

Tom I



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



e-Fizyka - Multimediale środowisko nauczania fizyki dla szkół ponadgimnazjalnych
Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (POKL).
Priorytet III Działanie 3.3.

Rozdział

1

Kosmos i grawitacja

Podrozdziały:

- [1.1 Jak rodził się współczesny obraz Kosmosu i Ziemi](#)
- [1.2 Obserwacje naziemne obiektów astronomicznych](#)
- [1.3 Ruch jednostajny po okręgu](#)
- [1.4 Siła dośrodkowa](#)
- [1.5 Siła grawitacji. Prawo powszechnego ciężenia](#)
- [1.6 Siły bezwładności](#)
- [1.7 Prędkości kosmiczne i sztuczne satelity](#)
- [1.8 Układ Słoneczny](#)
- [1.9 Ewolucja i klasyfikacja gwiazd](#)
- [1.10 Galaktyki](#)
- [1.11 Ewolucja Wszechświata](#)
- [1.12 Odległości we Wszechświecie](#)
- [1.D1 Ocena dokładności wyników pomiarów \(Dodatek\)](#)
- [1.D2 Efekt Dopplera \(Dodatek\)](#)

Chociaż ludzie obserwowali niebo i gwiazdy od zarania dziejów, to zdecydowana większość odkryć w dziedzinie astronomii miała miejsce stosunkowo niedawno – w ostatnich kilkudziesięciu latach. Było to możliwe w wyniku znacznego udoskonalenia metod obserwacyjnych wykorzystujących najnowsze odkrycia fizyki. Powstały nowe techniki – głównie elektronika i technika raketowa. Dzięki temu do eksploracji Kosmosu używamy dziś nie tylko przyrządów naziemnych, ale odbywamy też wyprawy kosmiczne wysyłając ludzi i sondy – roboty. Niemal codziennie jesteśmy świadkami nowych, ważnych odkryć, które nieustannie poszerzają horyzonty naszej wiedzy.

W rozdziale tym przybliżymy obecny stan wiedzy na temat najbliższych nam ciał kosmicznych: Księżyc, planet, Słońca. Dowiesz się czym są komety i meteory, z czego wynikają fazy Księżyc. Opiszemy odległe od nas gwiazdy i galaktyki – czyli zbiorowiska gwiazd. Znajdziesz tu też trochę „historii” – chcemy pokazać, jak wyglądał Wszechświat oglądany oczami naszych przodków – jak na przestrzeni dziejów kształtowały się poglądy na temat pochodzenia, budowy i położenia najbliższych, dostrzegalnych gołym okiem, sąsiadów kosmicznych.

Nasi przodkowie w swoich obserwacjach opierali się głównie na tym, co dostrzegali gołym okiem. Obecnie, dzięki coraz doskonalszym narzędziom, możemy oglądać i opisywać nawet najdalsze obiekty, znajdujące się na krańcach naszego obserwowalnego Wszechświata. Obiekty te, podobnie jak Słońce i inne gwiazdy, emitują światło, które pokonuje ogromne odległości w przestrzeni, zanim dotrze do nas. Im obiekt jest bardziej odległy, tym większą do pokonania drogę ma światło. Fascynujące jest to, że najdalsze obserwowane obiekty możemy dzisiaj widzieć takimi, jakimi były miliardy lat temu! Możemy zajrzeć w głąb czasu i obserwować zjawiska, które miały wtedy miejsce.



Wskazówka: Historycy byliby zachwyceni, gdyby mogli, spoglądając w dal, obserwować bitwę pod Grunwaldem, a patrząc jeszcze dalej – wydarzenia starożytnej Grecji. Astrofizycy mają taką możliwość! Obserwując najdalsze obiekty we Wszechświecie, widzą, jaki był Wszechświat przed miliardami lat.

Wędrując w czasie, dowiemy się jak nasz Wszechświat mógł wyglądać w przeszłości i zastanowimy się jaka może go czekać przyszłość. W swojej wędrówce dotrzemy aż do początku Wszechświata oraz do początku czasu i przestrzeni, bowiem, według poglądów współczesnych fizyków, wraz z narodzinami Wszechświata **narodziła się przestrzeń i narodził się czas.**

1.1 Jak rodził się współczesny obraz Kosmosu i Ziemi

Badania przedkopernikańskie

Kulistość i rozmiary Ziemi

Człowiek od najdawniejszych czasów obserwował gwiazdy. Zastanawiał się nad ich usytuowaniem w przestrzeni i nad relacjami, jakie występują między nim, a Ziemią i Niebem. Początkowo przyjmował, że świat jest taki, jakim go widział w bezpośrednich obserwacjach. Mógł zatem uznać, że Ziemia jest płaska, a niebo rozpościera się nad nią w postaci sferycznej kopuły. Wydawało się, że wszystkie gwiazdy, jak również Księżyc i Słońce znajdują się na tej kopule – na tzw. „sklepieniu niebieskim”. Tego terminu używa się w języku potocznym i literackim do dzisiaj.



Płaska Ziemia otoczona jest sferami niebieskimi, na których zawieszono gwiazdy oraz poruszające się Słońce, a za nimi Niebo. Wytrwały wędrowiec mógłby dotrzeć do krańców Wszechświata i ujrzeć Niebo w całej okazałości

Rysunek 1.1: Jedno ze starożytnych wyobrażeń Wszechświata

Dzisiaj wiemy, że pogląd o usytuowaniu wszystkich widzialnych obiektów kosmicznych na tzw. sklepieniu niebieskim, w jednakowej odległości od Ziemi, jest nieprawidłowy, jednak był on bardzo popularny i powszechnie uznawany za obowiązujący w starożytności. Co więcej, w takiej lub nieco zmienionej postaci, utrzymywał się aż do czasów średniowiecznych.

Jednak nie wszyscy podzielali poglądy ogółu. Już niektórzy starożytni uczeni (m.in. pitagorejczycy i inni uczeni greccy w IV i III wieku p.n.e.) na podstawie dość precyzyjnych, jak na owe czasy, obserwacji ciał niebieskich – Księżyca, planet i Słońca - wyciągnęli zaskakująco trafne i nowatorskie wnioski. Odbiegały one znacznie od popularnego w tamtych czasach postrzegania Kosmosu.

Twierdzili oni, między innymi, że Ziemia nie jest płaska, ale ma kształt kuli – do wniosku o kulistości Ziemi prowadziły obserwacje znikających za horyzontem statków na morzu (*Rysunek 1.2: Oddalający się statek znika stopniowo za horyzontem* na stronie 5). Odkryli, że Księżyc znajduje się w dużo bliższej odległości od Ziemi niż Słońce. Głosili, że ruch dobowy sfery niebieskiej da się wytłumaczyć ruchem wirowym Ziemi z zachodu na wschód. Jeden z uczonych, *Arystarch*, ogłosił rewolucyjną tezę, że Słońce znajduje się w centrum Wszechświata, a Ziemia zajmuje położenie peryferyjne. Nie miał on jednak wystarczających dowodów na poparcie swoich poglądów i, podobnie jak wiele innych, popadły one w zapomnienie.

Najpierw jest widoczny w całości (położenie 1), później widoczny jest maszt i górna część żagla (położenie 2), następnie znika z pola widzenia (położenia 3 i 4) *zobacz animację!*

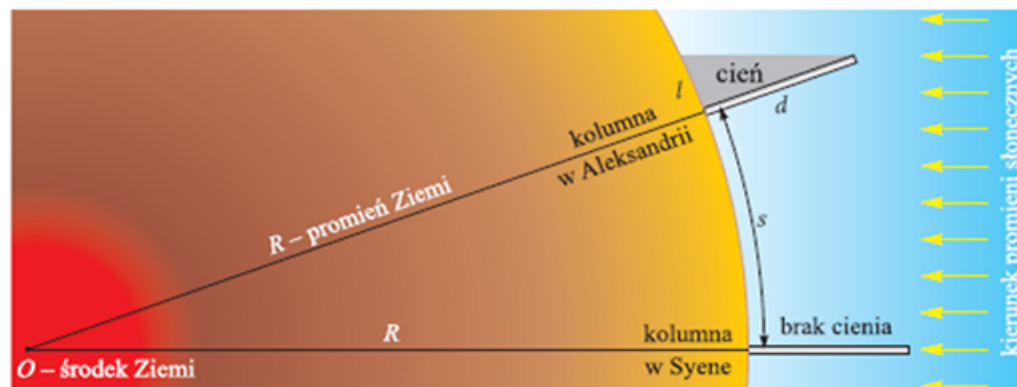
Rysunek 1.2: Oddalający się statek znika stopniowo za horyzontem

Jednym z pierwszych uczonych głoszących pogląd o kulistym kształcie Ziemi był *Pitagoras* (VI w. p.n.e.). W III w. p.n.e. *Eratostenes* po raz pierwszy zmierzył promień Ziemi (patrz Przykład 1#1).

Przykład 1: Czy potrafiłbyś określić wielkość Ziemi mając takie dane, jakimi dysponował Eratostenes?

Eratostenes zauważył, że wtedy, kiedy Słońce znajduje się w zenicie w miejscowości Syene (jest to dzisiejszy Asuan w Egipcie) – to znaczy, że świeci dokładnie nad głową obserwatora (jego promienie padają prostopadle do powierzchni Ziemi pod kątem 90° do niej), w odległej o około $s = 800$ kilometrów Aleksandrii promienie słoneczne padają na ziemię pod kątem różnym od 90° . Eratostenes stwierdził, że przedmioty w Syene nie rzucają cienia, natomiast w Aleksandrii kolumna o wysokości $d = 8,8$ m rzuca na ziemię cień o długości $l = 1,1$ m (*Rysunek 1.3: Sytuacja, jaką analizował Eratostenes, określając promień kuli ziemskiej* na stronie 5). Mając te dane wyznacz za Eratostenesem promień Ziemi R .

Wskazówka: Eratostenes stosował inne, niż kilometry, jednostki odległości. Obliczał wszystko w tzw. *stadionach*. Przyjęta przez Eratostenesa s - odległość Syene-Aleksandria - wynosiła 5 000 stadionów. Obliczona przez niego wartość promienia Ziemi wynosiła ok. 40 000 stadionów. Z prostego przeliczenia $800 \text{ km} \approx 5\,000$ stadionów wynika, że jeden stadion odpowiadał długości ok. 160 m. Wynik uzyskany przez Eratostenesa $R \approx 6\,400$ km zgadzał się dobrze ze współcześnie przyjętym: $R_{\text{śr.}} = 6\,370$ km.



Rysunek 1.3: Sytuacja, jaką analizował Eratostenes, określając promień kuli ziemskiej

Rozwiązanie: Eratostenes słusznie założył, że Słońce jest daleko od Ziemi (patrz *pytania i problemy* nr 1.4 i 1.5) i dlatego można przyjąć, że jego promienie padają równoległe w różne

miejsca na jej powierzchni. Z podobieństwa trójkąta utworzonego przez cień kolumny do trójkąta utworzonego przez promienie kuli ziemskiej, można obliczyć R – promień Ziemi, gdyż znane są l i d – boki trójkąta cienia, oraz s – odległość Syene-Aleksandria.

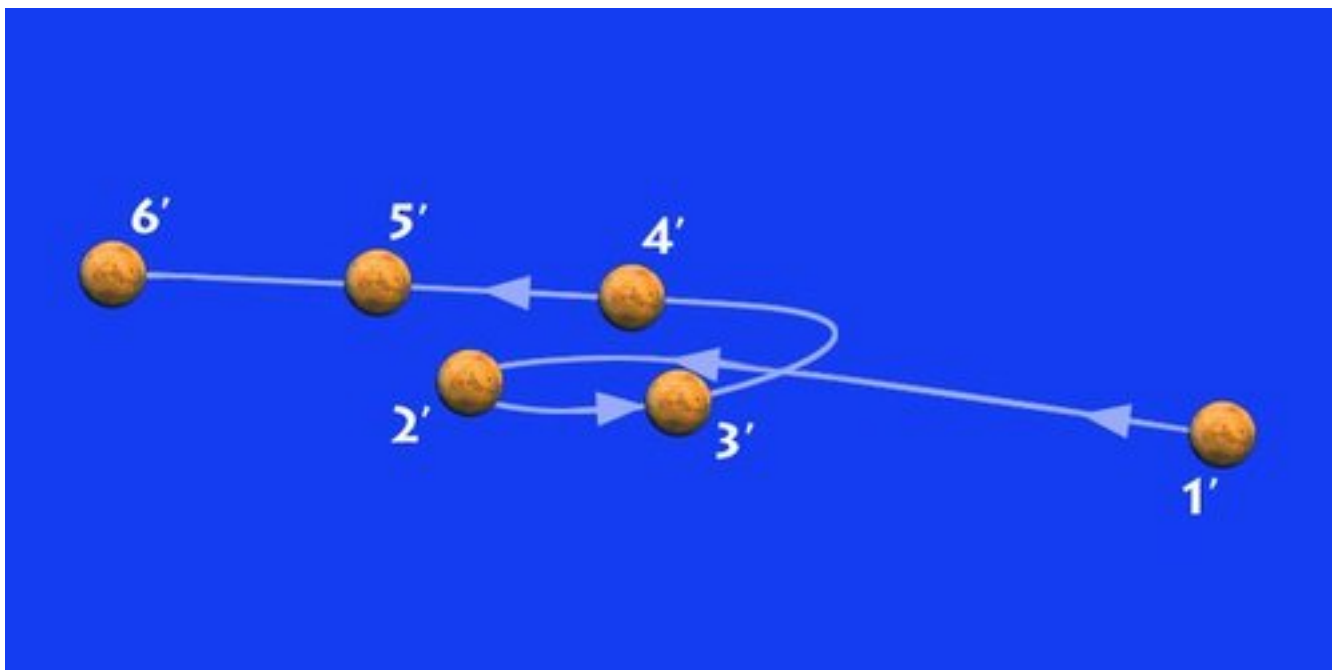
$$(\text{wzór 1}) R = \frac{d}{7} s = 6\,400 \text{ km}$$

Obiekty pozaziemskie

Podobnie jak nasi przodkowie w czasach starożytnych, my też wpatrując się w niebo możemy dziś ulec wrażeniu, że tzw. sfera niebieska, Słońce i gwiazdy, obracają się wokół Ziemi oraz, że gwiazdy nie zmieniają położenia względem siebie na sferze niebieskiej. W rzeczywistości znajdują się one w różnych odległościach od nas i poruszają się względem siebie, ale ich ruch możemy wykryć wyłącznie za pomocą bardzo precyzyjnych instrumentów astronomicznych, ponieważ są one bardzo od nas odległe.

! **Ważne:** *Planety* (z greckiego „wędrujące gwiazdy”) nie świecą własnym światłem. Ich światło jest światłem odbitym pochodzącym od Słońca. Choć w rzeczywistości są dużo większe od Księżyca, wydają się małe, ponieważ są bardziej oddalone.

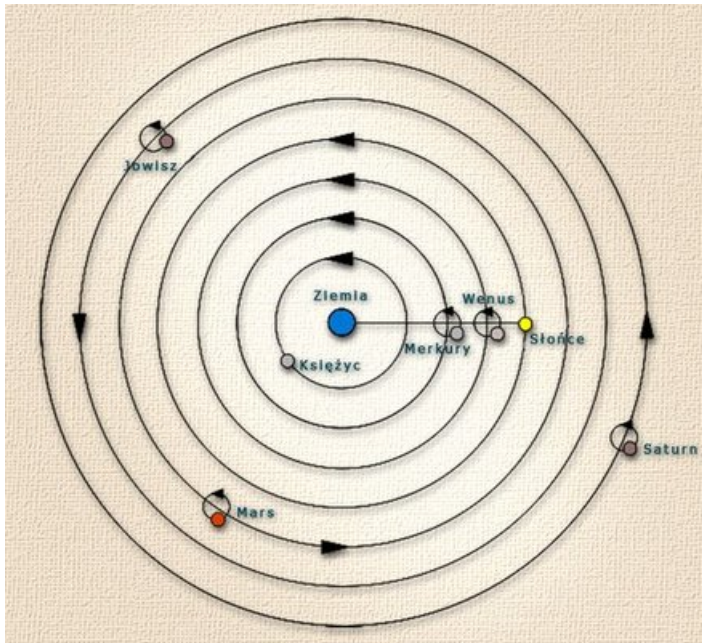
Planety, chociaż na pierwszy rzut oka przypominają gwiazdy, znajdują się znacznie bliżej nas i, podobnie, jak Ziemia, są globami okrążającymi Słońce. Zmieniają one swoje położenie na tle gwiazd. Można się łatwo o tym przekonać podczas regularnych, wielodobowych obserwacji nieba, (*Rysunek 1.4: Ruch planety* na stronie 6). Tym właśnie „wędrownikom” na tle tzw. „gwiazd stałych” planety zawdzięczają swoją nazwę, bowiem w języku greckim *planetes astron* oznacza wędrującą gwiazdę.



Cyframi 1', 2' ... 6' oznaczono kolejne widziane z Ziemi położenia planety na tle gwiazd stałych

Rysunek 1.4: Ruch planety

Starożytni obserwując planety widzieli, że poruszają się one na niebie po skomplikowanych torach, zakreślając pętle na tle gwiazd. Wyjaśnienie tego zjawiska w systemie geocentrycznym było bardzo zawile. Aleksandryjski astronom **Klaudiusz Ptolemeusz**, działający w II wieku n.e., objaśniał obserwowany na Ziemi ruch planet, zakładając, że poruszają się one po tzw. epicyklach, czyli po torach kołowych, których środki przemieszczają się po kołowych orbitach wokółziemskich (*Rysunek 1.5: Układ geocentryczny Ptolemeusza* na stronie 7).



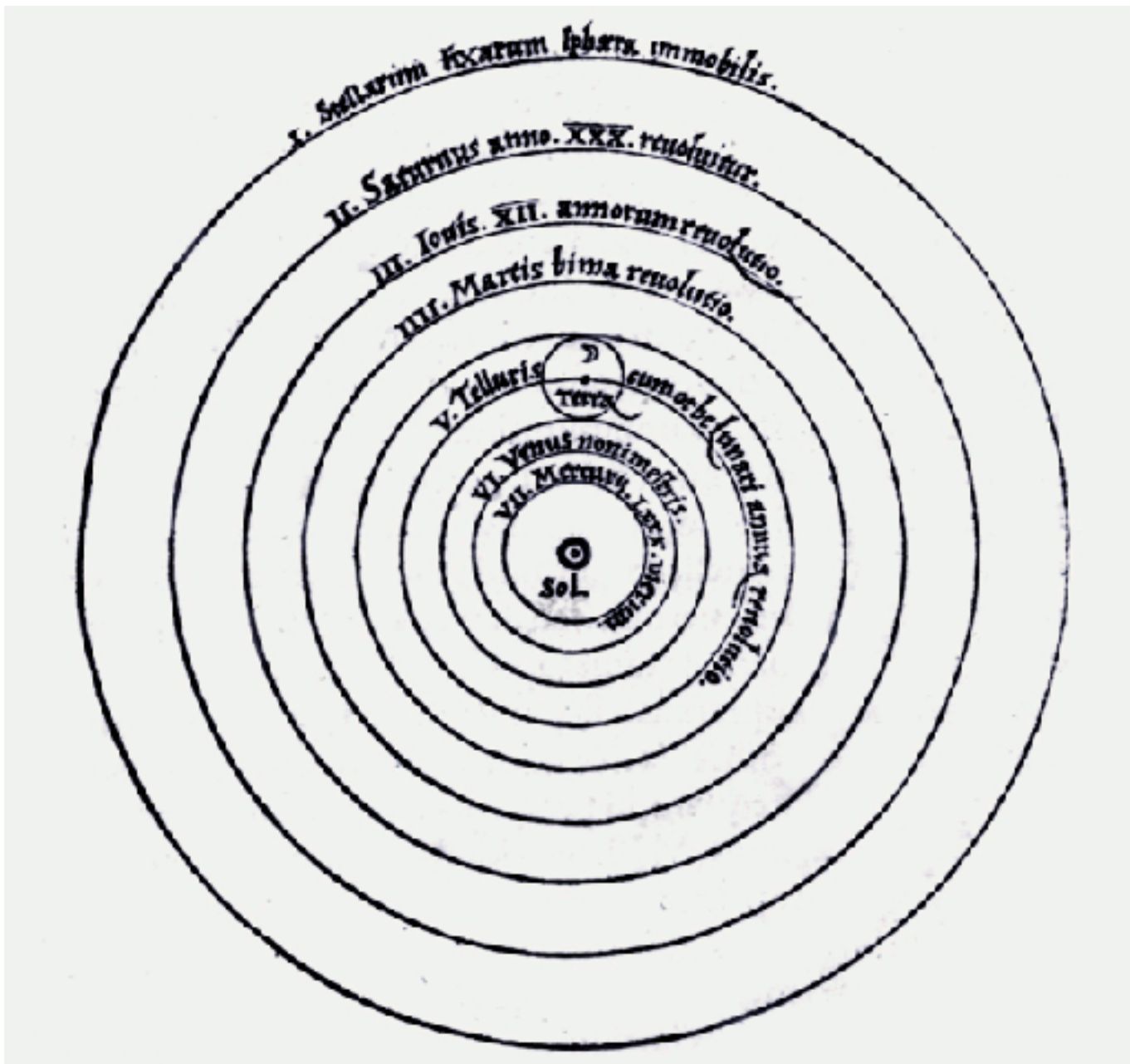
Rysunek 1.5: Układ geocentryczny Ptolemeusza

Teoria Kopernika

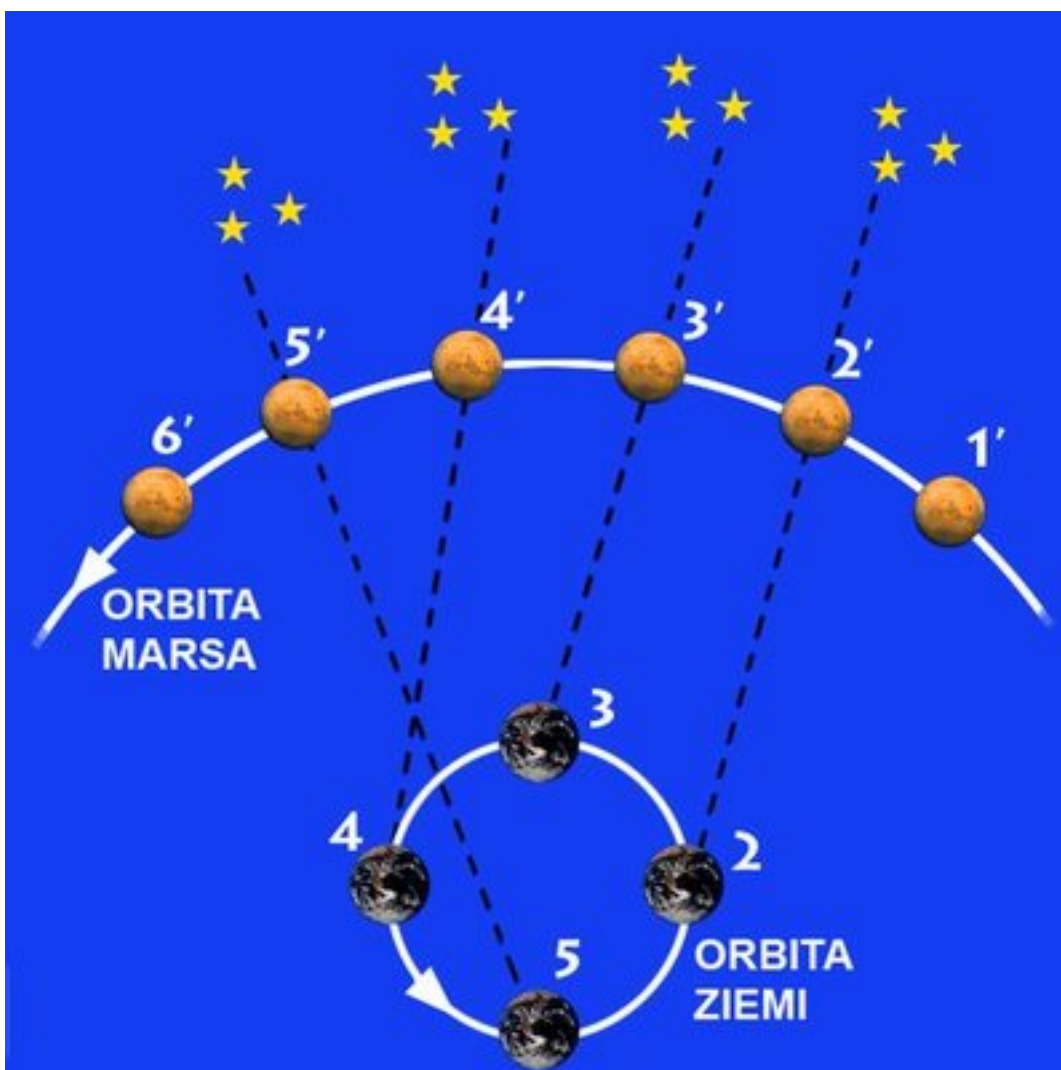


Rysunek 1.6: Mikołaj Kopernik (1473-1543)

Polski astronom *Mikołaj Kopernik* znalazł znacznie prostsze wyjaśnienie wzajemnych ruchów ciał niebieskich. Przyjął, że to Słońce znajduje się w centrum, a Ziemia wraz z innymi planetami krąży wokół niego. Ziemia wiruje też wokół własnej osi, co tłumaczy dobowy ruch ciał na niebie. Swoje odkrycie Kopernik opisał w opublikowanym w 1543 roku dziele pt. *De revolutionibus orbium coelestium* (*O obrotach ciał niebieskich*).



Rysunek 1.7: Układ heliocentryczny Kopernika - rysunek z jego książki pt. „De revolutionibus orbium coelestium”



Kolejne położenia planety oznaczono cyframi 1', 2' ... 6', zaś cyframi 2, 3, 4, i 5 – odpowiednie położenia Ziemi
[zobacz animację - Widok Marsa ze Słońca.](#)

Rysunek 1.8: Ruch planety i Ziemi w Układzie Słonecznym

Kopernik postulując, że to nie Ziemia stanowi centrum Wszechświata, lecz jest tylko jedną z planet, dokonał prawdziwego przewrotu w ówczesnym światopoglądzie. Jego model, zwany heliocentrycznym, zakładał, że Słońce stanowi środek Wszechświata. Obecnie wiemy, że Słońce jest w środku Układu planetarnego; ale wiemy również, że jest ono tylko jedną z wielu miliardów gwiazd, leżącą na peryferiach naszej Galaktyki, a oprócz niej istnieją miliardy innych galaktyk.

⚠ **Ważne:** *Galaktyka* – układ dziesiątek lub setek miliardów gwiazd.



Rysunek 1.9: Astrolabium - przyrząd do pomiarów astronomicznych (XV w, Uniwersytet Jagielloński)

Dzielo Kopernika wywarło wielki wpływ na rozwój nauki. Pozwoliło **Keplerowi** odkryć prawa ruchu planet, **Galileuszowi** – zasadę względności oraz **Newtonowi** – prawa dynamiki i grawitacji. Newton – ojciec nowoczesnej fizyki – opisując podłoże swoich odkryć, stwierdził, że „opierał się na dwóch olbrzymach: na Koperniku i Galileuszu”.

Kopernik, a za nim inni fizycy i astronomowie doprowadzili do zmiany przekonania o tym, że Słońce, planety i gwiazdy obracają się wokół Ziemi, jednak dowody świadczące o ruchu wirowym i obiegowym Ziemi pojawiły się dopiero pod koniec XVII i w XVIII wieku. Najbardziej przekonującego dowodu ruchu wirowego Ziemi dostarczył **Foucault** [wym. fuko] – stosunkowo niedawno – w połowie XIX w. Demonstrowane przez niego wahadło (zwane dzisiaj wahadłem Foucaulta) przyniosło mu wielką sławę. Zasadę działania tego wahadła poznasz, wykonując doświadczenie „Foucault”.

Doświadczenie „Foucault”

W środku denka przezroczystego kubka plastikowego nakłuwamy otworek, przez który przewlekamy nitkę. Na końcu nitki przyczepiamy kulkę lub jakiś ciężarek. Odwracamy kubek do góry dnem. Na zewnętrznym końcu nitki wykonujemy pętelkę, która zapobiegnie spadaniu nitki obciążonej kulką. Kulka na tak umocowanej nitce będzie wahadłem. Kubek umieszczamy na obrotowej podstawie, jak na [Rysunek 1.10: Orientacja płaszczyzny wahań nie zależy od ruchu obrotowego układu](#) na stronie 11. Nadajemy kulce ruch wahadłowy przez delikatne wahadłowe

przesuwanie kubka w poziomie wzdłuż ustalonego kierunku, nie nadając bocznych odchyień, aby kulka wahała się w jednej płaszczyźnie – płaszczyznę tę nazywamy płaszczyzną wahań.

[zobacz animację!](#)

Rysunek 1.10: Orientacja płaszczyzny wahań nie zależy od ruchu obrotowego układu

Stawiamy delikatnie kubek z wahającą się kulką na płycie obrotowej. Kulka waha się w ustalonej płaszczyźnie. Jeżeli teraz obrócimy płytę, to kierunek płaszczyzny wahań nie zmieni się, mimo że cały układ się obraca.

Nie dziwi nas, że płaszczyzna wahań jest ciągle w stałym położeniu w przestrzeni, gdyż nie ma żadnych bocznych poziomych sił, które działałyby na kulkę. Nie ma więc powodu, aby kulka miała wyjść z ustalonej uprzednio płaszczyzny wahań.

Wskazówka: Wahadło Foucaulta można zobaczyć w Centrum Nauki Kopernik w Warszawie: [zobacz film!](#) Jest to fascynujące doświadczenie, ponieważ można ujrzeć na własne oczy, że Ziemia się obraca.

To zjawisko obserwowane z zewnątrz układu wydaje się zupełnie zrozumiałe. Jednakże dla obserwatora obracającego się wraz z płytą płaszczyzna wahań zmienia swój kierunek, podobnie jak pasażer jadącego samochodu widzi przydrożne drzewa uciekające do tyłu.

Wyobraźmy sobie, że rolę płyty obrotowej gra kula ziemiska. Jeżeli na długim drucie zawiesimy ciężką kulę, otrzymamy wahadło, które może wykonywać drgania przez dłuższy czas. To właśnie jest wahadło Foucaulta. Jeżeli takie wielkie wahadło wprawimy w ruch, to możemy się przekonać, że kierunek płaszczyzny wahań będzie ciągle się zmieniał.

Współczesne badania Kosmosu

Obecnie dysponujemy niewspółmiernie większymi możliwościami obserwacyjnymi i podstawami teoretycznymi związanymi z rozwojem fizyki, niż kiedykolwiek w historii. To, co osiągnęliśmy w ostatnich czasach, w wieku XX i na początku XXI, przeważa swoim bogactwem odkryć całą dotychczasową historię astronomii.



a) Statek orbitalny sondy Cassini (fot. NASA), b) Teleskop Hubble na orbicie okołozemskiej (NASA), c) Anteny radarowe - radioteleskopy w miejscowości Piwnice pod Toruniem, d) Teleskop słoneczny, Arizona, USA (NASA)

Rysunek 1.11: Współczesne urządzenia do obserwacji Kosmosu

Do współczesnych **technik obserwacyjnych** zaliczamy:

1. Badania za pomocą teleskopów i spektrometrów,
2. Badania za pomocą sond kosmicznych i satelitów badawczych,
3. Bezpośrednia eksploracja ciał kosmicznych przez człowieka – lądowanie na Księżycu.

Współczesne **badawcze narzędzia teoretyczne** to:

1. Teoria grawitacji Newtona,
2. Termodynamika,
3. Teorie Einsteina: teoria względności, teoria grawitacji,
4. Teoria budowy atomu i chemia teoretyczna, fizyka jądrowa, fizyka cząstek elementarnych i fizyka kwantowa.

- ⚠ **Ważne:** *Spektrometr* – to przyrząd pozwalający określić skład chemiczny ciała na podstawie analizy wysyłanego przez nie promieniowania.
- ⚠ **Ważne:** *Grawitacja*, inaczej ciężenie – to zjawisko polegające na tym, że każde dwa ciała przyciągają się. Przejawem działania siły grawitacji jest to, że podrzucony do góry przedmiot (np. piłka) spada na ziemię. Innym przejawem grawitacji jest ruch planet wokół Słońca.
- ⚠ **Ważne:** *Termodynamika* – to dział fizyki zajmujący się badaniem energetycznych efektów zjawisk fizycznych. Przemiany cieplne, takie jak parowanie, topnienie, to przykładowe zjawiska opisywane przez termodynamikę.
- ⚠ **Ważne:** *Fizyka kwantowa* – jest to dział fizyki opisujący świat w najmniejszej skali (mikroświat), czyli atomy, jądra atomowe itp.

Niektóre z obecnych technik badawczych zostały wprowadzone już wcześniej. Dotyczy to teleskopów, teorii grawitacji i termodynamiki. Pierwszym badaczem, który zastosował teleskop do badań ciał pozaziemskich, był Galileusz i od razu odniósł sukces w postaci odkrycia kilku księżyców krążących wokół Jowisza (*Rysunek 1.12: Io, zdjęcie z sondy Galileo w naturalnych kolorach* na stronie 13). Odkrycie to było poważnym poparciem teorii Kopernika. Połączenie teleskopów ze spektrometrami przyniosło informacje o budowie Słońca i gwiazd.



Io, jeden z galileuszowych księżyców Jowisza, sfotografowany przez sondę kosmiczną Galileo wystrzeloną w 1989 r. [więcej>>](#)

Rysunek 1.12: Io, zdjęcie z sondy Galileo w naturalnych kolorach

Wskazówka: Więcej niezwykłych zdjęć znajdziesz [tutaj!](#)

Ludzie przez wiele wieków obserwowali Wszechświat, odbierając wyłącznie docierające do Ziemi światło widzialne. Wszechświat wydawał się statyczny, niezmienny w czasie. Prawdziwą rewolucję stanowiło wprowadzenie obserwacji w innych zakresach fal elektromagnetycznych: od fal radiowych przez promieniowanie podczerwone, nadfioletowe, rentgenowskie do promieniowania gamma. Wyniesienie urządzeń badawczych na orbitę, poza atmosferę ziemską ([Rysunek 1.11: Współczesne urządzenia do obserwacji Kosmosu](#) na stronie 12b), pozwoliło otrzymać niezwykle ostre i szczegółowe fotografie dalekich obiektów astronomicznych. Przykładem mogą być przepiękne fotografie wykonane przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a umieszczone na orbicie okołoziemskiej w 1990 r.

Przy pomocy nowych technik obserwacyjnych odkryto m.in. olbrzymie strumienie wysokoenergetycznych cząstek wyrzucane z jąder galaktyk, kwazary o jasności większej niż jasność całej naszej Galaktyki, zaczęto badać wybuchy gwiazd supernowych, poszukiwać planet krążących wokół odległych gwiazd. Okazało się, że Wszechświat jest bardzo interesujący, dynamiczny i podlega nieustannym zmianom.

Ważne: *Kwazar* (z ang. quasar – quasi-stellar radio source) to obiekt przypominający gwiazdę, będący źródłem zwartego, niezwykle silnego promieniowania. W rzeczywistości jest to rodzaj galaktyki. Kwazary znajdują się na krańcach obserwowanego Wszechświata, miliardy lat świetlnych od nas.



Ważne: *Rok świetlny* – jednostka odległości używana w astronomii – jest równy odległości, jaką pokonuje światło w próżni w ciągu jednego roku kalendarzowego, w przeliczeniu jest to około 9,5 biliona km. Słońce znajduje się w odległości 150 mln km. Światło pokonując tę odległość w czasie ok. 8 minut i 20 sekund. Oznacza to, że Słońce znajduje się w odległości ok. 8,3 minuty świetlnej od nas.



Jedno z najstunningiejszych zdjęć teleskopu Hubble'a [więcej>>](#)

Rysunek 1.13: Mgławica Orzeł

Pytania i problemy

1. Latarnia morska w Świnoujściu (najwyższa latarnia morska w Polsce) ma wysokość 64 m. Czy mierząc długość jej cienia mógłbyś wyznaczyć promień Ziemi? Jakie dane liczbowe trzeba znać? Kiedy należałoby zmierzyć długość cienia – czy ważna jest a) pora dnia? b) który to dzień i pora roku?
2. Posługując się schematycznym rysunkiem wyjaśnij, dlaczego możemy dostrzec gołym okiem, że planety przemieszczają się na niebie na tle gwiazd. Dlaczego nie możemy dostrzec przemieszczania się gwiazd względem siebie?
3. Wyjaśnij krótko, jak za pomocą wahadła Foucault można unaocznić ruch wirowy Ziemi?
4. Co w czasach Erastotenesa świadczyło o kulistości Ziemi – dlaczego nie mógł założyć, że Ziemia jest płaska?
5. Podaj, jakie współczesne techniki obserwacyjne stosuje się w astrofizyce i co możemy za ich pomocą zaobserwować.

1.2 Obserwacje naziemne obiektów astronomicznych

Obserwacje nocnego nieba


Co zwraca uwagę przy obserwacji nocnego nieba? Przede wszystkim duża ilość migoczących punktów świetlnych. To gwiazdy. Znajdują się one bardzo daleko od nas i dlatego ich obraz jest prawie punktowy. Drobne zmiany gęstości atmosfery, tzw. fluktuacje, powodują, że raz je widzimy lepiej, raz gorzej. Postrzegamy to jako migotanie gwiazd.

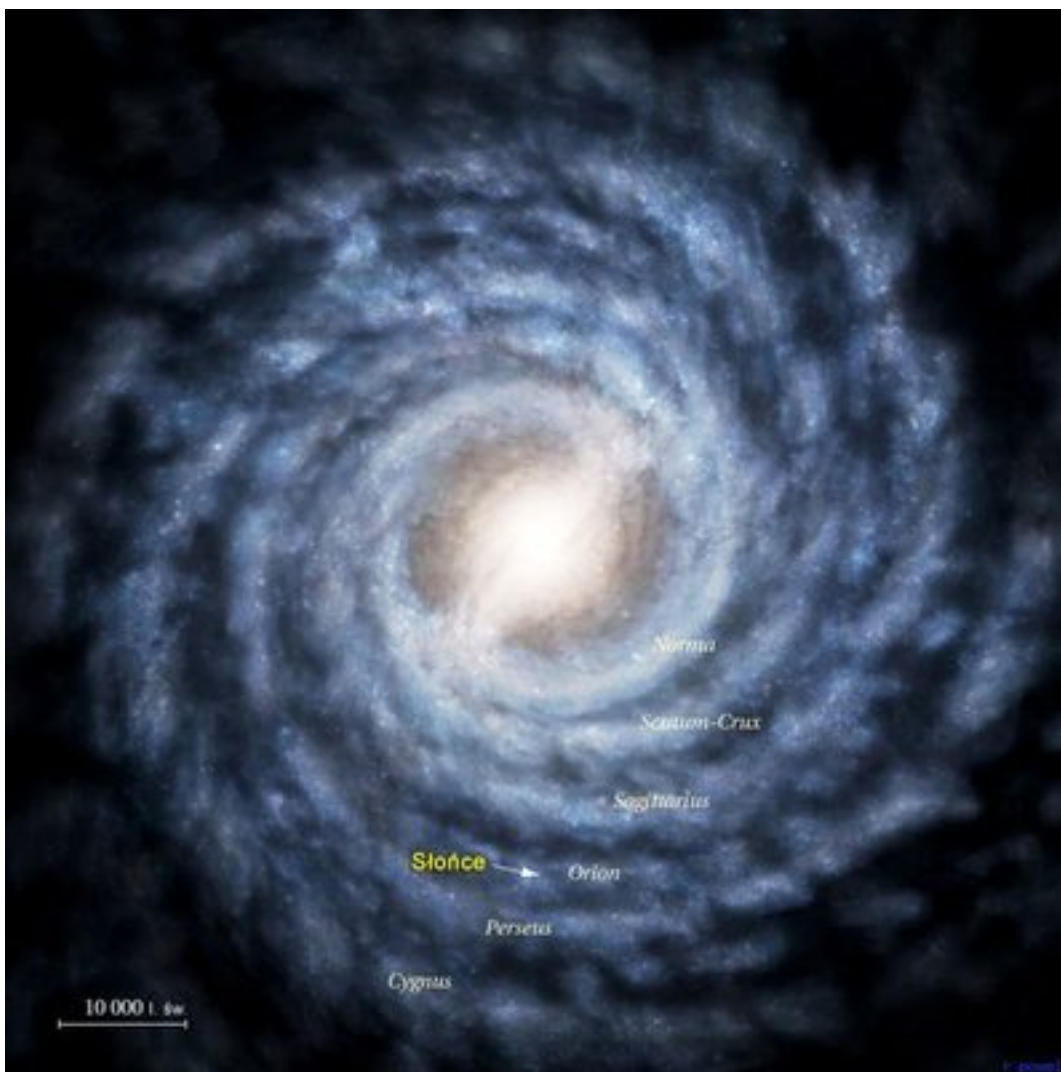
Planety, podobnie jak nasz naturalny satelita – Księżyc, świecą światłem odbitym, pochodzącym od Słońca. Światło to ma dużo większe natężenie, zatem fluktuacje atmosfery nie są w stanie go zakłócić w stopniu, w jakim zakłócają światło gwiazd. To dlatego światło pochodzące od planet prawie nie migocze. Spostrzeżenie to pozwala wskazać nawet bardzo początkującym miłośnikom wieczornych obserwacji nieba z dużym prawdopodobieństwem, który z obserwowanych obiektów jest planetą.

[zobacz animację!](#)

Rysunek 1.14: Nocne niebo z „drogą mleczną”

Z półkuli północnej można dostrzec gołym okiem około 3 000 gwiazd, a przez największe teleskopy – około sto miliardów! Łatwo jest zauważyć, że najwięcej widocznych gwiazd grupuje się w szerokim, nieregularnym pasie przecinającym niebo. To zgrupowanie gwiazd nazwano *Drogą Mleczną*. Słońce jest jedną z gwiazd należących do Drogi Mlecznej, czyli do naszej Galaktyki (patrz rozdział [1.10 Galaktyki](#) na stronie 90).

 **Wskazówka:** Więcej informacji o naszej Galaktyce znajdziesz [tutaj!](#)



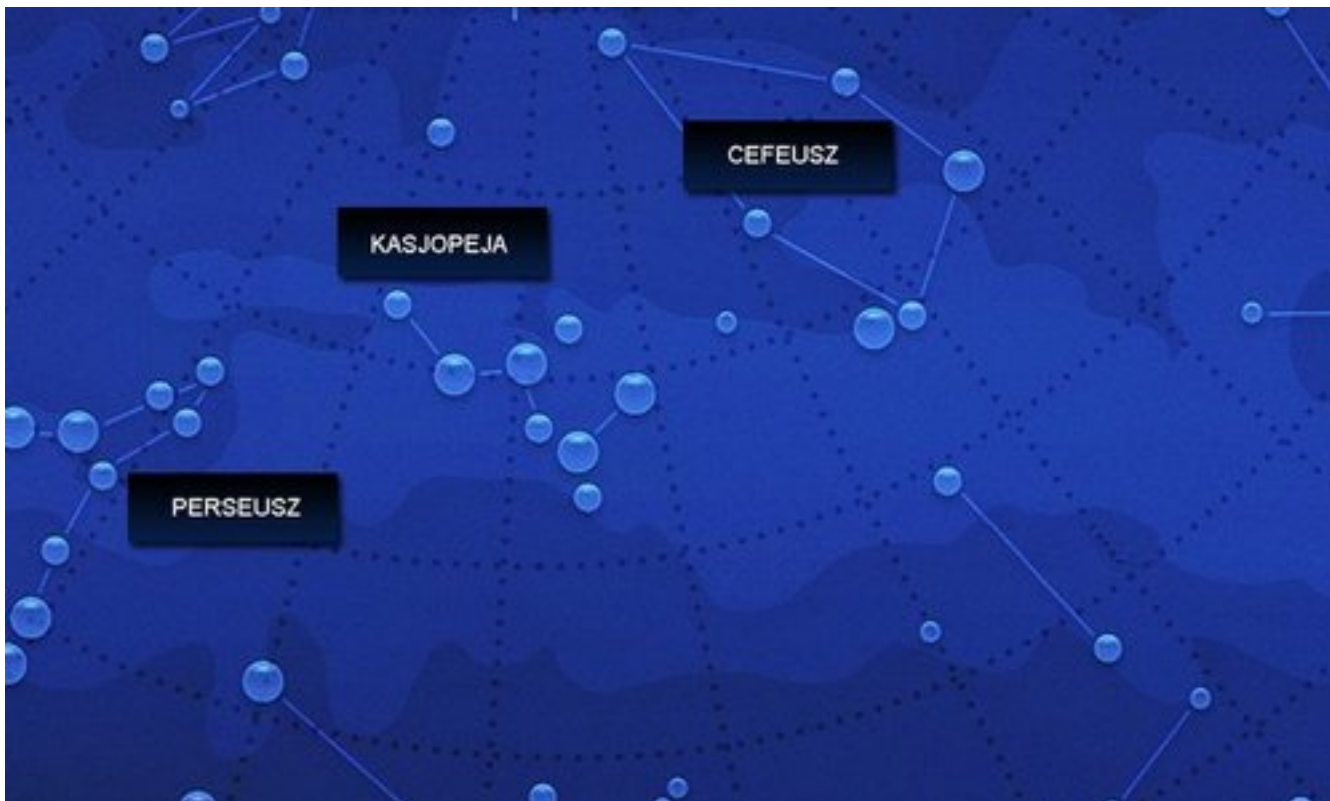
Dysk widziany od środka przedstawia się nam jako jasna smuga. <http://wszechswiat.astrowww.pl/milkyway.html>

Rysunek 1.15: Galaktyka ma kształt dysku, a Słońce znajduje się na jego peryferiach (strzałka)

Konstelacje gwiazd

Grupy gwiazd (tzw. konstelacje lub *gwiazdozbiory*), tworzące określone wzory na niebie, ułatwiają orientowanie się w geografii nieba. Ich nazwy pochodzą od wyobrażeń naszych przodków, którzy utożsamiali je z postaciami z

mitologii, symbolami zwierząt i przedmiotów. Dzisiejsza astronomia posługuje się konstelacjami gwiazd w zupełnie innym znaczeniu – oznaczają one ściśle ograniczone fragmenty nieba, w których znajduje się określona grupa gwiazd. Nazwy pozostały tradycyjne. Należy wyraźnie stwierdzić, że gwiazdy tworzące określony wzór na niebie nie są w żaden sposób ze sobą powiązane. Znajdują się one w różnych odległościach, ale ich rzut na sferę niebieską tworzy określony wzór. Na *Rysunek 1.16: Konstelacja Kasjopei* na stronie 16 przedstawiono gwiazdozbiór o nazwie Kasjopea. Jest on bardzo charakterystyczny, ponieważ przypomina dużą literę W (lub M – w zależności od pory roku i doby).



Gwiazdy tworzące określony wzór na niebie nie są ze sobą powiązane, znajdują się w różnych od nas odległościach - [zobacz animację!](#)

Rysunek 1.16: Konstelacja Kasjopei

Musimy mieć świadomość, że zdecydowana większość widocznych gołym okiem obiektów astronomicznych należy do naszej Galaktyki, Drogi Mlecznej. W gwiazdozbiórze Andromedy (na niebie odnajdziesz go w pobliżu gwiazdozbioru Kasjopei) znajduje się jedna z najbliższych nam galaktyk – M31. Oznaczenie M31 pochodzi z *Katalogu Messiera*.

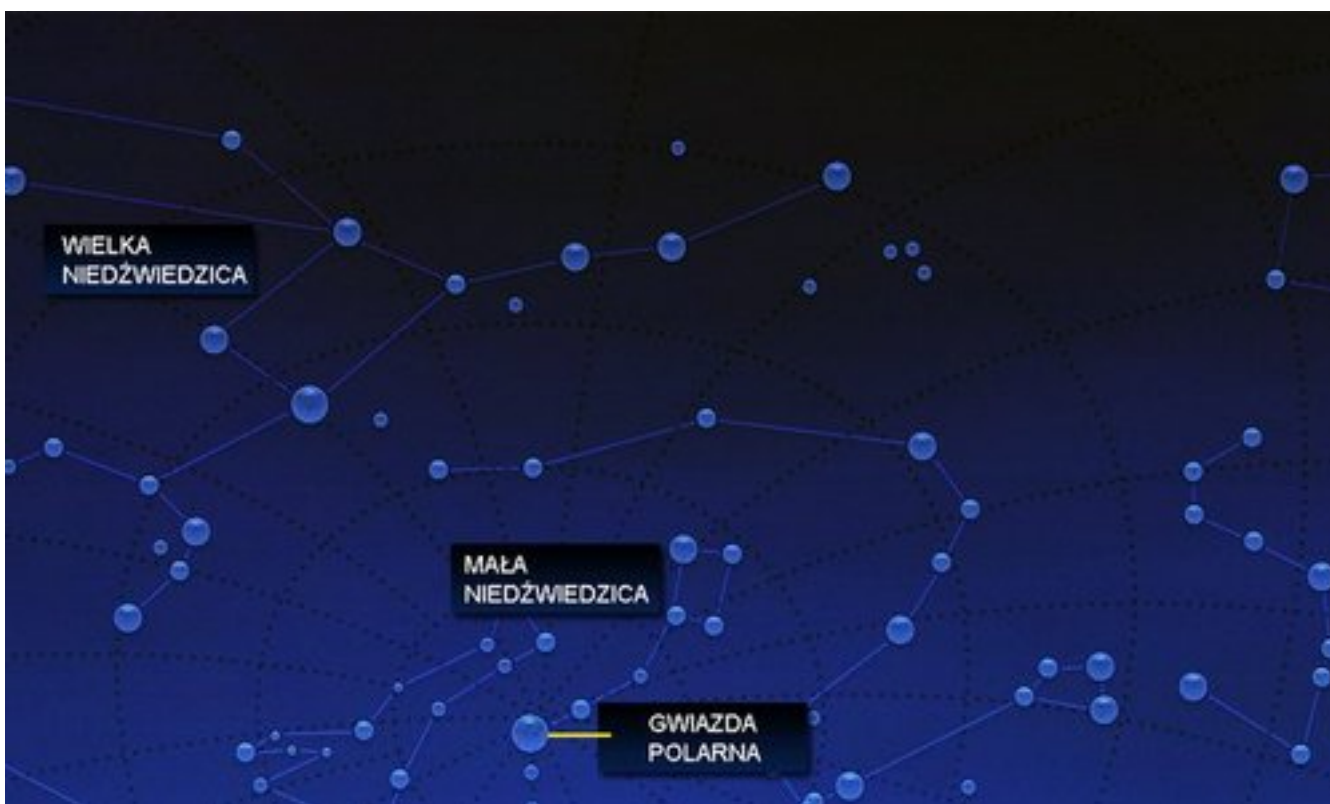
⚠ **Ważne:** *Katalog Messiera* obiektów mgławicowych – pierwszy katalog obiektów astronomicznych (zawierający gromady gwiazd, mgławice i galaktyki) opublikowany przez zapalonego poszukiwacza komet Charlesa Messiera w 1781 roku.

Galaktyka M31 jest odległa od nas o 2,25 miliona lat świetlnych. Jest ona bardzo podobna do naszej Galaktyki – Drogi Mlecznej – i jest jedyną galaktyką widoczną gołym okiem na północnej półkuli nieba. Obserwator na południowej półkuli może dostrzec dwa inne obiekty znajdujące się poza obrębem naszej Galaktyki. Są to Mały i Wielki Obłok Magellana – galaktyki satelitarne Drogi Mlecznej.



Rysunek 1.17: Wielka Niedźwiedzica - jej fragmentem jest Wielki Wóz

Jednym z najbardziej charakterystycznych gwiazdozbiorów (a przez to najbardziej znanych i najłatwiejszych do odnalezienia) jest Wielka Niedźwiedzica (*Rysunek 1.17: Wielka Niedźwiedzica – jej fragmentem jest Wielki Wóz* na stronie 17). Jego częścią jest tzw. Wielki Wóz. Odszukanie Wielkiego Wozu na niebie jest stosunkowo łatwe, znajduje się on po przeciwnej stronie nieba w stosunku do Kasjopei. Na przedłużeniu linii łączącej dwie ostatnie gwiazdy Wielkiego Wozu znajduje się Gwiazda Polarna wskazująca biegun północny (*Rysunek 1.18: Wielki Wóz i Gwiazda Polarna* na stronie 18). Gwiazda Polarna tworzy początek „dyszla” Małego Wozu.



Rysunek 1.18: Wielki Wóz i Gwiazda Polarna

Meteory i meteoryty

Na ogół nie zdajemy sobie sprawy z tego, że codziennie Ziemia bombardowana jest *meteoroidami* – ciałami w postaci kamieni lub odłamków metali o różnych rozmiarach, od kilku mikrometrów do kilku metrów, pochodzącymi z Kosmosu. Czasami, obserwując niebo, możesz je zauważyć jako tzw. *meteory*, potocznie nazywane „spadającymi gwiazdami”. Codziennie spada na Ziemię średnio ok. 400 ton pyłu kosmicznego. Pozostałości po meteorach, które dotrą do powierzchni Ziemi, nazywamy *meteorytami* (Rysunek 1.19: *Meteoryty* na stronie 19). Większość z nich nie wyrządza szkód, gdyż lecąc z olbrzymią prędkością rozpala się w atmosferze i wyparowuje. Jednak duże, zdarzające się bardzo rzadko, mogą spowodować znaczne spustoszenie. Na powierzchni Ziemi można znaleźć wiele kraterów, podobnych do tych, które są widoczne na Księżycu, utworzonych przez duże meteoryty (Rysunek 1.20: *Krater meteorytowy w stanie Arizona USA. Średnica 1280 m, głębokość 183 m* na stronie 20). Prawdopodobnie uderzenie dużego meteorytu spowodowało w przeszłości wyginięcie wielu gatunków zwierząt, w tym dinozaurów.



Rysunek 1.19: Meteoryty



Rysunek 1.20: Krater meteorytowy w stanie Arizona USA. Średnica 1280 m, głębokość 183 m

- ⚠ **Ważne:** *Meteoroid* – okruch skalny o rozmiarach od 0,1 mm do kilku metrów poruszający się po orbicie wokół Słońca.
- ⚠ **Ważne:** *Meteor* (zwany potocznie „spadającą gwiazdą”) – świecący ślad, jaki pozostawia spalający się w atmosferze ziemskiej meteoroid.
- ⚠ **Ważne:** *Meteoryt* – pozostałość meteoroidu, która spadła na Ziemię.

W dniu 15.02.2013 r. nad Czelabińskiem w Rosji pojawił się ogromny meteor (zwany bolidem), który podczas przejścia przez atmosferę rozgrzał się i gwałtownie eksplodował. Powstała przy tym fala uderzeniowa uszkodziła tysiące budynków, a ponad 1000 ludzi zostało rannych.



Rysunek 1.21: Meteor nad Czelabińskiem w Rosji w dniu 15 lutego 2013 roku

⚠ **Ważne:** *Planetoidy* – to niewielkie ciała, o rozmiarach od kilku metrów do około 1 000 km, okrążające Słońce, podobnie jak planety. Często mają nieregularne kształty, noszące ślady zderzeń.

Skąd biorą się meteoroidy? Uważa się, że pochodzą głównie z trzech źródeł. Są to:

1. pozostałości pierwotnego obłoku materii, z którego tworzył się Układ Słoneczny, które nie weszły w skład planet,
2. rozpraszany w pobliżu Słońca materiał komet,
3. pozostałości po rozpadzie planetoid przy wzajemnych zderzeniach.

Grawitacja powoduje spadanie meteoroidów na Ziemię. Można powiedzieć, że Ziemia jest jak gdyby wielkim odkurzaczem pyłu kosmicznego, podobnie jak inne planety i ich księżyce.

Komety

Kometa to ciało niebieskie o mglistych zarysach, czasem obdarzone wydłużoną poświatą w postaci warkocza (*Rysunek 1.22: Kometa (zdjęcie z Teleskopu Hubble'a, NASA/ESA)* na stronie 22). Komety nie są zbyt częstymi gośćmi na naszym niebie, zwłaszcza te widzialne gołym okiem. Jeżeli już się zjawia, należą do najbardziej spektakularnych zjawisk, jakie możemy dostrzec. Pojawiają się na krótko i przemieszczają stosunkowo szybko na tle gwiazd. W dawnych czasach to niecodzienne zjawisko wywoływało zabobonny strach, było traktowane jak zapowiedź niezwykłych wydarzeń. Już jednak starożytni uczeni tłumaczyli to zjawisko jako całkowicie naturalne.



Rysunek 1.22: Kometa (zdjęcie z Teleskopu Hubble'a, NASA/ESA)

Dzisiaj wiemy, że *kometa* to obiekt będący skupiskiem pyłu oraz drobnych bryłek lodu. Zwykle składa się z *głowy* zawierającej niewielkie *jądro* (o średnicy do ok. 20 km), w którym zawarta jest prawie cała jej masa, oraz z *warkocza*, który powstaje na skutek działania ciśnienia światła słonecznego na pył i gaz. Warkocz gazowy komety, który jest bardzo podatny na działanie wiatru słonecznego, jest zwrócony zawsze w stronę przeciwną do Słońca. W pobliżu Słońca wiele cząstek komety ulega wyrzuceniu w przestrzeń kosmiczną, dlatego komety okresowe przy każdym pojawieniu się na niebie świecą coraz to słabszym światłem.

