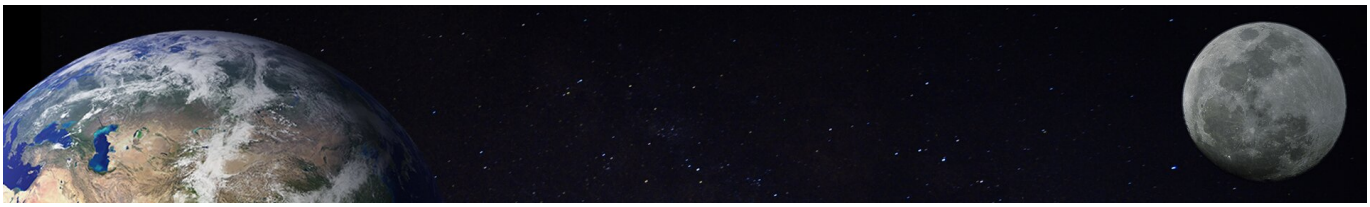


Świat pod lupą

Otaczającego nas świata nie można zrozumieć bez poznania podstaw fizyki. Fizyka jest wszechobecna. W e-podręczniku do fizyki znajdziesz odpowiedź na pytanie dlaczego planety naszego układu krążą wokół Słońca, i jak właściwie zbudowana jest materia. Dowiesz się, jak działa elektrownia jądrowa i dlaczego, gdy podskoczymy, nie odlatujemy w przestrzeń kosmiczną.

Ciekawe filmy, ilustracje i animacje uzmysłowią ci, dlaczego jedne przedmioty pływają na powierzchni wody, a inne toną. Zobaczysz także, że pojęcia takie jak „szybko" i „powoli" są względne.

Proponujemy wiele ciekawych obserwacji i doświadczeń, które wzbogaciliśmy filmami i ilustracjami ułatwiającymi samodzielne ich przeprowadzenie. Wykonując je, nauczysz się formułowania problemów badawczych, stawiania hipotez oraz ich weryfikacji. Interaktywne zadania pomogą zaś w zdobywaniu wiedzy i umiejętności w sposób atrakcyjny, a zarazem efektywny.

- Wstęp
- Grawitacja i elementy astronomii
    - Obserwujemy niebo wieczorne
    - Księżyc – naturalny satelita
    - Ruch planet na sferze niebieskiej
    - Jak daleko jest do planet, Słońca i gwiazd?
    - Ruch jednostajny po okręgu
    - Dlaczego ciała poruszają się po okręgu?
    - Prawo powszechnego ciążenia
    - Prędkości kosmiczne
    - Loty w kosmos
    - Układ Słoneczny i budowa Galaktyki
    - Podsumowanie wiadomości z działu I
- Fizyka atomowa
    - Promieniowanie termiczne ciał stałych
    - Zjawisko emisji i absorpcji energii przez atomy gazu
    - Foton – najmniejsza porcja energii fali elektromagnetycznej
    - Zewnętrzny efekt fotoelektryczny i jego zastosowanie

        - Budowa atomu wodoru. Stan podstawowy i stany wzbudzone
        - Podsumowanie wiadomości z fizyki atomu
- Fizyka jądrowa
        - Promieniowanie jądrowe α, β i γ
        - Jądro atomowe i jego składniki
        - Przemiany jądrowe
        - Dlaczego jądro jest trwałe – deficyt masy i energia wiązania
        - Promieniowanie jonizujące i jego wpływ na organizmy żywe
        - Reakcje jądrowe
        - Zastosowanie promieniowania jądrowego i energii jądrowej
        - Reakcja łańcuchowa
        - Działanie elektrowni jądrowej
        - Reakcje termojądrowe
        - Podsumowanie wiadomości z fizyki jądrowej
- Ewolucja Wszechświata
- Zakończenie

Bibliografia:

-

Wstęp

Nauki ścisłe z fizyką na czele znowu zaczynają być modne! Czołowi fizycy i astrofizycy cieszą się sławą porównywalną z tą, jaka jest udziałem gwiazd popkultury, a legendarni uczeni, tacy jak Albert Einstein stają się ikonami, które można dostrzec na koszulkach, plakatach zdobiących nasze pokoje, w artystycznym graffiti, a nawet na tatuażach

I znowu ta fizyka! Takie westchnienie pewnie towarzyszy niektórym z was, kiedy zaczynacie czytać lub nawet tylko przeglądać ten podręcznik. A przecież to dzięki fizyce istnieją komputery, monitory, tablety. To dzięki fizyce potrafimy nadawać i odbierać sygnały czy budować sieci komputerowe. Ci z was, którzy korzystali z naszego podręcznika już w gimnazjum, mogli przeczytać, jak badanie właściwości ciał stałych doprowadziło do odkrycia półprzewodników, co z kolei umożliwiło budowę procesorów wykonujących miliardy operacji na sekundę, skonstruowanie pamięci o rozmiarach paznokcia i produkcję małych czytników e-booków, zawierających teść książek, które jeszcze nie tak dawno zajmowały wiele regałów.

Aby to wszystko poznać i zrozumieć, trzeba lat nauki, a także studiów na uczelni. Ale my, autorzy niniejszego podręcznika, zabierzemy was na krótką wycieczkę. Krótką, bo trwającą tylko trzydzieści kilka lekcji. Podczas tej podróży opowiemy, co działo się w ciągu tysięcy lat. Przeczytacie o tym, jak myśliwi w epoce kamienia łupanego spoglądali w rozgwieżdżone niebo, jak kapłani i uczeni egipscy, sumeryjscy i greccy zapisywali ciekawe zjawiska, a także jak postały pierwsze teorie budowy świata, które próbowały wyjaśnić to, co widać. Wycieczka będzie krótka, bo najważniejsze jest dla nas to, abyście sami jak najwięcej zobaczyli i zrozumieli.

Nasza podróż zacznie się od przyjrzenia się niebu. Ale nie tylko przez chwilę. Mamy nadzieję, że przeprowadzicie samodzielnie wiele obserwacji. Bo zjawiska astronomiczne trwają i powtarzają się w czasie wielu godzin, dni, lat, a nawet wieków. Poświęcimy także trochę uwagi historii całego Wszechświata, trwającej prawie 14 miliardów lat. Zobaczymy, jaką drogę przeszła ludzkość od momentu, kiedy zaczeła obserwować zmiany na niebie, do chwili, kiedy zaczęła sobie zadawać pytanie: „dlaczego?". Dlaczego planety krążą wokół Słońca (jak wiecie, to nie było od razu takie oczywiste)? Odpowiedzią stało się prawo powszechnej grawitacji, sformułowane przez Izaaka Newtona. Ale wcześniej ważnych odkryć dokonali Arystarch z Samos, Klaudiusz Ptolemeusz, Mikołaj Kopernik, Jan Kepler, Galileusz – wymieniamy tu tylko niektórych uczonych. Prawo grawitacji i matematyka rozwijana na potrzeby fizyki oraz astronomii pozwoliły na dokładny opis ruchu planet i innych ciał poruszających się w Układzie Słonecznym. Potem ludzkość zaczęła się zastanawiać, jak daleko są gwiazdy i czym właściwie one są. Dlaczego świecą? Kiedy powstały? Czy będą wieczne? Z czego są zbudowane?

Wielcy filozofowie twierdzili, że nigdy nie będziemy wiedzieli, z czego zbudowane są gwiazdy. Nie minęło jednak wiele czasu, a fizyka to wyjaśniła. Jeszcze na początku XX wieku zupełnie nie zdawano sobie sprawy, jak długo „żyją" gwiazdy. Gwiazdy są tak daleko, że możemy je badać tylko przez analizę światła, jakie dochodzi do nas po przebyciu gigantycznych odległości, co trwa przez tysiące, a czasem miliony lub miliardy lat. Analiza tego światła wiązała się z pytaniami: Jak i dlaczego atomy emitują światło? Jak są zbudowane? Powstawały teorie, które były weryfikowane przez doświadczenia. Ich wyniki przyczyniły sie do powstania nowych opisów budowy materii, dzięki którym zrozumiano, dlaczego i kiedy świecą atomy. Odkrycie jądra atomowego oraz dodatnich ładunków znajdujących się w jego wnętrzu sprawiły, że zaczęto się zastanawiać, dlaczego jądro jest trwałe. Odpowiedź na to pytanie oraz odkrycie zjawiska naturalnej i sztucznej promieniotwórczości stworzyły cały dział fizyki – fizykę jądrową. Zjawiska te zostały wykorzystane w diagnostyce, medycynie, wytwarzaniu energii a także, niestety, w produkcji broni jądrowej. Fizyka jądrowa pozwoliła zrozumieć, jak i dlaczego świecą gwiazdy – te same, które świeciły znacznie wcześniej niż w epoce kamienia łupanego. Światło badanych obiektów kosmicznych niekiedy wyszło z nich wcześniej, niż powstały Słońce i Ziemia.

Obserwujemy niebo wieczorne

Jak odróżnić gwiazdę od planety? Dlaczego Księżyc porusza się ze wschodu na zachód i czy tak jest naprawdę? W jaki sposób oznaczamy gwiazdy? Jeśli chcesz znać odpowiedź na te i inne pytania związane z obserwacją wieczornego nieba, czytaj dalej.

Gwiazdy na nocnym niebie wykonują pozorny ruch związany z ruchem obrotowym Ziemi wokół własnej osi, można go zarejestrować na fotografii wykonywanej przez dłuższy czas

Już potrafisz

- odróżniać strony świata, wskazywać linię horyzontu.

Nauczysz się

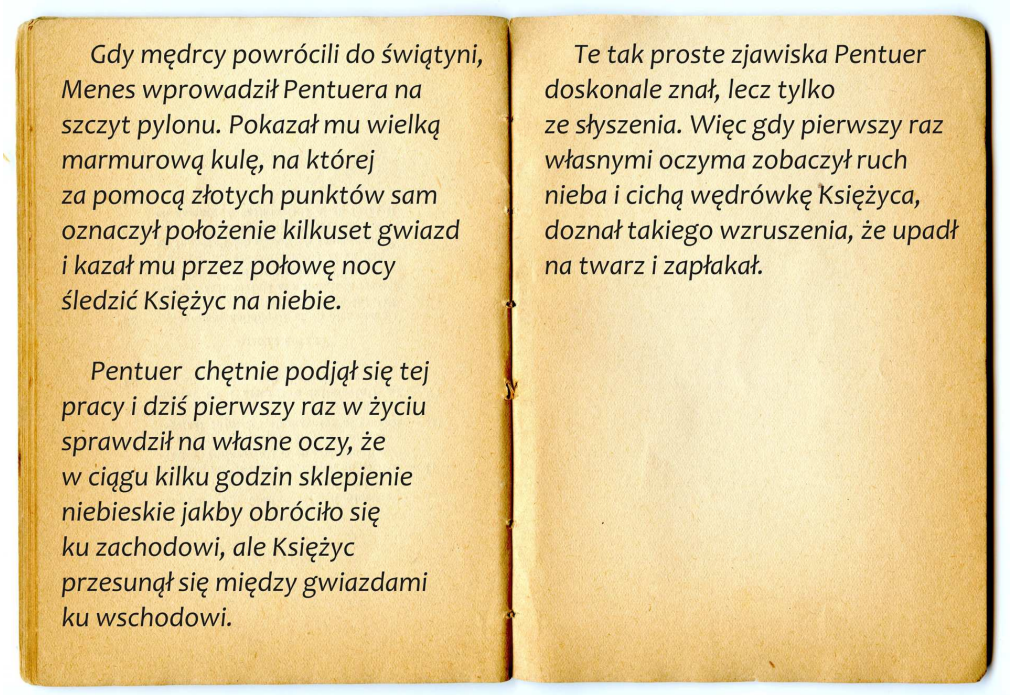
- odróżniać na niebie planety od gwiazd;
- zauważać ruch gwiazd (ze wschodu na zachód) i ruch Księżyca (z zachodu na wschód);
- za pomocą mapy nieba znajdować gwiazdozbiory takie jak: Wielki i Mały Wóz, Orion oraz Kasjopea;
- interpretować nazwy gwiazd związane z gwiazdozbiorami (np. α Ori czy β UMa) oraz skalę wielkości gwiazdowych jako skalę obserwowanych jasności gwiazd.

1. Jakie obiekty i zjawiska widzimy na niebie?

Od niepamiętnych czasów ludzie wpatrywali się nocą w niebo. Kiedy pogoda jest dobra, a niebo – czyste, na nocnym niebie widać tysiące gwiazd. Możemy zauważyć także planety i Księżyc.
Nie zawsze jednak łatwo jest odróżnić planetę od gwiazdy. Planety świecą światłem ciągłym – nie widzimy ich migotania. Czasami też uda nam się również zobaczyć sztucznego satelitę Ziemi lub załogową stację kosmiczną. Kiedy patrzymy na Księżyc, widzimy jego kształt – może być to okrągła tarcza, połowa tarczy albo zupełnie inny kształt. Pamiętajmy jednak, że obserwacja w ciągu krótkiego czasu (pół godziny czy nawet godziny) nie pokaże nam żadnych zmian w wyglądzie kształtu Księżyca. Potrzeba na to kilku dni.

Gdy na obserwację nieba i poświęcimy kilka godzin, to zauważymy, że widoczne na nim obiekty (poza sztucznymi satelitami) przesuną się ze wschodu na zachód. To efekt ruchu wirowego Ziemi, który odbywa się z zachodu na wschód. Gwiazdy, planety (także Słońce, ale gwiazdy obserwujemy nocą) i oczywiście nasz Księżyc pozornie poruszają się w przeciwną stronę, czyli ze wschodu na zachód.
Jeżeli Księżyc znajdzie się blisko jakiejś jasnej gwiazdy lub planety, to bez trudu można zauważyć, że w stosunku do tej gwiazdy przesuwa się on z zachodu na wschód.

Obserwacjami ruchu Księżyca zajmiemy się w następnym rozdziale, ale warto chyba w tym miejscu przypomnieć fragment powieści „Faraon” Bolesława Prusa.



Gdy mędrcy powrócili do świątyni, Menes wprowadził Pentuera na szczyt pylonu. Pokazał mu wielką marmurową kulę, na której za pomocą złotych punktów sam oznaczył położenie kilkuset gwiazd i kazał mu przez połowę nocy śledzić Księżyc na niebie.

Pentuer chętnie podjął się tej pracy i dziś pierwszy raz w życiu sprawdził na własne oczy, że w ciągu kilku godzin sklepienie niebieskie jakby obróciło się ku zachodowi, ale Księżyc przesunął się między gwiazdami ku wschodowi.

Te tak proste zjawiska Pentuer doskonale znał, lecz tylko ze słyszenia. Więc gdy pierwszy raz własnymi oczyma zobaczył ruch nieba i cichą wędrówkę Księżyca, doznał takiego wzruszenia, że upadł na twarz i zapłakał.

Cytat z powieści Bolesława Prusa „Faraon”

> **Polecenie 1**
>
> Jesteśmy przyzwyczajeni do tego, że kiedy obserwujemy **Słońce** poruszające się ze wschodu na zachód, widzimy (ustawiając się twarzą do niego), że ruch ten zachodzi od lewej do prawej. Gdy dawni żeglarze przekraczali równik i wypływali na półkulę południową, ze zdziwieniem stwierdzali, że Słońce porusza się tam odwrotnie (znów ustawiając się twarzą do niego): od prawej do lewej. Wyjaśnij to zjawisko.

Gdy niebo jest czyste (najlepiej je obserwować poza terenem zabudowanym) i nie ma na nim Księżyca, możemy zobaczyć **Drogę Mleczną** – naszą Galaktykę. To ogromne zbiorowisko gwiazd, których liczba oceniana jest na 200 miliardów.

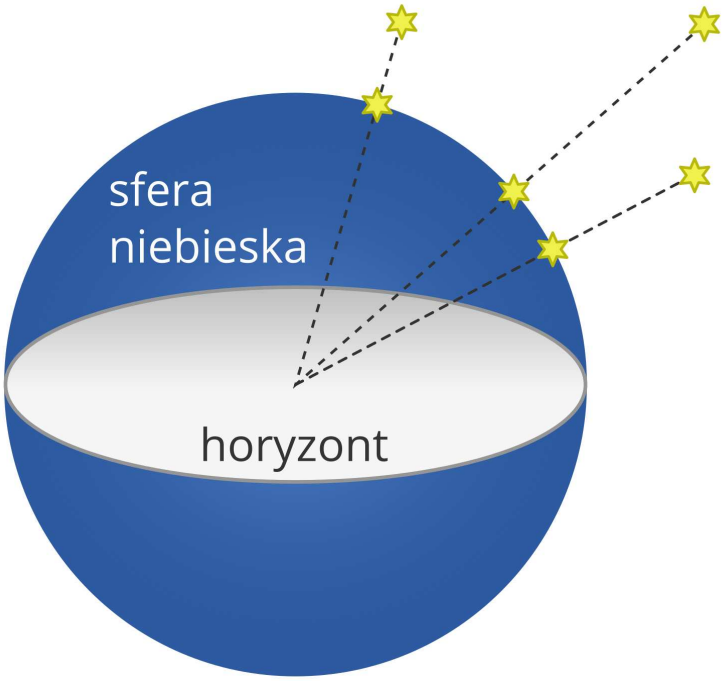
A gdybyśmy obserwowali niebo dłużej – przez tydzień, miesiąc, rok? Stwierdzilibyśmy wówczas, że gwiazdy są ułożone w stałe konfiguracje. Nazywamy je gwiazdozbiorami.
Z pewnością znasz nazwy niektórych z nich, np. gwiazdozbiory z tzw. pasa zodiakalnego – gwiazdozbiory Barana, Lwa, Bliźniąt czy Raka. Znasz na pewno również gwiazdozbiory takie jak Mały i Wielki Wóz (ten pierwszy nazywany jest również Małą Niedźwiedzicą, drugi jest fragmentem większego gwiazdozbioru – Wielkiej Niedźwiedzicy).

Aries

Astronomowie wprowadzili nawet system oznaczeń gwiazd związany z łacińskimi nazwami gwiazdozbiorów. Przykładowo: Gwiazda Polarna, świecąca w pobliżu północnego bieguna niebieskiego, nosi nazwę α Ursae Minor, czyli Małej Niedźwiedzicy. Litera α oznacza, że jest

to gwiazda najjaśniejsza w danym gwiazdozbiorze. Litera β symbolizuje gwiazdę drugą co do jasności w danym gwiazdozbiorze, a γ – trzecią.

Kiedy latem spoglądasz w niebo nad płonącym ogniskiem i widzisz jasny punkt niedaleko zenitu, to patrzysz na gwiazdę o nazwie α Lyrae, czyli najjaśniejszą gwiazdę w gwiazdozbiorze Lutni (albo Liry). Gwiazda ta nosi arabską nazwę Wega. Po upadku cywilizacji greckiej i egipskiej to właśnie Arabowie przechowali i rozwinęli sztukę astronomii. Na zimowym niebie można zobaczyć gwiazdozbiór Oriona. Znano go już w starożytnej Mezopotamii – nazywano go Uru-anna, czyli „Światło Nieba".



Ciała niebieskie bez względu na swoją rzeczywistą odległość wydają się dla obserwatora znajdującego się na Ziemi znajdować w stałej odległości – na powierzchni sfery niebieskiej, której środek wyznacza położenie obserwatora

Gwiazdy tworzące gwiazdozbiór nie są na ogół ze sobą związane i zwykle znajdują się od nas w różnych odległościach. Odnosimy jednak wrażenie, jakby wszystkie widoczne gwiazdy znadowały się na jednej powierzchni. Tę powierzchnię, będącą złudzeniem optycznym, nazywamy sferą niebieską.

Jeżeli popatrzysz na niebo, to zauważysz, że niektóre gwiazdozbiory zawierają bardzo jasne gwiazdy, a inne są ledwie widoczne. Dlatego już na początku naszej ery wprowadzono system oznaczeń gwiazd związany z ich jasnością. Najjaśniejsze gwiazdy to **gwiazdy pierwszej wielkości**, nieco słabiej świecące – **gwiazdy drugiej wielkości**. Najsłabiej świecące gwiazdy widoczne „gołym" okiem (w bardzo sprzyjających warunkach – czyste powietrze, brak mgieł, świateł miejskich, Księżyca na niebie) to **gwiazdy szóstej wielkości**. Oczywiście, przez teleskopy lub dzięki fotografiom możemy obserwować (i badać) gwiazdy nawet dwudziestej wielkości.

Pamiętaj, że wyraz „wielkość" nie ma nic wspólnego z rzeczywistymi rozmiarem gwiazd. Należy przez nią rozumieć „jasność", i to pozorną, gdyż blask na niebie zależy od rozmiarów ciała, wysyłanej energii (a tym samym temperatury) i odległości. Słońce jest jedną ze słabszych gwiazd, ale znajduje się bardzo blisko Ziemi i dlatego jest bardzo jasne – jaśniejsze od gwiazd pierwszej wielkości. Dokładne rachunki pokazują, że w ciągu sekundy ze Słońca dociera do nas około 10^{13} razy więcej energii niż od z gwiazd szóstej wielkości.

Systematyczne obserwacje gwiazd wykazały, że wiele z nich zmienia swój blask. Takie gwiazdy nazywamy zmiennymi. Aby stwierdzić, że blask się zmienił, trzeba obserwować daną gwiazdę i porównywać jej blask z sąsiednimi gwiazdami. Taką gwiazdą zmienną jest m.in. druga co do jasności gwiazda w konstelacji Perseusza. Nosi ona arabską nazwę Algol (czyli „Diabeł" albo „Demon"). Okres zmienności tego ciała niebieskiego wynosi niecałe trzy dni, a jej przyczyną jest zasłanianie jednego składnika gwiazdy podwójnej przez drugi składnik. Układów podwójnych lub nawet wielokrotnych jest więcej. Gwiazdozbiór Bliźniąt (Gemini) ma dwie jasne gwiazdy. Ich nazwy to Kastor i Polluks. Jeżeli popatrzymy na Kastora przez niewielką lunetę, to zobaczymy dwie gwiazdy, ale przy dużym powiększeniu widać, że jest tam sześć gwiazd tworzących układ wielokrotny.

Istnieją również inne typy gwiazd zmiennych, np. takie, które rozszerzają się i kurczą. Są to na ogół ciała niebieskie kilkanaście razy większe od naszego Słońca, a promień tych gwiazd zmienia się mniej więcej o tyle, ile wynosi średnica Słońca. Dużą rolę w rozwoju astronomii odegrały cefeidy – gwiazdy zmienne nazwane tak od gwiazdy δ Cephei (gwiazdozbiór Cefeusza). Przeczytasz o nich na dalszych stronach tego podręcznika.

Gwiazdozbiory wydają nam się tworami niezmiennymi, ponieważ nawet setki lat obserwacji nie wystarczą, aby zobaczyć zmiany, które jednak zachodzą.

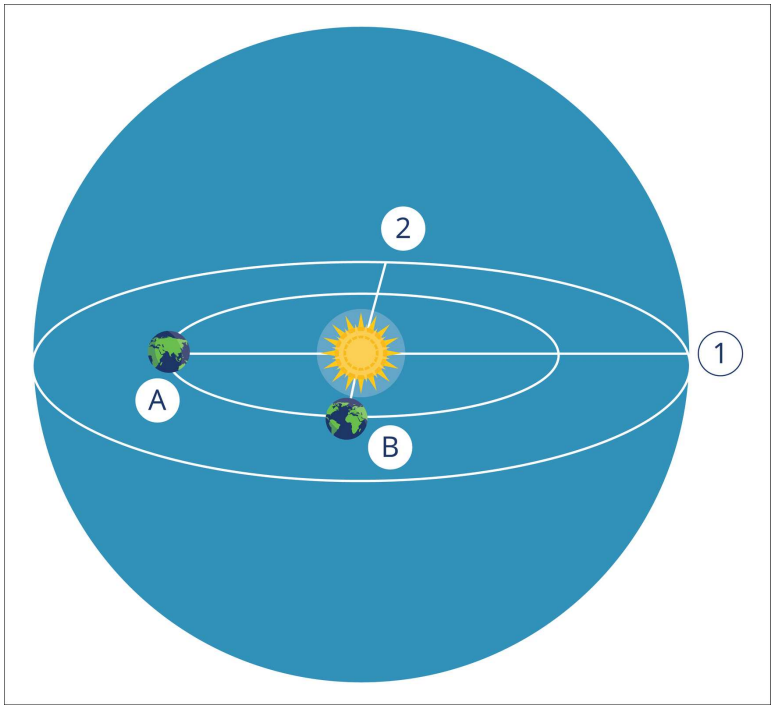
Jeśli będziemy obserwować niebo przez kilka tygodni, możemy zobaczyć zmianę położenia planet. W stosunku do gwiazd stałych przesuwają się one na niebie ruchem niejednostajnym. Przyspieszają i zwalniają, zakreślają złożone pętle. Tym ruchem zajmiemy się w osobnym rozdziale.

Czasem zauważymy na niebie meteor. Są takie okresy w roku, że w ciągu godziny obserwujemy kilkadziesiąt takich przelotów. Dzieje się tak, gdy Ziemia przejdzie przez tzw. rój meteorów. Niekiedy – co kilka lat – zdarza nam się obserwować kometę – obiekt wzbudzający niegdyś strach i trwogę. Teraz wiemy właściwie wszystko o tych obiektach, możemy nawet oglądać zdjęcia (np. w internecie) jądra komety Halley. Warto jednak zastanowić się, jaką drogę przeszła ludzkość od średniowiecza do czasów współczesnych, zwłaszcza że obecnie możemy obserwować w telewizji lądowanie próbnika sondy kosmicznej na powierzchni jądra komety.

Kometa Halley aktualnie oddala się od Słońca – znajduje się w okolicach orbity Neptuna. Największą odległość od Słońca osiągnie w 2024 roku, a w pobliżu Słońca i Ziemi będzie ponownie w roku 2061.

Kometa krótkookresowa, której pojawienie się przewidział na początku XVIII w. astronom angielski Edmund Halley

Obserwacja nieba odbywa się nie tylko w nocy. W dzień widzimy największe ciało Układu Słonecznego – Słońce. W wyniku ruchu wirowego Ziemi wschodzi ono i zachodzi. Jeżeli jednak będziemy obserwować drogę Słońca nad horyzontem w ciągu kilku miesięcy, to zauważymy, że miejsca wschodu i zachodu oraz wysokość Słońca w momencie górowania się zmieniają. Uczyliście się o tym na lekcjach przyrody w szkole podstawowej i na lekcjach geografii w gimnazjum.
Wszyscy wiedzą, że Ziemia krąży dookoła Słońca, czyli je obiega. Ale czy można to zobaczyć na własne oczy?



Słońce w środku sfery niebieskiej i krążąca wokół niego Ziemia

Powyższy rysunek przedstawia Słońce umieszczone w środku sfery niebieskiej i Ziemię krążącą wokół niego. Obserwator znajdujący się na Ziemi widzi Słońce na sferze niebieskiej. Przejściu Ziemi na orbicie okołosłonecznej z punktu A do B odpowiada przejście Słońca na sferze niebieskiej z położenia 1 do 2. Pełnemu obiegowi Ziemi wokół Słońca odpowiada przejście Słońca na sferze niebieskiej – porusza się ono po okręgu zwanym ekliptyką.

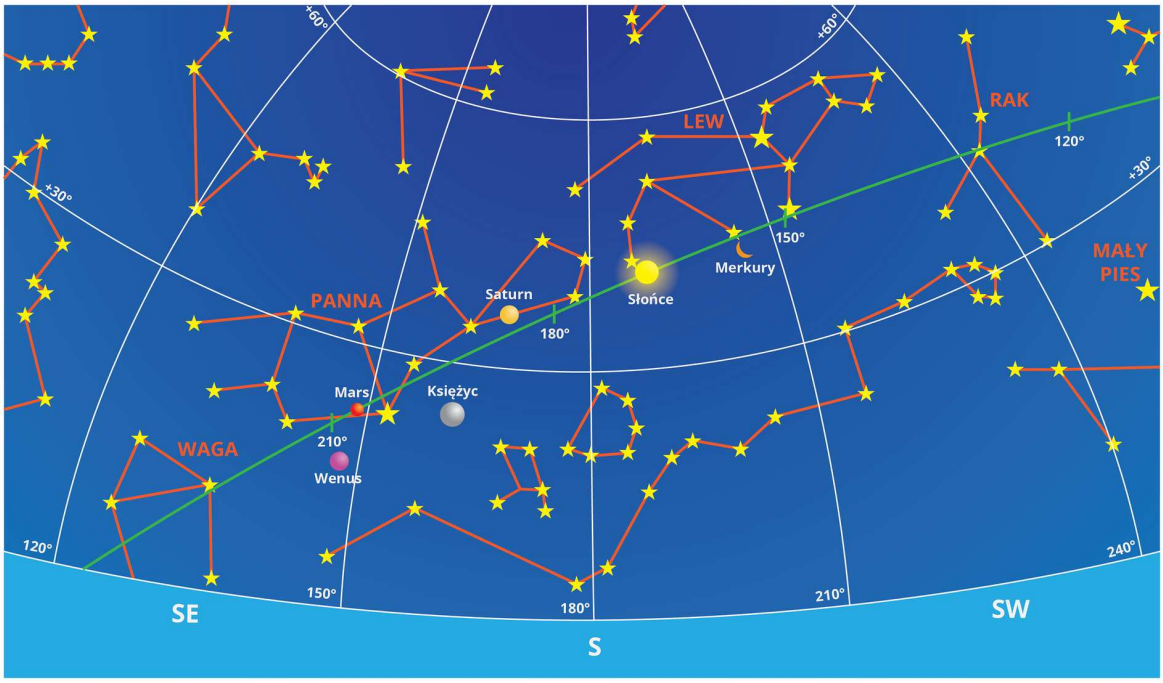
> **Polecenie 2**
>
> Jeśli będziemy obserwować niebo latem i zimą, zauważymy, że o tej samej godzinie, np. wieczorem, widoczne są inne gwiazdozbiory. Przepiękny gwiazdozbiór Oriona widoczny jest na niebie zimą. Latem na nocnym niebie widzimy zaś gwiazdozbiory Lutni, Łabędzia i Orła. Na podstawie rysunku 2., wyjaśnij, dlaczego na nocnym niebie widzimy w różnych porach roku (ale o tej samej godzinie) różne gwiazdozbiory.

To krótkie zestawienie zjawisk i obiektów widocznych na niebie nie wyczerpuje oczywiście wszystkich przypadków. Wiele ciał niebieskich można zobaczyć tylko przez duże teleskopy. Aby zaś zobaczyć niektóre zjawiska, np. wybuchy supernowych, trzeba czasem czekać kilkaset lat.

2. Jak znaleźć to, co chcemy obserwować?

Jeśli chcemy znaleźć jakąś miejscowość czy inny obiekt geograficzny, posługujemy się mapą. Do opisu położenia różnych obiektów astronomicznych służą zaś mapy nieba. Poniżej znajduje się fragment takiej mapy.

Na mapach tego typu zaznaczane są położenia gwiazd i gwiazdozbiorów. Podane są nazwy gwiazdozbiorów (czasem w języku polskim, częściej tradycyjnie – po łacinie). Na poniższym fragmencie mapy zieloną linią zaznaczono pozorną drogę (jest to ekliptyka – uczysz się o niej na lekcjach geografii), jaką przebywa Słońce w ciągu roku. Są tam też zaznaczone linie równoleżników niebieskich (na dole rysunku jest równik) oraz południków niebieskich. Układ tych linii jest analogiczny do linii równoleżników i południków na globusie ziemskim. Pozwala to łatwo odnaleźć dany obiekt.



Na mapach nieba zaznacza się położenia gwiazd i gwiazdozbiorów

Na powyższym rysunku mamy zaznaczone dokładne położenia Księżyca, Słońca i planet – mapa przedstawia sytuację konkretnego dnia i konkretnej godziny, a za godzinę będzie nieaktualna.

W obserwacji ciał niebieskich niezwykle pomocna jest obrotowa mapa nieba, produkowana przez kilka firm. W internecie można natomiast znaleźć interaktywne mapy nieba oraz bezpłatny program Stellarium będący symulatorem planetarium (pokazuje Słońce i planety, a nawet niektóre planetoidy – o dowolnej godzinie w dowolnym miejscu na kuli ziemskiej). W wyszukiwarce wystarczy wpisać hasła: „mapa nieba", „obrotowa mapa nieba" lub „Stellarium". Można także zdobyć mapę nieba na obracającym się globusie, często podświetlonym od środka, i bez trudu we własnym pokoju stworzyć atmosferę planetarium. Dzięki oglądaniu obiektów zaznaczonych na obrotowej mapie nieba można sobie zaplanować obserwacje wielu ciekawych zjawisk.

Podsumowanie

- Krótkie spojrzenie na niebo pozwala zauważyć gwiazdy, planety, Księżyc i poruszające się sztuczne satelity.
- Kilkugodzinna obserwacja pozwala zobaczyć ruch sfery niebieskiej ze wschodu na zachód i ruch Księżyca z zachodu na wschód (w stosunku do gwiazd).
- Aby zobaczyć cykl faz Księżyca, przesuwanie się planet na tle gwiazd itp., potrzebne są obserwacje trwające kilka tygodni lub miesięcy.

- Jeżeli mówimy, że jakaś gwiazda jest np. drugiej wielkości gwiazdowej, a inna – czwartej wielkości, nie oznacza to, że rzeczywiście ta pierwsza jest większa – oznacza to, że świeci na niebie jaśniej niż ta druga.
- Do planowania i przeprowadzania obserwacji przydatne są obrotowe mapy nieba lub program Stellarium.

Praca domowa

Polecenie 3.1

Ważne!

W odróżnieniu od innych prac domowych to zadanie zaplanowane jest do **wykonywania** przez cały rok szkolny. Wynika to po pierwsze z faktu, że powtarzalność większości zjawisk to kilka tygodni lub miesięcy. Po drugie, ważna jest pogoda. Najlepiej wykorzystać każdy pogodny dzień, bo po nim może wystąpić zachmurzenie trwające kilka lub kilkanaście dni.

Jeżeli zobaczysz Księżyc, to zapisz godzinę obserwacji i naszkicuj rysunek, na którym przedstawisz położenie tego ciała w stosunku do stron świata i obiektów znajdujących się w pobliżu jego tarczy (wysokie budynki, drzewa i jasne gwiazdy w pobliżu tarczy Księżyca).
a) Powtórz obserwację np. 4 godziny później. Sporządź następny rysunek.
b) Powtórz obserwację następnego dnia, o tej samej godzinie. Zaznacz położenie Księżyca na wykonanym wcześniej rysunku.

Ważne!

Jeżeli przeprowadzisz takie obserwacje kilka dni z rzędu, to na własne oczy zaobserwujesz ruch Księżyca wokół Ziemi.

Polecenie 3.2

Aby zaobserwować ruch Księżyca, możesz też w kolejnych dniach obserwować położenie Księżyca w stosunku do miejscowego południka niebieskiego (zobacz w internecie, co to takiego). Najlepiej wykonywać takie obserwacje o tej samej godzinie. Dlaczego?

Polecenie 3.3

Możesz także notować momenty wschodu lub zachodu Księżyca – analiza godzin wschodu lub zachodu pokaże wyraźnie, jak Księżyc porusza się wokół Ziemi.

Polecenie 3.4

Podczas obserwacji Księżyca i szkicowania wyglądu jego tarczy zastanów się i zapisz, gdzie może znajdować się Słońce. Wykonaj następnie rysunek przedstawiający orbitę Księżyca wokół Ziemi. Zaznacz położenie Księżyca i Słońca.

Polecenie 3.5

Podczas tzw. nowiu Księżyc jest niewidoczny. Bardzo interesujący jest jego wygląd 2–3 dni po nowiu. Przeprowadź taką obserwację i wykonaj rysunek przedstawiający wygląd Księżyca (najlepiej tuż po zachodzie Słońca). Sprawdź w internecie znaczenie słowa „irradiacja" i zapisz, dlaczego część oświetlona i nieoświetlona Księżyca wyglądają inaczej. Dlaczego część nieoświetlona bezpośrednio przez Słońce jest wtedy widoczna?

Polecenie 3.6

Orion jest znanym gwiazdozbiorem nieba zimowego. Od listopada do lutego (w przybliżeniu o tej samej godzinie) przeprowadź cykl obserwacji i naszkicuj położenie tego gwiazdozbioru w stosunku do stron świata. Na pewno zauważysz zmianę położenia. W którą stronę przesuwa się ten gwiazdozbiór? Co jest tego przyczyną? Jeżeli wykonasz to zadanie prawidłowo, zobaczysz skutki ruchu obiegowego Ziemi wokół Słońca.

Polecenie 3.7

Na mapie nieba lub w programie Stellarium wyszukaj gwiazdozbiory przedstawione podczas pokazu przezroczy oraz obiekty, takie jak: Galaktyka Andromedy, Mgławica w Orionie (blisko miecza Oriona), otwarta gromada Plejady (w gwiazdozbiorze Byka). Obserwuj je na niebie. Jeśli spojrzysz na Mgławicę w Orionie, zobaczysz miejsce, gdzie powstają nowe gwiazdy.

Polecenie 3.8

Niektórzy z was uczą się języka łacińskiego. Przygotujcie dla kolegów z klasy prezentację, w której przedstawicie łacińskie nazwy gwiazdozbiorów. Wyjaśnijcie także sposób pisania tych nazw w II przypadku. Przykładowo: gwiazdozbiór Byka nosi łacińską nazwę Taurus, a najjaśniejsza gwiazda tego gwiazdozbioru α Tauri.

Słowniczek

gwiazdozbiór

– kiedyś układ gwiazd, któremu przypisywano jakiś kształt (smoka, psa myśliwego); obecnie do gwiazdozbioru należą wszystkie gwiazdy leżące w pewnym obszarze sfery niebieskiej (również te niewidoczne gołym okiem).

sfera niebieska

– pozorna powierzchnia kulista; w rzeczywistości obiekty widoczne na niebie w rzeczywistości znajdują się bardzo daleko (w bardzo różnych odległościach), ale nie jesteśmy w stanie zobaczyć różnicy odległości między nimi – w ten sposób powstaje wrażenie, że wszystkie obiekty leżą w tej samej odległości, a zatem znajdują się na powierzchni kuli czy sfery. Środek tej sfery znajduje się w oku obserwatora.

wielkość gwiazdowa (pozorna)

– liczba wskazująca na jasność gwiazdy; im gwiazda jest jaśniejsza, tym liczba określająca jej wielkość gwiazdową jest mniejsza. W teorii geocentrycznej (opisanej przez Ptolemeusza) najjaśniejsze gwiazdy były gwiazdami pierwszej wielkości, słabsze – drugiej itd. Najbledsze gwiazdy widoczne gołym okiem przy idealnych warunkach to gwiazdy szóstej wielkości. Po wprowadzeniu pomiarów na kliszach określono dokładne zależności między tymi wielkościami. Ustalono, że np. od gwiazdy szóstej wielkości otrzymujemy 100 razy mniej światła niż od gwiazdy pierwszej wielkości. Niektóre gwiazdy mają ujemną wielkość gwiazdową (np. Syriusz –1,45) lub zawartą między 0 a 1. To samo dotyczy planet, Księżyca lub Słońca. Wartość wielkości gwiazdowej zapisujemy jako np. $1{,}45^m$, gdzie literka „m” jest skrótem od łacińskiej nazwy *magnitudo*.

Księżyc – naturalny satelita

Księżyc zwraca uwagę każdego człowieka. Jest widoczny w nocy, ale często także podczas dnia. To bardzo jasny obiekt – po Słońcu to najjaśniejsze ciało niebieskie widoczne z Ziemi. Obserwacja w czasie kilku dni, a jeszcze lepiej – kilkunastu, pozwala zobaczyć, że Księżyc zmienia swój wygląd oraz położenie. Rzadko – zdarza się to czasem tylko dwa razy w roku – podczas pełni przybiera czerwoną barwę. Dlaczego tak się dzieje? Odpowiedź na to pytanie znajduje się w tym rozdziale.

Księżyc jest zwrócony do naszej planety zawsze tą samą stroną, dlatego z powierzchni Ziemi możemy obserwować maksymalnie jedynie jedną jego półkulę. Na powyższym zdjęciu widać około 60% zwróconej do Ziemi strony Księżyca.

Już potrafisz

- zaobserwować Księżyc na niebie;
- opisać kształt widocznej części tarczy Księżyca.

Nauczysz się

- opisywać przebieg faz Księżyca i nazywać niektóre z nich;
- wyjaśniać zmiany wyglądu oświetlonej części Księżyca widzianej z Ziemi;
- opisywać warunki występowania zaćmienia Księżyca i jego wygląd na niebie podczas tego zjawiska.

1. Fazy Księżyca

Księżyc krąży wokół Ziemi – to stwierdzenie jest znane od najdawniejszych czasów. Jednak wiele osób pytanych o ten ruch odpowiada, że naturalny satelita Ziemi krąży ze wschodu na zachód. Tak naprawdę jest to efekt nie ruchu Księżyca, a wirowego ruchu Ziemi. Prawdziwy ruch Księżyca odbywa się z zachodu na wschód. W poprzednim rozdziale opisaliśmy, jak zaobserwować tę zmianę położenia.
W jaki sposób możemy opisać i wyjaśnić ruch Księżyca i zmiany jego wyglądu?

Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Różnice w oświetleniu tarczy Księżyca obserwowane z Ziemi

Animacja prezentująca Ziemię, Księżyc i Słońce. Księżyc zaczyna swój ruch wokół Ziemi i dokonuje pełnego obiegu wokół niej, po lewej stronie są wyświetlane wszystkie fazy i fazy pośrednie Księżyca.

Spróbujmy podsumować nasze obserwacje.

W położeniu 1. Słońce oświetla półkulę Księżyca odwróconą od Ziemi. Druga półkula jest nieoświetlona, zatem Księżyc nie jest widoczny. Mówimy, że znajduje się on w fazie nowiu.
W położeniu 2. półkula Księżyca widoczna z Ziemi będzie częściowo oświetlona przez Słońce. Obserwator zauważy więc część Księżyca zawartą między narysowanymi liniami, czyli wąski sierp – reszta półkuli Księżyca zwróconej ku Ziemi jest nieoświetlona.
W położeniu 3. widoczna będzie połowa półkuli zwróconej do Ziemi – tę fazę nazywamy **pierwszą kwadrą**. Położenie 5. to faza pełni **Księżyca**. Zauważ, że obserwator, który chce jednocześnie widzieć Słońce i Księżyc w pełni, musi stać na linii dzielącej półkulę nocną i dzienną Ziemi. Słońce będzie obserwował na zachodzie, a Księżyc – na wschodzie.
Położenie 7. nazywane jest **trzecią** albo **ostatnią kwadrą**.

Polecenie 1

Na niebie możemy obserwować jednocześnie i Słońce, i Księżyc w pierwszej kwadrze. Jaki jest kąt między kierunkiem, w jaki spoglądamy aby widzieć Słońce a kierunkiem, w jakim ustawiamy się aby patrzeć na Księżyc?

Polecenie 2

Jaki będzie kąt między kierunkiem obserwacji Słońca a kierunkiem obserwacji Księżyca, jeżeli Księżyc będzie:

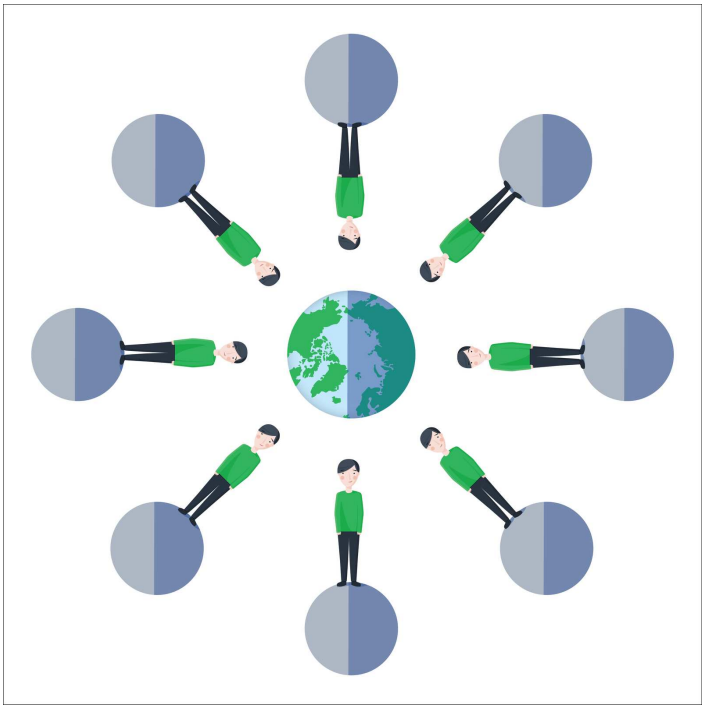
1. w pełni;
2. w ostatniej kwadrze.

Polecenie 3

W jakich okresach swojego ruchu Księżyc będzie widoczny po zachodzie Słońca, a w jakich – przed wschodem? W jaki sposób można wskazać położenie Słońca, patrząc na oświetloną część Księżyca?

Warto zwrócić uwagę na całkowicie fałszywe przekonanie wielu ludzi o istnieniu „ciemnej strony Księżyca", czyli takiej, na której zawsze jest noc. W każdej chwili jedna połowa powierzchni naszego satelity jest oświetlona przez Słońce, a druga – oczywiście nie (aby się o tym przekonać, skorzystaj z powyższej animacji).

Ponieważ pełen obrót Księżyca wokół własnej osi i jego pełen obieg wokół Ziemi są sobie równe i odbywają się w tę samą stronę, Księżyc zwraca ku Ziemi zawsze tę samą półkulę.



Obserwator stojący we wskazanym miejscu na Księżycu widzi cały czas Ziemię

Człowiek przedstawiony na rysunku stoi nieruchomo w dowolnym punkcie na powierzchni Księżyca. W ciągu około tygodnia Księżyc obróci się w lewo o 90° (będzie to $\frac{1}{4}$ obrotu) i jednocześnie wykona $\frac{1}{4}$ pełnego obiegu. Półkula, na której stoi człowiek, będzie zawsze zwracać się w stronę Ziemi. Druga półkula pozostanie niewidoczna, ale oczywiście będzie również co pewien czas oświetlana przez Słońce, jak to wyraźnie widać na rysunku.

Polecenie 4

Księżyc widziany 2–3 dni po nowiu wygląda jak na rysunku poniżej.

Księżyc obserwowany kilka dni po nowiu

Na rysunku przedstawiającym schemat oświetlenia Księżyca zaznacz położenie Księżyca w sytuacji widocznej na powyższym zdjęciu.

Warto dodać, że czas między dwiema kolejnymi pełniami wynosi około 29 dni i 12 godzin oraz nazywany jest miesiącem synodycznym. Jest on dłuższy od okresu ruchu Księżyca wokół Ziemi, czyli miesiąca gwiazdowego (inaczej: syderycznego), który wynosi około 27 dni i 8 godzin.

Ciekawostka

Niezależnie od położenia na Ziemi wszyscy obserwują dokładnie te same fazy Księżyca. To znaczy, że jeśli Księżyc jest w pełni, to jest ona widoczna na całej kuli ziemskiej.

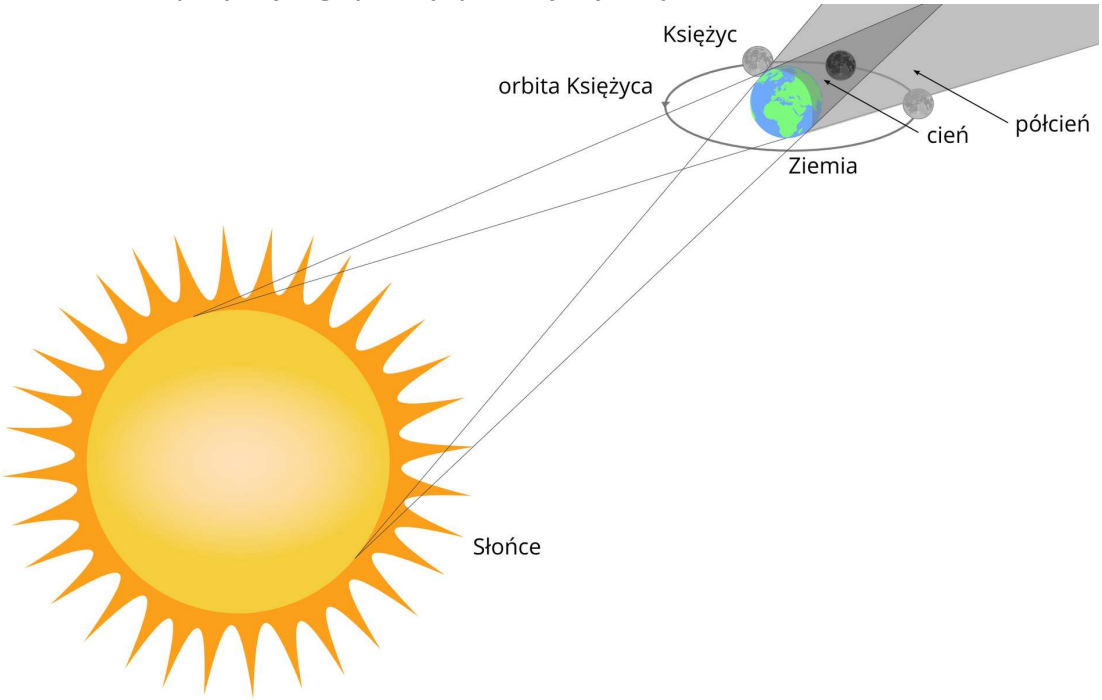
2. Zaćmienia Księżyca

Do najciekawszych zjawisk związanych z ruchem Księżyca wokół Ziemi należą niewątpliwie zaćmienia Słońca i Księżyca. W układzie Ziemia–Księżyc są one szczególnie efektowne,

ponieważ pozorna średnica Księżyca jest w przybliżeniu równa średnicy Słońca. Gdy między Ziemią a Słońcem znajdzie się Księżyc, to zasłoni on całkowicie tarczę Słońca.

Z kolei Księżyc podczas wędrówki po swojej okołoziemskiej orbicie może wejść do wnętrza stożka cienia całkowitego Ziemi, który znajduje się z przeciwnej strony Ziemi niż Słońce. Wystąpi wtedy zaćmienie Księżyca.

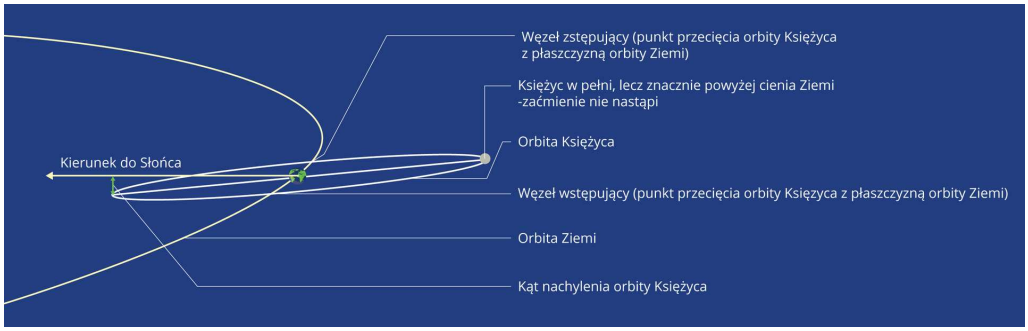
> **zaćmienie Księżyca**
>
> – zjawisko, które występuje, gdy Księżyc znajduje się w obszarze cienia Ziemi.



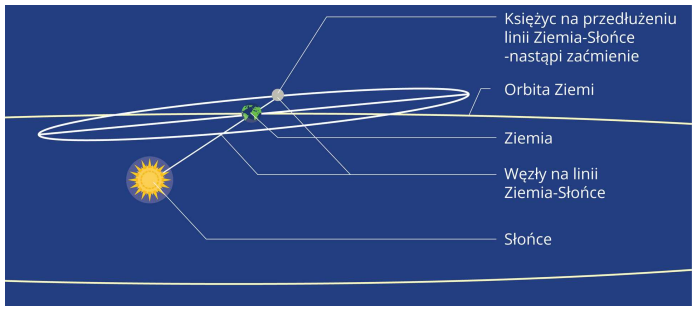
Źródło: Krzysztof Jaworski, Anonymous (https://openclipart.org), Gothika (https://commons.wikimedia.org), Fleshgrinder (http://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY-SA 3.0.

Na rysunku widać, że Księżyc znajduje się wtedy po przeciwnej stronie Ziemi niż Słońce, czyli jest w fazie pełni. I tu pojawia się pewien problem: kolejne pełnie następują co 29,5 dnia, a przecież zaćmienie Księżyca zdarza się znacznie rzadziej. Dlaczego tak się dzieje?

Powodem jest nachylenie płaszczyzny orbity Księżyca względem Ziemi do płaszczyzny orbity Ziemi względem Słońca. Wyjaśniają to dokładnie dwa poniższe rysunki.



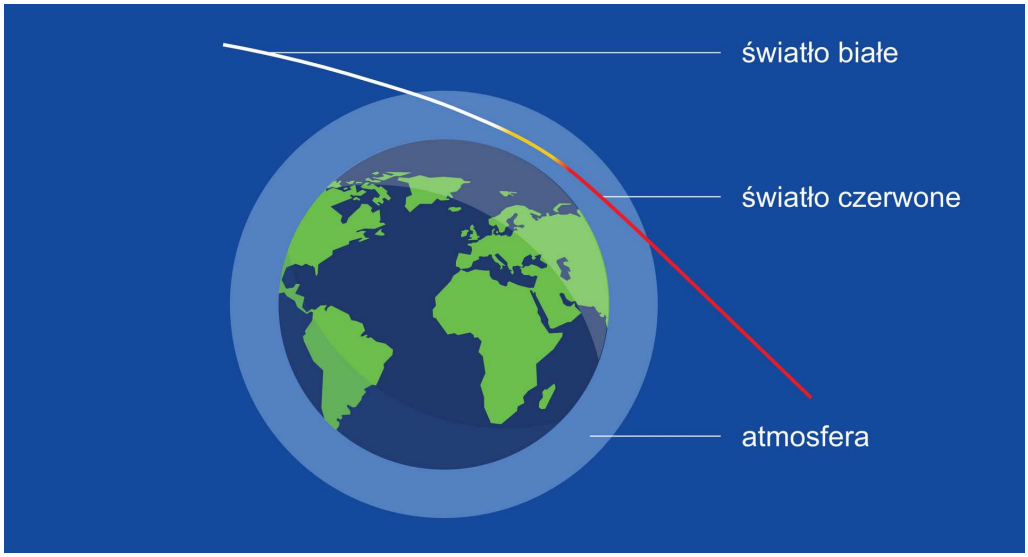
Położenie orbity Księżyca w stosunku do orbity Ziemi wokół Słońca – jeżeli Księżyc znajdzie się we wskazanym miejscu, to będzie w pełni, ale nie wystąpi zaćmienie Księżyca



Położenie orbity Księżyca, w którym może wystąpić zaćmienie, pod warunkiem że we wskazanym punkcie znajdzie się akurat Księżyc (na przedłużeniu linii Słońce – Ziemia)

Stożek cienia całkowitego Ziemi to miejsce, gdzie nie powinny docierać promienie słoneczne. Tarcza Księżyca jest jednak widoczna podczas tego zjawiska. Dlaczego tak się dzieje?

Księżyc w momencie bliskim całkowitego zaćmienia. Jest widoczny, ale przybiera barwę czerwono-brunatną



Przejście promieni słonecznych przez atmosferę ziemską

Podczas zaćmienia tarcza Księżyca najpierw ciemnieje, gdyż wchodzi w obszar półcienia, a następnie jest stopniowo zasłaniana przez Ziemię. W czasie całkowitego zaćmienia przyjmuje barwę czerwono-brunatną. Wynika to z faktu, że Księżyc oświetlany jest promieniami słonecznymi, które się załamują i rozpraszają w atmosferze ziemskiej. Najsilniej rozpraszane są promienie o barwie niebieskiej i właśnie dlatego niebo ma niebieski kolor. Przechodzące dalej promienie załamują się w atmosferze i gdy z niej wychodzą, mają czerwoną barwę. Oświetlają one Księżyc znajdujący się w stożku cienia i nadają naszemu satelicie właśnie taki kolor.

Ten sam mechanizm powoduje, że Słońce podczas wschodu i zachodu przybiera barwę czerwoną.

Zaćmienie Księżyca jest zjawiskiem astronomicznym wywołującym ogromne wrażenie na obserwatorze. Przyjrzyjmy się zaćmieniu jeszcze raz.

Ćwiczenie 1

Które ze zdań są prawdziwe, a które fałszywe?

	Prawda	Fałsz
Jeśli Księżyc znajduje się między Słońcem a Ziemią, to jego fazę nazywamy nowiem.	○	○
Zaćmienie Księżyca ma miejsce, gdy znajdzie się on w cieniu Ziemi.	○	○
Do zjawiska zaćmienia Księżyca dochodzi, gdy Ziemia znajduje się na linii między Słońcem a Księżycem.	○	○
Zaćmienie Księżyca obserwujemy zawsze, gdy jest on w pełni.	○	○
Jeśli Księżyc znajduje się między Słońcem a Ziemią, to jego fazę nazywamy pełnią.	○	○
Zaćmienia Księżyca nigdy nie obserwujemy, gdy Ziemia znajduje się w stosunku do Słońca przed Księżycem.	○	○
Ziemia nigdy nie rzuca swojego cienia na Księżyc.	○	○
Zaćmienie obserwujemy, gdy Księżyc znajdzie się poza obszarem cienia Ziemi.	○	○

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Wiedza o zaćmieniach Księżyca nie była powszechna w Europie, nie mówiąc już o innych kontynentach. „Zaćmienie Księżyca ocaliło Krzysztofa Kolumba, zagrożonego śmiercią głodową na Jamajce, gdzie zbuntowana ludność odmówiła mu pożywienia. Wiedząc o rychłym wystąpieniu tego zjawiska, Kolumb uciekł się do groźby oryginalnej –

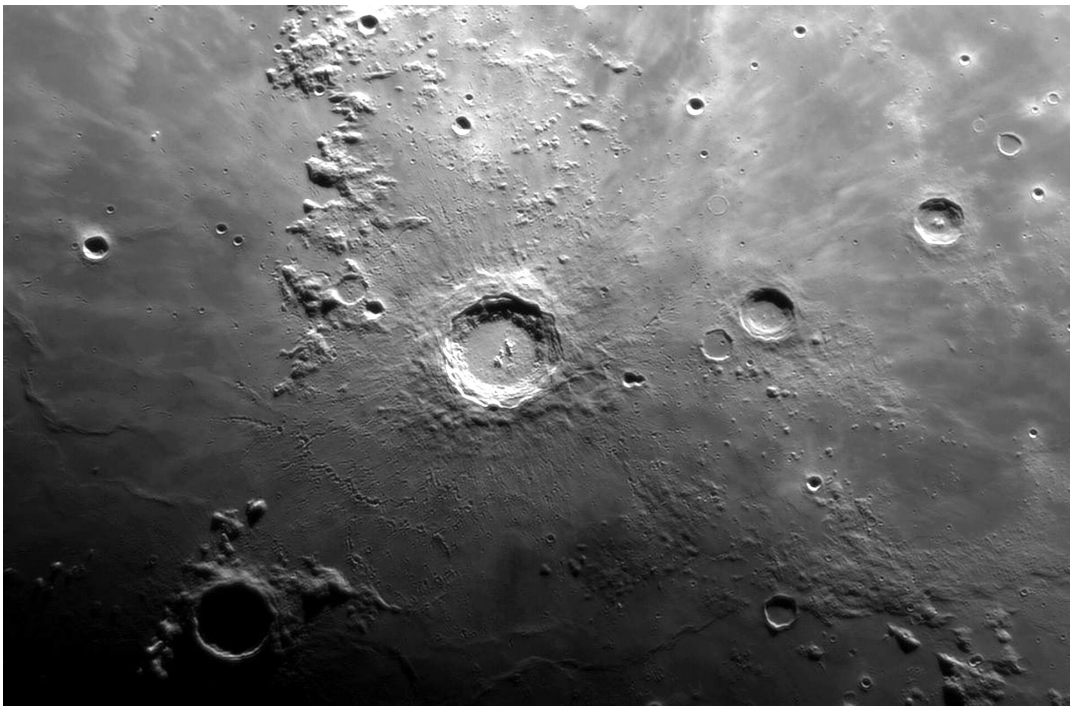
pozbawienia tubylców światła księżycowego – i dotrzymał słowa. Zaledwie Księżyc się schował, skruszeni mieszkańcy rzucili się do nóg sławnego żeglarza, błagając o przebaczenie". Historia ta przydarzyła się podróżnikowi 1 marca 1504 r. Opisuje ją Kamil Flammarion w książce .

Źródło: Seaman Joshua Valcarcel (http://commons.wikimedia.org), public domain.

3. Księżyc – najlepiej zbadany obiekt pozaziemski

Księżyc i Słońce to dwa ciała niebieskie, które od najmłodszych lat potrafimy zidentyfikować na niebie. Księżyc jest najbliższym sąsiadem Ziemi, gdyż znajduje się około 384 403 km od jej środka. Obszary widoczne na naszym satelicie jako jaśniejsze to wyżyny i góry, a ciemniejsze to tzw. morza. Morza są bardziej płaskie i odbijają mniej promieni słonecznych. Obszary bardziej pofałdowane lepiej rozpraszają światło słoneczne.

Oprócz pofałdowań powierzchni (zwanych górami) można zobaczyć również kratery meteorytowe.



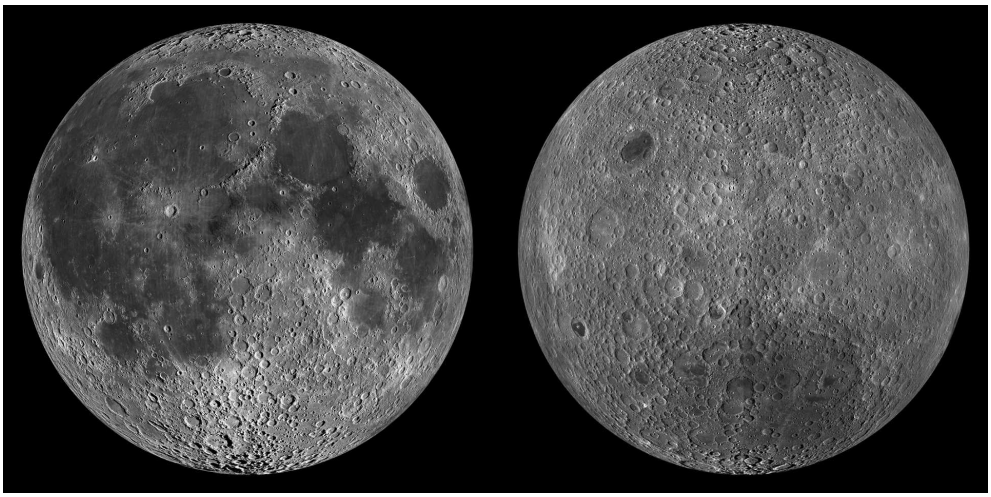
Krater Kopernik o średnicy 90 km i wysokości nad otaczającym terenem ok. 1 km

Takich kraterów są tysiące. Największe znajdują się na powierzchni Księżyca niewidocznej z Ziemi. Największy krater to Hertzsprung, który ma średnicę prawie 600 km. Kratery meteorytowe mają bardzo łagodne stoki. Przy wysokości wału 1 km ich szerokość może wynosić do 20 km. Nie przypominają one wulkanów na Ziemi, takich jak np. Wezuwiusz. Nie są pochodzenia wulkanicznego – powstały wskutek uderzenia ogromnych brył meteorytów w skorupę Księżyca. Dowodem na to są obszary o większej gęstości, tzw. maskony, odkryte pod skorupą Księżyca. Znajdują się one pod dużymi kraterami i morzami księżycowymi. Najprawdopodobniej wielka bryła poruszająca się z dużą prędkością przebiła skorupę Księżyca i wybiła krater. Przez otwór powstały w skorupie wydostała się płynna lawa i po zastygnięciu utworzyła morze księżycowe.

W XVII wieku obserwacją powierzchni Księżyca zajmował się polski astronom Jan Heweliusz. Posiadał on w Gdańsku kilka kamienic. Na wspólnym dachu trzech z nich wybudował obserwatorium astronomiczne. Dysponował największymi wówczas teleskopami i prowadził obserwacje powierzchni Księżyca. Właśnie dlatego uznawany jest za ojca selenografii, czyli działu astronomii zajmującego się opisem powierzchni Księżyca.

> **Ciekawostka**
>
> Już w 1959 roku rozpoczęto badania Księżyca prowadzone w przestrzeni kosmicznej. W styczniu tego roku w pobliżu satelity Ziemi przeleciał statek kosmiczny Łuna 1, wysłany przez Radziecką Agencję Kosmiczną, a w październiku Łuna 3 zrobiła zdjęcia części Księżyca niewidocznej z Ziemi. Kosmiczne agencje radziecka i amerykańska prześcigały się w podboju Srebrnego Globu. ZSRR realizował program badawczy dotyczący gruntu Księżyca, a Amerykanie prowadzili program Apollo, który zakończył się lądowaniem człowieka na Księżycu.

Zdjęcie wykonane przez Neila Armstronga na Księżycu



Zdjęcia widocznej z Ziemi (z lewej strony) i niewidocznej półkuli Księżyca. Widoczne morza (ciemniejsze obszary) na półkuli zwróconej do Ziemi

Powierzchnia Księżyca pokryta jest grubą warstwą drobnego regolitu. Składają się na niego zarówno odłamki skał powstałe w wyniku uderzeń meteorytów, jak i pył meteorytów bezustannie opadający na powierzchnię.

Wygląd skał księżycowych jest podobny do skał ziemskich. Grunt w większości składa się z metali o wysokiej temperaturze wrzenia. Substancje takie jak woda, czyli o niskiej temperaturze wrzenia, wyparowały z naszego satelity w przestrzeń kosmiczną. Skały księżycowe zawierają mniej składników lotnych niż skały ziemskie. Badania próbek gruntu księżycowego potwierdzają, że w skałach Księżyca nie ma wody. Wyniki tych badań wskazują także, że proces tworzenia się skał zachodził bez udziału tlenu. Szacuje się, że najmłodsze skały liczą 3,1 miliarda lat, a najstarsze – 4,4 miliarda lat.

Podsumowanie

- Księżyc jest naturalnym satelitą Ziemi, którego obieg wokół naszej planety wynosi około 27,3 doby. Tor ruchu Księżyca jest bardzo zbliżony do elipsy.
- Powierzchnia Księżyca pokryta jest warstwą rozdrobnionej skały. To rozdrobnienie jest efektem uderzeń meteorytów, opadania mikrometeorytów oraz kruszenia się skał w wyniku zmian temperatury.
- Informacje na temat budowy Księżyca uzyskano dzięki różnym projektom badawczym.
- Obserwowany kształt tarczy Księżyca zależy od wzajemnego położenia Słońca, Ziemi i Księżyca. Jego fazy są skutkiem ruchu obiegowego wokół Ziemi.
- Zaćmienie Księżyca zachodzi, gdy znajdzie się on w cieniu Ziemi.

Praca domowa

> **Polecenie 5.1**
>
> W astronomii poza pojęciem miesiąca gwiazdowego i synodycznego występuje stosuje się jeszcze określenie „miesiąc smoczy". Znajdź definicję miesiąca smoczego i napisz, z czym związana jest ta nazwa.

> **Polecenie 5.2**
>
> Miesiąc synodyczny, czyli czas pomiędzy np. pełniami, jest dłuższy niż pełen obieg Księżyca wokół Ziemi (tzn. miesiąc gwiazdowy). Dlaczego tak się dzieje? Pamiętaj, że Ziemia wraz z Księżycem krążą dookoła Słońca.

Słowniczek

meteoryt

– ciało, które nie wyparowało w atmosferze i uderzyło w powierzchnię ciała niebieskiego znacznie większego od siebie. Księżyc nie ma atmosfery i dlatego wszystkie ciała, które przyciąga, uderzają w jego powierzchnię.

miesiąc gwiazdowy

– pełen obieg Księżyca wokół Ziemi. Wynosi 27,3217 doby ($27^d07^h43^m11{,}5^s$).

miesiąc synodyczny

– czas między dwiema takimi samymi fazami Księżyca, który trwa $29^d12^h44^m02{,}9^s$.

nów

– faza Księżyca, podczas której jest on niewidoczny z powierzchni Ziemi; tarcza Księżyca jest wtedy niewidoczna, ponieważ znajduje się on między Ziemią a Słońcem.
pełnia

– faza Księżyca, podczas której jego tarcza zwrócona do Ziemi całkowicie oświetlona.
regolit

– warstwa pokruszonej skały na powierzchni Księżyca. To rozdrobnienie jest efektem uderzeń meteorytów, opadania mikrometeorytów oraz kruszenia się skał w wyniku zmian temperatury.
selenografia

– dział astronomii opisujący powierzchnię Księżyca.

Biogramy

Światowej sławy polski astronom. W 1647 r. opublikował dzieło „Selenographia", w którym szczegółowo opisał powierzchnię Księżyca i umieścił jego mapy

Jan Heweliusz

28.01.1611–28.01.1687

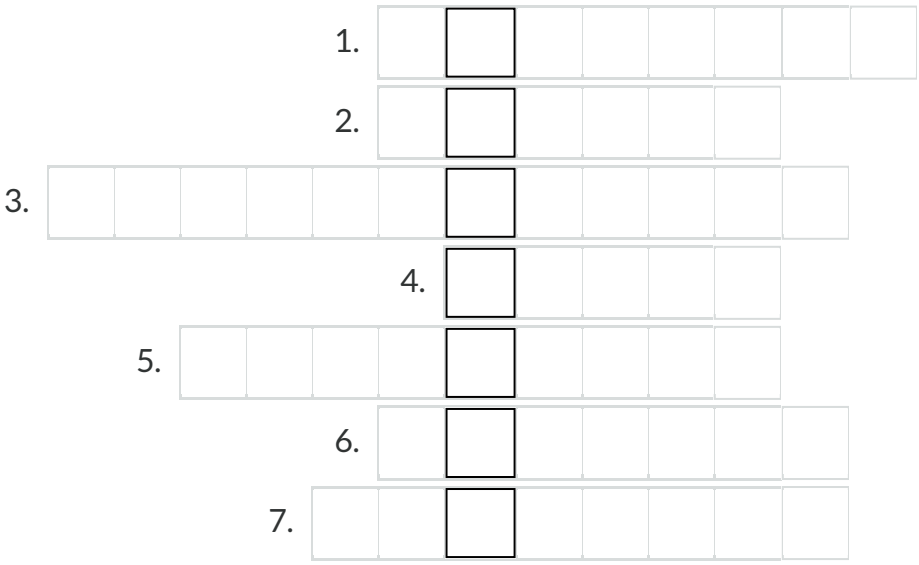
Ojciec Jana Heweliusza zapewnił mu wszechstronne wykształcenie. Młody Jan rozpoczął naukę w Gdańskim Gimnazjum Akademickim, gdzie uczył się pod okiem profesora Piotra Krügera (który kształcił też Keplera i Brahego). Następnie studiował w Królewcu, a także na uniwersytetach w Lejdzie i Oksfordzie. Wybudował obserwatorium na dachu trzech gdańskich kamienic, gdzie znajdowały się teleskopy, do których soczewki Heweliusz szlifował osobiście. W jego obserwatorium gościli królowie. Uczony obserwował plamy na

Słońcu, powierzchnię Księżyca oraz komety. Stworzył też katalog gwiazd. Był wynalazcą śruby mikrometrycznej, zbudował również prototyp peryskopu i zegara wahadłowego.

Zadania podsumowujące moduł

Ćwiczenie 2

Rozwiąż krzyżówkę.



1. Jedna z wielkości fizycznych, jej jednostka to m/s.
2. Jedna z faz Księżyca.
3. Dział astronomii zajmujący się powierzchnią Księżyca.
4. Czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego obrotu.
5. Słynny gdański astronom żyjący w XVII wieku.
6. Może być gwiazdowy.
7. Każde ciało obiegające inne ciało, np. Księżyc

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 3

Na podstawie informacji dotyczących Księżyca zamieszczonych w tej lekcji oceń prawdziwość każdego zdania.

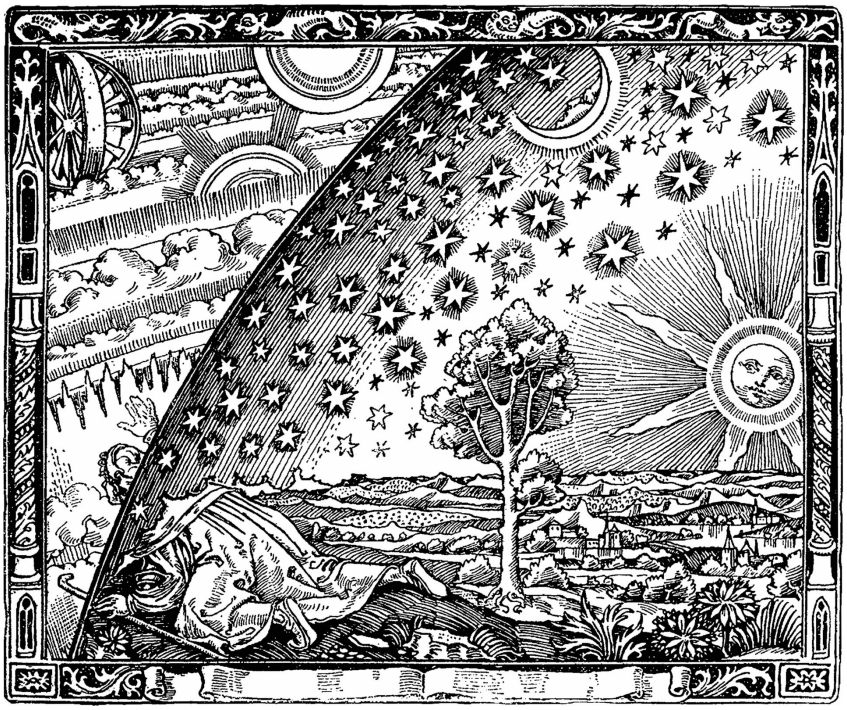
	Prawda	Fałsz
Na powierzchni Księżyca występują kratery, które powstały na skutek zderzeń m.in. z meteorytami.	◯	◯
Jan Heweliusz sporządził pierwsze mapy powierzchni Księżyca dzięki współpracy z Galileuszem.	◯	◯
W każdym miejscu na Ziemi w tym samym czasie obserwowane są różne fazy Księżyca.	◯	◯
Okres obiegu Księżyca wokół Ziemi wynosi 24 godziny.	◯	◯
Zaćmienie Księżyca można zaobserwować, gdy jest on w pełni.	◯	◯
Zaćmienie Księżyca nie zachodzi podczas każdej pełni, ponieważ orbita Księżyca jest nachylona pod określonym kątem do orbity Ziemi.	◯	◯

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ruch planet na sferze niebieskiej

Zdaniem Arystotelesa sfera to najdoskonalsza figura, ponieważ kiedy obraca się wokół jakiejś osi, to zachowuje stałe miejsce w przestrzeni. Ten pogląd wpłynął na widzenie budowy świata i był uznawany za prawdziwy przez prawie 2000 lat. To Arystoteles widział świat w postaci sferycznych warstw wokół sferycznej Ziemi. Uważał, że tylko ruchy po okręgu mogą być wieczne.

Według tego filozofa świat dzielił się na podksiężycowy, w któryn wszystkie ciała (zbudowane z elementów, takich jak woda, ziemia, ogień i powietrze) spadały do środka, oraz nadksiężycowy. Świat nadksiężycowy zdaniem Arystotelesa był wieczny – nie miał ani początku, ani końca.



Koncepcja budowy świata głoszona przez Arystotelesa odcisnęła piętno na ludzkim pojmowaniu kosmosu przez ponad 1500 lat. Ilustracja powyżej to drzeworyt nieznanego artysty, zatytułowany „Wędrowiec na krańcu świata". Stanowi on odzwierciedlenie średniowiecznego sposobu postrzegania Wszechświata, zgodnego w znaczniej mierze z kosmologią Arystotelesa.

Już potrafisz

- odróżnić na niebie planetę od gwiazdy;
- zaobserwować i opisać ruch Księżyca wokół Ziemi;
- wyjaśnić zjawisko zmiany oświetlenia części Księżyca widzianej z Ziemi.

Nauczysz się

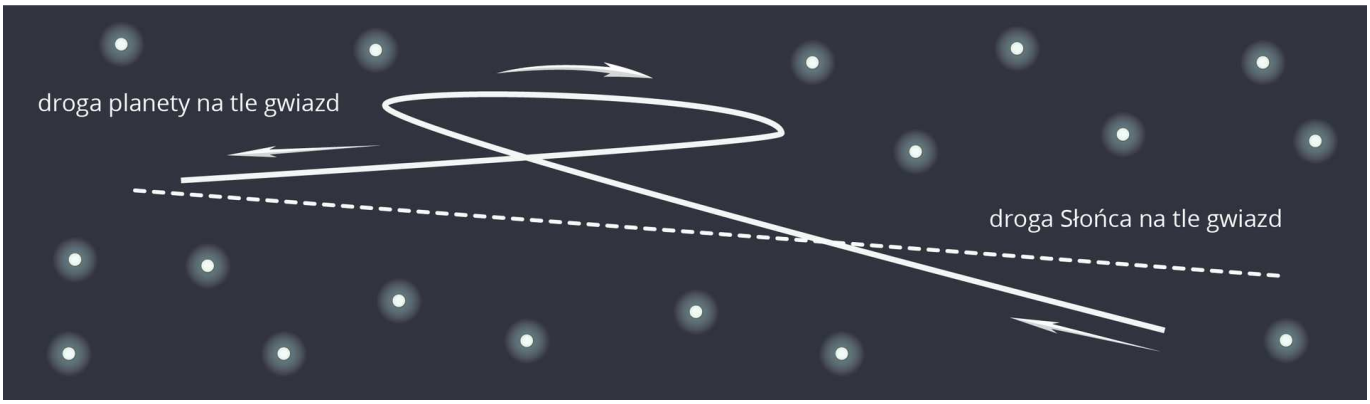
- opisywać ruch planet na sferze niebieskiej oraz wyjaśniać go w systemie geocentrycznym i heliocentrycznym;

- podawać treść praw Keplera;
- wymieniać obserwacje Galileusza, które potwierdzały, że nie wszystkie ruchy odbywają się wokół Ziemi.

1. System geocentryczny

System, w którym centrum Wszechświata stanowi Ziemia, to system geocentryczny. Jako pierwszy opisał go Pitagoras. Uważał on, że Ziemia jest kulą unoszącą się w przestworzach, a wszystkie inne ciała krążą dookoła niej. Arystoteles, Archimedes Hipparch byli również zwolennikami tego systemu. Arystarch z Samos próbował zmierzyć odległości do ciał niebieskich. Z jego prac wynikało, że Słońce musi być znacznie większe od Ziemi. Uważał on, że jest nieprawdopodobne, aby ogromne Słońce krążyło wokół małej Ziemi, i że wobec tego trzeba przyjąć, że to Ziemia obiega Słońce. Był zatem prekursorem heliocentryzmu – systemu, według którego w centrum świata jest Słońce. Pogląd ten nie był jednak w tamtych czasach powszechnie akceptowany.

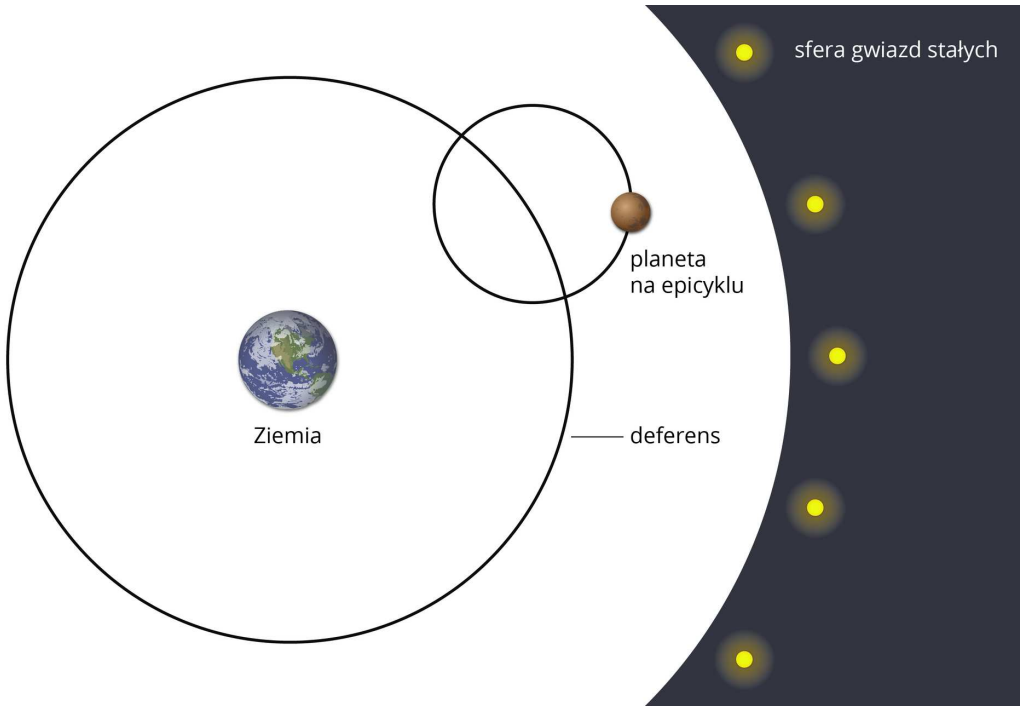
Niezależnie jednak od tego, co umieszczano w środku świata, zawsze obowiązywała zasada, że ciała niebieskie poruszają się ruchem doskonałym, czyli jednostajnym po okręgu. Problem jednak polegał na tym, że obserwowany ruch planet na niebie wcale nie był jednostajny, a tor ruchu wyglądał często tak jak na rysunku poniżej.



Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Droga, po której porusza się planeta, tworzy pętle. Jak widzimy na rysunku, planeta stosunkowo szybko przemieszcza się z prawej strony na lewą, następnie zwalnia i zaczyna poruszać się wstecz (z lewej strony na na prawą), a potem znowu szybko z prawej strony na lewą. Jak widać, ruch planet na niebie nie jest ruchem po okręgu i nie odbywa się ze stałą prędkością. Jak sobie poradzili z tym starożytni uczeni?
Przyjmowano system wielu sfer lub okręgów, po których poruszały się planety. Te

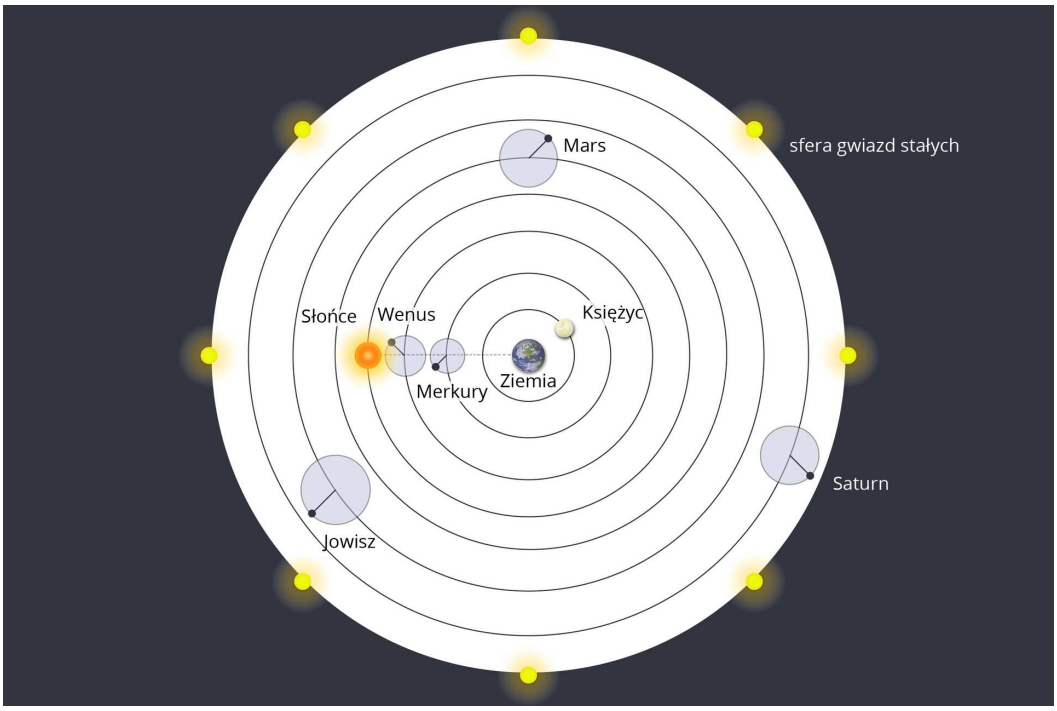
największe i główne nazywano deferensami (lub deferentami), te mniejsze – epicyklami. Poniższy rysunek przedstawia deferens i epicykl I rzędu.



Epicykle i deferensy

> **Polecenie 1**
>
> Przedyskutujcie w klasie, w jaki sposób przyjęcie modelu ruchu planety po epicyklu i ruchu epicykl po deferensie mogło wyjaśnić, dlaczego planeta zakreśla pętle na tle gwiazd stałych. Patrzymy na ten ruch z Ziemi. Jakie założenia trzeba przyjąć, aby droga planety była taka jak na ilustracji 2?

System geocentryczny był przedstawiany różnie, ale tutaj chcemy pokazać jego najbardziej znaną wersję (Klaudiusz Ptolemeusz, II wiek n.e.). Obecnie uważa się, że Ptolemeusz zebrał wcześniejsze teorie (głównie Hipparcha) i zbudował ten model. Rysunek przedstawia wersję uproszczoną – w rzeczywistości przyjmowano, że Ziemia nie leży dokładnie w środku deferensów planet – deferensy były ekscentryczne.



W systemie geocentrycznym Ziemia zajmuje centralne położenie w stosunku do innych ciał niebieskich

Warto zwrócić uwagę na to, że na powyższym rysunku epicykle Wenus i Merkurego leżą całkowicie pomiędzy Słońcem a Ziemią, a ich środki znajdują się na prostej łączącej Ziemię ze Słońcem. Wynika z tego, że Wenus i Merkury nie mogły oddalać się za bardzo od Słońca. Rysunek jest schematyczny i nie przedstawia prawidłowych proporcji rozmiarów epicykli w porównaniu z rozmiarami deferensów.

W jaki sposób system geocentryczny Ptolemeusza wyjaśniał to, że Wenus (podobnie jak Merkury) albo zachodzi zaraz po zachodzie Słońca, albo wschodzi niedługo przed wschodem Słońca? Posłuż się pokazanym wyżej modelem tego systemu.

Przeanalizuj uważnie rysunek i jego opis znajdujący się poniżej. Czy z takiej konfiguracji wynika, że na Wenus moglibyśmy zaobserwować zjawisko analogiczne do cyklu faz Księżyca (od nowiu do pełni)? Uzasadnij odpowiedź.

2. System heliocentryczny

Jak wspomniano wyżej, nie wszyscy naukowcy byli zwolennikami centralnego położenia Ziemi we Wszechświecie, ale poglądy, jakie głosił Arystarch z Samos, nie były popularne.

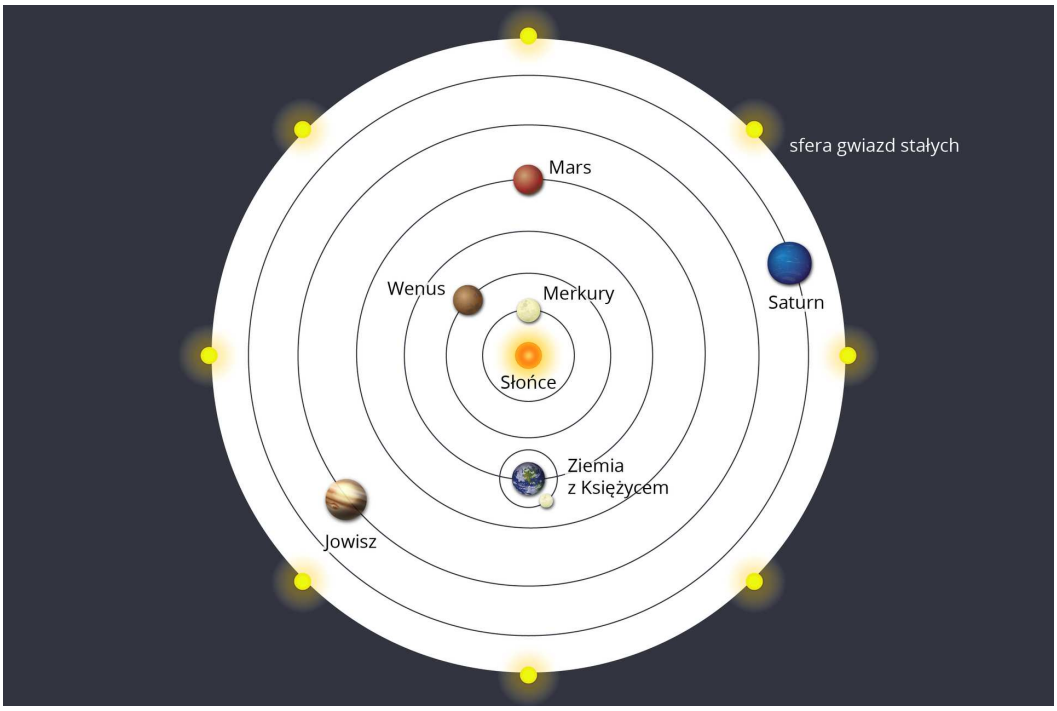
Po upadku Cesarstwa Rzymskiego nadeszły w Europie czasy niesprzyjające rozwojowi niezależnej nauki, opartej na obserwacjach. Sytuacja zmieniła się wraz z ekspansją Arabów i nowo powstałej religii – islamu – na obszary Mezopotamii, Egiptu, Syrii oraz dzisiejszej Hiszpanii. Najeźdźcy poznali astronomię grecką i egipską. Dzieła astronomiczne

przetłumaczono na język arabski. Religia islamu nie zakazywała zajmowania się tymi zagadnieniami, w wręcz przeciwnie – znajomość kierunków świata, dat świąt i postów (istotnych dla wyznawców tej religii) wiązała się z koniecznością obserwowania i zapisywania położeń Słońca, Księżyca oraz planet. Powstawały obserwatoria, np. w Bagdadzie w IX w. i w Samarkandzie w XV w. (to ostatnie zostało założone przez Uług Bega – mongolskiego władcę).

Mimo że astronomowie arabscy stwierdzili niezgodności między obserwowanymi pozycjami planet a ich położeniami wynikającymi z teorii Ptolemeusza, nie odeszli od idei systemu geocentrycznego i jednostajnego ruchu planet po okręgach.
Dlaczego stwierdzano niezgodności? W ciągu setek lat okazywało się, że zjawiska przewidziane przez teorię geocentryczną zachodzą w innych momentach, niż zakładano. Próbowano usuwać te niezgodności przez dodawanie kolejnych epicykli. Zakładano więc, że planeta krąży po epicyklu II rzędu, środek tego epicyklu krąży (oczywiście także ruchem jednostajnym) po epicyklu I rzędu, a dopiero ten epicykl krąży po deferensie. Dobór rozmiarów epicykli w zależności od czasów obiegu pozwalał na dokładniejsze przewidywanie zjawisk.

Kiedy nastąpiło Odrodzenie, zaczęto przypominać sobie o dawnych przekonaniach dotyczących budowy Wszechświata. Nadal obowiązywał system geocentryczny Ptolemeusza – potrzebna była zasadnicza zmiana obowiązujących poglądów. Tej zmiany (przynajmniej częściowo) dokonał Mikołaj Kopernik. Podczas studiów na Wydziale Sztuk Wyzwolonych na Akademii Krakowskiej Kopernik zetknął się z kwestionowaniem tez Arystotelesa dotyczących budowy Wszechświata. Poznał też poglądy Pitagorejczyków o ruchach Ziemi. Późniejsze studia w Bolonii i Padwie pozwoliły Kopernikowi na ugruntowanie opinii na temat nowego obrazu świata.

Zasadniczą zmianą, jaką wprowadzał system Kopernika, było umieszczenie Słońca w środku świata. Wdług tej teorii Ziemia jest jedną z planet krążących wokół Słońca. Dzienny ruch Słońca, Księżyca i gwiazd to efekt ruchu wirowego Ziemi. Drogi planet na niebie wynikają z ruchu Ziemi dookoła Słońca. Sfera gwiazd stałych pozostaje nieruchoma. System (nazywamy go heliocentrycznym) Kopernika przedstawiony jest na uproszczonym rysunku poniżej. Ponieważ Kopernik nie zrezygnował z założenia, że planety poruszają się po okręgach, system ten zawierał również epicykle. Ponadto orbity są ekscentryczne – środek deferensu nie leży w środku Słońca, lecz jest przesunięty.
System Kopernika wcale nie był prostszy od systemu Ptolemeusza, a liczba okręgów, które stanowiły tory planet, nawet nieco wzrosła.



W systemie heliocentrycznym Słońce zajmuje centralne położenie w stosunku do innych ciał niebieskich

Zasługą Kopernika było wybranie innego układu odniesienia – w centrum znajdowało się Słońce (a nie Ziemia). Spowodowało to ogromny przewrót. Teoria heliocentryczna zburzyła obraz świata stworzony jeszcze przez Arystotelesa i umożliwiła powstanie nowej filozofii przyrody. Z teorii kopernikańskiej wynikało, że nie istnieje podział świata na część ziemską (świat podksiężycowy) i pozaziemską (niebieską). Gwiazdy nie musiały się więc znajdować na powierzchni sfery (po to, by – zgodnie z teorią Ptolemeusza – mogły poruszać wokół Ziemi w ciągu 24 godzin), lecz nic nie stało na przeszkodzie, aby mogły znajdować się w różnych odległościach od Słońca. Ziemia, podobnie jak inne planety, była zależna od Słońca. Jednak nie nadszedł jeszcze czas na pytanie o przyczynę ruchu Ziemi i planet dookoła Słońca. Pogląd, ogłoszone drukiem w 1543 r., były rewolucyjne, a spór o słuszność nowej teorii trwał bardzo długo. Dzieło polskiego astronoma znajdowało się przez około 200 lat (do 1830 r.) na indeksie ksiąg zakazanych przez władze kościelne, a postać Kopernika nie była w Polsce zbyt popularna.

Kiedy w styczniu 1807 r. armia Napoleona wkroczyła do Torunia, cesarz zapytał rajców miejskich: Macie tu u siebie jakiś pomnik Kopernika?

„„Burmistrz wyuczył się zawczasu wszelkich możliwych odpowiedzi, ale tego pytania nie przewidział. Stał zmieszany i spocony z wytrzeszczonymi oczami. Na szczęście jakiś urzędnik przypomniał sobie o narożnym domu na ulicy św. Anny, w którym miał urodzić się wielki nieboznawca. Cesarz wynurzył chęć bezzwłocznego oglądania tego zabytku. Przybywszy na miejsce, znalazł wszystko w nędznym stanie”. ”

Tak opisywano cesarskie oględziny w z tego samego roku.

Pierwszy pomnik Kopernika odsłonięto w Warszawie 11 maja 1830 r.

Polecenie 2

Wykonaj rysunek przedstawiający uproszczony model układu heliocentrycznego: największy okrąg ma przedstawiać sferę gwiazd stałych, mniejszy – orbitę Jowisza, kolejny – orbitę Ziemi, a w centrum narysuj Słońce. Na orbicie Ziemi zaznacz dwa położenia, jakie Ziemia przyjmuje co pół roku. Na orbicie Jowisza zaznacz położenia Jowisza również co pół roku, ale pamiętaj, że pełen obieg Jowisza wokół Słońca trwa ok. 12 lat.

Narysowane okręgi muszą mieć promienie odpowiedniej wielkości. Zastanów się, jak duży musi być promień największej sfery, czyli sfery gwiazd stałych. Na pewno trzeba będzie trochę poeksperymentować.
Następnie połącz linią jedno z położeń Ziemi i pierwsze położenie Jowisza – koniec odcinka tej linii to miejsce, w którym na sferze widać Jowisza. Czynność tę musisz powtarzać. W nagrodę zobaczysz, że Jowisz na naszej sferze może przyspieszać, zwalniać, cofać się i znowu pędzić. Zrozumiesz wówczas, w jaki sposób system heliocentryczny wyjaśnia drogi planet. Pamiętaj, że epicykle i deferensy mogą leżeć w różnych płaszczyznach i dlatego powstają pętle.

Zjawisko, o którym mowa wyżej, można zaobserwować również na poniższej animacji.

Film dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/D1CQJWLmP

Materiał dotyczący ruchu planety na tle gwiazd widzianego z Ziemi.

---

3. Rozwój idei kopernikańskiej

Teoria heliocentryczna Kopernika stawała się coraz powszechniejsza. Jednym z jej wielbicieli był duński astronom Tycho Brahe, który na przełomie lat 1575–76 przedstawił na dworze królewskim system świata skonstruowany przez Kopernika, a następnie – dzięki funduszom udzielonym przez króla Fryderyka II – założył na wyspie Hwen (Ven) duże obserwatorium. Mimo że Brahe cały czas był wielbicielem Kopernika, w końcu zaczął odrzucać jego poglądy. Zaproponował swój własny system – zgodnie z nim w środku świata znajdowała się Ziemia. Dookoła niej krążyły Księżyc i Słońce, otoczone kręgami planet. System Brahego był równie dobry, jak systemy Kopernika lub Ptolemeusza, aby przedstawić Układ Słoneczny i zachodzące w nim zjawiska astronomiczne, ale gubił główny sens teorii Kopernika – to, że Słońce jest zdecydowanie większe od Ziemi i innych planet.

Po kilku latach Brahe przeniósł się do Pragi. Tam zatrudnił Jana Keplera – nowego asystenta, dla którego system Kopernika był oczywisty. Po śmierci Brahego plon jego wieloletnich obserwacji dostał się w ręce Keplera. I wtedy nastąpił przełom.

Brahe jeszcze za życia prosił Keplera o wyznaczenie orbity Marsa. Nie było to łatwe, ponieważ Mars jest obserwowany z orbity Ziemi, która zawsze się porusza. Najpierw Kepler stwierdził, że orbita Ziemi musi być lekko spłaszczonym okręgiem. Okazało się, że wcale nie porusza się ona ruchem jednostajnym – był on szybszy w zimie, a wolniejszy w lecie. Z kolei kiedy astronom analizował orbitę Marsa, stwierdził, że ma ona kształt eliptyczny. Wreszcie Kepler zajął się kwestią, która od dawna go nurtowała: jaki jest związek między rozmiarami orbit planet a okresem ich obiegu dookoła Słońca. Szukanie takiego związku trwało dosyć długo, bo dopiero w maju 1618 r. zostało sformułowane tzw. prawo harmonii, czyli III prawo Keplera.

Kiedy Kepler utrwalał system Kopernika w swoich prawach ruchu planet, w styczniu 1610 r. Galileo Galilei (Galileusz) odkrył księżyce Jowisza, a następnie cykl faz Wenus. Drugie odkrycie dowodziło, że Wenus krąży wokół Słońca, a nie wokół Ziemi, pierwsze zaś było dowodem na to, że istnieją ciała krążące wokół innych planet niż Ziemia. Obserwacje plam słonecznych wykonane przez Galileusza dowodziły, że Słońce nie jest doskonałym ciałem niebieskim, jak głosili zwolennicy filozofii Arystotelesa i systemu geocentrycznego. Mimo to przeciwnicy Galileusza i Kopernika (a także Keplera) nawet nie chcieli spojrzeć w lunetę. W 1616 r. za herezję uznano twierdzenie głoszone przez Galileusza, że Słońce znajduje się w środku świata i pozostaje nieruchome, a Ziemia się porusza. Oba twierdzenia przyjęto za absurdalne oraz zakazano ich głoszenia. W 1632 r. Galileusz wydał we Florencji swój słynny „Dialog o dwu najważniejszych układach świata: ptolemeuszowym i kopernikowym". Przeprowadził w nim znakomitą krytykę geocentryzmu, ale formalnie przyznał zwycięstwo zwolennikom Ptolemeusza. Mimo to został wezwany do Rzymu i znalazł się w więzieniu inkwizycji. 22 czerwca 1633 r. siedemdziesięcioletni Galileusz został zmuszony do odwołania swoich poglądów i ostatnie 9 lat życia spędził w odosobnieniu.

W 1828 r. papież Pius VII wydał decyzję o zdjęciu dzieła Kopernika z indeksu dzieł zakazanych.

Warto w tym miejscu wspomnieć o rozwoju idei kopernikańskiej w Polsce. O tej koncepcji sporo musiał wiedzieć król Władysław IV, dla którego Galileusz (przebywający już w areszcie domowym) wykonywał szkła do teleskopu. Włoski astronom pisał do króla: „„Wiem, że egzemplarze tej książki (tzn. Dialogu – przyp. autora) dotarły w wasze strony..."". Jan Heweliusz – wybitny polski astronom w skali europejskiej – również był zwolennikiem teorii Kopernika. Urządził obserwatorium i śledził Księżyc, zmiany położeń Słońca, planet i gwiazd. Dzięki Heweliuszowi teoria Kopernika dotarła do króla Jana III Sobieskiego, który jeździł do Gdańska i spotykał się z tym astronomem. Na cześć króla Heweliusz nazwał pewien układ gwiazd Tarczą Sobieskiego (*Scutum Sobiescianum*). Obecnie używana jest tylko nazwa Tarcza.

4. Prawa Keplera

Zarówno geocentryczny system Ptolemeusza, jak i heliocentryczny system Kopernika zakładały ruch planet po okręgach. Założenie to wymagało wprowadzania kilku okręgów dla każdej planety oraz umieszczania środków tych okręgów poza Ziemią lub Słońcem.

Wiosną 1605 r. Kepler analizował spłaszczenia orbity Marsa. Doszedł wtedy do wniosku, że ma ona kształt elipsy. Sformułował prawo zwane **I prawem Keplera**.

Kiedy planeta jest najbliżej Słońca, mówimy, że znajduje się w punkcie przysłonecznym, czyli peryhelium. Punkt, w którym planeta jest najdalej od Słońca, nazywamy punktem odsłonecznym, czyli aphelium. Orbity satelitów Ziemi nazywają się analogicznie: **perygeum** i **apogeum**. Odległość między peryhelium a aphelium nazywamy wielką osią elipsy.

Średnia odległość planety od Słońca, oznaczana literą a, jest równa:

$$a = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2}$$

czyli połowie wielkiej osi elipsy.

Kilka lat wcześniej, zimą 1601 r., Kepler analizował zmiany szybkości ruchu planet i doszedł do wniosku, który sformułował jako II prawo Keplera.

Orbity większości planet orbity mało różnią się od okręgów, zatem różnica prędkości nie jest bardzo duża. Stosunkowo łatwo można zauważyć różnice prędkości orbit Marsa i Merkurego. Prędkość Ziemi w aphelium wynosi około 29,6 km/s, a w peryhelium jest o około 1 km/s większa. Ta różnica powoduje, że na naszej półkuli zima trwa krócej niż lato. Efekt zmiennej prędkości jest wyraźniejszy dla komet, które obiegają Słońce po bardzo spłaszczonych elipsach. W peryhelium komety osiągają prędkość rzędu kilkudziesięciu lub nawet kilkuset kilometrów na sekundę, w aphelium ta prędkość spada zaledwie do kilkuset metrów na sekundę. W epopei narodowej pt. „Pan Tadeusz" Adam Mickiewicz pisze o komecie, która pojawiła się pod koniec 1811 roku. Porusza się ona po orbicie w kształcie wydłużonej elipsy. Peryhelium tej komety znajduje się w odległości nieco większej niż odległość Ziemi od Słońca, natomiast aphelium znajduje się 410 razy dalej. Na jeden obieg wokół Słońca ta kometa potrzebuje prawie 3096 lat, więc w pobliżu Słońca (i Ziemi) znajdzie się ponownie dopiero koło roku 4907. Będzie to pięćdziesiąty wiek...

Najwięcej czasu zajęło Keplerowi poszukiwanie związku między średnią odległością planety od Słońca a okresem obiegu planety wokół niego. Kepler był przekonany o istnieniu takiego związku. Uważał bowiem, że we wszystkich zjawiskach przyrody ukryte są proste zależności matematyczne. Takie poglądy wyrażali kiedyś Pitagoras i jego uczniowie.

15 maja 1618 r. Kepler znalazł wreszcie formułę wiążącą długość połowy wielkiej osi elipsy wyznaczającej orbitę planety wokół Słońca a i okres obiegu wokół niego T:

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

W tym wzorze a_1 i T_1 oznaczają odpowiednie parametry dla jednej planety (np. Ziemi), a a_2 i T_2 – parametry drugiej planety (np. Jowisza). Ta zależność nosi nazwę **III prawa Keplera**. Można je stosować do innych układów, ale trzeba pamiętać, że ciała muszą krążyć dookoła tego samego obiektu (np. księżyce Jowisza czy Marsa, księżyce planetoid).

> **Reguła: III prawo Keplera**
>
> Stosunek kwadratu okresu obiegu planety wokół Słońca do sześcianu wielkiej półosi jej orbity (czyli średniej odległości od Słońca) jest stały dla wszystkich planet w Układzie Słonecznym.

Prawa Keplera opisywały ruch planet, zmiany ich odległości od Słońca i zmiany prędkości w ruchu na orbicie i nie odnosiły się już do skomplikowanego systemu kół (deferensów i epicykli), po których miała poruszać się planeta.

Podsumowanie

- W starożytności twierdzono, że ciała niebieskie mogą się poruszać tylko ruchem doskonałym, a za taki uważano ruch jednostajny po okręgu.
- Planety poruszają się na niebie w sposób skomplikowany – zmieniają swoją prędkość, kierunek ruchu i zakreślają pętle na tle gwiazd.
- Systemy kosmologiczne mają za zadanie opisać budowę całego Wszechświata. W starożytności dominował pogląd, że w centrum świata znajduje się Ziemia, wokół niej leżą sfery, po których poruszają się Księżyc, Słońce i planety.
- System geocentryczny opisywał skomplikowane drogi planet jako wynik ruchu każdej planety po kilku okręgach jednocześnie.
- System heliocentryczny przedstawia drogi planet w stosunku do gwiazd jako wypadkową ruchu ich oraz Ziemi dookoła Słońca – ten ruch pozorny (wynikający z ruchu Ziemi) nakłada się na rzeczywisty ruch planety.
- Trzy prawa Keplera opisują ruch planet i innych ciał niebieskich dookoła Słońca. Opierają się na następujących założeniach: orbity są eliptyczne (I prawo), prędkość liniowa i kątowa jest zmienna, a prędkość polowa stała (II prawo), rozmiary orbit planet mają związek z okresem ich obiegu wokół Słońca (III prawo).

> **Praca domowa**

Polecenie 3.1

Okres obiegu Wenus po epicyklu wynosił 225 dni, a Merkurego – 88 dni. Okres obiegu planet po deferensie wynosi zaś 1 rok. Z kolei okres obiegu planet zewnętrznych (Marsa, Jowisza i Saturna) po epicyklu wynosi 1 rok, a po deferensie odpowiednio: dla Marsa – 1,88 roku, dla Jowisza – 11,8 roku, dla Saturna – 29,5 roku. Dlaczego te czasy wynosiły właśnie tyle?

Polecenie 3.2

Komety są widoczne na niebie tylko wtedy, gdy znajdują się blisko Słońca. Okres obiegu komety Halleya wokół Słońca wynosi około 76 lat. Widzimy ją jednak tylko przez kilka miesięcy. Wyjaśnij ten fakt. Skorzystaj z II prawa Keplera.

Polecenie 3.3

Średnia odległość Ziemi od Słońca wynosi 149 mln km. Wenus obiega Słońce w czasie 225 dni, a Ziemia – około 365 dni. Oblicz odległość Wenus od Słońca.

Polecenie 3.4

Odległość Jowisza od Słońca jest 5,2 razy większa niż Ziemi. Oblicz, ile trwa obieg Jowisza wokół Słońca. Wynik podaj w latach.

Słowniczek

deferens (deferent)

– okrąg, po którym porusza się środek epicyklu planety.

elipsa

– krzywa definiowana jako zbiór punktów, których suma odległości od ognisk elipsy jest stała.

epicykl

– okrąg, po którym porusza się planeta; w późniejszym okresie rozwoju astronomii uważano, że każda planeta ma kilka epicykli i porusza się po jednym z nich.

system heliocentryczny (heliocentryzm)

– układ kosmologiczny; w jego centrum znajduje się Słońce, wokół którego krążą Ziemia i inne planety. Gwiazdy nie znajdują się na powierzchni sfery, ale w różnych odległościach od Słońca. Twórcą systemu heliocentrycznego był Mikołaj Kopernik.

ogniska elipsy

– dwa punkty leżące na wielkiej osi elipsy; suma odległości od tych dwóch punktów jest stała dla wszystkich punktów elipsy.

oś wielka elipsy

– odległość między dwoma najdalszymi punktami elipsy.

peryhelium i aphelium

– punkty na orbicie okołosłonecznej; odpowiednio – najbliższy i najdalszy.

prędkość polowa

– stosunek pola zakreślonego przez promień wodzący planety do czasu, w jakim to pole zostało zakreślone (analogicznie do prędkości liniowej).

promień wodzący planety

– odcinek łączący planetę i Słońce.

system geocentryczny

– układ kosmologiczny, który zakładał, że w centrum Wszechświata umieszczona jest Ziemia, a wszystkie planety i Słońce obiegają ją po torach będących okręgami. Gwiazdy widoczne na nieboskłonie są równo oddalone od Ziemi.

Biogramy

Archimedes z Syrakuz

287 p.n.e Syrakuzy – 212 p.n.e Syrakuzy

Grecki fizyk, matematyk, filozof i wynalazca. Zajmował się również mechaniką (maszyny proste) i hydrostatyką (prawo Archimedesa). Jako matematyk znany jest ze swoich prac dotyczących geometrii (wyznaczanie powierzchni figur płaskich). Zginął z ręki legionisty po zdobyciu Syrakuz przez legiony rzymskie (II wojna punicka).

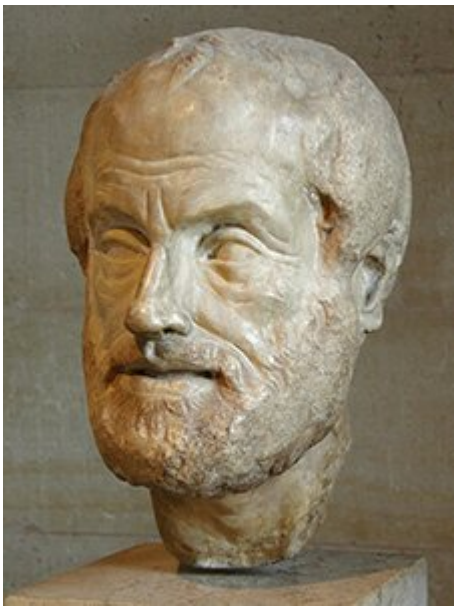
Arystarch jako pierwszy znany astronom zaproponował system heliocentryczny jako model budowy Wszechświata

Arystarch z Samos

310 p.n.e Samos – 230 p.n.e Samos

Koncepcja heliocentryzmu, którą zaproponował Arystarch, została odrzucona przez współczesnych mu astronomów. Głównym powodem były niezgodności wyników obliczeń Arystarcha z obserwacjami przeprowadzanymi przez innych starożytnych uczonych.

Arystarch – podobnie jak jego następcy – błędnie założył, że torem ruchu Ziemi wokół Słońca jest okrąg.



Źródło: Eric Gaba (http://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY-SA 2.5.

Arystoteles

384 p.n.e Stagira – 322 p.n.e Chalkis

Grecki filozof i logik, który przejawiał również zainteresowanie naukami przyrodniczymi, takimi jak biologia, fizyka i astronomia. Jako pierwszy dokonał podziału na nauki teoretyczne, praktyczne i pojetyczne. System filozoficzny, którego był twórcą, wywarł ogromny wpływ na doktrynę Kościoła katolickiego i na całą średniowieczną Europę.

Wybitny duński astronom, twórca modelu układu planetarnego w którego centrum znajdowała się wirująca Ziemia

Tycho Brahe

14.12.1546 zamek Knutstorp (Skania) – 24.10.1601 Praga

Tycho Brahe był doskonałym obserwatorem, który zasłynął z niezwykle dokładnych pomiarów położenia gwiazd i planet Układu Słonecznego. Obserwacje, które

przeprowadzał, skłoniły go do podważania założeń systemu Kopernika i wysunięcia hipotezy, że centralnym punktem Układu Słonecznego jest wirująca Ziemia, a nie – Słońce. Ani Brahme, ani Kopernik nie wiedzieli jednak, że planety poruszają się po elipsach. Bardzo precyzyjne pomiary Brahego okazały się niewystarczające, aby to stwierdzić. Jan Kepler (asystent Brahmego) wykorzystał te wyniki i na ich podstawie sformułował prawa ruchu planet w modelu heliocentrycznym, w pełni zgodne z danymi doświadczalnymi uzyskanymi przez Brahego. Te prawa są nazywane dzisiaj trzema prawami Keplera.

Galileusz – pierwszy nowożytny fizyk

Galileo Galilei

15.02.1564 Piza – 08.01.1642 Arcetri

Galileusz był typowym przedstawicielem renesansu – interesował się matematyką, fizykę, astronomią, polityką i medycyną. Typowemu nauczaniu scholastycznemu przeciwstawiał poznanie empiryczne i doświadczenie. Był zwolennikiem teorii heliocentrycznej Kopernika, zwalczanej przez Kościół. Rewolucyjne poglądy Galileusza nie przysporzyły mu wielu sympatyków. Uczony szybko wszedł w konflikt ze Świętą Inkwizycją, co skończyło się karą pozbawienia wolności na wiele lat i wymuszeniem odwołania głoszonych przez siebie tez.

Jeden ze współtwórców systemu geocentrycznego

Hipparch z Nikei

190 p.n.e Nikeia – 120 p.n.e Rodos

Hipparch w swoich pracach analizował ruchy planet i na podstawie swoich obserwacji wprowadził epicykle i deferenty jako element opisu tych ruchów. Te zjawiska stały się punktem wyjścia do dalszych badań prowadzonych przez Ptolemeusza. Zainteresowania Hipparacha nie ograniczały się do astronomii – zajmował się on również trygonometrią i kartografią.

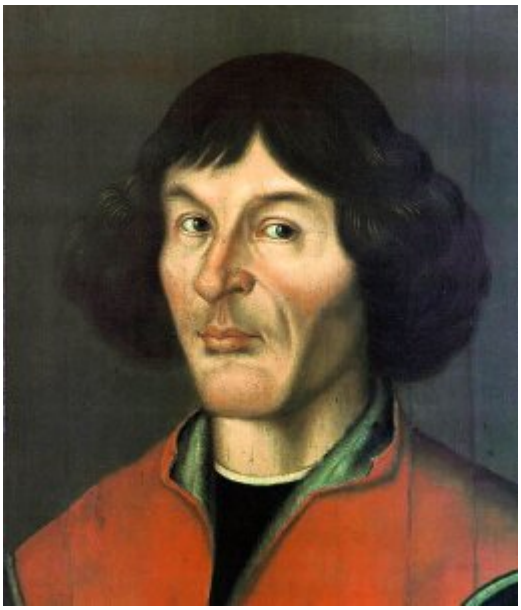
Jeden z twórców XVII w. rewolucji naukowej w Europie

Jan Kepler

27.12.1571 Weil der Stadt – 15.11.1630 Ratyzbona

Jan Kepler interesował się głównie matematyką i astronomią. Jego największym odkryciem, ktore przyczyniło się do rozwoju nauki, były prawa rządzące ruchem planet. Dziś te prawa

są znane jako trzy prawa Keplera. Uczony dał się również poznać jako zagorzały obrońca systemu kopernikańskiego (praca z zakresu astronomii pt. „*Mysterium Cosmographicum*").

