, był reaktor atomowy skonstruowany w roku 1942 przez Enrico Fermiego.

reaktor jądrowy

Reaktor jądrowy wykorzystuje zjawisko wymuszonego rozszczepienia jądra uranu, którego warunkiem jest pochłonięcie przez niego neutronu. Reakcję tę inicjuje się za pomocą niezależnego źródła neutronów. Kolejne neutrony powstają już w wyniku rozszczepienia następnych jąder. Mają one zazwyczaj dużą energię i słabo reagują z innymi jądrami. Fermi odkrył, że najskuteczniejsze w wywoływaniu rozszczepienia są tak zwane neutrony powolne, o niewielkiej energii kinetycznej. Spowalniając odpowiednio neutrony można sprawić, że reakcja łańcuchowa będzie się podtrzymywać samoistnie na odpowiednim poziomie.

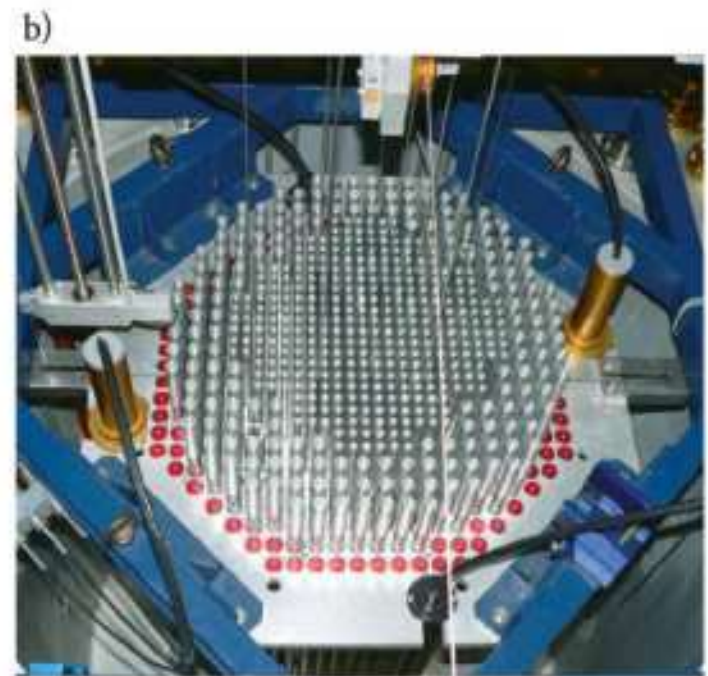
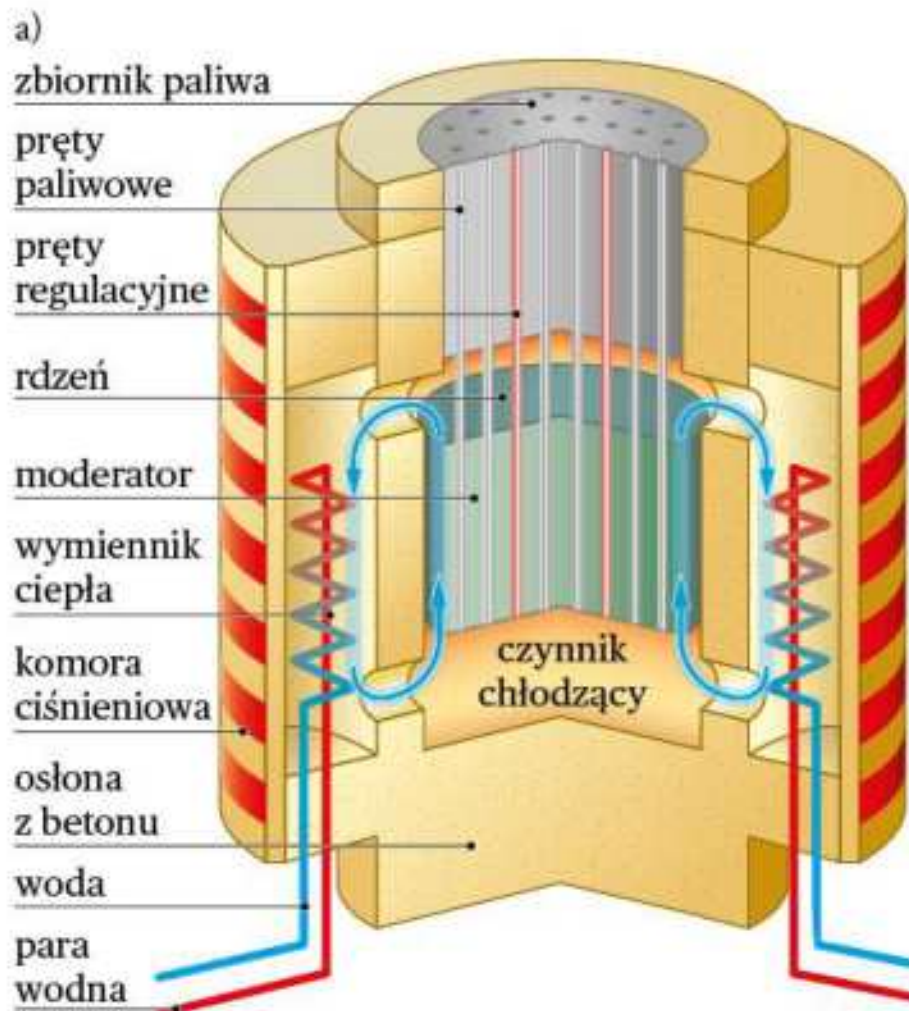
Stan, w którym liczba swobodnych neutronów w materiale rozszczepialnym maleje i reakcja wygasa, nazywamy **stanem podkrytycznym**. Gdy pozostaje stała (czyli tyle samo neutronów jest pochłanianych, ile emitowanych podczas kolejnych rozszczepień), mamy do czynienia ze **stanem krytycznym**, a gdy rośnie i reakcja przyspiesza – ze **stanem nadkrytycznym**. Stabilną pracę reaktora zapewnia więc stan krytyczny.

budowa reaktora jądrowego

Podstawowym elementem rdzenia reaktora (rys. 32) są **pręty paliwowe** wykonane ze wzbogaconego uranu (czyli z większą zawartością izotopu 235 niż występuje w przyrodzie; najpowszechniejszy izotop – uran 238 – nie jest rozszczepialny). Są one umieszczone w środowisku **moderatora**, który ma spowolnić neutrony, aby skuteczniej wywoływały rozszczepienie. Moderator jest wykonany z pierwiastków lekkich: grafitu, berylu, ciężkiego wodoru (deuteru) – neutrony tracą część energii, zderzając się sprężysto z lekkimi jądrami. Do reaktora wsuwa się **pręty regulacyjne** z kadmu, mającego zdolność silnego pochłaniania neutronów, a tym samym – regulowania prędkości reakcji. W normalnych warunkach w reaktorze utrzymuje się stan bliski krytycznemu. Całkowite wsunięcie prętów może w razie konieczności wygasić reakcję, a ich wysunięcie ją przyspiesza. Wydzielone ciepło jest odprowadzane na zewnątrz przez chłodziwo – najczęściej wodę. Oprócz niej stosuje się też stopiony sód lub potas. Takie rozwiązanie umożliwia pracę w wyższych temperaturach.



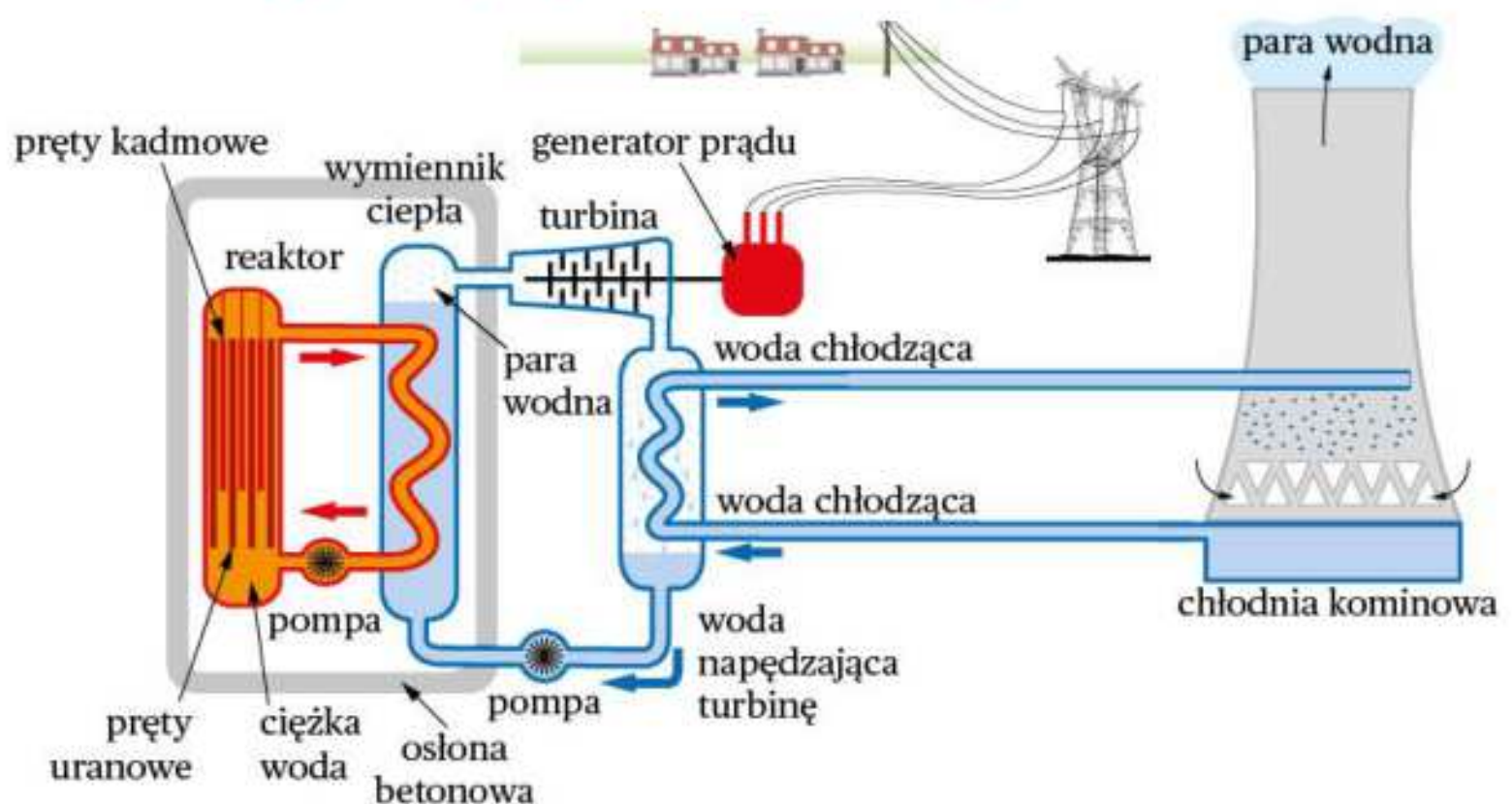
Rys. 31. Enrico Fermi (1901–1954) – wybitny fizyk włoski, laureat Nagrody Nobla (1938). Dokonał szeregu ważnych odkryć w fizyce jądrowej, m.in. wyjaśnił mechanizm rozpadu beta i odkrył odpowiedzialne za nie oddziaływanie jądrowe słabe. Od 1938 r. pracował w Stanach Zjednoczonych, gdzie skonstruował pierwszy na świecie reaktor jądrowy i uczestniczył w projekcie Manhattan.



Ryc. 32. a) Schemat budowy reaktora jądrowego. b) Wygląd reaktora.

Oprócz reaktorów energetycznych buduje się również **reaktory badawcze**, służące m.in. do produkcji izotopów wykorzystywanych w medycynie i technice. W Polsce taki reaktor znajduje się w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku pod Warszawą.

Elektrownia jądrowa (nazywana też atomową)



Ryc. 33. Schemat elektrowni jądrowej.

**elektrownia
jądrowa**

Jako źródło ciepła reaktor jądrowy w energetyce może odgrywać podobną rolę jak kocioł, w którym spalamy węgiel. Gorące chłodziwo opuszczające reaktor oddaje ciepło w wymiennikowni, podgrzewając wodę w drugim obiegu. Chodzi tu o to, by napromieniowane chłodziwo nie miało kontaktu z dalszymi fragmentami instalacji. Zamieniona w parę woda może napędzać turbinę jak w zwykłej elektrowni (ryc. 34) lub zostać użyta w celach grzewczych. Wykorzystana para zostaje skroplona i trafia



z powrotem do wymiennikowni. Nadmiar ciepła jest oddawany do atmosfery za pomocą charakterystycznych wież chłodniczych stosowanych też w elektrowniach konwencjonalnych. Z zewnątrz elektrownia jądrowa wygląda więc bardzo podobnie do elektrowni konwencjonalnej. Różni ją przede wszystkim brak komina, który jest nieodłącznym elementem kotła, gdzie następuje spalanie.

Rys. 34. Wygląd zewnętrzny elektrowni jądrowej położonej w miejscowości Leibstadt w Szwajcarii.

Zalety i wady energetyki jądrowej**zalety i wady
energetyki jądrowej**

Obecnie na świecie działa w elektrowniach kilkaset reaktorów jądrowych produkujących łącznie kilkanaście procent energii elektrycznej zużywanej przez ludzkość.

Budowa elektrowni jądrowej pociąga za sobą ogromne koszty i trwa bardzo długo. Jest to spowodowane koniecznością zastosowania najlepszych materiałów i zapewnienia wysokiej jakości wykonania w celu zagwarantowania bezpieczeństwa i wieloletniej niezawodności. Konieczne jest również posiadanie odpowiednich technologii i zatrudnienie wysokiej klasy specjalistów. Dlatego też nie wszystkie kraje stać na taki wydatek.