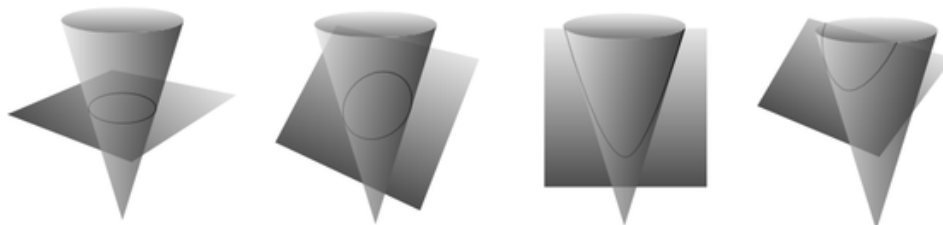
Gęstość komety jest bardzo mała, ale jej rozmiary (zwłaszcza warkoczy) bywają ogromne – są takie, które przewyższają swoimi rozmiarami kilkakrotnie średnicę Ziemi, a nawet bywają większe niż Słońce. Pochodzenie komet nie jest jasne.



Wskazówka:

Orbity komet

Newton pod koniec XVII wieku stwierdził, że komety poruszają się po torach krzywoliniowych, tzw. stożkowych, mających Słońce w swoim ognisku. Krzywe te można utworzyć przecinając stożek płaszczyzną, otrzymując: koło, elipsę, hiperbolę lub parabolę (*Rysunek 1.23: Ruch ciał niebieskich w pobliżu Słońca odbywa się po torach będących krzywymi stożkowymi* na stronie 23). Planety poruszają się po torach eliptycznych (patrz prawa *Keplera*, rozdział *1.8 Układ Słoneczny* na stronie 69), czyli też wzdłuż krzywych stożkowych. Ten ciekawy fakt wynika w sposób naturalny z teorii grawitacji.



Krzywe te można utworzyć przecinając stożek płaszczyzną: a) prostopadłą do osi stożka – koło, b) ustawioną pod kątem ostrym do osi stożka – elipsa, c) równoległą do osi stożka – hiperbola, d) równoległą do tworzącej stożka – parabola

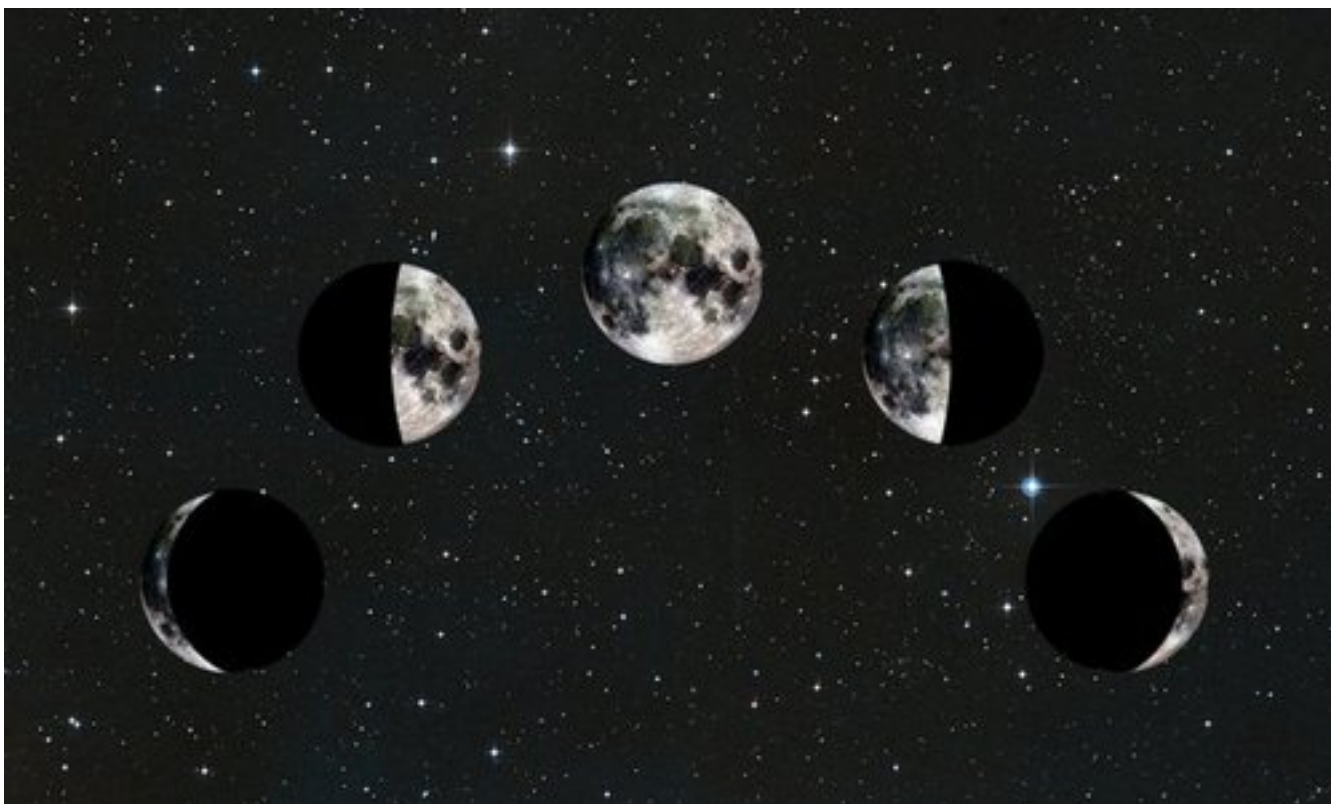
Rysunek 1.23: Ruch ciał niebieskich w pobliżu Słońca odbywa się po torach będących krzywymi stożkowymi

Fazy Księżyca

Film omawia ruch księżyca po orbicie wokół Ziemi. Pokazuje fazy księżyca, będące rezultatem oglądania oświetlonej połowy satelity pod różnymi kątami, spowodowanymi różnymi położeniami Słońca, Ziemi i Księżyca względem siebie.

Rysunek 1.24: Fazy Księżyca

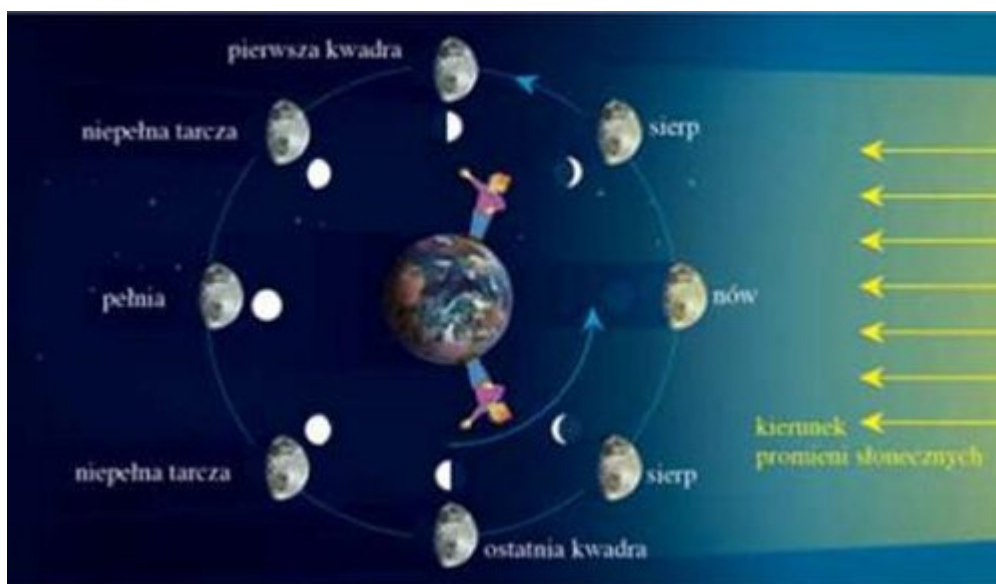
Księżyc zmienia swoje oblicze – raz występuje w postaci półkola, raz w postaci sierpa, a niekiedy w postaci pełnej tarczy. Są to tzw. *fazy Księżyca* zależne od jego ruchu orbitalnego wokół Ziemi. Kolejne fazy Księżyca przedstawione są na [Rysunek 1.25: Widok Księżyca w kolejnych fazach](#) na stronie 24.



Jeżeli widzisz Księżyc w postaci sierpa tak zwróconego, że przypomina literę D, to w następnych nocach Księżyc będzie dopełniał się, aż pokaże pełną tarczę, później będzie go ubywać. Jeżeli zobaczysz Księżyc w postaci sierpa, przypominającego literę C, to w następnych nocach Księżyc będzie się cofał

Rysunek 1.25: Widok Księżycy w kolejnych fazach

Fazy Księżycy wynikają z różnego kąta oświetlenia Księżycy przez Słońce – patrz [Rysunek 1.26: Słońce oświetla Księżyc – tylko jedną jego półkulę](#) na stronie 24.



Oczom „ludzika” znajdującego się na Ziemi przedstawia się widok faz Księżycy narysowanych na wewnętrznym okręgu

Rysunek 1.26: Słońce oświetla Księżyc - tylko jedną jego półkulę

Nie tylko Księżyc, ale i niektóre planety mają fazy, np. Wenus. Gdy skierujemy lornetkę na Wenus, możemy zauważyć niejednakowe oświetlenie tarczy w postaci sierpa.

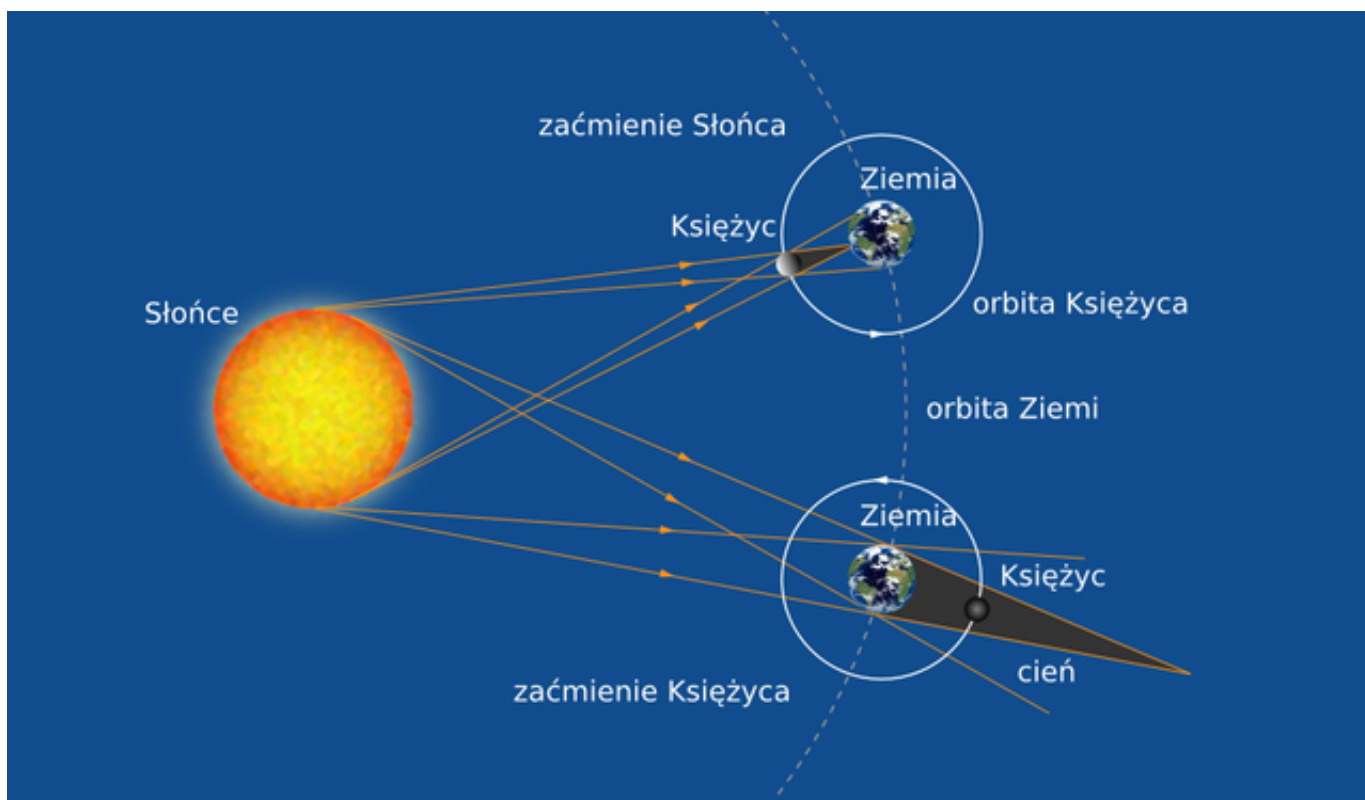


Rysunek 1.27: Sierp Wenus widoczny przez lornetkę

Zaćmienia Księżycy i Słońca

Zjawisko *zaćmienia Księżycy* występuje wtedy, gdy na drodze promieni słonecznych oświetlających Księżyc znajdzie się Ziemia. Wtedy cień Ziemi zasłoni Księżyc całkowicie lub częściowo na krótki czas (kilkudziesięciu minut). Rysunek [Rysunek 1.28: Zaćmienia](#) na stronie 26 pokazuje schematycznie sytuację, w której dochodzi do zaćmienia Księżycy.

Zjawisko *zaćmienia Słońca* ([Rysunek 1.28: Zaćmienia](#) na stronie 26) występuje wówczas, gdy Księżyc znajduje się w takim położeniu między Słońcem i Ziemią, że zasłania tarczę słoneczną. Zaćmienie będzie całkowite, gdy Księżyc zasłoni obserwatorowi całą tarczę Słońca lub częściowe, kiedy zasłoni fragment tarczy.



Zaćmienie Księżyca występuje wtedy, gdy Ziemia zasłania Księżyc, rzucając na niego cień. Zaćmienie Słońca natomiast występuje wtedy, gdy cień Księżyca pada na powierzchnię Ziemi

Rysunek 1.28: Zaćmienia

Zaćmienia Księżyca i Słońca

Rysunek 1.29: Animacja

Doświadczenie "Domowe laboratorium - obserwacja zaćmień"

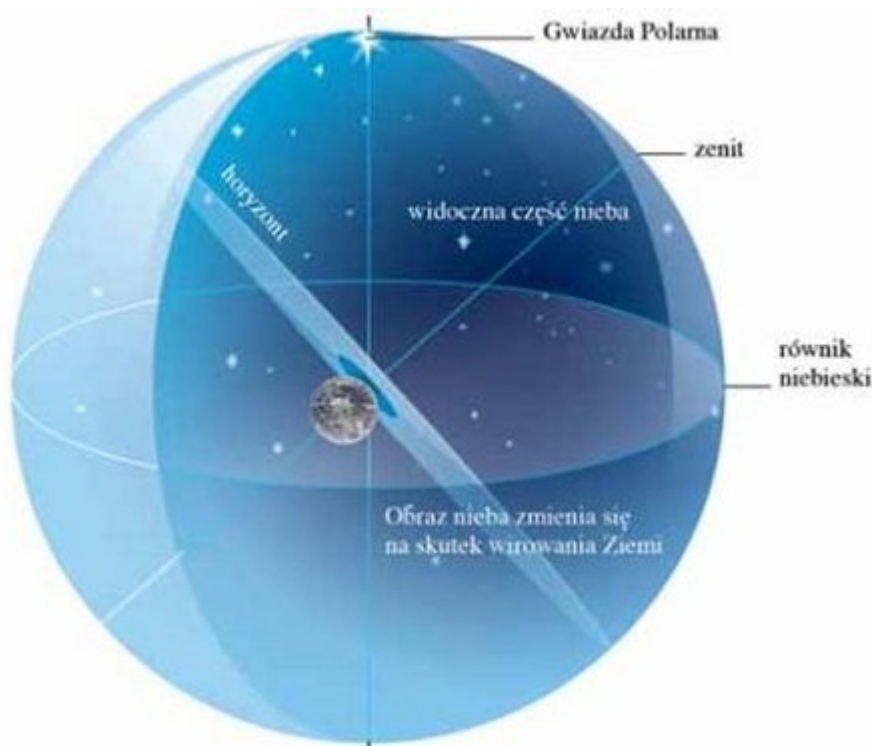
Potrzebna będzie lampka rzucająca snop światła w zaciemnionym pokoju i dwa przedmioty o kulistym kształcie, mniejszy i większy (np. mały globus, piłka, jabłko, pomarańcza itp.). Dwie kulki będą spełniać rolę Ziemi i Księżyca, a światło lampy będzie imitowało światło pochodzące od Słońca.

1. Ustaw „Ziemię” w snopie światła i obracaj ją wokół własnej osi. Zaznacz punkt na powierzchni przedmiotu – położenie, w jakim znajduje się „obserwator”. Zaobserwuj, jak zmienia się obszar dnia (oświetlona część kuli) i nocy (część kuli w cieniu).
2. Teraz zademonstrujemy powstawanie różnych faz Księżyca. Wokół „Ziemi” poruszaj po orbicie kołowej „Księżycem” (patrz [Rysunek 1.26: Słońce oświetla Księżyc – tylko jedną jego półkulę](#) na stronie 24). Jak ustawisz „Księżyc”, aby z „Ziemi” widoczna była pełnia, czyli oświetlona cała tarcza „Księżyca”? W jakim położeniu ustawić „Księżyc”, aby z „Ziemi” obserwowany był nów, czyli cała tarcza „Księżyca” w cieniu (Księżyc niewidoczny)? Zaobserwuj kolejne fazy „Księżyca”. Teraz spróbuj znaleźć odpowiedzi na pytania:
 - a. W jakiej porze doby (w dzień czy w nocy) możemy obserwować Księżyc w pełni?
 - b. Czasami Księżyc widoczny jest w dzień jako wąski sierp na niebie. Wyjaśnij to, odpowiednio ustawiając względem siebie „Księżyc” i „Ziemię”.
3. Zademonstruj zaćmienie Księżyca ([Rysunek 1.28: Zaćmienia](#) na stronie 26). „Księżyc” musi znaleźć się w cieniu „Ziemi”. W jakiej fazie Księżyca może się to wydarzyć?

4. Zademonstruj zaćmienie Słońca. Cień „Księżycy” musi padać na „Ziemię”. W jakiej fazie Księżycy może się to wydarzyć?

Współrzędne astronomiczne

Nasza planeta wiruje i my wraz z nią – znajdujemy się jak gdyby na karuzeli. Dlatego patrząc na niebo, widzimy, że wiruje ono wraz z gwiazdami. Łatwo zauważamy, że gwiazdy, podobnie jak Słońce, poruszają się ze wschodu na zachód. Widzimy tylko tę część nieba, która jest nad nami – nad *horyzontem*, gdyż pozostała część jest zasłonięta przez Ziemię. Linia graniczna horyzontu jest wyznaczona przez płaszczyznę styczną do powierzchni kuli ziemskiej w miejscu, w którym się aktualnie znajdujemy – patrz *Rysunek 1.30: Obserwowany z Ziemi ruch sfery niebieskiej jest spowodowany ruchem wirowym Ziemi* na stronie 27. W dzień, gdy jesteśmy zwrócenii w kierunku Słońca, nie widzimy gwiazd, gdyż światło słoneczne rozproszone w atmosferze tłumi słabe światło gwiazd. To dlatego gwiazdy są widoczne tylko w nocy.



W określonej chwili widoczna jest tylko część nieba znajdująca się nad widnokregiem

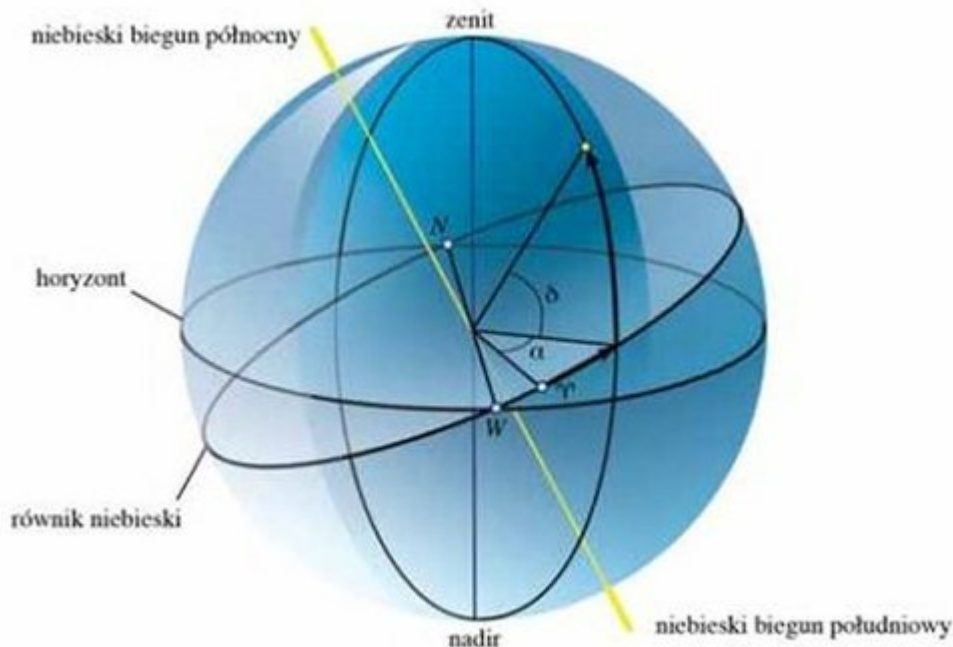
Rysunek 1.30: Obserwowany z Ziemi ruch sfery niebieskiej jest spowodowany ruchem wirowym Ziemi

Położenia punktów na niebie określamy tak, jak współrzędne punktów na Ziemi (lub na globusie). Przyjmujemy zatem, że *niebieski biegun północny* znajduje się nad biegunem północnym Ziemi i leży na linii będącej przedłużeniem osi obrotu Ziemi (w przybliżeniu kierunek ten wyznacza Gwiazda Polarna). Odpowiednikiem równika ziemskiego jest równik niebieski. Posługujemy się odpowiednikami pojęć szerokości i długości geograficznej, którymi są δ - *deklinacja* i α - *rektascensja* (*Rysunek 1.31: Niebieski biegun północny i południowy wyznaczają oś główną równikowego układu współrzędnych* na stronie 28). Taki układ współrzędnych nazywamy *układem równikowym*.

Na rysunkach *Rysunek 1.30: Obserwowany z Ziemi ruch sfery niebieskiej jest spowodowany ruchem wirowym Ziemi* na stronie 27 i *Rysunek 1.31: Niebieski biegun północny i południowy wyznaczają oś główną równikowego układu współrzędnych* na stronie 28 zaznaczono linię poprowadzoną od obserwatora do punktu leżącego nad jego głową na sferze niebieskiej, zwanego *zenitem*. Jest to oś główna tzw. *horyzontalnego układu współrzędnych*. Układ ten jest związany z położeniem obserwatora na Ziemi. Oś główna tego układu ma kierunek linii pionowej obserwatora. Na linii tej, po przeciwnej stronie zenitu, leży punkt, który nosi nazwę *nadir*. Istotnym elementem tego układu jest

płaszczyzna prostopadła do pionu obserwatora przechodząca przez sferę niebieską wzdłuż wielkiego koła zwanego *horyzontem*. Położenie horyzontu nieznacznie różni się od *widnokregu*, który zależy od wzniesienia obserwatora nad powierzchnią Ziemi.

Na sferze niebieskiej wyróżniamy *ekliptykę*. Jest to okrąg koła wielkiego, wzdłuż którego obserwuje się roczny ruch Słońca. Ruch ten jest skutkiem rocznego ruchu Ziemi dookoła Słońca. Płaszczyzna ekliptyki jest usytuowana pod kątem $23,5^\circ$ do płaszczyzny równikowej.



Współrzędne położenia gwiazdy (żółte kółko) dane są przez rektascensję – kąt α , odpowiednik długości geograficznej, oraz przez deklinację – kąt δ , odpowiednik szerokości geograficznej. Kąt α mierzymy od punktu Barana (punkt równonocy wiosennej) oznaczonego symbolem γ

Rysunek 1.31: Niebieski biegun północny i południowy wyznaczają oś główną równikowego układu współrzędnych

Znajomość układów współrzędnych astronomicznych pozwala na orientowanie się w położeniach różnych ciekawych obiektów na niebie i umożliwia posługiwanie się *obrotową mapą nieba*.

[XLSX PDF](#) Obrotowa mapa nieba

Pytania i problemy

1. Dlaczego Księżyc jest czasami widoczny w dzień, podczas gdy gwiazdy są zawsze niewidoczne za dnia?
2. Dlaczego obserwowane światła gwiazdy migoczą, a planet (np. Wenus czy Marsa) nie?
3. Podaj nazwę obiektu astronomicznego, do którego należy zdecydowana większość widocznych gołym okiem gwiazd.
4. Co to są konstelacje gwiazd lub tzw. gwiazdozbiory i skąd pochodzą ich nazwy? Czy gwiazdy tworzące określoną konstelację na niebie są ze sobą powiązane (czy są blisko siebie)?
5. Co to są tzw. „spadające gwiazdy”? Czy pozostawiają one jakieś ślady na powierzchni Ziemi, Księżyca czy innych planet?
6. Opisz wygląd komety, jej możliwe rozmiary i ruch. Skąd pochodzą komety?
7. Dlaczego Księżyc zmienia swoje oblicze? Wyjaśnij za pomocą rysunku dlaczego występują fazy Księżyca.

1.3 Ruch jednostajny po okręgu

Rysunek 1.32: Ruch jednostajny po okręgu

Większość planet, w tym Ziemia, porusza się wokół Słońca prawie jednostajnie po orbitach w przybliżeniu kołowych. Wokół Ziemi krąży Księżyc. Niektóre planety mają również naturalne satelity, które okrążają je po orbitach prawie kołowych.

Ruch po okręgu jest typowy dla wielu ciał kosmicznych. W życiu codziennym również spotykamy się z nim bardzo często.

Rozpatrzmy przypadek *ruchu jednostajnego po okręgu*. Mamy z nim do czynienia, kiedy ciało przebywa jednakowe odcinki drogi po okręgu w jednakowych odstępach czasu. Zapoznamy się z zasadniczymi wielkościami fizycznymi, za pomocą których opisujemy ruch punktu materialnego po okręgu. Jedną z nich jest prędkość v .

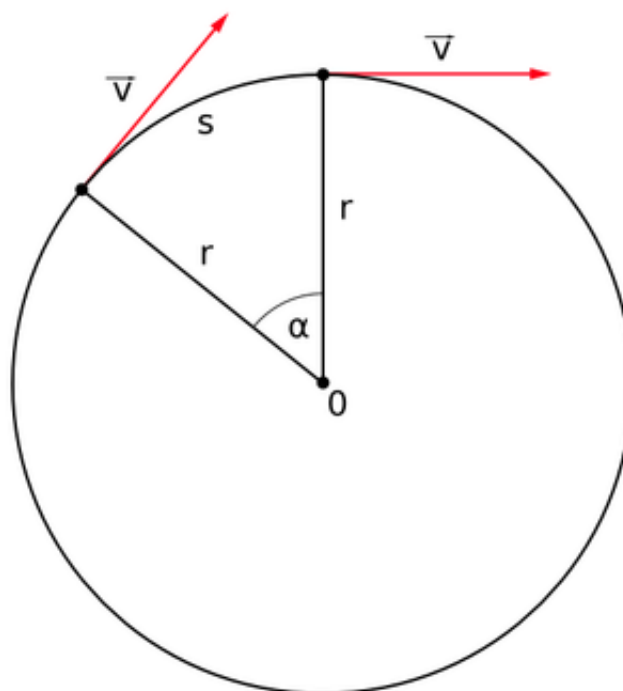
Prędkość v

Wartość prędkości w ruchu jednostajnym po okręgu jest stała. Jest ona określona jako stosunek s – łuku, jaki zakreśli poruszający się punkt, do t – czasu, w którym to nastąpi:

$$(\text{wzór 2}) \quad v = \frac{s}{t}$$

Aby określić prędkość nie wystarczy podać jej wartości, trzeba też określić jej kierunek. Wielkości, które mają określony kierunek nazywamy *wektorami*. Na rysunkach oznacza się je strzałką, która wyznacza kierunek. Długość strzałki jest proporcjonalna do wartości wektora. Prędkość jest wektorem i dlatego przedstawia się ją za pomocą strzałki.

Wskazówka: Kiedy wybieramy się w podróż, ważne jest nie tylko, jak szybko jedzie samochód, ale i w jakim kierunku!



Rysunek 1.33: Wektor prędkości ciała poruszającego się po okręgu jest styczny do okręgu

- Ⓡ **Zamapiętać:** W ruchu jednostajnym po okręgu stała jest tylko wartość prędkości, natomiast kierunek prędkości stale się zmienia.

Prędkość kątowna ω

Prędkość kątowną w ruchu jednostajnym po okręgu określamy jako stosunek kąta zakreślanego przez promień wodzący punktu r do czasu, w którym to następuje. Jeśli w czasie t promień wodzący zakreśli kąt α , to prędkość kątowna wynosi:

$$(\text{wzór 3}) \omega = \frac{\alpha}{t}$$

Jednostką prędkości kątownej jest stopień na sekundę.

Okres obiegu T

Okres jest to czas, w jakim punkt materialny wykona pełny obieg okręgu. Za pomocą okresu możemy wyrazić *prędkość liniową* oraz *prędkość kątowną* punktu materialnego poruszającego się po okręgu.

Prędkość liniową przedstawiamy jako stosunek $2\pi r$ – obwodu koła do T – okresu obiegu:

$$(\text{wzór 4}) v = \frac{2\pi r}{T}$$

Prędkość kątowną można przedstawić jako stosunek 2π – czyli miary kąta pełnego w radianach do T – okresu obiegu:

$$(\text{wzór 5}) \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Częstotliwość ν

Częstotliwość definiujemy jako liczbę obiegów, którą punkt materialny wykonuje w ciągu jednostki czasu. Jeżeli w czasie jednej sekundy punkt wykonuje np. 3 obroty, to jeden obrót trwa $1/3$ sekundy. Widzimy, że częstotliwość można wyrazić jako odwrotność okresu, czyli

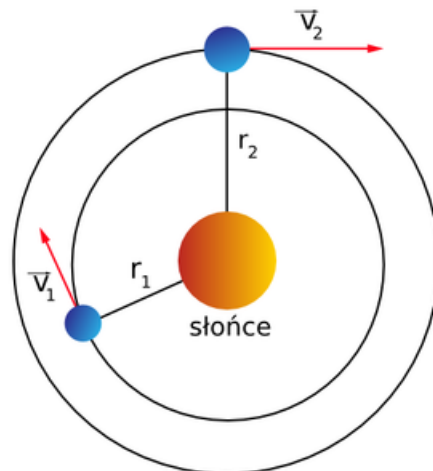
$$(\text{wzór 6}) \nu = \frac{1}{T}$$

Jednostką częstotliwości jest odwrotność sekundy (s^{-1}). Nosi ona nazwę — *herc*, $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$.

Przykład - Prędkość Ziemi na orbicie

Oblicz wartość prędkości Ziemi na jej orbicie wokół Słońca znając promień orbity $r = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m} \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ oraz czas jej obiegu dookoła Słońca $T = 365,25$ dni (jedna doba wynosi $23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s} = 86 \text{ } 164 \text{ s}$).

Rozwiązanie: Wzór (*wzór 4* na stronie 30) stosuje się do każdego ruchu jednostajnego po okręgu, więc możemy go zastosować także w stosunku do Ziemi okrążającej Słońce.



Rysunek 1.34: Ziemia okrąży Słońce w przybliżeniu ruchem jednostajnym po orbicie kołowej

T – okres orbitalnego ruchu Ziemi w przeliczeniu na sekundy wynosi:

$$\text{(wzór 7) } T = 365,25 \cdot 86\,400 \text{ s} = 31\,471\,401 \text{ s} \approx 3,147 \cdot 10^7 \text{ s}$$

Zatem prędkość Ziemi, zgodnie ze wzorem (*wzór 4* na stronie 30), jest równa:

$$v_Z = \frac{2\pi r}{T}, \text{ czyli } v_Z = \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^8}{3,147 \cdot 10^7} \right) \frac{\text{km}}{\text{s}} = 29,85 \frac{\text{km}}{\text{s}} \approx 30 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Widzimy, że jest to bardzo duża prędkość (wielokrotnie większa od prędkości najszybszych samolotów odrzutowych). Pomimo tego, że mknimy w przestworzach Kosmosu z tak olbrzymią prędkością, to praktycznie jej nie zauważamy – wydaje się nam, że pozostajemy w spoczynku.

Przykładami ruchu jednostajnego po okręgu, z którymi mamy do czynienia na co dzień mogą być: ruch wentyla na wirującym kole unieruchomionego roweru, ruch krzeselka na karuzeli, ruch dowolnego punktu na kuli ziemskiej.

Doświadczenie „Rotacja I”

Celem tego doświadczenia będzie zapoznanie się z podstawowymi wielkościami określającymi ruch jednostajny po okręgu. Będziemy obserwować ruch wentyla na kole roweru. Ustawmy rower na podpórce, w ten sposób, aby przednie koło mogło obracać się swobodnie (patrz *Rysunek 1.35: Ustawienie roweru* na stronie 32).



Rysunek 1.35: Ustawienie roweru

Część I: Okres, prędkość i częstotliwość w ruchu po okręgu

Mierzymy odległość wentyla od osi koła (patrz [Rysunek 1.36: Pomiar promienia \$r\$ okręgu, po którym porusza się wentyl](#) na stronie 32). Odległość ta to promień okręgu, po którym porusza się wentyl. Oznaczmy promień literą r .



Rysunek 1.36: Pomiar promienia r okręgu, po którym porusza się wentyl

Wynik pomiaru r – promienia okręgu, po którym porusza się wentyl, wpisujemy do tabelki pomiarów ([Rysunek 1.37: Tabela pomiarów 1](#) na stronie 33).

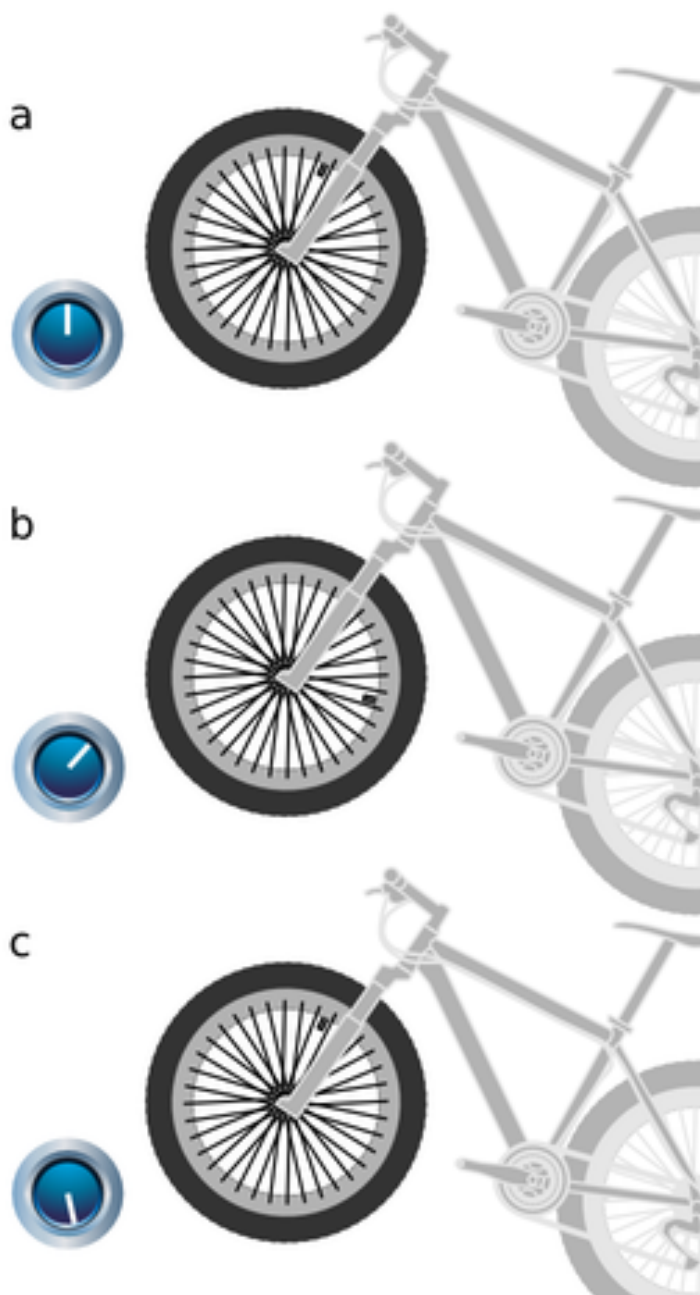
Lp.	Promień okręgu r (cm)	Okres — czas obiegu T (s)	Prędkość (liniowa) v (m/s)	Częstotliwość ν (1/s)	Prędkość kątowna ω (1/s)

Rysunek 1.37: Tabela pomiarów 1

Nadajemy kołu niezbyt szybkie obroty i mierzymy stoperem czas pełnego obiegu wentyla – włączamy stoper, gdy wentyl znajdzie się w określonym miejscu i wyłączamy, gdy wentyl znajdzie się ponownie w tym samym miejscu (na przykład włączamy stoper w momencie, gdy wentyl mija przednią krawędź widełek i wyłączamy gdy ponownie mija tę krawędź widełek – patrz [Rysunek 1.38: Pomiar czasu](#) na stronie 34a i [Rysunek 1.38: Pomiar czasu](#) na stronie 34c).

Czas pełnego obiegu wentyla nazywamy *okresem* i oznaczamy go literą T . Wynik pomiaru okresu T wpisujemy do tabelki pomiarów ([Rysunek 1.37: Tabela pomiarów 1](#) na stronie 33).

a) chwila początkowa, b) po czasie t , c) po czasie T –



okres

Rysunek 1.38: Pomiar czasu

Obliczamy *prędkość* v ruchu wentyla po okręgu według znanego wzoru:

$$(\text{wzór 8}) \quad v = \frac{s}{t}$$

gdzie s oznacza przebytą drogę wentyla (po okręgu); t – czas przebycia tej drogi.

Z naszych pomiarów wynika, że w czasie okresu T wentyl wykonał pełny obieg po okręgu, czyli przebył drogę $s = 2\pi r$. Dane z tabelki pomiarów podstawiamy do wzoru (*wzór 4* na stronie 30). Obliczamy *prędkość* v i wypełniamy następną rubrykę tabelki.

Obliczamy *częstotliwość* ν (liczbę obrotów w ciągu 1 s) według wzoru (*wzór 6* na stronie 30). Aby obliczyć *częstotliwość*, trzeba podzielić liczbę obrotów wykonanych w czasie t , przez ten czas.

Otrzymamy w ten sposób liczbę obrotów wykonaną w czasie 1 s. Ponieważ w czasie T wykonany był jeden obrót, dzielimy 1 przez T . Wynik wpisujemy do tabelki pomiarów (*Rysunek 1.37: Tabela pomiarów 1* na stronie 33).

i Wskazówka: Zauważmy, że w ten sam sposób możemy opisywać również i inne przypadki ruchów po okręgu. Na przykład, ruch Księżyca wokół Ziemi, którego okres obiegu po orbicie w przybliżeniu kołowej wynosi około $T = 27,3$ doby (jest to tzw. księżycowy miesiąc gwiazdowy).

Obliczamy *prędkość kątową* ω ruchu wentyla po okręgu według wzoru:

$$(\text{wzór 9}) \omega = \frac{\alpha}{t}$$

gdzie α oznacza kąt, jaki zakreślił promień (np. – szprycha) w czasie t .

Prędkość kątowa – jest to kąt zakreślany przez promień w jednostce czasu.

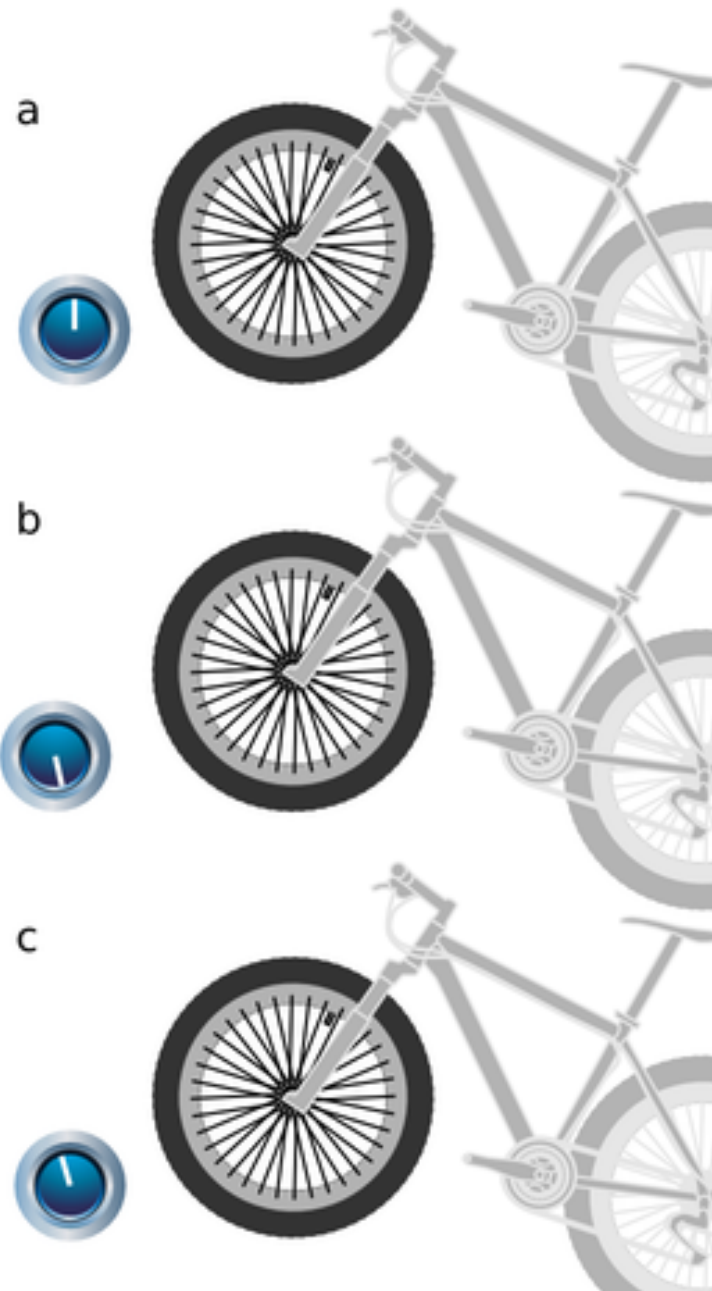
Z naszych pomiarów wynika, że w czasie T promień wykonał pełny obieg po okręgu, czyli zakreślił kąt pełny $\alpha = 2\pi$. Zatem możemy przyjąć wzór (*wzór 5* na stronie 30) do obliczenia ω – jego prędkości kątowej.

Dane z tabelki pomiarów podstawiamy do wzoru (*wzór 5* na stronie 30), obliczamy prędkość kątową ω i wypełniamy następną rubrykę tabelki.

Część 2: Jednostajność ruchu po okręgu, niepewności i błędy pomiarowe

Rozpędzamy koło i mierzymy stoperem kolejne trzy czasy pełnych obiegów wentyla (*Rysunek 1.39: Pomiar czasu* na stronie 36). W tym celu należy zastosować stoper z rejestrem tzw. międzyczasów. Jeżeli takim nie dysponujemy, poprośmy o pomoc dwie inne osoby, które zmierzą kolejne – drugi i trzeci – czasy pełnego obiegu.

Jeżeli koło rowerowe nie doznaje znacznych oporów ruchu, to zmierzone czasy będą się mało różnić między sobą. Pomiar każdego z nich daje T – wartość okresu.



a) chwila początkowa, b) po czasie T , c) po czasie $2T$

Rysunek 1.39: Pomiar czasu

Lp.	Promień okręgu r (cm)	Niepewność pomiarowa Δr (cm)	Okres — czas obiegu T			Okres średni T (s)	Niepewność pomiarowa ΔT (s)	Prędkość (liniowa) v (m/s)	Niepewność pomiarowa Δv (m/s)
			T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)				

Rysunek 1.40: Tabela pomiarów 2

Oceniamy niepewności pomiarowe Δr i ΔT (patrz rozdział [1.D1 Ocena dokładności wyników pomiarów \(Dodatek\)](#) na stronie 115), zatem: *Niepewność pomiaru promienia* Δr – uwzględniamy połowę najmniejszej działki podziałki linijki (np.

$\frac{1}{2}$ mm), dokładność przyłożenia linijki do osi (np. 1 mm) oraz dokładność odczytu (np. $\frac{1}{2}$ mm). Sumujemy te wielkości i otrzymujemy wartość niepewności pomiaru Δr (np.

$\Delta r = \frac{1}{2} \text{ mm} + 1 \text{ mm} + \frac{1}{2} \text{ mm} = 2 \text{ mm} = 0,2 \text{ cm}$), którą wpisujemy do tabeli ([Rysunek 1.40: Tabela pomiarów 2](#) na stronie 37).

Niepewność pomiaru okresu ΔT - wynika przede wszystkim z czasu reakcji przy włączaniu i wyłączaniu oraz dokładności odczytu (np. 0,01 s – stoper *analogowy*: odczyt bezpośrednio z podziałki, stoper *cyfrowy*: połowa różnicy między sąsiednimi wartościami cyfrowymi odczytu).

Czas reakcji przy włączaniu stopera (np. 0,1 s) oraz czas reakcji przy wyłączaniu stopera (np. 0,1 s). Sumujemy te wielkości i otrzymujemy wartość niepewności pomiaru ΔT (np. $\Delta T = 0,01 \text{ s} + 0,1 \text{ s} + 0,1 \text{ s} = 0,21 \text{ s}$, co można przybliżyć do 0,21 s), którą wpisujemy do tabeli ([Rysunek 1.40: Tabela pomiarów 2](#) na stronie 37).

Jeżeli wyniki pomiarów T_1, T_2, T_3 różnią się od siebie w granicach niepewności pomiarowej ΔT , to wnioskujemy, że ruch wentyla po okręgu jest ruchem *jednostajnym*.

Obliczamy prędkość v ruchu wentyla po okręgu. W tym celu do wzoru ([wzór 4](#) na stronie 30) wstawiamy wartość średnią okresu (T – średnia arytmetyczna z T_1, T_2, T_3):

$$(\text{wzór 10}) \quad T = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$$

Obliczamy niepewność pomiarową Δv (patrz rozdział [1.D1 Ocena dokładności wyników pomiarów \(Dodatek\)](#) na stronie 115). Najpierw obliczymy niepewność względną $\Delta v/v$ ze wzoru:

$$(\text{wzór 11}) \quad \left| \frac{\Delta v}{v} \right| = \left| \frac{\Delta r}{r} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right|$$

następnie – niepewność pomiaru prędkości Δv ze wzoru:

$$(\text{wzór 12}) \quad \Delta v = \frac{\Delta v}{v} v$$

Przykładowo:

$$(\text{wzór 13}) \quad \left| \frac{\Delta v}{v} \right| = \left| \frac{\Delta r}{r} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{0,2}{30} + \frac{0,21}{2} = 0,007 + 0,105 = 0,112 \approx 0,11$$

Prędkość

$$(\text{wzór 14}) \quad v = \frac{2\pi r}{T} = 94,2 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Więc

$$\text{(wzór 15) } \Delta v = \frac{\Delta v}{v} v = 0,112 \cdot 94,2 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 10,554 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \approx 11 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Otrzymaliśmy w ten sposób niepewność pomiaru prędkości. *Wynik pomiaru* zapisujemy w następujący sposób:

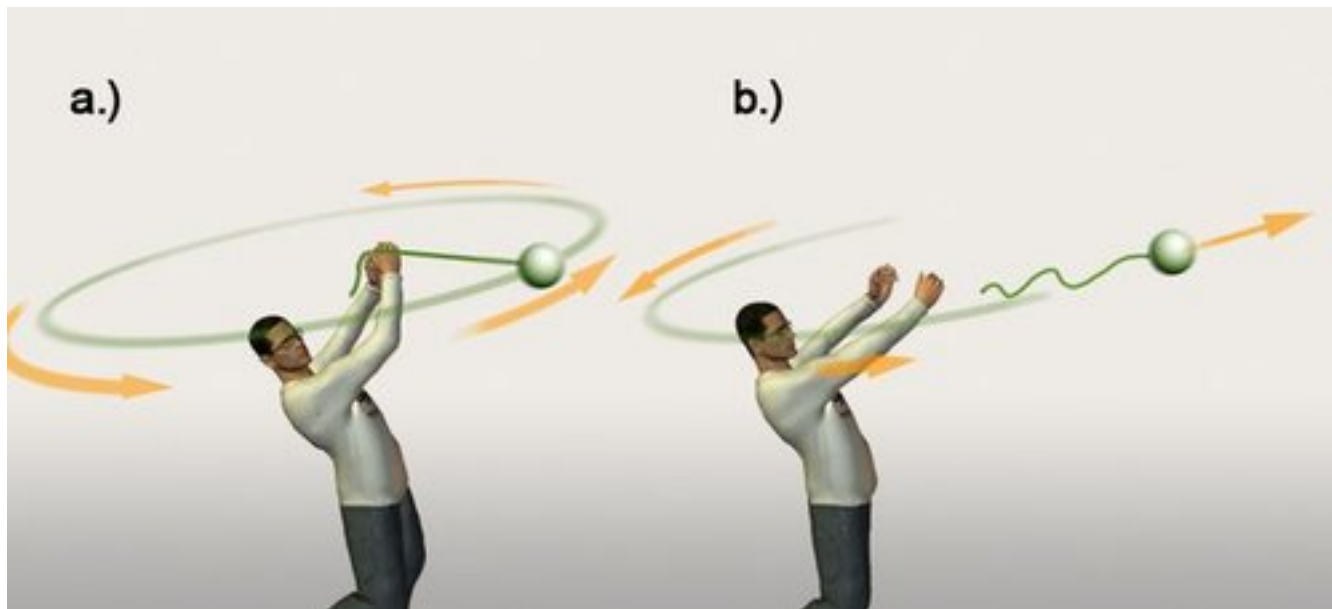
$$\text{(wzór 16) } v = (94 \pm 11) \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Uwaga: Pamiętaj o właściwych zaokrągleniach wyników (patrz rozdział [1.D1 Ocena dokładności wyników pomiarów \(Dodatek\)](#) na stronie 115)

1.4 Siła dośrodkowa

Wiemy, że ciało, na które nie działa żadna siła, porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym. Aby prędkość mogła się zmienić, musi zadziałać siła. W ruchu jednostajnym po okręgu kierunek prędkości wciąż się zmienia. Wnioskujemy, że warunkiem występowania takiego ruchu jest działanie siły. Jaka to siła? Odwołajmy się do dość powszechnego doświadczenia. Kto z nas nie kręcił w dzieciństwie workiem z kapciami? Żeby worek nie odleciał w dal, trzeba mocno trzymać za sznurek. To właśnie jest ta siła, która zmienia wciąż kierunek prędkości. Ciągniemy sznurek do środka okręgu, po którym szybuje worek. Siła utrzymująca ciało w ruchu po okręgu nazywa się *siłą dośrodkową* – skierowana jest zawsze do środka okręgu.

Ilustracja tego zjawiska pokazana jest na [Rysunek 1.41: Ilustracja działania siły dośrodkowej](#) na stronie 38. Zawieszony na sznurku kamień można wprawić w ruch kołowy trzymając jeden koniec sznurka w ręku ([Rysunek 1.41: Ilustracja działania siły dośrodkowej](#) na stronie 38a). Siła dośrodkowa, która zmusza kamień do ruchu po okręgu, jest wywierana przez napięty sznurek. Po wypuszczeniu sznurka z ręki kamień będzie kontynuował swój ruch po linii prostej stycznej do okręgu (jeśli pominąć przyciąganie ziemskie) – zgodnie z chwilowym kierunkiem prędkości kamienia ([Rysunek 1.41: Ilustracja działania siły dośrodkowej](#) na stronie 38b).



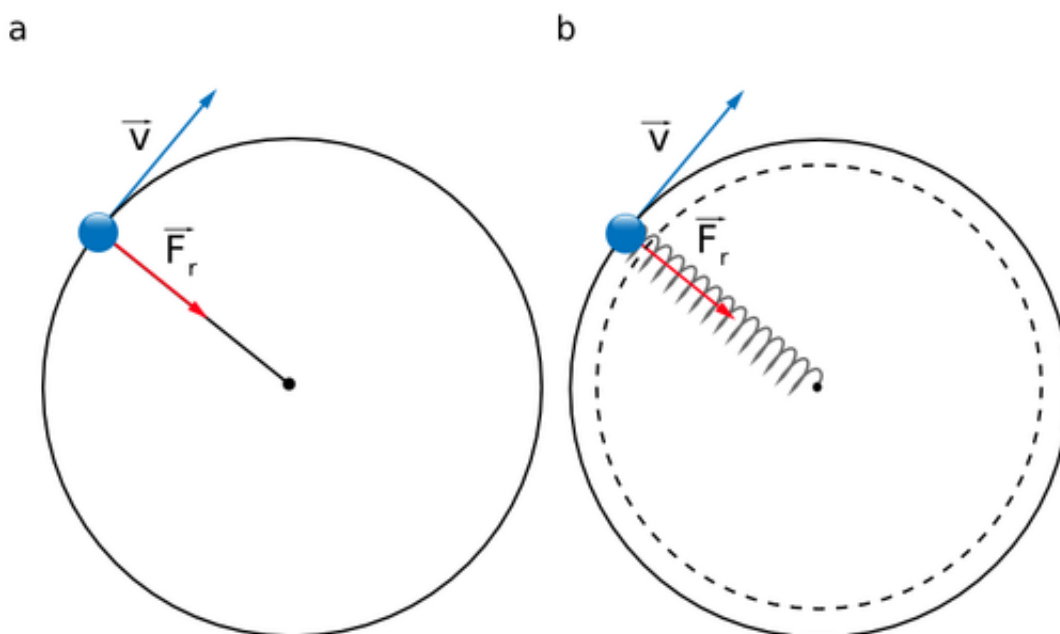
a) Siła dośrodkowa, która zmusza kamień do ruchu po okręgu, jest wywierana przez napięty sznurek. b) Kamień kontynuuje ruch po linii prostej stycznej do okręgu

Rysunek 1.41: Ilustracja działania siły dośrodkowej

Jak można zmierzyć siłę dośrodkową?

Sznurek działa na kamień w ruchu po okręgu siłą sprężystości stanowiącą siłę dośrodkową, a w myśl trzeciej zasady Newtona kamień działa na sznurek taką samą siłą, lecz przeciwnie skierowaną i wywołującą napięcie sznurka. W sznurku powstaje siła naciągu. Siła ta wynika z rozciągnięcia sznurka. Rozciągnięcie w tym przypadku jest małe, prawie niezauważalne.

Pochodzenie siły naciągu sznurka można zademonstrować, gdy zamiast sznurka zastosujemy sprężynę – *Rysunek 1.42: Siła dośrodkowa w ruchu po okręgu jest wywierana przez* na stronie 39. Siła naciągu sprężyny uwidoczni się poprzez jej wydłużenie. Mierząc wydłużenie sprężyny możemy wyznaczyć siłę sprężystą, która jest równa sile dośrodkowej działającej na kamień. Zamiast zwykłej sprężyny można zastosować siłomierz, wtedy wartość siły dośrodkowej można odczytać bezpośrednio z podziałki siłomierza.



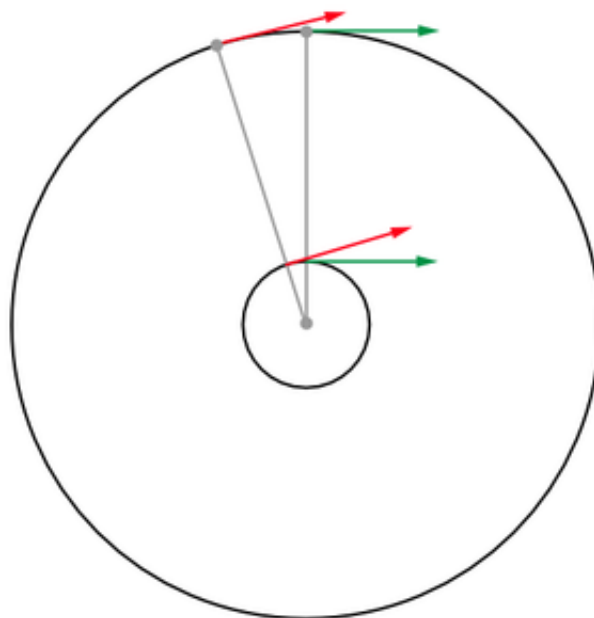
a) napięty sznurek, choć rozciągnięty w stopniu ledwo widocznym, b) napiętą i wyraźnie rozciągniętą sprężynę

Rysunek 1.42: Siła dośrodkowa w ruchu po okręgu jest wywierana przez

Od czego zależy wartość siły dośrodkowej?

Gdy mamy do czynienia z ruchem po okręgu musimy się zastanowić od jakich parametrów tego ruchu zależy wymagana w tym ruchu siła dośrodkowa. Pokażemy tutaj, że wartość tej siły zależy od masy poruszającego się ciała, jego prędkości oraz promienia okręgu po którym ma się poruszać.