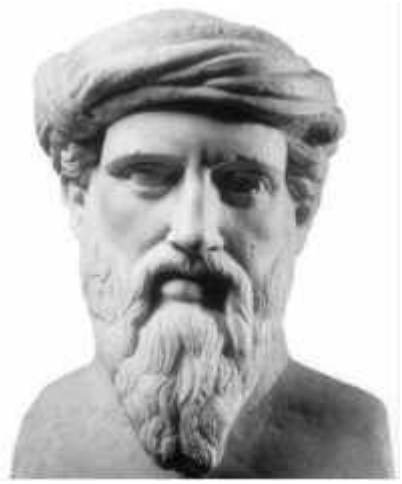


Mikołaj Kopernik – ten, który wstrzymał Słońce, a poruszył Ziemię

Mikołaj Kopernik

19.02.1473 Toruń, Polska – 21.05.1543 Frombork

Mikołaj Kopernik był synem kupca Mikołaja i Anny z rodu Watzenrode. Ojciec Kopernika zmarł, gdy chłopiec miał 10 lat. Opiekę nad nim przejął wuj – biskup warmiński Łukasz Watzenrode. Mikołaj uczęszczał do szkoły przykatedralnej najpierw w Toruniu, a następnie we Włocławku. W latach 1491–95 studiował na Wydziale Sztuk Wyzwolonych Akademii Krakowskiej. Dzięki studiom zdobył wiedzę z astronomii, matematyki i fizyki (zwłaszcza z optyki). W 1496 roku wyjechał do Włoch – w Bolonii studiował prawo kanoniczne (do 1500 r.). Po krótkim pobycie w Rzymie wyjechał do Padwy, gdzie rozpoczął studia medyczne. W 1503 r. powrócił do Polski i przebywał głównie na Warmii. Prowadził obserwacje astronomiczne na zamku w Olsztynie. Do dziś zachowała się tzw. tablica kopernikańska – pozostałość po badaniach nad wyznaczeniem daty równonocy. Wyniki tych obserwacji przyczyniły się do reformy kalendarza (zamiast juliańskiego zaczął obowiązywać gregoriański). Kopernik interesował się też ekonomią; sformułował prawo, że gorszy pieniądz jest wypierany przez lepszy pieniądz. Najbardziej znane dzieło Kopernika nosiło pierwotnie tytuł „O obrotach", jednak wydawca zmienił go na „O obrotach sfer niebieskich" w obawie przed rewolucyjnymi poglądami zawartymi w tej publikacji. System opisany przez Kopernika był heliostatyczny (z nieruchomym Słońcem), a nie heliocentryczny. W tym systemie środki kołowych orbit planet znajdowały się w różnych odległych punktach.



Pitagoras znany jest nie tylko ze swojego twierdzenia matematycznego (twierdzenia Pitagorasa)

Pitagoras

572 p.n.e Samos lub Sydon – 497 p.n.e Metapont

Grecki filozof i matematyk. Twórca szkoły pitagorejskiej (529 r. p.n.e.), która była zamkniętym stowarzyszeniem mistycznym. Pitagoras uważał, że wszechświat jest uporządkowany i harmonijny (harmonia sfer). Interesował się nie tylko matematyką, którą uważał za uniwersalny język opisu świata, lecz także muzyką (wynalazł skalę muzyczną). Był wyznawcą orfizmu.

Sformułował matematyczne podstawy systemu geocentrycznego

Klaudiusz Ptolemeusz

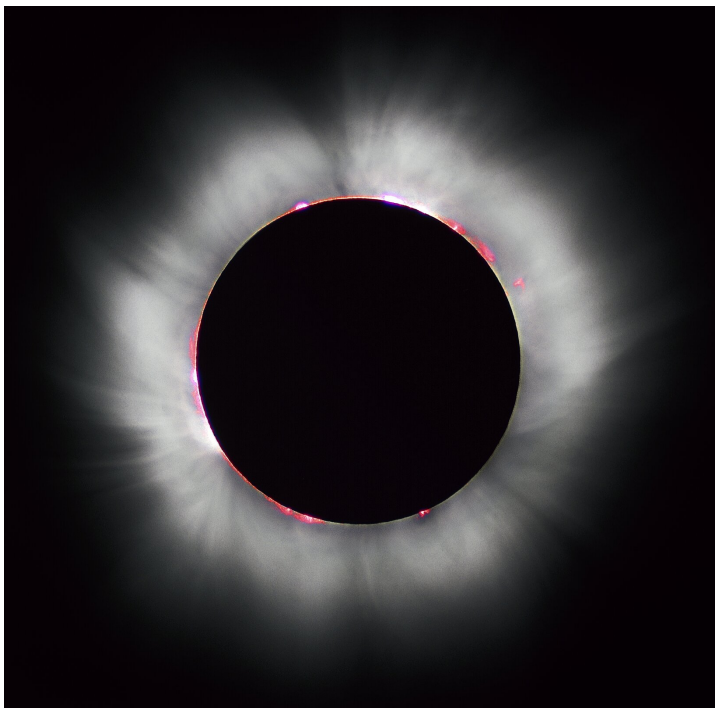
100 Tebaida (prawdopodobnie) – 168

Astronom, geograf i fizyk pochodzenia greckiego. Prowadził badania w Aleksandrii, w II w. n. e. znajdującej się pod władaniem Cesarstwa Rzymskiego. W swoim trzynastotomowym dziele „Almagest" zawarł podstawy matematyczne systemu geocentrycznego. Do czasu wydania pracy „O obrotach" Mikołaja Kopernika (co miało miejsce kilkanaście stuleci później) poglądy Ptolemeusza całkowicie zdominowały sposób pojmowania rzeczywistości,

a „Almagest” stał się głównym argumentem w zwalczaniu innych systemów kosmologicznych.

Jak daleko jest do planet, Słońca i gwiazd?

Kiedy patrzymy na niebo, to odnosimy wrażenie, że wszystkie obiekty, które na nim widzimy znajdują się w jednakowej odległości od Ziemi. Już w starożytności przyjmowano, że wszystkie obiekty widoczne na niebie leżą na powierzchni sfery niebieskiej. Ówcześni badacze uważali, że między sferą gwiazd stałych a Ziemią krążą ciała niebieskie, takie jak planety, Słońce i Księżyc. Ten ostatni często zakrywał gwiazdy, więc musiał być bliżej. Komety przez wiele stuleci uważano za obiekty występujące w atmosferze Ziemi (tzw. wyziewy Ziemi, które były groźne dla człowieka, ponieważ niosły za sobą zarazy, głód i wojny). Jak dzisiaj wyznaczamy odległości w kosmosie? Odpowiedź na to pytanie będzie tematem tej lekcji.



Podczas niektórych zaćmień całkowitych Słońca obserwator na Ziemi ogląda tarczę Księżyca idealnie zakrywającą tarczę Słońca. Dzięki temu możliwe jest obserwowanie korony słonecznej, czyli najbardziej zewnętrznej części atmosfery słonecznej

Już potrafisz

- rozpoznawać kąty wierzchołkowe i kąty przyległe oraz korzystać z ich właściwości;
- rozpoznawać trójkąty ostrokątne, prostokątne i rozwartokątne, a także równoboczne oraz równoramienne;
- stosować twierdzenie o sumie kątów trójkąta.

Nauczysz się

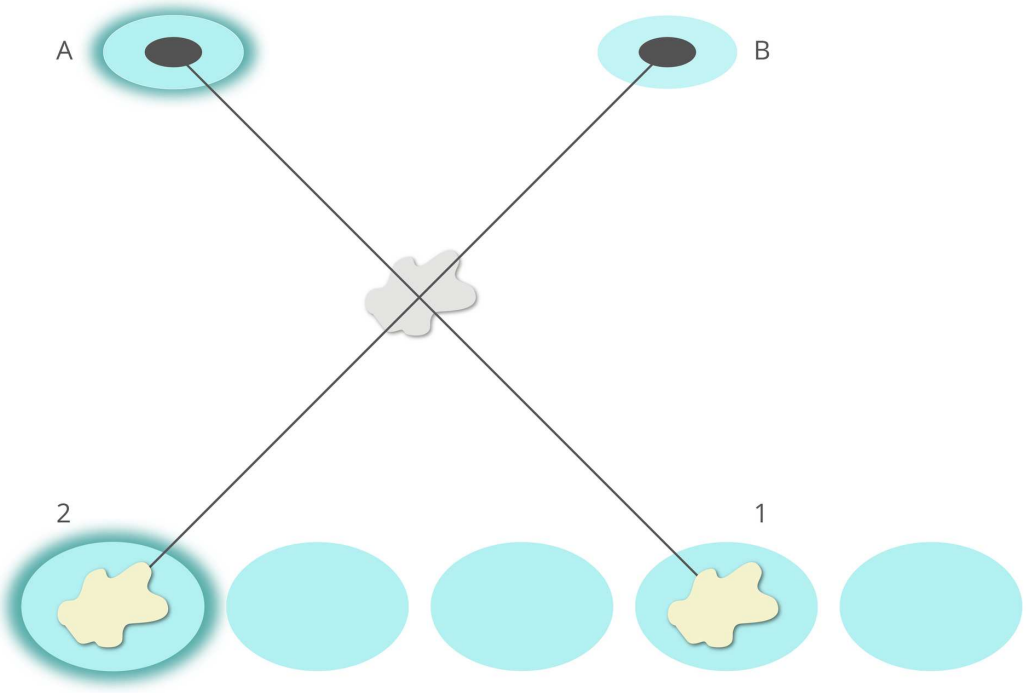
- wyznaczać odległości do oddalonych punktów z wykorzystaniem zjawiska paralaksy;
- interpretować rok świetlny jako jednostkę odległości;

- posługiwać się jednostką astronomiczną do opisu odległości w Układzie Słonecznym.

1. Na czym polega zjawisko paralaksy

Skąd wiemy, jak daleko od nas znajduje się jakaś rzecz? Pomińmy przedmioty znjdujące się w naszym najbliższym otoczeniu i zajmijmy się oceną odległości od domów, drzew, samolotów. Wykorzystujemy tu właściwości atmosfery i oka – im dalej znajduje się dany obiekt, tym bardziej jest on zamglony. Ma również mniejsze rozmiary kątowe. Jeśli przedmiot znajduje się blisko nas, widzimy dużo szczegółów, jeśli daleko – tylko ogólny zarys. Na ogół widujemy przedmioty i z bliska, i z daleka, dzięki czemu mamy skalę porównania. Brakuje nam jej jednak w odniesieniu do Księżyca, Słońca i gwiazd, gdyż są one one zbyt daleko. Gwiazdy (poza Słońcem) widzimy jako punkty niezależnie od tego, w jakiej odległości się od nas znajdują. Warto wspomnieć, że głównymi przeszkodmi w rozwoju astronomii obserwacyjnej były: brak możliwości pomiaru odległości i nieuwzględnienie skutków ruchu obrotowego Ziemi.

W wyznaczaniu odległości pomocne okazało się zjawisko paralaksy. Na rysunku poniżej widać, że gdy patrzymy z punktu A, chmurkę widzimy w miejscu, oznaczonym jako 1, a gdy patrzymy z punktu B – widzimy ją w zupełnie innym miejscu (oznaczonym jako 2). Przesunięcie obserwatora z punktu A do B powoduje przesunięcie obrazu obiektu oglądanego przez tego obserwatora z położenia 1 do 2.



Gdy przesuwamy się z punktu A do punktu B, to przedmiot obserwacji ulega pozornemu przemieszczeniu (w stosunku do przedmiotów bardziej oddalonych)

To zjawisko przeważnie jest niekorzystne. Jest np. źródłem błędu odczytu wielkości fizycznych za pomocą mierników wskazówkowych. Gdy odczytujemy położenie wskazówki na tle skali, to oko umieszczone w punkcie A widzi inną wartość niż oko znajdujące się w położeniu B. Podobny błąd popełniamy, kiedy odczytujemy temperaturę na skali termometru.

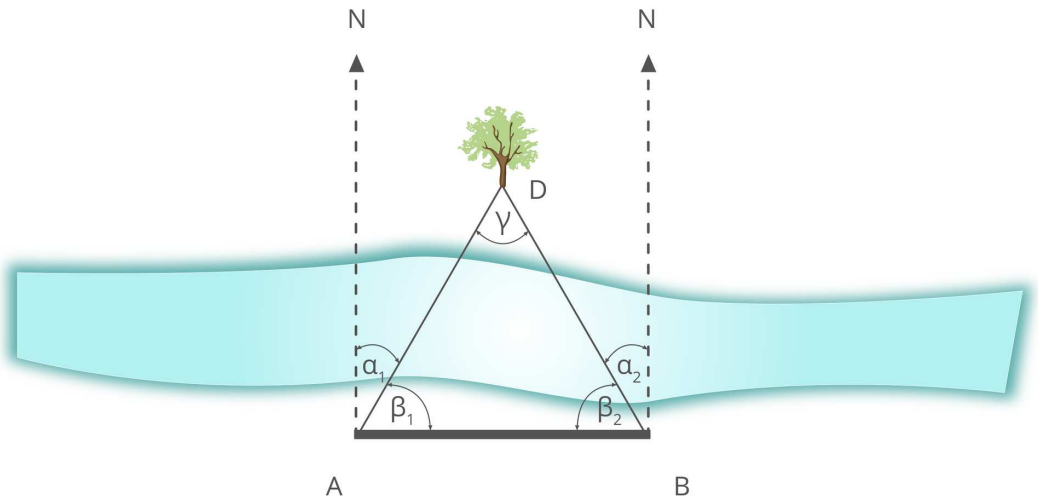
Błąd spowodowany zjawiskiem paralaksy pojawia się również w niektórych aparatach fotograficznych – zarejestrowany obraz jest przesunięty w stosunku do tego, co widzieliśmy w wizjerze.

> **Polecenie 1**
>
> Jak powinno być ustawione oko, aby w wyniku zjawiska paralaksy nie doszło do błędnego odczytu położenia wskazówki miernika? Uzasadnij odpowiedź.

Przesunięć gwiazd, które znajdują się bliżej Ziemi w stosunku do tych bardziej oddalonych spodziewano się od momentu ogłoszenia teorii Kopernika. W wyniku ruchu Ziemi dookoła Słońca powinniśmy obserwować przesuwanie się bliższych gwiazd na tle dalszych. Jednak niczego takiego w tamtych czasach nie stwierdzono. Dlaczego?

Przyjrzyjmy się uważnie rysunkowi powyżej. Gdyby przyjąć, że odległość AB to średnica orbity Ziemi (czyli – w ujęciu teorii Kopernika – okręgu, po jakim nasza planeta porusza się dookoła Słońca), to przesunięcie ciała niebieskiego (naszej chmurki) na tle oddalonego obiektu jest tym mniejsze, im dalej ten obiekt się od nas znajduje. Przy bardzo dużych odległościach przesunięcie będzie niemierzalne. Wszystko zależy więc od dokładności pomiarowej użytych przyrządów (a ściślej – dokładności pomiaru małych kątów).

2. Co nam daje znajomość geometrii, czyli jak zmierzyć odległość do obiektów, do których nie można dotrzeć?



Jak wyznaczyć odległość do drzewa?

Po drugiej stronie rzeki znajduje się drzewo. W jakiej odległości od nas się ono znajduje?

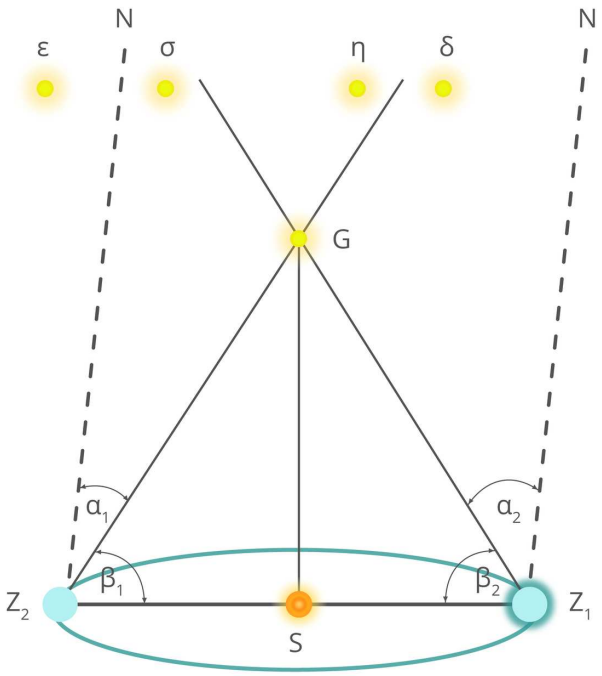
Na brzegu rzeki, na którym stoimy, wyznaczamy tzw. bazę AB – odcinek o długości kilkunastu lub kilkudziesięciu metrów (im dalej od nas znajduje się drzewo, tym dłuższy powinien być ten odcinek).
Kiedy znajdujemy się w punkcie A, mierzymy kąt między kierunkiem północym a kierunkiem, w jakim spoglądamy patrząc na drzewo. Czynność tę powtarzamy, kiedy znajdujemy się w punkcie B. Kierunek północny wyznaczony w punkcie A jest równoległy do kierunku północnego wyznaczonego w punkcie B; oba te kierunki są prostopadłe do odcinka AB. Ten ostatni warunek nie jest konieczny, ale ułatwi rozumowanie tym, którzy jeszcze nie polubili geometrii.
Z pomiarów znamy wartości kątów α_1 i α_2. Z prostych zależności obliczamy wartości kątów β_1 i β_2 w trójkącie ABD i wartość kąta γ. Znamy zatem wartości wszystkich kątów w tym trójkącie i długość jednego boku. Pozwala to obliczyć długości pozostałych boków.

> **Polecenie 2**
>
> Wartości kątów α_1 i α_2 wynoszą odpowiednio 40° i 30°. Oblicz wartości wszystkich kątów w trójkącie ABD.
> Rachunki nie są skomplikowane – nadmieniamy tylko, że kąt γ ma miarę 70°.

3. A gdzie w tym wszystkim jest paralaksa?

No właśnie, pisaliśmy o pomiarze odległości do drzewa, a gdzie w tym wszystkim są paralaksa i gwiazdy?

Zacznijmy od powszechnie znanego faktu, że Ziemia krąży wokół Słońca (mamy nadzieję, że zaczęliście już obserwować nocne niebo i wiecie, które gwiazdozbiory są widoczne na jego południowej stronie. Dalsze obserwacje pozwolą wam się przekonać, że Ziemia naprawdę krąży wokół Słońca).



Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Jak widać, gwiazda G w wyniku obiegu Ziemi dookoła Słońca stanie się widoczna obok gwiazdy σ (sigma), gdy Ziemia znajdzie się w punkcie Z_1 orbity, oraz między gwiazdami η (eta) i δ (delta), gdy będzie w położeniu Z_2 na orbicie. Takie zjawisko można zaobserwować w rzeczywistości.

> **kąt paralaksy**
>
> – kąt, pod którym z danej gwiazdy widoczna byłaby wielka półoś (czyli w uproszczeniu promień albo średnia odległość od Słońca) orbity Ziemi.

Niestety, jest pewien problem: aby skorzystać z tej definicji i zmierzyć kąt paralaksy, należałoby polecieć tam, gdzie ta gwiazda się znajduje. Od najbliższej (poza Słońcem) gwiazdy światło biegnie do Ziemi przez ponad 4 lata, a obecna technika pozwalałaby odbyć taką podróż w czasie dziesiątków tysięcy lat. Na szczęście nie musimy nigdzie lecieć, ponieważ pomiaru możemy dokonać z Ziemi.

> **Polecenie 3**
>
> Wykorzystaj powyższy rysunek i właściwości geometryczne trójkąta oraz prostych równoległych i wykaż, że kąt paralaksy p można obliczyć ze wzoru:
>
> $$p = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}$$

Aby zmierzyć kąt paralaksy dla gwiazd, trzeba było czekać do połowy XIX wieku – dopiero w 1839 r. w kilku miejscach zmierzono wartości kątów paralaksy dla kilku gwiazd. Pomiary paralaksy są bardzo żmudnym zajęciem. W latach 1989–93 satelita ESO (Europejskiej Agencji Kosmicznej) Hipparcos (nazwany na cześć astronoma Hipparcha) dokonał pomiarów paralaksy dla około 2,5 miliona gwiazd. Oprócz astrometrii satelita realizował również program fotometryczny (pomiary natężenia światła pochodzącego od gwiazd). Wykrył duże liczby gwiazd podwójnych, a także zbadał zmiany promieniowania tysięcy gwiazd zmiennych. Do wyznaczenia paralaks potrzebna była dokładność rzędu 0,001 sekundy łuku. Aby wyobrazić sobie, jaka to wartość, wystarczy przypomnieć, że kątowe średnice Słońca lub Księżyca na niebie wynoszą w przybliżeniu około pół stopnia, czyli 1800 sekund kątowych.

Dlaczego tak trudno było wyznaczyć kąt paralaksy? Odległości do gwiazd okazały się znacznie większe, niż przypuszczano. Paralaksa najbliższej (poza Słońcem) gwiazdy wynosi około 0,78” (sekundy). Jest to gwiazda o nazwie Proxima Centauri. Słowo „Proxima” oznacza po prostu „najbliższa”. Ta gwiazda znajduje się na południowej półkuli nieba, w gwiazdozbiorze Centaura. Razem z podwójną gwiazdą α Centaura tworzy układ potrójny gwiazd.

Pomiar paralaksy kilku najbliższych gwiazd (W. Struve, F. Bessel, T. Henderson) spowodował zdjęcie dzieła Kopernika z indeksu ksiąg zakazanych.

Wyznaczenie pierwszych paralaks dla gwiazd nie było jednak jedynym dowodem na ruch Ziemi dookoła Słońca. Ponad sto lat wcześniej, w latach 1725–26, odkryto i wyjaśniono zjawisko aberracji światła gwiazd. Dokonał tego James Bradley.

4. Jakich jednostek używamy do opisu odległości gwiazd i planet?

Do opisu odległości astronomowie używają jednostki związanej bezpośrednio z kątem paralaksy. Ta jednostka to parsek (1 pc), a jego definicja jest bardzo prosta:

$$D\Big(\text{odległość w parsekach}\Big) = \frac{1}{p''}$$

Przykładowo: paralaksa Proximy wynosi 0,78", zatem jej odległość od Ziemi to:

$$\frac{1}{0{,}78} \;=\; 1{,}28 \;\text{pc}$$

Jest to wygodna jednostka – w dwie najbliższe nam gwiazdy (Słońce i Proxima) są odległe od siebie ok. 1 parsek. Używane są też wielokrotności tej jednostki: kiloparsek (kpc) i megaparsek (Mpc).

Dzięki trygonometrii, którą niedługo poznasz w szkole, można obliczyć, ile kilometrów mieści się w jednym parseku. Otrzymujemy ogromną liczbę, tj. $3{,}086 \cdot 10^{13}$ km lub $3{,}086 \cdot 10^{16}$m. Oznacza to, że odległość do Proximy wynosi około 4022 bilionów km.

Popularną jednostką używaną w artykułach popularnonaukowych jest jeden rok świetlny (1 ly – skrot od słów *light year*). Jest to odległość, jaką światło przebywa w próżni w ciągu roku. Łatwo obliczyć, że jest to odległość... Ale może obliczycie ją sami?

> **Polecenie 4**
>
> Oblicz, ile kilometrów i metrów ma 1 rok świetlny oraz ile lat świetlnych to jeden parsek.

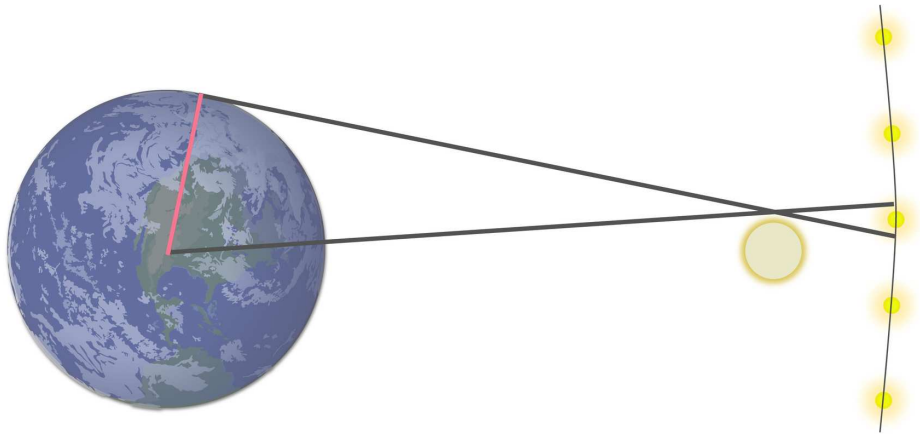
Wiemy już, jak wyznaczyć odległość do gwiazd. Przyrządy satelity Hipparcos pozwalają wyznaczyć odległość z dokładnością do 1000 pc. Galaktyka jest jednak znacznie większa; znacznie większa jest także odległość do innych galaktyk. Jak się wyznacza tak ogromne odległości? Wspomnimy o tym w dalszej części podręcznika.

A Układ Słoneczny? Czy do wyznaczania odległości można wykorzystać inne metody? Odkrycie trzech praw Keplera opisujących ruch planet (zwłaszcza III prawa) pozwoliło obliczyć odległości od planet do Słońca. Przyjmijmy przy tym, że jednostka odległości równa 1 odpowiada odległości między Ziemią a Słońcem. Taką jednostkę nazywamy jednostką astronomiczną. Jej wartość wynosi 149 600 000 km. Jednostkę astronomiczną oznaczamy jako AU (Astronomical Unit). 1 parsek jest równy 206 265 AU.

> **Polecenie 5**
>
> Pełen obieg Marsa wokół Słońca wynosi 1,88 roku (ziemskiego). Oblicz odległość od Słońca do Marsa. Wynik podaj w jednostkach astronomicznych i kilometrach: podczas obliczeń warto skorzystać z kalkulatora naukowego lub arkusza kalkulacyjnego.

A jak wyznaczyć odległość z Ziemi do Księżyca? Opisane metody nie znajdują tu zastosowania. Jednak Księżyc znajduje się stosunkowo blisko Ziemi, która jest kilka razy od

niego większa. Można zatem wykorzystać pomiary wykonywane na Ziemi. W tym celu posługujemy się zjawiskiem paralaksy geocentrycznej.



Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

W tym samym momencie tarczę Księżyca inaczej widzi obserwator, dla którego Księżyc znajduje się w płaszczyźnie horyzontu, a inaczej obserwator, dla którego Księżyc jest w zenicie. Wyznaczenie kątów w sposób podobny jak dla paralaksy heliocentrycznej pozwala wyznaczyć odległość do Księżyca.

Obecnie odległość do Księżyca wyznacza się za pomocą zjawiska odbicia światła laserowego wysłanego z Ziemi i odbitego od specjalnych odbłyśników umieszczonych na powierzchni naszego naturalnego satelity, m.in. dzięki wyprawom kosmicznym. Orbita Księżyca jest orbitą eliptyczną. Minimalna odległość od Księżyca do Ziemi wynosi 364 400 km (odległość w perygeum), a maksymalna 406 700 km (odległość w apogeum). Połowa wielkiej osi elipsy wynosi około 384 700 km.

Podsumowanie

- Zjawisko paralaksy heliocentrycznej (czyli pozornego przesuwania się gwiazd znajdujących się bliżej Ziemi w stosunku do tych dalszych, co jest wynikiem zmiany położenia obserwatora) pozwoliło potwierdzić teorię Kopernika i wyznaczyć odległości do najbliższych gwiazd.

- W astronomii używane są różne jednostki, za pomocą których wyraża się odległość do gwiazd lub planet. W Układzie Słonecznym najwygodniejszą jednostką jest jednostka astronomiczna (1 AU), równa średniej między Ziemią a Słońcem, czyli 149 mln 600 000 km. Astronomowie używają jednostki zwanej parsekiem (skrót od wyrażenia **par**alaksa **sek**undowa). Kąt paralaksy dla gwiazdy odległej o 1 parsek (1 pc) wynosiłby 1". W życiu codziennym często używa się jednostki zwanej rokiem świetlnym (1 ly). Jest to odległość, jaką światło przebywa w próżni w ciągu jednego roku.
- Do wyznaczenia odległości obiektów znajdujących się stosunkowo blisko Ziemi, takich jak Księżyc czy planety Układu Słonecznego, wystarczają dwa punkty na Ziemi. Zmiana położenia obserwatora o kilka czy kilkanaście tysięcy kilometrów wystarczy do wykazania zjawiska paralaksy i wyznaczenia odległości.

Praca domowa

Polecenie 6.1

Znajdź w Internecie hasło „aberracja światła" i zapoznaj się z opisem tego zjawiska.

Polecenie 6.2

Dopiero w 1839 r. trzej astronomowie (niezależnie od siebie) zmierzyli pierwsze paralaksy gwiazd. Byli to: Wilhelm Struve, który w Dorpacie wyznaczył paralaksę Wegi, Friedrich Bessel, który w Królewcu zmierzył paralaksę gwiazdy 61 Cygni, i Thomas Henderson, który w latach 1832–33 w Kapsztadzie dokonywał pomiarów współrzędnych gwiazdy alfa Centauri.

1. Paralaksa roczna gwiazdy 61 Cygni wynosi 0,29". Oblicz odległość od Ziemi do tej gwiazdy w latach świetlnych.

2. Odległość dzieląca Ziemię od Wegi wynosi 25,3 roku świetlnego. Oblicz paralaksę tej gwiazdy.

3. Zapisz polskie nazwy gwiazdozbiorów, do których należą wymienione gwiazdy.

Polecenie 6.3

Pełen obieg Saturna wokół Słońca trwa 29,5 roku. Oblicz, ile razy średnia odległość od Saturna do Słońca jest większa niż odległość od Ziemi do Słońca.

Słowniczek

aberracja światła gwiazd

– pozorna zmiana położenia ciała (planety, gwiazdy) na sferze niebieskiej, spowodowana ruchem obiegowym Ziemi.

jednostka astronomiczna (1 AU)

– połowa wielkiej osi elipsy, po której krąży Ziemia dookoła Słońca; inaczej – średnia odległość od Ziemi do Słońca, wynosząca 149 600 000 km.

paralaksa (zjawisko)

– pozorne przesuwanie się obiektów bliższych w stosunki do dalszych w wyniku zmiany położenia obserwatora; poza astronomią to zjawisko istotne także w miernictwie i fotografii.

paralaksa heliocentryczna

– połowa kąta, o jaki przesunie się gwiazda na sferze niebieskiej podczas przejścia Ziemi z jednego punktu orbity okołosłonecznej na przeciwległy punkt tej orbity; inaczej – kąt, pod jakim z danej gwiazdy byłaby widziana połowa wielkiej osi elipsy, po której krąży Ziemia (średnia odległość między Ziemią a Słońcem).

parsek

– jednostka odległości używana w astronomii; jeden parsek równy jest odległości od Ziemi do gwiazdy, której paralaksa roczna położenia Ziemi wynosi 1″ (jedną sekundę kątową).

rok świetlny

– odległość, którą światło przebywa w próżni w ciągu 1 roku.

sekunda kątowa, minuta kątowa

– kąt pełny dzieli się na 360 stopni, jeden stopień – na 60 minut, a każda minuta kątowa – na 60 sekund kątowych; ze względu na podobieństwo nazw „minuta” i „sekunda” używanych jako jednostki czasu należy używać pełnych nazw, a więc: minuta kątowa, sekunda kątowa; minuty kątowe zapisuje się za pomocą znaku ′ (np. 1′), natomiast sekundy kątowe – za pomocą znaku ″ (np. 1″).

Biogram

James Bradley, astronom angielski, który dokonał dwóch fundamentalnych odkryć: aberracji światła (1725–1728) oraz zaburzenia ruchu osi Ziemi pod wpływem oddziaływania grawitacyjnego Księżyca – nutacji (1728–1748)

James Bradley

1693–13.07.1762

Bradley odkrył zmiany położenia gwiazd na niebie, przy czym te zmiany były dostrzegalne po upływie 1 roku. Ponadto badacz otrzymał jednakowe wyniki dla wszystkich gwiazd, które obserwował, zatem obserwowane zjawisko nie mogło być efektem paralaksy rocznej. Bradley interpretował je jako proces wynikający ze skończonej prędkości światła. W ten sposób wykazał dwie rzeczy: że Ziemia krąży dookoła Słońca i że prędkość światła jest skończona. W 1742 r. James Bradley uzyskał tytuł astronoma królewskiego i do końca życia pracował oraz mieszkał w obserwatorium w Greenwich.

Ruch jednostajny po okręgu

Ruch jednostajny po okręgu od wieków uważano za najdoskonalszą formę ruchu. Arystoteles sądził, że okrąg jest figurą doskonałą, a natura ruchu po okręgu – boska. Dzisiaj nikt chyba tak nie myśli. Ta lekcja pozwoli Ci zrozumieć prawdziwą naturę ruchu, która wyłania się z praw fizyki.

Klasycznym przykładem ruchu po okręgu jest karuzela łańcuchowa. Parametry ruchu obrotowego krzesełka z jego pasażerem będą się zmieniać, ale sam pasażer siedzący w krzesełku zawsze będzie krążył po okregu.

Już potrafisz

- obliczać obwód okręgu o promieniu r (obwód = $2\pi r$);
- obliczać prędkość ciała ze wzoru $v = \frac{s}{t}$ i wyrażać ją w różnych jednostkach;
- opisać ruch jednostajny prostoliniowy jako taki, w którym prędkość jest stała, a torem jest linia prosta.

Nauczysz się

- podawać znaczenie pojęć: „prędkość liniowa”, „okres obiegu” i „częstotliwość obiegu”;
- obliczać wartości tych wielkości;
- opisywać ruch jednostajny po okręgu jako ruch, w którym prędkość jest stała, torem jest okrąg, a kierunek prędkości zmienia się w czasie.

1. Ruch jednostajny po okręgu

Na lekcjach fizyki w gimnazjum omówione zostały szczegółowo zagadnienia dotyczące ruchu jednostajnego prostoliniowego i jednostajnie przyspieszonego. Tory, po których poruszają się ciała, mogą być jednak w rzeczywistości znacznie bardziej złożone. Gdy jedziemy autobusem do szkoły, poruszamy się po linii krzywej, której poszczególne odcinki są zwykle łukami zakrętów, prostymi i – jak dzieje się podczas pokonywania ronda – okręgami.

Torem ruchu samochodu poruszającego się po rondzie jest okrąg

Podobnie poruszają się poszczególne punkty obracających się ciał: Ziemi, bębna w pralce, wskazówek zegara, kół samochodu podczas jazdy. O ruchu obrotowym będziecie się uczyć w części rozszerzonej. Dobrym przykładem ruchu ciał po okręgu jest ruch krzesełka karuzeli czy ruch niektórych ciał niebieskich. Po okręgach poruszają się tzw. satelity stacjonarne.

Ruch punktu po okręgu charakteryzują pewne wielkości fizyczne, tj. **okres**, **częstotliwość** i **prędkość**.

> **okres (*T*)**
>
> – czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego obiegu po okręgu; jednostką okresu jest sekunda (s).
>
> **częstotliwość (*f*)**
>
> – liczba obiegów po okręgu wykonanych w czasie 1 sekundy; jednostką częstotliwości jest herc (Hz).
>
> **herc (Hz)**
>
> – jednostka miary częstotliwości w układzie SI; $1\ \mathrm{Hz} = \frac{1}{1\ \mathrm{s}} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$.
>
> **Zapamiętaj!**

> Częstotliwość poruszającego się ciała wynosi 1 Hz, jeśli w czasie jednej sekundy wykonuje ono jeden obieg po okręgu.

Nazwa jednostki częstotliwości pochodzi od nazwiska odkrywcy fal elektromagnetycznych – Heinricha Hertza.

> **Przykład 1**
>
> Koło samochodu o średnicy ok. 40 cm wykonuje 960 obrotów na minutę. Oblicz okres i częstotliwość ruchu okrężnego, jaki wykonuje liść przyklejony do opony.
> **Dane:**
> $n = 960$
> $t = 1\ \text{min} = 60\ \text{s}$
>
> **Szukane:**
> $T = \ ?$
> $f = \ ?$
>
> **Wzory:**
> $T = \frac{t}{n}$
> $f = \frac{n}{t}$
> **Obliczenia:**
>
> $T = \frac{60\ \text{s}}{960} = \frac{1}{16}\text{s} = 0{,}0625\ \text{s}$
>
> $f = \frac{960}{60\ \text{s}} = 16\ \text{Hz}$
>
> **Odpowiedź:**
> Czas jednego obiegu, jaki liść wykonuje wraz z obracającym się kołem samochodu (okres obiegu) wynosi $0{,}0625$ s. Liść wykonuje 16 obiegów w ciągu jednej sekundy.

Zwróć uwagę, że otrzymane wyniki można zapisać jako liczby odwrotne. **Mówimy, że częstotliwość jest odwrotnością okresu.**
$f = \frac{1}{T}$

Ćwiczenie 1

Przed przystąpieniem do rozwiązywania zadania przygotuj kartkę papieru i przybory do pisania. Może przydać się również kalkulator.
Krzesełko karuzeli wykonuje 12 obrotów w czasie 1 minuty. Okres i częstotliwość obrotów są odpowiednio równe:

- [ ] $T = 0{,}2\ \mathrm{s},\ f = \frac{1}{5}\ \mathrm{Hz}.$
- [ ] $T = 0{,}2\ \mathrm{Hz},\ f = \frac{1}{5}\ \mathrm{s}.$
- [ ] $T = \frac{1}{5}\ \mathrm{s},\ f = 0{,}5\ \mathrm{Hz}.$
- [ ] $T = \frac{1}{5}\ \mathrm{s},\ f = 0{,}2\ \mathrm{Hz}.$
- [ ] $T = 5\ \mathrm{Hz},\ f = 0{,}5\ \mathrm{s}.$
- [ ] $T = 5\ \mathrm{s},\ f = \frac{1}{5}\ \mathrm{Hz}.$
- [ ] $T = 5\ \mathrm{s},\ f = 0{,}2\ \mathrm{Hz}.$
- [ ] $T = 5\ \mathrm{s},\ f = 0{,}5\ \mathrm{Hz}.$

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

W ruchu jednostajnym prostoliniowym ciało porusza się ze stałą prędkością, a jej punkt przyłożenia, kierunek, zwrot i wartość nie ulegają zmianie. Czy prędkość, rozumiana jako wielkość wektorowa, będzie się zmieniać, jeśli torem ruchu stanie się okrąg, a wartość prędkości będzie stała?
Uruchom symulację.

Zasób interaktywny dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/D1g6fC8Yz

Prędkość w ruchu po okręgu

Za pomocą myszki umieść żeton na obracającej się płycie. Następnie naciśnij przycisk: „Pokaż wektor prędkości” i obserwuj jego zachowanie. Zmień położenie żetonu. Ponownie wybierz opcję „Pokaż wektor prędkości”. Czynność powtórz trzykrotnie. Możesz także zmienić prędkość wirowania płyty za pomocą suwaka i ponownie przyjrzeć się wektorowi prędkości żetonu.

Ćwiczenie 2.1

Uzupełnij luki po wykonaniu poleceń.

W ruchu po okręgu o stałym promieniu i stałej liczbie obrotów tarczy w jednostce czasu, nie zmienia się [ ] prędkości liniowej owada oraz [ ]. Kierunek i zwrot prędkości [ ]. Wektor prędkości owada jest [ ] do okręgu, po którym porusza się ciało. Przy stałej liczbie obrotów tarczy w jednostce czasu prędkości wirowania, wartość prędkości, widoczna jako długość wektora, [ ] od promienia okręgu. Im ciało znajduje się dalej od środka okręgu, tym wartość jego prędkości [ ]. Wartość prędkości liniowej jest [ ] proporcjonalna do promienia okręgu.

zmieniają się | jest większa | równoległy | zależy | wprost | styczny | nie zmienia się | wartość | jest mniejsza | nie zależy | odwrotnie | kierunek | punkt przyłożenia | są stałe | zwrot

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Prędkość, którą rozważaliśmy, jest nazywana **prędkością liniową**.

> **prędkość liniowa**
>
> – prędkość styczna do okręgu w każdym punkcie; jej kierunek i zwrot się zmieniają.

Wróćmy do ruchu jednostajnego prostoliniowego. Jeśli chcemy obliczyć wartość prędkości w tym ruchu, wystarczy, że podzielimy przebytą drogę przez czas trwania ruchu:

$$v = \frac{s}{t}$$

W ruchu jednostajnym po okręgu o promieniu r przebyta droga podczas jednego obiegu jest równa obwodowi tego okręgu, czyli:

$$s = 2\pi r$$

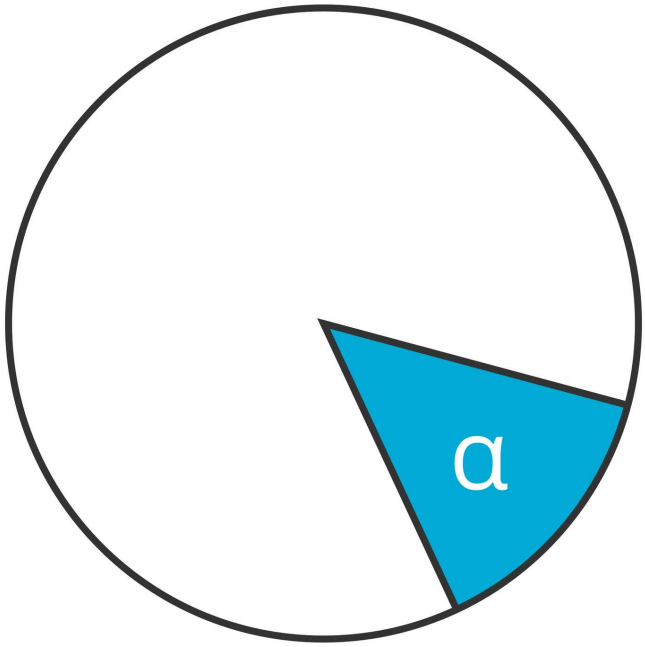
Jeśli uwzględnimy wzór na prędkość w ruchu jednostajnym prostoliniowym, obwód okręgu i okres obiegu, to otrzymamy wzór na prędkość w ruchu jednostajnym po okręgu:

$v = \frac{2\pi r}{T}$
gdzie:
$v\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$ – prędkość liniowa;
$r\ [\mathrm{m}]$ – promień okręgu;
$T\ [\mathrm{s}]$ – okres.

Prędkość liniowa jest wprost proporcjonalna do promienia okręgu i odwrotnie proporcjonalna do okresu. Gdy dana jest częstotliwość f, to wzór na prędkość liniową przyjmuje postać:

$$v = 2\pi r f$$

> **Ciekawostka**
>
> Do opisu ruchu po okręgu fizycy posługują się jeszcze prędkością kątową. Podczas obiegu ciała po okręgu ciało i środek okręgu są połączone odcinkiem. Zakreśla on pewien kąt α. W czasie pełnego okresu (T) zakreślany jest kąt 360°. Jeśli wybierzemy dowolny przedział czasu t, to prędkość kątowa jest stosunkiem zakreślonego kąta (α) do czasu, w którym ten kąt został zakreślony:



Prędkość kątowa to stosunek kąta α zakreślonego przez promień wodzący do czasu, w którym został zakreślony

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

gdzie:
ω – prędkość kątowa;
α – zakreślony kąt;
t – czas.

Przykład 2

Bęben pralki mający promień 25 cm wykonuje 1200 obrotów na minutę.

1. Oblicz okres obrotu i częstotliwość obrotów bębna.
2. Oblicz wartość prędkości liniowej dla punktu położonego w odległości 25 cm od osi obrotu bębna.

Rozwiązanie:

1. Bęben wykonuje 1200 obrotów w czasie 1 minuty, czyli 60 sekund. Ile obrotów wykona w czasie 1 sekundy? Ile będzie wynosił czas jednego obrotu (okres)?

$1200 : 60 = 20 \frac{\text{obrotów}}{\text{s}}$, co oznacza, że $f = 20$ Hz. Skoro $T = \frac{1}{f}$, to $\mathrm{T} = \frac{1}{20}\mathrm{s}$, czyli 0,05 s

.

1. Prędkość liniowa będzie równa $v = \frac{2\pi r}{T}$ lub $v = 2\pi r f$. Jeśli skorzystamy z drugiego wzoru, otrzymamy:
   $v = 2\pi \cdot 0{,}25\ \mathrm{m} \cdot 20\ \mathrm{Hz} = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}25 \cdot 20 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 31{,}4 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Odpowiedź:

1. Częstotliwość obrotów wynosi $20\ \mathrm{Hz}$, a okres jednego obrotu to $0{,}05$ s.
2. Punkt położony w odległości $25\ \mathrm{cm}$ od osi bębna porusza się z prędkością $31{,}4\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Przykład 3

Dziecko siedzące na krzesełku karuzeli wykonuje 15 obiegów na minutę, przy czym porusza się po okręgu o promieniu 4 m. Oblicz wartość prędkości liniowej, z jaką porusza się dziecko.

Rozwiązanie:

Prędkość liniową można obliczyć ze wzoru: $v = 2\pi r f$ lub $v = \frac{2\pi r}{T}$. Ponieważ znamy wartość promienia okręgu, to musimy jedynie obliczyć okres obiegu lub częstotliwość.

Jeżeli krzesełko z dzieckiem wykonuje 15 obiegów w czasie 60 sekund, to czas jednego obiegu wynosi $T = \frac{60\ \mathrm{s}}{15}$, czyli 4 s. Wartość prędkości liniowej wynosi zaś:
$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 4\ \mathrm{m}}{4\ \mathrm{s}} = 6{,}28\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Jeśli chcemy skorzystać z zależności $v = 2\pi r f$, musimy obliczyć najpierw częstotliwość. Wprawdzie jest ona podana, ale nie w czasie 1 sekundy, lecz 1 minuty. Ponieważ minuta ma 60 sekund, w ciągu 1 sekundy krzesełko wykona: $f = \frac{15}{\mathrm{min}} = \frac{15}{60\ \mathrm{s}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\mathrm{s}}$, czyli $\frac{1}{4}$ obiegu; $f = \frac{1}{4}\mathrm{Hz}$.
Resztę obliczeń wykonaj samodzielnie.

Ćwiczenie 3

Przed przystąpieniem do rozwiązywania zadania przygotuj kartkę papieru i przybory do pisania. Może przydać się również kalkulator.
Kamień przymocowano do sznurka o długości 50 cm i wprawiono w ruch po okręgu w płaszczyźnie pionowej. W czasie 1 minuty kamień wykonywał 30 obiegów.
Okres, częstotliwość i prędkość liniowa są równe:

- [ ] $T = \frac{1}{2}\ \mathrm{s};\ v = 15{,}7\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $f = 2\ \mathrm{Hz};\ v = 15{,}7\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $f = 2\ \mathrm{Hz};\ T = \frac{1}{2}\ \mathrm{s}.$
- [ ] $T = 2\ \mathrm{s};\ f = 0{,}5\ \mathrm{Hz}.$
- [ ] $f = 2\ \mathrm{Hz};\ v \cong 160\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $f = 2\ \mathrm{Hz};\ v = 157\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $f = 2\ \mathrm{Hz};\ v \cong 1{,}6\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $T = \frac{1}{2}\mathrm{s};\ v = 157\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $T = 2\ \mathrm{s}; v = 1{,}57\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $T = \frac{1}{2}\ \mathrm{s};\ v \cong 160\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $f = 2\ \mathrm{Hz};\ T = 0{,}5\ \mathrm{s}.$
- [ ] $f = 0{,}5\ \mathrm{Hz};\ v \cong 1{,}6\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$
- [ ] $T = 2\ \mathrm{s};\ f = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\mathrm{s}}.$

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4

Przed przystąpieniem do rozwiązania zadania przygotuj kartkę papieru i przybory do pisania. Wskaż wzór (lub wzory), które pozwolą obliczyć promień okręgu.

- [ ] $r = \frac{T}{2\pi v}$
- [ ] $r = \frac{v}{2\pi T}$
- [ ] $r = \frac{f}{2\pi v}$
- [ ] $r = \frac{2\pi v}{f}$
- [ ] $r = \frac{v}{2\pi f}$
- [ ] $r = \frac{2\pi T}{v}$
- [ ] $r = \frac{2\pi v}{T}$
- [ ] $r = \frac{\mathrm{vf}}{2\pi}$
- [ ] $r = \frac{2\pi f}{v}$
- [ ] $r = \frac{v \cdot T}{2\pi}$

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Podsumowanie

- Do opisu ruchu po okręgu posługujemy się pojęciami „okres obiegu” i „częstotliwość”. Okresem (T) nazywamy czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego obiegu po okręgu. Częstotliwością (f) nazywamy liczbę pełnych obiegów wykonywanych w czasie 1 sekundy.
- W ruchu jednostajnym po okręgu wartość prędkości liniowej jest stała, lecz zmieniają się jej kierunek i zwrot. Prędkość liniowa jest styczna do okręgu.

- Prędkość liniową (v) obliczamy ze wzoru:
  $v = \frac{2\pi r}{T}$ lub $v = 2\pi r f$.

Praca domowa

Polecenie 1.1

Znajdź, jaką wartość ma promień równikowy (np. w tablicach fizycznych lub geograficznych, bądź też w internecie). Następnie skorzystaj z poznanych wzorów dotyczących ruchu po okręgu i oblicz prędkość liniową na równiku.

Polecenie 1.2

Oblicz prędkość Księżyca na orbicie. Przyjmij, że średnia odległość Księżyca od Ziemi jest równa 385 000 km, a czas obiegu odpowiada miesiącowi gwiazdowemu (patrz: poprzednie lekcje).

Polecenie 1.3

Przypomnij sobie treść trzech zasad dynamiki. Ułatwi ci to zrozumienie następnej lekcji.

Słowniczek

satelita stacjonarny (satelita geostacjonarny)

– sztuczny satelita przebywający na geostacjonarnej orbicie Ziemi; orbita geostacjonarna to orbita kołowa, która pozwala umieszczonym na niej obiektom (zwykle satelitom telekomunikacyjnym) zachować stałe położenie nad wybranym punktem równika Ziemi.

Biogram

Źródło: Krzysztof Jaworski <Krzysztof.jaworski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Heinrich Rudolf Hertz

22.02.1857 Hamburg – 01.01.1894 Bonn

Heinrich Hertz studiował fizykę w Monachium i Berlinie. Po uzyskaniu tytułu doktora był wykładowcą na różnych uczelniach. W Karlsruhe rozpoczął badania nad falami elektromagnetycznymi i skonstruował specjalne urządzenie do ich wzbudzania, tzw. oscylator elektryczny. W 1887 r. udowodnił istnienie fal elektromagnetycznych. Następnie wykazał, że mają one cechy światła – ulegają zjawiskom odbicia, załamania, interferencji (nakładanie się), dyfrakcji (uginanie się) i polaryzacji. Ponadto udowodnił, że fale elektromagnetyczne rozchodzą się z prędkością światła i mogą być przekazywane na odległość. Odkrył zewnętrzny efekt fotoelektryczny. Aby uhonorować Hertza za te odkrycia, jednostkę częstotliwości w układzie SI nazwano hercem (Hz).

Dlaczego ciała poruszają się po okręgu?

Jak to się dzieje, że planety krążą wokół Słońca, a księżyce Jowisza – wokół niego? Co mają wspólnego ruch planet i ruch samochodu na zakręcie? Dzięki tej lekcji poznasz przyczynę zmiany kierunku prędkości i cechy ruchu po okręgu.

Co ma wspólnego rower na zakręcie z planetami krążącymi wokół Słońca? Mimo drastycznej różnicy rozmiarów i masy, ich ruchem rządzą te same prawa fizyki

Już potrafisz

- podawać znaczenie pojęć: „prędkości liniowa", „okres obiegu" i „częstotliwość obiegu";
- obliczać wartości tych wielkości;
- opisywać ruch jednostajny po okręgu jako ruch, w którym prędkość jest stała, torem jest okrąg, a kierunek prędkości zmienia się cały czas;
- podawać przyczyny ruchu jednostajnego i zmiennego.

Nauczysz się

- wyjaśniać ruch po okręgu działaniem siły dośrodkowej;
- wskazywać źródła siły dośrodkowej w odniesieniu do konkretnych ruchów po okręgu;
- obliczać wartość siły dośrodkowej.

1. Siła dośrodkowa

Znasz już zasady (prawa) dynamiki. Pierwsza z nich mówi, że aby zmienić stan ruchu ciała, czyli zwiększyć lub zmniejszyć jego prędkość albo zmienić jej kierunek lub zwrot, musimy działać pewną siłą. Aby zwiększyć prędkość ruchu ciała, trzeba działać siłą o takim samym kierunku i zwrocie, jakie ma prędkość, natomiast aby zmniejszyć wartość prędkości – siła powinna mieć zwrot przeciwny do zwrotu prędkości ciała.

Co powoduje, że ciało poruszające się dotychczas po prostej zaczyna zakręcać i poruszać się po okręgu? Domyślasz się pewnie, że musi działać jakaś siła. Jakie powinna mieć ona kierunek, zwrot i wartość?

Rozpatrujemy ruch jednostajny po okręgu, a zatem wartość prędkości musi być stała. Ma następować jedynie zmiana kierunku prędkości. Oznacza to, że siła, o której myślimy, musi być prostopadła do wektora prędkości ciała i zwrócona do środka okręgu. Taką siłę będziemy nazywać zatem **siłą dośrodkową**. Od czego może zależeć jej wartość?

Pomińmy kwestie matematyczne związane z wyprowadzeniem wzoru. Zauważymy tylko, że im większa będzie prędkość ciała poruszającego się po linii prostej, tym większą siłę trzeba będzie przyłożyć, aby zmienić kierunek jego ruchu. Logiczne będzie także stwierdzenie, że im większa masa ciała, które ma poruszać się po okręgu, tym większa siła musi na nie działać (II zasada dynamiki). Okrąg, po którym ma się poruszać ciało, będzie miał jakiś promień. Jeżeli działająca siła będzie niewielka, to niewielkie okaże się również odchylenie ciała od dotychczasowego toru – będzie się ono poruszało po okręgu o dużym promieniu. Aby uzyskać mały promień okręgu, musimy działać odpowiednio większą siłą dośrodkową.

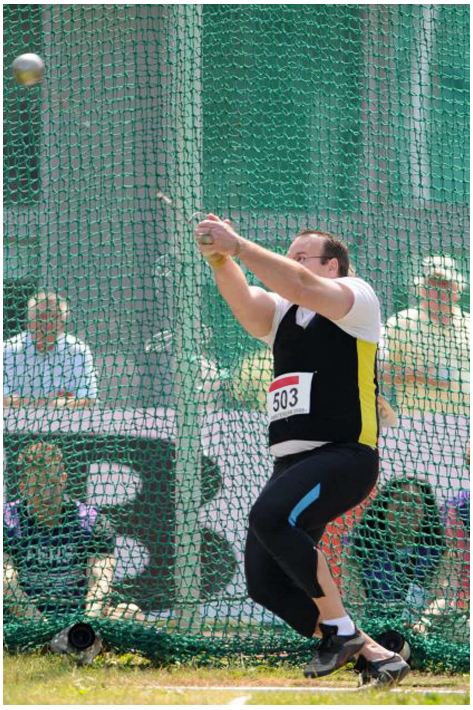
Rozważania matematyczne prowadzą do następującej zależności siły dośrodkowej (F) od masy (m) i prędkości (v) ciała oraz promienia okręgu (r):

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

> **Zapamiętaj!**
>
> Siła dośrodkowa jest odpowiedzialna za to, że ciało porusza się po okręgu. Jej wartość obliczamy za pomocą wzoru:
>
> $$F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$
>
> gdzie:
> $m[\mathrm{kg}]$ – masa poruszającego się ciała;
> $v\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$ – prędkość ciała;
> $r[\mathrm{m}]$ – promień okręgu, który zakreśla poruszające się ciało.

A co jest źródłem tej siły?

Podczas rzutu młotem (tak naprawdę jest to kula, do której przymocowano stalową linkę zakończoną uchwytem) siłę dośrodkową za pośrednictwem linki wywiera zawodnik.



Źródłem siły dośrodkowej podczas rzutu młotem jest zawodnik

Zawodnik rozpędza młot, wykonując kilka obrotów, a następnie puszcza linkę. Na młot przestaje wówczas działać siła dośrodkowa – obserwujemy, jak daleko on poleci.

Wyobraźmy sobie szklankę stojącą na obracającej się płycie (np. gramofonowej) albo na szklanym talerzu w kuchence mikrofalowej. Jeżeli szklankę postawimy w pewnej odległości od osi obrotu, to naczynie będzie się poruszało po okręgu. Co powoduje, że szklanka porusza się takim ruchem? Czy poruszałaby się tak, gdyby powierzchnia talerza była idealnie gładka? Jaka siła mogłaby wówczas spowodować ruch szklanki? Jedyną siłą, o jakiej może być tu mowa, jest siła tarcia pomiędzy płytą (talerzem) a szklanką (pomijamy tu możliwość przyklejania szklanki do płyty).

Co się dzieje podczas pokonywania zakrętu przez samochód? Powiecie: po prostu kręcimy kierownicą i przednie koła ustawiają się w odpowiedniej pozycji. Czy na pewno? A gdyby na zakręcie był lód? Czy skręcenie kół wystarczyłoby do zmiany kierunku jazdy? Chyba wszyscy są przekonani, że nie. Podobnie jak w powyższym przykładzie, siłą dośrodkowa jest znowu siła tarcia.

O sile grawitacji, która jest siła dośrodkową, będziemy mówić na następnych lekcjach.
A jakie jeszcze inne ruchy po okręgu możecie wskazać?

Polecenie 1

Wybierzcie kilka rodzajów ruchu po okręgu, przeanalizujcie je i wskażcie, co jest siłą dośrodkową w każdym przykładzie.

Analiza różnych rodzajów ruchu po okręgu wskazuje, że siłą dośrodkową może być jedna, bezpośrednio działająca siła lub (częściej) wypadkowa kilku sił działających na ciało.

Przykład 1

Samochód o masie $2\ \mathrm{t}$ porusza się ze stałą prędkością $72\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$. Oblicz wartość siły dośrodkowej działającej na samochód, jeśli znajduje się on na zakręcie będącym łukiem okręgu o promieniu $25\ \mathrm{m}$.

Analiza zadania:
W zadaniu podana jest informacja o masie ciała, jego prędkości i promieniu okręgu, po którym się ono porusza. Są to wystarczające dane, aby móc wyznaczyć wartość siły dośrodkowej. Należy jednak zwrócić uwagę, że prędkość została podana w km/h, a więc wymaga przeliczenia na m/s.

Dane:
$m = 2\ \mathrm{t}$

$1\ \mathrm{t} = 1\ 000\ \mathrm{kg}$

$v = 72\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$

$r = 25\ \mathrm{m}$

Szukane:
$F = \ ?$

Wzór:
$F = \frac{mv^2}{r}$
Obliczenia:
$v = 72\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} = 72 \cdot \frac{1\ 000\ \mathrm{m}}{3\ 600\ \mathrm{s}} = 20\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

$F = \frac{2\ 000\ \mathrm{kg} \cdot \left(20\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2}{25\ \mathrm{m}} = 80 \cdot 400\ \mathrm{N} = 32\ 000\ \mathrm{N} = 32\ \mathrm{kN}$

Odpowiedź:
Na samochód działa sila dośrodkowa $32\ \mathrm{kN}$.

Przykład 2

Podczas zawodów lekkoatletycznych odbywa się konkurencja rzutu młotem. Do linki o długości $1{,}1\ \mathrm{m}$ przymocowana jest kula o masie $4\ \mathrm{kg}$. Zawodniczka wprawia kulę w ruch jednostajny po okręgu, tak że na kulę działa siła dośrodkowa o wartości $1{,}6\ \mathrm{kN}$. Oblicz wartośc prędkości liniowej, z jaką porusza się kula.

Analiza zadania:

W zadaniu podana jest informacja o wartości siły dośrodkowej, którą obliczamy ze wzoru $F = \frac{mv^2}{r}$. Nie znamy wartości prędkości liniowej ciała, musimy więc ją obliczyć na podstawie danych zawartych w zadaniu.

Dane:

$r = 1{,}1\ \mathrm{m}$

$m = 4\ \mathrm{kg}$

$F = 1{,}6\ \mathrm{kN} = 1\ 600\ \mathrm{N}$

Szukane:

$v = ?$

Wzory:

$F = \frac{mv^2}{r} \ / \cdot r$

$F \cdot r = mv^2 / : m$

$v^2 = \frac{F \cdot r}{m}$

$v = \sqrt{\frac{F \cdot r}{m}}$

Obliczenia:

$$v = \sqrt{\frac{1\ 600\ \mathrm{N} \cdot 1{,}1\ \mathrm{m}}{4\ \mathrm{kg}}} = \sqrt{440 \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}} \cong 21 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Odpowiedź:

Kula porusza się z prędkością o wartości równej w przybliżeniu $21 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Przykład 3

Dziecko o masie $20\ \mathrm{kg}$ siedzi na krzesełku karuzeli znajdującym się w odległości $5\ m$ od środka obrotu. Oblicz wartość siły dośrodkowej działającej na dziecko, gdy krzesełko porusza się z prędkością $3 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Analiza zadania:

Korzystamy z zależności $F = \frac{mv^2}{r}$, aby wykorzystać informacje zawarte w zadaniu.

Dane:

$\mathrm{m} = 20\ \mathrm{kg}$

$\mathrm{r} = 5\ \mathrm{m}$
$v = 3\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Szukane:
$\mathrm{F} = ?$

Obliczenia:
$F = \frac{mv^2}{r} = \frac{20\ \mathrm{kg} \cdot \left(3\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2}{5\ \mathrm{m}} = 36\ \mathrm{N}$

Odpowiedź:
Na dziecko siedzące na krzesełku kręcącej się karuzeli działa siła dośrodkowa o wartości 36N.

Polecenie 2

Na samochód poruszający się po łuku zakrętu działa siła dośrodkowa 1 125 N. Auto jedzie ze stałą prędkością $15\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Zakręt jest wycinkiem okręgu o promieniu $50\ \mathrm{m}$. Oblicz całkowitą masę samochodu.

Wskazówka

Aby wyznaczyć całkowitą masę samochodu, musimy skorzystać z tego samego wzoru co poprzednio..

Ćwiczenie 1

Przed przystąpieniem do rozwiązywania zadania przygotuj kartkę papieru i przybory do pisania. Może przydać się również kalkulator.
Dziecko o masie 20 kg siedzi na karuzeli, która wykonuje 12 obrotów na minutę. Promień zataczanego okręgu jest równy 6 m.
Wybierz wszystkie poprawne odpowiedzi.

- [ ] W czasie jednego obrotu karuzeli dziecko przebędzie drogę ok. 37,68 m.
- [ ] Okres obrotu karuzeli jest równy 12 s.
- [ ] W ciągu dwóch minut karuzela wykona 24 obroty.
- [ ] W czasie 5 minut karuzela wykona 3600 obrotów.
- [ ] Na dziecko działa siła o kierunku takim samym jak kierunek prędkości.
- [ ] Prędkość liniowa karuzeli wynosi około 18,8 m/s.
- [ ] W ciągu sekundy karuzela wykona 0,2 obrotu.
- [ ] Na dziecko działa siła wzdłuż promienia, zwrócona do środka okręgu.
- [ ] Na dziecko działa siła wzdłuż promienia, zwrócona na zewnątrz okręgu.
- [ ] Okres obrotu karuzeli jest równy 5 s.

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Przed przystąpieniem do rozwiązywania zadania przygotuj kartkę papieru i przybory do pisania.

Wybierz wszystkie poprawne odpowiedzi. Po uwzględnieniu wzoru na prędkość liniową ($v = \frac{2\pi \cdot R}{T}$ lub $v = 2\pi R f$) we wzorze na siłę dośrodkową otrzymamy zależność:

- [ ] $F = mr(2\pi f)^2.$
- [ ] $F = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 mr.$
- [ ] $F = m\frac{4\pi r^2}{T^2}.$
- [ ] $F = (2\pi\,\mathrm{fr})^2 m.$
- [ ] $F = 2\pi r f^2.$
- [ ] $F = 4\pi^2 m r f^2.$
- [ ] $F = \frac{2m\pi r^2}{T^2}.$
- [ ] $F = \frac{4m\pi^2 r}{T^2}\ .$
- [ ] $F = 4m\pi r f^2.$
- [ ] $F = \left(\frac{2\pi}{T} r\right)^2.$
- [ ] $F = \frac{2\pi r}{T^2} m.$

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Podsumowanie

- Siłą odpowiedzialną za ruch ciała po okręgu jest siła dośrodkowa.

- Wartość siły dośrodkowej obliczamy za pomocą wzoru: $F = \frac{m \cdot v^2}{r}$,
  gdzie:
  $m[\mathrm{kg}]$ – masa poruszającego się ciała;
  $v\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$ – prędkość ciała;
  $r[\mathrm{m}]$ – promień okręgu zakreślanego przez poruszające się ciało.
- Siłą dośrodkową może być jedna, bezpośrednio działająca siła lub (częściej) wypadkowa kilku sił działających na ciało. Jej źródłem może być jedno ciało lub kilka. Siła dośrodkowa jest prostopadla do wektora prędkości ciała.

Praca domowa

Polecenie 3.1

Motocyklista porusza się ze stałą prędkością o wartości $90\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$. Motocyklista i motocykl mają łączną masę 270 kg. Na motocykl działa pewna siła dośrodkowa. Oblicz:

1. wartość siły tarcia działającej na koła pojazdu, jeśli znajduje się on na zakręcie będącym wycinkiem koła o promieniu $20\ \mathrm{m}$;
2. czas, w jakim motocyklista wykonałby jedno pełne okrążenie, gdyby poruszał się po okręgu o tym samym promieniu;
3. częstotliwość, z jaką obracają się koła motocykla, jeśli wiadomo, że średnica kół pojazdu wynosi 640 mm.

Polecenie 3.2

Zawodnik wykonuje rzut młotem. Kula o masie $5\ \mathrm{kg}$ jest przymocowana linką o długości $1{,}2\ \mathrm{m}$. Zawodnik wprawia kulę w ruch, tak że zyskuje ona stałą prędkość $18\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Oblicz siłę naciągu linki.

Słowniczek

siła dośrodkowa

– siła odpowiedzialna za ruch ciała po okręgu. Jej wartość obliczamy ze wzoru $F = \frac{mv^2}{r}$. Siła ta działa na ciało wzdłuż promienia okręgu, po którym odbywa się ruch ciała i jest zwrócona zawsze do środka tego okręgu.

Prawo powszechnego ciążenia

Od czasów starożytnych zadawano sobie pytanie, jak poruszają się planety. Zanim Kepler sformułował prawa opisujące ruch planet, uważano, że muszą się one poruszać po okręgach. Kepler i jego następcy udowodnili, że jest to ruch po elipsie. Jednak dopiero Robert Hooke, a następnie Isaac Newton zadali jeszcze ważniejsze pytanie: jakie zasady rządzą ruchem planet krążących wokół wspólnego centrum, którym jest Słońce?

Prawo powszechnego ciążenia obowiązuje wszystkie przedmioty obdarzone masą – zarówno małe, jak i wielkie. Oddziaływanie to, choć ze wzrostem odległości słabnie, tak naprawdę nigdy nie zanika. Dlatego właśnie nasz Układ Słoneczny mogą odwiedzać przybywające zza jego granic komety, a niektóre z nich stają się stałymi gośćmi

Już potrafisz

- wskazać siłę dośrodkową odpowiedzialną za ruch ciała po okręgu;
- obliczać wartość siły dośrodkowej;
- wskazywać źródła sił dośrodkowych.

Nauczysz się

- podawać treść prawa powszechnego ciążenia i wymieniać wielkości, od których zależy siła grawitacji;
- opisywać zależność wartości siły grawitacji od masy przyciągających się ciał i odległości między nimi;
- opisywać sily grawitacji jako siły wzajemnego oddziaływania ciał;
- wykorzystywać wiedzę o sile grawitacji do opisu ruchu ciał niebieskich oraz sztucznych satelitów Ziemi.

Prawo powszechnego ciążenia

Dlaczego planety krążą dookoła Słońca? Arystoteles i Kopernik uważali, że jest to ruch naturalny. Kepler i Kartezjusz sądzili, że musi to być spowodowane jakimś czynnikiem, ale ich teorie były bardzo dalekie od obecnego poglądu na tę sprawę. Pierwszym uczonym, który zwrócił uwagę, że planety muszą być przyciągane przez ciało centralne, był Robert Hooke. Pisał on, że:

> „Wszystkie bez wyjątku ciała niebieskie są obdarzone właściwością ciążenia, czyli przyciągania do swych środków, i dzięki temu przyciągają nie tylko swe własne części, uniemożliwiając im odłączanie się (...), lecz także przyciągają wszystkie inne ciała niebieskie znajdujące się w sferze ich działania."

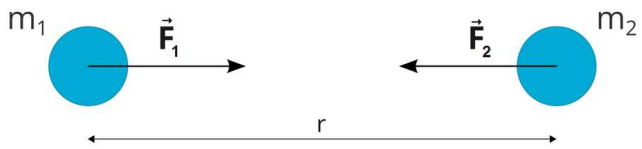
Pytanie było następujące: jak ta siła przyciągająca zależy od odległości między Słońcem a planetą? Pierwszym uczonym, który twierdził, że ta siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości planety od Słońca, był przypuszczalnie Christiaan Huygens (Holender). Do takiego samego wniosku doszedł Edmond Halley (którego nazwiskiem nazwano później słynną kometę). Obaj uczeni nie mieli jednak wystarczającego aparatu matematycznego. Bez niego nie mogli oni uzasadnić takiego związku ani wykazać, że zależność siły od odległości jest przyczyną eliptycznego kształtu orbit planet. Taki aparat matematyczny zbudował Isaac Newton. Prawdopodobnie właśnie dlatego uważał on, że to jemu należą się wszystkie zasługi za sformułowanie prawa grawitacji.

Rozważania o przyczynie ruchu planet wokół Słońca nie prowadziły jednak do sformułowania prawa powszechnego ciążenia. Podobno dopiero obserwacja spadającego jabłka nasunęła Newtonowi nastepującą myśl: ten sam czynnik, który sprawia, że jabłko spada na ziemię, jest również przyczyną ruchu Księżyca wokół Ziemi. Oba zjawiska powoduje bowiem ta sama siła.
Newton stwierdził, że ciała obdarzone masą działają wzajemnie na siebie. Innymi słowy: we Wszechświecie wszystkie ciała się przyciągają. Siłę tę nazywamy siłą grawitacji.

> **siła grawitacji**
>
> – oddziaływanie ciała posiadającego masę na inne ciało obdarzone masą. Siła grawitacji jest siłą przyciągającą.

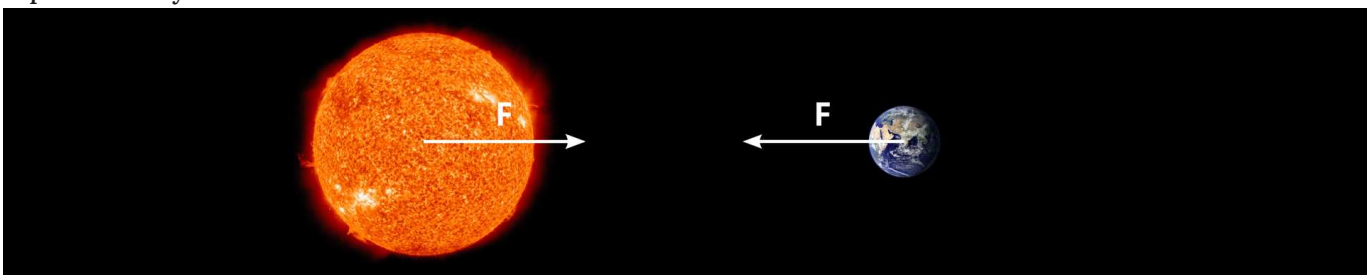
Rozważania Newtona dotyczące siły powodującej krążenie planet dookoła Słońca doprowadziły do sformułowania następującego prawa:

> **Zapamiętaj!**
>
> Dwie punktowe lub kuliste masy przyciągają się siłami wprost proporcjonalnymi do iloczynu ich mas, a odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi.



Siły grawitacji, jakimi wzajemnie działają na siebie dwa ciała o budowie kulistej

Zgodnie z III zasadą dynamiki siły przyciągania są wzajemne: jeżeli Słońce przyciąga Ziemię pewną siłą, to Ziemia przyciąga Słońce siłą o takiej samej wartości i kierunku, lecz o przeciwnym zwrocie.



Oddziaływanie grawitacyjne Ziemi na Słońce i Słońca na Ziemię

Zapamiętaj!

Jeśli dwa ciała o masach m_1 i m_2 są oddalone od siebie o odległość r, to wartość siły grawitacji obliczamy ze wzoru:

$F = G\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$
gdzie G to stała grawitacji równa $6,67 \cdot 10^{-11}\,\frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$.

Prawo powszechnego ciążenia jest spełnione nie tylko dla mas punktowych, lecz także dla ciał o różnych rozmiarach. Siła grawitacji jest wówczas sumą sił występujących między punktami materialnymi, które tworzą dane ciało.

Polecenie 1

Na Marsie odważnik o masie $1\ \mathrm{kg}$ byłby przyciągany z siłą ok. $3{,}7\ \mathrm{N}$. 4 lipca 1997 r. na tej planecie wylądowała sonda kosmiczna Pathfinder o masie całkowitej równej ok. $275\ \mathrm{kg}$. Oblicz wartość siły przyciągania wzajemnego sondy i Marsa.

Siła grawitacji pełni funkcję siły dośrodkowej w ruchu planet wokół Słońca. Ziemia jest przyciągana przez Słońce, Księżyc oraz wszystkie planety Układu Słonecznego. Na podstawie III zasady dynamiki Newtona wiadomo, że wszystkie oddziaływania są wzajemne. Skoro Słońce przyciąga Ziemię siłą grawitacji, to także Ziemia przyciąga Słońce.

Przykład 1

Porównajmy siłę dośrodkową, jaka działa na każdy $1\ \mathrm{kg}$ masy Księżyca, z siłą grawitacji działającą na $1\ \mathrm{kg}$ masy dowolnego ciała na powierzchni Ziemi.

Ciężar ciała o masie 1 kg na powierzchni Ziemi wynosi ok. 9,91 N.
Siłę dośrodkową obliczamy ze wzoru: $F = \frac{m \cdot v^2}{R}$

Obliczmy najpierw wartość prędkości, z jaką Księżyc porusza się po orbicie okołoziemskiej. W tym celu skorzystamy ze wzoru: $v = \frac{2\pi R}{T}$, gdzie R jest średnią odległością od Księżyca do Ziemi wynoszącą $3{,}85 \cdot 10^8$ m. T to czas pełnego obiegu Księżyca wokół Ziemi (miesiąc gwiazdowy), wynoszący $27{,}3217$ doby. Doba z kolei ma 86 400 sekund (24 godziny po 3 600 s).
Podstawiamy odpowiednie wartości. Z obliczeń wynika, że szukana prędkość wynosi ok. 1 020 m/s (czyli ok. 1 km/s).
Na ciało o masie 1 kg krążące po takiej orbicie działa siła dośrodkowa:

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

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy $\mathrm{F} = 2{,}72 \cdot 10^{-3}\mathrm{N}$. Na ciało o masie 1 kg znajdujące się na powierzchni Ziemi działa siła 9,81 N. Jeśli podzielimy jedną wartość przez drugą, otrzymamy:
$\frac{9{,}81\ \mathrm{N}}{2{,}72 \cdot 10^{-3} N} = 3\ 600.$

Działająca siła jest 3 600 razy większa na powierzchni Ziemi niż na orbicie Księżyca. Ile razy większa jest odległość od Księżyca od środka Ziemi w porównaniu z odległością od ciała leżącego na powierzchni Ziemi do jej środka? Pierwsza odległość to ok. $3{,}85 \cdot 10^8\mathrm{m}$, natomiast druga (średni promień Ziemi) to $6{,}37 \cdot 10^6\mathrm{m}$.

Stosunek obu odległości to ok. $60 : 1$, stosunek sił wynosi zaś $1 : 3600$. Wniosek jest oczywisty – jeśli odległość jest 60 razy większa, to siła grawitacji jest 3 600 razy mniejsza.

Tak rozumował podobno sam Newton.
Przykład 2

Oblicz wartość siły przyciągania grawitacyjnego Ziemi przez Słońce. Potrzebne dane odczytaj z tablic fizycznych.
Analiza zadania:
Wszystkie dane potrzebne do obliczenia zadania (masa Ziemi i Słońca, odległość między nimi, stała grawitacji) należy odczytać z tablic fizycznych lub znaleźć w internecie. Następnie trzeba skorzystać z zależności siły grawitacji od mas obu ciał i odległości między nimi.

Dane:

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

$M_Z = 5{,}98 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$

$M_S = 1{,}99 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg}$

$r = 1{,}5 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m}$

Szukane:

$F = ?$

Wzór:

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

Obliczenia:

$$F = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot \frac{5{,}98 \cdot 10^{24}\mathrm{kg} \cdot 1{,}99 \cdot 10^{30}\mathrm{kg}}{\left(1{,}5 \cdot 10^{11}\mathrm{m}\right)^2} = \frac{6{,}67 \cdot 5{,}98 \cdot 1{,}99}{1{,}5^2} \cdot 10^{21}\mathrm{N} = 3{,}53 \cdot 10^{22}\mathrm{N}$$

Odpowiedź:
Wartość siły przyciągania grawitacyjnego Ziemi przez Słońce wynosi $3{,}53 \cdot 10^{22}$ N. Jest ona równa wartości siły, jaką Ziemia przyciąga Słońce.

Działanie grawitacyjne każdego ciała (np. Ziemi) rozciąga się do nieskończoności. Oczywiście, większą wartość zawsze będzie miało przyciąganie ciał znajdujących się bliżej danego obiektu – np. księżyce Jowisza są silniej przyciągane przez Jowisza niż przez Ziemię.

Przykład 3

Oblicz wartość siły, jaką Ziemia przyciąga jabłko o masie 200 g.
Potrzebne dane odczytaj z tablic fizycznych.

Analiza zadania:
Masę i promień Ziemi musimy odczytać z tablic fizycznych lub znaleźć w internecie. Masa jabłka jest podana w zadaniu, należy jednak wyrazić ją w kilogramach, aby ujednolicić jednostki. Dane podstawimy do wzoru na siłę grawitacji.

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

$M_Z = 5{,}98 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$

$M_j = 200\ \mathrm{g} = 0{,}2\ \mathrm{kg}$

$r = 6400\ \mathrm{km} = 6{,}4 \cdot 10^{6}\ \mathrm{m}$

Szukane:
$F = \ ?$

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

Obliczenia:

$$F = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot \frac{5{,}98 \cdot 10^{24}\,\mathrm{kg} \cdot 0{,}2\,\mathrm{kg}}{\left(6{,}4 \cdot 10^{6}\mathrm{m}\right)^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1{,}196 \cdot 10^{24}}{40{,}96 \cdot 10^{12}}\mathrm{N} = 1{,}95\ \mathrm{N}$$

Odpowiedź:
Ziemia przyciąga jabłko z siłą o wartości $1{,}95\ \mathrm{N}$. Jabłko przyciąga Ziemię z siłą o tej samej wartości, czyli $1{,}95\ \mathrm{N}$.

Ćwiczenie 1
Korzystając z prawa powszechnego ciążenia, uzupełnij tekst przeciągając sformułowania w ramkach w odpowiednie miejsce.

Astronauta wraz ze skafandrem jest przyciągany na powierzchni Ziemi siłą o wartości 1000 N. Na powierzchni planety o masie 2 razy większej od masy Ziemi i tym samym promieniu byłby przyciągany z siłą [ ], czyli siłą o wartości [ ]. Na planecie o promieniu większym 2 razy od promienia Ziemi i tej samej masie (co masa Ziemi) byłby przyciągany z siłą [ ] czyli o wartości [ ].

czterokrotnie mniejszą | czterokrotnie większą | 2000 N | dwukrotnie mniejszą | 50 N | 400 N | taką samą | dwukrotnie większą | 100 N | 250 N

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Podsumowanie

- Dwa dowolne ciała przyciągają się wzajemnie.
- Wartość siły grawitacji jest wprost proporcjonalna do iloczynu mas, a odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości.
- Wartość siły grawitacji można obliczyć ze wzoru:
  $F = G\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$
  gdzie:
  $G\left[\frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{kg^2}\right]$ – stała grawitacji;
  $m_1, m_2[\mathrm{kg}]$ – masy ciał;
  $r[\mathrm{m}]$ – odległość między środkami mas ciał.
- Siła grawitacji pełni funkcję siły dośrodkowej w ruchu planet wokół Słońca.

Praca domowa

Polecenie 2.1

Poszukaj danych dotyczących mas i promieni planet skalistych Układu Słonecznego, tj. Merkurego, Wenus i Marsa.

1. Skorzystaj z prawa powszechnego ciążenia i oblicz wartość sił, jakie przyciągałyby cię na każdej z tych planet.

2. Porównaj uzyskane wartości i wyjaśnij, skąd biorą się różnice między nimi.

3. Oszacuj lub oblicz masę, jaką musiałby mieć człowiek na powierzchni każdej z tych planet, aby wartość siły grawitacji była taka jak na powierzchni Ziemi.

Polecenie 2.2

Od czasu do czasu w mediach pojawiają się wiadomości o grożącym nam końcu świata. Niektórzy twierdzą, że ten koniec nastapi, kiedy planety Układu Słonecznego ustawia się w jednej linii po tej samej stronie Słońca.

1. Oblicz siłę przyciągania Słońca przez największą planetę – Jowisza.

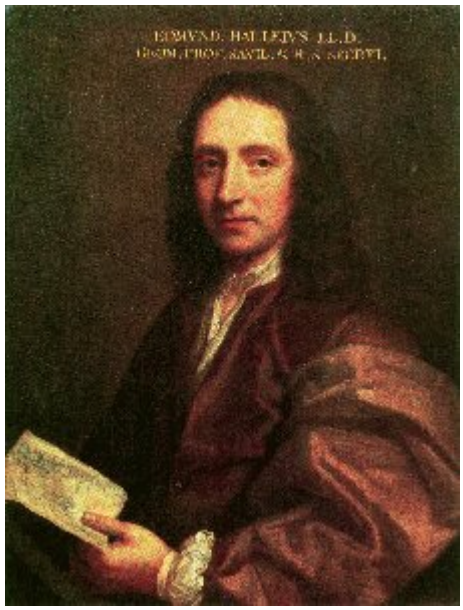
2. Oblicz, o ile wzrośnie wartość tej siły, gdy pozostałe planety ustawią się w jednej linii z Jowiszem (po tej samej stronie Słońca).

3. Jakie wnioski wyciagasz z porównania wartości obliczonych sił w obu sytuacjach?

Ważne!

Masy i odległości poszczególnych planet od Słońca odszukaj w tablicach fizycznych.

Biogramy



Przewidział powrót komety, którą dzisiaj od jego nazwiska nazywamy kometą Halley'a

Edmond Halley

8.11.1656–14.01.1742

Edmond Halley był człowiekiem, który wywarł wielki wpływ na rozwój nauki. Interesował się astronomią, fizyką i matematyką. Jako astronom odkrył eliptyczne orbity komet i za pomocą przyrządów astronomicznych zweryfikował obliczenia położenia gwiazd, dokonane przez Jana Heweliusza z Gdańska. Sfinansował wydruk najsłynniejszego dzieła Newtona „Philosophiae naturalis principia mathematica" (1687 r.), w którym Newton przedstawił podstawowe prawa rządzące mechaniką klasyczną, w tym również prawo powszechnego ciążenia. Halley jako pierwszy zastosował rtęć w termometrach. Przedstawił również sposób obliczania składek dla pierwszych towarzystw ubezpieczeniowych – jako przykładowe miasto podał Wrocław.

Angielski astronom, fizyk, biolog i konstruktor

Robert Hooke

18.07.1635–3.03.1703

Robert Hooke był człowiekiem wszechstronnie utalentowanym – odkrył gwiazdy podwójne i wykonał szkice powierzchni Marsa, jednak w historii nauki zapisał się głównie jako autor prawa określającego zależność odkształcenia ciała od przyłożonych sił zewnętrznych (prawo Hooke'a). Za pomocą ulepszonego przez siebie mikroskopu odkrył istnienie komórek roślinnych. Zbudował pierwszy teleskop reflektorowy, deszczomierz i poziomnicę.

Holenderski fizyk, astronom i matematyk

Christiaan Huygens

14.04.1629–8.07.1695

Christiaan Huygens zdobył sławę jako twórca i zwolennik falowej teorii światła. Zajmował się również matematyką i mechaniką (teoria ruchu wahadła matematycznego). Prowadził obserwacje księżyców Saturna za pomocą skonstruowanego przez siebie teleskopu. Jest autorem jednego z pierwszych podręczników do rachunku prawdopodobieństwa.

Isaac Newton

25.12.1642–20.03.1727

Newton urodził się w ubogiej rodzinie farmera. Po ukończeniu szkoły naukę kontynuował w Trinity College, gdzie zdobył tytuł magistra (1668 r.). Były to czasy, gdy Cambridge nękały epidemie. Newton wyjechał na wieś i właśnie tam narodziły się jego nowe idee. Na lata 1665–66 przypada złoty okres osiągnięć Newtona. Uczony opracował wtedy trzy podstawowe prawa mechaniki (nazywane zasadami dynamiki), podstawy rachunku różniczkowego i całkowego (niezależnie od Leibnitza). Dalsze prace prowadził, korespondując z Robertem Hookiem. Ta wymiana doświadczeń została gwałtownie przerwana, gdy Hooke stwierdził, że siła grawitacji jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Newton był odmiennego zdania i dlatego uciął wszelkie kontakty. Całość prac Newtona została opublikowana w dziele „Philosophiae naturallis principia mathematica" (Matematyczne podstawy filozofii naturalnej) w 1687 r. W trakcie studiów wykładowca Newtona dostrzegł jego zdolności, przekazał mu katedrę fizyki i matematyki na Uniwersytecie Cambridge. Posadę tę Newton utrzymał przez trzydzieści dwa lata. Najpierw wykładał optykę; wyjaśnił zjawisko rozszczepienia światła białego na barwy składowe, co opisał w „New Theory about Light and Colours" (Nowa teoria światła i kolorów). W 1672 r. został wybrany na członka Royal Society, a później pełnił funkcję przewodniczącego tego towarzystwa. Został także członkiem Paryskiej Akademii Nauk. Więcej informacji na temat tego wielkiego fizyka i matematyka znajdziesz w książce Franka E. Manuela: „Portret Izaaka Newtona".

Zadania podsumowujące moduł

Ćwiczenie 2

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 3

Przeczytaj uważnie każde zdanie i oceń, czy jest prawdziwe, czy fałszywe.

	Prawda	Fałsz
Na planecie o masie 3 razy większej niż Ziemia i takim samym promieniu będziesz przyciągany siłą o wartości dziewięciokrotnie większej.	◯	◯
Odważnik o masie 1 kg na pewnej planecie jest przyciągany siłą o wartości 2,5 N, zatem sonda o masie 200 kg będzie przyciągana siłą o wartości 500 N.	◯	◯
Gdyby Ziemia miała masę 2-krotnie mniejszą, to byłbyś wówczas przyciągany z siłą o wartości 4 razy większą.	◯	◯
Siła grawitacji jest wprost proporcjonalna do iloczynu mas ciał oddziałujących między sobą.	◯	◯
Siła grawitacji jest odwrotnie proporcjonalna do odległości między środkami ciał oddziałujących między sobą.	◯	◯
Gdybyś znalazł się w odległości równej trzem promieniom Ziemi od jej powierzchni, to siła grawitacji działająca na Ciebie byłaby dziewięciokrotnie mniejsza.	◯	◯

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4

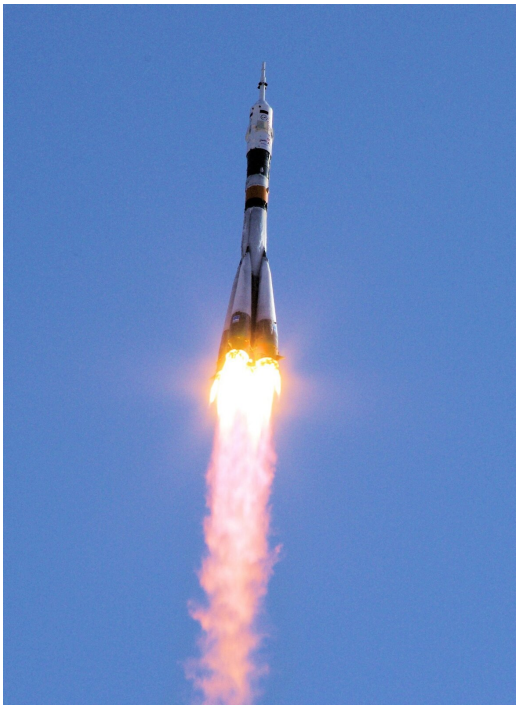
Przed przystąpieniem do rozwiązywania zadania przygotuj kartkę papieru i przybory do pisania. Może przydać się również kalkulator.
Na Ziemi sonda kosmiczna jest przyciągana siłą o wartości 3,6 kN. Gdyby ta sonda wylądowała na planecie o masie 2 razy większej i 3 razy większym promieniu, to byłaby przyciągana siłą o wartości:

- [ ] 8200 N.
- [ ] 8,20 kN.
- [ ] 400 N.
- [ ] 0,4 kN.
- [ ] 820 N.
- [ ] 800 N.
- [ ] 0,08 kN.
- [ ] 0,8 kN.

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Prędkości kosmiczne

Ludzkość od wieków marzyła o podróży w kosmos, czego przykładem są powieści Juliusza Verne'a czy Jerzego Żuławskiego. Mniej znane są prace Rosjanina (potomka polskiego zesłańca) Konstantego Ciołkowskiego. W swojej książce „Poza Ziemią" formułuje on teorie budowy rakiet (m.in. rakiety wielostopniowej) i stacji orbitalnych, a nawet założenia wypraw na Księżyc i inne planety. Konstantego Ciołkowskiego można bez wahania nazwać ojcem astronautyki. Potem prowadzone były prace przez duże zespoły, które powstały w ZSRR (z udziałem Sergiusza Korolewa – późniejszego kierownika programu kosmicznego ZSRR), Stanach Zjednoczonych (pracom przewodniczył Goddard) i Niemczech (Herman Oberth i Werner von Braun). Jakie warunki muszą być spełnione, aby umieścić obiekt na orbicie? Jeśli chcesz poznać odpowiedź na to pytanie, czytaj dalej.



Rakieta nośna wynoszącej ładunek na orbitę musi nadać mu prędkość umożliwiającą utrzymanie się na orbicie lub zrównanie się z prędkością innego obiektu orbitalnego, do którego ma dotrzeć

Już potrafisz

- wskazać siłę dośrodkową jako czynnik powodujący ruch po okręgu;
- obliczyć wartość siły dośrodkowej;
- wskazać źródła siły dośrodkowej;
- podać treść prawa powszechnego ciążenia oraz wymienić wielkości fizyczne, od których zależy siła grawitacji;

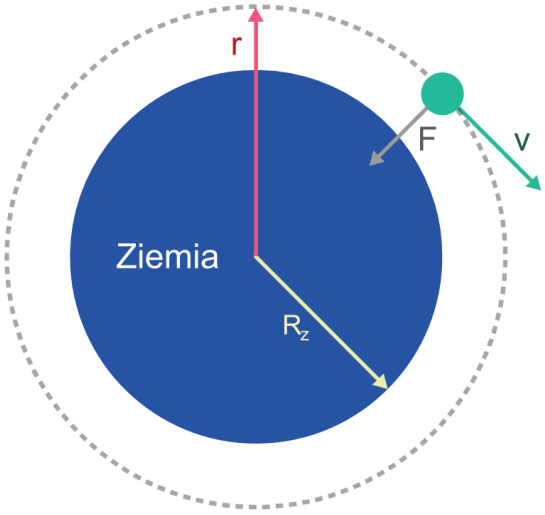
- opisać zależność siły grawitacji od masy obu przyciągających się ciał i kwadratu odległości między nimi.

Nauczysz się

- wykorzystywać siłę grawitacji do opisu i wyjaśniania ruchu ciał niebieskich oraz sztucznych satelitów Ziemi;
- obliczać wartości prędkości satelitów i okresy ich obiegu w zależności od odległości od Ziemi;
- wyznaczać masę ciał niebieskich, wokół których krążą satelity.

1. Prędkość orbitalna

Z jaką prędkością musi się poruszać obiekt, aby móc krążyć wokół planety, np. Ziemi, w danej odległości od jej środka? Obecnie na to pytanie możemy odpowiedzieć bez trudu. Wiemy przecież, że podczas ruchu po okręgu na ciało musi działać siła dośrodkowa, którą jest siłą grawitacji.



F – siła grawitacji, która jest siłą dośrodkową
r – promień orbity satelity o masie *m*
R_z – promień Ziemi, której masa wynosi M_z
v – prędkość

Ruch ciała po orbicie okołoziemskiej

Siła grawitacji jest siłą dośrodkową:

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

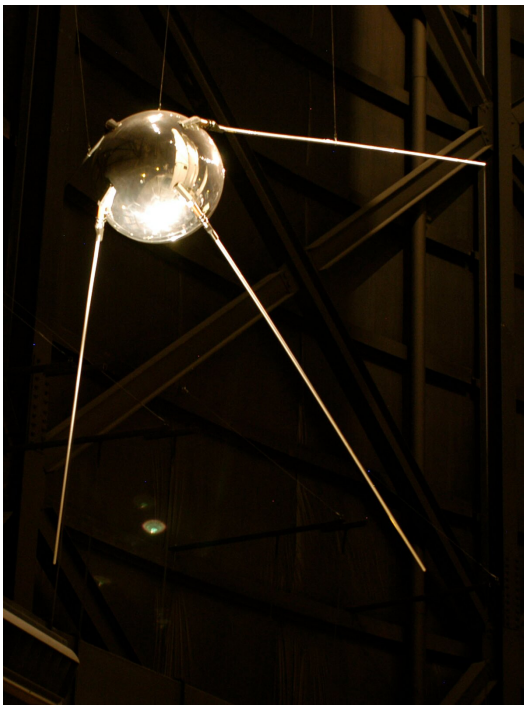
Po prostych przekształceniach (wykonaj je!) otrzymamy $v = \sqrt{\frac{GM_Z}{r}}$, co oznacza, że im dalej od powierzchni Ziemi krąży satelita, tym wartość jego prędkości orbitalnej jest mniejsza.

Do wyprowadzenia powyższych zależności skorzystaliśmy jedynie z takiej cechy wektora siły, jaką jest wartość. Oczywiście, ten wektor ma również kierunek – przechodzi on przez środek Ziemi. Wynika z tego bardzo ważny wniosek – płaszczyzna orbity każdego satelity planety przechodzi przez jej środek.
Zapewne spotykacie się czasem z pojęciem I prędkości kosmicznej. Jest to wartość prędkości, którą należy nadać ciału (stycznie do powierzchni Ziemi), aby mogło ono krążyć po orbicie kołowej o promieniu równym promieniowi Ziemi.

> **Polecenie 1**
>
> Promień Ziemi ma wartość $6370\ \mathrm{km}$. Masa Ziemi wynosi ok. $6 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$. Oblicz wartość I prędkości kosmicznej.

> **Polecenie 2**
>
> Wymień co najmniej dwa powody, dla których niemożliwe jest, aby satelita poruszał się wokół Ziemi z I prędkością kosmiczną.

Marzenia mają to do siebie, że się spełniają: 4 października 1957 r. świat dowiedział się o tym, że pierwszy sztuczny **satelita** Ziemi – **SPUTNIK 1** – został wystrzelony przez ZSRR i krążył wokół Ziemi po orbicie eliptycznej; perygeum orbity znajdowało się na wysokości $214\ \mathrm{km}$, a apogeum – $938\ \mathrm{km}$ nad powierzchnią Ziemi. Czas jednego okrążenia satelity wokół naszej planety wynosił ok. $96\ \mathrm{minut}$.



Pierwszy sztuczny satelita Ziemi

Średnica kuli widocznej na zdjęciu wynosi ok. $59\ \mathrm{cm}$, a masa – nieco ponad $80\ \mathrm{kg}$. Satelita ten nadawał sygnały i przesyłał informacje o ciśnieniu i temperaturze, jakie panowały w jego wnętrzu i na zewnątrz urządzenia.

> **Polecenie 3**
>
> Oblicz maksymalną i minimalną odległość Sputnika I od środka Ziemi. Przyjmij, że średni promień Ziemi jest równy $6370\ \mathrm{km}$.

> **Ciekawostka**
>
> Kilka zdań warto poświęcić nazwom obiektów krążacych wokół Ziemi. Używa się dwóch określeń – „sputnik" i „satelita" – które właściwie znaczą to samo. Słowo **„sputnik"** oznacza współtowarzysza podróży (w języku rosyjskim) – obiekt ten wędruje razem z Ziemią dookoła Słońca. Słowo **„satelita"** oznacza obiekt znajdujący się w pobliżu innego obiektu, który jest większy lub ważniejszy. Satelity obiektów astronomicznych (np. Jowisza) wędrują razem z nimi dookoła Słońca. Autorzy i redaktorzy tego podręcznika pragną przypomnieć, że słowo „satelita" jest rodzaju męskiego. Nie należy również używać tego wyrazu w odniesieniu do anteny satelitarnej służącej do odbioru sygnału z satelity telekomunikacyjnego.

Od czego zależy okres obiegu satelity wokół Ziemi? Możemy to łatwo pokazać – wystarczy wiedzieć, że wartość prędkości, z jaką porusza się satelita (przyjmijmy orbitę kołową), jest równa $v = \frac{2\pi r}{T}$ i $v = \sqrt{\frac{GM_\mathrm{Z}}{r}}$. Jeśli połączymy obie zależności (wykonaj takie przekształcenia samodzielnie), otrzymamy zależność:

$$\frac{GM_\mathrm{Z}}{4\pi^2} = \frac{r^3}{T^2}$$

Większość z was zauważyła, że ten wzór jest podobny do III prawa Keplera. Jeżeli zamiast Ziemi (i masy Ziemi M_Z) wstawimy Słońce, wokół którego krążą planety, i jego masę M_S,to otrzymamy:

$$\frac{GM_\mathrm{S}}{4\pi^2} = \frac{a^3}{T^2}$$

gdzie:
a – średnia odległość planety od Słońca (połową wielkiej osi elipsy).
Jeśli zapiszemy tę zależność dla dwóch planet krążących dookoła Słońca, zauważymy, że prawdziwe jest równanie:

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

Przypomnijmy, że wskaźnik 1 dotyczy połowy wielkiej osi (średniej odległości) i okresu obiegu jednej planety po swojej orbicie, a wskaźnik 2 – drugiej planety. Nie powinno to

dziwić – przecież prawa Keplera wynikają z właściwości sił grawitacji.

Możemy teraz wyznaczyć okres obiegu satelity wokół np. Ziemi. Wyżej pokazaliśmy już, że:

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

Przekształcenia powyższego wzoru prowadzą do wykazania zależności okresu ruchu obiegowego satelity od promienia jego orbity:

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

Jest to nieco inna postać III prawa Keplera. Jeśli poobserwujemy krążące satelity, możemy zacząć się zastanawiać, czy możliwe byłoby, aby taki satelita „wisiał" stale nad jednym punktem na powierzchni Ziemi. Gdyby satelita był nieruchomy, to oczywiście musiałby spaść. Ale gdyby krążył dookoła Ziemi, wykonując jeden obieg w czasie 24 godzin (dokładnie 23 godzin, 56 minut i 4 sekund – bo tyle trwa jeden obrót Ziemi dookoła własnej osi), to wcale nie musiałby spadać.
Tak właśnie funkcjonują satelity geostacjonarne. Mają one okres obiegu taki jak ten podany wyżej i krążą wraz z obracającą się Ziemią.

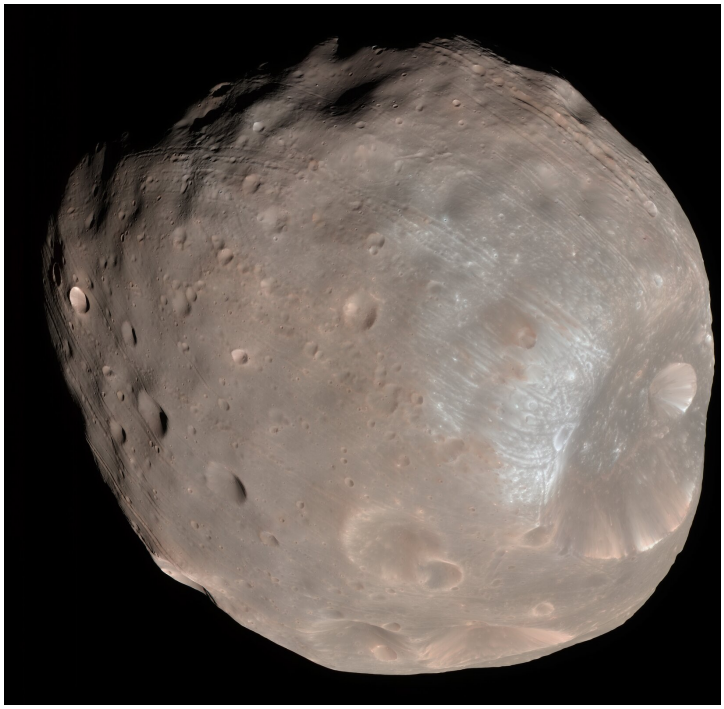
> **Polecenie 4**
>
> Oblicz promień orbity satelity stacjonarnego. Przyjmij następujące wartości: masa Ziemi $m = 6 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$, stała grawitacji $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$. Oblicz również, jak wysoko nad powierzchnią Ziemi znajduje się taki satelita.

> **Polecenie 5**
>
> Wykaż, że wartość prędkości satelity stacjonarnego na orbicie wynosi ok. $3\ 080\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Dlaczego satelity tego typu są ważne? Większość z nich to **satelity telekomunikacyjne**, czyli takie, z których są nadawane programy telewizyjne bądź transmitowane rozmowy telefoniczne. Wystarczy raz dokładnie ustawić antenę odbiorczą i przekazanie sygnału jest zawsze zapewnione.

2. Jak wyznaczyć masę Marsa?

Prędkość, z jaką ciało porusza się po orbicie wokół jakiegoś innego większego ciała, może być obliczona z zależności $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$. Wyobraź sobie jednak, że znamy okres obiegu naturalnego satelity, np. Fobosa, wokół macierzystej planety – Marsa. Znamy także odległość tego księżyca od środka planety. Możemy zatem obliczyć wartość prędkości, a następnie masę planety.



Fobos – jeden z dwóch księżyców Marsa

Polecenie 6

1. Odległość od Fobosa do środka Marsa wynosi $9\ 375\ \mathrm{km}$. Czas obiegu tego księżyca wokół planety to ok. $7{,}65\ \mathrm{godziny}$. Wykaż, że prędkość Fobosa na orbicie okołomarsjańskiej wynosi ok. $2\ 138\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$;

2. Oblicz masę Marsa.

Ta metoda stosowana jest wszędzie tam, gdzie znamy parametry orbity małego księżyca krążącego wokół planety. W ten sam sposób można wyznaczyć masę Słońca lub innej gwiazdy, jeśli tylko poznamy parametry ruchu planety krążącej wokół tej gwiazdy.

3. Start rakiety kosmicznej

Powyższe wartości prędkości orbitalnej zależą od promienia orbity, po jakiej ma krążyć satelita. Satelita niskopułapowy, czyli krążący na niskich orbitach, tj. bliskich powierzchni Ziemi, ma prędkość ok. $7\frac{\text{km}}{\text{s}}$. W jaki sposób uzyskać takie prędkości?

Podczas startu rakiety odpowiednią siłę ciągu mogą w tej chwili zapewnić tylko silniki na paliwo chemiczne. Produkty spalania tego paliwa uzyskują duże prędkości i w efekcie (na zasadzie odrzutu) zwiększa się prędkość rakiety. Takie paliwo jednak nie może rozpędzić rakiety do większych prędkości niż ok. $3\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Druga kwestia to stosunek masy użytecznej ładunku (np. satelity telekomunikacyjnego) do masy całej rakiety, czyli silników, zbiorników z paliwem i obudowy. Chodzi o to, aby silniki nie rozpędzały bezustannie całej ogromnej rakiety. To właśnie Ciołkowski był autorem pomysłu budowy rakiety wielostopniowej. Taka rakieta składa się zazwyczaj z trzech członów. Pierwszy człon rozpędza rakietę do $3\frac{\text{km}}{\text{s}}$ i po wyczerpaniu paliwa zostaje odczepiony. Włącza się wtedy drugi człon, który zwiększa prędkość o dalsze $3\frac{\text{km}}{\text{s}}$ – staje się to łatwiejsze, ponieważ masa rakiety jest mniejsza. Na końcu włączany jest trzeci człon.

Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Orbitalny test bezzałogowy rakiety Orion

Film przedstawia start rakiety Orion. Pierwsza scena: rakieta znajduje się na Ziemi. Ujęcie kręcone z odległości ok. 200 metrów. Komentator odlicza w języku angielskim od 8 w dół. Gdy dochodzi do 1 rakieta startuje. Widoczne płomienie wychodzące spod rakiety. Rakieta startuje. W kolejnej scenie pokazano startującą rakietę z odległości ok. kilometra. Rakieta unosi się pionowo w górę, od rakiety odchodzą trzy smugi ognia. W następnej scenie ukazano obraz rejestrowany przez kamerę znajdującą się na zewnętrznej części rakiety. Rakieta coraz bardziej oddala się od Ziemi, znajduje się nad chmurami. Po pewnym czasie

znajduje się na tyle wysoko, że można zobaczyć kulistość Ziemi. Staje się coraz ciemniej. Jedynie Ziemia jest oświetlona. Chwilę po czwartej minucie filmu od rakiety odrywa się jeden z elementów, który od razie staje w płomieniach.

Kiedy obserwujemy start rakiety z kosmodromu, to widzimy, że podnosi się ona bardzo powoli, z niewielkim przyspieszeniem. W ciągu następnych minut jej przyspieszenie jednak wzrasta, mimo że ilość spalanego paliwa się nie zmienia i siła ciągu jest stała. Pod koniec filmu pokazane jest odłączenie członow startowych rakiety.

Pytanie: daczego przyspieszenie rośnie, chociaż cały czas działa pierwszy człon?

Startująca rakieta na początku porusza się pionowo w górę. Chodzi o to, żeby jak najszybciej opuścić obszar gęstej atmosfery i zmniejszyć siłę oporu. W końcowej fazie lotu następuje zmiana kierunku ruchu, tak aby uzyskać kierunek styczny do przyszłej orbity docelowej.

Podsumowanie

- Na planetę krążącą wokół Słońca lub innej gwiazdy działa siła grawitacji, która jest siłą dośrodkową.
- Prędkość, z jaką planeta, księżyc planety lub sztuczny satelita Ziemi się porusza po orbicie o promieniu r wokół ciała centralnego, wyraża się wzorem:
  $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$
- Masa M to masa ciała centralnego, wokół którego krąży drugie ciało, które jest mniejsze od ciała centralnego.
- Znajomość okresu obiegu satelity wokół ciała centralnego i odległości satelity tego ciała pozwala wyznaczyć masę ciała centralnego: Słońca, planety czy nawet planetoidy (wiele z nich ma księżyce mniejsze od siebie).
- Obecnie tylko rakieta wielostopniowa osiąga odpowiednie prędkości, które pozwalają umieścić statek kosmiczny na orbicie lub polecieć na Księżyc.

> **Praca domowa**
>
> > **Polecenie 7.1**
> >
> > Miłośnikom historii proponujemy zapoznanie się z pracami dotyczącymi konstrukcji rakiet w latach 30. XX wieku – zajmowała się tym grupa naukowców i techników GIRD w Związku Radzieckim i w innych krajach. Warto również zapoznać się z postaciami takimi jak Robert Goddard, Herman Oberth czy Werner von Braun.

Polecenie 7.2

Jowisz jest największą planetą Układu Słonecznego. Promień tej planety jest ponad 11 razy większy od promienia Ziemi, a jego masa – niemal 318 razy większa od masy Ziemi. Wokół Jowisza krąży 67 księżyców o określonych orbitach, z których 14 nie ma jeszcze swoich nazw, a parametry ich orbit zostały obliczone dopiero wstępnie.

1. Na podstawie powyższych informacji wyznacz wartość I prędkości kosmicznej dla Jowisza.

2. Przyjmuje się, że w roku 1610 Galileusz zbudował teleskop. Dzięki niemu zaobserwował cztery księżyce Jowisza. Odszukaj ich nazwy i je zapisz.

3. Wybierz dwa z tych księżyców, wyszukaj informacje dotyczące ich odległości od Jowisza i okresu obiegu wokół tej planety, a następnie wyznacz wartość prędkości orbitalnych dla każdego z nich.

4. Sprawdź, czy odległości tych księżyców od Jowisza i czasy ich obiegu wokół macierzystej planety spełniają III prawo Keplera.

5. Wyznacz masę Jowisza.

Polecenie 7.3

Prędkość orbitalna nie zależy od masy satelity. Co by było, gdyby jednak istniała taka zależność?

Polecenie 7.4

Przypomnij sobie treść zasad dynamiki Newtona – pozwoli ci to zrozumieć następną lekcję.

Słowniczek

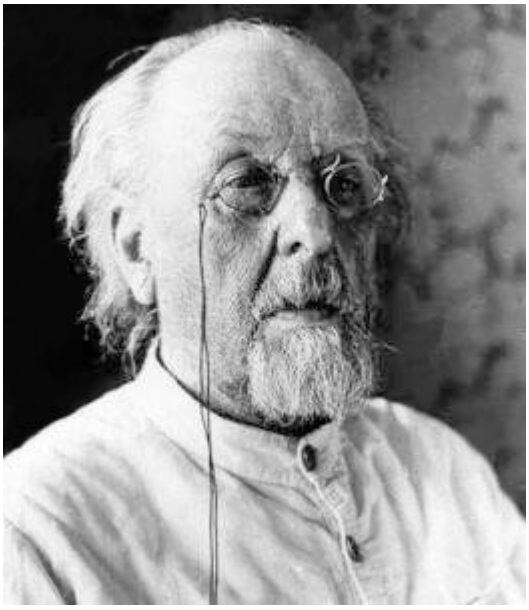
I prędkość kosmiczna

– prędkość, jaką trzeba nadać ciału poruszającemu się stycznie do powierzchni planety, aby mogło ono krążyć po orbicie, której promień jest równy promieniowi tej planety; pierwsza prędkośc kosmiczna Ziemi to 7,91 km/s.

prędkość orbitalna

– prędkość, z jaką porusza się ciało na orbicie wokół ciała centralnego; zależy od masy ciała centralnego i promienia orbity:
$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$.

Biogram



Pionier lotów kosmicznych

Konstanty Ciołkowski

17.09.1857–19.09.1935

Syn polskiego zesłańca, uważany na pioniera astronautyki. Przewidział podbój przestrzeni kosmicznej przez człowieka – stacje załogowe, pojazdy kosmiczne (rakiety) – i jej kolonizację w przyszłości. Jako pierwszy opracował naukowe podstawy lotu rakiet (teorię ruchu rakiet wielostopniowych) o zmiennej masie. Zbudował pierwszy na świecie tunel aerodynamiczny, w którym przeprowadzał badania oporu aerodynamicznego ciał. Podał naukowe podstawy pracy silnika na paliwo ciekłe. Jest autorem powiedzenia: „Ziemia jest kolebką ludzkości, ale nie można ciągle żyć w kolebce”.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Przeczytaj uważnie każde ze zdań i oceń, czy jest prawdziwe, czy fałszywe.

	Prawda	Fałsz
Aby ciało było satelitą Ziemi, to jego masa powinna być zbliżona do masy Ziemi.	◯	◯
Satelita geostacjonarny nie zmienia swego położenia względem Ziemi.	◯	◯
Prędkość orbitalna zależy od masy ciała centralnego i promienia orbity, po której porusza się satelita.	◯	◯
Prędkość orbitalna księżyca planety zależy od masy planety.	◯	◯
Okres obiegu satelity wokół Ziemi nie zależy od wysokości nad powierzchnią Ziemi.	◯	◯
Aby się poruszać dookoła Ziemi, satelita musi mieć prędkość o wartości co najmniej 10 km/s.	◯	◯

Źródło: Magdalena Grygiel <magdalena.grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Loty w kosmos

Na co dzień nie widzimy satelitów. Czasem z telewizji, prasy lub internetu dowiemy się o wymianie załóg na stacji kosmicznej lub starcie jakiejś eksperymentalnej rakiety. Od czasu do czasu pojawia się informacja o lądowaniu sondy kosmicznej na jądrze komety, która to sonda wyruszyła z Ziemi 10 lat temu. Wydaje się, że to wszystko odbywa się jakby poza normalnym, codziennym światem. Czy tak jest naprawdę? Czy tak rzeczywiście tak rzadko mamy kontakt z wytworami skomplikowanych technologii i efektami pracy genialnych umysłów? Na dzisiejszej lekcji dowiesz się o kilku zastosowaniach praw ruchu ciał niebieskich i osiągnięciach nauki.

Wschód Słońca na orbicie ziemskiej obserwowany z pokładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS)

Już potrafisz

- wykorzystywać siłę grawitacji do opisu i wyjaśniania ruchu ciał niebieskich i sztucznych satelitów Ziemi;
- obliczać prędkość satelitów i okres ich obiegu wokół Ziemi – w zależności od odległości od jej powierzchni;
- wykorzystywać zasady dynamiki do opisu i wyjaśniania ruchu ciał.

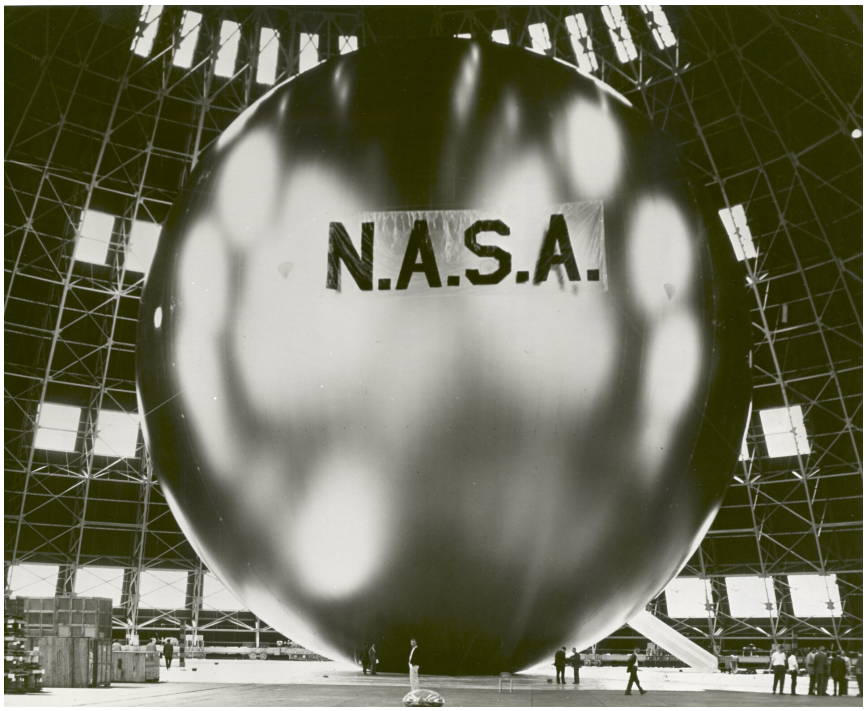
Nauczysz się

- wymieniać zastosowania sztucznych satelitów Ziemi i opisywać przeznaczenie stacji kosmicznych;

- opisywać możliwości badawcze, jakie daje zastosowanie satelitów i próbników kosmicznych.

1. Satelity telekomunikacyjne

Satelity służą do przekazywania sygnałów radiowych i telewizyjnych. Pierwsze urządzenie tego typu nazywało się Echo 1. Ten satelita – umieszczony na orbicie w 1960 r. – tylko odbijał fale elektromagnetyczne.



Echo 1 był 100-stopowym (ok. 30,5 m) plastikowym balonem pokrytym warstwą aluminium, który umożliwił pierwszą satelitarną rozmowę telefoniczną między New Jersey a Kalifornią

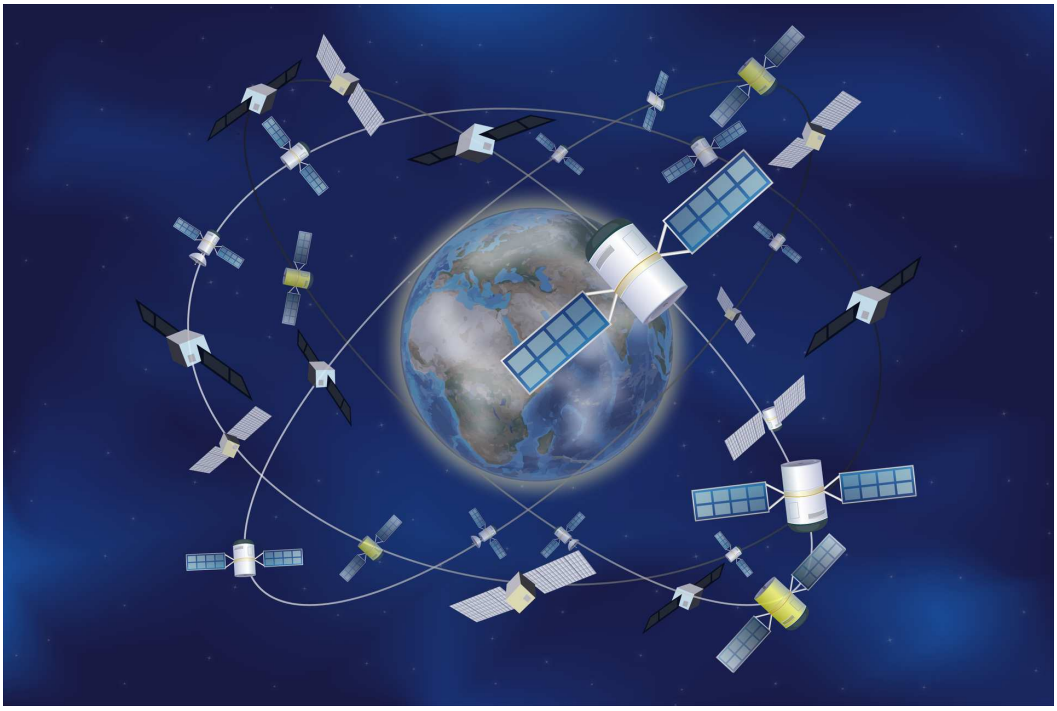
Potem konstruowano satelity, które odbierały sygnały, wzmacniały je i transmitowały dalej. Orbity tych urządzeń były eliptyczne, co zmuszało do „śledzenia" takiego satelity przez stacje odbiorczą na Ziemi. Obecnie wykorzystujemy satelity geostacjonarne, które poznaliście na poprzedniej lekcji. Krążą one w odległości ok. 36 000 km nad powierzchnią Ziemi – poruszają się po orbitach leżących w płaszczyźnie równika. W zasadzie trzy takie satelity wystarczyłyby do pokrycia całej Ziemi odbieranym sygnałem, ale jest ich znacznie więcej.