Mimo wysokich kosztów budowy samej elektrowni, energia jądrowa okazuje się stosunkowo tania. Nie powoduje wyczerpania surowców naturalnych, nie zużywa tlenu i nie zanieczyszcza środowiska. Pewną niedogodność stanowi powstawanie odpadów radioaktywnych, ale opracowano bezpieczne metody ich składowania głęboko pod ziemią w starych kopalniach. Ilość tych odpadów jest znikoma – objętość odpadów produkowanych przez elektrownie węglowe jest 100 000 razy większa. Pomiary wykazują też, że pyły emitowane przez elektrownie węglowe są stukrotnie bardziej radioaktywne niż bezpośrednie otoczenie elektrowni jądrowych.

Wbrew obiegowym opiniom, elektrownie jądrowe są również bardzo bezpieczne. Obowiązują w nich surowe procedury bezpieczeństwa, a personel jest odpowiednio szkolony. Przed katastrofą w Czarnobylu w żadnej elektrowni jądrowej świata nikt nigdy nie zginął w wypadku, w przeciwieństwie do elektrowni konwencjonalnych.



Planując rozwój energetyki, należy brać pod uwagę dostępność paliwa i innych źródeł energii. Typowa elektrownia konwencjonalna spala w ciągu roku miliony ton węgla. Zasoby złóż węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego kurczą się, a ich wydobycie będzie w przyszłości coraz bardziej kosztowne. Spalanie tych surowców powoduje emisję do atmosfery milionów ton gazów cieplarnianych i niekorzystne zmiany klimatyczne. Paliwa kopalne można zastąpić paliwami odnawialnymi, czyli biomasą, ale jej produkcja wymaga zajęcia obszarów rolnych. Tymczasem elektrownia jądrowa wymaga niewielkiej ilości paliwa – z rozszczepienia 1 grama uranu można otrzymać tyle energii, ile ze spalania około 3 ton węgla. Uran jest surowcem stosunkowo tanim. Ponadto szacuje się, że jego znane zasoby wystarczą ludzkości na kilkaset lat. Problem ograniczonych surowców można rozwiązać też przez zastosowanie tzw. reaktorów powielających, które produkują więcej paliwa, niż go zużywają. Planuje się również zastosowanie jako paliwa innego pierwiastka ciężkiego – toru.

Istnieją typy elektrowni, które w ogóle nie wymagają paliwa ani specjalistów do ich obsługi, a wytwarzana przez nie energia jest bardzo tania. Ale one też nie są pozbawione wad. Elektrownie wiatrowe psują krajobraz i stanowią zagrożenie dla ptaków. Budowa elektrowni wodnych, nawet małych, wymaga spiętrzania wody i zalewania terenów oraz utrudnia migrację ryb. Elektrownie jądrowe działają natomiast niezależnie od warunków pogodowych i hydrologicznych, w odróżnieniu od elektrowni wiatrowych, wodnych i ogniw fotowoltaicznych.

Istotnym czynnikiem przemawiającym przeciwko budowie elektrowni jądrowych jest opór społeczny spowodowany potencjalną możliwością wystąpienia awarii i katastrof. W historii światowej energetyki zdarzyły się dwie duże katastrofy (w Czarnobylu i Fukushima) oraz pewna ilość wewnętrznych awarii i wycieków promieniotwórczych. Likwidacja skutków tych incydentów często była bardzo kosztowna. Z tego powodu niektóre kraje mające reaktory atomowe wdrażają plan ich stopniowego wygaszania. Samo zamknięcie i utylizacja elektrowni również wiąże się z ogromnymi kosztami. Aby je pokryć, elektrownie zazwyczaj tworzą specjalny fundusz likwidacyjny, na który odkładają część zysków ze sprzedaży energii.

Warto przy okazji nadmienić, że obecnie budowane reaktory nowych generacji są wyposażone w tzw. pasywne systemy bezpieczeństwa. Reaktory projektuje się w taki sposób, aby w razie ich ewentualnego uszkodzenia reakcje wygasły w nich samoczynnie, nawet bez ingerencji służb ratowniczych i bez konieczności zasilania zewnętrznego. Na przykład jako moderatora używa się wody, która w przypadku ewentualnego pożaru wyparuje. Brak moderatora spowoduje automatyczne przerwanie reakcji łańcuchowej i wydzielania ciepła. Ryzyko katastrofy w takich elektrowniach zostaje więc wyeliminowane poprzez samo zadziałanie praw fizyki.

Energetyka jądrowa sprzyja produkcji i rozprzestrzenianiu się broni jądrowej, gdyż w reaktorach można wytwarzać surowce niezbędne do jej budowy. Stwarza to obawy wobec państw niestabilnych politycznie. Oddzielnym problemem jest też zagrożenie terrorystyczne w odniesieniu do instalacji jądrowych.



Pozytywnym aspektem działania reaktorów jest produkcja radioizotopów niezbędnych na przykład w medycynie. Elektrownie jądrowe zapewniają też bezpieczeństwo energetyczne kraju na długie dziesięciolecia.

Energetyka jądrowa budzi wielkie emocje i ma wielu zwolenników oraz wielu przeciwników. Podejmując decyzje o rozwoju energetyki jądrowej, trzeba uwzględnić argumenty każdej ze stron.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij zasadę działania reaktora jądrowego i rolę zastosowanych w nim elementów.
2. Wymień podobieństwa i różnice w budowie i zasadzie działania elektrowni jądrowej oraz węglowej.
3. Przedstaw w formie tabeli narysowanej w zeszycie zalety i wady elektrowni jądrowych.
4. Przygotuj referat multimedialny o przyczynach i skutkach awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu.
5. Przygotuj referat multimedialny o przyczynach i skutkach awarii elektrowni jądrowej w Fukushima.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 244 • Reakcje rozszczepienia wykorzystywane są do produkcji energii cieplnej w reaktorach jądrowych.
- s. 244 • Ważnymi elementami reaktora są pręty paliwowe, pręty regulacyjne oraz moderator.
- s. 244 • Stabilną pracę reaktora zapewnia stan krytyczny, w którym w trakcie trwania reakcji łańcuchowej utrzymuje się mniej więcej stała liczba neutronów. Jeśli liczba neutronów maleje (stan podkrytyczny), to reakcja wygasa, a jeśli rośnie (stan nadkrytyczny), to reakcja przyspiesza.
- s. 246 • Energia cieplna odprowadzana z reaktora za pomocą rozgrzanej pary może służyć do produkcji energii elektrycznej.
- s. 246 • Budowa i zasada działania elektrowni jądrowej jest podobna do budowy i zasady działania elektrowni węglowej. Główną różnicę stanowi źródło ciepła.
- s. 246 • Elektrownie jądrowe zaspokajają kilkanaście procent światowego zapotrzebowania na energię elektryczną.
- s. 246 • Elektrownie jądrowe mają wiele zalet, ale z drugiej strony są bardzo drogie w budowie i stwarzają potencjalne ryzyko katastrofy. Dlatego też ich budowa ma zarówno zwolenników, jak i przeciwników.



5.11. Reakcje termojądrowe

NA TEJ LEKCJI:

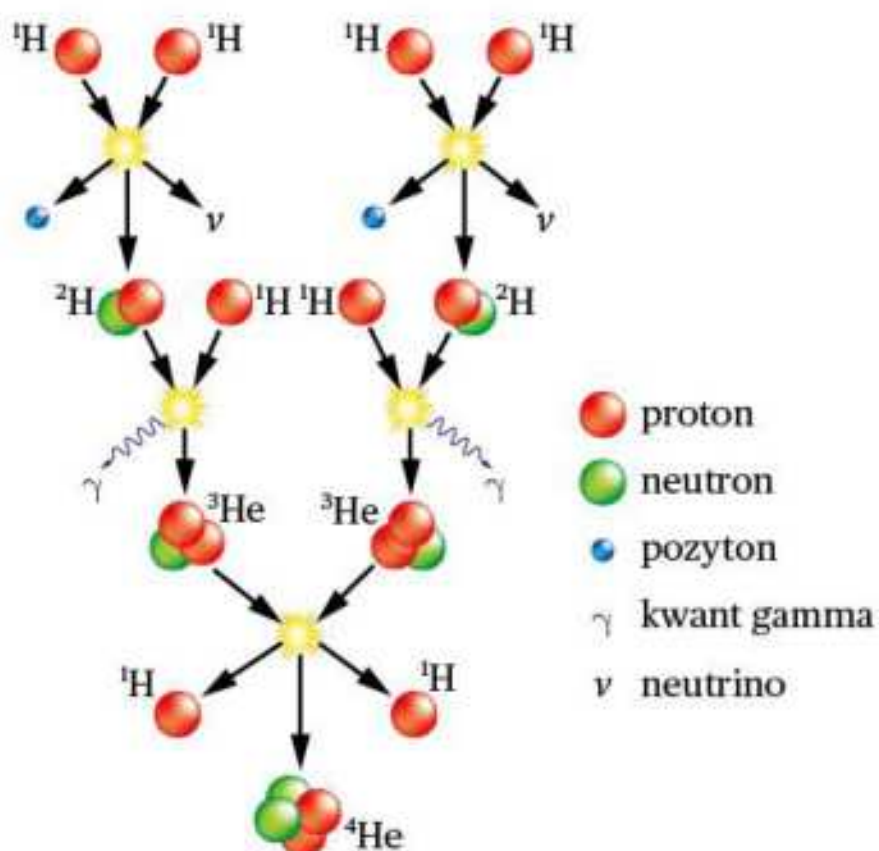
- dowiesz się, dlaczego gwiazdy świecą;
- poznasz zasadę działania bomby termojądrowej.

Reakcje termojądrowe zachodzące w gwiazdach

Z analizy wykresu na rysunku 16 (rozdz. 5.5) wynika, że dokonując **syntezy** (zwanej też **fuzją**) pierwiastków lekkich w cięższe, możemy wyzwolić znacznie więcej energii niż podczas rozszczepiania jąder ciężkich. Deficyt masy dla pierwiastków znajdujących się w pierwszych wierszach układu okresowego silnie wzrasta wraz ze wzrostem liczby atomowej, co rozpoznajemy po dużym nachyleniu wykresu z jego lewej strony. Problem z reakcjami syntezy polega jednak na tym, że nie mogą one zachodzić w zwykłych warunkach. W reakcjach rozszczepienia cząstką inicjującą całe zjawisko jest neutron. Ponieważ nie ma on ładunku, nie jest przez jądro odpychany, w związku z czym może się z nim zderzyć, nawet mając niewielką prędkość. Gdy odległość między jądrem a neutronem zmniejszy się do około 10^{-15} m, do głosu dochodzą siły jądrowe, które przyciągają neutron do jądra i dochodzi do reakcji.

reakcja syntezy
(fuzja)

Sytuacja zmienia się diametralnie, gdy neutron zastąpimy cząstką naładowaną, na przykład jądrem wodoru (czyli protonem) lub jądrem innego pierwiastka. Cząstki takie będą się odpychać siłami elektrostatycznymi. Zgodnie z prawem Coulomba siła oddziaływania elektrostatycznego między cząstkami naładowanymi jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi. Przyjmuje więc ekstremalnie duże wartości dla odległości skrajnie małych, koniecznych do zadziałania sił jądrowych. Jeśli więc dwa protony miałyby się zbliżyć do siebie na odległość rzędu 10^{-15} m, musiałyby mieć ogromne prędkości, a co za tym idzie – ogromne energie kinetyczne. Makroskopową miarą średniej energii kinetycznej cząsteczek jest jej temperatura. Zatem reakcje syntezy mogą przebiegać samorzutnie jedynie w środowisku, w którym temperatura osiąga miliony stopni. Aby reakcje zachodziły często, reagujące jądra powinny być odpowiednio blisko siebie, więc tworzący je gaz powinien mieć bardzo dużą gęstość, co ma miejsce pod ogromnym ciśnieniem. Opisane warunki występują w przyrodzie we wnętrzach gwiazd. Gaz w gwiazdach jest całkowicie zjonizowany, czyli ma postać plazmy – mieszaniny jąder i oderwanych od nich elektronów.

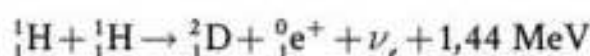


Rys. 35. Schemat reakcji protonowej.

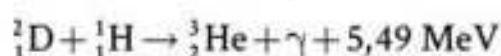
reakcje syntezy
w gwiazdach

cykl reakcji
termojądrowych
proton-proton

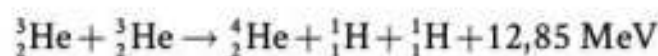
Dominującym źródłem energii emitowanej przez Słońce i podobne mu gwiazdy jest cykl reakcji termojądrowych określanych mianem **proton-proton**. Substratami pierwszego etapu tego cyklu są dwa protony – jądra wodoru (wodór stanowi 75% masy całego Słońca). Jeśli dwa protony zderzą się odpowiednio mocno, łączą się, przy czym jeden z nich zostaje przekształcony w neutron. Ładunek dodatni przekształconego protonu zostaje uniesiony przez pozyton (antyelektron) – cząstkę o właściwościach takich jak elektron, ale przeciwnym znaku. Antyelektron po zetknięciu się z pierwszym napotkanym elektronem anihiluje, to znaczy zamienia się w energię promieniowania unoszoną przez kwanty gamma. Złączony proton i neutron stanowią jądro izotopu wodoru – deuteru. W wyniku procesu powstaje jeszcze neutrino elektronowe – cząstka niezwykle lekka, przenikliwa i pozbawiona ładunku. Bardzo szybko opuszcza ona Słońce, unosząc część energii.



Następnie jądro deuteru przyłącza kolejne jądro wodoru, tworząc jądro izotopu helu 3. Dodatkowo zostaje wyemitowany kwant gamma, unoszący wydzieloną energię.



Ostatnim etapem cyklu jest fuzja dwóch jąder helu 3, w wyniku czego powstaje jądro helu 4 oraz 2 protony (jądra wodoru). Powstałe protony mogą wziąć udział w kolejnej reakcji proton-proton.