Wyobraźmy sobie dwa kamienie wirujące na sznurkach. Jeden na krótkim sznurku (ruch po okręgu o małym promieniu r), drugi na bardzo długim sznurku (okrąg o dużym promieniu r) (patrz *Rysunek 1.43: Im mniejszy promień okręgu, tym gwałtowniej zmienia się kierunek prędkości* na stronie 40). W ruchu po okręgu o dużym promieniu kierunek prędkości zmienia się nieznacznie (kolejne wektory prędkości są prawie równoległe). Inaczej jest w ruchu po okręgu o małym promieniu – tu kierunek prędkości zmienia się o wiele szybciej. Wiemy już, że zmiana kierunku prędkości spowodowana jest przez siłę dośrodkową. Gwałtowniejszym zmianom kierunku prędkości musi towarzyszyć większa siła dośrodkowa. Mamy więc zależność: im mniejszy promień okręgu, po którym porusza się ciało, tym większa potrzebna jest siła dośrodkowa i na odwrót – większemu promieniowi okręgu odpowiada mniejsza siła. Możemy stwierdzić, że siła dośrodkowa F_r jest odwrotnie proporcjonalna do promienia okręgu, po którym porusza się ciało: $F_r \propto \frac{1}{r}$.



Rysunek 1.43: Im mniejszy promień okręgu, tym gwałtowniej zmienia się kierunek prędkości

Zastanówmy się teraz, czy udałoby się nam utrzymać w ruchu wirowym wielki głaz zawieszony na linie. Doskonale wiemy, że musielibyśmy użyć dużej siły, tym większej, im większa jest masa głazu, przy jednakowych prędkościach i promieniach okręgu. Mamy więc następną zależność. W sekcji [Wyprowadzenie wzoru na przyspieszenie dośrodkowe \$a_r\$ i siłę dośrodkową \$F_r\$](#) na stronie 41 wykażemy, że siła dośrodkowa jest wprost proporcjonalna do masy poruszającego się ciała: $F_r \propto m$.

Na pewno widzieliście karuzelę łańcuchową w ruchu. Aby jazda na karuzeli była bezpieczna, łańcuchy utrzymujące krzeselka muszą być dobrej jakości. Jeśli zdarzy się, że łańcuch jest stary, zardzewiały, może się zerwać. Taki wypadek nie zdarza się zazwyczaj, gdy karuzela dopiero rozpoczyna ruch i krzeselka poruszają się powoli. Łańcuch zrywa się, gdy karuzela się rozpędzi, a krzeselka poruszają się z dużą prędkością. Wniosujemy, że im większa jest wartość prędkości, tym większa potrzebna jest siła dośrodkowa. Okazuje się, że siła dośrodkowa zależy silnie od prędkości – jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości: $F_r \propto v^2$, co także wyprowadzimy w rozdziale [Wyprowadzenie wzoru na przyspieszenie dośrodkowe \$a_r\$ i siłę dośrodkową \$F_r\$](#) na stronie 41.

Ostatecznie wzór na siłę dośrodkową przyjmie postać:

$$(\text{wzór 17}) F_r = \frac{mv^2}{r}$$

We wzorze ([wzór 17](#) na stronie 40): m to masa ciała, v – wartość prędkości, r – promień okręgu, po którym porusza się ciało.

Ⓡ **Zamapiętać:** Siła dośrodkowa $F_r = \frac{mv^2}{r}$ jest to siła powodująca zakrzywienie toru ciała. W ruchu jednostajnym po okręgu siła dośrodkowa ma stałą wartość i jest zawsze skierowana do środka okręgu.

Zgodnie z drugą zasadą dynamiki siła F działająca na ciało o masie m nadaje mu przyspieszenie $a = \frac{F}{m}$. Dotyczy to również ruchu po okręgu. Tak więc siła dośrodkowa nadaje ciału przyspieszenie dośrodkowe a_r . Przyspieszenie dośrodkowe, podobnie jak siła dośrodkowa, skierowane jest wzdłuż promienia okręgu do jego środka i opisuje tempo

zmian *kierunku* prędkości. Wzór na przyspieszenie dośrodkowe otrzymamy dzieląc wyrażenie we wzorze (wzór 17 na stronie 40) przez masę ciała m .

$$(\text{wzór 18}) a_r = \frac{v^2}{r}$$

Wyprowadzenie wzoru na przyspieszenie dośrodkowe a_r i siłę dośrodkową F_r

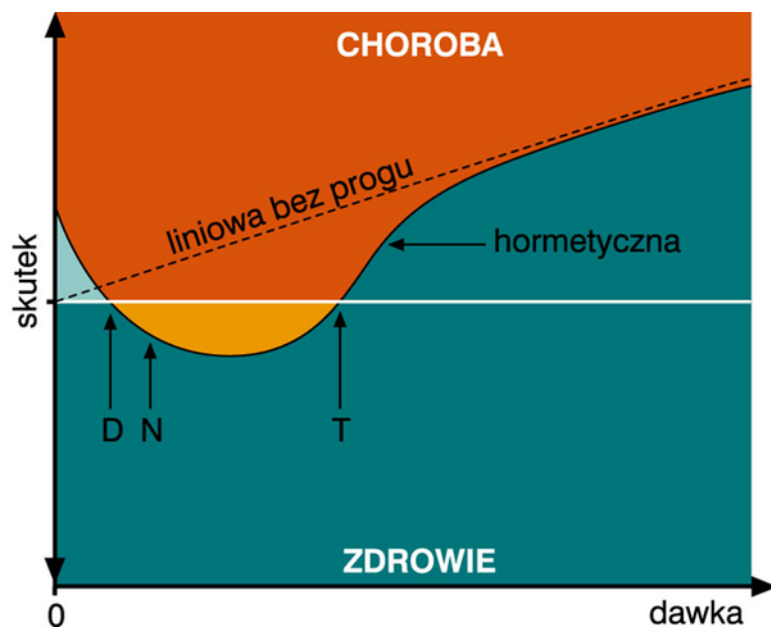
Pomimo tego, że w ruchu jednostajnym po okręgu wartość prędkości punktu materialnego nie zmienia się, to prędkość jako wektor \vec{v} wciąż zmienia swój kierunek tak, aby zawsze był skierowany stycznie do okręgu (*Rysunek 1.33: Wektor prędkości ciała poruszającego się po okręgu jest styczny do okręgu* na stronie 29). Można powiedzieć, że w każdym małym odcinku czasu t do wektora prędkości \vec{v} zostaje dodany w kierunku do środka pewien przyrost prędkości $\Delta \vec{v}$, który ciągle ustawia wektor \vec{v} stycznie do okręgu, nie zmieniając przy tym jego wartości (*Rysunek 1.44: Wektor prędkości* na stronie 41). Jak wiemy, stosunek przyrostu prędkości do czasu to właśnie przyspieszenie: $a_r = \frac{\Delta v}{t}$. Przyspieszenie to jest skierowane wzdłuż promienia do środka okręgu, dlatego nazywa się przyspieszeniem dośrodkowym.

Oto wzór na przyspieszenie dośrodkowe:

$$(\text{wzór 19}) a_r = \frac{v^2}{r}$$

Wzór ten można wyprowadzić w następujący sposób:

Wyobraźmy sobie, że punkt materialny przechodzi bardzo mały odcinek łuku s od punktu P do P' w czasie t (*Rysunek 1.44: Wektor prędkości* na stronie 41).



Styczny do okręgu wektor prędkości w punkcie P' można utworzyć przez dodanie do wektora prędkości \vec{v} w punkcie P przyrostu $\Delta \vec{v}$ (wartość wektora prędkości nie zmienia się, więc $v_P = v_{P'} = v$)

Rysunek 1.44: Wektor prędkości

Przenieśmy wektor prędkości z punktu P do punktu P' . Wektor prędkości w punkcie P' możemy traktować jako wynik dodania do wektora \vec{v} przyrostu wektora $\Delta \vec{v}$. Bardzo mały łuk s możemy uważać za odcinek prostej. Wtedy trójkąt OPP' jest podobny do trójkąta $P'AB$ i możemy napisać proporcję:

$$(\text{wzór 20}) \frac{s}{r} = \frac{\Delta v}{v}$$

Po podzieleniu tego równania stronami przez t otrzymamy

$$(\text{wzór 21}) \frac{s/t}{r} = \frac{\Delta v/t}{v}$$

W równaniu tym występuje $\frac{s}{t} = v$ – prędkość, oraz $\frac{\Delta v}{t}$ — to jest nic innego tylko właśnie przyspieszenie dośrodkowe a_r , dane wyrażeniem $a_r = \frac{\Delta v}{t}$. Napiszemy więc

$$(\text{wzór 22}) \frac{v}{r} = \frac{a_r}{v}$$

Stąd otrzymujemy wzór na wartość tego przyspieszenia

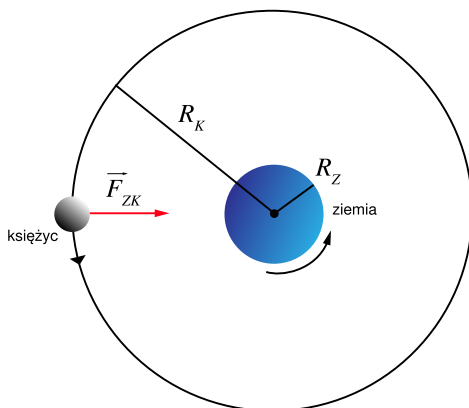
$$(\text{wzór 23}) a_r = \frac{v^2}{r}$$

Druga zasada Newtona mówi, że przyspieszenie ciała jest wywołane siłą. Zatem i w tym przypadku przyczyną występowania przyspieszenia dośrodkowego jest siła dośrodkowa. Siłę dośrodkową zgodnie ze wzorem Newtona $F_r = ma_r$, możemy przedstawić następująco:

$$(\text{wzór 24}) F_r = \frac{mv^2}{r}$$

Kierunek przyspieszenia jest zgodny z kierunkiem działającej siły. Siła dośrodkowa jest skierowana do środka okręgu. To ona powoduje występowanie przyspieszenia dośrodkowego. Przyspieszenie to jest wektorem zawsze prostopadłym do wektora prędkości. Przyspieszenie dośrodkowe nie opisuje zmiany wartości wektora prędkości, lecz zmianę jego kierunku. Jeżeli ustanie działanie siły dośrodkowej (np. w przypadku zerwania więzów), to ciało będzie kontynuować swój ruch, ale po linii prostej.

Siła dośrodkowa działająca na Księżyc



Rysunek 1.45: Ziemia przyciąga Księżyc siłą F_{ZK}

Obserwacje ruchu Księżyca posłużyły Newtonowi do odkrycia prawa grawitacji. Prześledzimy tutaj tok rozumowania uczzonego. Dla ułatwienia posłużymy się serią pytań i odpowiedzi.

Obserwacje ruchu Księżyca doprowadziły do stwierdzenia, że Księżyc krąży wokół Ziemi w przybliżeniu po okręgu ruchem jednostajnym (*Rysunek 1.45: Ziemia przyciąga Księżyc siłą F_{ZK}* na stronie 42). Można powiedzieć, że porusza się jednostajnie po orbicie kołowej. Promień okręgu, na którym w przybliżeniu porusza się Księżyc wynosi $R_K = 384\,400$ km. Okres, czyli czas jednego pełnego obiegu, wynosi $T = 7,3$ doby.

- **Pytanie:** Ile razy promień orbity Księżyca jest większy od promienia Ziemi (przyjmij, że $R_Z = 6\,400$ km)?

Odpowiedź: $\frac{R_K}{R_Z} = 60$ – promień orbity Księżyca jest ok. 60 razy większy od promienia Ziemi.

- **Pytanie:** Ile wynosi prędkość v z jaką porusza się Księżyc na orbicie wokół Ziemi?

Odpowiedź: Zastosujemy wzór (*wzór 4* na stronie 30). Zatem $v = \frac{2\pi R_K}{T} = 3\,684,49 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 1\,023,47 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Wskazówka: Widzimy, że prędkość Księżyca jest bardzo duża, na przykład jest większa od prędkości kuli karabinowej, która wynosi ok. 800 m/s, ale mała w porównaniu z prędkością Ziemi w jej ruchu wokół Słońca.

- **Pytanie:** Ile wynosi przyspieszenie dośrodkowe Księżyca?

Odpowiedź: Zastosujemy wzór (*wzór 18* na stronie 41). Zatem $a_r = \frac{v^2}{R_K} = 0,002725 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Widzimy, że przyspieszenie dośrodkowe Księżyca jest dużo mniejsze od przyspieszenia ziemskiego $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Ile razy?

$$\frac{a_r}{g} = \frac{1}{3600} = \frac{1}{60^2}$$

Wskazówka: Promień orbity Księżyca jest 60 razy większy od promienia Ziemi, podczas gdy jego przyspieszenie dośrodkowe stanowi $\frac{1}{60^2}$ przyspieszenia ziemskiego! To właśnie nasunęło Newtonowi myśl o możliwej zależności siły grawitacji od odległości przyciągających się ciał kosmicznych (odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości).

- **Pytanie:** Ile wynosi siła dośrodkowa działająca na Księżyc i powodująca jego ruch okrężny wokół Ziemi. Masa Księżyca wynosi $m = 7,37 \cdot 10^{22} \text{ kg}$.

Odpowiedź: Zastosujemy wzór (*wzór 17* na stronie 40). Zatem

$$F_r = \frac{mv^2}{r} = 7,37 \cdot 10^{22} \text{ kg} \cdot 0,002725 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

Wskazówka: Jest to olbrzymia siła w skali „ludzkiej” – musi być tak wielka, aby mogła zakrzywić tor masywnego Księżyca. Nie trudno się domyślić, że ta siła jest spowodowana obecnością Ziemi (bo przecież ona znajduje się w środku okręgu, po którym porusza się Księżyc). Obrazowo rzecz można, że Ziemia przyciąga Księżyc „niewidzialnym sznurkiem” i trzyma go na uwięzi. Gdyby nagle przestała działać, to Księżyc by uciekł od Ziemi – podobnie jak kamień zerwany ze sznurka (*Rysunek 1.41: Ilustracja działania siły dośrodkowej* na stronie 38).

- **Pytanie:** Jak silnie Ziemia przyciągałaby Księżyc, gdyby znalazł się na jej powierzchni (oczywiście, aby to zrobić, trzeba by zmniejszyć Księżyc do punktu materialnego, zachowując jego masę)?

Odpowiedź: Zastosujemy wzór $F = mg = 7,37 \cdot 10^{22} \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 72 \cdot 10^{22} \text{ N}$.

Wskazówka: Fakt, że Księżyc jest duży i nie można było by umieścić go (dokładniej jego środka) na powierzchni Ziemi nie ma tu wpływu na nasze rozumowanie, bo stosunek sił jest równy stosunkowi przyspieszeń (patrz wzór (*wzór 26* na stronie 43)) i dowolnie małe ciało np. piłka o małej masie byłaby przyciągana przez Ziemię w takim samym stosunku jak Księżyc.

- **Pytanie:** Ile razy siła działająca na Księżyc znajdujący się na orbicie wokółziemskiej jest mniejsza od tej siły?

Odpowiedź: Obliczamy:

$$(\text{wzór 25}) \frac{F_r}{mg} = \frac{2 \cdot 10^{20} \text{ N}}{7,2 \cdot 10^{22} \text{ N}} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^2} = \frac{1}{3600} = \frac{1}{60^2}$$

Otrzymaliśmy znowu „magiczną liczbę”: $\frac{1}{60^2}$, która oznacza, że siła z jaką Ziemia przyciąga inne ciała maleje wraz z odległością od środka Ziemi odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości.

Innymi słowy: siła ciężenia maleje wraz z odległością tak, jak maleje przyspieszenie – tego wyniku powinniśmy się spodziewać, gdyż masa m w wyrażeniu (*wzór 17* na stronie 40) upraszcza się:

$$(\text{wzór 26}) \frac{F_r}{mg} = \frac{ma_r}{mg} = \frac{a_r}{g}$$

a to, jak stwierdziliśmy uprzednio, oznacza stosunek przyspieszeń równy w tym przypadku $\frac{1}{60^2}$.

Możemy stwierdzić, że siła przyciągania (siła grawitacji) maleje wraz z odległością r odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości $\frac{1}{r^2}$, co zapisujemy wzorem:

$$(\text{wzór 27}) F \sim \frac{1}{r^2}$$

Mniej więcej w podobny sposób rozumował Newton odkrywając prawo grawitacji. Dokładny wzór wyrażający prawo grawitacji Newtona podajemy w dalszej części podręcznika.

Opis Doświadczenie zdalne: Siła odśrodkowa

Pytania i problemy

1. Podaj definicję częstotliwości obrotów ν . W jakich jednostkach wyrażamy częstotliwość?
2. Podaj definicję okresu w ruchu po okręgu. W jakich jednostkach wyrażamy okres? Podaj związek okresu z częstotliwością.
3. Promień Ziemi wynosi 6 340 km, doba 24 h. Nadaj tym wielkościom odpowiednie symbole literowe oraz nazwij je stosując pojęcia zdefiniowane dla ruchu po okręgu.
 - a) Oblicz z jaką prędkością względem osi Ziemi porusza się punkt na równiku.
 - b) Znajdź, posługując się globusem, lub mapą, na jakiej szerokości geograficznej znajduje się twoja miejscowość i oblicz z jaką prędkością względem osi Ziemi porusza się twój dom.
4. Wyjaśnij, jaką rolę w ruchu jednostajnym po okręgu spełnia siła dośrodkowa?
5. Jaki kierunek i jaki zwrot ma siła dośrodkowa? Podaj wzór na siłę dośrodkową i objaśnij symbole w tym wzorze stosowane.
6. Jaki kierunek i jaki zwrot ma przyspieszenie dośrodkowe?
7. Zadanie doświadczalne „**Rotacja II**”: Na talerzu połóż kulkę (np. z łożyska kulkowego). Połóż obok stoper. Ruchem ręki podtrzymującej talerz wprowadź kulkę w ruch okrężny jednostajny (*Rysunek 1.46: Zdjęcie do doświadczenia „Rotacja II”* na stronie 45). Całość sfilmuj za pomocą kamery (np. takiej jaką masz w telefonie komórkowym, kamery internetowej, lub innej).

Przy odtwarzaniu filmu na komputerze, korzystając ze „stop klatki”, odczytaj kolejne wskazania stopera w momentach, gdy kulka przechodzi przez określony punkt na obwodzie koła na talerzu. Na tej podstawie wyznacz kolejne okresy ruchu po okręgu kulki: T_1 , T_2 i T_3 .

Czy po wyznaczeniu tych wartości możesz powiedzieć, że masz do czynienia z *ruchem jednostajnym* po okręgu? Jeżeli tak, to oblicz wartość prędkości kulki. Co jeszcze powinieneś przedtem zmierzyć?

Czy masz już wystarczający zestaw danych do wyznaczenia przyspieszenia dośrodkowego kulki, jeżeli tak, to oblicz je.

Czy masz już wystarczający zestaw danych do wyznaczenia siły dośrodkowej działającej na kulkę, jeżeli nie, to zmierz brakującą wielkość i oblicz tę siłę – skorzystaj ze wzoru (*wzór 17* na stronie 40).



Rysunek 1.46: Zdjęcie do doświadczenia „Rotacja II”

Na zakończenie możesz jeszcze określić dokładność swoich pomiarów i wyznaczyć niepewności pomiarowe wielkości zmierzonych i obliczonych w tym eksperymencie.

1.5 Siła grawitacji. Prawo powszechnego ciążenia

Zgodnie z prawami dynamiki Newtona ciało może poruszać się po okręgu tylko wtedy, gdy działa na nie siła dośrodkowa. Gdyby na ciała niebieskie nie działała żadna siła, ciała te musiałyby pozostawać w spoczynku lub poruszać się po liniach prostych ruchem jednostajnym. Jednakże planety poruszają się po torach zbliżonych do okręgów, a zatem w swoim ruchu kołowym wokół Słońca muszą być związane z nim za pomocą jakiegoś niewidzialnego, gigantycznego „sznura” wywierającego na planety siły, które nie pozwalają im oddalić się od niego po linii prostej w bezkresną kosmiczną dal (podobnie, jak ruch kamienia przywiązanego do sznurka, który krążąc wokół ręki utrzymywany był w tym ruchu siłą dośrodkową wywieraną przez sznurek).

Wyjaśnienie ruchu planet podał Izaak Newton. Stwierdził, że *wszystkie ciała przyciągają się wzajemnie*.



Wskazówka:

Spadające jabłko, czyli jak Newton odkrył prawo grawitacji?

Kopernik w swoim dziele pt. *O obrotach ciał niebieskich* pisał: *Najwłaściwiej jest postępować za przezorną przyrodą, która najmocniej się strzegła tworzyć coś zbytecznego lub nieużytecznego, a często jedną rzecz obdarzyła wielorakimi skutkami*. Taką „jedną rzeczą” okazała się siła powszechnego ciążenia, inaczej grawitacja; jedyna przyczyna ruchu wszystkich ciał kosmicznych, siła naprawdę obdarzona „wielorakimi skutkami”. Dlatego przyjrzymy się bliżej jednemu z podstawowych zjawisk przyrody – kształtującej Kosmos *sile grawitacji*.

Do czasów Newtona na ogół nie szukano przyczyn ruchu kołowego planet wokół Słońca. Jak już wspominaliśmy wcześniej, uważano ruch planet po okręgach za „idealny”. Przyjmuje się, że Newton jako pierwszy zauważył konieczność podania przyczyny krzywoliniowego ruchu planet, wprowadzając do fizyki swoje zasady dynamiki. Nie tylko postawił ten problem, ale też rozwiązał go, dokonując genialnej syntezy zjawisk zachodzących na Ziemi i zjawisk w Układzie Słonecznym: sformułował prawo powszechnego ciążenia. Swoje odkrycia opisał w dziele opublikowanym 1686 r. pod nazwą *Matematyczne zasady filozofii przyrody*.

W jaki sposób Newton doszedł do swojego odkrycia? Jak mówi anegdota – pewnego lata odpoczywał pod jabłonią. W pewnym momencie zobaczył spadające na ziemię jabłko. Wtedy uświadomił sobie, że ta sama siła, która przyciąga jabłko i inne przedmioty znajdujące się w pobliżu Ziemi, musi przyciągać również Księżyc krążący wokół Ziemi. Newton w swoich rozważaniach poszedł dalej. Skoro Ziemia krąży wokół Słońca, to znaczy, że Słońce przyciąga Ziemię siłą o tym samym charakterze. To samo dotyczy również i innych planet krążących wokół Słońca.

W myśl trzeciej zasady dynamiki, każda z planet musi wzajemnie przyciągać Słońce z taką samą siłą, lecz przeciwnie zwróconą.

Jednak masa Słońca jest wielokrotnie większa od masy jakiegokolwiek z planet, dlatego skutek wzajemnego przyciągania odbija się prawie wyłącznie na planecie: planeta i Słońce obiegają wspólny środek masy, który znajduje się bardzo blisko środka Słońca.

Następny krok rozumowania Newtona przynosi stwierdzenie, że Ziemia przyciąga siłą ciążenia wszystkie ciała w swoim otoczeniu, łącznie z Księżycem, planetami i Słońcem; i na odwrót – wszystkie ciała w pobliżu Ziemi przyciągają Ziemię. I oto ostateczne uogólnienie koncepcji Newtona: *wszystkie ciała przyciągają się wzajemnie siłą grawitacji*.



Stworzył podstawy nowożytnej fizyki, przede wszystkim – mechaniki i optyki, odkrył fundamentalne prawo grawitacji

Rysunek 1.47: Izaak Newton (1642-1727) - fizyk i matematyk

Siła wzajemnego przyciągania grawitacyjnego dwóch ciał kulistych o masach m i M , których środki znajdują się w odległości r , wyraża się za pomocą wzoru

$$(\text{wzór 28}) F = G \frac{mM}{r^2}$$

Stałą G występującą w tym wzorze nazywamy *stałą grawitacji*. Jej wartość, wyznaczana doświadczalnie, wynosi:

$$(\text{wzór 29}) G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$

i Wskazówka: Zauważ, jak mała jest stała grawitacji, wyrażona w jednostkach SI. Jeśli zapiszemy ją jako liczbę dziesiętną, to pierwsza cyfra różna od zera (szóstka) pojawi się dopiero na jedenastym miejscu po przecinku! Dlatego nie zauważamy działania siły grawitacji pomiędzy ciałami o niewielkich masach, na przykład ludźmi, książkami, samochodami. Wartość siły grawitacji staje się odpowiednio duża (mierzalna), gdy przynajmniej jedna z mas ma wielką, „kosmiczną” wartość, gdy jednym z ciał jest planeta, gwiazda, galaktyka itp.

To samo prawo, które tłumaczy spadanie ciał na Ziemię, rządzi ruchem planet i komet w Układzie Słonecznym, gwiazd w Galaktyce, a nawet ruchem olbrzymich galaktyk. Prawo grawitacji rządzi więc całą mechaniką Kosmosu.

- Ⓡ **Zamapiętać:** *Prawo grawitacji:* Wszystkie ciała przyciągają się wzajemnie siłą grawitacji. Siła wzajemnego przyciągania dwóch ciał kulistych dana jest wyrażeniem:

$$(\text{wzór 30}) G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$

- Ⓡ **Zamapiętać:** Prawo powszechnego ciężenia możemy wyrazić następująco: **Dwie masy punktowe przyciągają się wzajemnie siłą wprost proporcjonalną do iloczynu ich mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu ich wzajemnej odległości.**

Ważenie Ziemi

Znając prawo grawitacji i doświadczalnie wyznaczoną stałą grawitacji, możemy wyznaczyć masę Ziemi i innych ciał naszego układu planetarnego, nie opuszczając pomieszczenia, w którym się znajdujemy.

- Ⓡ **Zamapiętać:** Zgodnie z drugą zasadą dynamiki, jeśli siła F nadaje ciału o masie m przyspieszenie a , to można zapisać $F = ma$. Siła przyciągania ziemskiego, czyli ciężar nadaje ciału przyspieszenie ziemskie g – z takim przyspieszeniem spadają swobodnie wszystkie ciała. Stąd zależność $F = mg$.

Aby wyznaczyć masę Ziemi, zauważmy najpierw, że siła przyciągania ciała o masie m przez Ziemię, wyrażona wzorem $F = mg$, przy jej powierzchni jest równa sile grawitacji wyrażonej za pomocą wzoru ([wzór 28](#) na stronie 47), zatem

$$(\text{wzór 31}) mg = G \frac{mM}{R^2}$$

gdzie M jest masą Ziemi, a R jej promieniem.

Stąd po uproszczeniu masy m i odpowiednim przekształceniu otrzymamy

$$(\text{wzór 32}) M = \frac{gR^2}{G}$$

Podstawiając tu znane wartości przyspieszenia ziemskiego $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, stałej grawitacji $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$ oraz promienia Ziemi z pomiarów geodezyjnych $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$, otrzymamy, że masa Ziemi wynosi

$$(\text{wzór 33}) M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

- ⚠ **Wskazówka:** Wykaż, że użyte w tych rozważaniach jednostki stałej grawitacji G są tożsame z jednostkami użytymi we wzorze ([wzór 28](#) na stronie 47).

- ⓘ **Wskazówka:** Jest to olbrzymia masa. Dla porównania, łączna masa wszystkich ludzi na Ziemi (w liczbie kilku miliardów) stanowi znikomy ułamek masy Ziemi, mianowicie 10^{-13} . Jest to liczba, której rozwinięcie dziesiętne ma aż 12 zer, po których dopiero występuje jedynek!

Znając masę Ziemi oraz jej promień, nietrudno obliczyć średnią gęstość Ziemi ze wzoru $\rho = \frac{M}{V}$. Podstawiając objętość kuli ziemskiej $V = \frac{4\pi R^3}{3}$, otrzymamy

$$(\text{wzór 34}) \rho = 5,5 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Jest to bardzo cenna informacja dla geofizyków, gdyż można stąd wyciągnąć wnioski o zawartości wnętrza Ziemi. Woda ma gęstość 10^3 kg/m^3 . Ma ona mały wpływ na średnią gęstość Ziemi, mimo że wydawałoby się, iż jest jej dużo. Przecież ogromne zbiorniki wodne, jakimi są oceany, stanowią około 70% powierzchni Ziemi. Jednakże ich przeciętna głębokość wynosi zaledwie 4 km (największa głębokość nie przekracza 11 km). W stosunku do promienia Ziemi, który ma długość około 6 370 km, to bardzo mało. Możemy powiedzieć, że oceany pokrywają kulę ziemską warstwą wody o grubości mniejszej niż grubość skórki na jabłku! Decydujący wpływ na średnią gęstość Ziemi mają minerały znajdujące się w jej wnętrzu.

Wartość przyspieszenia ziemskiego nie jest jednakowa we wszystkich miejscach na Ziemi, a co za tym idzie zmienna jest także siła grawitacji działająca na wybrane ciało. Wynika to z kształtu Ziemi (nie jest ona idealną kulą) oraz z

obecności w niektórych miejscach minerałów, których gęstość różni się od średniej gęstości Ziemi. Satelita badawczy okrążający Ziemię doznaje nad takimi miejscami nieznacznych zakłóceń swojej orbity. Rejestrując te zjawiska, można wnosić o obecności poszukiwanych minerałów w różnych niedostępnych rejonach kuli ziemskiej.

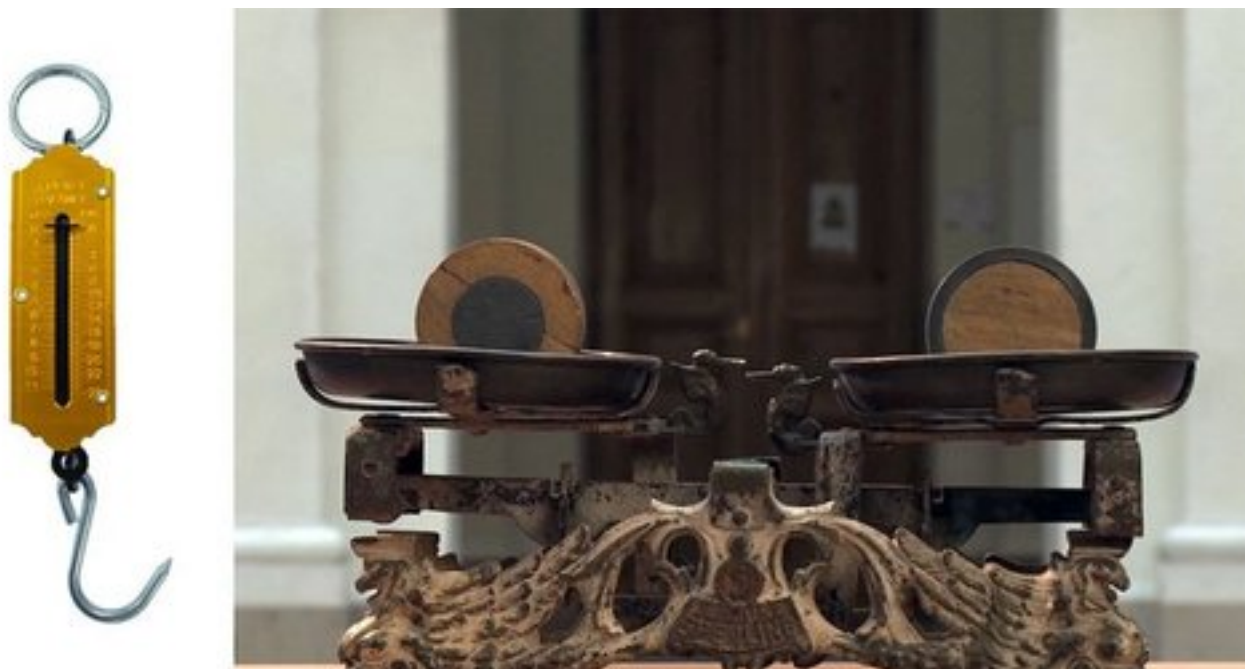
Siła grawitacji a ciężar

Ludzie często mylą pojęcia ciężaru i masy, stosując je zamiennie. Jednakże popełniają błąd, gdyż są to dwa zasadniczo różne pojęcia.

Przypomnijmy że ciężar ciała nie jest, oczywiście, jego masą. Ciężar definiujemy jako siłę ciężenia w pobliżu Ziemi lub innego ciała kosmicznego. Ciężar ciała jest inny na Ziemi niż na Księżycu. Natomiast masa ciała jest wszędzie jednakowa, ponieważ jest cechą ciała i nie zależy od oddziaływania z innymi ciałami.

Jak mierzymy masę, a jak ciężar? Masę możemy zmierzyć za pomocą wagi szalkowej (*Rysunek 1.48: Waga szalkowa i waga sprężynowa* na stronie 49). Na jednej szalce kładziemy ważony przedmiot, a na drugiej odważniki o takiej masie, aby zrównoważyć szalki. Szalki są w równowadze, gdy działają na nie jednakowe siły, czyli ciężary działające na obie szalki są takie same. Z równości ciężarów dwóch ciał wynika równość ich mas, gdy ciężary zostały wyznaczone w jednakowych warunkach. Wynik pomiaru nie zależy od tych warunków, czyli od tego, czy wykonamy go na Ziemi, czy, na przykład, na Księżycu – masa jest zawsze taka sama. Musimy jedynie unikać stanu nieważkości – tam ciężar każdego ciała jest równy zero, niezależnie od jego masy.

Inaczej jest w przypadku wagi sprężynowej. Tu ciężar przedmiotu równoważony jest siłą sprężyny. Wielkość rozciągnięcia sprężyny zależy od siły z jaką Ziemia (lub inne ciało) przyciąga ważony przedmiot. Wynik pomiaru będzie więc różny na Ziemi i Księżycu – ciężar zależy od tego, gdzie znajduje się ciało.



Która z nich mierzy masę, a która ciężar?

Rysunek 1.48: Waga szalkowa i waga sprężynowa



Przykład: Ciężar kosmonauty

Ile razy ciężar ciała kosmonauty na Księżycu jest mniejszy w porównaniu z ciężarem na Ziemi?

Wiadomo, że stosunek mas Księżyca i Ziemi wynosi $\frac{M_K}{M_Z} = \frac{1}{81,23}$, zaś stosunek ich promieni

$$\frac{R_K}{R_Z} = 0,273.$$

Rozwiązanie: Ciężar kosmonauty o masie m na Księżycu wynosi

$$(\text{ wzór 35 }) F_K = G \frac{mM_K}{R_K^2}$$

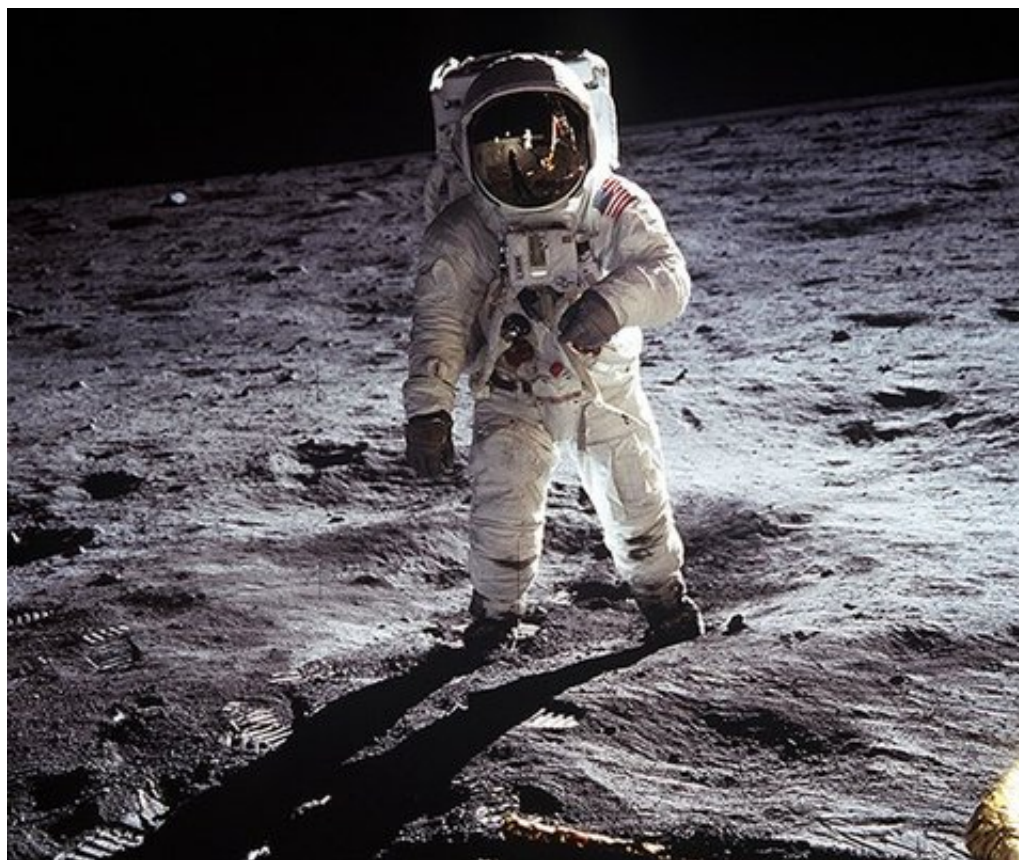
a na Ziemi

$$(\text{ wzór 36 }) F_Z = G \frac{mM_Z}{R_Z^2}$$

Po podzieleniu tych równań przez siebie otrzymamy

$$(\text{ wzór 37 }) \frac{F_K}{F_Z} = \frac{M_K R_Z^2}{M_Z R_K^2} = 0,165 \approx \frac{1}{6}$$

Zatem kosmonauta na Księżycu ma ciężar sześć razy mniejszy niż na Ziemi.




Ciężar kosmonauty na Księżycu jest sześć razy mniejszy od ciężaru na Ziemi

Rysunek 1.49: Kosmonauci na Księżycu mogli się przekonać osobiście o słuszności wniosków wynikających z teorii grawitacji (fot. NASA)

i **Wskazówka:** Ciężar ciała nie jest jednakowy w każdym miejscu na Ziemi. Po pierwsze, na różnych wysokościach odległość od środka Ziemi jest różna, co – zgodnie ze wzorem (*wzór 28* na stronie 47) – daje różne wartości siły przyciągania określonego ciała przez Ziemię. Po drugie, minerały wewnątrz Ziemi nie są rozłożone równomiernie, a to powoduje małe lokalne anomalie siły grawitacji, które wykrywają współczesne satelity. Po trzecie, Ziemia obraca się wokół swojej osi, a to powoduje, że ciała na Ziemi doznają działania siły odśrodkowej. Siła ta jest największa na równiku. Dlatego ciała mają najmniejszy ciężar na równiku, a największy na biegunie. Wreszcie, po czwarte, kształt Ziemi odbiega od idealnego geometrycznego kształtu kuli – na biegunach Ziemia jest nieco spłaszczona, co zwiększa tam dodatkowo ciężar ciała.


Pytania i problemy

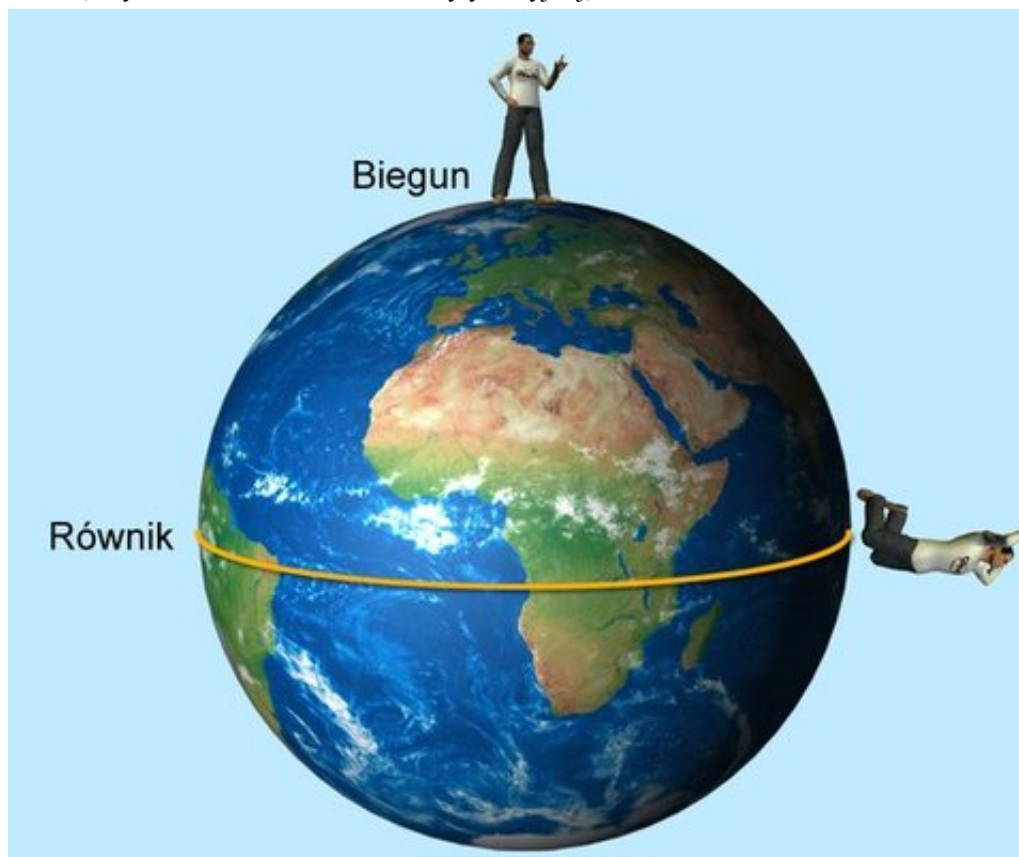
1. Czym różni się ciężar ciała od jego masy? Jak definiujemy ciężar a jak masę? Co możemy zmierzyć za pomocą wagi sprężynowej, a co szalkowej?
2. Dlaczego ciężar ciała Kosmonauty jest inny na Ziemi, niż na Księżycu?
3. Jaki ciężar będzie miał kosmonauta na Marsie, jeżeli jego masa z pełnym oprzyrządowaniem wynosi $m = 80$ kg. Masa Marsa wynosi $M = 6,34 \cdot 10^{23}$ kg, jego promień $R = 3,39 \cdot 10^6$ m.
4. Dlaczego nie obserwuje się, że dwa ciała, jak na przykład dwa autobusy, przyciągają się wzajemnie siłą grawitacji? Przecież siła wzajemnego przyciągania dotyczy absolutnie wszystkich ciał. Odpowiedź uzasadnij liczbowo.

5.  **Wskazówka:** Dlaczego ciężar ciała na biegunie jest większy niż na równiku? Załóżmy, że jakiś turysta stanął na biegunie Ziemi i zważył na wadze sprężynowej swój plecak – waga wskazała $P_b = 200 \text{ N}$. Następnie znalazł się na równiku, gdzie również zważył na wadze sprężynowej swój plecak. Jak myślisz czy waga wskazała tę samą wartość? Mając następujące dane: przyspieszenie ziemskie na biegunie $g = 9,83 \text{ m/s}^2$, promień Ziemi $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ i okres obrotu Ziemi dokoła osi $T = 86 \text{ 164 s}$, oblicz ciężar plecaka P_r na równiku. Przyjmij, że Ziemia ma kształt kuli.



Rysunek 1.50: Ciężar ciała na biegunie jest większy niż na równiku

6.  **Wskazówka:** Jak prędko musiałyby się obracać Ziemia, aby ciała na równiku nic nie ważyły? Mając następujące dane: przyspieszenie ziemskie na biegunie $g = 9,83 \text{ m/s}^2$, promień Ziemi $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ i okres obrotu Ziemi dokoła osi $T = 86 \text{ 164 s}$, oblicz, ile razy szybciej niż obecnie powinna się obracać Ziemia, aby na równiku ciała nic nie ważyły. Przyjmij, że Ziemia ma kształt kuli.



Rysunek 1.51: Gdyby Ziemia obracała się odpowiednio szybciej niż obecnie, to ciała na równiku byłyby w stanie nieważkości

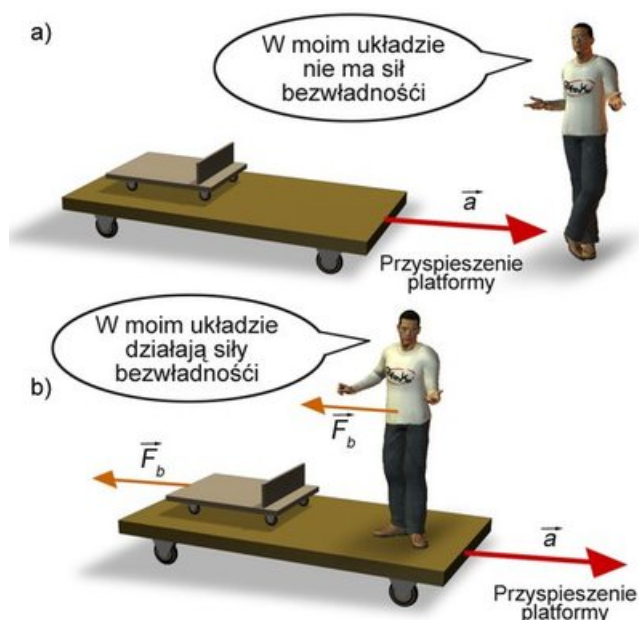
1.6 Siły bezwładności

Każdy z nas odczuł działanie *sił bezwładności*, na przykład będąc w tramwaju ruszającym z przystanku lub gwałtownie hamującym. Stojąc w tramwaju gwałtownie przyspieszającym musimy trzymać się mocno poręczy, gdyż siła bezwładności ciągnie nas do tyłu. Gdy tramwaj gwałtownie hamuje, siła bezwładności działa do przodu.

Podobne działanie sił bezwładności zauważamy również wtedy, gdy znajdujemy się w innych pojazdach poruszających się z przyspieszeniem. W każdym układzie poruszającym się z przyspieszeniem występują siły bezwładności. Układ, który porusza się z przyspieszeniem (np. zmieniający swą prędkość tramwaj, samochód, samolot czy winda) nazywa się *układem nieinercyjnym*. Natomiast układ poruszający się bez przyspieszenia (np. poruszający się ruchem jednostajnym tramwaj, łódź, samochód, samolot czy winda) nazywa się *układem inercyjnym*.

W celu prześledzenia działania sił bezwładności rozważmy przypadek, gdy na ruchomej platformie znajduje się wózek mogący poruszać się prawie bez tarcia (*Rysunek 1.52: Ruch wózka względem platformy* na stronie 53). Gdy platforma porusza się w prawo ze stałym przyspieszeniem, to wózek względem platformy porusza się w lewo z przyspieszeniem o tej samej wartości, ale skierowanym przeciwnie.

Opiszemy ruch wózka z punktu widzenia dwóch różnych obserwatorów: jednego - „nieruchomego” - znajdującego się na ziemi w układzie inercyjnym oraz drugiego - „ruchomego” - znajdującego się na platformie, czyli w układzie nieinercyjnym. Poniżej podajemy, jak obaj obserwatorzy interpretują ten sam fakt doświadczalny: ruch wózka względem platformy.



a) Dla obserwatora „nieruchomego” wózek jest w spoczynku; na wózek nie działa żadna siła (platforma wysuwa się z pod niego) b) Dla obserwatora „ruchomego” wózek o masie m ma przyspieszenie $\vec{a}_b = -\vec{a}$; na wózek działa siła bezwładności \vec{F}_b

Rysunek 1.52: Ruch wózka względem platformy

Obaj zgodnie stwierdzą, że siła ciężkości działająca na wózek „w dół” jest równoważona przez siłę reakcji jego podłoża (czyli platformy), która jest skierowana „do góry”. Sił tych nie umieszczamy więc na *Rysunek 1.52: Ruch wózka względem platformy* na stronie 53.

Układ nieinercyjny (obserwator „ruchomy”)

Na wózek nie działają żadne siły, które by pochodziły od innych ciał, a mimo to wózek ma przyspieszenie względem platformy, które wynosi: $\vec{a}_b = -\vec{a}$. Uzasadniamy ten fakt mówiąc, że to siła bezwładności \vec{F}_b nadaje wózkowi przyspieszenie zgodnie z drugą zasadą dynamiki:

$$(\text{ wzór 38 }) \vec{F}_b = -m\vec{a}$$

Znak „-” w tym wzorze oznacza, że siła bezwładności ma zwrot przeciwny do ogólnego przyspieszenia układu.

Układ inercjalny (obserwator „nieruchomy”)

Na wózek nie działają żadne siły i wózek pozostaje w spoczynku względem ziemi, zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona. Platforma zaś porusza się z przyspieszeniem \vec{a} .

Mamy tu zdecydowanie odmienne opisy tego samego zjawiska w dwóch różnych układach odniesienia. W układzie inercjalnym siła bezwładności nie występuje, obserwator „nieruchomy” w ogóle nie zauważy jej występowania, chyba że się porozumie ze swoim „ruchomym” kolegą. Natomiast drugi obserwator, będący w układzie nieinercjalnym, odczuwa działanie siły bezwładności. Określi ją jednak mianem siły pozornej (fikcyjnej), gdyż nie będzie mógł wskazać żadnego obiektu, który tę siłę wywiera. Zasadniczą cechą sił bezwładności jest bowiem fakt, iż nie spełniają one III zasady dynamiki Newtona. Mimo tego, siłę bezwładności może zmierzyć. Innym argumentem świadczącym za pozornym charakterem sił bezwładności jest fakt, że siły te nie istnieją w układzie inercjalnym.

Jeżeli obserwator zaczepi sprężynę znajdującą się na końcu wózka do podpórki platformy (*Rysunek 1.53: Naciągnięta sprężyna jest miarą siły bezwładności w układzie nieinercjalnym platformy* na stronie 54), to sprężyna zostanie napięta, wydłuży się, a wózek będzie wtedy w spoczynku względem platformy. Wydłużenie tej sprężyny jest miarą siły bezwładności w układzie nieinercjalnym. Jednakże obserwator „nieruchomy” zinterpretuje wydłużenie sprężyny inaczej: to platforma, poruszając się ruchem zmiennym, działa na wózek siłą napinającą sprężynę, a wydłużenie sprężyny jest miarą oddziaływania platformy na wózek zgodnie z zasadami dynamiki i właściwościami sił sprężystych.



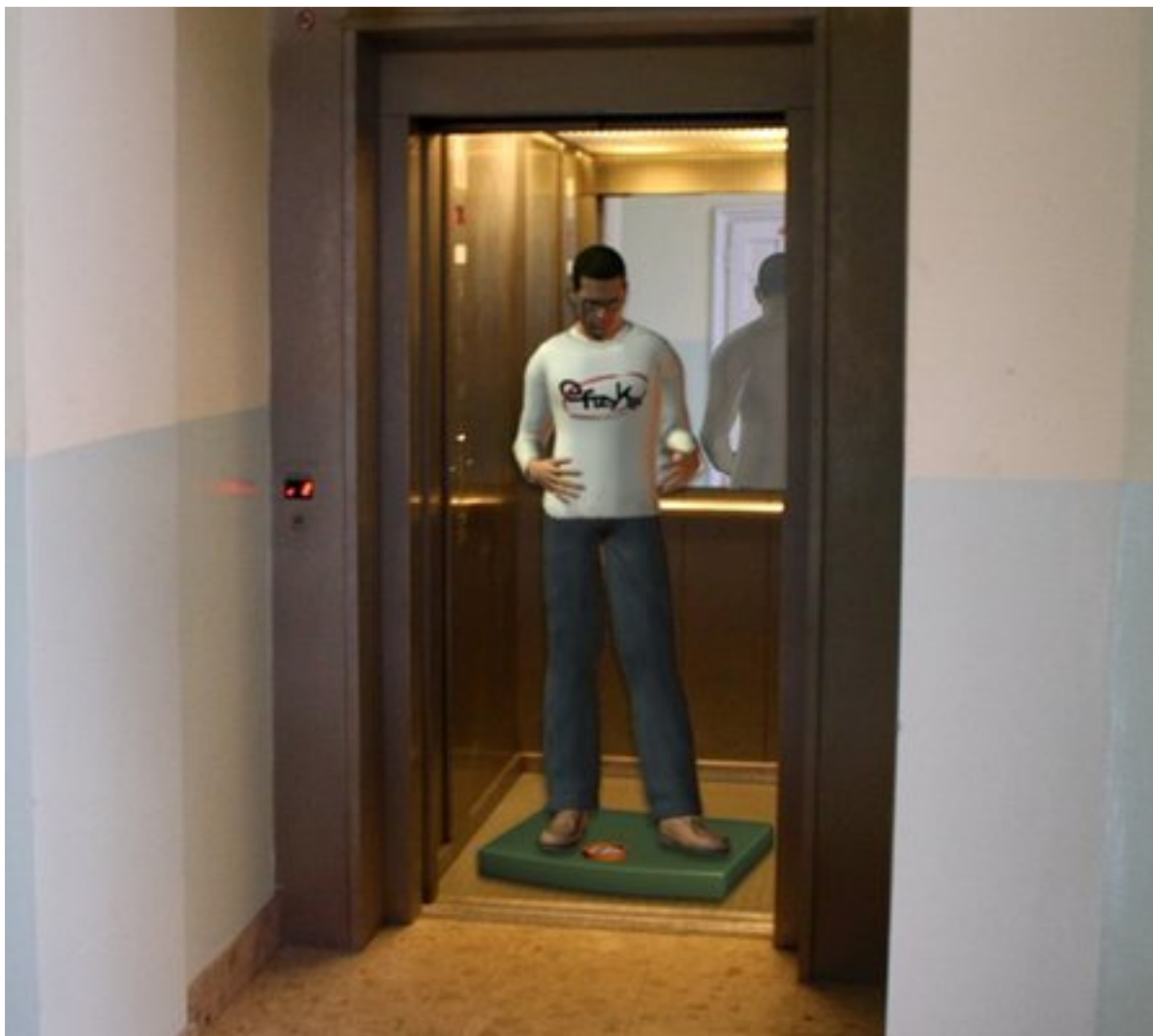
Dla obserwatora zewnętrznego w układzie inercjalnym jest to siła, z jaką platforma działa na wózek

Rysunek 1.53: Naciągnięta sprężyna jest miarą siły bezwładności w układzie nieinercjalnym platformy

- ® **Zamapiętać:** Siła bezwładności $\vec{F}_b = -m\vec{a}$ jest to siła pozorna działająca na ciało będące w układzie nieinercjalnym, spowodowana przyspieszeniem układu.
- i **Wskazówka:** Siły bezwładności są *siłami pozornymi*. Pasażer hamującego autobusu, gdy obserwujemy go z chodnika, nie dlatego leci do przodu, że działa na niego jakaś siła (z pewnością nie przyciąga go przednia szyba!), tylko dlatego, że *nie działa* na niego siła analogiczna do tej, która hamuje autobus. W rezultacie pasażer porusza się szybciej niż zwalniający autobus i leci do przodu. Siły bezwładności obserwujemy i stosujemy tylko w układach nieinercjalnych.

Przy rozwiązywaniu różnych problemów fizycznych warto korzystać z sił bezwładności w układach nieinercjalnych, ponieważ to często znakomicie ułatwia zadanie.

Poniższe przykłady oraz doświadczenie pozwolą ci bliżej zapoznać się z siłami bezwładności.



Rysunek 1.54: Wskazania wagi w windzie informują nas o sile bezwładności

Pomiaru siły bezwładności możesz dokonać samodzielnie stając na wadze łazienkowej w windzie (*Rysunek 1.54: Wskazania wagi w windzie informują nas o sile bezwładności* na stronie 55). Wskazania wagi, w czasie gdy winda porusza się z przyspieszeniem, dają możliwość pomiaru siły bezwładności działającej na twoje ciało. Gdy winda jest w spoczynku lub gdy porusza się ruchem jednostajnym, waga wskazuje twój ciężar. Gdy przyspieszenie windy jest zwrócone w górę, wskazanie wagi jest większe o wartość siły bezwładności. Natomiast gdy przyspieszenie windy jest zwrócone w dół, wskazanie wagi jest mniejsze o wartość tej siły.

Opisz sytuacje w zagadnieniu niejednostajnego ruchu windy, w których jej przyspieszenie jest zwrócone do góry. W jakich sytuacjach przyspieszenie windy jest zwrócone w dół? Pamiętaj przy tym, że jeśli wektor przyspieszenia skierowany jest zgodnie z wektorem prędkości, ciało przyspiesza (wartość prędkości rośnie). Jeśli wektor przyspieszenia skierowany jest przeciwnie do wektora prędkości, ciało zwalnia (wartość prędkości maleje).

Przykład: Winda

W windzie u sufitu zawieszony jest na sprężynie klocek o ciężarze P . Określ siłę działającą na sprężynę w następujących przypadkach ruchu windy:

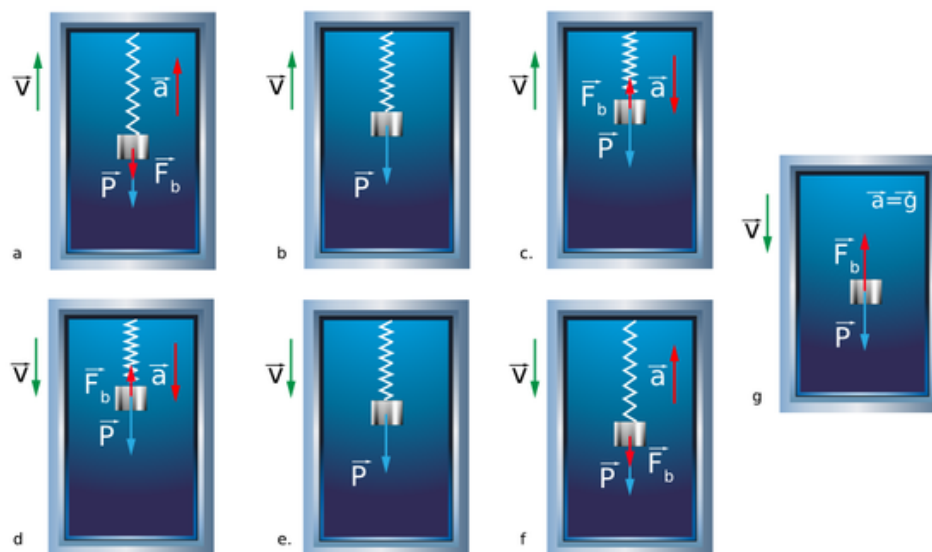
- a) w górę z przyspieszeniem zwróconym w górę,

- **b)** w górę bez przyśpieszenia,
- **c)** w górę z przyśpieszeniem zwróconym w dół,
- **d)** w dół z przyśpieszeniem zwróconym w dół,
- **e)** w dół bez przyśpieszenia,
- **f)** w dół z przyśpieszeniem zwróconym w górę.