1.1 Satelity nawigacyjne do ustalania położenia obiektów na powierzchni Ziemi

System określania położenia obiektu na powierzchni Ziemi jest codziennością już od kilku lat. Dla wielu kierowców jazda z włączonym odbiornikiem sygnału satelitarnego i możliwość oglądania trasy na wyświetlanej mapie zawierającej wskazówki, jak jechać dalej, są normalnym elementem jazdy. Taką nawigację umożliwiają obecnie dwa systemy satelitów: amerykański GPS i rosyjski GLONASS.

System GLONASS – podobnie jak GPS – został zaprojektowany w latach 70. XX w. Oba systemy mają przede wszystkim zastosowanie militarne. Zarówno GLONASS, jak i GPS, składają się z 31 satelitów. Część z nich to satelity operacyjne, część zaś pełni funkcję satelitów zapasowych.

Obecnie powstają jeszcze trzy systemy tego typu, m.in. system Galileo, będący dziełem Europejczyków, system chiński i system hinduski. Do 2013 roku wystrzelono w tym celu 4 satelity, a docelowo ma ich być 30.

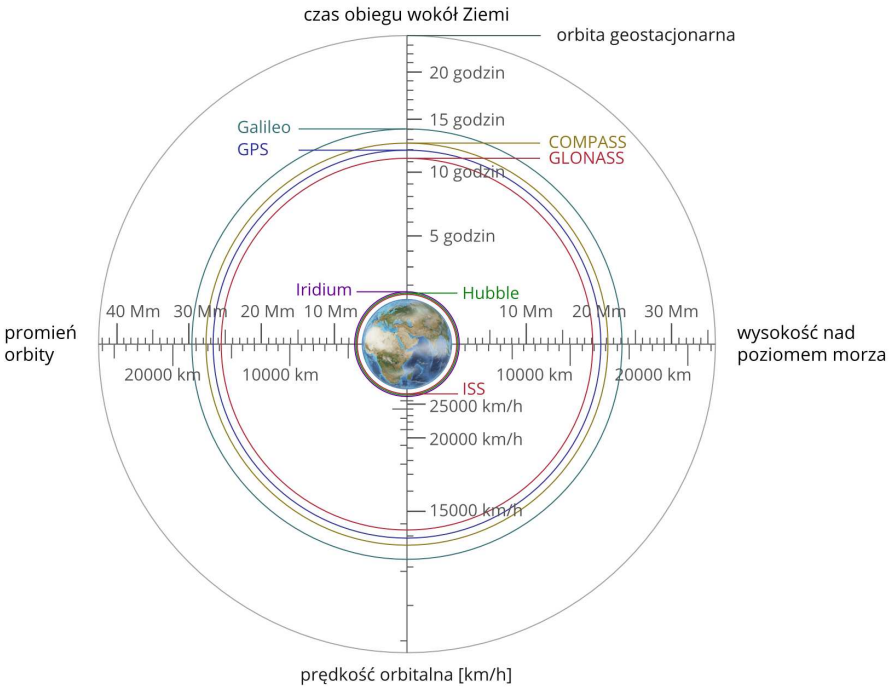


W przeciwieństwie do GPS Galileo ma być systemem międzynarodowym i cywilnym, co może wpłynąć korzystnie na efektywność jego działania. System Galileo docelowo ma się składać z 27 satelitów operacyjnych i 3 zapasowych, które rozmieszczone będą na trzech orbitach

Systemy nawigacji mogą być użytkowane przez posiadaczy nie tylko specjalnych odbiorników, lecz także smartfonów (zarówno system GPS, jak i GLONASS).

Poza satelitami nawigacyjnymi w przestrzeni kosmicznej znajdują się również inne satelity, np. meteorologiczne, telekomunikacyjne (telefonia satelitarna, telewizja), badawcze,

teleskopy kosmiczne. Satelity te znajdują się na różnych wysokościach i okrążają Ziemię z różnymi prędkościami.



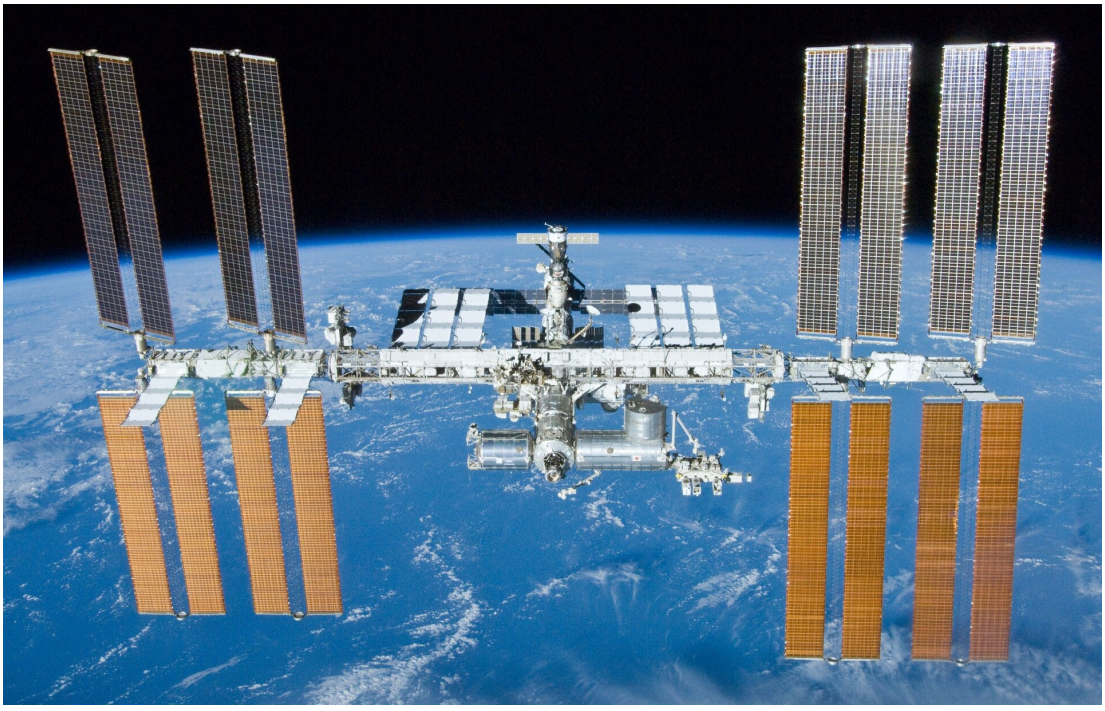
Okres obiegu satelitów nawigacyjnych jest dłuższy niż okres obiegu satelitów badawczych – stacji ISS, teleskopu Hubble'a. Zaznaczono także orbitę satelity geostacjonarnego

2. Stacje kosmiczne

Ludzkość marzyła o tym, aby móc przebywać jak najdłużej w przestrzeni kosmicznej. Za każdym razem człowiek przebywał na orbicie coraz dłużej (pierwszy statek, którym człowiek poleciał w Kosmos, nazywał się Wostok 1 – pobyt kosmonauty Jurija Gagarina w przestrzeni kosmicznej trwał 108 minut). Jednak życie w małym statku kosmicznym nie pozwala na prowadzenie badań. Prawdziwą stacją badawczą była radziecka stacja Mir („Pokój"), istniejąca od 1986 r. i rozbudowywana przez dołączanie kolejnych modułów do 1996 r. W wyniku rozbudowy masa stacji osiągnęła ponad 130 ton. Przez kilkanaście lat przebywało na niej 137 kosmonautów z wielu krajów, którzy przeprowadzili tysiące eksperymentów naukowych i zdobyli bezcenne doświadczenia związane z reakcją organizmu ludzkiego na długotrwały pobyt w stanie nieważkości. Kiedy rozpoczęto budowę Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), stację Mir trzeba było zamknąć.

Źródło: NASA/Crew of STS-91 (http://commons.wikimedia.org), edycja: Krzysztof Jaworski, public domain.

Pierwsze moduły Międzynarodowej Stacji Kosmicznej zostały wyniesione na orbitę w 1998 roku. Nowa stacja – podobnie jak Mir – została zaprojektowana w systemie modułowym. Projektowana objętość pomieszczeń ma wynosić ponad 1 100 m^3, a masa – ponad 400 ton. Na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej będzie mogło przebywać jednocześnie 6 osób.



Międzynarodowa Stacja Kosmiczna na orbicie okołoziemskiej

Na stacjach kosmicznych przeprowadza się nie tylko eksperymenty naukowe z różnych dziedzin fizyki i astronomii. Równie ważne są badania związane ze szczególnymi

warunkami panującymi na stacji, mianowicie ze stanem nieważkości. Są to badania np. krystalizacji ciał w tym stanie (nie występuje wtedy zjawisko konwekcji) oraz wpływu stanu nieważkości na organizm człowieka.

3. Stan nieważkości

Widziałeś pewnie transmisje z pokładu stacji kosmicznej, podczas których kosmonauta jakby pływał, mógł się ustawiać w dowolnej pozycji, a puszczony przez niego przedmiot nie spadał, tylko unosił się w kabinie. Co to jest stan nieważkości i w jakich warunkach mamy z nim do czynienia?
Wiemy, że na powierzchni Ziemi działa na nas siła grawitacji. Najbardziej to odczuwamy, gdy musimy wejść po wysokich schodach lub na górski szczyt. A czy na pokładzie stacji kosmicznej istnieje grawitacja? Oczywiście, że tak – inaczej zarówno stacja, jak i jej załoga nie poruszałyby się wokół Ziemi. Do tego potrzebna jest siła dośrodkowa, którą jest siła grawitacji. Dlaczego zatem na Ziemi odczuwamy ciężar, a na orbicie – nie?

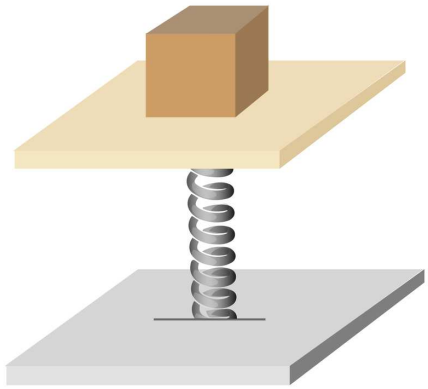
Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Zmiana siły nacisku paczki na wagę sprężynową w czasie ruchu windy

Na blacie leży paczka oraz waga analogowa. Następnie widać wnętrze windy i na środku wagę. Demonstrator kładzie paczkę na wadze. Pojawia się inset obok z działającymi siłami. Demonstrator wciska przycisk aby waga z paczką pojechała na górę. Obok głównego

ekranu pojawia się drugi inset przedstawiający budynek. Następnie winda jedzie w dół. Później pokazane są dwa zdjęcia przedstawiające ludzi w stanie nieważkości.

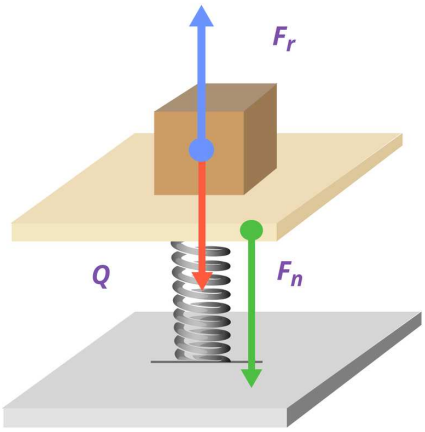
Kiedy położysz paczkę na wadze sprężynowej, spowodujemy ugięcie sprężyny. Sytuacja ta została przedstawiona na rysunku **A**.



A

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Pod wpływem nacisku paczki, wynikającego z siły grawitacji, sprężyna ugina się aż do uzyskania stanu równowagi. Paczka znajdująca się w tym stanie jest nieruchoma, co w myśl I zasady dynamiki oznacza, że wypadkowa sił na nią działających wynosi zero. Jakie siły działają na paczkę?

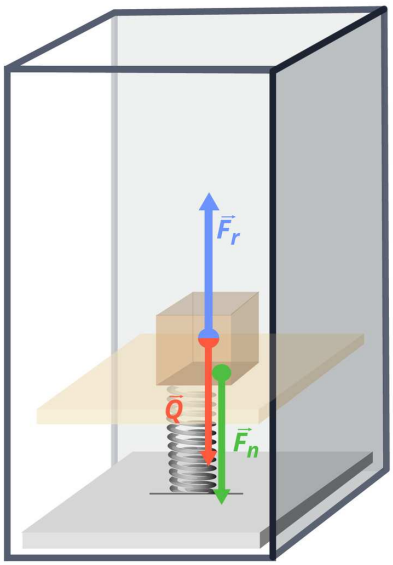


B

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Oczywiście, działa siła grawitacji Q oraz reakcja sprężyny na nacisk (zgodnie z III zasadą dynamiki paczka działa na sprężynę siłą nacisku F_{n}, a sprężyna na paczkę – siłą reakcji F_{r}).

Na rysunku **B** widzimy, że $F_r = Q$ (I zasada dynamiki); wartości obu sił są równe. Jednocześnie siła $F_{\mathrm{r}} = F_{\mathrm{n}}$(zgodnie z III zasadą dynamiki wartości sił akcji i reakcji są równe).

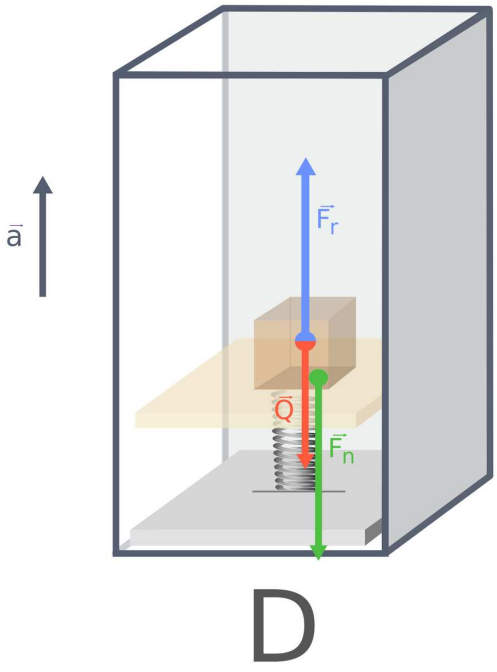


C

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Przedstawione wyżej rozumowanie sprawdza się zarówno w sytuacji pokazanej na rysunku, jak i wtedy, gdy nasza paczka jedzie ruchem jednostajnym (np. windą). Wskazania wagi są równe sile grawitacji Q – rysunek **C**.

Co się jednak stanie, gdy winda, która znajdowała się w stanie spoczynku, ruszy w górę?



Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Będzie wówczas poruszać się ruchem przyspieszonym (załóżmy dla uproszczenia, że jest to ruch jednostajnie przyspieszony). Co nam w takiej sytuacji podpowiadają zasady dynamiki?

Skoro winda porusza się w górę ruchem jednostajnie przyspieszonym, robi to również paczka (oczywiście domyślasz się, że sprężyna dodatkowo nieco się ugnie). Aby paczka poruszała się ruchem przyspieszonym, siła wypadkowa działająca na tę paczkę musi być różna od zera i mieć zwrot w górę (zgodnie z II zasadą dynamiki). Oznacza to, że siła F_{r} będzie większa od siły Q i wypadkowa sił działających na paczkę będzie spełniać równanie:

$$m \cdot a = F_{\mathrm{r}} - Q$$

gdzie:

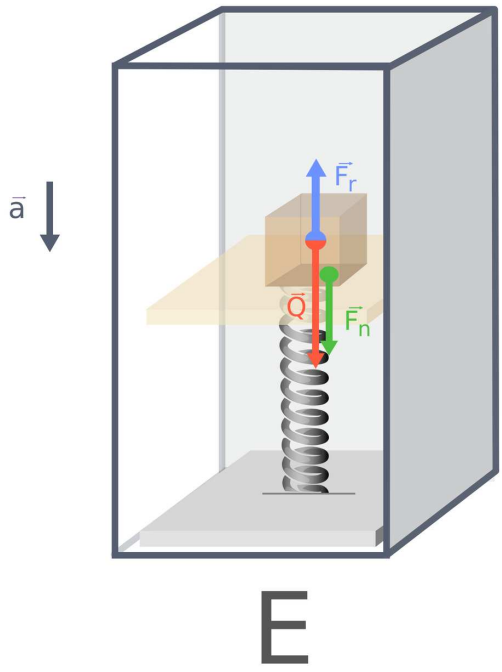
m – masa paczki; a - przyspieszenie windy, a tym samym również przyspieszenie paczki.

Sytuacja przedstawiona została na rysunku **D**.

Siła $F_{\mathrm{r}} = m \cdot a + Q$. W związku z tym (i III zasadą dynamiki) również siła nacisku $F_{\mathrm{n}} = m \cdot a + Q$. Wniosek jest oczywisty: **siła nacisku wzrosła**.

Taki stan występuje w statku kosmicznym podczas startu: rakieta poruszająca się z rosnącym przyspieszeniem rozpędza również kosmonautów – efektem jest tzw. przeciążenie. Kosmonauci naciskają na fotele, na których leżą, siłą wielokrotnie większą od swojego ciężaru. Jest to stan nietypowy dla ludzkiego organizmu, więc kosmonauci odbywają wcześniej wielogodzinne treningi w tzw. wirówkach przeciążeniowych.

Po pewnym czasie statek dociera na orbitę, silniki zostają wyłączone – rozpoczyna się lot orbitalny. Siła grawitacji działa cały czas: zakrzywia tor statku i tor, po którym poruszają się kosmonauci. Skąd zatem bierze się stan nieważkości?
Wróćmy na chwilę do naszej windy – pomogła nam ona zrozumieć stan przeciążenia. Przyjmijmy, że teraz winda zaczyna zjeżdżać w dół. Oczywiście, na początku porusza się ruchem przyspieszonym. Co teraz powiedzą nam zasady dynamiki?



Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Skoro ruch odbywa się z przyspieszeniem a w dół, to zgodnie z II zasadą dynamiki siła wypadkowa będzie zwrócona w dół.
Oznacza to, że $m \cdot a = Q - F_r$, a siła $F_r = Q - m \cdot a$, zatem siła nacisku $F_n = Q - m \cdot a$. Im większe przyspieszenie osiągnie nasza winda podczas jazdy w dół, tym mniejsze będą wskazania wagi. Uzyskamy wtedy stan **niedociążenia**. Działające siły przedstawiono na rysunku **E**.

Powyższe równania pokazują nam, że siła nacisku może być równa zero. Stanie się to, gdy Q będzie równe $m \cdot a$.

Pod wpływem sił grawitacji spadające swobodnie ciała uzyskują przyspieszenie zwane przyspieszeniem grawitacyjnym: $g = \frac{F_{\text{grawitacji}}}{m}$ (zgodnie z II zasadą dynamiki). Siła grawitacji

$Q = m \cdot g$, co oznacza, że siła nacisku na podłoże będzie równa zero, gdy $Q = m \cdot g = m \cdot a$.

Co się dzieje wtedy z windą? Spada ona z przyspieszeniem równym grawitacyjnemu. Jak widać, umiesz już osiągać stan braku nacisku na podłoże – właśnie taki stan nazywamy stanem nieważkości. A jak do windy ma się stacja kosmiczna? Przede wszystkim nasza winda może poruszać się nie tylko pionowo, lecz także poziomo; torem będzie wówczas krzywa zwana parabolą. Po takich parabolach poruszają się samoloty, w których na krótko osiągany jest stan nieważkości. Na stację kosmiczną i na kosmonautę działają siły grawitacji zależne od ich masy, ale przyspieszenia grawitacyjne są jednakowe. Stacja i kosmonauta „spadają" z jednakowym przyspieszeniem, a jednocześnie poruszają się po okręgu. Efektem jest brak wzajemnego nacisku, a zatem stan nieważkości.

4. Satelity i sondy naukowe

Zapewne wszyscy z was słyszeli o teleskopie kosmicznym Hubble'a. Jego nazwa pochodzi od nazwiska Edwina Hubble'a – odkrywcy rozszerzania się Wszechświata (na temat tego zagadnienia dowiesz się więcej w końcowych rozdziałach podręcznika). To nie jedyne takie urządzenie. Dlaczego wysyłamy teleskopy na orbitę? Głównym powodem jest niekorzystny wpływ ziemskiej atmosfery na przeprowadzane obserwacje. Niektóre rodzaje promieniowania są przez nią niemal całkowicie pochłaniane, co uniemożliwia badanie pewnych obiektów i wielu interesujących zjawisk.

Teleskop Hubble'a (**H**ubble **S**pace **T**elescope – HST) został wyniesiony na orbitę okołoziemską w 1990 r. Obiega Ziemię w niespełna 97 minut. Powstał dzięki współpracy dwóch agencji astronomicznych – amerykańskiej NASA i europejskiej ESA. Naprawy tego teleskopu odbywają się w przestrzeni kosmicznej, a dokonują ich kosmonauci. Teleskop Hubble'a dostarcza ciekawego materiału badawczego dla astronomów.

Teleskop Hubble'a znajduje się w przestrzeni kosmicznej od 1990 r. Zdjęcie zostało zrobione podczas drugiej misji serwisowej z pokładu promu Discovery. Do tej pory odbyło się pięć takich misji

Teleskop kosmiczny Chandra (jego nazwa pochodzi od nazwiska Subrahamanyana Chandrasekhara – hinduskiego fizyka pracującego w USA). Wystrzelony w 1999 r., krąży po okołoziemskiej orbicie eliptycznej, której apogeum znajduje się w odległości prawie 129 000 km od środka Ziemi, a perygeum – ok. 20 000 km od środka Ziemi. Teleskop ten rejestruje źródła promieniowania rentgenowskiego – promieniowanie to pozwala na obserwacje białych karłów, gwiazd neutronowych i czarnych dziur. Będziemy mówili o takich obiektach w dalszej części tego podręcznika.

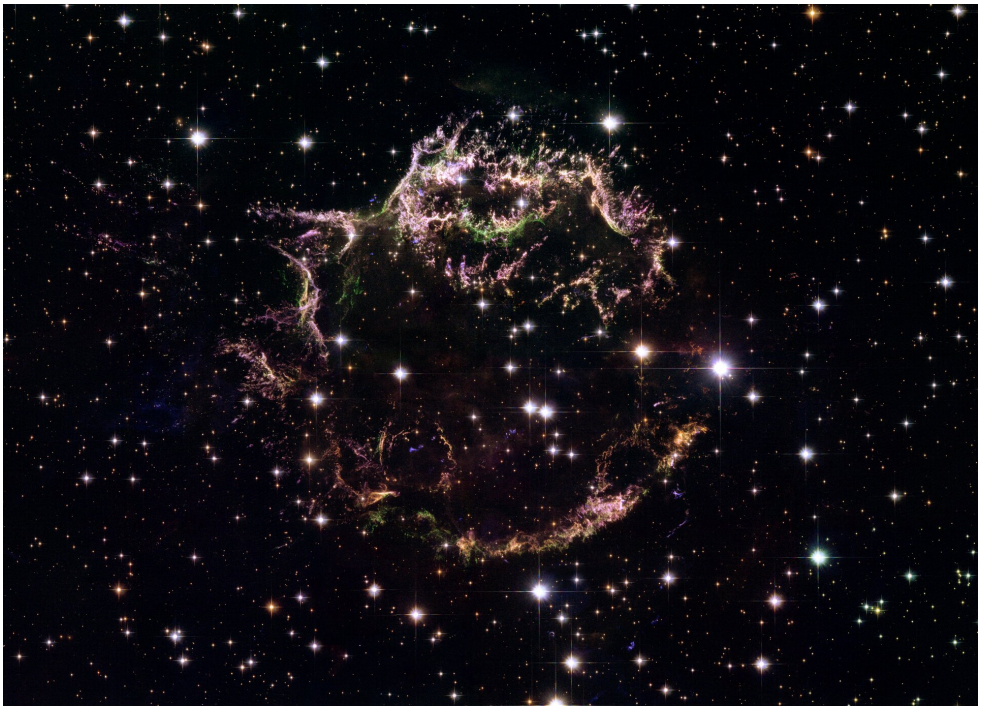
Zakres promieniowania podczerwonego jest badany za pomocą **teleskopu kosmicznego Spitzera**. Teleskop ten został umieszczony na orbicie okołosłonecznej. Porusza się po tej samej orbicie co Ziemia – podąża za nią w pewnej odległości.

Aby szukać planet poza Układem Słonecznym, zbudowano **teleskop Keplera** i w 2009 r. umieszczono go na orbicie okołosłonecznej . W wyniku awarii zakończył on swoją misję w 2013 r.

Kosmiczne Obserwatorium Herschela, w skrócie nazywane **Herschel** to z kolei teleskop Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA). Jest przeznaczony do prowadzenia obserwacji astronomicznych dalekiej podczerwieni i fal submilimetrowych. Obserwatorium zostało wyniesione na orbitę wokół punktu L_2 (punkt Lagrange'a) 14 maja 2009 r. Jest to punkt układu Ziemia–Słońce, znajdujący się w odległości ok. 1,5 mln km od Ziemi. Głównym zadaniem Herschela były obserwacja procesu powstawania galaktyk i ich ewolucji oraz badanie powstawania gwiazd. Zwierciadło tego teleskopu ma średnicę 3,5 m. Razem z Kosmiczym Obserwatorium Herschela został wystrzelony satelita Planck – jego zadaniem był

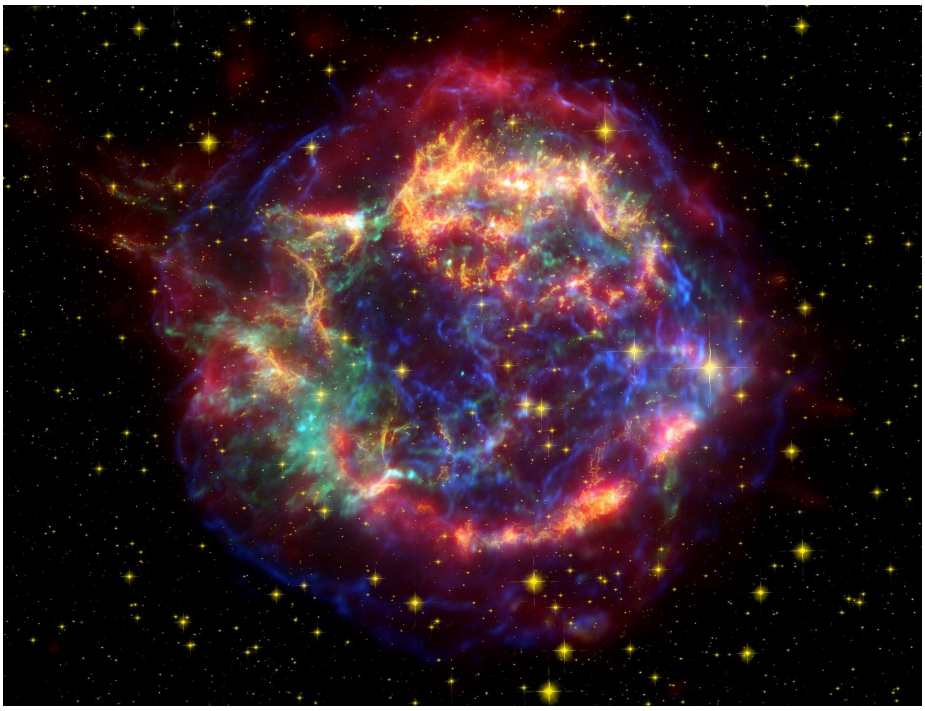
pomiar nieregularności rozkładu promieniowania mikrofalowego pochodzącego z kosmosu. O efektach tych pomiarów i ich znaczeniu dla kosmologii przeczytasz w ostatnich modułach tego podręcznika.

Na 2018 r. planowane jest wystrzelenie następcy teleskopu Hubble'a – **teleskopu Webba**. Ma mieć on 2,5 raza większą średnicę zwierciadła niż teleskop Hubble'a i będzie badał głównie obszar podczerwieni.
Budowa teleskopów kosmicznych to jedno z najbardziej skomplikowanych zadań współczesnej nauki. Taki satelita porusza się z prędkością kilkudziesięciu kilometrów na sekundę po zakrzywionych orbitach, a teleskop musi przez kilka godzin być skierowany w jeden punkt nieba. Ze względu ma metodę pomiarów aparatura musi być utrzymywana w temperaturze niewiele większej od zera absolutnego.
Co nam daje użycie tak wielu różnych teleskopów? Popatrzmy na dwa zdjęcia umieszczone niżej.



Obiekt Cassiopeia A

Powyższe zdjęcie zostało wykonane przez teleskop kosmiczny Hubble'a i przedstawia obiekt Cassiopeia A. Silne źródło fal radiowych w gwiazdozbiorze Kasjopei jest pozostałością po wybuchu gwiazdy. Obiekt ten idzialnym jzny. Rozymry tego gwiazdozbioru przekraczają 10 lat świetlnych. Złożenie zdjęć wykonanych przez inne teleskopy kosmiczne daje znacznie ciekawsze informacje.



Obiekt Cassiopeia A

Zdjęcie wykonane powyżej zostało złożone ze zdjęć wykonanych przez różne teleskopy; na zdjęciu powyżej na zdjęciu powyżej kolor czerwony to zdjęcie z teleskopu Spitzer, pomarańczowy – teleskopu Hubble, a niebieski – z teleskopu Chandra. Wiadomo już, że rozszerzająca się powłoka ma temperaturę $30\ \text{mln K}$ i przemieszcza się z prędkością $10\ 000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Teleskop kosmiczny Chandra odkrył w centrum mgławicy obiekt o bardzo małych rozmiarach i temperaturze nieco powyżej $2\ \text{ mln K}$ – przypuszczalnie jest to gwiazda neutronowa. Pamiętaj o tych odkryciach, kiedy pod koniec roku szkolnego będziesz opisywał ewolucję gwiazd.
Przedstawiiśmy krótką listę satelitów służących człowiekowi – są jeszcze satelity meteorologiczne, stacje kosmiczne badające inne planety, a nawet lądujące na ich powierzchniach. Niektóre z tych obiektów opuściły już Układ Słoneczny i zmierzają w stronę gwiazd.

Podsumowanie

- Satelity, czyli ciała krążące wokół Ziemi, innych planet lub Słońca, mają różnorodne zastosowanie – od naukowego po komercyjne (telekomunikacja, audycje radiowe i telewizyjne). Niektóre satelity są przeznaczone do celów wojskowych lub wywiadowczych.
- Satelity pozwalają na obserwację zjawisk niedostępnych z powierzchni Ziemi albo na zbieranie doświadczeń związanych z długim pobytem człowieka w stanie nieważkości.

- Gdy rakieta porusza się pionowo w górę z określonym przyspieszeniem (np. podczas startu), doznaje przeciążenia. Oznacza to zwiększony nacisk na fotele, na których leżą kosmonauci. Siła, z jaką oni naciskają na ziedzenia , jest wielokrotnie większa od ciężaru astronautów:
  $F_{\mathrm{n}} = Q + m \cdot a$

  ,
  gdzie:
  F_{n} – siła nacisku; Q – siła grawitacji; a – przyspieszenie, z jakim porusza się rakieta podczas startu.
- Ciało poruszające się pionowo w dół (np. w windzie) z pewnym przyspieszeniem różnym od przyspieszenia grawitacyjnego znajduje się w stanie niedociążenia. Ciężar pozorny takiego ciała jest mniejszy od ciężaru mierzonego w stanie spoczynku. Wartość siły nacisku na podłoże jest równa $F_{\mathrm{n}} = Q - m \cdot a$. Gdy winda, w której znajduje się ciało, spada swobodnie, mamy do czynienia ze stanem nieważkości. Oznacza to brak wzajemnego nacisku ciała i windy.
- W pojeździe kosmicznym poruszającym się tylko pod wpływem siły grawitacji (bez włączonych silników) panuje stan nieważkości. Wynika on z tego, że zarówno pojazd, jak i jego załoga doznają jednakowych przyspieszeń i dlatego te ciała na siebie nie naciskają.

Praca domowa

Doświadczenie 1.1

Wyznaczenie wartości przyspieszenia windy.

Waga najczęściej wyskalowana jest w jednostkach masy – kilogramach, natomiast siłomierz – w niutonach. W obu przypadkach potrzebna jest znajomość masy – twojej lub ciężarka. Przyjmij wartość przyspieszenia grawitacyjnego $g = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. Przyjęcie przybliżonej wartości $10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ spowoduje, że uzyskane wyniki będą zbyt mało dokładne.

Co będzie potrzebne

- waga sprężynowa (nie elektroniczna) lub siłomierz (pożyczony ze szkoły);
- winda;
- odważnik (jeśli dysponujesz siłomierzem).

Instrukcja

1. **Sytuacja, w której posługujesz się wagą sprężynową:** wejdź na wagę, odczytaj jej wskazania i zanotuj je w następujących przypadkach

   :

   1. gdy winda się nie porusza;
   2. gdy winda rusza w górę;
   3. gdy winda rusza w dół;
   4. podczas jednostajnego ruchu windy.

2. **Sytuacja, w której posługujesz się siłomierzem:** zawieś odważnik, odczytaj jego wskazania i zanotuj je w następujących przypadkach:

1. gdy winda się nie porusza;

2. gdy winda rusza w górę;

3. gdy winda rusza w dół;

4. podczas jednostajnego ruchu windy.

3. Wydrukuj formularz i sporządź notatkę.

Tabela do doświadczenia

Imię i nazwisko:			
Data:		Klasa:	
Cel lub przedmiot obserwacji:			
Winda:	F_N (_____)	mg (_____)	a (_____)
stoi			
rusza w górę			
rusza w dół			

jedzie ze stałą prędkością			
WNIOSKI:			

Podsumowanie

Gdy winda rusza w górę, to mamy do czynienia ze stanem .....
Gdy winda rusza w dół, to mamy do czynienia ze stanem .....
Na Ziemi jest zatem możliwe/niemożliwe osiągnięcie stanu ..... oraz .....

Słowniczek

GLONASS (ros. Globalnaja Nawigacionnaja Sputnikowaja Sistiema)

– rosyjski system nawigacji satelitarnej (odpowiednik amerykańskiego GPS). Składa się z 24 satelitów ze statusem operacyjnym (31 łącznie), które swoim zasięgiem pokrywają całą kulę ziemską.

GPS (ang. Global Positioning System)

– amerykański system nawigacji satelitarnej. Pozwala na precyzyjne ustalenie (z dokładnością do 100 m) położenia obiektów na powierzchni Ziemi; działa na podstawie sygnałów radiowych wysyłanych z satelitów.

nieważkość

– stan, w którym mimo istnienia siły grawitacji dwa ciała na siebie nie naciskają (siła nacisku wynosi zero). Występuje, gdy np. człowiek znajduje się w kabinie, która spada tylko pod wpływem siły grawitacji (bez działania dodatkowych sił typu opór powietrza lub napęd kabiny). Taki stan występuje również w stacjach kosmicznych i rakietach po wyłączeniu silników, kiedy to ruch odbywa się tylko pod wpływem siły grawitacji.

Przyczyną tego zjawiska jest to, że zarówno rakieta, jak i pasażerowie poruszają się z jednakowym przyspieszeniem grawitacyjnym.

przeciążenie

– stan, w którym ciało (organizm) poddawane jest działaniu siły zewnętrznej (innej niż siła grawitacji), zależnej od masy ciała. Maksymalne przeciążenie, które może znieść człowiek bez trwałego uszczerbku na zdrowiu odpowiada sile ok. dziewięć razy większej od siły ciężkości (mówi się też, że jest to przeciążenie wynoszące $9g$).

punkt libracyjny (punkt L_2)

– obszar w przestrzeni (np. w kosmosie) stanowiącej obszar układu dwóch ciał oddziaływujących ze sobą siłami grawitacji, w którym dodatkowe ciało o masie znacznie mniejszej od każdego z dwóch ciał tworzących układ (mówimy, że jest to tzw. masa zaniedbywalna) może pozostawać w spoczynku względem obu ciał o większej masie; punkt L_2 jest jednym z pięciu punktów tego typu w układzie gwiazda–planeta i dla układu Słońce–Ziemia znajduje się on w półcieniu planety, co czyni go dobrym miejscem do prowadzenia obserwacji przestrzeni kosmicznej.

spadanie swobodne

– przykład ruchu jednostajnie przyspieszonego, odbywającego się z przyspieszeniem równym przyspieszeniu grawitacyjnemu (działa jedynie siła grawitacji).

wirówka przeciążeniowa

– urządzenie, którego zadaniem jest wytworzenie przeciążenia; jest to długie ramię wirujące względem osi obrotu przechodzącej przez jeden z końców tego ramienia; długie ramię z drugiej strony jest zakończone monitorowaną kabiną.

Zadania

Ważne!

Przed przystąpieniem rozwiązywania zadań przygotuj kartkę papieru i przybory do pisania.

Ćwiczenie 1

Przeczytaj zdania i oceń ich prawdziwość.

	Prawda	Fałsz
W stanie niedociążenia mogą znaleźć się pasażerowie samochodu zjeżdżającego z góry z określonym przyspieszeniem.	◯	◯
Podczas startu samolotu załoga i pasażerowie znajdują się w stanie niedociążenia.	◯	◯
Pasażer diabelskiego młyna podczas wznoszenia się do góry może doznać stanu przeciążenia.	◯	◯
Pasażer samolotu podczas gwałtownego opadania znajduje się w stanie niedociążenia.	◯	◯
W stanie nieważkości na ciało nie działa żadna siła.	◯	◯
W stanie przeciążenia siły działające na ciało równoważą się.	◯	◯

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Przyjmij $g = 10\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. W windzie poruszającej się w górę z przyspieszeniem $a = 2\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ pasażer o ciężarze 640 N naciska na podłogę z siłą o wartości:

- ◯ F = 512 N.
- ◯ F = 640 N.
- ◯ F = 128 N.
- ◯ F = 64 N.
- ◯ F = 768 N.
- ◯ F = 5120 N.
- ◯ F = 1280 N.

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 3

Przyjmij $g = 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

W windzie poruszającej się w dół ruchem jednostajnie przyspieszonym pasażer o masie 80 kg naciska na podłogę z siłą o wartości F = 600 N. Winda porusza się z przyspieszeniem:

- [ ] $a = 17{,}5\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}$.
- [ ] $a = 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.
- [ ] $a = 2{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.
- [ ] $a = 7{,}5\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}$.
- [ ] $a = 17{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.
- [ ] $a = 7{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.
- [ ] $a = 2{,}5\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}$.
- [ ] $a = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

Źródło: Magdalena Grygiel <Magdalen.Grygiel@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Układ Słoneczny i budowa Galaktyki

Czy mimo niedoskonałości naszych zmysłów ludzkość jest w stanie wejrzeć w głąb Wszechświata? Czy umiemy określić miejsce Układu Słonecznego w Galaktyce, a Galaktyki – we Wszechświecie? Jeśli chcesz wiedzieć więcej, czytaj dalej...

Układ Słoneczny i budowa Galaktyki

Większość naszej wiedzy o Wszechświecie i kosmosie zgromadziliśmy, nie opuszczając naszej planety. Jednak już nawet obserwacje z Ziemi i jej orbity przyniosły fascynujące odkrycie i piękne obrazy. Na zdjęciu powyżej jedno z najbardziej niesamowitych ujęć kosmosu: Mgławica Koński Łeb sfotografowana powtórnie z okazji 23. rocznicy umieszczenia teleskopu na orbicie.

Już potrafisz

- odnajdować na niebie planety i Księżyc;
- wymienić nazwy powszechnie znanych planet.

Nauczysz się

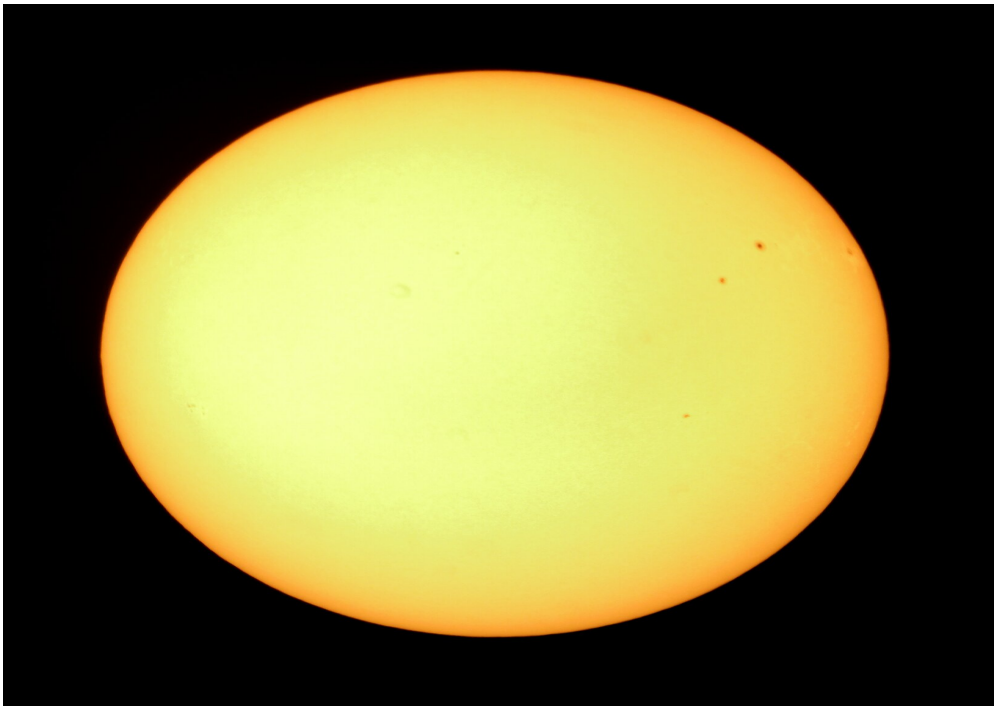
- opisywać budowę Galaktyki i miejsce Układu Słonecznego w Galaktyce;
- wymieniać najważniejsze obiekty w Galaktyce – gwiazdy, gromady gwiazd, mgławice gazowe – i rozpoznawać je na fotografiach.

1. Układ Słoneczny

Popatrzmy na Wszechświat z jego wnętrza. Jeśli będziemy używać tylko oczu, zbyt wiele nie zobaczymy, ale przecież mamy do dyspozycji potężne narzędzia – teleskopy o średnicach

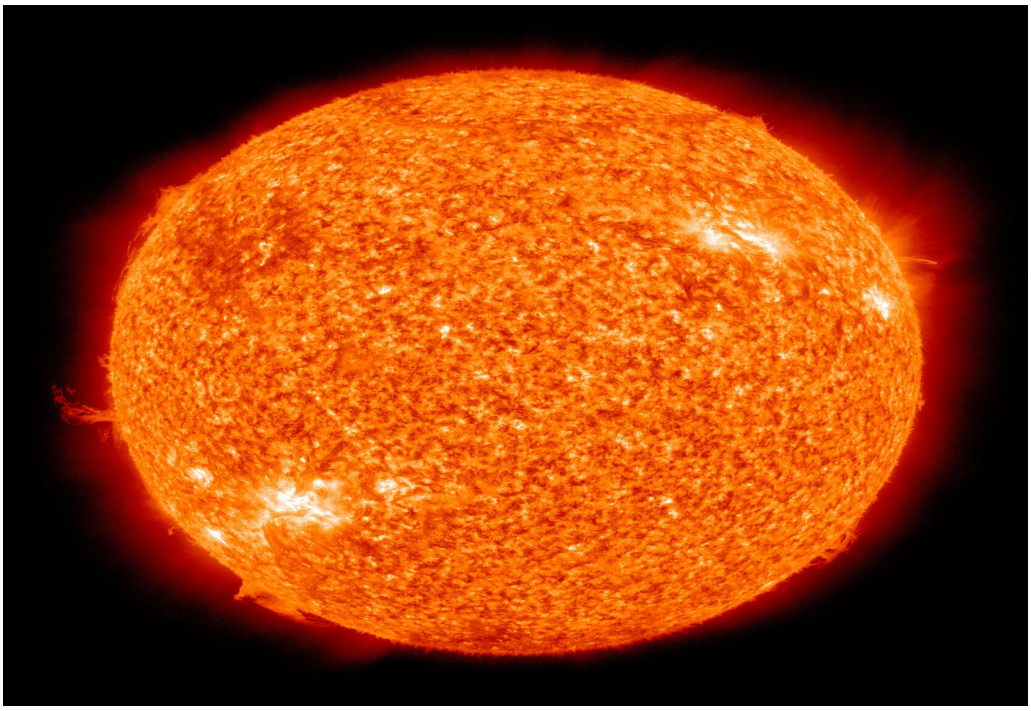
kilkunastu metrów umieszczone na Ziemi oraz teleskopy umieszczone w Kosmosie (mówiliśmy o nich w poprzednim rozdziale) – dają nam one ogromne ilości informacji. Teraz tylko zasygnalizujemy, jakie obiekty występują w Kosmosie. Gdybyśmy chcieli dokładnie wszystko opisać, ten podręcznik musiałby mieć tysiące stron, a i tak mogłoby się okazać, że część informacji jest już nieaktualna, bo jakiś instytut naukowy właśnie ogłosił wyniki analizy materiału przesłanego z sondy kosmicznej. Prawdziwą kopalnią wiedzy o Wszechświecie będzie dla was internet, ale napotkacie tam także sporo informacji już nieaktualnych, a nawet nieprawdziwych. Powinniście się także nauczyć rozróżniać hipotezy od faktów naukowych.

Żyjemy zatem w Kosmosie. Razem z innymi planetami krążymy wokół Słońca. Dla nas to ogromna kula gorącego gazu o średnicy ok. 1 milion 400 tys. kilometrów. Średnica tej gwiazdy jest 109 razy większa od średnicy Ziemi. Nie będziemy tu podawać dokładnych rozmiarów lub mas obiektów; będziemy je odnosić właśnie do rozmiarów lub masy Ziemi bądź Słońca. Gdyby Ziemia była kulką o średnicy 1 cm, to średnica Słońca wynosiłaby 109 cm.



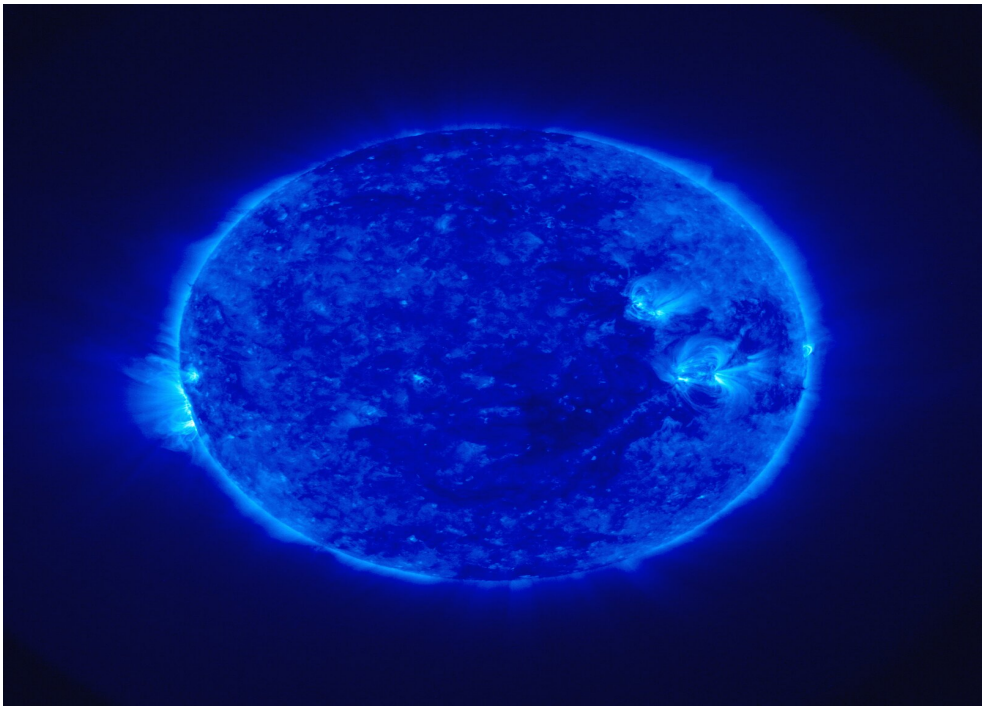
Słońce

Słońce w świetle widzialnym



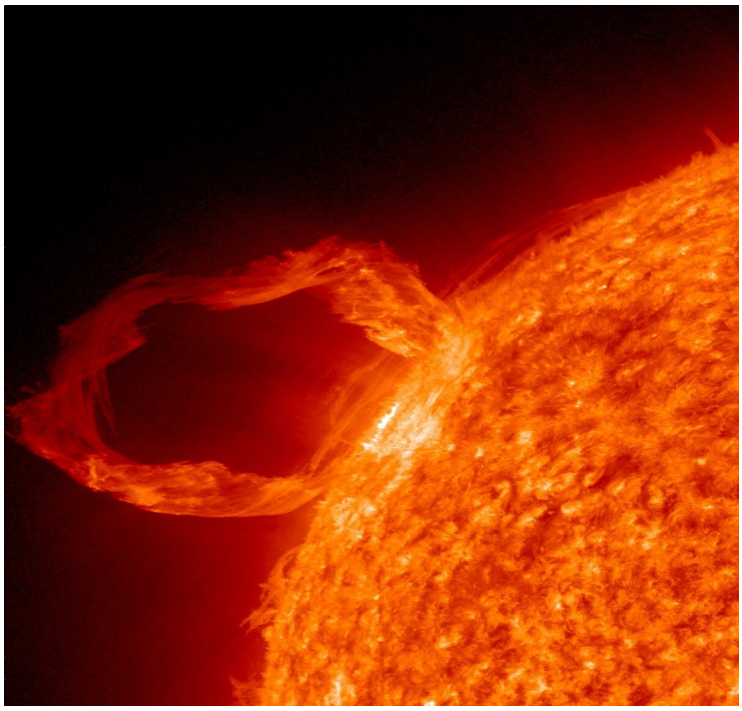
Słońce

Słońce widoczne w podczerwieni



Słońce

Słońce widoczne w ultrafiolecie

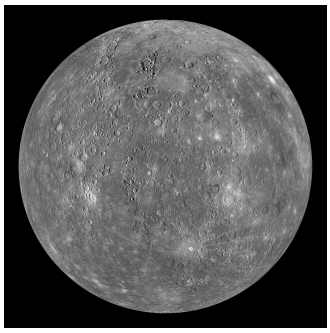


Słońce

Protuberancja słoneczna

Cztery powyższe zdjęcia przedstawiają Słońce widoczne w różnych obszarach widma fal elektromagnetycznych. Z następnej części tego podręcznika dowiecie się, dlaczego Słońce ma tak różny wygląd. Ale już teraz widzicie, że Słońce niekoniecznie jest spokojnie świecącą tarczą, jaką widzimy, kiedy się opalamy na plaży. Informacje o plamach słonecznych, rozbłyskach chromosferycznych, protuberancjach i innych zjawiskach na powierzchni Słońca znajdziecie w internecie.
Wokół Słońca krąży 8 planet. Od czasów starożytnych znano: Merkurego, Wenus, Marsa, Jowisza i Saturna. Uran został odkryty przez Williama Herschela w 1781 r.

Jak wyglądają najważniejsze obiekty Układu Słonecznego (z wyjątkiem Ziemi, o której uczycie się na lekcjach geografii)?

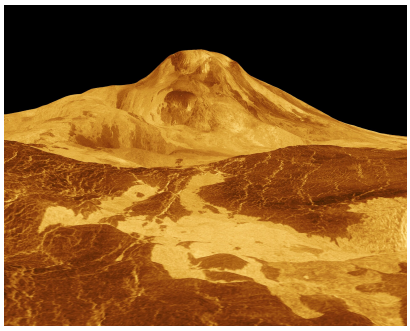


Merkury

Źródło: NASA-APL (https://commons.wikimedia.org).

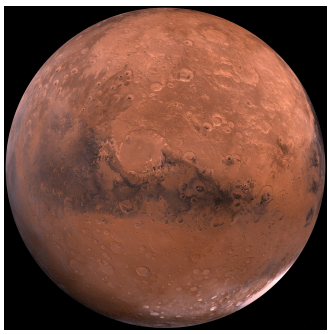
Wenus

Źródło: NASA (http://commons.wikimedia.org).



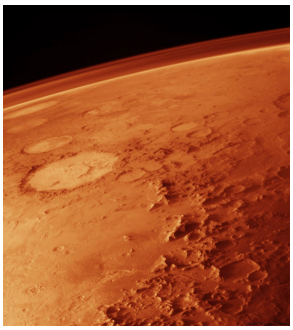
Góra na powierzchni Wenus

Źródło: NASA (http://commons.wikimedia.org).



Zdjęcie Marsa wykonane przez sondę kosmiczną

Źródło: WikiImages (http://pixabay.com).



Mars widziany z orbity stacji kosmicznej krążącej wokół tej planety

Źródło: NASA (https://commons.wikimedia.org).

Ślady łazika marsjańskiego Curiosity

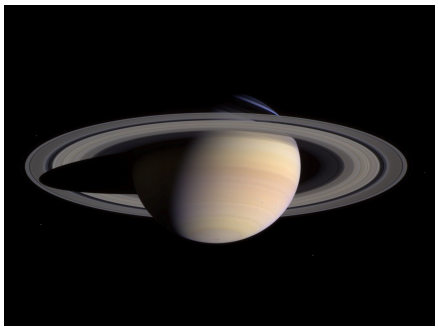
Źródło: NASA/JPL-Caltech/MSSS (https://commons.wikimedia.org).

Obraz Jowisza w lunecie średniej wielkości. Widoczne 4 księżyce, które odkrył Galileusz w roku 1610

Źródło: stewartde (https://commons.wikimedia.org), Krzysztof Jaworski.

Zdjęcie Jowisza zrobione przez sondę Voyager 1 24 stycznia 1979, z odległości 40 milionów km

Źródło: NASA/JPL (https://commons.wikimedia.org).

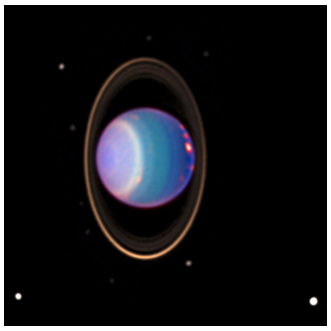


Zdjęcie Saturna wykonane przez sondę Cassini w 2004 roku

Źródło: NASA / JPL / Space Science Institute (https://commons.wikimedia.org).

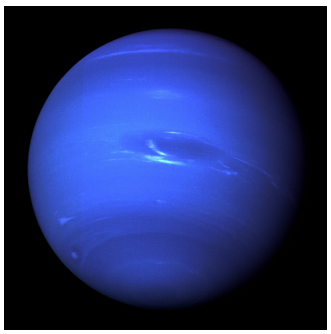
Zdjęcie Urana wykonane przez sondę Voyager 2

Źródło: NASA/JPL (http://commons.wikimedia.org).



Uran

Źródło: Erich Karkoschka (University of Arizona) and NASA/ESA (https://commons.wikimedia.org).



Zdjęcie Neptuna wykonane przez sondę Voyager 2 w roku 1989

Źródło: NASA (http://commons.wikimedia.org).

2. Galaktyka, czyli Droga Mleczna

Kiedy patrzymy na niebo podczas bezksiężycowej nocy, bez trudu możemy dostrzec jasną smugę przecinającą całe niebo. To nasza Galaktyka – Droga Mleczna. Tak ją nazwali starożytni, a ponieważ podobnych tworów są we Wszechświecie miliardy, to jej nazwę piszemy zawsze wielką literą. Czym jest Galaktyka?

2.1. Rodzaje galaktyk

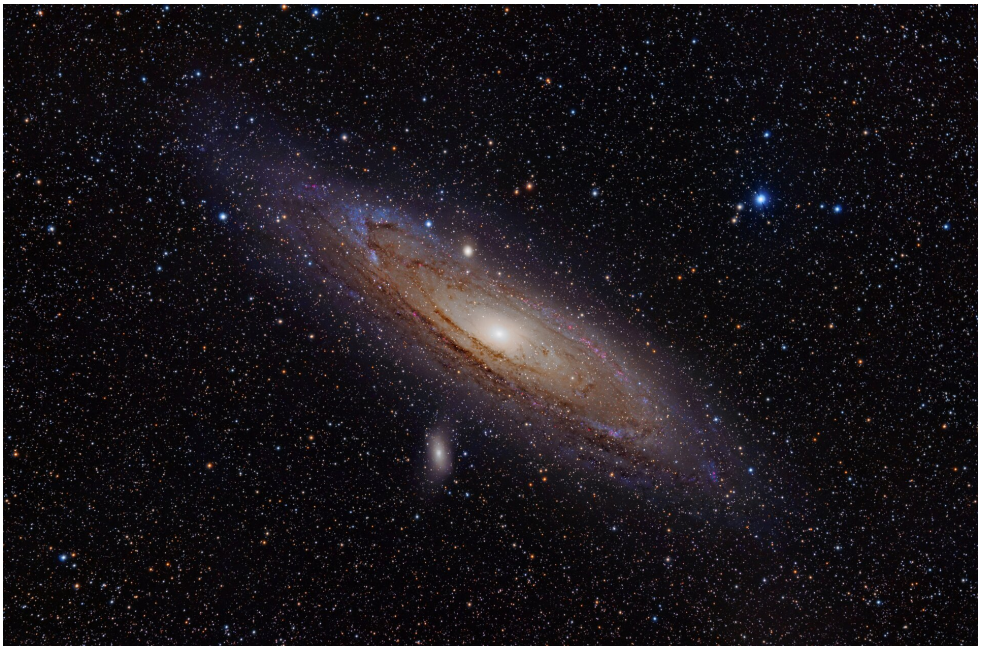
Przez tysiące lat Galaktyka traktowana była jako obłok, ale już w starożytnej Grecji pojawiały się poglądy, że jest to zbiorowisko gwiazd położonych bardzo blisko siebie.
Już w starożytności zaobserwowano na niebie inne obiekty podobne do Galaktyki. Nazwali je mgławicami. W średniowieczu znano mgławicę w gwiazdozbiorze Andromedy, w połowie XVII wieku Huygens odkrył mgławicę w Orionie. Gdański astronom Heweliusz zarejestrował 14 mgławic. Dalsze badania nieba, rozwijające się zwłaszcza po zastosowaniu fotografii, zaowocowały zdjęciami tysięcy galaktyk.
Okazało się, że obiekty zwane wcześniej mgławicami mają bardzo różną budowę. Niektóre z nich są obłokami gazu znajdującymi się w naszej Galaktyce (mgławica Oriona), inne są prawdziwymi galaktykami, czyli zbiorowiskami gwiazd, leżącymi dalej niż jakakolwiek gwiazda Drogi Mlecznej.

Galaktyki we Wszechświecie.

Galaktyka spiralna

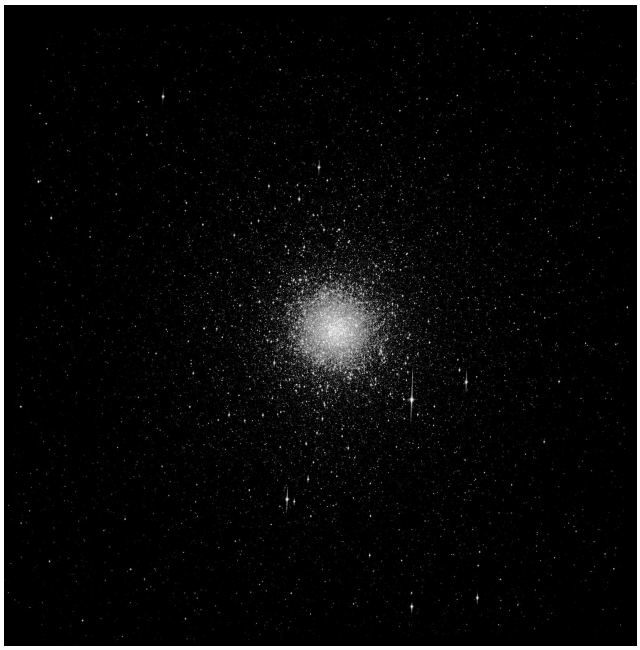
Galaktyki we Wszechświecie.

Galaktyka spiralna z poprzeczką



Galaktyki we Wszechświecie.

Wielka galaktyka w gwiazdozbiorze Andromedy (spiralna z poprzeczką)



Galaktyki we Wszechświecie.
Galaktyka Eliptyczna

Galaktyki we Wszechświecie.
Obłoki Magellana –Wielki i Mały, karłowate galaktyki nieregularne, satelity naszej Galaktyki

Badacze stopniowo dochodzili do wniosku, że galaktyki mogą mieć różną budowę i kształty. Ogólna charakterystyka zawiera trzy główne rodzaje galaktyk: nieregularne, eliptyczne i spiralne (tych ostatnich jest najwięcej, bo ok. 80%). Istotną podgrupą są galaktyki spiralne z poprzeczką.

2.2. Jak wygląda nasza Galaktyka?

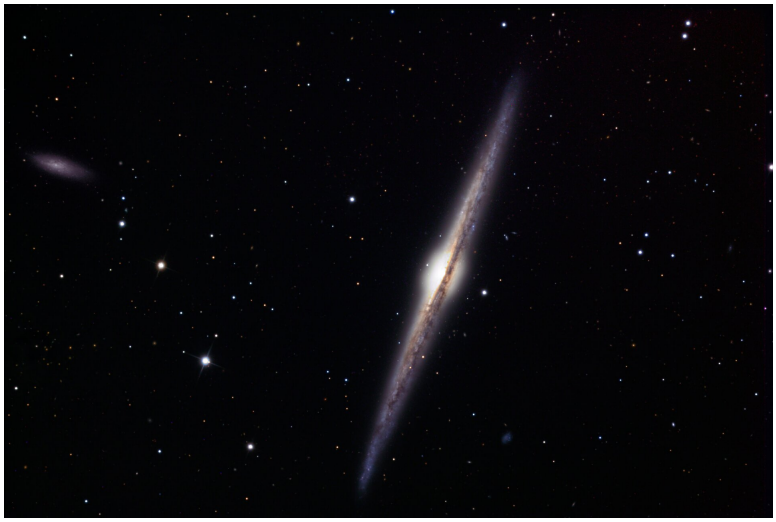
Patrząc na te piękne zdjęcia, można zapytać: a jak wygląda nasza Galaktyka? Widzimy ją na niebie w postaci pasa gwiazd rozdzielającego się na kilka ramion. Problem polega na tym, że jesteśmy wewnątrz niej. Czy możemy zobaczyć, jak wygląda las, kiedy jesteśmy wewnątrz niego? Najbliższe drzewa zasłaniają nam widok i nie wiemy, czy za 100 m zobaczymy polanę, koniec lasu czy też może ścieżkę.
Takie problemy powodowały, że przez dziesiątki lat poznaliśmy budowę galaktyk odległych o 2 mln lat świetlnych (np. galaktyki w gwiazdozbiorze Andromedy) czy nawet miliardy lat świetlnych. Zależy to od ustawienia danej galaktyki – galaktyki spiralne są na ogół w kształcie dysku, tj. są grubsze w środku, a cieńsze bliżej brzegów. Jeżeli patrzymy w kierunku prostopadłym do powierzchni dysku, to widzimy jego dokładny kształt i strukturę. Jeżeli patrzymy w płaszczyźnie równika galaktyki, widzimy przekrój dysku – grube jądro galaktyki i cienkie brzegi. Galaktyka Andromedy widoczna jest dla obserwatora z Ziemi ukośnie, pod kątem ok. 77° do osi jej dysku. Mimo że znaliśmy budowę innych galaktyk, nie znaliśmy budowy naszej. Ale niedługo się dowiecie, że różne gazy różnie promieniują. Ponadto tam, gdzie gazu jest więcej, promieniowanie staje się bardziej intensywne. Analiza tego promieniowania, obejmująca różne długości fal elektromagnetycznych, doprowadziła do wniosku, że nasza Galaktyka jest galaktyką spiralną z poprzeczką.

Droga Mleczna

Droga Mleczna czyli Galaktyka widziana na niebie

Droga Mleczna

Przypuszczalny kształt naszej Galaktyki widzianej z kierunku prostopadłego do jej płaszczyzny



Galaktyka spiralna w gwiazdozbioerze Warkocz Bereniki

Galaktyka spiralna w gwiazdozbiorze Warkocz Bereniki widziana „z boku”

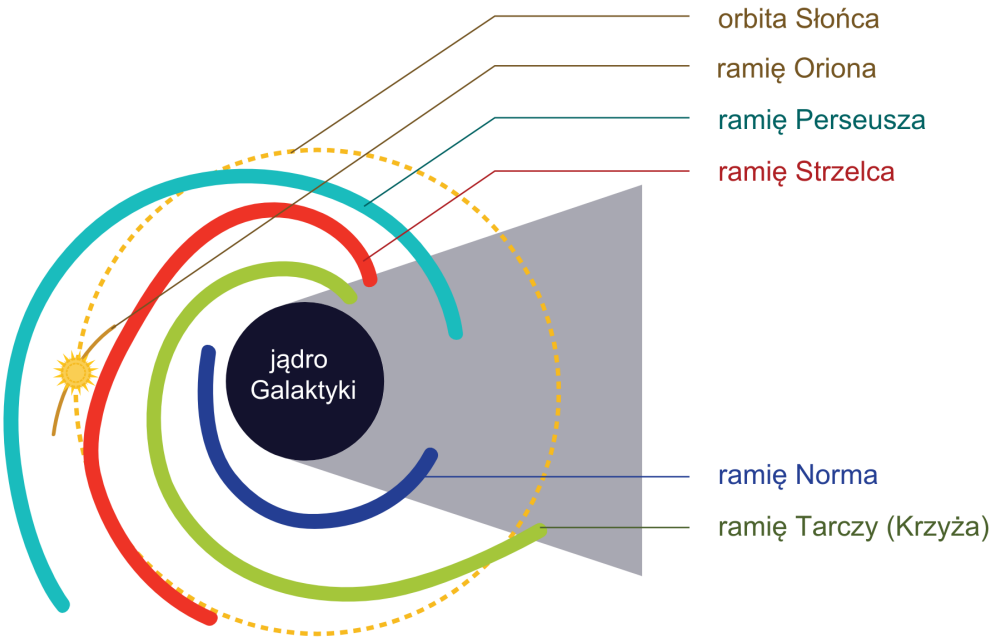
2.3. Nasze miejsce w Galaktyce

Poniższe zdjęcie przedstawia centralne części Galaktyki, sfotografowane w podczerwieni przez teleskop Spitzera. W świetle widzialnym nie zobaczymy tych obszarów, ponieważ w płaszczyźnie równika Galaktyki znajduje się dużo gazu i pyłu, które zasłaniają dalszą przestrzeń.

Centrum Galaktyki

Centralne obszary Galaktyki sfotografowane w podczerwieni

Dysk naszej Galaktyki ma średnicę ok. 120 000 i grubość ok. 2–3 tys. lat świetlnych. Liczba gwiazd w Galaktyce szacowana jest na 200–300 mld. Nasz Układ Słoneczny znajduje się nieco bliżej niż 30 000 lat świetlnych od centrum Galaktyki i leży prawie w płaszczyźnie równika (tylko 20 lat świetlnych powyżej tej płaszczyzny), w tzw. ramieniu Oriona. Oczywiście, podobnie jak pozostałe gwiazdy Galaktyki, Słońce i planety Układu Słonecznego obiegają centrum. Prędkość Słońca na tej orbicie wynosi ok. $270 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$, co daje okres obiegu wokół centrum galaktyki trwający ponad 200 mln lat.



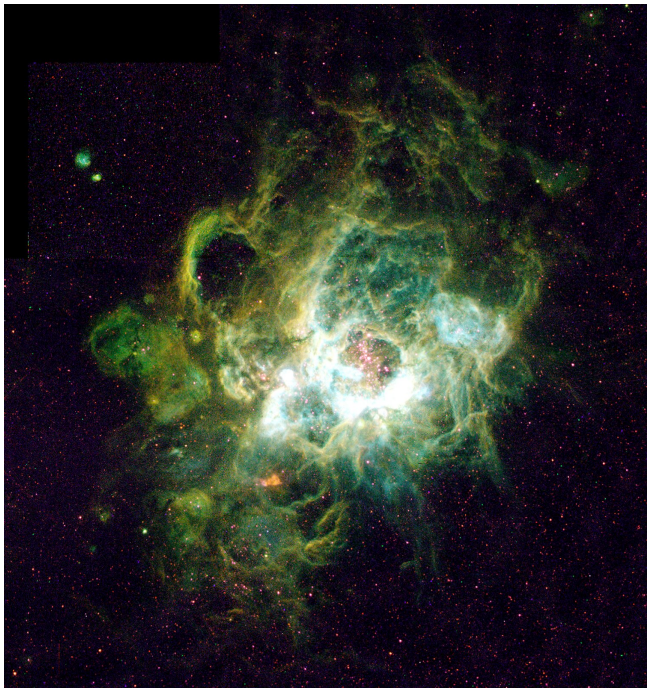
Nasze miejsce w Galaktyce

Położenie Słońca (żółta kropka) w Galaktyce. Szary obszar to miejsce, którego nie możemy zobaczyć

2.4. Co wchodzi w skład naszej Galaktyki?

W skład Galaktyki wchodzą nie tylko gwiazdy, lecz także obiekty takie jak:

- mgławice gazowe i pyłowe;
- gromady otwarte i kuliste gwiazd;
- supermasywna czarna dziura w centrum.



Mgławica gazowa w gwiazdozbiorze Trójkąta

Mgławica gazowa w gwiazdozbiorze Oriona. Ma rozmiary około 30 lat świetlnych

Mgławica gazowo – pyłowa. Zdjęcie wykonane w czerwonym obszarze widma. Widoczne ciemne miejsca zagęszczonego gazu i pyłu, w których powstają nowe gwiazdy. Warto odnaleźć w internecie informacje o takich obiektach jak NGC 2467, mgławica Trąba Słonia, mgławica emisyjna IC 1396, mgławica Carina

Podwójna gromada otwarta gwiazd w gwiazdozbiorze Perseusza. Odległość od Słońca ok. 7000 lat świetlnych. Wiek gwiazd w gromadzie wynosi kilka milionów lat

Gromada gwiazd Plejady w gwiazdozbiorze Byka. Odległość nieco ponad 400 lat świetlnych. Widoczne obłoki gazu. Gromada zwiera ok. 500 gwiazd, wiek gwiazd wynosi ok. 100 mln lat

Na gromady otwarte gwiazd składają się gwiazdy stosunkowo młode. Wynika to z tego, że gwiazdy powstające w gromadzie stopniowo się rozpraszają i po kilkuset milionach lat już nie tworzą struktury odróżniającej się od otoczenia.
Z kolei w gromadach kulistych znajdują się stare gwiazdy. Gromad kulistych znamy w tej chwili ok. 200. Rozmieszczone są one w dość jednorodny sposób wokół centrum Galaktyki. Istnieją przypuszczenia, że przynajmniej niektóre gromady kuliste stanowią pozostałość po małych galaktykach wchłoniętych przez naszą.

Gromada gwiazd w gwiazdozbiorze Centaura

Najjaśniejsza gromada kulista na niebie znajduje się w gwiazdozbiorze Centaura. Zawiera około 10 mln gwiazd, odległość wynosi 17 tys. lat świetlnych, wiek gwiazd w gromadzie ocenia się na 12 miliardów lat.

Kiedy oglądamy kolorowe zdjęcia mgławic, gromad gwiazd lub galaktyk, warto pamiętać, że takiego obrazu nie zobaczymy nawet za pomocą najpotężniejszych teleskopów. Takie zdjęcia wykonywane są często przez filtry, aby pokazać rozmieszczenie np. wodoru lub innych gazów. Obszarom o różnych temperaturach nadaje się również różne barwy – najchłodniejsze są często czerwone, nieco bardziej gorące – żółte, a najbardziej gorące – niebieskie. Nie jest to jednak regułą.

3. Gwiazdy

Gwiazdy widzisz na niebie jako świecące punkty. Wiesz już, że są one położone w różnych odległościach od Ziemi, ale ponieważ nie widzimy tych różnic, mamy wrażenie, że gwiazdy są rozmieszczone na powierzchni sfery. Jedne gwiazdy świecą mocniej, inne – słabiej. Wiemy już, że jasność gwiazdy widocznej na niebie określa się za pomoca skali wielkości gwiazdowych. Gwiazda, nawet największa, ale obserwowana z dużej odległości, będzie świeciła słabo. Czym jednak różnią się gwiazdy między sobą? Z następnej części podręcznika dowiesz się, że ilość energii wysyłanej przez gwiazdę zależy od jej temperatury i powierzchni (czyli od promienia danej gwiazdy). Pomiar kąta paralaksy rocznej umożliwia wyznaczenie odległości gwiazdy od Ziemi. Prawa fizyki odkryte pod koniec XIX i na początku XX wieku pozwoliły obliczyć temperaturę powierzchni gwiazdy i długość jej promienia. Jakie zatem są gwiazdy?
Większość gwiazd jest podobna do naszego Słońca. Oczywiście różnia się one masą, długością średnicy oraz ilością wysyłanej energii. Nazywane są gwiazdami ciągu głównego. Najwięcej energii wysyłają gwiazdy o masie nawet 100 razy większej niż masa naszego Słońca i średnicy do 15 razy większej niż średnica Słońca. Na ich powierzchni panuje temperatura przekraczająca 25 tys. K. Te ciała niebieskie wysyłają kilkaset tysięcy razy więcej energii niż Słońce. Nasza gwiazda, której masę i średnicę przyjmujemy tutaj jako jednostkę, ma temperaturę ok. 6000 K. Ale do tej grupy należą także takie gwiazdy, których masa jest mniejsza niż masa Słońca – nawet do 10 razy. Tyle samo razy mniejsza jest ich średnica, a temperatura na ich powierzchni jest niższa od temperatury powierzchni Słońca – wynosi nawet poniżej 3000 K. Powoduje to, że wysyłają one ponad 1000 razy mniej energii niż Słońce. O tym, dlaczego takich gwiazd jest najwięcej oraz jakie zjawiska zachodzą w ich wnętrzach, dowiesz się z ostatnich lekcji w naszym podręczniku.

Odkryto, że istnieją także gwiazdy różniące się znacznie od gwiazd ciągu głównego. Jedne z nich mają temperaturę zbliżoną do temperatury Słońca, ale wysyłają nawet milion razy więcej energii. Nazywamy je nadolbrzymami – ich średnice są od kilkuset do tysiąca razy większe niż średnica Słońca, która wynosi ok. 1 400 000 km. 1000 średnic Słońca to 1,4 mld km. Średnia odległość od Ziemi od Słońca to 150 mln km. Odległość od Jowisza do Słońca to 780 mln km. Gdyby zatem taka gwiazda znalazła się na miejscu naszego Słońca, to wszystkie

4 planety wewnętrzne znalazłyby się w jej wnętrzu, a Jowisz krążyłby bardzo blisko jej powierzchni. Mniejsze od nadolbrzymów są gwiazdy zwane olbrzymami – ich średnice są od kilkudziesięciu do stu razy większe od średnicy Słońca.

Ostatnią grupą gwiazd, o której wspomnimy w tej lekcji, są białe karły. Ich temperatura jest kilka razy wyższa od temperatury Słońca. Białe karły wysyłają jednak znacznie mniej energii, zatem wniosek jest oczywisty – mają niewielkie rozmiary. Są mniej więcej tak duże jak Ziemia, co oznacza, że ich średnice są ok. 100 razy mniejsze od średnicy Słońca. Niektórzy z was na pewno słyszeli, że istnieją również obiekty takie jak gwiazdy neutronowe i czarne dziury. O tych obiektach będziemy mówili na lekcjach poświęconych ewolucji gwiazd.

Podsumowanie

- Układ Słoneczny to Słońce i 8 planet krążących wokół niego. Oprócz tych planet do Układu Słonecznego należą ich księżyce, różnej wielkości planetoidy oraz tzw. planety karłowate. Wokół Słońca po bardzo wydłużonych orbitach krążą także komety.
- Słońce i inne ciała krążące wokół niego są częścią Galaktyki widocznej na niebie jako Droga Mleczna. Nasza Galaktyka zawiera od 200 do 300 miliardów gwiazd. Jest to jedna z większych galaktyk we Wszechświecie – ma średnice równą ok. 120 tys. lat świetlnych.
- Nasz Układ Słoneczny znajduje się nieco bliżej niż 30 000 lat świetlnych od centrum Galaktyki i leży prawie w płaszczyźnie równika, w tzw. ramieniu Oriona. Oczywiście, podobnie jak pozostałe gwiazdy Galaktyki, Słońce i planety Układu Słonecznego obiegają centrum Galaktyki. Prędkość Słońca na tej orbicie wynosi ok. 270 km/s, co daje okres obiegu wokół centrum wynoszący ponad 200 mln lat.
- W Galaktyce znajdują się bardzo różne gwiazdy. Najwięcej jest gwiazd podobnych do Słońca – mają one średnicę do kilkunastu razy większą niż średnica Słońca. Znacznie mniej jest gwiazd dużo większych, mających ok. 100 razy większą średnicę niż średnica Słońca (olbrzymy), i mające średnicę ok. 1000 razy większą niż średnica Słońca (nadolbrzymy). Najmniejsze gwiazdy to białe karły, które mają wyższą temperaturę niż temperatura naszego Słońca, ale ich średnice są mniej więcej takie same jak średnica Ziemi.

> **Praca domowa**

Polecenie 1.1

Wyszukaj w internecie informacje dotyczące poszczególnych planet Układu Słonecznego: ich masy, średnice, odległości od Słońca.

1. Oblicz, ile czasu potrzebuje światło słoneczne, aby dotrzeć do poszczególnych planet Układu Słonecznego.

2. Po jakich planetach kosmonauci w przyszłości mogliby spacerować, a po których nie byłoby to możliwe?

Polecenie 1.2

Wyszukaj w internecie informacje dotyczące komet, planet karłowatych, pasa planetoid, pasa Kuipera i obłoku Oorta.

Słowniczek

biały karzeł

– obiekt astronomiczny o rozmiarach porównywalnych z rozmiarami Ziemi, charakteryzujący się ogromną gęstością masy; emituje promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie fal widzialnych, jest końcowym etapem ewolucji gwiazd takich jak Słońce.

ciąg główny

– obszar (pas) ciągnący się wzdłuż przekątnej diagramu Hertzsprunga-Russella (wykres klasyfikujący gwiazdy z uwagi na jasność gwiazdy oraz typ widmowy); w ciągu głównym skupia się większość gwiazd (w tym Słońce).

czarna dziura

– obiekt astronomiczny wytwarzający tak silne pole grawitacyjne, że nie może go opuścić nawet światło; wszystkie ciała, które za bardzo zbliżą się do czarnej dziury, zostaną przez nią pochłonięte. Masa czarnej dziury we wnętrzu naszej Galaktyki jest ok. 4 mln razy większa niż masa Słońca.

gwiazda neutronowa

– gwiazda zbudowana głównie z neutronów; powstaje w wyniku gwałtownego zapadnięcia się jądra gwiazdy o dużej masie, w wyniku czego protony łączą się z elektronami. Gwiazdy neutronowe charakteryzują się niezwykle wysoką gęstością – gwiazda o promieniu mniejszym niż 10 km może mieć masę nawet do 2,5 razy większą niż masa Słońca. Gwiazdy neutronowe bardzo szybko wirują – jeden obrót trwa ułamek sekundy. Hipoteza o istnieniu takich gwiazd powstała w latach 30. XX wieku, ale dopiero odkrycie tzw. pulsarów (1967 r.) potwierdziło, że takie obiekty rzeczywiście istnieją.

hipoteza

– naukowe przypuszczenie, które wymaga potwierdzenia lub zaprzeczenia; w fizyce hipotezy wymagają potwierdzenia doświadczalnego.

nadolbrzymy

– gwiazdy o masach 10–50 razy większych od masy Słońca i rozmiarach średnicy większych nawet 1500 razy od średnicy Słońca; typ widmowy nadolbrzymów może mieścić się w zakresie od typu O (nadolbrzym błękitny) do typu M (nadolbrzym czerwony).

Podsumowanie wiadomości z działu I

W tym dziale zapoznaliśmy was z obiektami widocznymi na wieczornym niebie. Opisaliśmy zjawiska, które można na nim zaobserwować, oraz podaliśmy wyjaśnienia niektórych z nich. Przedstawiliśmy prawa powszechnego ciążenia i wpływ sił grawitacyjnych na ruch różnych obiektów w pobliżu Ziemi oraz dużo dalej – w Układzie Słonecznym, Galaktyce, Kosmosie. Ponieważ ruch planet, księżyców i sztucznych satelitów jest ruchem krzywoliniowym, a w przybliżeniu także ruchem po okręgu, nauczyliśmy was opisu takiego ruchu oraz opisaliśmy siłę dośrodkową jako jego przyczynę.

Na przestrzeni dziejów obserwacje nieba niejednokrotnie doprowadzały do odkryć ważnych dla życia ludzi

1. Obiekty i zjawiska widoczne na niebie

1. **Gwiazdy**, **planety**, **Księżyc** i poruszające się **sztuczne satelity** możemy zauważyć nawet podczas krótkiej obserwacji nocnego, bezchmurego nieba.
2. **Ruch sfery niebieskiej** (ze wschodu na zachód) i **ruch Księżyca** (z zachodu na wschód) w stosunku do gwiazd zauważymy po kilku godzinach obserwacji.
3. **Cykl faz Księżyca** wymaga kilku tygodni obserwacji.
4. **Przesuwanie się planet na tle gwiazd** widoczne jest po kilku lub kilkunastu miesiącach obserwacji.

5. Gwiazdy widoczne na niebie mają różną jasność – astronomowie mówią, że mają one różną wielkość gwiazdową. Przykładowo: gwiazda drugiej wielkości gwiazdowej świeci na niebie jaśniej niż gwiazda czwartej wielkości gwiazdowej.
6. Do przeprowadzenia obserwacji nieba przydatne są obrotowe mapy nieba lub program Stellarium.

Źródło: ESO/H. Dahle (https://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY 4.0.

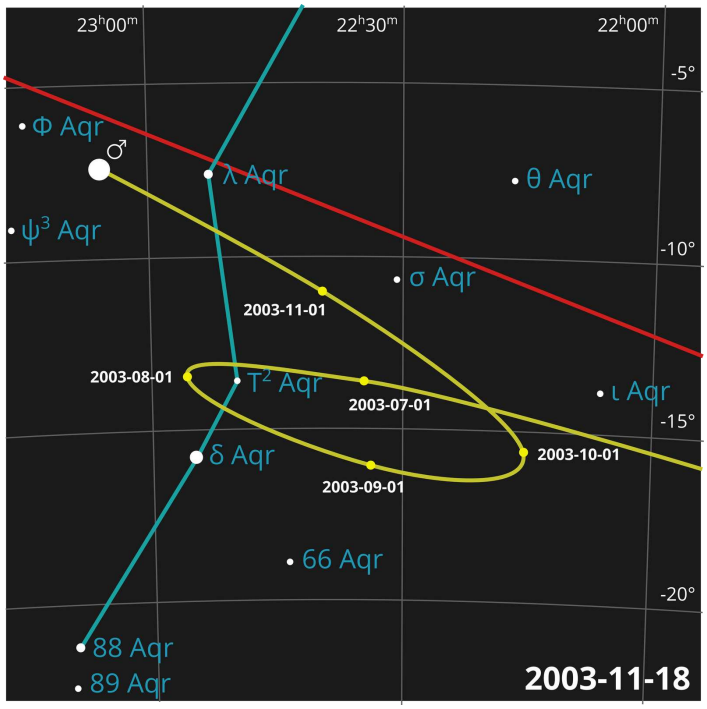
2. Księżyc – nasz naturalny satelita

1. Księżyc jest naturalnym satelitą Ziemi; pełen obieg Księżyca wokół Ziemi trwa około 27,3 doby. Jego tor ruchu jest elipsą, a średnia odległość od Księżyca do Ziemi wynosi ok. 380 tys. km.
2. Obserwowany kształt tarczy Księżyca zależy od wzajemnego położenia Słońca, Ziemi i Księżyca. Fazy Księżyca są skutkiem jego ruchu obiegowego wokół Ziemi i zmiany oświetlenia jego powierzchni, która jest widoczna z Ziemi, przez Słońce.
3. Zaćmienie Księżyca zachodzi, gdy znajdzie się on w cieniu Ziemi.
4. Powierzchnia Księżyca pokryta jest zwietrzałymi skałami, tzw. regolitem.
5. Informacje nt. budowy Księżyca uzyskano dzięki różnym projektom badawczym, m.in dzięki lądowaniu człowieka na jego powierzchni.

Zdjęcie Księzyca w kilka dni po nowiu. Widać obszar oświetlony bezpośrednio przez Słońce oraz tzw. popielate światło Księżyca

3. Ruch planet

1. Planety poruszają się na niebie w skomlikowany sposób – zmieniają swoją prędkość i kierunek ruchu, zakreślają pętle na tle gwiazd.
2. Według systemu geocentrycznego skomplikowane drogi planet są wynikiem ruchu planety odbywającego się po kilku okręgach jednocześnie.
3. Zgodnie z systemem heliocentrycznym Ziemia porusza się dookoła Słońca; pozorny ruch planet na niebie (wynikający z ruchu Ziemi) nakłada się na ich rzeczywisty ruch względem gwiazd.



Źródło: Eugene Alvin Villar (https://commons.wikimedia.org), Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY-SA 3.0.

4. Pomiar odległości w astronomii

1. Do wyznaczenia odległości do bliskich obiektów, takich jak Księżyc czy planety, wystarczą dwa punkty na Ziemi. Zmiana położenia obserwatora o kilka czy kilkanaście tysięcy kilometrów wystarczy, aby wykorzystać zjawisko**paralaksy geocentrycznej**i wyznaczyć szukane odległości.
2. Obecnie odległość od Ziemi do Księżyca wyznacza się za pomocą zjawiska odbicia światła laserowego wysłanego z Ziemi i odbitego od specjalnych odbłyśników umieszczonych na powierzchni naszego naturalnego satelity, m.in. dzięki wyprawom kosmicznym.
3. Zjawisko**paralaksy heliocentrycznej** (pozornego przesuwania się gwiazd znajdujących się bliżej Ziemi w stosunku do tych dalszych, co jest wynikiem zmiany położenia obserwatora) pozwoliło potwierdzić teorię Kopernika i na wyznaczyć odległości do najbliższych gwiazd.
4. Jednostki odległości używane w astronomii:
    1. **jednostka astronomiczna (1 AU)** – jest równa średniej odległości między Ziemią a Słońcem, czyli 149 mln km; jest najwygodniejszą jednostką w Układzie Słonecznym;
    2. **parsek (1 pc)** (skrót pochodzi od wyrażenia **par**alaksa **sek**undowa) – dla gwiazdy odległej o 1 parsek kąt paralaksy heliocentrycznej wynosi jedną sekundę kątową. Jednostki tej używają głównie astronomowie, aby wyrazić odległość do gwiazd i innych odległych obiektów astronomicznych;

3. **rok świetlny (1 ly)** – odległość, jaką światło przebywa w próżni w ciągu jednego roku. Jeżeli wyrażamy odległości w latach świetlnych, wiemy jednocześnie, ile lat wcześniej zdarzyło się to, co obecnie obserwujemy.

5. Ruch po okręgu

1. Do opisu ruchu po okręgu posługujemy się pojęciami „okresu obiegu" i „częstotliwość".
    1. Okresem (T) nazywamy czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego obiegu po okręgu.
    2. Częstotliwością (f) nazywamy liczbę pełnych obiegów wykonywanych w czasie 1 sekundy.

2. W ruchu jednostajnym po okręgu wartość prędkości liniowej jest stała, lecz zmieniają się jej kierunek i zwrot.

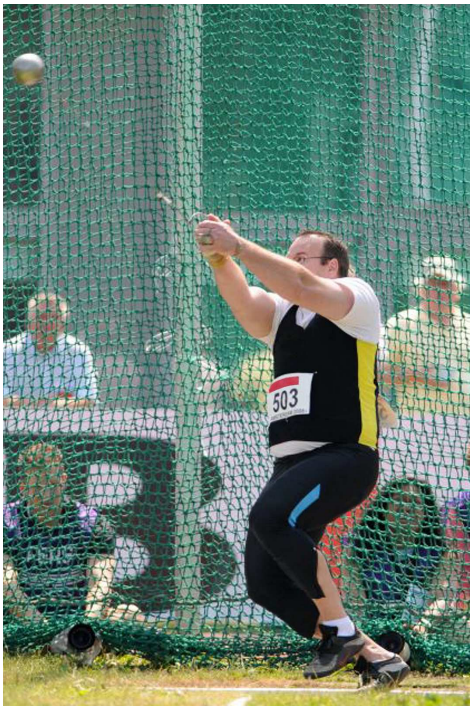
3. Prędkość liniowa jest styczna do okręgu.

4. Prędkość liniową (v) obliczamy ze wzoru: $v = \frac{2\pi r}{T}$
lub $v = 2\pi rf$, gdzie: $2\pi r$ – droga przebyta w ciągu jednego okresu T.

Samochody na rondzie

6. Siła dośrodkowa

1. Siłą odpowiedzialną za ruch ciała po okręgu jest siła dośrodkowa.
2. Wartość siły dośrodkowej obliczamy według wzoru:
   $F = \frac{m \cdot v^2}{r}$
   gdzie:
   $m[\mathrm{kg}]$ – masa poruszającego się ciała;
   $v\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$ – prędkość ciała;
   $r[m]$ – promień okręgu zakreślanego przez poruszające się ciało.
3. Funkcję siły dośrodkowej może pełnić pojedyncza siła działająca na ciało (np. siła grawitacyjna, magnetyczna, sprężystości) lub wypadkowa kilku różnych sił działających na ciało.



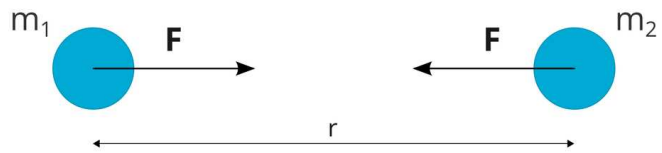
Źródło: Erik van Leeuwen (https://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY-SA 3.0.

7. Prawo powszechnego ciążenia

1. **Każde** dwa ciała przyciągają się wzajemnie **siłami grawitacji**.
2. Wartość siły grawitacji zależy od masy ciał i odległości między ich środkami; siła ta jest:
   - wprost proporcjonalna do iloczynu mas;
   - odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między ciałami.
3. Wartość siły grawitacji dla ciał kulistych lub takich, które możemy traktować jako punktowe (z uwagi na bardzo dużą, w porównaniu z rozmiarami samych ciał, odległość między nimi), można obliczyć ze wzoru: $F = G\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$
   gdzie:

G – stała grawitacji;
m_1, m_2 – masy ciał;
r – odległość między środkami ciał.

4. Siła grawitacji pełni funkcję siły dośrodkowej w ruchu planet wokół Słońca czy ruchu księżyców wokół planet bądź sztucznych satelitów poruszających się wokół Ziemi.



Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

8. Prędkości kosmiczne

1. Na planetę krążącą wokół Słońca lub innej gwiazdy działa siła grawitacji, która jest siłą dośrodkową.
2. Prędkość, z jaką planeta, księżyc planety lub sztuczny satelita Ziemi poruza się po orbicie o promieniu r wokół ciała centralnego, wyraża się zależnością: $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$. Masa M jest to masa ciała centralnego, wokół którego krąży drugie ciało, które ma znacznie mniejszą masę od ciała centralnego.
3. I prędkość kosmiczna to wartość prędkości, którą należy nadać ciału (stycznie do powierzchni Ziemi), aby mogło ono krążyć po orbicie kołowej o promieniu równym promieniowi Ziemi.
4. Znajomość okresu obiegu satelity wokół ciała centralnego i jego odległości od środka ciała centralnego pozwala wyznaczyc masę ciała centralnego: Słońca, planety czy nawet planetoidy (wiele z nich ma księżyce mniejsze od siebie).
5. Obecnie tylko rakieta wielostopniowa osiąga odpowiednie prędkości, które pozwalają umieścić statek kosmiczny na orbicie lub polecieć na Księżyc.

Źródło: ignis (https://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY-SA 3.0.

9. Ruch sztucznych satelitów Ziemi

1. Satelity, czyli ciała krążące wokół Ziemi, innych planet lub Słońca, mają różnorodne zastosowanie – od naukowego po komercyjne (telekomunikacja, audycje radiowe i telewizyjne). Niektóre satelity są przeznaczone do celów wojskowych lub wywiadowczych.
2. Dzięki satelitom możemy ogladać zjawiska niewidoczne z powierzchni Ziemi albo zbierać doświadczenia związane z długim pobytem człowieka w stanie nieważkości.

Źródło: Thegreenj at English Wikipedia (https://commons.wikimedia.org), public domain.

10. Przeciążenie i nieważkość

1. Gdy rakieta porusza się pionowo w górę z określonym przyspieszeniem (podczas startu), to doznaje **przeciążenia**. Oznacza to zwiększony nacisk na fotele, na których leżą kosmonauci podczas startu. Siła, z jaką oni naciskają na fotele, jest kilkakrotnie większa od ciężaru kosmonautów;
   $F_{\mathrm{n}} = Q + m \cdot a$
   gdzie:
   F_n

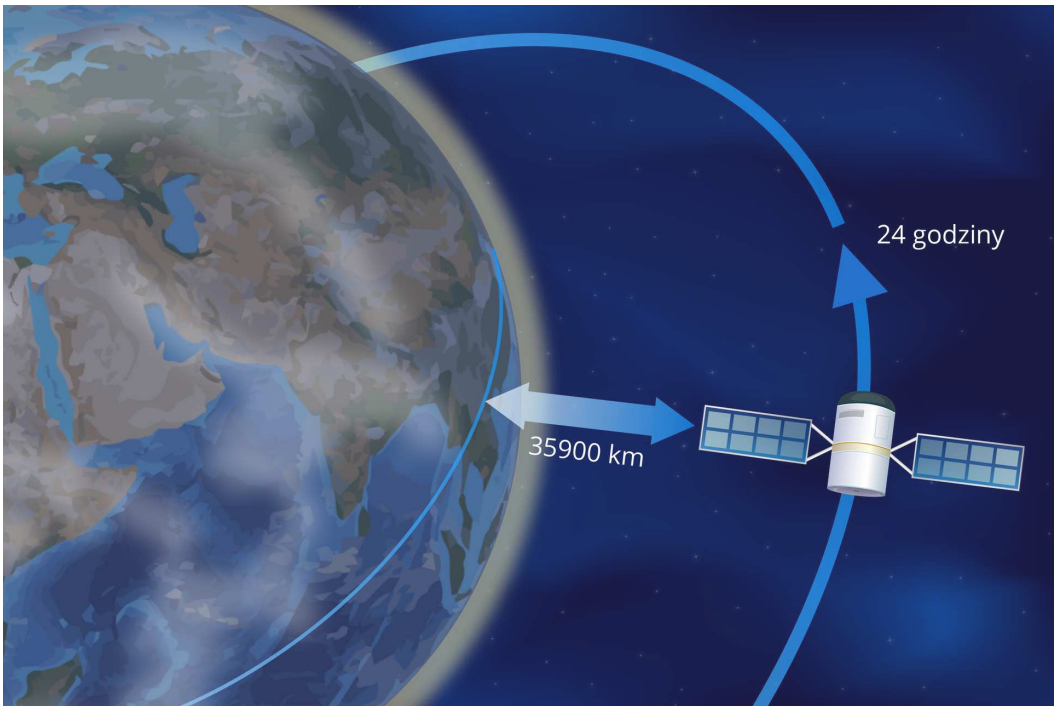
   siła nacisku;
   Q – siła grawitacji;
   a – przyspieszenie, z jakim porusza się rakieta podczas startu.
2. Ciało poruszające się pionowo w dół z pewnym przyspieszeniem (np. w windzie) różnym od przyspieszenia grawitacyjnego znajduje się w stanie **niedociążenia**. Ciężar pozorny takiego ciała jest mniejszy od ciężaru mierzonego w stanie spoczynku. Wartość siły nacisku na podłoże obliczamy ze wzoru: $F_{\mathrm{n}} = Q - m \cdot a$.
3. Gdy winda, w której znajduje się ciało, spada swobodnie, mamy do czynienia ze **stanem nieważkości**. Oznacza to brak wzajemnego nacisku ciała i windy.
4. W pojeździe kosmicznym poruszającym się tylko pod wpływem siły grawitacji (bez włączonych silników) panuje stan nieważkości. Wynika on z tego, że zarówno pojazd,

jak i jego załoga doznają jednakowych przyspieszeń i dlatego te ciała na siebie nie naciskają.

Źródło: NASA (http://commons.wikimedia.org), public domain.

11. Satelita geostacjonarny

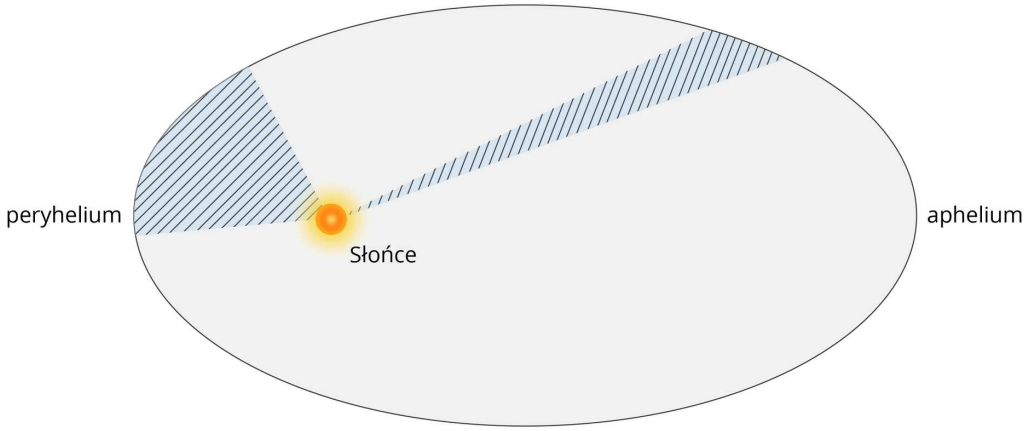
Satelita geostacjonarny to satelita, który „wisi" stale nad jednym punktem znajdującym się na powierzchni Ziemi (dokładniej: nad punktem na równiku). Krąży dookoła Ziemi, wykonując jeden obieg w czasie 24 godzin (dokładnie: 23 godzin, 56 minut i 4 sekund – bo tyle trwa jeden obrót Ziemi dookoła własnej osi),
Promień orbity takiego satelity wynosi około 42 tys. km, a jego prędkość ma wartość $3080 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Satelity tego typu sa wazne, bo większość z nich to **satelity telekomunikacyjne**, czyli takie, z których są nadawane programy telewizyjne bądź transmitowane rozmowy telefoniczne.



Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

12. Prawa Keplera

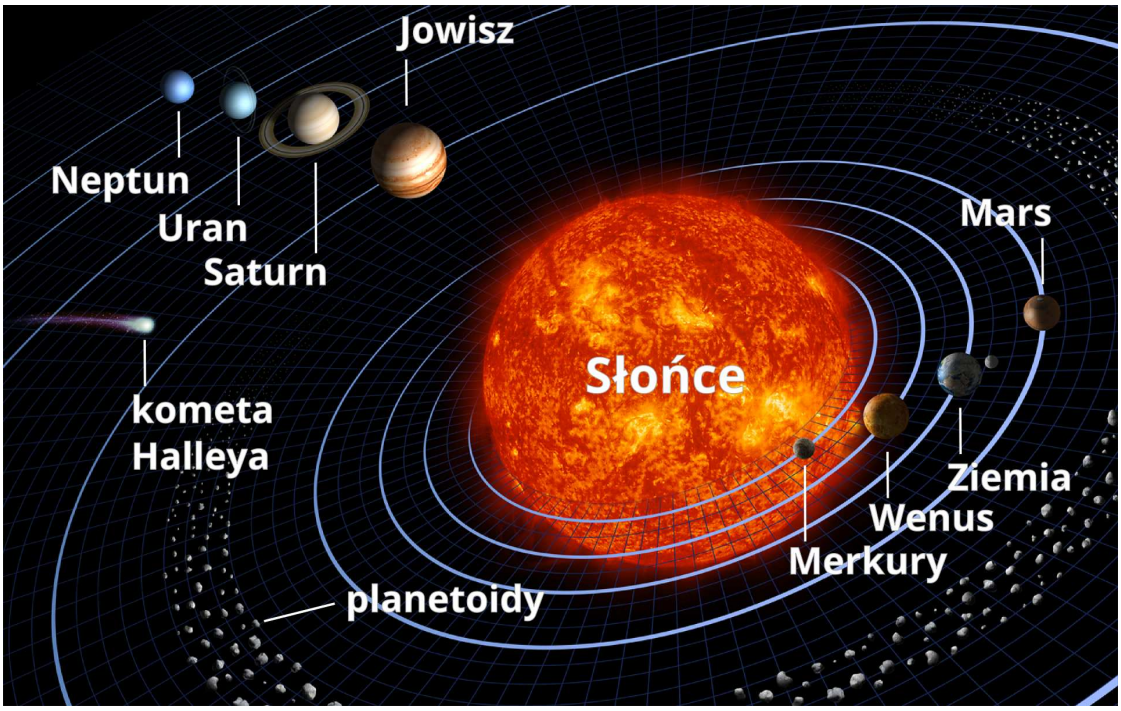
1. Trzy prawa Keplera opisują ruch planet i innych ciał niebieskich dookoła Słońca:
    - I prawo głosi, że orbity planet są eliptyczne; oznacza to, że odległość od planety do Słońca jest zmienna; punkt leżący najbliżej Słońca nazywamy **peryhelium**, a najdalej – **aphelium**;
    - II prawo mówi o zmiennej prędkości liniowej i kątowej oraz o stałej prędkości polowej planet; prędkość linowa jest największa w peryhelium, a najmniejsza – w aphelium;
    - III prawo to związek rozmiarów orbit planet i okresów ich obiegu wokół Słońca; tę zależność można zapisać w postaci wzoru:
      $\frac{{a_1}^3}{{T_1}^2} = \frac{{a_2}^3}{{T_2}^2}$, gdzie:
      a_1, a_2– średnia odległość od planety do Słońca; T1, T2 – okres obiegu dla jednej planety (na przykład Ziemi). Ten wzór można stosować dla dowolnej pary księżyców krążących wokół jednej planety.



Źródło: Tomorrow sp.z o.o., licencja: CC BY 3.0.

15. Układ Słoneczny

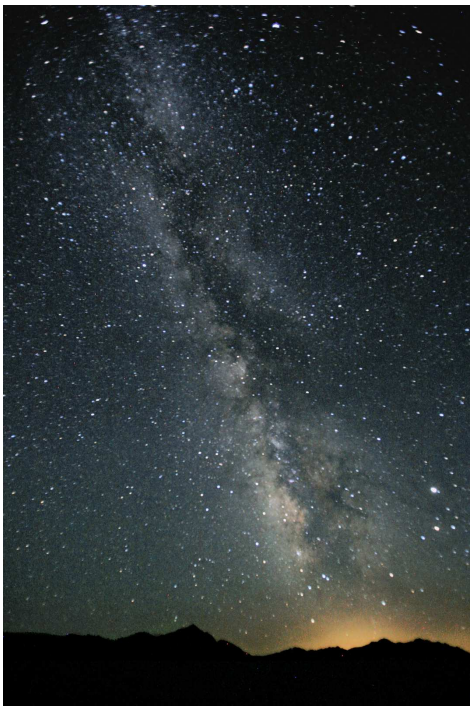
1. Układ Słoneczny to Słońce i osiem planet krążących wokół niego. Są to: Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn, Uran i Neptun.
2. Oprócz tych planet do Układu należą:
    - ich księżyce;
    - różnej wielkości planetoidy oraz tzw. planety karłowate (m.in. Pluton, Eris, Ceres);
    - komety, krążące wokół Słońca po bardzo wydłużonych orbitach eliptycznych.



Źródło: Harman Smith and Laura Generosa (nee Berwin), graphic artists and contractors to NASA's Jet Propulsion Laboratory (https://commons.wikimedia.org), Krzysztof Jaworski, public domain.

16. Budowa Galaktyki

1. Słońce i inne ciała krążące wokół niego są częścią Galaktyki widocznej na niebie jako Droga Mleczna. Nasza Galaktyka liczy od 200 do 300 miliardów gwiazd. Droga Mleczna to jedna z większych galaktyk we Wszechświecie – ma średnicę równą ok. 120 tys. lat świetlnych. Kształtem przypomina spiralę z poprzeczką.
2. Nasz Układ Słoneczny znajduje się nieco bliżej niż 30 000 lat świetlnych od centrum Galaktyki i leży prawie w płaszczyźnie równika, w tzw. ramieniu Oriona. Słońce i planety Układu Słonecznego obiegają centrum Galaktyki. Prędkość Słońca na tej orbicie wynosi ok. 270 km/s, co daje okres obiegu wokół centrum Galaktyki wynoszący ponad 200 mln lat.
3. W Galaktyce znajdują się bardzo różne gwiazdy. Najwięcej jest gwiazd podobnych do Słońca – mają one średnicę do kilkunastu razy większą niż średnica Słońca. Znacznie mniej jest gwiazd większych, mających średnicę ok. 100 razy większą niż średnica Słońca (olbrzymy), i mające średnicę około 1000 razy większą niz średnica Słońca (nadolbrzymy). Najmniejsze gwiazdy to białe karły, które mają wyższą temperaturę niż temperatura naszego Słońca, ich średnica jest mniej więcej taka sama jak średnica Ziemi. Odkryto także tzw. pulsary – mają one średnicę 10–20 km i prawdopodobnie są gwiazdami neutronowymi.



Źródło: Steve Jurvetson (http://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY 2.0.

Test

Ćwiczenie 1

Najodleglejsza planeta Układu Słonecznego - Neptun - obiega Słońce w ciągu 165 lat. Jaka jest średnia odległość planety od Słońca wyrażona w jednostkach astronomicznych?

- ◯ 5,5 j. a.
- ◯ 40 j. a.
- ◯ 30 j. a.
- ◯ 13 j. a.
- ◯ 2120 j. a.
- ◯ 165 j. a.
- ◯ Nie można obliczyć tej odległości – w treści zadania podano za mało danych.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Płyta CD wykonuje od 200 do 500 obrotów na minutę. W jakim zakresie zmienia się okres obrotów płyty? Wskaż poprawne odpowiedzi.

- [ ] od 0,005 min do 0,002 min
- [ ] od 3,333 s do 8,333 s
- [ ] od 0,03 s do 0,012 s
- [ ] od 0,05 min do 0,02 min
- [ ] od 0,3 s do 0,12 s
- [ ] od 0,3333 s do 0,8333 s
- [ ] od 0,5 min do 0,2 min

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 3

W wirówce znajdują się dwie cząsteczki A i B. Masa cząsteczki A jest dwa razy większa od masy cząsteczki B. Na którą cząsteczkę i ile razy większa siła dośrodkowa musi działać, aby obie poruszały się po okręgu o tym samym promieniu i z tą samą prędkością?

- ◯ Na cząsteczkę B musi działać dwa razy większa siła.
- ◯ Na cząsteczkę B musi działać cztery razy większa siła.
- ◯ Na cząsteczkę A musi działać cztery razy większa siła.
- ◯ Na obie cząsteczki musi działać taka sama siła.
- ◯ Na cząsteczkę A musi działać dwa razy większa siła.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4

Na samochód pokonujący łagodny zakręt z prędkością o wartości 40 km/h działa siła dośrodkowa o wartości 4 kN.
Oblicz siłę potrzebną, aby ten sam samochód pokonał ten zakręt z prędkością o wartości 80 km/h?

- [ ] 4 000 N
- [ ] 6 kN
- [ ] 16 000N
- [ ] 8 kN
- [ ] 4 kN
- [ ] 8 000 N
- [ ] 6 000 N
- [ ] 16 kN

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 5

Strumień elektronów porusza się po okręgu o promieniu R. W pewnym momencie zaobserwowano, że promień toru ruchu cząstek wzrósł do wartości 1,5 R. Jak zmieniła się wartość siły dośrodkowej działającej na cząstki, jeśli wiadomo, że wartość ich prędkości nie uległa zmianie?

- ◯ Siła dośrodkowa wzrosła $2{,}25 = (1{,}5)^2$ razy.
- ◯ Siła dośrodkowa zmalała $2{,}25 = (1{,}5)^2$ razy.
- ◯ Siła dośrodkowa zmalała $1{,}5$ razy.
- ◯ Siła dośrodkowa nie zmieniła się.
- ◯ Siła dośrodkowa wzrosła $1{,}5$ razy.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 6

Trzy satelity S_1, S_2, i S_3 krążą wokół Ziemi na jednej orbicie, to znaczy, że wszystkie są w tej samej odległości od Ziemi. Masy tych satelitów wynoszą odpowiednio: 10 kg, 100 kg, 200 kg. Na podstawie tych informacji, oceń prawdziwość poniższych zdań.

	Prawda	Fałsz
Prędkości wszystkich trzech satelitów są takie same.	◯	◯
Ziemia najsilniej przyciąga satelitę S_3.	◯	◯
Siła grawitacyjna, z jaką Ziemia przyciąga satelitę S_1 jest 10 razy mniejsza niż ta działająca na S_2.	◯	◯
Siła, z jaką Ziemia przyciąga satelity jest taka sama dla wszystkich trzech obiektów.	◯	◯
Satelita S_1 porusza się z największą prędkością, a satelita S_3 z najmniejszą.	◯	◯
Satelity o różnych masach nie mogą krążyć na jednej orbicie.	◯	◯

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 7

Ziemia przyciąga Księżyc siłą F. Odległość Księżyca od Ziemi wynosi D. Jaką wartość miałaby siła, oddziaływania Ziemi na Księżyc, gdyby w wyniku katastrofy kosmicznej Księżyc odsunął się na odległość 2D?

- [ ] 0,5 F
- [ ] 4 F
- [ ] 1/4 F
- [ ] 0,25 F
- [ ] F
- [ ] 2 F
- [ ] 1/2 F

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 8

Ile czasu potrzebuje satelita geostacjonarny, aby wykonać jedno pełne okrążenie? Wskaż poprawne odpowiedzi.

- [ ] Tyle ile Ziemia potrzebuje na wykonanie obrotu wokół własnej osi.
- [ ] Około 24 godzin.
- [ ] Ten czas zależy od promienia orbity satelity.
- [ ] 1 rok.
- [ ] 1 dobę.
- [ ] Tyle, ile Ziemia potrzebuje na okrążenie Słońca.
- [ ] 12 godzin.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 9

Czy wyrzucenie ciała z prędkością o wartości 7,9 km/s (tyle wynosi wartość I prędkości kosmicznej) jest wystarczające, aby stało się ono satelitą Ziemi?

- ◯ Tak wystarczy, ponieważ jest to wartość I prędkości kosmicznej.
- ◯ Tak wystarczy, ale należy wyrzucić ciało pionowo do góry.
- ◯ Nie wystarczy, dodatkowo należy tej prędkości nadać kierunek styczny do powierzchni Ziemi.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 10

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 11

Wskaż odpowiedź, w której uporządkowano planety według rosnącej odległości od Słońca.

- ◯ Saturn, Merkury, Jowisz, Mars
- ◯ Merkury, Saturn, Jowisz, Mars
- ◯ Merkury, Mars, Jowisz, Saturn
- ◯ Mars, Merkury, Jowisz, Saturn
- ◯ Jowisz, Merkury, Mars, Saturn
- ◯ Merkury, Jowisz, Saturn, Mars

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 12

Siła grawitacji działająca na pojazd kosmiczny znajdujący się na powierzchni Ziemi wynosi 1 000 N. Na jakiej wysokości nad powierzchnią Ziemi siła grawitacji działająca na ten pojazd zmaleje do 250 N?

- ◯ Na wysokości cztery razy większej od promienia Ziemi.
- ◯ Na wysokości 2 km.
- ◯ Na wysokości równej wartości promienia Ziemi, czyli 6 370 km.
- ◯ Na wysokości trzy razy większej od promienia Ziemi.
- ◯ Na wysokości równej odległości Ziemi od Księżyca.
- ◯ Na wysokości 4 km.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 13

Wokół planety Jowisz krąży ponad 60 księżyców. Co stałoby się z tymi księżycami, gdyby nagle zniknęła siła grawitacyjna między Jowiszem a każdym z księżyców?

- ◯ Księżyce spadłyby na Jowisza.
- ◯ Księżyce oddalałyby się od Jowisza po linii spiralnej.
- ◯ Księżyce nadal krążyłyby po swoich orbitach.
- ◯ Księżyce oddaliłyby się od Jowisza po liniach prostych stycznych do ich dotychczasowych orbit.
- ◯ Księżyce oddalałyby się od Jowisza promieniście.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Zadania

Polecenie 1

Opisz sposób pomiaru odległości do bliskiej gwiazdy za pomocą paralaksy rocznej (heliocentrycznej). Podaj definicję jednostki odległości używanej przez astronomów i związanej ze zjawiskiem paralaksy.

Polecenie 2

Widoczny na niebie ruch planet jest skomplikowany; każda planeta zakreśla pętle i zmienia swoją prędkość. Jak ten ruch wyjaśnia teoria geocentryczna, a jak – heliocentryczna? Wyjaśnienia poprzyj odpowiednim rysunkiem.

Polecenie 3

Wirówka używana w laboratorium analitycznym wykonuje maksymalnie 18 000 obrotów na minutę. Oblicz okres obrotów wirówki, a jej częstotliwość wyraź w hercach.

Polecenie 4

Na stronie internetowej
http://tvnmeteo.tvn24.pl/informacje-pogoda/ciekawostki,49/wkrotce-ksiezyc-zasloni-34-tarczy-sloncaczekaja-nas-utrudnienia,160331,1,0.html
10 marca 2015 można było przeczytać następującą informację:
W piątek 20 marca Polacy powinni spoglądać w niebo. Tego dnia Księżyc przysłoni miejscami nawet 75 proc. tarczy słonecznej. Zjawisko rozpocznie się po godz. 9.40. Jako pierwsi zobaczą je wrocławianie (o godz. 9.41). Następnymi obserwatorami będą mieszkańcy Krakowa i Gdańska. Warszawiacy zobaczą zaćmienie po godz. 9.48.
Największa faza zjawiska (apogeum) rozpocznie się na krótko przed godz. 11.
Naszkicuj wzajemne położenie Słońca, Ziemi i Księżyca w chwili zapowiadanego zjawiska. Nazwij fazę, w jakiej znalazł się Księżyc tego dnia.

Polecenie 5

W tekstach o gwiazdach i planetach można przeczytać, że „planeta (gwiazda) przechwyciła przelatującą obok planetoidę i ta stała się jej satelitą". Jak rozumiesz takie sformułowanie? Na czym polega to „przechwycenie"?

Polecenie 6

* Ziemia krąży wokół Słońca po elipsie zbliżonej kształtem do okręgu; ma prędkosc ok. 30 km/s. Wyobraź sobie, że pewnego letniego dnia zniknęła siła grawitacyjna, jaką Słońce działa na Ziemię. Zastanów się nad następującymi problemami i przygotuj na nie odpowiedź.

1. Czy w konsekwencji zaniku tej siły ustałyby ruch wirowy Ziemi wokół własnej osi oraz następstwo dni i nocy?

2. Czy ustałoby następstwo pór roku? Jeśli tak, to czy zawsze byłoby lato?

3. Czy Ziemia oddalałaby się od Słońca z prędkością większą, mniejszą czy równą 30 km/h? A może nadal krążyłaby wokół Słońca?

4. Czy ludzie na Ziemi znaleźliby się w stanie nieważkości?

Polecenie 7

Deimos – jeden z księżyców Marsa – okrąża planetę w ciągu 30 godzin. Odległość między Deimosem a środkiem Marsa wynosi ok. 23 500 km. Udowodnij, że znajomość tych dwóch danych jest wystarczająca, aby obliczyć masę Czerwonej Planety.

Polecenie 8

Okres obiegu Neptuna, ostatniej planety Układu Słonecznego, trwa około 165 lat. Oblicz średnią odległość Neptuna od Słońca w jednostkach astronomicznych (AU).