W ten sposób cykl się zamyka. Jego sumarycznym efektem jest zamiana czterech protonów w jądro helu z emisją dwóch antyelektronów i dwóch neutrin. Antyelektrony anihilują z elektronami i zamieniają się w promieniowanie. Sumaryczny ładunek elektryczny Słońca pozostaje zachowany. Wydzielona energia utrzymuje wysoką temperaturę w jądrze i jest stopniowo wypromieniowana. To sprawia, że Słońce świeci, podobnie jak inne gwiazdy. W naszym Słońcu w ciągu każdej sekundy syntezy ulega około 657 milionów ton wodoru, w efekcie czego powstaje około 653 milionów ton helu. Brakujące około 4 miliony ton, po pomnożeniu przez kwadrat prędkości światła, stanowi ilość energii produkowanej przez Słońce w ciągu każdej sekundy.

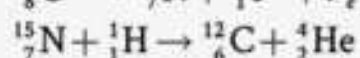
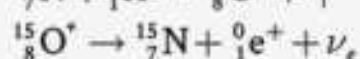
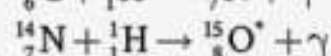
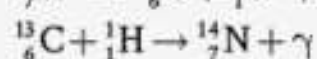
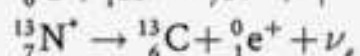
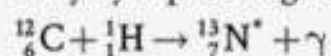
Z przedstawionych liczb można wyciągnąć wniosek, że reakcje termojądrowe zachodzące w Słońcu mają charakter wybuchowy. To mylne wyobrażenie. Całkowita masa Słońca jest tak ogromna, że zapasów wodoru w jego jądrze starczy jeszcze na miliardy lat. W rzeczywistości opisane tu reakcje zachodzą bardzo wolno i cały cykl reakcji trwa około miliarda lat. Energia produkowana przez jeden kilogram materii słonecznej jest mniejsza od energii produkowanej w tym samym czasie przez jeden kilogram ciała ludzkiego w procesach metabolicznych. Wielka moc promieniowania Słońca wynika ze skali – ogromnej masy naszej gwiazdy centralnej.



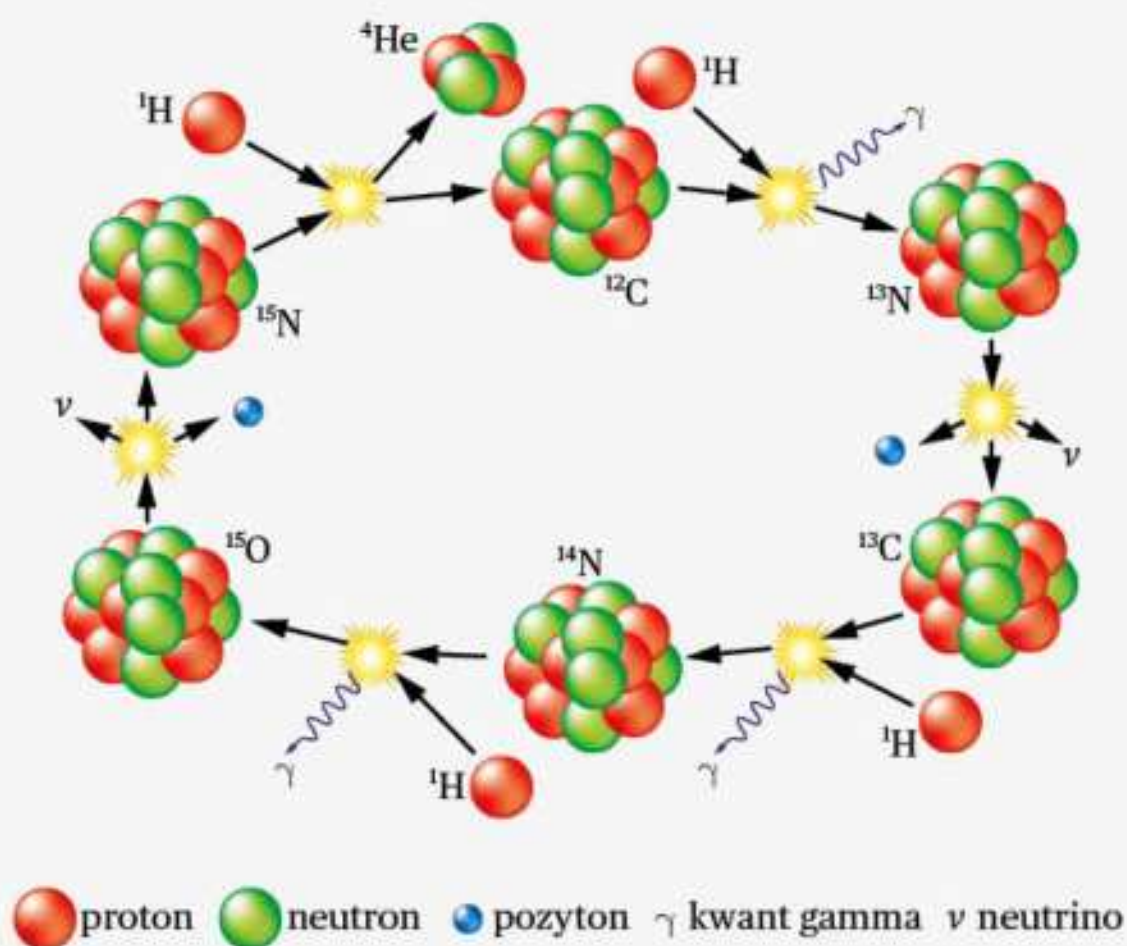
Chcesz wiedzieć więcej?

W gwiazdach masywniejszych od Słońca, we wnętrzach których panuje wyższa temperatura, zachodzi inny, wydajniejszy cykl reakcji powodujących zamianę wodoru w hel. Dzieje się to w obecności jąder węgla, które przyłączając kolejne protony, zamieniają się kolejno w azot i tlen. Ostatecznie wyprodukowane cięższe jądra rozpadają się z powrotem na węgiel oraz na hel. Węgiel w tym procesie nie zużywa się i pełni wobec tego funkcję katalizatora. Dlatego też wystarczy niewielka jego ilość, by reakcja mogła zachodzić.

Cały cykl przebiega następująco:



Sumaryczny efekt powyższych reakcji jest taki sam, jak dla cyklu protonowego, ale synteza może przebiegać szybciej.



Rys. 36. Cykl węglowo-azotowo-tlenowy (C-N-O).



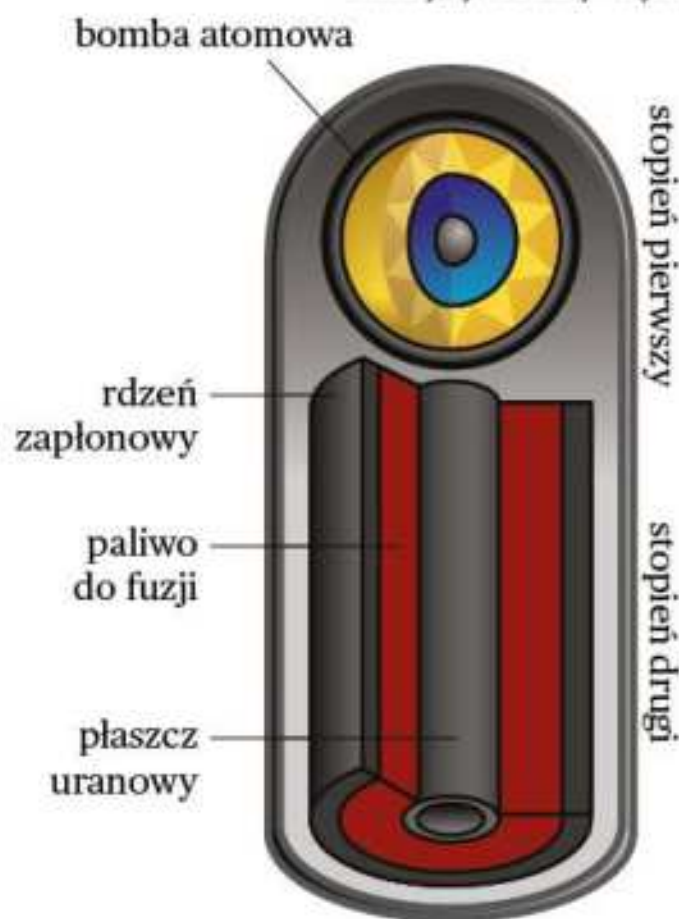
reakcja syntezy
w bombach
wodorowych

Bomba wodorowa (termojądrowa)

Reakcje syntezy jądrowej znalazły niestety zastosowania militarne. Bomby atomowe oparte na zjawisku rozszczepienia mają ograniczoną moc związaną między innymi z wielkością masy krytycznej. Zdano sobie sprawę, że o wiele większą siłę rażenia miałyby bomby wykorzystujące reakcję syntezy jądrowej. Wiesz już, że ta reakcja

jest wielokrotnie wydajniejsza energetycznie od reakcji rozszczepienia, ponadto nie ma w niej żadnych limitów, jeśli chodzi o masę substratów. Aby w sposób sztuczny doprowadzić do fuzji jądrowej, trzeba rozwiązać jeden problem techniczny: podgrzać lekkie jądra do milionów stopni Celsjusza i zapewnić odpowiednio wysokie ciśnienie. Aby zdetonować bombę termojądrową, należy więc stworzyć warunki podobne do panujących we wnętrzu Słońca.

Problem ten rozwiązano, stosując jako zapalnik bomby wodorowej „zwykłą” bombę atomową (rys. 37). Jej wybuch powoduje gwałtowny wzrost ciśnienia i temperatury do wartości, w których może dojść do właściwej reakcji – syntezy ciężkich izotopów wodoru w hel – o sile rażenia wielokrotnie większej (w zasadzie – bez ograniczeń). Pierwszą bombę termojądrową zdetonowano w 1952 roku. Największe konstrukcje miały moc kilka tysięcy razy większą od bomby zrzuconej na Hiroszimę. Na szczęście nigdy nie zostały użyte w celach bojowych.



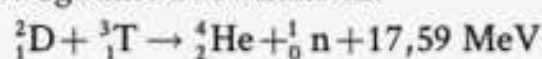
Rys. 37. Schemat bomby termojądrowej.



Chcesz wiedzieć więcej?

Wielka wydajność reakcji termojądrowych w połączeniu z dostępnością i niskim kosztem paliwa stwarza nadzieję na zastąpienie wszystkich dotychczasowych sposobów wytwarzania energii elektrycznej. Na przeszkodzie stoi jednak problem techniczny – konieczność stworzenia ekstremalnych warunków niezbędnych do przeprowadzenia reakcji syntezy. Do tej pory można ją przeprowadzać na większą skalę jedynie w sposób niekontrolowany – detonując bombę termojądrową. Sposób ten absolutnie nie nadaje się do produkcji energii elektrycznej.

Próby przeprowadzania fuzji jądrowej w kontrolowanych warunkach podejmowane są już od lat pięćdziesiątych XX wieku. Pierwsze tego typu urządzenie o nazwie tokamak (skrót od rosyjskiej nazwy „toroidalna komora z cewką magnetyczną”) zbudowano w Moskwie w 1956 roku. Jego zasadniczy element to toroidalna komora próżniowa, w której zjonizowany gaz (mieszanka deuteru i trytu) jest utrzymywany w wąskim pasemku o małej objętości za pomocą pola magnetycznego daleko od ścianek i podgrzewany do milionów stopni indukowanym prądem elektrycznym lub falami elektromagnetycznymi. W tak przygotowanej plazmie zachodzi reakcja syntezy helu z deuteru i trytu zgodnie z równaniem:





Obecnie prowadzi się badania nad kontrolowaną fuzją jądrową w kilku miejscach na świecie, między innymi w Wielkiej Brytanii (JET) i Francji (ITER). W urządzeniach tych uzyskuje się chwilową moc rzędu kilkunastu megawatów. Prace nadal nie wyszły poza fazę testów laboratoryjnych. Nie rozwiązano jeszcze kwestii zamiany energii cieplnej uwalnianej w reakcji syntezy na energię elektryczną. Problemem są też powstające w reakcji wysokoenergetyczne, bardzo przenikliwe neutrony, które wzbudzają promieniotwórczość w całej konstrukcji. Pociąga to za sobą trudność w przyszłej utylizacji zużytego urządzenia. Jeśli problemy te zostaną przezwyciężone, powstanie nowe, wydajne źródło energii. Będzie ono również bardziej bezpieczne, gdyż w razie awarii urządzenia nastąpi zanik warunków do kontynuowania reakcji syntezy i nastąpi jej automatyczne wygaszenie.



Rys. 38. Tokamak – widok wnętrza.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego syntezy jądrowej nie można przeprowadzać w temperaturze pokojowej.
2. Wytlumacz, dlaczego gwiazdy świecą.
3. Słońce w ciągu każdej sekundy zamienia na energię 4 250 000 ton swojej masy. Oblicz moc Słońca.
4. Największa w historii bomba termojądrowa o nazwie Car Bomba została zdetonowana na terenie Związku Radzieckiego w czasach zimnej wojny. Przygotuj referat multimedialny o jej parametrach oraz skutkach wybuchu.
5. Przygotuj referat multimedialny o aktualnym stanie badań w ramach projektów JET i ITER.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Reakcje syntezy wytwarzają więcej energii niż reakcje rozszczepienia, ale do ich przeprowadzenia konieczna jest bardzo wysoka temperatura i wielkie ciśnienie. s. 249
- Reakcje syntezy zachodzące w jądrach gwiazd powodują ich świecenie. s. 249
- W gwiazdach podobnych do Słońca głównym źródłem energii jest reakcja protonowa, w wyniku której następuje przekształcenie czterech jąder wodoru w jedno jądro helu. s. 250
- W warunkach ziemskich reakcje syntezy potrafimy przeprowadzać w sposób wybuchowy w bombach wodorowych. s. 252



5.12. Ewolucja gwiazd

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, skąd czerpiemy informacje o gwiazdach;
- poznasz podstawowe typy gwiazd;
- przeczytasz o tym, jak się rodzą, żyją i jak umierają gwiazdy w zależności od swojej masy.