Rozwiązanie: Rysunek (*Rysunek 1.55: Winda* na stronie 56) przedstawia działanie sił bezwładności w każdym z wymienionych przypadków, a także w siódmym, dość specyficznym, którym zajmujemy się na koniec. Siła bezwładności \vec{F}_b działa zawsze przeciwnie do przyśpieszenia windy, niezależnie od tego czy winda jedzie w górę, czy w dół.

Siła bezwładności w przypadku a), gdy winda jedzie w górę z przyśpieszeniem zwróconym ku górze, jest zwrócona w dół; tak samo jak w przypadku f), gdy winda jedzie w dół i hamuje, czyli gdy przyśpieszenie windy jest zwrócone ku górze. W obu tych przypadkach siła bezwładności dodaje się do ciężaru \vec{P} . W przypadku c), gdy winda jedzie w górę i hamuje, czyli jej przyśpieszenie jest zwrócone ku dołowi, siła bezwładności zwrócona jest ku górze; tak samo jak w przypadku d), gdy winda jedzie w dół i przyśpiesza. W obu ostatnich przypadkach siła bezwładności odejmuje się od ciężaru \vec{P} .

W przypadkach b) i e) nie występuje żadna siła bezwładności, ponieważ winda nie ma przyśpieszenia. To oznacza, że jest ona układem inercyjnym (niezależnie od tego, czy winda jedzie w górę, czy w dół).



Na rysunkach a), c), d) i f) zwrot siły bezwładności jest zawsze przeciwny do przyśpieszenia windy, niezależnie od tego, czy winda jedzie w górę, czy w dół; na rysunkach b) i e) winda jedzie bez przyśpieszenia, więc siła bezwładności nie występuje; w przypadku g) w swobodnie spadającej windzie panuje „stan nieważkości”

Rysunek 1.55: Winda

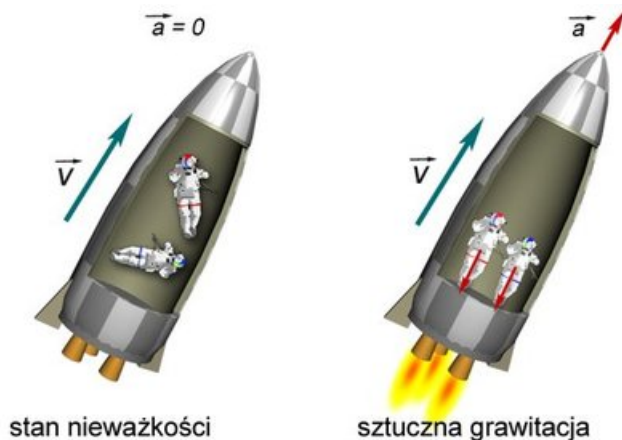
Rozważmy jeszcze jeden przypadek (*Rysunek 1.55: Winda* na stronie 56g), gdy winda spada swobodnie w dół. Przyśpieszenie spadającej windy jest równe przyśpieszeniu ziemskiemu ($a = g$), więc siła bezwładności $\vec{F}_b = -m\vec{g}$. Oznacza to, że \vec{F}_b ma tę samą wartość co ciężar, ale przeciwny zwrot. Kłoczek nie rozciągnie więc sprężyny w ogóle, tak jakby nic nie ważył. Mamy tu do czynienia ze *stanem nieważkości*. W podobnych warunkach ćwiczyli pierwsi kosmonauci, zanim wystartowali na orbitę ziemską. Ćwiczenia wykonywano na dużych wysokościach nad Ziemią w pikującym samolocie, który wspomagany siłą ciągu silników (by przezwyciężyć opór powietrza)

poruszał się z przyspieszeniem równym przyspieszeniu ziemskiemu. Dzięki siłom bezwładności adepci kosmonautyki mogli przez krótki czas odczuwać stan nieważkości. W podobnej sytuacji znajduje się przez moment ktoś, kto jest na huśtawce. W bardzo krótkim czasie, gdy huśtawka, zawracając, opada w dół, człowiek odczuwa stan niedociążania a nawet stan nieważkości przy wychyleniu huśtawki o 90 stopni.

Przykład: Rakieta

Wyobraźmy sobie rakietę, która opuściła Układ Słoneczny i porusza się, z wyłączonymi silnikami, „ruchem bezwładnym” (jednostajnym prostoliniowym). Jeśli przyjmiemy, że siła grawitacji działająca na rakieta i kosmonautów jest znikoma, gdyż nie ma w pobliżu żadnych ciał kosmicznych, to kosmonauci odczuwają stan nieważkości. Taka sytuacja, jeżeli trwa dłuższy czas, jest niekorzystna dla zdrowia. Aby stworzyć kosmonautom komfortowe warunki, można wywołać „sztuczną grawitację”. W jaki sposób?

Rozwiązanie: Należy włączyć silniki wywołujące przyspieszenie rakiety a_r . Kosmonauci będą wtedy w układzie nieinercyjnym. Na wszystkie ciała w rakiecie będzie działać siła bezwładności (*Rysunek 1.56: Rakieta* na stronie 57).



a) Kosmonauci znajdujący się w rakiecie, która leci w przestrzeni poza zasięgiem sił grawitacji z wyłączonymi silnikami, znajdują się w układzie inercyjnym – odczuwają nieważkość. b) Podczas pracy silników rakieta uzyskuje przyspieszenie i staje się układem nieinercyjnym, kosmonauci odczuwają siły bezwładności – powstaje „sztuczna grawitacja”

Rysunek 1.56: Rakieta

Jeżeli dostosuje się siłę napędową silników rakiety tak, aby nadawała rakiecie przyspieszenie o wartości równej przyspieszeniu ziemskiemu $a = g$, to każdy kosmonauta odczuje siłę bezwładności, której zwrot będzie przeciwny do zwrotu przyspieszenia rakiety i która będzie taka sama, jak siła ciężkości na Ziemi:

$$(\text{wzór 39}) F_b = ma = mg$$

Siła odśrodkowa

Wyobraźmy sobie, że kręcimy się na karuzeli w wesołym miasteczku. Czujemy siłę wciskającą nas w krzeselko. Nic dziwnego – znajdujemy się bowiem w układzie nieinercyjnym, krzeselko porusza się z przyspieszeniem dośrodkowym. Działa na nas siła bezwładności, zwana *siłą odśrodkową*. Siła odśrodkowa działa wzdłuż promienia okręgu, po którym porusza się ciało, a skierowana jest na zewnątrz. Można wykazać, że wartość siły odśrodkowej dana jest wzorem $F_o = \frac{mv^2}{r}$.

- Wskazówka:** Zwróć uwagę na podobieństwo tego wzoru do wzoru na siłę dośrodkową F_r . Choć podobieństwo to nie jest zupełnie przypadkowe, nie oznacza ono, że obowiązuje uniwersalny związek $F_o = -F_r$.

Siłę odśrodkową dobrze znają kierowcy. Wiedzą, że jeśli nie zwolnią na zakręcie, siła odśrodkowa wyrzuci samochód z drogi. Jest to określenie popularne – precyzyjne wyjaśnienie tego zjawiska wymaga dużo bardziej rozbudowanego rozumowania (należałoby sobie wyobrazić platformę tira na której stoi samochód, gdy tir wchodzi w zakręt ze zbyt dużą prędkością samochód może się zsunąć z platformy na zewnątrz zakrętu pod wpływem siły odśrodkowej – siły bezwładności).



Kosmonauci w stacji orbitalnej znajdują się w stanie nieważkości. W tej sytuacji stan ten wynika z kompensowania się siły przyciągania Ziemi z odśrodkową siłą bezwładności występującą na orbicie

Rysunek 1.57: Stacja orbitalna (fot. ESA)

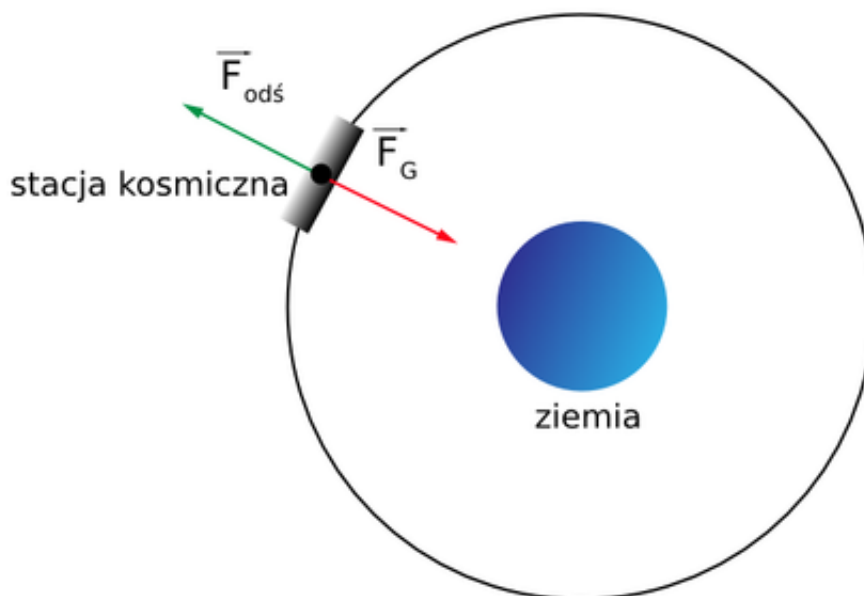
Wartość siły odśrodkowej silnie zależy od prędkości, z jaką obraca się nieinercyjny układ odniesienia (we wzorze mamy prędkość do kwadratu). Czyli dwukrotne zwiększenie prędkości, aż czterokrotnie zwiększy siłę odśrodkową).

Naturę siły odśrodkowej wyjaśnić można następująco: Człowiek stojący na obracającej się tarczy trzyma na nitce kulkę. W pewnym momencie nitka pęka. Jak ruch kulki wygląda dla obserwatora w układzie inercyjnym (nieruchomym) i dla obserwatora w układzie nieinercyjnym (obracającej się tarczy)? Obserwator w układzie nieruchomym stwierdza początkowo istnienie siły dośrodkowej – realnej siły oddziaływania nitki na kulkę. Gdy nitka ulega przerwaniu siła dośrodkowa znika i kulka porusza się dalej po linii prostej, stycznej do okręgu. Natomiast obserwator na tarczy widzi, że na kulkę działa siła odśrodkowa, która po przerwaniu nitki wyrzuca kulkę na zewnątrz wzdłuż promienia.

- ! **Ważne:** *Siła odśrodkowa* – siła bezwładności występująca w układach poruszających się po okręgu. Jest skierowana od środka okręgu i dana wzorem $F_o = \frac{mv^2}{r}$.

Rozważmy sytuację kosmonautów na stacji kosmicznej poruszającej się po kołowej orbicie okołoziemskiej.

W układzie nieinercyjnym (stacja kosmiczna) na pasażerów działa siła przyciągania Ziemi \vec{F}_G i równa jej siła odśrodkowa \vec{F}_{ods} . W rezultacie kosmonauci nie odczuwają działania żadnej siły – są w stanie nieważkości. Dla obserwatora w układzie inercyjnym, który patrzy na to z zewnątrz, kosmonauci poruszają się z takim samym przyspieszeniem dośrodkowym jak stacja. W jego układzie na kosmonautów działa tylko rzeczywista siła grawitacji. Zwróćmy uwagę, że sytuacja jest podobna, jak w przypadku windy spadającej swobodnie. W ogólności możemy powiedzieć, że stan nieważkości występuje w układach poruszających się swobodnie w polu grawitacyjnym.

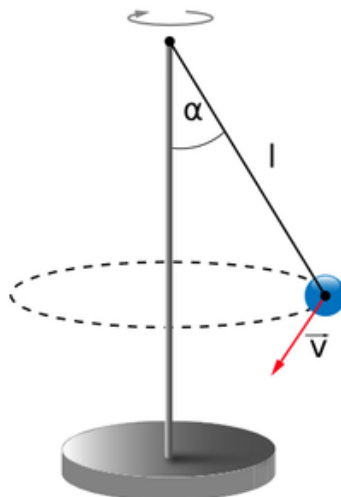


Rysunek 1.58: Stacja kosmiczna na orbicie okołoziemskiej

Przykład: Opis ruchu kulki

Kulka o masie $m = 100$ g zawieszona na nitce długości $l = 60$ cm porusza się jednostajnie, zakreślając w płaszczyźnie poziomej okrąg (Kąt nachylenia nitki do pionu wynosi $\alpha = 30^\circ$).

- **a)** Narysuj wszystkie siły działające na kulkę w układzie inercyjnym – nieruchomym. Określ kierunek i zwrot siły wypadkowej. Czy siła wypadkowa spełnia rolę siły dośrodkowej?
- **b)** Narysuj rozkład sił w układzie nieinercyjnym – związanym z wirującą podstawą, tak aby uwidocznisz siłę odśrodkową.
- ! **Wskazówka: c)** Ile wynosi siła dośrodkowa, a ile odśrodkowa? Ile wynosi siła naprężenia nici?
- ! **Wskazówka: d)** Z jaką prędkością v porusza się kulka?

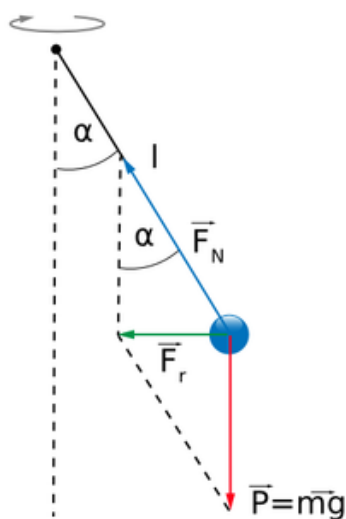


Rysunek 1.59: Kulka zawieszona na nitce porusza się jednostajnie, opisując w płaszczyźnie poziomej okrąg

Rozwiązanie:

Ad a) Na [Rysunek 1.60: Siły działające na kulkę w układzie związanym z Ziemią](#) na stronie 60 przedstawiono siły działające na kulkę w układzie inercyjnym. Na kulkę działa siła ciężkości $\vec{P} = m\vec{g}$ oraz siła naciągu nici \vec{F}_N . Skoro wiemy, z treści zadania, że pod wpływem tych sił kulka porusza się po okręgu w płaszczyźnie poziomej, to wnioskujemy, że wypadkowa tych sił musi mieć kierunek poziomy i być skierowana do środka zataczanego okręgu.

Uwaga! Jeśli rysujemy siły działające na kulkę, to punkty przyłączenia tych sił **muszą** leżeć na kulce.

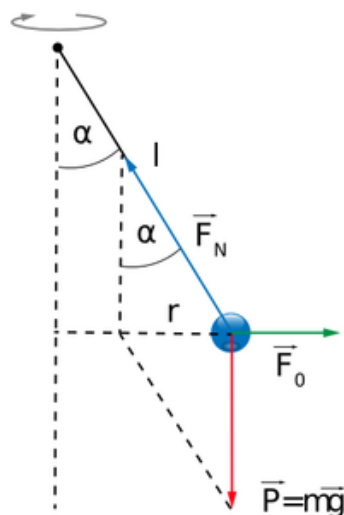


Rysunek 1.60: Siły działające na kulkę w układzie związanym z Ziemią

Ad b) Na *Rysunek 1.61: Siły działające na kulkę w układzie nieinercyjnym związanym z kulką* na stronie 61 przedstawiony jest rozkład siły ciężkości $\vec{P} = m\vec{g}$ działającej na kulkę w układzie nieinercyjnym związanym z kulką. Kulka doznaje przyspieszenia dośrodkowego \vec{a}_r wzdłuż promienia r . Zatem kulka znajduje się w układzie nieinercyjnym (doznaje przyspieszenia), więc na kulkę działa siła bezwładności \vec{F}_o przeciwnie skierowana do przyspieszenia dośrodkowego \vec{a}_r :

$$(\text{wzór 40}) \vec{F}_o = m\vec{a}_r$$

Nazywamy ją *siłą odśrodkową*. Siła odśrodkowa działa na kulkę w poziomie wzdłuż promienia okręgu zataczanego przez nią (*Rysunek 1.61: Siły działające na kulkę w układzie nieinercyjnym związanym z kulką* na stronie 61). Można powiedzieć, że siła odśrodkowa odchyła nić o kąt α od pionu. Na kulkę działa też siła ciężkości \vec{P} i siła naciągu nici \vec{F}_N .

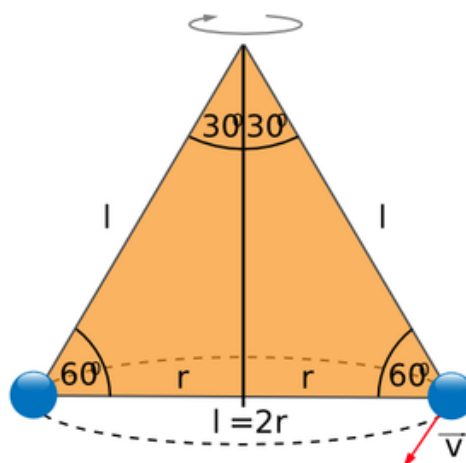


Rysunek 1.61: Siły działające na kulkę w układzie nieinercyjnym związanym z kulką



Wskazówka:

Ad c) Na *Rysunek 1.62: Nić tworzy trójkąt równoboczny w dwóch przeciwnych położeniach kulki* na stronie 62 przedstawiona jest kulka w dwóch przeciwnych położeniach. Wtedy nić tworzy trójkąt równoramienny, ale ponieważ w naszym przypadku $\alpha = 30^\circ$, więc kąt wierzchołkowy wynosi 60° i pozostałe dwa u podstawy też wynoszą po 60° . Zatem jest to trójkąt równoboczny. Stąd wynika, że jego podstawa równa $2r$ wynosi $l = 60$ cm, więc $r = 30$ cm.



Rysunek 1.62: Nić tworzy trójkąt równoboczny w dwóch przeciwnych położeniach kulki

Na [Rysunek 1.63: Zabarwione trójkąty są podobne](#) na stronie 63 pokazano, że trójkąt utworzony przez l – nić i r – promień jest podobny do trójkąta utworzonego przez siłę \vec{F}_N i \vec{F}_r . Zatem skoro $r/l = 1/2$, to i $F_r/F_N = 1/2$, lub

$$(\text{wzór 41}) F_N = 2F_r$$

Z twierdzenia Pitagorasa wiemy, że:

$$(\text{wzór 42}) F_N^2 = P^2 + F_r^2$$

Wstawiając ([wzór 41](#) na stronie 62) do ([wzór 42](#) na stronie 62) otrzymamy:

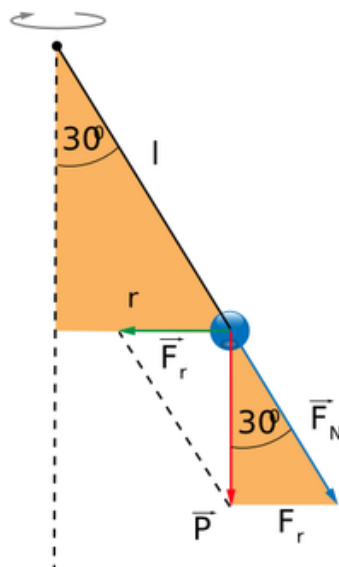
$$(\text{wzór 43}) 4F_r^2 = P^2 + F_r^2$$

Stąd: $4F_r^2 - F_r^2 = P^2$, czyli $3F_r^2 = P^2$. Ostatecznie:

$$(\text{wzór 44}) F_r = \frac{P}{\sqrt{3}}$$

Ponieważ $P = mg = 0,1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 0,981 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 0,981 \text{ N}$, więc z ([wzór 44](#) na stronie 62) otrzymamy, że siła dośrodkowa wynosi: $F_r = 0,566 \text{ N}$.

Siła odśrodkowa jest równa co do wartości sile dośrodkowej, zatem $F_o = 0,566 \text{ N}$.



Rysunek 1.63: Zabarwione trójkąty są podobne



Wskazówka:

Ad d) Obliczymy teraz prędkość v kulki.



Ponieważ $F_r = \frac{mv^2}{r}$ oraz $r = l/2$, więc

$$(\text{wzór 45}) \quad v = \sqrt{\frac{F_r r}{m}} = \sqrt{\frac{0,566 \cdot 0,3}{0,1}} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Prędkość kulki wynosi:

$$(\text{wzór 46}) \quad v = 1,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Pytania i problemy

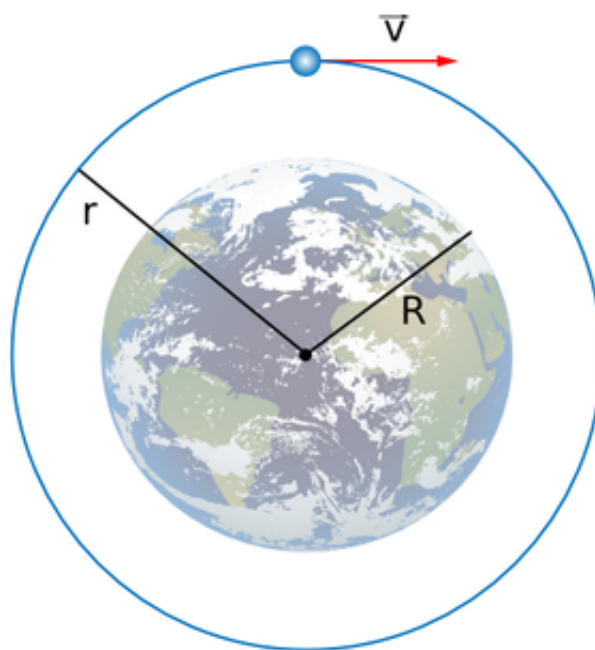
1. Co to jest układ inercjalny i układ nieinercjalny? Podaj trzy przykłady układów inercjalnych i trzy przykłady układów nieinercjalnych.
2. W jaki sposób, będąc w zamkniętym pomieszczeniu (powiedzmy, w kabinie statku), można stwierdzić, czy jest to układ inercjalny?
3. Podaj wzór na siłę bezwładności działającą na ciało o masie m w układzie poruszającym się z przyspieszeniem a . Jaki jest kierunek tej siły?
4. Czy siły bezwładności występują w układach inercjalnych? Odpowiedź uzasadnij.
5. W windzie poruszającej się ruchem jednostajnym w dół z prędkością $v = 5 \text{ m/s}$ stoi na wadze sprężynowej człowiek o masie 65 kg . Jaki ciężar wskazuje waga?
6. Jak można wywołać „sztuczną grawitację”?
7.  **Wskazówka:** W jakim celu na zakręcie tory kolejowe są pochylone w ten sposób, że zewnętrzna szyna łuku jest ułożona wyżej od wewnętrznej?
Wskazówka: Rozważ wszystkie siły działające na pociąg pokonujący zakręt.
8. Jaki kierunek i jaki zwrot ma siła odśrodkowa? Podaj przykłady sytuacji, w których odczuwasz siłę odśrodkową.
9. Wyjaśnij, dlaczego kosmonauci w statku kosmicznym na orbicie okołoziemskiej są w stanie nieważkości.
10.  **Wskazówka:** Promień Ziemi wynosi $6\,340 \text{ km}$, doba 24 h . Jak ruch wirowy Ziemi wpływa na ciężar ciał znajdujących się na jej powierzchni?

1. Oblicz ile wynosi siła odśrodkowa działająca na ciało o masie $m = 60$ kg znajdujące się na równiku.
2. Ile razy szybciej, niż obecnie, musiałyby obracać się Ziemia, aby ciała na równiku nic nie ważyły?

1.7 Prędkości kosmiczne i sztuczne satelity

Prawo grawitacji pozwala obliczyć prędkość, jaką należy nadać ciału, aby mogło okrążyć Ziemię w postaci sztucznego satelity. Pierwszym człowiekiem, który zauważył taką możliwość, był nie kto inny, ale sam Izaak Newton! Przeprowadził on następujące rozumowanie:

Niech stojące na wysokiej górze działo strzela w kierunku poziomym pociskami z coraz większymi prędkościami. Wtedy zasięg pocisków staje się coraz większy. Jeśli pominielibyśmy opory ruchu, to przy pewnej prędkości pocisk w ogóle nie upadłby na Ziemię, ale zacząłby ją okrążyć jak na *Rysunek 1.64: Przy dostatecznie dużej prędkości zasięg rzutu poziomego pocisku staje się tak duży, że pocisk okrąży Ziemię, stając się jej sztucznym satelitą* na stronie 64. W ten sposób pocisk stałby się sztucznym satelitą Ziemi.



Rysunek 1.64: Przy dostatecznie dużej prędkości zasięg rzutu poziomego pocisku staje się tak duży, że pocisk okrąży Ziemię, stając się jej sztucznym satelitą

Współczesne rakiety startują z powierzchni Ziemi, wylatują poza obszar atmosfery otaczającej Ziemię i tam, na wysokości ponad 160 km, umieszczają satelity. Chodzi o to, aby opór powietrza nie zmniejszył prędkości satelity, co nieuchronnie spowodowałoby jego upadek. Rakieta nie od razu nabywa odpowiedniej prędkości, lecz rozpędza się na określonej drodze, pokonując zarówno przyciąganie ziemskie, jak i opór powietrza. Opis ruchu rakiety w takim przypadku jest skomplikowany.

My uprościmy sobie zadanie i obliczymy prędkość, jaką należy nadać ciału, aby mogło krążyć po orbicie kołowej nad Ziemią, pomijając opór powietrza. Przyjmijmy, że promień orbity wynosi r , promień Ziemi zaś R . Prędkość satelity na orbicie oznaczmy przez v_{orb} . Wiemy już, że aby ciało mogło poruszać się po orbicie kołowej, musi na nie działać siła dośrodkowa. Rolę siły dośrodkowej spełnia siła grawitacji, możemy zatem przyrównać wyrażenia na obie te siły:

$$(\text{wzór 47}) \quad \frac{mv_{orb}^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}$$

Po uproszczeniu przez r otrzymujemy, że

$$(\text{wzór 48}) \quad mv_{orb}^2 = G \frac{Mm}{r}$$

Po przekształceniu tej zależności otrzymujemy wzór na wartość prędkości satelity na orbicie kołowej:

$$(\text{wzór 49}) \quad v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Jeżeli satelita ma orbitę bliską Ziemi, to promień orbity r bardzo mało różni się od promienia Ziemi R . Wtedy we wzorze (wzór 49 na stronie 65) możemy podstawić $R = r$ i otrzymamy wzór na tak zwaną *pierwszą prędkość kosmiczną*:

$$(\text{wzór 50}) \quad v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{gR}$$

Wykorzystaliśmy tu wzór (wzór 31 na stronie 48) dla ciał w pobliżu Ziemi, z którego wynika, że: $g = \frac{GM}{R^2}$.

Ostatecznie więc

$$(\text{wzór 51}) \quad v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}} = 7,92 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Pierwsza prędkość kosmiczna wynosi około 8 km/s, czyli jest prawie o rząd wielkości większa od typowej prędkości kuli karabinowej.

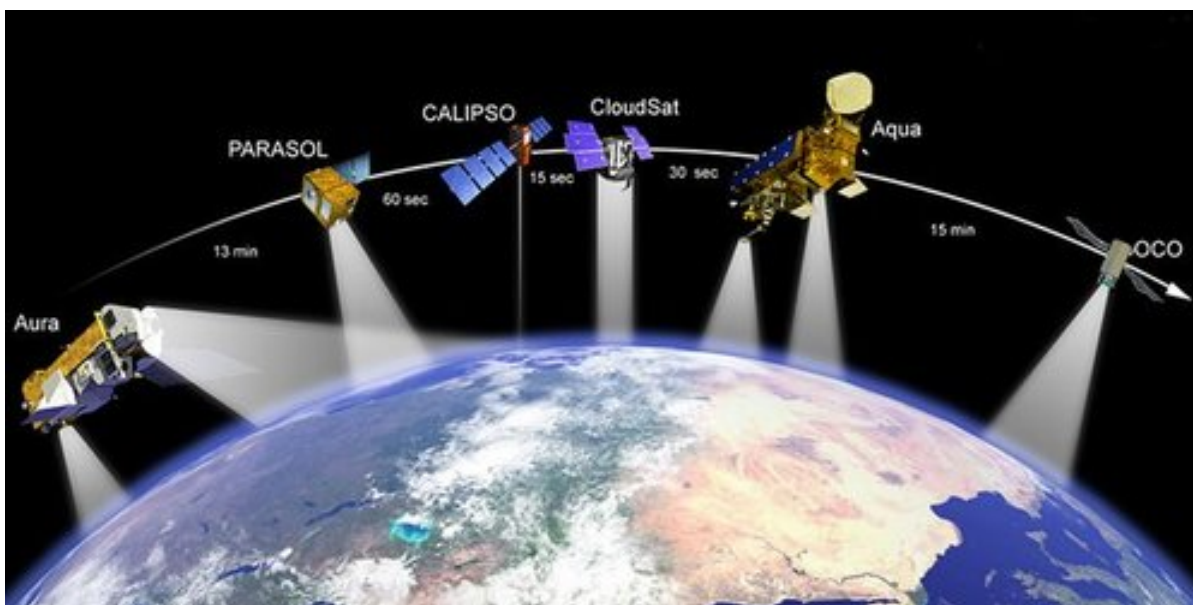
Ⓜ **Zamknięta:** *Pierwsza prędkość kosmiczna* – jest to prędkość jaką należy nadać ciału, aby mogło okrążyć Ziemię w pobliżu jej powierzchni, z pominięciem oporu powietrza. Wynosi ona: $v_1 = \sqrt{gR} = 8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Jeśli oczekujemy, że ciało ucieknie poza zasięg oddziaływania grawitacyjnego Ziemi, to musimy nadać mu jeszcze większą prędkość.

Nazywamy ją *drugą prędkością kosmiczną* v_2 lub *prędkością ucieczki*. Można wykazać, że druga prędkość kosmiczna jest większa od v_1 - pierwszej prędkości kosmicznej o czynnik pierwiastek z dwóch, czyli $v_2 = \sqrt{2} v_1$.

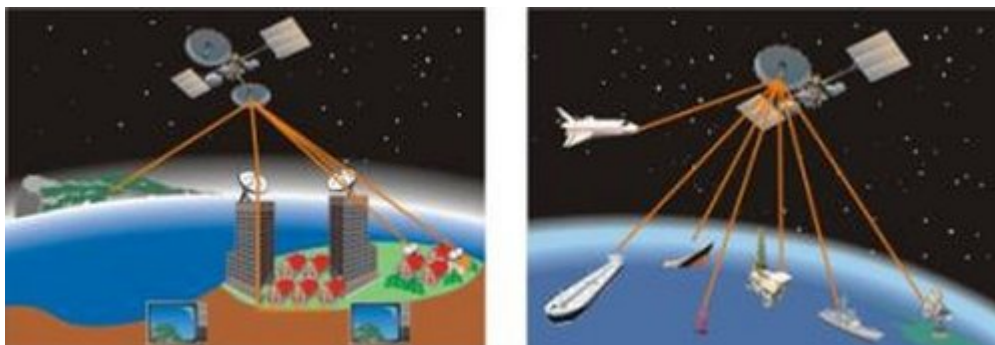
Oto wzór na prędkość ucieczki v_2 z zasięgu oddziaływania grawitacyjnego kulistego ciała kosmicznego o masie M i promieniu R :

$$(\text{wzór 52}) \quad v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$



Obecnie badania Kosmosu prowadzi się również za pomocą satelitów umieszczonych w przestrzeni ponad Ziemią, co pozwala na znaczne polepszenie jakości wyników

Rysunek 1.65: Badania Kosmosu



a) Stacjonarne satelity telewizyjne znajdujące się cały czas nad określonymi punktami Ziemi na dużej wysokości pozwalają na globalną łączność telewizyjną. b) Satelita telekomunikacyjny pozwala na przekaz informacji z różnych miejsc na kuli ziemskiej, dzięki czemu może być utrzymana stała łączność ze statkami oraz urządzeniami wiertniczymi na oceanie, oddalonymi o tysiące kilometrów od bazy. Wołanie o pomoc w przypadku niebezpieczeństwa nie może być przeoczone

Rysunek 1.66: Satelity

- Ⓡ **Zamapiętać:** Druga prędkość kosmiczna – jest to prędkość, jaką należy nadać ciału, aby mogło opuścić zasięg oddziaływania grawitacyjnego Ziemi:

$$(\text{wzór 53}) v_2 = \sqrt{2gR} = 11,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Od czego zależy okres obiegu satelity?

Prędkość satelity v_s , krążącego po kołowej orbicie o promieniu r , zgodnie ze wzorem (wzór 4 na stronie 30), jest równa:

$$(\text{wzór 54}) v_s = \frac{2\pi r}{T}$$

Ponadto na satelitę działa siła dośrodkowa (wzór 17 na stronie 40) równa sile grawitacji (wzór 28 na stronie 47), zatem

$$(\text{wzór 55}) \frac{mv_s^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}$$

Po uproszczeniu przez r i m otrzymujemy, że

$$(\text{wzór 56}) v_s^2 = G \frac{M}{r}$$

Wstawiając tu wzór (wzór 54 na stronie 66) otrzymamy

$$(\text{wzór 57}) \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = G \frac{M}{r}$$

Po przekształceniach mamy

$$(\text{wzór 58}) \frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

Prawa strona równania (wzór 58 na stronie 66) jest stała, więc sześciątka promienia orbity r^3 oraz kwadrat okresu obiegu satelity T^2 to wielkości wprost proporcjonalne. Korzystając z tego wzoru można wyznaczyć okres ruchu satelity w zależności od promienia orbity:

$$(\text{wzór 59}) T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} \cdot r^3$$

Im większy promień orbity, tym dłuższy okres ruchu satelity.

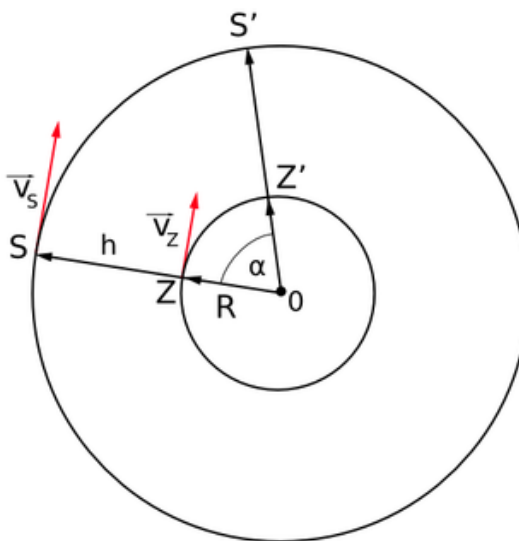
Wskazówka: Zależność ta dotyczy nie tylko satelitów krążących wokół Ziemi, ale również planet okrążających Słońce (oczywiście w tym przypadku M oznacza masę Słońca). Proporcjonalność sześciątka promienia orbity planety r^3 oraz kwadratu okresu ruchu planety T^2 odkrył w pierwszej połowie XVII wieku Kepler i zależność ta znana jest jako trzecie prawo Keplera.

Skoro okres obiegu satelity wzrasta wraz z promieniem orbity, można znaleźć orbitę, dla której okres ruchu będzie równy okresowi ruchu wirowego Ziemi. Satelita poruszający się w płaszczyźnie równika po takiej orbicie będzie znajdował się zawsze nad tym samym punktem Ziemi. Takiego satelity nazywamy *satelitą geostacjonarnym*.

Przykład: Satelita telekomunikacyjny

Telekomunikacyjny satelita stacjonarny znajduje się stale nad jednym punktem równika Ziemi. Na jakiej wysokości h znajduje się satelita? Z jaką prędkością okrąża Ziemię? Promień Ziemi wynosi $R = 6\,370$ km. Czas trwania doby $T = 24$ h = 23 h 56 min 4 s = 86 164 s.

Satelita w swoim ruchu orbitalnym może utrzymywać się stale nad punktem Z tylko wtedy, gdy podczas obrotu Ziemi, w określonym czasie, promień OZ (R) obróci się o ten sam kąt α co i promień OS ($R + h$)



(R)

Rysunek 1.67: W punkcie Z znajdującym się na równiku na powierzchni Ziemi znajduje się obserwator, nad nim na wysokości h w punkcie S znajduje się satelita stacjonarny

Rozwiązanie: Oznaczmy przez r promień orbity satelity. Oczywiście:

$$(\text{wzór 60}) r = R + h$$

Promień satelity wyznaczamy ze wzoru (wzór 58 na stronie 66)

$$(\text{wzór 61}) r^3 = \frac{GMT^2}{4\pi^2}$$

Możemy tu wykorzystać zależność ([wzór 31](#) na stronie 48), którą zastosowaliśmy przy „ważeniu Ziemi”

$$(\text{wzór 62}) \quad mg = G \frac{mM}{R^2}$$

Stąd

$$(\text{wzór 63}) \quad gR^2 = GM$$

Po wstawieniu tego wzoru do ([wzór 61](#) na stronie 67) otrzymamy

$$(\text{wzór 64}) \quad r = \sqrt[3]{\frac{gR^2T^2}{4\pi^2}}$$

Podstawiając dane $T = 86\,164$ s, $R = 6,37 \cdot 10^6$ m, $g = 9,81$ m/s² otrzymujemy, że promień orbity satelity stacjonarnego wynosi:

$$(\text{wzór 65}) \quad r = 42\,159 \text{ km}$$

Czyli h – wysokość satelity nad powierzchnią Ziemi zgodnie z ([wzór 60](#) na stronie 67) wynosi:

$$(\text{wzór 66}) \quad h = r - R = 35\,789 \text{ km}$$

Mając r – promień orbity satelity możemy łatwo ze wzoru ([wzór 54](#) na stronie 66) obliczyć jego prędkość:

$$(\text{wzór 67}) \quad v_s = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 42\,159 \text{ km}}{86\,164 \text{ s}} = 3,073 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 11\,062 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Jak widzisz, jest to prędkość bardzo duża w skali typowych zjawisk zachodzących na Ziemi.

Warto się jeszcze zastanowić, z jaką prędkością porusza się punkt Z , a więc i wszystkie przedmioty spoczywające na równiku Ziemi:

$$(\text{wzór 68}) \quad v_z = \frac{2\pi R}{T}$$

czyli

$$(\text{wzór 69}) \quad v_z = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6\,370 \text{ km}}{24 \text{ h}} = 464,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1\,671 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Uzyskana prędkość również jest duża (odpowiadająca prędkości szybkich samolotów odrzutowych), ale jest ona kilkakrotnie mniejsza od prędkości satelity stacjonarnego.



Wskazówka: *Satelita stacjonarny* znajduje się jakby na szczycie niezwykle wysokiej niewidzialnej wieży, obejmując swym zasięgiem około 1/3 powierzchni Ziemi. Współczesna technika satelitarna daje możliwości, które inżynierom lądowym nawet się nie śniły. Należy sobie wyobrazić, jakie ilości materiałów konieczne byłyby do zbudowania wieży o takiej wysokości oraz jak szeroka u podstawy musiałaby być ta wieża (porównaj np. z wieżą Eiffla; byłaby ona wyższa od wieży Eiffla około 120 tysięcy razy). Oczywiście jest, że przedsięwzięcie takie byłoby niemożliwe do zrealizowania.

Pytania i problemy

1. Dlaczego satelity są umieszczane na wysokościach ponad 160 km nad powierzchnią Ziemi?
2. Podaj definicję pierwszej prędkości kosmicznej. Ile razy ta prędkość jest większa od prędkości maksymalnej samochodu na autostradzie 130 km/h?
3. Podaj definicję drugiej prędkości kosmicznej. Ile razy ta prędkość jest większa od pierwszej prędkości kosmicznej?

4. W przykładzie *Przykład: Satelita telekomunikacyjny* na stronie 67 obliczaliśmy wysokość nad Ziemią, na jakiej krąży satelita stacjonarny: $h = 35\,789$ km. Czy może on znajdować się wyżej lub niżej od tej wysokości, będąc nadal satelitą stacjonarnym? Odpowiedź uzasadnij.
5. Dlaczego telewizyjne satelity stacjonarne krążą nad równikiem? Czy można byłoby umieścić satelitę stacjonarnego tak, aby jego orbita znajdowała się cały czas nad równoleżnikiem, np. przebiegającym przez Warszawę? **Wskazówka:** Gdzie znajduje się środek orbity satelity?
6. Dlaczego satelitarne anteny telewizyjne w Polsce są nachylone w stosunku do poziomu? Jak najkorzystniej ukierunkował byś satelitarną antenę telewizyjną, będąc na równiku?
7. Kosmonauci, zanim wylądowali na Księżycu, okrążyli go na niewielkiej wysokości nad jego powierzchnią. Pojazd kosmonautów stał się wtedy sztucznym satelitą Księżyca. Poruszał się z pierwszą prędkością kosmiczną dla Księżyca. Oblicz, ile wynosi pierwsza prędkość kosmiczna dla sztucznego satelity Księżyca. Wykorzystaj dane: promień Księżyca $R_K = 1\,737$ km, przyspieszenie grawitacyjne na Księżycu $g_K = 1,62$ m/s²
8. W przyszłości Księżyc być może będzie stacją przesiadkową dla pojazdów kosmicznych, kierujących się na inne planety. Oblicz, ile wynosi prędkość ucieczki z Księżyca, czyli druga prędkość kosmiczna dla Księżyca. Wykorzystaj dane z poprzedniego zadania.

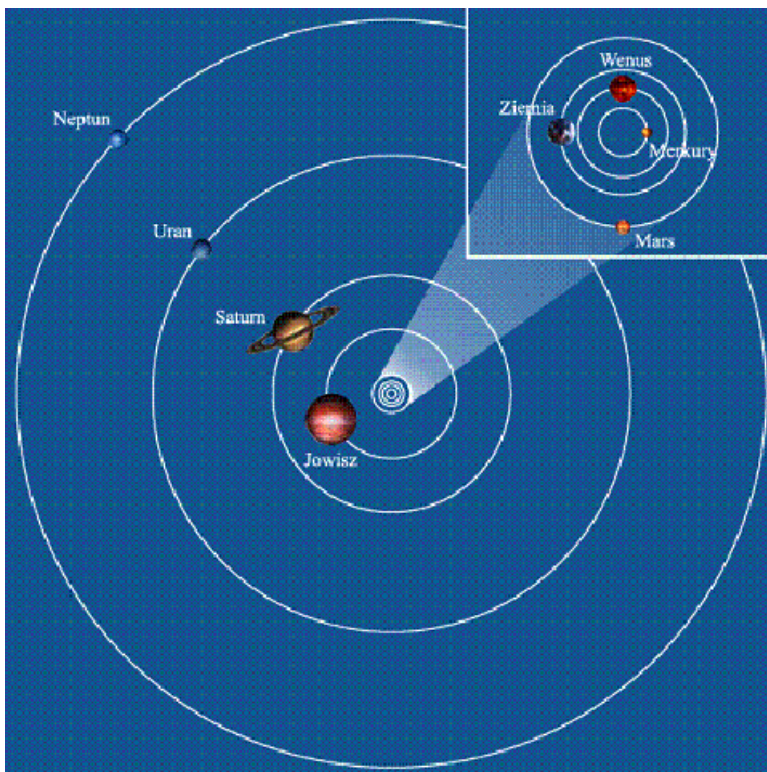
1.8 Układ Słoneczny

Uważa się, że Układ Słoneczny powstał około 4,6 miliarda lat temu. Elementy Układu Słonecznego to:

- Słońce – typowa gwiazda Drogi Mlecznej,
- 8 planet,
- ponad 160 księżyców,
- niezliczone planetoidy i komety,
- pył międzyplanetarny.

i Wskazówka: Do niedawna uznawano, że Układ Słoneczny ma 9 planet. W 2006 roku dziewiąta planeta, *Pluton*, została „zdegradowana”. Uznano ją za tzw. *planetę karłowatą* i zaliczono do pasa planetoid występującego na krańcach Układu Słonecznego – tzw. Pasa Kuipera.

Orbity poszczególnych planet z zachowaniem przybliżonej skali przedstawione są na *Rysunek 1.68: Orbity planet we właściwej skali* na stronie 70.



Średni promień orbity Saturna jest ok. 10 razy większy od ziemskiego, Urana – ok. 20 razy, Neptuna – ok. 30 razy

Rysunek 1.68: Orbity planet we właściwej skali

Astronomowie mierzą odległości w Układzie Słonecznym w jednostkach astronomicznych (w skrócie j.a. lub AU).



Ważne: 1 AU - *jednostka astronomiczna* – jest to średnia odległość od Ziemi do Słońca.

1 AU = $1,496 \cdot 10^8$ km.



Wskazówka: *Merkury*, planeta najbliższa Słońca, znajduje się w odległości 0,39 AU (3,2 minuty świetlnej). Jowisz jest oddalony od Słońca o 5,20 AU, a najdalsza planeta, Neptun, aż o 30,06 AU (Neptun – ok. 4,25 godziny świetlnej).

Planety w swoim ruchu wykazują ciekawe prawidłowości:

- Orbity wszystkich planet leżą mniej więcej w jednej płaszczyźnie, która pokrywa się, dość dobrze z płaszczyzną równika słonecznego. Płaszczyzna ta jest z kolei prawie tożsama z tzw. płaszczyzną *ekliptyki*, w której Ziemia obiega Słońce.
- Wszystkie planety poruszają się w swoim ruchu orbitalnym w tym samym kierunku, zgodnym z kierunkiem obrotu Słońca.
- Większość planet obraca się dookoła swej osi w tym samym kierunku zgodnym z kierunkiem ich ruchu orbitalnego. Wyjątkowe pod tym względem są Uran i Wenus - wirują one w kierunku przeciwnym.

Jednakowy kierunek ruchu orbitalnego planet i wirowego ruchu Słońca sugeruje, że Układ Słoneczny powstał z ogromnego, wirującego dysku gazowo-pyłowego. Siła grawitacji spowodowała, że materia zapadała się do środka dysku i w ten sposób powstało Słońce, zawierające większość masy dysku pierwotnego. Z pozostałych resztek pyłów i gazów z czasem uformowały się planety, których ruch naśladował wirowanie dysku pierwotnego.

Wiek Układu Słonecznego można oszacować, badając skład chemiczny skał ziemskich i meteorytów docierających na Ziemię z kosmosu. O tej metodzie datowania, wykorzystującej zjawisko promieniotwórczości, dowiesz się z dalszej części podręcznika.



Wskazówka: Zobacz też <http://www.oocities.org/extrascience/discovered.htm>



Orbity zostały narysowane bez zachowania właściwej skali

Rysunek 1.69: Układ Słoneczny: planety oraz pasy planetoid

Planety zewnętrzne i wewnętrzne

Rysunek 1.70: Obejrzyj film

Pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza znajduje się wiele małych planetoid w postaci odłamków skalnych o rozmiarach od kilku milimetrów do ok. 800 km. Tworzą one tzw. *pas planetoid* – patrz [Rysunek 1.69: Układ Słoneczny: planety oraz pasy planetoid](#) na stronie 71.

Poza orbitą Neptuna, na krańcach Układu Słonecznego, również znaleziono wiele obiektów o niewielkich rozmiarach okrążających Słońce. Znane są dwa olbrzymie skupiska występowania tego typu ciał ([Rysunek 1.69: Układ Słoneczny: planety oraz pasy planetoid](#) na stronie 71). Pierwszy z nich, *Pas Kuipera*, rozciąga się za orbitą Neptuna w odległości od 30 AU do około 50 AU. Zawiera on prawdopodobnie ponad 70 000 obiektów o średnicy powyżej 100 km. Do chwili obecnej odkryto ich ponad 1 000. Jednym z obiektów należących do Pasa Kuipera jest Pluton. Drugim skupiskiem niewielkich obiektów jest *dysk rozproszony* rozciągający się na odległość do około 100 AU. W 2005 roku odkryto tam planetę karłowatą Eris, większą o 27% od Plutona. Pas Kuipera i dysk rozproszony to najdalsze i najzimniejsze obiekty w Układzie Słonecznym. Przypuszcza się, że stamtąd właśnie pochodzą komety, które po wydłużonych orbitach zbliżają się do Słońca.

Wskazówka: Trudno sobie uzmysłowić jak wielkie odległości występują w Układzie Słonecznym. Wyobraź sobie, że Układ Słoneczny został pomniejszony do „codziennych” rozmiarów. Ludzie najdalej dotarli do Księżyca – niech więc odległość z Ziemi do Księżyca wynosi 1 mm. Odległość do Marsa wynosi w tej skali 31 mm, do Jowisza – 26 cm. Najdalsza planeta, Neptun, jest już w odległości 1,8 m, pas Kuipera rozciąga się do 3 m, a dysk rozproszony aż do 6 m. Nasze „zdobywanie kosmosu” jest w powijakach – ledwie wychylił się za próg!

Ruch planet w Układzie Słonecznym - prawa Keplera

Prawa Keplera

Rysunek 1.71: Obejrzyj film

Astronom **Johannes Kepler** był gorącym zwolennikiem teorii Kopernika. Jeszcze zanim Newton odkrył prawo powszechnego ciężenia poszukiwał on praw rządzących ruchem planet, żeby udowodnić, że krążą one wokół Słońca. W wyniku swoich dociekań sformułował trzy prawa, znane dziś jako *Prawa Keplera*. Są to prawa dosyć uniwersalne – oprócz tego, że opisują ruch planet wokół Słońca, możemy stosować je również do opisu ruchu komet i planetoid okrążających Słońce, a także księżyców czy satelitów okrążających dowolną planetę.



Rysunek 1.72: Johannes Kepler (1671-1630) - astronom

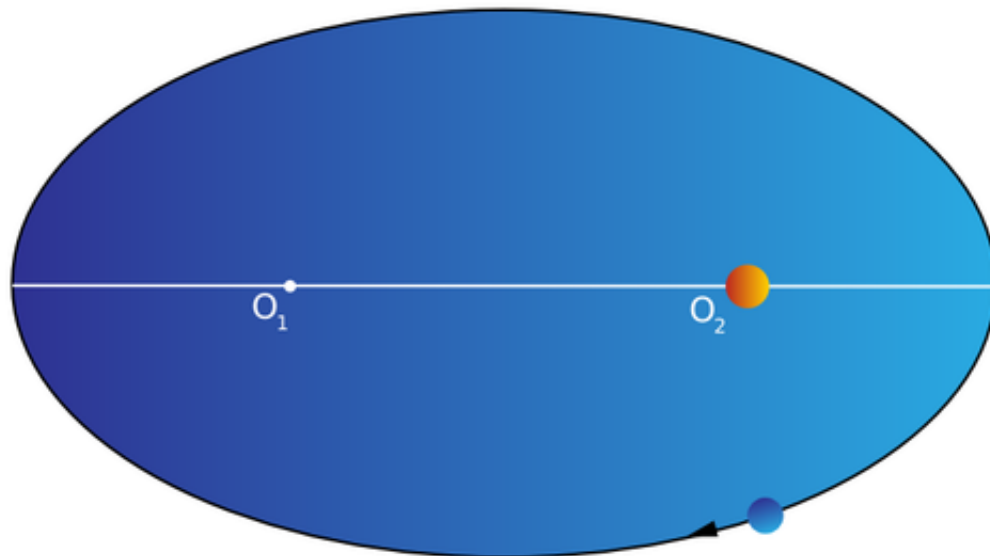
Pływy

Rysunek 1.73: Obejrzyj film

Pierwsze prawo Keplera

Kepler badał położenia planet. Stwierdził, na przykładzie Marsa, że tor jaki zakresła ta planeta w swoim ruchu wokół Słońca jest bardzo zbliżony do elipsy. Zaproponował więc, jako pierwszy w historii astronomii, by zrezygnować z wizji planet poruszających się po systemach okręgów (przypomnij sobie epicykle z rozdziału [1.1 Jak rodził się współczesny obraz Kosmosu i Ziemi](#) na stronie 4), a w zamian przyjąć, że poruszają się one po elipsach.

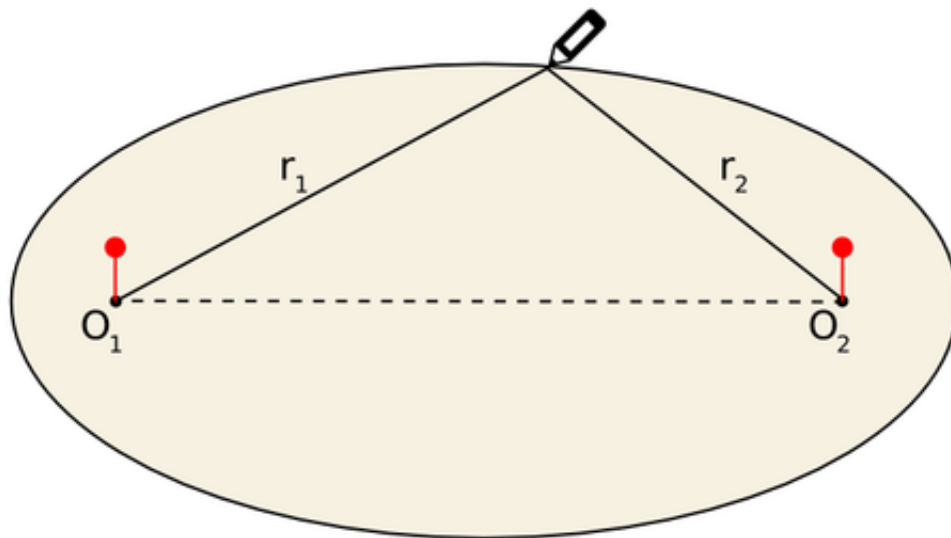
® **Zamapiętać:** *I prawo Keplera:* Każda planeta krąży po orbicie eliptycznej, a Słońce znajduje się w jednym z dwóch ognisk elipsy ([Rysunek 1.74: Pierwsze prawo Keplera](#) na stronie 73).



Planeta krąży po orbicie eliptycznej, a Słońce znajduje się w jednym z dwóch ognisk elips

Rysunek 1.74: Pierwsze prawo Keplera

Elipsa jest to krzywa zamknięta w postaci spłaszczonego okręgu. Możesz ją wykreślić w sposób przedstawiony na [Rysunek 1.75: Sposób wykreślenia elipsy](#) na stronie 74. Elipsę można zdefiniować, jako zbiór punktów na płaszczyźnie, dla których suma odległości r_1 i r_2 od dwóch ustalonych punktów O_1 i O_2 (tzw. ognisk) jest stała.



w dwóch punktach O_1 i O_2 wbijamy szpilki, na które nakładamy pętlę z nitki i ostrzem ołówka kreślimy elipsę

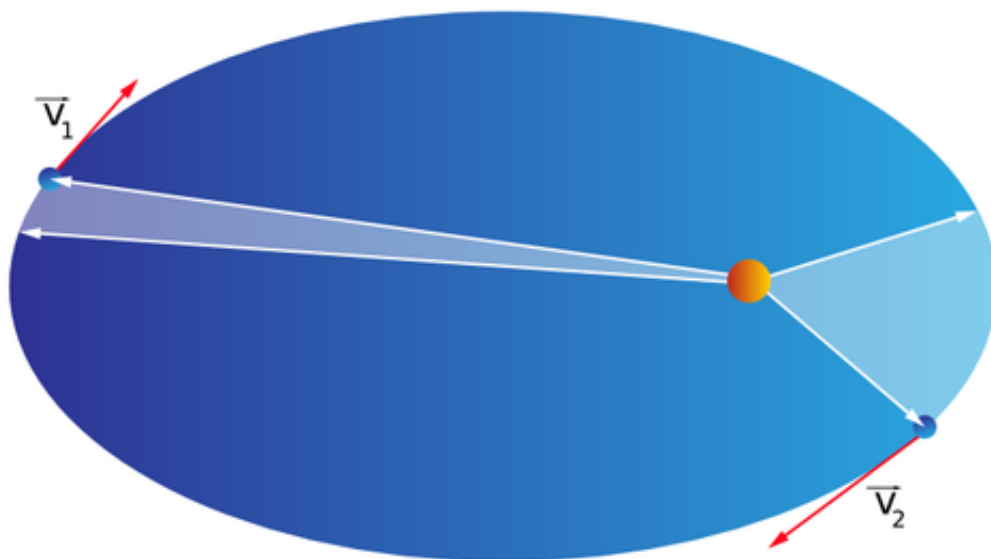
Rysunek 1.75: Sposób wykreślenia elipsy

Okrąg jest szczególnym przypadkiem elipsy, w którym oba ogniska pokrywają się ze środkiem okręgu. Orbity planet naszego Układu słonecznego są elipsami spłaszczonymi w stopniu bardzo niewielkim, dlatego w wielu zagadnieniach można je z powodzeniem traktować jako orbity kołowe.

Drugie prawo Keplera

Badając położenia planet Kepler stwierdził także, iż planety nie poruszają się po swych eliptycznych orbitach ruchem jednostajnym. Największą prędkość planeta osiąga, gdy jest najbliżej Słońca, zaś najmniejszą gdy jest najbardziej od Słońca oddalona. Zgodnie z ówczesnym obyczajem naukowym Kepler poszukiwał wielkości charakterystycznej dla ruchu każdej planety, która byłaby stała. Taką wielkością, nieco „abstrakcyjną”, okazało się być pole powierzchni zakreślane przez promień wodzący planety w ustalonych odstępach czasu.

- Ⓡ **Zamapiętać:** *II prawo Keplera:* Promień wodzący poprowadzony ze środka Słońca do środka planety zakreśla równe pola powierzchni w równych odstępach czasu (*Rysunek 1.76: Ilustracja drugiego prawa Keplera* na stronie 75).