Promieniowanie termiczne ciał stałych

Ciała rozgrzewane do bardzo wysokich temperatur świecą – im wyższa temperatura, tym jasniej świeci ciało, a zatem wysyła więcej energii. Zmienia się również barwa światła: w temperaturze ok. $500^\circ\mathrm{C}$ światło wysyłane przez rozgrzane ciało ma barwę ciemnoczerwoną, wraz ze wzrostem temperatury barwa ciała staje się najpierw pomarańczowa, potem jasnożółta, białożółta, a na końcu biała. Dlaczego tak jest? Dowiecie się tego z dzisiejszej lekcji.

Dlaczego metal w stanie płynnym świeci, jak działa noktowizor albo czy jest możliwy pomiar temperatury przedmiotu na odległość? Odpowiedzi na te tak różne pytania są możliwe dzięki jednemu zjawisku fizycznemu

Już potrafisz

- podać definicję fali elektromagnetycznej;
- przedstawić klasyfikację fal elektromagnetycznych ze względu na ich długość;
- podać zakres długości fal charakterystyczny dla światła widzialnego;
- podać definicję temperatury jako wielkości proporcjonalnej do średniej energii kinetycznej cząsteczek.

Nauczysz się

- podawać definicję promieniowania termicznego (cieplnego);
- podawać definicję ciała doskonale czarnego;
- opisywać ciągłe widmo emisyjne ciała i wpływ temperatury ciała na natężenie promieniowania wysyłanego przez to ciało.

Promieniowanie termiczne (cieplne) jest promieniowaniem elektromagnetycznym, którego źródłem są ciała (niezależnie od ich stanu skupienia) znajdujące się w temperaturze wyższej od zera bezwzględnego. Za emisję promieniowania cieplnego odpowiedzialna jest energia ruchu cieplnego atomów i cząsteczek w obserwowanym ciele. Kiedy promieniowanie cieplne przejdzie przez **spektroskop**, tworzy widmo spektroskopowe – barwny obraz emitowanego promieniowania dla poszczególnych długości fal (wartości energii).

Doświadczenie 1

Wytworzenie i obserwacja widma promieniowania cieplnego.

Co będzie potrzebne

- rzutnik do przezroczy (może być także rzutnik multimedialny);
- ramka do przezroczy;
- czarny papier;
- pryzmat;
- ekran.

Instrukcja

1. Z czarnego papieru wytnij prostokąt o wymiarach przeźrocza, tak aby pasował on do ramki rzutnika.
2. Wycięty prostokąt przetnij w połowie jego dłuższego boku, tak aby po włożeniu papieru do ramki na jego środku powstała pionowa szczelina.
3. Ramkę z czarnym prostokątem ze szczeliną w środku umieść w rzutniku.
4. Rzutnik umieść w odległości od 1 do 2 m od ekranu.
5. Włącz rzutnik i ustaw jego ostrość.
6. Między rzutnikiem a ekranem ustaw na podstawce pryzmat, tak aby światło przechodzące przez szczelinę padało na jedną z jego ścian.

7. Jeżeli chcesz wykorzystać rzutnik multimedialny, warto przedtem obejrzeć poniższą animację.

Podsumowanie

Widmo promieniowania termicznego (cieplnego) lampy rzutnika ma charakter ciągły.

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Film dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/D1BZobvVo

Widmo promieniowania termicznego (cieplnego) wytwarzanego przez lampę rzutnika

Pokazany rzutnik. Następnie laptop. Włączona jest aplikacja do rysowanie. Demonstrator zmienia tło na czarne i rysuje grubą białą kreskę. Następnie włącza rzutnik i wyświetla stowrzoną przez siebie grafikę. Później umieszcza nakładkę do rozszczepiania światła. Na ekranie widać tęczę.

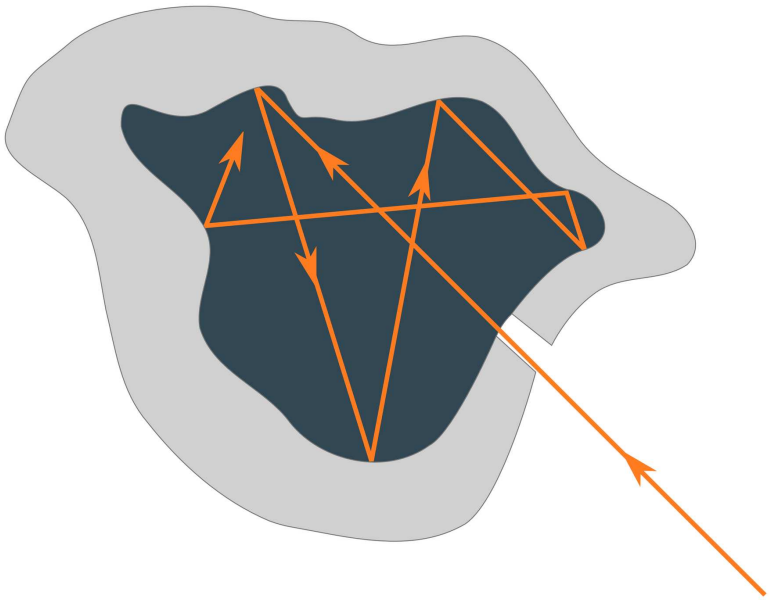
Ciała o temperaturach wyższych niż 0 K (–273,15°C) mogą zarówno emitować, jak i absorbować (pochłaniać) padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne. Im ciało (znajdujące się w stałej temperaturze) absorbuje więcej energii, tym więcej jej emituje. Kirchhoff wykazał, że stosunek promieniowania zaabsorbowanego do wyemitowanego nie zależy od natury ciała – dla wszystkich ciał jest taką samą funkcją temperatury i długości fali.

Zdolność ciał do emisji i absorpcji promieniowania pozwala na wytłumaczenie istnienie barw. Barwa ciała zależy zarówno od składu widmowego padającego promieniowania elektromagnetycznego, jak i od długości fal, które są przez ciało lepiej lub gorzej pochłaniane. Jeśli na ciało padałoby światło niebieskie, a ciało prawie całkowicie by je pochłaniało, to kolor tego ciała rejestrowany przez oko ludzkie byłby czarny.

Aby móc opisać promieniowanie termiczne, jego emisję oraz absorpcję przez ciała, stworzono model **ciała doskonale czarnego**. Jest to takie ciało, które całkowicie pochłania padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od długości fali i temperatury, w której ten proces zachodzi. W rzeczywistości nie ma ciał doskonale czarnych, ale umiemy budować modele, które są ich wystarczającym przybliżeniem. Jednym z nich może być mały otwór w bryle pustej w środku. Promień o dowolnej długości fali wpada przez otwór do wnęki, gdzie ulega wielokrotnemu odbiciu, a prawdopodobieństwo, że ten promień z powrotem wydostanie się z wnęki, jest praktycznie równe zeru. Pewnym przybliżeniem tego zjawiska jest również sytuacja,

w której – gdy patrzymy z zewnątrz – wydaje nam się, że w pokoju z otwartymi oknami jest ciemno. Osoba, która jest w tym pokoju, nie odnosi takiego wrażenia.

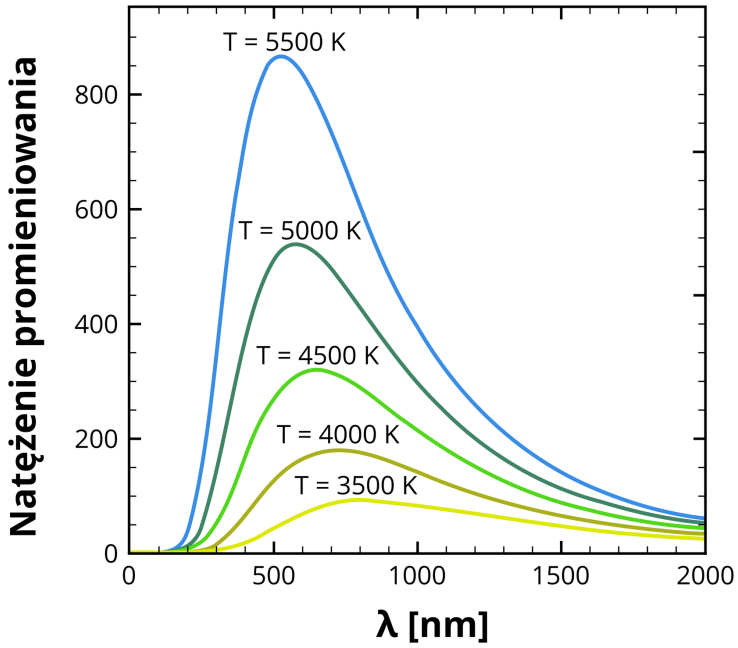
W tym miejscu jednak trzeba podkreślić, że takie ciało wyda nam się czarne tylko wtedy, gdy będziemy rejestrować promieniowanie widzialne. Jeżeli temperatura jest wyższa od zera absolutnego, to ściany będą emitować energię. Gdyby ściany miały temperaturę 500℃, świeciłyby światłem czerwonym i wydostawałoby się ono przez otwór, który byłby źródłem tego światła. Paradoks jest pozorny – w definicji ciała doskonale czarnego jest mowa tylko o pochłanianiu padającego promieniowania.



Wyjaśnienie, dlaczego promień, który wchodzi przez mały otwór, jest całkowicie pochłaniany

Założenie, że źródłem promieniowania cieplnego są ciała doskonale czarne, znacznie ułatwiło opisy matematyczne, przy czym żaden ważny aspekt tego zjawiska nie został w takim teoretycznym opisie pominięty.

Promieniowanie cieplne jest promieniowaniem o szerokim zakresie długości fal i różnym rozkładzie natężenia promieniowania, które zależy od temperatury ciała.



Rozkład natężenia promieniowania w funkcji długości fali dla różnych temperatur

Na osi pionowej oznaczono natężenie promieniowania. Wielkość ta jest równa energii emitowanej w czasie jednej sekundy przez 1 m^2 ciała, które wysyła falę elektromagnetyczną o danej długości. Przypomnijmy, że zakres widzialny to promieniowanie o długości fali od 400 do 700 nm. Ponieważ ilość wysyłanej energii zależy także od temperatury ciała, na wykresie znajdują się krzywe odpowiadające ciałom o różnych temperaturach.

Przebieg wykresu dla danej temperatury wskazuje, że natężenie promieniowania jest różne w odniesieniu do różnych długości fali. Oznacza to, że w stałej temperaturze dla każdej długości fali występującej w widmie promieniowania cieplnego ilość energii emitowanej przez ciało jest inna. Na każdym znajduje się taka długość fali, w której ciało wysyła najwięcej energii – maksimum promieniowania w danej temperaturze.

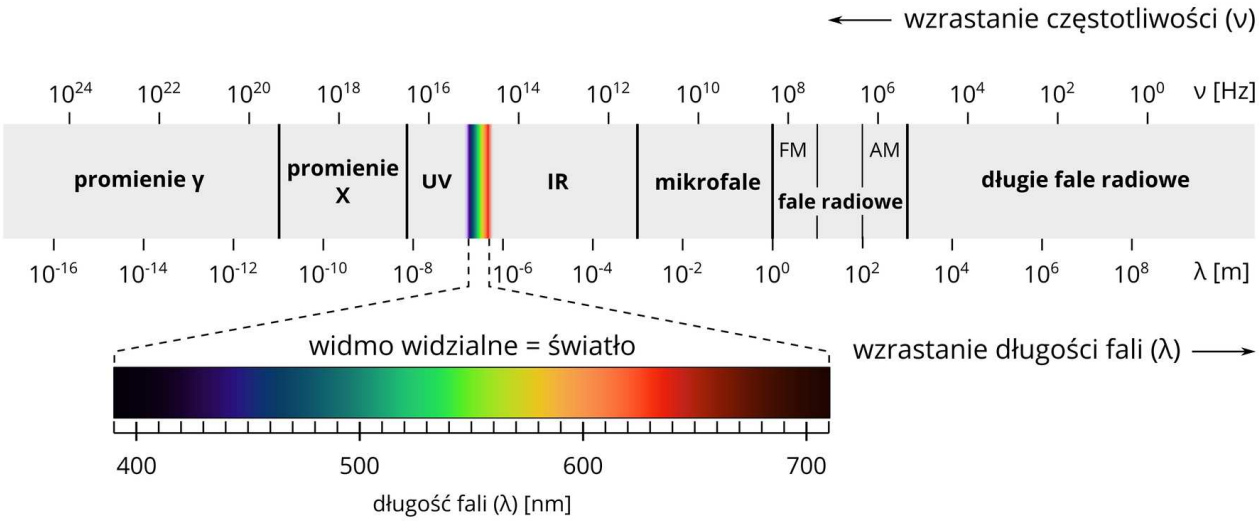
Kiedy porównamy wykresy dla różnych temperatur, zauważymy, że im wyższa temperatura ciała, tym to maksimum jest bardziej przesunięte w stronę fal krótszych, a cały wykres jest położony wyżej. Oznacza to, że ciało emituje więcej energii dla wszystkich fal – zarówno długich, jak i krótkich. Podniesione jest również maksimum promieniowania. Wynika z tego, że w wyższych temperaturach ciała emitują więcej energii.

Zjawisku temu towarzyszy także zmiana barwy światła wysyłanego przez ciało. Jeśli będziemy pododgrzewać metalową kulę, zauważymy, że jej barwa zmieniać się będzie od ciemnoczerwonej, przez pomarańczową, aż do białej. W niskich temperaturach wysyłane jest głównie światło czerwone, w wyższych – zarówno czerwone, jak i niebieskie (także żółte czy zielone). W ten sposób ciało świeci coraz bardziej białym światłem.

Film dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/D1BZobvVo

Wraz ze wzrostem temperatury światła następuje przesunięcie barwy

Film przedstawia zależność pomiędzy wzrostem temperatury światła i barwy światła. Poziomo ustawiony prostokątny ekran. Po lewej stronie ekranu poziomy palnik. Płomień w palniku biały. Nad płomieniem palnika żółte koło. Średnica koła to około trzy centymetry. Na prawo skala liczbowa. Liczby na skali ułożone pionowo jedna nad drugą. Najniżej temperatura pięćset dwadzieścia stopni Celsjusza. Powyżej pięćset osiemdziesiąt stopni, sześćset pięćdziesiąt. Najwyższa temperatura na skali to tysiąc dwieście pięćdziesiąt stopni. Na lewo od skali pionowy prostokątny pas. Powierzchnia prostokąta to barwy światła. Barwy zmieniają natężenie w zależności od temperatury. Najniżej barwa czerwona. Czerwony przechodzi stopniowo w pomarańczowy. Następnie na skali jest kolor żółty i najwyżej biały. Poziomo na barwnym prostokącie ruchomy wskaźnik. Wskaźnik przesuwa się w górę.

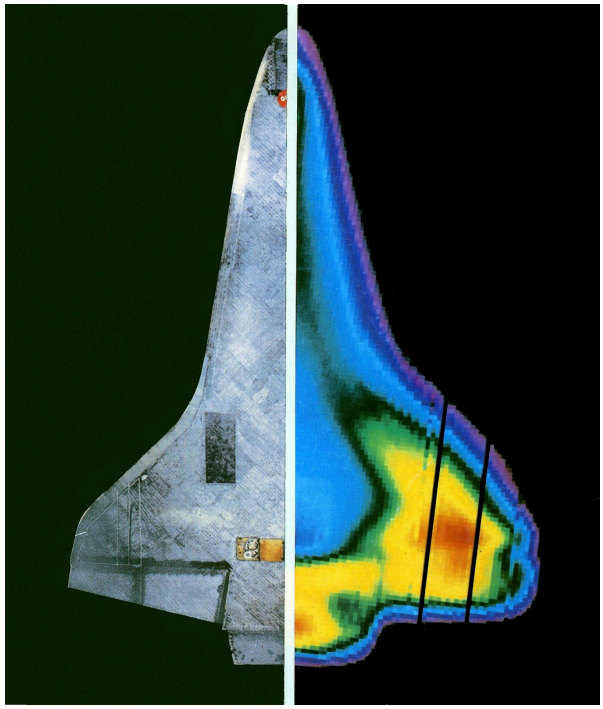


Długość fali światła czerwonego jest większa od długości fali światła fioletowego. Oznaczenie UV dotyczy promieniowania o długości fali mniejszej od długości fali światła fioletowego (tak zwanego ultrafioletu), a oznaczenie IR (infrared) - promieniowania o dlugości fali większej niz światła czerwonego, czyli tak zwanej podczerwieni

* To, przy jakiej długości fali występuje maksymalne natężenie promieniowania cieplnego, jest treścią prawa przesunięć Wiena.

Zakres długości fal promieniowania cieplnego znacznie wykracza poza przedział charakterystyczny dla światła widzialnego. Promieniowanie cieplne może osiągać maksimum natężenia dla długości fal odpowiadającym promieniowaniu mikrofalowemu. Interesującym przykładem takiej sytuacji jest promieniowanie reliktowe Wszechświata (długość fali rzędu milimetrów), które w przybliżeniu odpowiada promieniowaniu ciała doskonale czarnego w temperaturze blisko 3 K. Promieniowanie reliktowe, nazywane również promieniowaniem tła, jest obecne w całym Wszechświecie. Źródłem tego promieniowania wcale nie jest występująca w nim materia (galaktyki, gwiazdy). Jest ono najprawdopodobniej pozostałością po Wielkim Wybuchu, który dał początek naszemu Wszechświatowi. Z kolei przedmioty codziennego użytku emitują najczęściej promieniowanie cieplne, którego maksimum przypada na promieniowanie podczerwone. Dzięki rozkładowi natężenia promieniowania i jego zależności od temperatury ciała

jesteśmy w stanie dokonywać bezkontaktowego pomiaru temperatury ciał za pomocą kamery termowizyjnej.



Obraz zarejestrowany przez kamerę termowizyjną

* Prawo Stefana-Boltzmanna opisuje, jaka jest zależność między całkowitą (we wszystkich długościach fal) energią emitowaną przez jednostkę powierzchni ciała doskonale czarnego w jednostce czasu, a temperaturą bezwzględną tego ciała.

Podsumowanie

- Promieniowanie cieplne (termiczne) jest promieniowaniem elektromagnetycznym, którego źródłem są ciała znajdujące się w temperaturze wyższej od zera bezwzględnego.
- Za emisję promieniowania cieplnego odpowiedzialna jest energia ruchu cieplnego atomów i cząsteczek w obserwowanym ciele.
- Widmo promieniowania cieplnego ciał stałych i cieczy ma charakter ciągły.
- Ciała o temperaturach wyższych niż 0 K ($-273{,}15\,^\circ\mathrm{C}$) mogą zarówno emitować, jak i absorbować (pochłaniać) padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne. Im ciało (znajdujące się w stałej temperaturze) absorbuje więcej energii, tym więcej jej emituje. Kirchhoff wykazał, że stosunek energii zaabsorbowanej do wyemitowanej nie zależy od natury ciała – dla wszystkich ciał jest taką samą funkcją temperatury i długości fali.
- Zdolność ciał do emisji i absorpcji promieniowania pozwala na wytłumaczenie istnienia barw. Barwa ciała zależy zarówno od składu spektralnego padającej fali

elektromagnetycznej, jak i tego, które długości fal są przez dane ciało lepiej lub gorzej pochłaniane. Jeśli na ciało padałoby światło niebieskie, a ciało prawie całkowicie by je pochłaniało, to kolor rejestrowany przez oko ludzkie byłby czarny.

- Aby móc opisać promieniowanie cieplne, jego emisję oraz absorpcję przez ciała, stworzono model ciała doskonale czarnego. Jest to takie ciało, które całkowicie pochłania padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od długości fali i temperatury, w której ten proces zachodzi.
- Jeśli temperatura ciała ulega zmianie, zmienia się również charakterystyka energetyka jego promieniowania cieplnego. Wzrostowi temperatury odpowiada jednoczesny wzrost całkowitej energii wypromieniowywanej przez ciało. Zjawisku temu towarzyszy także zmiana barwy światła wysyłanego przez ciało. Długość fali, dla której wypromieniowywana energia jest największa, przesuwa się w stronę fal krótkich wraz ze wzrostem temperatury.
- Rozgrzane ciała wysyłają energię cieplną zarówno w postaci fal długich, jak i krótkich. Całkowita moc wypromieniowywana przez jednostkę powierzchni ciała doskonale czarnego przez ciało mające temperaturę T wynosi $E = \sigma \cdot T^4$, jeżeli temperatura otoczenia wynosi 0 K (gdzie σ to stała, której wartość wynosi $5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s \cdot m^2 K^{-4}}}$). Zależność ta znana jest jako prawo Stefana-Boltzmanna. Z tego wzoru wynika bardzo silna zależność mocy promieniowania emitowanego przez jednostkę powierzchni od temperatury.
- To, dla jakiej długości fali odpowiada maksimum natężenia promieniowania cieplnego, jest treścią prawa przesunięć Wiena, wyrażonego wzorem:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

gdzie:
b – stała Wiena; $b = 2{,}89 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m \cdot K}$;
T – temperatura ciała wyrażona w skali bezwzględnej (kelwiny).

Praca domowa

> **Polecenie 1.1**
>
> Uzasadnij, dlaczego nie będziemy mogli obserwować świecenia ciała o temperaturze 300 K w maksimum jego promieniowania (nie dysponujemy żadnymi przyrządami, a nasze oczy są nieosłonięte).

> **Polecenie 1.2**
>
> Dlaczego gwiazdy o dużych rozmiarach wysyłają więcej energii niż gwiazdy o tej samej temperaturze, ale mniejszych rozmiarach?

Polecenie 1.3

Uzasadnij, dlaczego gwiazdy chłodne, czyli o niższej temperaturze, słabiej świecą na niebie niż gwiazdy mające te same rozmiary, znajdujące się w tej samej odległości, ale mające wyższą temperaturę.

Słowniczek

Definicja: prawo rozpadu naturalnego

– zależność określająca szybkość ubywania pierwotnej masy substancji zbudowanej z jednego rodzaju cząstek, która ulega naturalnemu, spontanicznemu rozpadowi. Ma zastosowanie przy określaniu tempa rozpadu promieniotwórczego ciał, ale dotyczy wielu procesów fizycznych.

ciało doskonale czarne

– ciało, które całkowicie pochłania padające na nie promieniowanie, tj. w całym zakresie długości fal. Takie ciała w rzeczywistości nie istnieją; tworzymy jedynie ich modele, za pomocą których badamy i opisujemy własności emisyjne i absorpcyjne badanych obiektów.

promieniowanie termiczne (cieplne)

– promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez ciało znajdujące się w temperaturze większej od 0 K (zera bezwzględnego).

spektroskop (spektrometr)

– przyrząd służący do rozkładu promieniowania widzialnego na poszczególne barwy składowe (widmo) według długości fali. Pozwala na wyznaczenie długości fali danego promieniowania.

widmo ciągłe

– widmo o ciągłym rozkładzie natężenia promieniowania w funkcji długości fali; w takim widmie nie ma przerw.

Biogramy

Źródło: nn. (http://commons.wikimedia.org), public domain.

Ludwig Boltzmann

20 p.n.e Wiedeń – 5 p.n.e Duino k. Triestu

Autor prac stanowiących podstawę fizyki statystycznej, którą wykorzystał w opisie cząsteczkowej teorii gazów. W 1884 r. teoretycznie sformułował prawo promieniowania ciała doskonale czarnego.

Josef Stefan na podstawie pomiarów określił zależność energii emitowanej przez ciało doskonale czarne od jego temperatury (1878 r.)

Josef Stefan

24 p.n.e Saint Peter – 7 p.n.e Wiedeń

Profesor Uniwersytetu Wiedeńskiego. Prowadził prace dotyczące termodynamiki, fizyki cząsteczkowej i optyki.

Zadania podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Uzupełnij poniższe zdania, wybierając z listy poprawną odpowiedź.

Jeżeli kulę żelazną podgrzejemy do wyższej temperatury, to ilość wysyłanej energii w zakresie fal długich [ ], w zakresie fal krótkich [ ], a maksimum natężenia promieniowania przesunie się w stronę fal [ ].

zmaleje | krótszych | wzrośnie | dłuższych | wzrośnie | zmaleje

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Przeczytaj uważnie poniższe zdania i uzupełnij luki.

Jeżeli ciało odbija jednakowo wszystkie długości fali, to pod wpływem oświetlenia światłem białym ma barwę [ ]. Jeżeli na takie ciało padnie promieniowanie o barwie niebieskiej, to ciało to będzie miało barwę [ ].

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 3

Przeczytaj uważnie poniższe zdanie i uzupełnij lukę.

Namalowany kwadrat oświetlany światłem białym jest widoczny jako czerwony. Jeżeli ten sam kwadrat oświetlimy światłem niebieskim, to przybierze on kolor [ ].

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4

Przeczytaj uważnie poniższe zdanie i uzupełnij lukę.

Maksimum promieniowania pewnego ciała o temperaturze T_1 przypada na długość fali 550 nm. Jeżeli zwiększymy temperaturę dwukrotnie, maksimum przypadnie na długość fali [ ] nm.

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Zjawisko emisji i absorpcji energii przez atomy gazu

Dużym postępem w zrozumieniu budowy atomu było odkrycie liniowego widma promieniowania gazów. Okazało się, że świecące gazy emitują tylko niektóre długości fali promieniowania. Jeżeli światło wysyłane przez gaz skierujemy na szczelinę spektroskopu, to powstający obraz będzie nie widmem ciągłym, ale lecz liniami o różnych barwach (prawie monochromatycznych). Linie te są obrazem szczeliny, jednak to oznacza, że świecące gazy wysyłają promieniowanie nieciągłe, a zatem inne niż emitowane przez ciała stałe świecące w wyniku ich rozgrzania, których widmo składało się z fal o pełnym zakresie długości. A jak wygląda widmo nieciągłe? Dowiesz się tego z dzisiejszej lekcji.

Podstawową metodą badania właściwości odległych obiektów astronomicznych, a nawet Słońca, jest badanie widm, czyli spektrometria

Już potrafisz

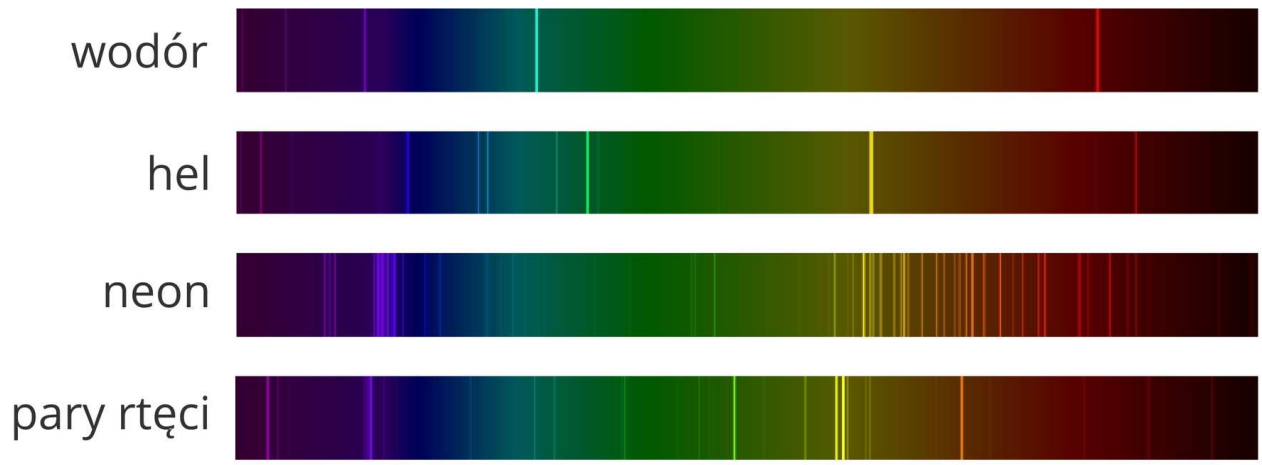
- podać zakres długości fal charakterystycznych dla światła widzialnego;
- podać definicję promieniowania termicznego (cieplnego);
- podać definicję ciała doskonale czarnego;
- stwierdzić, że widmo promieniowania ciała doskonale czarnego ma charakter ciągły;
- uzasadnić, dlaczego barwa świecącego ciała zależy od temperatury.

Nauczysz się

- odróżniać widmo liniowe od ciągłego;
- że źródłem widma liniowego są atomy swobodne w gazach;
- że widmo emisyjne emitowane jest przez gorący gaz, a widmo absorpcyjne – przez chłodny gaz pochłaniający promieniowanie elektromagnetyczne (np. światło) o widmie ciagłym, które to promieniowanie przechodzi przez ten gaz.

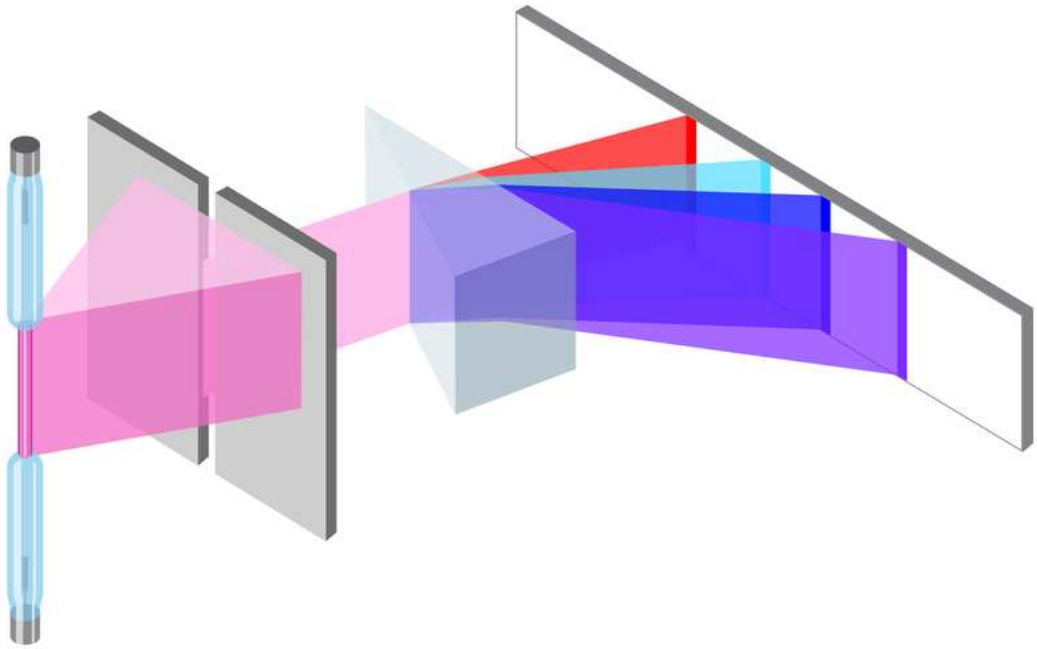
1. Emisja energii

Za pomocą spektroskopu badano promieniowanie wysyłane przez sód i rtęć w stanie gazowym oraz przez inne gazy, takie jak wodór czy neon. Na podstawie wyników tych badań stwierdzono, że widmo tego promieniowania jest nieciągłe, tzn. występują w nim tylko niektóre długości fali. Takie widmo nazywamy widmem liniowym (dyskretnym lub nieciągłym). Warto wspomnieć, że istotną rolę w badaniach nad tym zjawiskiemodegrali fizycy Gustav Kirchhoff i Robert Bunsen.



Widmo niektórych gazów

Okazało się, że każdy pierwiastek ma inne widmo liniowe, które pozwala na jednoznaczną identyfikację danego pierwiastka. Badanie widma Słońca pokazało, że występują tam linie pierwiastka nieznanego na Ziemi. Nazwano go helium, czyli „słoneczny". Późniejsze badania różnych gazów wykazały, że jest to gaz występujący również na Ziemi. Jednak w II połowie XIX wieku kłopoty sprawiało wyjaśnienie zarówno rozkładu energii w widmie ciała stałego (była o tym mowa w poprzednim rozdziale), jak i powstawania liniowego widma pierwiastków w stanie gazowym. Wyniki eksperymentalne były nie do pogodzenia z ówczesnym stanem wiedzy.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Widmo wodoru uzyskane za pomocą pryzmatycznego spektrometru optycznego

Nagranie przedstawia sposób uzyskania widma wodoru przy pomocy szkolnego pryzmatycznego spektrometru optycznego.

Widmo atomu wodoru

Lp.	**Długość fali** $\lambda[\mathrm{nm}]$	**Barwa**
1.	410,17	fioletowa
2.	434,05	fioletowa
3.	486,13	niebieska
4.	656,27	czerwona

Fizycy często poszukują zależności matematycznych pomiędzy wielkościami wyznaczonymi doświadczalnie. Jedną z nich wykrył matematyk Jan Jakub Balmer ze Szwajcarii – udało mu sie to zrobić na podstawie analizy wyników uzyskanych przez fizyków wykonujących doświadczenia.

Linie widmowe H_α, H_β, H_γ i H_δ

Źródło: Merikanto (http://commons.wikimedia.org), Adrignola (http://commons.wikimedia.org), Dariusz Kajewski, edycja: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

Balmerowi udało się opracować wzór wiążący ze sobą poszczególne długości linii widmowych wodoru:

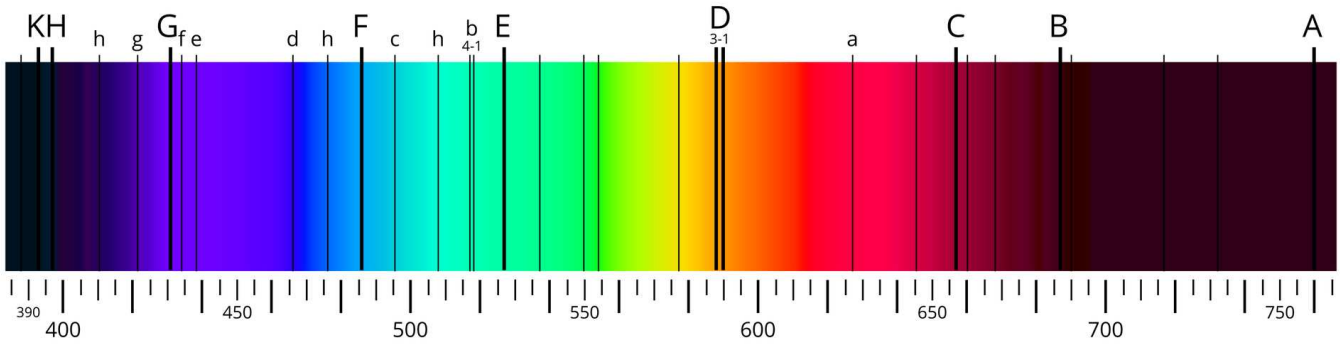
$$\lambda = b\frac{n^2}{n^2-2^2}$$

dla: $n = 3, 4, 5, 6$; $b = 364{,}6\ \mathrm{nm}$.

> **Polecenie 1**
>
> Sprawdź, dla jakiego *n* we wzorze Balmera otrzymujemy długości fali poszczególnych linii podanych w tabeli powyżej.

2. Widmo absorpcyjne

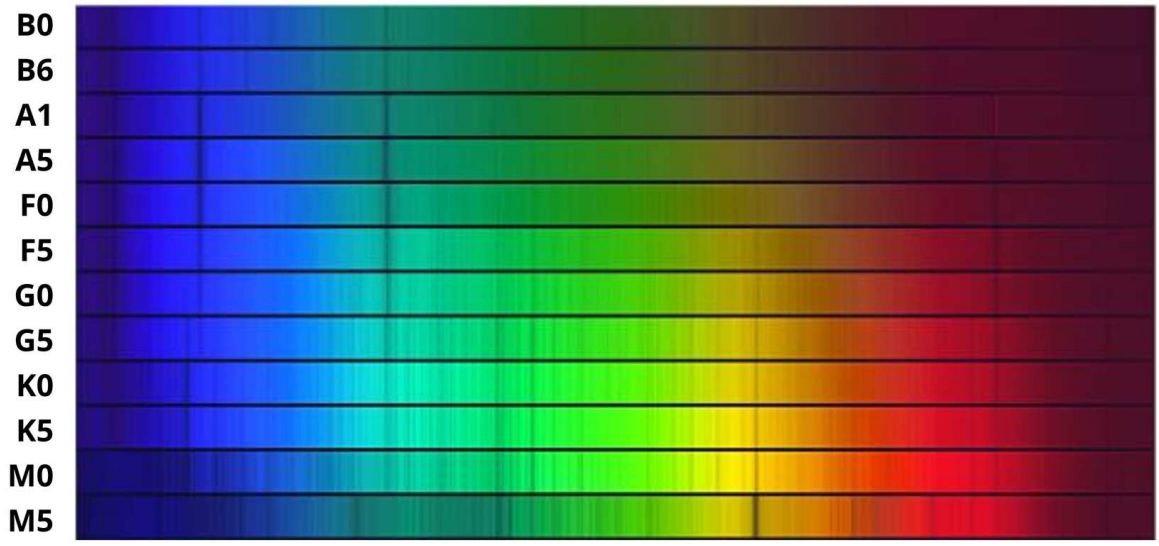
Na początku XIX wieku zaobserwowano w widmie światła słonecznego obecność ciemnych linii. Od 1814 r. niemiecki fizyk J. Fraunhofer zaczął systematycznie badać widmo Słońca. Wyznaczał przede wszystkim długości fali odpowiadających ciemnym liniom. Doszedł do wniosku, że w widmie Słońca znajduje się ich ponad 500. Późniejsze badania Kirchhoffa i Bunsena dowiodły, że długości fali dla niektórych linii są dokładnie równe długościom 4 linii wodoru (patrz: tabela powyżej) wyznaczonych z analizy widma emisyjnego.



Linie Fraunhofera. C, F – linie absorpcyjne wodoru; D1, D2 – linie sodu; H, K – linie wapnia zjonizowanego (pozbawionego jednego elektronu); E – jedna z linii żelaza (jest ich bardzo dużo); A i B – linie otrzymane w wyniku absorpcji światła przez cząsteczki tlenu znajdujące się w atmosferze ziemskiej

Ciemne linie absorpcyjne oznaczają, że energia fal o tych długościach jest pochłaniana. Promieniowanie wychodzące z wnętrza Słońca przechodzi przez chłodniejsze warstwy atmosfery słonecznej i jest pochłaniane przez znajdujące się tam atomy. Badania doprowadziły do wniosku, że w atmosferze Słońca znajdują się atomy wodoru, żelaza, sodu, wapnia i dziesiątków innych pierwiastków.

Badanie widm absorpcyjnych jest podstawową i jedyną metodą badania gwiazd – nie możemy przecież polecieć tak daleko. Zdecydowana większość widm gwiazdowych to widma absorpcyjne – wynika to z faktu, że gaz znajdujący się blisko powierzchni gwiazdy jest chłodniejszy niż wnętrze samej gwiazdy i pochłania promieniowanie emitowane z jej środka. Poniższy rysunek przedstawia kilkanaście typów widm gwiazdowych.



Widmo Słońca jest widmem typu G

Najwyższą temperaturę na powierzchni mają gwiazdy typu O – sięga ona 25 000 K. Widma typu G (widoczne na powyższym rysunku) są charakterystyczne dla gwiazd chłodniejszych. Do tego typu zalicza się nasze Słońce, które ma temperaturę powierzchniową ok. 6000 K.

Gwiazdy typu M5 osiągają temperaturę ok. 3000 K. Istnieją również gwiazdy o temperaturze zarówno powyżej 25 000 K, jak i poniżej 3000 K.

Na przykładowym zestawie widać, że położenie linii absorpcyjnych jest stałe, ale nie wszystkie z nich są jednakowo dobrze widoczne. Powodem jest przede wszystkim temperatura powierzchni gwiazdy, które wpływa na stan atomów i ich prędkość. W wysokich temperaturach atomy są zjonizowane i ich widmo jest inne, niż gdyby znajdowały się one w stanie neutralnym. Ważne są również czynniki takie jak gęstość gwiazdy oraz skład chemiczny, jednak – wbrew pozorom – nie jest on najistotniejszy. Astronomowie twierdzą bowiem, że jeżeli w widmie są widoczne linie jakiegoś pierwiastka, to na pewno znajduje się on w atmosferze gwiazdy. Natomiast jeżeli jakiś pierwiastek się tam znajduje, to w wypadku wystąpienia pewnych niekorzystnych okoliczności możemy nie zobaczyć jego linii.

W dalszych częściach podręcznika wrócimy jeszcze do tych zagadnień, jednak jeśli chcesz dowiedzieć się więcej, musisz poczekać do rozpoczęcia studiów wyższych na jednym z odpowiednich kierunków ścisłych.

Podsumowanie

- Widmo, które składa się z oddzielnych linii widmowych, nazywamy widmem liniowym.
- Wszystkie pierwiastki w stanie gazowym mają charakterystyczne widmo liniowe.
- Widmo liniowe jest typowe dla gazów składających się z atomów lub cząsteczek. Przykładem mogą być gazy takie jak wodór, hel, neon, argon, opary rtęci lub sodu.
- Odkrycie linii widmowych wodoru oraz innych pierwiastków przyczyniło się do zrozumienia budowy atomu.
- Gorące gazy wysyłają promieniowanie liniowe emisyjne. Jeżeli jednak promieniowanie mające widmo ciągłe przechodzi przez obszar zawierający chłodny gaz, to następuje absorpcja energii fal dokładnie o tych długościach, które dany atom może emitować.

> **Praca domowa**
>
> > **Polecenie 2.1**
> >
> > Poszukaj w internecie odpowiednich informacji i opisz budowę spektroskopu pryzmatycznego.

Słowniczek

analiza widmowa

– metoda badania składu substancji na podstawie analizy długości fal widma emitowanego przez tę substancję. Analiza widm pozwala na wyznaczanie temperatury gwiazdy, jej składu chemicznego, gęstości gazu w jej atmosferze, a nawet prędkości wirowania gwiazdy wokół własnej osi.

spektroskop

– przyrząd służący do rozkładu promieniowania widzialnego na poszczególne barwy składowe (widmo) według długości fali. Pozwala na wyznaczyć długość fali danego promieniowania.

Biogramy

Szwajcarski fizyk i matematyk

Jan Jakub Balmer

1.05.1825–12.03.1898

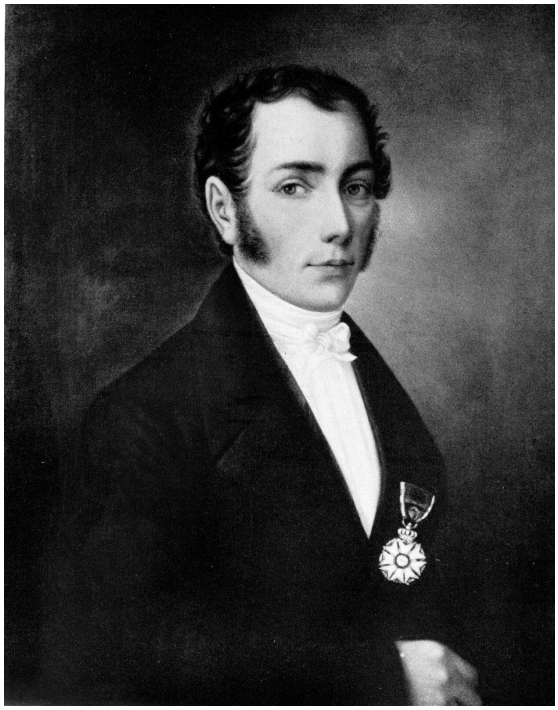
Zajmował się głównie geometrią. Opracował wzór opisujący linie widmowe wodoru.

Niemiecki fizyk i chemik

Robert Wilhelm Bunsen

30.03.1811–16.08.1899

Robert Bunsen wspólnie z Gustawem Kirchhoffem prowadził badania w dziedzinie spektroskopii. Jest też wynalazcą palnika (1850), który do dziś jest stosowany w szkolnych pracowniach chemicznych (fizycznych), a nawet w budownictwie.



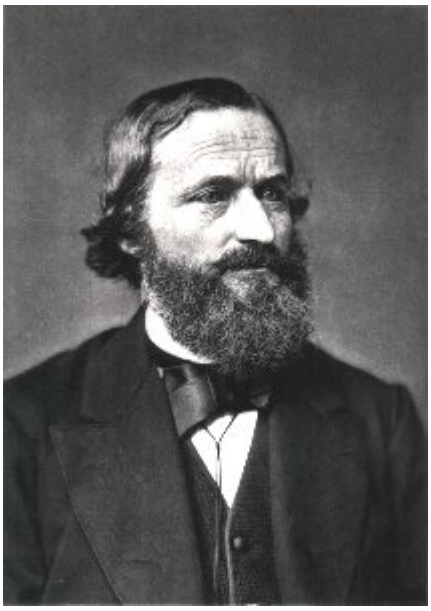
Joseph von Fraunhofer – odkrywca linii absorpcyjnych w widmie Słońca

Joseph von Fraunhofer

6.03.1787–7.06.1826

Największe odkrycia Josepha von Fraunhofera dotyczą optyki i astronomii. Jego wynalazkami są: siatka dyfrakcyjna, spektroskop pryzmatyczny i heliometr. Fraunhofer,

niezależnie od A. Fresnela, opisał zjawisko dyfrakcji i zaobserwował linie absorpcyjne w widmie Słońca.



Odkrywca prawa promieniowania ciała doskonale czarnego i metody analizy widmowej

Gustaw Robert Kirchhoff

12.03.1824–17.10.1887

Niemiecki fizyk, w latach 1850–54 profesor uniwersytetu we Wrocławiu. Znany jest przede wszystkim z prac nad teorią obwodów elektrycznych i temperaturowym promieniowaniem ciał. Skonstruował spektroskop (razem z R. W. Bunsenem), badał linie widmowe pierwiastków. Zastosował spektroskopię do badania atmosfery słonecznej i widma jaśniejszych gwiazd stałych.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

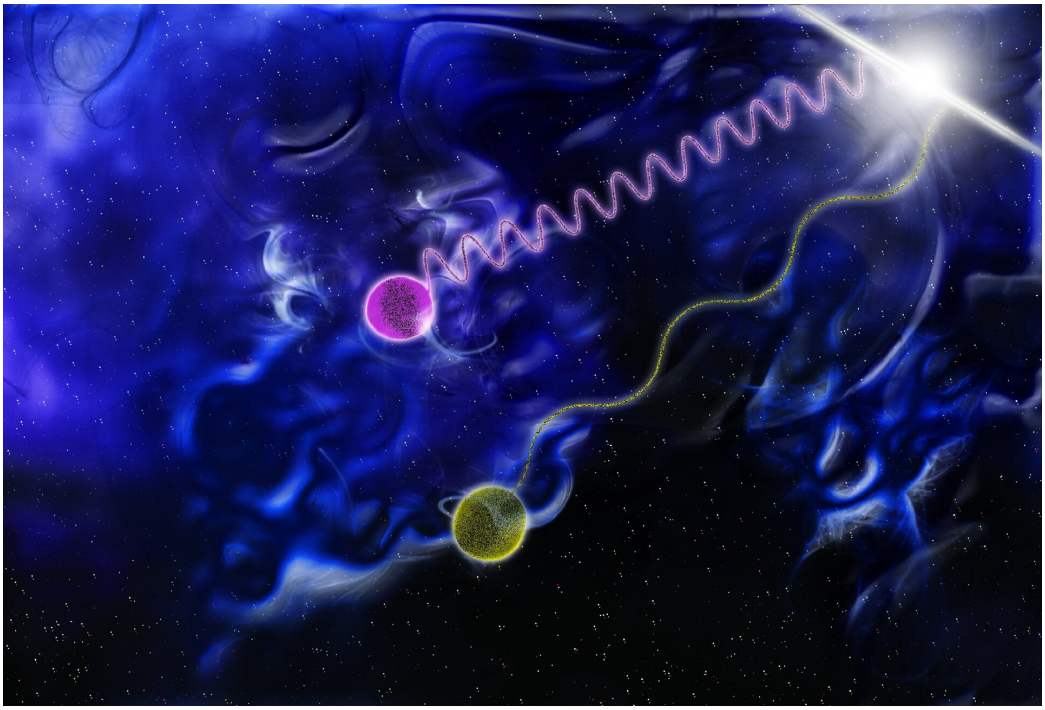
Które z poniższych zdań są prawdziwe, a które fałszywe?

	Prawda	Fałsz
Każde ciało o temperaturze powyżej zera absolutnego emituje widmo liniowe.	◯	◯
Linie absorpcyjne pierwiastków powstają gdy przez gaz składający się z tych pierwiastków przechodzi promieniowanie z zewnątrz.	◯	◯
Odległości pomiędzy liniami Balmera są jednakowe.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Foton – najmniejsza porcja energii fali elektromagnetycznej

Koniec XIX wieku był okresem, w którym wielu fizyków próbowało wyjaśnić zależność natężenia promieniowania ciał od długości fali. Próby dopasowania ówczesnej wiedzy fizycznej do wyników obserwacji nie dawały rezultatów. Przełom nastąpił w grudniu 1900 r. Jak to się odbywało i z jakim rezultatem? Jeśli chcesz wiedzieć, czytaj dalej.



Artystyczna wizja – cząstki elementarne światła, nazwane fotonami, wykazują właściwości zarówno falowe, jak i korpuskularne

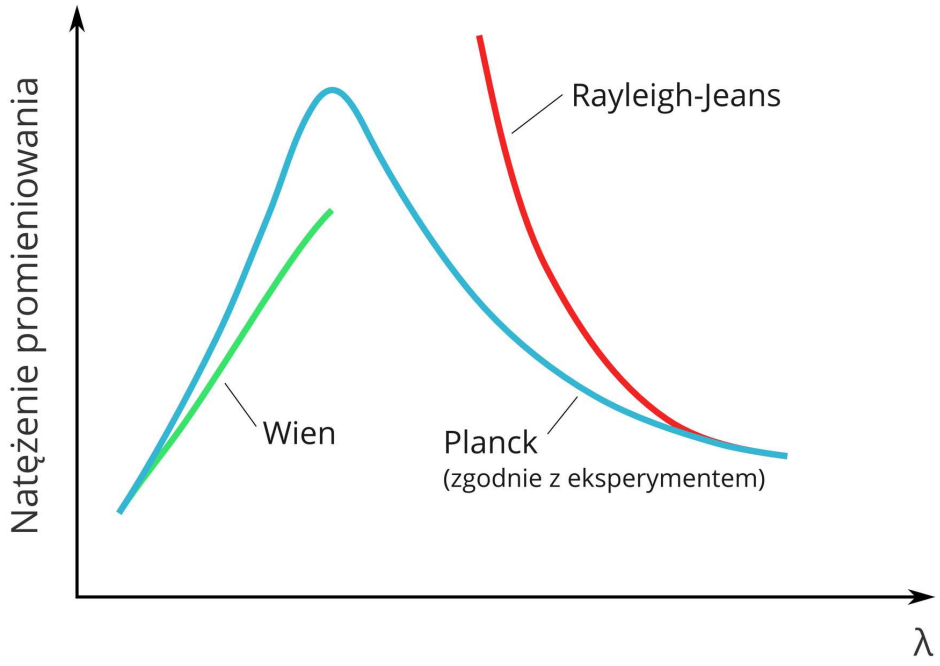
Już potrafisz

- podać zakresy długości fal charakterystyczne dla światła widzialnego;
- podać definicję promieniowania termicznego (cieplnego);
- podać definicję ciała doskonale czarnego;
- stwierdzić, że widmo promieniowania ciała doskonale czarnego ma charakter ciągły.

Nauczysz się

- że kwant jest ścisle określoną porcją energii, którą ciało może wyemitować lub pochłonąć;
- że najmniejsza porcja energii fali elektromagnetycznej nazywana jest kwantem lub fotonem;
- obliczać energię, którą niesie ze sobą foton.

Próba teoretycznego opisu wyników doświadczeń, których celem było zrozumienie praw rządzących promieniowaniem cieplnym ciała doskonale czarnego się nie powiodła. Zdolność emisyjną ciała doskonale czarnego w stałej temperaturze opisywano za pomocą dwóch wzorów – Wiena i Reyleigha-Jeansa. Niestety, oba zawiodły. Wzór Wiena sprawdzał się dobrze w przypadku fal krótkich, ale bardzo wyraźne odstępstwa pojawialy się w zakresie fal długich. Z kolei wzór Reyleigha-Jeansa sprawdzał się bardzo dobrze w odniesieniu do fal długich, ale źle w przypadku fal krótkich.



Wzory Wiena i Reyleigha-Jeansa a dane doświadczalne

W 1900 r. ogłoszono co najmniej pięć zależności między natężeniem promieniowania a długością emitowanej fali elektromagnetycznej.

Dopiero 14 grudnia 1900 r. Max Planck podczas wystąpienia na posiedzeniu Towarzystwa Fizycznego w Berlinie przedstawił teorię opisującą emisję i absorpcję promieniowania elektromagnetycznego przez ciało doskonale czarne. Fizykowi udało się uzyskać zgodność wyników pomiarów z obliczeniami. Planck założył, że energia wypromieniowywana jest z ciała doskonale czarnego i przez nie pochłaniana w postaci ściśle określonych porcji energii, czyli kwantów (fotonów). Ta energia ma zatem charakter nieciągły, a nie – jak dotychczas sądzono – ciągły.

Według Plancka najmniejsza porcja energii fali elektromagnetycznej, czyli fotonu, wyraża się wzorem:

$$E = h \cdot \nu,$$

gdzie:

h – uniwersalna stała, nazwana stałą Plancka; $h \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34}\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$;

ν [Hz] (grecka litera „ni") – częstotliwość promieniowania emitowanego lub pochłanianego przez ciało doskonale czarne.

Jak widać, energia takiej „porcji" jest zależna od częstotliwości promieniowania, a tym samym od długości fali:

$\lambda = c \cdot \mathrm{T}$ i $\mathrm{T} = \frac{1}{\nu}$

gdzie c jest prędkościa światła w próżni.

$\lambda = c \cdot T = c \cdot \frac{1}{\nu} = \frac{c}{\nu}$

Po przekształceniu wzoru otrzymujemy:

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

Na tej podstawie możemy wyprowadzic wzór:

$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

> **Przykład 1**
>
> Oblicz energię kwantów promieniowania świetlnego o długości fali $\lambda_1 = 656\ \mathrm{nm}$ (czerwona linia w widmie wodoru) i $\lambda_2 = 486\ \mathrm{nm}$ (niebieska linia w widmie wodoru).
>
> **Rozwiązanie:**
>
> **Analiza zadania:**
>
> Zadanie wymaga obliczenia energii kwantów promieniowania elektromagnetycznego dla długości fali $\lambda_1 = 656\ \mathrm{nm}$ i $\lambda_2 = 486\ \mathrm{nm}$.
>
> **Dane:**
>
> $\lambda_1 = 656\ \mathrm{nm}$
>
> $\lambda_2 = 486\ \mathrm{nm}$
>
> $c = 300000000 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
>
> $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$
>
> **Szukane:**

E_1, E_2

Wzór:

$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

Obliczenia:

$$E_1 = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 6{,}63 \cdot 10^{-34} \mathrm{J \cdot s}}{656 \cdot 10^{-9} \mathrm{m}} = 3 \cdot \frac{6{,}63}{656} \cdot 10^8 \cdot 10^{-34} \cdot 10^9 \ \mathrm{J} = 3{,}03 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$$

$$E_2 = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 6{,}63 \cdot 10^{-34} \mathrm{J \cdot s}}{486 \cdot 10^{-9} \mathrm{m}} = 3 \cdot \frac{6{,}63}{486} \cdot 10^8 \cdot 10^{-34} \cdot 10^9 \mathrm{J} = 4{,}09 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$$

Odpowiedź:

Energia kwantu światła odpowiadająca długości fali $486 \ \mathrm{nm}$ wynosi $4{,}09 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$, a energia kwantu światła odpowiadająca długości fali $656 \ \mathrm{nm}$ – $3{,}03 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$.

Do tej pory przyjmowano jako pewnik, że energia emitowana przez ciało ma rozkład ciągły. Swoim wystąpieniem Planck zapoczątkował ciąg wydarzeń, który zrewolucjonizował postrzeganie przez nas świata.

W 1905 r. Albert Einstein studiował przyczyny występowania zjawiska fotoelektrycznego, które szczegółowo omówimy na następnej lekcji. Natrafił jednak, tak samo jak jego poprzednicy, na trudności związane z jego wytłumaczeniem. Za pomocą teorii kwantów Einsteinowi udało się nie tylko wyjaśnić to zjawisko, lecz także skorygować teorię. Na czym polegała jej modyfikacja? Planck twierdził, że emisja i absorpcja promieniowania elektromagnetycznego przez ciało stałe mogą odbywać się wyłącznie w sposób nieciągły, tj. określonymi porcjami. Właściwość tę wiązał jednak z reakcją materii na padające promieniowanie i nie sądził, że ta cecha ma coś wspólnego z naturą promieniowania elektromagnetycznego. Zupełnie inaczej to zjawisko potraktował Einstein, który opisał falę elektromagnetyczną jako cząsteczki (kwanty) o energii zależnej od częstotliwości. Tym samym stanął w jawnej opozycji do klasycznej fizyki, która opisywała zachowanie fal elektromagnetycznych za pomocą równań Maxwella (czyli z wykorzystaniem wielkości takich jak długość fali, okres, amplituda drgań).

Do opisu zjawiska fotoelektrycznego Einstein korzystał jedynie ze sformułowania „kwant energii promieniowania". Dopiero w 1926 r. Gilbert Lewis, który poszukiwał nośnika energii promienistej, wprowadził pojęcie fotonu. Najpierw jednak odkryto, że taka „porcja energii" – kwant – przypomina poruszającą się cząsteczkę (nieistniejącą w spoczynku) obdarzoną masą i mogącą zderzać się z elektronem. Za odkrycie i wyjaśnienie tego zjawiska A.H. Compton otrzymał w 1927 r. Nagrodę Nobla.

Zapamiętaj!

> Foton jest kwantem promieniowania elektromagnetycznego – poruszającą się cząsteczką, która nie ma masy spoczynkowej (istnieje tylko w ruchu) ani ładunku i odgrywa istotną rolę w każdym procesie elektromagnetycznym. W próżni foton ma prędkość $\mathrm{c} = 300000000 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

> **Polecenie 1**
>
> Oblicz, w jakim przedziale energii mieści się promieniowanie widzialne, któremu odpowiada przedział długości fali między 380 a $780\ \mathrm{nm}$.

Odkrycia Maxa Plancka i Alberta Einsteina dały początek całkiem nowej gałęzi fizyki, odmiennej pojęciowo od od tej, którą znano dotychczas. Ta nowa gałąź wiedzy okazała się fundamentalna dla zrozumienia praw rządzących mikroświatem – mechaniki kwantowej.

Podsumowanie

- Emisja i absorpcja promieniowania elektromagnetycznego przez ciało polega na wysyłaniu lub pochłanianiu energii w określonych porcjach (kwantach), zależnych od częstości promieniowania. Porcje te nazywamy fotonami.
- Foton jest kwantem promieniowania elektromagnetycznego. Możemy traktować go jako cząstkę, która nie ma masy spoczynkowej (istnieje tylko w ruchu) ani ładunku. Odgrywa istotną rolę w każdym procesie promienistym i w oddziaływaniach elektromagnetycznych.
- Według Plancka najmniejsza porcja energii elektromagnetycznej, czyli kwantu energii, wyraża się wzorem:
  $E = h \cdot \nu$ lub $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$
  gdzie: h – uniwersalna stała, nazwana stałą Plancka; $\mathrm{h} \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34} \mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$; ν [Hz] (grecka litera „ni”) – częstotliwość promieniowania emitowanego lub pochłanianego przez ciało czarne; c – wartość prędkości światła w próżni; λ – długość fali promieniowania.

> **Praca domowa**
>
> > **Polecenie 2.1**
> >
> > Oblicz, ile razy energia kwantu (fotonu) promieniowania widzialnego o długości fali $\lambda = 500\ \mathrm{nm}$ jest większa od energii kwantu fal radiowych o częstotliwości $\nu = 225\ \mathrm{kHz}$ (fale długie, stacja Warszawa I).

Słowniczek

foton

– kwant promieniowania elektromagnetycznego o ściśle określonej energii zależnej od częstotliwości (długości fali) promieniowania.

kwant energii

– najmniejsza, ściśle określona porcja energii, jaką może mieć lub o jaką może się zmienić energia ciała.

równania Maxwella

– równania klasycznej teorii pola elektromagnetycznego, opublikowane w 1862 roku przez J.C. Maxwella. Łączą wszystkie znane prawa opisujące oddziaływania ładunków elektrycznych i zjawiska z nimi związane. Równania Maxwella to kompletny zbiór zasad rządzących własnościami pól elektrycznych i magnetycznych.

zjawisko fotoelektryczne

– zjawisko polegające na pochłanianiu promieniowania optycznego przez ciało stałe, ciecz lub gaz; procesowi temu towarzyszą zjawiska elektryczne, np. emisja elektronów z metalu (fotoefekt zewnętrzny).

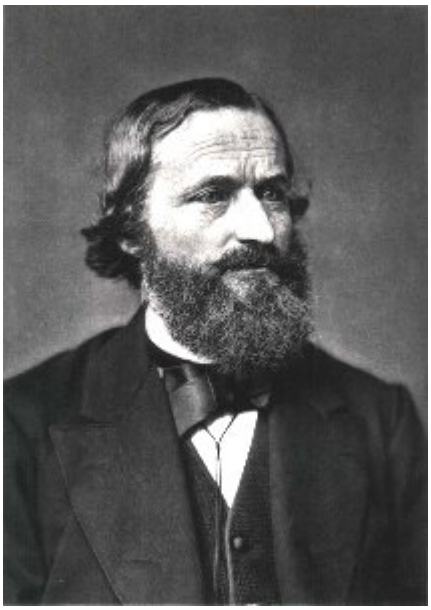
Biogramy

Laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki (1927 r.)

Arthur Holly Compton

10.09.1892–15.03.1962

Odkrywca rozpraszania Comptona – nazwa zjawiska pochodzi od nazwiska uczonego. Zauważył, że kiedy fotony z zakresu fal rentgenowskich padają na elektrony słabo związane z jądrem atomu, powodują ich przemieszczenie ze swoich orbit i tracą przy tym energię; temu procesowi towarzyszy zmiana długości fali padającego promieniowania (przesunięcie comptonowskie). Za to odkrycie w 1927 r. został uhonorowany Nagrodą Nobla. Brał także udział w pracach nad bombą atomową, a jego badania pomogły Enricowi Fermiemu w konstrukcji pierwszego reaktora (1942 r.).

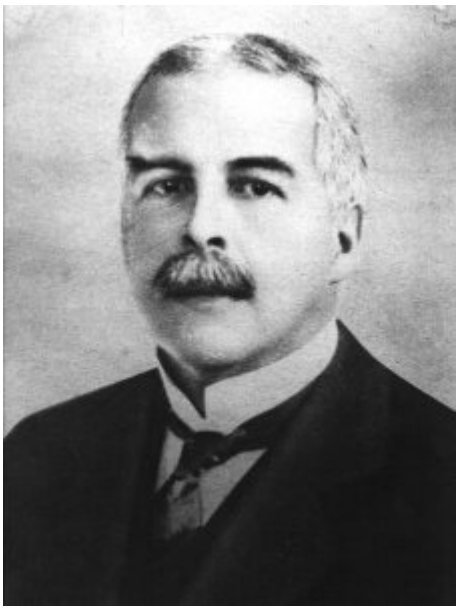


Gustav Kirchhoff zauważył, że stosunek zdolności absorpcji i emisji ciała doskonale czarnego jest stały i zależy tylko od długości fali oraz temperatury ciała

Gustav Kirchhoff

12.03.1824–17.10.1887

Wynalazca spektroskopu i metody analizy spektralnej. Odkrył pierwiastki takie jak cez i rubid. Twórca praw dotyczących elektryczności.

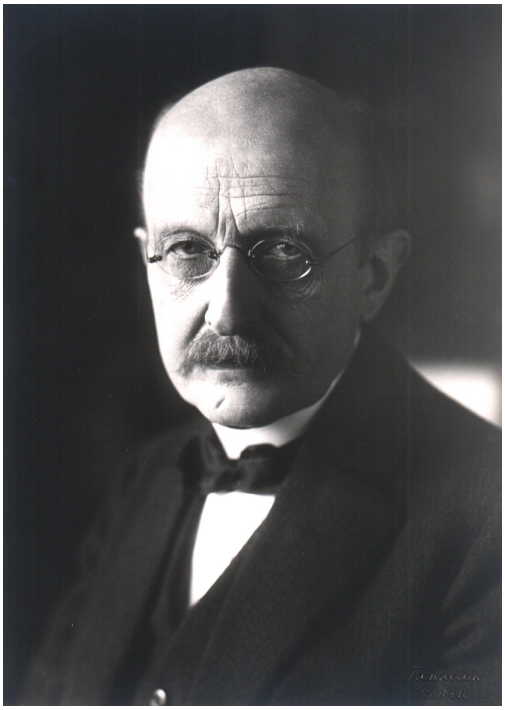


Gilbert Lewis, który jako pierwszy posłużył się pojęciem fotonu

Gilbert Lewis

23.10.1875–23.03.1946

Amerykański fizykochemik, twórca teorii tworzenia się wiązań kowalencyjnych. Jako pierwszy otrzymał ciężką wodę. (D_2O).



Max Planck, twórca teorii kwantów

Max Planck

23.04.1858–4.10.1947

Niemiecki fizyk, jeden z twórców fizyki kwantowej. Zajmował się termodynamiką, optyką oraz teorią względności.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Przeczytaj poniższe zdania. Które z nich jest fałszywe, a które prawdziwe?

	Prawda	Fałsz
Gdy podwoimy długość fali promieniowania, energia każdego z jego kwantów zwiększy się czterokrotnie.	◯	◯
Foton możemy traktować jako cząsteczkę, która nie ma masy spoczynkowej.	◯	◯
Kwanty światła czerwonego mają większą energię niż kwanty światła niebieskiego.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Zewnętrzny efekt fotoelektryczny i jego zastosowanie

Odkrycie zjawiska fotoelektrycznego (przy okazji badań nad falami elektromagnetycznymi) stało się wyzwaniem dla fizyki klasycznej. Na tej lekcji dowiesz się, kto je wyjaśnił, jak do tego doszło i dlaczego było to takie ważne.

Efekt fotoelektryczny zewnętrzny ma w dzisiejszym świecie szerokie spektrum zastosowań, a jednym z nich jest konstrukcja fotokomórki, którą po raz pierwszy zastosowano już w 1931 roku w w mechanizmie automatycznie otwieranych drzwi.

Już potrafisz

- podać definicję kwantu energii fali elektromagnetycznej;
- obliczyć energię, kwantu promieniowania elektromagnetycznego o danej długości fali;
- obliczyć wartość energii kinetycznej ciała;
- stosować zasadę zachowania energii.

Nauczysz się

- opisywać zjawisko fotoelektryczne za pomocą takich pojęć, jak praca wyjścia, energia fotonu, energia kinetyczna fotoelektronu;
- wyjaśniać zjawisko fotoelektryczne jako emisję elektronów z powierzchni metalu pod wpływem (działaniem) strumienia fotonów;
- wykorzystywać zasadę zachowania energii do wyznaczania energii kinetycznej i prędkości fotoelektronów oraz pracy wyjścia elektronu z metalu;
- opisywać budowę i działanie fotokomórki.

W 1887 r. Heinrich Hertz do badania zjawiska rozchodzenia się fal elektromagnetycznych używał drutu wygiętego w kształt okręgu i zakończonego dwiema kuleczkami – taki przyrząd nazywamy rezonatorem. Gdy fala elektromagnetyczna docierała do takiego rezonatora, pomiędzy kuleczkami przeskakiwała iskra. Hertz stwierdził, że gdy obszar między kuleczkami jest oświetlony światłem, to iskra jest intensywniejsza. Ogłosił krótką wzmiankę o wpływie światła na zjawisko rozchodzenia się fal elektromagnetycznych, ale nie zajmował się nim więcej. Dalsze badania prowadzili inni naukowcy. Wilhelm Hallwachs stwierdził, że oświetlona metalowa płytka ładuje się dodatnio. Aleksandr Stoletow, skonstruował pierwszą fotokomórkę i zauważył, że światło o zbyt małej częstotliwości (zbyt dużej długości) fali nie powoduje, że płytki metalowa ładuje się dodatnio. Philipp Lenard wykazał, że wyniki naświetlania powierzchni metalu zależą od rodzaju użytej lampy oraz że zwiększenie natężenia światła powoduje szybsze rozładowaniem się płytki połączonej z elektroskopem.

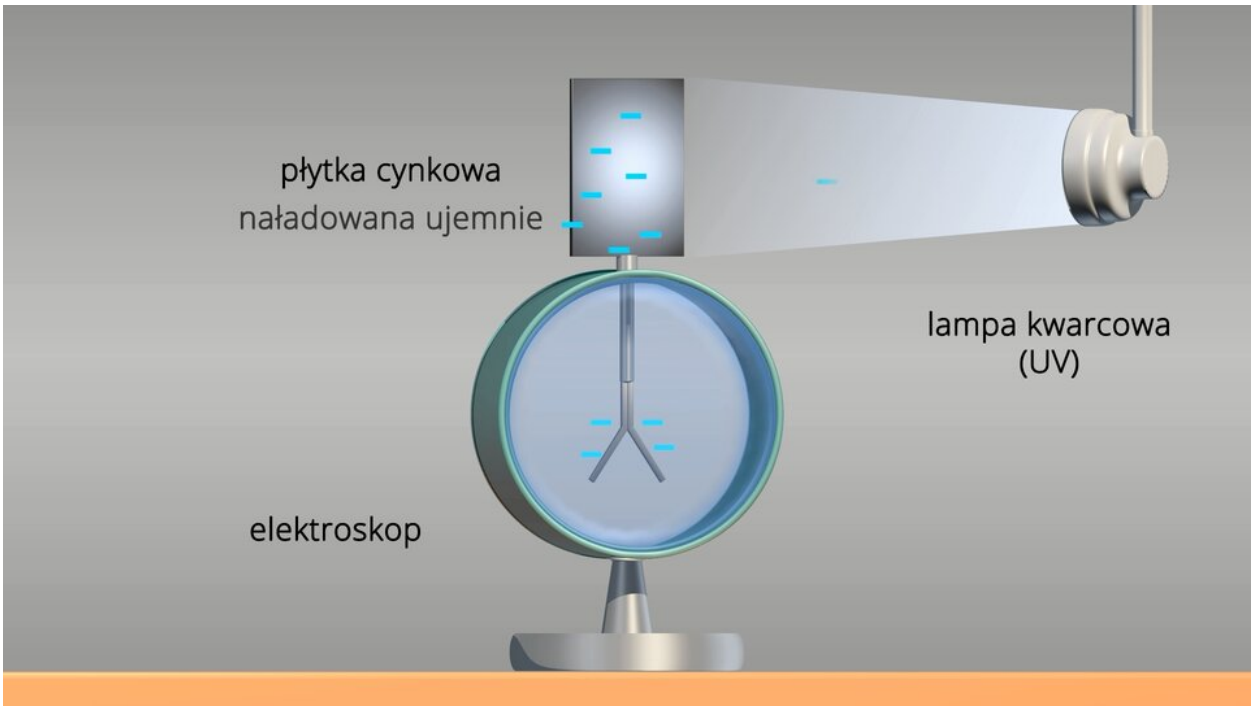
Doświadczenie 1

Pokazać, że oświetlanie płytki cynkowej światłem nadfioletowym prowadzi do emisji elektronów.

Podczas pracy lampy kwarcowej wszyscy powinni mieć założone okulary chroniące przed promieniowaniem ultrafioletowym. Mogą to być okulary przeciwsłoneczne, ale nie takie, jakie można kupić w supermarkecie. Najlepszą gwarancję ochrony wzroku stanowią okulary używane przez spawaczy (okulary spawalnicze).

Co będzie potrzebne

- elektroskop;
- pałeczka ebonitowa i sukno;
- płytka cynkowa;
- rzutnik;
- lampa kwarcowa.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Fotoemisja z powierzchni blaszki cynkowej

Na środku ekranu ustawiony jest elektroskop. Okrągła obudowa o średnicy około czterdziestu centymetrów. Szerokość obudowy około dziesięć centymetrów. Po obu stronach okrągła szczelnie zamontowana szybka. Wewnątrz obudowy metalowy pręt. Pręt ustawiony pionowy, umieszczony w górnej części obudowy. Pręt zakończony rozwidleniem. Rozwidlenia to listki. Listki rozwidlają się na długości około dwudziestu centymetrów. Długość listków to około dziesięć centymetrów. Pręt wystaje na górze poza obudowę. Na szczycie pręta przymocowana jest cynkowa płytka. Płytka o wymiarach: wysokość około dwadzieścia centymetrów, szerokość to około dziesięć centymetrów. Na prawo od płytki zawieszona jest lampa kwarcowa. Lampa emituje promieniowanie ultrafioletowe w kierunku płytki cynkowej. Niebieskie znaki minus naniesione na powierzchni płytki oraz wokół listków wewnątrz elektroskopu

---

Instrukcja

1. Oczyść płytkę cynkową i jej krawędzie drobnoziarnistym papierem ściernym.
2. Zamontuj płytkę na uziemionym elektroskopie.
3. Naładuj ujemnie pałeczkę ebonitową, pocierając ją suknem.
4. Dotknij pałeczką krawędzi płytki cynkowej i przeciągnij bokiem pałeczki po krawędzi płytki, aby przekazać jej jak największy ładunek.
5. Obserwuj, czy listki elektroskopu się rozchyliły. Jeśli nie, powtórz czynności opisane w punktach 3. i 4.
6. Oświetl płytkę światłem rzutnika.
7. Obserwuj listki elektroskopu – nie powinny zmienić swojego położenia.
8. Oświetl płytkę elektroskopu światłem pochodzącym z lampy kwarcowej.

9. Obserwuj listki elektroskopu. Co udało ci się zauważyć?

Podsumowanie

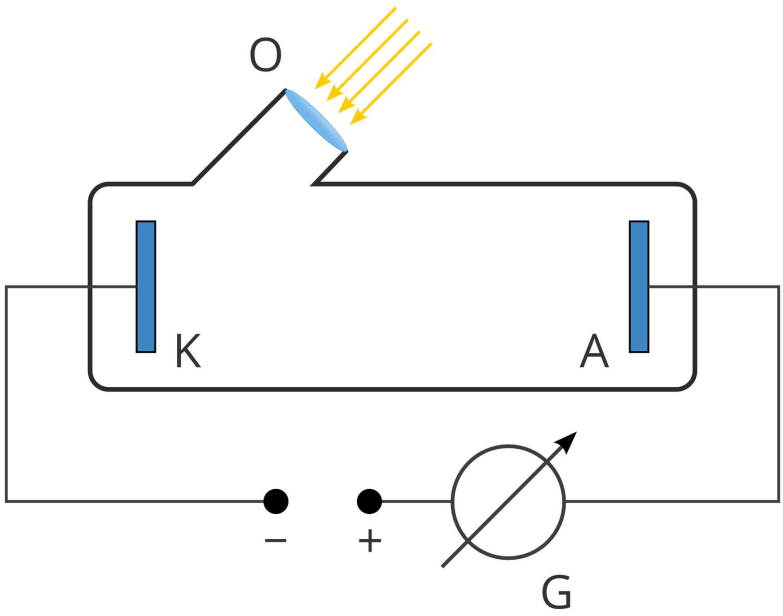
Pod wpływem światła emitowanego przez lampę kwarcową listki elektroskopu opadły. Światło lampy rzutnika nie spowodowało żadnej zmiany w ich wychyleniu. Lampa kwarcowa emituje fale elektromagnetyczne także w zakresie nadfioletu (fale krótsze od zakresu światła widzialnego). Ponieważ padały one na płytkę cynkową naładowaną ładunkami ujemnymi, powodowały emisję zgromadzonych tam elektronów i doprowadzały do opadnięcia listków elektroskopu.

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Zapamiętaj!

W zewnętrznym zjawisku fotoelektrycznym – fotoemisji – pochłanianie światła powoduje emisję elektronów poza obręb oświetlanej substancji. Takie elektrony nazywamy fotoelektronami.

Dokładniejsze badania były prowadzone za pomocą układu, którego schemat zamieszczamy poniżej.



Schemat układu doświadczalnego do badania zjawiska fotoelektrycznego

Przez okienko (O) znajdujące się w górnej części bańki próżniowej wpada promieniowanie elektromagnetyczne. Pada ono na katodę (K) znajdującą się z lewej strony. Pomiędzy katodą a drugą elektrodą – anodą (A) płynie prąd elektryczny. Możemy sprawdzić to za pomocą

galwanometru (G), czyli czułego amperomierza, włączonego w obwód. Okienko wykonane jest ze szkła kwarcowego, przepuszczającego duży zakres długości fal padającego promieniowania– od ultrafioletu do podczerwieni. Zmieniając długość fali, można badać wpływ parametrów promieniowania na przebieg zjawiska.

Efekty badań można przedstawić następująco:

1. Zjawisko fotoelektryczne zachodzi natychmiast po włączeniu oświetlenia lub też nie zachodzi wcale.
2. Nie ma żadnego opóźnienia między rozpoczęciem naświetlania a przepływem prądu.
3. Im większe natężenie oświetlenia, tym silniejsze natężenie prądu.
4. Dla każdego metalu, z którego wykonana jest katoda, istnieje graniczna częstotliwość (długość fali) promieniowania, poniżej której zjawisko w ogóle nie zachodzi.
5. Wyznaczenie energii kinetycznej emitowanych elektronów pokazało, że nie jest ona związana z natężeniem padającego światła, ale zależy od jego częstotliwości – jest większa dla ultrafioletu, a mniejsza dla światła żółtego.

Kłopoty w wyjaśnieniu fotoefektu spowodowane były m.in tym, że zjawisko fotoelektryczne zachodzi natychmiast po włączeniu oświetlenia (czas potrzebny na jego zainicjowanie nie zależy ani od jasności, ani od częstotliwości promieniowania).
W ujęciu fizyki klasycznej elektrony powinny „wyparowywać" z powierzchni metalu, tak jak dzieje się to podczas odparowywania cząsteczek z powierzchni gorącej wody. Wymagałoby to jednak pewnego czasu, a obserwowany efekt był natychmiastowy.

Liczba emitowanych elektronów zależy tylko od natężenia światła. Natomiast ich energia jest uwarunkowana częstotliwością promieniowania, którym oświetlamy metal. W ujęciu fizyki klasycznej energia fali elektromagnetycznej jest proporcjonalna do jej natężenia, a więc im większe jest natężenie promieniowania, tym większą energię powinno ono przekazać elektronom. Fizyka klasyczna niepoprawnie opisywała także to zjawisko.

Istotne okazało się istnienie częstotliwości granicznej. W myśl teorii falowej zjawisko fotoelektryczne powinno zachodzić w każdym rodzaju promieniowania, gdy tylko elektrony w metalu nabiorą odpowiedniej energii. Musiałoby wystąpić jednak opóźnienie tego zjawiska.

Trudno było więc zrozumieć zjawisko fotoelektryczne na podstawie założeń fizyki klasycznej. W 1905 r. efekt ten w prosty sposób wytłumaczył Alberta Einstein, który w 1921 r. otrzymał za to Nagrodę Nobla. Przyjął, że światło należy traktować nie jako falę, a jako strumień fotonów (kwantów energii promieniowania). Zgodnie z postulatem Plancka mają one energię kinetyczną równą:

$$E_{\mathrm{k}} = h\nu$$

Teraz wszystko staje się jasne – im więcej fotonów pada na powierzchnię metalu, tym większa jest liczba zderzeń z elektronami i tym więcej elektronów zostaje wybitych z powierzchni. Jeden foton może oddziaływać tylko z jednym elektronem. Im większa częstotliwość światła, tym większa energia fotonów, którą mogą one przekazać elektronom. Tym samym elektrony będą miały większą energię kinetyczną po opuszczeniu metalu.

Zauważono także, że istnieje pewna częstotliwość progowa, poniżej której elektrony nie mogą opuścić powierzchni metalu. Jest to całkiem logiczne, jeżeli weźmiemy pod uwagę oddziaływania elektryczne elektronów na wnętrze metalu. Elektrony w metalu są stosunkowo swobodne – tworzą tzw. gaz elektronowy. Nie mogą jednak opuścić metalu, ponieważ są przyciągane przez dodatnie jony metalu. Jeżeli energia dostarczona przez foton będzie za mała, elektron nie uwolni się od oddziaływań elektrostatycznych, przeciwko którym musi zostać wykonana pewna praca. Pracę tę nazywać będziemy pracą wyjścia.

Zgodnie z wyjaśnieniem Alberta Einsteina zjawisko fotoelektryczne polega na wybijaniu elektronów z metalu pod wpływem kwantów światła (fotonów). Energia każdego fotonu (zgodnie z hipotezą Plancka) jest równa iloczynowi tzw. stałej Plancka oraz częstotliwości fali elektromagnetycznej (świetlnej) odpowiadającej strumieniowi fotonów. Część pochłoniętej energii fotonu zostaje zużyta na wykonanie pracy przeciwko siłom przyciągającym (jony metalu są dodatnie). Reszta zaś stanowi energię kinetyczną elektronu. Otrzymujemy więc zależność:

$$h\nu = W + E_{\mathrm{k}}$$

gdzie:

W – praca wyjścia elektronu z metalu;

E_{k} – energia kinetyczna elektronów.

po dokonaniu przekształceń otrzymujemy:

$$W = h\nu_0$$

gdzie:

ν_0 – częstotliwość minimalna promieniowania elektromagnetycznego, przy którym zachodzi zewnętrzny efekt fotoelektryczny; częstotliwość ta ma inną wartość dla każdego metalu.

> **Przykład 1**
>
> Praca wyjścia elektronów z powierzchni magnezu wynosi $5{,}85 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$.
>
> 1. Oblicz częstotliwość graniczną zachodzenia zjawiska fotoelektrycznego dla magnezu.

2. Oblicz długość fali odpowiadającą tej częstotliwości.
3. Czy światło o tej długości fali jest przez nas widziane? Dlaczego?

Rozwiązanie:

Analiza zadania:

Zadanie dotyczy emisji elektronów z powierzchni magnezu. Jeśli energia padających kwantów fali elektromagnetycznej jest równa pracy wyjścia, to elektrony pochłonięte przez kwanty powinny znaleźć się na powierzchni oświetlanego materiału. Wówczas częstotliwość padającego światła będzie równa tzw. częstotliwości granicznej. Na podstawie zależności między częstotliwością a długością fali obliczymy długość fali odpowiadającą częstotliwości granicznej. Wiemy, że zakres fal widzialnych zawiera się w przedziale od 380 do $770\ \mathrm{nm}$, więc na końcu ustalamy, czy obliczona przez nas długość fali należy do tego przedziału.

Energia kwantu promieniowania fali elektromagnetycznej:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Praca wyjścia:

$$W = E = h \cdot \nu_0$$

Wymagane wielkości:

ν_0 – częstotliwość graniczna

$$W = h \cdot \nu_0 / : h$$

$$\nu_0 = \frac{W}{h}$$

λ – długość fali odpowiadająca częstotliwości granicznej

$$h \cdot \nu_0 = \frac{h \cdot c}{\lambda} / : h$$

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu_0}$$

Dane:

$$c = 300\ 000\ 000 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$

$W = 5{,}85 \cdot 10^{-19}\mathrm{J}$

Szukane:

W = ?

Obliczenia:

$\nu_0 = \frac{W}{h} = \frac{5{,}85 \cdot 10^{-19}\mathrm{J}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}} = \frac{5{,}85}{6{,}63} \cdot 10^{15}\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 882 \cdot 10^{12}\mathrm{Hz}$

$\lambda = \frac{c}{\nu_0} = 3 \cdot 10^{8}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot \frac{1}{882 \cdot 10^{12}}\,\mathrm{s} = \frac{3}{882} \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m} = 340 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-4}\mathrm{m} = 340 \cdot 10^{-9}\mathrm{m}$

$\lambda = 340\ \mathrm{nm}$

Odpowiedź:

Częstotliwość graniczna zewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego dla materiału wykonanego z magnezu wynosi $\nu_0 = 882 \cdot 10^{12}\ \mathrm{Hz}$, co odpowiada długości fali padającego światła $\lambda = 340\ \mathrm{nm}$. Jest to wartość poza dolną granicą długości dla światła widzialnego, która zawiera się w przedziale od 380 do $770\ \mathrm{nm}$.

Przykład 2

Graniczna długość fali dla cynku wynosi $290\ \mathrm{nm}$.

1. Oblicz pracę wyjścia elektronów dla cynku.
2. Czy światło o długości fali większej niż $290\ \mathrm{nm}$ spowoduje zjawisko fotoelektryczne w przypadku cynku? Dlaczego?

Rozwiązanie:

Analiza zadania:

Zadanie dotyczy emisji elektronów z powierzchni cynku. Aby elektrony móc opuścić powierzchnię metalu, muszą wykonać pracę - jest to tzw. praca wyjścia. Jest ona wykonywana kosztem energii kwantów padającej fali elektromagnetycznej i zależy od jej częstotliwości. Częstotliwość padającego światła jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali. Im częstotliwość (a tym samym energia) jest większa, tym krótsza musi być fala.

Energia kwantu promieniowania fali elektromagnetycznej:

$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

Praca wyjścia:

$W = E = h \cdot \nu_0 = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

Wymagane wielkości:

W – praca wyjścia

$W = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

Dane:

$c = 300\ 000\ 000 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$

$\lambda = 290\ \mathrm{nm}$

Szukane:

W = ?

Obliczenia:

$W = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \mathrm{J} \cdot \mathrm{s} \cdot 3 \cdot 10^{8} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{290 \cdot 10^{-9} \mathrm{m}} = 6{,}9 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$

Odpowiedź:

Praca wyjścia elektronów dla cynku wynosi $W = 2{,}3 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$. Fala o długości większej niż $\lambda = 290\ \mathrm{nm}$ nie może spowodować zewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego, ponieważ jej kwanty mają zbyt małą energię. Zwiększenie długości fali powoduje, że zmniejsza się energia jej kwantów. Wynika to z zależności: $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.

Przykład 3

Elektrony wybite z powierzchni złota mają energię kinetyczną $4{,}55 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$. Praca wyjścia dla złota wynosi $8{,}48 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$.

1. Wykaż, że światło o długości fali $150\ \mathrm{nm}$ sprawi, że elektrony zostana wybite z powierzchni złota.
2. Oblicz prędkość elektronów wybijanych z tej powierzchni.
   Potrzebne dane wyszukaj w tablicach fizycznych lub w internecie.

Rozwiązanie:

Analiza zadania:

Zgodnie z zasada zachowania energii elektron opuszczający powierzchnię przewodnika zużywa część energii na wykonanie pracy wyjścia, a pozostała energia jest zamieniana na energię kinetyczną. Kiedy obliczymy sumę pracy wyjścia i energii kinetycznej, możemy obliczyć energię fotonu i częstotliwość promieniowania i tym samym określić długość padającej fali. Następnie porównujemy tak wyznaczoną wartość ze $150\ \mathrm{nm}$. Jeśli okaże się, że jest ona większa od długości fali $150\ \mathrm{nm}$ (bądź jej równa), to ta ostatnia wywoła zjawisko fotoelektryczne, gdy pada na powierzchnię przewodnika. Jeśli znamy energię kinetyczną elektronów, możemy wyznaczyć ich prędkość (wcześniej musimy odczytać masę elektronu z tablic fizycznych).

Energia kwantu promieniowania fali elektromagnetycznej:

$$E = W + E_{\mathrm{k}} = h \cdot \nu$$

Długość fali padającego światła:

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

Energia kinetyczna:

$$E_{\mathrm{k}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Wymagane wielkości:

E – energia kwantu

$$E = W + E_{\mathrm{k}}$$

ν – częstotliwość fali padającego światła

$$W + E_{\mathrm{k}} = h \cdot \nu \ / : h$$

$$\nu = \frac{W + E_{\mathrm{k}}}{h}$$

v – prędkość elektronu

$$E_{\mathrm{k}} = \frac{m \cdot v^2}{2} / \cdot 2$$

$$2 \cdot E_{\mathrm{k}} = m \cdot v^2 / : m$$

$\frac{2 \cdot E_{\mathrm{k}}}{m} = v^2$

$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\mathrm{k}}}{m}}$

m – masa spoczynkowa elektronu odczytana z tablic

Dane:

$c = 300\,000\,000 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$

$\lambda = 150\ \mathrm{nm}$

$m = 9{,}12 \cdot\ 10^{-31}\ \mathrm{kg}$

$W = 8{,}48 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$

$E_{\mathrm{k}} = 4{,}55 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$

Szukane:

ν = ?

λ = ?

v = ?

Obliczenia:

$E = W + E_{\mathrm{k}} = 8{,}48 \cdot 10^{-19} \mathrm{J} + 4{,}55 \cdot 10^{-19} \mathrm{J} = 13{,}03 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}$

$\nu = \frac{W + E_{\mathrm{k}}}{h} = \frac{13{,}03 \cdot 10^{-19} \mathrm{J}}{6{,}63 \cdot 10^{-34} \mathrm{J} \cdot \mathrm{s}} = \frac{13{,}03}{6{,}63} \cdot 10^{15} \mathrm{Hz} = 196{,}53 \cdot 10^{13} \mathrm{Hz}$

$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{196{,}53 \cdot 10^{13} \mathrm{Hz}} = \frac{300}{196{,}53} \cdot 10^{-7} \mathrm{nm} = 152{,}6\ \mathrm{nm}$

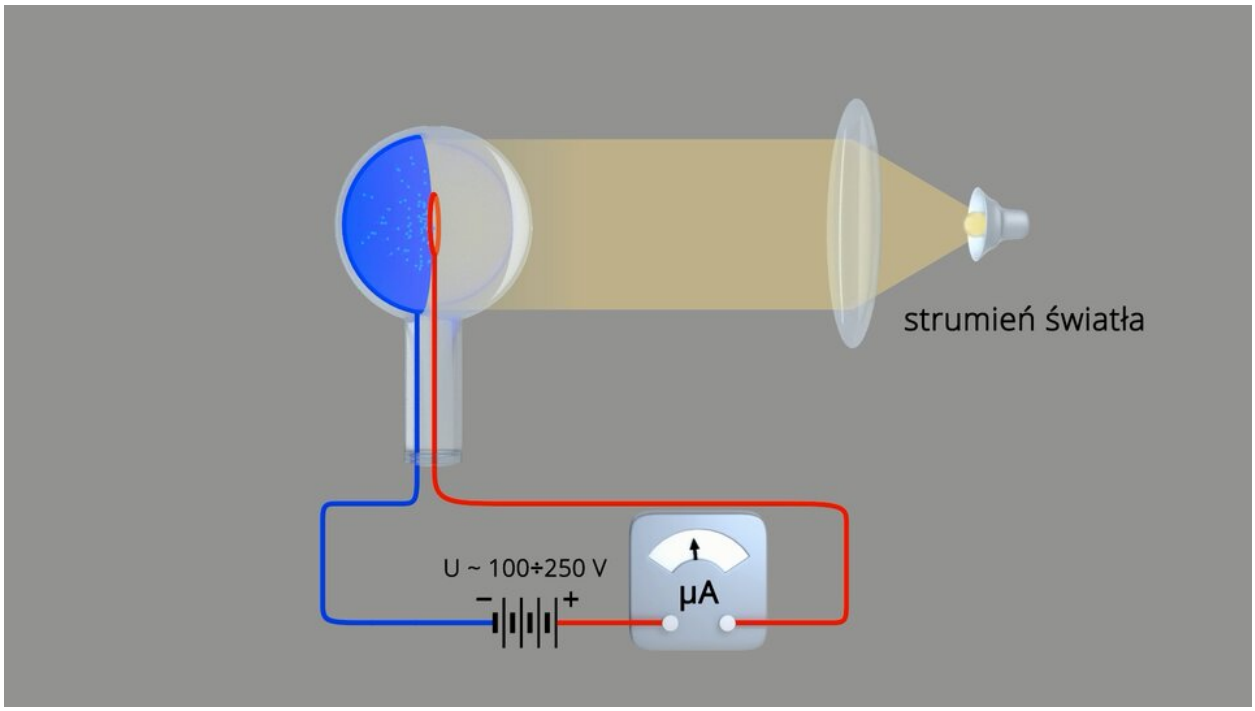
$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\mathrm{k}}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4{,}55 \bullet 10^{-19} \mathrm{J}}{9{,}12 \cdot 10^{-31} \mathrm{kg}}} = \sqrt{\frac{9{,}10}{9{,}12} \cdot 10^{12} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} \approx 10^6 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Odpowiedź:

> Długość fali padającego promieniowania jest nieznacznie mniejsza od długości fali wymaganej do tego, aby wykonać pracę wyjścia i nadać elektronom odpowiednią energię kinetyczną. Fala elektromagnetyczna $\lambda = 150\ \mathrm{nm}$ spowoduje zatem emisję elektronów z powierzchni metalu. Prędkość elektronów wyniesie $v \approx 10^6 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Wzór $h\nu = \mathrm{W} + E_\mathrm{k}$ nazywany jest często wzorem Einsteina-Millikana. Millikan początkowo był przeciwnikiem teorii Einsteina. Prowadził jednak badania, które ostatecznie potwierdziły wzór Einsteina. W 1923 r. otrzymał Nagrodę Nobla za wyznaczenie ładunku elektronu oraz za badania nad zjawiskiem fotoelektrycznym.

Zjawisko to jest podstawą działania fotokomórek wykorzystywanych często w nauce, technice, a także w życiu codziennym (włączanie i wyłączanie oświetlenia ulicznego czy latarni morskich).
Czym jest fotokomórka?



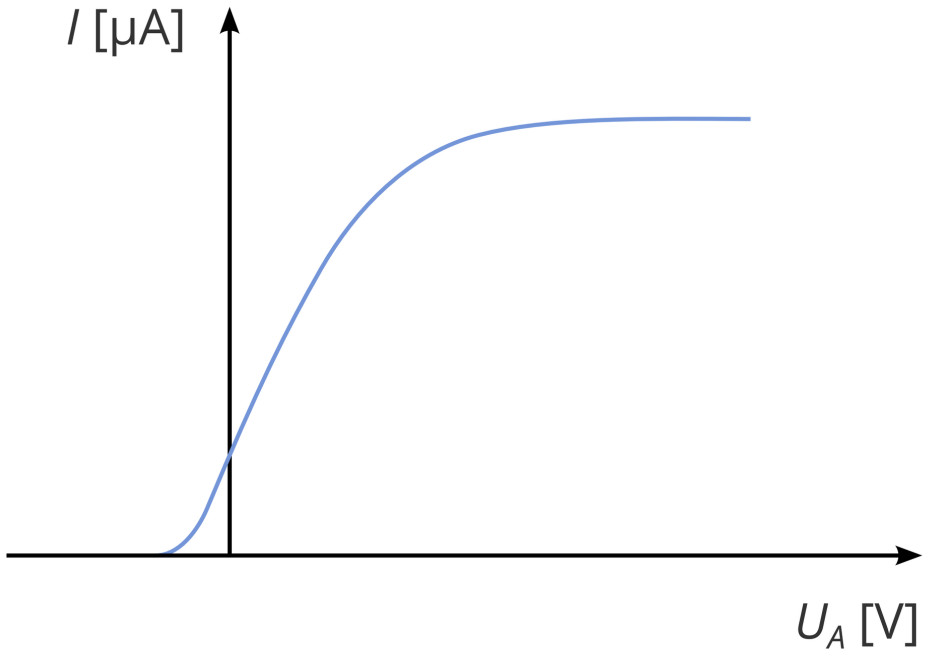
Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Budowa i zasada działania fotokomórki

Schemat przedstawia budowę i zasadę działania fotokomórki. Schemat w kształcie poziomego prostokąta znajduje się na dole ekranu. Krawędzie prostokąta mają kolor niebieski, lewa strona, kolor czerwony, prawa strona. Niebieski to katoda, napięcie ujemne. Czerwony to anoda, napięcie dodatnie. Wzdłuż dolnej krawędzi schematu znajdują się potencjał ujemny i dodatni. Pomiędzy potencjałami cztery małe pionowe prostokąty. Długość około trzy milimetry. Pomiędzy prostokątami dłuższe pionowe linie. Długość osiem milimetrów. Powyżej potencjałów zapis: duża litera „u”, poziomy symbol fali, tylda, liczba sto, plus, dwieście pięćdziesiąt, symbol litery „v”. Na prawo od potencjałów rysunek amperomierza. W górnej części amperomierza okinko ze skalą. Czarny grot strzałki wskazuje wielkość natężenia. Poniżej symbol grecki „mi”i duża litera „a”. To skrót

wskazujący mikroampery. Górna krawędź prostokątnego schematu wydłuża się w dwie pionowe linie. Lewa linia niebieska, to katoda. Prawa linia czerwona, to anoda. Katoda to półokrąg, anoda to okrąg. Katoda i anoda w szklanej okrągłej osłonie. Na prawo od osłony symboliczne, pionowe owalne okno. Okno jest szklane. Na prawo od okna lampa wysyłająca strumień światła. Strumień światła to żółty poziomy prostokąt między oknem a okrągłą osłoną katody i anody.

Przeanalizujmy wykres zależności natężenia prądu fotoelektrycznego od przyłożonego napięcia.



Charakterystyka prądowo-napięciowa fotokomórki

Natężenie prądu fotoelektrycznego wzrasta wraz ze wzrostem napięcia, dopóki nie osiągnie maksymalnej wartości, nazwanej prądem nasycenia (dalsze zwiększanie napięcia nie powoduje wzrostu natężenia prądu). Dzieje się tak, ponieważ przy pewnym napięciu do anody docierają wszystkie uwolnione elektrony, jakie w tym czasie opuszczają fotokatodę.

> **Polecenie 1**
>
> Dlaczego podczas zwiększania napięcia między anodą a katodą natężenie prądu fotoelektrycznego wzrasta, dopóki nie osiągnie stanu nasycenia? Natężenie oświetlenia, czyli liczba padających fotonów, jest stałe.

Podsumowanie

- Zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne – fotoemisja – polega na pochłanianiu światła przez materię. Temu zjawisku towarzyszy emisja elektronów z oświetlanej substancji. Takie elektrony nazywamy fotoelektronami.
- Energia elektronów, która jest wynikiem fotoefektu, nie zależy od natężenia promieniowania, a jedynie od długości jego fali.
- Większe natężenie światła oznacza większą liczbę padających fotonów, dlatego liczba fotoelektronów jest proporcjonalna do natężenia padającego promieniowania.
- Zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne jest dowodem na to, że falę elektromagnetyczną można traktować jako strumień cząsteczek – fotonów.
- Fotoefekt jest zjawiskiem kwantowym i stał się podstawą kwantowej teorii światła.
- Fotokomórki to urządzenia wykorzystywane do pomiaru natężenia padającego światła; służą jako światłoczułe wyłączniki. Gdy na fotokomórkę pada światło, przepływa przez nią prąd, a gdy światło nie pada – prąd w obwodzie nie płynie. Fotokomórki znalazły szerokie zastosowanie w życiu codziennym (włączanie i wyłączanie oświetlenia ulicznego czy latarni morskich).

Praca domowa

Polecenie 2.1

Z przebiegu charakterystyki prądowo-napięciowej fotokomórki wynika, że słaby prąd płynie nawet wtedy, gdy między katodą a anodą nie jest przyłożone żadne napięcie. Dlaczego tak się dzieje?

Polecenie 2.2

Z przebiegu charakterystyki prądowo-napięciowej fotokomórki wynika, że gdy przyłożymy niewielkie napięcie między anodą a katodą, tj. do katody podłączymy biegun dodatni, a do anody – biegun ujemny (oświetlana jest dalej katoda), to prąd jednak płynie. Dlaczego natężenie tego prądu jest mniejsze niż przy całkowitym braku napięcia?

Polecenie 2.3

Przedstawiona charakterystyka prądowo-napięciowa została sporządzona przy stałym natężeniu padającego promieniowania. Jak przebiegałaby ta charakterystyka, jeżeli zwiększylibyśmy dwukrotnie natężenie oświetlenia, czyli liczbę padających fotonów?

Słowniczek

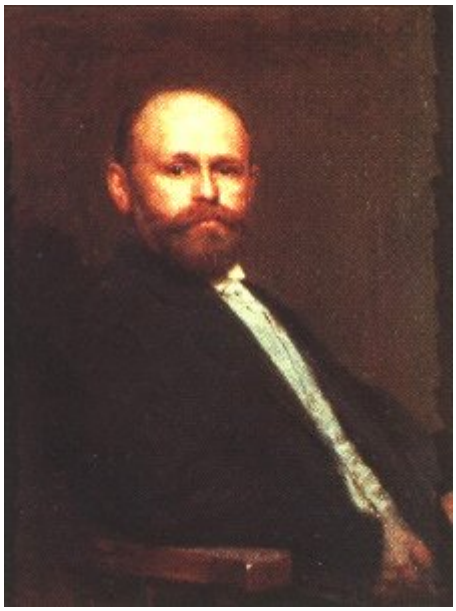
praca wyjścia

– energia, której elektron potrzebuje do pokonania siły elektrostatycznej, aby móc opuścić powierzchnię metalu.

prąd fotoelektryczny

– prąd płynący między katodą a anodą fotokomórki, będący skutkiem zewnętrznegoefektu fotoelektrycznego.

Biogramy



Wilhelm Hallwachs współodkrywca zjawiska fotoelektrycznego

Wilhelm Ludwig Franz Hallwachs

9.07.1859–20.06.1922

Asystent Rudolfa Hertza. W 1888 r. zauważył, że kiedy światło nadfioletowe padac na ujemnie naładowane płyty metalowe, sprawia, że tracą one swój ładunek elektryczny. Zjawisko to nazwano najpierw efektem Hallwachsa, a nieco później zjawiskiem fotoelektrycznym.

Philipp Lenard – laureat Nagrody Nobla z fizyki (1905 r.)

Philipp Lenard

7.06.1862–25.05.1947

Profesor uniwersytetu we Wrocławiu. Za badania promieniowania katodowego otrzymał Nagrodę Nobla. Podczas obserwacji zjawiska fotoelektrycznego zauważył, że prąd emisyjny zależy od częstotliwości padającego światła, a nie od jego natężenia.

Robert Andrews Millikan, laureat Nagrody Nobla (1923 r.), potwierdził doświadczalnie prawa rządzące zjawiskiem fotoelektrycznym (1916 r.)

Robert Andrews Millikan

11.03.1868–19.12.1953

Genialny eksperymentator, profesor uniwersytetu w Chicago. Wyznaczył doświadczalnie ładunek elektryczny (1911 r.), a w wyniku prac nad zewnętrznym zjawiskiem fotoelektrycznym wyliczył stałą Plancka.

Aleksandr Stoletow, rosyjski fizyk, który sformułował pierwsze prawo zjawiska fotoelektrycznego

Aleksandr Grigorjewicz Stoletow

10.08.1839–27.05.1896

Aleksandr Grigorjewicz Stoletow prowadził badania samoistnych wyładowań w gazach (zjawisko Stoletowa, zjawisko fotoefektu). Wykazał, że natężenie prądu fotoelektrycznego zależy od intensywności padającego światła (prawo Stoletowa). Badania tego uczonego stały się podstawą fotometrii i przyczyniły się do skonstruowania pierwszego fotoelementu.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

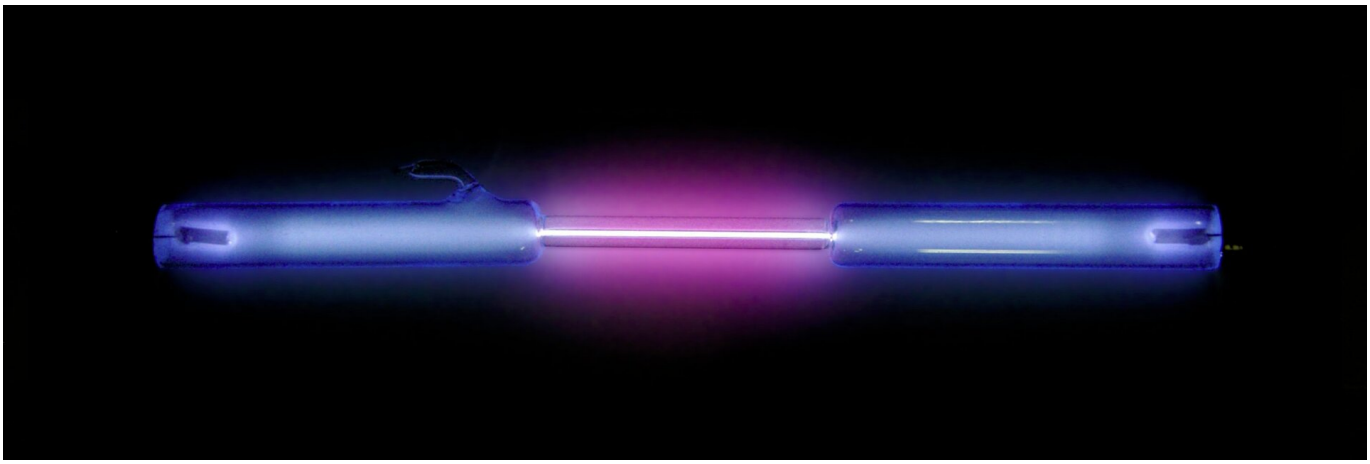
Które informacje są prawdziwe, a które fałszywe?

	Prawda	Fałsz
Efekt fotoelektryczny jest dowodem na falową naturę światła.	◯	◯
Energia elektronów będąca wynikiem fotoefektu nie zależy od natężenia promieniowania.	◯	◯
Elektron musi wykonać pewną pracę przeciwko oddziaływaniom elektrostatycznym, by móc opuścić powierzchnię metalu.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Budowa atomu wodoru. Stan podstawowy i stany wzbudzone

Pod koniec XIX wieku i na początku XX wiedza na temat najmniejszej – jak wtedy uważano – porcji materii, czyli atomu, była raczej skromna. Nie pozwalała na wyjaśnienie zjawiska widma promieniowania atomów (nawet tak prostego jak atom wodoru). Doświadczenie Rutherforda i model atomu stworzony przez Bohra były przełomem w rozwoju fizyki.



Wodór jest najprostszym i najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem we Wszechświecie. W postaci plazmy świeci intensywnie purpurowym blaskiem. Prace nad modelem atomowym wodoru doprowadziły do przełomowych odkryć w dziedzinie budowy materii.

Już potrafisz

- stwierdzić, że światło widzialne to promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali w przedziale 380–780 nm;
- opisać doświadczenia, w których promieniowanie elektromagnetyczne, a zwłaszcza światło widzialne, można traktować jako strumień porcji energii (kwantów, fotonów);
- podać definicję fotonu i obliczyć jego energię;
- opisać widmo liniowe wodoru – cztery linie widoczne w świetle widzialnym oraz ich kolory.

Nauczysz się

- opisywać budowę atomu składającego się z bardzo małego jądra i elektronów krążących wokół niego;
- podawać względne rozmiary jądra w stosunku do atomu;
- opisywać oddziaływanie między jądrem a elektronami jako oddziaływanie elektrostatyczne zgodne z prawem Coulomba;

- zapisywać dwa najważniejsze postulaty Bohra, wiążące wielkości opisujące elektron z możliwościami zmiany energii atomu;
- korzystać z modelu Bohra, aby obliczać wartość energii elektronu w atomie wodoru znajdującym się na określonym (dozwolonym) poziomie energetycznym;
- korzystać z modelu Bohra, aby obliczyć możliwe zmiany energii atomu i długości fal linii widmowych wysyłanych lub pochłanianych przez atom wodoru;
- wyjaśniać, jakie konsekwencje dla budowy materii płyną z modelu atomu Bohra;
- uzasadniać, dlaczego model atomu wodoru stworzony przez Bohra był przełomowy w rozwoju fizyki.

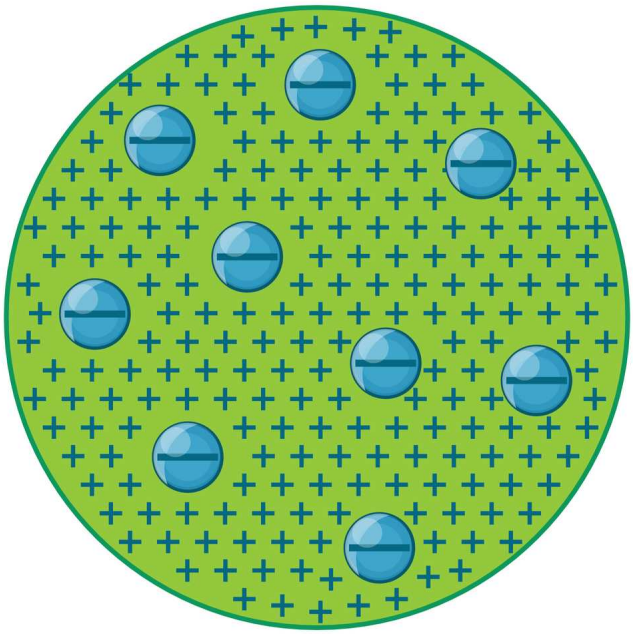
1. Modele budowy atomu

Joseph John Thomson w 1897 r. dokonał przełomowego odkrycia w fizyce i budowie materii. Kiedy badał przewodnictwo gazów, stwierdził, że naelektryzowanie przenoszone jest za pomocą cząsteczek mających pewien ładunek ujemny. Thomsonowi udało się również określić stosunek ich ładunku do masy. Cząsteczką, którą odkrył brytyjski fizyk, był elektron. Thomson dowiódł, że źródłem pochodzenia elektronów są atomy, i tym samym obalił powszechną wówczas ideę o niepodzielności atomu.

Na podstawie późniejszych badań elektron okazał się cząstką niosącą elementarną, czyli podstawową, ilość ładunku elektrycznego.

1.1. Model budowy atomu według Thomsona

J.J. Thomson w 1904 r. zaproponował model budowy atomu, który składał się z różnych elementów, czyli był podzielny.



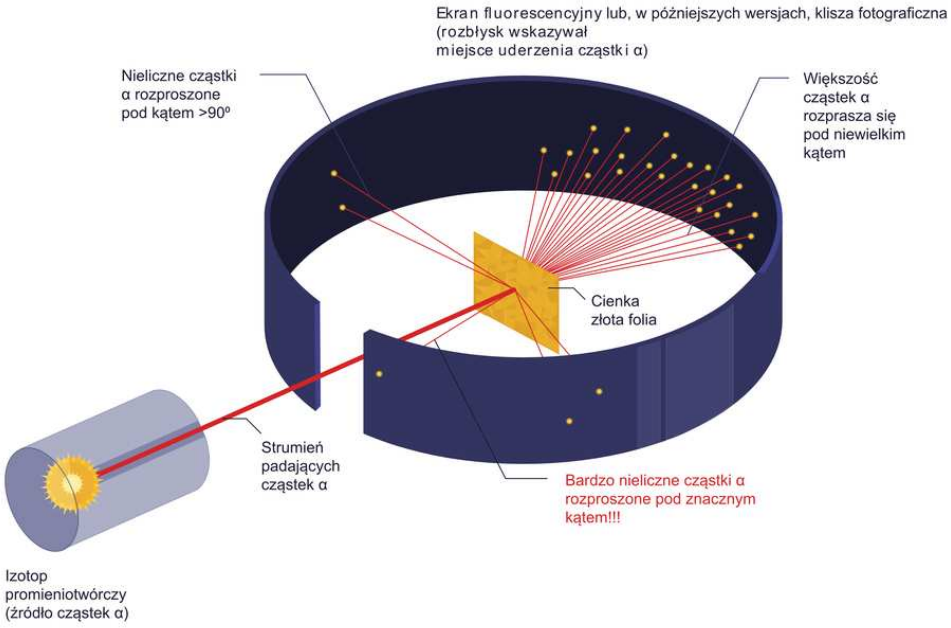
Model atomu Thomsona, zwany modelem „ciasta z rodzynkami” lub „puddingu z rodzynkami”

Model ten nazywano modelem „ciasta z rodzynkami” lub „puddingu z rodzynkami”. Dlaczego? Thomson twierdził, że dodatni ładunek atomu rozłożony jest równomiernie w całym atomie, w którym znajdują się elektrony o ujemnym ładunku (co przypomina rodzynki w cieście). Jednak bardzo szybko model ten został podważony przez Ernesta Rutherforda.

1.2. Model budowy atomu według Rutherforda

Ernest Rutherford i jego dwaj pomocnicy – Hans Geiger oraz Ernest Marsden przeprowadzili eksperyment bombardowania cienkiej złotej folii cząstkami alfa, odkrytymi wcześniej przez Rutherforda. Cząstki te mają budowę identyczną jak jądra atomu helu, ale Ernest Rutherford podczas przeprowadzania doświadczenia jeszcze o tym nic nie wiedział. Sądził, że było to promieniowanie α – strumień cząstek obdarzonych podwójnym ładunkiem dodatnim $2e$, którego źródłem była substancja promieniotwórcza.

Eksperyment Rutherforda był prosty w wykonaniu. Strumień cząstek α padał na cienką złotą folię o grubości 0,00004 cm. Umieszczony wokół ekran rozbłyskiwał, gdy uderzyła w niego cząstka α. Na podstawie obserwacji rozbłysków można było wyznaczyć zmianę kierunku poruszającej się cząstki. W późniejszych badaniach wykorzystywano również inne metale. Podczas badań Geiger i Marsden naliczyli ponad sto tysięcy rozbłysków spowodowanych przez cząstki α.



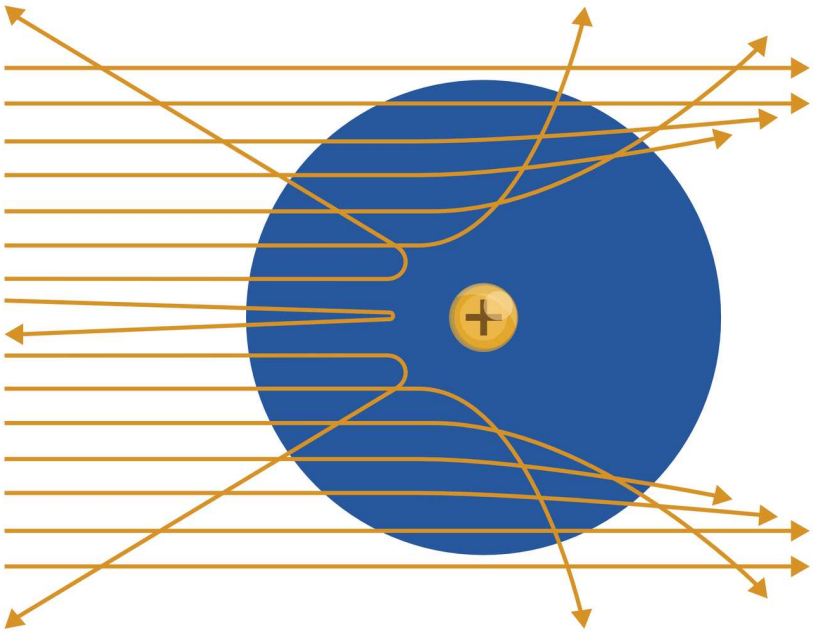
Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Eksperyment Rutherforda – odkrycie jądra atomowego

Ilustracja przedstawia atom wodoru. Duże niebieskie koło po prawej stronie ilustracji. To atom wodoru. W środku koła małe żółte koło ze znakiem plus. Żółte poziome strzałki pokrywają całą ilustrację oraz lewą część atomu. Na ilustracji znajduje się piętnaście strzałek. Strzałki znajdują się w równych odległościach jedna nad drugą. Na prawym końcu każdej strzałki grot. Tylko dwie dolne i dwie górne strzałki są do siebie równoległe. Strzałki ulegają wygięciu. Im bliżej jądra atomu tym bardziej strzałki są odchylone w przeciwną stronę. Czwarta, piąta i szósta strzałka na dole jest skierowana w dół. Strzałki nad jądrem atomu również są wychylone. Strzałki nad jądrem wychylają się w górę. Trzy strzałki przed jądrem, po lewej stronie, są odchylone do tyłu, w lewo.

Opublikowane wyniki pomiarów były zdumiewające. Prawie wszystkie cząstki α przechodziły przez folię bez zmiany kierunku ruchu, co było niemożliwe w modelu Thomsona. Z kolei znaczne odchylenia torów cząstek α, które mogłyby wskazywać na występowanie dużej siły odpychającej cząstki α obserwowano bardzo rzadko. Zdarzało się, że cząstka α odbijała się od folii i biegła w przeciwną stronę. Rutherford miał nawet powiedzieć, że „...to było tak, jakbyś wystrzelił piętnastocalowy pocisk do kawałka bibułki, a ten pocisk odbił się od bibułki i uderzył w ciebie”.

Rutherford przez osiemnaście miesięcy zastanawiał się, co jest przyczyną, że niektóre cząstki promieniowania α doznają tak silnego rozproszenia. Zastanawiało go, jaki jest znak ładunku jądra (Rutherford używał pojęcia „rdzeń”). W końcu fizyk doszedł do wniosku, że muszą one przechodzić w pobliżu pewnych ciał naładowanych dodatnio i mających niezwykle małe rozmiary.