Fakty obserwacyjne

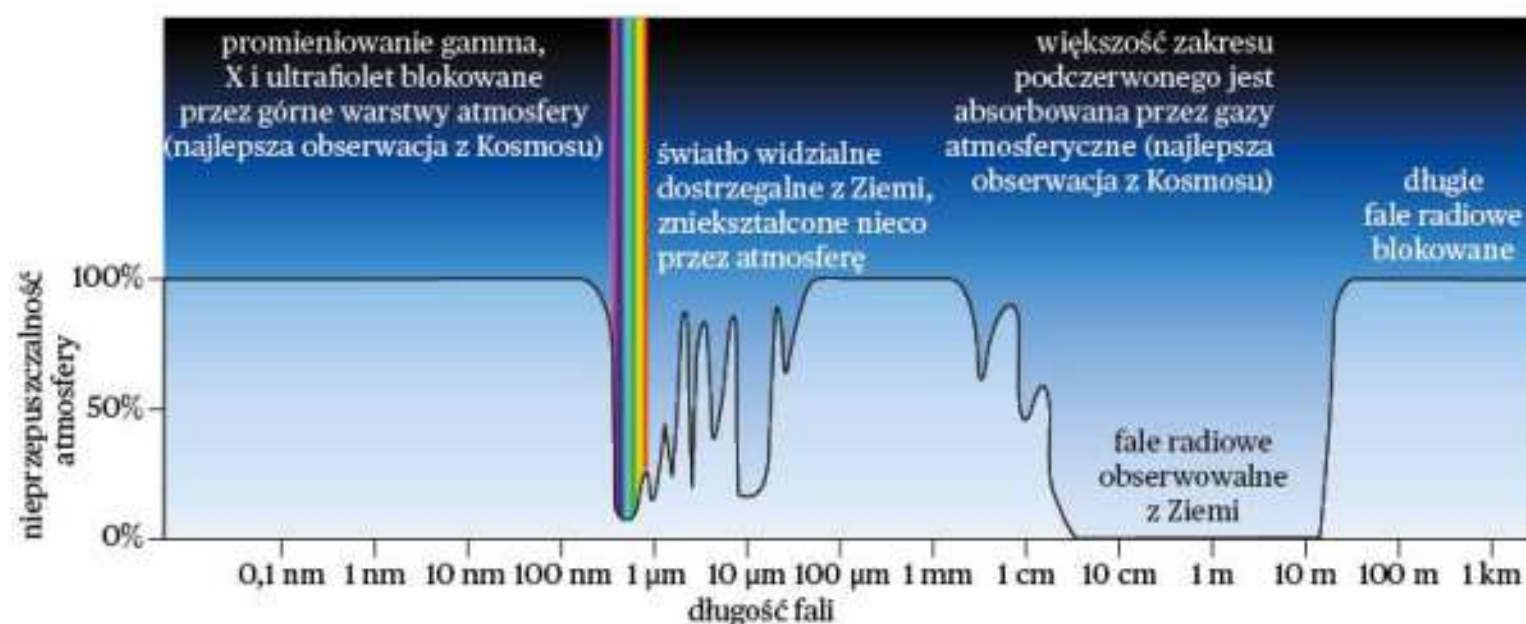
Wykorzystamy teraz wiedzę przedstawioną w ciągu trzech lat nauki w szkole średniej do opisu życia gwiazd. Zagadnieniami takimi zajmuje się **astrofizyka**. Najbliższe gwiazdy znajdują się setki tysięcy razy dalej niż planety Układu Słonecznego. Nie ma żadnych szans, aby wysłać w ich rejony statek kosmiczny, zbadać okolicę i przesłać wyniki badań na Ziemię w czasie życia najbliższych pokoleń. Przelot do najbliższej gwiazdy z największymi prędkościami osiąganymi przez współczesne rakiety trwałby około 100 tysięcy lat. Nie możemy też przeprowadzać na gwiazdach żadnych eksperymentów. Jednak astrofizycy sobie radzą i stworzyli szczegółowe modele wyjaśniające budowę i ewolucję gwiazd.

Jedyna gwiazda, którą możemy zobaczyć z bliska, to Słońce. Tylko ono jest widoczne w postaci tarczy, na której widać różne szczegóły, na przykład plamy słoneczne, koronę i protuberancje. Rejestrujemy też materię słoneczną docierającą w pobliże Ziemi w postaci wiatru słonecznego. Znamy dokładnie masę Słońca, a obserwacja neutrin dostarcza nam pośredniej informacji o tym, co dzieje się we wnętrzu jądra słonecznego.

Wszystkie inne gwiazdy znajdują się tak daleko, że nawet pod największym osiągalnym powiększeniem nadal wyglądają jak kropki. Wielkości tych kropek zależą od faktycznej wielkości gwiazdy, jej temperatury oraz odległości od nas.

Praktycznie jedynym nośnikiem informacji o gwiazdach jest docierające do naszych przyrządów obserwacyjnych promieniowanie elektromagnetyczne. Ze względu na pochłaniające właściwości naszej atmosfery do powierzchni Ziemi docierają jedynie niektóre rodzaje promieniowania – głównie światło widzialne i fale radiowe (rys. 39). Dlatego obserwacje naziemne mogą być przeprowadzane tylko za pomocą teleskopów optycznych i radioteleskopów (rys. 40). Inne rodzaje promieniowania emitowanego przez gwiazdy, w tym: podczerwień, nadfiolet, promieniowanie X i gamma, mogą być rejestrowane jedynie przez przyrządy umieszczone w przestrzeni kosmicznej.

informacje
pochodzące
z gwiazd



Rys. 39. Przepuszczalność atmosfery ziemskiej dla różnych zakresów promieniowania elektromagnetycznego.

Docierające do Ziemi światło gwiazd jest niezwykle słabe – jego natężenie mierzy się w pikowatach na metr kwadratowy. Mimo to astronomowie potrafią takie światło rozszczepić w pryzmacie i zbadać jego widmo. Widoczne w widmie linie absorpcyjne informują nas o składzie chemicznym atmosfery gwiazdy. Z kolei położenie maksimum promieniowania dostarcza nam informacji o temperaturze powierzchniowej gwiazdy. A to już jest bardzo dużo.

Rys. 40. Radioteleskop – podstawowe narzędzie badawcze współczesnej astronomii.

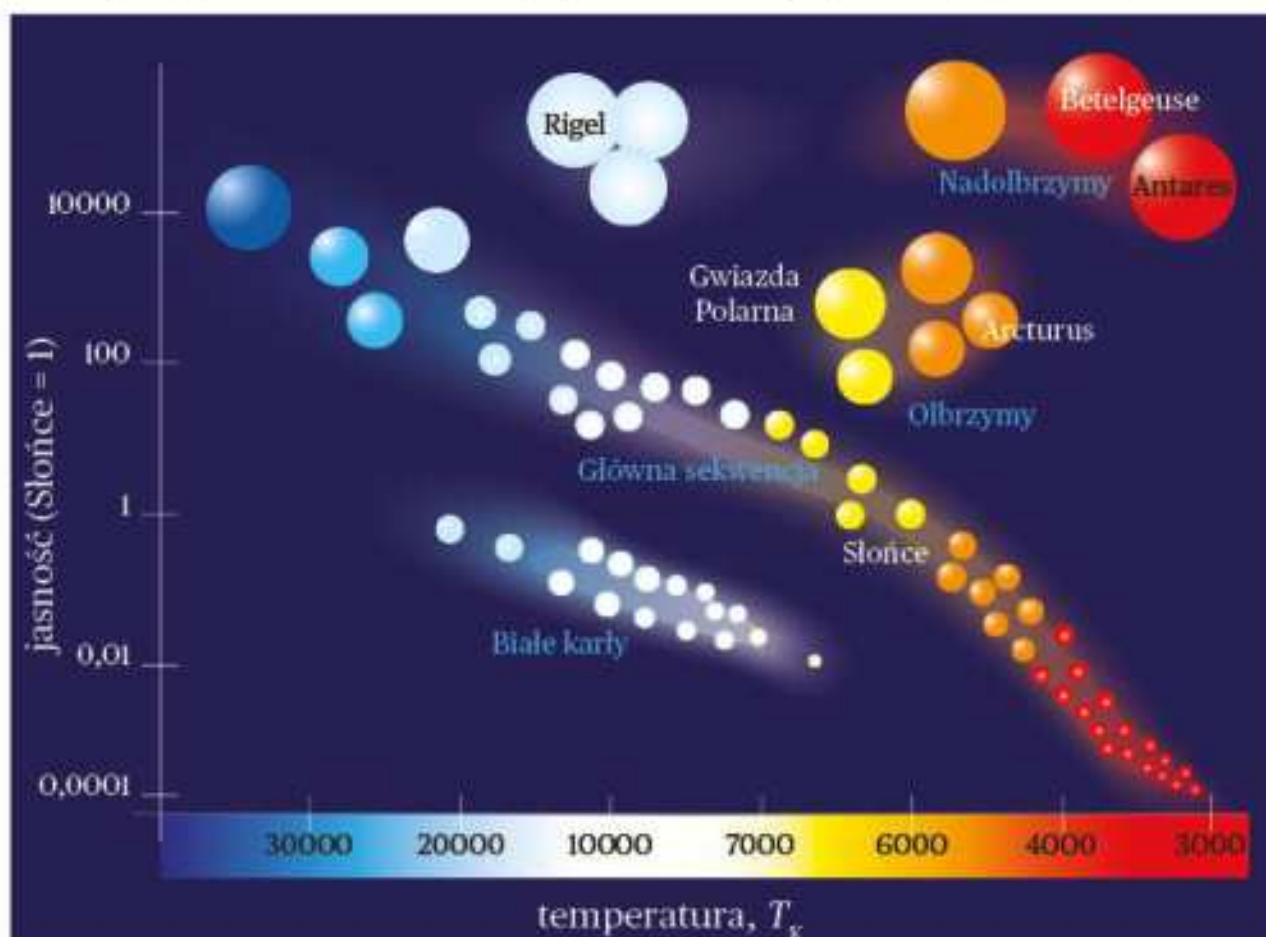


Z lekcji fizyki w klasie pierwszej znasz metody pomiarów odległości do pobliskich gwiazd. Na podstawie wiedzy o jasności widomej danej gwiazdy (czyli takiej, jaką widzimy na ziemskim niebie) i odległości do niej można obliczyć tak zwaną jasność absolutną – odniesioną do pewnej standardowej odległości. To nam daje z kolei skalę porównawczą całkowitej mocy promieniowania gwiazdy. Jeśli znamy moc i temperaturę gwiazdy oraz zastosujemy inne znane prawa dotyczące promieniowania, bez problemu obliczymy jej powierzchnię, a więc i średnicę. W ten sposób znajomość praw fizyki pozwala nam ustalić pełne informacje o gwiazdzie odległej nieraz o wiele lat świetlnych od Ziemi.



Diagram Hertzsprunga–Russella

Po przeanalizowaniu widm tysięcy gwiazd okazało się, że jasność i temperatura gwiazdy nie mogą być dowolne. W układzie współrzędnych temperatura – jasność gwiazdy układają się w pewne obszary odpowiadające parametrom, przy których gwiazda jest stabilna. Wykres taki (rys. 41) – nazywany w skrócie **diagramem H–R** – został skonstruowany w latach 1911–1913 przez Ejnara Hertzsprunga (czytaj: hercszprunga, 1873–1967) i Henry’ego Russella (czytaj: rasela, 1877–1957).



Rys. 41. Diagram Hertzsprunga–Russella. Jasność jest wyrażona w jednostkach jasności Słońca. Obie skale są logarytmiczne, tzn. z każdą ich działką odpowiednia wielkość fizyczna wzrasta lub maleje tyle samo razy.

Najbardziej typowe gwiazdy układają się w pobliżu przekątnej diagramu, w obszarze zwanym **ciągiem głównym**. Im większa jest gwiazda ciągu głównego, tym wyższą ma temperaturę powierzchniową i jaśniej świeci, co wydaje się dość logiczne. Kolor gwiazdy wiąże się z jej temperaturą. Gwiazdy najzimniejsze (o temperaturze powierzchni około 3000 K, tzw. **czerwone karły**) mają kolor czerwony, średnie (6000 K) – żółty, a najgorętsze (20 000 K) – niebieski. Słońce okazuje się typową gwiazdą ze środka ciągu głównego.

Oprócz tego wyróżniamy obszar **białych karłów** – gwiazd małych i stosunkowo ciemnych, ale dosyć gorących. Gwiazdy bardzo duże i dość jasne, ale raczej chłodne, to **czerwone olbrzymy**, a gwiazdy jeszcze większe i jaśniejsze, ale również dość chłodne, to **nadolbrzyny**. Bardzo rzadko się zdarza, by jakaś gwiazda miała parametry leżące poza wymienionymi obszarami.



Narodziny i życie typowej gwiazdy

Życie gwiazdy trwa od kilkudziesięciu milionów do wielu miliardów lat, więc cała historia rozwoju nauki na Ziemi jest dla gwiazd chwilą. Nawet gdybyśmy obserwowali daną gwiazdę przez tysiąc lat, nie dostrzegliśmy w niej żadnych zmian. Tylko od czasu do czasu, gdzieś w otchłaniach Kosmosu dochodzi do jakiegoś spektakularnego zjawiska, na przykład wybuchu supernowej. Proces taki dzieje się na naszych oczach i jego przebieg możemy prześledzić od początku do końca. Poza tymi nielicznymi wyjątkami gwiazdy wydają się być stale i niezmiennie.

W jednej ze swoich książek Russell trafnie porównał sytuację astronoma, który na podstawie znajomości widm i wielkości różnych gwiazd ma ustalić przebieg ich ewolucji, do sytuacji przybysza, który nigdy wcześniej nie widział drzewa, ale po krótkim spacerze po lesie miałby stworzyć teorię ewolucji drzew. Żadne z drzew w czasie spaceru nie zdołało się w żaden istotny sposób zmienić, ale widząc drzewa duże, małe, zmurszałe i kielkujące, przybysz może wyciągnąć całkiem sensowne wnioski na temat ich całego życia.