Promień wodzący poprowadzony ze środka Słońca do środka planety zakreśla równe pola powierzchni w równych odstępach czasu

Rysunek 1.76: Ilustracja drugiego prawa Keplera

- ⚠ **Ważne:** *Aphelium* – punkt orbity planety najbardziej oddalony od Słońca.
- ⚠ **Ważne:** *Peryhelium* – punkt orbity planety znajdujący się w najbliższej odległości od Słońca.

Aby planeta mogła zakreślać równe pola powierzchni w równych odstępach czasu to musi mieć mniejszą prędkość (v_1), gdy jest w aphelium, a większą (v_2) – gdy jest w peryhelium.



W punkcie P - peryhelium orbity - prędkość planety v_P ma największą wartość, zaś w punkcie A - aphelium orbity - prędkość planety v_A ma wartość najmniejszą

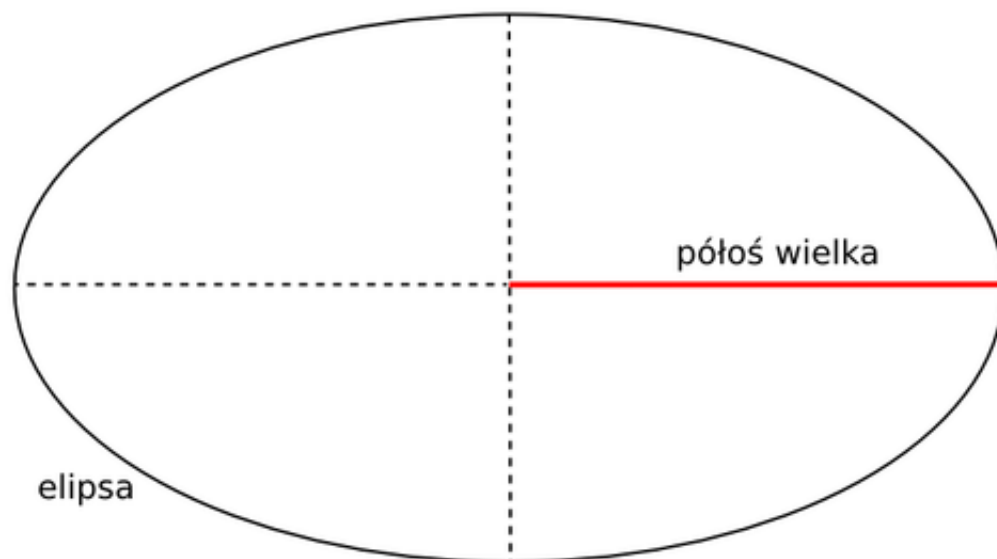
Rysunek 1.77: Prędkość planety na orbicie

Trzecie prawo Keplera

W czasach Keplera znana była reguła, że im planeta krąży dalej od Słońca, tym dłuższy jest okres jej obiegu. Kepler poszukiwał takiego związku pomiędzy rozmiarem orbity planety a okresem jej obiegu, który można byłoby wyrazić za pomocą wielkości stałej, jednakowej dla wszystkich planet. Po wielu próbach odkrył, że iloraz sześciastu wielkiej półosi a orbity planety i kwadratu T okresu jej obiegu jest taki sam dla wszystkich planet. Zapisał to jako:

$$(\text{wzór 70}) \quad \frac{a^3}{T^2} = \text{const}$$

- Ⓜ **Zamapiętać: III prawo Keplera:** Sześciastu wielkich półosi orbit dwóch dowolnych planet obiegających tę samą gwiazdę mają się tak do siebie, jak kwadraty ich okresów obiegu.



Osią wielką elipsy nazywamy największą odległość między punktami elipsy. Połowa osi wielkiej to półoś wielka

Rysunek 1.78: Elipsa

W przypadku orbit kołowych dwóch planet, korzystamy z ich promieni R_1 i R_2 (okrąg jest szczególnym przypadkiem elipsy). Otrzymujemy związek:

$$(\text{wzór 71}) \quad \frac{R_1^3}{R_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}$$

gdzie T_1 i T_2 to okresy obiegu tych planet wokół Słońca.

Newton udowodnił, że prawa Keplera wynikają z prawa powszechnego ciążenia.

Korzystając z trzeciego prawa Keplera, możemy obliczyć, ile trwa rok na dowolnej planecie Układu Słonecznego (pod warunkiem, że znana jest odległość do niej).

Przykład: Ile trwa rok na Neptunie

Obliczymy, ile trwa rok na Neptunie, najdalszej planecie Układu Słonecznego. Wiemy, że rok ziemski, czyli okres obiegu Ziemi wokół Słońca, wynosi $T_Z = 365,25$ dni (jedna doba = 23 h 56 min 4 s = 86 164 s). Promień orbity Ziemi to $R_Z = 1$ AU. Promień orbity Neptuna (wyrażony w jednostkach astronomicznych) wynosi $R_N = 30,06$ AU.

Rozwiązanie: Do wzoru (wzór 71 na stronie 77) podstawiamy dane liczbowe:

$$(\text{wzór 72}) \quad \frac{R_N^3}{R_Z^3} = \frac{T_N^2}{T_Z^2} \rightarrow \frac{(30,06 \text{ AU})^3}{(1 \text{ AU})^3} = \frac{(T_N \text{ dni})^2}{(365,25 \text{ dni})^2}$$

gdzie T_N jest okresem obiegu Neptuna wokół Słońca, wyrażonym w dniach. Jednostki odległości w powyższym wzorze skraca się, więc nie musimy ich zamieniać.

$$(\text{wzór 73}) T_N = \sqrt{30,06^3} \cdot 365,25 \text{ dni} = 60\,196,84 \text{ dni} = 164,8 \text{ lat}$$

Pytania i problemy

1. Wymień składniki Układu Słonecznego. Ile planet wchodzi w jego skład?
2. Opisz kształt Układu Słonecznego. Jak poruszają się planety?
3. Ile wynosi promień orbity Ziemi wyrażony w jednostkach astronomicznych? Jak jest zdefiniowana jednostka astronomiczna?
4. Podaj pierwsze prawo Keplera. Opisz elipsę: czym różni się od okręgu. Co to są ogniska elipsy?
5. Sformułuj drugie prawo Keplera. Czy planeta porusza się po orbicie ruchem jednostajnym? W których punktach planeta porusza się najszybciej i najwolniej?
6. Podaj trzecie prawo Keplera. Znając promień orbity Marsa (w przybliżeniu kołowej) $R_M = 1,5237 \text{ AU}$, oblicz ile wynosi rok marsjański. Promień orbity Ziemi (w przybliżeniu kołowej) to $R_Z = 1 \text{ AU}$ oraz rok ziemski $T_Z = 365,25 \text{ dni}$.

1.9 Ewolucja i klasyfikacja gwiazd

Uwaga! Ten rozdział będzie łatwiej zrozumieć po wcześniejszym zapoznaniu się z rozdziałem *Fizyka jądrowa* na stronie 159.

Gwiazdy

Rysunek 1.79: Obejrzyj film

Narodziny gwiazdy

Jak powstają gwiazdy? Obecnie uważa się, że w procesie powstawania gwiazdy można wyróżnić pewne charakterystyczne etapy – przedstawiono je na *Rysunek 1.80: Narodziny typowej gwiazdy* na stronie 79.

Nie mamy żadnych informacji, pochodzących z bezpośrednich obserwacji, o tym jak wygląda pierwszy etap formowania gwiazdy. Istnieją jednak przesłanki, by sądzić, że wszystko zaczyna się, kiedy chmura gazu i pyłu kosmicznego, w której dominujący udział ma wodór, gromadzi się wokół przypadkowego zagęszczenia. Może się też zdarzyć, że takie zagęszczenie jest wywołane strumieniem materii, wyrzuconej z innej gwiazdy, która sama wybuchła.

i Wskazówka: Niech nas nie zmyli określenie „obłok” – w naszych ziemskich warunkach byłby on doskonałą próżnią! Materia tworząca przeciętny obłok ma bowiem gęstość rzędu kilkudziesięciu atomów w 1 cm^3 (dla porównania w ziemskiej atmosferze na poziomie morza w tej samej objętości znajduje się ok. 10^{19} atomów) i temperaturę 100-150 K. Rozmiary obłoków, z których powstają gwiazdy mogą mieć średnice do kilkudziesięciu lat świetlnych i masę nawet tysięcy mas Słońca.

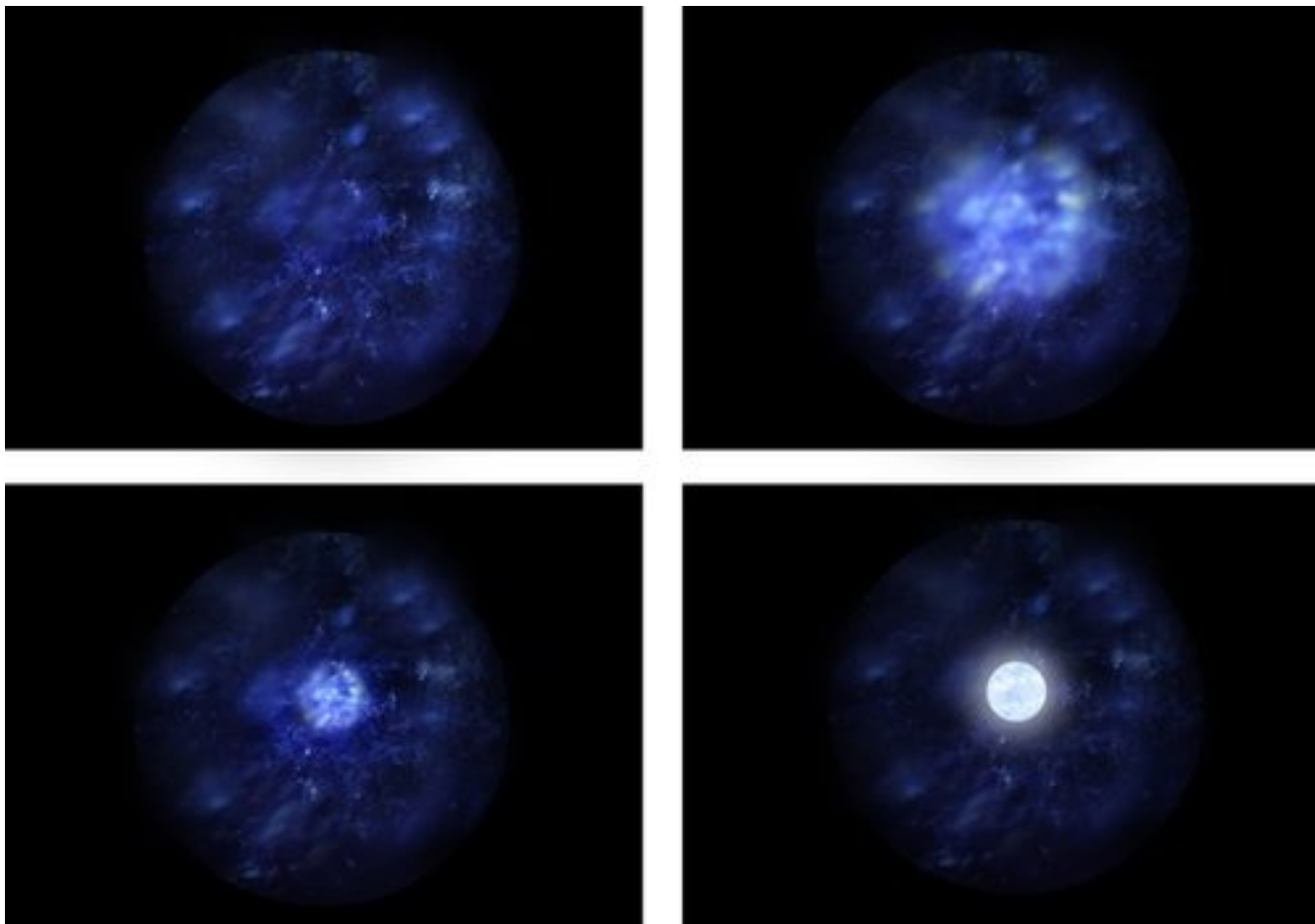
Na skutek grawitacji obłok kurczy się. W miarę kurczenia, wrasta jego temperatura. Powstaje dysk z kulistą centralną częścią – *protogwiazdą*. Cała chmura gazowo-pyłowa obraca się wokół własnej osi początkowo wolno, a w miarę kurczenia się coraz szybciej. Proces kurczenia się i powstawania protogwiazdy może trwać kilkaset tysięcy lat.

i Wskazówka: Rotację kurczącego się obłoku można porównać do ruchu tancerki wykonującej piruet. Rozpoczyna ona obroty z rękami wyciągniętymi w bok. Gdy przyciąga ręce do ciała, zaczyna wirować coraz szybciej.

Gdy temperatura protogwiazdy osiągnie odpowiednio wysoką wartość, rozpoczyna się w niej proces syntezy (łączenia) jąder wodoru w jądra helu. Energia wydzielana w tym procesie powstrzymuje grawitacyjne zapadanie. Gwiazda zaczyna jasno świecić. W taki sposób rozpoczyna się najdłuższy i względnie stabilny okres, bo stanowiący około 90% całego czasu jej życia. Czas stabilnego życia gwiazdy zależy przede wszystkim od jej masy. Najbardziej masywne gwiazdy żyją „najszybciej” - zaledwie kilkadziesiąt milionów lat; najmniej masywne gwiazdy mogą żyć

nawet kilkadziesiąt miliardów lat. Nasze Słońce ma za sobą mniej więcej połowę swego stabilnego życia, które potrwa jeszcze około czterech miliardów lat. Wynika to z teoretycznych modeli opisujących ewolucję gwiazd typu Słońca.

Co się dzieje z pozostałą częścią dysku pyłowo-gazowego otaczającego rodzącą się gwiazdę? Mamy poważne argumenty na to, by przypuszczać, że powstają z niej mniejsze skupiska materii, z których z czasem formują się planety krążące wokół centralnej gwiazdy. Nasza Ziemia (oraz inne planety naszego układu) powstała niewiele później niż Słońce. Znajduje to potwierdzenie w badaniach geologicznych najstarszych skał ziemskich.



a) początek procesu: chmura powolnie rotująca, b) pod wpływem grawitacji cząstki tworzą zagęszczenie w centrum, c) dysk z centralną częścią kulistą – protogwiazdą, d) rozpoczął się proces syntezy jąder wodoru w centrum gwiazdy – gwiazda jasno świeci

Rysunek 1.80: Narodziny typowej gwiazdy

Końcowe stadia ewolucji gwiazd

Biały karzeł

Jest ostatnim etapem ewolucji niezbyt dużej gwiazdy (porównywalnej rozmiarami i masą do naszego Słońca), w której przez większość życia zachodziły reakcje syntezy jąder wodoru w jądra helu. Gdy zużyty zostaje prawie cały wodór, a w rdzeniu gwiazdy pozostają jądra helu, reakcja termojądrowa ustaje i znów górę bierze grawitacja. Powoduje ona kurczenie się rdzenia gwiazdy. Jednocześnie warstwy zewnętrzne gwiazdy rozszerzają się wielokrotnie – powstaje tzw. czerwony olbrzym. W zapadającym się rdzeniu gwiazdy temperatura wzrasta do wartości, które umożliwiają rozpoczęcie reakcji syntezy jąder helu. Powstają wtedy cięższe jądra: węgla i tlenu.

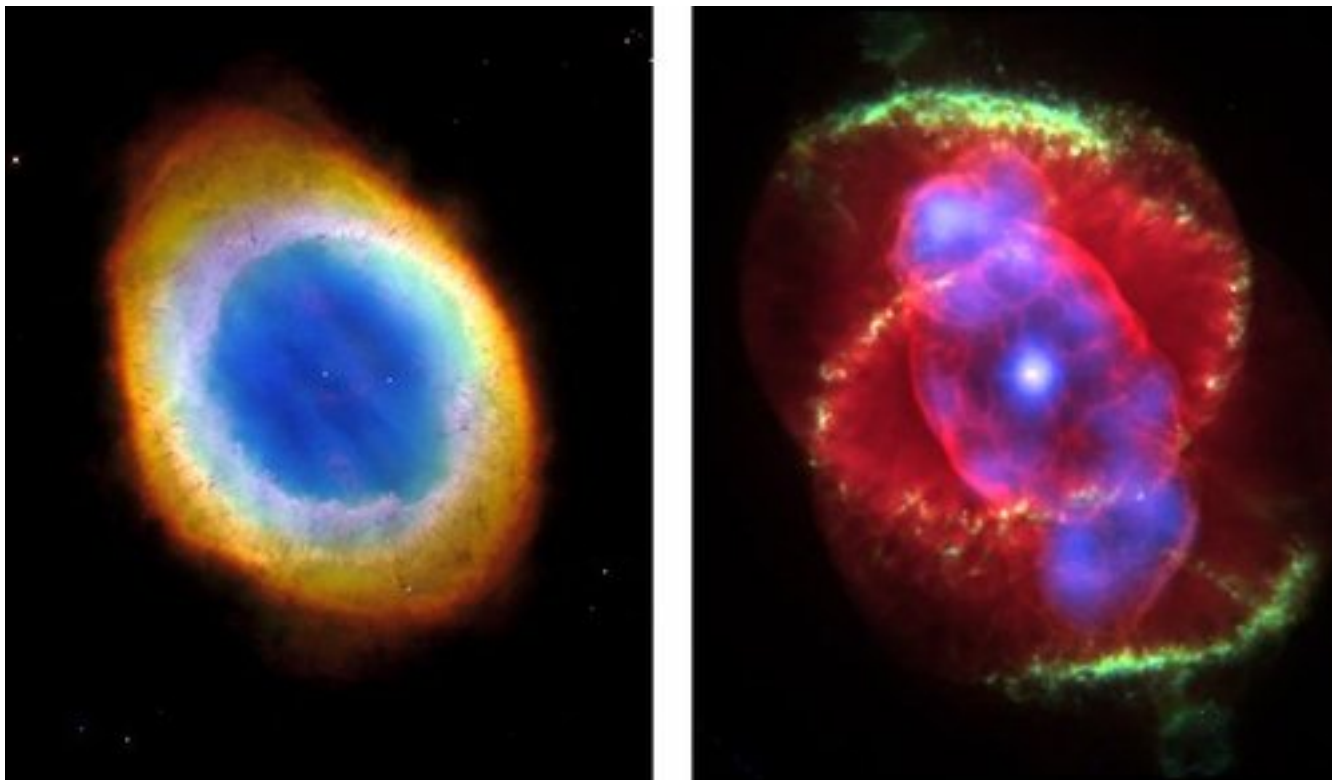
Łączenie jąder helu wymaga wyższej temperatury niż łączenie jąder wodoru, ponieważ jądra mają większe ładunki niż jądra wodoru (protony) i silniej odpychają się siłami elektrostatycznymi. Potrzebna jest większa energia kinetyczna, czyli większa temperatura, aby przezwyciężyć to odpychanie.

Po wyczerpaniu się zapasu helu, gdy rdzeń gwiazdy wypełniają jądra węgla i tlenu, synteza jądrowa ustaje i nie zrównoważone siły grawitacji ponownie powodują zapadnięcie się jądra wnętrza gwiazdy i utworzenie *białego karła*. W tym procesie zostają odrzucone zewnętrzne warstwy gwiazdy. Biały karzeł to gwiazda o rozmiarach podobnych do rozmiaru Ziemi i gęstości rzędu 10^6 g/cm^3 , w której ustały procesy syntezy termojądrowej. Biały karzeł początkowo ma wysoką temperaturę i dlatego świeci białym światłem. W ciągu kolejnych miliardów lat stopniowo stygnie, świecąc coraz słabiej.

- Wskazówka:** Gęstość materii białego karła jest milion razy większa niż gęstość wody. Oznacza to, że ilość tej materii mieszcząca się na łyżeczce od herbaty waży 5 ton!

Zewnętrzne warstwy gwiazdy, odrzucone w procesie powstawania białego karła, tworzą tzw. mgławice planetarne.

- Wskazówka:** *Mgławica planetarna* nie ma tak naprawdę nic wspólnego z planetami. Jej nazwa wzięła się z czysto powierzchownego podobieństwa teleskopowych obrazów obu tych rodzajów obiektów.



Rysunek 1.81: Mgławice planetarne

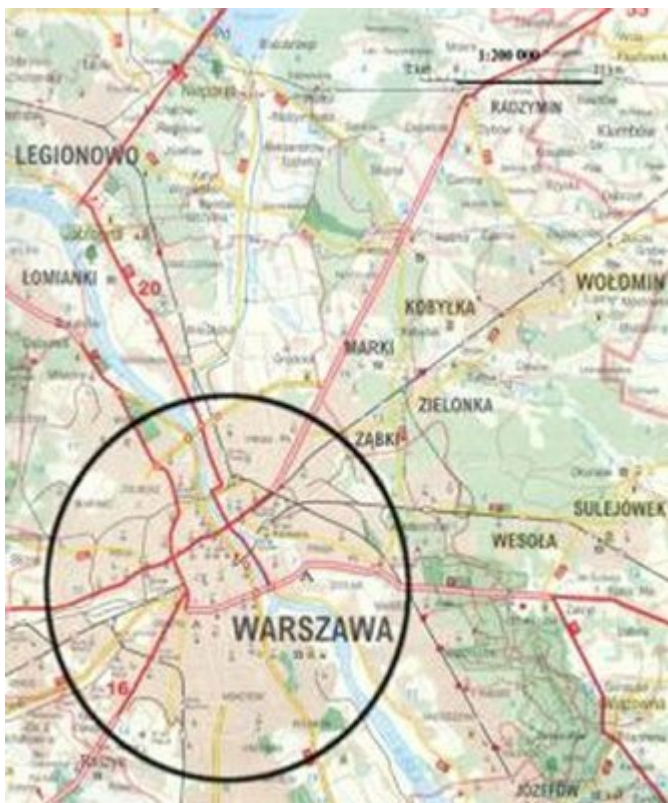
Tak kończą swój żywot gwiazdy niewielkie, których masy nie przekraczają 3 mas Słońca. Wewnątrz gwiazd bardziej masywnych temperatura osiąga wartość umożliwiającą syntezę jąder cięższych niż węgla i tlenu. Powstają jądra magnezu, krzemu, siarki i w końcu jądra żelaza. Na jądrach żelaza kończy się proces nukleosyntezy w gwiazdach. Podczas syntezy jąder lżejszych od żelaza energia wydziela się (są to reakcje egzoenergetyczne), natomiast synteza jąder cięższych od żelaza wymagałaby dostarczenia energii z zewnątrz (byłyby to reakcje endoenergetyczne).

Gwiazdy neutronowe i pulsary

W momencie ustania syntezy jądrowej w dużej gwiazdzie wydarzenia przybierają bardzo dynamiczny charakter – gwiazda wybuchła jako tzw. *supernowa*. Otoczka gwiazdy zostaje gwałtownie odrzucona, zaś rdzeń, o masie zbliżonej do masy Słońca i składający się głównie z jąder żelaza, kurczy się gwałtownie, zgniatany gigantyczną siłą grawitacji. W ułamkach sekund jego promień zmniejsza się od kilku tysięcy do około dziesięciu kilometrów. Gęstość materii osiąga wartości charakterystyczne dla jąder atomowych. W tym stanie elektrony i jądra atomowe nie mogą istnieć niezależnie. Atomy rozpadają się, a elektrony łączą się z protonami, tworząc neutrony. Powstaje gwiazda neutronowa: kula o wnętrzu składającym się prawie całkowicie z neutronów, otoczona ciekłą żelazną skorupą. Można ją porównać do gigantycznego jądra atomowego zawierającego 99,5% neutronów i tylko 0,5 % protonów.



Wskazówka: *Gwiazda neutronowa* to obiekt o promieniu około 10 - 20 km, masie równej 1 – 2 mas Słońca i gęstości miliarda ton na cm^3 !



Rysunek 1.82: Rozmiary gwiazdy neutronowej w porównaniu z rozmiarami Warszawy

Gwiazdy neutronowe są zbyt małe, aby mogły być obserwowane bezpośrednio. Jednak możemy je dostrzec dzięki temu, że emitują niezwykle silne promieniowanie elektromagnetyczne w całym zakresie częstotliwości: od promieniowania rentgenowskiego do fal radiowych. Źródła tego promieniowania znajdują się na biegunach magnetycznych gwiazdy. Promieniowanie wysyłane jest do wnętrza stożka (*Rysunek 1.84: Model pulsara – model latarni morskiej* na stronie 83).

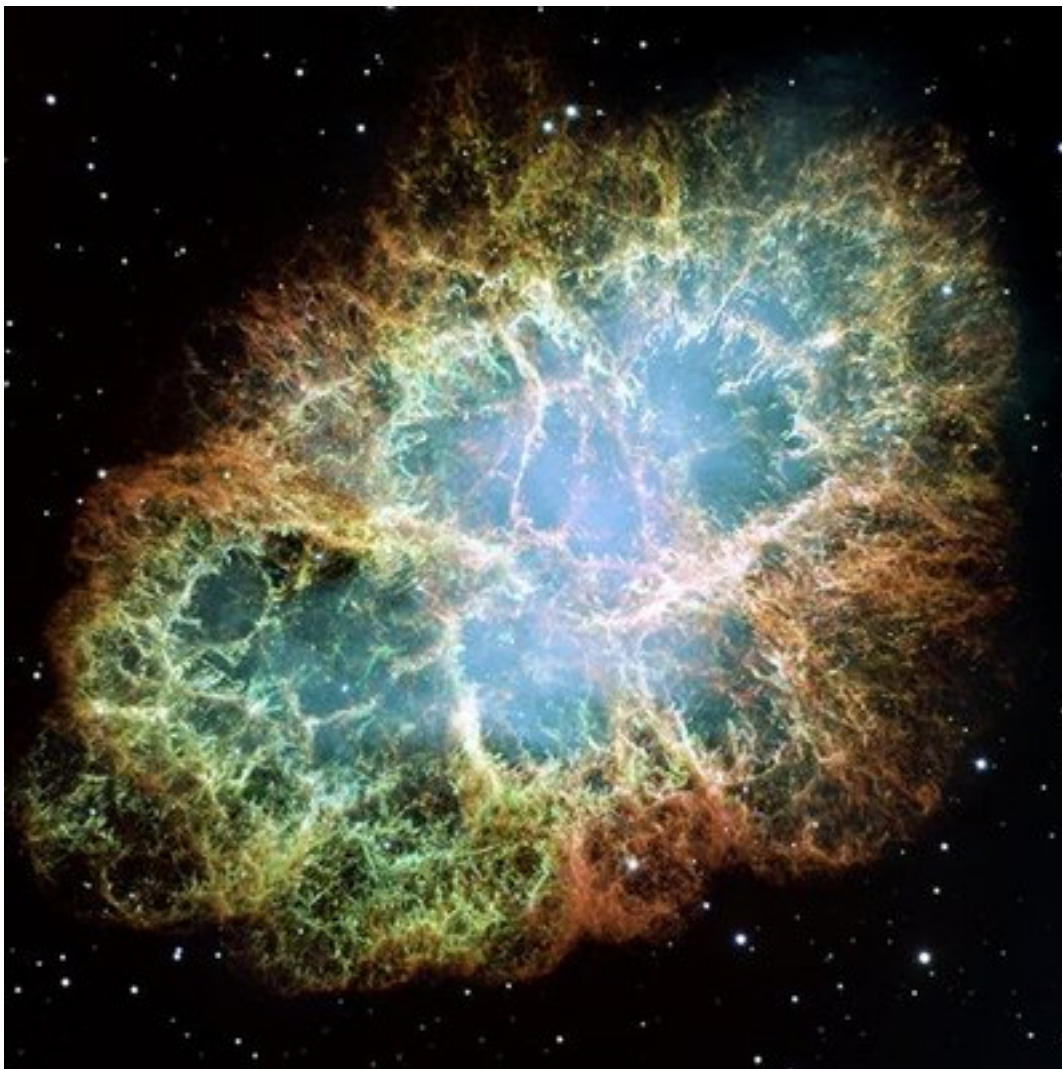
Gwiazda neutronowa wiruje niezwykle szybko wokół własnej osi. Obowiązuje tu ta sama zasada wzrostu szybkości wirowania, co przy kurczeniu się obłoku podczas tworzenia się gwiazdy – tu też mamy do czynienia z kurczeniem się i zagęszczaniem materii. Jednak w przypadku gwiazdy neutronowej wzrost prędkości wirowania jest dużo większy, gdyż gwiazda kurczy się do niezwykle małych rozmiarów.

Szybkozmiennie źródła promieniowania elektromagnetycznego pulsujące z niezwykle precyzyjnym okresem powtarzalności odkryto w 1967 r. i nazwano je pulsarami. Początkowo podejrzewano nawet związek pulsarów z pozaziemskimi cywilizacjami, jednak szybko okazało się, że to gwiazdy neutronowe, których istnienie przewidzieli wcześniej astrofizycy badający ewolucję gwiazd.



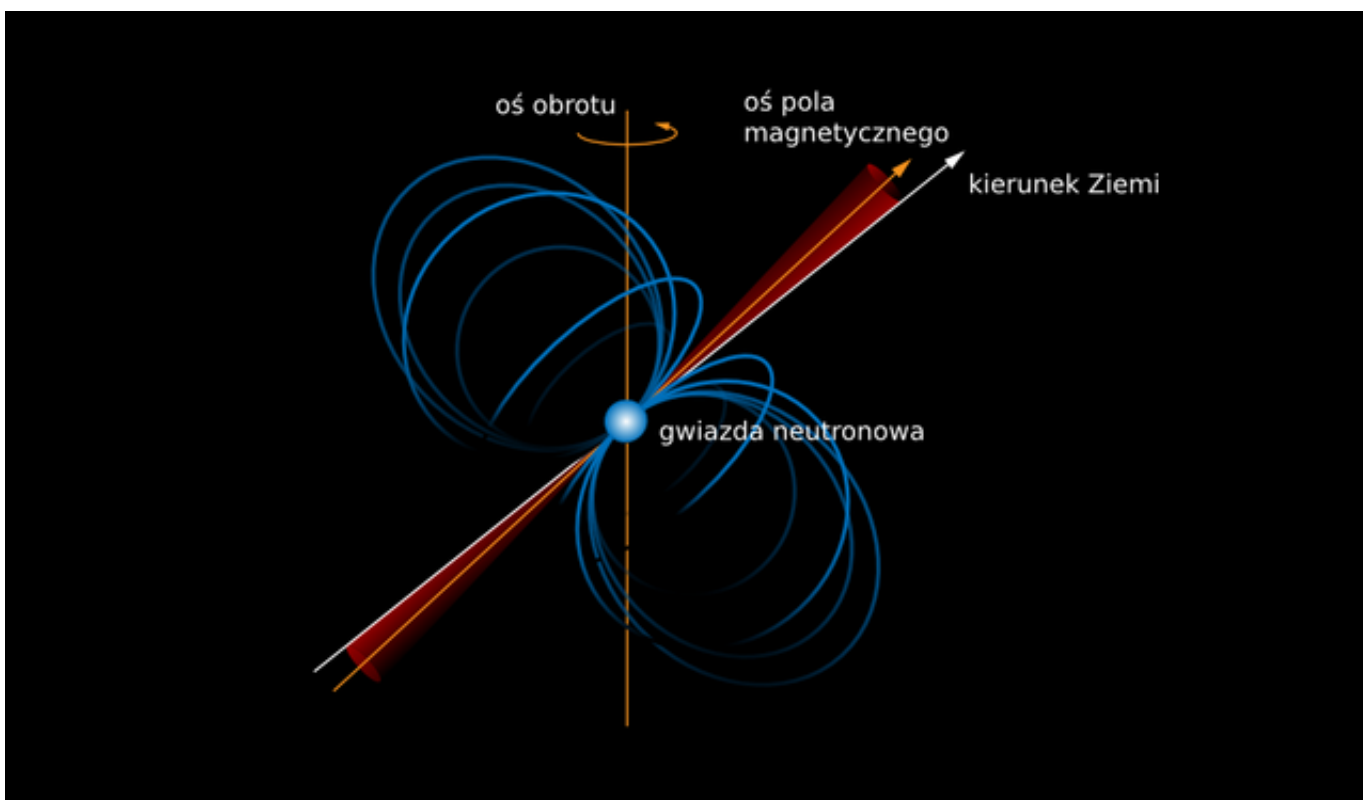
Ważne: *Pulsar* to gwiazda neutronowa, której promieniowanie dociera do nas w postaci impulsów o okresie od milisekund do ok. 4 s.

Czy wszystkie gwiazdy neutronowe możemy obserwować w postaci pulsarów? Jeśli Ziemia nie znajdzie się w przestrzeni oświetlanej snopem promieniowania z gwiazdy, to taka gwiazda nie zostanie zaobserwowana bezpośrednio z Ziemi. Możemy jednak pośrednio wnioskować o jej istnieniu, jeśli zaobserwujemy krążącą wokół niej planetę.



Około tysiąca lat temu zaobserwowano pojawienie się nowej gwiazdy o niezwykle silnym blasku (gwiazda była widoczna w dzień – zjawisko to zostało opisane przez chińskich astronomów w 1054 roku). Pozostałością tego wydarzenia jest tzw. mgławica Krab, którą możemy dziś obserwować za pomocą współczesnych instrumentów astronomicznych. Oto jej zdjęcie uzyskane z teleskopu Hubble’a (jasnoniebieska centralna część pochodzi z teleskopu rentgenowskiego). W centrum mgławicy znajduje się pulsar, który wysyła w przestrzeń kosmiczną promieniowanie o kolosalnej mocy

Rysunek 1.83: Mgławica Krab



Wirująca namagnesowana gwiazda neutronowa emituje promieniowanie w obszar wydrążonego stożka. Stożek omiata pewien wycinek przestrzeni i – jeśli „wyceluje” w Ziemię – objawia się nam jako impuls promieniowania

Rysunek 1.84: Model pulsara - model latarni morskiej

Czarna dziura

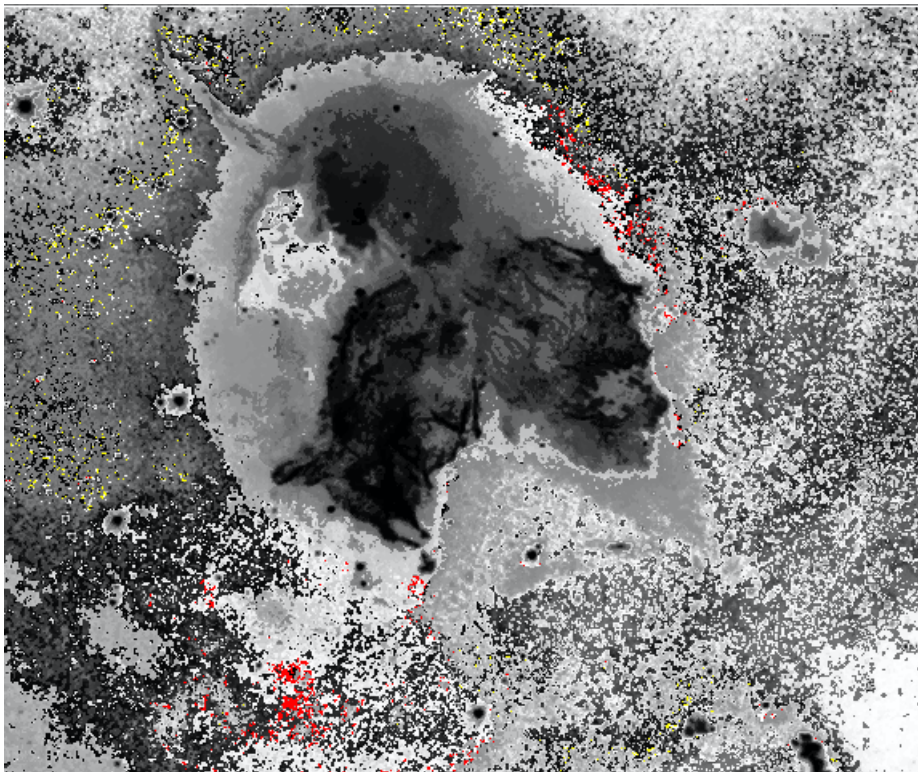
Gwiazdy o największych masach, przewyższających kilkanaście razy masę Słońca, kończąc swój żywot wybuchają jako supernowe, ale zapadają się do *czarnej dziury*. To obiekt, wytwarzający tak wielkie siły grawitacji, że nic, nawet światło, nie może się z niego wydostać.

Nie potrafimy opisać wnętrza czarnej dziury, bo nie ma odpowiedniej teorii, która opisywałaby ogromne siły grawitacji na mikroskopowych odległościach.

Z teorii grawitacji (ogólnej teorii względności) wynika, że każde ciało ściśnięte do odpowiednio małej objętości może stać się czarną dziurą. Jeśli ciało o masie M ściśniemy w kuli o promieniu nie większym niż R_{Schw} zwanym promieniem Schwarzschilda [wym. szwarzschilda], to zapadnie się ono do czarnej dziury. Promień Schwarzschilda wyraża się wzorem $R_{\text{Schw}} = 2G\frac{M}{c^2}$, gdzie M – masa ciała, G – stała grawitacji, c – prędkość światła.

Supernowe

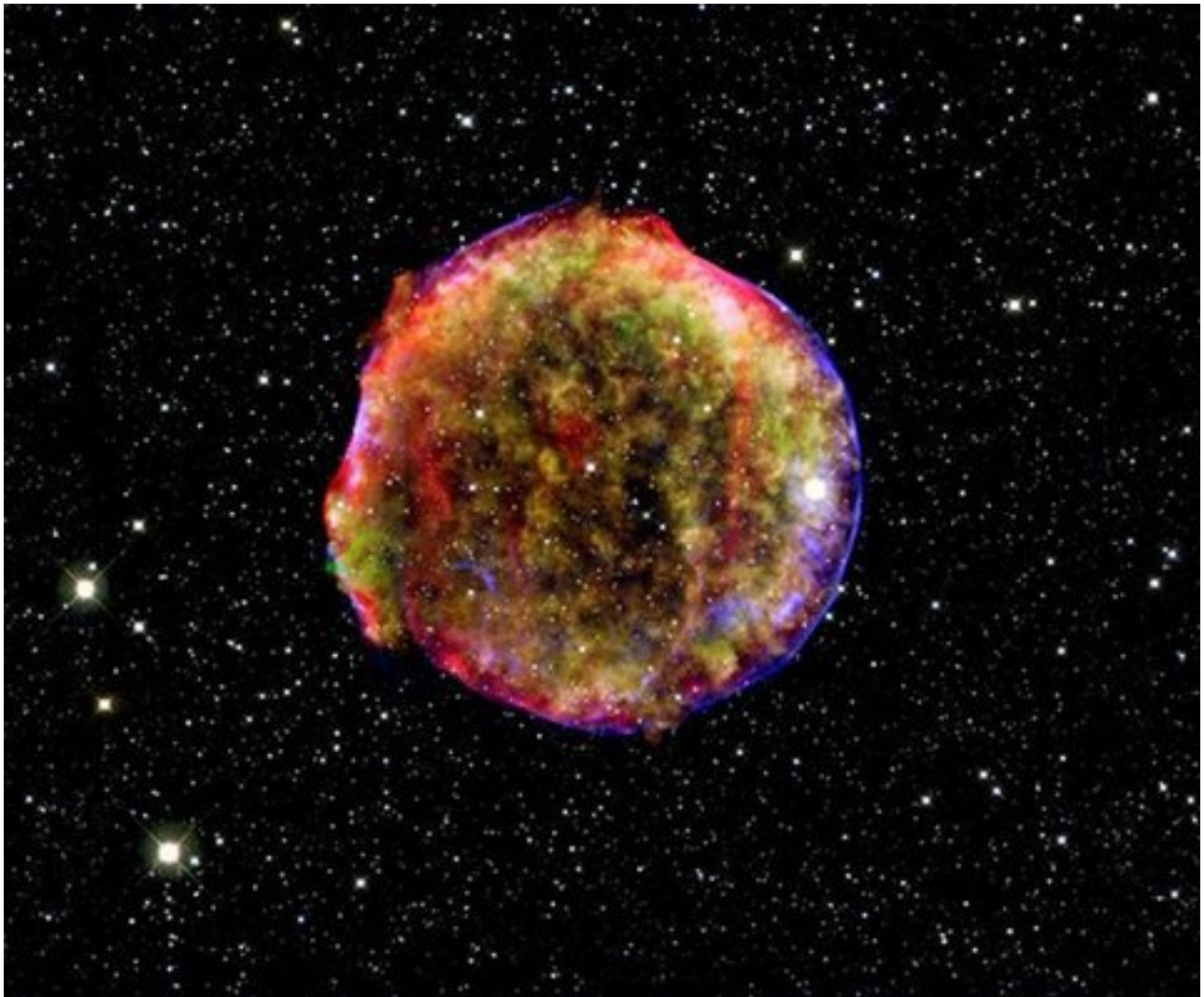
Wybuchu supernowej to zjawisko zapoczątkowane gwałtownym zapadnięciem się jądra masywnej, wypalonej gwiazdy, podczas którego zewnętrzne warstwy opadają z prędkością rzędu 100 000 km/s, odbijając się od rdzenia, zawierającego głównie jądra żelaza. Przeciwbieżne strumienie materii zderzają się i wytwarzają falę uderzeniową, która przechodzi przez materię. Wydziela się przy tym tyle energii, że możliwa staje się endoenergetyczna synteza pierwiastków cięższych od żelaza: ołowiu, złota, uranu itp. W końcu zewnętrzne warstwy gwiazdy zostają odrzucone na ogromne odległości. To wybuch *supernowej* – największa eksplozja obserwowana w kosmosie. W trakcie wybuchu supernowej materia międzygwiazdowa zostaje wzbogacona o pierwiastki cięższe od helu, które wchodzi w skład kolejnych generacji nowopowstających gwiazd i planet. Obecność na Ziemi żelaza i innych ciężkich pierwiastków nie jest więc przypadkowa: powstały one w wybuchu supernowej i weszły w skład nowopowstającej gwiazdy, naszego Słońca i jej układu planetarnego.



Ta kolorowa chmura ma kolosalne rozmiary. Znajduje się ona w Wielkim Obłoku Magellana widocznym na południowej półkuli nieba

Rysunek 1.85: Zdjęcie pozostałości po wybuchu supernowej, wykonane przez teleskop kosmiczny Hubble’a

Wybuchy gwiazd supernowych widoczne gołym okiem są zjawiskami niezwykle rzadkimi, niemniej się zdarzają. W listopadzie 1572 r. w gwiazdozbiorze Kasjopei pojawiła się nowa gwiazda o takiej jasności, że widoczna była za dnia. Opisał ją duński astronom Tycho Brahe w pracy *Stella Nova*. Dziś wiemy, że był to wybuch supernowej. Wybuch nastąpił w naszej Galaktyce w odległości 7 500 lat świetlnych od Słońca. Od tego wydarzenia upłynęło ponad 400 lat. Materia z wybuchu utworzyła w tym czasie kulę gazu i pyłu o średnicy 20 lat świetlnych ([Rysunek 1.86: Pozostałość po wybuchu supernowej SN1572](#) na stronie 85).



Zdjęcie w promieniowaniu rentgenowskim wykonane przez teleskop kosmiczny Chandra

Rysunek 1.86: Pozostałość po wybuchu supernowej SN1572

Przykład: Ziemia czarną dziurą?

Sprawdźmy, do jakich rozmiarów należałoby ścisnąć Ziemię, aby stała się czarną dziurą. Przyjmij następujące dane: prędkość światła $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, stała grawitacji $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$, promień Ziemi $R = 6,37 \cdot 10^6$ m, masa Ziemi $M = 5,97 \cdot 10^{24}$ kg $\approx 6 \cdot 10^{24}$ kg.

Rozwiązanie: Po podstawieniu wartości do wzoru na promień Schwarzschilda otrzymujemy:

$$(\text{wzór 74}) R_{\text{Schw}} = 2G \frac{M}{c^2} = 2 \cdot 6,673 \cdot 10^{-11} \frac{5,97 \cdot 10^{24}}{9 \cdot 10^{16}} \text{ m} = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 8,9 \text{ mm}$$

Widzimy, że aby Ziemia mogła stać się czarną dziurą, musiałaby przybrać śmiesznie małe rozmiary – niewielkiej kuleczki o średnicy około 18 mm!

Generacje

Pierwsze gwiazdy – nazywamy je *gwiazdami III generacji* – powstały z zagęszczeń pierwotnej materii w najwcześniejszych epokach rozwoju Kosmosu. Miały one w swoim składzie wodór i hel (z bardzo małą domieszką

litu). W czasie swego istnienia produkowały w swych wnętrzach niewielkie ilości pierwiastków cięższych niż hel. Ich okres życia w skali kosmicznej nie był długi, rzędu kilkudziesięciu milionów lat – gwiazdy III generacji już dawno zakończyły swój żywot, wybuchając i tworząc obłoki rozproszonej materii.

Obłoki pozostałe po gwiazdach III generacji umożliwiły powstanie następnego pokolenia – *gwiazd II generacji*. W czasie swojego życia „wyprodukowały” one znaczne ilości jąder atomowych wszystkich znanych nam pierwiastków, w tym węgla, niezbędnego do powstania życia na Ziemi. Węgiel w połączeniu z wodorem tworzy bowiem olbrzymią różnorodność związków organicznych – węglowodorów. Związki te są podstawowym budulcem nas samych i wszystkich pozostałych żywych organizmów.

i Wskazówka: Nie będzie odrobiny przesady w stwierdzeniu, że jesteśmy „dziećmi gwiazd”, ponieważ Ziemia, którą zamieszkujemy, Słońce, cała materia, z której powstał Układ Słoneczny, a więc również nasze ciała, pochodzą z rozproszonej materii gwiazd II i III generacji.

Najmłodsze gwiazdy *I generacji* (należy do nich Słońce) zawierają w składzie swoich atmosfer do 3 % pierwiastków ciężkich (dla porównania gwiazdy II populacji ok. 1%).

Obserwowane przez nas obecnie gwiazdy należą do I i II populacji. Mogą się one znacznie różnić masą. Najlżejsze mają masę nieco mniejszą od jednej dziesiątej masy Słońca, największe są około 150 razy bardziej masywne niż Słońce. Różnią się między sobą także składem chemicznym.

Gwiazdy I generacji nadal powstają we wnętrzach olbrzymich obłoków materii międzygwiazdowej i, podobnie jak ich poprzedniczki, kończą swój żywot rozpraszając materię w olbrzymich obszarach Kosmosu.

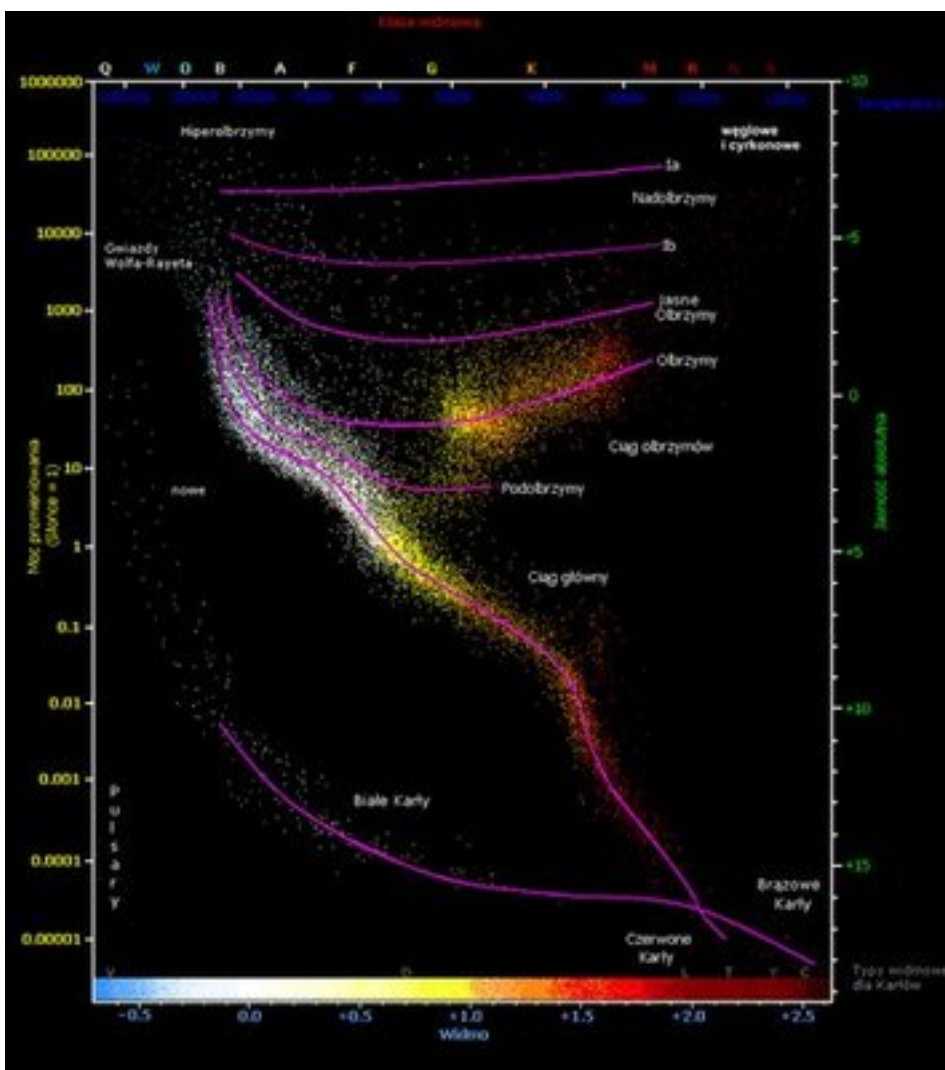
Diagram H-R

Astronomowie obserwując i badając gwiazdy, przypisywali im różne właściwości. Poszukiwali też prawidłowości i związków pomiędzy tymi właściwościami. Diagram Hertzsprung-Russela [wym. herspruna rasła] przedstawia najbardziej znany związek: pomiędzy temperaturą powierzchni gwiazdy a mocą, z jaką gwiazda emituje promieniowanie elektromagnetyczne ze swej powierzchni. Te dwie wielkości są odłożone, odpowiednio, na osi odciętych i na osi rzędnych diagramu H-R. Trzeba tu zaznaczyć, że ze względów historycznych, oś odciętych wskazuje malejącą temperaturę powierzchni gwiazdy, zaś na osi rzędnych zaznacza się, w skali logarytmicznej, stosunek mocy promieniowania gwiazdy do mocy promieniowania Słońca, traktowanej jako swoisty wzorzec.

Olbrzymia większość obserwowanych przez astronomów gwiazd układa się na diagramie wzdłuż przekątnej – jest to tzw. *ciąg główny*. Słońce jest gwiazdą ciągu głównego.

Takie, a nie inne położenie gwiazdy na diagramie wynika z budowy, historii powstania oraz etapu życia, w jakim się ona znajduje.

W trakcie swojej ewolucji gwiazda przemieszcza się po obszarze diagramu. Przykładowo nasze Słońce w przyszłości opuści ciąg główny stając się czerwony olbrzymem a następnie przewędruje w obszar białych karłów - patrz rozdział [Co czeka nasze Słońce](#) na stronie 87.



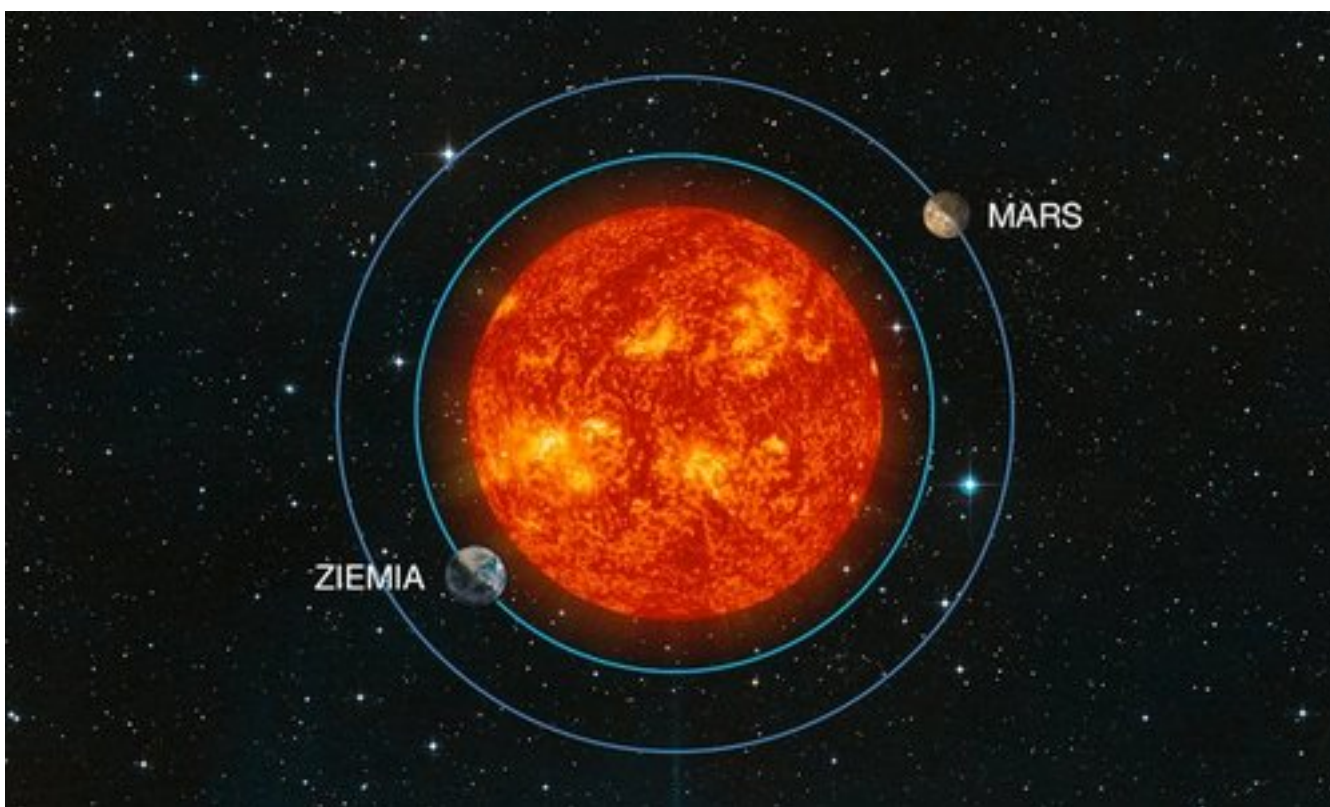
Na rysunku (aut. Richard Powell) pokazano inny sposób wyrażania mocy promieniowania gwiazdy - poprzez podanie tzw. absolutnej wielkości gwiazdowej

Rysunek 1.87: Diagram HR obrazuje związek całkowitej mocy promieniowania gwiazdy z temperaturą jej powierzchni

Co czeka nasze Słońce

Nasze Słońce należy do najmłodszych gwiazd – I generacji. Jest ono gwiazdą średniej wielkości. Wytwarza energię w reakcjach syntezy jądrowej i promieniuje ją na zewnątrz, ogrzewając między innymi Ziemię i stwarzając warunki do życia na niej.

Słońce powstało około 5 miliardów lat temu. Przewidujemy, że będzie ono pracować stabilnie jeszcze przez około 4-4,5 miliarda lat, po czym nastąpi seria szybkich - w skali kosmicznej - zdarzeń. Reakcje syntezy jąder wodoru w rdzeniu Słońca nie mogą trwać wiecznie, jego zapasy w końcu wyczerpią się. Prawie cały wodór zostanie przetworzony w hel. Rdzeń zacznie się zapadać, przez co wzrośnie ciśnienie i temperatura w jego wnętrzu. Na skutek tego rozpoczną się reakcje syntezy helu, które początkowo mają charakter wybuchowy. Ten przejściowy etap w życiu Słońca nazywamy *błyskiem helowym*. Energia wydzielona w błysku helowym spowoduje przede wszystkim rozciągnięcie jego zewnętrznych warstw, a co za tym idzie, obniżenie temperatury powierzchni Słońca.



Po około 4,5 miliardach lat Słońce stanie się czerwonym olbrzymem. O rozmiarach tak dużych, że obejmie orbitę Merkurego i Wenus, które znajdują się wewnątrz Słońca

Rysunek 1.88: Słońce czerwonym olbrzymem

Słońce stanie się czerwonym olbrzymem o rozmiarach tak dużych, że obejmie orbitę Wenus i niebezpiecznie zbliży się do Ziemi (*Rysunek 1.88: Słońce czerwonym olbrzymem* na stronie 88). Zdmuchnie z niej całą atmosferę i wypali wszystko na popiół, stopi skały. To monstrualne Słońce obserwowane z Ziemi ogarnie prawie połowę horyzontu (*Rysunek 1.89: Monstrualne Słońce obserwowane z Ziemi ogarnie prawie połowę horyzontu (wizja artystyczna)* na stronie 89).



Rysunek 1.89: Monstrualne Słońce obserwowane z Ziemi ogarnie prawie połowę horyzontu (wizja artystyczna)

W czasie około 100 mln lat w centrum Słońca będzie trwała synteza jąder helu. Jasność Słońca początkowo około 2000 razy większa niż obecnie będzie stopniowo spadać do wartości 50 razy większej niż obecnie. Skały na Ziemi znów będą ciałem stałym – temperatura spadnie do kilkuset stopni Celsjusza. Po wyczerpaniu zapasu helu w jądrze nastąpi powtórna faza zapadania się jądra Słońca – powstanie biały karzeł, który będzie stygł przez kolejne miliardy lat. Zewnętrzne warstwy Słońca zostaną odrzucone i utworzą mgławicę planetarną ([Rysunek 1.90: Końcowy etap ewolucji Słońca](#) na stronie 90).