Przyjęcie istnienia jądra atomowego wyjaśniło wyniki eksperymentu Rutherforda

Rutherford przyjął, że w atomie dodatni ładunek jest skupiony w bardzo małej objętości atomu, co sugerowało istnienie jądra atomowego. Elektrony znajdujące się w atomie miały krążyć po zamkniętych orbitach wokół jądra, tak jak planety krążą wokół Słońca. Model ten nazwano planetarnym modelem budowy atomu. Rutherford oszacował, że ciężkie jądro atomowe powinno mieć rozmiar $10^{-15}\mathrm{m}$, a oddziaływanie między jądrem a elektronami – charakter elektryczny (kulombowski). Uznał również, że ładunek elektryczny jądra i elektronów na powłokach są sobie równe co do wartości bezwzględnej, tak że atom jako całość pozostaje obojętny elektrycznie.

Model ten miał jednak wiele niedoskonałości. Stał w sprzeczności z fizyką klasyczną, ponieważ fale elektromognetyczne powinny być emitowane przez krążące elektrony w sposób ciągły, a zatem ich energia kinetyczna musiałaby się zmniejszać i ostatecznie elektrony powinny się zbliżać do jądra, czego nie zaobserwowano. Materia, którą znamy, jest stabilna, a elektrony nie spadają na jądra w atomach.

> **Polecenie 1**
>
> Jakie zjawisko obserwowane w doświadczeniu Rutherforda by nie zaszło, gdyby prawdziwy okazał się model budowy atomu Thomsona? Dlaczego?

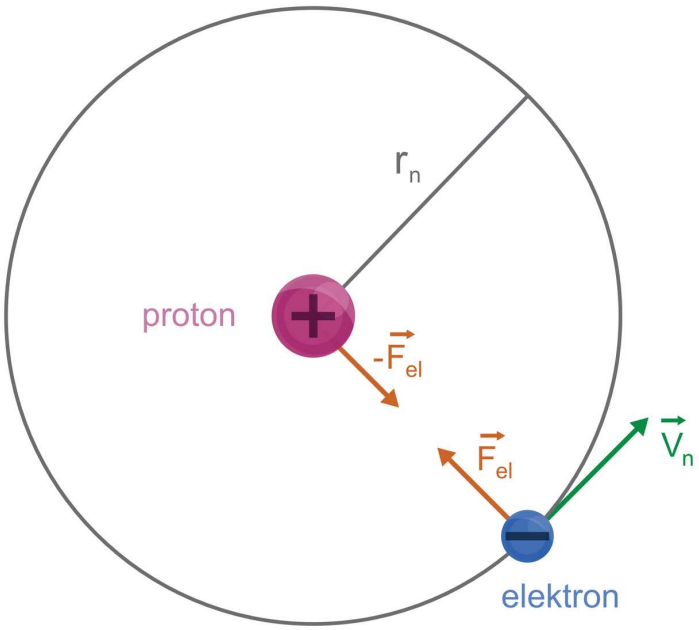
> **Polecenie 2**
>
> Średnica atomu jest rzędu $10^{-10}\ \mathrm{m}$, a średnica jądra to $10^{-15}\ \mathrm{m}$. Oblicz średnicę atomu w modelu, w którym średnica jądra wynosi $1\ \mathrm{cm}$.

2. Model budowy atomu wodoru stworzony przez Bohra (1913 r.)

Duński fizyk Niels Bohr był uczniem Thomsona, ale bardziej cenił sobie współpracę z Ernestem Rutherfordem. Budowa atomu odkryta przez Rutherforda stała się podstawą do rozważań Bohra nad niezrozumiałymi faktami dotyczącymi tego modelu.

- Co sprawia, że atom jest stabilny?
- Co decyduje o rozmiarach atomu?
- Co różni atomy różnych pierwiastków?

Gdy Bohr dowiedział się o wzorze Balmera, zrozumiał, że rozwiązanie tych problemów jest tylko kwestią czasu.



Model budowy atomu wodoru stworzony przez Bohra

Bohr korzystał z modelu atomu Rutherforda i przyjął, że atom wodoru zbudowany jest z dodatnio naładowanego jądra – protonu, wokół którego krąży ujemnie naładowany elektron. Cząstki te przyciągają się wzajemnie siłami zgodnymi z prawem Coulomba. Fizyk rozpatrywał energię całkowitą atomu jako sumę energii kinetycznej elektronu i energii potencjalnej układu proton – elektron. Jednak aby wyjaśnić stabilność atomów oraz kwestię emisji i absorpcji energii przez atom, przyjął dwa postulaty:

1. Elektron krążący wokół jądra nie wysyła energii (jak wynikało to z fizyki klasycznej), jeżeli promień tej orbity i prędkość elektronu spełniają warunek:

$$rmv = n\frac{h}{2\pi}; n = 1, 2, 3 \ldots$$

gdzie:

r – promień orbity, po której krąży elektron;

m – masa elektronu;

v – wartość prędkości liniowej krążącego elektronu;

n – liczba całkowita określająca numer orbity elektronu;

h – stała Plancka $\left(h \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}\right)$.

Założenie to nazywane jest **pierwszym postulatem Bohra**, a takie orbity – orbitami stacjonarnymi.

2. Procesowi przejścia elektronu z jednej orbity na drugą towarzyszy albo wysłanie, albo zaabsorbowanie pewnej ściśle określonej porcji energii (kwantu energii, fotonu).

Bohr założył, że do zmian energii atomu może dojść tylko wtedy, gdy elektron przechodzi z orbity znajdującej się bliżej jądra na orbitę dalszą (lub odwrotnie). Zmiana energii równa jest porcji (kwantowi) energii, która zgodnie ze wzorem Plancka jest równa:

$$\Delta E = E_n - E_k = \mathrm{h}\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

gdzie:

n, k – odpowiednie numery orbit elektronu;

h – stała Plancka;

ν – częstotliwość promieniowania elektromagnetycznego;

λ – długość fali promieniowania elektromagnetycznego;

c – prędkość światła w próżni.

Warunek ten, nazywany **drugim postulatem Bohra**, związany jest z przejściem elektronu z jednej orbity na drugą.

Rozważania i obliczenia uwzględniające siły, jakimi działają na siebie jądro wodoru i elektron, związek energii całkowitej atomu z energią kinetyczną elektronu i energią potencjalną układu proton–elektron w połączeniu z I postulatem Bohra doprowadziły do otrzymania zależności:

1. Promień orbity stacjonarnej można wyrazić wzorem:
   $r = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 k e^2 m} = n^2 r_0$
2. Energię całkowitą atomu wodoru można przedstawić wzorem:
   $E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{4^2 k^2 e^4 m}{2\hbar^2}$

Jak widać, obie zależności zawierają wielkość oznaczoną literą n, która nazywana jest główną liczbą kwantową.

Wartość promienia dla $n = 1$ jest równa $0{,}53 \cdot 10^{-10}$ m; nazywana jest promieniem pierwszej orbity Bohra w atomie wodoru. Promień drugiej orbity jest 4 razy większy, trzeciej – 9 razy większy itd. Obecnie wartości tych promieni mają znaczenie jedynie historyczne – według nowych teorii opisujących atom elektron nie jest już naładowaną ujemnie kulką.

Energia całkowita atomu wodoru (po podstawieniu odpowiednich wartości liczbowych) może być wyrażona jako:

$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot A$, gdzie: $A \cong 2{,}17 \cdot 10^{-18}\mathrm{J}$.

Z tej zależności wynika, że energia atomu jest ujemna. Oznacza to, że atom wodoru nie może się samorzutnie rozpaść na jądro i elektron.

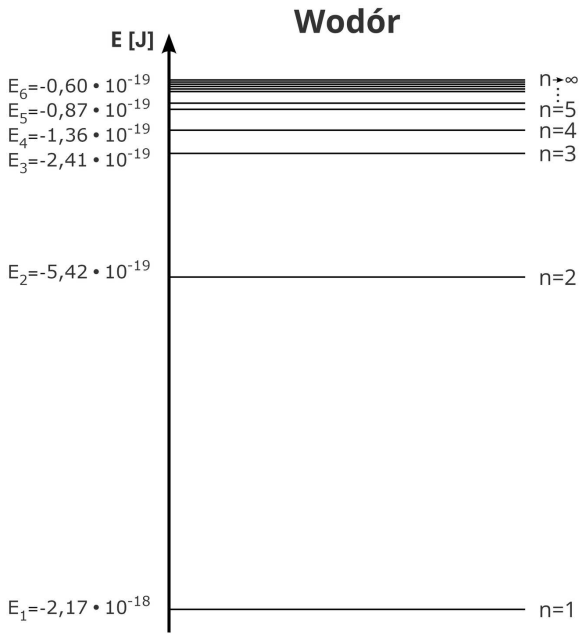
Najmniejszą energię ma atom wodoru w stanie, dla którego $n = 1$. Jest ona równa $-\ 2{,}17 \cdot 10^{-18}\mathrm{J}$. Ten stan nazywamy stanem podstawowym. Wartości energii dla $n = 2, 3, 4, 5, 6$, przedstawione w poniższej tabeli, dotyczą atomów znajdujących się na jednym z wyższych poziomów energetycznych.

Dozwolone wartości stanów energetycznych atomu wodoru

n	E
1	$-2{,}17 \cdot 10^{-18}\mathrm{J}$
2	$-5{,}42 \cdot 10^{-19}\mathrm{J}$
3	$-2{,}41 \cdot 10^{-19}\mathrm{J}$

4	$-1{,}36 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$
5	$-0{,}87 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$
6	$-0{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$

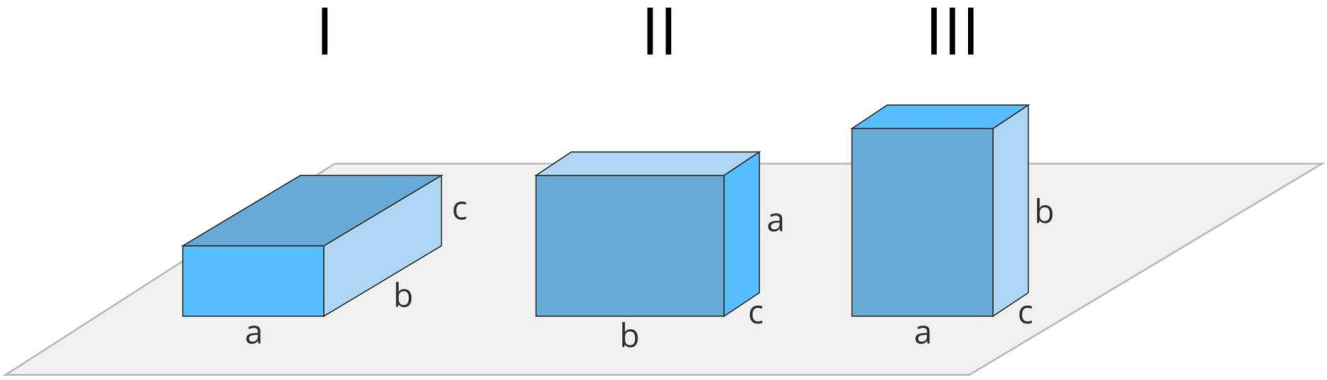
Bardzo często wykonujemy rysunek przedstawiający wartości energii atomu wodoru.



Atom wodoru

Schemat poziomów energetycznych atomu wodoru

Widzimy zatem, że energia atomu nie może być dowolna. Stany, w których elektron znajduje się na wyższych poziomach energetycznych, czyli $n = 2, 3, 4, 5$ itd., nazywamy stanami wzbudzonymi, ponieważ atom wodoru musi wtedy zwiększyć swoją energię do odpowiedniej wartości. Aby to lepiej zrozumieć, można posłużyć się pewną dość prostą analogią do prostopadłościanu o krawędziach a, b i c.



Analogia między stanami energetycznymi atomu wodoru a energią potencjalną prostopadłościanu w różnych położeniach

Prostopadłościan ten można położyć stabilnie tylko na jednej z trzech różnych ścian. Położenie I, w którym prostopadłościan leży na ścianie ab, oznacza, że ma on najniższą energię potencjalną w stosunku do podłoża. Położenie II, w którym prostopadłościan leży na ścianie bc, oznacza większą energię potencjalną, a położenie III, czyli na ścianie ac – największą (przedyskutujcie w klasie, dlaczego tak jest). Oczywiście, aby przenieść prostopadłościan ze stanu I do II albo ze stanu II do III, trzeba wykonać pracę o wartości różnicy energii potencjalnych.

Przykład 1

Oblicz wartość energii, jaką musi pochłonąć atom znajdujący się na poziomie podstawowym, aby przejść na drugi poziom.

Energia na drugim poziomie jest równa (posłużymy się zależnościami ogólnymi):

$E_2 = -\frac{1}{2^2} \cdot A$, a energia na pierwszym poziomie: $E_1 = -\frac{1}{1^2} \cdot A$. Z obliczeń wynika, że atom musi zwiększyć swoją energię o $\Delta E = E_2 - E_1 = 1{,}63 \cdot 10^{-18}$ J.

Przykład 2

Oblicz wartość energii, jaką musi pochłonąć atom wodoru, aby przejść z drugiego poziomu ($n = 2$) na trzeci poziom ($n = 3$).

Energia na trzecim poziomie wynosi: $E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot A$, a energia na drugim poziomie: $E_k = -\frac{1}{k^2} \cdot A$.

$\Delta E = E_n - E_k = -\frac{1}{n^2} \cdot A - \left(-\frac{1}{k^2} \cdot A\right) = A\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)$

Po podstawieniu wartości $A, k = 2, n = 3$, otrzymamy
$\Delta E = E_3 - E_2 = -\frac{1}{3^2} \cdot A - \left(-\frac{1}{2^2} \cdot A\right) = 2{,}17 \cdot 10^{-18} \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9}\right) = 3{,}01 \cdot 10^{-19} J$

Z powyższych rozważań wynika, że pochłonięcie kwantu promieniowania przez atom może skutkować przeskokiem elektronu na wyższy poziom energetyczny (atom wodoru

przechodzi w stan wzbudzony) tylko wówczas, gdy energia promieniowania jest równa **dokładnie** różnicy między wybranymi stanami energetycznymi. Natomiast gdy elektron powraca na niższy poziom energetyczny, musi wypromieniować energię w postaci promieniowania elektromagnetycznego o wartości równej dokładnie różnicy energii między poziomami energetycznymi. Możliwe są sytuacje, w których atom pochłania taką energię, że przechodzi np. z pierwszego poziomu od razu na czwarty. W stanie wzbudzonym atom „przebywa" krótko – przeciętnie 10^{-8} s (jedna stumilionowa część sekundy). Potem pozbywa się nadmiaru energii i przechodzi na jeden z poziomów o niższej energii – może przeskoczyć od razu na pierwszy poziom, ale często jest to przejście stopniowe (etapowe) najpierw na trzeci poziom, potem na drugi itd. Podczas każdego przejścia atom wysyła kwant energii, co oznacza emisję promieniowania o ściśle określonej długości fali (barwie).

Warto wspomnieć o tym, w jaki sposób możemy pobudzić atomy gazu do świecenia. Odbywa się to w ten sposób, że podczas zderzenia atomów (jak wiemy, poruszają się one tym szybciej, im wyższa jest temperatura) następuje pochłonięcie energii kinetycznej, w wyniku czego atom przechodzi z poziomu podstawowego na jeden z poziomów wzbudzonych. Właśnie wtedy mówimy o wzbudzeniu termicznym. Potem następują procesy przechodzenia na niższe poziomy energetyczne i wysyłanie jednego lub kilku kwantów promieniowania.

Model Bohra sprawdzał się dobrze w trakcie badań atomu wodoru. Zgodność obliczeń z wynikami pomiarów była w pełni satysfakcjonująca. Jednak uogólnienie tego modelu na atomy innych pierwiastków niosło wiele problemów. Wynikało to np. z tego, że w atomie wodoru rozpatrujemy oddziaływania jednego protonu z jednym elektronem. W atomie helu mamy już dwa ładunki elementarne w jądrze i dwa elektrony. Ponadto nie tylko jądro działa na każdy z elektronów, lecz także one oddziałują ze sobą. Jeżeli jednak będziemy analizować atom zjonizowanego helu, w którym wokół jądra krąży tylko jeden elektron, to opis okaże się znacznie prostszy, a jego widmo – bardzo podobne do widma wodoru. Oczywiście, długości emitowanych i absorbowanych fal są inne – zawsze wiadomo, z którym pierwiastkiem mamy do czynienia. Łatwo można opisać również atomy wodoropodobne, takie jak sód, w których na ostatniej orbicie krąży jeden elektron.

Oddziaływania w atomach wieloelektronowych są bardzo złożone i, jak się później okazało, nie tylko energia jest skwantowana – inne wielkości fizyczne także mogą przyjmować tylko ściśle określoną wartość. Należą do nich moment pędu, orbitalny moment magnetyczny i tzw. moment spinowy (będziecie mogli je poznać w dalszym toku nauki). Bohr wprowadził swoje postulaty, aby uzyskać zgodność z obserwacjami. W następnych latach zrozumiano, dlaczego prawdziwy jest pierwszy postulat Bohra, ale wtedy już nie traktowano elektronu jako kulki mającej ładunek elektryczny. Te dwie teorie (potwierdzone doświadczalnie) –

model planetarny Rutherforda i model Bohra – stały się podstawą zrozumienia procesów w świecie atomów. Powstała mechanika kwantowa, pozwalająca wyjaśnić atomową budowę ciał stałych, co z kolei doprowadziło do poznania ich wielu niezwykłych właściwości. Odkrycie półprzewodników sprawiło, że wiele nowoczesnych urządzeń zostało zminiaturyzowanych; teraz urządzenia, które kiedyś zajmowałyby ogromne pomieszczenia, mieszczą się w kieszeni. Na płytce wielkości paznokcia możemy mieć bibliotekę tysięcy audiobooków lub e-booków, zapisać film, nawet gdyby trwał on kilkadziesiąt godzin, lub przechować kilkaset godzin muzyki.

> **Polecenie 3**
>
> Pomiędzy np. piątym poziomem energetycznym a ostatnim, w którym energia atomu jest równa zero, jest nieskończenie wiele poziomów energetycznych. Uzasadnij, dlaczego nie oznacza to, że energia atomu wodoru może przyjmować dowolną wartość.

> **Polecenie 4**
>
> W drugim przykładzie obliczyłeś, że przejście atomu z poziomu drugiego na trzeci wymaga pochłonięcia energii o wartości około $\Delta E = 3{,}01 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$. Oblicz długość fali promieniowania, której kwant został pochłonięty. Jaka jest barwa światła o tej długości fali?

Podsumowanie

- Model atomu wodoru stworzony przez Bohra powstał na podstawie faktów doświadczalnych, które doprowadziły do wprowadzenia pojęć nieznanych dotąd fizyce klasycznej:
    - Opis promieniowania ciała doskonale czarnego i fotoefekt:
        - pojęcie kwantu energii promieniowania;
        - pojęcie fotonu;
        - promieniowanie elektromagnetyczne jako strumień cząstek.
    - Liniowe widmo atomu wodoru:
        - widmo atomu wodoru w opisie fizyki klasycznej powinno mieć charakter ciągły;
        - seria widmowa Balmera.
    - Model atomu Thomsona:
        - atom ma strukturę, w skład której wchodzą elektrony.

    - Model atomu Rutherforda:
        - atom składa się z ciężkiego jądra i elektronów krążących wokół niego;
        - atom jest obojętny elektrycznie;
        - za oddziaływania między jądrem atomu, a jego powłoką odpowiada siła Coulomba;
        - znane są rozmiary atomu i jego jądra.
- Teoria atomu wodoru stworzona przez Bohra opierała się na dwóch postulatach:
    - elektron znajdujący się na orbicie stacjonarnej (dozwolonej) nie emituje fali elektromagnetycznej;
    - elektron emituje lub absorbuje energię w postaci kwantu promieniowania ($h\nu$) podczas przejścia między jedną a drugą orbitą stacjonarną.
- Za pomocą modelu Bohra można wyjaśnić układ linii widmowych atomu wodoru.
- Model atomu Bohra pozwala opisać precyzyjnie budowę jedynie atomu wodoru; zawodzi w odniesieniu do atomów mających bardziej złożone jądro atomowe, wokół którego krąży więcej elektronów.
- Dzięki modelowi Bohra stworzono podstawy nowej gałęzi fizyki współczesnej – mechaniki kwantowej.

Praca domowa

Polecenie 5.1

Na schemacie układu poziomów energetycznych atomu wodoru narysuj przejście z poziomu trzeciego na drugi, z czwartego na drugi i z piątego na drugi. Oblicz wartości energii emitowanej za każdym razem oraz długości fal otrzymanego promieniowania. Porównaj wyniki obliczeń z długościami linii widmowych wodoru.

Polecenie 5.2

Oblicz długości fali promieniowania wysyłanego przez atom wodoru podczas przejścia z drugiego poziomu na podstawowy i z czwartego poziomu na trzeci. W jakich obszarach promieniowania elektromagnetycznego (radiowe, podczerwień, widzialne, nadfiolet) znajduje się to promieniowanie?

Uwaga: poniższe zadania warto przedyskutować również podczas lekcji.

Polecenie 5.3

* W atmosferze gwiazdy, podobnie jak w każdym gazie, atomy poruszają się ruchem chaotycznym, zderzając się wzajemnie. W gazie o niskiej temperaturze większość atomów znajduje się zatem na poziomie podstawowym, ale w wyższych temperaturach energia zderzeń jest na tyle duża, że przeciętny atom znajduje się na drugim poziomie (jest tak w temperaturze rzędu 9 000–11 000 K). Atom wodoru znajdujący się w tym stanie pochłania (absorbuje) fotony biegnące z wnętrza gwiazdy i przechodzi na jeden z wyższych poziomów energetycznych. W jakim obszarze widma (podczerwień, światło widzialne, ultrafiolet) odbywa się ta absorpcja? Odpowiedź uzasadnij (skorzystaj z wyników obliczeń w poprzednim poleceniu).

Polecenie 5.4

* Każdy atom lub jon emituje lub pochłania promieniowanie o innych długościach fali. Ma też charakterystyczne widmo pierwiastka. Kiedy astronomowie badali widma dwóch gwiazd, stwierdzili, że w pierwszej gwieździe dominują linie pierwiastków w stanie neutralnym, a w drugiej – głównie pierwiastków zjonizowanych. Jaki wniosek mogą sformułować astronomowie na tej podstawie? Uzasadnij odpowiedź.

Polecenie 5.5

* Kiedy badano widmo Słońca, wykryto obecność pierwiastka nieznanego wtedy na Ziemi. Był to hel. Kilkadziesiąt lat później, podczas badań widma korony słonecznej (atmosfery Słońca, którą widać podczas jego całkowitych zaćmień), stwierdzono ponownie obecność linii nieznanych pierwiastków. Jeden z nich nazwano „koronium”. Po niedługim czasie okazało się, że są to linie pierwiastków znanych na Ziemi, ale wielokrotnie zjonizowanych (np. żelazo pozbawione kilkunastu elektronów). Świadczyło to o bardzo wysokiej temperaturze. Dlaczego?

Uwaga!

Temperatura korony słonecznej wynosi od miliona do dwóch milionów kelwinów i jest znacznie wyższa od temperatury powierzchni Słońca.

Zadania podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Wybierz prawidłową ilość sposobów jakimi elektron może przejść z orbity 3, na poziom podstawowy.

Wzbudzony atom wodoru znajdujący się na trzecim poziomie energetycznym może przejść na poziom podstawowy na [ ] sposób/sposoby.

trzy | dwa | cztery | jeden

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajeski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Które informacje są prawdziwe, a które fałszywe?

	Prawda	Fałsz
Zgodnie z fizyką klasyczną atom wodoru powinien emitować widmo liniowe.	◯	◯
Zgodnie z fizyką klasyczną w modelu Rutherforda elektron powinien spaść na jądro.	◯	◯
Atom znajdujący się w stanie wzbudzonym, wracając do stanu podstawowego, może wyemitować więcej niż jeden foton, jeżeli nie znajduje się na pierwszym poziomie wzbudzonym.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <Dariusz.Kajeski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Słowniczek

cząstka alfa

– jądro atomu helu.

elektron

– trwała cząstka elementarna o ujemnym ładunku elektrycznym wynoszącym $1{,}602 \cdot 10^{-19}\mathrm{C}$.

model budowy atomu Bohra

– model atomu wodoru zaproponowany w 1913 r. przez Nielsa Bohra. Zgodnie z jego koncepcją wokół dodatnio naładowanego jądra krąży elektron, który porusza się po zamkniętej orbicie stacjonarnej. Atom w modelu Bohra może przyjmować jedynie pewne ściśle określone (dyskretne) wartości energii; również elektron może krążyć jedynie po orbitach o ustalonym promieniu. W celu zmiany stanu energetycznego atomu należy dostarczyć mu ściśle określoną porcję (kwant) energii. Przejściu atomu do stanu o niższej energii towarzyszy emisja kwantu promieniowania elektromagnetycznego o ściśle określonej długości fali.

planetarny model budowy atomu

– model budowy atomu zaproponowany przez Rutherforda. Według tej koncepcji elektrony krążą wokół małego jądra naładowanego dodatnio.

stan podstawowy

– stan energetyczny atomu o najniższej możliwej energii.

stan wzbudzony

– stan energetyczny atomu wyższy niż podstawowy, tj. taki, w którym elektron przeszedł na wyższą orbitę i zyskał energię dzięki absorpcji promieniowania albo zderzenia z innym atomem.

Biogramy

Niels Bohr, jego model budowy atomu legł u podstaw nowego działu fizyki – mechaniki kwantowej

Niels Bohr

7.10.1885–18.11.1962

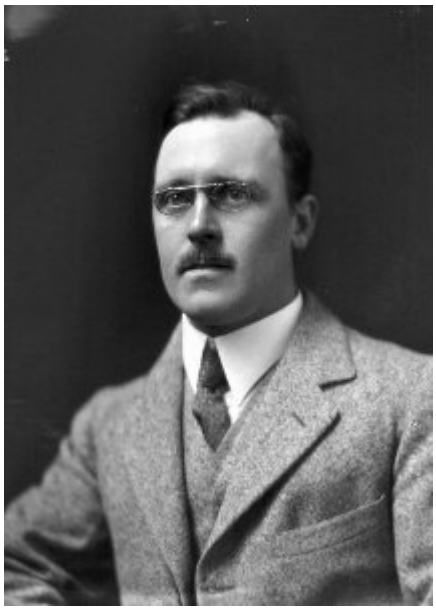
Duński fizyk, współtwórca mechaniki kwantowej. Brał dział w budowie pierwszej bomby atomowej w ramach projektu „Manhattan".

Johannes Geiger, projektant licznika promieniowania (licznik Geigera)

Johannes Geiger

30.09.1882–24.09.1945

Niemiecki fizyk, który wspólnie z Walterem Müllerem opracował licznik promieniowania, nazwany na ich cześć licznikiem Geigera-Müllera.

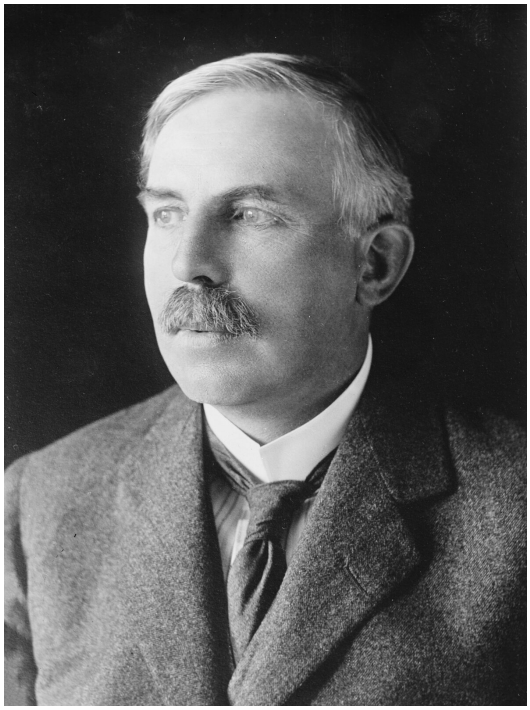


Ernest Marsden, współtwórca radaru

Ernest Marsden

19.02.1889–15.12.1970

Jeden z czołowych nowozelandzkich fizyków. W czasie II wojny światowej prowadził prace nad radarem.



Ernest Rutherford, twórca jądrowo-planetarnego modelu budowy atomu

Ernest Rutherford

30.08.1871–19.10.1937

Nowozelandzki fizyk. Badał pierwiastki promieniotwórcze, odkrył, że źródłem promieniowania jest spontaniczny rozpad pierwiastków, za co otrzymał Nagrodę Nobla.

Joseph John Thomson, laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki, odkrywca elektronu

Joseph John Thomson

18.12.1856–30.08.1940

Angielski fizyk, który otrzymał Nagrodę Nobla za badanie przewodnictwa elektrycznego gazów, co doprowadziło do odkrycia elektronu.

Podsumowanie wiadomości z fizyki atomu

W tym dziale opisaliśmy zjawiska związane z wysyłaniem i pochłanianiem promieniowania przez ciała stałe i gazy: promieniowanie cieplne, widma ciągłe, liniowe, emisyjne i absorpcyjne oraz zjawisko fotoelektryczne. Przedstawiliśmy wpływ badań nad tymi zjawiskami na rozwój poglądów dotyczących budowy atomu i natury promieniowania: modele atomu wodoru zaproponowane przez Thomsona, Rutherforda i Bohra, a także naturę falowo-korpuskularną promieniowania elektromagnetycznego.

Okresem największych odkryć w dziedzinie wiedzy o atomie była niewątpliwie pierwsza połowa XX wieku i sami współcześni nazwali ten okres „wiekiem atomu". Znalazło to wyraz w monumentalnym modelu kryształu żelaza, budynku zwanym Atomium wybudowanym z okazji Wystawy Światowej z 1958 roku w Brukseli.

1. Promieniowanie cieplne

1. Ciała znajdujące się w temperaturze wyższej od zera bezwzględnego są źródłem promieniowania elektromagnetycznego, nazywanego **promieniowaniem termicznym (cieplnym).**
2. Za emisję promieniowania termicznego (cieplnego) odpowiedzialna jest energia ruchu cieplnego atomów i cząsteczek w danym ciele.

3. Ciała o temperaturach wyższych niż $0\ \mathrm{K}$ ($-273{,}15\ ^\circ\mathrm{C}$) mogą zarówno emitować, jak i absorbować (pochłaniać) padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne.
4. Im więcej dane ciało absorbuje energii, tym więcej jej emituje.
5. Stosunek energii pochłanianej do energii wysyłanej nie zależy od natury ciała – dla wszystkich ciał jest taką samą funkcją temperatury i długości fali promoieniowania elektromagnetycznego.
6. Zdolność ciał do emisji i absorpcji promieniowania o określonej energii pozwala na wytłumaczenie istnienia barw. Barwa ciała zależy m.in. od jego wpływu na promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie światła widzialnego: pochłaniania go, rozpraszania, odbijania, interferencji oraz własności emisyjnych badanego ciała. Jeśli na ciało pada światło np. niebieskie, które jest całkowicie przez nie pochłaniane, to ciało widziane jest jako czarne.

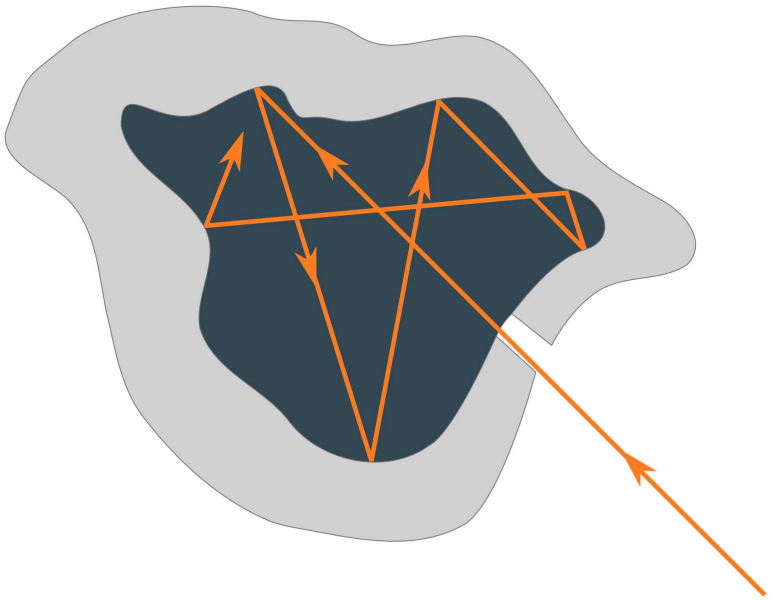
Źródło: Caleb Kimbrough (https://www.flickr.com/), licencja: CC BY 2.0.

2. Ciało doskonale czarne

1. **Ciało doskonale czarne** to takie ciało, które pochłania całkowicie padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne – niezależnie od długości fali i temperatury, w której ten proces zachodzi.
2. Energia promieniowania cieplnego ciała zależy od temperatury – wzrostowi temperatury odpowiada wzrost całkowitej energii wypromieniowywanej przez ciało.

Zjawisku temu towarzyszy także zmiana barwy promieniowania wysyłanego przez ciało.

3. Całkowitą energię emitowaną przez ciało mające temperaturę T obliczamy ze wzoru Stefana-Boltzmanna: $\mathrm{E} = \sigma \cdot T^4$, gdzie σ to stała, której wartość wynosi $5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}^{-4}}$.
4. Rozgrzane ciała wysyłają energię w postaci fal elektromagnetycznych o różnych długościach, którym odpowiadają różne energie.
5. Wraz ze wzrostem temperatury długość fali, której odpowiada największa wypromieniowywana energia, przesuwa się w stronę fal krótkich.
6. Długość fali, której odpowiada maksimum natężenia promieniowania cieplnego można obliczyć za pomocą prawa przesunięć Wiena, wyrażonego wzorem: $\lambda_{\mathrm{max}} = \frac{b}{T}$, gdzie:
   b – stała Wiena; $b = 2{,}897 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{K}$;
   T – temperatura w skali bezwzględnej.



Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

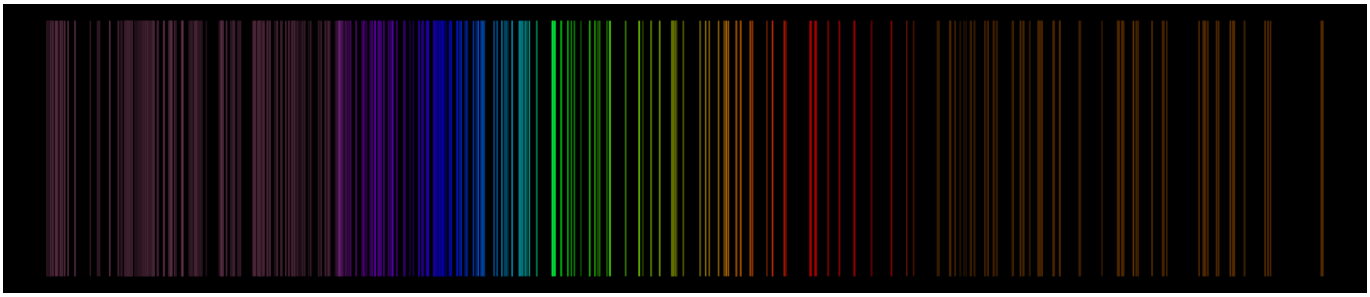
3. Widmo ciągłe

1. **Widmem** nazywamy obraz promieniowania składającego się z różnych długości fal (barw). Zamiast długości fal można podać odpowiadające im częstotliwości lub energie.
2. Przyrządy służące do obrazowania i badania widm to spektroskopy oraz spektrometry.

3. Widmo promieniowania cieplnego ciał stałych i cieczy ma charakter ciągły – w takim widmie występują wszystkie długości fal i nie ma między nimi przerw; przykładem widma ciągłego jest tęcza.

Źródło: Pudelek (https://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY-SA 3.0.

4. Widmo liniowe

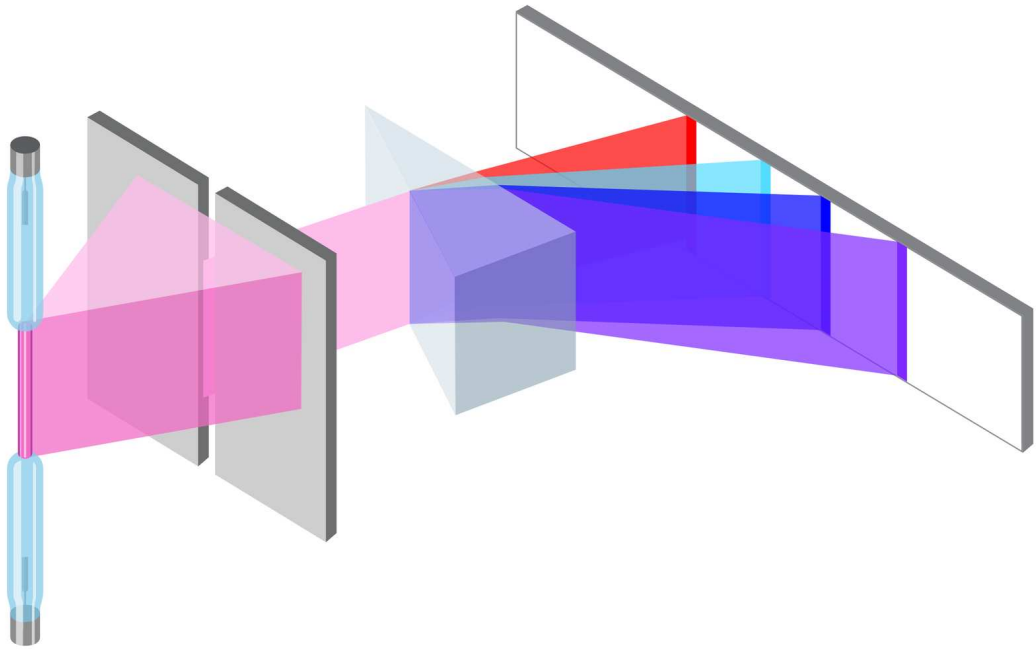


Źródło: Christopher Thomas (https://commons.wikimedia.org), edycja: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY-SA 1.0.

1. Widmo, które składa się z wielu oddzielnych barwnych linii, nazywamy widmem liniowym.
2. Widmo liniowe jest typowe dla gazów składających się z atomów lub cząsteczek. Przykładem mogą być: wodór, hel, neon, argon oraz pary rtęci lub sodu.
3. Wszystkie pierwiastki w stanie gazowym mają charakterystyczne widmo liniowe.

5. Widmo emisyjne

Widma emisyjne to widma promieniowania wysyłanego (emitowanego) przez ciała pobudzone do świecenia. Gorące gazy wysyłają promieniowanie emisyjne liniowe, a gorące ciała stałe – widmo emisyjne ciągłe. Gazy, których cząsteczki mają złożoną, wieloatomową budowę, wysyłają widma emisyjne pasmowe.

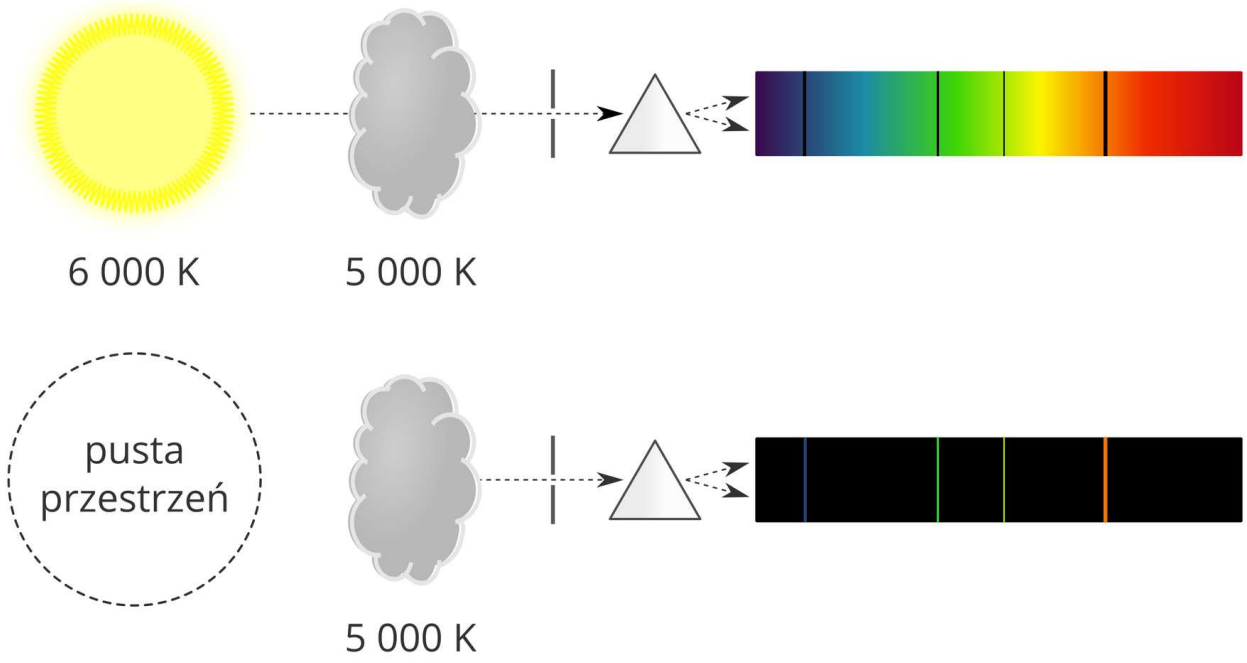


Źródło: Anita Mowczan, licencja: CC BY 3.0.

6. Widmo absorpcyjne

1. Widmo absorpcyjne powstaje w wyniku pochłaniania (absorpcji) promieniowania elektromagnetycznego przez ciało.
2. Jeżeli promieniowanie mające widmo ciągłe przechodzi przez chłodny gaz, to następuje absorpcja energii fal elektromagnetycznych dokładnie o tych długościach, które może emitować dany atom.
3. Na obrazie widma absorpcyjnego widoczne są ciemnie prążki – znajdują się one w miejscach długości fal, które zostały pochłonięte przez dany gaz.

4. Takie ciemne linie w widmie światła słonecznego pierwszy zarejestrował Fraunhofer. Nazywamy je liniami Fraunhofera.

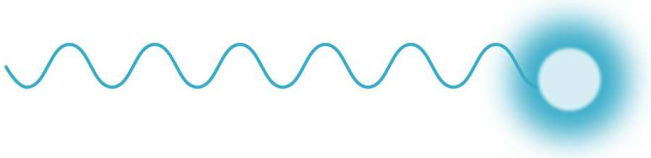


Źródło: Krzysztof Jaworski, OpenClipartVectors (https://pixabay.com), licencja: CC BY 3.0.

7. Foton

Foton, zwany także kwantem energii, jest porcją energii promieniowania elektromagnetycznego. Możemy traktować go jak cząstkę, która ma następujące cechy:

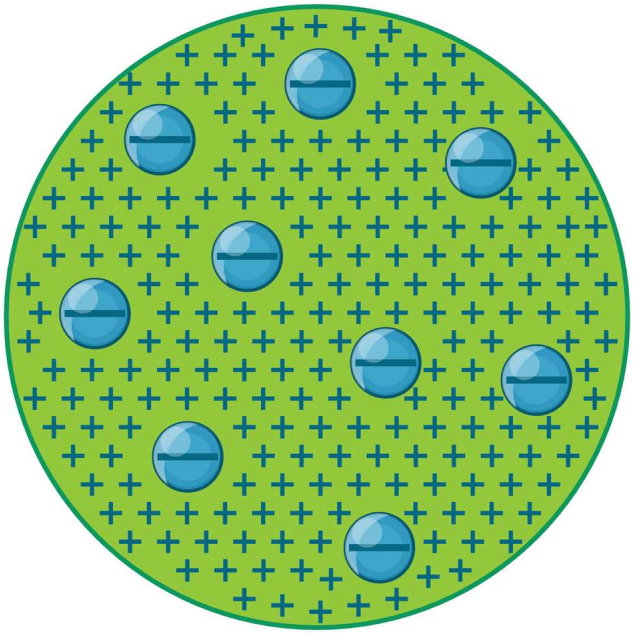
1. Nie ma masy spoczynkowej.
2. Nie ma ładunku elektrycznego.
3. Ma energię, którą wyraża się wzorem: $E = h \cdot \nu$ lub $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$,
   gdzie:
   h – uniwersalna stała, nazwana stałą Plancka; $h \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$;
   ν (grecka litera „ni”) [Hz] – częstotliwość promieniowania emitowanego lub pochłanianego przez ciało czarne;
   c – prędkość światła;
   λ – długość fali promieniowania.
4. Foton odgrywa istotną rolę w każdym procesie promienistym i w oddziaływaniach elektromagnetycznych.



Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

8. Atom – model Thomsona

1. W 1897 r. Thomson odkrył elektron.
2. Elektron jest składnikiem wszystkich atomów.
3. Atom posiada strukturę, w której skład wchodzą elektrony; strukturę tę nazwano modelem „ciasta z rodzynkami”.



Źródło: Anita Mowczan, Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

9. Atom – model Rutherforda

1. Atom składa się z jądra i elektronów krążących wokół niego.

2. Atom jest obojętny elektrycznie (jądro ma ładunek dodatni, a elektrony – ujemny).
3. Za oddziaływania między jądrem atomu a jego elektronami odpowiada siła Coulomba.
4. Rozmiary jądra są 100 tysięcy razy mniejsze od rozmiarów atomu.

10. Atom – model Bohra

Bohr stworzył model atomu na podstawie modelu Rutherforda. Sformułował dwa postulaty:

1. Elektron może krążyć wokół jądra tylko na wybranych orbitach, **zwanych orbitami stacjonarnymi**, dla których spełniony jest warunek:
   $rmv = n\frac{h}{2\pi}, n = 1, 2, 3, \ldots$
   gdzie:
   r – promień orbity, po której krąży elektron;
   m – masa elektronu;
   v – wartość prędkości liniowej krążącego elektronu;
   n – **liczba całkowita określająca numer orbity elektronu** (główna liczba kwantowa);
   h – stała Plancka ($h \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34}\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$).
   Energia elektronu na orbicie stacjonarnej jest stała.
2. Zmiana energii atomu następuje tylko podczas przejścia elektronu między orbitami stacjonarnymi – przeskokowi z orbity wyższej na niższą odpowiada emisja energii, a przejście z powłoki niższej na wyższą spowodowane jest pochłonięciem energii. Energia jest wysyłana i pochłaniana przez atom w formie porcji (kwantów) energii o wartości wynikającej ze wzoru:
   $\Delta E = E_n - E_k$,
   gdzie: n , k – numery orbit, między którymi następuje przeskok elektronu.

Z założeń tego modelu wynika, że:

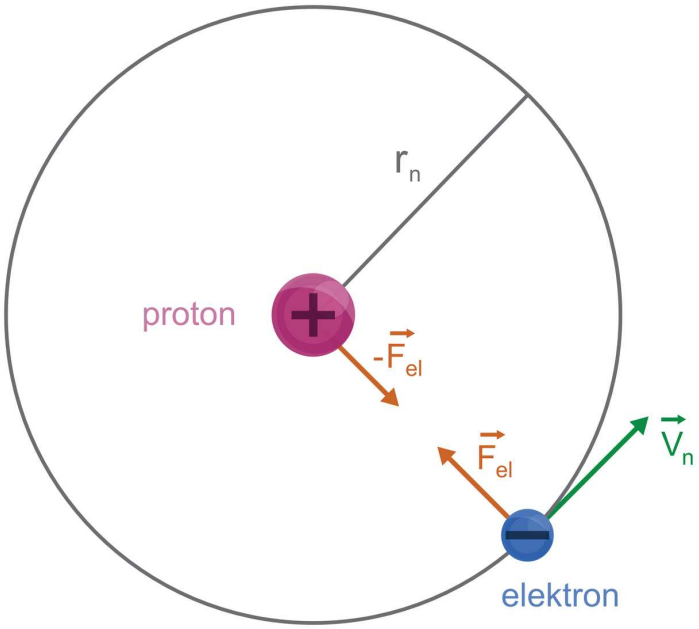
1. Atom nie emituje promieniowania, gdy znajduje się w stanie stacjonarnym. Każdemu stanowi stacjonarnemu atomu odpowiada ściśle określona wartość energii E_n

   , którą można wyznaczyć ze wzoru:
   $E_\mathrm{n} = -\frac{1}{n^2} \cdot A$,
   gdzie: $\mathrm{A} = 2{,}17 \cdot 10^{-18}\mathrm{J}n$ – główna liczba kwantowa ($n = 1, 2, 3, \ldots$).
   Wartości energii atomu (E_1, E_2,E_3 ...) noszą nazwę tzw. poziomów energetycznych atomu.
2. Atom może zmienić poziom energetyczny jedynie w wyniku emisji lub pochłaniania kwantów energii promieniowania. Wynika to z drugiego postulatu Bohra:
   $\Delta E = E_n - E_k$.
   Millikan w 1916 r. udowodnił, że zmianę energii stanu stacjonarnego w odniesieniu do

atomu można wyrazić wzorem:
$\Delta E = E_n - E_k = E_{\text{fotonu}} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.
Oznacza to, że energia kwantu energii (fotonu) pochłoniętego lub wyemitowanego przez atom jest proporcjonalna do częstotliwości padającego lub emitowanego promieniowania.

3. Promień orbity stacjonarnej jest równy

: $r = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 k e^2 m} = n^2 r_0$.
Wartość promienia dla $n = 1$ jest równa $r_0 = 0{,}53 \cdot 10^{-10}$ m; nazywa się ją promieniem pierwszej orbity Bohra w atomie wodoru.
4. Atom wodoru najmniejszą energię ma w stanie, dla którego $n = 1$. Jest ona równa $-2{,}17 \cdot 10^{-18}$J. Ten stan nazywamy **stanem podstawowym**. Stany o $n = 2, 3, 4, 5 \ldots$ nazywamy **stanami wzbudzonymi**.

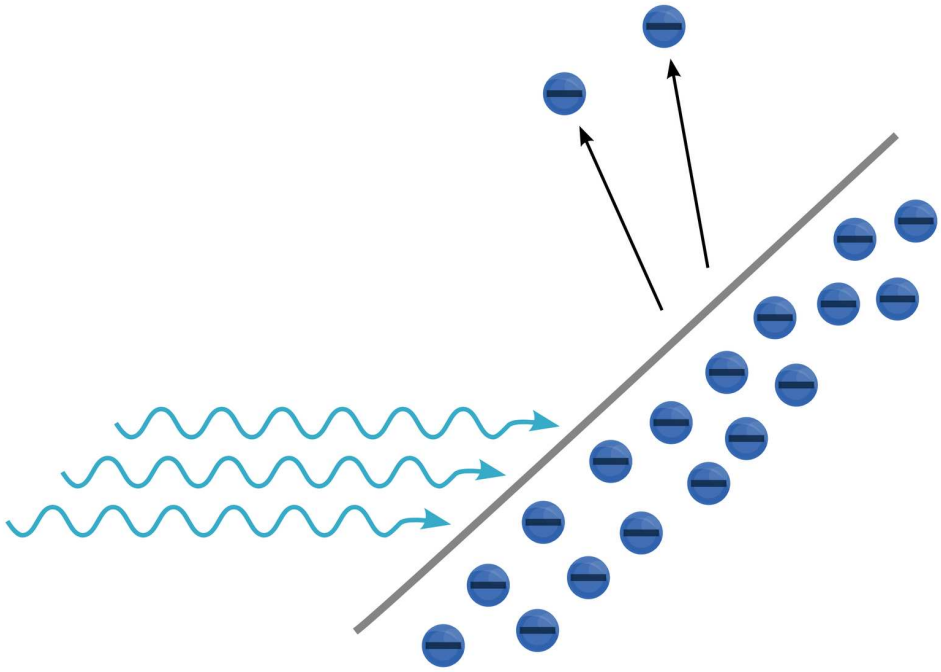


Źródło: Anita Mowczan, licencja: CC BY 3.0.

11. Fotoefekt

1. Fotoefekt, czyli zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne (fotoemisja), polega na emisji elektronów z powierzchni metalu pod wpływem światła (promieniowania) padającego na tę powierzchnię. Elektrony wybite światłem nazywamy fotoelektronami.
2. Cechy zewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego to:

    1. Dla każdego metalu istnieje graniczna częstotliwość (długość fali) promieniowania, poniżej (a w przypadku długości fali – powyżej) której zjawisko w ogóle nie zachodzi.
    2. Energia kinetyczna emitowanych elektronów nie zależy od natężenia promieniowania, a **jedynie od długości jego fali**.
    3. Liczba fotoelektronów jest proporcjonalna do natężenia padającego promieniowania.
3. Zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne jest dowodem na to, że falę elektromagnetyczną można traktować jako strumień cząstek – fotonów.
4. Fotoefekt jest zjawiskiem kwantowym; stał się podstawą kwantowej teorii światła.



Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

12. Równanie Einsteina-Millikana

$$h \bullet v = W + E_{kin}$$

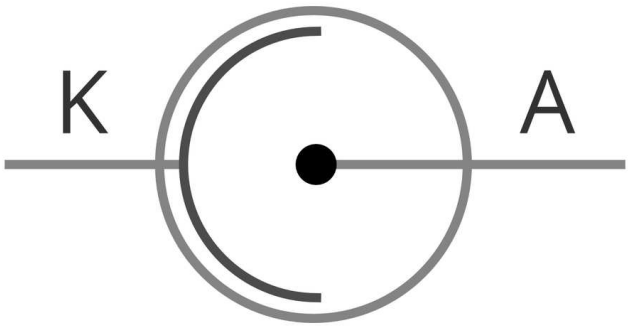
Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

1. Fizyka klasyczna nie potrafiła wyjaśnić zjawiska fotoelektrycznego (odkryto natomiast kwantowe cechy promieniowania).

2. W 1905 r. Albert Einstein wyjaśnił przebieg zjawiska fotoelektrycznego dzięki założeniu, że **światło jest strumieniem fotonów, a jeden foton padający na metal może przekazać energię jednemu elektronowi w metalu.**
3. Zasada zachowania energii w oddziaływaniu foton – elektron została zapisana w równaniu, zwanym równaniem Einsteina–Millikana:
   $h \cdot \nu = W + E_{\text{kin}}$
   energia fotonu = praca wyjścia + energia kinetyczna fotoelektronu.
4. Praca wyjścia to minimalna energia potrzebna do tego, aby elektron opuścił metal; jej związek z częstotliwością (długością) graniczną ma postać:
   $W = h \cdot \nu_0$ lub $W = \frac{h \cdot c}{\lambda_0}$

13. Fotokomórka

1. Klasyczna **fotokomórka** to szklana bańka starannie opróżniona z powietrza, wewnątrz której znajdują się dwie elektrody: ujemna (fotokatoda) i dodatnia (anoda).
2. Fotokomórka służy do badania zjawiska fotoelektrycznego oraz do innych celów naukowych.
3. Fotokomórki znalazły zastosowanie praktyczne w technice (urządzenia alarmowe), przemyśle (zliczanie dużej liczby przedmiotów – kartonów, wytłoczek, butelek itp. w produkcji taśmowej), sporcie (dokładny pomiar czasu w różnych dyscyplinach sportowych) i życiu codziennym (wyłączniki świateł).



Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

Zadania

Polecenie 1

Oblicz największą i najmniejszą energię fotonu światła widzialnego. Jakiej barwie światła odpowiadają te fotony? Dane dotyczące długości fal światła widzialnego znajdź w tablicach fizycznych lub innych dostępnych źródłach.

Polecenie 2

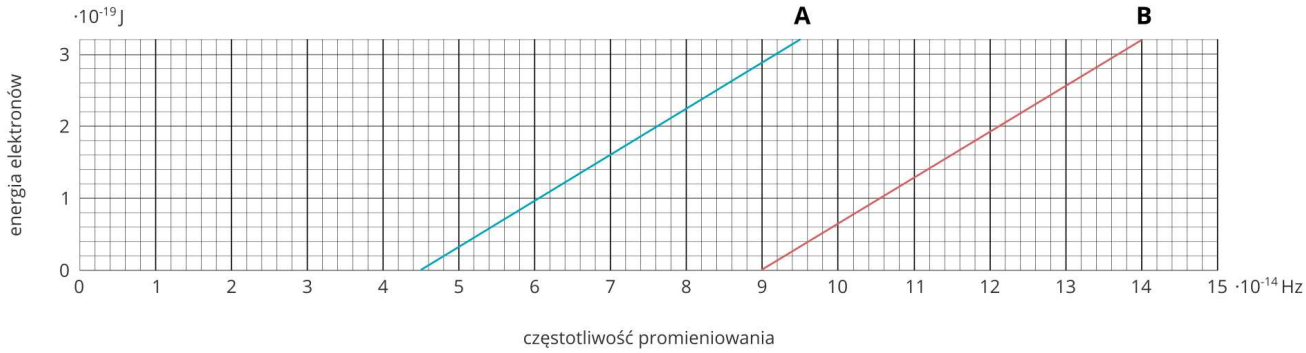
Energia elektronu znajdującego się na pierwszej orbicie atomu wodoru (atom znajduje się na poziomie podstawowym) ma wartość $-2{,}17 \cdot 10^{-18}\ \mathrm{J}$. Oblicz energię fotonu, który zdoła przenieść ten elektron na trzeci poziom.

Polecenie 3

Podaj trzy przykłady wykorzystania zjawiska fotoelektrycznego.

Polecenie 4

Rysunek przedstawia zależność energii kinetycznej fotoelektronów od energii fotonów padających na fotokomórkę dla dwóch różnych fotokatod.



Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

Tabela zawiera wartości pracy wyjścia dla kilku metali. Ustal, z jakich metali wykonano fotokatody A i B.

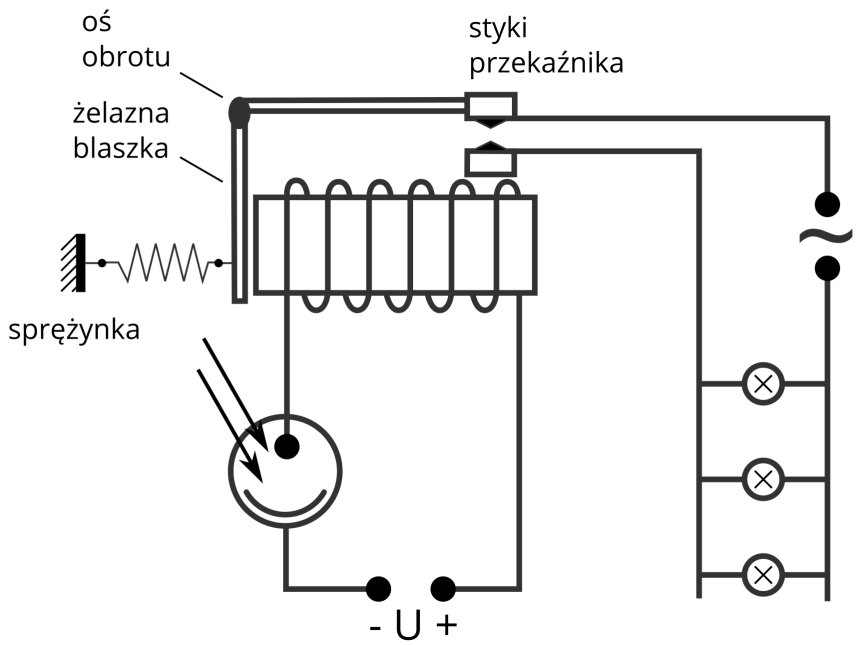
Wartości pracy wyjścia dla wybranych metali

Metal	Praca wyjścia, J
cez	$3{,}0 \cdot 10^{-19}$
chrom	$7{,}0 \cdot 10^{-19}$
nikiel	$7{,}8 \cdot 10^{-19}$
uran	$5{,}9 \cdot 10^{-19}$

Metal	Praca wyjścia, J
wolfram	$7{,}4 \cdot 10^{-19}$
srebro	$7{,}6 \cdot 10^{-19}$
platyna	$9{,}9 \cdot 10^{-19}$

Polecenie 5

Przeanalizuj i opisz zasadę działania wyłącznika zmierzchowego, którego schemat przedstawiono na poniższym rysunku:



Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

Polecenie 6

* Opisz, jak można wykorzystać światło wysyłane przez gwiazdę do pomiaru temperatury jej powierzchni.

Polecenie 7

Praca wyjścia dla platyny równa jest $8{,}49154 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$. Czy promieniowanie, którego długość fali wynosi $\lambda = 3 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{m}$, wywoła emisję elektronów z powierzchni tego metalu? Odpowiedź uzasadnij (wykonaj odpowiednie obliczenia).

Polecenie 8

Zaprojektuj schemat instalacji otwierającej bramę i wykorzystującej fotokomórki.

Test

Ćwiczenie 1

Foton o energii E pada na metal, dla którego praca wyjścia wynosi 1/3 E. Ile elektronów może wybić ten foton z powierzchni metalu?

- ◯ Dwa elektrony.
- ◯ Jeden lub więcej elektronów.
- ◯ Trzy elektrony.
- ◯ Najwyżej jeden elektron.
- ◯ Od jednego do trzech elektronów.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Długość fali promieniowania padającego na fotokomórkę zmalała dwukrotnie. Jak zmieniła się energia kinetyczna wybitych elektronów?

- ◯ Wzrosła mniej niż dwa razy.
- ◯ Zmalała mniej niż dwa razy.
- ◯ Wzrosła dwa razy.
- ◯ Wzrosła więcej niż dwa razy.
- ◯ Zmalała więcej niż dwa razy.
- ◯ Zmalała dwa razy.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 3

Elektron w atomie wodoru przeskakuje z poziomu szóstego na niższe. Może to zrobić w jednym etapie lub kilku etapach. Któremu przeskokowi towarzyszy emisja fotonu o największej częstotliwości?

- ◯ Przeskokowi z czwartego poziomu na drugi.
- ◯ Przeskokowi z piątego poziomu na trzeci.
- ◯ Przeskokowi z szóstego poziomu na pierwszy.
- ◯ Przeskokowi z drugiego poziomu na pierwszy.
- ◯ Przeskokowi z szóstego poziomu na piąty.
- ◯ Przeskokowi z szóstego poziomu na drugi.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4

Energia atomu wodoru w stanie podstawowym (elektron na pierwszym poziomie energetycznym) wynosi $-E_1$. Gdy elektron przeniesiemy na trzeci poziom, to energia atomu:

- ◯ zmaleje 9 razy.
- ◯ wzrośnie o 1/9 E_1.
- ◯ wzrośnie 9 razy.
- ◯ wzrośnie o 8/9 E_1.
- ◯ wzrośnie 3 razy.
- ◯ zmaleje 3 razy.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 5

Energia promieniowania termicznego jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury wyrażonej w kelwinach. Jak zmieni się energia emitowana przez lawę, jeśli jej temperatura wzrośnie z $27^\circ\mathrm{C}$ do $327^\circ\mathrm{C}$?

- ◯ Wzrośnie 2 razy.
- ◯ Wzrośnie 12 razy.
- ◯ Wzrośnie 16 razy.
- ◯ Nie zmieni się.
- ◯ Wzrośnie 4 razy.
- ◯ Wzrośnie 12^4 razy.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 6

Połącz w pary.

Jądro atomu	ma wartość ujemną.
Fotoelektron	jest zjawiskiem kwantowym.
Foton	ma rozmiary rzędu 10^{-10} m.
Atom	ma ładunek ujemny.
Energia atomu	ma ładunek dodatni.
Fotoefekt	nie ma masy spoczynkowej.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Promieniowanie jądrowe α, β i γ

Badania nad promieniotwórczością naturalną nierozerwalnie związane są z nazwiskami Piotra Curie i Marii Skłodowskiej-Curie. Maria Skłodowska-Curie jest dwukrotną noblistką. W 1903 r. wraz z mężem Piotrem otrzymała Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki, a 1911 r. – w dziedzinie chemii (za odkrycie pierwiastka promieniotwórczego – polonu). W tym rozdziale spróbujemy odpowiedzieć na pytanie, na czym polega zjawisko promieniotwórczości i jakie substancje określamy mianem promieniotwórczych.

Promieniowanie jądrowe obecne wokół nas pochodzi zarówno ze źródeł naturalnych jak i sztucznych pierwsze otaczają nas zawsze i wszędzie – powszechnie występujące skały granitowe są silnym źródłem promieniowania

Już potrafisz

- opisać jądrowy model budowy atomu;
- przewidywać, jak pole elektryczne wpływa na tor ruchu naładowanej cząstki.

Nauczysz się

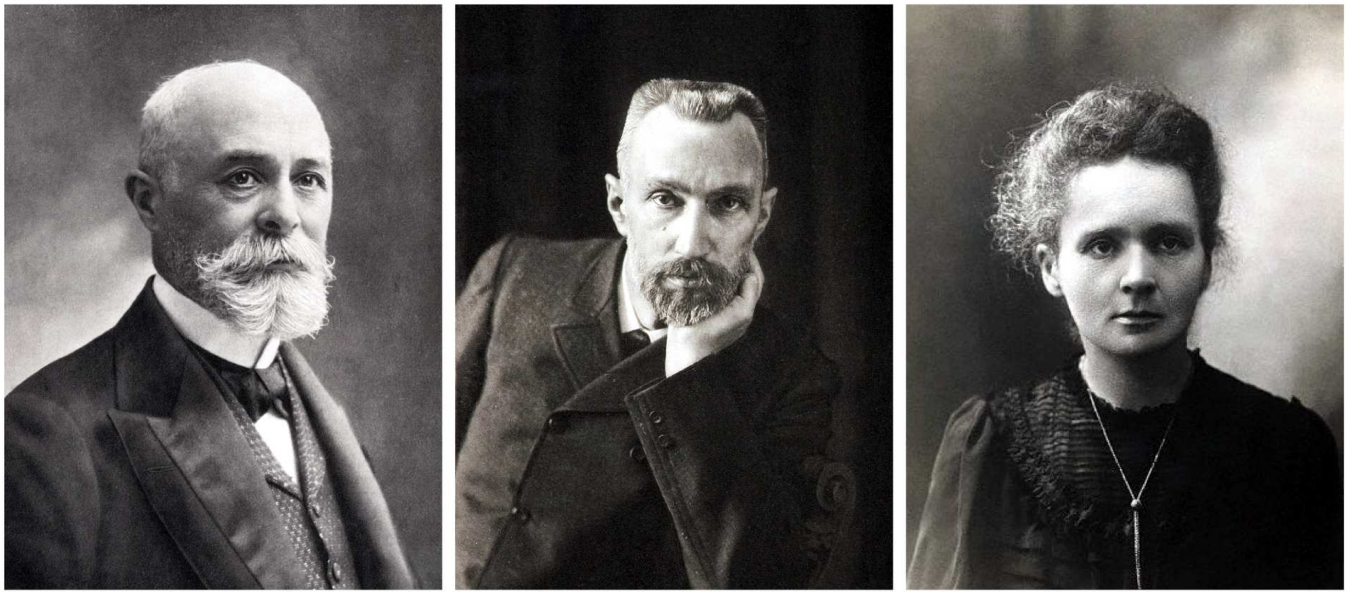
- podawać definicję promieniotwórczości naturalnej;
- opisywać właściwości promieniowania α, β i γ;
- opisywać wybrany sposób wykrywania promieniowania jonizującego.

1. Odkrycie promieniotwórczości naturalnej (promieniowania uranowego)

Wróćmy na chwilę do końca XIX wieku. Nie istnieją jeszcze planetarne modele atomu przedstawione przez Rutherforda i Bohra (z małym jądrem atomowym i elektronami krążącymi wokół niego). Za kilka lat J.J. Thomson opracuje model atomu zwany modelem „ciasta z rodzynkami" (1904 r.). Badane jest promieniowanie ciał stałych i gazów. Znany jest wzór Balmera. Mimo że wyniki uzyskiwane za pomocą tego wzoru są zgodne z danymi doświadczalnymi, to nadal nie wiadomo, dlaczego ma on właśnie taką postać.

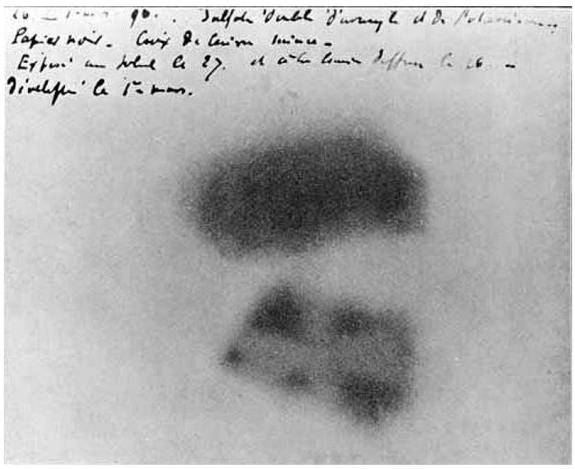
Wiadomo jednak, że istnieją cząstki mniejsze od atomów, naładowane dodatnio lub ujemnie. Atomy są obojętne elektrycznie, a więc muszą się znajdować w nich zarówno jedne, jak i drugie cząstki. To, w jaki sposób są one rozmieszczone w atomach, jaki mają ładunek i jaką masę, jest tematem dalszych dociekań naukowców.

W latach 90. XIX wieku dokonano dwóch ważnych odkryć: pierwsze dotyczy promieni X (czego dokonał W. Röntgen), a drugie – naturalnej promieniotwórczości niektórych ciał.



Badacze promieniotwórczości – od lewej Henri Becquerel i jego asystenci Maria Skłodowska-Curie i Piotr Curie

Dzięki doświadczeniom przeprowadzonym przez Henryka Becquerela, Ernesta Rutherforda oraz Marię Skłodowską-Curie i Piotra Curie odkryto, że substancje zawierające pewne pierwiastki, zwane pierwiastkami promieniotwórczymi, emitują promieniowanie zdolne zaczernić kliszę fotograficzną.



Klisza fotograficzna naświetlona przez Becquerela w pobliżu próbki pierwiastka promieniotwórczego

Zjawisko polegające na zaczernianiu klisz fotograficznych przez sole uranu odkrył Henri Becquerel w 1896 r. przy okazji badań nad świeceniem tych związków po ich uprzednim naświetleniu światłem słonecznym. Stwierdził jednak, że klisza ulega zaczernieniu nawet wtedy, gdy sole uranu nie zostały wcześniej naświetlone. Dalsze doświadczenia doprowadziły Becquerela do wniosku, że jest to promieniowanie mające charakter falowy. Odkrycie to sprawiło, że naukowcy przestali się interesować tym zagadnieniem. Wynikało to z sytuacji, jaka powstała po odkryciu promieni X (zwanych obecnie rentgenowskimi) przez **W. Röntgena**, co miało miejsce pod koniec 1895 r. Właściwości tego promieniowania były wówczas tak niesamowite, że zepchnęły na dalszy plan inne badania – ich wyniki nie były nagłaśniane.

Sytuacja zmieniła się diametralnie, gdy pracę nad zagadnieniem naturalnej promieniotwórczości podjęła **Maria Skłodowska-Curie**. Ciekawie pisze o tym A.K. Wróblewski w , do której odsyłamy wszystkich tych, którzy chcą poznać wysiłek, jaki Polka włożyła w swoje badania. Uwieńczeniem jej pracy naukowej było odkrycie obecności nowych pierwiastków w związkach uranu, które to pierwiastki były odpowiedzialne za emisję badanego promieniowania. Te pierwiastki to polon i rad.

> **Ciekawostka**
>
> Mimo że Maria Skłodowska-Curie większość swojego życia spędziła poza granicami Polski podzielonej zaborami, czuła się zawsze mocno związana z ojczyzną. Aby dać temu wyraz, pierwiastek odkryty przez siebie i męża nazwała polonem. Polon jest metalem promieniotwórczym o srebrzystobiałej barwie, który roztacza wokół siebie niebieską aurę, będącą skutkiem oddziaływania emitowanego promieniowania alfa i powietrza. Gęstość tego pierwiastka wyrażona w jednostkach układu SI wynosi $9\ 400 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$. Ze względu na dużą energię, jaką polon wydziela w krótkim czasie, stosowany jest on jako źródło zasilania w satelitach i pojazdach kosmicznych. Śladowe ilości tego metalu znajdują się w dymie papierosowym.

Badania Ernesta Rutherforda i innych fizyków dowiodły, że promieniowanie to nie ma natury jednorodnej. Ze względu na jego przenikliwość wyróżniono trzy rodzaje, które nazwano promieniowaniem alfa, beta i gamma – zgodnie z pierwszymi literami alfabetu greckiego.

Okazało się, że promienie uranowe (tak je wtedy nazywano), nazwane literami α i β, ulegają odchyleniu w polu elektrycznym i magnetycznym. Oznacza to, że mają ładunek elektryczny. Badania wykazały, że składowa nazwana literą γ jest zarówno bardzo przenikliwa, jak i niewrażliwa na wpływ wyżej wspomnianych pól. Było to jednoznaczne z tym, że nie przenosi ona ładunku elektrycznego. O tym, dlaczego cząstka mająca ładunek elektryczny zmienia kierunek swojego ruchu podczas poruszania się w polu magnetycznym i jaki jest tor takiej cząstki w obu polach, będziesz mógł się dowiedzieć w następnych klasach, gdy wybierzesz fizykę jako przedmiot rozszerzony.

> **Polecenie 1**
>
> Skorzystaj z biogramu lub dowolnego źródła i opisz osiągnięcia naukowe Marii Skłodowskiej-Curie w dziedzinie promieniotwórczości.

2. Promieniowanie alfa (α)

Promieniowanie alfa charakteryzuje się o wiele mniejszą przenikliwością niż promieniowanie beta i gamma. W powietrzu zasięg promieniowania α ogranicza się do kilku (maksymalnie dziesięciu) centymetrów; zwykła odzież całkowicie je pochłania. Dlatego też substancje, które emitują ten typ promieniowania, mogą być przechowywane np. w zwykłych szklanych ampułkach. Jednak nie można bagatelizować jego wpływu na żywe organizmy, zwłaszcza gdy promienie alfa trafią na nieosłoniętą tkankę lub dostaną się do wnętrza organizmu drogą oddechową lub pokarmową. Promieniowanie alfa ma silne właściwości jonizujące i może prowadzić do choroby popromiennej.

Promieniowanie alfa po napotkaniu bariery, którą może być zwykła kartka papieru, zostaje pochłonięte – jego przenikliwość jest bardzo niska. Jakie są jego inne właściwości fizyczne?

Kiedy promieniowanie alfa przechodzi przez obszar pola elektrycznego, zmienia kierunek rozchodzenia się i stosunkowo łatwo można wykazać, że przenosi ładunek dodatni.

Już na przełomie XIX i XX w. fizycy podejrzewali, że promieniowanie alfa składa się z cząstek. Śledzili dokładnie zachowanie cząstek alfa w polach magnetycznym

i elektrycznym, dzięki czemu wyznaczyli wartość ładunku i masę cząstki. Okazało się, że ładunek cząstki alfa jest dwa razy większy od ładunku zjonizowanego atomu wodoru (czyli protonu). Cząstka alfa jest też cztery razy cięższa od zjonizowanego atomu wodoru. Czym są tajemnicze cząstki alfa?

W 1908 r., a więc znacznie później, odkryto, że są one tożsame z jądrami helu ($^4_2\mathrm{He}$). Rutherford jeszcze do końca lat dwudziestych XX w. uważał, że cząstki alfa są niepodzielne.

3. Promieniowanie beta (β)

Kolejnym produktem rozpadu niestabilnych jąder jest promieniowanie beta. Promieniowanie beta jest znacznie bardziej przenikliwe niż cząstek promieniowania alfa o tej samej energii. Bez trudu przechodzi przez kartkę papieru, ale pochłaniane jest przez folię aluminiową. W zależności od swojej energii potrafi w powietrzu rozchodzić się nawet na dystans kilku metrów. Szkło o grubości ponad czterech milimetrów stanowi jednak dla tych promieni zaporę nie do pokonania. Jakie efekty dało badanie promieniowania beta w polu elektrycznym?

Kiedy promieniowania beta przechodzi przez obszar, w którym występuje pole elektryczne, zmienia kierunek rozchodzenia się, jednak w przeciwną stronę, niż działo się to w przypadku cząstek alfa. Promieniowanie beta musi więc przenosić ze sobą ładunek elektryczny o przeciwnym znaku – skoro cząstki α naładowane są dodatnio, to cząstki β mają ładunek ujemy. Czy promieniowanie beta jest strumieniem cząstek?

Podobnie jak w przypadku cząstek α fizycy śledzili zachowanie cząstek β w polach magnetycznym i elektrycznym. Wykazali, że promieniowanie beta jest strumieniem naładowanych cząstek. Wyznaczyli wartość ładunku cząstki β i jej masę, które okazały się takie same jak w przypadku elektronu.

> **Ważne!**
>
> Dzisiaj wiemy, że istnieją dwa rodzaje promieniowania beta – strumień elektronów (rozpad β^-) i pozytonów (rozpad β^+).

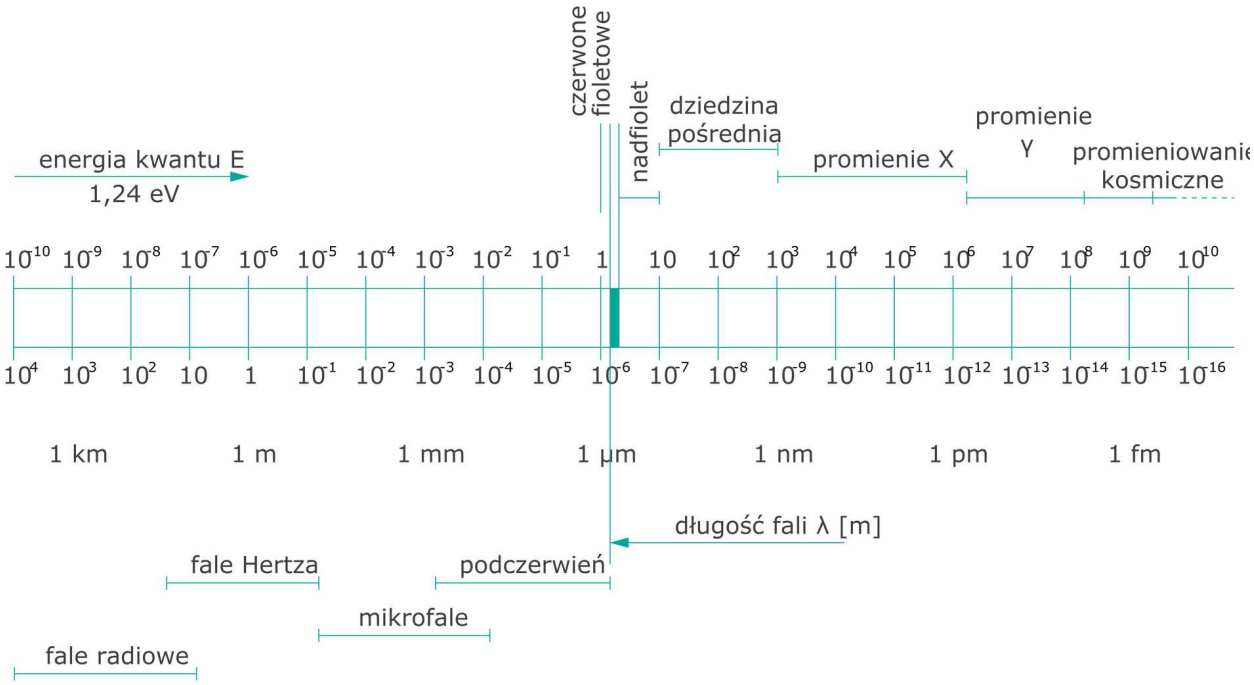
4. Promieniowanie gamma (γ)

Promieniowanie gamma w 1900 r. odkrył Paul Villard, który współpracował z Marią Skłodowską-Curie i Piotrem Curie.
Na drodze doświadczalnej dowiedziono później, że trzeci rodzaj promieniowania jądrowego, który nie występuje samodzielnie, lecz towarzyszy promieniowaniu alfa i beta, wykazuje największą przenikliwość.

Promieniowanie gamma dzięki dużej energii przenika zarówno przez cienką kartkę papieru, jak i przez folię aluminiową, a częściowo pochłonięte może zostać dopiero przez np. płytę ołowianą o grubości minimum 7 cm lub też 5-metrową warstwę betonu. Stanowi silny czynnik jonizujący i jest szkodliwe dla organizmu ludzkiego. Odpowiednio duże dawki promieniowania gamma prowadzą do choroby popromiennej.

Spróbujmy teraz odpowiedzieć na pytanie, co się stanie, gdy promieniowanie gamma będzie rozchodzić się w zewnętrznym polu elektrycznym.

Kiedy promieniowanie gamma przechodzi przez obszar pola elektrycznego, w ogóle się nie zakrzywia, nie ma więc żadnego ładunku. Dalsze badania wykazały, że promieniowanie gamma to fale elektromagnetyczne o bardzo małych długościach – krótszych od fal promieniowania rentgenowskiego.



Zakres długości fal promieniowania gamma jest mniejszy od zakresu długości fal promieniowania X

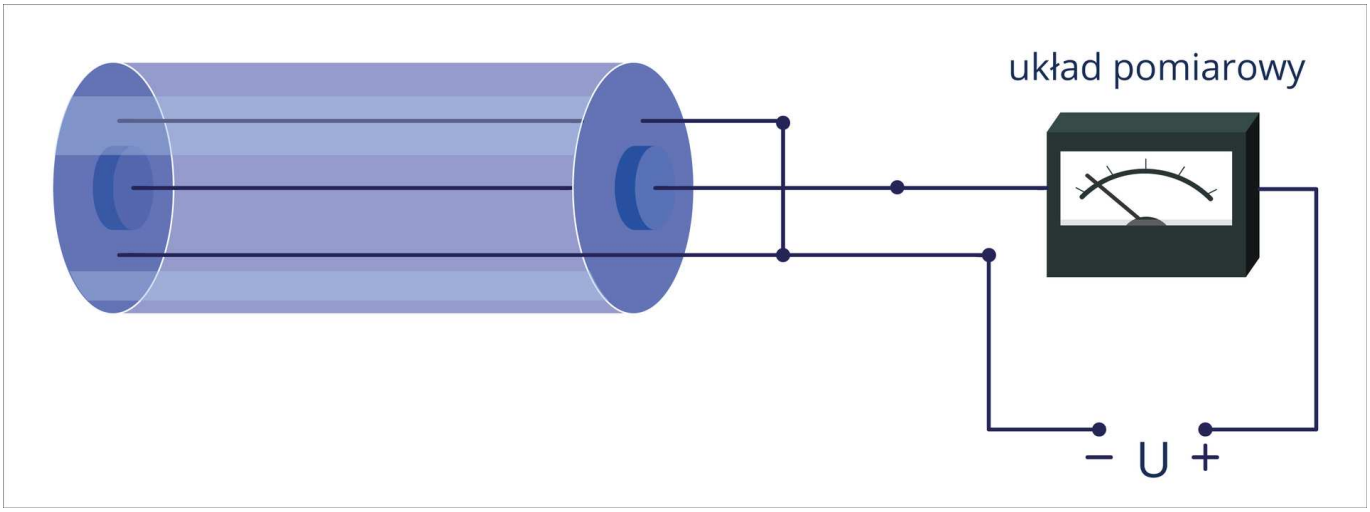
Polecenie 2

Znajdź w internecie przykłady praktycznego zastosowania promieniowania gamma.

5. Metody wykrywania i badania torów cząstek naładowanych – detektory

Z oczywistych względów nie możemy zobaczyć cząstek takich jak proton, cząstka α czy cząstka β. W jaki sposób zatem fizycy dowiedzieli się o nich tak wiele – poznali ich masę, ładunek i tor, po których te cząstki poruszają się w przestrzeni?

Bardzo ważną właściwością poruszających się cząstek naładowanych jest jonizacja ośrodka, w którym się one przemieszczają. Ponieważ cząstki te są obdarzone ładunkiem elektrycznym, to kiedy przemieszczają się w pobliżu atomów lub cząsteczek związków chemicznych, powodują odrywanie elektronów, a na drodze toru ruchu tych cząstek powstaje ślad w postaci łańcuszka jonów. Ich obecność można wykryć i tym samym stwierdzić istnienie cząstki jonizującej, a nawet zobaczyć ślad jej przelotu. Urządzeniem służącym do wykrywania cząstek jonizujących jest **komora jonizacyjna**. Może ona mieć kształt cylindra wypełnionego gazem. Wzdłuż osi cylindra umieszczona jest elektroda (cienki drut odizolowanego od ścianek komory). Drugą elektrodę może tworzyć układ drutów położonych bliżej ścianek komory lub cylindryczna elektroda umieszczona dookoła puszki.

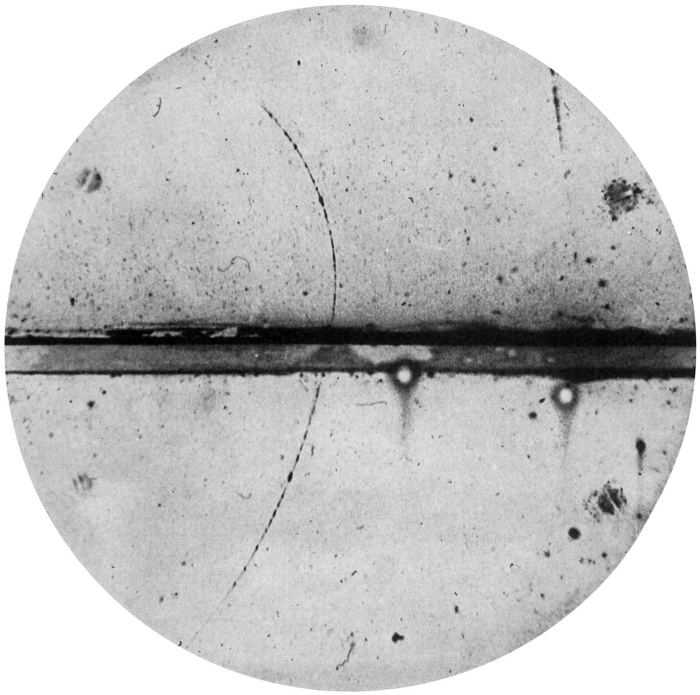


Zasada działania komory jonizacyjnej

Jeżeli cząstka jonizująca przeleci przez cylinder, to na swojej drodze spowoduje powstanie wielu par jonów (jonizacja sprawia, że zawsze mamy ładunek dodani i ujemny). Między elektrodami nastąpi wówczas przepływ prądu, który będzie zarejestrowany przez układ pomiarowy.

Badanie torów cząstek jonizujących oparte jest na zjawisku, które często oglądamy na niebie. Samolot przelatujący na dużej wysokości zostawia za sobą ślad w postaci tzw. smugi

kondensacyjnej. Na wysokości rzędu 10 km od powierzchni Ziemi temperatura jest bardzo niska. Para wodna w tych warunkach może się skroplić tylko wtedy, jeśli pojawią się tzw. jądra kondensacji. Ze względu na to, że powietrze na tak dużej wysokości jest czyste, nie może wystąpić kondensacja pary wodnej. Przelatujący samolot zostawia jednak za sobą spaliny, które są częściowo zjonizowane. Powoduje to, że para wodna skrapla się w miejscach, w których są takie jony. Powstające krople natychmiast zamarzają i tworzą smugę zbudowaną z kryształków lodu. Zależnie od temperatury i stopnia zawartości pary wodnej na danej wysokości, na której leci samolot, taka smuga znika szybko lub dopiero po dłuższym czasie.



Tory naładowanych cząstek zarejestrowane w komorze Wilsona

Jeśli tory cząstek badamy w tzw. **komorze Wilsona**, nie zaobserwujemy kryształków lodu, a jedynie kropelki wody lub alkoholu. Taką komorę pierwszy zbudował **Charles Wilson** w 1900 r. Jeżeli umieścimy ją w zewnętrznym polu magnetycznym, to tory cząstek będą zakrzywione w zależności od ładunku i masy cząstki, a zatem można te wielkości wyznaczyć. O tym, w jaki sposób kształt toru zależy od masy i ładunku, będziesz mógł się dowiedzieć w następnych klasach.

Tory naładowanych cząstek zarejestrowane w komorze pęcherzykowej

W II połowie XX w. skonstruowano urządzenie zwane **komorą pęcherzykową**. Wewnątrz takiej komory znajduje się ciecz w stanie tzw. przegrzania (czyli w temperaturze wyższej niż temperatura wrzenia). Przelot jonizującej cząstki powoduje jonizację cieczy i w miejscach, w których znajdują się jony, następuje gwałtowne przejście wody w stan pary. Ślad przelatującej cząstki – podobnie jak w komorze Wilsona – można sfotografować. Jeżeli będzie tam pole elektryczne, to można również badać zakrzywienia torów cząstek.

Podsumowanie

- Promieniotwórczość naturalna (bez udziału człowieka) to zjawisko samorzutnego rozpadu jąder atomowych w pierwiastkach promieniotwórczych występujących w przyrodzie, któremu towarzyszą promieniowania: alfa, beta i gamma.
- Odkrywcami promieniotwórczości i jej pierwszymi badaczami byli Henri Becquerel oraz Maria Skłodowska-Curie i jej mąż Piotr Curie.
- Małżeństwo Curie w 1898 r. odkryło dwa nieznane wówczas pierwiastki promieniotwórcze: rad i polon.
- Promieniowanie α to strumień cząstek majacych taką samą budowę jak jądra helu. Charakteryzuje się niską przenikliwością, jego zasięg w powietrzu nie przekracza 10 cm. Ma właściwości jonizujące. Kontakt promieniowania α z żywą tkanką prowadzi do jej uszkodzeń.
- Promieniowanie β to strumień elektronów lub pozytonów. Jego przenikliwość jest większa niż cząstek α, a zasięg w powietrzu sięga nawet do kilku metrów. Ma

właściwości jonizujące.

- Największą przenikliwość i zasięg ma promieniowanie γ, które jest falą elektromagnetyczną o zakresie fal krótszych od promieni rentgenowskich. Emisji cząstek alfa i beta towarzyszy promieniowanie gamma.
- Cząstki naładowane powodują jonizację ośrodka, co pozwala na wykrycie ich ruchu i obserwację śladu takiego przejścia.
- Promieniowanie jądrowe emitują niestabilne jądra atomów podczas ich samorzutnego rozpadu.

Zadania podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Połącz w pary.

promieniowanie gamma	fala elektromagnetyczna
promieniowanie alfa	podwójnie zjonizowany atom helu
promieniowanie beta	elektron lub pozyton

Źródło: Dariusz Kajewski, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Przeczytaj uważnie poniższe zdania i określ które z nich są prawdziwe, a które fałszywe.

	Prawda	Fałsz
Po przepuszczeniu promieniowania gamma przez obszar pola magnetycznego promieniowanie to zakrzywiane jest w tę samą stronę co promieniowanie alfa.	◯	◯
Promieniowanie gamma to promieniowanie elektromagnetyczne o krótkiej fali, a więc dużej częstotliwości i energii.	◯	◯
Ochronę przed promieniowaniem gamma stanowi ekran ołowiany o dostatecznie dużej grubości.	◯	◯
Promieniowanie gamma ulegnie znaczącemu osłabieniu po przejściu przez ścianę z jednej warstwy cegieł.	◯	◯
Ściana betonowa o grubości kilku metrów obniża natężenie promieniowania gamma do bezpiecznego poziomu.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski, licencja: CC BY 3.0.

Praca domowa

Praca domowa

Polecenie 3.1

Narysuj wiązkę promieniowania alfa, beta i gamma pomiędzy płytkami naładowanego kondensatora.

Słowniczek

komora jonizacyjna

– detektor służący do wykrywania przelatującej cząstki; jest to możliwe dzięki wywołanej przez nią jonizacji ośrodka (gazu) wypełniajacego komorę.

komora pęcherzykowa

– urządzenie badawcze, którego celem jest obserwacja śladów cząstek promieniowania jonizującego. Wewnątrz komory znajduje się ciecz w stanie tzw. przegrzania (czyli w temperaturze wyższej niż temperatura wrzenia). Przelot jonizującej cząstki powoduje jonizację cieczy i w miejscach, w których znajdują się jony, następuje gwałtowne przejście wody w stan gazowy (parę wodną). Dzięki temu możemy fotografować ślady przelatujących cząstek.

komora Wilsona (komora mgłowa)

– detektor promieniowania jonizującego. Kiedy cząstki jonizujące przelatują przez gaz zawierający tzw. parę nasyconą, wzdłuż toru ich ruchu następuje kondensacja kropelek cieczy. Dzięki temu możemy śledzić i rejestrować, jaką drogę cząstki przebyły w komorze.

polon (Po)

– naturalny pierwiastek promieniotwórczy o srebrzystobiałej barwie, który w powietrzu jarzy się na niebiesko na wskutek oddziaływania emitowanego promieniowania α i powietrza; gęstość polonu wynosi $9\ 400 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$.

promieniowanie α

– strumień cząstek wyrzucanych przez jądra atomów. Sa one tożsame z podwójnie zjonizowanymi atomami helu, tj. składają się z dwóch protonów i dwóch neutronów.

promieniowanie β

– jeden z rodzajów promieniowania jądrowego; strumień elektronów lub pozytonów.

promieniowanie γ

– promieniowanie elektromagnetyczne o bardzo małej długości fali, czyli o bardzo dużej częstotliwości i energii.

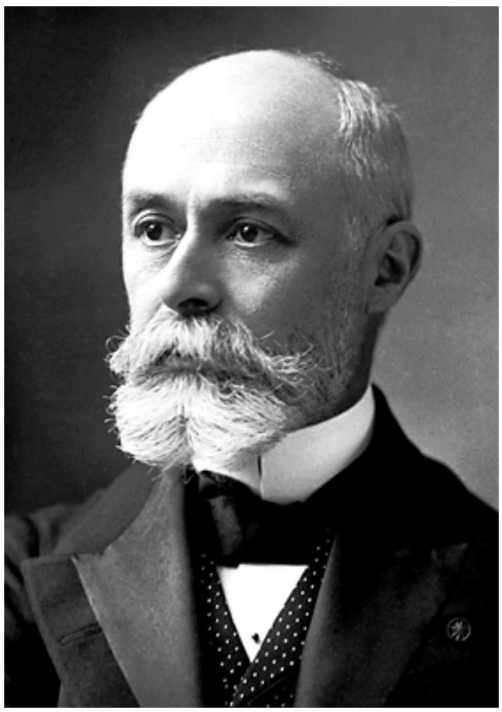
promieniotwórczość naturalna

– samorzutne wysyłanie cząstek α, β i promieniowania γ przez atomy. Obecnie wiemy, że ten proces zachodzi podczas rozpadu jąder pierwiastków promieniotwórczych pochodzenia naturalnego.

rad (Ra)

– miękki metal o srebrzystej barwie, naturalny pierwiastek radioaktywny o dużej aktywności promieniotwórczej.

Biogramy



Źródło: Nobel foundation (http://commons.wikimedia.org), public domain.

Antoine Henri Becquerel

15.12.1852–25.08.1908

Henri Becquerel zajmował się wieloma zagadnieniami z pogranicza fizyki i chemii – należały do nich optyka, elektryczność, magnetyzm, fotochemia, elektrochemia, a nawet meteorologia. Jednak prawdziwa sławę przyniosło Becquerelowi odkrycie tzw. promieni Becquerela. Było to promieniowanie emitowane przez sole uranu, które kiedy padało na kliszę fotograficzną, prowadziło do jej zaczernienia (1896 r.). Miało również zdolność

przenikania przez materię. Dziś wiemy, że były to cząsteczki alfa, beta i kwanty elektromagnetycznego promieniowania gamma.

Źródło: Smithsonian Institution from United States(http://commons.wikimedia.org), public domain.

Piotr Curie

15.05.1859–19.04.1906

Piotr Curie odkrył zjawisko piezoelektryczne i razem ze swoją żoną Marią Skłodowską-Curie stworzył podstawy nauki o promieniotwórczości. Maria i Piotr Curie w 1898 r. odkryli także pierwiastki promieniotwórcze – rad i polon. Piotr Curie zmarł wskutek tragicznego wypadku pod kołami wozu konnego na jednej z ulic Paryża.

Źródło: nn.(http://commons.wikimedia.org), edycja: Krzysztof Jaworski, public domain.

Maria Salomea Skłodowska-Curie

7.11.1867–4.07.1934

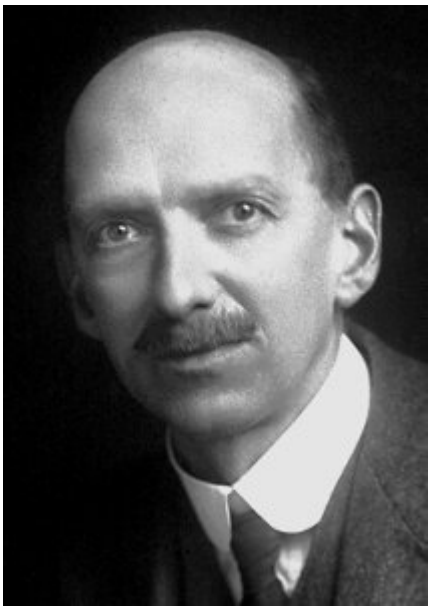
Maria Skłodowska-Curie swoją karierę naukową rozpoczęła na paryskiej Sorbonie, gdzie zdobyła licencjat z fizyki i matematyki. W 1898 r. zespół badawczy (kierowany przez Henri Becquerela), w skład którego wchodziło małżeństwo Curie, odkrył dwa nieznane dotąd pierwiastki promieniotwórcze – rad i polon. W 1903 r. trójka badaczy za swoją pracę naukową została uhonorowana Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki. Po tragicznej śmierci męża w 1906 r. Maria Skłodowska-Curie objęła po nim katedrę fizyki na Sorbonie. W 1911 r. ponownie otrzymała Nagrodę Nobla, tym razem w dziedzinie chemii, za badania nad właściwościami uprzednio odkrytych pierwiastków, m.in. za wyodrębnienie metalicznego radu. W 1912 r. była jednym ze współzałożycieli paryskiego Instytutu Radowego w Paryżu, który od jej nazwiska nosi obecnie nazwę Instytutu Curie. Z powodu prowadzonych badań nad substancjami promieniotwórczymi stan zdrowia noblistki się pogorszył i ostatecznie w lipcu 1934 r. roku Maria Skłodowska-Curie umarła na białaczkę. W dowód uznania jej wielkich zasług dla nauki prochy uczonej w roku 1955 r. zostały przeniesione z rodzinnego grobowca rodziny Curie do paryskiego Panteonu.

Źródło: nn.(http://commons.wikimedia.org), public domain.

Wilhelm Conrad Röntgen

27.03.1845–10.02.1923

Odkrywca i badacz nowego rodzaju promieniowania przenikliwego, nazwanego od jego imienia promieniami Röntgena (promienie X). Znalazło ono szerokie zastosowanie w medycynie i technice. Badacz skonstruował także przenośne źródło promieniowania rentgenowskiego – lampę rentgenowską.



Źródło: AB Lagrelius & Westphal (https://commons.wikimedia.org), public domain.

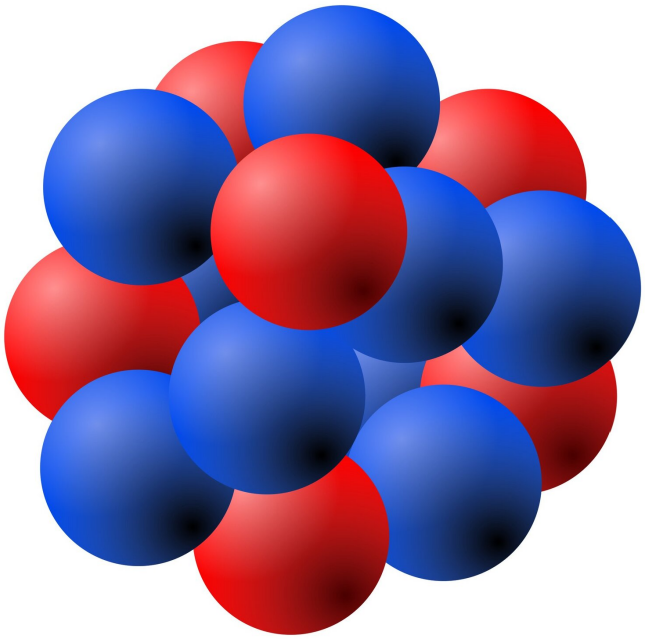
Charles Thomson Rees Wilson

14.02.1869–15.11.1959

Konstruktor detektora i rejestratora promieniowania jonizującego – urządzenia nazywanego dzisiaj komorą Wilsona. Za to właśnie osiągnięcie został uhonorowany Nagrodą Nobla.

Jądro atomowe i jego składniki

W 1911 r. Ernest Rutherford publikuje wyniki swoich badań, które dowodzą, że atom zbudowany jest z małego – w porównaniu z jego rozmiarami – jądra, w którym skupiona jest prawie cała masa atomu. Jądro atomu otacza powłoka elektronowa i atom jako całość pozostaje obojętny elektrycznie. Daje to początek nowej gałęzi fizyki – fizyce jądrowej, stawiającej sobie za cel poznanie tego nowo odkrytego elementu atomu.



Najczęstsze wyobrażenia dotyczące budowy jądra atomowego przez osoby, które interesują się tym tematem, a nie są fizykami, odpowiadają tak zwanemu modelowi kroplowemu opracowanego jeszcze przez Nielsa Bohra i Johna Wheelera na podstawie koncepcji George'a Gamowa. Obecnie model ten, w którym jądro atomu składa się ze ściśniętych razem protonów i neutronów, tworząc obiekt zbliżony kształtem do kuli, jest uważany za nieadekwatny do rzeczywistości, ale pozwala na dość dobre rozpatrywanie właściwości materii.

Już potrafisz

- stwierdzić, od czego zależą oddziaływania elektrostatyczne;
- podać definicję kwantu energii promieniowania elektromagnetycznego;
- obliczyć energię, którą przenosi kwant promieniowania elektromagnetycznego;
- stwierdzić, że światło w określonych warunkach można traktować jako falę elektromagnetyczną, a w innych – jako strumień kwantów (fotonów, porcji energii);
- wyjaśnić budowę atomu na podstawie modelu Bohra.

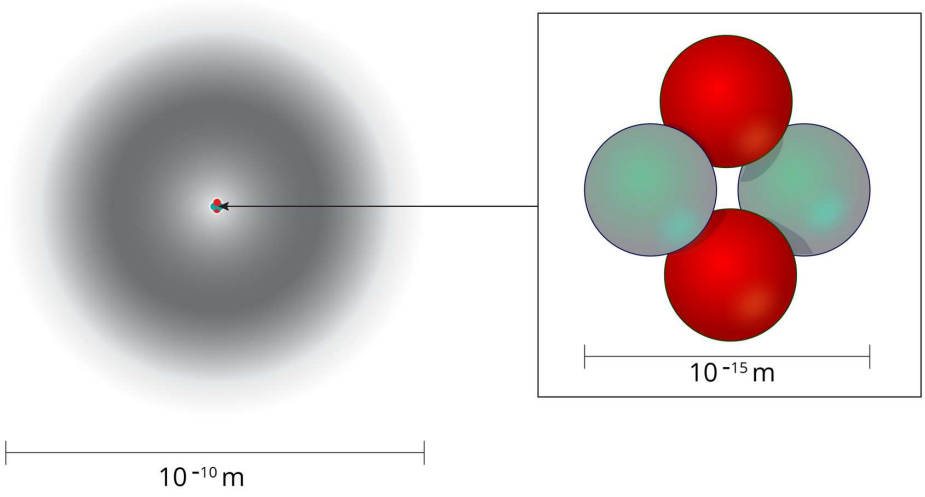
Nauczysz się

- wymieniać cząstki, z jakich zbudowane jest jądro atomowe;
- podawać definicję liczby masowej i atomowej;

- podawać definicję izotopu pierwiastka;
- podawać definicje kwarków i gluonów;

1. Jądro atomowe

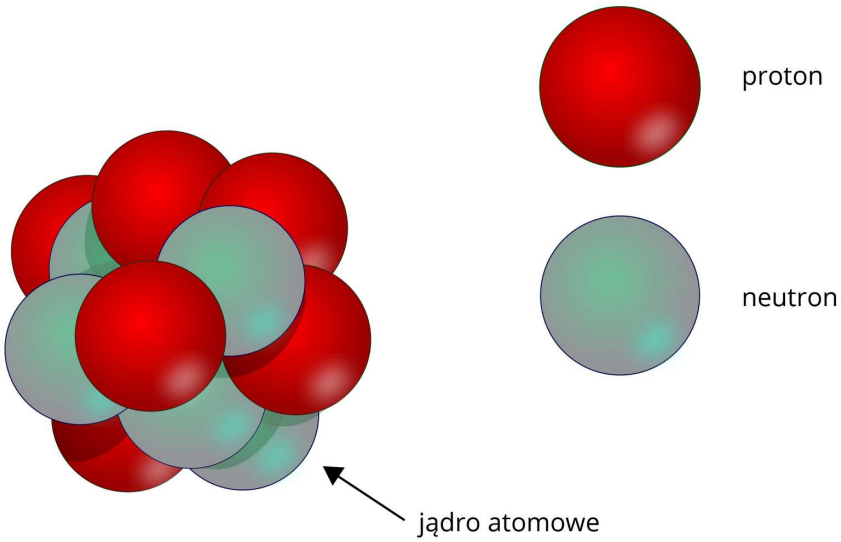
W planetarnym modelu budowy atomu przedstawionym przez Rutherforda niemal cała masa atomu skupiona była w niewielkim jądrze (10^{-15} m) o ładunku dodatnim, a po zamkniętych orbitach krążyły elektrony, tworzące tzw. powłokę elektronową.



Współczesny model budowy atomu

Odkrycie jądra atomowego sprawiło, że powstało wiele kolejnych wątpliwości. Uważano np., że jeśli jądro atomowe zbudowane byłoby z dodatnio naładowanych cząstek (protonów), musiałaby istnieć siła, która równoważyłaby ich wzajemne odpychanie wynikające z oddziaływań elektrycznych. Warto zdać sobie sprawę z faktu, że dwa protony znajdujące się w odległości rzędu 10^{-15}m odpychają się elektrostatycznie siłą o wartości 230 N. Ta wielkość nie wydaje się bardzo duża, ale trzeba pamiętać, że masa protonu wynosi ok. $1{,}67 \cdot 10^{-27}$g. Przez pewien czas uważano, że w jądrze znajdują się także elektrony. Dopiero odkrycie neutronu przez **Jamesa Chadwicka** w 1932 r. (istnienie neutronu zakładał dwanaście lat wcześniej **Ernest Rutherford**), pozwoliło wyjaśnić ten problem.

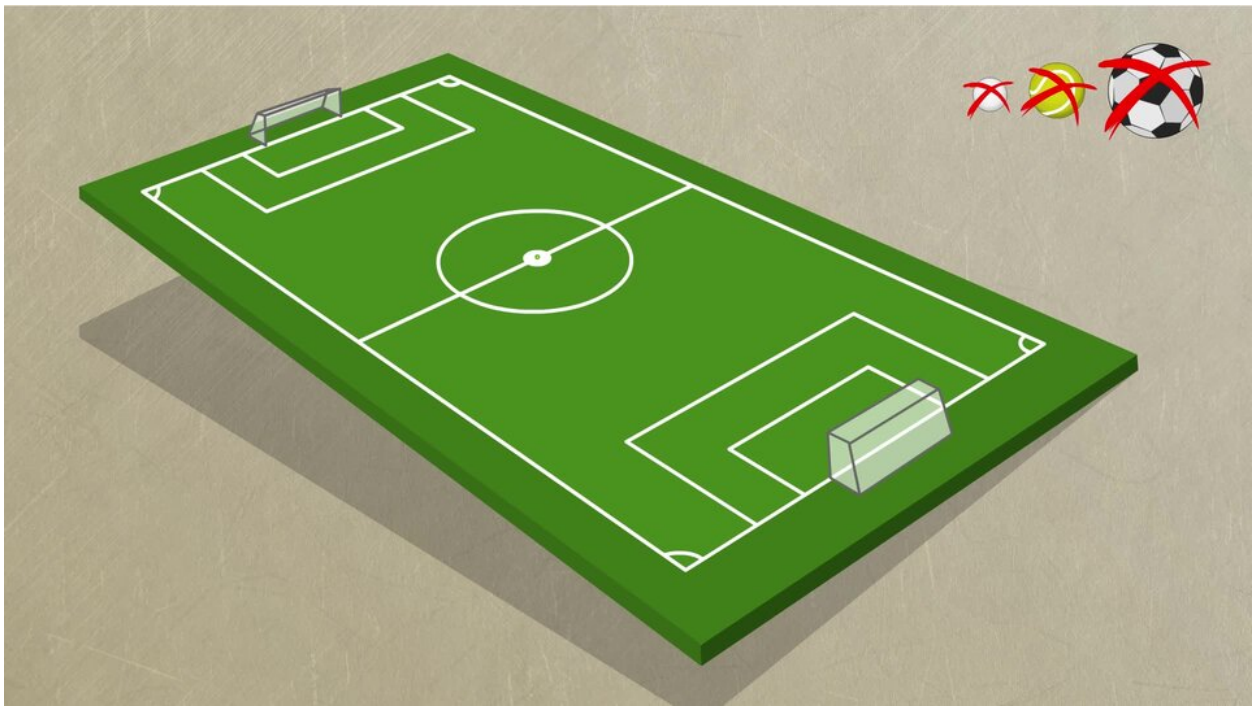
Obecnie wiemy, że jądro – centralna część atomu – zbudowane jest z **nukleonów**: protonów i neutronów.



Budowa jądra atomowego

Nukleony wchodzące w skład jądra atomowego są podobnych rozmiarów oraz mają zbliżone masy. Proton ma ładunek $+1e$, ($e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\mathrm{C}$), a neutron jest elektrycznie obojętny. Między składnikami jądra działają olbrzymie siły przyciągania o charakterze krótkozasięgowym, zdolne do pokonania elektrycznych sił odpychania między protonami. Są to **siły jądrowe**.

Jądro stanowi niewielką część całego atomu. Jeśli porównamy rozmiary atomu z rozmiarami jądra atomowego (dla atomu o średnicy rzędu $10^{-10}\mathrm{m}$), okaże się, że jądro jest aż 100 000 razy mniejsze od atomu, ale to właśnie w jądrze skupione jest $99{,}9\%$ masy całego atomu.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Jak wyobrazić sobie odległości w atomie?

Animacja przedstawia porównanie atomu do boiska piłkarskiego. Na środku boiska pojawiają się przedmioty wskazywane przez lektora. Gdy lektor w dialogu odrzuca przedmiot jako nieodpowiedni, wędruje on w prawy, górny róg ekranu/kadru ciągnąc za sobą zanikającą smugę. Przedmiot ustawia się w górnej części ekranu i zostaje przekreślony na krzyż dwoma kreskami. Przekreślone przedmioty: piłka futbolowa, piłka tenisowa, piłeczka ping-pongowa, ziarnko grochu. Musi być zachowana skala wymiarów przedmiotów. Gdy lektor w monologu wymienia kolejny przedmiot pojawia się szpilka widoczna przez lupę (więc trochę powiększona – nie w skali) wyraźnie widoczny jest malutki łepek szpilki. Szpilka wędruje łukiem na środek boiska (w miarę oddalania się szpilki ta staje się coraz mniejsza) ciągnąc za sobą zanikającą smugę i tam „znika" bo jest zbyt mała by ją widzieć w skali rysunku. Pojawia się tylko strzałka wskazująca na środek boiska a nad nią napis szpilka.

Gdyby narysować model atomu z zachowaniem rzeczywistej skali jego elementów składowych, to dla jądra o rozmiarze kilku centymetrów średnica atomu przekroczyłaby 1 km. Wyobraźe sobie, że ponad 99,99999% objętości atomu stanowi pusta przestrzeń!

> **Polecenie 1**
>
> Odczytaj z tablic, ile nukleonów mają jądra: żelaza, niobu, wodoru i ołowiu.

2. Cząstki elementarne

W latach 30. XX wieku wprowadzono pojęcie**cząstek elementarnych**. Zaliczono do nich: elektrony, protony, neutrony i fotony. Jak widać, rodzajów tych cząstek nie było zbyt dużo. Badania promieniowania kosmicznego prowadzone w następnych latach oraz analiza produktów reakcji jądrowych (zderzanie dwóch jąder) doprowadziły do odkrycia ponad dwustu nowych rodzajów cząstek elementarnych o masach od kilkuset do kilku tysięcy razy większych niż masa elektronu. Większość cząstek o tak dużej masie (większej od masy protonu i neutronu) okazywała się zwykle nietrwała. Eksperymentalnie udowodniono również eksperymentalnie istnienie tzw.**antycząstek**. Należy do nich np. pozyton – cząstka o masie równej masie elektronu, ale o ładunku dodatnim. Pozyton został odkryty w produktach zderzeń cząstek atmosfery ziemskiej z cząstkami promieniowania kosmicznego – głównie protonami. W 1955 r. dokonano odkrycia**antyprotonu**i wkrótce stało się jasne, że właściwie każda cząstka elementarna ma swoją antycząstkę. Model opisujący cechy cząstek elementarnych się skomplikował.

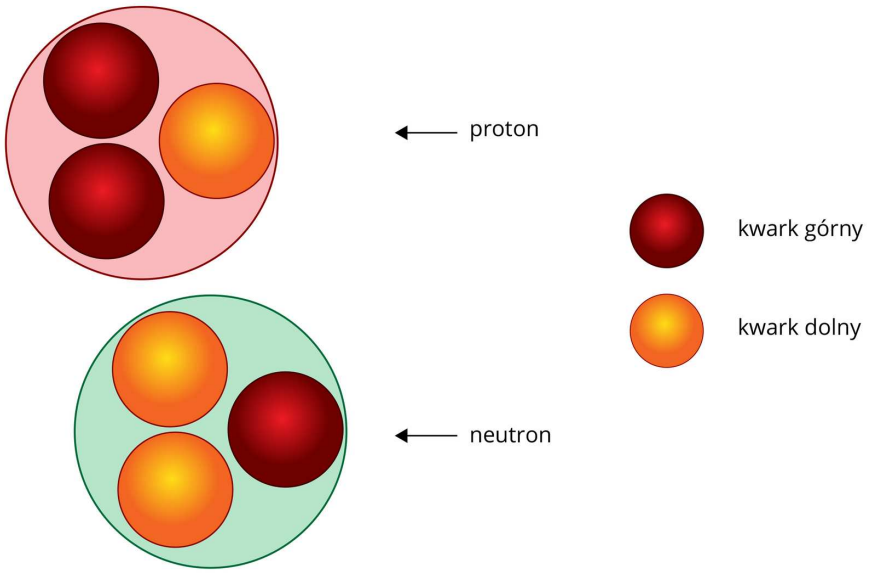
> **Ciekawostka**
>
> Warto wspomnieć także o polskim udziale w badaniach nad cząstkami elementarnymi. Dwaj polscy fizycy – Marian Danysz i Jerzy Pniewski – w 1952 r. odkryli tzw.**hiperjądro**. Hiperjądro zamiast jednego z neutronów zawierało cząstkę zwaną**„hiperon lambda”**o ładunku zero i masie ok. 2200 razy większej niż masa elektronu. Obecnie (w myśl najnowszych teorii) większość tych cząstek nie jest jednak uważana za cząstki elementarne.

Fizycy dość szybko doszli do wniosku, że świat cząstek elementarnych jest jednak zbyt skomplikowany. W roku 1964 r.**Murray Gell-Mann**i**George Zweig** wysunęli hipotezę, że dotychczasowy model cząstek elementarnych można uprościć, jeśli założy się istnienie**kwarków**.

> **Ciekawostka**
>
> Jeśli nie lubicie fizyki, to powinniście wiedzieć, że Gell-Mann również nie chciał jej studiować. A.K. Wróblewski w książce pt. „Historia fizyki” napisał, że interesował się on ornitologią, archeologią i lingwistyką, a do studiowania fizyki przekonał go ojciec. W 1969 r., w wieku czterdziestu lat, Gell-Mann otrzymał Nagrodę Nobla za prace wcześniejsze niż hipoteza kwarków. Podobnie było z Jamesem Chadwickiem, który na fizykę w Manchesterze dostał się przez przypadek – na egzaminie usiadł w niewłaściwej ławce. Po egzaminie Chadwickowi oznajmiono mu, że został przyjęty na Wydział Fizyki. Ponieważ był nieśmiały, wstydził się przyznać do swojej pomyłki. W 1935 r. otrzymał Nagrodę Nobla za odkrycie neutronu.

3. Kwarki i gluony

Jak wspomnieliśmy, jeszcze w latach 60. XX wieku przyjmowano, że podstawowym budulcem atomów, a zarazem najmniejszymi, niepodzielnymi składnikami materii, są trzy rodzaje cząstek: neutrony, protony i elektrony. Okazało się jednak, że w skład protonu i neutronu wchodzą jeszcze mniejsze cząstki, tzw.**kwarki**.