Gwiazdy powstają na skutek **zagęszczania się** (pod wpływem własnej grawitacji) **obłoków gazu** w przestrzeni kosmicznej. Zjawisko to zachodzi w niektórych mgławicach również obecnie (rys. 42). Podczas sprężania gazu, jego energia potencjalna zamienia się na energię wewnętrzną i temperatura obłoku (a zwłaszcza jego centralnej części) mocno wzrasta. Część energii jest emitowana w postaci promieniowania. Taki twór zaczyna być widoczny i nazywamy go **protogwiazdą**.

Kurczenie się masywnej protogwiazdy trwa około 100 000 lat, a gwiazdy wielkości Słońca – 10 milionów lat. Jeśli masa protogwiazdy nie przekracza 8% masy Słońca, obłok nigdy nie przekształca się w gwiazdę i powoli stygnie jako tak zwany **brązowy karzeł**.

Gdy protogwiazda jest wystarczająco masywna, temperatura w jej wnętrzu osiąga w końcu wartość kilkunastu milionów kelwinów i zapalają się reakcje syntezy wodoru w hel (por. rozdz. 5.11). Energia wytworzona w wyniku reakcji syntezy powstrzymuje obłok przed dalszym zapadaniem i protogwiazda przekształca się w gwiazdę ciągu głównego. Miejsce, które zajmie na diagramie H–R, zależy od jej początkowej masy. Najlżejsze gwiazdy uzyskują niską temperaturę powierzchni i kolor czerwony (czyli są to **czerwone karły**), najmasywniejsze (kilkanaście mas Słońca) – kolor niebieski (tzw. **niebieskie olbrzymy**). Tempo reakcji jądrowych we wnętrzach gwiazd zależy od temperatury. Czerwone karły „tłą” się powoli i paliwa jądrowego starczy im na setki miliardów lat. Dlatego też od początku istnienia Wszechświata żaden czerwony karzeł nie zdążył się jeszcze wypalić i nie opuścił ciągu głównego. Gdy



Rys. 42. Fragment mgławicy Orzeł, gdzie odkryto protogwiazdę (E42), z której narodzi się gwiazda o masie zbliżonej do Słońca.

ewolucja gwiazd

narodziny i cykl życia gwiazdy



wpływ masy
gwiazdy na
cykl jej życia

wodoru w takiej gwiazdzie wreszcie zabraknie, zacznie ona stygnąć i zapadać się, przechodząc ostatecznie w stadium **czarnego (zimnego) karła**. Im masywniejsza jest gwiazda, tym krótsze jej życie, bardziej gwałtowne i zawierające więcej epizodów, a śmierć – bardziej widowiskowa.

Końcowe etapy ewolucji gwiazd o średniej masie

Opisany powyżej żywot czerwonych karłów dotyczy gwiazd kilkakrotnie lżejszych od Słońca. Rozpoczynają one i kończą swoją ewolucję jako gwiazdy ciągu głównego, nie zmieniają się zasadniczo przez wiele miliardów lat. Konwekcja w ich wnętrzu powoduje stałą dostawę wodoru z warstw zewnętrznych do jądra gwiazdy – świeci ona tak długo, aż wypali się wodór zawarty w całej objętości gwiazdy.

O wiele ciekawsza jest ewolucja gwiazd o masach zbliżonych do słonecznej. Konwekcja zachodzi w nich w sposób ograniczony, przez co jądro ma inny skład chemiczny niż jego otoczka. Po pewnym czasie (w przypadku Słońca nastąpi to za około 5 miliardów lat) zapasy wodoru w jądrze wyczerpią się i ustanie produkcja energii w procesie syntezy. Brak ciśnienia promieniowania spowoduje zapadnięcie się

jądra. Jego temperatura znacznie wzrośnie i zostanie zainicjowana kolejna reakcja – synteza helu w węgiel. Pod wpływem nowego impulsu energii synteza wodoru w hel przeniesie się w bardziej zewnętrzne obszary gwiazdy. Objętość otoczki zwiększy się wielokrotnie. Ponieważ energia będzie teraz emitowana ze znacznie większej powierzchni, temperatura powierzchniowa gwiazdy spadnie – przybierze ona postać czerwonego olbrzyma. Słońce będzie wtedy tak wielkie, że pochłonie Merkurego, Wenus, a być może i Ziemię. Po dość krótkim, jak na życie gwiazdy okresie – kilku milionów lat – czerwony olbrzym odrzuca swoje zewnętrzne warstwy materii w postaci mgławicy planetarnej (rys. 43), a jego małe, ściśnięte jądro tworzy białego karła.

Rys. 43. Mgławica planetarna NGC 6302. Nazwa „planetarna” nie ma nic wspólnego z planetami – po prostu przez mały teleskop taka mgławica wygląda jak planeta.



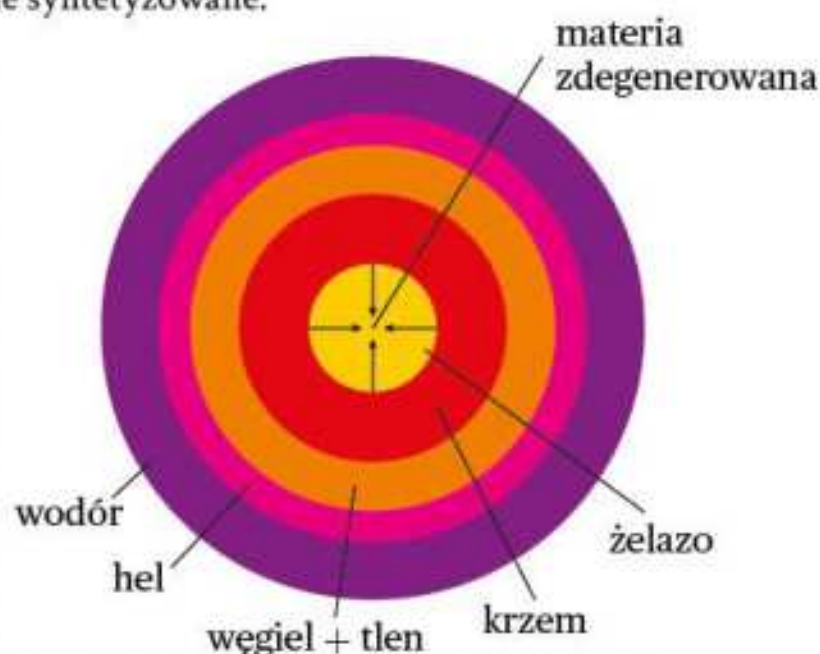
Biały karzeł jest tworem o masie zbliżonej do masy słonecznej i wielkości porównywalnej do wielkości Ziemi. Ma więc ogromną gęstość. Nie produkuje już energii, gdyż ustały w nim reakcje syntezy. Wyświeca swoją energię, stygnąc, co może trwać wiele miliardów lat. Ostatecznie przestaje być widoczny i zamienia się w czarnego karła.



Końcowe etapy ewolucji gwiazd masywnych

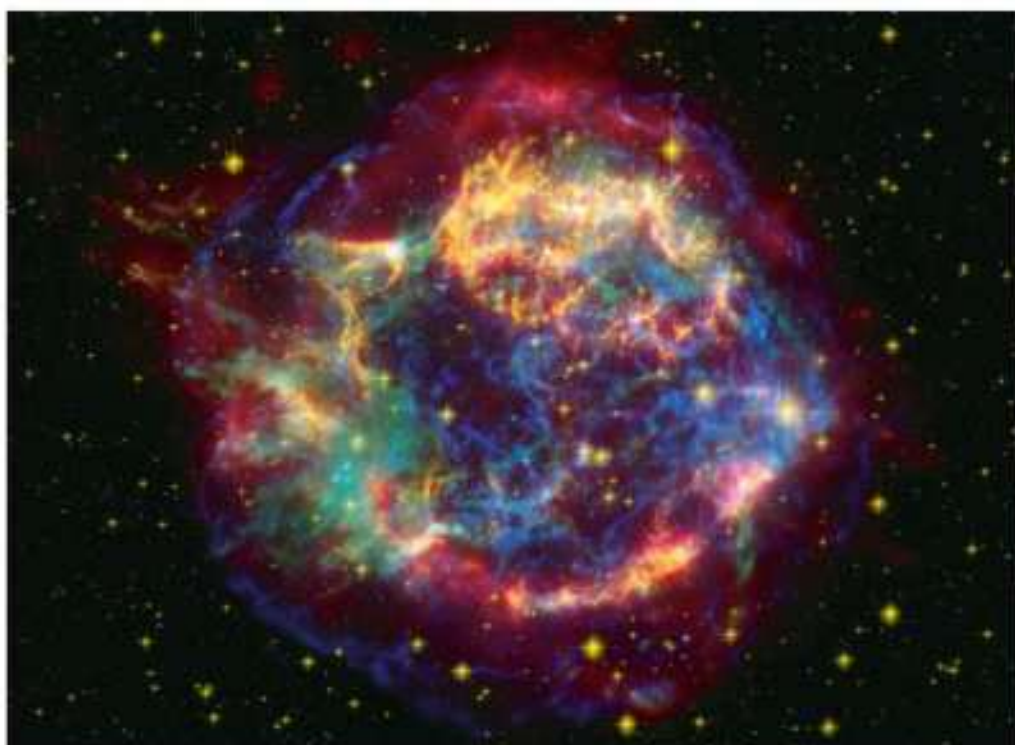
W gwiazdach o masach kilkakrotnie przekraczających masę Słońca (a więc znajdujących się na „niebieskim” końcu ciągu głównego, temperatura wnętrza osiąga wartości, przy których możliwa jest synteza pierwiastków cięższych niż węgiel i tlen. Gwiazda taka przyjmuje strukturę warstwową (rys. 44), przy czym im bliżej środka gwiazdy, tym cięższe pierwiastki są w danej warstwie syntetyzowane.

Gdy dojdzie do syntezy żelaza, ciąg reakcji egzoenergetycznych się kończy. Żadna reakcja z udziałem żelaza nie wydzieli już energii, gdyż żelazo ma spośród wszystkich pierwiastków największą energię wiązania. Zanika więc źródło energii wytwarzającej ciśnienie wewnętrzne, utrzymujące gwiazdę w stanie równowagi. Wnętrze gwiazdy zapada się do takiego stanu, że utworzone jądra atomowe ulegają zmiżdżeniu. Elektrony łączą się z protonami i tworzą neutrony oraz emitują antyneutrino. Jądro gwiazdy staje się gigantycznym jądrem atomowym złożonym prawie wyłącznie z neutronów – powstaje **gwiazda neutronowa**.



Rys. 44. Struktura masywnej gwiazdy w zaawansowanym stadium ewolucji.

Zewnętrzne warstwy gwiazdy spadają z wielką prędkością na to jądro i rozgrzewają się do niewyobrażalnych temperatur. W tych warunkach dochodzi do syntezy wszystkich możliwych pierwiastków – zachodzą również reakcje wymagające dostarczenia energii. Cały proces trwa bardzo krótko i ma charakter wybuchowy. Przez kilka dni gwiazda świeci z jasnością dorównującą całej galaktyce. Nazywamy ją **supernową**. Po wybuchu pozostaje gwiazda neutronowa (jeśli wiruje i omiata okoliczną przestrzeń swoim polem magnetycznym, nazywamy ją **pulsarem**) oraz szybko rozprzestrzeniający się obłok obfitujący w ciężkie pierwiastki (rys. 45). Obłok taki w ciągu kilkudziesięciu tysięcy lat rozprasa się w przestrzeni kosmicznej.



Rys. 45. Obłok materii powstały po wybuchu supernowej. Kolorem niebieskim przedstawiono tlen, zielonym wodór, a czerwonym siarkę.

Wszystkie występujące w przyrodzie pierwiastki cięższe od żelaza powstały podczas wybuchu supernowej – jest to jedyny znany nam naturalny proces syntezy takich pierwiastków. Dzięki nim mogą powstawać planety skaliste i wszystko, co się na



nich znajduje. Atomy wchodzące w skład naszych ciał pochodzą więc z katastroficznych zjawisk, które kilka miliardów lat temu zaszły gdzieś w Kosmosie.

Gwiazdy neutronowe są tak ściśnięte, że przy masie równej 1,4–2 mas Słońca formują kule o promieniu zaledwie 10–15 km. Są zbudowane z neutronów z domieszką protonów, elektronów i innych cząstek, a w zewnętrznej powłoce – z jąder atomowych, które nie uległy zmiażdżeniu. Neutrony w takiej gwiazdzie nie są połączone siłami jądrowymi (bo te mają za krótki zasięg), tylko siłami grawitacyjnymi. Gęstość takiej materii jest rzędu 10^{12} kg/cm^3 .



Rys. 46. Czarna dziura – wizja artysty.

Gdy masa pozostałości po supernowej jest jeszcze większa, również neutrony ulegają zmiażdżeniu. Gwiazda zapada się jeszcze bardziej, siła grawitacji wzrasta, aż w końcu nic nie może jej już opuścić, nawet światło – powstaje **czarna dziura**. Czasoprzestrzeń w czarnej dziurze zmienia swoje właściwości – zamyka się w sobie i otacza tak zwanym horyzontem zdarzeń. Przez horyzont materia może tylko wpadać do czarnej

dziury, natomiast nie istnieje dla niej żadna droga powrotna. Wszystkie potencjalne drogi ucieczki z czarnej dziury prowadzą z powrotem do jej środka. Podobnie żaden marynarz nie znajdzie drogi, która doprowadziłaby go do krańca świata. Czarna dziura pochłania materię z otoczenia niczym kosmiczny odkurzacz i się rozrasta.