W końcowym etapie życia Słońca jego materia rozproszy się w otoczeniu w postaci kolorowej otoczki. W środku pozostanie bardzo mała gwiazda – biały karzeł

Rysunek 1.90: Końcowy etap ewolucji Słońca

Pytania i problemy

1. Co to jest protogwiazda? Opisz etapy powstawania gwiazdy.
2. Co jest źródłem energii Słońca?
3. Jak kończy swój żywot gwiazda podobna do Słońca?
4. Jak kończy swój żywot gwiazda znacznie większa od Słońca?
5. Porównaj białego karła z gwiazdą neutronową.
6. Jakie jest pochodzenie pierwiastków we Wszechświecie?

1.10 Galaktyki

Układ Słoneczny należy do wielkiego skupiska gwiazd zwanego *Galaktyką* lub *Drogą Mleczną*. Aż do połowy lat dwudziestych XX wieku nie było jasne, czy oprócz naszej Galaktyki istnieją gdziekolwiek w Kosmosie inne galaktyki. Wprawdzie już w połowie XVIII wieku teleskopy pozwoliły zobaczyć na niebie rozmyte rozciągle obiekty, jednakże większość uczonych skłaniała się do przyjęcia, że są to obłoki gazu wewnątrz Galaktyki. Dlatego te rozmyte obiekty nazwano mgławicami. Wydawało się, że cały Kosmos to układ gwiazd usytuowany w Drodze Mlecznej.

Obecnie wiemy, że Droga Mleczna to jedna z wielu galaktyk. Ma kształt ogromnego dysku o średnicy około 100000 lat świetlnych i grubości około 1000 lat świetlnych. Galaktyka wiruje – wszystkie gwiazdy poruszają się po orbitach w przybliżeniu kołowych wokół jej środka. Słońce wraz z Ziemią pędzi z prędkością 220 km/s i zatacza pełny okrąg o promieniu 26000 lat świetlnych w czasie 225 milionów lat.



Tak byśmy widzieli naszą galaktykę, gdybyśmy unieśli się daleko w Kosmos

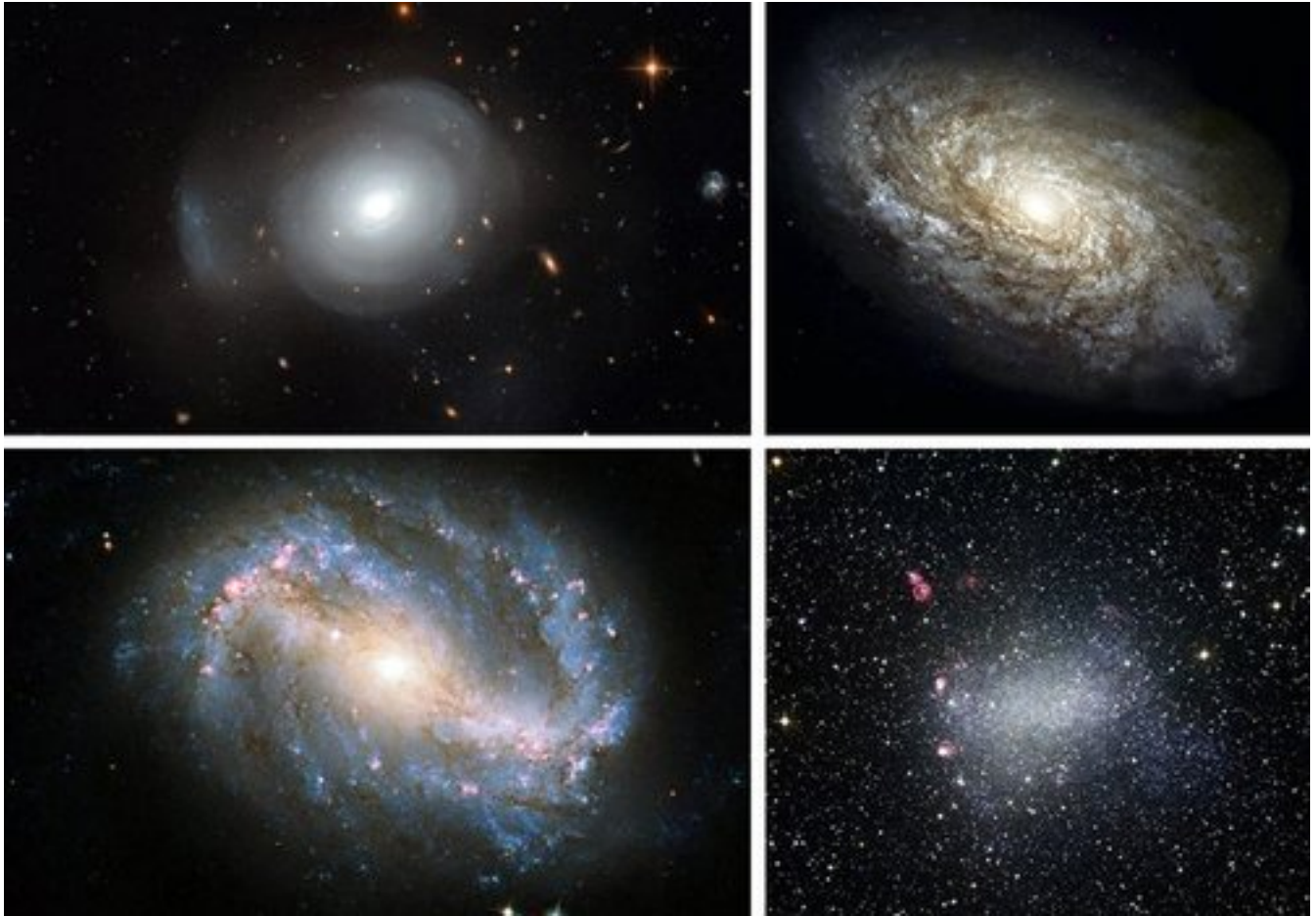
Rysunek 1.91: Galaktyka spiralna podobna do naszej - Drogi Mlecznej

i **Wskazówka:** Jakie odległości dzielą gwiazdy w Galaktyce? Aby to sobie wyobrazić, zmniejszmy Słońce do ledwie widocznego pyłku o średnicy 0,1 mm. Galaktyka zawiera co najmniej 200 miliardów gwiazd. Taka liczba pyłków zmieści się w dużym pudle. Gdybyśmy teraz chcieli zbudować model Galaktyki, musielibyśmy rozsypać drobinki na odległość, w przybliżeniu, od Ziemi do Marsa. Galaktykę wypełnia głównie pusta przestrzeń! Oczywiście zderzenia gwiazd, czy nawet bliskie spotkania, są w tej pustce zupełnie nieprawdopodobne. Dobrym modelem galaktyki jest płyta CD. Gdybyśmy Galaktykę zmniejszyli do takiego rozmiaru, to wszystkie gwiazdy widoczne na niebie gołym okiem znajdą się w odległości 1-2 mm od niewidocznego punktu symbolizującego Słońce. Sąsiednie galaktyki dzieliłoby od naszej kilka lub kilkanaście metrów.

W obserwowanej części Wszechświata znajduje się 10^{10} (dziesięć miliardów) galaktyk. Droga Mleczna należy do dużych galaktyk. Tylko nieliczne galaktyki mają masę większą od niej. Większość jest znacznie mniejsza. Na rysunkach [Rysunek 1.92: Przykłady galaktyk różnych typów](#) na stronie 92 i [Rysunek 1.93: Galaktyka nietypowa](#) na stronie 93 przedstawiono przykłady kilku galaktyk różnych typów morfologicznych. Nasza galaktyka należy do galaktyk spiralnych – gwiazdy gromadzą się w jej centrum oraz w obszarach w kształcie spiralnych ramion. Kształt ramion wskazuje na ruch wirowy. W ramionach galaktyk spiralnych jest więcej gwiazd młodych i jasnych, ale gęstość gwiazd nie jest wiele większa niż pomiędzy ramionami. Słońce znajduje się w jednym z takich ramion ([Rysunek 1.91: Galaktyka spiralna podobna do naszej – Drogi Mlecznej](#) na stronie 91). Trochę większe zagęszczenie gwiazd występuje w jądrze – centralnej części Galaktyki. W centrum stwierdzono też istnienie gigantycznej czarnej dziury o masie około 3 milionów mas Słońca.

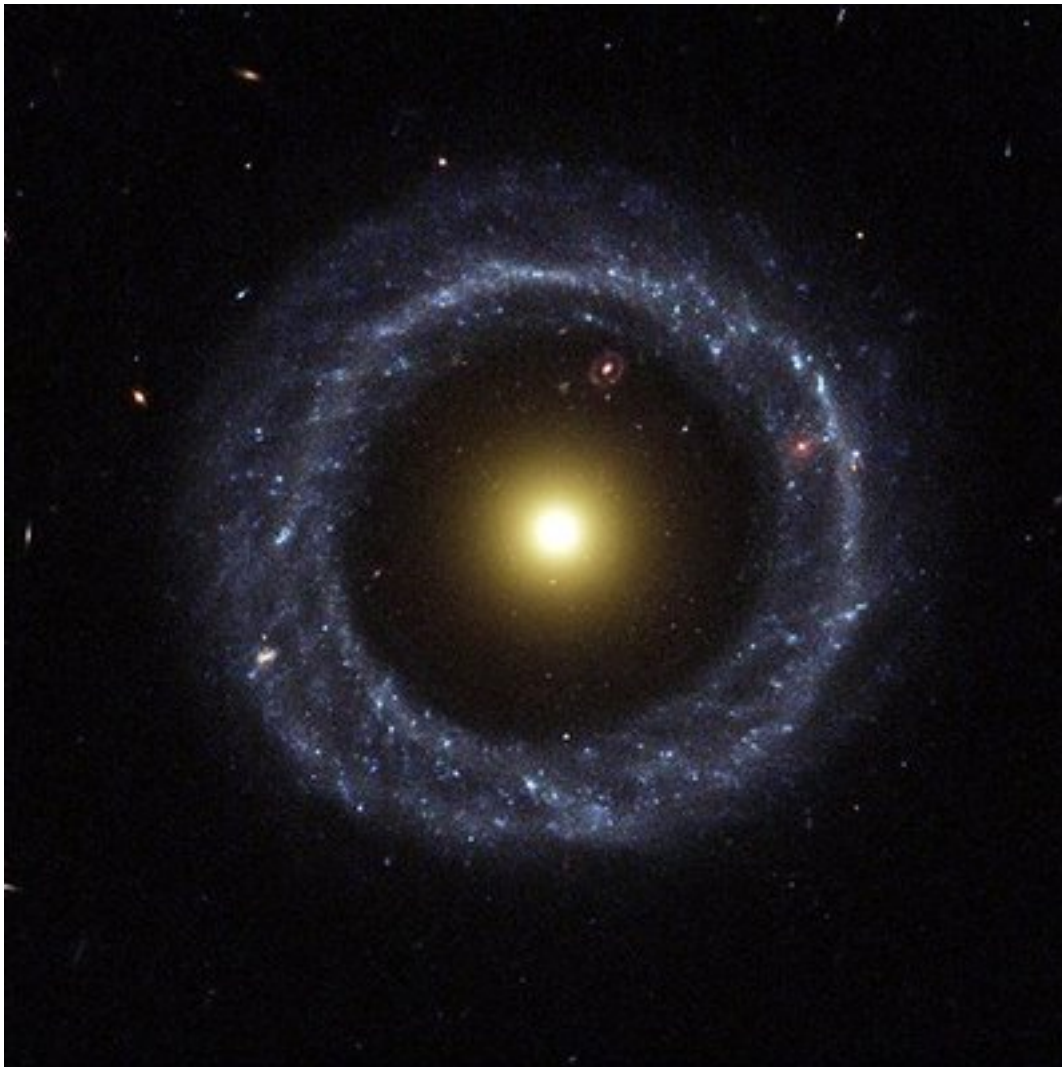


Wskazówka: Więcej informacji o naszej galaktyce: <http://archive.is/wszechswiat.astrowww.pl>



a) eliptyczna, b) spiralna, c) z poprzeczką, d) nieregularna

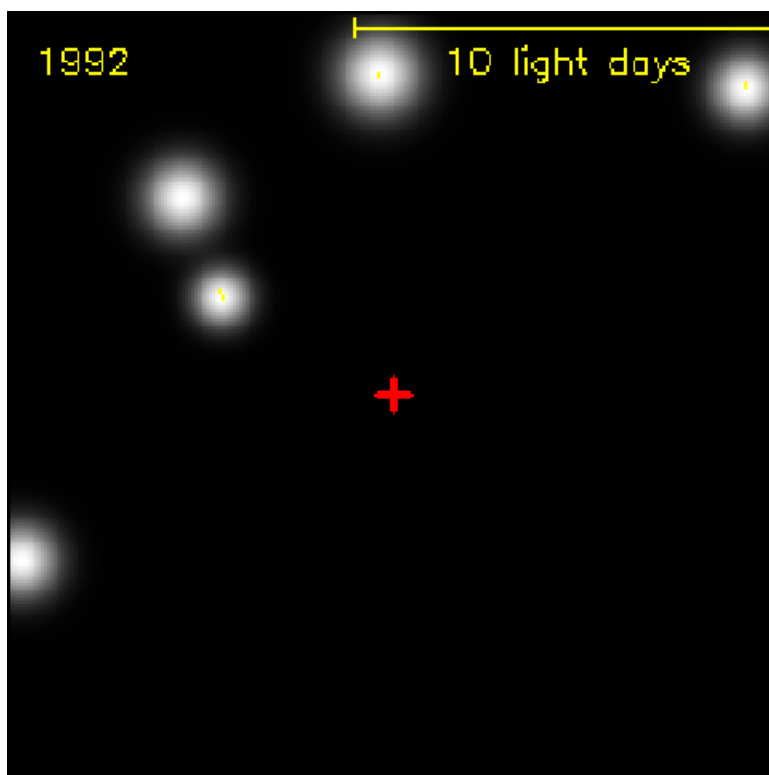
Rysunek 1.92: Przykłady galaktyk różnych typów



Rysunek 1.93: Galaktyka nietypowa

⚠ **Ważne:** Czarna dziura to obiekt o wielkiej masie zagęszczonej w małej objętości. Przyciąganie grawitacyjne czarnej dziury jest tak wielkie, że nic nie może się z niej wydostać. Dotyczy to również światła – czarna dziura nie emituje światła, więc nie możemy jej zobaczyć. Można za to zobaczyć i odczuć skutki działania siły grawitacji, która zmienia tory ciał poruszających się w pobliżu. Jeśli jakiegokolwiek ciało zostanie wciągnięte do czarnej dziury, już nigdy się z niej nie wydostanie.

Na animacji, utworzonej ze zdjęć gwiazd w centrum Galaktyki zrobionych w ciągu kilkunastu lat, możemy zobaczyć, jak gwiazdy poruszają się po keplerowskich, eliptycznych orbitach wokół „pustego” punktu zaznaczonego krzyżykiem (*Rysunek 1.94: Zdjęcia gwiazd w centrum Galaktyki wykonywane w ciągu kilkunastu lat* na stronie 94). Z ruchu gwiazd wnioskujemy, że punkt wcale nie jest pusty, tam właśnie znajduje się czarna dziura – obiekt, który przyciąga gwiazdy siłą grawitacji. Analiza torów gwiazd krążących wokół czarnej dziury pozwoliła oszacować jej masę.

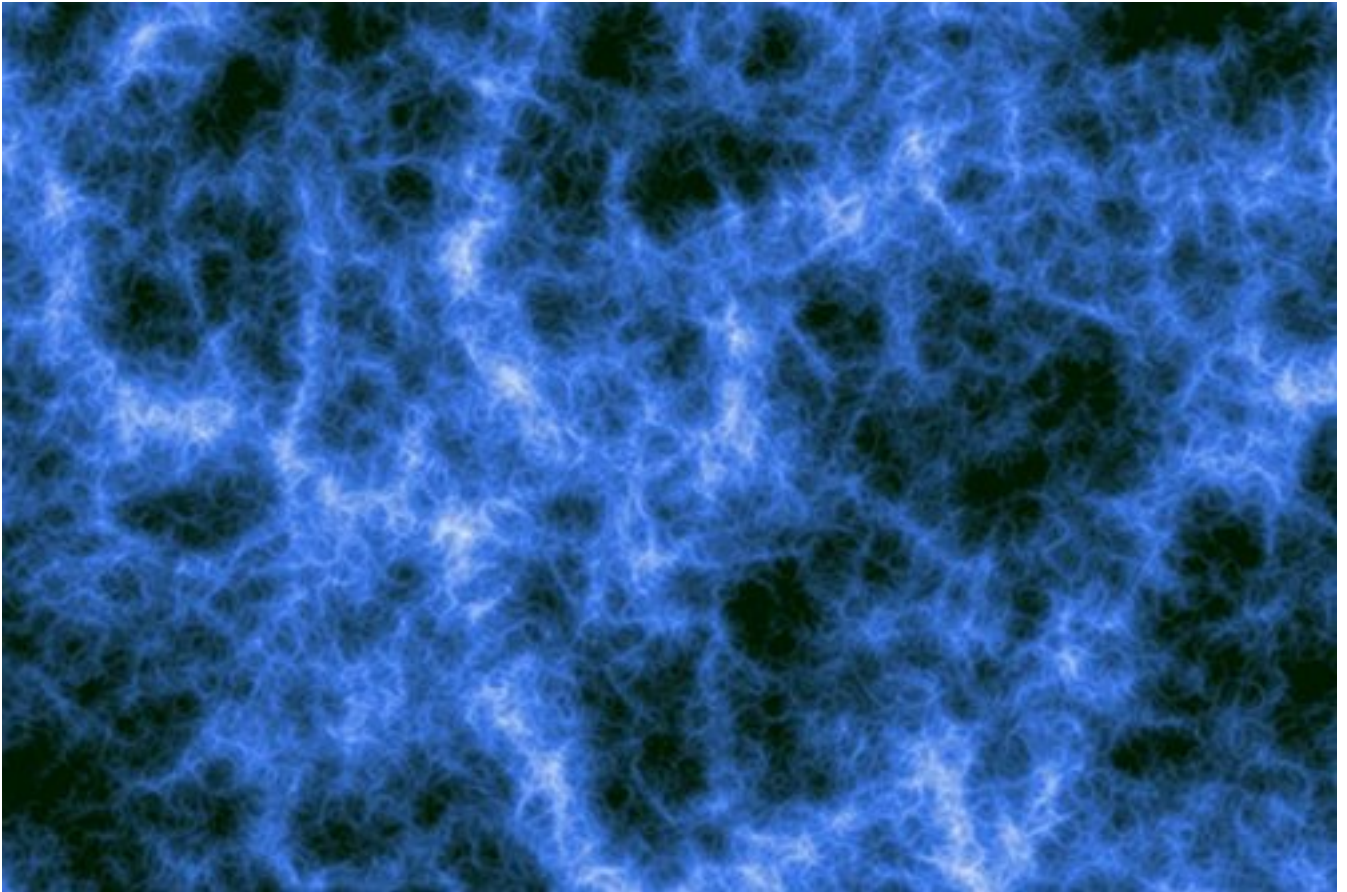


Orbity gwiazd to keplerowskie elipsy z ogniskiem w centrum Drogi Mlecznej. W obszarze o rozmiarach kilkunastu godzin świetlnych (kilka Układów Słonecznych) zawarta jest masa około 3 mln mas Słońca

Rysunek 1.94: Zdjęcia gwiazd w centrum Galaktyki wykonywane w ciągu kilkunastu lat

Ciekawe rezultaty przyniosły pomiary położenia wielu tysięcy galaktyk w celu stworzenia mapy Wszechświata. Okazało się, że galaktyki nie są rozmieszczone równomiernie. Tworzą skomplikowane struktury – łańcuchy i ściany otaczające puste obszary. Ściany skupiają około 60% galaktyk, natomiast zajmują jedynie 10% objętości Wszechświata.

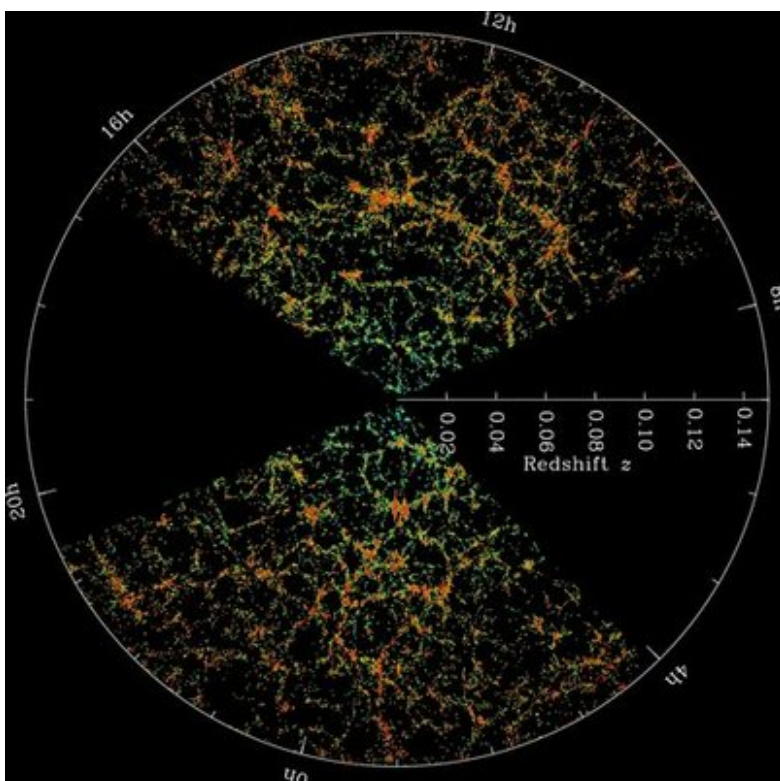
Wskazówka: Rozmieszczenie galaktyk we Wszechświecie przypomina pianę mydlaną, tyle że w kosmicznej skali.



Przypomina pianę mydlaną, tyle że w kosmicznej skali

Rysunek 1.95: Obraz rozmieszczenia galaktyk w przestrzeni otrzymany za pomocą symulacji komputerowej

⚠ **Wskazówka:** *Podróż przez Wszechświat* – symulacja utworzona z danych o położeniu galaktyk zebranych w projekcie *Sloan Digital Sky Survey*: <http://apod.nasa.gov/apod/ap120813.html>



Mapa sporządzona przez zespół *Sloan Digital Sky Survey*. Ziemia znajduje się w środku okręgu, którego promień to około 2 miliardy lat świetlnych. Galaktyki układają się w skomplikowane struktury otaczające olbrzymie puste obszary

Rysunek 1.96: Mapa wycinka Wszechświata

Wskazówka: I ty możesz zostać odkrywcą Kosmosu! Naukowcy badający galaktyki realizują zakrojony na wielką skalę projekt Sloan Digital Sky Survey (SDSS), w którym fotografują wielkie obszary nieba w celu odnalezienia miliona galaktyk. Jednak zebrano zbyt wiele zdjęć, aby astronomowie mogli je obejrzeć i odpowiednio zakwalifikować. Zaprośili więc do pomocy internautów, którzy po krótkim przeszkoleniu mogą wziąć udział w badaniach kosmosu, klasyfikując galaktyki według kształtu. Służy do tego witryna Galaxy Zoo, również w języku polskim: <http://zoo1.galaxyzoo.org/pl/>. To niepowtarzalna okazja, aby zobaczyć, czasami jako pierwszy człowiek na Ziemi, niezwykle obiekty kryjące się w mrokach Wszechświata. Bardzo ciekawe i przystępne dla każdego jest wprowadzenie w tematykę badań w zakładce „Nauka” w witrynie Galaxy Zoo.

Pytania i problemy

1. Co to jest: galaktyka, nasza Galaktyka? Wyjaśnij różnicę w pojęciach.
2. Jakiej wielkości jest nasza Galaktyka w porównaniu z innymi?
3. Podaj, czy galaktyki są rozmieszczone równomiernie w Kosmosie. Do czego, co znasz z życia codziennego, mógłbyś porównać rozkład przestrzenny galaktyk w Kosmosie?

1.11 Ewolucja Wszechświata

Ewolucja Wszechświata

Rysunek 1.97: Obejrzyj film

Na początku cały Wszechświat był ściśnięty do bardzo małych rozmiarów, a następnie doznał gwałtownego rozszerzania się, aż do dzisiejszych niewyobrażalnie wielkich rozmiarów. Obecnie uważamy, że Wszechświat miał

swój początek przed około 13,7 miliarda lat – świadczy o tym wiele danych doświadczalnych oraz przemawia wiele przesłanek teoretycznych. Przedstawimy tutaj kilka najważniejszych.

Ucieczka galaktyk

Bardzo długo sądzono, że rozmyte i rozciągle obiekty obserwowane przez teleskopy są obłokami gazu wewnątrz Drogi Mlecznej. Dopiero **Edwin Hubble** [wym. habl] w połowie lat dwudziestych XX wieku jako pierwszy udowodnił, że te mgławice to w rzeczywistości olbrzymie układy gwiazdne – galaktyki – występujące daleko od niej. Mógł to stwierdzić dzięki zastosowaniu największego w owym czasie teleskopu umieszczonego na szczycie Mount Wilson w Kalifornii. To nie wszystko – Hubble odkrył, że galaktyki oddalają się od nas, i to tym szybciej, im są bardziej oddalone.

! **Wskazówka:** Jak Hubble mógł zmierzyć prędkość ucieczki galaktyk? Posłużył się znanym zjawiskiem dotyczącym rozchodzenia się fal, zwanym *zjawiskiem Dopplera* (rozdział 1.D2 *Efekt Dopplera (Dodatek)* na stronie 119). Gdy stoimy przy drodze, możemy po dźwięku poznać, że samochód właśnie nas mija. Dźwięk zbliżającego się samochodu jest wyższy, a w momencie mijania staje się niższy.

Tłumaczymy to tym, że długość fali wysyłanej z oddalającego się źródła staje się większa (częstotliwość mniejsza więc słyszymy niższy dźwięk), a z kolei długość fali ze źródła zbliżającego się jest mniejsza (częstotliwość większa – słyszymy wyższy dźwięk). Podobnie jest ze światłem, które jest *falą elektromagnetyczną*. Każdy pierwiastek, na przykład wodór, wysyła światło o określonej częstotliwości fal, czyli określonej barwie. Promieniowanie dochodzące z galaktyk wykazuje tzw. *przesunięcie do czerwieni* (do fal o mniejszej częstotliwości czyli o większej długości). Oznacza to, że galaktyki oddalają się od nas, tym szybciej, im większe jest to przesunięcie.

Wszystkie galaktyki oddalają się od nas – czyżby to znaczyło, że jesteśmy w środku Wszechświata? Oczywiście, że nie! Oddalanie się galaktyk tłumaczymy rozszerzaniem się przestrzeni Wszechświata, która unosi z sobą galaktyki. Można to porównać z kropkami na nadmuchiwanym baloniku. Od każdej kropki pozostałe oddalają się tym szybciej, im większa odległość je dzieli. Tak więc żadna z galaktyk nie stanowi środka Wszechświata. Można też powiedzieć, że środek Wszechświata mógłby równie dobrze znaleźć się w każdym punkcie.

! **Wskazówka:** Stwierdzenie, że żaden obserwator nie jest wyróżniony, a Wszechświat z punktu widzenia każdego z nich wygląda tak samo, nosi nazwę *zasady kopernikańskiej*. Nadanie tej zasadzie imienia Kopernika jest wyrazem uznania dla jego wielkiego wkładu w naukę o budowie Kosmosu. Z zasady kopernikańskiej wynika, że skoro żaden obserwator nie jest wyróżniony, to nie ma sensu mówić o jakimś wyróżnionym punkcie we Wszechświecie, który byłby jego środkiem i od którego oddalałyby się wszystkie galaktyki. Każdy obserwator znajdujący się w dowolnej galaktyce stwierdzi, że wszystkie galaktyki oddalają się od niego. Dlatego Wielki Wybuch należy traktować jako rozszerzanie się przestrzeni, a nie rozbieganie się galaktyk w pustej przestrzeni od jakiegoś jednego wyróżnionego punktu.

Doświadczenie: Domowe laboratorium - model Wszechświata

Możesz zrobić własny model rozszerzającego się Wszechświata. Potrzebny będzie tylko kawałek (około pół metra) gumki z pasmanterii. Namaluj na gumce kilka kropek w różnych odległościach od siebie. Teraz, trzymając nieruchomo jedną z kropek, drugą ręką rozciągaj gumkę, obserwując efekt w lustrze. Zauważysz, że szybciej oddalają się od siebie te kropki, które są bardziej oddalone. Następnie unieruchom inną kropkę (to tak, jakbyśmy przenieśli się na inną galaktykę!). Sprawdź teraz, że gdy gumka się rozciąga, to inne kropki oddalają się z prędkościami wprost proporcjonalnymi do ich odległości od nowej nieruchomej kropki.



Jeśli masz problemy ze zrozumieniem rozszerzania się przestrzeni Wszechświata, to nie martw się. Jesteś w dobrym towarzystwie! Sam genialny **Albert Einstein**, twórca Ogólnej Teorii Względności, uznał, że rozwiązania jego własnych równań wskazujące na rozszerzanie się lub kurczenie Wszechświata nie mogą być prawidłowe! Próbował nawet zmienić swoje równania, aby uratować statyczny, niezmienny obraz Wszechświata. Jednak niebawem Hubble odkrył ucieczkę galaktyk i okazało się, że równania Einsteina są „mądrzejsze” od swego twórcy. Czy to nie zdumiewające, że w równaniach opisujących realny świat może być więcej treści, niż przewiduje i akceptuje to autor tych równań!

Wielki Wybuch

Skoro obserwujemy rozszerzanie się Wszechświata, oczywiste jest, że dawniej Wszechświat musiał być mniejszy. Kiedy więc cofniemy się w czasie odpowiednio daleko, możemy wyobrazić sobie Wszechświat o rozmiarach bliskich zeru. To niesamowite, że cała materia Wszechświata, wszystkie obecne gwiazdy i galaktyki - choć nie były jeszcze uformowane tak, jak dzisiaj, mieściły się w mikroskopijnej objętości! Oczywiście materia była wtedy w zupełnie innym stanie niż teraz. Gęstość i temperatura osiągały ekstremalnie wielkie wartości, w miarę rozszerzania się Wszechświata wartości te stopniowo maleją.

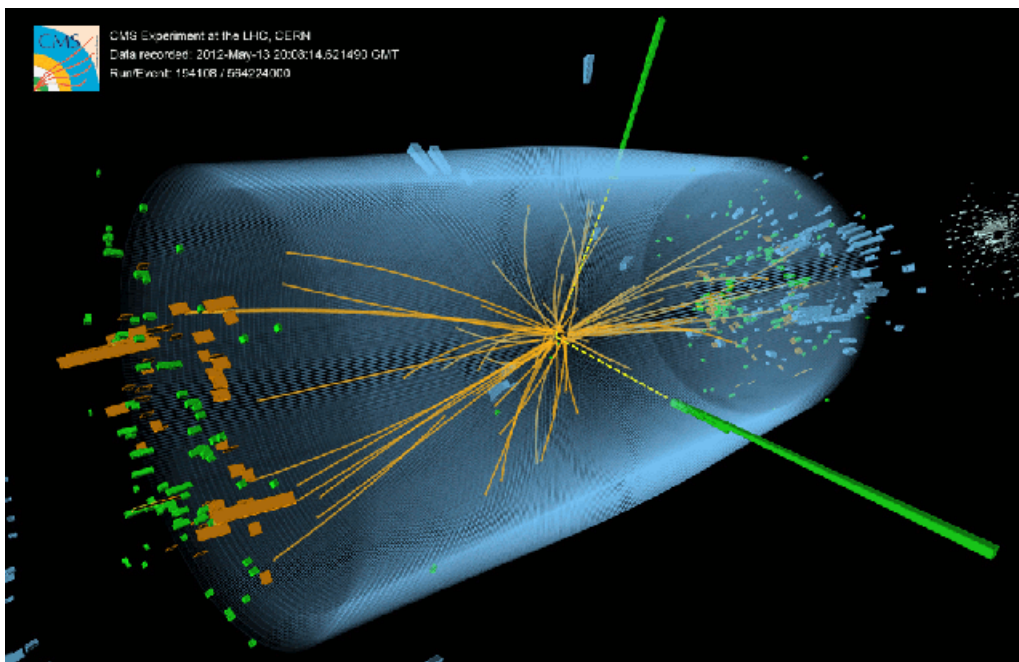
Moment, gdy Wszechświat mieścił się niemal w punkcie uważamy z początek Wszechświata. Według obecnych badań miało to miejsce ok. 13,7 miliarda lat temu. Od tego momentu Wszechświat stale się rozszerza, aż do osiągnięcia obecnych, gigantycznych rozmiarów. Powstanie i ekspansję Wszechświata nazywamy *Wielkim Wybuchem*.

„Wielki Wybuch” to nazwa obrazowa, ale nieco myląca. Rozszerzanie się Wszechświata nie ma nic wspólnego z wybuchem, na przykład, granatu. Odłamki granatu, wyrzucone siłą wywieraną przez ładunek wybuchowy, przemierzają nieruchomą przestrzeń. Natomiast obserwowana ucieczka galaktyk polega na tym, że są one unoszone przez rozszerzającą się przestrzeń.

- 
Wskazówka: Podejście do przestrzeni jako do niezmiennego i niezależnego od materii pustego naczynia było odziedziczone jeszcze po *Arystotelesie*. Poglądy badaczy uległy radykalnej zmianie po opublikowaniu w 1916 roku przez Alberta Einsteina (1879-1955) ogólnej teorii względności. Według tej teorii przestrzeń (a właściwie czasoprzestrzeń) jest zależna od materii. Materia deformuje czasoprzestrzeń, zakrzywiając ją. Właśnie to zakrzywienie wpływa na ruch materii. Na podstawie tej teorii zbudowano model rozszerzającego się Wszechświata zgodny z zasadą kopernikańską, który nie ma określonego środka, żadna galaktyka nie jest wyróżniona, a Wszechświat w dużej skali wygląda tak samo z każdego punktu.
- 
Wskazówka: Narzuca się pytanie, co było przed Wielkim Wybuchem? Na razie nie potrafimy na nie odpowiedzieć. Jeśli kiedyś ktoś znajdzie rozwiązanie, prawdopodobnie będzie opisywała je fizyka znacznie bardziej zaawansowana niż ta, którą znamy obecnie – bowiem w Wielkim Wybuchu powstała nie tylko energia i materia, ale też przestrzeń i czas, które znamy i które są opisywane przez znane nam równania fizyki. Nie sposób się jednak oprzeć wrażeniu, że zakładając istnienie tylko jednego, wyróżnionego Wszechświata, w którym żyjemy, zachowujemy się jak nasi starożytni przodkowie, którzy uważali, że płaska Ziemia znajduje się w centrum znanego im świata, a gwiazdy krążą wokół niej. Dzisiaj ich przekonania wydają się nam zabawne, choć jest to niesłuszna ocena. Nie dysponowali oni bowiem narzędziami, które umożliwiałyby im sprawdzenie, jak naprawdę wygląda świat, który ich otacza. My też jesteśmy w podobnej sytuacji – nie możemy spojrzeć na Wszechświat „z zewnątrz”, więc zakładamy, że nic poza nim nie istnieje... Możliwe jednak, że pewnego dnia dowiemy się, że nasz Wszechświat jest tylko jednym z typowych wszechświatów istniejących w bezkresnym, pozornie bezładnym, zbiorowisku podobnych wszechświatów. Jednak, jak na razie, przypuszczenia, że jesteśmy obywatelami multiwszechświata, ocierają się raczej o fantastykę naukową.

Sam Wielki Wybuch, jego pierwsze chwile, są dla nas tajemnicą – po prostu nie mamy jeszcze teorii, która mogłaby opisać Wszechświat w tym stanie. Potrafimy opisać historię Wszechświata poczynając od czasu około 10^{-34} s po Wielkim Wybuchu.

Początkowo nie istniały protony, neutrony, ani tym bardziej atomy czy cząsteczki chemiczne, bo temperatura i gęstość materii były zbyt wysokie. Materia występowała w postaci cząstek elementarnych, najprawdopodobniej kwarków i elektronów, które poruszały się z ogromnymi energiami i zderzając się ze sobą, produkowały lawiny kolejnych cząstek. Takie zderzenia możemy obserwować i badać w wielkich akceleratorach, takich jak Wielki Zderzacz Hadronów w CERN pod Genewą w Szwajcarii. Właśnie badania cząstek elementarnych i jąder atomowych pozwoliły fizykom opisać pierwsze chwile Wszechświata.



Linie wychodzące z punktu zderzenia to tory cząstek wyprodukowanych w zderzeniu. Tak możemy wyobrazić sobie pierwsze ułamki sekund po Wielkim Wybuchu

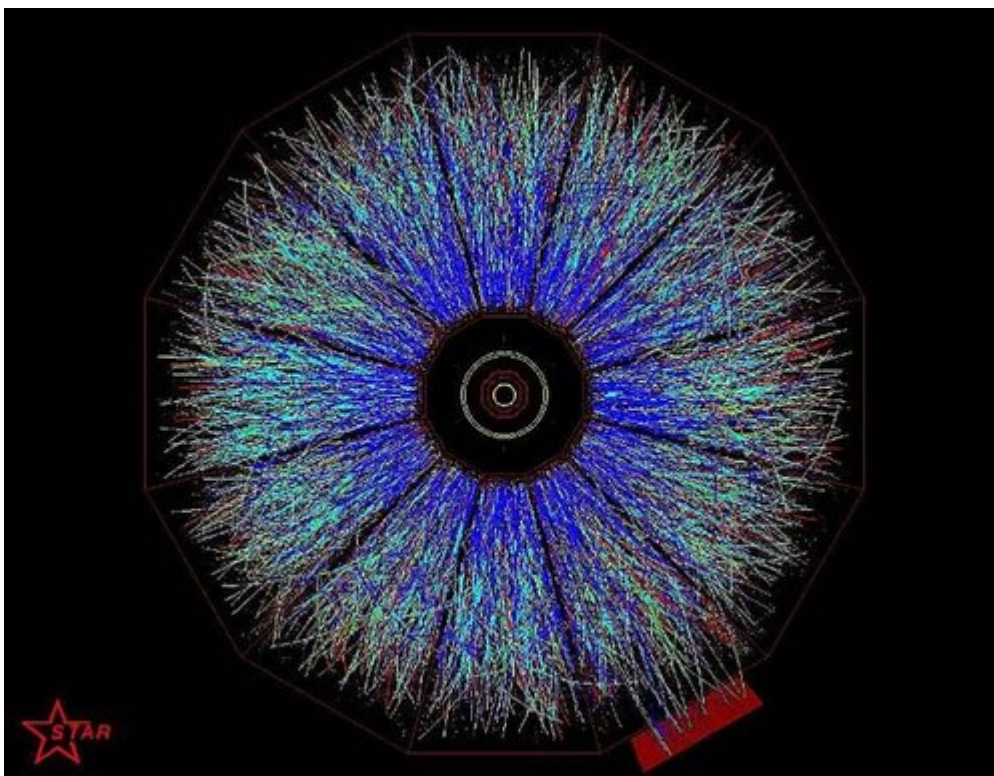
Rysunek 1.98: Zderzenie proton - proton o ogromnej energii zarejestrowane w laboratorium CERN w Szwajcarii (10.03.2010)

Etapy rozwoju Wszechświata

Materia w pierwszych ułamkach sekund po Wielkim Wybuchu miała ekstremalnie wielką gęstość i temperaturę. W tych warunkach nie istniały hadrony.

- i **Wskazówka:** Hadrony to cząstki składające się z kwarków i podlegające oddziaływaniom silnym. Na przykład proton i neutron są hadronami. Gluony są nośnikami oddziaływań silnych. Gdy materia jest w stanie o bardzo wysokiej temperaturze i gęstości, granice między nukleonami zanikają i powstaje stan plazmy kwarkowo-gluonowej.

Materia miała postać plazmy kwarkowo-gluonowej. Taki stan materii uzyskujemy dziś w zderzeniach jąder poruszających się z prędkościami bliskimi prędkości światła.



Punkt w środku to miejsce zderzenia – jądra nadleciały z kierunków prostopadłych do ekranu. Kolorowe linie to tory wyprodukowanych w zderzeniu cząstek. Obraz ten to świetny przykład potwierdzający równoważność energii i masy $E = mc^2$ – energia kinetyczna pocisków zamieniła się na masy powstających cząstek

Rysunek 1.99: Zderzenie jąder złota o ogromnych energiach (eksperyment STAR, Brookhaven National Laboratory, USA)

Gdy od Wielkiego Wybuchu minęło 10^{-9} s, temperatura spada do 10^{15} K i kwarki zaczynają łączyć się w hadrony. Powstałe hadrony, cząstki o ogromnych energiach, nieustannie zderzają się ze sobą. W zderzeniach produkowane są lawiny cząstek wtórnych.

Produkcja zachodzi zawsze parami: cząstka i antycząstka, aby mógł być zachowany ładunek i inne liczby kwantowe. Jednocześnie zachodzi anihilacja hadronów i antyhadroneów.

- ⚠ **Ważne:** *Kreacja cząstek* polega na powstawaniu nowych cząstek w zderzeniach wysokoenergetycznych cząstek lub jąder atomowych. Cząstki powstają kosztem energii kinetycznej zderzających się pocisków.
- ⚠ **Ważne:** *Cząstki i antycząstki:* każdej cząstce odpowiada antycząstka o identycznej masie i przeciwnym ładunku elektrycznym. Na przykład antycząstką elektronu jest dodatnio naładowany pozyton. Gdy cząstka i antycząstka spotykają się, następuje *anihilacja*, czyli obie cząstki znikają i pojawia się promieniowanie o energii równej energii spoczynkowej cząstek. Podczas anihilacji elektronu i pozytonu powstają dwa fotony promieniowania gamma biegnące w przeciwne strony. Zdarza się też proces odwrotny - *kreacja* pary elektron-pozyton. Foton promieniowania gamma może w pobliżu jądra atomowego zamienić się na elektron i jego antycząstkę pozyton. Całkowita energia obu powstałych cząstek jest dokładnie równa energii fotonu, który zniknął.

Kreacja i anihilacja hadronów początkowo są w równowadze, to znaczy, tyle samo cząstek powstaje, co znika w procesie anihilacji. W miarę ekspansji Wszechświata spada temperatura, a więc zmniejsza się średnia energia kinetyczna cząstek. W końcu zaczyna brakować energii na produkcję cząstek i anihilacja zaczyna przeważać nad kreacją. Prawie wszystkie protony i neutrony anihilują, zwiększając liczbę fotonów we Wszechświecie. Pozostaje nadwyżka materii nad antymaterią. Fakt, że po wielkiej anihilacji w ogóle coś pozostało jest jedną ze współczesnych zagadek nauki. Fizycy mają nadzieję, że eksperyment na największym zderzaczu LHC w CERN pozwoli zweryfikować hipotezy wyjaśniające, dlaczego pozostała nadwyżka materii nad antymaterią. Jak wielka

była ta nadwyżka? Szacuje się, że na 30 mln antycząstek przypadało (30 mln + 1) cząstek. Z tej niewielkiej nadwyżki składa się obecny Wszechświat, łącznie z nami.

Przez pierwszą sekundę materia Wszechświata składa się z oddzielnych cząstek: protonów, neutronów, elektronów, fotonów. Jądra atomowe nie mogą istnieć, bo temperatura jest zbyt wysoka – powstałe jądro natychmiast ulega rozbięciu w kolejnym zderzeniu.

Aby protony i neutrony mogły łączyć się w jądra atomowe, temperatura nie może być zbyt wysoka, bo wtedy nowopowstałe jądra natychmiast się rozpadają. Temperatura nie może też być zbyt niska tak, aby protony miały wystarczającą energię, by pomimo odpychania kulombowskiego mogły zbliżyć się do siebie.

Po około 1 s po Wielkim Wybuchu temperatura spada do około 10^{10} K i rozpoczyna się proces *nukleosyntezy pierwotnej*. Przy tej temperaturze mogły już utrzymać się produkty pierwszej reakcji nukleosyntezy $n + p \rightarrow {}^2_1\text{D}$. Jądra deuteru wchodziły w kolejne reakcje ${}^2_1\text{D} + n \rightarrow {}^3_1\text{T}$ oraz ${}^2_1\text{D} + p \rightarrow {}^3_2\text{He}$. Tworzyły się też jądra ${}^4_2\text{He}$ w reakcji: ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2p$. Niewielka część jąder helu zdążyła jeszcze wejść w reakcję: ${}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^7_3\text{Li}$.

Zapis reakcji $n + p \rightarrow {}^2_1\text{D}$ oznacza, że neutron n połączył się z protonem p i powstało jądro deuteru ${}^2_1\text{D}$, składające się z 1 protonu i 1 neutronu.


Natomiast w reakcji ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2p$ połączyły się dwa jądra ${}^3_2\text{He}$ (każde zawiera 2 protony i 1 neutron). Powstało jądro ${}^4_2\text{He}$ (2 protony i 2 neutrony) oraz 2 dodatkowe protony.

Cały Wszechświat przypominał w tym okresie wnętrze gwiazdy. Pamiętajmy, że Wszechświat się nieustannie rozszerzał i zmniejszała się jego temperatura. Po około 3 minutach temperatura spadła do około 10^8 K i nukleosynteza ustała – temperatura stała się zbyt niska, aby łączenie się jąder mogło zachodzić. Ustalił się skład Wszechświata. Po zakończeniu nukleosyntezy pierwotnej zawartość Wszechświata była następująca:

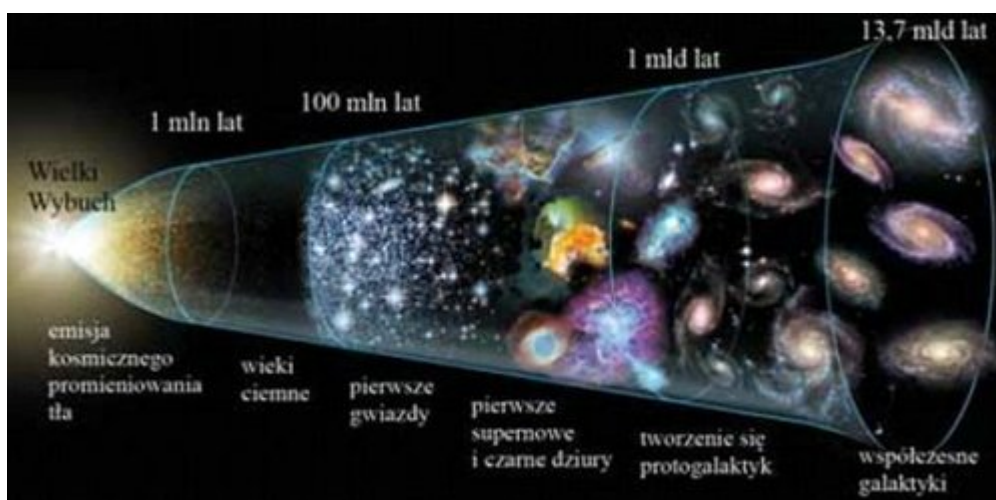
- fotony
- elektrony (ok. 1 na miliard fotonów)
- protony (ok. 1 na miliard fotonów)
- jądra helu (23% masy wodoru)
- jądra ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_3\text{Li}$ (śladowe ilości)

Powstanie atomów – geneza promieniowania relikтового

Przez około 300000 lat temperatura Wszechświata była na tyle wysoka, że materia występowała w postaci plazmy – jądra atomowe i elektrony poruszały się niezależnie.

 **Ważne:** *Plazma* – stan materii, w którym atomy są zjonizowane, to znaczy jądra atomowe i elektrony występują oddzielnie - są ze sobą wymieszane, ale nie tworzą atomów.

Plazma była nieprzezroczysta dla promieniowania, fotony wciąż zderzały się ze swobodnymi elektronami i protonami i zmieniały kierunek ruchu. Po 380000 lat temperatura spada do 3000 K. W tej temperaturze mogły już istnieć atomy. Protony i jądra helu przyłączały elektrony i powstały atomy. Promieniowanie nie było już w stanie oddziaływać z materią — miało zbyt małą energię, aby jonizować i wzbudzać atomy. Materia stała się przezroczysta i straciła wpływ na promieniowanie. Fotony z tego okresu w większości bez przeszkód podróżowały przez Wszechświat i możemy je teraz rejestrować jako tak zwane *promieniowanie reliktowe* (*promieniowanie tła*). Promieniowanie to niesie informacje o Wszechświecie w wieku 380000 lat, kiedy był on 1000 razy mniejszy niż jest teraz. Temperatura Wszechświata spadła od tego momentu 1000-krotnie i wynosi teraz około 3 K.



Rysunek 1.100: Ewolucja Wszechświata

Po około 200 mln lat po Wielkim Wybuchu zaczęły powstawać pierwsze *gwiazdy* i *galaktyki*. Rozpoczęła się współczesna *era galaktyczna*. Pierwotne duże gwiazdy wybuchają w postaci nowych i supernowych. Z rozproszonej po nich materii tworzą się następne gwiazdy. Jedną z nich jest nasze Słońce, które wraz z planetami istnieje już ok. 5 miliardów lat. Na Ziemi (od około 3,5 miliarda lat) rozwija się życie organiczne, początkowo w formach prymitywnych, następnie tworzą się bardziej skomplikowane organizmy roślinne i zwierzęce. W końcu (ok. 150 tys. lat temu) pojawia się *homo sapiens*, który spoglądając w gwiazdy odkrywa ogrom czasowy i przestrzenny Kosmosu.

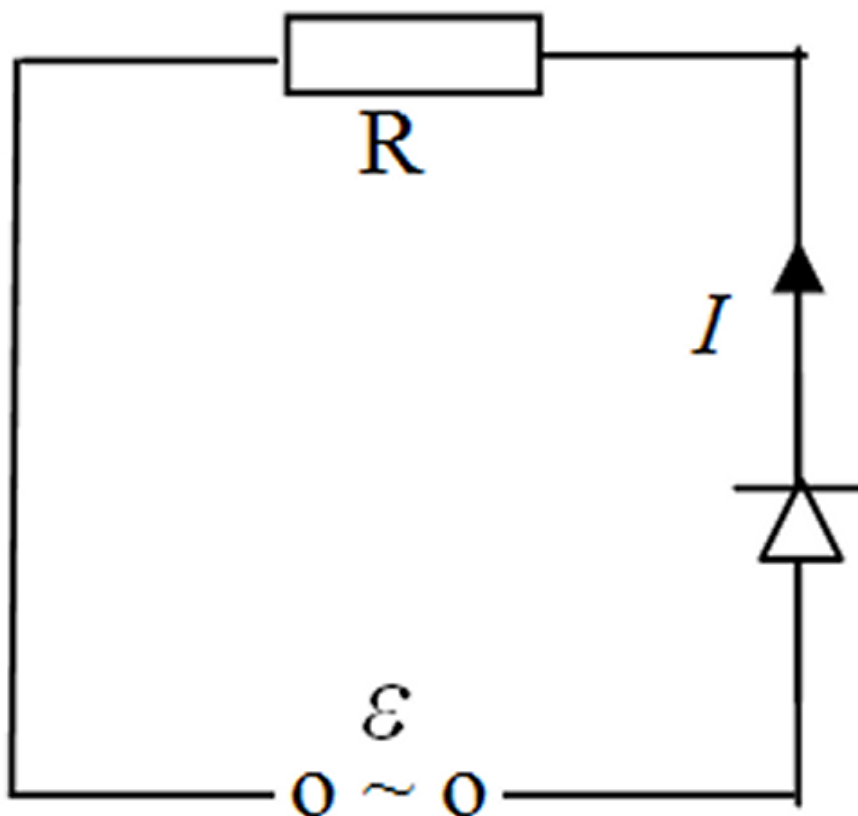
Przyszłość Wszechświata

Zapytajmy, czy i jak Wszechświat będzie ewoluował w czasie. Okazuje się, że dla przyszłości Wszechświata istotna jest gęstość materii w nim zawartej, ponieważ wszystkie ciała się przyciągają siłami grawitacyjnymi. Ekspandująca (gwałtownie rozprzestrzeniająca się) materia ma energię kinetyczną, jednakże grawitacja spowalnia tempo ekspansji. Jeżeli gęstość materii ρ we Wszechświecie jest dostatecznie duża, to przyciąganie wzajemne materii (czyli grawitacja) spowoduje zatrzymanie ekspansji, po czym grawitacja spowoduje zapadanie się Wszechświata – taki Wszechświat nazywa się *Wszechświatem zamkniętym*. Jeżeli jednak gęstość materii jest mała, mniejsza od tzw. gęstości krytycznej ρ_{kryt} , to grawitacja nigdy nie zdoła wziąć góry nad ekspansją i Wszechświat będzie się rozszerzał w nieskończoność. Mamy wtedy *Wszechświat otwarty*, który ma tylko początek, ale nie ma końca. W przypadku, gdy $\rho = \rho_{kryt}$, mamy również otwarty Wszechświat (tzw. marginalny, płaski), mający tylko początek i rozszerzający się bez końca.

Gęstość krytyczna wynosi $\rho_{kryt} = 9,7 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Odpowiada to 6 atomom wodoru w jednym metrze sześciennym.

Nie jest to dużo, ale biorąc pod uwagę, że między materią skupioną w gwiazdach i galaktykach Kosmos zionie pustką, to przy równomiernym rozproszczeniu w całym Kosmosie materii zawartej w świecących obiektach otrzymalibyśmy wartość 25 razy mniejszą od wartości ρ_{kryt} - dane uzyskane z badania promieniowania relikтового wskazują, że parametr gęstości, czyli stosunek gęstości materii we Wszechświecie do gęstości krytycznej wynosi $\Omega = \rho / \rho_{kryt} = 1,02 \pm 0,02$. Prawdopodobnie, jeśli ten pomiar jest prawidłowy, Wszechświat czeka wieczna ekspansja.

Krzywe na [Rysunek 1.101: Hipotezy ewolucji Wszechświata](#) na stronie 103 przedstawiają zależność promienia Wszechświata $R(t)$ od czasu dla trzech przypadków omówionych powyżej.



Krzywa a przedstawia Wszechświat otwarty ($\rho < \rho_{kryt}$), krzywa b – otwarty ($\rho = \rho_{kryt}$), c – zamknięty ($\rho > \rho_{kryt}$) – ma początek i koniec (być może oscylujący?)

Rysunek 1.101: Hipotezy ewolucji Wszechświata

Zagadka ciemnej materii i ciemnej energii

Już dawno astronomowie zauważyli, że prędkości gwiazd na peryferiach galaktyk są większe, niż przewidują to prawa dynamiki i grawitacji. Wynika z tego, że galaktyki muszą zawierać więcej materii oddziałującej grawitacyjnie, niż widzimy.

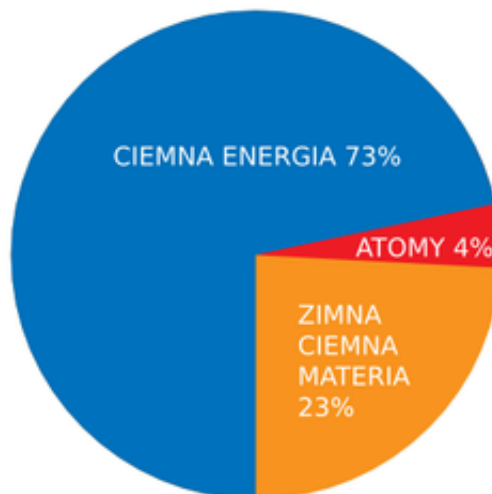
Wskazówka: Wyobraźmy sobie karuzelę łańcuchową ze starymi, zardzewiałymi łańcuchami. Jesteśmy pewni, że gdy karuzela zacznie wirować, łańcuchy pozrywają się i krzeselka odfruną w dal. Jednak widzimy, że karuzela wiruje i nic złego się nie dzieje. Wnioskujemy, że łańcuchy są jednak mocniejsze, niż nam się wydawało. Podobnie jest z gwiazdami na peryferiach galaktyki, które poruszają się zbyt szybko, niż na to pozwala siła grawitacji pochodząca od widzialnej materii. Wnioskujemy, że siła grawitacji jest jednak większa, a więc musi istnieć jakaś niewidzialna materia w galaktyce – ciemna materia.

Tę nieznaną materię, której nie możemy wykryć inaczej niż przez jej oddziaływanie grawitacyjne nazwano *ciemną materią*. Analiza ruchu gwiazd w galaktykach wskazuje, że galaktykę otacza sferyczna kula ciemnej materii. Masa ciemnej materii otaczającej galaktykę wielokrotnie przewyższa masę świecących gwiazd wchodzących w jej skład. Ciemna materia składa się z nieznanых nam cząstek oddziałujących tylko grawitacyjnie i słabo. Istnieją hipotezy o naturze cząstek ciemnej materii (np. cząstki supersymetryczne), ale nie wykryto ich do tej pory. Wiadomo, że nie składa się z kwarków, jak materia, którą obserwujemy.

Badanie tzw. mikrofalowego promieniowania relikтового wskazuje, że ciemnej materii jest we Wszechświecie prawie 6 razy więcej niż widzialnej.

Badanie supernowych typu 1a (tzw. świece standardowe) prowadzi do wniosku, że około 5 mld lat temu ekspansja Wszechświata zaczęła przyspieszać. Nieznana jest przyczyna tego zaskakującego zjawiska. Czynnikiem powodującym


przyspieszanie ekspansji Wszechświata nazwano *ciemną energią*. Z badania promieniowania relikтового wynika, że ciemna energia, której natury nie znamy, stanowi około 73% zawartości Wszechświata.