Protony i neutrony zbudowane są z mniejszych cząstek zwanych kwarkami

Hipoteza Gell-Manna i Zweiga pozostawała przez pewien czas jedynie hipotezą. Kwarki nie występują jako cząstki swobodne. Skąd zatem wiadomo, że jednak istnieją?
Od 1968 r. zaczęto wykonywać cykl doświadczeń, w których badano zderzenia elektronów z protonami. Analiza wyników wykazała, że protony mają pewną wewnętrzną strukturę, a jej elementy są obdarzone ładunkiem elektrycznym. W 1990 r. Friedman, Kendall i Taylor otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki „za ich pionierskie badania dotyczące głęboko nieelastycznego rozpraszania elektronów na protonach i wiązanych neutronach, co miało istotny wpływ na rozwój modelu kwarkowego w fizyce cząstek".

Poniższa tabela przedstawia nazwy poszczególnych typów kwarków oraz wartości i znaki ich ładunków elektrycznych.

Kwarki i ich ładunki elektryczne

Nazwa	Symbol	Ładunek [e]

górny	u	+⅔
dolny	d	−⅓
dziwny	s	−⅓
powabny	c	+⅔
niski, piękny	b	−⅓
wysoki, prawdziwy	t	+⅔

Kwarki utrzymują się razem dzięki cząstkom nazywanym**gluonami**, których nazwa pochodzi od angielskiego słowa „glue" – („klej"). Cząstki te powodują, że kwarki w protonie czy neutronie tworzą stabilny układ.

> **Polecenie 2**
>
> Czy proton i neutron są cząstkami elementarnymi? Uzasadnij swoją odpowiedź.

> **Polecenie 3**
>
> Składniki protonu to dwa kwarki *u* i jeden *d*. Składniki neutronu to dwa kwarki *d* i jeden *u*. Wykaż, że proton i neutron mają w związku z tym ładunki zgodne z obserwacjami.

4. Izotopy

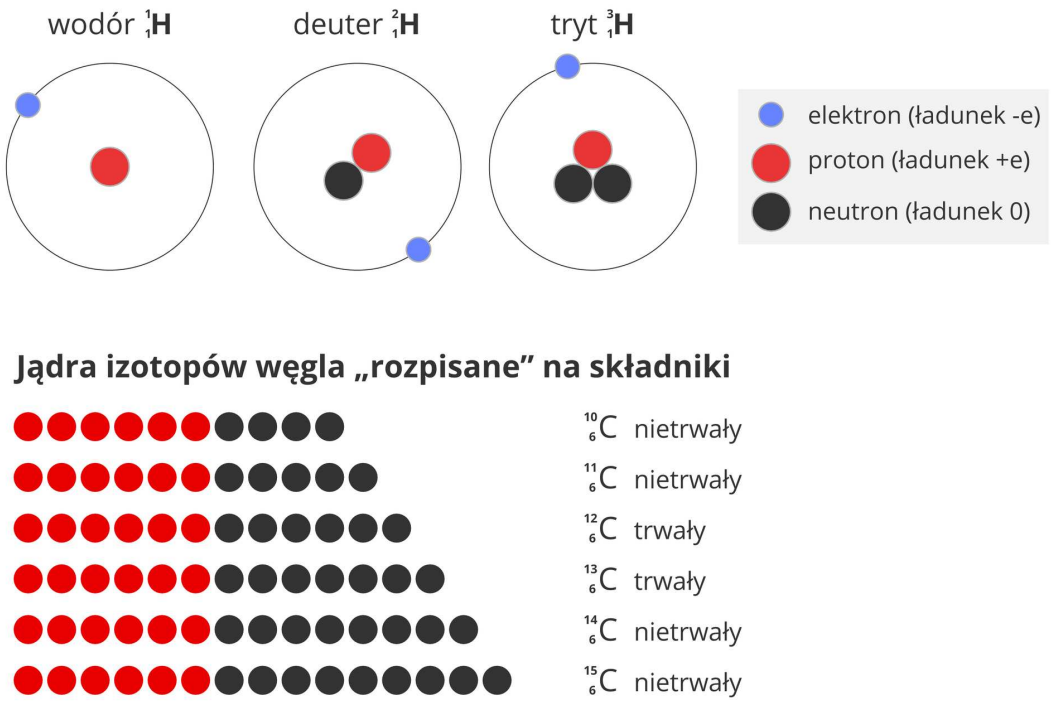
Wiesz już, że jądro każdego atomu składa się z pewnej liczby dodatnio naładowanych protonów oraz elektrycznie obojętnych neutronów.
Liczbę protonów w jądrze oznaczamy literą „Z". Jest to tak zwana **liczba atomowa** lub porządkowa. Iloczyn $Z \cdot e$ jest ładunkiem jądra atomu. W atomie elektrycznie obojętnym liczba protonów w jądrze jest równa liczbie elektronów znajdujących się na powłokach wokół jądra. Z kolei liczba wszystkich nukleonów (protonów i neutronów) w jądrze jest oznaczana literą „A". To tzw.**liczba masowa**.

Będziemy używali pewnego symbolicznego, uproszczonego zapisu. Jeżeli dany pierwiastek X będzie miał liczbę masową A i liczbę atomową (porządkową) Z, zapis ten będzie wyglądał następująco:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X}$$

Odmiany tego samego pierwiastka różniące się liczbą masową (liczbą neutronów) nazywamy **izotopami**. Pierwiastki występujące w przyrodzie są mieszaninami swoich izotopów, w tym radioaktywnych (promieniotwórczych).

Jądra wszystkich izotopów danego pierwiastka mają tę samą liczbę atomową „Z”, ale różnią się wartościami liczby masowej „A”.



Górna część rysunku przedstawia izotopy wodoru: wodór, deuter i tryt. Dolna część to zestaw izotopów węgla

Przykładowo: wodór występuje w trzech odmianach. Oprócz zwykłej, dobrze znanej, gdzie w jądrze istnieje tylko jeden proton, jądro wodoru może mieć dodatkowo jeden lub dwa neutrony. Izotop wodoru z jednym neutronem i jednym protonem to tzw. deuter. Izotop wodoru z dwoma neutronami i jednym protonem to tryt.

> **Polecenie 4**
>
> Według przedstawionego wyżej zapisu symbolicznego zapisz liczby masowe i atomowe niobu, uranu, węgla i rtęci.

Podsumowanie

- Atom zbudowany jest z ciężkiego jądra o niewielkich rozmiarach i powłoki elektronowej.
- Elektrony krążą wokół jądra – poruszają się po zamkniętych orbitach; atom jest obojętny elektrycznie. W atomie obojętnym elektrycznie liczba protonów odpowiada liczbie elektronów.
- Rozmiar jądra atomowego wynosi około $10^{-15}\mathrm{m}$, a atomu – 10^{-10} m.
- Jądro – centralna część atomu – zbudowane jest z nukleonów: protonów i neutronów.
- Masy protonu i neutronu są zbliżone (nieco większa jest masa neutronu). Ładunek protonu jest dodatni i równy wartości ładunku elementarnego $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\mathrm{C}$; neutron jest obojętny elektrycznie.
- Przez wiele lat uważano, że proton i neutron to cząstki niepodzielne. Okazało się jednak, że zarówno proton, jak i neutron składają się jeszcze z tzw. kwarków. Kwarki oddziałują ze sobą za pomocą gluonów. Gluony „sklejają" ze sobą kwarki i w rezultacie powstają cząstki takie jak protony i neutrony. Panuje przekonanie, że kwarki są fundamentalnym budulcem materii i są niepodzielne.
- Zwarta struktura jądra jest wynikiem równowagi między siłami odpychającymi, jakimi oddziałują na siebie protony (charakter elektryczny), a przyciągającymi siłami jądrowymi. Siły jądrowe są bardzo silne i działają na bardzo małych odległościach. Jądro atomu (z wyjątkiem atomu wodoru) nie mogłoby istnieć bez neutronów.
- Liczbę protonów w jądrze (równą liczbie elektronów atomu) nazywamy liczbą atomową (porządkową) i oznaczamy literą „Z". Ładunek jądra można obliczyć ze wzoru: $Z \cdot e$.
- Liczbę nukleonów (protonów i neutronów) nazywamy liczbą masową i oznaczamy literą „A.
- Symbolicznie budowę atomu opisujemy jako:
  ${}^{A}_{Z}X$,
  gdzie:
  X – symbol atomu pierwiastka;
  A – liczba masowa;
  Z – liczba porządkowa (atomowa).
- Jądra atomowe większości pierwiastków mogą występować w odmianach różniących się liczbą neutronów. Pierwiastki posiadające w jądrze różną liczbę neutronów nazywamy izotopami danego pierwiastka.
- Przykładami izotopów wodoru (${}^{1}_{1}\mathrm{H}$) mogą być deuter (${}^{2}_{1}\mathrm{H}$) i tryt (${}^{3}_{1}\mathrm{H}$). Węgiel ma znane trzy izotopy: ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$. Ten ostatni jest promieniotwórczy.

Praca domowa

Polecenie 5.1

Wpisz odpowiednie symbole pierwiastków w miejsce czarnych kwadratów:

$$^{23}_{11}\blacksquare;\ ^{60}_{28}\blacksquare;\ ^{64}_{28}\blacksquare;\ ^{205}_{81}\blacksquare;\ ^{118}_{50}\blacksquare;\ ^{73}_{32}\blacksquare$$

Zadania podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Które informacje są prawdziwe, a które fałszywe?

	Prawda	Fałsz
Protony i neutrony to cząstki elementarne.	◯	◯
Protony i neutrony zbudowane są z innych cząstek nazywanych kwarkami.	◯	◯
W jądrze jest zawsze tyle samo protonów co neutronów.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Uzupełnij tekst.

Pierwiastek, który zawiera w swoim jądrze 7 protonów i siedem neutronów to [ ]. Pierwiastek o liczbie atomowej wynoszącej 18 to [ ]. Jądro niobu ma 41 protonów i 52 neutronów, więc jego liczba masowa wynosi [ ].

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Słowniczek

antycząstka

– cząstka będąca „lustrzanym odbiciem” cząstki elementarnej; każdej cząstce elementarnej możemy przyporządkować antycząstkę o identycznej masie, czasie życia i innych cechach, ale o przeciwnym znaku ładunku (np. elektron – pozyton).

antyproton

– antycząstka protonu.

cząstka elementarna

– podstawowy i niepodzielny składniki materii Obecnie nie można sformułować ścisłej definicji tego pojęcia. Do cząstek elementarnych pierwotnie zaliczano proton, neutron i elektron; sytuację zmieniło odkrycie kwarków.

gluony

– bezmasowe niepodzielne cząstki, będące nośnikami silnych oddziaływań; spajają ze sobą kwarki w nukleonach.

hiperjądro

– nietrwałe jądro atomowe, które dodatkowo (oprócz protonów i neutronów) ma co najmniej jeden hiperon.

hiperon lambda

– cząstka obojętna elektrycznie, która może stanowić składnik jądra atomowego.

izotop

– odmiana atomu tego samego pierwiastka, różniąca się liczbą neutronów.

kwarki

– niepodzielne cząstki, z których zbudowane są protony i neutrony.

liczba atomowa (liczba porządkowa)

– liczba protonów w jądrze, oznaczana literą „Z”.

liczba masowa

– liczba nukleonów w jądrze (suma protonów i neutronów tworzących jądro atomowe).

nukleon

– składnik jądra atomowego; proton lub neutron.

siły jądrowe

– siły zdolne do pokonania elektrycznych sił odpychania między protonami; utrzymują jądro atomowe w całości. Charakteryzują się krótkim zasięgiem i olbrzymią wartością (stukrotnie większą niż siły oddziaływań elektrostatycznych).

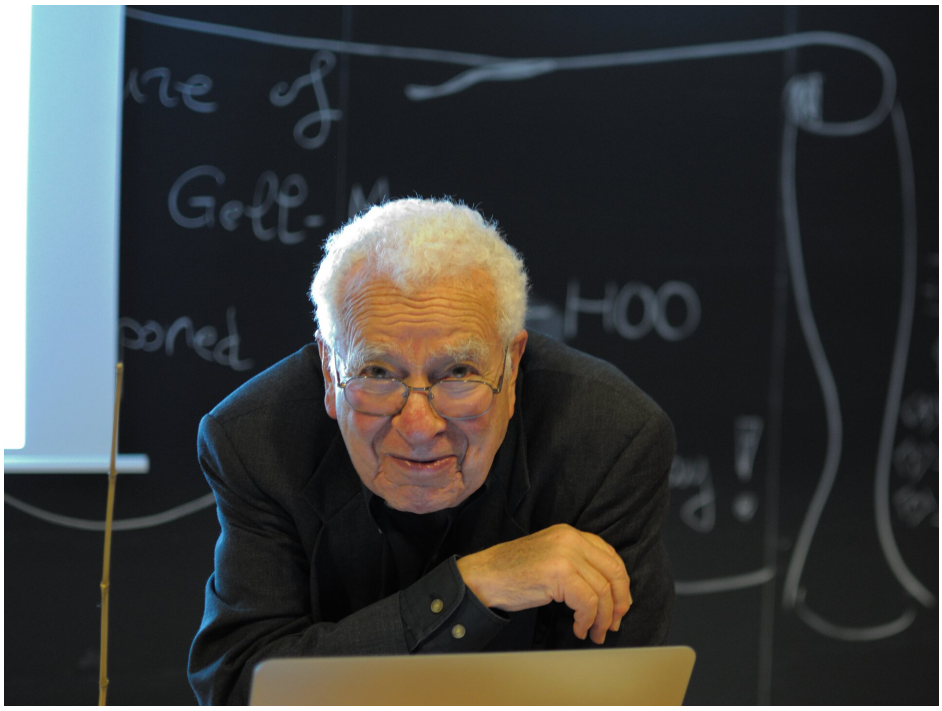
Biogramy

Źródło: Los Alamos National Laboratory (https://commons.wikimedia.org), public domain.

James Chadwick

20.10.1891–24.07.1974

Brytyjski fizyk. W 1935 r. otrzymał Nagrodę Nobla za odkrycie neutronu – nowej cząstki w jądrze atomu. Współpracownik Ernesta Rutherforda, w czasie II wojny światowej uczestnik projektu „Manhattan".



Źródło: Melirius (https://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY-SA 3.0.

Murray Gell-Mann

ur. 15.09.1929

Fizyk teoretyk. Prowadzi badania dotyczące fizyki cząstek elementarnych. Postulował istnienie hiperonu i kwarku. Wprowadził nową liczbę kwantową – dziwność.

Źródło: Tomorrow Sp.z o.o., licencja: CC BY 3.0.

George Zweig

ur. 30.05.1937

George Zweig jeszcze jako student wysunął (niezależnie od Murraya Gell-Manna) hipotezę, że cząstki takie jak neutron i proton mają określoną strukturę wewnętrzną i nie mogą być traktowane jako cząstki elementarne. Od lat 70. prowadzi badania w zakresie neurobiologii.

Przemiany jądrowe

Wiesz już, że radioaktywne jądra pierwiastków wysyłają promieniowanie α, β i γ. Co się dzieje z jądrami atomów promieniotwórczych? Jakie zmiany w nich zachodzą? Co powstaje w wyniku tych przemian? Jak szybko odbywają się te zmiany? Oprócz pierwiastków radioaktywnych występujących w przyrodzie pojawiają się nowe – są nimi np. odpady promieniotwórcze powstające w elektrowniach jądrowych. Jak długo te odpady pozostaną radioaktywne i będą stanowić zagrożenie? Czytajcie dalej, a znajdziecie odpowiedzi na te pytania.

Na początku XX wieku fizyków fascynowała stała obecność helu w związkach pierwiastków promieniotwórczych. Badania tego fenomenu doprowadziły do odkrycia przewidzianego wcześniej teoretycznie zjawiska przemiany promieniotwórczej pierwiastków. Obecnie wykorzystuje się je m.in. do datowania, czyli określania wieku próbek, znalezisk i monumentów takich jak Stonehenge, który – jak się okazało po badaniach metodą radiowęglową przeprowadzonych w 2008 roku – budowany był stopniowo od około 3100 do 1600 roku p.n.e.

Już potrafisz

- stwierdzić, co to jest promieniowanie jądrowe, i wymienić jego najważniejsze rodzaje;
- podać definicję promieniowania jonizującego;
- wymienić właściwości fizyczne promieniowania alfa, beta i gamma.

Nauczysz się

- podawać definicję aktywności pierwiastka;
- prawa rozpadu promieniotwórczego;
- obliczać liczbę jąder, które jeszcze nie uległy rozpadowi promieniotwórczemu;
- podawać definicję czasu połowicznego rozpadu promieniotwórczego;

- zapisywać równania przemian jądrowych i przewidywać, jakie nowe jądra powstają w procesie rozpadu promieniotwórczego.

1. Prawo rozpadu promieniotwórczego

Rozpad promieniotwórczy zachodzi zgodnie z prawem, które nosi nazwę **prawa rozpadu promieniotwórczego**. Warto podkreślić, że termin ten odnosi się do samorzutnych przemian jąder macierzystych w jądra pochodne. Proces ten jest naturalny i ma charakter statystyczny. Nie możemy przewidzieć, kiedy konkretne jądro ulegnie rozpadowi. Liczba rozpadów będzie tym większa, im większa będzie ilość substancji radioaktywnej i im dłuższy czas będziemy rozpatrywać. Prawo rozpadu dotyczy także izotopów promieniotwórczych uzyskiwanych sztucznie w wyniku reakcji jądrowych.

Można zapisać stosunkowo prostą zależność:

$$\Delta N = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t,$$

Oznacza ona, że liczba jąder rozpadających się w czasie Δt jest proporcjonalna (λ – współczynnik proporcjonalności zwany stałą rozpadu) do liczby atomów w próbce i do czasu trwania rozpadu. Próbka zawierająca dwa razy więcej jąder danego pierwiastka będzie wysyłać dwa razy więcej cząstek α lub β w tym samym czasie. Oznacza to, że dwa razy więcej jąder będzie ulegać rozpadowi. Znak „−” oznacza, że liczba jąder się zmniejsza.

Zapamiętaj!

Wyrażenie:

$$A(t) = \frac{\Delta \mathrm{N}}{\Delta \mathrm{t}}$$

nazywamy aktywnością promieniotwórczą. Aktywność oznacza liczbę przemian jądrowych w danej ilości substancji, które zachodzą w określonej jednostce czasu.

Jednostką aktywności promieniotwórczej jest jeden **bekerel (Bq)**:

$$1\ \mathrm{Bq} = \frac{1\ \mathrm{rozpad}}{1\ \mathrm{s}}$$

Zapamiętaj!

Aktywność promieniotwórcza jest równa jednemu bekerelowi, jeśli w czasie jednej sekundy następuje jeden rozpad promieniotwórczy.

Polecenie 1

Oblicz aktywność bryłki nieznanej substancji, w której dochodzi do 139 rozpadów promieniotwórczych w ciągu godziny.

My sami i nasze otoczenie stanowimy źródło promieniowania korpuskularnego (wysyłanie cząstek). Poniższa tabela podaje aktywność naturalnych pierwiastków i źródeł (w bekerelach).

Aktywność promieniotwórcza wybranych źródeł naturalnych w odniesieniu do jednostki masy lub objętości

Źródło	Aktywność promieniotwórcza
banan	$125 \frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{kg}}$
mleko	$50 \frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{l}}$
woda morska	$12 \frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{l}}$
granit	$7000 \frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{kg}}$
5-letnie dziecko (20 kg)	$600\ \mathrm{Bq}$
dorosła osoba (70 kg)	$10\,000\ \mathrm{Bq}$

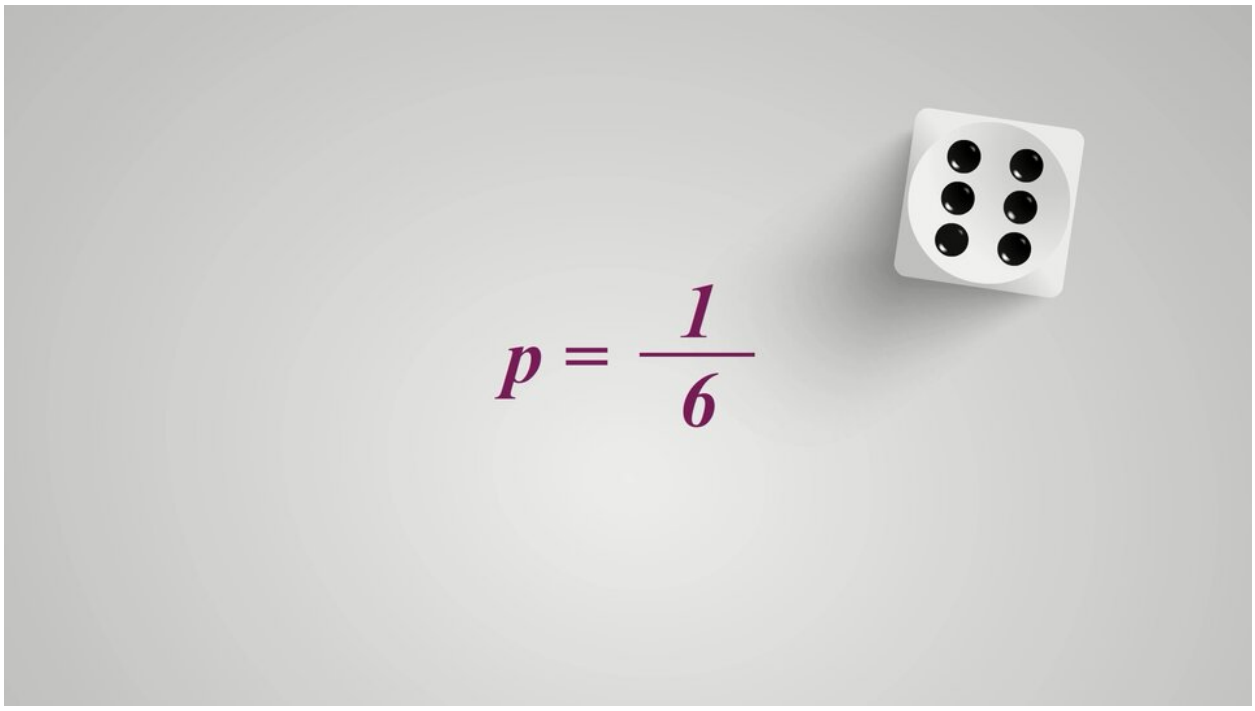
Na podstawie zależności:

$$\Delta N = -\lambda \cdot N \cdot \Delta t$$

i definicji aktywności, możemy zapisać, że:

$$A = \lambda \cdot N(t)$$

Jeżeli liczba jąder radioaktywnych maleje (a tak jest zawsze), to maleje również aktywność promieniotwórcza danej substancji.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Aktywność pierwiastka promieniotwórczego

Animacja prezentująca rozpad promieniotwórczy. Prezentująca sposób obliczania aktywności promieniotwórczej, jej definicję, wzór oraz przykład obliczenia.

Aby opisać, jak zmienia się liczba jąder danego pierwiastka z upływem czasu, wygodnie jest wprowadzić pewne pojęcie.

Czas, po upływie którego w próbce pozostała połowa początkowej liczby jąder, to **okresem połowicznego rozpadu** (niekiedy nazywany **okresem połowicznego zaniku**). Czas połowicznego zaniku oznaczamy jako „$T_{1/2}$" lub po prostu „T". Po upływie czasu równego dwóm okresom połowicznego zaniku zostaje $1/4$ jąder w stosunku do ich liczby początkowej, po trzech okresach połowicznego zaniku – $1/8$ itd.

Czas połowicznego rozpadu wybranych źródeł promieniotwórczych

Źródło promieniotwórcze	Czas połowicznego rozpadu $(T_{1/2})$	Rodzaj rozpadu
$^{222}_{86}\mathrm{Rn}$	3,82 dni	α
$^{14}_{6}\mathrm{C}$	5730 lat	β
$^{131}_{53}\mathrm{J}$	8,1 dni	β
$^{235}_{92}\mathrm{U}$	$7{,}1 \cdot 10^8$ lat	α
$^{232}_{90}\mathrm{Th}$	$1{,}4 \cdot 10^{10}$ lat	α

Czas połowicznego zaniku jąder atomów jest różny dla różnych izotopów. Może być równy zarówno bilionowym częściom sekundy, jak i miliardom lat.

W naukach takich jak historia, archeologia, biologia i geologia ważną rolę odgrywa nietrwały izotop węgla $^{14}\mathrm{C}$, którego czas połowicznego zaniku wynosi 5730 lat. Izotop węgla $^{14}\mathrm{C}$ stanowi niewielką domieszkę całej zawartości atomów węgla w materii i jeśli zmierzymy zawartość tego izotopu w danym organizmie lub przedmiocie, możemy oszacować datę powstania przedmiotu bądź śmierci organizmu.

Polecenie 2

Okres połowicznego zaniku pewnego izotopu wynosi 4 godziny. Uzupełnij poniższą tabelkę.

Rozpad izotopu promieniotwórczego w funkcji czasu

Czas [h]	0	4	8	12	16	20	24	28
Liczba jąder	$6{,}4 \cdot 10^{10}$							

Narysuj wykres zależności liczby jąder, które uległy rozpadowi, od czasu trwania rozpadu dla tego izotopu.

Wyprowadzenie dokładnej zależności liczby jąder od czasu wymaga wiedzy na poziomie matematyki wyższej. Ale jeśli skorzystamy z pojęcia okresu połowicznego zaniku, to możemy otrzymać taką zależność w prosty sposób. Zapisz, jaka część początkowej liczby jąder pozostanie po upływie kolejnych okresów.
Na początku było N_0, potem kolejno: $\frac{N_0}{2}$, $\frac{N_0}{4}$, $\frac{N_0}{8}$, $\frac{N_0}{16}$, $\frac{N_0}{32}$. Jak zapewne zauważyliście, możemy ten ciąg zapisać jako: N_0, $\frac{N_0}{2^1}$, $\frac{N_0}{2^2}$, $\frac{N_0}{2^3}$, $\frac{N_0}{2^4}$, $\frac{N_0}{2^5}$, a to z kolei da się uprościć do postaci (biorąc pod uwagę, ile okresów połowicznego zaniku upłynęło):

$$N = \frac{N_0}{2^n},$$

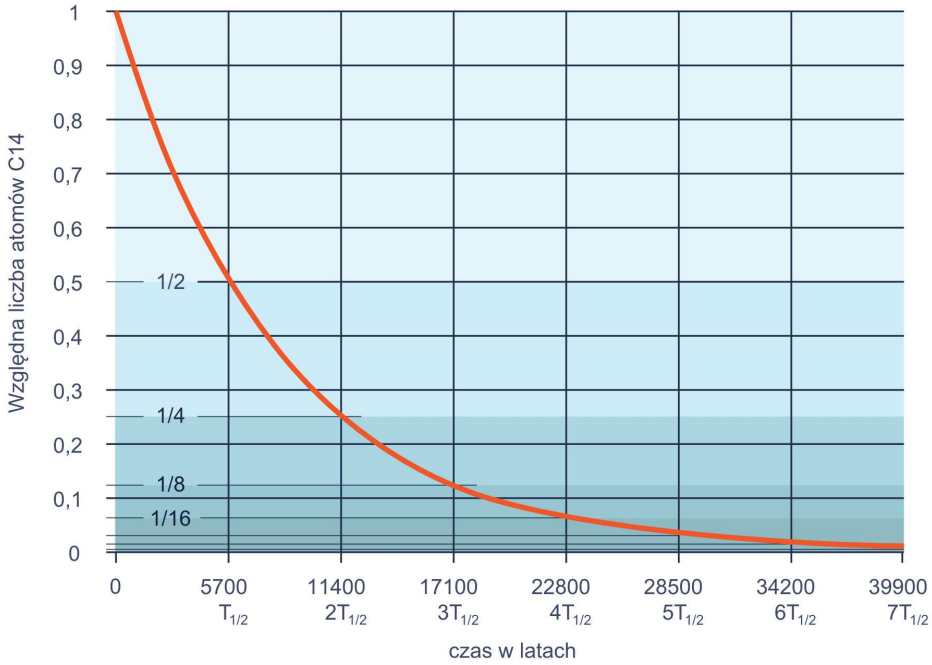
gdzie n jest liczbą okresów połowicznego zaniku, które upłynęły od momentu rozpoczęcia procesu. Oczywiście:

$$n = \frac{t}{T_{1/2}}$$

i ostatecznie:

$$N(t) = N_0 \bullet 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Ostatnia zależność pozwoli na obliczenie liczby jąder w dowolnym czasie. Potrzebne do tego będą kalkulator naukowy albo arkusz kalkulacyjny.



Rozpad promieniotwórczy izotopu węgla ^{14}C

Polecenie 3

Uzasadnij, dlaczego zamiast N i N_0 nie można używać mas próbek $m(t)$ i m_0.

Polecenie 4

Czas połowicznego zaniku pewnego pierwiastka wynosi 110 minut. Wykaż, że po 330 minutach pozostanie w tej próbce 12,5% jąder tego pierwiastka (w stosunku do stanu początkowego). Czy masa końcowa całej próbki będzie stanowiła 12,5% początkowej masy tej próbki? Dlaczego?

2. Reguły przesunięć

Pierwiastki, które emitują promieniowanie jądrowe α i β, ulegają przemianom jądrowym, co prowadzi do zamiany tych pierwiastków w inne pierwiastki, o czym mówi reguła przesunięć.

Na początku 1913 r. kilku fizyków (w tym Polak Kazimierz Fajans pracujący w Niemczech) sformułowało tzw.**regułę przesunięć**, określaną obecnie mianem reguły przesunięć

Soddy'ego-Fajansa. Podczas rozpadu α przybiera ona poniższą postać:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{4}_{2}\alpha + {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} $$

Kiedy jądro pierwiastka X emituje cząstkę α, przekształca się w jądro pierwiastka Y, który ma o dwa ładunki dodatnie w jądrze mniej w porównaniu z pierwiastkiem X. Oznacza to, że nowy pierwiastek w stosunku do wyjściowego jest przesunięty o dwa miejsca w stronę mniejszych liczb porządkowych, a o cztery zmniejsza się jego liczba masowa.

W przypadku rozpadu β następuje zwiększenie ładunku jądra, a nowy pierwiastek jest przesunięty o jedno miejsce w stronę większych liczb porządkowych:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{0}_{-1}\beta + {}^{A}_{Z+1}Y, $$

Zapis ${}^{0}_{-1}\beta$ oznacza cząstkę o praktycznie (w stosunku do masy **nukleonów**) zerowej masie i ładunku ujemnym.

Co właściwie dzieje się w jądrze atomowym podczas***rozpadu*** β?

> **Ciekawostka**
>
> Neutrino to jedna z najbardziej tajemniczych cząstek elementarnych. Nie ma ładunku elektrycznego, a masa spoczynkowa tej cząstki jest bliska zeru. Oddziałuje wyjątkowo słabo z materią. Neutrina można rejestrować tylko pośrednio, na podstawie obserwacji rezultatów oddziaływań tych cząstek z jądrami atomów. Gdy neutrino zostanie wychwycone przez jądro, co statystycznie jest bardzo mało prawdopodobne, ulega rozpadowi, którego efekty możemy zaobserwować w specjalnych detektorach.
> **Ciekawostka**
>
> Istnienie neutrin teoretycznie przewidział **Pauli** w 1930 r. Podcza analizy rozkładu energii elektronów w rozpadzie beta, stwierdził, że w tym procesie często brakuje znacznej części początkowej wartości energii. Jak zapewne pamiętasz, w fizyce obowiązuje zasada zachowania energii: suma energii ciał w układzie przed procesem musi równać się sumie ich energii po zakończeniu procesu. W 1930 r. uważano, że w rozpadzie beta nie była spełniona zasada zachowania energii albo że istniała jeszcze jedna, trudno wykrywalna cząstka, która unosiła ze sobą część początkowej energii układu.

Eksperymentalne potwierdzenie hipotezy Pauliego o istnieniu neutrina nastąpiło dopiero w 1956 r.

Zasób interaktywny dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/D5AZrZPic

Szereg promieniotwórczy uranowo-radowy. Czasami nowo powstałe jądro jest niestabilne i ulega kolejnym rozpadom tak długo, dopóki w efekcie przemian nie powstanie jądro stabilne

Reguły przesunięć wyjaśniły wiele niezrozumiałych dotąd zjawisk, obserwowanych podczas badania właściwości różnych pierwiastków. Jednak dopiero odkrycie neutronu ostatecznie rozwiązało zagadkę istnienia**izotopów**.

Warto podkreślić, że w powyższych równaniach przemian jądrowych obowiązują dwie zasady. Jedna to znana już wcześniej**zasada zachowania ładunku**. Zarówno w rozpadzie α, jak i β suma ładunków przed rozpadem jest równa sumie ładunków cząstek po rozpadzie. Drugą zasadę sformułujemy jako **zasadę zachowania liczby nukleonów**.

Przykład 1

Rad $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ ulega rozpadowi α. Schemat rozpadu jest następujący:

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{222}_{86}\mathrm{Rn}$$

Skorzystaliśmy tu z obu wymienionych wyżej zasad: suma ładunków przed rozpadem jest równa 88, suma po rozpadzie również wynosi $86 + 2 = 88$. Suma nukleonów po rozpadzie to $4 + 222 = 226$, czyli tyle samo co przez rozpadem.

Przykład 2

Jeden z izotopów kobaltu $^{60}_{27}\mathrm{Co}$ emituje cząstki β. Zapis rozpadu jest następujący:

$$^{60}_{27}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{0}_{-1}\beta + {}^{60}_{28}\mathrm{Y}$$

Liczba nukleonów jest stała i wynosi 60, suma ładunków przed rozpadem wynosi 27 i tyle samo po rozpadzie: $-1 + 28 = 27$.

W**układzie okresowym** sprawdzamy, że pierwiastkiem Y jest nikiel.

Przykładem rozpadu, w którym powstaje pozyton, jest rozpad jednego z izotopów fosforu: $^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{0}_{+1}\beta + {}^{30}_{14}\mathrm{Si}$. Sprawdź, czy spełnione są zasady zachowania wymienione wyżej. Zapiszcie ogólny schemat takiego rozpadu.

> **Polecenie 5**
>
> Na podstawie wykresu rozpadów dla szeregu uranowo-radowego, zapisz kolejne rozpady, zaczynając od izotopu $^{238}\mathrm{U}$ i kończąc na izotopie polonu $^{218}\mathrm{Po}$.

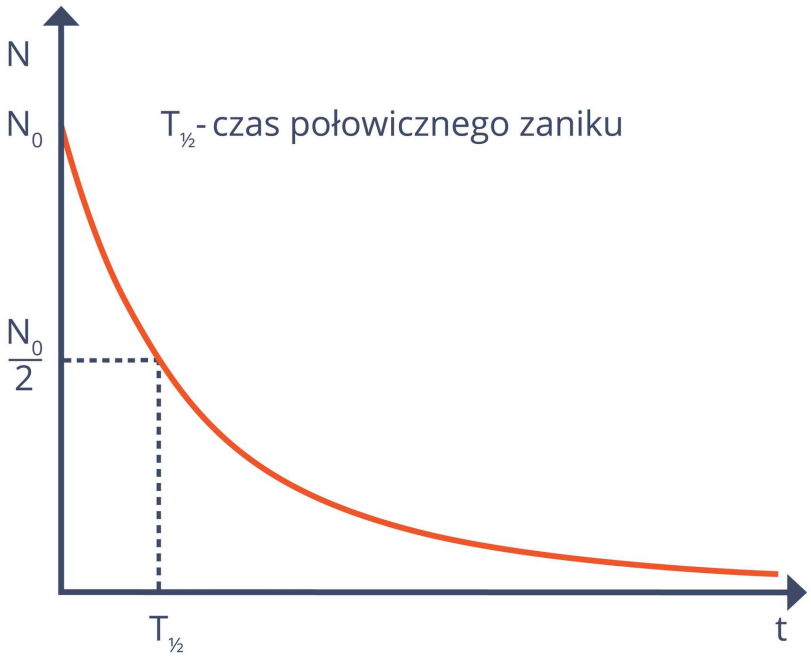
Podsumowanie

- Izotopy promieniotwórcze dzielimy na stabilne (trwałe) i nietrwałe. Czas życia izotopów nietrwałych (promieniotwórczych) jest krótki, a podczas rozpadu emitują one promieniowanie α, β lub γ.
- W celu określenia stopnia radioaktywności pierwiastka wprowadzono pojęcie aktywności. Wyrażenie $\mathrm{A}(t) = \frac{\Delta \mathrm{N}}{\Delta \mathrm{t}}$ nazywamy aktywnością danej próbki. Oznacza ono liczbę rozpadających się jąder w jednostce czasu (szybkość rozpadów). Aktywność ta jest proporcjonalna do aktualnej liczby jąder danego pierwiastka: $A(t) = \lambda \cdot N(t)$. Ponieważ liczba jąder radioaktywnych maleje w wyniku rozpadów (a tak jest zawsze), to aktywność spada.
- Jednostką aktywności promieniotwórczej jest 1 bekerel (Bq):

$$1\ \mathrm{Bq} = \frac{1\ \mathrm{rozpad}}{1\ \mathrm{s}}$$

- Aktywność promieniotwórcza jest równa jednemu bekerelowi, jeśli w czasie jednej sekundy następuje jeden rozpad promieniotwórczy.
- Czas, po upływie którego w próbce pozostała połowa początkowej liczby jąder, to okres połowicznego zaniku (niekiedy nazywany również czasem połowicznego rozpadu). Oznaczamy go T lub (częściej) $T_{1/2}$.
- Za pomocą pojęcia okresu połowicznego zaniku możemy zapisać prawo rozpadu w następującej formie:

$$\mathrm{N}(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$



Prawo rozpadu promieniotwórczego

- Rozpady α i β podlegają regułom przesunięć (regułom Soddy'ego-Fajansa).
  Rozpad α: ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{4}_{2}\alpha + {}^{A-4}_{Z-2}Y$.

  Rozpad β: ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{0}_{-1}\beta + {}^{A}_{Z+1}Y$,
- Promieniowanie γ (gamma) powstaje podczas rozpadów α lubβ i jest skutkiem uwolnienia przez jądro nadmiaru energii w formie kwantów promieniowania elektromagnetycznego o bardzo dużej energii.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Które z poniższych stwierdzeń są prawdziwe, a które nie?

	Prawda	Fałsz
Czas połowicznego zaniku to czas, w którym rozpadnie się połowa jąder w danej próbce.	◯	◯
W każdym rozpadzie alfa następuje zmniejszenie się ładunku jądra.	◯	◯
Szybkość rozpadu promieniotwórczego to inaczej aktywność próbki.	◯	◯
W wyniku rozpadu beta następuje zmniejszenie się liczby protonów w jądrze.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Praca domowa

Praca domowa

Polecenie 6.1

Jądro powstałe w wyniku rozpadu może być dalej niestabilne i ulegać dalszym rozpadom. Jądro atomu uranu $^{238}_{92}\mathrm{U}$ rozpada się tak, że powstaje jądro innego izotopu uranu $^{234}_{92}\mathrm{U}$. Jakie cząstki zostały wypromieniowane w tych rozpadach i ile ich było?

Polecenie 6.2

W przyrodzie istnieją tzw. szeregi promieniotwórcze. Dzieje się tak dlatego, że (tak jak w przykładzie powyżej) nowo powstałe jądro jest niestabilne i ulega kolejnym rozpadom tak długo, aż w efekcie przemian nie powstanie jądro stabilne. Fragment jednego z szeregów może być zapisany w następujący sposób:
$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{214}_{82}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{214}_{83}X \rightarrow {}^{214}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{210}_{82}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{210}_{83}X \rightarrow {}^{210}_{84}\mathrm{Po}$
Skorzystaj z układu okresowego i rozszyfruj pierwiastek X.

1. Zapisz wszystkie przejścia od jednego jądra do kolejnego i zidentyfikuj emitowaną cząstkę.

Polecenie 6.3

Odszukaj w internecie inne szeregi promieniotwórcze. Przeanalizuj ich przebieg, sprawdź, co jest produktem końcowym.

Polecenie 6.4

W czasie równym okresowi połowicznego zaniku połowa jąder ulega rozpadowi. A co stanie się w czasie połowy okresu połowicznego zaniku? W odpowiedzi wykorzystaj wykres zależności liczby jąder od czasu dla pierwiastków radioaktywnych.

Słowniczek

aktywność pierwiastka

– szybkość rozpadów promieniotwórczych izotopu obliczana jako iloraz liczby jąder (ΔN), które uległy rozpadowi, i czasu (Δt), w którym ten rozpad nastąpił.

czas połowicznego rozpadu

patrz: okres połowicznego rozpadu

izotopy stabilne

– nieradioaktywne izotopy lub pierwiastki promieniotwórcze o długim czasie rozpadu.

neutrino

– cząstka niezwykle trudna do wykrycia, słabo oddziałująca z materią, obojętna elektrycznie, mająca masę spoczynkową bliską zeru; w 1930 r. istnienie neutrina przewidział Wolfgang Pauli; doświadczalne potwierdzenie istnienia tej cząstki nastąpiło dopiero w 1956 r.

okres połowicznego rozpadu (okres połowicznego zaniku)

– czas, po upływie którego w próbce pozostaje połowa początkowej liczby jąder.

reguła przesunięć

– reguła pozwalająca określić, w jaki sposób ulega zmianie liczba masowa (A) i liczba atomowa (Z) jądra izotopu przomieniotwórczego ulegają zmianie w czasie rozpadu alfa i beta.

układ okresowy

– tabela będąca zestawieniem wszystkich znanych pierwiastków chemicznych, uporządkowanych zgodnie z rosnącą wartością ich liczby atomowej.

zasada zachowania ładunku

– zasada, która wyraża doświadczalnie obserwowany fakt, że sumaryczny ładunek elektryczny układu (elektrycznie izolowanego) nie zmienia się mimo przemian, którym ten układ ulega.

zasada zachowania liczby nukleonów

– zasada mówiąca o tym, że podczas przemiany jądrowej liczba nukleonów nie ulega zmianie.

Biogram

Źródło: Nobel foundation (http://commons.wikimedia.org), public domain.

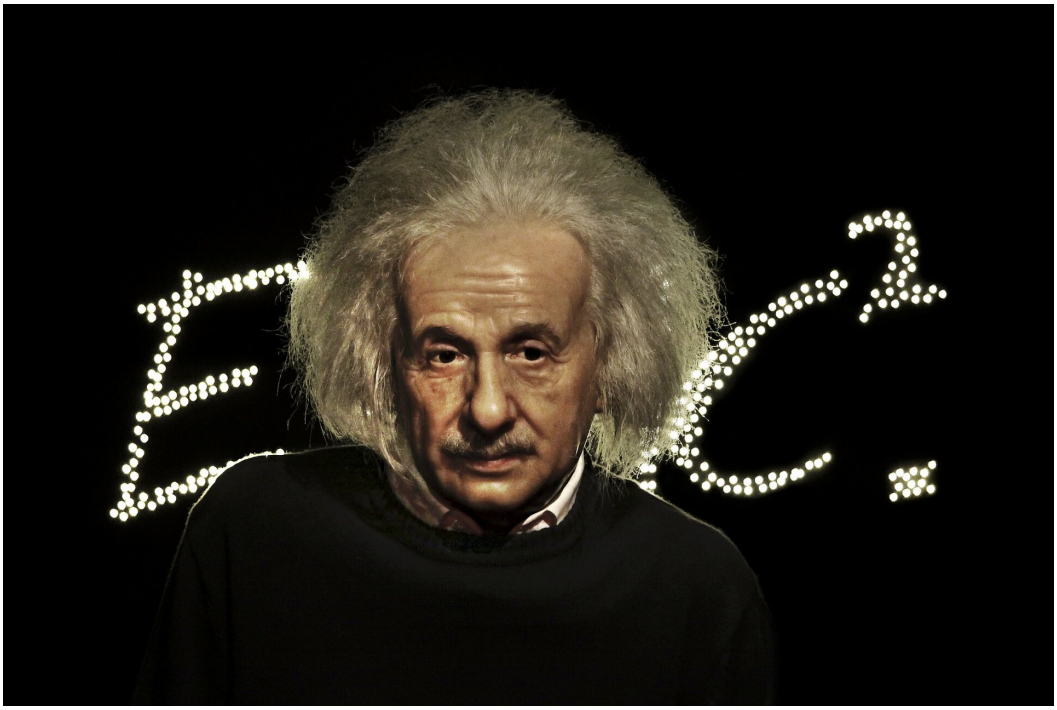
Wolfgang Pauli

25.04.1900–15.12.1958

Prace Wolfganga Pauliego przyczyniły się do rozwoju mechaniki kwantowej, teorii cząstek elementarnych i kwantowej teorii pola. Fizyk postulował w 1931 r. istnienie neutrina. Największe osiągnięcie tego naukowca to bez wątpienia tzw. zakaz Pauliego – zasada opisująca sposób obsadzania stanów kwantowych w układach fermionów.

Dlaczego jądro jest trwałe – deficyt masy i energia wiązania

Co wiąże nukleony w jądrze? Jaka energia jest potrzebna, aby rozbić jądro na mniejsze fragmenty? Jednym z elementów szczególnej teorii względności ogłoszonej przez Alberta Einsteina w 1905 r. była równoważność masy i energii. Jego odkrycie pozwoliło wyjaśnić pochodzenie energii wiązania – energii łączącej składniki jądra atomowego w jedną spójną strukturę. Jeśli chcecie poznać podstawowe prawa rządzące materią i masą na poziomie atomowym, to znaleźliście się we właściwym miejscu naszego podręcznika.



Najsłynniejsze równanie świata, wiążące masę z energią, odkrywa przed nami tajemnicę ogromu sił wiążących cząstki elementarne wewnątrz jąder atomów, a jednocześnie stanowi swego rodzaju obietnicę: A gdyby tak udało się tę energię wykorzystać?

Już potrafisz

- wymienić założenia budowy modelu atomu według Bohra;
- wymienić cząstki wchodzące w skład jąder atomów (nukleony);
- wymienić dwa podstawowe oddziaływania, które zachodzą między nukleonami – elektryczne oddziaływania odpychające oraz jądrowe oddziaływania przyciągające silne;
- podać definicję liczby masowej i atomowej (porządkowej);
- podać definicję izotopu i odróżnić izotopy na podstawie liczby masowej i porządkowej (atomowej);
- podać skład jądra na podstawie znajomości liczby masowej „A” i porządkowej „Z”;

- wymienić przykłady samorzutnego rozpadu niestabilnych jąder atomowych, zapisać schematy takich rozpadów za pomocą zasady zachowania ładunku i zasady zachowania liczby nukleonów.

Nauczysz się

- podawać definicję deficytu masy i wymieniać warunek jego występowania;
- zapisywać warunek równoważności masy i energii $E = m \cdot c^2$;
- podawać definicję energii wiązania jądra atomowego;
- obliczać wartość energii wiązania jądra i energii wiązania przypadającej na jeden nukleon dla dowolnego pierwiastka.

1. Energia wiązania

Świat zna **Alberta Einsteina** głównie dzięki wzorowi $E = mc^2$, który okazał się sztandarowym przykładem nowego sposobu postrzegania rzeczywiści przez fizykę współczesną. Wzór ten dowiódł, że masa i energia są równoważne. Zmiana masy układu może zachodzić wskutek wymiany nie tylko substancji z otoczeniem, lecz także energii. Masa i energia stały się jakościowo różnymi postaciami materii.

Jeśli znamy masę protonu i neutronu oraz wiemy, że atom składa się z protonów (Z) i neutronów ($A - Z$), to możemy obliczyć masę jądra atomu. W tym celu korzystamy ze wzoru:

$$m_{\text{jądra}} = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n$$

Okazuje się jednak, że wzór ten daje niezgodne wyniki w porównaniu z danymi eksperymentalnymi. **Masa jądra jest bowiem zawsze mniejsza niż suma mas jego poszczególnych składników** (nukleonów).

Ten ubytek masy, czy też **deficyt masy**, obliczamy według wzoru:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_j,$$

gdzie M_j to rzeczywista masa jądra danego pierwiastka.

Ubytek masy związany jest z oddziaływaniami jądrowymi i energią potrzebną do utrzymania jądra atomowego w całości. Podczas powstawania jądra energia związana z ubytkiem masy została zamieniona na inną formę energii równą $\Delta E = \Delta mc^2$.

Obliczmy zatem energię wiązania dla jąder atomowych. Weźmy pod uwagę jądro helu, o którym tak wiele mówiliśmy. Składa się ono z 4 nukleonów: dwóch protonów i dwóch

neutronów.
Masa protonu: $1{,}673 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$

Masa neutronu: $1{,}675 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$

Masa jądra helu: $6{,}645 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg}$

Deficyt masy: $\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_j$

Czyli:

$$\Delta m = 2 \cdot 1{,}673 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg} + 2 \cdot 1{,}675 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg} - 6{,}645 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg} = 5{,}1 \cdot 10^{-29}\mathrm{kg}$$

Jak widać, deficyt masy stanowi zaledwie drobny ułamek masy czterech nukleonów – około $0{,}7\%$.

Deficytowi masy tej wielkości odpowiada równoważna mu energia obliczona z zależności $\Delta E = \Delta m c^2$.
Skoro $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$, to:

$$\Delta E = 5{,}100 \cdot 10^{-29}\mathrm{kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} = 4{,}590 \cdot 10^{-12}\mathrm{J}$$

Energię tą nazywamy **energią wiązania jądra** danego atomu.

$1{,}80 \cdot 10^9$

Wartości energii wiązania dla wybranych pierwiastków

Nazwa	A	$E_{\text{wiązania}}[\mathrm{J}]$	$E_{\text{wiązania}}[\mathrm{eV}]$	$E_{\text{wiązania}}[\mathrm{MeV}]$	$\frac{E_w}{A}\left[\frac{\mathrm{MeV}}{\text{nukleon}}\right]$
deuter	2	$3{,}57 \cdot 10^{-13}$	2231663	2,2	1,1
hel	4	$4{,}59 \cdot 10^{-12}$	28687500	28,4	7,1
lit	7	$6{,}07 \cdot 10^{-12}$	37956938	38,0	5,4
węgiel	12	$1{,}48 \cdot 10^{-11}$	92394563	92,4	7,7
tlen	16	$2{,}05 \cdot 10^{-11}$	$1{,}28 \cdot 10^8$	127,9	8,0
uran	238	$2{,}89 \cdot 10^{-10}$	$1{,}80 \cdot 10^9$	1804,9	7,6

W tabelce pojawiły się jednostki, z których jak dotąd nie korzystaliśmy. W fizyce obowiązuje międzynarodowy układ jednostek (**SI**), w którym jednostką energii jest jeden dżul (1 J). Jednak jednostka ta jest czasami zbyt duża, a czasami – zbyt mała. Przykładowo: gdyby nergia elektryczna zużywana w gospodarstwie domowym była wyrażana w dżulach, musielibyśmy operować ogromnymi liczbami sięgającymi setek milionów. Z tego powodu używamy jednostki energii elektrycznej zwanej**kilowatogodziną**(poznaliście ją już w gimnazjum) – 1 kWh. Jest ona równa 3 600 000 J.

W świecie atomów i cząstek elementarnych energia jednego dżula jest energią gigantyczną. Z obliczeń wynika (patrz wyżej), że energia wiązania jąder atomów jest równa w odniesieniu do małych jąder około jednej bilionowej dżula, a dla najcięższych jąder – jednej dziesięciomiliardowej dżula. Energia atomu wodoru na poziomie podstawowym wynosi $-2{,}1 \cdot 10^{-18}$ J. Z tych powodów fizycy używają jednostki energii zwanej**elektronowoltem**.

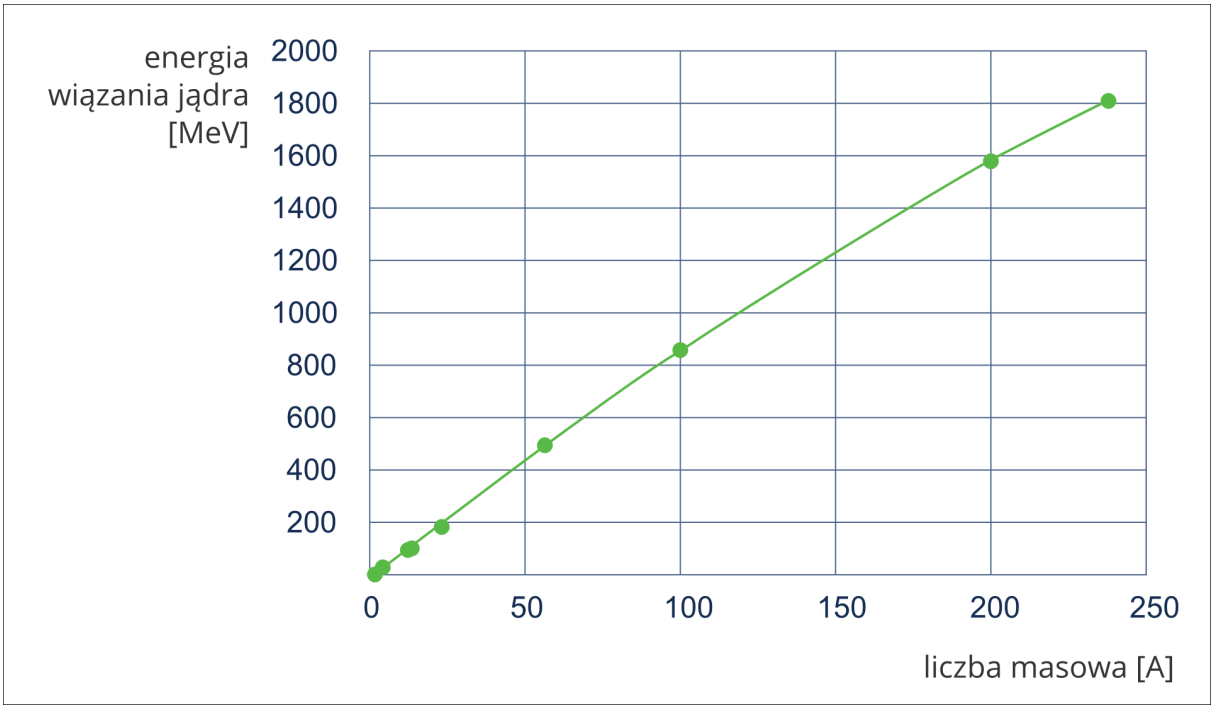
Jeden elektronowolt (eV) jest jednostką energii, która jest równoważna pracy wykonywanej przez siły elektryczne, kiedy przemieszczają elektron w polu elektrostatycznym między dwoma punktami, pomiędzy którymi panuje napięcie elektryczne 1 V. Odpowiada to w przybliżeniu wartości $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J. Pracę tę można wyrazić w dżulach, ale wygodniej jest to zrobić w elektronowoltach lub też posłużyć się wielokrotnościami tej jednostki: kiloelektronowoltem (keV), megaelektronowoltem (MeV) lub gigaelektronowoltem (GeV)

Wybrane wielokrotności jednostki 1 eV

Wielokrotność		
Mnożnik	Nazwa	Symbol
10^0	elektronowolt	eV
10^3	kiloelektronowolt	keV
10^6	megaelektronowolt	MeV
10^9	gigaelektronowolt	GeV
10^{12}	teraelektronowolt	TeV

Współczesne urządzenia do badania cząstek rozpędzają je do energii ponad 100 GeV (gigaelektronowoltów, czyli 10^9 eV), a**Wielki Zderzacz Hadronów** (największa maszyna świata) uzyskuje energię cząstek rzędu kilku TeV (10^{12} eV), czyli kilku bilionów elektronowoltów. Energie wyrażone w elektronowoltach wydają się być gigantyczne, ale są to tak naprawdę wartości mniejsze niż jedna milionowa dżula. Należy jednak pamiętać, że energiami tymi obdarzone są cząstki o masach rzędu 10^{-27} kg (w spoczynku).

Wróćmy teraz do wartości liczbowych zawartych w tabeli energii wiązania wybranych pierwiastków. Dane te można przedstawić graficznie na wykresie zależności energii wiązania jądra od liczby masowej (wykres zawiera dane większej liczby pierwiastków niż w tabelce).



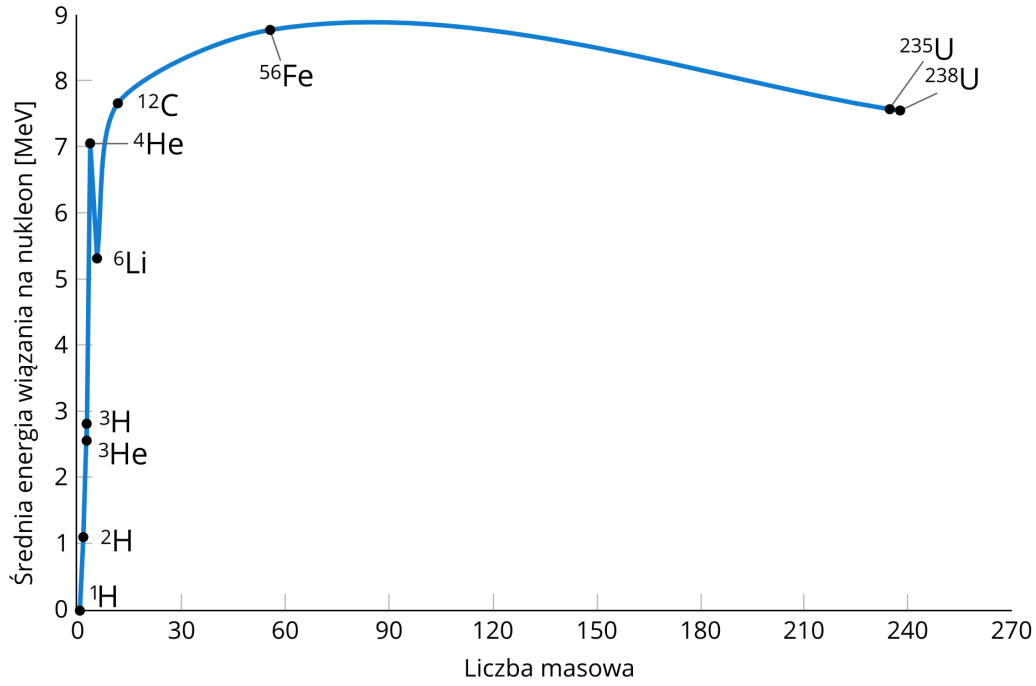
Źródło: Anita Mowczan, licencja: CC BY 3.0.

Na podstwie danych z tabeli można zauważyć, że energia wiązania jest tym większa, im większa jest liczba nukleonów w jądrze. Jest to zrozumiałe – większa liczba protonów oznacza większe siły odpychania, zatem jądro może być stabilne, pod warunkiem że energia wiązania będzie większa. Właśnie dlatego ciężkie jądra mają duży nadmiar neutronów.

Ponowna analiza danych umieszczonych w tabeli prowadzi do jeszcze jednego ciekawego wniosku: Energia wiązania każdego nukleonu w jądrze helu jest większa niż energia wiązania takiego nukleonu w jądrze litu. Na wykresie widać, że energia wiązania rośnie wraz ze wzrostem liczby masowej, ale nie jest to wzrost liniowy (wzrost energii wiązania jest coraz wolniejszy).

Czym jest **energia wiązania przypadająca na jeden nukleon**? Jest to ilość energii, jaką trzeba dostarczyć do jądra, aby wyrwać z niego jeden nukleon. Jeżeli chcemy zamiast jądra uzyskać niezależne cząstki swobodne, to musimy w tym celu dostarczyć energię równą całkowitej energii wiązania.

Ciekawy wynik otrzymamy, gdy na wykresie przedstawimy zależność energii wiązania przypadającej na jeden nukleon od liczby masowej (A) – liczby nukleonów.



Źródło: Persino (https://commons.wikimedia.org), Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

Analiza wykresu pozwala stwierdzić, że największa średnia energia wiązania przypada na jądra znajdujące się w środkowej części wykresu. W porównaniu z tymi jądrami zarówno jądra najlżejsze (zaczynając od deuteru, helu czy węgla), jak i te cięższe (takie jak uran) mają mniejszą energięe przypadającą na jeden nukleon.

> **Zapamiętaj!**
>
> Najbardziej trwałe są jądra leżące w środkowej części wykresu zależności energii wiązania jądra od liczby masowej.

Maksymalną wartość energii wiązania ma żelazo – 8,8 MeV na nukleon. Jest to tylko jeden z wniosków wynikających z przebiegu tego wykresu.

Warto też zwrócić uwagę na fakt dużej, w porównaniu z sąsiednimi jądrami, energii wiązania na nukleon jądra helu $_{2}^{4}\mathrm{He}$. Lit, który ma większą energię wiązania i większą masę, ma mniejszą energię przypadającą na jeden nukleon. Oznacza to, że jądro helu jest związane silniej niż jądra o mniejszej i nieco większej masie. Z tego wynikają istnienie cząstki α i przekonanie (żywione długo przez Rutherforda), że w jądrach atomów takie cząstki istnieją cały czas. Obszary wykresu dotyczące zarówno mniejszych, jak i większych liczb masowych spowodowały prawdziwą rewolucję. Dzięki niemu możliwa stała się produkcja energii jądrowej na dwa sposoby (ale również możliwość zbudowania dwu rodzajów bomb jądrowych). Ponadto za pomocą tego wykresu wyjaśniono, co jest źródłem energii gwiazd, a także wytłumaczono, jak tworzyły się pierwiastki podczas powstania i ewolucji Wszechświata. Tymi kwestiami zajmiemy się na najbliższych lekcjach.

Polecenie 1

Oblicz energię wiązania jądra żelaza i jądra sodu. Potrzebne dane odszukaj w tablicach.

Polecenie 2

Oblicz procent masy Słońca zamienionej na energię od momentu jego powstania, czyli 5 mld lat, jeżeli w ciągu sekundy wysyła ono energię równą $4 \cdot 10^{26}\mathrm{J}$.

Podsumowanie

- Masa i energia całkowita są miarą tej samej wielkości fizycznej. Zmiana masy układu może zachodzić wskutek wymiany nie tylko substancji, lecz także energii.
- Równoważność masy i energii Albert Einstein opisał za pomocą wzoru:
  $E = mc^2$,

  gdzie:
  m – masa ciała, c – prędkość światła w próżni.
- Masa jądra jest mniejsza od sumy mas nukleonów, z którego jest ono utworzone. Tę różnicę nazywamy deficytem masy.
- Energia wiązania jest równa wartości pracy, którą należy wykonać, aby układ rozłożyć na pojedyncze cząstki (w przypadku jądra – są to nukleony).
- Energia wiązania jest równa wartości energii (ΔE) związanej z deficytem masy (Δm):
  $\Delta E = \Delta mc^2$,
  gdzie: c – prędkość światła w próżni.
- Energia ta zmienia się wraz liczbą nukleonów w jądrze; im większa liczba nukleonów, tym jądro jest silniej związane.
- Charakterystyczną wielkością dla danego jądra jest energia wiązania przypadająca na jeden nukleon w jądrze. Jest to energia, jaką trzeba dostarczyć do jądra, aby uwolnić z niego jeden nukleon.

Zadania podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Które informacje są prawdziwe, a które fałszywe?

	Prawda	Fałsz
Im większa energia wiązania przypadająca na jeden nukleon $\Delta E = \Delta \mathrm{mc}^2$, tym więcej energii potrzeba, aby rozbić takie jądro.	◯	◯
Defektowi masy odpowiada równoważna mu energia $\Delta E = \Delta \mathrm{mc}^2$	◯	◯
Gdyby porównać masę jądra atomowego z sumą mas jego składników, wówczas okaże się, że jądro jako układ nukleonów związanych siłami jądrowymi jest cięższy niż suma mas tych nukleonów.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Uzupełnij lukę.

Jądra, które są stabilne to właśnie te, w których energia wiązania przypadająca na jeden nukleon jest [ ].

najmniejsza | zerowa | największa

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Praca domowa

Praca domowa

Polecenie 3.1

Ile wynosi energia uwolniona w czasie reakcji, jeżeli masa substancji ulegającej tej reakcji zmniejszyła się o 0,2 g?

Polecenie 3.2

Tryt jest izotopem wodoru o symbolu ${}_{1}^{3}\mathrm{H}$. Masa jądra trytu wynosi $5{,}00 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$. Oblicz deficyt masy tego jądra i jego energię wiązania.

Polecenie 3.3

Oblicz deficyt masy i energię wiązania izotopu polonu 208.

Słowniczek

energia spoczynkowa

– energia cząstki pozostającej w spoczynku względem inercjalnego układu odniesienia.

deficyt masy

– różnica między masą cząstek swobodnych a masą jądra utworzonego z tych cząstek.

elektronowolt

– jednostka energii równoważna pracy, jaką wykonują siły elektryczne, kiedy przemieszczają elektron w polu elektrostatycznym między dwoma punktami, pomiędzy którymi panuje napięcie 1 V. Odpowiada to w przybliżeniu wartości $1{,}6 \cdot 10^{-19}\mathrm{J}$.

energia wiązania jądra

– energia równoważna deficytowi masy. Odpowiada pracy, którą należy wykonać, aby podzielić jądro na pojedyncze nukleony. Wartość energii wiązania jądra równa jest energii uzyskanej kosztem różnicy masy między nukleonami swobodnymi a nukleonami związanymi w jądrze atomu.

kilowatogodzina

– jednostka energii równoważna ilości energii zużywanej przez urządzenie o mocy 1 kW (1000 W).

masa spoczynkowa

– stała masa charakteryzująca ciało niezależnie od rozpatrywanego układu odniesienia, w którym to ciało spoczywa.

SI

– Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (franc. *Système international d'unités*), używany w Polsce od 1966 r.

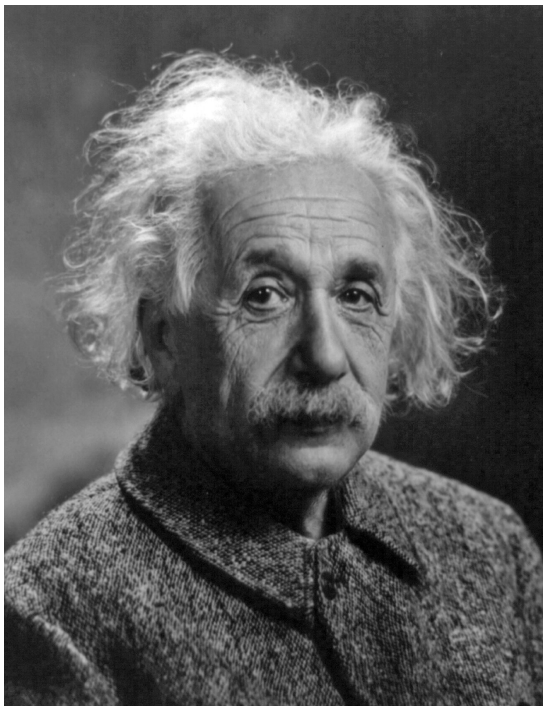
średnia energia wiązania przypadająca na jeden nukleon

– energia wiązania jądra podzielona przez liczbę wszystkich nukleonów w jądrze danego pierwiastka; inaczej: energia wiązania przypadająca na jeden nukleon lub właściwa energia wiązania.

Wielki Zderzacz Hadronów

– największy na świecie akcelerator (przyspieszacz) cząstek, znajdujący w CERN-ie (Europejski Ośrodek Badań Jądrowych) pod Genewą.

Biogram



Źródło: Jack Turner, PM_Poon, Dantadd. (http://commons.wikimedia.org), public domain.

Albert Einstein

14.03.1879–18.04.1955

Jeden z najwybitniejszych fizyków teoretyków wszech czasów, twórca szczególnej (1905 r.) i ogólnej teorii względności (1915 r.). Laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki (1921 r.).

Promieniowanie jonizujące i jego wpływ na organizmy żywe

Organizm człowieka narażony jest na skutki wywołane promieniowaniem jonizującym, które może pochodzić zarówno ze źródeł sztucznych, jak i naturalnych. Na tej lekcji dowiecie się, co to jest promieniowanie jonizujące i czy musimy się go obawiać.

Chociaż wypadki w elektrowniach jądrowych zdarzają się sporadyczne, niewiele rzeczy budzi w nas większy strach – winna jest temu głównie nasza niewiedza

Już potrafisz

- opisać zjawisko promieniotwórczości naturalnej;
- opisać rolę, jaką odegrała Maria Skłodowska-Curie w badaniach nad promieniotwórczością naturalną;
- wymienić rodzaje promieniowania, które towarzyszą przemianom jąder atomowych;
- wymienić własności promieniowania alfa, beta i gamma.

Nauczysz się

- podawać definicję promieniowania jonizującego;
- dokonywać podziału na promieniotwórczość sztuczną i naturalną oraz podawać przykłady każdej z nich;
- wymieniać skutki, jakie może spowodować promieniowanie jonizujące, jeśli oddziałuje bezpośrednio na organizmy żywe.

1. Czym jest promieniowanie jonizujące?

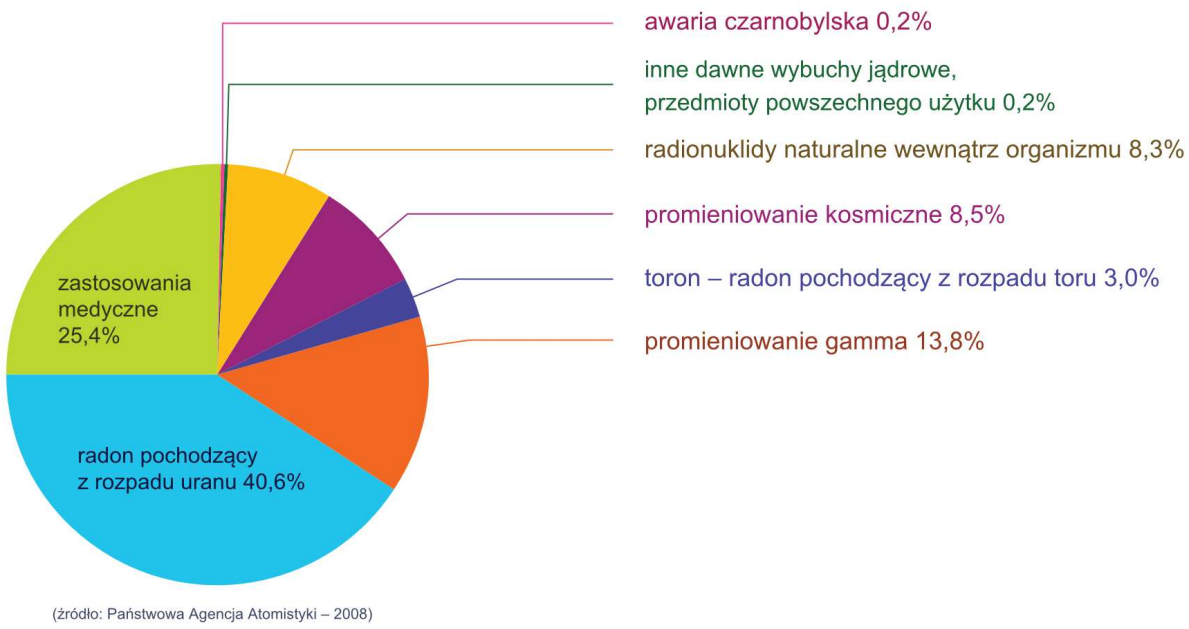
Promieniowanie jonizujące towarzyszy człowiekowi od zawsze. Codziennie pochłaniamy promieniowanie, które dociera do nas z Kosmosu oraz pochodzi ze skał lub gleby. Promieniowanie jonizujące jest promieniowaniem korpuskularnym lub elektromagnetycznym, powodującym jonizację ośrodka, przez który przechodzi. Dzięki odpowiednio dużej energii jest zdolne oderwać elektron od obojętnych atomów lub cząsteczek. Promieniowaniem jonizującym jest promieniowanie jądrowe (α, β i γ), neutronowe, X i kosmiczne.

Źródłem naturalnego promieniowania jonizującego jest m.in. przestrzeń kosmiczna. **Promienie kosmiczne**, które składają się głównie z jąder atomów o wielkich energiach (są to głównie protony), zostało odkryte na początku XX w. Przed promieniowaniem kosmicznym częściowo chroni nas atmosfera ziemska, która pochłania energię padających cząstek. W wyniku zderzeń cząsteczek z jądrami gazów (azot, tlen) w atmosferze emitowane jest**promieniowanie wtórne**. Szacuje się, że do wysokości 20 km nad powierzchnią Ziemi jest ono dominującą składową promieniowania kosmicznego. Im grubszą warstwę atmosfery musi pokonać promieniowanie, tym słabsze się ono staje. W związku z tym ludzie przyjmują dużo mniejszą dawkę promieniowania na poziomie morza niż osoby wspinające się w wysokich górach. Osoby latające samolotami na trasach transkontynentalnych otrzymają dawkę promieniowania równą mniej więcej dawce towarzyszącej prześwietleniu rentgenowskiemu płuc.

Źródłem promieniowania jonizującego są również powierzchnia i wnętrze Ziemi, które zawierają bogate zasoby **pierwiastków radioaktywnych**. Na terenie Polski po zakończeniu drugiej wojny światowej wydobywano rudy uranu m.in. w Kletnie i Kowarach (Sudety). Z kopalni w Kletnie uzyskano łącznie 20 ton uranu.

Oprócz źródeł naturalnych promieniowania jonizującego istnieją także jego źródła sztuczne. Promieniowanie jonizacyjne wytworzone przez człowieka powstaje jako rezultat przemian zachodzących we wnętrzach jąder atomowych. Tym zmianom towarzyszy zmiana energii jąder, a często także liczby nukleonów. Podatne na to są zwłaszcza izotopy pierwiastków, w których znajduje się nieodpowiednia liczba neutronów.

Do źródeł sztucznych promieniowania jonizującego zaliczamy aparaturę medyczną (aparaty rentgenowskie, bomby kobaltowe), elektrownie jądrowe (reaktory) i urządzenia badawcze, np. akceleratory cząstek. W medycynie, przemyśle i nauce powszechnie stosuje się sztuczne izotopy promieniotwórcze, będące źródłem promieniowania α, β i γ.



Źródła promieniowania jonizującego

Wspomnieć należy również o jeszcze innych źródłach promieniowania jonizującego – testach bomb nuklearnych i awariach elektrowni jądrowych.

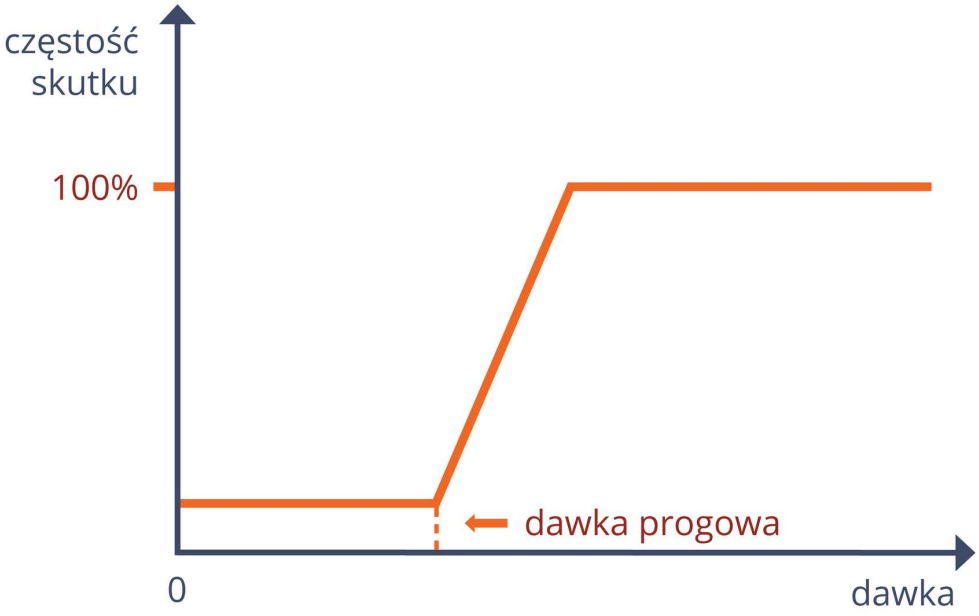
Zastanówmy się nad wpływem, jaki wywiera promieniowanie jonizujące na organizmy żywe, zwłaszcza na organizm ludzki.

Efekt ten zależy głównie od kilku czynników:

- wielkości i natężenie przyjętej dawki;
- rodzaju promieniowania;
- wielkości i rodzaju obszaru poddanego działaniu czynnika jonizującego;
- wieku oraz płci osoby napromieniowanej;
- wrażliwości osobniczej;
- masy ciała;
- pory roku (temperatury otoczenia);

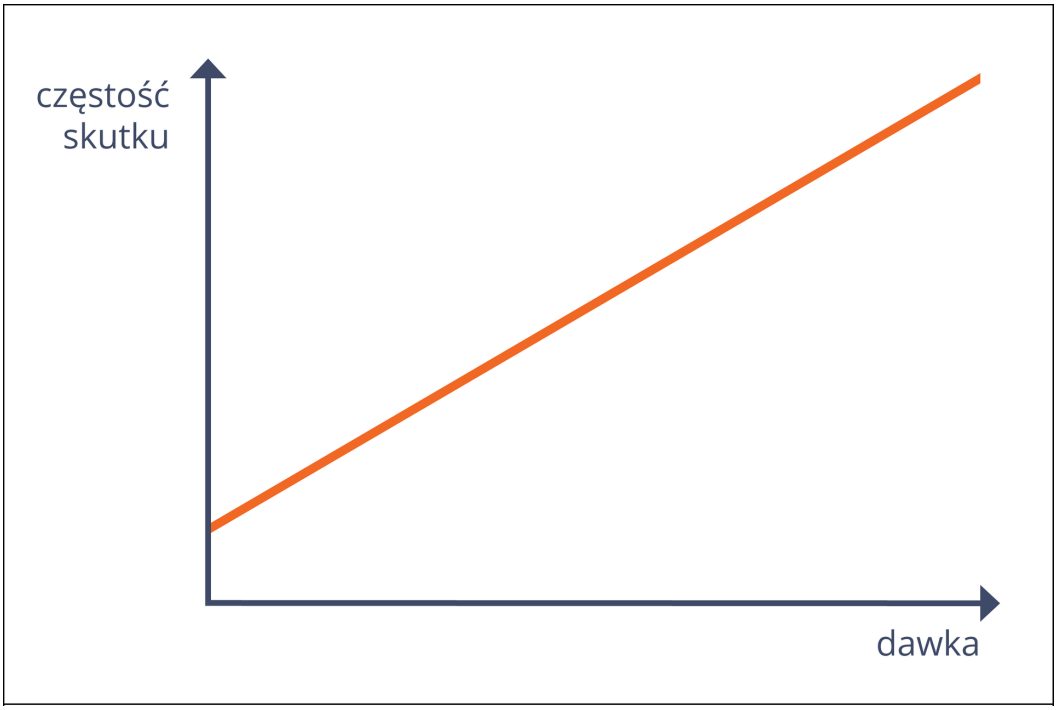
Promieniowanie jonizujące powoduje określone skutki biologiczne, które ze względu na podstawowe mechanizmy ich powstawania możemy podzielić na **deterministyczne** i **stochastyczne**.

Skutki deterministyczne są konsekwencją pochłonięcia przez organizm ludzki na tyle dużej dawki promieniowania jonizującego, że powoduje ona zniszczenie lub bezpowrotne uszkodzenie pewnej liczby komórek. Przejawem skutków deterministycznych jest**choroba popromienna**.



Przekroczenie dawki progowej promieniowania wywołuje pierwsze dostrzegalne zmiany w organizmie

Skutki stochastyczne (losowe) są rezultatem uszkodzenia materiału genetycznego pojedynczej komórki i przejawiają się w postaci nowotworów lub chorób dziedzicznych. Dawka, która wywołuje te schorzenia, może być dowolnie mała, a o ich początku decyduje przypadek.



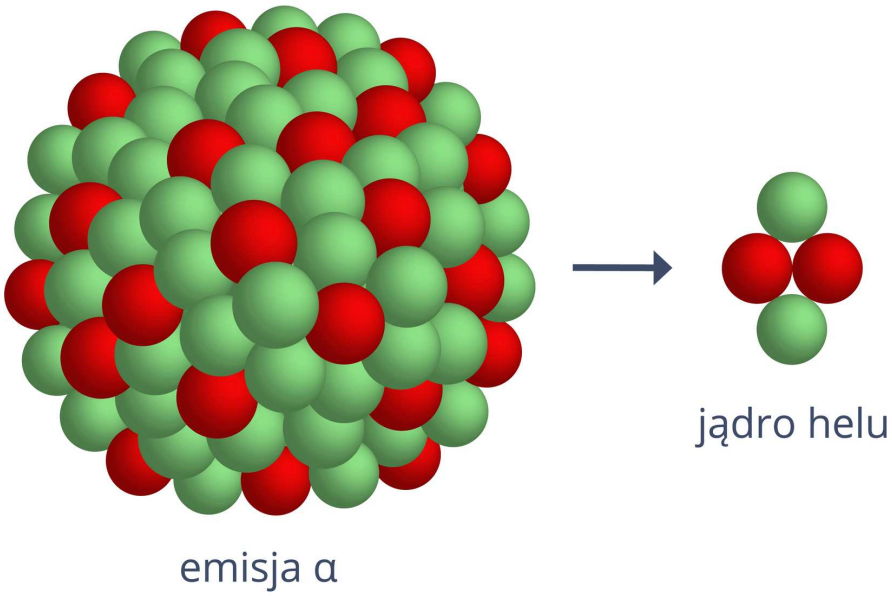
Dawka promieniowania wywołująca skutki stochastyczne może być dowolnie mała (bezprogowa)

Jeśli promieniowanie jonizujące oddziałuje na żywą tkankę, może wywołać uszkodzenia na poziomie:

- molekularnym – uszkodzenia**lipidów**(wytwarzanie wolnych rodników), pękanie nici**DNA**;
- komórkowym – uszkodzenia struktur błonowych, jądra i organelli komórkowych (zaburzenie metabolizmu komórki, degradacja składników komórki i uszkodzenie jej materiału genetycznego).

Promieniowanie α stanowią duże cząstki, które mimo swojego krótkiego zasięgu mają silne własności jonizacyjne (nawet 20-krotnie większe niż promieniowanie β lub γ). Kiedy cząstka α o energii 4 MeV porusza się w powietrzu, może wytworzyć nawet 120 000 par jonów. Prawie cała energia cząstek alfa zużywana jest na jonizację ośrodka.

Źródłem promieniowania α są przemiany promieniotwórcze niektórych jąder tzw. pierwiastków ciężkich (uranu, toru, radu).



Promieniowanie jonizujące

Szkło, kilkucentymetrowa warstwa powietrza (4,37 cm dla energii cząstek 6 MeV), skóra ludzka lub zwykły papier stanowią dla tego promieniowania zaporę nie do przebycia. Gdyby jednak cząstki α dostały się w jakiś sposób do organizmu, np. drogą pokarmową, to ich jonizujące działanie mogłoby się okazać tragiczne dla zdrowia (choroba popromienna, białaczka) i zakończyć nawet śmiercią. Promieniowanie α nie wymaga stosowania specjalnych osłon.

Promieniowanieβ (strumień elektronów) w porównaniu z promieniowaniem α ma znacznie większy zasięg (zależny od energii cząstek; w powietrzu rozchodzi się ono na odległość kilku metrów)oraz większą przenikliwość. Źródłem promieniowania β są procesy zachodzące wewnątrz jąder pierwiastków promieniotwórczych, gdzie następuje przemiana

neutronu w proton (β^-) lub protonu w neutron (β^+). Cząstki β, których zarówno ładunek, jak i masa są mniejsze w porównaniu z cząstkami α, wywołują znacznie mniejszą jonizację ośrodka. W powietrzu mogą mieć zasięg nawet kilku metrów (2,3 m dla 6,0 MeV). Biologiczne skutki oddziaływania promieniowania β na żywą tkankę są jednak znacznie mniejsze w porównaniu z promieniowaniem α. Przed promieniowaniem β chroni cienka warstwa aluminium lub tworzywa sztucznego a także szklana płyta o grubości 1 cm. Aby zabezpieczyć się przed promieniowaniem β, musimy korzystać z osłony. Wykorzystanie tarcz ołowianych (lub wykonanych z innych metali ciężkich) nie jest wskazane, ponieważ wychwycenie elektronu przez jądra osłony może stać się źródłem promieniowania wtórnego.

Niebezpieczne dla zdrowia jest przyjęcie dawki promieniowania β znajdującej się w skażonej żywności..

Promieniowanie oraz**promieniowanie neutronowe**stanowią pośredni czynnik jonizujący. Nie zawierają ładunku elektrycznego, ale są odpowiedzialne za powstawanie cząstek naładowanych, które z kolei wywołują jonizację.

Promieniowanie promieniowanie gammajest najbardziej przenikliwą formą promieniowania jonizującego. Są to fale elektromagnetyczne krótsze od **promieni rentgenowskich**.

Źródłem promieniowania γ są wzbudzone jądra, które podczas powrotu do stanu podstawowego, emitują nadmiar energii w postaci promieniowania elektromagnetycznego. Promieniowanie γ nigdy nie występuje samo – zawsze towarzyszy emisji cząstek α lub β. Liczba masowa jądra pozostaje niezmieniona.

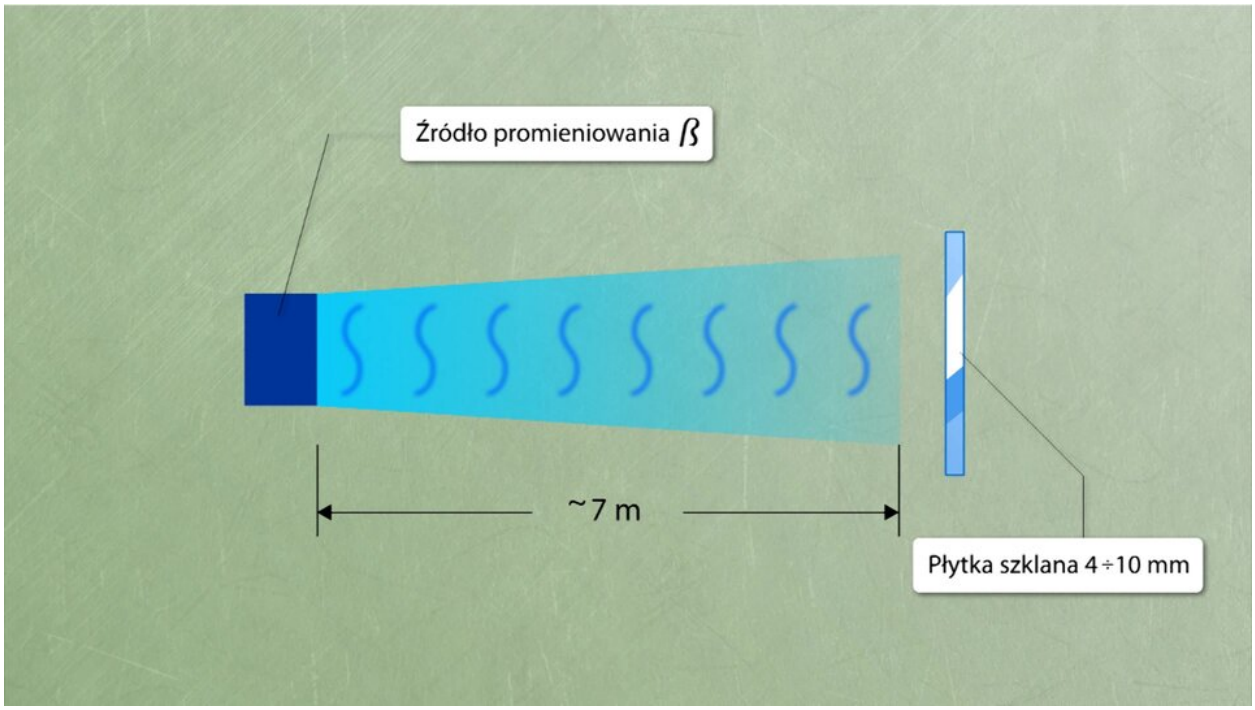
$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma $$

Gwiazdka w powyższym zapisie oznacza, że dane jądro jest wzbudzone. Częściową (najczęściej jednak w pełniwystarczającą) ochronę przed tym promieniowaniem stanowią płyty ołowiane (które mogą być także wykonane z innych metali ciężkich, np. stali albo zubożonego uranu) lub wielometrowa warstwa betonu. Promieniowanie γ nie ma zasięgu maksymalnego i po napotkaniu odpowiedniej przeszkody ulega pochłanianiu, którego stopień zależy od tego, jak gruba jest ta przeszkoda i z jakiego materiału została ona wykonana. Energia promieniowania γ może zmieniać się liniowo w bardzo szerokim zakresie – od kilkuset keV do kilku MeV.

Promieniowanie neutronoweto kolejny rodzaj promieniowania jonizującego, który nie przenosi ładunku elektrycznego. Powstaje w wyniku rozszczepienia jąder atomowych lub rozpadu niektórych izotopów promieniotwórczych. Ze względu na prędkość (a tym samym energię), którą osiągają neutrony, dzielimy je na termiczne i szybkie.

Neutrony termiczne (o ich znaczeniu przeczytacie w następnych podrozdziałach) osiągają prędkość ok. 2 km/s oraz energię poniżej 1 eV. Neutrony termiczne pochłaniane są przez tarcze wykonane z materiałów takich jak kadm lub bor.

Z kolei proces pochłaniania neutronów szybkich przebiega dwustopniowo. Przed wychwyceniem muszą zostać spowolnione do prędkości charakterystycznej dla neutronów termicznych. Moderatorami (spowalniaczami) w tym wypadku mogą być materiały zbudowane z jąder o niskich liczbach atomowych (zawierające wodór), np. ciężka woda, parafina bądź grafit.



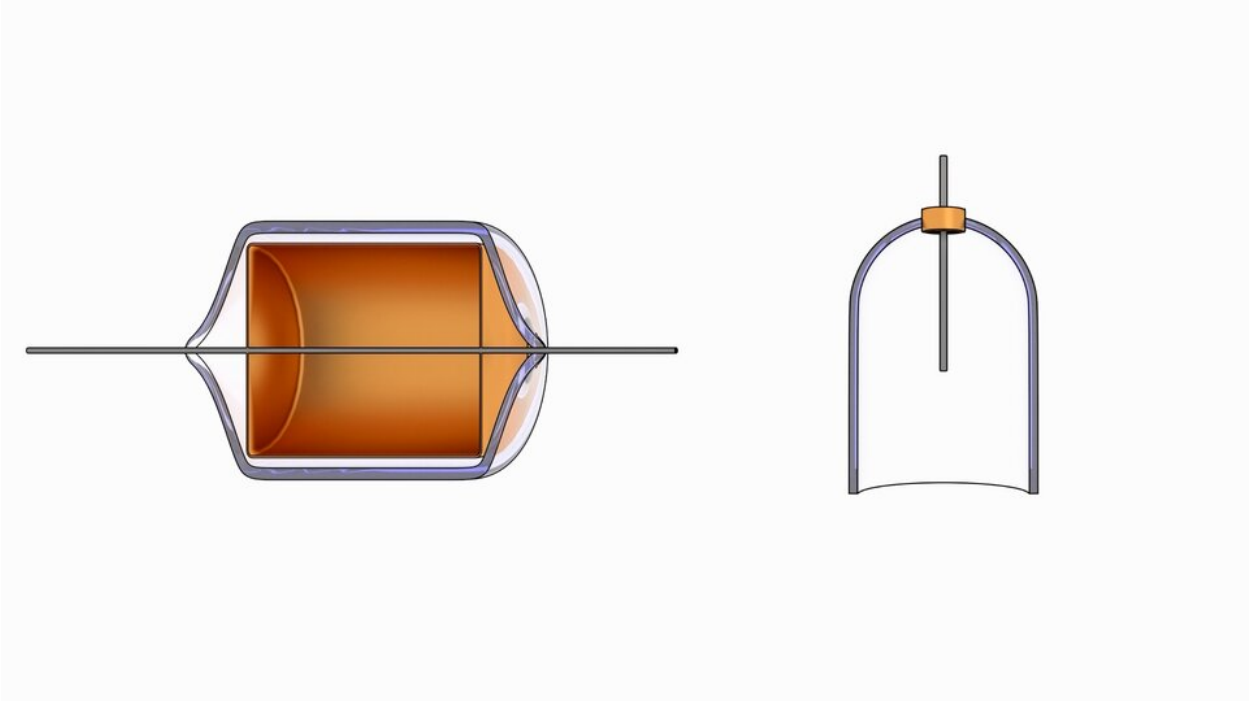
Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Ochrona organizmów żywych przed skutkami promieniowania jonizującego

Promieniowanie jonizujące

Ciekawostka

Licznik Geigera-Müllera.
Licznik Geigera-Müllera to przyrząd skonstruowany w celu rejestrowania obecności cząstek jonizujących w powietrzu.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

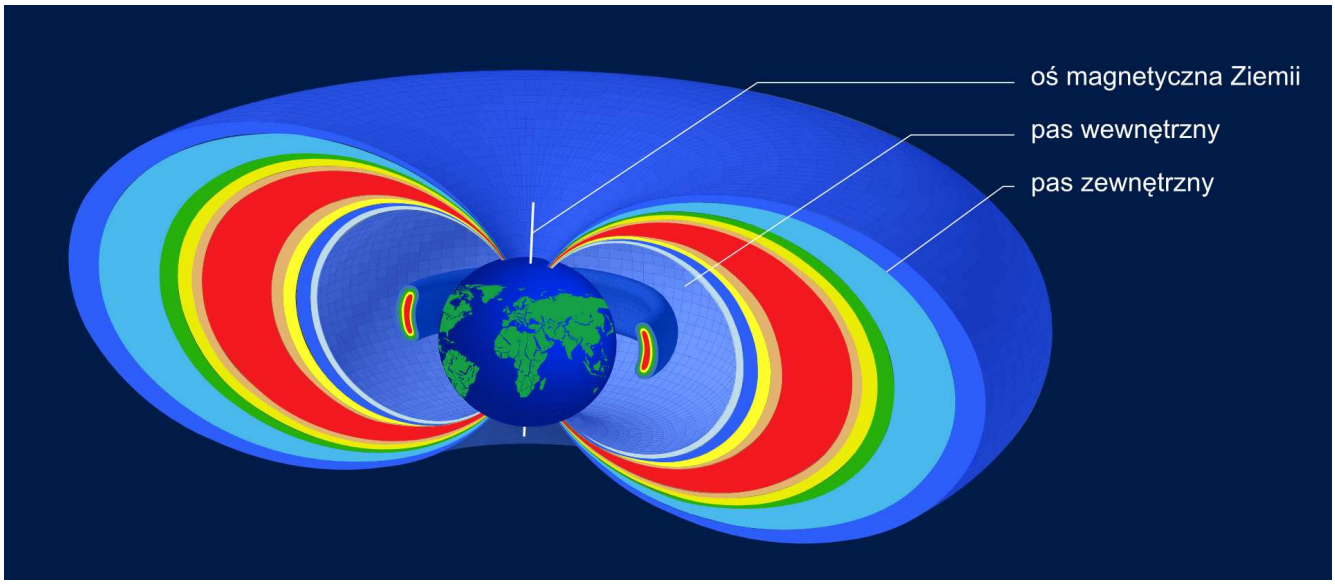
Zasada działania licznika Geigera-Müllera

Licznik Geigera–Müllera

Mimo upływu czasu i wprowadzenia licznych usprawnień zasada działania miernika nie zmieniła się w zasadzie od momentu jego wynalezienia, czyli od 1928 r. Licznik Geigera-Müllera jest wykorzystywany nie tylko przez naukowców, lecz także przez służby, których zadaniem jest wykrywanie skażeń i informowanie o nich.

Ciekawostka

Pasy Van Allena to obszary wzmożonego promieniowania cząsteczkowego, które otaczają Ziemię. To właśnie w nich cząsteczki promieniowania kosmicznego cząsteczki promieniowania kosmicznego zatrzymywane są w „pułapkach” wytworzonych przez pole magnetyczne Ziemi. W obszarze pasów Van Allena cząsteczki (głównie protony i elektrony) poruszają się po torach zbliżonych do spirali. Pasy pełnią funkcję ekranu magnetycznego, chroniącego mieszkańców Ziemi przed niekorzystnym wpływem promieniowania jonizującego, którego głównym źródłem jest Słońce.



Źródło: Anita Mowczan, licencja: CC BY 3.0.

2. Dawki promieniowania

Dawkę pochłoniętego promieniowania (D) przez różne materiały obliczamy w następujący sposób: energię (E), którą pochłonął ośrodek (a tym samym utraciło promieniowanie), dzielimy przez wartość jego masy (m).

$$D = \frac{E}{m} \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$$

Jednostką dawki promieniowania jonizującego w układzie SI jest **grej**(Gy) – energia pochłoniętego promieniowania równa 1 J i przypadająca na jednostkę masy równą 1 kg:

$$\mathrm{Gy} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$$

Starszą jednostką dawki promieniowania, używaną jeszcze do dzisiaj, jest **rad** ($1\ \mathrm{rad} = 0{,}01\ \mathrm{Gy} = 1\ \mathrm{cGy}$).

Przykładowe skutki napromieniowania γ dawką wyrażoną w grejach

Zespół chorobowy	D [Gy]
Ostry zespól szpikowy	1,0
Trwała niepłodność u mężczyzn	2,5–6,0
Trwała niepłodność u kobiet	3,5–6,0
Zmętnienie soczewki oka	0,5–2,0
Zaćma oczna	5,0

Rumień skóry	3,0
Sączące złuszczanie naskórka	20,0
Martwica skóry	50,0
Powstawanie wad rozwojowych płodu	0,1–1,0

To, jaki wpływ będzie miało promieniowanie na organizm, zależy od kilku czynników:

- wielkości dawki promieniowania pochłoniętej przez organizm;
- rozkładu dawki w czasie (czy była to dawka jednorazowa, czy dawka rozłożona w pewnym przedziale czasowym);
- rodzaju promieniowania;
- wielkości napromienionej powierzchni (czy zostało napromienione całe ciało, czy tylko jego część);
- który z narządów został napromieniony (czy jest to napromienienie wewnętrzne, czy zewnętrzne, jaki rodzaj tkanki został poddany działaniu promieniowania);
- wieku, stanu zdrowia i płci;
- wrażliwości osobniczej i gatunkowej.

Zdolności jonizacyjne promieniowania alfa, beta, gamma i neutronowego zdecydowanie się od siebie różnią. Najbardziej szkodliwe, biorąc pod uwagę wywierane skutki, są promieniowanie α i neutronowe. Jeden grej promieniowania gamma (wysoka przenikliwość) wpływa na organizm ludzki zupełnie inaczej niż jeden grej promieniowania alfa. Skutki promieniowania mogą być różne, dlatego wprowadzono wielkość zwaną **równoważnikiem dawki**. Wyraża się go wzorem:

$$H = Q \cdot D$$

gdzie:
Q – współczynnik jakości promieniowania (liczba z przedziału od 1 do 25);
D – dawka promieniowania.

Wartości współczynnika jakości promieniowania

Promieniowanie	Q
α i γ powyżej 30 keV	1
β powyżej 30 keV	1
β trytu	2
α, neutrony, protony, ciężkie jony	25
neutrony termiczne	4,5

Bezwymiarowa liczba Q przyjmuje wartość równą jeden dla promieniowania γ i dwadzieścia pięć – dla promieniowania α i neutronowego. Uwzględnia różne skutki

promieniowania jonizującego wywierane na organizm ludzki (inna zdolność jonizacyjna, przenikliwość, odporność biologiczna). W układzie SI jednostką pochodną równoważnika dawki promieniowania jest jeden**siwert**(Sv).

Przykład 1

Aby określć różnicę między dawką pochłoniętego promieniowania a równoważnikiem tej dawki, przeprowadzono eksperyment. Odpowiednio spreparowaną tkankę zwierzęcą poddano działaniu dwóch różnych rodzajów promieniowania jonizującego – α i β. Masa tkanki wynosiła 10 g i pochłonęła 10^{10} cząstek o energii 10 MeV.

Rozwiązanie:
Dawka pochłoniętego promieniowania w obu przypadkach jest taka sama i wynosi:

$$D = \frac{10^{10} \cdot 10\ \mathrm{MeV}}{10^{-2}\,\mathrm{kg}} = 10^{9}\ \frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{kg}}$$

Wiadomo jednak, że:

$$1\mathrm{MeV} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-13}\mathrm{J}$$

Dawka pochłoniętego promieniowania wyrażona w grejach wynosi zatem:

$$D = 1{,}6 \cdot 10^{9} \cdot 10^{-13}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}} = 1{,}6 \cdot 10^{-4}\mathrm{Gy} = 0{,}016\ \mathrm{cGy}$$

Jeśli skorzystamy z tabeli wartości współczynnika jakości, otrzymamy:
dla promieniowania α: $H = D \cdot Q = 0{,}016\ \mathrm{cGy} \cdot 25 = 4\ \mathrm{mSv}$
i
dla promieniowania β: $H = D \cdot Q = 0{,}016\ \mathrm{cGy} \cdot 1 = 0{,}16\ \mathrm{mSv}$

Wniosek:

Mimo że dawki pochłoniętego promieniowania alfa i beta były takie same, to wartości równoważników tych dawek bardzo się różnią. Negatywny wpływ, który jest wywierany przez promieniowanie α na żywą tkankę, jest znacznie większy niż wpływ cząstek β.

Równoważnik dawki naturalnego tła promieniowania dla wybranych rejonów Ziemi

Państwo (obszar)	Równoważnik dawki [mSv]
Stany Zjednoczone	ok. 1,0
Wielka Brytania	ok. 1,9
Polska	ok. 2,8

Francja – Masyw Centralny	3,5
Iran – Ramsar	ok. 240
Indie – Kerala, Madras	8–80
Brazylia – Minas Gerais	17–120
Rio de Janeiro – plaże	5,5–12,5

Źródłami promieniowania (poza promieniowaniem kosmicznym oraz pierwiastkami promieniotwórczymi obecnymi w powietrzu i skorupie ziemskiej) mogą być przeróżne źródła sztuczne, np. wielka płyta, którą często się wykorzystuje podczas stawiania budynków mieszkalnych). Promieniowanie może pochodzić nawet z samego organizmu człowieka ($^{40}\mathrm{K}$, $^{14}\mathrm{C}$).

Jednorazowe przyjęcie 2-3 Sv równoważnika dawki promieniowania jonizującego kończy się śmiercią w 25% przypadków, przyjęcie 3–5 Sv kończy się zgonem w 50% przypadków, a dawka 5–7 Sv prowadzi do uszkodzenia szpiku kostnego i organów wewnętrznych i powoduje śmierć w 100% przypadków.

Podsumowanie

- Promieniowanie jonizujące to każdy rodzaj promieniowania, który może doprowadzić do pośredniej lub bezpośredniej jonizacji ośrodka materialnego. Promieniowaniem jonizującym są m.in. promieniowanie gamma oraz strumienie cząstek alfa i beta.
- Źródła promieniowania jonizującego mogą być sztuczne i naturalne. Źródła naturalne to przede wszystkim pierwiastki promieniotwórcze obecne w skorupie ziemskiej i atmosferze, a także promieniowanie kosmiczne. Źródła sztuczne to pierwiastki radioaktywne wytworzone w reaktorach jądrowych (np. pluton) lub urządzenia wytwarzające promieniowanie jonizujące (aparaty rentgenowskie, bomby kobaltowe).
- Promieniowanie jonizujące niekorzystnie wpływa na organizm ludzki. Napromieniowanie dużymi dawkami promieniowania może prowadzić do śmierci lub choroby popromiennej. Małe dawki promieniowania mogą skutkować chorobami nowotworowymi, a jeśli został uszkodzony materiał genetyczny, mogą się one ujawnić dopiero w następnym pokoleniu. Przez dawkę pochłoniętego promieniowania jonizującego rozumiemy ilość energii pochłoniętej w wyniku napromienienia ośrodka w odniesieniu do jednostki masy tego ośrodka:

$$D = \frac{E}{m}\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$$

- W układzie SI jednostką dawki pochłoniętego promieniowania jest grej (Gy), zdefiniowany jako iloraz energii promieniowania równoważnej 1 J oraz masy wynoszącej 1 kg (1 Gy = 1 J / 1 kg).
- Uszkodzenia organizmu zależą głównie od energii i rodzaju padającego promieniowania (w przypadku cząstek – od masy i ich ładunku elektrycznego). Najbardziej przenikliwe są promieniowanie gamma oraz promieniowanie beta (strumień elektronów) – powodują one największe uszkodzenia organizmu. W związku z tym, że różne rodzaje promieniowania jonizującego różnie wpływają na zmiany w organizmie, wprowadzono pojęcie równoważnika dawki tego promieniowania (H):

$$H = Q \cdot D$$

gdzie:
Q – współczynnik jakości promieniowania (liczba z przedziału od 1 do 25);
D – dawka pochłoniętego promieniowania.

- W układzie SI jednostką równoważnika dawki promieniowania jest sivert (Sv).
- Jednorazowe przyjęcie 2–3 Sv równoważnika dawki promieniowania jonizującego kończy się śmiercią w 25% przypadków, przyjęcie 3–5 Sv kończy się zgonem w 50% przypadków, a dawka 5–7 Sv prowadzi do uszkodzenia szpiku kostnego i organów wewnętrznych i jest śmiertelna w 100% przpadków.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Uzupełnij luki.

Nieustannie nasze organizmy narażone są na działanie promieniowania jonizującego dobiegającego do nas z przestrzeni otaczającej Ziemię. Promieniowanie to nazywamy promieniowaniem [ ]. Jednostką dawki pochłoniętej przez człowieka jest [ ].

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Praca domowa

Praca domowa

Polecenie 1.1

Na podstawie informacji znalezionych w internecie przygotuj odpowiedzi na następujące pytania:
a) Jakie cząstki wchodzą w skład promieniowania kosmicznego pierwotnego?
b) Jak powstaje promieniowanie wtórne i jakie cząstki się wtedy tworzą?
c) Jak przebiegała historia odkrycia promieniowania kosmicznego pierwotnego i wtórnego i kto brał w niej udział?

Polecenie 1.2

Skorzystaj z internetu i znajdź informacje o poziomie promieniowania na Ziemi w latach 50. i 60. XX w. i porównaj te dane z poziomem promieniowania w Polsce po wybuchu w elektrowni w Czarnobylu. Wyszukaj także informacje o miejscach na Ziemi, gdzie promieniowanie ma znacznie wyższy poziom niż w Polsce.

Słowniczek

choroba popromienna

– zespół objawów klinicznych wywołany promieniowaniem jonizującym; może dotyczyć całego ciała lub jego części i mieć przebieg ostry bądź przewlekły.

dawka pochłoniętego promieniowania

– ilość energii pochłoniętego promieniowania przypadająca na jednostkę masy; jednostką dawki pochłoniętego promieniowania jest grej (Gy).

DNA

– kwas deoksyrybonukleinowy, ulokowany w jądrach komórek; główny nośnik informacji genetycznej.

grej

– jednostka dawki pochłoniętego promieniowania jonizującego; obowiązuje w układzie SI i odpowiada energii równej 1 J, która została pochłonięta przez ośrodek o masie 1 kg (1 Gy = 1 J / 1 kg).

lipidy

– związki chemiczne zawierające tłuszcze, woski i sterole; podstawowe zadanie lipidów w organizmie ludzkim to magazynowanie energii, tworzenie błon biologicznych i udział w przesyłaniu sygnałów.

megaelektronowolt

– jednostka energii będąca wielokrotnością elektronowolta; $1\ \mathrm{Mev} = 10^6\ \mathrm{eV}$.

mutacja

– zdolność skokowej zmiany materiału genetycznego, którą wykazują organizmy żywe (komórki); może wystąpić naturalnie (samoistnie) lub pod wpływem czynników zewnętrznych, np. ekspozycji na promieniowanie.

pierwiastek radioaktywny

– pierwiastek, który w wyniku rozpadu jądra emituje promieniowanie alfa, beta i gamma.

promieniowanie alfa

– strumień cząstek składających się z dwóch protonów i dwóch neutronów (tak jak jądra helu $_2^4\mathrm{He}$); jest emitowany podczas przemian promieniotwórczych w jądrach pierwiastków ciężkich (np. uranu, toru lub radu).

promieniowanie beta

– strumień elektronów powstały wskutek przemian zachodzących w jądrach atomów pierwiastków promieniotwórczych.

promieniowanie gamma

– promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali poniżej 0,1 nm; jest emitowane podczas przechodzenia jądra pierwiastka promieniotwórczego z poziomu wzbudzonego do poziomu podstawowego.

promieniowanie jonizujące

– każdy rodzaj promieniowania, który może doprowadzić do pośredniej lub bezpośredniej jonizacji ośrodka materialnego. Promieniami jonizującymi są m.in. promienie gamma oraz cząstki alfa i beta.

promieniowanie neutronowe

– rodzaj promieniowania jonizującego (neutrony), który nie przenosi ładunku elektrycznego. Powstaje w wyniku rozszczepienia jąder atomowych lub rozpadu niektórych izotopów promieniotwórczych.

promieniowanie rentgenowskie

– fale elektromagnetyczne o długości mieszczącej się zakresie od 10^{-11} do $5 \cdot 10^{-8}$ m, emitowane przez materię poddaną bombardowaniu wiązką elektronów o energii od 1 do 500 keV.

promieniowanie wtórne

– promieniowanie będące wynikiem emisji wtórnej promieniowania uprzednio pochłoniętego przez ciało.

biologiczny równoważnik dawki (dawka równoważna)

– dawka promieniowania, która została pochłonięta przez organizm; uwzględnia skutki biologiczne każdego rodzaju promieniowania; jest wyrażana w siwertach (Sv).

siwert

– jednostka dawki równoważnej pochłoniętego promieniowania jonizującego; jest równa ilorazowi energii 1 J oraz masy 1 kg; podobnie jak grej, należy do jednostek układu SI.

Reakcje jądrowe

Samorzutne przemiany jądrowe to cecha niektórych jąder atomowych. Czy człowiek może sam wywołać takie przemiany? Czy można zamienić rtęć w złoto? Jeśli chcecie wiedzieć więcej, czytajcie dalej.

Transmutacja metali w złoto, marzenie alchemików od setek lat, stała się faktem dzięki fizyce nuklearnej drugiej połowy XX wieku. Pierwsze udane próby w tym zakresie wywołały nawet pewną panikę na rynkach cennych kruszców, ale na szczęście dla inwestorów i ekonomii okazało się, że produkowanie złota w akceleratorach cząstek i reaktorach nuklearnych jest zbyt kosztowne.

Już potrafisz

- wymienić rodzaje promieniowania jądrowego i podać ich właściwości;
- podać definicję aktywności źródła promieniowania;
- przedstawić definicję jednostki aktywności;
- przytoczyć treść prawa rozpadu promieniotwórczego;
- podać definicję czasu połowicznego rozpadu pierwiastków.

Nauczysz się

- opisywać reakcje jądrowe jako efekt bombardowania jąder atomów poruszającymi się cząstkami.

Pierwszą reakcję jądrową przeprowadził **Ernest Rutherford** w 1919 r. – bombardował gazy cząsteczkami alfa, których źródłem był izotop polonu $^{214}_{84}\mathrm{Po}$. Podczas eksperymentu z azotem zaobserwował, że na skutek takich zderzeń pojawiają się protony i śladowe ilości tlenu. Rutherford zinterpretował wyniki swoich pomiarów następująco: kiedy cząstka alfa uderza w jądro atomu azotu, bierze udział w reakcji jądrowej, dzięki której zamienia się ono w tlen, czemu towarzyszy emisja protonu.

Reakcję jądrową najczęściej przedstawiamy schematycznie:

$$\mathrm{a} + \mathrm{X} \rightarrow \mathrm{b} + \mathrm{Y},$$

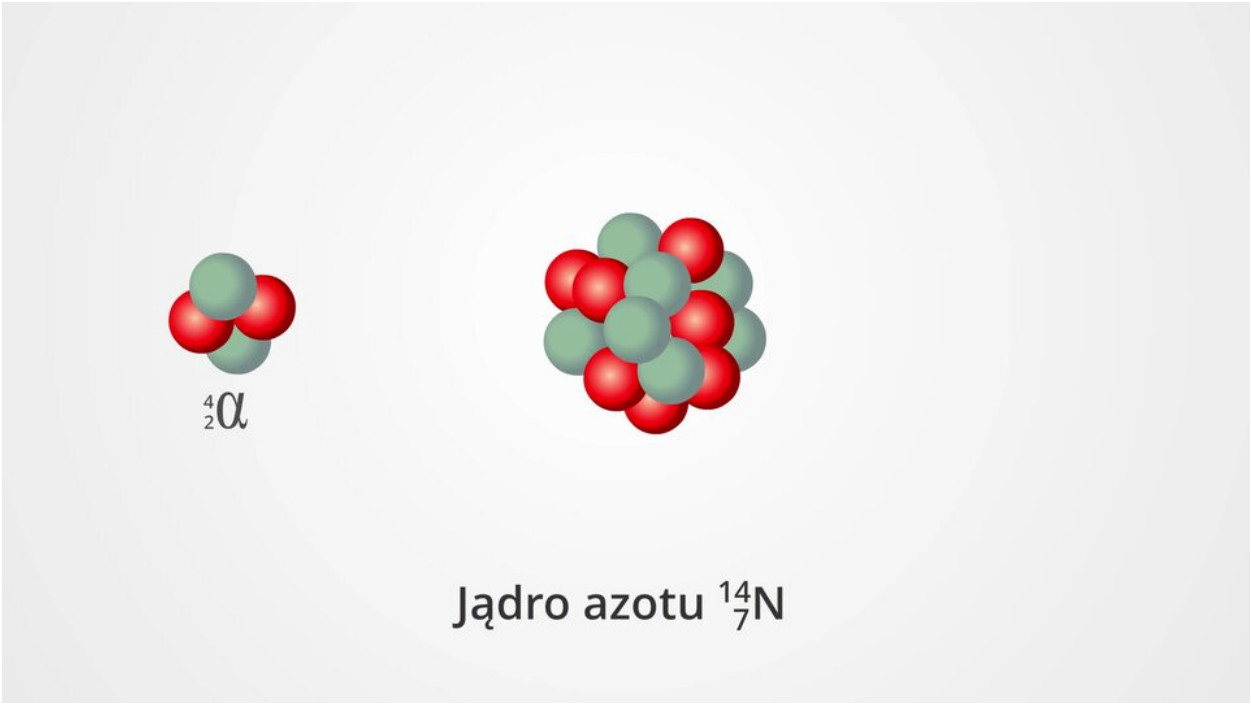
gdzie:
X – jądro bombardowanego pierwiastka, tzw. tarcza;
a – cząstka bombardująca;
Y – jądro powstałe w czasie reakcji;
b – cząstka powstała w czasie reakcji.

Reakcję zaobserwowaną przez Rutherforda możemy zapisać następująco:

$$^{14}_{+7}\mathrm{N} + {}^{4}_{+2}\alpha \rightarrow {}^{17}_{+8}\mathrm{O} + {}^{1}_{+1}p$$

Jak widać, liczby A i Z są takie same po obu stronach reakcji.

Precyzyjne badania nad omawianą reakcją jądrową wykazały, że nie zachodzi ona jednoetapowo, tzn. reakcja ma swoją fazę pośrednią, którą najczęściej pomija się w formalnym zapisie. Zanim utworzy się stabilne jądro izotopu tlenu $^{17}\mathrm{O}$, powstaje niestabilne jądro fluoru $^{18}\mathrm{F}$, które się rozpada i wyrzuca proton:



Film dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/D8AxKErDX

Reakcja jądrowa polegająca na przejściu jądra azotu w jądro tlenu z emisją protonu

Na ekranie pojawia się jądro azotu : 7 kulek czerwonych i 7 kulek szarych ułożonych w koło, wymieszane). Z lewej strony nadlatuje cząstka alfa: 2 kulki czerwone i 2 szare. Cząstka alfa zbliża się do jądra azotu i wlatuje w środek. Teraz w kole – jądrze o 4 kulki więcej (2 czerwone i 2 szarozielone). Przetasowują się: nowe jądro przybiera kształt lekkiej elipsy to pionowej, to poziomej. Po chwili z drgającego jądra wylatuje w prawo czerwona kulka. Znika poza kadrem. Teraz jądro ma 8 kulek czerwonych i 9 szarych.

Należy pamiętać, że w reakcjach jądrowych (podobnie jak w zjawiskach rozpadu promieniotwórczego) obowiązują zasady zachowania ładunku elektrycznego i liczby nukleonów. Na przykładzie powyższej reakcji:

Przed zderzeniem: liczba nukleonów – 18 $(14 + 4)$; liczba protonów – 9 $(7 + 2)$; ładunek – 9 e.
Po zderzeniu: liczba nukleonów – 18 $(17 + 1)$; liczba protonów – 9 $(8 + 1)$; ładunek – 9 e.