Czarne dziury możemy obserwować na kilka sposobów. Pierwszy to rejestracja promieniowania emitowanego przez materię tuż przed wpadnięciem pod horyzont zdarzeń. Rozgrzewa się ona do wysokich temperatur, a często tworzy najpierw wirujący szybko wokół czarnej dziury dysk akrecyjny (ryc. 46). Drugi to tak zwane soczewkowanie grawitacyjne – obserwacja zakrzywienia biegu promieni świetlnych gwiazd, spowodowanego zakrzywieniem samej czasoprzestrzeni. Ostatnio nauczono się wykrywać fale grawitacyjne powstające w procesie zderzania się i łączenia czarnych dziur.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wymień informacje, jakie możemy odczytać na podstawie analizy światła docierającego od gwiazdy.
2. Podaj i scharakteryzuj poszczególne rodzaje gwiazd.
3. Wytlumacz, jak gwiazdy się rodzą i jak umierają.
4. Oszacuj, jaki promień miałaby hipotetyczna gwiazda neutronowa o masie równej masie Ziemi ($6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$). W rzeczywistości gwiazda neutronowa o tak znikomej masie nie mogłaby istnieć.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- Wszystkie informacje o gwiazdach pochodzą z analizy emitowanego przez nie promieniowania elektromagnetycznego, głównie światła. s. 254
- Gwiazdy ewoluują zbyt wolno, by móc śledzić zachodzące w nich zmiany. O przebiegu ich ewolucji wnioskujemy na podstawie obserwacji gwiazd będących w różnych stadiach rozwoju. s. 257
- Gwiazdy rodzą się poprzez zagęszczenie obłoków gwiazdowych i większą część życia spędzają jako tzw. gwiazdy ciągu głównego. s. 257
- W zależności od masy, gwiazdy umierają jako stygnące czerwone karły, białe karły, gwiazdy neutronowe lub czarne dziury. s. 257
- Im gwiazda jest masywniejsza, tym jej ewolucja przebiega szybciej i obfituje w więcej spektakularnych wydarzeń. s. 258

Analiza tekstu: Neutrino

Neutrino słoneczne. Problem oscylacji neutrin

Neutrino słoneczne są cząstkami, które powstają na Słońcu w trakcie reakcji jądrowych będących podstawowym źródłem energii słonecznej. Są to cząstki bardzo przenikliwe i potrzebują zaledwie dwóch sekund, aby przebyć drogę z centrum Słońca do jego powierzchni. Przechodzą więc przez materię słoneczną praktycznie bez żadnego oddziaływania. W ciągu kolejnych ośmiu minut neutrino docierają do powierzchni Ziemi. Dzięki temu pojawiła się możliwość testowania centralnej części modelu Słońca. Sposobem na to miało być porównywanie liczby neutrin słonecznych docierających na Ziemię z teoretycznie obliczoną ich ilością, jaka według modelu miałyby dotrzeć do powierzchni naszej planety.

Neutrino wydawały się być dobrym parametrem do oznaczania warunków fizycznych panujących w danym momencie we wnętrzu Słońca. Bowiem szybkość reakcji jądrowych, a więc i strumień neutrin, jest uzależniona od temperatury.

Na Słońcu wytwarzana jest niewyobrażalnie duża ilość neutrin. Przez powierzchnię Ziemi o polu 1 cm^2 przechodzi w ciągu jednej tylko sekundy aż 65 miliardów neutrin. Wydawałoby się więc, że detekcja takich cząstek nie powinna sprawiać większych problemów. Tymczasem okazało się, że duży problem stanowi przenikliwość neutrin. Detektory tych cząstek muszą być bardzo masywne, aby zwiększyć prawdopodobieństwo oddziaływania neutrin z cząstkami detektora. Buduje się je również głęboko pod powierzchnią Ziemi, żeby wyeliminować jakiegokolwiek zewnętrzne zakłócenia.

Zanim jednak przejdziemy do detekcji neutrin słonecznych, warto przyjrzeć się dokładniej tym cząstkom. Tak więc neutrino są to cząstki elementarne pozbawione



ładunku elektrycznego. Należą do rodziny leptonów, ich spin wynosi $\frac{1}{2}$. Neutrina mogą oddziaływać tylko za pomocą oddziaływań słabych i ewentualnie grawitacyjnych, jeśli mają masę. Można wyróżnić trzy rodzaje neutrin: neutrina elektronowe, neutrina mionowe i neutrina taonowe.

To, że neutrina muszą istnieć, wiadomo było już od roku 1930. Wtedy to Wolfgang Pauli próbował w ten sposób utrzymać zasadę zachowania energii w rozpadach beta. Podczas rozpadów beta emitowane cząstki mogą mieć różne energie, nie jak w przypadku emisji cząstek alfa lub kwantów gamma. Przed Paulim badacze nie potrafili wyjaśnić, dlaczego tak się dzieje, że widmo promieniowania beta jest ciągle. Pauli zasugerował, że podczas rozpadu jądra oprócz cząstek beta emitowane są jeszcze inne cząstki o bardzo małej lub zerowej masie, które zabierają część energii. Ponieważ nie mają ładunku elektrycznego i nie powodują na swojej drodze efektu jonizacji, wobec tego bardzo trudno stwierdzić ich istnienie. Sam uczony nie był do końca pewien, o jaką cząstkę może chodzić. Później stwierdzono, że podczas rozpadów beta minus generowane są antyneutrino elektronowe, natomiast podczas rozpadów beta plus powstają neutrino elektronowe.

Obecnie wiadomo, że neutrino są we Wszechświecie bardzo powszechne. Naturalnym źródłem tych cząstek jest Słońce. Sama zagadka źródła energii słonecznej została rozwiązana dopiero w latach dwudziestych ubiegłego wieku. W roku 1920 naukowcy słusznie spostrzegli, że masa atomu helu jest mniejsza od sumy mas czterech atomów wodoru. Wówczas Artur Eddington, jeden z bardziej znanych astrofizyków, doszedł do wniosku, że reakcje jądrowe prowadzące do zamiany wodoru w hel mogłyby być wydajnym źródłem energii na Słońcu. Różnica masy, a konkretnie jej ubytek, miałaby być zamieniana na energię zgodnie z założeniem Einsteina o równoważności masy i energii. Potem okazało się, że stwierdzenie było słuszne. Istota tych reakcji została wyjaśniona pod koniec lat trzydziestych ubiegłego wieku przez Hansa Bethe. Dodatkowo okazało się, że na każde utworzone jądro helu przypadają dwa neutrino.

W sposób sztuczny neutrino można wygenerować w trakcie reakcji rozszczepienia jądrowego.

Początkowo naukowcy dosyć sceptycznie podchodzili do istnienia neutrin słonecznych. Wreszcie rozwiązanie tego problemu podjął się Raymund Davis pod koniec lat pięćdziesiątych dwudziestego wieku.

[...]

Davis prowadził swoje badania w czasie od 1962 do 1994 roku. Przez ten czas zliczył tylko 2000 atomów argonu. Była to znacznie mniejsza liczba niż wynikało z obliczeń teoretycznych. Podobne rezultaty uzyskano w trakcie detekcji neutrin słonecznych podczas eksperymentów SAGE na Kaukazie czy też GALLEX. Pojawiło się więc pytanie, czy neutrino faktycznie powstają na Słońcu w takich ilościach, jak początkowo sądzono, czy może coś się z nimi dzieje po drodze ze Słońca na Ziemię. Wtedy też po raz pierwszy powstała sugestia, że neutrino być może dysponują niewielką masą spoczynkową. Początkowo sądzono bowiem, że cząstki te masy w ogóle nie posiadają.



Zaczęto więc przeprowadzać eksperymenty, które miały jednoznacznie rozwiązać ten problem. Zaczęto ponownie badać neutrina słoneczne. Powstało kilka detektorów na terenie całego świata. Jednym z nich był detektor zlokalizowany na obszarze laboratorium SNO w Kanadzie. Ośrodek czynny tego detektora zawierał ciężką wodę. Prace prowadzono również na terenie Japonii. Tamtejszy eksperyment nosił nazwę Super-Kamionkade. Pierwotnie celem jego było badanie rozpadu protonów. Jednak jak to często bywa, celu tego nie udało się osiągnąć i zaczęto badać neutrina słoneczne. Nazwa eksperymentu pochodzi od zastosowanego w eksperymencie detektora neutrin słonecznych. Ze względu na to, że neutrina są bardzo przenikliwe detektor musiał zostać umieszczony głęboko pod powierzchnią ziemi. Do tego celu wykorzystano kopalnię Kamioka.

W kopalni tej został umieszczony ogromny zbiornik o średnicy 17 metrów zawierający zwykłą wodę. Ilość znajdującej się tam wody przekracza 2100 ton. Na ścianach zbiornika umieszczono fotopowielacze. Ich zadaniem była detekcja błysków pojawiających się w trakcie reakcji neutrina z jądrem w cząsteczce wody. W trakcie reakcji dochodziło do uwolnienia elektronów, które były źródłem promieniowania Czerenkowa. Był to bezpośredni dowód na przejście neutrina przez ośrodek detektora. Różnica między tym detektorem neutrin a poprzednimi polegała na tym, że był on w stanie rejestrować, kiedy zjawisko zaszło i jaki był kierunek toru neutrina. Tak więc mógł ostatecznie udowodnić, że rejestrowane neutrino są neutrinami słonecznymi. Wyniki otrzymane w trakcie tego eksperymentu potwierdziły to, co wcześniej uzyskał Davis. Mianowicie ponownie okazało się, że liczba neutrin pochodzących ze Słońca jest mniejsza niż ich liczba przewidywana teoretycznie.



Rys. 47. Detektor neutrin Super-Kamiokande w początkowej fazie napełniania wodą. W głębi łódka z pracownikami obsługującymi detektor.

Dzięki temu detektorowi udało się także zarejestrować neutrino pochodzące z wybuchu supernowej. Miało to miejsce w lutym 1987 roku. Dokładna liczba zarejestrowanych neutrin wynosiła 12. Według obliczeń w trakcie wybuchu doszło do emisji 10^{58} neutrin, z czego 10^{16} przeszło przez detektor.

Niezgodność między przewidywaną liczbą neutrin słonecznych a ich ilością wykrywaną została nazwana „problemem neutrin słonecznych”. Proponowanych rozwiązań tej kwestii było wiele, (...) lecz wszystkie one okazały się nie do przyjęcia. I tutaj przychodzi kolej na tzw. zjawisko oscylacji neutrin.



Teoria dotycząca oscylacji neutrin opiera się na założeniu, że jeden typ neutrin może w sposób cykliczny przechodzić w drugi. Można bowiem wyróżnić trzy rodzaje neutrin: neutrino elektronowe, neutrino mionowe i neutrino taonowe. W detektorach ziemskich rejestrowane są tylko neutrino elektronowe. Zatem mechanizm oscylacji wyjaśniałby, dlaczego jest ich mniej niż można by się spodziewać. Przyjęcie zjawiska oscylacji neutrin nie jest sprawą prostą. Równałoby się to przyznaniu, że neutrino mają masę, a to z kolei wprowadziłoby zamieszanie w założeniach modelu standardowego. Gdyby się okazało, że neutrino faktycznie posiadają masę, wówczas biorąc pod uwagę ich liczbę powstającą chociażby na Słońcu, można by przyznać, że stanowią pokaźną część brakującej materii w Kosmosie. Nosi ona nazwę „ciemnej materii”.

Pierwsze doniesienia dotyczące zjawiska oscylacji nadeszły z ośrodka przy reaktorze Savannah River. Pracami eksperymentalnymi dowodził tam Reines od dawna interesujący się problemem neutrin.

Ważny z naukowego punktu widzenia był eksperyment przeprowadzony w Los Alamos w roku 1995. W doświadczeniu wykorzystano przyspieszone w akceleratorze protony, które następnie docierały do zbiornika wypełnionego wodą. Dochodziło wtedy do wytwarzania dużej ilości mezonów. Następnie mezony te ulegały rozpadowi na neutrino mionowe i antyneutrino mionowe.

Dzisiaj wiadomo, że możemy mieć do czynienia z trzema generacjami leptonów: elektronowe, mionowe i taonowe. Na każdą generację przypada lepton obdarzony ładunkiem elektrycznym i neutrino. Mogą więc to być pary: elektron – neutrino elektronowe, mion – neutrino mionowe i taon – neutrino taonowe. Leptony obdarzone ładunkiem elektrycznym posiadają masę spoczynkową różną od zera. Jeśli zaś chodzi o neutrino, sprawa nie jest na razie jasna. Pomiędzy generacjami leptonów występują różnice w wartości tzw. liczby leptonowej. Może ona być elektronowa, mionowa i taonowa. Jeśli więc leptony należą do danej generacji, wówczas ich odpowiednia liczba leptonowa ma wartość $+1$, zaś pozostałe mają wartość zero.

Każda generacja leptonów ma odpowiadającą im generację antyleptonów. Cząstki te charakteryzują się przeciwnym znakiem liczby leptonowej.

Na pierwszą generację leptonów składają się elektrony oraz neutrino elektronowe. Wartość ich liczby leptonowej elektronowej jest równa $+1$. Tej generacji leptonów odpowiada generacja antyleptonów, w skład której wchodzi antyelektrony, czyli pozytony oraz antyneutrino elektronowe. Wartość ich liczby leptonowej jest równa -1 . Jeśli dana cząstka nie należy do rodziny leptonów, wówczas nie posiada charakteryzującej jej liczby leptonowej.

Wśród cząstek elementarnych jedną z obowiązujących zasad jest zasada zachowania liczby leptonowej. Wartość liczby leptonowej nie może się zmieniać w trakcie reakcji pomiędzy cząstkami.

W trakcie eksperymentu w Los Alamos skupiono się na detekcji antyneutrin elektronowych. Zakładano, że gdyby faktycznie doszło do detekcji takich antyneutrin



w wiązce, która pochodzi z rozpadu pionów, wówczas można by tę sytuację wyjaśnić na dwa sposoby. Albo miałyby miejsce pogwałcenie zasady zachowania liczby leptonowej albo też potwierdzenie, że faktycznie antyneutrino mionowe mogą ulegać przekształceniu w antyneutrino elektronowe. Złamanie zasady zachowania liczby leptonowej w ogóle nie bierze się pod uwagę. W grę może wchodzić jedynie drugi wariant, ale znowu pod pewnym warunkiem. Mianowicie neutrino, a więc i antyneutrino musiałyby mieć niezerową masę spoczynkową.