Tylko 4% materii Wszechświata stanowi zwykła materia (atomy), czyli to wszystko, co widzimy wokół siebie, co badają fizycy, chemicy i biologowie. Reszta to tajemnicza ciemna materia i jeszcze bardziej tajemnicza ciemna energia. Przyszli badacze mają co robić!

Rysunek 1.102: Skład Wszechświata

Pytania i problemy

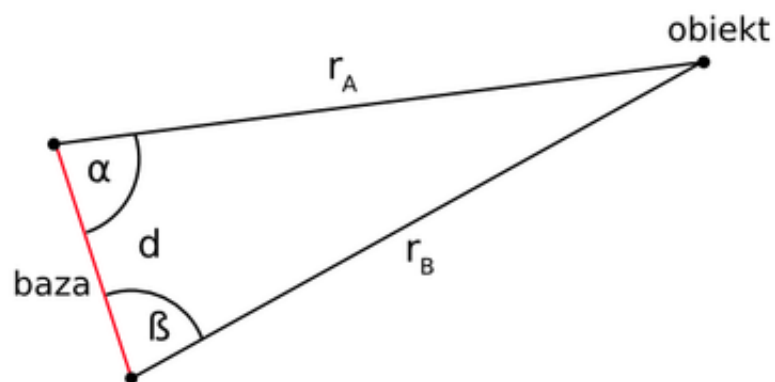
1. Przedstaw teorię Wielkiego Wybuchu. Opisz ucieczkę galaktyk.
2. Wyjaśnij, dlaczego obserwowane oddalanie się od nas galaktyk nie oznacza, że znajdujemy się w środku Wszechświata.
3.  **Wskazówka:** Od czego zależy przyszłość Wszechświata?

1.12 Odległości we Wszechświecie

Warto się zastanowić nad tym, w jaki sposób zdołano zmierzyć kosmiczne odległości nie mając możliwości opuszczenia macierzystej planety.

Metoda triangulacyjna

Aby zmierzyć duże odległości, nie jest konieczne wybieranie się w podróż. Na Ziemi można obrać pewien odcinek AB (tzw. bazę triangulacji, *Rysunek 1.103: Zasada triangulacyjnego pomiaru odległości obiektów astronomicznych* na stronie 105), zmierzyć jego długość oraz kąty α i β , pod którymi widać obiekt, aby dało się wyznaczyć odległości (r_A i r_B). Jak widać – punkty A , B i obiekt są wierzchołkami trójkąta; wystarczy zmierzyć jeden z boków trójkąta (tu AB) oraz kąty α i β , aby znaleźć długości pozostałych boków trójkąta (r_A i r_B). Trzeba także posłużyć się zasadą podobieństwa trójkątów lub jednym z twierdzeń trygonometrii.



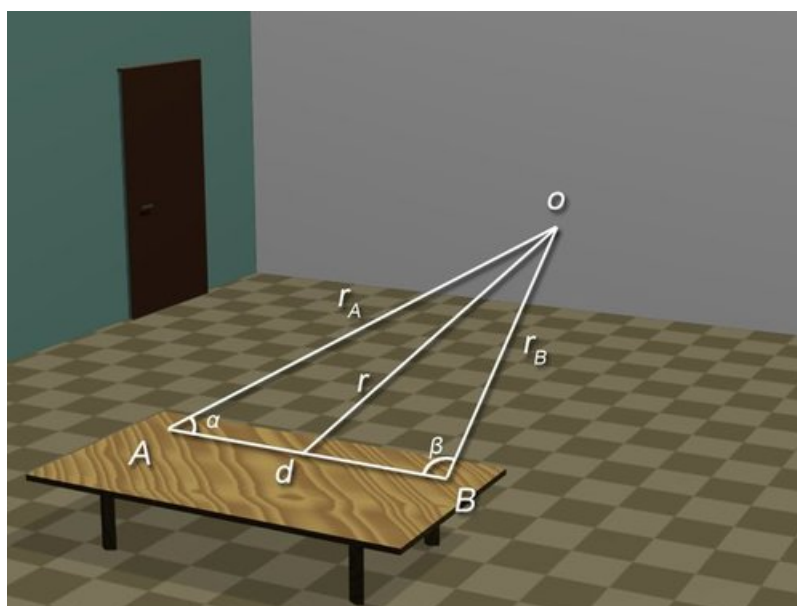
Wystarczy znać jeden z boków trójkąta (tzw. bazę d) oraz kąty α i β , aby znaleźć pozostałe boki trójkąta

Rysunek 1.103: Zasada triangulacyjnego pomiaru odległości obiektów astronomicznych

Łatwo się o tym przekonasz, jeżeli wykonasz następujące *doświadczenie*.

Doświadczenie: Pomiar metodą triangulacyjną

Za pomocą metody triangulacyjnej, podobnej do tej, jaką stosują astronomowie, zmierzmy zdalnie odległość punktu zaznaczonego na ścianie klasy od biurka nauczycielskiego, znajdującego się po przeciwnej stronie klasy. Biurko będzie spełniało rolę Ziemi, a punkt – wyobrażenie obiektu astronomicznego, np. Księżyca.



Rysunek 1.104: Zdalny pomiar odległości r , r_A i r_B do punktu O

Na ścianie zaznacz (np. wbijając pinezkę) punkt O (*Rysunek 1.104: Zdalny pomiar odległości r , r_A i r_B do punktu O* na stronie 106).

Narysuj kredą na biurku odcinek AB równoległy do krawędzi stołu (*Rysunek 1.104: Zdalny pomiar odległości r , r_A i r_B do punktu O* na stronie 106). Będzie to baza do zdalnego pomiaru odległości do punktu O .

Zmierz długość d bazy – odcinka AB za pomocą taśmy mierniczej.

Zmierz kąty α i β za pomocą kątomierza (np. takiego, który służy do rysowania kątów na szkolnej tablicy) lub lepiej – przyrządu optycznego do pomiarów kątów (np. teodolitu lub spektrometru).

W przypadku pomiarów kątomierzem umocuj (np. za pomocą plasteliny) cienki pionowy drut w środku kątomierza. Ustaw oko na linii łączącej drut z punktem O . Trzymając w ręku drugi cienki drut ustaw go na tej samej linii wzroku na kole kątomierza (jest to odpowiednik zelowania z karabinu za pomocą muszki i szczerbinki).

Każdy pomiar wykonaj trzykrotnie. Wyniki pomiarów wpisz do tabelki pomiarów wg wzoru (*Rysunek 1.105: Tabela pomiarów* na stronie 106):

Lp.	Baza AB d (m)	Kąt α (stopnie)	Kąt β (stopnie)	Odległość r_A		Odległość r_B		Odległość r	
				zmierzona na rysunku (cm)	obliczona (m)	zmierzona na rysunku (cm)	obliczona (m)	zmierzona na rysunku (cm)	obliczona (m)
1									
2									
3									

Rysunek 1.105: Tabela pomiarów

Przygotujesz teraz trójkąt podobny do trójkąta ABO , o odpowiednio mniejszych rozmiarach boków. Narysuj w skali, np. 1:20, na karcie papieru (np. formatu A3) bazę – odcinek AB : na przykład, jeżeli zmierzona długość bazy d wynosi 1,66 m, to na rysunku, w skali 1:10, ten odcinek będzie miał długość 16,6 cm, a w skali 1:20 – 8,3 cm).

Na papierze narysuj linie proste wychodzące z punktów A i B nachylone do bazy pod kątami α i β . Miejsce przecięcia tych prostych oznacz jako punkt O . Zmierz odcinki r_A i r_B , zastosuj odwrotność skali i oblicz rzeczywiste odległości r_A i r_B . Do obliczeń wykorzystaj wartości średnie z kilku (np. trzech) pomiarów. Wyniki pomiarów i obliczeń wstaw do tabelki. Przykładowe dane znajdują się w tabeli (*Rysunek 1.106: Tabela z przykładowymi wynikami pomiarów (skala rysunku 1:20)* na stronie 107).

Lp.	Baza AB d (m)	Kąt α (stopnie)	Kąt β (stopnie)	Odległość r_A		Odległość r_B		Odległość r	
				zmierzona na rysunku (cm)	obliczona wg skali (m)	zmierzona na rysunku (cm)	obliczona wg skali (m)	zmierzona na rysunku (cm)	obliczona wg skali (m)
1	1,60	84,5	81,5	40,0		40,5		40,0	
2	1,59	85,0	81,0	40,2		40,3		39,9	
3	1,61	84,0	82,0	40,1		40,7		40,0	
śr. =	1,60	84,5	81,5	40,1	8,02	40,5	8,10	40,0	8,00

Rysunek 1.106: Tabela z przykładowymi wynikami pomiarów (skala rysunku 1:20)

Wykonując to doświadczenie, masz możliwość sprawdzenia wyników r_A , r_B i r za pomocą taśmy mierniczej, co oczywiście jest niewykonalne w przypadku pomiarów astronomicznych. Zmierz zatem za pomocą taśmy mierniczej odległości r_A , r_B i r , i porównaj je z wynikami otrzymanymi opisaną wyżej metodą graficzną. A oto przykładowe dane pomiarów wykonanych taśmą mierniczą:

Lp.	r_{Am} (m)	r_{Bm} (m)	r_m (m)
1	8,07	8,20	8,05
2	8,09	8,22	8,03
3	8,08	8,18	8,04
śr. =	8,08	8,20	8,04

Rysunek 1.107: Wyniki pomiarów wykonanych taśmą mierniczą

Porównując te pomiary (*Rysunek 1.107: Wyniki pomiarów wykonanych taśmą mierniczą* na stronie 107) z wynikami z tabeli (*Rysunek 1.106: Tabela z przykładowymi wynikami pomiarów (skala rysunku 1:20)* na stronie 107) widzimy, że:

$$(\text{wzór 75}) \quad \Delta r_A = r_{Am} - r_A = 0,06 \text{ m}$$

$$(\text{wzór 76}) \quad \Delta r_B = r_{Bm} - r_B = 0,06 \text{ m}$$

$$(\text{wzór 77}) \quad \Delta r = r_m - r = 0,04 \text{ m}$$

Te wartości możemy uznać za wiarygodne *niepewności pomiaru* w naszej metodzie zdalnego wyznaczania odległości. Ujednolicając, możemy przyjąć, że niepewność naszego pomiaru

odległości metodą triangulacyjną wynosi 0,06 m. Zatem końcowe wyniki pomiarów powinniśmy przedstawić w postaci:

$$(\text{wzór 78}) r_A = (8,02 \pm 0,06) \text{ m}$$

$$(\text{wzór 79}) r_B = (8,10 \pm 0,06) \text{ m}$$

$$(\text{wzór 80}) r = (8,00 \pm 0,06) \text{ m}$$



Wskazówka:

Doświadczenie "*Triangulacja*" umożliwia zapoznanie się z zasadą triangulacyjnego pomiaru odległości stosowaną w astronomii, bez znajomości wzorów trygonometrycznych. Poniżej jest opisana metoda, która wykorzystuje wzory trygonometryczne.

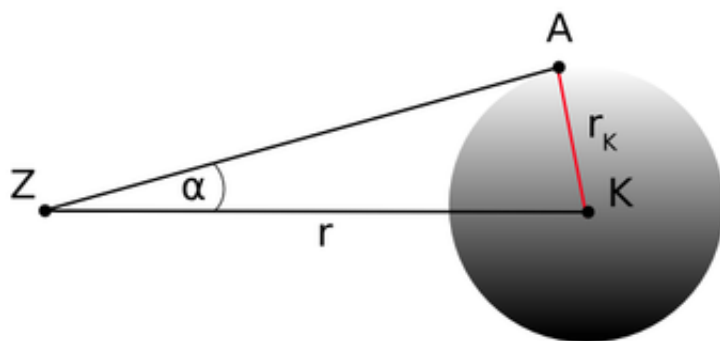
Po zastosowaniu znanego w geometrii twierdzenia sinusów, otrzymujemy:

$$(\text{wzór 81}) r_A = \frac{d}{\sin(\alpha + \beta)} \sin \beta$$

$$(\text{wzór 82}) r_B = \frac{d}{\sin(\alpha + \beta)} \sin \alpha$$

Znajomość odległości Ziemia-Księżyc dała możliwość określenia rozmiarów Księżyca. Rysunek [Rysunek 1.108: Zasada pomiaru promienia Księżyca \$r_K\$](#) na stronie 108 wyjaśnia zasadę pomiaru średnicy Księżyca.

Znając r – odległość Ziemia-Księżyc i mierząc kąt α (z pewnego punktu na Ziemi) możemy wyznaczyć



$$r_K = r \sin \alpha$$

Rysunek 1.108: Zasada pomiaru promienia Księżyca r_K

Metoda paralaksy

Metody triangulacyjne można stosować tylko do niezbyt odległych obiektów. Tą metodą zmierzono odległości do Księżyca, planet Układu Słonecznego i do Słońca. Do najbliższych sąsiednich gwiazd stosuje się odmianę metody triangulacyjnej, tzw. metodę paralaksy. Metoda ta wykorzystuje zjawisko pozornej zmiany położenia przedmiotu oglądanego z różnych kierunków.

i **Wskazówka:** Aby zrozumieć, na czym polega paralaksa, wykonaj proste ćwiczenie. Wyciągnij przed siebie rękę z wyciągniętym do góry palcem i spójrz na palec raz jednym, raz drugim okiem. Podczas zmiany oka, obraz palca przesuwa się. Teraz przybliż palec jak najbliżej oczu i powtórz ćwiczenie. Co się zmieniło? Dokończ zdanie: im większe przesunięcie obrazu oglądanego z różnych kierunków, tym odległość do przedmiotu jest... (mniejsza czy większa?).

W związku z ruchem Ziemi wokół Słońca obraz bliskiej gwiazdy w ciągu roku zatacza na niebie elipsę. Po wielkości tej elipsy można poznać, jak daleko znajduje się gwiazda: im większa elipsa, tym gwiazda jest bliżej nas. Na Ziemi mierzymy tzw. *paralakse* – kąt ε (*Rysunek 1.109: Metoda paralaksy* na stronie 110).

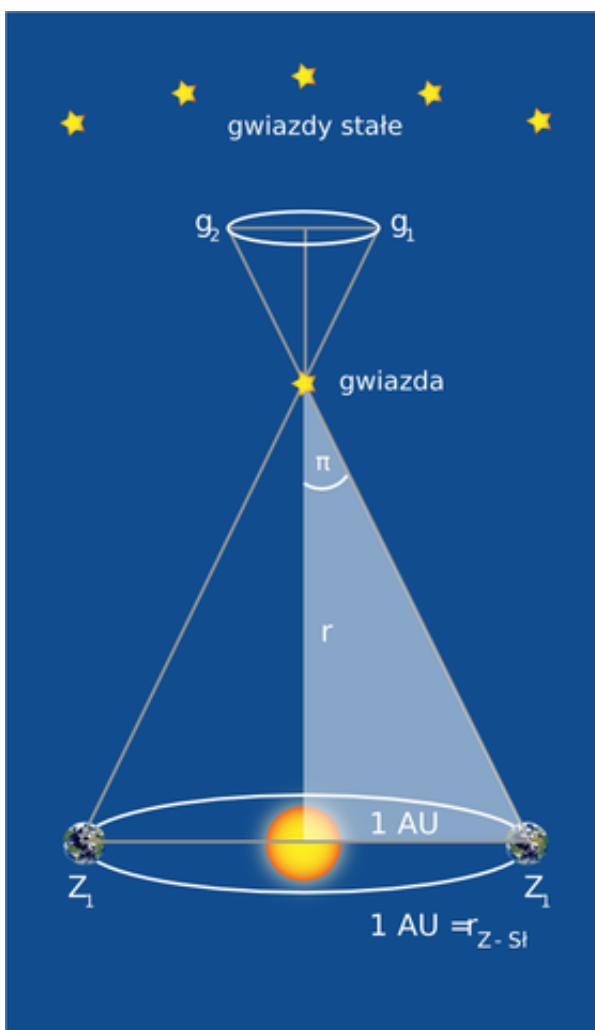
! **Ważne:** *Paralaksa* to pozorna zmiana położenia obiektu wynikająca z ruchu obserwatora, czyli ze zmiany jego położenia.

Rysunek *Rysunek 1.109: Metoda paralaksy* na stronie 110 pokazuje jak wyznacza się odległość do gwiazdy z pomiaru tzw. paralaksy – kąta ε , o który pozornie przemieszcza się bliska gwiazda na tle dalekich „gwiazd stałych”. Kąt ten wynika z ruchu Ziemi wokół Słońca w przypadku kiedy stosuje się średnicę orbity Ziemi jako *bazę* – mierzymy położenie gwiazdy na tle odległych, nieruchomych gwiazd w dwóch momentach: gdy Ziemia znajduje się w przeciwnych miejscach na swojej orbicie wokółsłonecznej.

r – odległość do gwiazdy można otrzymać ze wzoru:

$$(\text{wzór 83}) \quad r = \frac{r_{Z-Sl}}{\operatorname{tg} \varepsilon}$$

gdzie r_{Z-Sl} jest odległością Ziemia-Słońce, której wartość jest równa 1 AU.



Zasada wyznaczania odległości polega na pomiarze tzw. *paralaksy* – kąta ϵ , o który pozornie przemieszcza się bliska gwiazda na tle dalekich gwiazd stałych. Bliska gwiazda w ciągu roku zatacza pełne kółko na niebie w związku z ruchem Ziemi wokół Słońca

Rysunek 1.109: Metoda paralaksy

Metodą paralaksy wyznaczono odległość do najbliższej, znajdującej się poza Układem Słonecznym gwiazdy *Proxima Centauri* – stwierdzono, że wynosi ona 4,28 lata świetlne.

Wskazówka: W astronomii odległości nie wyraża się w metrach czy kilometrach, gdyż jest to jednostka zbyt mała. Jednostki odległości używane w astronomii to:

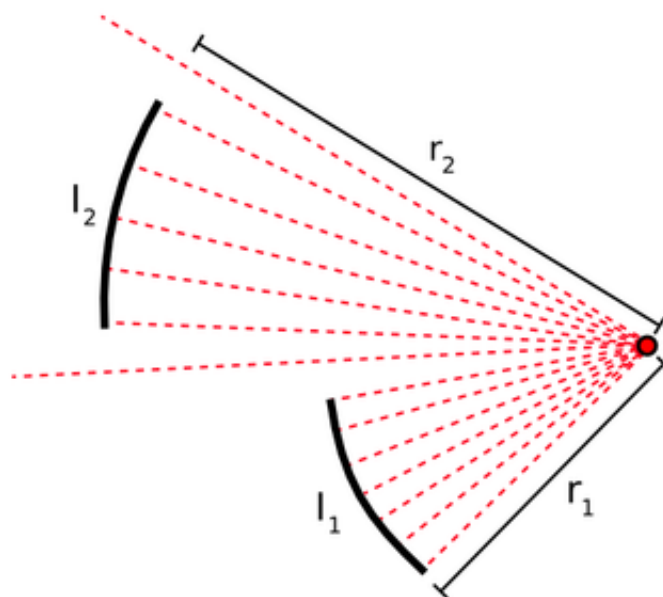
- *AU* – *jednostka astronomiczna* – jest to średnia odległość od Ziemi do Słońca; $1 \text{ AU} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$.
- *rok świetlny* – to droga jaką przebywa światło w próżni w czasie jednego roku;
 $1 \text{ rok świetlny} = 1 \text{ ly} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km}$ (oznaczenie *ly* pochodzi od ang. *light year*).
- *parsek* – odległość, z której promień orbity ziemskiej widziany byłby pod kątem 1 sekundy łuku;
 $1 \text{ ps} = 3,26 \text{ ly} = 206 \ 265 \text{ AU} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ km}$ (nazwa parsek pochodzi ze skrótu słów angielskich: *parallax* i *second*).

Metoda świec standardowych

Pomiary odległości do obiektów kosmicznych, znajdujących się znacznie dalej, wykonuje się, korzystając z innych sposobów. Aby wyniki były jak najbardziej wiarygodne, posługujemy się nie jedną, ale kilkoma metodami. Można dzięki temu poprawić dokładność pomiarów, zmniejszając błędy i niepewności pomiarowe. Astrofizycy znają wiele

metod wyznaczania dalekich odległości. Jedna z nich nosi nazwę metody świec standardowych (*Rysunek 1.110: Zasada pomiaru odległości metodą świec standardowych* na stronie 111).

Teleskop zbiera tylko część mocy promieniowanej przez obiekt – im dalej od obiektu, tym mniejsza część mocy jest zbierana. Zatem natężenie światła odbieranego przez teleskop zależy od odległości od obiektu o określonej mocy promieniowania. Jeżeli znamy odległość r_1 i mierzymy natężenie światła I_1 od obiektu, to możemy wyznaczyć nieznaną odległość r_2 po zmierzeniu natężenia



I_2

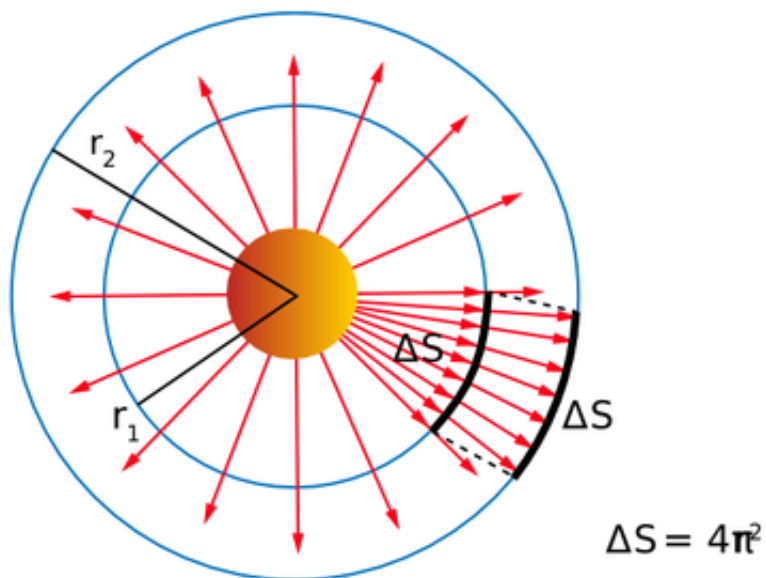
Rysunek 1.110: Zasada pomiaru odległości metodą świec standardowych

Metoda ta wykorzystuje fakt, że światło dochodzące do nas od gwiazdy jest tym słabsze, im dalej się ona znajduje. Obiektyw zwierciadła teleskopu o określonej powierzchni zbiera więcej światła, gdy gwiazda jest bliżej nas, a mniej – gdy jest dalej. Wielkość strumienia światła wpadającego do teleskopu informuje nas o odległości do gwiazdy.

Wyobraźmy sobie aleję z latarniami ustawionymi w równych odległościach. Natężenie światła dochodzącego od kolejnych latarni jest coraz mniejsze wraz ze wzrostem odległości od latarni. Mierząc to natężenie, można wyznaczyć odległość pod warunkiem, że znamy absolutną jasność źródła światła, czyli całkowitą energię promieniowania wysyłanego przez źródło.

Na rysunku *Rysunek 1.111: Zasada metody świec standardowych* na stronie 112 widzimy, że talerz zwierciadła teleskopu o powierzchni ΔS zbiera światło z większego kąta od bliskiej gwiazdy znajdującej się w odległości r_1 , niż w przypadku, gdy gwiazda znajduje się w większej odległości r_2 .

talerz zwierciadła teleskopu o powierzchni ΔS zbiera światło z większego kąta bryłowego od bliskiej gwiazdy znajdującej się w odległości r_1 , niż w przypadku, gdy gwiazda znajduje się w większej odległości



r_2

Rysunek 1.111: Zasada metody świec standardowych

Zależność natężenia światła od odległości od obiektu można wyprowadzić stosując następujące rozumowanie.

Natężenie światła I definiujemy jako stosunek mocy P światła przechodzącego przez powierzchnię S ustawioną prostopadle do kierunku jego rozchodzenia się, do tej powierzchni:

$$(\text{wzór 84}) I = \frac{P}{S}$$

Teleskop zbiera tylko część mocy promieniowanej przez obiekt – im dalej od obiektu, tym mniejsza część mocy jest zbierana. Jeżeli znamy odległość r_1 od obiektu o określonej mocy promieniowania i mierzymy natężenie światła I_1 , to możemy wyznaczyć niewiadomą odległość r_2 . Cała moc P_0 jest wysyłana przez obiekt we wszystkich kierunkach. Jeżeli otoczmy obiekt sferą o promieniu r_1 , czyli o powierzchni $S = 4\pi r_1^2$, to natężenie światła wyniesie:

$$(\text{wzór 85}) I_1 = \frac{P_0}{4\pi r_1^2}$$

Podobnie dla odległości r_2 :

$$(\text{wzór 86}) I_2 = \frac{P_0}{4\pi r_2^2}$$

Dzieląc stronami oba te równania, po przekształceniu otrzymamy:

$$(\text{wzór 87}) r_2 = r_1 \sqrt{\frac{I_1}{I_2}}$$

Aby zmierzyć odległości dalekich galaktyk metodą świec standardowych, trzeba znać ich absolutne jasności. Tak się szczęśliwie składa, że w wielu przypadkach w galaktykach znajdujemy gwiazdy supernowe typu *Ia*. Supernowe typu *Ia* to taki rodzaj gigantycznej, kosmicznej eksplozji, dla której znamy całkowitą energię wyzwalaną podczas

wybuchu, możemy więc określić moc z jaką promieniuje. Jeśli w odległej galaktyce znajdziemy supernową typu *Ia*, to możemy, mierząc jasność supernowej, wyznaczyć odległość do galaktyki.

Astronomowie znają też inne obiekty, które mogą posłużyć jako tzw. świece standardowe. Są nimi *cefeidy* – pulsujące gwiazdy, których jasność zmienia się z okresem od kilku do kilkudziesięciu dni. Znamy związek między okresem zmian jasności i jasnością absolutną – dlatego cefeidy mogą służyć jako „świece standardowe”.

Gwiazdy zmienne odkryła i skatalogowała **Henrietta Leavitt** w roku 1912. Na podstawie obserwacji wyjaśniła związek między okresem pulsacji gwiazd i ich jasnością absolutną, co miało wielkie znaczenie dla rozwoju astronomii.



Rysunek 1.112: Henrietta Leavitt

Warto wspomnieć, że obecnie z bardzo dużą dokładnością wykonuje się pomiary odległości do najbliższych obiektów za pomocą techniki laserowej. Na przykład, pomiar czasu przelotu promienia laserowego odbitego od powierzchni Księżyca pozwolił na wyznaczenie odległości do naszego satelity z dokładnością do kilku centymetrów.

Metody opisane powyżej pozwoliły na wyznaczenie odległości kosmicznych, przedstawionych w tabeli [Charakterystyczne odległości w Kosmosie](#).

Tabela 1: Charakterystyczne odległości w Kosmosie

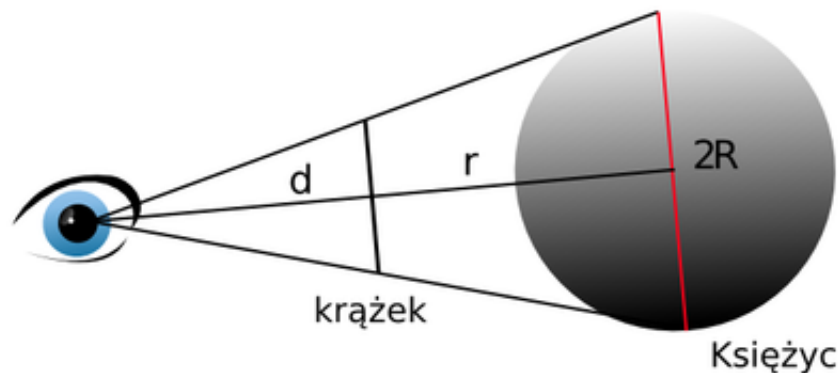
Odległość	Wartość w km	Czas przelotu światła
średnica Ziemi	$12,8 \cdot 10^3$	0,04 s
Ziemia – Księżyc	$3,8 \cdot 10^5$	1,28 s
Ziemia – Słońce	$1,5 \cdot 10^8$	8,32 min
Słońce – Neptun	$4,5 \cdot 10^9$	4,16 h
Słońce – najbliższa gwiazda (<i>Proxima Centauri</i>)	$4,05 \cdot 10^{13}$	4,28 lat
średnica Drogi Mlecznej	$1,1 \cdot 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^5$ lat
Słońce – najbliższa galaktyka (w Andromedzie)	$2,1 \cdot 10^{19}$	$2,3 \cdot 10^6$ lat
promień obserwowalnego Wszechświata	$1,3 \cdot 10^{23}$	$13,8 \cdot 10^9$ lat

! **Ważne:** *Promień obserwowalnego Wszechświata* to odległość, jaką światło mogło przebyć od momentu Wielkiego Wybuchu. Nie mamy informacji o tym, co położone jest dalej, bo światło nie zdążyło do nas dotrzeć w czasie istnienia Wszechświata. Linie ograniczającą obserwowalny Wszechświat nazywamy *horyzontem zdarzeń*.

Pytania i problemy

- Narysuj i wytnij z kartki papieru krążek o średnicy nie większej niż 1 cm. Zmierz możliwie dokładnie jego średnicę. Przylep go na szybie okna wtedy, gdy Księżyc będący w pełni znajdzie się naprzeciwko. Ustaw głowę w takiej odległości od szyby, aby przy otwartym jednym oku krążek dokładnie zasłaniał Księżyc – [Rysunek 1.113: Sposób pomiaru 2R – średnicy Księżyca](#) na stronie 115. Zmierz odległość oka od szyby. Znając odległość Ziemi od Księżyca $r = 384\ 400$ km, oblicz z podobieństwa trójkątów średnicę Księżyca (i jego promień).

$$(\text{ wzór 88 }) \frac{2R}{r} = \frac{d}{l} \rightarrow 2R = r \frac{d}{l}$$



Rysunek 1.113: Sposób pomiaru $2R$ - średnicy Księżyca

- Wyjaśnij, na czym polega pomiar odległości metodą paralaksy. Co trzeba znać, aby tą metodą zmierzyć odległość do gwiazdy? Wykonaj schematyczny rysunek.
- !** **Wskazówka:** Podaj, na czym polega pomiar odległości metodą standardowych świec. Co trzeba znać aby tą metodą zmierzyć odległość do jakiejś galaktyki?
- Podaj definicje jednostek odległości stosowanych w astronomii: roku świetlnego, jednostki astronomicznej i parseka.
- Mając dane z tabeli *Charakterystyczne odległości w Kosmosie* zbuduj model obserwowanego Wszechświata w mikroskali. Przyjmij, że Układ Słoneczny został zmniejszony do wielkości cząsteczki gazu 0,2 nm. W jakiej odległości od Słońca w tej skali znajdzie się najbliższa gwiazda, a w jakiej najbliższa galaktyka? **Uwaga:** 1 nm (*nanometr*) = 10^{-9} m.

1.D1 Ocena dokładności wyników pomiarów (Dodatek)

Każdy wynik pomiaru x daje tylko wartość przybliżoną rzeczywistej wartości x_0 . Powodowane jest to tym, że:

- przedmiot, który mierzymy, jest niedoskonały. Przy pomiarze długości stwierdzamy, że przedmiot nie jest idealnie równy,
- pomiar zawsze odbywa się z ograniczoną dokładnością wynikającą zarówno z czynności pomiarowych, jak i z wykonania samego przyrządu pomiarowego. Przy pomiarze długości występuje na przykład: niedokładne przyłożenie linijki, nieprecyzyjne wykonanie podziałki, określona grubość kresek podziałki itd.

Mimo że prawdziwa wartość wielkości mierzonej nie jest znana, możemy określić przedział wartości, w którym się ona mieści. Połowę szerokości tego przedziału nazywamy *niepewnością pomiarową* Δx . Przyjmujemy, że wartość rzeczywista mieści się w przedziale między: $(x - \Delta x)$ a $(x + \Delta x)$, gdzie x jest wartością zmierzoną. Na przykład, mierząc długość pręta, otrzymaliśmy wartość $x = 36,4$ cm i niepewność pomiarową $\Delta x = 0,3$ cm. Przyjmujemy więc, że długość zmierzonego pręta wynosi $36,4 \text{ cm} \pm 0,3 \text{ cm}$.

⚠ **Ważne:** *Niepewność pomiarowa* jest to połowa szerokości przedziału w którym przypuszczalnie mieści się rzeczywista wartość mierzona.

Niepewności pomiarowe można zmniejszyć, stosując dokładniejszy przyrząd lub dokładniejszą metodę pomiaru, jednak nie jesteśmy w stanie ich całkowicie wyeliminować. Poza niepewnościami pomiarowymi występują *błędy pomiarowe*, których można uniknąć. Powstają często na skutek przeoczenia lub pominięcia ważnego czynnika wpływającego na pomiar, np. przy pomiarze długości pręta nie zauważamy jego wygięcia.

Dla zmniejszenia niepewności pomiarowej wykonujemy pomiar wielokrotnie, wtedy często poszczególne wyniki pomiaru nieco różnią się od siebie, gdyż każdy pomiar obarczony jest przypadkową niepewnością pomiarową. Obliczając średnią arytmetyczną z tych pomiarów, otrzymujemy wartość najbardziej zbliżoną do wartości rzeczywistej. Czasami zdarza się, że jeden wynik pomiaru różni się znacznie od pozostałych. Wtedy odrzucamy go i nie uwzględniamy przy obliczaniu wartości średniej, gdyż mamy prawo sądzić, z dużym prawdopodobieństwem, że powstał na skutek błędu pomiaru. Mówimy, że ten wynik pomiaru jest obarczony *błędem grubym*.

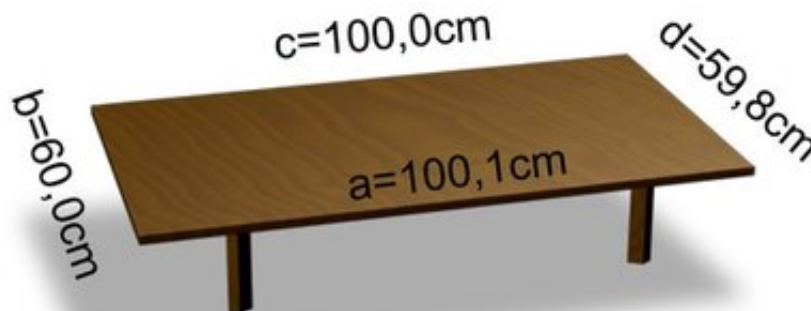
Przy ocenie niepewności pomiarowych pojedynczego pomiaru bierzemy pod uwagę wszystkie czynniki, które wpływają na jego dokładność. Suma wszystkich przyczynków daje wypadkową niepewność pomiarową. Sposób oceniania niepewności pomiarowych zależy od konkretnej sytuacji.

Zastanówmy się teraz, jak obliczyć niepewność pomiarową w przypadku, gdy wynikiem pomiaru jest wielkość złożona, dana za pomocą wzoru matematycznego, którego elementami są wielkości obarczone niepewnością pomiaru.

Przykład: Pomiar obwodu blatu stołu

Mierzymy l – obwód blatu stołu. Najpierw mierzymy długości poszczególnych krawędzi (*Rysunek 1.114: Pomiar krawędzi stołu* na stronie 116). Otrzymaliśmy następujące wartości: $a = 100,1$ cm, $b = 60,0$ cm, $c = 100,0$ cm i $d = 59,8$ cm. Następnie dodajemy je do siebie, co daje obwód blatu:

$$(\text{wzór 89}) \quad l = a + b + c + d = 319,9 \text{ cm}$$



Rysunek 1.114: Pomiar krawędzi stołu

Mierzylismy miarką milimetrową z dokładnością ± 2 mm, czyli pomiar krawędzi jest obarczony niepewnościami pomiarowymi $\Delta a = \Delta b = \Delta c = \Delta d = \pm 0,2$ cm, zatem niepewność pomiaru obwodu wyniesie

$$(\text{wzór 90}) \quad |\Delta l| = |\Delta a| + |\Delta b| + |\Delta c| + |\Delta d| = 0,2 \text{ cm} + 0,2 \text{ cm} + 0,2 \text{ cm} + 0,2 \text{ cm} = 0,8 \text{ cm}$$

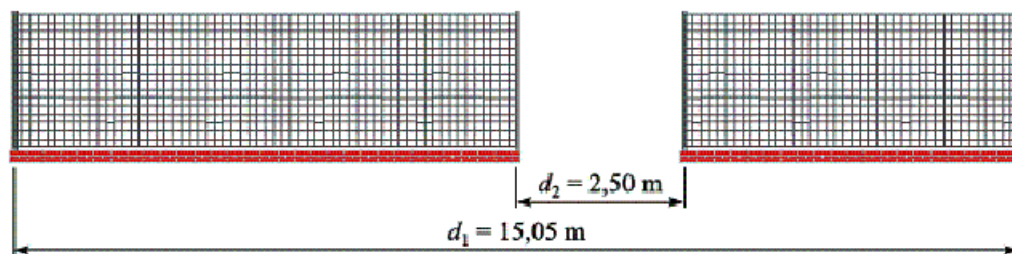
Wynik pomiaru zapisujemy w postaci

$$(\text{ wzór 91 }) l = (319,9 \pm 0,8) \text{ cm}$$

Przykład: Pomiar długości ogrodzenia

Mierzmy d - długość (w metrach bieżących) siatki ogrodzenia domu. Najpierw mierzymy d_1 – długość całego ogrodzenia i odejmujemy od niej d_2 – długość furki (*Rysunek 1.115: Pomiar ogrodzenia* na stronie 117) – otrzymaliśmy: $d_1 = 15,05$ m i $d_2 = 2,50$ m. Zatem długość siatki ogrodzenia wynosi

$$(\text{ wzór 92 }) d = d_1 - d_2 = 15,05 \text{ m} - 2,50 \text{ m} = 12,55 \text{ m}$$



Rysunek 1.115: Pomiar ogrodzenia

Mierzylismy taśmą mierniczą z podziałką 1 cm. Niepewność pomiaru przyjęliśmy jako równą ± 3 cm, czyli pomiar jest obarczony niepewnościami pomiarowymi $|\Delta d_1| = |\Delta d_2| = \pm 0,03$ m. Zatem niepewność pomiaru długości siatki ogrodzenia wyniesie

$$(\text{ wzór 93 }) |\Delta d| = |\Delta d_1| + |\Delta d_2| = 0,03 \text{ m} + 0,03 \text{ m} = 0,06 \text{ m}$$



Wskazówka:

Niepewność pomiaru wyniku Δd jest sumą niepewności składowych Δd_1 i Δd_2 , mimo że wynik pomiaru jest różnicą ($d = d_1 - d_2$). Postąpiliśmy tak celowo, ponieważ nie wiemy czy pomiar bezpośredni jest obarczony niepewnością z plusem, czy z minusem. W takich sytuacjach powinniśmy uwzględnić najbardziej niekorzystny przypadek, kiedy błędy się sumują.

Sposób postępowania w przykładach 1.8 i 1.9 uogólnimy następująco:

Jeżeli wynik pomiaru jest przedstawiony za pomocą wzoru w postaci sumy lub różnicy wielkości mierzonych bezpośrednio, to niepewność wyniku pomiaru jest równa sumie niepewności pomiarów bezpośrednich:

$$(\text{ wzór 94 }) \Delta(x + y) = |\Delta x| + |\Delta y|$$

$$(\text{ wzór 95 }) \Delta(x - y) = |\Delta x| + |\Delta y|$$

Przykład: Pomiar pola powierzchni blatu stołu

Mierzmy S – pole powierzchni prostokątnego blatu stołu. Przyjmijmy, że blat jest prostokątny (pomiar przeciwstawnych krawędzi daje jednakowe wartości w granicach niepewności pomiaru). Przyjmijmy zatem, że prostokąt ma krawędzie $a = 100,0$ cm i $b = 59,9$ cm (są to wartości zaokrąglone średnie). Zatem pole powierzchni stołu wynosi

$$(\text{ wzór 96 }) S = ab = (100,0 \text{ cm}) \cdot (59,9 \text{ cm}) = 5\,990,0 \text{ cm}^2$$

Jak w takim przypadku wyznaczyć niepewność pomiaru powierzchni stołu ΔS ? Wydaje się, że można zastosować wzory (*wzór 94* na stronie 117) lub (*wzór 95* na stronie 117). To jednak błędne podejście, ponieważ wzory te dotyczą tylko sumy lub różnicy, a teraz mamy do czynienia z

iloczynem. Gdybyśmy dodali niepewności w cm, to wynikowa niepewność również byłaby w cm, a niepewność pomiaru pola musi być w cm².

⚠ **Ważne:** *Niepewność względna* pomiaru to stosunek niepewności pomiaru do wielkości mierzonej: $\frac{\Delta x}{x}$.

Niepewność pomiaru pola powierzchni blatu stołu wyznaczymy w taki sposób, że najpierw obliczymy wielkości niemianowane – niepewności względne $(\Delta a)/a$ i $(\Delta b)/b$, a następnie ich sumę (również wielkość niemianowaną) uznamy za niepewność względną pomiaru pola. Zatem

$$(\text{wzór 97}) \left| \frac{\Delta a}{a} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| = \left| \frac{\Delta(ab)}{(ab)} \right| = \left| \frac{\Delta S}{S} \right|$$

czyli

$$(\text{wzór 98}) \left| \frac{\Delta S}{S} \right| = \left| \frac{\Delta a}{a} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| = \frac{0,2}{100} + \frac{0,2}{59,9} = 0,0053$$

ostatecznie

$$(\text{wzór 99}) \Delta S = \frac{\Delta S}{S} S = 0,0053 \cdot 5990 \text{ cm}^2 = 32 \text{ cm}^2$$

Otrzymaliśmy w ten sposób niepewność pomiaru pola powierzchni stołu. Wynik pomiaru zapisujemy jako:

$$(\text{wzór 100}) S = 5\,990 \pm 32 \text{ cm}^2$$

Sposób postępowania w przykładzie 1.10 uogólnimy następująco:

Ⓡ **Zamapiętać:** Jeżeli wynik pomiaru jest przedstawiony za pomocą wzoru w postaci iloczynowej, to względna niepewność wyniku pomiaru jest równa sumie względnych niepewności pomiarów bezpośrednich (względna niepewnością pomiarową nazywamy iloraz niepewności pomiarowej i wartości wielkości mierzonej):

$$(\text{wzór 101}) \left| \frac{\Delta(xy)}{(xy)} \right| = \left| \frac{\Delta x}{x} \right| + \left| \frac{\Delta y}{y} \right|$$

Wzór możemy interpretować następująco: w przypadku iloczynu dwóch mierzonych wielkości x i y niepewność

względna wyniku $\left| \frac{\Delta(xy)}{(xy)} \right|$ jest sumą niepewności względnych: $\left| \frac{\Delta x}{x} \right|$ i $\left| \frac{\Delta y}{y} \right|$. Zastosowaliśmy tu znaki bezwzględnej

wartości ponieważ przyjmujemy, dla oceny maksymalnej niepewności pomiaru, przypadek najbardziej niekorzystny – gdy niepewności pomiaru sumują się z tym samym znakiem.

Ⓡ **Zamapiętać:** *Niepewność pomiaru wielkości złożonej* wyrażonej w postaci:

1. sumy $X = x_1 + x_2$:

$$(\text{wzór 102}) \Delta X = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

2. iloczynu $X = x_1 \cdot x_2$:

$$(\text{wzór 103}) \frac{\Delta X}{X} = \left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right| + \left| \frac{\Delta x_2}{x_2} \right|$$

Zaokrąglenia wyników pomiarów

Na zakończenie podamy jeszcze w jaki sposób należy zaokrąglać wyniki i niepewności pomiarowe.

W przypadku, gdy wartość niepewności pomiarowej ma pierwszą cyfrę znaczącą mniejszą od 3, podajemy ją z dokładnością do dwóch miejsc znaczących, w pozostałych przypadkach zaokrąglamy ją do jednej cyfry znaczącej.

Zero jest tylko wtedy cyfrą znaczącą, gdy znajduje się między dwiema cyframi nie będącymi zerami albo na dowolnym miejscu po cyfrze nie będącej zerem, zawartej w liczbie z przecinkiem. Taki sposób zaokrąglenia wynika

z faktu, że zwykle nie jesteśmy w stanie wyznaczyć niepewności pomiarowej z dużą dokładnością. Oto przykłady właściwych zaokrągleń niepewności:

$$(\text{ wzór 104 }) 0,00132 \approx 0,0013 = 1,3 \cdot 10^{-3}$$

$$(\text{ wzór 105 }) 0,0101 \approx 0,010 = 1,0 \cdot 10^{-2}$$

$$(\text{ wzór 106 }) 0,0301 \approx 0,03 = 3 \cdot 10^{-2}$$

$$(\text{ wzór 107 }) 6\,280 \approx 6 \cdot 10^3$$

R **Zamapiętać:** Wynik pomiaru zaokrąglamy zawsze do tego samego miejsca dziesiętnego, do którego zaokrągliliśmy niepewność pomiarową.

Oto przykłady wyników pomiaru prawidłowo zaokrąglonych:

$$(\text{ wzór 108 }) l = (1,4832 \pm 0,0013) \text{ m}$$

$$(\text{ wzór 109 }) m = (380 \pm 40) \text{ g}$$

$$(\text{ wzór 110 }) t = (86,5 \pm 0,6) \cdot 10^6 \text{ s}$$

1.D2 Efekt Dopplera (Dodatek)

Zjawisko opisane w tym rozdziale odkrył i opisał w roku 1842 austriacki fizyk – **Christian Doppler**. Efekt Dopplera polega na zmianie częstotliwości (i długości) odbieranej fali, gdy porusza się źródło lub odbiornik. W przypadku, gdy źródło i odbiornik nie poruszają się względem siebie, to odbierana częstotliwość i długość fali jest taka sama jak nadawana przez źródło. Częstotliwość fali odbieranej jest mniejsza (a długość fali większa), gdy źródło oddala się od obserwatora. W przypadku, gdy źródło zbliża się do obserwatora, to częstotliwość fali odbieranej jest większa (a długość fali krótsza).

Zjawisko Dopplera

Rysunek 1.116: Obejrzyj film

Ze zjawiskiem tym spotykamy się w życiu codziennym. Na przykład gdy samochód się do nas zbliża, to wysokość tonu silnika, odbieranego przez nasze ucho jest wyższa, zaś gdy się od nas oddala - wysokość ta gwałtownie spada. Jeszcze wyraźniej zjawisko to jest zauważalne na wyścigach motocyklowych. Wcale nie musimy być obecni na wyścigach, wystarczy obejrzeć je w telewizji. W momencie gdy motocykl mija mikrofon kamery TV i oddala się, to słychać wyraźne obniżanie tonu jego silnika.

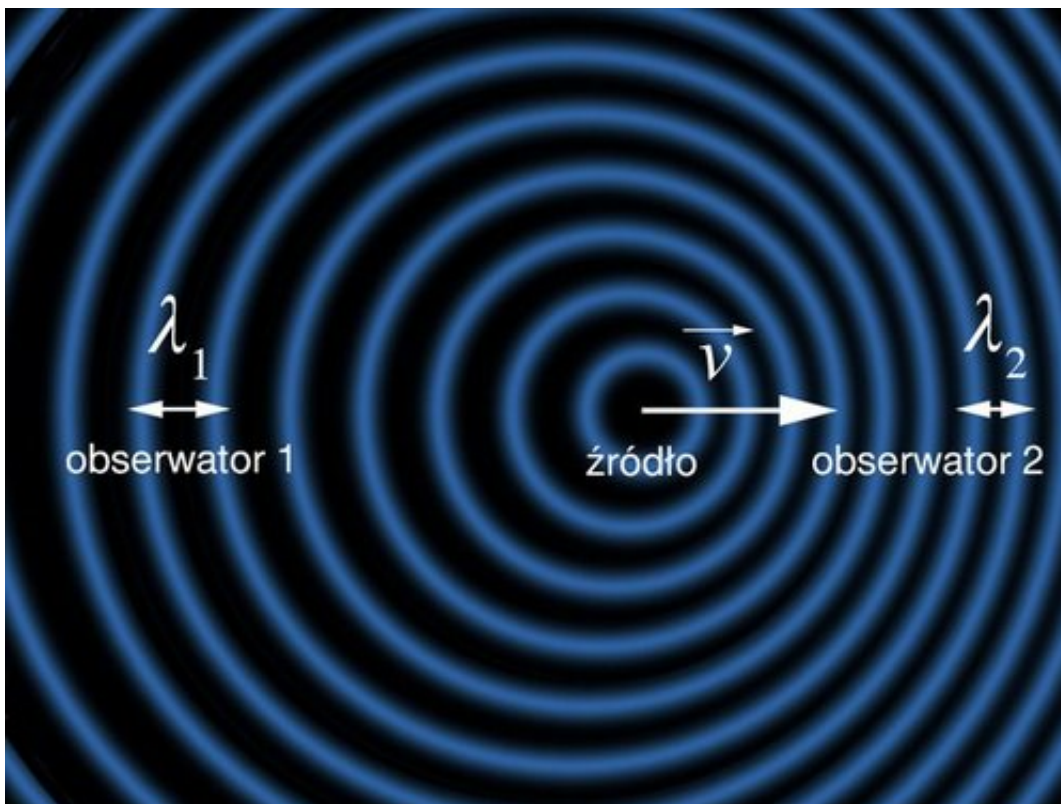
Efekt ten dotyczy wszystkich rodzajów fal: na wodzie, fal akustycznych, fal świetlnych i innych. W przypadku fal akustycznych, gdy źródło dźwięku oddala się od nas, to ton rejestrowany przez nasze ucho jest niższy, czyli ma niższą częstotliwość, a rejestrowana fala jest dłuższa. Wiedząc o jaką wartość wzrasta długość fali, możemy określić prędkość oddalania się źródła fal. Podobnie w obserwacji optycznej: tzw. poczerwienienie galaktyki, oznaczające zwiększenie długości fal świetlnych odbieranych przez nasze oczy, pozwala określić prędkość oddalania się galaktyki od nas.

Przyjrzymy się bliżej temu zjawisku przeprowadzając doświadczenie.

Doświadczenie „Doppler”

Część 1 – obserwacja

Na powierzchni wody wytwarzamy falę za pomocą rytmicznego źródła poruszającego się ze stałą prędkością. Obserwujemy, że kręgi na wodzie nie są koncentryczne, ale zagęszczają się przed źródłem, a rozrzedzają się za nim (*Rysunek 1.117: Zdjęcie fal na wodzie wytworzonych przez ruchome źródło na stronie 120*).

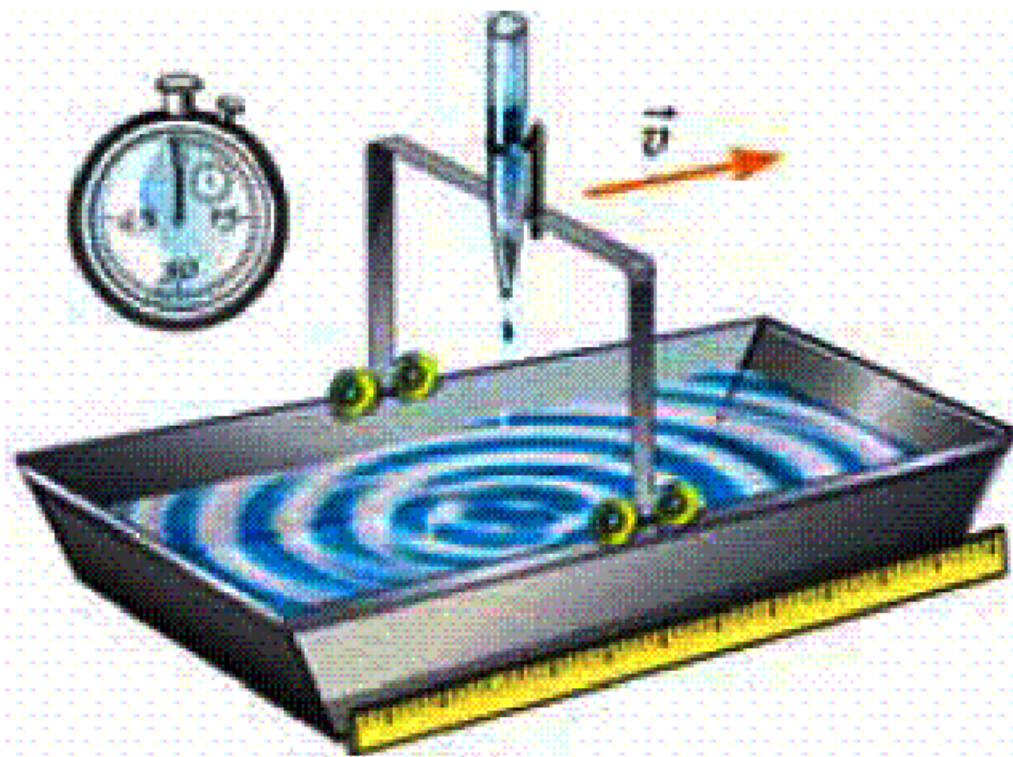


fale zagęszczają się przed źródłem, a rozrzedzają się za nim. Nieruchomy obserwator Obs_1 od którego źródło fal \dot{Z} oddala się stwierdzi, że docierająca do niego fala ma większą długość λ_1 , niż λ_2 , docierająca do obserwatora Obs_2 , do którego źródło zbliża się

Rysunek 1.117: Zdjęcie fal na wodzie utworzonych przez ruchome źródło

Część 2 – pomiary

W celu wykonania pomiarów powinniśmy zaplanować doświadczenie bardziej precyzyjnie. Należy nad naczyniem, np. formą do wypieków, umieścić na prowadnicach (mogą to być brzegi formy) wózek – [Rysunek 1.118: Urządzenie do obserwacji efektu Dopplera](#) na stronie 121. Na wózku należy umieścić urządzenie do rytmicznego pobudzania fal na powierzchni wody znajdującej się w formie. Może nim być ciężarek umieszczony na sprężynce pobudzony do drgań lub pipetka kroplomierza – krople spadające na powierzchnię wody utworzą na niej fale koliste – [Rysunek 1.118: Urządzenie do obserwacji efektu Dopplera](#) na stronie 121.



Rysunek 1.118: Urządzenie do obserwacji efektu Dopplera

Wózkowi nadajemy niedużą prędkość i filmujemy pofalowaną powierzchnię wody, w ujęciu z góry. Eksperyment powtarzamy kilkakrotnie (np. 3 razy) za każdym razem nadając wózkowi inną prędkość. W celu uzyskania danych do obliczenia prędkości wózka powinniśmy na filmie uwidoczniony uruchomiony stoper oraz miarkę milimetrową.

Odtwarzamy filmy na ekranie komputera i uzyskujemy (dla każdego przypadku powtarzanego eksperymentu) następujące dane:

- położenie wózka x_1 (zmierzone za pomocą miarki na początkowej stop-klatce filmu), wskazanie stopera t_1 (odczytane na tej samej, początkowej stop-klatce filmu);
- położenie wózka x_2 (zmierzone za pomocą miarki na końcowej stop-klatce filmu), wskazanie stopera t_2 (odczytane na końcowej stop-klatce filmu);
- długość fali λ_1 za wózkiem (zmierzona za pomocą miarki na środkowej stop-klatce filmu);
- długość fali λ_2 przed wózkiem (zmierzona za pomocą miarki na środkowej stop-klatce filmu).

Dane te umieszczamy w tabelce pomiarowej (*Rysunek 1.119: Tabelka pomiarów* na stronie 121).

Film	Wózek					Fale		
	x_1	x_2	t_1	t_2	$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$
1								
2								
3								

Rysunek 1.119: Tabelka pomiarów

Prędkość źródła fali obliczamy ze wzoru:

$$(\text{wzór 111}) \quad v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

Obliczamy zmianę długości fali za i przed ruchomym źródłem $\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ dla poszczególnych prędkości źródła fal. Obliczone wartości wpisujemy do tabelki pomiarów.

Wyciągamy wniosek jakościowy z naszych eksperymentów: im większa prędkość źródła, tym większa zmiana długości fali.

Możemy porównać nasze wyniki pomiarów z teorią efektu Dopplera, z której wynika wzór na $\Delta \lambda$:

Efekt Dopplera (1)

Rysunek 1.120: Obejrzyj film

$$(\text{wzór 112}) \quad \Delta \lambda = \frac{2v^2}{v_0 u}$$

gdzie v_0 to częstotliwość źródła fal, u jest prędkością fal na wodzie. Wielkości te łatwo możemy zmierzyć wykonując film w przypadku nieruchomego wózka.

[EXE PDF](#) Efekt Dopplera - doświadczenie

[OPIS](#) Doświadczenie zdalne: Efekt Dopplera

Efekt Dopplera (2)

Rysunek 1.121: Obejrzyj film

Rozdział

2

Fizyka atomowa

Podrozdziały:

- [2.1 Promieniowanie termiczne](#)
- [2.2 Zjawisko fotoelektryczne, fotony](#)
- [2.3 Widma promieniowania gazów](#)
- [2.4 Budowa atomu](#)
- [2.5 Doświadczenie - Spektrum](#)
- [2.6 Korpuskularno-falowa natura materii](#)
- [2.7 Atomowe orbitale elektronowe - bardziej zaawansowane wyobrażenie atomu](#)

Niezwykły świat zjawisk atomowych jest bardzo niepodobny do świata wielkości makroskopowych znanego z życia codziennego. Mimo to jednak potrafimy go zrozumieć i opisać posługując się prawami przyrody mającymi charakter uniwersalny, które są słuszne dla dowolnego zakresu i skali wielkości.