Podobnym reakcjom jądrowym ulegają także inne pierwiastki, które bombardowane są lekkimi cząstkami, takimi jak proton czy neutron. W wyniku takich reakcji mogą powstać sztuczne izotopy promieniotwórcze, niewystępujące w przyrodzie. Sztuczne pierwiastki promieniotwórcze podlegają takim samym prawom jak naturalne; jedyna różnica polega na tym, że jądro takiego pierwiastka zostało sztucznie pobudzone do emisji promieniowania. Przykładowo: jesteśmy w stanie wytworzyć radioaktywny izotop fosforu, jeśli atomy glinu zbombardujemy cząsteczkami α. Reakcję tę można zapisać następująco:

$$ {}^{27}_{+13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{+2}\alpha \rightarrow {}^{30}_{+15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

Izotop fosforu ^{30}P jest nietrwały i zachodzi w nim rozpad β, jednak cząstka, która jest emitowana, to nie elektron, ponieważ ma ona ładunek dodatni. Mówimy wówczas, że zaszedł rozpad β^+, a cząstkę tę nazywamy**pozytonem**, który jest **antycząstką** elektronu. Czas połowicznego rozpadu niestabilnego izotopu ^{30}P wynosi ok. 150 sekund. Izotop ten rozpada się na stabilne jądro krzemu i wspomniany już pozyton:

$$ {}^{30}_{+15}P \rightarrow {}^{30}_{+14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{+1}\beta $$

Reakcja powstawania sztucznego izotopu fosforu odkryta została w 1934 r. przez**Fryderyka** i**Irenę Joliot-Curie** – córkę **Marii Skłodowskiej-Curie**. Małżeństwo badało także inne reakcje, podczas których cząstkami alfa bombardowano atomy boru i magnezu, na skutek czego otrzymano niestabilne promieniotwórcze izotopy azotu i krzemu. Oba te izotopy podlegają następnie rozpadowi β^+.

Ciekawostka

W jednej z reakcji jądrowych odkryto **neutron**. Chadwick [czadłyk] w 1932 r. bombardował jądra berylu cząstkami α i jako produkt tej reakcji zidentyfikował cząstkę, która nie zawierała ładunku. Tą cząstką był neutron. Reakcję tę można zapisać następująco:

$$ {}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\alpha \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

Ciekawostka

Odwiecznym marzeniem alchemików była przemiana (transmutacja) jednych substancji w inne, zwłaszcza rtęci w złoto. Czy jest to możliwe z punktu widzenia dzisiejszej nauki?

Obecnie możemy uzyskać złoto przez bombardowanie izotopu rtęci ${}^{198}_{80}\mathrm{Hg}$ neutronami:

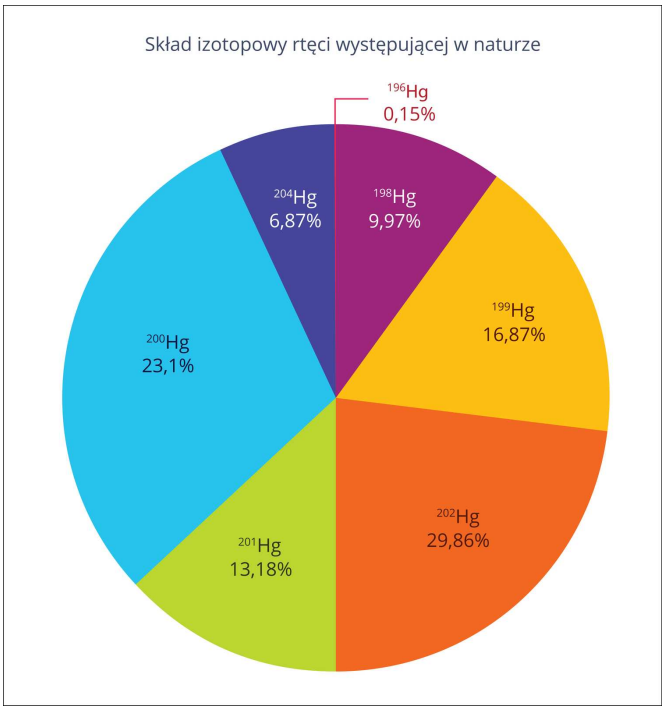
$$ {}^{198}_{+80}\mathrm{Hg} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{198}_{+79}\mathrm{Au} + {}^{1}_{+1}\mathrm{p}. $$

Jednak tak powstałe złoto jest nietrwałe (promieniotwórcze) i szybko ulega rozpadowi:

$$ {}^{198}_{+79}\mathrm{Au} \rightarrow {}^{198}_{+80}\mathrm{Hg} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}. $$

Jedynym niepromieniotwórczym izotopem złota, który występuje w przyrodzie, jest ${}^{197}\mathrm{Au}$. Czy ten izotop można otrzymać sztucznie?

Otrzymamy go, kiedy zbombardujemy izotop ${}^{197}\mathrm{Hg}$ neutronami. Ale i tu pojawia się problem: izotop ${}^{197}\mathrm{Hg}$ musielibyśmy wytworzyć w reaktorze, a do tego celu niezbędny jest izotop ${}^{196}\mathrm{Hg}$, którego w przyrodzie jest bardzo mało.



Izotop rtęci Hg-196 to tylko 0,15% ilości wagowej rtęci występującej w naturze

> A co z izotopem ^{199}Hg? Po pochłonięciu neutronu przekształci się on w rtęć ^{200}Hg, a nie w oczekiwaną „złototwórczą” rtęć ^{197}Hg.
>
> Jak widać, marzenia alchemików spełniły się tylko częściowo. Moglibyśmy jeszcze spróbować otrzymać trwałe złoto z platyny, ale czy okazałoby się to opłacalne?
>
> **Koszty uzyskania złota z innych pierwiastków w stosunku do jego ceny rynkowej są w przybliżeniu 5000 razy wyższe!**

Tablica Mendelejewa początkowo zawierała pierwiastki do liczby porządkowej 92 ($_{92}$U). Badanie reakcji jądrowych doprowadziło jednak do wniosku, że istnieją jeszcze cięższe jądra. Nazywamy je**transuranowcami**. Pierwszym pierwiastkiem otrzymanym po uranie był neptun (jego nazwa pochodzi od planety Układu Słonecznego – kolejnej po Uranie). W sumie ma on odkryte 22; wszystkie one są promieniotwórcze. Najtrwalszy izotop neptuna to $^{237}_{93}$Np, którego okres połowicznego zaniku wynosi ok. $2{,}2 \cdot 10^6$ lat. Izotop ten powstaje w wyniku bombardowania jąder uranu $^{238}_{92}$U neutronami. Następny pierwiastek, pluton, uzyskano w wyniku bombardowania jąder uranu jądrami deuteru $^{2}_{1}$H. Pluton – podobnie jak neptun – nie zawiera trwałych izotopów. Okres połowicznego zaniku najtrwalszego z nich wynosi ok. 80 mln lat. Łatwo się domyślić, że dalsze pierwiastki uzyskiwano w podobny sposób: ciężkie jądra bombardowano jądrami coraz to cięższych pierwiastków. Jednym z transuranowców jest**kopernik** ($^{277}_{112}$Cn). Powstał on w następującej reakcji:

$$^{208}_{+82}\mathrm{Pb} + {}^{70}_{+30}\mathrm{Zn} \rightarrow {}^{277}_{+112}\mathrm{Cn} + {}^{1}_{0}n$$

Jego najstabilniejszym izotopem jest obecnie ^{285}Cn. Okresy połowicznego zaniku wszystkich izotopów kopernika są krótsze niż 9 minut.

Zadanie

> **Polecenie 1**
>
> Atomy azotu $^{14}_{7}$N bombardowane deuterem $^{2}_{1}$H tworzą węgiel $^{12}_{6}$C. Zapisz równanie tej reakcji jądrowej. Jakie cząstki są emitowane podczas tej reakcji.

Podsumowanie

- Sformułowanie „sztuczny pierwiastek promieniotwórczy” odnosi się do izotopów promieniotwórczych powstałych w reakcjach wywołanych przez człowieka (sztucznie).
- Pierwsza reakcja jądrowa została przeprowadzona przez Ernesta Rutherforda w wyniku bombardowania atomów azotu cząstkami alfa.

- Eksperyment Rutherforda przebiegał według poniższego schematu:

$$\underset{+7}{^{14}\mathrm{N}} + \underset{+2}{^{4}\alpha} \rightarrow \underset{+8}{^{17}\mathrm{O}} + \underset{+1}{^{1}p}$$

Jądro atomu azotu na skutek przemiany jądrowej przekształciło się w izotop tlenu, czemu towarzyszyła emisja protonu.

- Sztuczne izotopy promieniotwórcze były przedmiotem badań Fryderyka i Ireny Joliot-Curie.
- Reakcje jądrowe można przedstawić według następującego schematu:

$$a + X \rightarrow b + Y$$

gdzie:
X – jądro bombardowanego pierwiastka, tzw. tarcza;
a – cząstka bombardująca;
Y – jądro powstałe w czasie reakcji;
b – cząstka powstała w czasie reakcji.

- Okazało się, że jeśli bombardujemy jądra atomów pierwiastków cząsteczkami lekkimi (protony, neutrony), możemy doprowadzić do rozpadu tych jąder na inne lżejsze jądra, czemu zwykle towarzyszy emisja promieniowania jonizującego.
- W 1935 r. Fryderyk i Irena Joliot-Curie zostali uhonorowani Nagrodą Nobla w dziedzinie chemii. Nagrodę otrzymali za badania nad sztucznymi pierwiastkami i za odkrycie powstawania par elektron – pozyton.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Które zdania są prawdziwe, a które fałszywe?

	Prawda	Fałsz
W reakcjach jądrowych obowiązuje zasada zachowania masy.	◯	◯
W reakcjach jądrowych obowiązuje zasada zachowania ładunku elektrycznego.	◯	◯
W reakcjach jądrowych obowiązuje zasada zachowania masy – energii.	◯	◯
W reakcjach jądrowych obowiązuje zasada zachowania liczby nukleonów.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Praca domowa

Praca domowa

Polecenie 2.1

Atomy siarki $^{32}_{16}\mathrm{S}$ bombardowane neutronami przekształcają się w atomy fosforu $^{32}_{15}\mathrm{P}$. Zapisz równanie tej reakcji.

Polecenie 2.2

Zidentyfikuj cząstki lub pierwiastki X, Y i Z w poniższym zapisie reakcji jądrowej:

$$\mathrm{X} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \ {}^{11}_{5}Y + {}^{4}_{2}Z$$

Polecenie 2.3

W wyniku zderzenia dwóch jąder deuteru możemy otrzymać albo izotop helu $^{3}_{2}\mathrm{He}$, albo izotop wodoru $^{3}_{1}\mathrm{H}$ (tryt). Zapisz równania obu reakcji.

Słowniczek

antycząstka

– cząstka, która w stosunku do danej cząstki różni się jedną cechą, np. znakiem ładunku (elektron β^- i pozyton β^+).

kopernik

– sztucznie wytworzony pierwiastek należący do grupy transuranowców; jego najstabilniejszy izotop to ^{285}Cn.

pozyton

– antycząstka elektronu; ma taką samą masę co elektron i taką samą wartość ładunku o przeciwnym znaku.

sztuczny pierwiastek promieniotwórczy

– pierwiastek będący wynikiem reakcji jądrowych wywołanych sztucznie przez bombardowanie jąder pierwiastków cząstkami alfa, beta, neutronami itd.

tablica Mendelejewa

– patrz: układ okresowy pierwiastków.

transuranowce

– pierwiastki promieniotwórcze ($Z > 92$); w układzie okresowym zajmują miejsca powyżej uranu; zazwyczaj są uzyskiwane sztucznie w wyniku reakcji jądrowych (wyjątek stanowią neptun i pluton – ich śladowe ilości znaleziono w rudach uranowych).

Źródło: Harcourt (https://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY 4.0.

Fryderyk Joliot-Curie

19.03.1900 Paryż – 14.08.1958 Paryż

Francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla w dziedzinie chemii. Nagrodę otrzymał za odkrycie powstawania par elektron–pozyton i za badania nad sztuczną promieniotwórczością.

Źródło: Nobel foundation (http://commons.wikimedia.org), public domain.

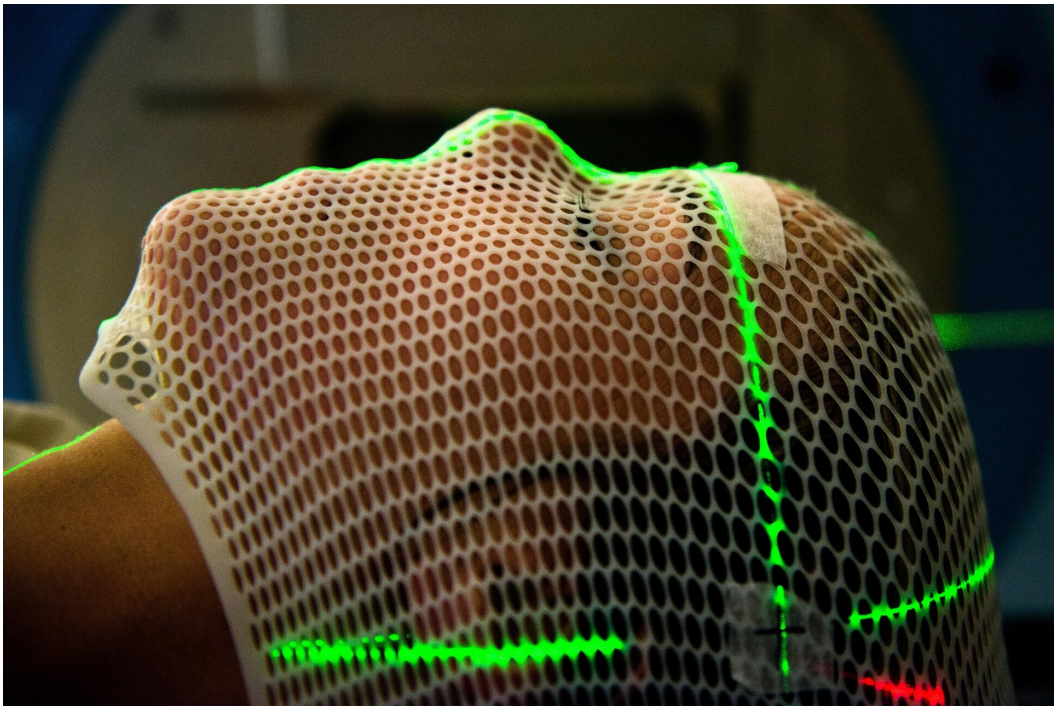
Irena Joliot-Curie

12.09.1897 Paryż – 17.03.1956 Paryż

Córka Marii Skłodowskiej-Curie. Wraz z mężem Fryderykiem otrzymała Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii (za odkrycie powstawania par elektron–pozyton oraz za badania nad sztuczną promieniotwórczością).

Zastosowanie promieniowania jądrowego i energii jądrowej

Czy energia jądrowa powinna nas przerażać? Czy niesie ze sobą jedynie niszczycielską moc i zagładę? A może jest jedyną nadzieją człowieka na przetrwanie? W tym rozdziale nie znajdziesz odpowiedzi na te pytania, ale pomoże ci on wyrobić własny pogląd na to, jak odkrycie energii jądrowej wpłynęło na nasze życie.



Jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów wykorzystania promieniowania jądrowego jest leczenie schorzeń nowotworowych. Wpływ promieniowania jonizującego na żywą tkankę stwierdzili już podczas swoich badań Maria Skłodowska-Curie oraz Pierre Currie (który prowadził doświadczenia w tym zakresie m.in. na sobie), nazywani pionierami medycyny nuklearnej.

Już potrafisz

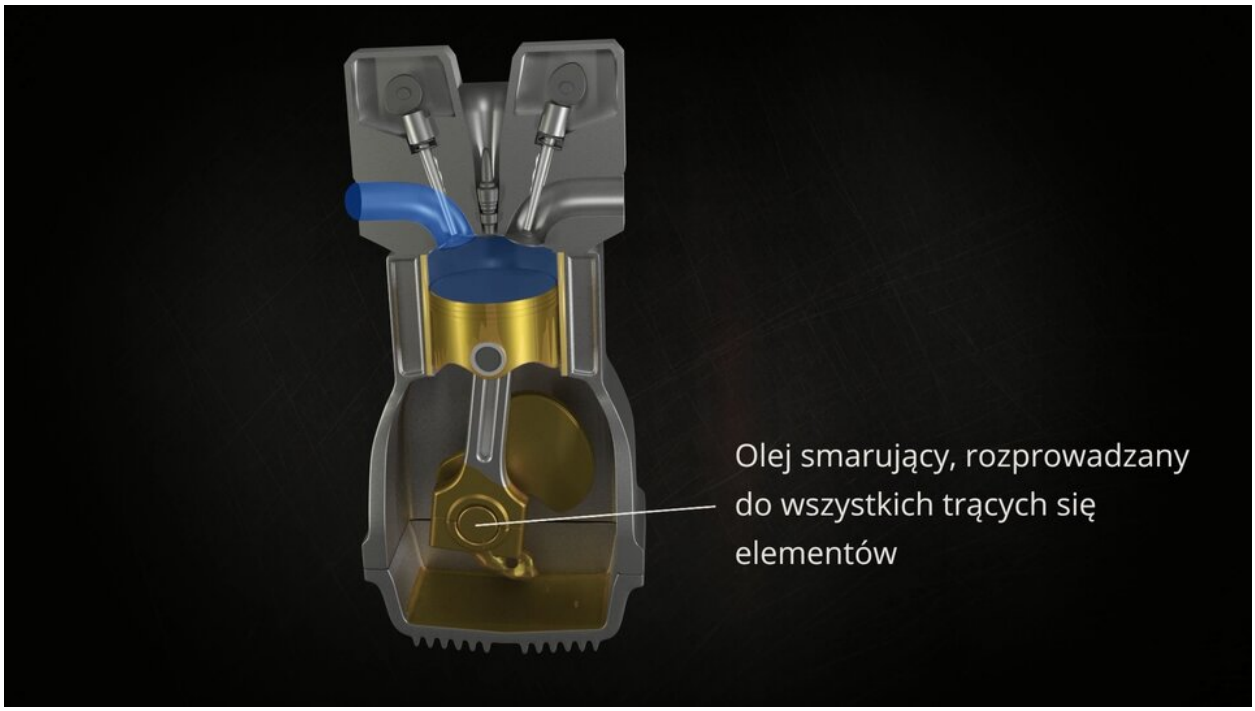
- wymienić rodzaje promieniowania jądrowego i podać ich właściwości;
- opisać wpływ promieniowania jonizującego na organizm ludzki;
- podać definicję aktywności promieniotwórczej izotopu;
- przytoczyć treść prawa rozpadu promieniotwórczego;
- wyjaśnić różnicę między promieniotwórczością sztuczną, a naturalną;
- podać definicję reakcji jądrowej.

Nauczysz się

- opisywać, jak wykorzystujemy promieniotwórczość sztuczną;
- wymieniać sposoby wykorzystania energii wyzwalanej podczas reakcji jądrowych.

Produkcja sztucznych izotopów promieniotwórczych umożliwiła zastosowanie promieniotwórczości w życiu codziennym. **Radioizotopy**wykorzystujemy obecnie w technice, medycynie, a nawet w rolnictwie.

W technice radioizotopy pozwalają precyzyjnie wyznaczyć grubość wytwarzanego materiału, np. papieru lub folii. Jeżeli radioizotop umieścimy pod badanym materiałem, a nad nim ustawimy detektor promieniowania, wówczas nawet najmniejsza zmiana grubości materiału spowoduje także zmianę liczby rejestrowanych cząstek.



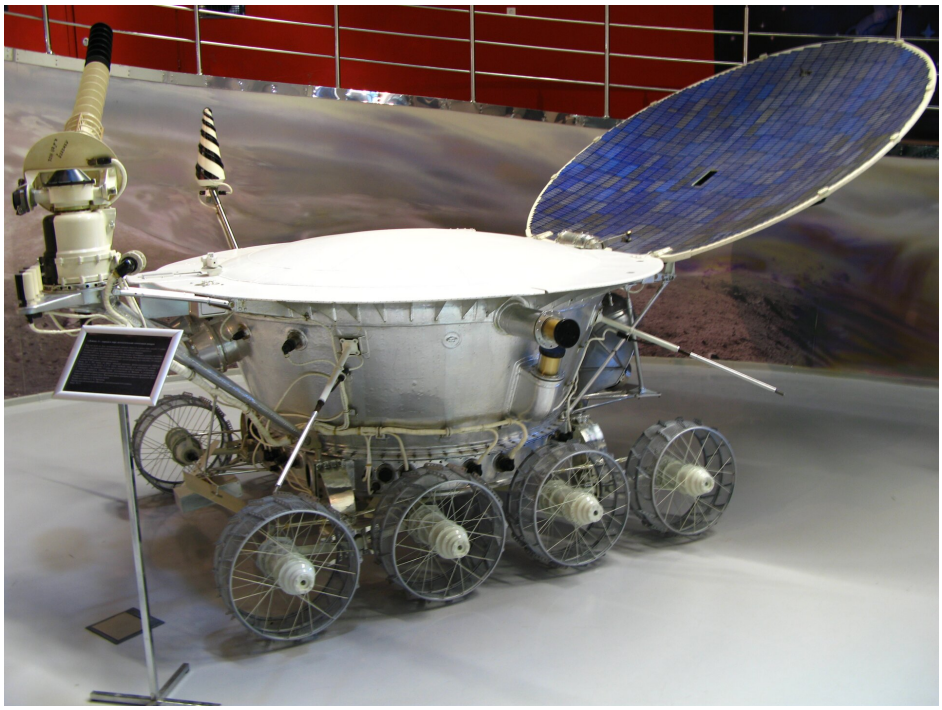
Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Przekrój silnika spalinowego

Animacja przedstawia pracę silnika. Na początku pojawiają się napisy: „FIZYKA” i pod spodem „Przekrój silnika spalinowego”. Następnie pokazano silnik spalinowy – przekrój. Tło czarne. Na środku znajduje się silnik. Silnik jest uruchomiony. Tłok silnika pokryty jest cienką warstwą oleju. Opisano to słowami „Tarcie tłoka o gładź cylindra redukowane przez cienką warstwę oleju (film olejowy)”. Elementy znajdujące się poniżej cylindra również pokryte są warstwą oleju, który z każdym ruchem tłoka jest mieszany. Opisano to słowami „Olej smarujący, rozprowadzany do wszystkich trących się elementów”.

W przemyśle motoryzacyjnym inżynierowie dodają radioizotopy do materiałów wykorzystywanych jako pokrycie wnętrza cylindrów silnika. Robią to na etapie badań, aby sprawdzić który olej jest najlepszy do smarowania silnika. Na skutek tarcia tłoków o cylindry drobiny materiału z radioizotopem przedostają się z cylindrów do oleju silnikowego. Ilość

materiału, który dostał się z silnika do oleju, możemy określić za pomocą detektorów promieniowania – im mniejsze promieniowanie oleju, tym lepiej smaruje on silnik.



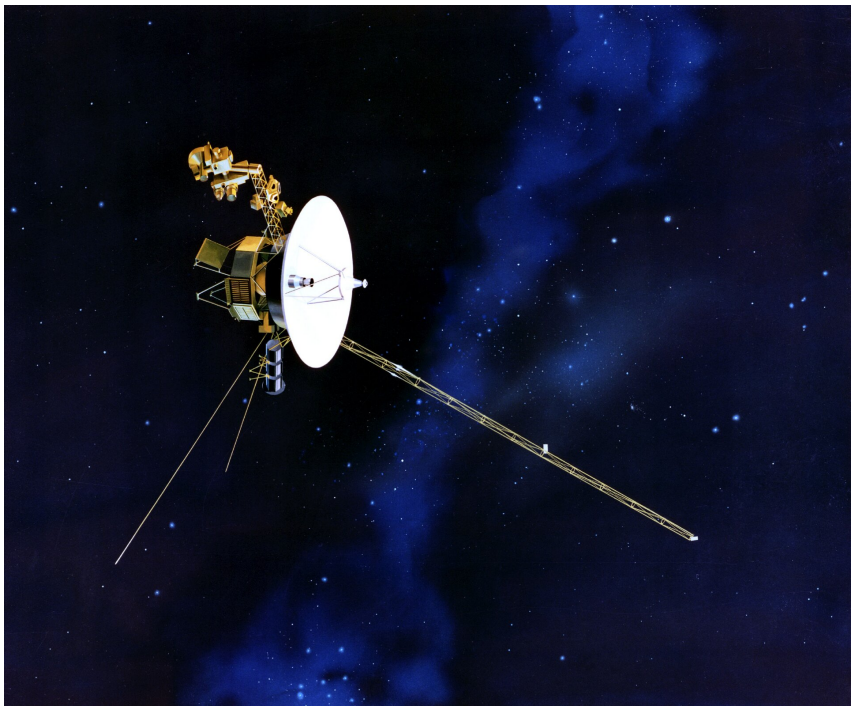
Księżycowy „łazik", który do ogrzewania swoich podzespołów wykorzystywał energię będącą wynikiem rozpadu promieniotwórczego polonu

Ciepło wydzielane podczas rozpadów promieniotwórczych jest wykorzystywane w wielu statkach kosmicznych, zwłaszcza, gdy z powodu dużej odległości od Słońca baterie słoneczne nie mogą dać wystarczającej ilości energii lub gdy pojazd księżycowy musi działać podczas nocy trwającej dwa tygodnie.

Źródła promieniotwórcze produkujące energię zostały użyte w sondach: Pionier 10, Pionier 11, Voyager 1 i Voyager 2.

Sonda Pionier 10, wystrzelona z Ziemi w 1972 r., obecnie znajduje się w odległości ponad 14 miliardów km od Słońca. Ostatnie sygnały pochodzące z tej sondy odebrano w 2003 r., czyli ponad 30 lat po jej starcie. Jest to pierwsza sonda, która opuściła**Układ Słoneczny**. Porusza się ona w kierunku gwiazdozbioru Byka i za dwa miliony lat ma szansę dotrzeć do gwiazdy Aldebaran.

Rok później wystrzelona została Sonda Pionier 11. Jej zadaniem, podobnie jak jej poprzedniczki, było zebranie danych o planetach**Układu Słonecznego** – Jowiszu i Saturnie – oraz o ich najbliższym otoczeniu (np. o Tytanie – największym księżycu Saturna). Po wykonaniu tej misji sonda skierowała się w kierunku gwiazdozbioru Orła.

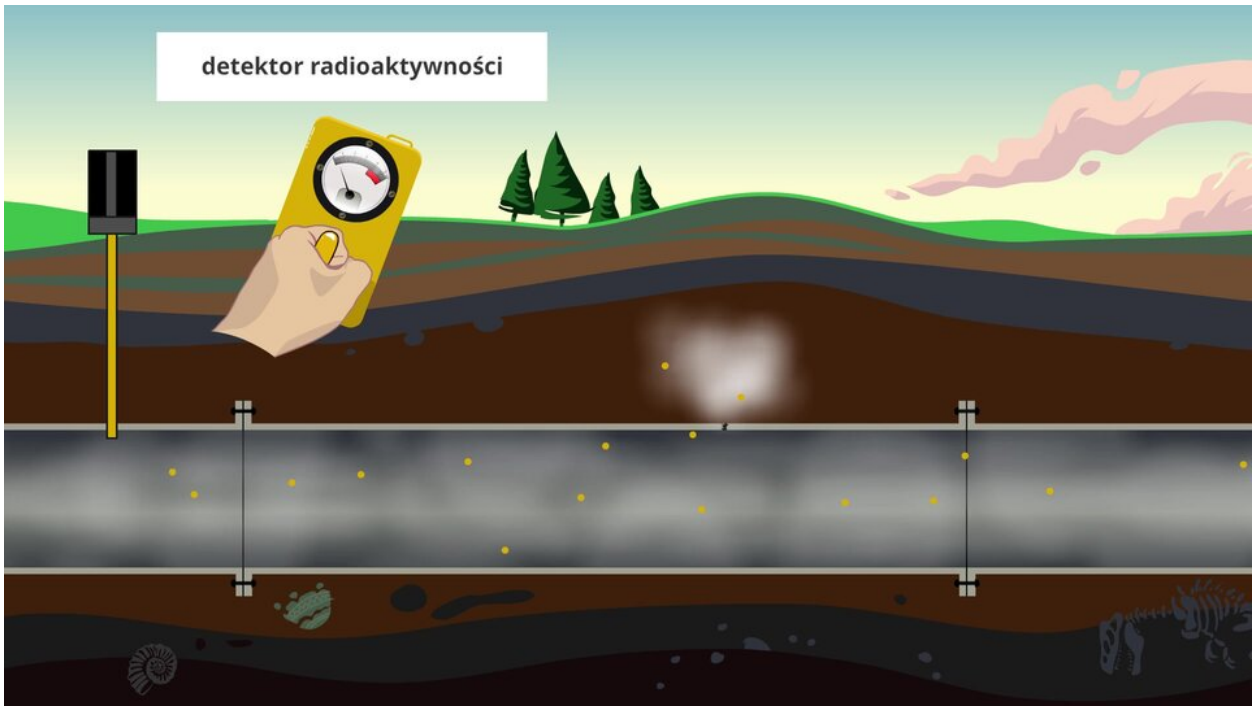


Bezzałogowa sonda kosmiczna Voyager 2

Sonda Voyager 2, wystrzelona w 1977 r., znajduje się w odległości ponad 15 mld km od Słońca. Warto podkreślić, że zasilanie sondy w energię (realizowane z wykorzystaniem trzech tzw. radioizotopowych generatorów termoelektrycznych) nadal działa – przewidywania wskazują, że może ono działać nawet do 2025 r.

Izotop promieniotwórczy wykorzystano także jako źródło ciepła w pojeździe księżycowym Łunochod. Jeden gram polonu produkuje energię $140\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$ i osiąga temperaturę ponad 500°C. Wydajniejszym źródłem energii jest pluton ($^{238}_{94}\mathrm{Pu}$), którego okres połowicznego zaniku wynosi prawie 90 lat. Ten izotop charakteryzuje się niskim poziomem emisji promieniowania β, pochodzącym głównie z produktów rozpadu. Warto wspomnieć, że generatory energii działają na takiej samej zasadzie jak elementy chłodzące w lodówkach turystycznych – z tą różnicą, że procesy w obu urządzeniach przebiegają odwrotnie (jeżeli wykonasz drugie polecenie w zadaniu domowym, to dowiesz się na ten temat znacznie więcej).

Izotopy promieniotwórcze wykorzystujemy także do sprawdzania nieszczelności instalacji kanalizacyjnych i do wykrywania, którędy rozchodzą się zanieczyszczenia w rzekach i jeziorach.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

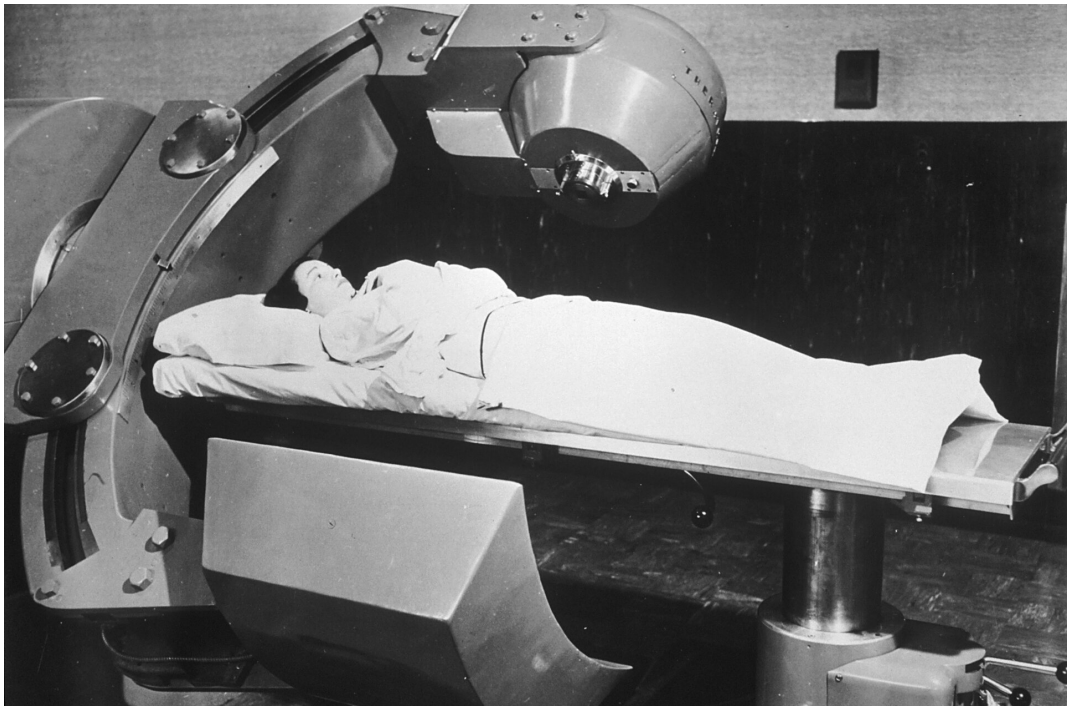
Badanie szczelności rurociągów i kanalizacji za pomocą izotopów promieniotwórczych

Animacja przedstawia jeden ze sposobów praktycznego wykorzystania promieniotwórczości. Na początku pojawiają się napisy: „FIZYKA” i pod spodem „Badanie szczelności rurociągów i gazociągów za pomocą izotopów promieniotwórczych”. Na animacji znajduje się przekrój podłoża (ziemi), na którym widać biegnącą przez szerokość kadru rurę wypełnioną gazem. Rura znajduje się pod ziemią. Powyżej powierzchni widoczne są cztery zielone drzewa iglaste oraz jasnobłękitne niebo i jasnoróżowe chmury po prawej stronie. W rurze, w prawą stronę, przemieszcza się gaz. W środkowej części, od góry, znajduje się dziura, przez którą gaz przedostaje się na zewnątrz, do gleby. Po chwili, z lewej strony, od góry, do rury „wciśnięto” wąską rurkę, przez którą, z zamieszczonego na górze prostokątnego pojemnika, dostają się do rury żółte kuleczki. Kuleczki poruszają się w tę samą stronę, co gaz – w prawo. Kilka z nich przedostaje się przez dziurę w rurze, na zewnątrz. Po kilku sekundach na animacji (po lewej, nad rurą, na wysokości powierzchni ziemi) pojawia się wizerunek ludzkiej ręki trzymającej żółte urządzenie z białą tarczą oraz miernikiem. Wskazówka spoczywa na początku skali. Urządzenie podpisano „detektor radioaktywności”. Napis zmienia się w inny: „słaba radioaktywność”. W tle słychać delikatne zakłócenia. Ręka z detektorem powoli przesuwa się w prawą stronę. Wskazówka cały czas spoczywa na początku skali. Gdy ręka zbliża się do miejsca, w którym znajduje się dziura w rurze, wskazówka przesuwa się na środek skali, a w miejscu bezpośrednio nad dziurą wskazówka przesunęła się na koniec skali, na czerwone pole. Na detektorem pojawia się napis „wzmożona radioaktywność, prawdopodobnie pod detektorem jest wyciek”. Słychać głośniejsze trzaski. Gdy ręka z detektorem dalej przesuwa się w prawo, trzaski nieco cichną, wskazówka przesuwa się na początek skali i pojawia się napis „słaba radioaktywność”.

W medycynie wykorzystywane są tzw. znaczniki (markery), które m.in. pozwalają określić, czy przepływ**płynu rdzeniowo-mózgowego**w organizmie człowieka jest prawidłowy. Zaburzenia przepływu tego płynu towarzyszą chorobie Alzheimera czy padaczce. Dzięki dożylnemu podaniu znacznika można również badać krążenie krwi.

Duże ilości promieniotwórczego jodu podaje się pacjentom cierpiącym**na nadczynność tarczycy**. Kiedy **tarczyca** się rozrasta, wydziela zbyt duże ilości hormonów, które negatywnie wpływają na funkcjonowanie organizmu człowieka. Aby ograniczyć tę nadczynność, stosuje się radioizotop jodu (podawany w kapsułkach). Promieniotwórczy jod zostaje wchłonięty przez tarczycę, która miejscowo jest niszczona, co prowadzi do ograniczenia jej czynnej powierzchni, a tym samym do mniejszego wydzielania hormonów. Radioizotop jodu działa lokalnie w promieniu 2 mm.

Szerokie zastosowanie do niszczenia guzów nowotworowych znalazła **bomba kobaltowa**.



Niszczenie guza nowotworowego za pomocą bomby kobaltowej

Jest to głowica zawierająca próbkę promieniotwórczego izotopu kobaltu $^{60}_{27}\mathrm{Co}$, który ze względów bezpieczeństwa jest umieszczony w ołowianej komorze. Reakcja rozpadu kobaltu $^{60}_{27}\mathrm{Co}$ przybiera postać:

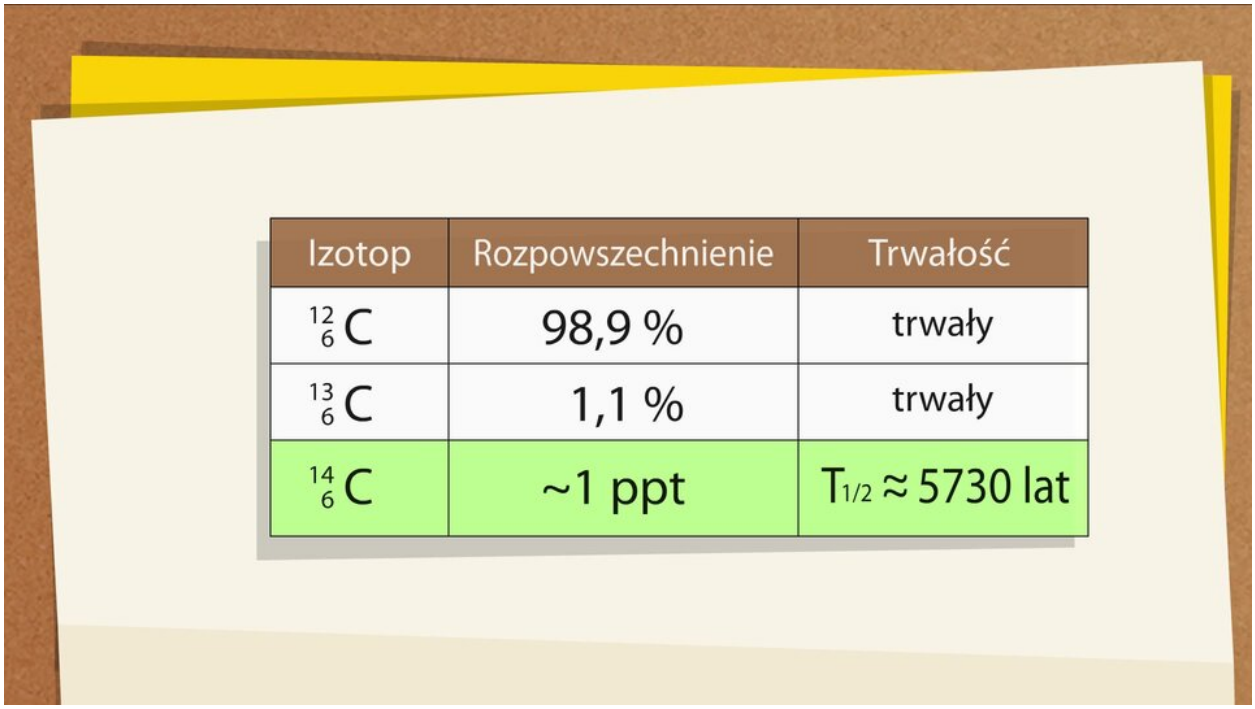
$$^{60}_{27}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\mathrm{Ni} + \ e^{-} + \overline{v}_{e}.$$

Reakcji rozpadu kobaltu towarzyszą emisja promieniowania beta (e^{-}), emisja antyneutrina elektronowego ($\overline{v}_{e}$) oraz uwolnienie dwóch wysokoenergetycznych kwantów gamma. W terapii antynowotworowej wykorzystywane jest właśnie promieniowanie gamma.

Aktywność izotopu kobaltu zawiera się w granicach 10^{13}–10^{14} Bq, co czyni go wydajnym źródłem promieniowania γ, które jeśli precyzyjnie pada na guz nowotworowy, niszczy go.

W rolnictwie izotopy wykorzystuje się do badania stopnia wchłaniania nawozów przez rośliny. Do nawozu dodaje się niewielką ilość substancji promieniotwórczej. Nawóz dostaje się do układu korzeniowego, a stamtąd – do naziemnej części rośliny. Następnie bada się poziom radioaktywności roślin i na tej podstawie można ocenić ilość wchłoniętego nawozu i oszacować jego odpowiednią dawkę.

Dzięki promieniotwórczości możemy także określać wiek niektórych substancji. Warunkiem jest jednak to, że muszą one zawierać węgiel i być częścią organizmu, który był kiedyś żywy. Metoda ta – oparta na**datowaniu radiowęglowym** – jest użyteczna zwłaszcza w badaniach archeologicznych. W atmosferze wytwarzany jest izotop węgla ^{14}C. Powstaje z niego dwutlenek węgla, który miesza się z CO_2 zawierającym zwykły węgiel ^{12}C i właśnie taką mieszankę pobierają rośliny. Jeżeli organizm umiera, to pobieranie węgla ^{14}C ustaje, a jego ilość stopniowo się zmniejsza. Problematyczne w tej metodzie jest to, że zawartość węgla promieniotwórczego jest bardzo mała, a ponadto nie wiemy, czy i jak zmieniała się w starożytności zawartość tego izotopu. Ci z was, którzy interesują się historią, mogą sprawdzić, czy opisana wyżej metoda daje dobre wyniki. Często dysponujemy niezależnymi informacjami na temat wieku danego przedmiotu – przykładem mogą być próbki o dość dokładnie określonym wieku, np. fragmenty łodzi pogrzebowych faraonów, elementy ich grobowców czy drewno z sarkofagów mumii. Pozwala to na dokładniejsze wyznaczanie wieku tych przedmiotów, a nawet na wnioski dotyczące zmian zawartości węgla ^{14}C w atmosferze ziemskiej na przestrzeni minionych wieków.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Zastosowanie izotopu węgla w badaniach archeologicznych

Na ekranie tabela przedstawiająca różne izotopy węgla, i rozpowszechnienie i trwałość. Następnie opis jednostki ppt używanej przez chemików. Na ekranie pojawia się schemat reakcji. Potem kolejny schemat reakcji. Rysunek 3D przedstawiający część kuli ziemskiej z „lotu ptaka, widoczna atmosfera w formie mgiełkowej poświaty. W atmosferze widać schemat przedstawiający rozpad oraz tworzenie izotopu nietrwałego. Następnie schemat dwutlenku węgla, pokazane na co się dzieli. Rysunek przedstawiający część łańcucha pokarmowego. Rysunek ściętego drzewa od niego strzałki wskazujące na rysunki kłód drewna od nich strzałki wskazujące na różne wyroby z drewna. Obok rysunek szkieletu zwierzaka. Pionowo w kolumnie rysunki z napisami: Siekierka – 81% 1000 lat temu, Drewniany totem – 55% 5000 lat temu, Duży ząb – 30% 10000 lat temu, Czaszka – 9% 20000 lat temu.

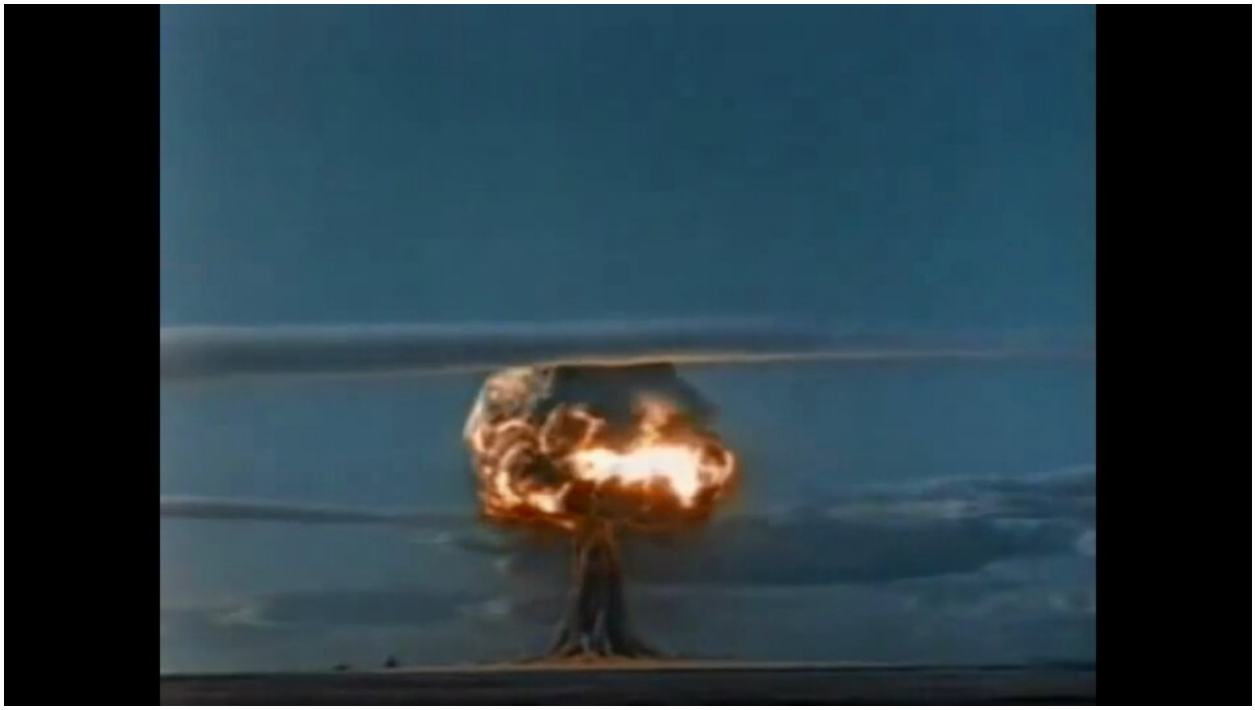
Do wyznaczania wieku skał wykorzystuje się radioaktywny potas $^{40}_{19}\mathrm{K}$, który jeśli ulegnie rozpadowi, przekształca się w izotop argonu $^{40}_{18}\mathrm{Ar}$. Okres połowicznego zaniku potasu wynosi 1,25 mld lat.

Załóżmy, że w pewnej próbce skały zawarte jest $1{,}8 \cdot 10^{-6}$g potasu $^{40}_{19}\mathrm{K}$ i $12{,}6 \cdot 10^{-5}$g argonu $^{40}_{18}\mathrm{Ar}$ pochodzącego z rozpadu potasu. Dane te wskazują, że liczba atomów argonu jest 7 razy większa niż atomów potasu (masy atomów argonu i potasu są jednakowe). Jeżeli założymy, że wszystkie atomy argonu pochodzą z rozpadu potasu, to możemy wywnioskować, że na początku atomów potasu było 8 razy więcej niż obecnie. Wynika z tego, że od rozpoczęcia procesu rozpadu upłynęły 3 okresy połowicznego zaniku, a więc rozpad rozpoczął się 3,75 mld lat temu. Uważny czytelnik mógłby zapytać, czy wcześniej w tej skale znajdowały się atomy argonu, które nie pochodziłyby z rozpadu potasu. Do pomiarów wybierane są jednak skały pochodzenia wulkanicznego – kiedy ta skała była w stanie płynnym, cały argon się ulotnił. Ocenia się, że ta metoda pozwala na ustalenie wieku skały z dokładnością do10%.

Produktem przemian i reakcji jądrowych są nie tylko sztuczne izotopy, lecz także energia. Energię tę możemy wyzwolić zarówno w sposób kontrolowany (w elektrowniach jądrowych, gdzie pozyskuje się energię elektryczną), jak i niekontrolowany (wybuch jądrowy). Niszczące możliwości bomby jądrowej zostały wykorzystane w końcowej fazie II wojny światowej. 6 sierpnia 1945 r. nad miastem Hiroszima w Japonii została zdetonowana bomba, której wybuch zabił ponad 78 tysięcy osób. Trzy dni później powtórzono atak w Nagasaki, gdzie życie straciło ponad 40 tysięcy mieszkańców.

Kwestią wytwarzania energii w różnych reakcjach jądrowych zajmiemy się w następnych rozdziałach.

Zniszczenie Hiroszimy i Nagasaki



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Wybuch bomby atomowej

Bomba atomowa

Polecenie 1

Czas połowicznego rozpadu węgla ^{14}C wynosi około 5700 lat. Ze znalezionego drewnianego narzędzia wyizolowano węgiel o masie 1 grama. Stwierdzono, że aktywność tej próbki węgla jest cztery razy słabsza od aktywności 1 grama węgla uzyskanego z takiego samego gatunku drzewa rosnącego obecnie. Ile lat temu powstało narzędzie? Przyjmij, że drewno, z którego je wykonano, uzyskano z drzewa ściętego w tym samym roku, a zawartość węgla ^{14}C w atmosferze była taka sama jak dziś.

Podsumowanie

- Sztuczna promieniotwórczość znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach energetyki, medycyny, nauki, techniki i przemysłu.
- Powszechnie stosowanym sposobem określania wieku znalezisk archeologicznych jest datowanie metodą radiowęglową (przy wykorzystaniu izotopu ^{14}C).
- Broń atomowa została po raz pierwszy użyta pod koniec II wojny światowej (1945 r.). Zniszczeniu uległy wówczas dwa japońskie miasta: Hiroszima i Nagasaki. W Hiroszimie na skutek uderzenia jądrowego zginęło ponad 78 tys. mieszkańców, w Nagasaki – ponad 40 tys.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Dlaczego nie możemy zastosować metody datowania węglem C-14 w przypadku monet?

	Prawda	Fałsz
Ponieważ monety zawierają zbyt dużo tego izotopu i nie istnieją mierniki umożliwiające pomiar aktywności tak dużej ilości izotopu węgla.	◯	◯
Ponieważ monety nie powstały z materii ożywionej.	◯	◯
Ponieważ monety nie składają się z tkanek biologicznych.	◯	◯
Ponieważ monety są za małe i nie możemy uzyskać z nich wystarczającej ilości węgla do badań.	◯	◯

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Praca domowa

Praca domowa

Polecenie 2.1

Poszukaj w internecie informacji o lotach sond kosmicznych wymienionych w tym rozdziale.

Polecenie 2.2

Znajdź w internecie informacje o zjawisku termoelektrycznym i jego zastosowaniu do wytwarzania energii elektrycznej w sondach kosmicznych.

Polecenie 2.3

Zastanów się, jaki jest wiek drewnianego antyku, jeśli natężenie promieniowania węgla ^{14}C stanowi w tym antyku 6% natężenia promieniowania w próbce kontrolnej wykonanej z drewna pochodzącego ze świeżo ściętego drzewa.

Polecenie 2.4

Węgiel radioaktywny ^{14}C powstaje w górnych warstwach atmosfery. Promienie kosmiczne zderzają się z jądrami atomów gazu i wytwarzają neutrony, które w zderzeniach z jądrami azotu ^{14}N powodują powstanie jąder węgla ^{14}C. Zapisz równanie tej reakcji.

Polecenie 2.5

Kiedy węgiel radioaktywny ^{14}C się rozpada, emituje promieniowanie β. Zapisz równanie tego rozpadu.

Słowniczek

datowanie radiowęglowe (datowanie ^{14}C)

– metoda wykorzystywana do szacowania wieku znalezisk archeologicznych wykonanych z materiałów biologicznych, wykorzystująca czas połowicznego rozpadu izotopu ^{14}C.

nadczynność tarczycy

– choroba tarczycy; polega na wydzielaniu przez tarczycę nadmiernej ilości hormonów.

płyn rdzeniowo-mózgowy

– bezbarwna ciecz, która wypełnia kanał rdzenia kręgowego i komory mózgu.

radioizotop

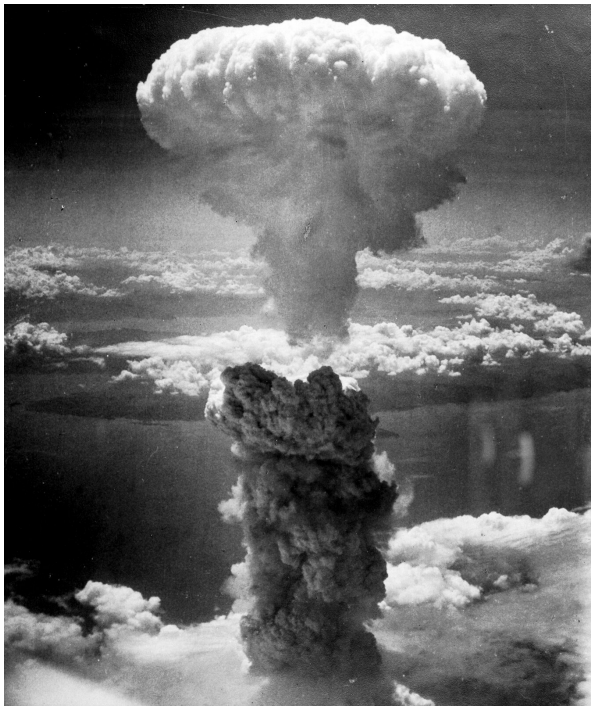
– izotop promieniotwórczy.

Układ Słoneczny

> – układ planetarny składający się ze Słońca i ciał niebieskich powiązanych z nim siłami grawitacyjnymi. W skład Układu Słonecznego wchodzą: Słońce, osiem planet z ich naturalnymi satelitami, planetoidy, komety, meteoryty i inne.

Reakcja łańcuchowa

Jak już wiecie, podczas reakcji jądrowych emitowane są cząstki. Co się jednak stanie, gdy te cząstki napotkają kolejne jądra? Wtedy te jądra się rozpadną i wyrzucą cząstki, te z kolei zderzą się z innymi jądrami, które również się rozpadną i... tak właśnie powstaje reakcja łańcuchowa.



Do przeprowadzenia niekontrolowanej reakcji łańcuchowej rozszczepienia jąder atomowych nie potrzeba zbyt wiele: wystarczy odpowiednia ilość właściwego materiału. W przypadku bomby Fat Man zrzuconej na Nagasaki, której eksplozja pochłonęła ponad 40 tysięcy istnień ludzkich, był to pluton 239 w ilości zaledwie 6 kg.

Już potrafisz

- podać definicję promieniowania jądrowego;
- wymienić rodzaje promieniowania jonizującego i opisać jego właściwości;
- zdefiniować aktywność pierwiastka i jej jednostkę w układzie SI;
- przytoczyć treść prawa rozpadu promieniotwórczego;
- podać definicję reakcji jądrowej;
- wymienić zastosowania izotopów promieniotwórczych w przemyśle, medycynie i nauce;
- opisać zależność energii wiązania od liczby nukleonów.

Nauczysz się

- opisywać reakcję łańcuchową;
- uzupełniać zapisy rekcji rozszczepienia.

Enrico Fermi, urodzony w 1901 r., był uważany za bardzo zdolnego fizyka. Już w 1926 r. opublikował prace na temat cząstek, które obecnie nazywamy **fermionami** (należą do nich m.in. elektron, proton czy neutron).
W 1934 r. prowadził badania nad sztucznymi pierwiastkami promieniotwórczymi (odkrytymi przez Irenę i Fryderyka Joliot-Curie). Próbował w ten sposób znaleźć odpowiedź na pytanie, czy można zwiększyć promieniotwórczość ciał poprzez naświetlanie ich neutronami (odkrytymi dwa lata wcześniej).

Na drodze strumienia neutronów stawiał różne materiały. Planował użyć ołowiu jako swego rodzaju filtra, ale pewnego dnia wpadł na pomysł, aby między źródłem neutronów a badanym materiałem (srebrna folia) umieścić parafinę zamiast ołowiu. Efekt był zdumiewający: naświetlane srebro zaczęło bardzo intensywnie promieniować.

Stosowanie materiałów wykonanych z innych substancji nie dawało podobnych efektów. Fermi zrozumiał, że kluczowe jest ich spowolnienie, gdyż neutrony są wówczas lepiej pochłaniane przez srebro.
Dlaczego parafina spowalnia przechodzące przez nią neutrony? Posłużmy się analogią do zderzających się kul bilardowych. Kule o jednakowych masach mogą się zderzyć w taki sposób, że jedna z nich się zatrzyma, a druga zostanie wprawiona w ruch (dzięki przekazanej energii). Jeśli kule znacznie różnią się od siebie pod względem masy (np. piłeczka pingpongowa zderza się z kulą bilardową), istnieje duża szansa na to, że kula o mniejszej masie odbije się od kuli o większej masie i prawie nie zmieni swojej prędkości (a zatem i energii kinetycznej).

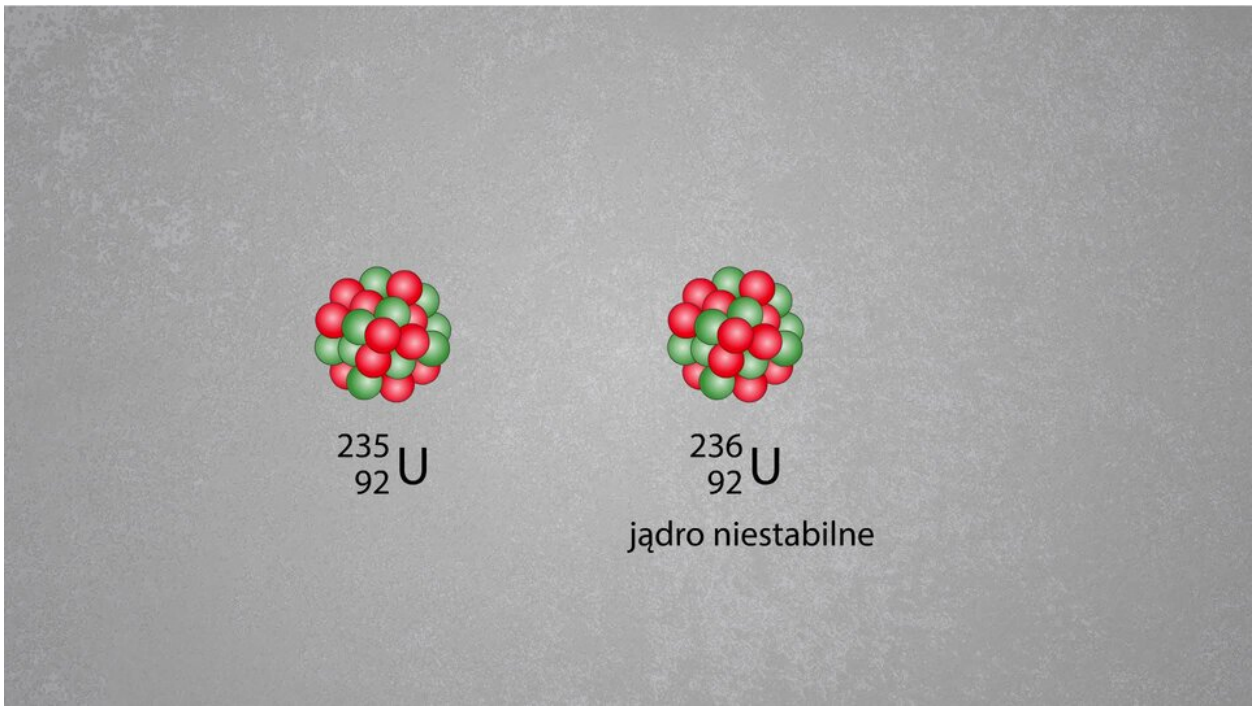
Oznacza to, że jeżeli neutron uderza w jądro o małej masie, to strata energii jest duża, a jeżeli uderza w jądro o dużej masie – prawie w ogóle nie traci energii. Parafina, która składa się głównie z węglowodorów, czyli jąder lekkich (węgla i wodoru), w doświadczeniu Fermiego pełniła funkcję spowalniacza neutronów.

Dalsza historia badania zjawiska rozszczepienia jąder ciężkich związana jest z nazwiskami niemieckich i austriackich uczonych, takich jak **Lise Meitner**, **Otto Hahn**, **Fritz Strassmann** i **Otto Frisch**.

W wyniku bombardowania uranu neutronami odkryto atomy baru – pierwiastka, który ma masę atomową dwa razy mniejszą od masy atomowej uranu. Proces ten nazwano **rozszczepieniem jądra atomowego**. Stwierdzono także, że fragmenty rozszczepionego jądra atomu uranu mają bardzo dużą energię.

W 1944 r. Otto Hahn otrzymał za odkrycie rozszczepienia jądra Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii. Spodziewano się, że Lise Meitner otrzyma Nagrodę Nobla

w dziedzinie fizyki. Tak się jednak nie stało, ale odkryty (a właściwie wyprodukowany) w 1982 r. pierwiastek o liczbie porządkowej 109 został nazwany „meitner”.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Rozszczepienie izotopu uranu U–235

Animacja przedstawiająca rozszczepienie jądra izotopu uranu (92^235)U. Na środku ekranu jądro U235: kulka złożona z kulek 2 kolorów: czerwonych i szarozielonych, kulki wymieszane chaotycznie, kulka nie drga. Z lewej strony ekranu nadlatuje neutron. Neutron przyłącza się do jądra. Z jądra uranu robi się nowa kulka. Po kilku zniekształceniach elipsoidalnych jądro wydłuża się w „hantle”. Niezależne części oddalają się od siebie w przeciwnych kierunkach.

Jak zapewne pamiętacie, analiza wykresu energii wiązania jąder przypadającej na jeden nukleon w różnych pierwiastkach prowadziła do wniosku, że najsilniej związane są nukleony w jądrach żelaza i w jądrach pierwiastków o liczbach masowych zbliżonych do liczby masowej żelaza (nikiel, molibden). Właściwa energia wiązania jest mniejsza dla jąder zwierających zarówno więcej, jak i mniej nukleonów.

Jeśli z jednego jądra powstają dwa, mamy do czynienia z większym **deficytem masy na jeden nukleon** w każdym z nowo powstałych jąder. Innymi słowy sumaryczna masa wszystkich produktów rozszczepienia jest mniejsza od masy jądra przed rozszczepieniem. Co się stało z brakującą masą? Zgodnie ze wzorem $E = \Delta mc^2$ została ona zamieniona na energię. Przykładowo: dla jądra o 240 nukleonach energia wiązania przypadająca na jeden nukleon jest większa o ok. 0,8 MeV niż dla jądra o 120 nukleonach. Oznacza to, że podczas rozpadu jądra o 240 nukleonach wydzieli się energia równa ok. 200 MeV (dla porównania

energia uzyskana przy rozpadzie cząsteczki trotylu wynosi w przybliżeniu 30 eV). Energia będąca rezultatem reakcji rozszczepienia jądra przybiera głównie postać energii kinetycznej nowo powstałych jąder i neutronów oraz promieniowania gamma.

Składowe wyzwalanej energii w procesie przemian jądrowych

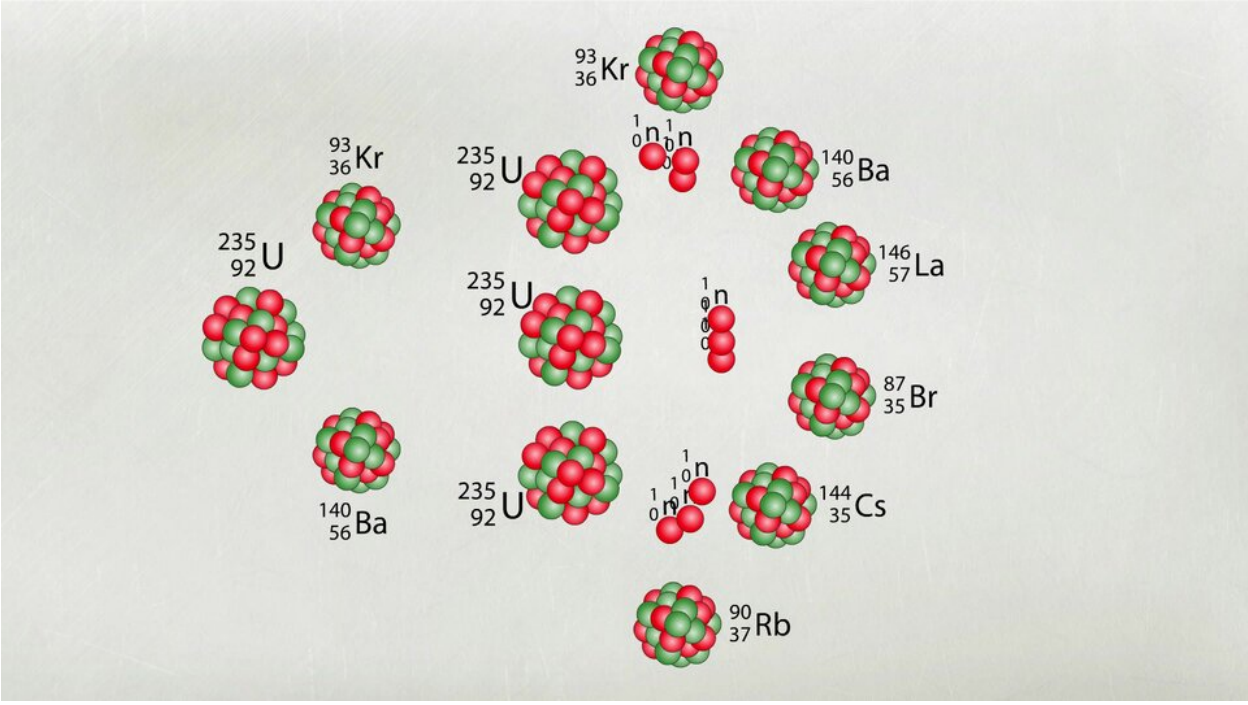
Wartość [MeV]	Składowe wyzwalanej energii
167	Energia kinetyczna fragmentów rozszczepienia (X i Y)
5	Energia kinetyczna neutronów
17	Energia promieniowania beta
7	Energia promieniowania gamma
196	Razem

Reakcję rozszczepienia jądra uranu $^{235}\mathrm{U}$ możemy zapisać następująco:
$${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{91}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{142}_{56}\mathrm{Ba} + 3\left({}^{1}_{0}n\right)$$

Reakcja rozszczepienia jądra plutonu $^{239}\mathrm{Pu}$ może zachodzić według kilku schematów:
$${}^{239}_{94}\mathrm{Pu} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2{}^{1}_{0}n$$
lub
$${}^{239}_{94}\mathrm{Pu} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{130}_{51}\mathrm{Sb} + {}^{107}_{43}\mathrm{Tc} + 3{}^{1}_{0}n,$$
a jego wynikiem mogą być pary zupełnie innych jąder, np

$_{37}\mathrm{Rb}$ i $_{55}\mathrm{Cs}$ lub $_{35}\mathrm{Br}$ i $_{57}\mathrm{La}$. Jak widać, zazwyczaj jedno z jąder ma większą masę. Podział na części o równych masach zdarza się bardzo rzadko.

Naukowców badających to zjawisko zaskoczyło to, że mogło się ono samo podtrzymywać. Każda reakcja rozpadu wytwarzała kolejne neutrony, które bombardowały sąsiadujące jądra i powodowały kolejne reakcje rozszczepienia. Proces ten trwał, dopóki dostępne były jądra izotopu uranu. Wszystkie opisane tutaj procesy składają się na tzw. **reakcję łańcuchową**.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie. Na jeden neutron pochłonięty przypada większa od jedności liczba wyrzuconych w procesie rozszczepienia neutronów swobodnych

Początkowo na ekranie widać tylko jądra uranu 235. Nadlatuje neutron z lewej, „uderza" w jądro uranu a to się dzieli. Części po podziale rozbiegają się. Trzy neutrony uderzają w kolejne 3 jądra uranu i je rozszczepiają. W każdym akcie rozszczepienia powstają 3 neutrony.

Aby mogła zajść reakcja łańcuchowa, muszą zostać spełnione pewne warunki. Reakcja ta nie zachodzi w metalicznym uranie, ponieważ izotop ^{235}U stanowi zaledwie $0{,}7\%$ jego składu, a pozostałe $99{,}3\%$ to słabo promieniotwórczy izotop ^{238}U, który pochłania neutrony, ale nie prowadzi to do reakcji rozszczepienia. Ponadto masa izotopu ^{235}U musi być wystarczająco duża, by neutrony wywołały reakcję łańcuchową i nie opuściły próbki. Musi zostać przekroczona **masa krytyczna**, powyżej której reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie.

W bombach atomowych dochodzi do wybuchu, gdy dwie części substancji radioaktywnej zostaną połączone i ich masa sumaryczna przekroczy masę krytyczną. Gwałtownie zachodząca reakcja łańcuchowa wyzwala wówczas ogromne ilości energii. Gdy dwie części substancji są oddalone od siebie, w każdej z nich reakcja rozszczepienia się wygasza.

> **Polecenie 1**
>
> Kiedy na zewnątrz próbki uranu wydobędzie się więcej neutronów: gdy stanowi ona jedną całość czy gdy jest podzielona na dwie równe części? Odpowiedź uzasadnij.

Podsumowanie

- Rozszczepienie jądra atomowego polega na podziale jądra na dwa (rzadziej na trzy) fragmenty – jądra innych pierwiastków lub ich izotopów, w tym co najmniej dwa, dla których liczba masowa $A > 20$. Jest rezultatem pochłonięcia cząstki (najczęściej neutronu) lub promieniowania γ. Rozszczepieniu jądra towarzyszy emisja promieniowania jonizującego.
- Reakcje jądrowe najczęściej zachodzą w wyniku wychwytu neutronów przez jądro. Neutrony nie oddziałują elektrycznie z jądrami izotopów promieniotwórczych (jądra te – jak wszystkie jądra atomowe – mają ładunek dodatni), co upraszcza zaplanowanie i przeprowadzenie reakcji jądrowych.
- Reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie. W wyniku każdej reakcji rozszczepienia powstają co najmniej dwie cząstki (neutrony), które bombardują sąsiednie jądra atomowe. Cząstki zostają pochłonięte przez jądra, które się rozpadają i wytwarzają następne neutrony. Proces zachodzi lawinowo w całej objętości substancji.
- Reakcji łańcuchowej towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości energii będącej skutkiem deficytu masy. W wyniku reakcji rozszczepienia jądra uranu $^{235}_{92}\mathrm{U}$ wydziela się energia wynosząca ok. 200 MeV.
- Deficyt masy to różnica między masą jądra przed rozpadem, a sumą mas wszystkich nukleonów uzyskanych w wyniku reakcji. W wypadku reakcji rozszczepienia jest dodatni i podlega przemianie w energię (zgodnie ze wzorem $\Delta E = mc^2$).
- Reakcja łańcuchowa nie zachodzi w każdych warunkach. Materiał rozszczepialny musi przekroczyć masę krytyczną.
- Izotop uranu $^{238}_{92}\mathrm{U}$ jest metalem o słabych właściwościach promieniotwórczych, ponieważ zawiera tylko $0{,}7\%$, niestabilnego uranu $^{235}_{92}\mathrm{U}$. Izotop $^{235}\mathrm{U}$ ulega wymuszonemu rozszczepieniu wskutek bombardowania neutronami. Wychwyt neutronów przez izotop $^{238}\mathrm{U}$ nie prowadzi do łańcuchowej reakcji rozszczepienia.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Przeczytaj poniższe zdania. Które z nich są prawdziwe? Zaznacz właściwy wybór.

- [ ] Reakcja rozszczepienia, zachodzi zawsze gdy bombardujemy jądra pierwiastków ciężkich neutronami.
- [ ] Neutrony wytworzone w pojedynczym procesie rozszczepienia mogą inicjować kolejne procesy rozszczepienia. Jeśli średnio więcej niż jeden z wytworzonych neutronów zainicjuje nową reakcję, to liczba rozszczepień rośnie lawinowo. Taki proces nazywamy reakcją łańcuchową.
- [ ] Szczególnym przypadkiem reakcji rozszczepienia jądra jest reakcja łańcuchowa. Jest to reakcja rozszczepienia jądra, która może się rozwijać podobnie jak chemiczne reakcje spalania.

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Praca domowa

Polecenie 2.1

Na podstawie dodatkowych źródeł znajdź schematy reakcji rozszczepienia izotopu uranu ^{235}U. Zapisz przykłady, które nie zostały wymienione w tym rozdziale.
Izotop uranu ^{235}U, który został poddany bombardowaniu neutronami, rozpadł się zgodnie z poniższym schematem reakcji:

$$ {}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{98}_{40}\mathrm{Zr} + {}^{A_2}_{Z_2}Y + 2 \cdot {}^{1}_{0}n $$

Skorzystaj z układu okresowego pierwiastków i zidentyfikuj pierwiastek Y. Oblicz deficyt masy.

Polecenie 2.2

Podczas bombardowania neutronami termicznymi jądro izotopu ^{235}U rozpada się według ogólnego schematu:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}X + {}^{A_2}_{Z_2}Y + k{}^{1}_{0}n + \text{energia}$$

przy czym wydzielana energia wynosi ok. 10^{-11}J. Oszacuj ilość uzyskanej energii pochodzącej z rozpadu 10 g izotopu uranu ^{235}U.

Słowniczek

fermiony

– wszystkie cząstki elementarne (elektrony, pozytony, neutrino, leptony μ) o spinie połówkowym, które podlegają statystyce Fermiego-Diraca; w jednym stanie kwantowym mogą znajdować się co najwyżej dwa fermiony.

masa krytyczna

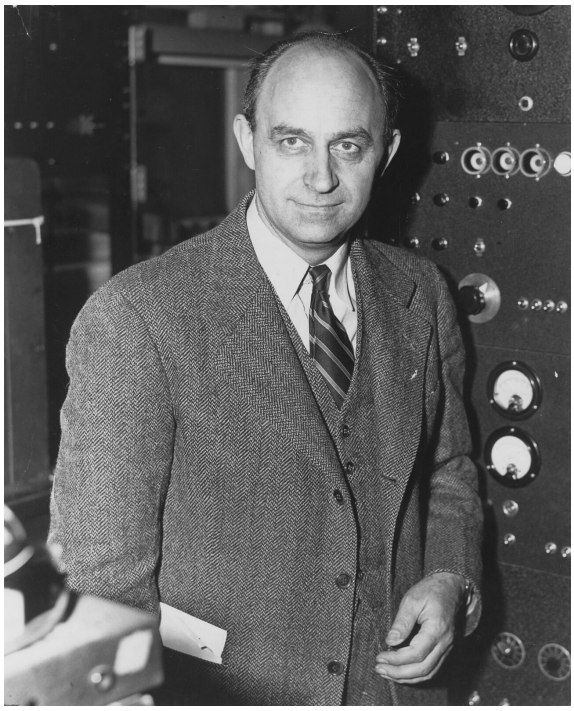
– masa próbki pierwiastka promieniotwórczego, niezbędna to podtrzymywania reakcji łańcuchowej.

reakcja łańcuchowa

– reakcja będąca serią kolejnych reakcji rozszczepienia. Każda reakcja rozszczepienia wytwarza co najmniej dwie cząstki (neutrony), które bombardują sąsiednie jądra. Cząstki zostają pochłonięte przez jądra, które się rozpadają i wytwarzają następne neutrony. Proces zachodzi lawinowo w całej objętości substancji; reakcji łańcuchowej towarzyszy wydzielanie olbrzymiej ilości energii. Reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie.

rozszczepienie jądra atomowego

– podział jądra na dwa (rzadziej trzy) fragmenty – jądra innych pierwiastków lub ich izotopów, w tym co najmniej dwa, dla których liczba masowa A > 20. Jest rezultatem pochłonięcia cząsteczki (najczęściej neutronu) lub promieniowania γ; rozszczepieniu towarzyszy emisja promieniowania jonizującego.



Źródło: Department of Energy. Office of Public Affairs (https://commons.wikimedia.org), public domain.

Enrico Fermi

29.09.1901–28.11.1954

Enrico Fermi był jednym z najbardziej uzdolnionych fizyków wszech czasów. Jako pierwszy skonstruował reaktor jądrowy. Brał czynny udział w pracach nad bombą atomową (projekt Manhattan). Wniósł nieoceniony wkład do fizyki teoretycznej – stworzył statystykę kwantową dla cząstek o spinie połówkowym (statystyka Fermiego-Diraca).

Źródło: Los Alamos National Laboratory (https://commons.wikimedia.org), public domain.

Otto Frisch

1.10.1904–22.09.1979

Fizyk urodzony w Austrii, który swoje prace prowadził na terenie Wielkiej Brytanii. Otto Frisch razem ze swoją ciotką Lise Meitner opisał teoretycznie reakcję rozszczepienia jądra uranu.

Źródło: Nobel foundation (http://commons.wikimedia.org), public domain.

Otto Hahn

8.03.1879–28.06.1968

Niemiecki fizyk, chemik, współodkrywca reakcji rozszczepienia jądra uranu, za co w 1944 r. został uhonorowany Nagrodą Nobla w dziedzinie chemii. Odkrywca zjawiska izomerii jąder atomu oraz izotopów $^{228}\mathrm{Ra}$, $^{228}\mathrm{Ac}$, $^{228}\mathrm{Th}$ i proaktynu.

Źródło: N.N. (http://commons.wikimedia.org), public domain.

Lise Meitner

17.11.1878–27.10.1968

Współpracowniczka Ottona Hahna, uważanego za prekursora technologii jądrowej. Meitner i Hahne wspólnie odkryli zjawisko odrzutu promieniotwórczego i trwały izotop proaktynu. Ze względu na swoje żydowskie pochodzenie Meitner musiała opuścić Niemcy. W Szwecji prowadziła badania w Instytucie Nobla, a następnie na Uniwersytecie Technicznym w Sztokholmie. Pod koniec życia przeprowadziła się do Wielkiej Brytanii, gdzie zamieszkała razem ze swoim siostrzeńcem Ottonem Frischem.

Źródło: Tomorrow Sp.z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Fritz Strassmann

22.02.1902–22.04.1980

Niemiecki chemik, który razem z Ottonem Hahnem odkrył zjawisko rozszczepienia jądra uranu, za co w 1944 r. obaj badacze otrzymali wspólnie Nagrodę Nobla. Prowadził także prace nad praktycznym wykorzystaniem promieniotwórczości, m.in. do określania wieku tworów geologicznych.

Działanie elektrowni jądrowej

Odkrycie reakcji łańcuchowych stworzyło możliwość czerpania energii z przemian zachodzących w jądrach atomowych. Aby móc ją wykorzystywać w kontrolowany sposób, skonstruowano reaktory jądrowe, które w wielu krajach stanowią obecnie podstawę energetyki. Z tego rozdziału dowiecie się, jak kontrolować reakcje łańcuchowe i w jaki sposób działają reaktory jądrowe.

Energetyka atomowa, pomimo pewnych zagrożeń wynikających z jej wykorzystywania, stanowi obecnie najwydajniejsze i jedno z najczystszych źródeł energii elektrycznej

Już potrafisz

- wymienić rodzaje promieniowania jądrowego i opisać jego wpływ na organizmy żywe;
- podać definicję izotopu promieniotwórczego;
- podać definicję aktywności promieniotwórczej;
- za pomocą prawa rozpadu promieniotwórczego obliczyć zmianę (zachodzącą w czasie) średniej liczby jąder izotopu promieniotwórczego;
- podać definicję okresu połowicznego rozpadu;
- wymienić przykłady sztucznych reakcji jądrowych wywołanych bombardowaniem cząsteczkami alfa;
- stwierdzić, że istnieje równoważność masą, a energią;
- podać definicję deficytu masy;
- podać ogólny schemat reakcji rozszczepienia izotopu uranu ^{235}U;

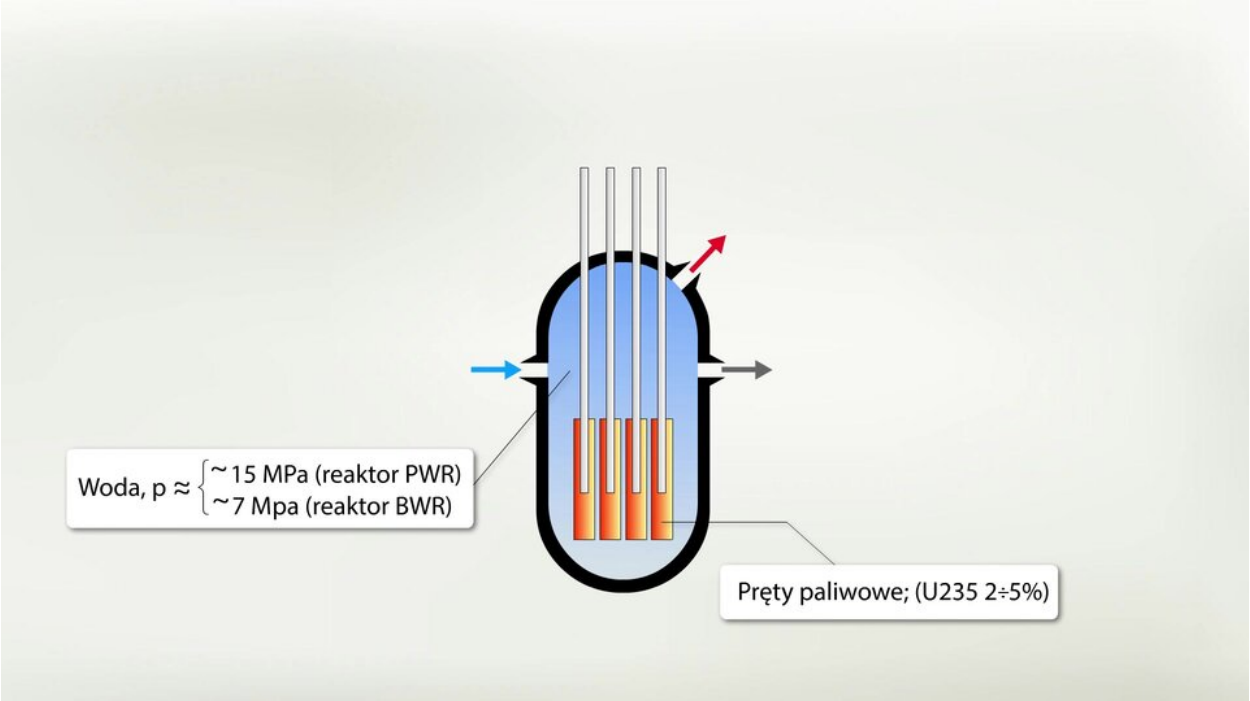
- wyjaśnić przebieg reakcji łańcuchowej rozszczepiania jądra uranu ^{235}U.

Nauczysz się

- jak kontroluje się przebieg reakcji łańcuchowej w reaktorach jądrowych;
- jakie korzyści i zagrożenia niesie ze sobą energetyka jądrowa.

Reakcje łańcuchowe są źródłem ogromnych ilości energii. Problem leży w tym, że jeśli chcemy je wykorzystać, musimy nauczyć się je kontrolować. Jednym z rezultatów każdej reakcji rozszczepienia jest wyrzut neutronów. **Paliwo jądrowe** w większości elektrowni jądrowych stanowi **wzbogacony uran**. Podczas każdego aktu rozszczepienia tego pierwiastka wyrzucane są trzy neutrony mogące spowodować kolejne reakcje. Część neutronów po prostu opuszcza obszar, w którym umieszczono materiał rozszczepialny, a część zostaje pochłonięta przez stabilne jądra izotopu ^{238}U. Aby reakcja samoistnie nie zanikła, przynajmniej jeden z trzech powstałych neutronów musi zostać wychwycony przez jądro niestabilne izotopu ^{235}U.
Na przebieg reakcji wpływają również masa materiału rozszczepialnego (bez odpowiedniej masy reakcja by w ogóle nie zaszła), **masa krytyczna** i rozmiar tego materiału – **rozmiar krytyczny**. Zbyt mały rozmiar i źle dobrany kształt są przyczyną ucieczki neutronów i samoistnego wygaszania przebiegu reakcji.

Reakcja łańcuchowa rozwija się z określoną szybkością. Czas takiej reakcji liczymy od momentu rozszczepienia jądra do chwili, w której neutron zostaje pochwycony przez inne jądro niestabilne. Jeśli ten czas gwałtownie maleje w porównaniu z poprzednim etapem, to reakcja przebiega zbyt szybko i pojawia się zagrożenie wybuchem (właśnie tak działa bomba atomowa). Proces ten zachodzi, gdy neutrony osiągają dużą prędkość (tzw. neutrony prędkie).
Aby móc kontrolować przebieg reakcji jądrowych, skonstruowano reaktory jądrowe. Najważniejszym elementem takiego urządzenia jest **rdzeń**, w którym znajdują się**elementy paliwowe** i **moderator**.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Budowa i zasada działania reaktora

Pojawia się napis „Reaktor lekkowodny LWR". Następnie litery L, W i R przepływają i układają się w pionie: L, W, R. Zaraz potem dodawane są napisy: Light, Water, Reactor. Na ekranie pojawia się grafika przedstawiająca reaktor. Omawiane są poszczególne elementy do których pojawiają się napisy. Pokazane schematycznie zastosowanie reaktora jądrowego

---

Paliwo jądrowe jest umieszczane w reaktorze nie w postaci jednego wsadu, tylko jako osobne elementy paliwowe (często pręty). Dzięki temu do rdzenia można wprowadzić moderator wykonany z substancji spowalniającej pędkość neutronów (**ciężka woda**, grafit, tlenek berylu), a tym samym zwiększyć prawdopodobieństwo wychwycenia neutronów przez jądra materiału rozszczepialnego. Łatwiejsze są też odprowadzenie wytwarzanego ciepła oraz kontrolowanie ilości paliwa w rdzeniu.

Przebiegiem reakcji łańcuchowej sterują pręty kontrolne, które mogą być wsuwane do reaktora na różne głębokości lub też całkowicie z niego wyprowadzane. Pręty kontrolne wykonane są z materiałów, które charakteryzują się dużą zdolnością wychwytywania neutronów (kadm, bor), dzięki czemu liczbę tych cząstek w rdzeniu można zmniejszać lub zwiększać. Ważną rolę odgrywają zwłaszcza tzw. pręty bezpieczeństwa – ich zadaniem jest przerwanie przebiegu reakcji. Gdy reakcja wymyka się spod kontroli, są one wstrzeliwane do rdzenia – wtedy praca reaktora zostaje przerwana. Zmiana strumienia neutronów pozwala na regulację mocy rdzenia.

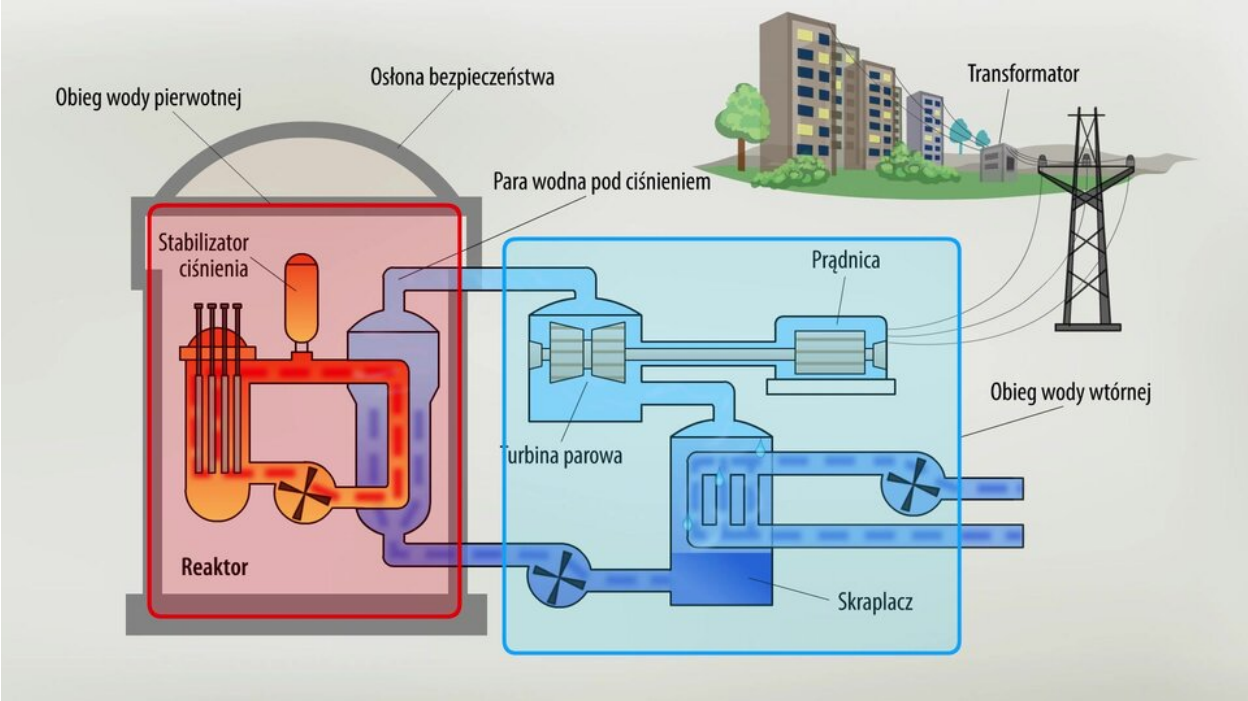
Reaktor podczas pracy wydziela olbrzymie ilości ciepła. Do odprowadzenia energii z rdzenia wykorzystuje się między m.in. ciekły sód, który nie pochłania neutronów, a tym

samym nie wpływa na pracę reaktora. Chłodziwami reaktorowymi mogą być nie tylko ciecze, lecz także gazy mające dobre właściwości cieplne (przewodnictwo cieplne, wysoka temperatura wrzenia, wysokie ciepło właściwe). Chłodziwo przepływa do **wymiennika ciepła**, gdzie swoje ciepło przekazuje wodzie. Ona zaś – już w postaci pary wodnej pod wysokim ciśnieniem – napędza turbiny poruszające się wirnikami generatorów (prądnic). Ich ruch obrotowy zamieniany jest w energię elektryczną (podobnie jak w**dynamie**rowerowym).
Reaktory stosowane są do:

- wytwarzania energii elektrycznej;
- produkcji paliwa jądrowego (w postaci plutonu ^{239}Pu) do celów militarnych;
- produkcji izotopów radioaktywnych (np. mających zastosowanie w medycynie);
- eksperymentów naukowych w fizyce, biologii itd.

Elektrownie atomowe działają podobnie jak konwencjonalne elektrownie cieplne – w obu przypadkach obiegiem roboczym jest obieg parowo-wodny.**Sprawność elektrowni atomowej**waha się w granicach 30–40%, czyli jest nieznacznie niższa niż sprawność elektrowni konwencjonalnej. Elektrownia atomowa wytwarza jednak dużo większą moc – jednostkowy blok energetyczny elektrowni jądrowej jest w stanie wyprodukować od 900 do 1400 MW czystej energii. Jedyną wadą elektrowni atomowych jest produkcja odpadów promieniotwórczych.

Zużyte paliwo wymieniane jest średnio co trzy lata i musi być składowane w miejscach specjalnie do tego przeznaczonych miejscach. Odpady promieniotwórcze najczęściej są wynikiem pracy samej elektrowni – takimi odpadami są np. promieniotwórczy uran ^{235}U nie do końca zużywany w elementach paliwowych lub pluton wytworzony w reaktorze. Odpady promieniotwórcze mogą być również efektem działań związanych z pozyskaniem rud uranu (promieniotwórcze hałdy usypane w pobliżu kopalni).

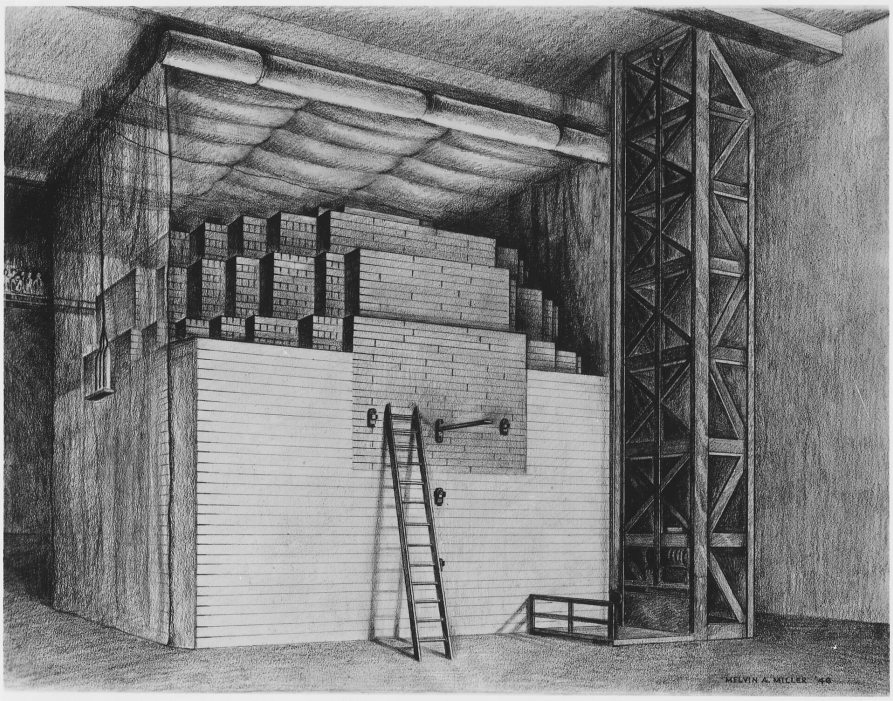


Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Budowa i zasada działania elektrowni jądrowej

Animacja prezentuje budowa i zasada działania elektrowni atomowej. W pierwszej scenie prezentowane są dwa reaktory. Na jednym zaznaczony został wylot gorącej wody, na drugim gorącej pary. Następnie prezentowany jest schemat działania elektorni wykorzystującej reaktory ciśnieniowe PWR, zostaje on omówiony przez lektora. Następnie prezentowany jest schemat budowy elektorwni korzystających z reaktorów z wrzącą wodą BWR, również zostajhe omówiony przez lektora.

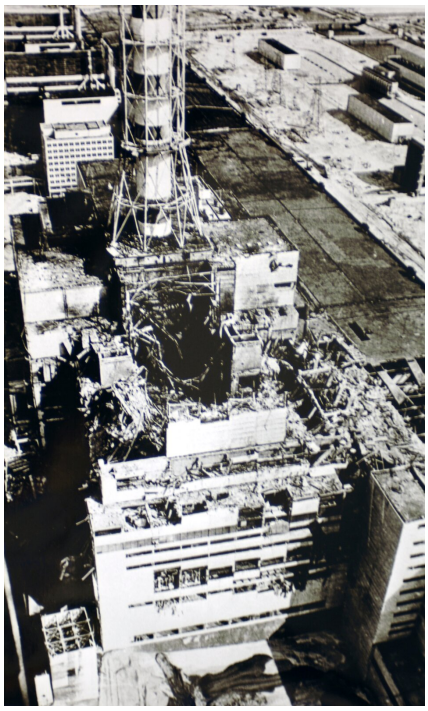
> **Ciekawostka**
>
> Pierwszy reaktor jądrowy, nazywany wówczas stosem atomowym, został zbudowany w 1942 r. przez Enrica Fermiego – włoskiego fizyka. Reaktor ustawiono pod trybuną stadionu Stagg Field. Dzięki temu reaktorowi 2 grudnia 1942 r. udało się przeprowadzić pierwszą reakcję łańcuchową kontrolowaną przez człowieka, w efekcie czego uzyskano energię jądrową.



Pierwszy reaktor jądrowy, skonstruowany przez Enrico Fermiego w 1942 r.

Ciekawostka

26 kwietnia 1986 r. doszło do największej w historii energetyki jądrowej awarii elektrowni jądrowej. Miało to miejsce w Czarnobylu – miejscowości leżącej na terenie obecnej Ukrainy. Należy podkreślić, że awaria reaktora, co należy podkreślić, nie pojawiła się na skutek normalnej eksploatacji bloku energetycznego, tylko była skutkiem przeprowadzanego w tym czasie eksperymentu. Do katastrofy przyczyniła się konstrukcja samego reaktora, który pierwotnie przeznaczony był do celów wojskowych (produkcja plutonu). Chłodziwem w urządzeniach tego typu jest woda. Reaktor uległ znacznemu przegrzaniu – wysoka temperatura doprowadziła do **termolizy** wody, czyli do jej rozkładu na tlen i wodór. Powstała **mieszanina piorunująca**, po czym nastąpił wybuch. Radioaktywny materiał wypełniający elementy paliwowe, który przedostał się do wody jeszcze przed jej odparowaniem, po zniszczeniu kopuły ochronnej skaził bezpośrednie otoczenie elektrowni. Sytuację pogorszył drugi wybuch, który całkowicie zniszczył reaktor; a chmura promieniotwórcza osiągnęła wysokość kilometra.



Awaria elektrowni atomowej w Czarnobylu

Awaria w Czarnobylu spowodowała, że wiele społeczeństw zaczęło krytycznie odnosić się do tego sposobu wytwarzania energii. Jednak potrzeby energetyczne są na tyle duże, że nie da się zrezygnować z tej metody produkcji energii.
Nie wolno zapominać, że elektrownie węglowe również są źródłem substancji radioaktywnych – zanieczyszczeń oraz hałd o podwyższonym stopniu radioaktywności (węgiel jest wydobywany z dużych głębokości, gdzie poziom radioaktywności jest większy niż na powierzchni Ziemi). Nie zawsze pamiętamy też o ofiarach wypadków w kopalniach, a do takich zdarzeń dochodzi każdego roku. Tymczasem o ofiarach śmiertelnych katastrofy elektrowni jądrowej możemy mówić jedynie w przypadku Czarnobyla.

Katastrofa w Czarnobylu i wypadki w innych elektrowniach atomowych doprowadziły do zmian konstrukcyjnych w nowo budowanych elektrowniach. Zaczęto wykorzystywać zjawiska fizyczne, które przebiegają bez udziału człowieka – np. zjawisko konwekcji zachodzi zawsze w określonych warunkach i nie można go przerwać. Chłodzenie reaktora nie jest już wymuszane systemem pomp, tylko uzyskiwane dzięki naturalnemu krążeniu substancji chłodzącej. Konstrukcje reaktorów są wyposażone w cztery niezależne systemy chłodzenia, z których każdy jest w stanie samodzielnie schłodzić rdzeń. Czynnikiem najbardziej poprawiającym bezpieczeństwo jest jednak zastosowanie wody jako moderatora i jednocześnie chłodziwa. Reakcje jądrowe wymagają spowalniania neutronów, ponieważ neutrony prędkie nie wywołują reakcji rozszczepienia uranu ^{235}U. Jeżeli temperatura wzrośnie ponad normę, woda przechodzi w stan pary, zmienia się jej gęstość i możliwości spowalniania maleją. Zaczynają zanikać rozszczepienia jąder uranu, spada ilość wytwarzanej energii i w rezultacie maleje moc reaktora.

W latach 60. XX wieku zaczęto się interesować cyklem torowo-uranowym. W skorupie ziemskiej jest znacznie więcej toru niż uranu, zwłaszcza uranu ^{235}U (pokłady tego izotopu

są od trzech do czterech razy mniejsze, niż pokłady toru). Tor, a przede wszystkim ^{232}Th nie jest materiałem rozszczepialnym. Jądro ^{232}Th pochłania neutrony i tak powstaje promieniotwórczy izotop^{233}Th, który ulega samorzutnemu rozpadowi i tworzy izotop ^{233}Pa (protaktyn). On również nie jest trwały; po następnym rozpadzie powstaje rozszczepialny izotop uranu ^{233}U. Konstrukcje reaktorów wykorzystujących ten izotop są opracowywane w wielu krajach świata. Takim przedsięwzięciem najbardziej zainteresowane są Indie (kraj ten ma bardzo duże złoża toru), gdzie potrzeby energetyczne są ogromne. Prace nad takim paliwem prowadzone są również w Polsce.

> **Polecenie 1**
>
> Dlaczego w niektórych elektrowniach jądrowych stosuje się dwa obiegi parowo-wodne – nazywane obiegiem pierwotnym i obiegiem wtórnym? Odpowiedź uzasadnij.

Podsumowanie

- Łańcuchowe reakcje jądrowe są źródłem olbrzymich ilości energii. Aby móc ją wykorzystać, musimy te reakcje kontrolować. Do sterowania przebiegiem reakcji jądrowych służy reaktor.
- Pierwszy reaktor jądrowy został skonstruowany w 1942 r. w Stanach Zjednoczonych przez włoskiego fizyka Enrica Fermiego.
- Reaktor składa się z rdzenia, w którym umieszczone są elementy paliwowe, moderatora, prętów sterujących, układu chłodzenia i osłony antyradiacyjnej.
- Energię cieplną wytwarzaną przez reaktor elektrownie jądrowe wykorzystują do zamiany wody w parę wodną. Ta napędza wirniki turbin i tak powstajec prąd elektryczny. Elektrownie jądrowe działają podobnie jak konwencjonalne elektrownie cieplne; różnica polega na sposobie uzyskiwania energii.
- Korzyści płynące z wykorzystania elektrowni atomowych są olbrzymie; pozwalają one uzyskiwać niemal nieograniczone ilości czystej energii. Główne wady to konieczność składowania materiałów radioaktywnych i zapewnienie szeroko pojętego bezpieczeństwa pracy.
- Do największej awarii elektrowni atomowej doszło w 1986 r. w Czarnobylu, na terenie dzisiejszej Ukrainy. Skażeniu promieniotwórczemu uległ obszar ponad 100 000 km^2.

> **Praca domowa**

> **Polecenie 2.1**
>
> Sprawdź w internecie, jakie konstrukcje reaktorów jądrowych są obecnie stosowane i w jaki sposób zapewniane jest w nich bezpieczeństwo.

> **Polecenie 2.2**
>
> Dlaczego nie można używać ołowiu lub żelaza jako moderatorów?

> **Polecenie 2.3**
>
> Zapisz przebieg następującej reakcji ^{232}Th jest bombardowany neutronami. Powstaje z niego^{233}Th, następnie tworzy się z niego protaktyn^{233}Pa, a po kolejnym rozpadzie – uran^{233}U. Zapisz, jakie cząstki (oprócz wymienionych jąder) powstają w tych procesach.

Słowniczek

> **ciężka woda**
>
> – woda, w której wysoki procent stanowią atomy izotopu wodoru – deuteru (2H). W elektrowniach jądrowych wykorzystywana jest jako moderator (spowalniacz neutronów).

> **dynamo**
>
> – prądnica rowerowa.

> **element paliwowy**
>
> – jednostka paliwa jądrowego (stałego lub ciekłego) otoczona hermetycznym zamknięciem (koszulką). Elementy paliwowe umieszczane są w rdzeniu reaktora w tzw. siatce, tak aby zachować między nimi odstęp. Pozwala to na lepsze chłodzenie tych elementów i manewrowanie paliwem.

> **moderator**
>
> – substancja spowalniająca neutrony (grafit, ciężka woda).

paliwo jądrowe

– rozszczepialny materiał paliwowy reaktora (pluton, wzbogacony uran).

sprawność elektrowni atomowej

– stosunek uzyskanej energii elektrycznej do energii cieplnej wytworzonej w reaktorze (elektrowni). Straty energetyczne w elektrowniach jądrowych są duże i ich sprawność zbliżona jest do wartości 1/3 (maksymalnie w granicach 40%).

termoliza

– rozkład substancji na cząsteczki lub atomy zachodzący pod wpływem temperatury.

współczynnik powielania neutronów

– wielkość bezwymiarowa oznaczana literą „k”; odpowiada stosunkowi liczby neutronów powstających na pewnym etapie reakcji łańcuchowej do liczby neutronów powstałych we wcześniejszym etapie. Reakcja łańcuchowa nie zanika, jeśli $k \geq 1$.

wymiennik ciepła

– urządzenie służące do wymiany ciepła między płynami.

wzbogacony uran

– uran ^{238}U, który zawiera więcej uranu ^{235}U niż naturalny uran (ponad 0,72%).

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

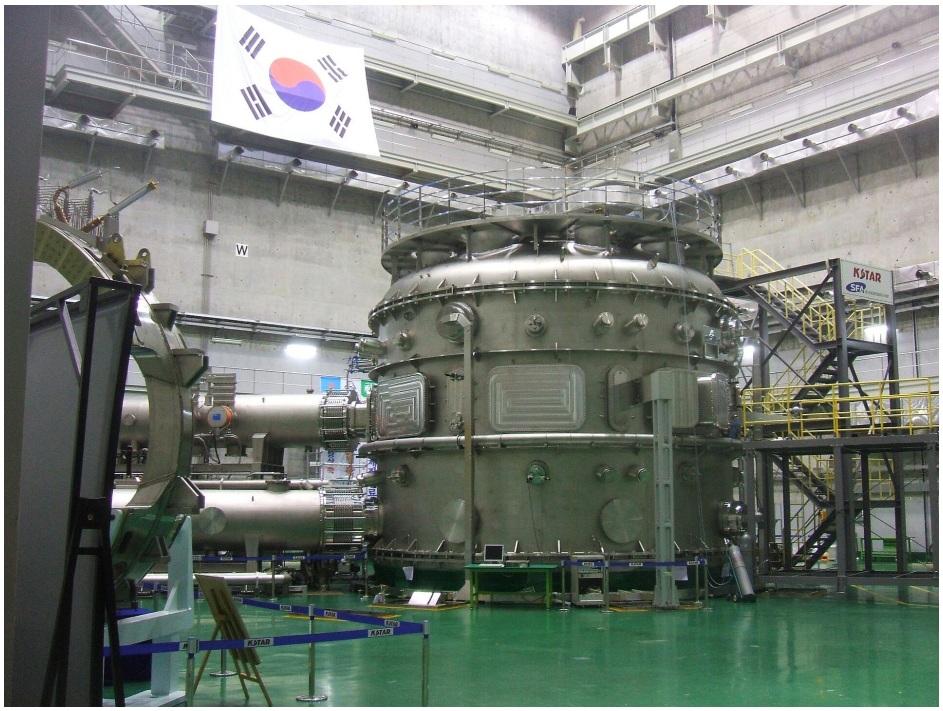
Wybierz prawidłowe zakończenie zdania. Urządzenie, w którym w sposób ciągły wykorzystuje się energię powstałą w wyniku rozszczepienia jąder, to:

- ◯ bomba atomowa.
- ◯ reaktor jądrowy.
- ◯ bomba wodorowa.

Źródło: Dariusz Kajewski, licencja: CC BY 3.0.

Reakcje termojądrowe

Na wykresie zależności właściwej energii wiązania przewidziano drugi typ reakcji jądrowych (inny niż rozszczepienie), w których wydzielana jest energia. Są to reakcje syntezy. Polegają one na tym, że z połączenia lekkich jąder powstają jądra pierwiastków cięższych. W tym rozdziale przeczytasz, jak doprowadzić do takiej reakcji, dlaczego jej wydajność jest większa, niż wydajność reakcji rozszczepiania i czemu synteza jądrowa nie stała się jeszcze powszechnie wykorzystywanym źródłem energii.



Reakcje zachodzące w sposób naturalny we wnętrzu Słońca ludzkość próbuje odtworzyć na kilka sposobów, m.in. poprzez magnetyczne uwięzienie plazmy w urządzeniach zwanych tokamakami.

Już potrafisz

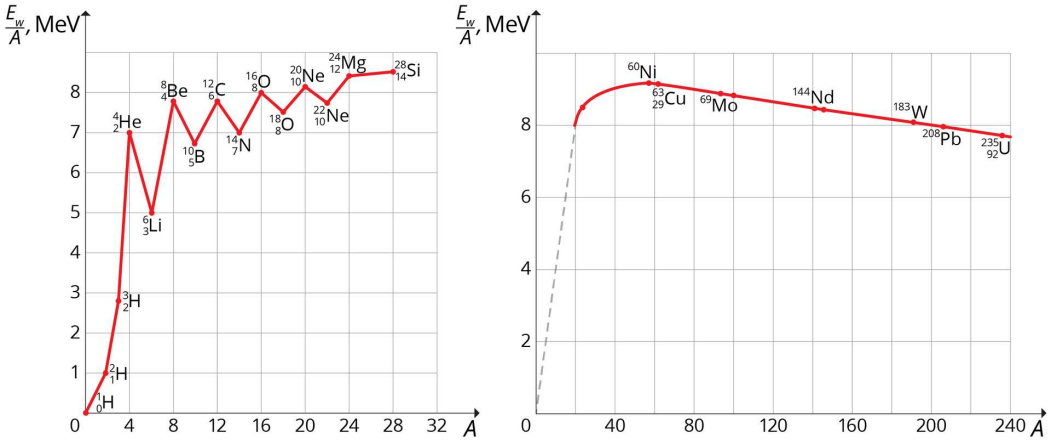
- podać definicję promieniowania jądrowego;
- wymienić rodzaje promieniowania jądrowego;
- wymienić właściwości promieniowania alfa, beta i gamma;
- podać definicję izotopu promieniotwórczego;
- opisać wpływ promieniowania jonizującego na organizm ludzki;
- podać ogólny schemat reakcji rozszczepienia jądra atomowego;
- wyjaśnić, na czym polega łańcuchowa reakcja rozszczepienia;
- opisać budowę i działanie reaktora jądrowego;
- wymienić korzyści płynące z energetyki jądrowej;
- opisać budowę i funkcjonowanie elektrowni jądrowej.

Nauczysz się

- zapisywać reakcje syntezy jąder atomowych;
- opisywać warunki, w jakich można doprowadzić do połączenia się dwóch jąder;
- wymieniać reakcje termojądrowe jako źródła energii gwiazd.

1. Reakcja syntezy jąder atomowych

Reakcje rozszczepienia jąder ciężkich nie są jedynym dostępnym źródłem energii związanym z przemianami jednych atomów w inne.



Średnia energia wiązania przypadająca na jeden nukleon. Wykres a) reprezentuje obszar jąder lekkich, natomiast wykres b) – obszar jąder ciężkich

Energia jądrowa wydzielana jest w reakcjach, w których końcowe produkty mają większy deficyt masy przypadający na jeden nukleon, niż pierwiastki stanowiące substraty tych reakcji. Taka sytuacja zachodzi w wyniku połączenia dwóch lekkich jąder w jedno o większej masie.

Energia wiązania w jądrach lekkich przypadająca na jeden nukleon

Jądro	$^{1}_{1}H$	$^{2}_{1}H$	$^{3}_{1}H$	$^{3}_{2}He$	$^{4}_{2}He$	$^{7}_{3}Li$	$^{12}_{6}C$
$E_{\text{wiązania}}[\text{MeV}]$		2,22	8,47	7,72	28,30	37,95	92,20

Jądro	${}_{1}^{1}\mathrm{H}$	${}_{1}^{2}\mathrm{H}$	${}_{1}^{3}\mathrm{H}$	${}_{2}^{3}\mathrm{He}$	${}_{2}^{4}\mathrm{He}$	${}_{3}^{7}\mathrm{Li}$	${}_{6}^{12}\mathrm{C}$
$\frac{E_{\text{wiązania}}}{\text{nukleon}}\,[\mathrm{MeV}]$		1,11	2,82	2,57	7,08	5,42	7,68

Z powyższego wykresu wynika, że połączenie dwóch jąder lekkich w jedno cięższe również może być źródłem energii. Ponadto możemy zauważyć, że energia wiązania nukleonu helu ${}_{2}^{4}\mathrm{He}$ wielokrotnie przewyższa energię w jądrze deuteru ${}_{1}^{2}\mathrm{H}$.

Jądro helu jest więc znacznie stabilniejsze niż jądro deuteru, zatem żeby oderwać nukleon od jądra helu, trzeba dostarczyć o wiele więcej energii, niż w przypadku jądra deuteru. Gdyby zatem połączyć ze sobą dwa jądra deuteru w jedno jądro helu, to w takim procesie zostałaby uwolniona duża nadwyżka energii (kosztem deficytu masy). Takie reakcje nazywamy reakcjami syntezy jąder:

$${}_{1}^{2}\mathrm{H} + {}_{1}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}_{2}^{3}\mathrm{He} + n.$$

Ilość wydzielanej energii podczas takiej reakcji wynosi ok. $3{,}25\ \mathrm{MeV}$.

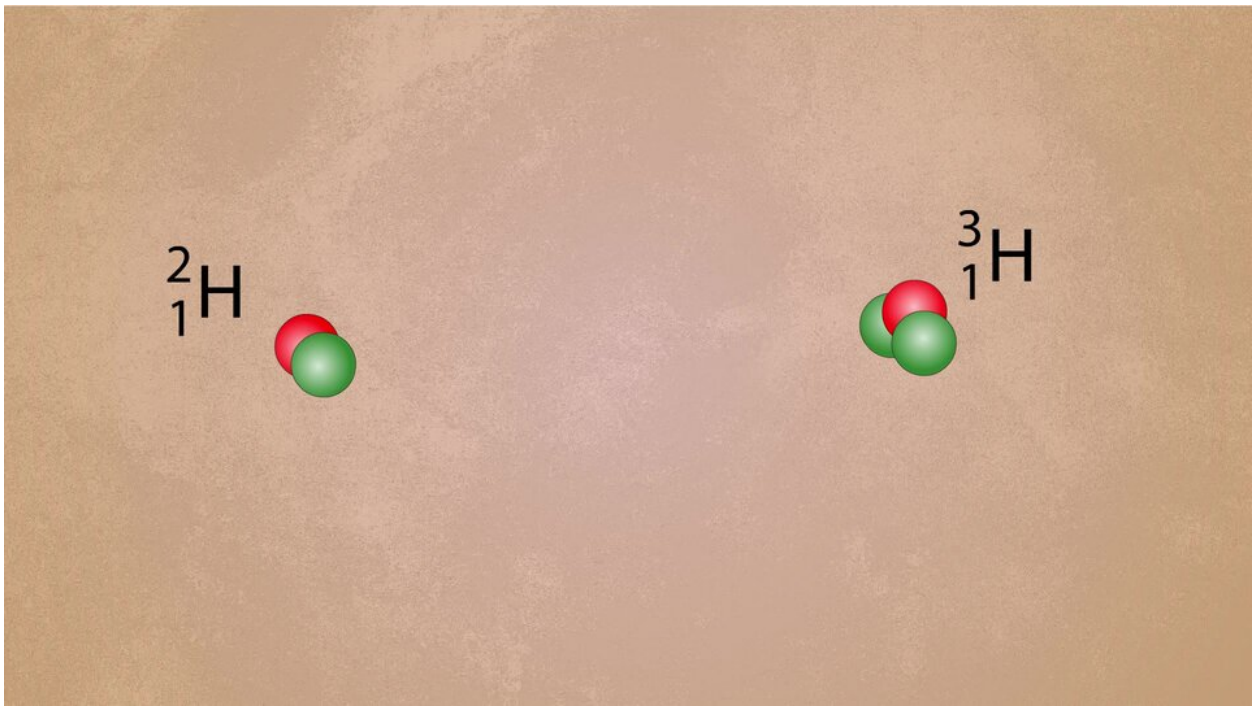
Możliwe są inne schematy przebiegu reakcji syntezy jąder, znacznie korzystniejsze energetycznie:

$$ {}_{1}^{2}\mathrm{H} + {}_{1}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}_{1}^{3}\mathrm{H} + \mathrm{p} + 4{,}03\ \mathrm{MeV}$$

lub

$$ {}_{1}^{2}\mathrm{H} + {}_{1}^{3}\mathrm{H} \rightarrow {}_{2}^{4}\mathrm{He} + \mathrm{n} + 17{,}6\,\mathrm{MeV}.$$

Podczas syntezy jądra trytu i deuteru (ostatni schemat) zostaje uwolniona energia, która w przeliczeniu na nukleon czterokrotnie przewyższa energię uzyskaną z rozszczepienia jądra uranu ${}^{238}\mathrm{U}$.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Reakcja syntezy jądra deuteru i trytu w jądro helu

Animacja przedstawia reakcję syntezy jądra deuteru i trytu w jądro helu. Na początku pojawiają się napisy: „FIZYKA” i pod spodem „Synteza termojądrowa”. Tło beżowe. Pierwsza scena: po lewej dwie przylegające do siebie kile, jedna zielona, druga czerwona. Obok czarny napis z indeksem górnym i dolnym po lewej stronie litery: 2 (góra) 1 (dół) H. Po prawej: trzy przylegające do siebie kule, dwie zielone i jedna czerwona (czerwona w środku). Obok czarny napis z indeksem górnym i dolnym po lewej stronie litery: 3 (góra) 1 (dół) H. Kule z prawej i lewej zbliżają się do środka ekranu – do siebie. Po chwili kule łączą się ze sobą, znikają czarne napisy. Złączona kule przez chwilę drgają, a następnie oddzielają się od siebie, w taki sposób, że na lewą stronę przesuwa się jedna zielona kula - obok czarny napis z indeksem górnym i dolnym po lewej stronie litery: 1 (góra) 0 (dół) n, a na prawą stronę przesuwają się dwie zielone i dwie czerwone kule połączone ze sobą - obok czarny napis z indeksem górnym i dolnym po lewej stronie litery: 4 (góra) 2 (dół) H. Po chwili, w nawiasach, pojawiają się dodatkowe napisy obok już występujących. Do napisu po lewej dołączono „14.1 MeV”, do napisu po prawej dołączono: „3.5 MeV”).

Spróbujmy teraz odpowiedzieć na pytanie: jakie należy stworzyć warunki, aby umożliwić przebieg reakcji syntezy lekkich jąder?