Tak więc powstałe w wyniku rozpadów pionów cząstki kierowane były do detektora rejestrującego antyneutrino elektronowe. Czas wykonywania pomiarów wynosił 4 miesiące. W tym czasie detektor zarejestrował 80 zdarzeń spowodowanych przez antyneutrino elektronowe. Połowa antyneutrino była pochodzenia kosmicznego i stała się promieniowaniem tła. Ważne było pozostałe 40 neutrino. Stały się bowiem dowodem, że neutrino mionowe mogą oscylować i stawać się neutrino elektronowymi. Sugeruje to, że któraś z tych dwóch odmian neutrino posiada masę, równą kilku dziesiątym elektronowolta. Masa i energia jest bowiem równoważna, o czym mówi słynny wzór Einsteina $E = mc^2$.

Doświadczenia wskazujące na możliwość oscylacji neutrino przeprowadzono w ostatnich latach ponownie z użyciem detektora Super-Kamionkade. Przedmiotem badań były również neutrino przybywające na powierzchnię Ziemi z przestrzeni kosmicznej. Do detektora docierały neutrino zarówno bezpośrednio z atmosfery, jak i te, które przybyły do powierzchni Ziemi z drugiej strony kuli ziemskiej i aby dotrzeć do detektora, musiały ją przeniknąć. W eksperymencie tym okazało się, że liczba neutrino, które wniknęły do detektora bezpośrednio, była większa od tych, które powstały po drugiej stronie Ziemi. Można więc wnioskować, że w trakcie tej dodatkowej drogi coś się z nimi stało. Mogło mianowicie nastąpić przejście neutrino jednego typu w neutrino innego typu. Przemiany te mogą zachodzić wielokrotnie i dlatego noszą nazwę oscylacji.

Źródło: *Neutrino słoneczne. Problem oscylacji neutrino*, Serwis Bryk.pl, <https://bezpiecznylink.pl/n7340e>

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, co to są neutrino, jak powstają i jakie mają właściwości.
2. Przedstaw rolę neutrino w badaniu budowy Słońca.
3. Omów metody detekcji neutrino.
4. Wyjaśnij własnymi słowami, na czym polega problem neutrino słonecznych i jak próbowano go rozwiązać.
5. Określ, czym są leptony.
6. Wytłumacz, na czym polegają oscylacje neutrino.

**PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM**

- s. 198 1. Jądro atomowe zostało odkryte w 1911 roku przez Ernesta Rutherforda. Stało się to później podstawą do utworzenia przez Nielsa Bohra modelu atomu.
- s. 199 2. Jądro jest dziesiątki tysięcy razy mniejsze od samego atomu i skupia niemal całą jego masę.
- s. 200 3. Jądro składa się z protonów, których liczba decyduje o tym, jaki to jest pierwiastek, i z neutronów, których liczba może być różna. Atomy tego samego pierwiastka różniące się liczbą neutronów w jądrze nazywamy izotopami.
- s. 203 4. Jądra atomowe ważą mniej niż wynosi suma mas ich składników. Zjawisko to nazywamy deficytem masy i jest ono związane z energią wiązania.
- s. 204 5. Promieniowanie jądrowe powoduje zaczernienie kliszy fotograficznej, jest przenikliwe, a dodatkowo jonizuje ośrodek i powoduje fluorescencję niektórych minerałów.
- s. 206 6. Znamy trzy główne rodzaje promieniowania jądrowego o różnej naturze i właściwościach: α , β i γ .
- s. 207 7. Aktywność substancji promieniotwórczej to ilość rozpadów promieniotwórczych w ciągu sekundy. Jednostką aktywności jest bekerel, czyli 1 rozpad na sekundę.
- s. 207 8. Czasem połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ danego pierwiastka nazywamy czasem, po którym połowa jąder tego pierwiastka ulegnie rozpadowi. Jest to parametr charakteryzujący dany izotop.
- s. 208 9. Prawo rozpadu mówi, że aktywność substancji promieniotwórczej jest proporcjonalna do liczby jąder, które jeszcze nie uległy rozpadowi.
- s. 210 10. W wyniku rozpadu α powstaje nowy pierwiastek, którego jądro ma masę mniejszą o 4 i ładunek mniejszy o 2 od pierwiastka wyjściowego. Rozpad taki powoduje przesunięcie się pierwiastka o dwie pozycje w lewo w układzie okresowym.
- s. 211 11. Rozpad β nie zmienia liczby masowej izotopu, natomiast zwiększa ładunek jądra o 1. Rozpadający się pierwiastek zajmuje pozycję o jeden w prawo w układzie okresowym.
- s. 212 12. Emisja kwantu γ następuje podczas przechodzenia jądra ze stanu wzbudzonego w stan podstawowy i unosi nadmiar energii jądra.
- s. 213 13. Pierwiastek powstały w wyniku rozpadu promieniotwórczego może być również promieniotwórczy. W przyrodzie znamy cztery naturalne szeregi promieniotwórcze złożone z pierwiastków powstających jedno z drugich.
- s. 216 14. Reakcją jądrową nazywamy przemianę jąder atomowych spowodowaną ich wzajemnym oddziaływaniem lub ich oddziaływaniem z cząstkami elementarnymi. Wyróżniamy m.in. reakcje rozpraszania i reakcje przemiany jądrowej, w tym reakcje rozszczepienia.
- s. 217 15. We wszystkich reakcjach jądrowych obowiązuje zasada zachowania ładunku oraz zasada zachowania liczby masowej (nie masy!).
- s. 224 16. Mnożąc różnicę mas produktów i substratów reakcji jądrowej przez kwadrat prędkości światła, obliczamy energię wyzwoloną lub pochłoniętą w wyniku tej reakcji.
- s. 223 17. Naturalnymi sposobami uzyskiwania energii jądrowej są reakcje syntezy jąder lekkich w nieco cięższe oraz rozszczepienia jąder ciężkich na lżejsze.



18. Promieniowanie jonizujące, przenikając przez materię, wyrzuca elektrony z atomów i cząsteczek. Czynnikiem jonizującym są: jonizacja bezpośrednia, zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne, zjawisko Comptona i kreacja pary elektron-antyelektron. s. 226
19. Neutrony przenikające przez materię mogą dodatkowo wywoływać reakcje jądrowe, których skutkiem może być powstawanie izotopów promieniotwórczych. s. 228
20. Promieniowanie jonizujące o wielkiej energii ma zdolność niszczenia struktur materii i rozrywania wiązań cząsteczkowych. Jest to szczególnie groźne w odniesieniu do żywych tkanek. s. 228
21. Pomiar ilości promieniowania zajmuje się dozymetria. Podstawowymi wielkościami fizycznymi stosowanymi w dozymetrii są: dawka pochłonięta, równoważnik dawki i dawka skuteczna. Dawkę pochłoniętą mierzymy w grejach, a równoważnik dawki i dawkę skuteczną – w siwertach. s. 228
22. Ludzie mający kontakt z promieniowaniem ze względu na wykonywaną pracę są objęci ochroną radiologiczną. Pochłanianie przez nich dawki są mierzone za pomocą osobistych dozymetrów. W Polsce obowiązują surowe normy dotyczące dopuszczalnych dawek promieniowania. s. 229
23. Znikome dawki promieniowania są na ogół korzystne dla żywego organizmu. Pochłonięcie nadmiernej dawki promieniowania jonizującego prowadzi do choroby popromiennej, która może zakończyć się śmiercią lub skutkami przewlekłymi. s. 229
24. Natężenie promieniowania przenikającego przez przeszkodę maleje wykładniczo wraz z grubością tej przeszkody. Zjawisko to zostało wykorzystane w praktyce w urządzeniach, jak waga izotopowa i izotopowy czujnik poziomu, oraz w defektoskopii i badaniu gęstości materiałów. s. 232
25. Znaczniki izotopowe umożliwiają m.in. wykrywanie nieszczelności rurociągu i badanie obiegu pierwiastków i zanieczyszczeń w przyrodzie. s. 233
26. Substancji radioaktywnych używa się jako źródła energii w trudno dostępnych urządzeniach. s. 234
27. Promieniotwórczość jest wykorzystywana do sterylizacji narzędzi oraz konserwacji żywności. s. 234
28. Stosowaniem narzędzi fizyki jądrowej w medycynie zajmuje się medycyna nuklearna. Jej techniki stosowane są zarówno w diagnostyce, jak i w terapii. s. 236
29. Podstawową techniką diagnostyczną medycyny nuklearnej jest stosowanie znaczników izotopowych i skanowanie ciała pacjenta za pomocą gammakamery. s. 236
30. Podstawowe metody leczenia pacjentów za pomocą promieniowania to brachyterapia, teleradioterapia, radioterapia systemowa oraz radioterapia paliatywna. s. 237
31. Rozszczepienie jądra polega na rozpadzie tego jądra na dwa fragmenty po pochłonięciu neutronu. Rozszczepieniu podlegają tylko niektóre izotopy najcięższych pierwiastków. Towarzyszy mu emisja kolejnych neutronów. s. 239
32. Jeśli neutrony wyemitowane podczas rozszczepienia jednego jądra powodują rozszczepienie następnych jąder, mamy do czynienia z reakcją łańcuchową. Warunkiem podtrzymania reakcji łańcuchowej jest odpowiednia masa substancji rozszczepialnej, która musi być większa od tzw. masy krytycznej. s. 240
33. Niekontrolowana reakcja łańcuchowa została zastosowana w konstrukcji bomby atomowej. s. 242
34. Kontrolowane reakcje rozszczepienia wykorzystuje się do produkcji energii cieplnej w reaktorach jądrowych. Energia ta może być potem przekształcona w turbinach w energię elektryczną. s. 244



- s. 244 35. Zasadniczymi elementami reaktora jądrowego są pręty paliwowe, pręty regulacyjne oraz moderator.
- s. 246 36. Stabilną pracę reaktora zapewnia stan krytyczny, w którym w trakcie trwania reakcji łańcuchowej utrzymuje się mniej więcej stała liczba neutronów. Jeśli liczba neutronów maleje (stan podkrytyczny), to reakcja wygasa, a jeśli rośnie (stan nadkrytyczny), to reakcja przyspiesza.
- s. 246 37. Budowa i zasada działania elektrowni jądrowej są podobne do budowy i zasady działania elektrowni węglowej. Główną różnicę stanowi źródło ciepła – zamiast kotła występuje reaktor.
- s. 246 38. Elektrownie jądrowe mają wiele zalet, ale z drugiej strony są bardzo drogie w budowie i stwarzają potencjalne ryzyko katastrofy. Dlatego też ich budowa często wzbudza opór społeczny.
- s. 249 39. Reakcje syntezy wytwarzają więcej energii niż reakcje rozszczepienia, ale do ich przeprowadzania konieczna jest bardzo wysoka temperatura i wysokie ciśnienie.
- s. 249 40. Reakcje syntezy zachodzące w jądrach gwiazd powodują ich świecenie. W gwiazdach podobnych do Słońca główne źródło energii to reakcja protonowa, której wynikiem jest przekształcenie czterech jąder wodoru w jedno jądro helu.
- s. 252 41. W warunkach ziemskich reakcje syntezy potrafimy przeprowadzać w sposób wybuchowy w bombach wodorowych.
- s. 254 42. Ewolucją gwiazd zajmuje się astrofizyka, która informacje o gwiazdach czerpie z analizy emitowanego przez nie promieniowania elektromagnetycznego, głównie światła.
- s. 254 43. Gwiazdy ewoluują zbyt wolno, by móc śledzić zachodzące w nich zmiany. O przebiegu ewolucji wnioskujemy na podstawie obserwacji gwiazd będących w różnych stadiach rozwoju.
- s. 257 44. Gwiazdy rodzą się poprzez zagęszczenie obłoków gwiazdowych i większą część życia spędzają jako tzw. gwiazdy ciągu głównego.
- s. 257 45. Mało masywne gwiazdy umierają jako stygnące czerwone karły.
- s. 257 46. Średnio masywne gwiazdy przechodzą przez stadium czerwonego olbrzyma i kończą żywot jako białe karły.
- s. 257 47. Gwiazdy masywne wielokrotnie przechodzą przez stadium czerwonego olbrzyma lub nadolbrzyma, czasami wybuchają jako supernowe i kończą ewolucję jako gwiazdy neutronowe lub czarne dziury.
- s. 258 48. Im masywniejsza jest gwiazda, tym szybciej przebiega jej ewolucja i obfituje w więcej spektakularnych wydarzeń.

Odpowiedzi do zadań

- 1.1.1. 500 s
 1.1.2. 64 mA
 1.2.1. 120 MV
 1.2.2. 435 C
 1.3.1. 348 mA
 1.3.2. 0,826 h = 49,6 min
 1.3.3. przy założeniu, że miesiąc ma 30 dni: 23,76 zł
 1.3.4. 19,4 GW
 1.3.5. 54 dni
 1.4.1. 242 V
 1.4.2. a) 23 Ω ; b) 23 Ω – 24 Ω ; c) 661 Ω
 1.4.3. 4 razy
 1.4.4. 2 kJ; 156 V
 1.5.1. 24 Ω
 1.5.2. 4,8 Ω
 1.5.3. o 58%
 1.7.1. wpływa 0,2 A
 1.7.2. $I_1 = 0,6$ A; $I_2 = 0,5$ A
 1.8.3. 3; 6
 1.10.4. 21,5
 2.6.1. 0,02 s; 0,0167 s
 2.6.2. 3680 W
 2.7.2. 48
 3.1.1. 0,773 m
 3.1.2. 6250 Hz
 3.3.1. 0
 3.3.3. 708 Hz
 3.4.1. 470 Hz
 3.4.2. $17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, zbliża; $17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, oddala
 3.4.3. a) 918 Hz; b) 682 Hz; c) 800 Hz
 3.5.2. 32°
 3.5.3. 24,4°
 3.6.2. 45°
 3.6.3. tak, 25%
 4.2.2. 994,5 nm; $3,02 \cdot 10^{14}$ Hz
 4.3.4. 820 nm; 1875 nm
 4.4.1. $n = 4$
 4.4.2. 0,544 eV
 4.4.3. $3,08 \cdot 10^{15}$ Hz
 4.5.5. $10,06 \cdot 10^{-19}$ J = 6,29 eV
 4.5.6. $1,41 \cdot 10^{15}$ Hz; $2300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 5.1.4. przy założeniu braku deficytu masy: 20,18
 5.2.2. o 75%
 5.2.3. 55 h
 5.3.1. polon 213
 5.4.2. ksenon 136
 5.4.3. 2
 5.5.1. 0,7 g
 5.5.2. 23 700 ton
 5.5.3. a) $6,73 \cdot 10^{10}$ J; b) $2,03 \cdot 10^{11}$ J;
 c) $5,37 \cdot 10^{10}$ J; d) $2,62 \cdot 10^{11}$ J;
 e) $2,02 \cdot 10^{11}$ J; f) $7,53 \cdot 10^{10}$ J;
 g) $-3,64 \cdot 10^9$ J
 5.6.4. $3 \cdot 10^{-8}$ J
 5.11.3. $3,825 \cdot 10^{26}$ W
 5.12.4. 113 m

Indeks

A

akcelerator 216, 218
akceptor 30, 49
aktywność substancji promienio-
twórczej 207, 208, 209
akumulator 46, 49
– kwasowo-ołowiowy 46
alternator 97
amper 12, 14
Ampère, André Marie 80
amperomierz 13, 34
amplituda 114, 118, 124
– napięcia 98
analizator 141
analiza widmowa 177, 179
antyelektron 212
antymateria 227
aparatura
– Rutherforda 198
– Thomsona 202
astrofizyka 254
atom 185
– wodoru 183

B

Balmer, Johann 178
bateria 34, 47, 49
baza 58
Becquerel, Henri Antoine 204
bekerel 207
bezpiecznik 34, 37, 39
– automatyczny 38
– nadmiarowoprądowy 38
– różnicowoprądowy 38
– topikowy 38
biały karzeł 256, 258
bieguny magnetyczne 68
– jednoimienne 68
– różnoimienne 68
bilans energetyczny 224
Bohr, Niels Hendrik David 181
bomba
– atomowa 242, 243
– wodorowa 252, 253
brachyterapia 237, 239
bramka 58
brązowy karzeł 257
broń masowego rażenia 242

C

całkowite wewnętrzne odbicie
136, 139
cechy siły elektrodynamicznej 79
cewka 34
– zapłonowa 105
charakterystyka prądowo-napię-
ciowa 51
choroba
– nowotworowa 228
– popromienna 229
– faza ostra 229
– faza przewlekła 230

ciało doskonale czarne 167
ciąg główny 256
Compton, Arthur 172
curie 207
cyklotron 218
cykl pracy akumulatora 46
czarna dziura 260
czarny karzeł 258
czerwony karzeł 256, 257
czerwony olbrzym 256
częstotliwość 98, 99, 114, 118
czoło fali 115, 118
czujnik
– dymu 233
– poziomu 233

D

datowanie metodą węgla 234
dawka
– pochłonięta 228, 231
– skuteczna 229
defektoskopia 233
deficyt masy 203, 226
Demokryt 180
detektor
– neutron 263
– śladowy 217
diagram H-R 256
dielektryk 28
dioda 34, 49
– elektroluminescencyjna 57
– półprzewodnikowa 57
– prostownicza 54
– świecąca 52
długość 114, 118
domieszkowanie 29
donor 30, 49
doświadczenie Rutherforda 198
dozymetria 228, 231
dozymetr osobisty 229
dren 58
dryf elektronów 11
dualizm korpuskularno-falowy
173, 174
dyfrakcja 120, 121
dynamo 97
dyspersja 149, 152
dziura 28
dżul 172

E

Einstein, Albert 189
ekran ciekłokrystaliczny 146
elektroda 44, 46
elektrolit 46
elektroluminescencja 52
elektronowolt 171
elektrony
– swobodne 27
– walencyjne 27, 30
elektrownia jądrowa 246, 248
emiter 58
energetyka jądrowa 246
energia
– jonizacji 182
– pochłonięta 228

– promienista 171
– wiązania 203, 221

F

fala 113, 118
– cylindryczna 116
– elektromagnetyczna 116, 147
– kolistą 116
– kulistą 116
– liniową 116
– materii 117
– mechaniczną 115
– niespolaryzowaną 140
– płaską 116
– podłużną 116
– poprzeczną 116, 143
– powierzchniową 116
– przestrzenną 116
– spolaryzowaną 140
– stojącą 125, 126
Faraday, Michael 90
fatamorgana 157, 159
faza 114
Fermi, Enrico 244
ferromagnetyk 70
filtr polaryzacyjny 144
fluid ciągły 171
fonon 62
fotoefekt 186
fotoelektron 187
fotoemisja 186
fotografika 146, 193
fotokomórka 192
foton 172
fotorezystor 192
fotosynteza 193
Franklin, Benjamin 12
fuzja 249

G

gammakamera 236, 239
Geiger, Hans 198
gloria 160
głośnik 34
granica zjawiska fotoelektrycznego
190
grej 228
gwiazda neutronowa 259

H

halo 160
harmoniczna 126
Huygens, Christiaan 119

I

indukcja elektromagnetyczna 92,
95, 96
induktor Ruhmkorffa 104
instalacja elektryczna 36, 39
interferencja 122, 127, 158
iryzacja 158
izolator 28, 33
izotop 201, 203

J

jasność
– absolutna 255
– widoma 255

jądro atomowe 203
jednostka masy atomowej 200
jon 182
jonizacja 226
– bezpośrednia 226
jubilerstwo 139

K

kąt graniczny 136, 139
kierunek
– drgań 116
– przepływu prądu 12, 14
kilowatogodzina 19, 21
Kirchhoff, Gustav Robert 41
kiur 207
klucz tranzystorowy 61
kolektor 58
kompas 68
komutator 96
kondensator 34
kreacja par elektron-pozyton 227
kryształ
– ciekły 145
– dwójtłomny 144
krzywa emisji 168, 169
kulomb 12, 14
kwant energii 172, 174

L

licznik
– Geigera–Müllera 233
– kilowatogodzin energii elektrycznej 20
linie pola magnetycznego 72, 77
lornetka 138
luminescencja 52
lutownica 104

Ł

ładowarka 103
łuk okołohoryzontalny 161

M

magnes 68, 72
maksimum interferencyjne 124
Marsden, Ernest 198
masa
– atomowa 201
– krytyczna 241, 243
materia 227
medycyna 138
medycyna nuklearna 236, 239
meteorologiczny radar dopplerowski 131
miernik elektryczny 82
minimum
– interferencyjne 124
miraż 157, 159
moc urządzenia elektrycznego 18, 21
model Bohra 181
moderator 244
mostek Graetza 55

N

nadobłbrzym 256
nadprzewodnictwo 62

napiecie 99
– chwilowe 98
– elektryczne 16
– skuteczne 99
natężenie
– prądu elektrycznego 12
– promieniowania 232, 235
– skuteczne 99
neutrino
– elektronowe 212, 262
– mionowe 262
– słoneczne 261
– taonowe 262
neutron 200
niebieski olbrzym 257
niebo 156
nośniki prądu elektrycznego 33
– w cieczech 11
– w gazach 11
– w przewodnikach 10
nóż gamma 238
nukleon 201, 203

O

obłok gazu 257
obraz 3D 146
obwód elektryczny 33, 39
oczko obwodu 35
ogniwo 34
– alkaliczne 45
– galwaniczne 44, 48
– Georges'a Leclanchego 44
– litowe 45
– łączenie równoległe 48
– łączenie szeregowo 48
– pierwotne 45
– słoneczne 192
– wtórne 46
Ohm, Georg Simon 24
okres 98, 114, 118
– połowicznego rozpadu 207, 209
okulary 146
om 22, 26
opornik 22, 34
opór
– elektryczny 22, 26
– właściwy 30
optoelektronika 138
optyka
– falowa 133
– geometryczna 133
Ørsted, Hans Christian 69

P

pasy radiacyjne 107
pierwiastek znaczony 236
Planck, Max Karl Ernst 171
polaroid 144
polarymetr 147
polaryzacja
– fali 142, 147
– w kierunku przewodzenia 51
– w kierunku zaporowym 50

polaryzator 141, 147
pole
– jednorodne 75
– magnetyczne 69, 72, 85, 89
– ziemskie 70
połączenie
– przewodów (węzeł) 34
– równoległe 35
– szeregowo 35
postulaty Bohra 182
potencjometr 34
powierzchnia falowa 115, 118
pozyton 212
półprzewodnik 28, 33
– samoistny 29
– typu n 30
– typu p 30
praca prądu elektrycznego 18, 21
prawo
– Grotthusa–Drapera 193
– Kirchhoffa 40, 43
– odbicia 133
– Ohma 24, 26
– rozpadu 209
– Snelliusa 135
– Starka–Einsteina 193
– załamania 135
prąd
– elektryczny 10, 11, 14
– elementarny 69
– indukcyjny 93, 94, 95, 96, 99
– przemieniczny 54
– pulsacyjny 98
– stały 98
– zmienny 98
prądnicą 96, 99
– rowerowa 97
prąd przemieniczny 99
prędkość
– fali 114, 118
– fazowa 114
pręty
– paliwowe 244
– regulacyjne 244
procedura datowania metodą węgla 235
promieniotwórczość 204, 235
– wzbudzona 228
promieniowanie
– alfa 206
– beta 206
– elektromagnetyczne 254
– gamma 206, 212
– jądrowe 209
– jonizujące 226, 231
– neutronowe 227
promiennik zupełny 167
promień 115, 118
– Bohra 182
prostownik 54
– dwupołkowy 55
– jednapółkowy 55
protogwiazda 257
proton 200
pryzmat 136
przebiecie izolatora 28

przełącznik (klucz tranzystorowy) 61
 przemiana jądrowa 218
 przepływomierz ultradźwiękowy 131
 przesyłanie energii elektrycznej 102
 przewodnik 26, 33
 przewód elektryczny 34
 pulsar 259

R

radar policyjny 130
 radioaktywność 206
 radioteleskop 255
 radioterapia 237
 – paliatywna 239
 – systemowa 238, 239
 reakcja
 – egzoenergetyczna 223
 – endoenergetyczna 223
 – jądrowa 216, 220, 223
 – łańcuchowa 240, 243
 – niekontrolowana 242
 – rozszczepienia 219, 239, 248
 – syntezy 226, 249, 253
 – termojądrowa 250
 – wymuszona 239
 reaktor
 – badawczy 245
 – jądrowy 218, 244
 reguła
 – lewej dłoni 79
 – prawej dłoni 77
 rekombinacja 50
 – promienista 52
 rozpad
 – alfa 210
 – beta 211
 rozpraszanie
 – elastyczne 218
 – nieelastyczne 218
 – światła 156
 rozszczepienie 149
 – jądra 243
 – światła 152
 równoważnik dawki pochłoniętej 229
 rurka katodowa 84
 Rutherford, Ernest 180, 200
 Rydberg, Johann 178

S

Schrödinger, Erwin 185
 scyntygrafia 236
 scyntygram 236
 siatka dyfrakcyjna 149
 sieć elektryczna 35, 36
 silnik elektryczny 34
 siła elektrodynamiczna 79, 83
 siwert 229
 Skłodowska-Curie, Maria 205
 Slotin, Louis 230
 słup słoneczny 161
 spawarka 104

spektrograf 151, 152
 – masowy 202
 spektrometr
 – masowy 89
 spektroskop 150, 152, 175
 spójność fal 122
 stała Plancka 171
 stan
 – aktywny 60
 – inwersyjny 60
 – krytyczny 244, 248
 – nadkrytyczny 244, 248
 – nasycenia 60
 – podkrytyczny 244, 248
 – zatkania 60
 sterylizacja 234
 stojan 96
 strumień fotonów 172
 substancje radioaktywne 235
 supernowa 259
 symbole elementów obwodu elektrycznego 34
 szczotki 96
 szereg promieniotwórczy 213

Ś

światła
 – odbłaskowe 138
 światło 147
 – białe 150
 światłowód 137, 140

T

telekomunikacja 138
 teleradioterapia 237, 239
 temperatura krytyczna 62
 temperaturowy współczynnik oporu 31
 teoria Plancka 190
 termistor 32, 33, 34
 tęcza 150, 153, 159
 – wtórna 154
 Thomson, Joseph 180
 tokamak 252
 transformator 34, 100, 106
 tranzystor 34, 57, 61
 – bipolarny 58, 61
 – n-p-n 58
 – p-n-p 58
 – polowy 61
 – unipolarny 58, 61
 turbogenerator 97

U

ugięcie 120
 ultrasonograf dopplerowski 131
 uziemienie 34
 uzwojenie
 – pierwotne 100
 – wtórne 100

V

Volta, Alessandro 44

W

waga izotopowa 232
 warstwa zaporowa 50

warunek
 – wygaszenia 124
 – wzmocnienia 124
 wat 19
 węzeł obwodu 35
 wiatr słoneczny 86
 widmo 150
 – absorpcyjne 179, 183
 – Brockenu 160
 – ciągle 150, 166
 – emisyjne 175, 179, 183
 – Fraunhofera 176
 – promieniowania 166, 169
 – słoneczne 176
 – światła białego 166
 – wodoru 178
 wieniec 162
 wirnik 96
 wolt 16, 17
 woltomierz 16, 34
 współczynnik
 – wzmocnienia prądowego tranzystora 60
 wychwyt elektronu 212
 wygaszenie interferencyjne 127
 wyłącznik 34
 wzmacniacz 60
 wzmocnienie interferencyjne 127
 wzór
 – Einsteina-Millikana 190
 – Malusa 142

Z

zaburzenie ośrodka 113
 zasada
 – Huygensa 121
 – superpozycji 123, 127
 zasilacz 103
 – izotopowy 234
 zdolność
 – absorpcyjna 167
 – emisyjna 168
 zimny karzeł 258
 zjawisko
 – Comptona 227
 – Dopplera 128, 130, 132
 – fotochemiczne 192
 – fotoelektryczne 189, 193
 – wewnętrzne 192
 – zewnętrzne 186, 226
 – tranzystorowe 60
 złącze
 – p-n 49
 znacznik
 – izotopowy 233, 235
 – pierwiastka 236
 zorza polarna 87
 zwojnica 34
 ź
 źródło 58
 – napięcia 15, 34
 – prądu przemiennego 34
 ż
 żagiel słoneczny 194