Główną przeszkodą są oddziaływania elektryczne między jądrami, mającymi zawsze ładunek dodatni. Aby mogła zajść reakcja, jądra muszą się znaleźć w wystarczająco małej odległości (dla jąder deuteru jest to ok. 10^{-15}m). Należy więc wytworzyć tak wysoką temperaturę, żeby energia kinetyczna jąder była na tyle duża, aby mogły one się do siebie zbliżyć i w rezultacie zainicjować przebieg reakcji. Przykładowo: łączenie ze sobą dwóch

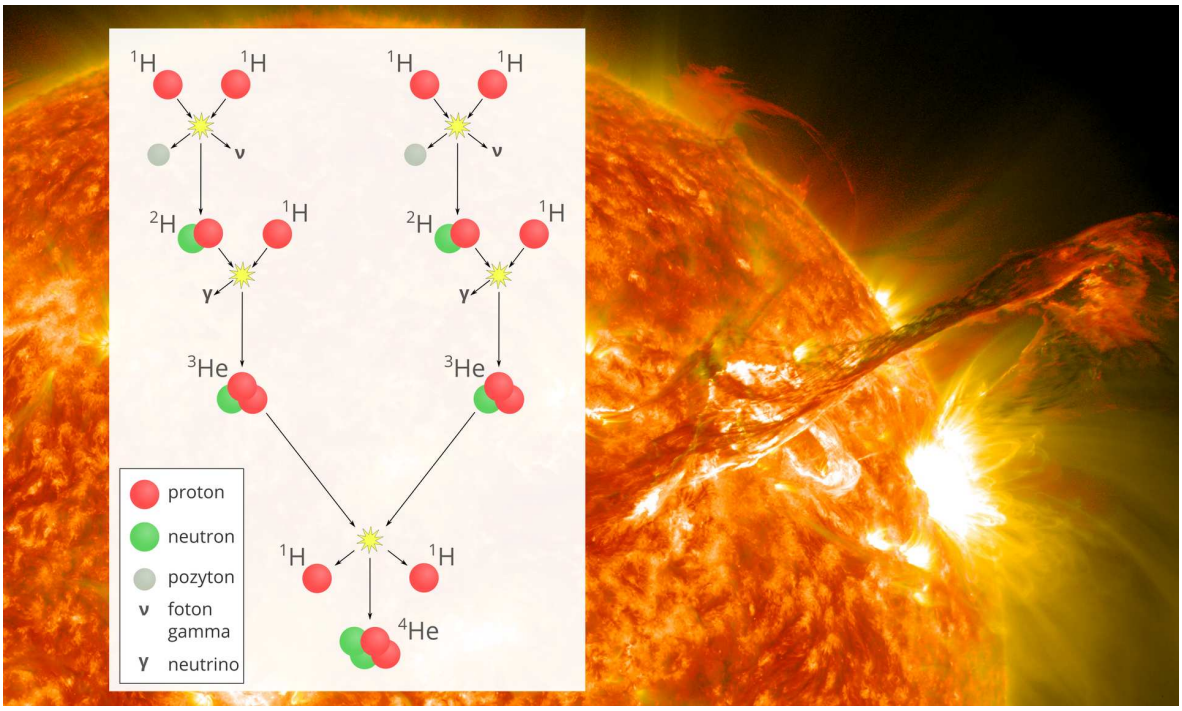
jąder deuteru wymaga temperatury, jaka panuje na Słońcu: $T \approx 10^7\mathrm{K}$. Reakcję syntezy jąder, która zachodzi pod wpływem wysokiej temperatury, nazywamy reakcją termojądrową.

Jak widać, przeprowadzenie reakcji termojądrowej wymaga dostarczenia ogromnych ilości energii. Aby równoważyła onawkład energetyczny niezbędny do wywołania reakcji, temperatura próbki materiału powinna być jeszcze wyższa i wynosić co najmniej $35 \cdot 10^7\mathrm{K}$. Wzrost temperatury sprawia, że zwiększa się liczba zderzeń, a tym samym zwiększa prawdopodobieństwo zachowania ciągłości procesu. Jednak materia znajduje się wówczas w stanie plazmy i jest całkowicie zjonizowana. Kontrola przebiegu reakcji termojądrowej wymaga więc nie tylko wytworzenia gorącej plazmy, lecz także odizolowania jej od otoczenia. Wieloletnie próby uzyskania korzystnego bilansu energetycznego fuzji termojądrowej nie przyniosły pomyślnych rezultatów. Dotychczas żadnemu z nie udało się wytworzyć większej ilości energii niż ta, którą należało dostarczyć w celu podtrzymania przebiegu reakcji.

> **Polecenie 1**
>
> Wymień różnice między uzyskiwaniem energii podczas spalania np. węgla a uzyskiwaniem jej w reakcji łączenia się jąder pierwiastków (syntezy).

2. Skąd pochodzi energia słoneczna?

Reakcje termojądrowe są głównym źródłem energii gwiazd, w tym Słońca. W ciągu jednej sekundy Słońce wypromieniowuje energię rzędu $10^{26}\mathrm{J}$, a temperatura jego centralnej części sięga $1{,}3 \cdot 10^7\mathrm{K}$.



Reakcje termojądrowe są źródłem energii słonecznej

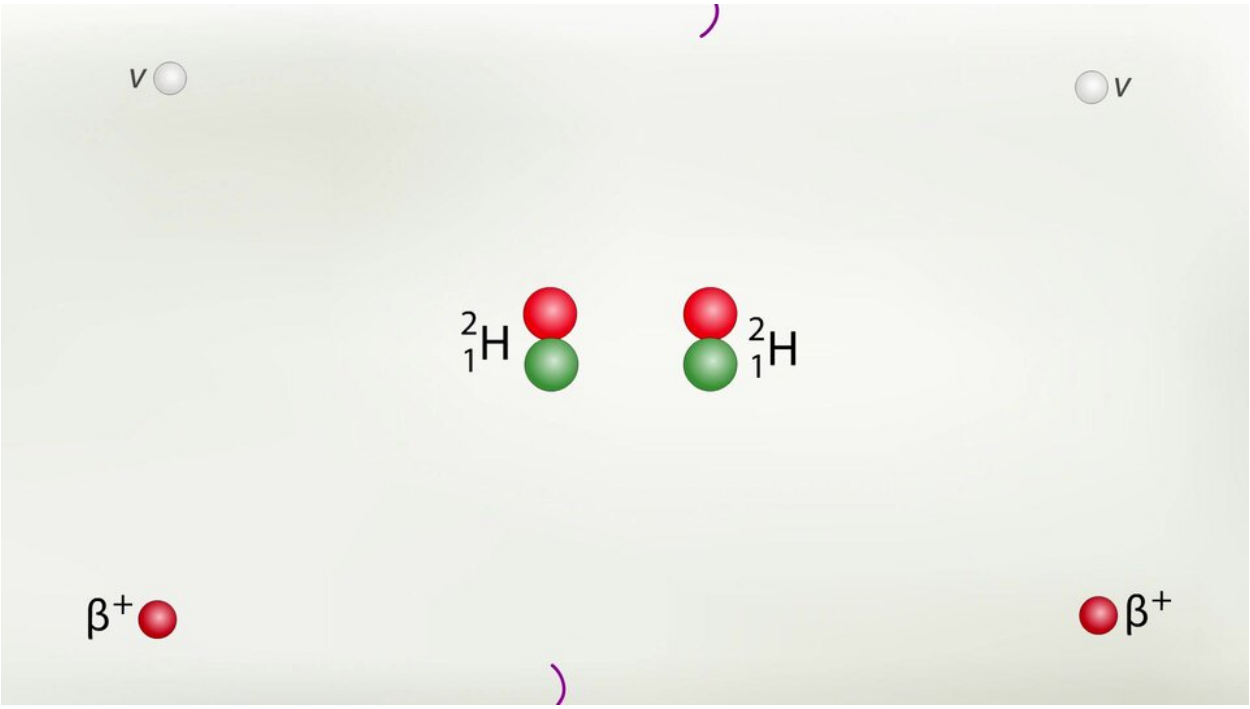
Aby wytłumaczyć emisję tak olbrzymich ilości energii, w 1938 r. zaproponowano protonowo-protonowy cykl reakcji.

$${}_1^1\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_1^2\mathrm{H} + e^+ + \text{neutrino elektronowe} + 1{,}44\,\mathrm{MeV}$$

$${}_1^1\mathrm{H} + {}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_2^3\mathrm{He} + 5{,}49\,\mathrm{MeV}$$

$${}_2^3\mathrm{He} + {}_2^3\mathrm{He} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + 2 \cdot {}_1^1H + 12{,}85\ \ \mathrm{MeV}$$ (1951 r. – jako przedłużenie reakcji).

Cykl protonowo-protonowy opiera się na reakcjach syntezy jąder wodoru, które to reakcje prowadzą do wytworzenia jąder helu, czemu towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości energii, w tym promieniowania gamma. Jądro ${}_1^2\mathrm{H}$ powstałe w pierwszej reakcji nazywa się deuteronem (od nazwy izotopu wodoru – deuteru).



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

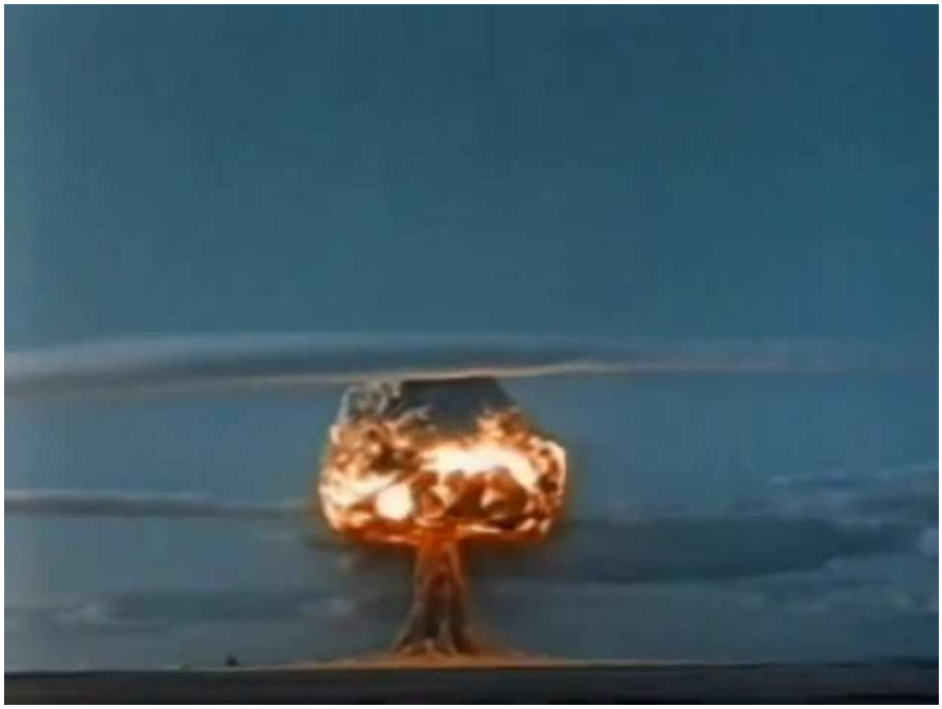
Cykl protonowo-protonowy

Widoczne Słońce, zbliżamy się do niego aż w końcu widzimy jądra poruszające się z ogromnymi prędkościami wewnątrz Słońca. Widoczne dwa razy dwa jądra wodoru, które po dwa zderzają się ze sobą, powstają dwa deuteronu (proton i neutron w jądrze), z każdego odlatuje pozyton w postaci jednej kulki, neutrino w postaci mniejszej kulki i wypromieniowana zostaje energia. Następnie każdy z dwóch deuteronów zderza się z kolejnym jądrem wodoru, powstają dwa jądra helu z dwoma protonami i jednym neutronem oraz wypromieniowana zostaje energia. Następnie dwa powstałe jądra helu zderzają się ze sobą i powstaje jądro helu z dwoma neutronami i dwoma protonami, powstają dwa jądra wodoru w postaci dwóch protonów i wypromieniowana zostaje energia.

> **Polecenie 2**
>
> Po połączeniu dwóch jąder deuteru $^2_1\mathrm{H}$ powstają izotop helu $^3_2\mathrm{He}$ oraz pewna cząstka. Jak się ona nazywa?

3. Bomba wodorowa i perspektywy kontrolowanej syntezy termojądrowej

Stosunkowo łatwo udało się wykorzystać reakcję termonuklearną do celów militarnych. Skonstruowano tzw. bombę wodorową, która wykorzystuje niekontrolowaną reakcję syntezy jąder helu z deuteru i trytu. Energia wyzwolona podczas wybuchu takiej bomby znacznie przewyższa energię wybuchu zwykłych bomb jądrowych i jest równoważna energii wyzwolonej podczas wybuchu ponad 50 megaton TNT (trójnitrotoluenu), czyli 50 milionów ton trotylu.



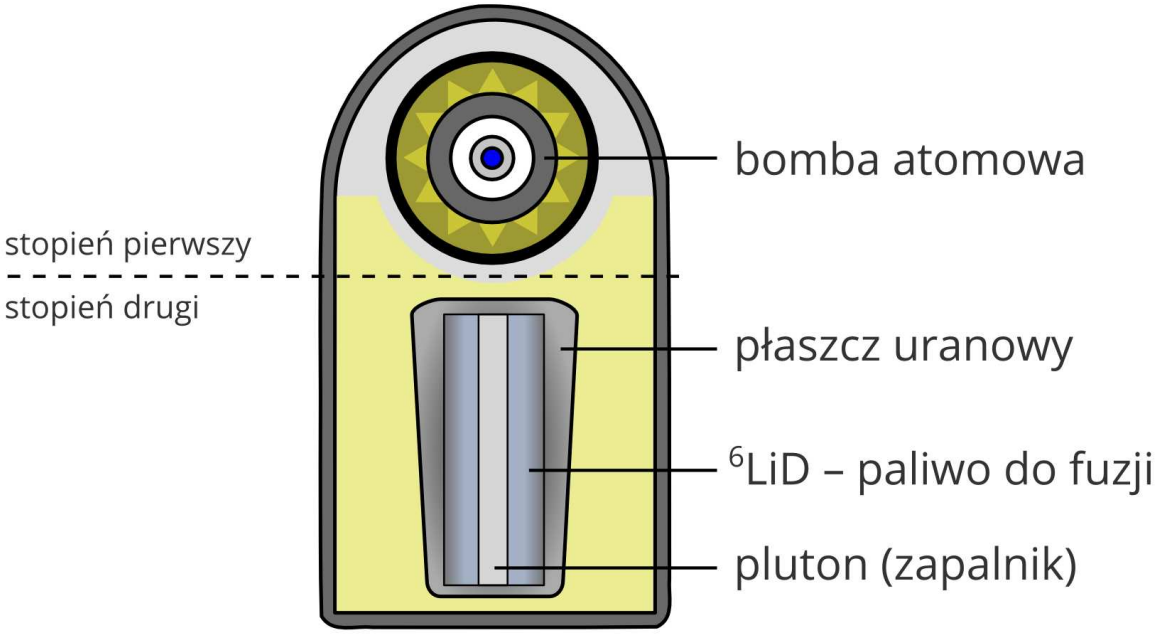
Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Niszczące skutki wybuchu bomby wodorowej

Bomby wodorowa

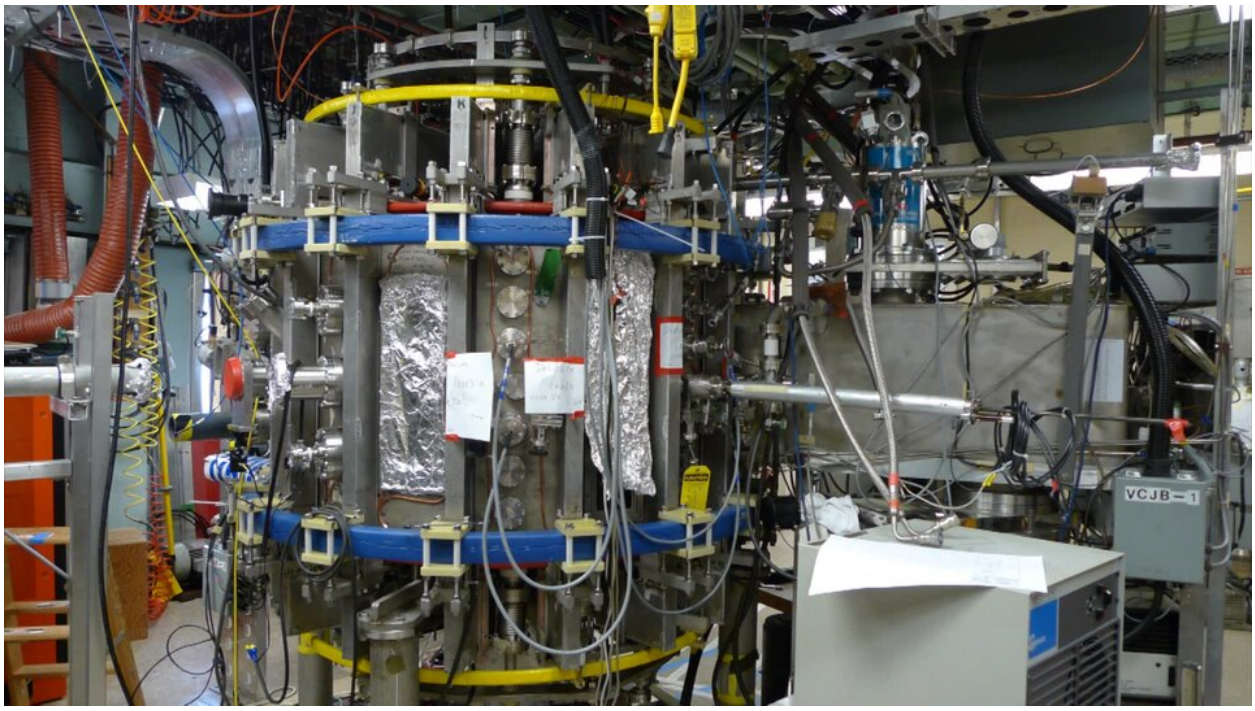
Głównym problemem, jaki napotkali konstruktorzy bomb wodorowych, było utrzymanie przez odpowiednio długi czas na tyle wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia, aby zainicjować reakcję syntezy. W tym celu wykorzystano bombę jądrową, która pełni funkcję zapalnika. Masa reagująca (deuterek litu) otacza bombę atomową. Może być pokryta dodatkową warstwą uranu ^{238}U, co dodatkowo zwiększa efektywną moc bomby.

Skutki wybuchu bomby wodorowej są przerażające. Temperatura w epicentrum może osiągnąć nawet do $10^8 K$, skażeniem promieniotwórczym jest objęty zdecydowanie większy obszar niż w przypadku „zwykłej" bomby atomowej, a zniszczenia wywołane falą uderzeniową są ogromne.



Konstrukcja bomby wodorowej

Wykorzystanie energii syntezy jądrowej do celów inne niż militarne okazało się znacznie trudniejsze. Utrzymywanie reakcji przez długi czas oraz ciągłe odprowadzanie uzyskiwanej energii są niezwykle skomplikowane. Pamiętajmy, że w temperaturze, w której zachodzi ta synteza wszystkie znane materiały są w stanie lotnym. Na razie cały proces pochłania więcej energii niż jej dostarcza. Zachodzi w urządzeniach nazywanych tokamakami. Tokamak to (z ros. *toroidalnaja kamiera s magnitnymi katuszkami*) **toroidalna komora z cewkami magnetycznymi**. Koncepcję tokamaka w 1950 r. opracowali Igor Tamm i Andriej Sacharow, a pierwszy egzemplarz tego urządzenia zbudowano w Moskwie w 1956 r. Obecnie największy tokamak o nazwie JET (a ang. *Joint European Torus*) pracuje w Wielkiej Brytanii i służy do przygotowania pracy reaktora ITER.



Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Budowa reaktora termojądrowego

Na filmie wyświetlane są zdjęcia przedstawiające wygląd reaktora termojądrowego - Tokamak.

Tokamak wytwarza plazmę w komorze wyładowań i utrzymuje ją kosztem energii dostarczanej przez prąd elektryczny o natężeniu zależnym od typu tokamaka, sięgającym nawet miliona amperów. Plazma dodatkowo stabilizowana jest przez pole magnetyczne. Komora wyładowań ma kształt toroidalny.

Pierwszym reaktorem termojądrowym, który ma wytwarzać więcej energii niż zużywać, będzie reaktor ITER. Jego nazwa pochodzi od pierwszych liter angielskiej nazwy: *International Thermonuclear Experimental Reactor*. Ma powstać na południu Francji w 2016 r.

> **Polecenie 3**
>
> W jakiej formie wyzwalana jest energia w reakcji termojądrowej?

Podsumowanie

- Reakcje syntezy lekkich jąder atomowych są niezwykle wydajnym źródłem energii, ale trudno jest kontrolować te reakcje.
- W wyniku reakcji syntezy jądra helu zwykle tworzone są z jąder izotopów wodoru – deuteru i trytu. Wydzielana energia jest wynikiem deficytu masy (masa jądra helu jest mniejsza od sumy mas jąder wodoru):
    - $_1^2\mathrm{H} + _1^2\mathrm{H} \rightarrow _2^3\mathrm{He} + \mathrm{n} + 3{,}25\,\mathrm{MeV}$
    - $_1^2\mathrm{H} + _1^2\mathrm{H} \rightarrow _1^3\mathrm{H} + \mathrm{p} + 4{,}03\,\mathrm{MeV}$
    - $_1^2\mathrm{H} + _1^3\mathrm{H} \rightarrow _2^4\mathrm{He} + \mathrm{n} + 17{,}6\,\mathrm{MeV}$
- Żeby zaszła reakcja syntezy, energia kinetyczna jąder musi być na tyle duża, aby pokonać siły odpychania kulombowskiego. Ponadto temperatura musi wynosić ok. – $10^7\mathrm{K}$, co sprawia, że takie reakcje nazywamy reakcjami termojądrowymi.
- W reakcjach syntezy jądrowej masa krytyczna ma znaczenia.
- Do przeprowadzenia reakcji termojądrowej potrzebna jest duża ilości energii, która powoduje gwałtowny wzrost temperatury. Materia w tak wysokiej temperaturze znajduje się w stanie plazmy.
- Reakcje termojądrowe trudno kontrolować, ponieważ plazma nie może mieć kontaktu z pozostałymi elementami aparatury pomiarowej i dodatkowo musi być stabilizowana polem magnetycznym. Ponadto trudno uzyskać bardzo wysoką temperaturę, która jest potrzebna, aby reakcja syntezy była korzystna energetycznie.
- Energia, którą emituje Słońce powstaje w wyniku naturalnych reakcji termojądrowych, zwanych cyklem protonowo-protonowym.
    - $_1^1\mathrm{H} + _1^1\mathrm{H} \rightarrow _1^2\mathrm{H} + \mathrm{e}^+ + \text{neutrino elektronowe} + 1{,}44\,\mathrm{MeV}$
    - $_1^1\mathrm{H} + _1^2\mathrm{H} \rightarrow _2^3\mathrm{He} + 5{,}49\mathrm{MeV}$
    - $_2^3\mathrm{He} + _2^3\mathrm{He} \rightarrow _2^4\mathrm{He} + 2 \cdot _1^1\mathrm{H} + 12{,}85\,\mathrm{MeV}$
- Cykl protonowo-protonowy opiera się na reakcjach syntezy jąder wodoru, które to reakcje prowadzą do wytworzenia jąder helu. Temu procesowi towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości energii, w tym promieniowania gamma.
- Przykładem niekontrolowanej i sztucznie wywołanej reakcji jądrowej jest bomba termojądrowa (wodorowa).
- Próby kontrolowania łańcuchowych reakcji termojądrowych odbywają się w reaktorach termojądrowychnp. w tokamakach. Nie udało się jednak przeprowadzić takiej reakcji korzystnej energetycznie (reaktor zużywa więcej energii niż jej wytwarza). Takie urządzenia utrzymują plazmę w stanie wysokiej temperatury przez ok. 30 sekund. TReaktor ITER – budowany obecnie przez Unię Europejską, Japonię, Rosję, USA, Chiny, Koreę Południową i Indie reaktor ITER – powinien umożliwić praktyczne wykorzystanie energii syntezy jader.

Praca domowa

Polecenie 4.1

Najpierw mówiliśmy o otrzymywaniu energii z reakcji rozpadu, a teraz opisujemy otrzymywanie energii w reakcji syntezy jądrowej. Dlaczego w dwóch przeciwstawnych reakcjach jesteśmy w stanie uzyskiwać energię? Która z tych reakcji jest wydajniejsza, jeśli chodzi o uzyskiwanie energii?

Polecenie 4.2

Z jądra deuteru i jądra $^{3}\mathrm{He}$ w reakcjach syntezy możemy otrzymać jądro $^{4}\mathrm{He}$. Zapisz tę reakcję i oblicz wartość wydzielanej energii.

Polecenie 4.3

Reakcje termojądrowe zachodzą wewnątrz Słońca i produkują duże ilości promieniowania gamma. Dlaczego w promieniowaniu wychodzącym z powierzchni Słońca przeważa promieniowanie widzialne?

Polecenie 4.4

Znajdź w internecie informacje o budowie tokamaków oraz Projekcie ITER. Być może już niedługo będzie można korzystać z energii produkowanej przez te urządzenia.

Słowniczek

bomba wodorowa (bomba termojądrowa)

– zapalnikiem bomby wodorowej jest bomba jądrowa umieszczona wewnątrz masy reagującej – deuterku litu. Aby zwiększyć moc wybuchu bomby termojądrowej, jej wsad jest pokryty dodatkową warstwą uranu $^{238}\mathrm{U}$; wybuch bomby jądrowej stwarza warunki, w których może dojść do lawinowej (niekontrolowanej) reakcji syntezy termojądrowej.

cykl protonowo-protonowy

– cykl reakcji termosyntezy zachodzących na Słońcu; proces, w wyniku którego z jąder izotopów wodoru powstają jądra helu, czemu towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości

energii.

gorąca plazma (plazma termojądrowa)

– całkowicie zjonizowany gaz o temperaturze sięgającej kilku milionów kelwinów, w którym mogą zachodzić reakcje syntezy termojądrowej.

ITER

– międzynarodowy projekt badawczy, którego celem jest uruchomienie eksperymentalnego reaktora termonuklearnego (tokamaka). Ma to być pierwsze urządzenie, w którym zostanie uzyskany dodatni bilans energetyczny, tj. ilość wyprodukowanej energii uzyskanej w cyklu jego pracy ma przekroczyć ilość energii zużytej na podtrzymanie kontrolowanej reakcji syntezy jądrowej, która według założeń powinna trwać ok. 1000 s. Reaktor ma być uruchomiony w 2019 r.

megatona TNT (MT)

– milion ton trotylu (TNT); energia bomby o mocy 1 MT odpowiada ilości energii powstałej podczas wybuchu miliona ton trotylu.

neutrino elektronowe

– cząstka obojętna elektrycznie, która nie posiada masy spoczynkowej; towarzyszy emisji elektronu w procesie rozpadu beta.

plazma

– niemal całkowicie zjonizowany gaz; ze względu na swoje własności nazywany jest czwartym stanem skupienia materii.

reakcja syntezy jądrowej

– reakcja polegająca na łączeniu dwóch jąder atomowych w jedno. Powstałe jądro ma mniejszą masę od sumy mas jąder, z których zostało utworzone, i jednocześnie większą energię wiązania od energii wiązania każdego z jąder biorących udział w reakcji. Kosztem różnicy mas (deficyt masy) wydziela się ogromna energia, m.in. w postaci promieniowania gamma.

reakcja termojądrowa

– reakcja syntezy jądrowej, która może zachodzić tylko w bardzo wysokiej temperaturze.

tokamak

– rodzaj reaktora termojądrowego o toroidalnej komorze wyładowań.

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1

Uzupełnij luki.

Reakcje syntezy jądrowej wymagają _____ temperatur. Jest to spowodowane tym, że biorące udział w reakcji cząstki _____ się i muszą mieć odpowiednio dużą _____, aby się mogły do siebie zbliżyć.

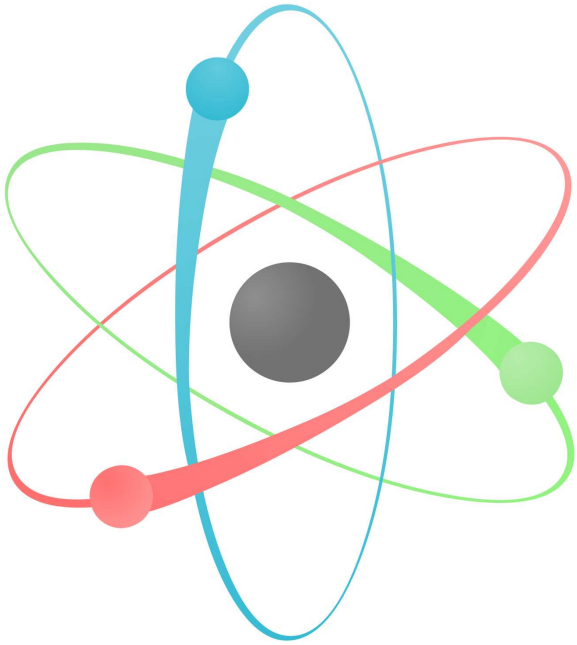
Źródło: Dariusz Kajewski, licencja: CC BY 3.0.

Podsumowanie wiadomości z fizyki jądrowej

W tym dziale przedstawiliśmy zbiór elementarnych wiadomości dotyczących budowy i właściwości jądra atomowego. Opisaliśmy procesy zwane przemianami promieniotwórczymi – rozpady jądrowe, reakcje jądrowe, rozszczepienia jądra. Przeanalizowaliśmy sposoby wyzwalania energii jądrowej i wyjaśniliśmy pojęcia deficytu masy i energii wiązania. Zdefiniowaliśmy okres połowicznego zaniku i sformułowaliśmy prawo rozpadu promieniotwórczego. Scharakteryzowaliśmy promieniowanie jądrowe i jonizujące. Opisaliśmy również sposoby ich wykrywania oraz to, jak można się przed nimi chronić.

Cały nasz świat istnieje dzięki energii jądrowej, ponieważ Słońce, które w rzeczywistości jest jednym wielkim reaktorem termonuklearnym, stanowi źródło ciepła niezbędnego do podtrzymania i rozwoju całego życia na Ziemi

1. Jądro atomu



Źródło: OpenClipartVectors (https://pixabay.com), Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

1. **Jądrem atomowym** nazywamy element znajdujący się w centralnej części atomu.
2. Jądro atomowe jest bardzo małe (kilkadziesiąt tysięcy razy mniejszy od atomu).
3. Jądro atomowe skupia praktycznie całą masę atomu.
4. Jądro atomowe obdarzone jest ładunkiem dodatnim.
5. Jądro atomowe składa się z protonów i neutronów, czyli **nukleonów**. Protony obdarzone są ładunkiem dodatnim, a neutrony są elektrycznie obojętne. Masy tych cząstek mają zbliżoną wartość.
6. Skład jądra atomowego zapisujemy jako:

$$ {}^{A}_{Z}X $$

gdzie:
X – symbol chemiczny pierwiastka;
Z – liczba porządkowa zawierająca informację, o liczbie protonów w jądrze;
A – liczba masowa równa liczbie nukleonów w jądrze;
$A - Z$ – liczba neutronów w jądrze.

> **Przykład 1**
>
> ${}^{40}_{19}K$ – jądro izotopu potasu zawiera 19 protonów i 21 neutronów, czyli razem 40 nukleonów.

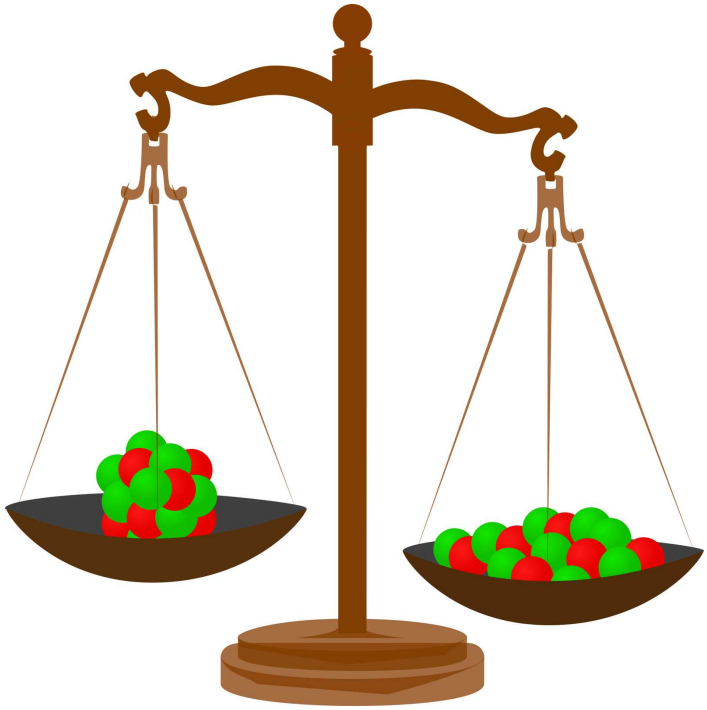
2. Izotopy

Izotopy wodoru

Izotopami nazywamy odmiany atomów tego samego pierwiastka różniące się masą.

1. Jądra izotopów mają taką samą liczbę protonów (liczba Z), różną liczbę neutronów, a tym samym różną liczbę masową (A).
2. Izotopy danego pierwiastka mają takie same właściwości chemiczne, ale różne właściwości fizyczne.
3. Pierwiastki naturalnie występujące w przyrodzie są mieszaniną wielu izotopów, choć poszczególne izotopy mogą mieć różny udział w tej mieszaninie. Przykładowo: w naturalnie występującym wodorze, będącym mieszaniną trzech izotopów: ${}_{1}^{1}\mathrm{H}$, ${}_{1}^{2}\mathrm{H}$, ${}_{1}^{3}\mathrm{H}$, pierwszy z nich stanowi $99{,}9\,\%$ składu tego pierwiastka.

3. Defekt masy



Δm

Defektem (deficytem) masy nazywamy różnicę między sumą mas nukleonów (gdy są one poza jądrem) tworzących jądro a masą tego jądra.
M_j oznacza masę jądra o liczbie masowej A i liczbie porządkowej Z.
Suma mas jego składników to:

$$Z \cdot m_{\text{protonu}} + (A - Z) \cdot m_{\text{neutronu}}$$

Defekt masy to:

$$\Delta m = [Z \cdot m_{\text{protonu}} + (A - Z) \cdot m_{\text{neutronu}}] - M_j$$

4. Energia wiązania

$$E = m \cdot c^2$$

Zasada równoważności masy i energii

1. Między nukleonami działają siły jądrowe. Siły te:
    - nie zależą od ładunku elektrycznego;
    - mają dużą wartość (znacznie większą od sił grawitacyjnych i elektrostatycznych);
    - mają krótki zasięg (działają na małych odległościach).
2. W wyniku działania sił jądrowych nukleony są ze sobą związane. O tym, jak silne jest to wiązanie, mówi nam **energia wiązania** – jest ona równa pracy, jaką należy wykonać, aby rozłożyć jądro na pojedyncze nukleony.
3. Obliczenie energii wiązania umożliwia **zasada równoważności masy i energii**: $E = m \cdot c^2$

   ,
   gdzie:
   m – masa;
   c – prędkość światła w próżni;
   E – energia, jaką można uzyskać z masy m.
4. Energia wiązania jest równa energii równoważnej deficytowi masy: $E_{\text{wiązania}} = \Delta m \cdot c^2$
5. Energia wiązania jądra rośnie wraz z liczbą masową atomu.
6. Ważną charakterystyką jądra każdego izotopu dowolnego pierwiastka jest energia wiązania przypadająca na jeden nukleon.

5. Promieniowanie jądrowe

Promieniowanie emitowane przez substancje zawierające niestabilne jądra izotopów naturalnych podzielono na trzy kategorie: α, β i γ.

1. Promieniowanie α to strumień cząstek, składających się z dwóch protonów i dwóch neutronów (a więc tak samo jak jądra helu). Ładunek cząstki α wynosi +2 e (e – ładunek elementarny). Charakteryzuje się niską przenikliwością – jego zasięg w powietrzu nie przekracza 10 cm. Promieniowane α ma właściwości jonizujące i jego kontakt z żywą tkanką prowadzi do jej uszkodzeń.
2. Promieniowanie β to strumień elektronów, którego przenikliwość jest większa niż cząstek alfa – rozchodzi się na odległość nawet do kilku metrów. Ma własności jonizujące, podobnie jak promienie α.
3. Promieniowanie γ jest falą elektromagnetyczną o długości mniejszej lub równej długości fal promieniowania rentgenowskiego. Jest to promieniowanie najbardziej przenikliwe; w powietrzu rozchodzi się na odległość od kilku do kilkunastu metrów, a w wodzie – na ponad 1 metr. Jest promieniowaniem jonizującym.

Promieniowanie emitowane przez substancje zawierające niestabilne jądra izotopów naturalnych podzielono na trzy kategorie: α, β i γ.

Ponadto jądra sztucznie wytworzonych izotopów mogą emitować:

1. Cząstki β^+ – pozytony, czyli dodatnie elektrony. Zasięg ich nie jest duży, ale pozytony w wyniku zderzania się z elektronami ulegają anihilacji i powstaje wtedy promieniowanie gamma.
2. Neutrony – przenikliwe, obojętne elektrycznie cząstki. Neutrony łączą się z jądrami atomów i przekształcają je w niestabilne jądra promieniotwórcze.
3. Protony (p) – dodatnio naładowane cząstki o właściwościach zbliżonych do promieniowania α, jednak znacznie bardziej od nich przenikliwe.

6. Dawka promieniowania

Aby określić parametry promieniowania i skalę efektów wywołanych przez promieniowanie w ośrodku materialnym, wprowadzono następujące definicje:

1. **Aktywność preparatu promieniotwórczego (A)** – liczba jąder promieniotwórczych ulegających przemianom jądrowym w ciągu sekundy. Jednostką aktywności preparatu promieniotwórczego jest bekerel ($\mathrm{Bq} = 1/\mathrm{s}$). $A = 1\ \mathrm{Bq}$ oznacza jeden rozpad jądra w ciągu sekundy.
2. **Dawka pochłonięta (D)** – energia promieniowania pochłonięta przez jednostkę masy substancji. Jednostką dawki pochłoniętej jest **grej** (Gy); $D = \frac{E}{m}\left[\mathrm{Gy} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$.
3. **Równoważnik dawki (H)** – iloczyn dawki pochłoniętej (D) i współczynnika jakości promieniowania (Q). Służy do oceny wpływu promieniowania na układy biologiczne. Jednostką równoważnika dawki jest **siwert** (Sv); $H = \mathrm{Q} \cdot \mathrm{D}\ [\mathrm{Sv}]$.
4. **Współczynnik jakości (Q)** jest definiowany przez porównanie skutków danego rodzaju promieniowania ze skutkami promieniowania wzorcowego o tej samej dawce pochłoniętej. Wartość współczynnika jakości mieści się w zakresie od 1 do 25.

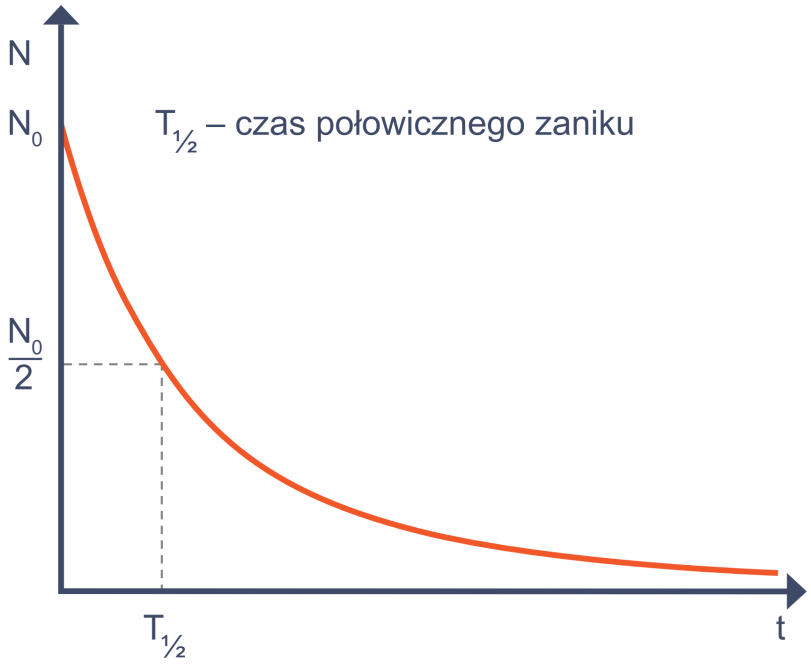
7. Okres połowicznego rozpadu

$$T_{1/2}$$

$T_{1/2}$

1. **Okres (czas) połowicznego rozpadu (zaniku)** – czas, po którym z początkowej liczby jąder promieniotwórczych pozostanie połowa z nich.
2. Okres połowicznego rozpadu oznaczany jest symbolem $T_{1/2}$ lub T. Jest wielkością charakterystyczną dla konkretnego izotopu pierwiastka.
3. Okres połowicznego rozpadu może przyjmować wartości od ułamków mikrosekundy do miliardów lat.
4. Przykładowo: okres połowicznego rozpadu radonu $^{222}\mathrm{Rn}$ wynosi 4 dni. Oznacza to, że po upływie 4 dni zostanie tylko połowa początkowej liczby jąder tego gazu, po upływie kolejnych 4 dni – połowa z połowy, czyli jedna czwarta, a po następnych 4 dniach – połowa z jednej czwartej itd.

8. Prawo rozpadu promieniotwórczego



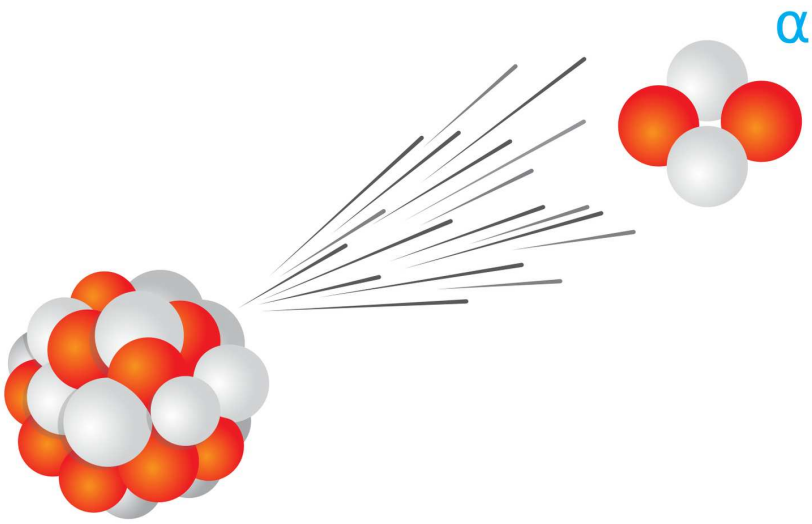
Rozpad promieniotwórczy

Rozpad jąder promieniotwórczych ma charakter przypadkowy i podlega prawom statystyki. Oznacza to, że jeśli znamy okres połowicznego zaniku, możemy oszacować, jaka liczba jąder rozpadnie się w pewnym przedziale czasu. Nie możemy jednak przewidzieć, które z tych jader się rozpadną i kiedy rozpadnie się jedno konkretne jądro. Poniższe równanie, zwane **prawem rozpadu promieniotwórczego**, pozwala obliczyć liczbę jąder promieniotwórczych, które pozostały po upływie czasu (t):

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

gdzie:
N_0 – początkowa liczba jąder;
$T_{1/2}$ – okres połowicznego zaniku.

9. Przemiany jądrowe



Emisja cząstki α

Emisja promieniowania jądrowego jest następstwem przemian zachodzących w jądrach atomów. Przemiany te opisuje się za pomocą równań podobnych do równań reakcji chemicznych, choć rozpady promieniotwórcze nie są reakcjami chemicznymi, lecz procesami fizycznymi.
Wszystkie przemiany jądrowe odbywają się z zachowaniem następujących zasad:

1. **Zasada zachowania liczby nukleonów** – suma liczby nukleonów we wszystkich produktach rozpadu jest równa liczbie nukleonów przed rozpadem.
2. **Zasada zachowania ładunku** – suma ładunków w produktach rozpadu jest po rozpadzie taka sama jak przed rozpadem.
3. **Zasada masy i energii** – suma mas i energii po rozpadzie jest taka sama jak przed rozpadem.

Rozpad α polega na wyrzuceniu z wnętrza jądra cząstki złożonej z dwóch protonów i dwóch neutronów. Tę cząstkę nazywamy cząstką α. W efekcie powstaje jądro innego pierwiastka, którego liczba masowa jest mniejsza o 4, a liczba porządkowa – o 2.

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{4}_{2}\alpha + {}^{A-4}_{Z-2}Y $$

Rozpad β^- polega na emisji elektronu z wnętrza jądra. Związane jest to z przekształceniem się jednego z neutronów w proton. W rezultacie proton pozostaje w jądrze, którego liczba porządkowa wzrasta o 1, a jądro jednocześnie zachowuje poprzednią wartość liczby masowej. Jądro ulega przemianie w nowe jądro.

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{1}_{1}p + \tilde{\nu}_e $$

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{A}_{Z+1}Y + \tilde{\nu}_e $$

Rozpad β^+ polega na emisji pozytonu (antyelektronu) z wnętrza jądra. Związane to jest z przekształceniem się jednego protonu w neutron, który pozostaje w jądrze.

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{p} \ \rightarrow {}^{0}_{1}e + {}^{1}_{0}n + \nu_e $$

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \ \rightarrow {}^{0}_{1}e + {}_{Z-1}{}^{A}Y + \nu_e $$

Rozpad γ przemiana, której podlega jądro znajdujące się w stanie wzbudzonym. W takim jądrze znajduje się nadmiar energii; aby się go pozbyć, jądro wysyła foton promieniowania γ. W wyniku tej przemiany skład jądra się nie zmienia. Przemiana ta często następuje po wcześniejszej przemianie β.

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \ \rightarrow {}^{0}_{0}\gamma + {}^{A}_{Z}Y $$

10. Reakcje jądrowe

Bombardowanie jąder atomów strumieniem cząstek alfa, protonów lub neutronów (a obecnie często jądrami innych atomów) oraz promieniowaniem gamma prowadzi do przekształcenia tych cząstek w jądra innych pierwiastków. Temu procesowi towarzyszy emisja promieniowania. Takie sprowokowane przemiany jądrowe nazywamy **reakcjami jądrowymi**. Można je zapisać za pomocą wzoru:

$$ a + X \ \rightarrow b + Y $$

gdzie:
a – cząstka (pocisk) padającego promieniowania;
X – atom bombardowany (tarcza);
Y – powstałe jadro;
b – promieniowanie emitowane.

Przykłady:

> **Przykład 2**
>
> $$ {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{27}_{13}\mathrm{Al} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

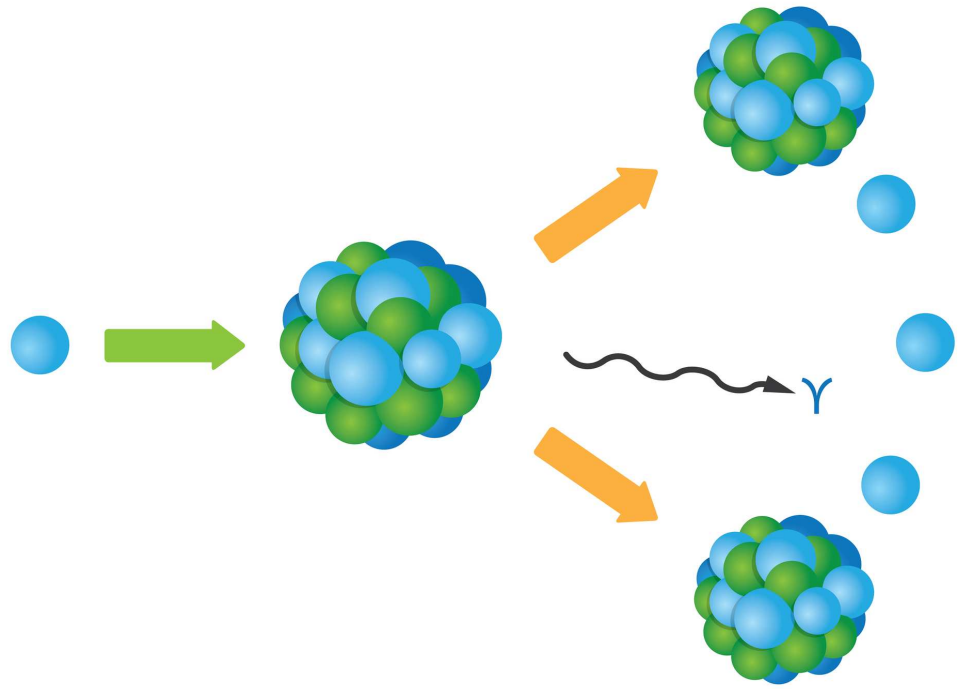
lub

> **Przykład 3**
>
> $$ {}^{208}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{70}_{30}\mathrm{Zn} \rightarrow {}^{277}_{112}\mathrm{Cn} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

Takie reakcje wykorzystywane są do produkcji syntetycznych nuklidów promieniotwórczych wykorzystywanych w przemyśle, medycynie i technice. Dzięki drugiej z pokazanych reakcji wytworzono nowy pierwiastek – kopernik **(Cn)**.

11. Rozszczepienie jądra atomowego

Rozszczepienie jąder ciężkich (w praktyce są to jądra uranu lub plutonu) na dwa lżejsze jądra to jeden ze sposobów wyzwalania energii jądrowej. Proces ten inicjowany jest bombardowaniem jąder ciężkich neutronami termicznymi. Neutron dołączony do jądra sprawia, że staje się ono niestabilne i w efekcie prowadzi do rozerwania jądra na dwa mniejsze. Podczas takiego procesu uwalniana jest energia oraz 2 lub 3 neutrony, które mogą inicjować rozszczepienie kolejnych jąder.
Przykładowy proces rozszczepienia jądra plutonu wygląda następująco:
$$^{239}_{94}\mathrm{Pu} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2{}^{1}_{0}n$$

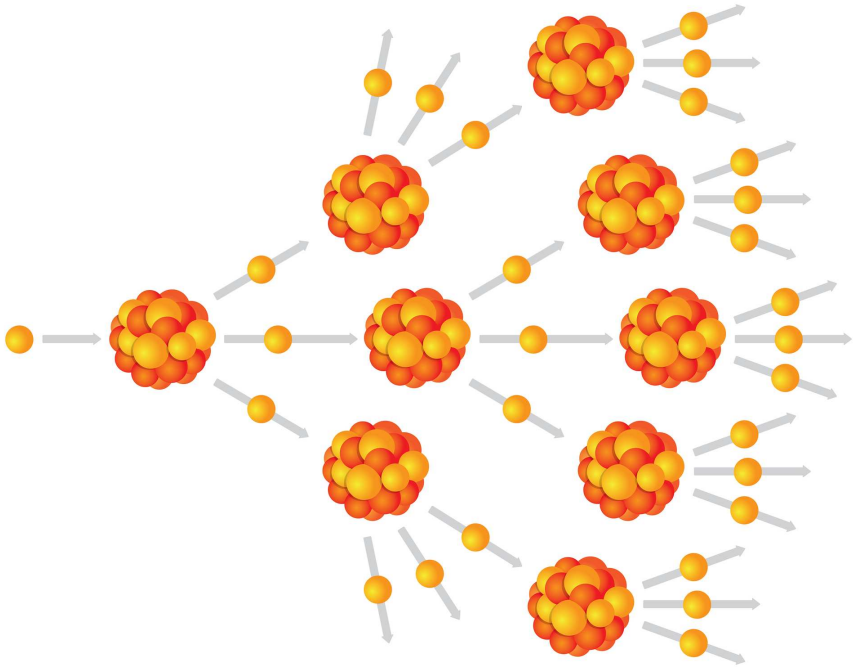


Źródło: Dariusz Adryan, licencja: CC BY 3.0.

12. Reakcja łańcuchowa

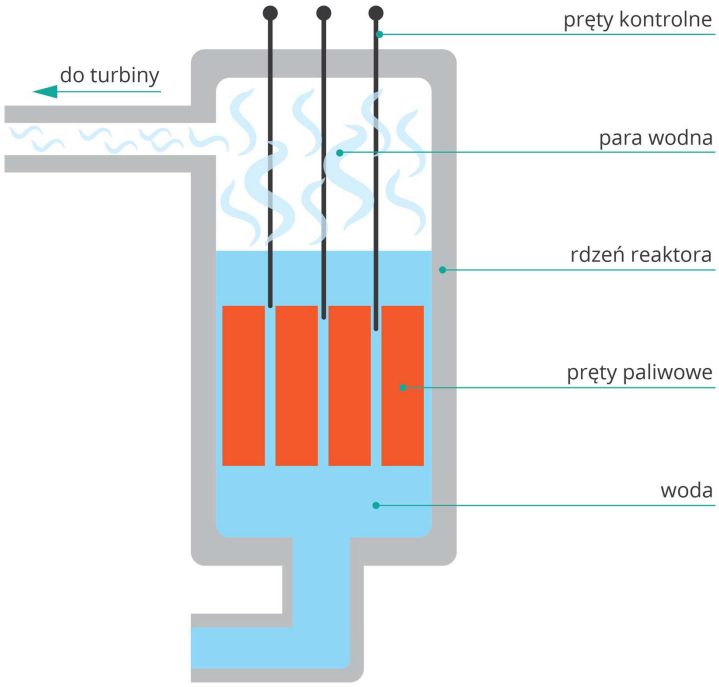
1. Reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie; składają się na nią zachodzące kolejno reakcje rozszczepienia. Każda reakcja rozszczepienia wytwarza co najmniej dwa neutrony; cząstki te bombardują sąsiednie jądra. Neutrony zostają pochłonięte przez

jądra, które się rozpadają i wytwarzają następne neutrony. Proces zachodzi lawinowo w całej objętości substancji.
2. Reakcji łańcuchowej towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości energii będącej skutkiem deficytu masy. W wyniku reakcji rozszczepienia jednego jądra uranu wydziela się energia wynosząca około 200 MeV.
3. Reakcja łańcuchowa nie zachodzi w każdych warunkach. Materiał rozszczepialny musi przekroczyć masę krytyczną. Jej istnienie jest spowodowane ucieczką neutronów poza objętość substancji; masa krytyczna zależy więc od rozmiarów i kształtu substancji.



Źródło: Dariusz Adryan, licencja: CC BY 3.0.

13. Elektrownia jądrowa



Źródło: Dariusz Adryan, licencja: CC BY 3.0.

1. Elektrownie jądrowe działają podobnie jak konwencjonalne elektrownie cieplne; różnica polega na sposobie uzyskiwania energii.
2. Energię cieplną wytwarzaną przez reaktor elektrownie jądrowe wykorzystują do zamiany wody w parę wodną. Ta napędza wirniki turbin i tak powstaje prąd elektryczny.
3. Reaktor jądrowy (zwany też dawniej stosem atomowym) jest urządzeniem przeznaczonym do sterowania przebiegiem reakcji jądrowych.

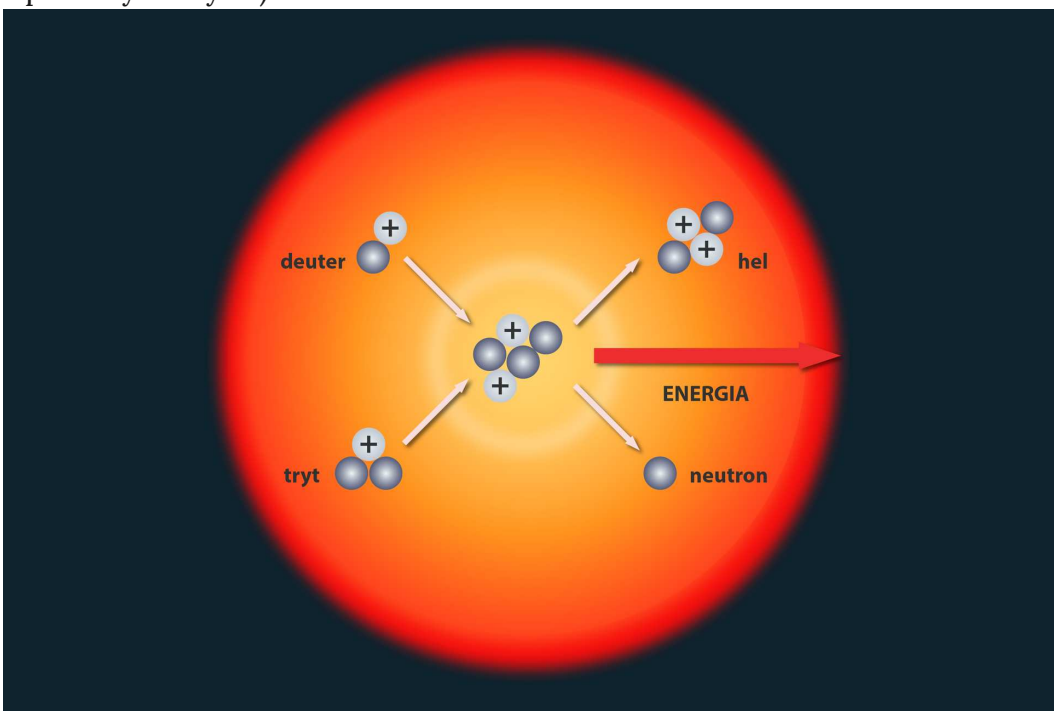
Elementy budowy reaktora jądrowego

Nazwa	**Funkcja**	**Najczęściej stosowane materiały**
paliwo	materiał rozszczepialny	wzbogacony uran, pluton
moderator	spowalnia neutrony bez ich pochłaniania	woda, ciężka woda, grafit, beryl
reflektor	kieruje neutrony ponownie do rdzenia	grafit
chłodziwo	odprowadza ciepło z rdzenia reaktora	woda, powietrze, ciekły sód
pręty kontrolne i pręty bezpieczeństwa	silnie pochłaniają neutrony	kadm, bor
osłona biologiczna	chroni otoczenie przed promieniowaniem	beton zawierający dużo boru

14. Synteza termojądrowa

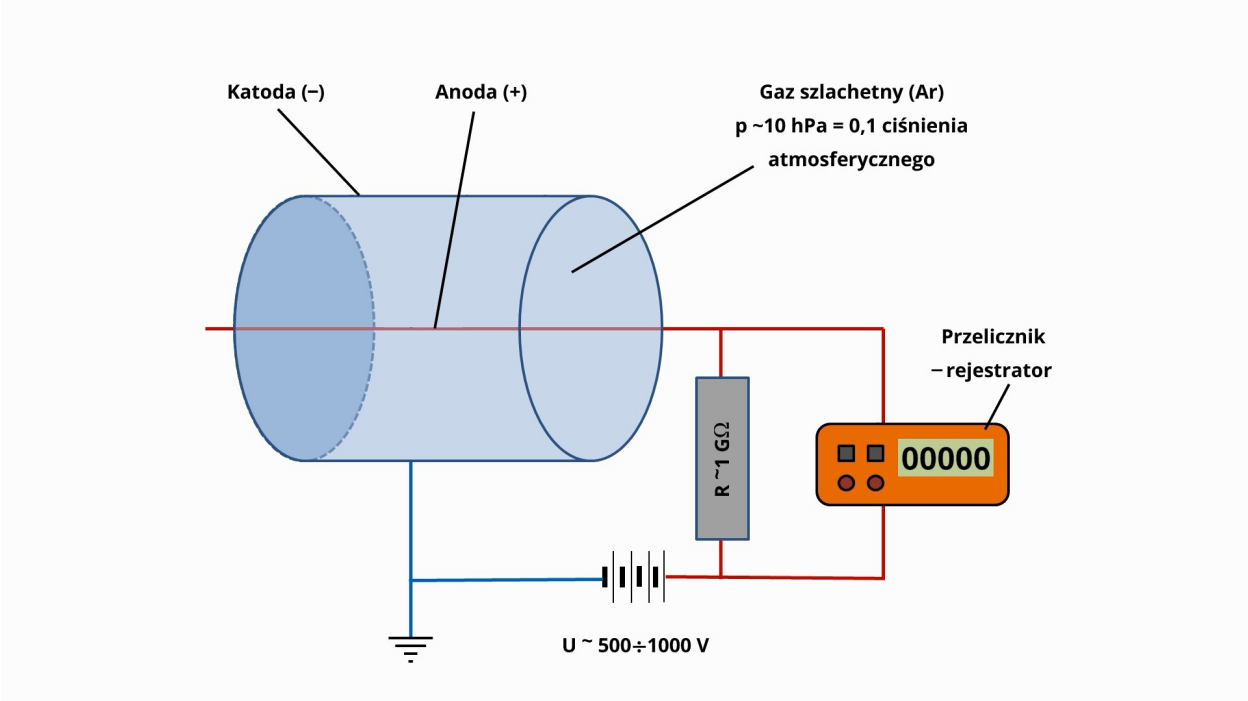
Synteza termojądrowa to jeden ze sposobów wyzwalania energii jądrowej. Polega na łączeniu się lekkich jąder atomów w jądra cięższe. Aby zapoczątkować taki proces, należy jądra lekkie zbliżyć do siebie na tak małą odległość, aby zaczęły działać siły jądrowe. Aby pokonać siły elektrostatycznego odpychania, które się wytworzyły w wyniku zbliżania jąder, trzeba rozpędzić lekkie jądra i zderzyć je ze sobą. Taki proces zachodzi wyłącznie w bardzo wysokiej temperaturze (ponad milion kelwinów) – dlatego w nazwie reakcji znajduje się przedrostek „termo".
Procesy syntezy termojądrowej zachodzą:

– we wnętrzach gwiazd, również w naszym Słońcu;
– w bombach wodorowych;
– w reaktorach termojądrowych (jak dotąd tylko eksperymentalnych, niemających zastosowań przemysłowych).



Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

15. Detekcja promieniowania



Źródło: Marcin Sadomski, licencja: CC BY 3.0.

Urządzenia służące do wykrywania i rejestrowania promieniowania jądrowego (jonizującego) nazywamy detektorami cząstek. Najczęściej są to urządzenia wykorzystujące:

– jonizację gazu (komora jonizacyjna, komora Wilsona, komora pęcherzykowa, licznik Geigera-Müllera);
– pobudzanie pewnych substancji do świecenia (licznik scyntylacyjny);
– reakcje chemiczne (emulsja fotograficzna).

16. Promieniotwórczość w technice i medycynie

Źródło: Kacper Przybylski (http://commons.wikimedia.org), licencja: CC BY-SA 3.0.

Sztuczna promieniotwórczość znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach:

1. Energetyka – elektrownie, baterie jądrowe (używane np. do rozruszników serca).
2. Medycyna – radioizotopy, znaczniki do badań diagnostycznych, leczenie chorób nowotworowych (bomba kobaltowa), akceleratory.
3. Nauka – określanie wieku znalezisk archeologicznych metodą datowania radiowęglowego (datowanie izotopem ^{14}C), analiza aktywacyjna (bardzo czuła metoda badania składu pierwiastkowego próbki).
4. Technika – silniki atomowe okrętów i statków kosmicznych, precyzyjne grubościomierze, świecące farby, czujniki dymu.
5. Przemysł – wykrywanie defektów w elementach silników samolotowych, sterylizacja żywności i sprzętu medycznego, kontrola terminu ważności produktów.

Test

> **Ważne!**
>
> Przed rozpoczęciem rozwiązywania testu przygotuj kartkę i przybory do pisania.

Ćwiczenie 1

Oceń prawdziwość poniższych zdań.

	Prawda	Fałsz
Jeśli do jądra atomu pewnego pierwiastka dołączymy proton, to powstanie izotop tego pierwiastka.	◯	◯
Jeśli do jądra atomu pewnego pierwiastka dołączymy neutron, to powstanie izotop tego pierwiastka.	◯	◯
Tryt jest izotopem wodoru, a jego jądro zawiera 1 proton i dwa neutrony.	◯	◯
Jeśli w ciągu 3 godzin rozpada się połowa jąder izotopu promieniotwórczego, to po upływie 6 godzin rozpadną się wszystkie jądra tego izotopu.	◯	◯
Reakcje jądrowe są reakcjami chemicznymi.	◯	◯
Promieniowanie jonizujące jest szkodliwe i nie ma żadnych pożytecznych zastosowań.	◯	◯

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2

Z ilu protonów i neutronów składa się jądro ołowiu Pb_{82}^{208}?

- ◯ Z 126 protonów i 82 neutronów.
- ◯ Z 208 protonów i 82 neutronów.
- ◯ Z 82 protonów i 208 neutronów.
- ◯ Z 82 protonów i 290 neutronów.
- ◯ Z 82 protonów i 126 neutronów.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 3

Które z równań poprawnie opisuje rozpad α dla izotopu neodymu?

- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow {}^{2}_{2}\alpha + {}^{142}_{58}\mathrm{Ce}$
- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow {}^{4}_{2}\alpha + {}^{142}_{58}\mathrm{Ce}$
- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{142}_{58}\mathrm{Ce}$
- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow \alpha + {}^{140}_{58}\mathrm{Ce}$
- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{140}_{58}\mathrm{Ce}$
- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow \alpha + {}^{140}_{59}\mathrm{Ce}$
- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow \alpha + {}^{142}_{58}\mathrm{Ce}$
- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow {}^{2}_{2}\mathrm{He} + {}^{142}_{58}\mathrm{Ce}$
- [ ] $^{144}_{60}\mathrm{Nd} \rightarrow {}^{4}_{2}\alpha + {}^{140}_{58}\mathrm{Ce}$

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4

Które z równań poprawnie opisuje rozpad β dla izotopu fosforu $^{32}_{15}\mathrm{P}$?

- [ ] $^{32}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{-1}_{0}\mathrm{e} + {}^{33}_{16}\mathrm{S} + \tilde{\nu}_\mathrm{e}$
- [ ] $^{32}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{33}_{16}\mathrm{S} + \tilde{\nu}_\mathrm{e}$
- [ ] $^{32}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{0}_{-1}\beta + {}^{32}_{16}\mathrm{S} + \tilde{\nu}_\mathrm{e}$
- [ ] $^{32}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{32}_{16}\mathrm{S} + \tilde{\nu}_\mathrm{e}$
- [ ] $^{32}_{15}\mathrm{P} \rightarrow \beta^{-} + {}^{32}_{16}\mathrm{S} + \tilde{\nu}_\mathrm{e}$

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 5

Poniższe równanie opisuje jedną z możliwych reakcji rozszczepienia jądra uranu:
$\mathrm{U}_{92}^{235} + \mathrm{n}_{0}^{1} \rightarrow \mathrm{U}_{*\ 236}^{92} \rightarrow \mathrm{Kr}_{36}^{94} + \mathrm{Ba}_{\mathrm{Z}}^{\mathrm{A}} + 3\mathrm{n}_{0}^{1} + 2\gamma$.
Jakie wartości mają: liczba masowa A i liczba porządkowa Z, powstałego tu izotopu baru $\mathrm{Ba}_{\mathrm{Z}}^{\mathrm{A}}$?

- Z = 56
  A = 85
- Z = 139
  A = 58
- Z = 56
  A = 139
- Z = 58
  A = 83
- Z = 8
  A = 139
- Z = 85
  A = 56

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 6

Podziel źródła promieniowania jonizującego na naturalne i sztuczne.

Naturalne źródła promieniowania jonizującego

Sztuczne źródła promieniowania jonizującego

Elementy niepasujące do żadnej kategorii

uliczna lampa sodowa

ciało człowieka

powietrze

Słońce

gwiazdy

radio

dym papierosowy

farby świecące

broń jądrowa

gleba

telefon komórkowy

izotopowy miernik grubości

ściany domów

aparat rentgenowski

lekarstwa radioaktywne

przewód z prądem

granit

cyklotron

woda

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 7

Do spowalniania neutronów w reaktorze jądrowym służy:

- [ ] pręt bezpieczeństwa.
- [ ] pręt paliwowy.
- [ ] betonowa osłona z dodatkiem boru.
- [ ] pręt kontrolny.
- [ ] reflektor.
- [ ] moderator.
- [ ] chłodziwo, jeśli jest moderatorem.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 8

Który rodzaj promieniowania jonizującego jest najmniej przenikliwy?

- promieniowanie rentgenowskie
- α i γ
- γ i promieniowanie rentgenowskie
- promieniowanie kosmiczne
- α
- β
- γ
- β i γ

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 9

Poniższe równanie opisuje jedna z możliwych reakcji rozszczepienia jądra uranu:
$\mathrm{U}_{92}^{235} + \mathrm{n}_{\mathrm{n}}^{1} \rightarrow \mathrm{U}_{*\ 236}^{92} \rightarrow \mathrm{Xe}_{54}^{140} + \mathrm{Sr}_{38}^{94} + k\mathrm{n}_{0}^{1} + \mathrm{energia}\,.$
Jaką wartość ma liczba k neutronów wyzwolonych podczas tego procesu?

- ◯ 0
- ◯ 2
- ◯ 3
- ◯ 4
- ◯ Nie można policzyć liczby neutronów, ponieważ nie podano ilości energii wyzwolonej w tym procesie.
- ◯ 1

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 10

Chcąc wykryć promieniowanie jonizujące można posłużyć się:

- ☐ wszystkimi wymienionymi przyrządami.
- ☐ spektrografem.
- ☐ komorą Wilsona.
- ☐ akceleratorem.
- ☐ czytnikiem laserowym.
- ☐ licznikiem Geigera-Müllera.
- ☐ cyklotronem.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 11

W elektrowni jądrowej energia pochodzi:

- ◯ ze spalania izotopu plutonu.
- ◯ z rozpadów α zachodzących w paliwie.
- ◯ z promieniowania kosmicznego.
- ◯ z reakcji rozszczepienia jąder ciężkich izotopów.
- ◯ ze spalania izotopu uranu.
- ◯ z promieniowania jądrowego.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 12

Reakcje syntezy termojądrowej zachodzą:

- ◯ w silnikach samochodowych na paliwo wodorowe.
- ◯ wyłącznie w gwiazdach.
- ◯ w bombie atomowej.
- ◯ w centrach gwiazd, reaktorach termojądrowych oraz bombach wodorowych.
- ◯ wjądrze Ziemi.
- ◯ wyłącznie w reaktorach jądrowych.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 13

Jakie funkcje pełnią poszczególne elementy reaktora jądrowego?

Paliwo jądrowe	kieruje neutrony do rdzenia reaktora.
Osłona biologiczna	odprowadza ciepło z rdzenia reaktora.
Pręty kontrolne	spowalnia neutrony.
Reflektor	chroni przed promieniowaniem.
Chłodziwo	ulega rozszczepieniu.
Moderator	pochłaniają neutrony.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 14

Aby ochronić się przed szkodliwym działaniem promieniowania β pochodzącego z zewnętrznego źródła wystarczy:

- ◯ zasłonić się kartką papieru.
- ◯ zasłonić się grubą ścianą z betonu zawierającego dodatek boru.
- ◯ zasłonić się grubą szybą ze szkła lub szkła organicznego.
- ◯ zasłonić się grubą płytą ołowianą.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 15

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Zadania

Polecenie 1

Oblicz energię wiązania jądra litu $^{7}_{3}\mathrm{Li}$. Przyjmij, że jego masa wynosi $11{,}647 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg}$, masa protonu jest równa $1{,}673 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg}$, a masa neutronu to $1{,}675 \cdot 10^{-27}\mathrm{kg}$. Prędkość światła w próżni wynosi $3 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m/s}$.

Polecenie 2

Okres połowicznego zaniku izotopu jodu stosowanego do badania tarczycy wynosi 8 dni. Oblicz, po ilu dniach aktywność preparatu podanego badanej osobie zmaleje 8 razy. Pomiń ubytek preparatu związany z jego wydalaniem go z organizmu.

Polecenie 3

Drewniany posążek znaleziony przez archeologów zawierał 4 razy mniej węgla $^{14}\mathrm{C}$ niż próbka drewna pobrana z rosnącego obecnie drzewa. Oblicz wiek drewna, z którego wykonano posążek. Czas połowicznego zaniku węgla znajdź w dostępnych ci źródłach.

Polecenie 4

W opisie atomów i cząstek mniejszych od atomu masę wyraża się nie w kilogramach, ale w jednostkach masy atomowej (po angielsku *unit*), oznaczanych literą „u” ($1\ \mathrm{u} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$). Oblicz deficyt masy jądra sodu $^{23}_{11}\mathrm{Na}$. Masa tego jądra wynosi $22{,}9898\ \mathrm{u}$, masa protonu jest równa $1{,}0073\ \mathrm{u}$, a masa neutronu ma wartość $1{,}0087\ \mathrm{u}$. Obliczoną wartość deficytu masy podaj w kilogramach.

Polecenie 5

Tytoń, z którego produkuje się papierosy, zawiera dwa podstawowe izotopy promieniotwórcze: ołów $^{210}_{82}\mathrm{Pb}$ i polon $^{210}_{84}\mathrm{Po}$.

1. Podczas palenia papierosa polon, ulega sublimacji i prawie w całości przechodzi w dym papierosowy (popiół nie wykazuje aktywności promieniotwórczej). Aktywność promieniotwórcza dymu powstałego ze spalenia paczki papierosów wynosi około 200 mBq. Ile cząstek alfa emituje taki dym średnio w ciągu minuty?

2. Wymień, jakie narządy palacza narażone są na działanie tego promieniowania.

3. Gdyby aktywność dymu zmniejszyć czterokrotnie, to dawka promieniowania pochłaniana w ciągu roku przez osobę wypalającą dwie paczki papierosów dziennie osiągnęłaby wartość porównywalną z tą, jaką pochłonęli mieszkańcy wschodnich terenów Polski po katastrofie w Czarnobylu. Oblicz czas, po którym aktywność dymu zmalałaby cztery razy (zakładamy, że dym nie ulatnia się z pojemnika, w którym go przetrzymujemy do celów badawczych). Czas połowicznego zaniku dla izotopu $^{210}_{84}\mathrm{Po}$ wynosi $T_{1/2}$= 138,4 dnia.

Ewolucja Wszechświata

Czy Wszechświat zawsze wyglądał tak jak teraz? Czy zachodziły i zachodzą w nim jakieś zmiany? Odpowiedź na to pytanie musi być twierdząca, ponieważ obserwujemy promieniowanie gwiazd. Wysyłana przez nie energia musiała jakoś powstać, a proces jej wytwarzania prowadził do zmian. Inną kwestią jest pochodzenie Wszechświata – jest wieczny czy kiedyś powstał? Jeżeli powstał, to jak i dlaczego? W dużej mierze są to rozważania filozoficzne, ponieważ fizyka jeszcze nie zna odpowiedzi na wiele z tych pytań. Dlatego mówimy o hipotezach. Jakie to hipotezy – dowiecie się z tego rozdziału.

W 1987 roku astronomowie zaobserwowali na niebie eksplodującą gwiazdę, czyli tzw. supernową – najjaśniejsze tego typu zjawisko od prawie 400 lat

Już potrafisz

- opisać budowę jąder atomów i warunki zachodzenia reakcji termojądrowych;
- opisać budowę naszej Galaktyki i położenia w niej Układu Słonecznego;
- wymieniać najważniejsze obiekty w Galaktyce: gwiazdy, gromady gwiazd, mgławice gazowe, a także rozpoznawać te ciała niebieskie na fotografiach.

Nauczysz się

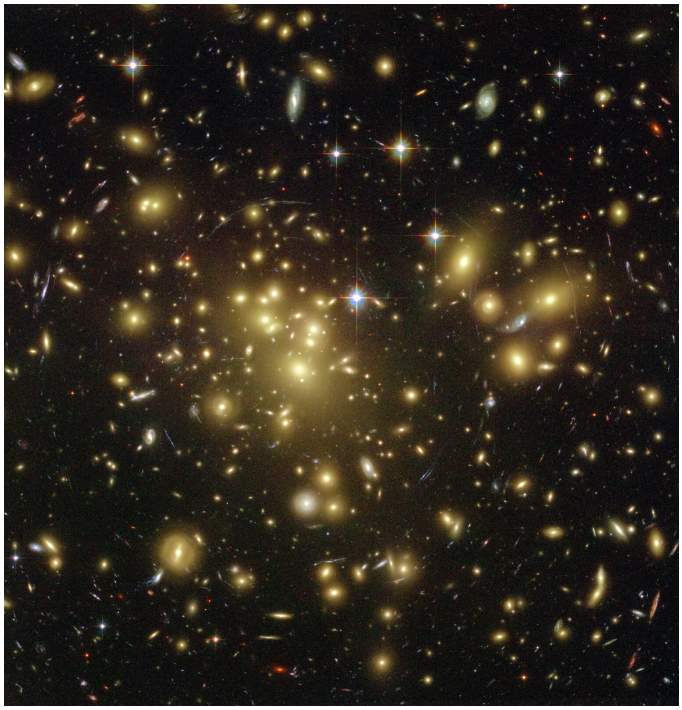
- opisywać oddalanie się galaktyk, odkryte przez Edwina Hubble'a;
- opisywać Wielki Wybuch jako początek znanego nam Wszechświata i rozszerzanie się Wszechświata (tzw. ucieczkę galaktyk);
- wyznaczać odległość do najdalszych obiektów we Wszechświecie;

- przedstawiać ewolucję Wszechświata jako całości.

1. Odkrycie Edwina Hubble'a

Edwin Hubble po analizie zdjęć pewnej gwiazdy znajdującej się w Mgławicy Andromedy stwierdził, że ta gwiazda to cefeida. Po wyznaczeniu okresu zmian blasku wykazał, iż odległość od niej do Ziemi wynosi około 850 000 lat świetlnych. Nie mógł to być obiekt należący do naszej Galaktyki. Okazało się, że Wszechświat jest znacznie większy, niż sądzono. W tej chwili przyjmuje się, że odległość od Układu Słonecznego do galaktyki Andromedy wynosi ponad **2 mln lat świetlnych**.

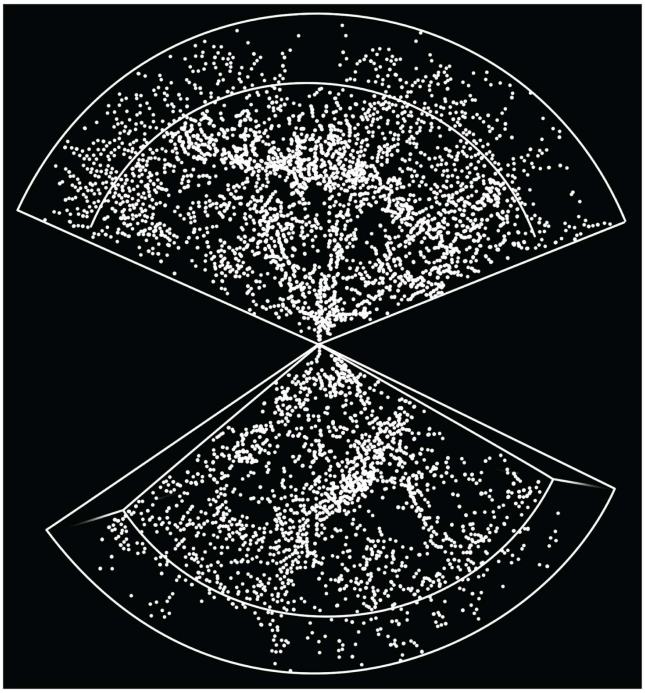
Rozwój fotografii pozwolił na zrobienie zdjęć obiektom o jeszcze mniejszej jasności, położonych dalej niż najbliższe galaktyki. Wtedy okazało się, że galaktyk są miliony i tworzą one struktury wyższego rzędu, zwane grupami, gromadami i supergromadami galaktyk. Grupy zawierają kilkanaście do kilkudziesięciu galaktyk. Przykładem grupy jest Grupa Lokalna Galaktyk, do której należą nasza Galaktyka, galaktyka Andromedy i jeszcze 50 mniejszych galaktyk, będących satelitami naszej Galaktyki lub Wielkiej Mgławicy w Andromedzie.



Fragment supergromady Virgo, do której należy nasza Galaktyka wraz z Grupą Lokalną Galaktyk. Każda plamka na tym zdjęciu to galaktyka (z wyjątkiem kilku gwiazd leżących bliżej)

Gromady galaktyk zawierają od kilkuset do kilku tysięcy galaktyk, a supergromady są utworzone z tysięcy gromad galaktyk. Czasami mówi się nawet o 10 milionach supergromad

we Wszechświecie. Nasza Galaktyka wraz z Grupa Lokalną Galaktyk jest częścią supergromady Virgo (Panny).



Rozkład przestrzenny galaktyk na mapie sporządzonej przez V. de Lapparenta, M. Gellera i J. Huchrę z Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) dla nieba północnego (górny wycinek) oraz przez zespół L. N. da Costy z Brazylijskiego Obserwatorium Narodowego dla nieba południowego (dolny wycinek). Droga Mleczna znajduje się w środku. Kątowa rozpiętość wycinków wynosi 135°, ich promień zaś około 150 megaparseków (Mpc). Każdy punkt odpowiada jednej galaktyce. Długa (pozioma) struktura na wycinku górnym to tzw. Wielki Mur

2. Ucieczka galaktyk

Wiesz już, że każdy pierwiastek wysyła promieniowanie o ściśle określonej długości fal. Analiza widma galaktyk pokazała, że długości fal nieco się różnią od długości wyznaczonych na Ziemi.

* Przyczyną okazał się ruch źródeł światła w stosunku do obserwatora na Ziemi.

Pierwszą galaktyką, dla której wyznaczono przesunięcie widma, była Wielka Mgławica w gwiazdozbiorze Andromedy. Okazało się, że ta galaktyka zbliża się do nas z prędkością 300 km/s. Pomiary wykonywane dla wielu innych galaktyk wskazywały, że większość galaktyk się od nas oddala, i to ze znacznie większymi prędkościami. Dalsze badania Hubble'a doprowadziły go do odkrycia, że prędkość, o której mówimy (tzw. prędkość radialna, czyli mierzona wyłącznie wzdłuż linii prostej łączącej Ziemię z galaktyką), jest

wprost proporcjonalna do odległości dzielącej Ziemię od badanego obiektu – im dalej od nas znajduje się galaktyka, tym szybciej się ona od nas oddala.

3. Prawo Hubble'a

Prawo opisujące ucieczkę galaktyk, zwane prawem Hubble'a, zapisujemy następująco:

$$v = \mathrm{H} \cdot r,$$

gdzie:
v – wartość prędkości radialnej;
H – stała Hubble'a;
r – odległość danej galaktyki od Układu Słonecznego.
Aby wyznaczyć prędkość radialną, trzeba znać przesunięcia linii widmowych:

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

gdzie:
c – prędkość światła
$\Delta\lambda$ – przesunięcie linii widmowej, która w laboratoriom ma długość λ.

Sporym problemem było i nadal jest wyznaczenie stałej Hubble'a. Na początku przyjmowano większe wartości, niż obecnie. W naszym podręczniku pojawia się także problem jednostek. W astronomii, ze względu na olbrzymie odległości pomiędzy badanymi obiektami, używane są nietypowe jednostki. Podstawową jednostką jest 1 parsek ($1\ \mathrm{pc}$), czyli odległość od Ziemi do gwiazdy, której kąt przesunięcia wynosiłby 1 sekundę kątową (w wyniku zjawiska paralaksy). Odległość ta odpowiada w przybliżeniu 3,26 roku świetlnego. Używane są wielokrotności parseka: $1\ \mathrm{kpc}$ – 1 kiloparsek, czyli 1000 parseków; $1\ \mathrm{Mpc}$ – 1 megaparsek, czyli milion parseków. Obecnie przyjmuje się, że wartość stałej Hubble'a wynosi:

$$\mathrm{H} = 70 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}} / \mathrm{Mpc},$$

Oznacza to, że obiekt oddalający się od nas z prędkością $70\ \mathrm{km}/s$ znajduje się w odległości 1 megaparseka (lub 3 milionów 26 tysięcy lat świetlnych). Jeżeli we wzorze Hubble'a wyrazimy $1\ \mathrm{Mpc}$ w kilometrach ($3{,}09 \cdot 10^{22}\mathrm{m}$), to otrzymamy:

$$\mathrm{H} = 2{,}3 \cdot 10^{-18}\mathrm{s}^{-1}$$

Cały czas prowadzone są badania mające na celu dokładniejsze wyznaczenie stałej Hubble'a. W 2012 r. pomiary wykonane za pomocą teleskopu kosmicznego Spitzera dały wynik nieco

większy niż ten podany powyżej. Z kolei w 2013 r. na podstawie danych uzyskanych przez teleskop Planck oszacowano, że stała Hubble'a wynosi mniej niż $2{,}3 \cdot 10^{-18}\mathrm{s}^{-1}$.

Wartość stałej Hubble'a może służyć do oszacowania wieku Wszechświata. Jeżeli założymy, że rozszerzanie Wszechświata rozpoczęło się w momencie narodzin Wszechświata ($r = 0$) i cały czas trwa, to prędkość ucieczki galaktyk równa się:

$$v = \frac{r}{t}$$

gdzie t – wiek Wszechświata.
Ze wzoru Hubble'a otrzymujemy zatem:

$$\frac{r}{t} = \mathrm{H} \cdot r,$$

oraz

$$t = \frac{1}{\mathrm{H}}$$

Jeśli przyjmiemy, że stała Hubble'a wynosi tyle, ile podaliśmy powyżej, to możemy wyciągnąć wniosek, że rozszerzanie się Wszechświata miało początek ok. 13,8 mld lat temu. Ta wartość jest przyjmowana obecnie jako wiek Wszechświata.

4. Wielki Wybuch

Astronomowie już w starożytności zastanawiali się, jak wygląda cały Wszechświat. Modele Ptolemeusza czy Kopernika nie różniły się tak bardzo – krańcem uniwersum była sfera gwiazd stałych. To, czy w środku znajdowała się Ziemia, czy – Słońce, w tym kontekście było nieistotne.

Jednak już w starożytności wyrażano poglądy, że gwiazdy nie leżą na jednej sferze, lecz znajdują się w różnych odległościach od Ziemi. Do tych teorii powrócił Galileusz. Z biegiem czasu zaczęto się zastanawiać, jak duży jest Wszechświat. Gdyby przyjąć, że jest skończony, to co znajduje się poza nim? A jeżeli jest nieskończony? I wypełniony gwiazdami? Z tego wynikał natychmiast pewien paradoks, zwany paradoksem fotometrycznym Olbersa.

Pomysły na wyjaśnienie tego paradoksu były różne. Niektórzy sądzili, że w Kosmosie znajdują się obłoki gęstego gazu, które zasłaniają bardziej oddalone gwiazdy. Takie obłoki jednak pochłaniałyby stopniowo energię promieniowania, w wyniku czego ich temperatura by rosła, a wraz z nią również ilość emitowanej przez nie energii. Takie obłoki gazowe

znajdowałyby się więc w stanie równowagi termodynamicznej: wypromieniowałyby tyle samo energii, ile by pochłaniały.

Kwestie tego paradoksu wyjaśniano także za pomocą modelu hierarchicznego. Wszechświat miał być zbudowany z układów o kolejno rosnących rozmiarach: gwiazdy tworzą galaktyki, galaktyki – gromady galaktyk, a te – gromady gromad. Średnia gęstość materii w tych gromadach maleje wraz ze wzrostem rzędu gromady. Nie mamy jednak danych obserwacyjnych potwierdzających prawdziwość takiego modelu.

Kosmologia jest nauką o Wszechświecie jako całości. To, jak opisuje ona Wszechświat, wynika z tego, jakie zjawiska oraz zmiany jesteśmy w stanie zaobserwować. W skali całego Wszechświata za najbardziej istotne uważane są następujące zjawiska:

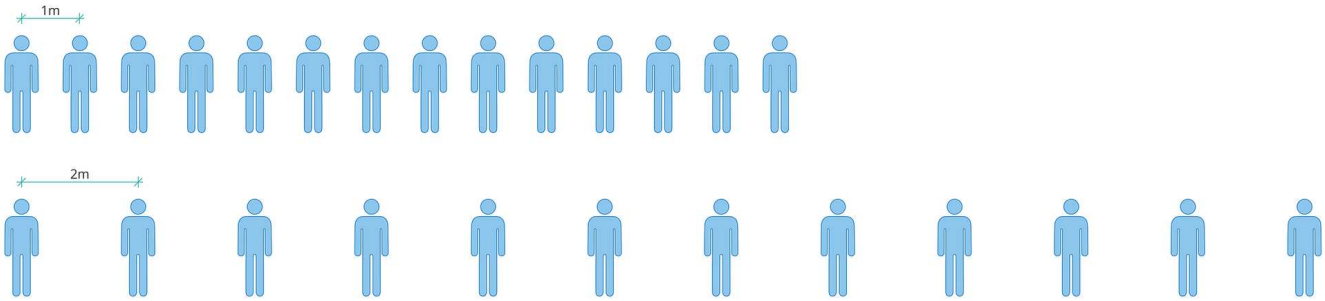
- „ucieczka" galaktyk, czyli rozszerzanie się Wszechświata;
- mikrofalowe promieniowanie tła, dochodzące do nas ze wszystkich kierunków;
- duży udział helu w materii tworzącej Wszechświat.

W jaki sposób zjawisko rozszerzania się Wszechświata pozwoliło rozwiązać paradoks fotometryczny Olbersa?
Do Ziemi może dochodzić światło emitowane przez obiekty położone w maksymalnej odległości $13{,}7 \cdot 10^9$ lat świetlnych (bo tyle czasu upłynęło od powstania Wszechświata). Oznacza to, że światło emitowane przez obiekty położone dalej niż $13{,}7$ mld lat świetlnych jeszcze do nas nie dotarło.

Ze zjawiskiem oddalania się galaktyk wiąże się kwestia położenia Słońca (lub naszej Galaktyki) we Wszechświecie. Skoro wszystkie galaktyki (z wyjątkiem najbliższych) się od nas oddalają, to można by na tej podstawie przypuszczać, że znajdujemy się w centrum Wszechświata. Tak jednak nie jest: rozszerza się cała przestrzeń i odległość między jej dowolnymi punktami zawsze się zwiększa.

Polecenie 1

Ustaw się z kolegami i koleżankami na szkolnym boisku. Stańcie obok siebie tak, żeby odległości pomiędzy kolejnymi osobami wynosiły 1 metr (na wyciągnięcie ramion). Stań na początku szeregu. Oznacza to, że osoba stojąca najbliżej ciebie znajdzie się w odległości 1 metra, druga – 2 metrów, kolejna – 3 metrów itd. A teraz dwukrotnie zwiększcie odstęp między sobą (do 2 metrów). O ile zwiększy się odległość między tobą a poszczególnymi osobami?

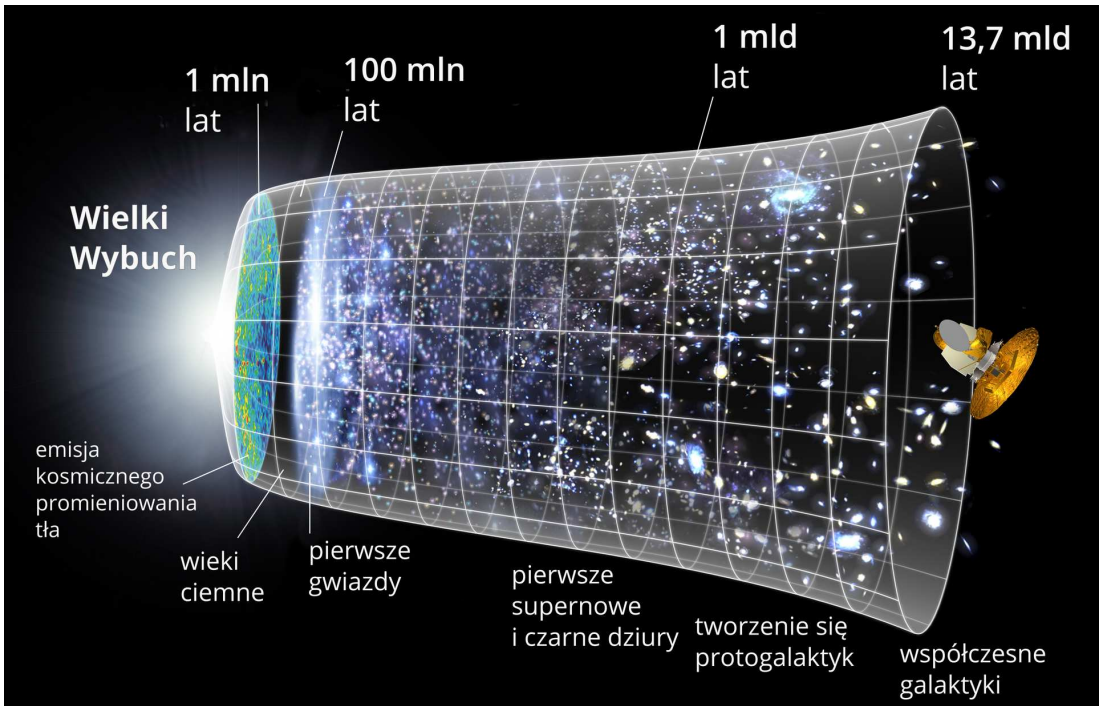


Źródło: Dariusz Adryan, licencja: CC BY 3.0.

Załóżmy, że takie zwiększenie odległości każdemu zajęło 1 sekundę. Z jaką prędkością oddalą się od ciebie uczniowie stojący po twojej prawej stronie? Jak ta sytuacja będzie wyglądała z punktu widzenia trzeciego ucznia od lewej?

5. Etapy rozwoju Wszechświata

Skoro galaktyki się oddalają, a rozmiary Wszechświata rosną, to nasuwa się pytanie: co działo się wcześniej? Odpowiedź wydaje się oczywista – Wszechświat był mniejszy. Galaktyki znajdowały się bliżej siebie. A co było na początku?



Początek i ewolucja Wszechświata

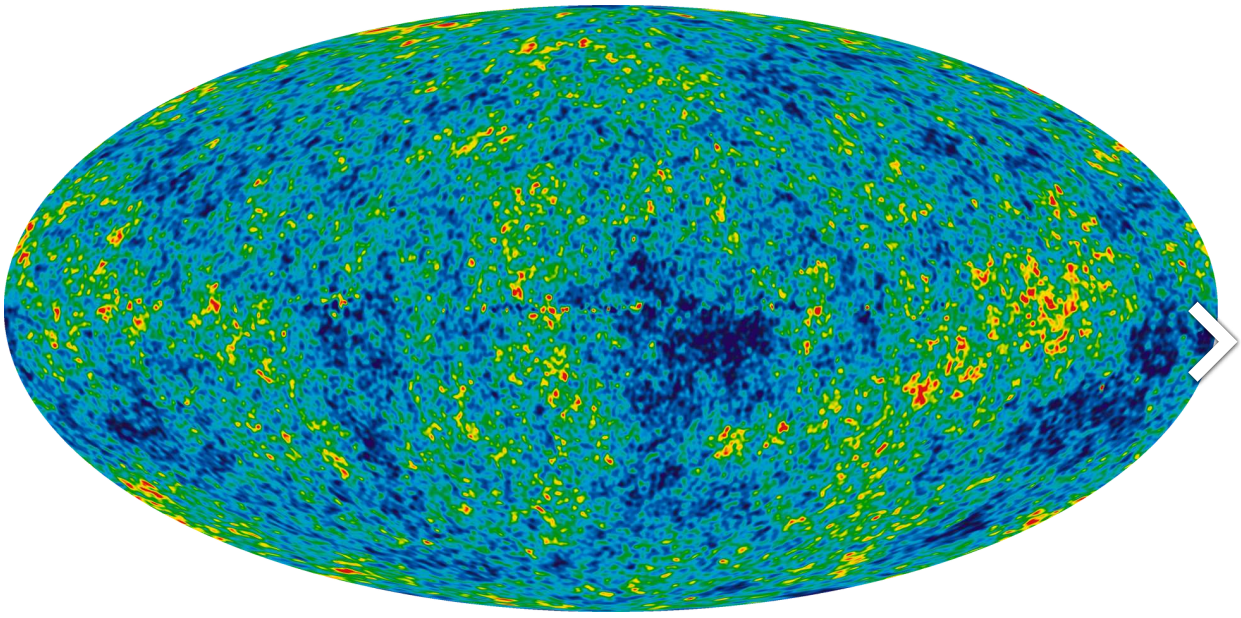
Ten początek i to, co nastąpiło zaraz potem, nazwano Wielkim Wybuchem. Do rozpowszechnienia się tej hipotezy przyczynili się przede wszystkim rosyjski matematyk Aleksander Friedman oraz belgijski astronom (i ksiądz) Georges Lemaître.
Nie wiemy, jak wyglądał ten początek. Nie ma również sensu pytać o czas i rozmiary tego zjawiska, ponieważ czas i przestrzeń pojawiły się jednocześnie w tym właśnie momencie. Przestrzeń i czas, materia i energia, tworzące jedność, uległy czemuś w rodzaju eksplozji. Gęstość powstałej osobliwości była nieskończenie duża.

Pierwsza faza rozwoju wczesnego Wszechświata to tzw. Era Plancka. Obejmowała ona czas od 0 do 10^{-34} s. Nie umiemy jeszcze opisać, jaki był to stan ani jakie procesy w nim zachodziły.

Okres pomiędzy 10^{-34} s a 10^{-32} s to czas, w którym rozmiary Wszechświata powiększyły się od 10^{20} do 10^{26} razy – ten okres nazywamy erą inflacyjną. Po zakończeniu tego etapu przestrzeń Wszechświata składała się z gorącej i gęstej mieszaniny kwarków, antykwarków i gluonów oraz fotonów, elektronów i pozytonów.

Następnym etapem było łączenie się kwarków w protony i neutrony, a gdy Wszechświat miał jedną sekundę, a jego temperatura obniżyła się do 5 mld kelwinów, nastąpiły procesy anihilacji elektronów i pozytonów (po zetknięciu się elektronu i pozytonu obie cząstki znikają, a zamiast nich pojawiają się dwa fotony promieniowania gamma), w wyniku czego zwiększyła się liczba fotonów. Rozpoczęła się era nukleosyntezy – powstawały jądra atomowe deuteru, trytu, helu ^{3}He i ^{4}He. Trwała około 4 minut i właśnie wtedy ustalił się skład Wszechświata – na ok. 75% protonów i ponad 24% jąder helu. Potem jądra ciężkie nie mogły już powstawać, gdyż temperatura stała się zbyt niska, aby jądra helu mogły się łączyć i tworzyć cięższe jądra.

Dalsze rozszerzanie się Wszechświata prowadziło do obniżenia temperatury – protony i jądra helu mogły się łączyć z elektronami w obojętne atomy wodoru i helu. Powstawało wtedy promieniowanie (układ protonu i elektronu mający ujemną energię), które w tej chwili obserwujemy jako promieniowanie reliktowe – mikrofalowe promieniowanie tła. Obecnie jest to promieniowanie odpowiadające temperaturze ok. 2,7 K. Do jego odkrycia przyczynili się różni astrofizycy, ale przyjmuje się, że dokonali tego Arnio Penzias i Robert Wilson (1965 r.).



Rozkład przestrzenny promieniowania reliktowego uzyskany przez satelitę Planck

6. Powstawanie galaktyk i ewolucja gwiazd

Wiemy już, że Wszechświat to miliardy galaktyk. Tworzą one gromady i supergromady. Jednak mechanizm powstawania galaktyk nie został w pełni wyjaśniony. Astronomowie długo zastanawiali się, jak tego rodzaju ewolucja w ogóle była możliwa, skoro Wszechświat zgodnie z ich ówczesną wiedzą był tworem jednorodnym.

Przełom przyniosły badania tła mikrofalowego (promieniowania reliktowego), które wyraźnie wykazały obecność obszarów o zróżnicowanym natężeniu tego promieniowania. Płynął z tego wniosek, że już we wczesnym etapie ewolucji Wszechświata pojawiły się niejednorodności w rozkładzie materii, a zatem już wtedy Wszechświat był „przygotowany" na powstawanie galaktyk.

Jednak samo rozmieszczenie galaktyk i gromad galaktyk nasuwa wiele pytań. Dlaczego w jednych miejscach jest bardzo dużo galaktyk i gromad, a w innych są puste obszary? Dlaczego te tak ogromne obiekty, zawierające setki miliardów gwiazd, niekiedy tworzą „mur", przed którym i za którym obszar Wszechświata jest prawie pusty?

Zdecydowanie więcej wiemy o procesie powstawania gwiazd.

Jak powstaje gwiazda?

Gwiazdy powstają w obłokach materii międzygwiazdowej. W wyniku działania sił grawitacyjnych taki obłok zaczyna gęstnieć. Następnym etapem jest podział obłoków, mających zazwyczaj bardzo duże rozmiary, na wiele mniejszych fragmentów. Każdy z nich dalej się kurczy (kontrakcja grawitacyjna), co prowadzi do powstania kulistego obiektu o tak wysokiej temperaturze, że zaczyna on świecić. Tak powstaje protogwiazda. Ciśnienie wewnątrz protogwiazdy jest już stosunkowo wysokie, ale siły grawitacji nadal przeważają i obiekt wciąż się kurczy.

W pewnym momencie (zależnym od masy – im większa masa protogwiazdy, tym szybciej się to dzieje) temperatura w jądrze osiąga wartość rzędu milionów kelwinów, a cząstki osiągają bardzo dużą prędkość. Dochodzi wtedy do reakcji syntezy termojądrowej – z wodoru powstaje hel. Od tego momentu protogwiazda staje się gwiazdą – ciśnienie wewnętrzne równoważy siłę grawitacji. Protogwiazda staje się gwiazdą ciągu głównego i produkuje energię w reakcjach syntezy wodoru. Następne etapy ewolucji gwiazdy zależą od jej masy. Budowa gwiazdy będzie się zmieniać, jeśli zaburzona zostanie równowaga między ciśnieniem w gwieździe a siłą grawitacji. Znaczenie będą miały zmiany zawartości wodoru (a potem także helu) w jądrze gwiazdy.

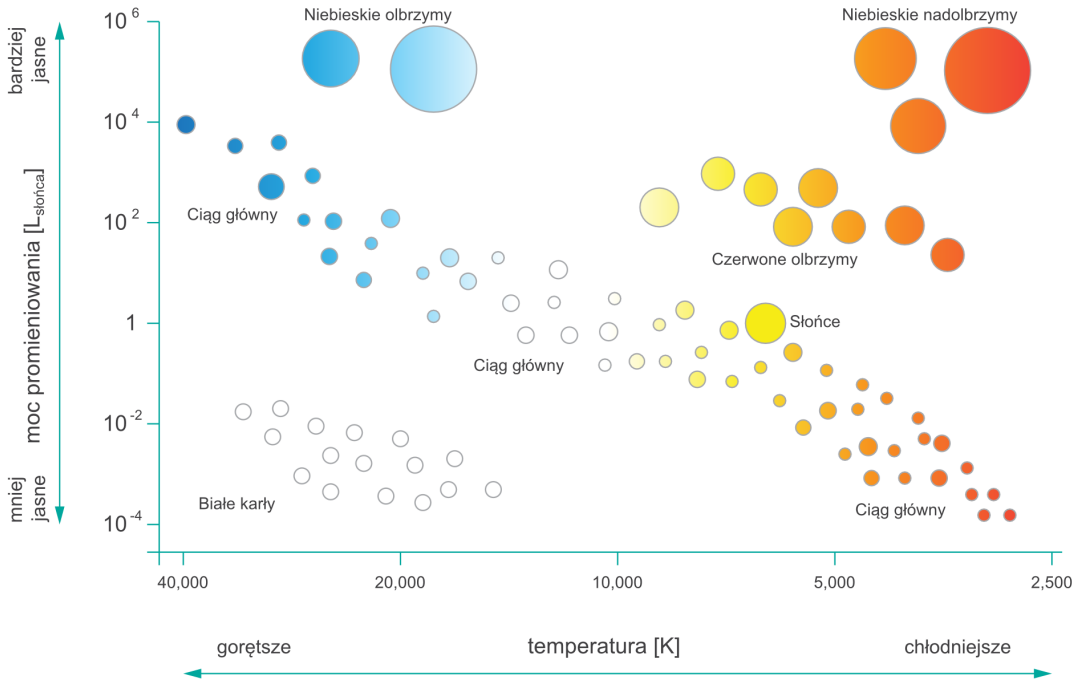
7. Reakcje termojądrowe na Słońcu

We wnętrzu Słońca zachodzą reakcje termojądrowe. W każdej z nich z 4 protonów powstaje jądro helu ${}_2^4\mathrm{He}$. Jak już wiesz, wzrost energii wiązania podczas jednej reakcji syntezy helu oznacza wydzielanie się ok. $4{,}3 \cdot 10^{-12}\mathrm{J}$. Słońce emituje energię rzędu $4 \cdot 10^{26}\ \mathrm{J}$ w ciągu sekundy. Oznacza to, że w czasie 1 sekundy takich reakcji musi zachodzić ok. 10^{39}. Jest to liczba, którą trudno sobie wyobrazić. Masa Słońca jest jednak ogromna – wynosi $2 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg}$. Gdyby ta gwiazda składała się z samego wodoru, to liczba jej atomów sięgałaby 10^{57}. Jednak w wyniku tych reakcji masa Słońca zmniejsza się o ok. $4\ \mathrm{mln\ ton}$ w ciągu sekundy. Jak długo Słońce będzie jeszcze świecić? Aby się o tym przekonać, wykonaj poniższe polecenie.

> **Polecenie 2**
>
> 1. Oblicz, ile wynosi ubytek masy 4 protonów po ich połączeniu się (syntezie) w jądro atomu helu. Potrzebne dane znajdź w poprzednich rozdziałach niniejszego podręcznika.
> 2. Oblicz, ile lat będzie jeszcze świecić Słońce, jeśli jego masa będzie maleć w takim tempie jak teraz. Przyjmij, że w ciągu 1 sekundy masa Słońca zmniejsza się o 4 mln ton.
> 3. Oblicz, ile procent masy Słońca zmieniło się w energię w ciągu dotychczasowych 4,5 mld lat istnienia tej gwiazdy.

Jak widać, nie musimy się martwić, że Słońce nagle wygaśnie. Istotne jest, że podczas reakcji termojądrowych powstaje hel, a maleje liczba jąder wodoru. Mimo nieznacznego ubytku masy Słońca utrata wodoru jest odczuwalna. Czas, w którym Słońce zamienia wodór w hel, jest najdłuższym okresem życia takiej gwiazdy. Według obliczeń powinien on trwać ok. $10\ \mathrm{mld}$ lat. Skoro wiemy, że Słońce powinno świecić bez zmian jeszcze ok. $5\ \mathrm{mld}$ lat, możemy spać spokojnie (o ile oczywiście współczesne modele budowy Słońca i zachodzących w nim zjawisk są zgodne z prawdą).

Jak przebiega dalszy cykl życia gwiazdy?



Ewolucja gwiazdy

Podsumowanie

- Amerykański astronom Edwin Hubble w latach dwudziestych XX w. ustalił, że gwiazda (cefeida), którą obserwował nie należy do naszej Galaktyki. Było to przełomowe odkrycie, ponieważ do tej pory nie zdawano sobie sprawy z rzeczywistych rozmiarów Wszechświata.
- Przyjmuje się, że odległość od Ziemi do gwiazdy (w galaktyce M31 w gwiazdozbiorze Andromedy) obserwowanej przez Hubble'a wynosi ponad 2 mln lat świetlnych.
- Liczba galaktyk we Wszechświecie jest trudna do oszacowania (jest ich jednak bardzo dużo). Zdjęcia wykonywane przez teleskop Hubble'a pokazują, że na jednej dziesięciomilionowej części nieba rejestrujemy kilkaset miliardów galaktyk.
- Struktury wyższego rzędu niż galaktyki to grupy, gromady i supergromady galaktyk.
- Galaktyki oddalają się od siebie. Zjawisko to odkrył Edwin Hubble. Tłumaczy się je jako przejaw ekspansji (rozszerzenia) Wszechświata. Prawo opisujące ucieczkę galaktyk (prawo Hubble'a) zapisujemy następująco: $v = \mathrm{H} \cdot r$,

  gdzie: v – prędkość ucieczki galaktyk; H – stała Hubble'a; r – odległość między galaktykami.
- Prawo Hubble'a pozwala na oszacowanie wieku Wszechświata; obecnie przyjmuje się, że w przybliżeniu ma on 13,8 mld lat.

- Współczesna astronomia zakłada, że początkiem naszego Wszechświata był Wielki Wybuch. Od tego momentu Wszechświat się rozszerza.
- Potwierdzeniem teorii Wielkiego Wybuchu są obserwacje zjawiska przesunięcia ku czerwieni i obecność tzw. promieniowania reliktowego (mikrofalowego promieniowania tła) o temperaturze 2,7 K.
- Rozmiary Wszechświata szacujemy na ponad 90 mld lat świetlnych.
- We wnętrzu Słońca zachodzą reakcje termojądrowe. W każdej z nich z 4 protonów powstaje jądro helu $^4_2\mathrm{He}$. Słońce w ciągu jednej sekundy wypromieniowuje energię $4 \cdot 10^{26}$ J. Szacuje się, że Słońce będzie świecić jeszcze przez 5 mld lat.

Słowniczek

> **anihilacja elektronów i pozytonów**
>
> – zjawisko całkowitej zamiany masy elektronu i pozytonu w energię; po zderzeniu się elektronu i pozytonu obie cząstki znikają, a zamiast nich pojawiają się dwa fotony promieniowania gamma.

Biogramy

Źródło: Dirl (https://commons.wikimedia.org), public domain.

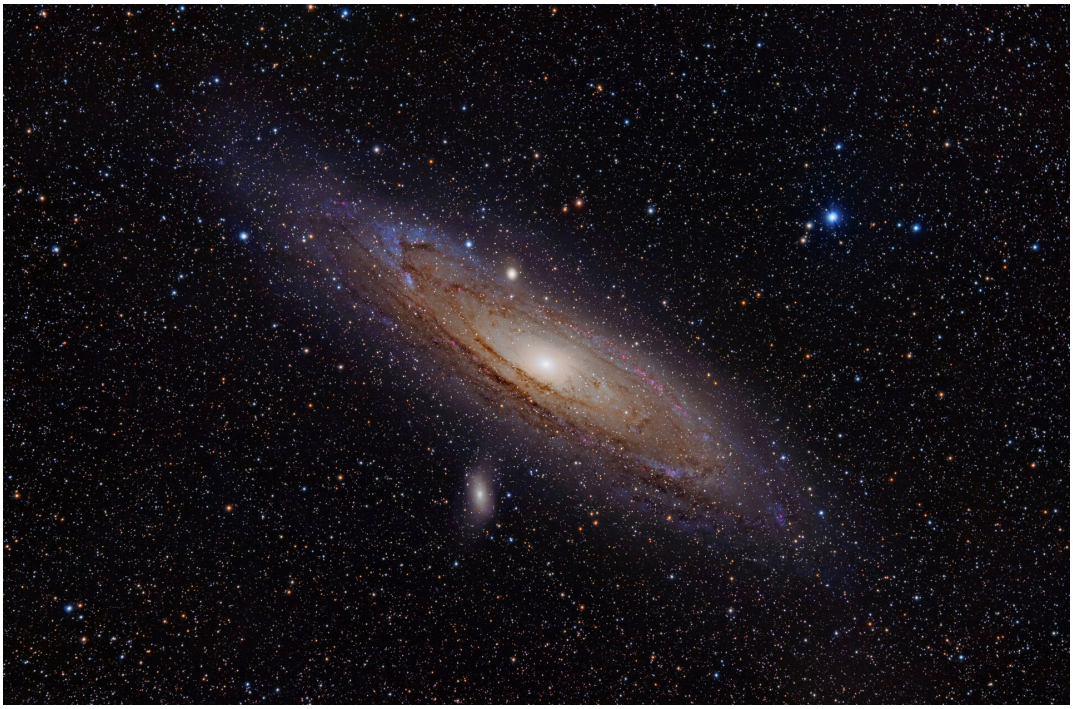
Edwin Hubble

20.11.1889–28.09.1953

Amerykański astronom, który jako pierwszy udowodnił istnienie innych galaktyk poza Drogą Mleczną. Wcześniej sądzono bowiem, że obiekty określane mianem „mgławic" znajdują się w obrębie naszej Galaktyki. Również jemu przypisuje się odkrycie w 1929 r. zjawiska oddalanie się od siebie galaktyk, wyrażonego matematycznie w postaci prawa nazwanego jego imieniem. Idea oddalania się od siebie galaktyk doprowadziła w konsekwencji do powstania koncepcji Wielkiego Wybuchu i rozszerzania się Wszechświata.

Ciekawostka: Edwin Hubble studiował matematykę, fizykę i astronomię, a także prawo, ale w latach młodości większe uznanie wzbudzały jego osiągnięcia sportowe. Jego głównym zainteresowaniem był sport, zwłaszcza boks i koszykówka. Sukcesy w boksie spowodowały, że Hubble'owi proponowano uprawianie boksu zawodowego (przyszły astronom walczył nawet ze słynnym Georges'em Carpentierem). Po zakończeniu I wojny światowej Hubble wrócił do Stanów Zjednoczonych i zajął się astronomią.

Zakończenie



Galaktyka Andromedy – najbliższa duża galaktyka o rozmiarach zbliżonych do naszej Drogi Mlecznej znajduje się w odległości „zaledwie" 2,52 miliona lat świetlnych od Ziemi i według najnowszych badań zawiera około biliona gwiazd. O ogromie Wszechświata świadczy fakt, że w widzialnej jego części istnieje 350 miliardów dużych galaktyk oraz 3,5 biliona znacznie mniejszych galaktyk karłowatych.

Dotarliśmy do końca wycieczki, na którą wyruszyliśmy we wrześniu. Tylko od ciebie zależy, dokąd pójdziesz dalej. Zainteresowanie fizyką nie rodzi się zbyt łatwo.
Czy postrzegasz gwiazdy tak samo jak na początku tego roku szkolnego? Poznałeś metody badania światła gwiazd, jego natężenia, składu widmowego. Wiesz, jak i dlaczego świecą atomy, potrafisz wyznaczyć skład chemiczny gazu budującego atmosferę gwiazdy odległej od Ziemi o biliony bilionów kilometrów – gwiazdy, która jest dla nas punkcikiem, mimo że jej rzeczywista średnica wynosi miliony czy dziesiątki milionów kilometrów. Możliwości analizy widmowej są znacznie większe, ale o tym dowiesz się podczas studiów, jeśli zdecydujesz się pogłębiać wiedzę dotyczącą fizyki.

Jeszcze na początku XX wieku zupełnie nie domyślano się prawdy o źródłach energii gwiazd. Odkrycie promieniotwórczości, poznanie budowy jąder atomów i wieloletnia praca takich ludzi jak Maria Skłodowska-Curie pozwolły zrozumieć, dlaczego jedne jądra są trwałe, a inne – nie. Autorzy tego podręcznika mają nadzieję, że i ty zrozumiesz omówione w nim tematy, choć w niniejszej książce zostały przybliżone tylko niektóre zagadnienia.

Oczywiście, odkrycia fizyki dotyczą całego naszego życia, ale to dzięki odkryciu praw ruchu ciał niebieskich możemy prowadzić badania kosmiczne, a przede wszystkim tworzyć okołoziemską sieć łączności. Ma to wpływ na niemal każdą chwilę naszego życia. Mamy prawie nieograniczony dostęp do informacji, dlatego nie martwimy się, że nie można było

napisać w tym podręczniku o wszystkim. Przecież wystarczy, jak wpiszesz w wyszukiwarce internetowej hasła: „cefeida", „czarna dziura", „nadolbrzym", „diagram Hertzsprunga-Russella", „Wielki Atraktor", „ewolucja gwiazd", „reaktor na wrzącą wodę", „projekt ITER". Właściwie możesz szukać znaczenia każdego terminu, który wydał wam się niezrozumiały podczas korzystania z tego podręcznika. Pamiętaj, że zrozumiesz więcej, gdy będziesz miał rzetelniejszą wiedzę podstawową. Nie zapominaj jednak że nie wszystkie informacje znajdowane w internecie są wiarygodne.
Poznałeś obecnie najważniejszą hipotezę o powstaniu i ewolucji naszego Wszechświata. Piszemy „naszego", ponieważ istnieją teorie o mnogości wszechświatów, więc może ich być nieskończenie wiele.

Obawy wciąż budzi kwestia wykorzystania energii jądrowej do praktycznych celów energetycznych; kilka wypadków położyło się cieniem na bezawaryjnej pracy setek reaktorów. Potrzebna jest wiedza, jak taką energię można uzyskać, i świadomość tego, że brak wiedzy i odpowiedzialności może doprowadzić do tragedii.

Przedstawiliśmy drogę, jaką przeszła ludzkość od czasów starożytnych do współczesnych. Była to droga pełna trudu i cierpień. Droga wieloletnich obserwacji i doświadczeń. Kwestie, które teraz są dla nas oczywiste, zupełnie inaczej były postrzegane za czasów współczesnych Arystarcha z Samos, Kopernika, Keplerai, czy Galileusza. Nie uważamy już, że Słońce jest środkiem Kosmosu, o deferensach i epicyklach słuchamy jak o dinozaurach. Poświęciliśmy sporo uwagi historii i postaciom, które przyczyniły się do rozwoju fizykii. Izaak Newton powiedział: *Jeśli widziałem dalej niż inni, to dlatego, że stałem na barkach gigantów*.
Kepler na okładce swojego egzemplarza dzieła Kopernika „O obrotach..." napisał –. Kiedy będziesz patrzeć w gwiaździste niebo i je podziwiać, pomyśl czasem o ludziach, dzięki którym mogliśmy stanąć na początku drogi do gwiazd.