Poznanie budowy atomu umożliwiło wytłumaczenie wszystkich własności chemicznych pierwiastków wraz z własnościami ujętymi w tablicy Mendelejewa. Fizyka atomu stworzyła teoretyczne podstawy chemii. Chemia teoretyczna stała się właściwie fizyką powłok elektronowych. Zjawiska i prawa chemiczne to wykaz praw fizyki powłok elektronowych atomów i cząsteczek.

Dzięki poznaniu budowy atomów stało się możliwe dokładne zbadanie właściwości cieczy i ciał stałych jako olbrzymich skupisk atomów i cząsteczek. Doprowadziło to do powstania wielu wspaniałych wynalazków i stworzenia nowych dziedzin techniki atomowej o możliwościach, o jakich przedtem można było tylko marzyć. Umożliwiło to budowanie komputerów, telefonów komórkowych i wielu innych urządzeń elektronicznych. Poznanie własności optycznych atomów pozwoliło na rozwój techniki laserowej i optoelektroniki.

2.1 Promieniowanie termiczne

Świat, który widzimy jest kolorowy. Ale co to właściwie znaczy? Czym różni się światło białe od światła czerwonego czy niebieskiego? Przypomnijmy sobie, jaka jest natura światła białego, przepuszczając światło żarówki przez pryzmat.

Rysunek 2.1: Dyspersja optyczna

Pryzmat rozszczepia światło na poszczególne barwy, którym odpowiadają różne długości fal. Gdy rozszczepione promienie padają na ekran, tworzy się na nim tak zwane widmo światła. Badając widmo możemy stwierdzić, jakie długości fal emituje dane źródło.

Ⓡ **Zamapiętać:** *Światło białe* to mieszanina światła o różnych barwach. światło jest falą elektromagnetyczną. Światło białe zawiera wszystkie barwy tęczy. Każdej barwie odpowiada inna długość fali. światło czerwone to fala o największej długości, światło niebieskie i fioletowe - o najmniejszej.

Źródłem światła białego jest na przykład tradycyjna żarówka. Przez drucik w żarówce przepływa prąd, który rozgrzewa go do wysokiej temperatury i dlatego żarówka świeci. Od czego zależy barwa świecącego ciała?

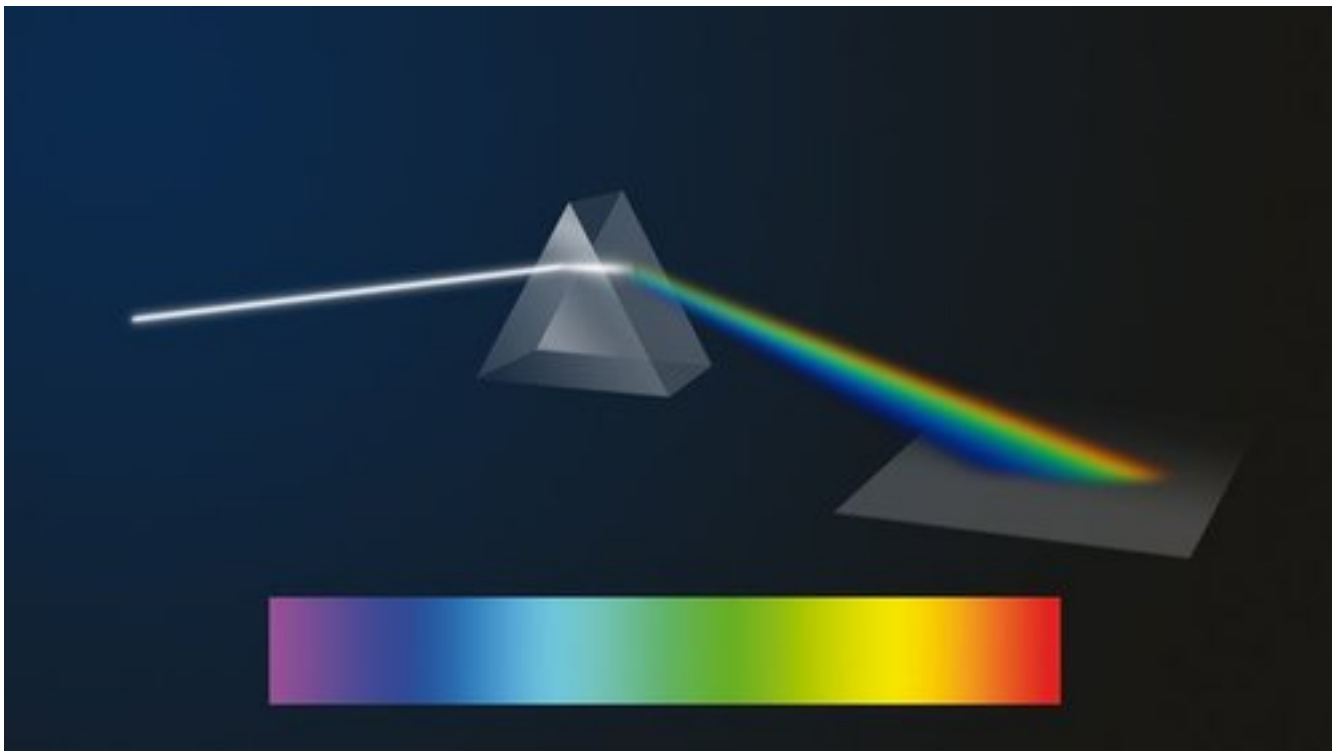
Podgrzewany pręt zaczyna świecić czerwonym światłem. Gdy temperatura pręta wzrasta, barwa światła zmienia się w żółtą, a potem niebieskawą. Jednocześnie ze wzrostem temperatury świecenie jest coraz silniejsze - mówimy, że wzrasta natężenie promieniowania.

Wszystkie ciała mocno rozgrzane świecą. Jest to tak zwane promieniowanie termiczne. Okazuje się, że ciała o niższych temperaturach, które nie świecą widzialnym światłem, również emitują promieniowanie, ale w zakresie fal dłuższych niż światło widzialne. Takie promieniowanie nazywamy *promieniowaniem podczerwonym*.

Możesz to sprawdzić, zbliżając rękę na kilka centymetrów do gorącego przedmiotu (kubek z herbatą, kaloryfer itp.). Odczujesz ciepło spowodowane działaniem promieniowania podczerwonego na skórę.

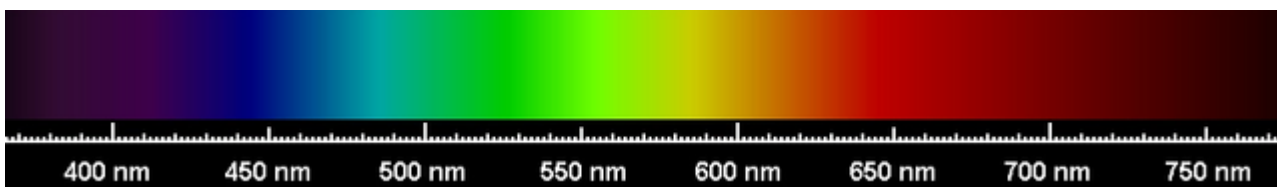
Ⓡ **Zamapiętać:** Rozgrzane *ciała stałe* świecą światłem o widmie ciągłym, zawierającym wszystkie długości fal.

Z drugiej strony widma światła widzialnego występuje *promieniowanie nadfioletowe* o długościach fal zbyt małych, aby nasze oczy mogły je odbierać.



Rysunek 2.2: Pryzmat rozszczepia światło, tworząc widmo

Rysunek [Rysunek 2.2: Pryzmat rozszczepia światło, tworząc widmo](#) na stronie 125 pokazuje przykładowy sposób otrzymania widma promieniowania termicznego. Wystarczy ustawić pryzmat na drodze wiązki światła. Pryzmat rozszczepi światło białe na składowe promienie barwne o określonych długościach fali. Rzutuując je na kartkę papieru uwidaczniamy je w postaci widma.



Rysunek 2.3: Światło żarówki wolframowej ma widmo ciągłe składające się z fal o wszystkich długościach

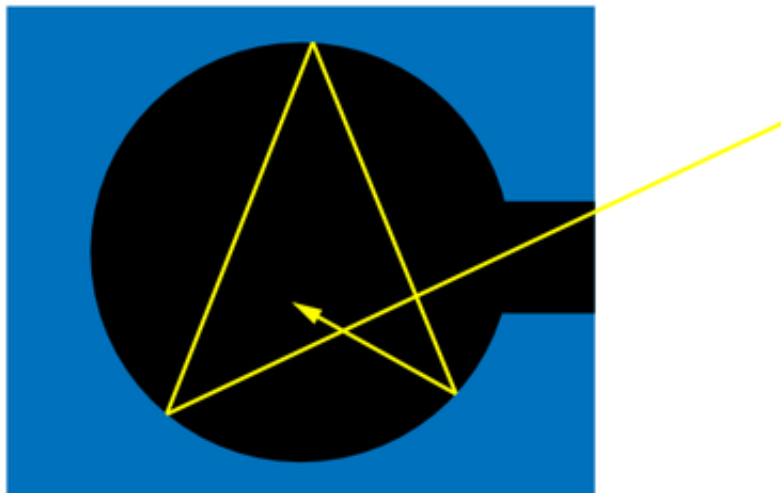
Więcej o promieniowaniu termicznym, czyli jak za pomocą badania promieniowania można zajrzeć do początków Wszechświata

Różne ciała podgrzane do tej samej temperatury świecą nie jednakowo. Jednakże okazuje się, że jeżeli wykona się wnęki w dowolnych materiałach, to promieniowanie wychodzące z tych wnęk nie zależy od rodzaju materiału, w którym wnęka się znajduje, lecz tylko od temperatury ciała. Nazywamy je *promieniowaniem ciała doskonale czarnego*.

W przypadku, gdy do wnęki wpada światło, to wnęka całkowicie je pochłania ([Rysunek 2.4: Model ciała doskonale czarnego - wnęka z niewielkim otworkiem](#) na stronie 126). Dlatego jest ona czarna, czarniejsza niż czarny aksamit. Mówimy, że stanowi ona model ciała doskonale czarnego. *Ciałem doskonale czarnym* nazywamy ciało, które pochłania w stu procentach padające nań światło o każdej długości fali (wiadomo, że normalne ciało nigdy nie pochłania padającego nań promieniowania w stu procentach).

Promień światła, wpadający przez otworek do wnęki, mógłby wyjść z niej dopiero po wielokrotnym odbiciu, ale przy każdym odbiciu traci stały procent swojej energii i dlatego, jeżeli otwór jest mały, promień zostaje całkowicie

pochłonięty. Przykłady tego typu „ciał doskonale czarnych” są nam dobrze znane z życia codziennego. Sprawdźcie sami – oglądane z zewnątrz okna budynków, wejście do jaskini, źrenica oka – są czarne, czyli pochłaniają światło!



Promień wpadający do wnęki przy każdym odbiciu od jej wewnętrznej ścianki traci coraz to więcej energii i w końcu zostaje całkowicie pochłonięty (*zobacz też animację*)

Rysunek 2.4: Model ciała doskonale czarnego - wnęka z niewielkim otworkiem

W celu zbadania zjawiska promieniowania rozżarzonych ciał stosuje się uniwersalne ciało doskonale czarne. Przede wszystkim bada się *widma promieniowania* ciała doskonale czarnego.

Rysunek *Rysunek 2.3: Światło żarówki wolframowej ma widmo ciągłe składające się z fal o wszystkich długościach* na stronie 125 pokazuje przykładowo sposób otrzymania widma promieniowania wychodzącego z wnęki. Wystarczy ustawić pryzmat na drodze wiązki światła wychodzącego z wnęki. Pryzmat rozszczepi światło białe na składowe promienie barwne o określonych długościach fali. Rzutuując je na kartkę papieru uwidaczniamy je w postaci tzw. *widma*.

Jednakże samo uwidocznienie widma nie dużo wnosi do zbadania tego promieniowania. Aby dokładniej je zbadać należy przemieszczać wzdłuż widma czujnik (np. fotokomórkę), który zmierzy energię we wszystkich kolejnych miejscach barwnego widma.

Zmierzona ilość energii promienistej w określonych zakresach długości fali światła λ pozwala wykreślić *krzywą rozkładu widmowego* – *Rysunek 2.5: Przedstawiona krzywa obrazuje zmierzoną ilość energii promienistej w określonych zakresach widma* na stronie 127 i *Rysunek 2.6: Krzywa rozkładu widmowego promieniowania termicznego* na stronie 128 (mówiąc ściślej, jest to krzywa zależności *natężenia* promieniowania, czyli ilości energii promieniowania o danej długości fali λ wysyłanej w ciągu jednej sekundy przez jednostkę powierzchni ciała: $I(\lambda)$). Te krzywe nie będą zależały ani od rodzaju materiału, ani od kształtu wnęki, lecz tylko od temperatury ciała.

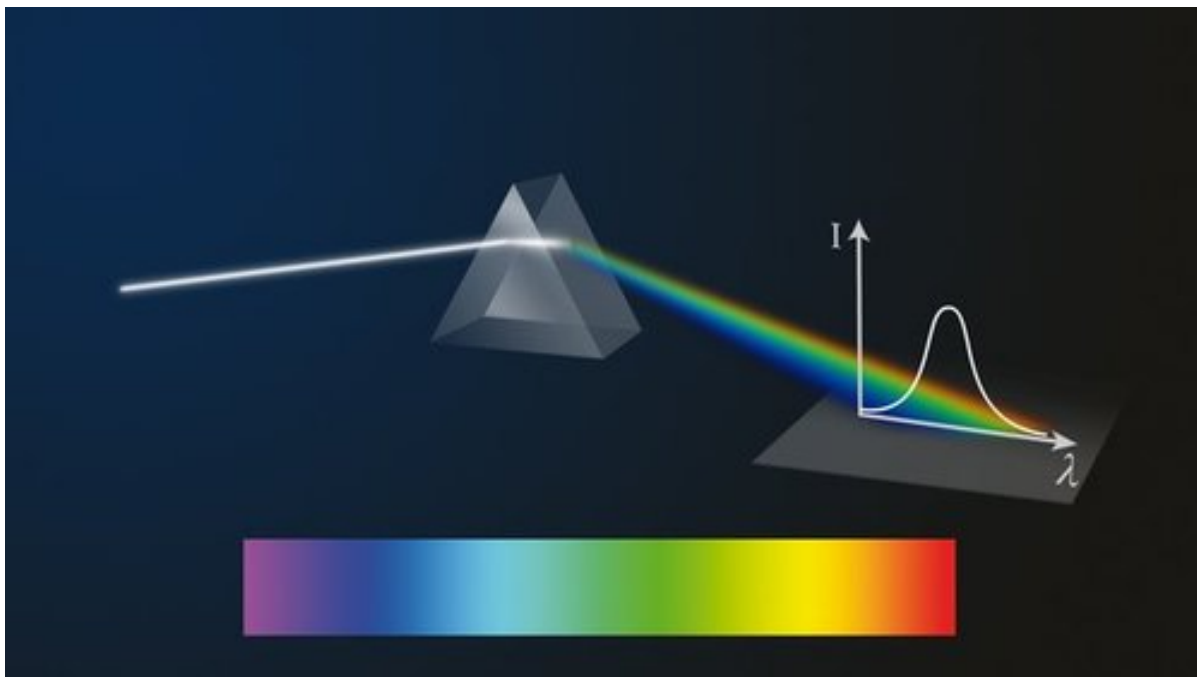
Jeżeli wykonamy je w różnych temperaturach promieniującego ciała to otrzymamy rodzinę krzywych takich, jak na rysunku *Rysunek 2.7: Krzywe rozkładu widmowego promieniowania termicznego* na stronie 129.



Wskazówka:

Aby dokładniej zbadać widmo promieniowania, należałoby wzdłuż widma przemieszczać czujnik, który zmierzy moc promieniowania we wszystkich kolejnych miejscach barwnego widma. Załóżmy, że nasz

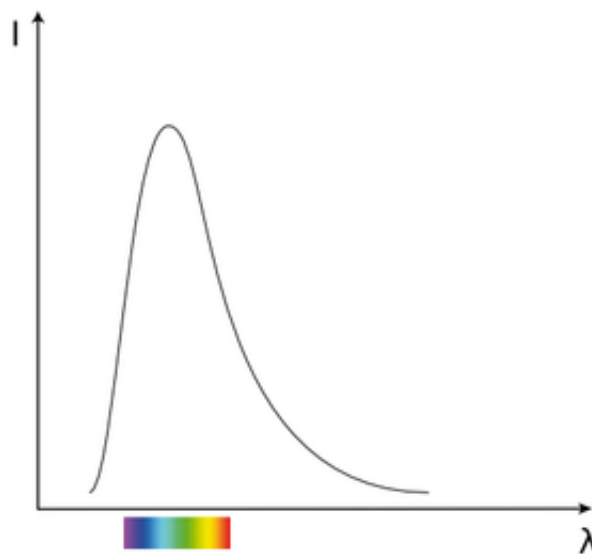
czujnik wykrywa również promieniowanie poza obszarem światła widzialnego, niewidoczne dla ludzkiego oka: od strony fioletu - promieniowanie nadfioletowe, od strony czerwieni promieniowanie podczerwone (*Rysunek 2.5: Przedstawiona krzywa obrazuje zmierzoną ilość energii promienistej w określonych zakresach widma na stronie 127*).



Rysunek 2.5: Przedstawiona krzywa obrazuje zmierzoną ilość energii promienistej w określonych zakresach widma

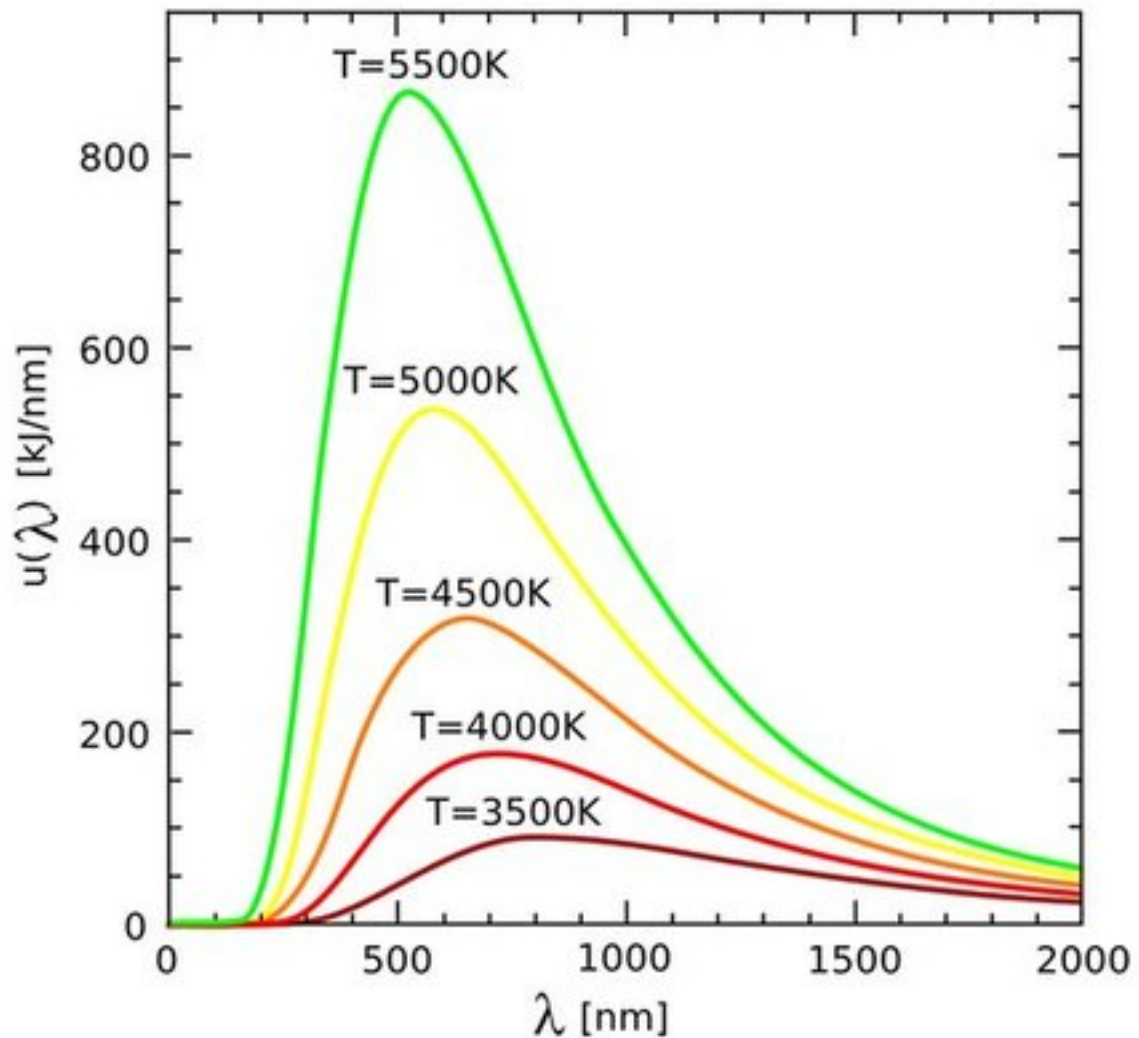
Natężenie promieniowania, $I(\lambda)$ to ilości energii promieniowania o danej długości fali λ docierającej do czujnika w ciągu jednej sekundy. Można przyjąć, że natężenie to jest proporcjonalne do ilości energii emitowanej w jednostce czasu przez ten fragment powierzchni świecącego ciała, z którego promieniowanie, skupione przez soczewki i załamane w pryzmacie, dociera do naszego czujnika.

Na *Rysunek 2.6: Krzywa rozkładu widmowego promieniowania termicznego* na stronie 128 przedstawiony jest wynik takiego pomiaru, czyli zależność natężenia promieniowania od długości fali. Widzimy, że w tym przypadku maksymalna energia promieniowania przypada na światło o barwie niebiesko-zielonej. Znacznie mniej promieniowania wysyłane jest jako światło czerwone. Udział światła o różnych barwach decyduje o tym, jaką barwę świecącego ciała odbierze nasze oko.



Rysunek 2.6: Krzywa rozkładu widmowego promieniowania termicznego

Obserwując zmiany barwy podgrzewanego pręta wnioskujemy, że wraz ze zmianą temperatury, zmienia się dominująca długość fali wysyłanego światła. Rzeczywiście, możemy to zobaczyć na wykresie porównującym rozkłady widmowe dla różnych temperatur ([Rysunek 2.7: Krzywe rozkładu widmowego promieniowania termicznego](#) na stronie 129).



Osiągają one coraz większe wartości wraz z rosnącą temperaturą, a ich maksima przesuują się w kierunku fal krótkich

Rysunek 2.7: Krzywe rozkładu widmowego promieniowania termicznego

Ze wzrostem temperatury dominująca długość fali promieniowania przesuwa się w kierunku fal krótszych. Oznacza to, że podgrzewany pręt najpierw zaczyna świecić na czerwono, a w miarę wzrostu temperatury jego barwa zmienia się.

Zwróćmy uwagę, że wraz z temperaturą silnie rośnie wysokość krzywych - emitowana energia wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Oznacza to po prostu, że im wyższa temperatura ciała, tym mocniej ono świeci.

Maksimum krzywej rozkładu widmowego promieniowania przesuwa się wraz ze wzrostem temperatury w kierunku mniejszych długości fal. Długość fali odpowiadająca maksimum jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury bezwzględnej ciała:

$$(\text{wzór 113}) \lambda_{max} = \frac{a}{T}$$

gdzie a jest pewną stałą ($a = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}$). Wzór ten nosi nazwę *prawa przesunięcia Wiena*.

Ⓡ **Zamąpiętać:** *Prawo przesunięcia Wiena:* Długość fali odpowiadająca maksimum λ_{max} jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury bezwzględnej ciała

$$(\text{wzór 114}) \lambda_{max} = \frac{a}{T}$$

gdzie a jest pewną stałą, $a = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}$.



Wskazówka:

Widzimy, że znajomość krzywej rozkładu widmowego pozwala na wyznaczenie temperatury odległego obiektu świecącego. Jeżeli wyznaczmy długość fali odpowiadającej maksimum krzywej λ_{max} , to przekształcając wzór (wzór 113 na stronie 129) otrzymamy temperaturę obiektu:

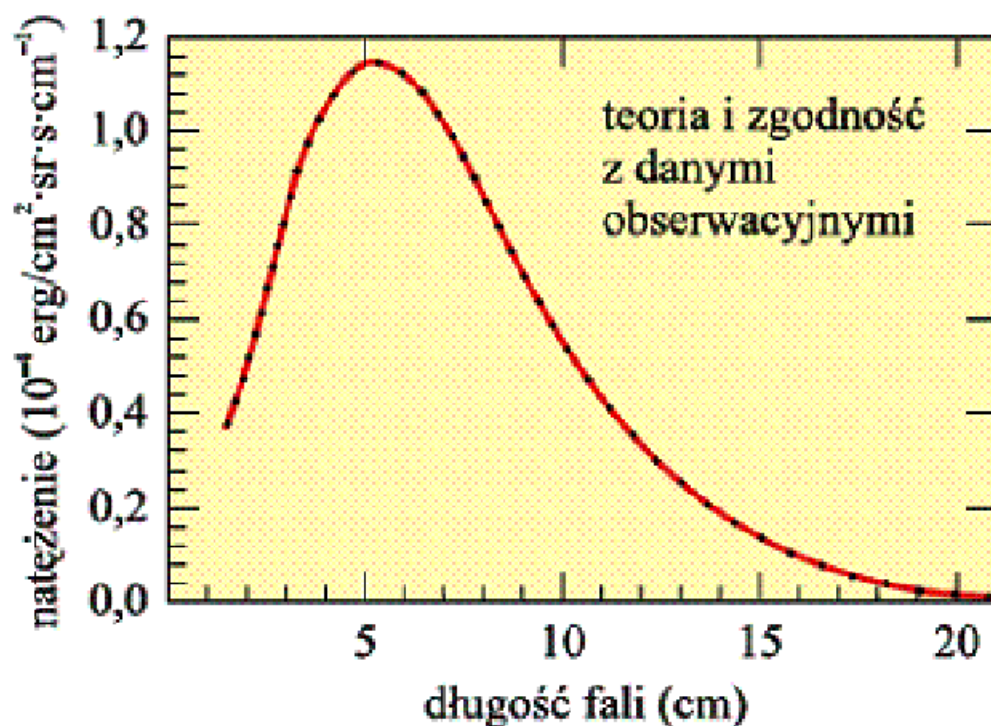
$$(\text{wzór 115}) \quad T = \frac{a}{\lambda_{max}}$$

W ten sposób nie opuszczając Ziemi wyznacza się temperaturę Słońca, oraz innych gwiazd.

Okazuje się, że nasze Słońce promieniuje w ten sposób, że krzywa rozkładu widmowego odpowiada temperaturze około 5800 K (jest to przeciętna temperatura warstwy powierzchniowej Słońca).

Teoria promieniowania termicznego ma zastosowanie w badaniach początków Wszechświata. Kiedy Wszechświat był bardzo młody, jego gęstość była bardzo duża i panowała wysoka temperatura. Wszechświat był wtedy "gorącym piecem" wypełnionym promieniowaniem. Maksimum tego promieniowania przypadało na krótkie fale - krótsze od ultrafioletowych. Na skutek rozszerzania się Wszechświata temperatura obniżała się i fale elektromagnetyczne docierające do nas dzisiaj mają dużo większe długości. Obecnie maksimum promieniowania wypełniającego Wszechświat przypada na fale o długości kilku centymetrów - nazywamy je promieniowaniem mikrofalowym lub reliktowym (Rysunek 2.8: Wykres widma promieniowania relikowego (dane z satelity COBE - 1996 r.; jednostki użyte w opisie osi są spoza układu SI) na stronie 130).

Korzystając ze wzoru (wzór 115 na stronie 130) można obliczyć, że obecna temperatura Wszechświata wynosi $T = 2,726 \pm 0,005 \text{ K}$. Wszechświat jako całość jest dzisiaj bardzo zimny! Pierwsze pomiary widma promieniowania relikowego były mało precyzyjne i fragmentaryczne. Obecnie dzięki badaniom satelitarnym dysponujemy niezwykle precyzyjnym potwierdzeniem zgodności teorii Wielkiego Wybuchu z obserwacjami promieniowania relikowego wypełniającego Wszechświat.



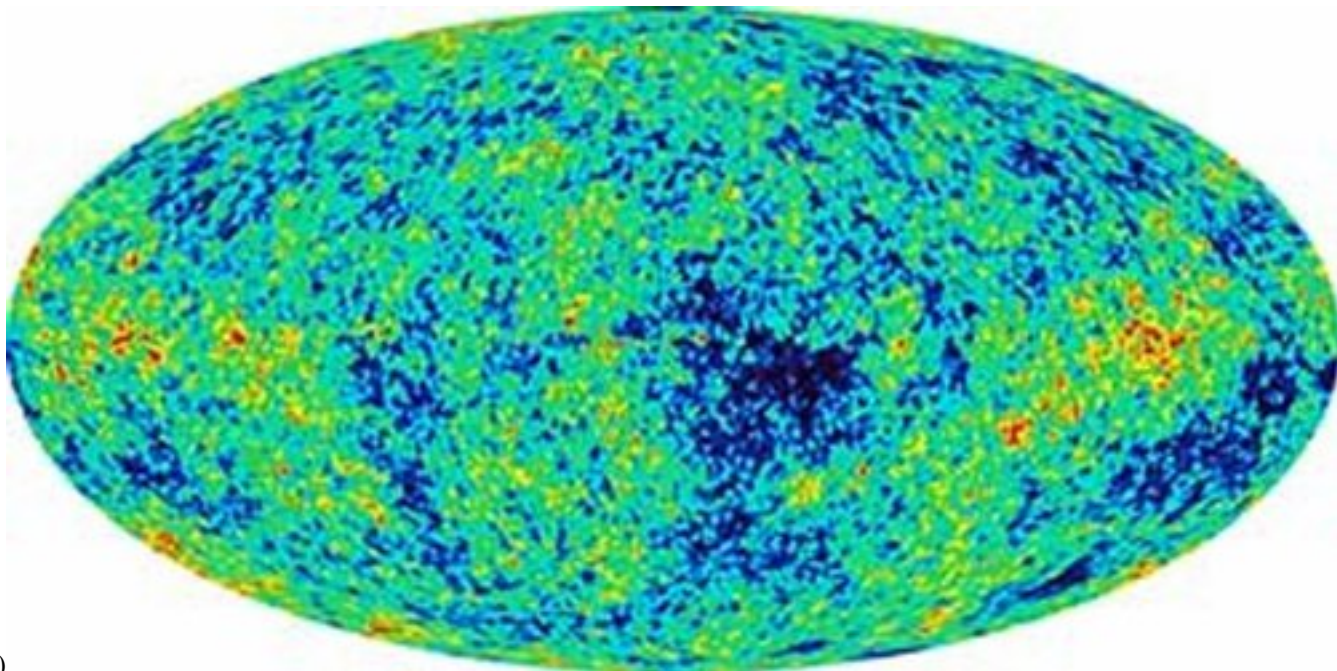
Jest to dowód fantastycznej zgodności doświadczenia z teorią promieniowania termicznego. Punkty doświadczenia mieszczą się dokładnie na krzywej teoretycznej

Rysunek 2.8: Wykres widma promieniowania relikowego (dane z satelity COBE - 1996 r.; jednostki użyte w opisie osi są spoza układu SI)

Promieniowanie reliktowe jest jednorodne. To znaczy, że z każdego kierunku dochodzi identyczne promieniowanie. Dokładniejsze badania wykazały jednak, że w małych obszarach występują drobne różnice temperatury promieniowania, tak zwane fluktuacje (*Rysunek 2.9: Fluktuacje temperatury promieniowania relikтового dochodzącego z różnych miejsc na niebie* na stronie 131). Różnice temperatur odpowiadają różnicom gęstości materii Wszechświata w czasie, gdy miał on 380 tys. lat. *Rysunek 2.9: Fluktuacje temperatury promieniowania relikтового dochodzącego z różnych miejsc na niebie* na stronie 131 możemy więc nazwać fotografią Wszechświata w wieku niemowlęcym!

Takie fluktuacje gęstości umożliwiły powstanie gwiazd i galaktyk. Zagęszczenia przyciągały grawitacyjnie coraz więcej materii i stały się zaczątkami przyszłych gwiazd i galaktyk.

Różne kolory oznaczają różne temperatury (dane z satelity WMAP z



2001r.)

Rysunek 2.9: Fluktuacje temperatury promieniowania relikowego dochodzącego z różnych miejsc na niebie

Teoria Plancka

Właściwości promieniowania termicznego znane były z eksperymentów już w końcu XIX wieku. Fizycy nie potrafili jednak ich wytłumaczyć, stosując falowy opis promieniowania.

Właściwe wyjaśnienie dał w roku 1900 **Max Planck**. Teoria Plancka zawierała rewolucyjne założenie. Właściwości promieniowania termicznego staną się zrozumiałe, jeśli przyjmiemy, że promieniowanie wysyłane jest przez ciała nie w sposób ciągły, ale porcjami. Taką porcję energii promieniowania nazywamy kwantem. Energia kwantu promieniowania zależna jest od częstotliwości fali ν :

$$(\text{wzór 116}) E = h \cdot \nu$$

gdzie h jest uniwersalną stałą, którą nazwano *stałą Plancka*.

Częstotliwość promieniowania ν jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali λ : $\nu = \frac{c}{\lambda}$, gdzie c jest prędkością światła.

Uniwersalna stała Plancka odgrywa wyjątkowo ważną rolę w dzisiejszej fizyce. Ma ona bardzo małą wartość (wyrażoną w jednostkach właściwych dla świata makroskopowego)

$$(\text{wzór 117}) h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Właśnie jej bardzo mała wartość sprawia, że nieciągłość występująca wyraźnie w świecie atomowym nie ujawnia się przy badaniach zjawisk makroskopowych.

Stała Plancka jest wyrazem nieciągłego (skokowego) charakteru procesów w świecie atomowym.

Wskazówka: Zapis 10^{-34} oznacza liczbę: 0,000000...0001, gdzie cyfra 1 jest na 34 miejscu po przecinku.

Wskazówka: *Teoria Plancka* odbiegała w sposób zasadniczy od teorii klasycznej. Okazało się to rewolucyjne dla fizyki. Dzień ogłoszenia teorii Plancka był dniem narodzin mechaniki kwantowej. Co w tych założeniach odbiega tak drastycznie od założeń fizyki klasycznej? W fizyce klasycznej wszelkie zmiany energii mogą zachodzić w sposób ciągły. Jeden stan energetyczny może różnić się od drugiego o dowolnie małą wartość, a co za tym idzie, wypromieniowana energia może być dowolnie mała. Założenia Plancka przeczą temu - najmniejsza porcja energii, jaka może być wypromieniowana to $E = h \cdot \nu$. Energia promieniowania emitowana jest skokowo. Było to szokujące dla ówczesnych uczonych i od razu stało się jasne, że w mikroświecie ujawniają się specyficzne prawa nieznanne w świecie makroskopowym.



Rysunek 2.10: Barwa płomienia ogniska zmienia się w różnych miejscach od czerwonej do białej

[EXE PDF](#) Ciało doskonale czarne

[XLSX PDF](#) Ciało doskonale czarne – ćwiczenie w Excelu

[OPIS](#) Doświadczenie zdalne: Ciało doskonale czarne

Rysunek 2.11: Ciało doskonale Czarne

Pytania i problemy

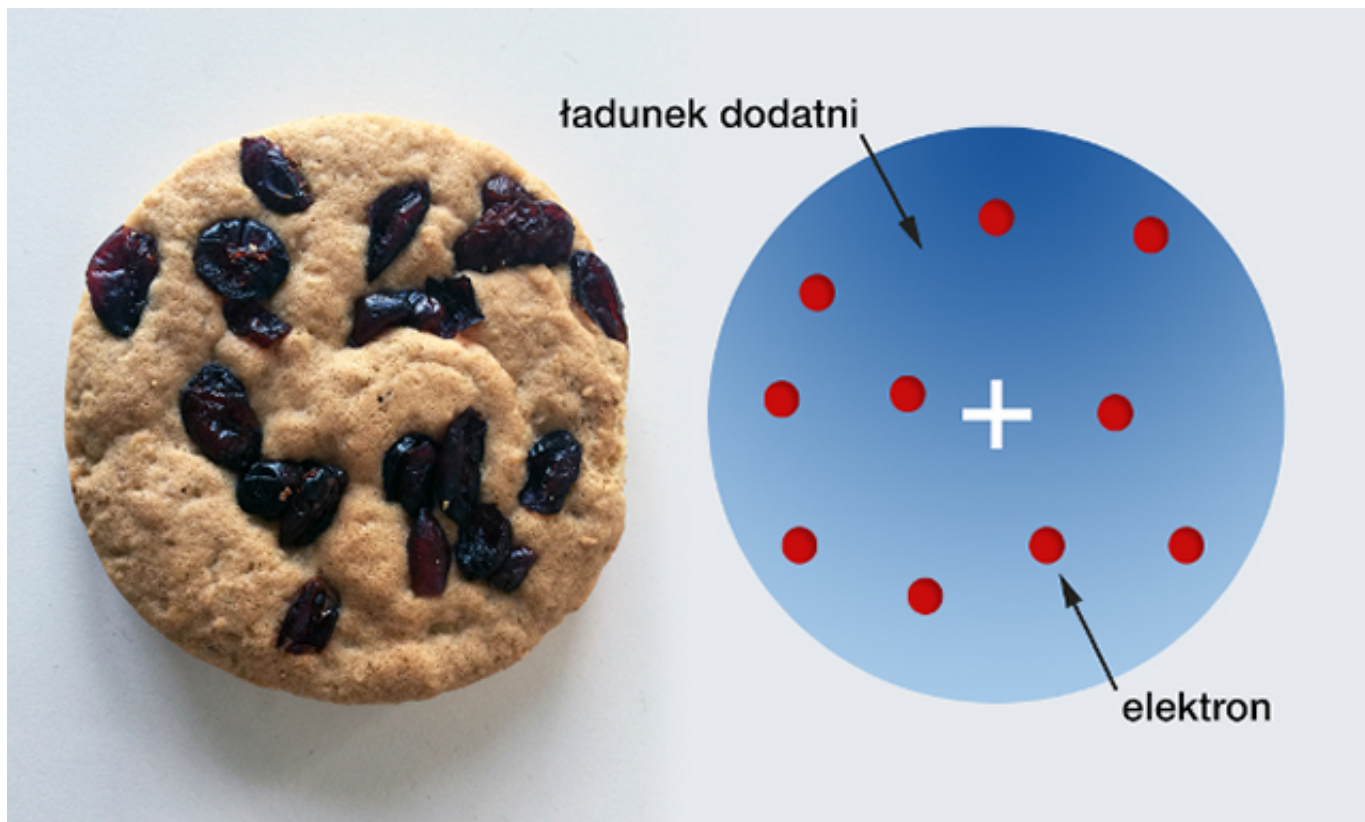
1. Od czego zależy barwa światła wysyłanego przez rozgrzane ciało?
2. Na pewno zauważyliście, przyglądając się rozżarzonym kawałkom drewna w ognisku, że światło wysyłane z nich nie jest jednolite - zagłębienia wydają się jaśniejsze niż samo drewno i barwa płomienia zmienia się od czerwonej do żółtej i białej (*Rysunek 2.10: Barwa płomienia ogniska zmienia się w różnych miejscach od czerwonej do białej* na stronie 132). Jak to wyjaśnić? Czy temperatura w zagłębieniach jest znacznie wyższa niż temperatura powierzchni żarzącego się drewna?
3. Na czym polega rewolucyjne odkrycie Maxa Plancka?

2.2 Zjawisko fotoelektryczne, fotony

Kolejnego przewrotu w naszym rozumieniu świata dokonał **Albert Einstein**. Wykazał on, że światło nie tylko emitowane jest porcjami, ale rozchodzi się w przestrzeni jako zbiór cząstek - fotonów, a także jest pochłaniane porcjami. Było to niezwykle odkrycie, bo przecież było wiadomo, że światło to fala elektromagnetyczna, a wszystkie zjawiska optyczne doskonale wyjaśniała falowa teoria światła. Po raz pierwszy pojawiło się w fizyce pojęcie dualizmu falowo-korpuskularnego. Einstein odkrył korpuskularną naturę światła, wyjaśniając zjawisko fotoelektryczne. Warto podkreślić, że za to właśnie odkrycie Albert Einstein został uhonorowany Nagrodą Nobla.

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na wybijaniu elektronów z metalu przez padające na niego światło (*Rysunek 2.12: Zjawisko fotoelektryczne* na stronie 133).

- ⚠ **Ważne:** *Korpuskuła* to inaczej cząstka. Dualizm falowo-korpuskularny oznacza, że światło jest jednocześnie falą i zbiorem cząstek.



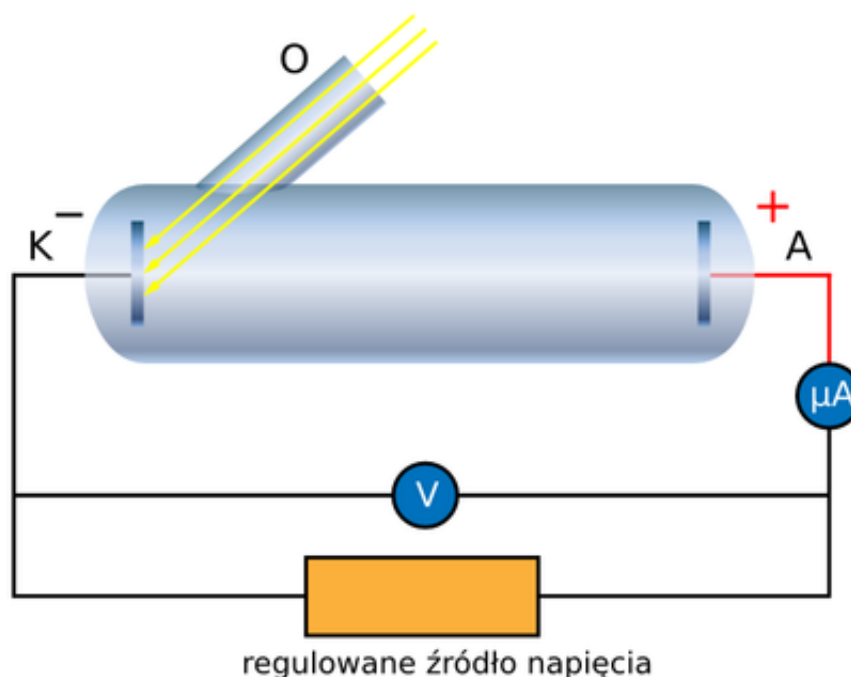
Światło monochromatyczne pada przez okienko kwarcowe O (przepuszczające światło ultrafioletowe) na katodę K i wybija z niej elektrony, które są przyciągane przez dodatnią anodę A

Rysunek 2.12: Zjawisko fotoelektryczne

Na [Rysunek 2.13: Układ doświadczalny do badania zjawiska fotoelektrycznego](#) na stronie 134 przedstawiony jest schemat układu doświadczalnego do badania zjawiska fotoelektrycznego. światło monochromatyczne pada przez okienko kwarcowe O na katodę K i wybija z niej elektrony, które lecą do anody A .

⚠ **Ważne:** Światło monochromatyczne - światło zawierające jedną długość fali.

Im większa jest liczba elektronów przelatujących w jednostce czasu od katody do anody, tym wyższe natężenie prądu w obwodzie. Mierząc to natężenie (za pomocą mikroamperomierza), uzyskujemy informację o liczbie elektronów wybijanych z katody.



O - okienko kwarcowe, K - katoda, A - anoda, μA - mikroamperomierz, V - woltomierz

Rysunek 2.13: Układ doświadczalny do badania zjawiska fotoelektrycznego

Rysunek 2.14: Efekt fotoelektryczny

[EXE PDF](#) Ćwiczenie: Efekt Fotoelektryczny

[OPIS](#) Doświadczenie zdalne: Zjawisko fotoelektryczne

Pomiary wykazują, że im większe jest natężenie światła, tym wyższe natężenie prądu w obwodzie, a więc i liczba elektronów wybijanych z katody.

⚠ **Ważne:** *Natężenie światła* to wielkość informująca nas jak silne jest światło padające na określoną powierzchnię; ściślej jest to moc światła padającego na powierzchnię jednostkową.

W doświadczeniu można również zmierzyć energię kinetyczną elektronów wybijanych z katody.

⚠ **Ważne:** *Energia kinetyczna* - energia poruszającego się ciała, zależy od masy i prędkości ciała: $E_k = \frac{mv^2}{2}$.

⚠ **Wskazówka:** Jak mierzy się energię kinetyczną elektronów wybijanych z katody? Na schemacie ([Rysunek 2.13: Układ doświadczalny do badania zjawiska fotoelektrycznego](#) na stronie 134) przedstawiono także woltomierz V , który służy do pomiaru napięcia panującego między anodą i katodą. Jest ono zależne od napięcia źródła zasilania (baterii). Jeśli baterię podłączymy tak, że anoda jest dodatnia a katoda ujemna, elektrony wybijane z katody będą przyspieszane. Jeśli baterię podłączymy odwrotnie (katoda dodatnia,

a anoda ujemna), to elektrony będą hamowane. Pomiar napięcia hamowania pozwala na wyznaczenie energii elektronów wybijanych z katody. Można tego dokonać w następujący sposób: zwiększamy napięcie hamujące U_0 coraz bardziej, aż do zaniku prądu w obwodzie. Wtedy wszystkie elektrony w bańce zostaną wyhamowane do tego stopnia, że nie będą mogły dolecieć do anody.

Energia kinetyczna elektronu

$$(\text{wzór 118}) E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Jest równa pracy wyhamowania:

$$(\text{wzór 119}) \frac{mv^2}{2} = e \cdot U_0$$

gdzie: m - masa elektronu, v - prędkość elektronu, e - ładunek elektronu.

Przeprowadzone pomiary wykazały, że:

1. Liczba wybijanych z katody elektronów jest wprost proporcjonalna do natężenia światła padającego na katodę.
2. Energia kinetyczna wybijanych z katody elektronów zależy od częstotliwości światła, a nie zależy od natężenia światła padającego na katodę.
3. Istnieje graniczna (progowa) częstotliwość światła poniżej której elektrony nie są wybijane z katody bez względu na natężenie światła. Wartość tej częstotliwości zależy od właściwości metalu, z jakiego wykonana jest katoda.



Wskazówka: Własności *zjawiska fotoelektrycznego* są niezrozumiałe w świetle falowej teorii światła.

Te własności efektu fotoelektrycznego kłóciły się z klasycznym pojmowaniem światła. Wiadomo, że światło to fala elektromagnetyczna, a energia wiązki światła to energia fali proporcjonalna do natężenia. światło o większym natężeniu powinno z większą energią wybijać elektrony z metalu. Tymczasem doświadczenie wykazuje, że energia elektronów wybijanych z katody w efekcie fotoelektrycznym nie zależy od natężenia światła! Dlatego z punktu widzenia fizyki klasycznej efekt fotoelektryczny był niezrozumiały. Nie wiadomo było, dlaczego energia elektronów wybijanych z katody za pomocą światła zależy tylko od jego częstotliwości.

Obecność częstotliwości progowej (granicznej) była także niemożliwa do objaśnienia w ramach teorii klasycznej.

Ten paradoks wyjaśnił Albert Einstein w 1905 roku. Przyjął, że światło (mimo że ma własności falowe) zachowuje się jak strumień cząstek - *fotonów*, z których każdy ma energię E_f zależną od częstotliwości światła ν :

$$(\text{wzór 120}) E_f = h \cdot \nu$$

gdzie h jest stałą Plancka.

Elektron wybijany jest z katody przez pojedynczy foton, który całą swą energię przekazuje elektronowi. Oto, jak fotonowa teoria światła wyjaśnia własności zjawiska fotoelektrycznego:

1. Natężenie światła jest miarą liczby fotonów padających na katodę w ciągu sekundy. Jasne jest, że im więcej fotonów pada na katodę, tym więcej jest wybijanych elektronów i tym większe zmierzmy natężenie prądu w obwodzie.
2. Rozumiemy już, dlaczego energia elektronów zależy od częstotliwości światła - im większa częstotliwość, tym większa energia fotonu. Elektron wybijany przez foton o większej energii $E = h\nu$ (o większej częstotliwości) musi mieć większą energię kinetyczną.
3. Obecność częstotliwości granicznej (progowej) wynika z faktu, że elektron jest związany w metalu, a dla jego wybicia potrzebna jest pewna minimalna energia.

Fotonowa teoria światła Einsteina w pełni wyjaśnia obserwowane własności efektu fotoelektrycznego. Stają się one zrozumiałe, jeśli założymy, że światło składa się z fotonów. Jeden foton wybija jeden elektron z katody, oddając elektronowi całą swą energię.

W zjawisku fotoelektrycznym musi być spełnione *prawo zachowania energii*, to znaczy energia początkowa równa jest energii końcowej.

Einstein podał wzór, który przedstawia prawo zachowania energii w zjawisku fotoelektrycznym. Zależność ta doskonale zgadza się z doświadczeniem. Foton, padając na metalową katodę, oddaje swoją energię napotkanemu

elektronowi. Na elektrony w metalu działają przyciągające siły elektrostatyczne. Aby elektron mógł opuścić metal, musi być wykonana praca przeciwko tym siłom, zwana *pracą wyjścia*. Do opuszczenia metalu elektron potrzebuje więc energii co najmniej równej pracy wyjścia W . Foton ma energię $h\nu$. Energia pojedynczego fotonu zostaje zużyta na pracę wyjścia W elektronu z metalu oraz nadanie mu energii kinetycznej $\frac{mv^2}{2}$.

Równanie Einsteina dla efektu fotoelektrycznego:

$$(\text{wzór 121}) \quad h\nu = W + \frac{mv^2}{2}$$

- Ⓡ **Zamapiętać:** W zjawisku fotoelektrycznym energia padającego fotonu zamienia się na pracę wyjścia elektronu z metalu oraz energię kinetyczną wybitego elektronu.

energia padającego fotonu energia kinetyczna elektronu

$$h\nu = W + \frac{mv^2}{2}$$

praca wyjścia elektronu z metalu

Rysunek 2.15: a) Równanie Einsteina dla efektu fotoelektrycznego

Z równania Einsteina wynika, że zjawisko fotoelektryczne może zachodzić tylko wtedy, gdy energia padającego fotonu $h\nu$ jest większa niż praca wyjścia W z katody. Wartość pracy wyjścia zależy od materiału i stanu powierzchni katody. Rzeczywiście, doświadczenie potwierdza, że zjawisko fotoelektryczne zachodzi tylko dla odpowiednio dużych częstotliwości ν - większych od częstotliwości progowej.

Zjawisko fotoelektryczne znalazło zastosowanie praktyczne w *fotokomórkach*. Zasadę działania fotokomórki możesz łatwo zrozumieć. Przyjrzyj się jeszcze raz rysunkowi [Rysunek 2.13: Układ doświadczalny do badania zjawiska fotoelektrycznego](#) na stronie 134. Łatwo możesz zauważyć, że tylko wtedy w obwodzie będzie płynął prąd, gdy do katody K będzie docierało światło. Każde przerwanie strumienia światła objawi się zanikiem prądu w obwodzie, gdyż nie będą wybijane elektrony z katody. Brak elektronów wewnątrz fotokomórki spowoduje przerwę w obwodzie. Ten zanik prądu można wykorzystać do włączenia się innego urządzenia, np. otwierającego drzwi w supermarkecie, lub do włączenia się urządzenia alarmowego w przypadku, gdy pojawi się osoba niepożądana.

- ⚠ **Wskazówka:** Obecnie zamiast fotokomórek stosuje się *fotodiody* (elementy półprzewodnikowe) działające jako detektory światła. Zasada działania fotodiody polega na pojawieniu się znacznego napięcia pod wpływem oświetlenia. Przy braku oświetlenia prąd w obwodzie fotodiody jest bardzo mały. Wystarczy fotodiody oświetlić, aby prąd wzrósł wielokrotnie. Będzie on tym większy, im silniejsze będzie światło (natężenie światła) padające na nią.

Pytania i problemy

1. Na czym polega zjawisko fotoelektryczne?
2. Podaj i objaśnij wzór Einsteina dla zjawiska fotoelektrycznego. .
3. Dlaczego energia elektronów wybijanych z katody zależy od częstotliwości światła?
4. Wiedząc, że natężenie światła jest wprost proporcjonalne do liczby fotonów padających na katodę w ciągu sekundy, wyjaśnij dlaczego natężenie prądu elektronów przepływających między katodą i anodą zależy od natężenia światła.

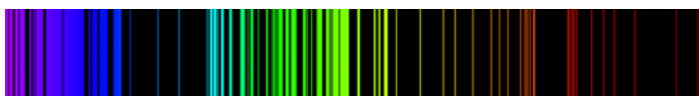
2.3 Widma promieniowania gazów

Światło emitowane przez rozrzedzone gazy składające się z pojedynczych atomów ma inny charakter niż promieniowanie termiczne ciał stałych. Widmo promieniowania gazów jest widmem liniowym. W przeciwieństwie do widma rozgrzanych ciał stałych, o których mówiliśmy w rozdziale [2.1 Promieniowanie termiczne](#) na stronie 124, widmo gazów ma charakter nieciągły. Oznacza to, że emitowane jest światło o pewnych, określonych długościach fal. Jeśli takie światło rozszczepimy np. w pryzmacie, na ekranie zobaczymy pojedyncze linie. Przykładowe widma liniowe emitowane przez atomy azotu i żelaza pokazane są na [Rysunek 2.16: Przykładowe widma liniowe a\) atomów azotu, b\) atomów żelaza](#) na stronie 137.

a)



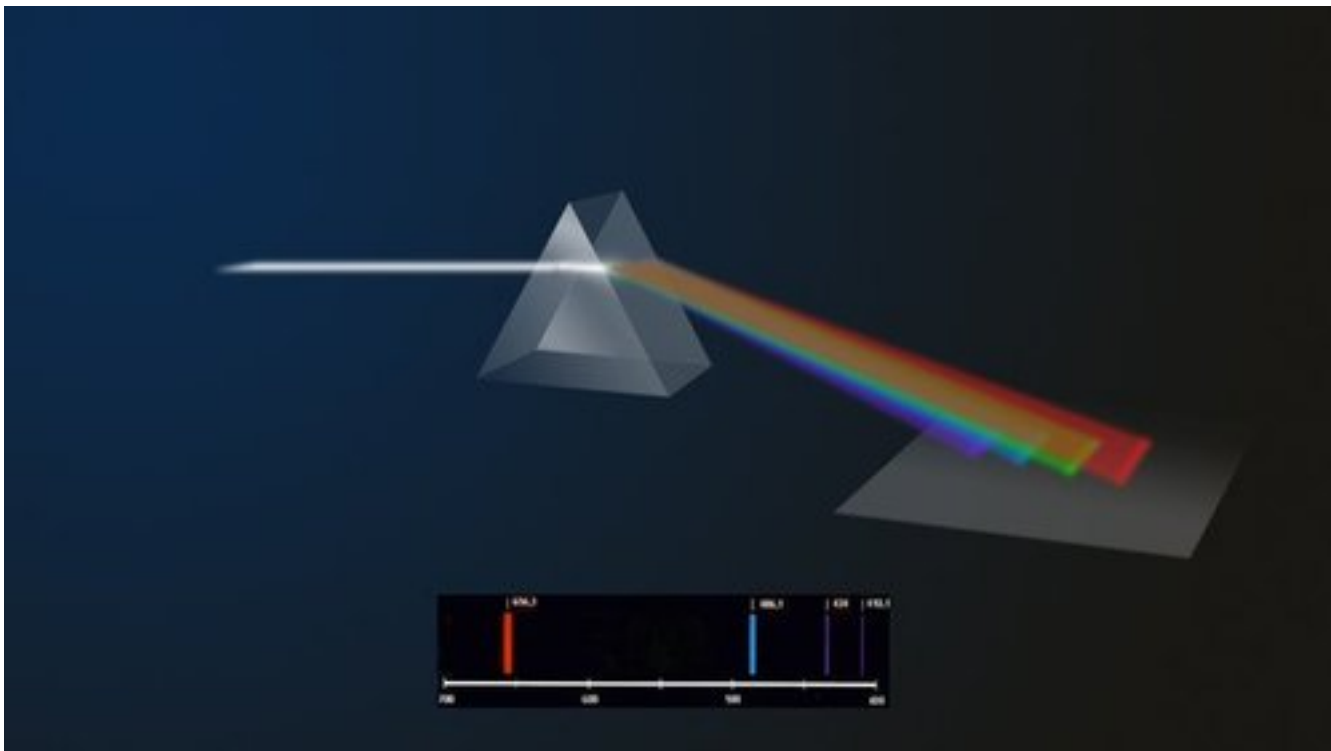
b)



Rysunek 2.16: Przykładowe widma liniowe a) atomów azotu, b) atomów żelaza

Na [Rysunek 2.18: Schemat układu doświadczalnego do obserwacji nieciągłego widma świecącego gazu znajdującego się wewnątrz rurki wyladowczej](#) na stronie 138 przedstawiono schematycznie układ do obserwacji widma gazu znajdującego się w szklanej rurce wyladowczej. Gaz jest pobudzany do świecenia poprzez przyłożenie wysokiego napięcia. Na drodze światła znajduje się pryzmat, który je rozszczepia, ujawniając jego fale składowe, widoczne na ekranie w postaci barwnych prążków.

Rysunek 2.17: Widmo elektromagnetyczne



Rysunek 2.18: Schemat układu doświadczenia do obserwacji nieciągłego widma świecącego gazu znajdującego się wewnątrz rurki wyładowczej

Johann Jakob Balmer w 1885 r. analizował widmo promieniowania wodoru. Zauważył, że w obszarze widzialnym widma częstotliwości fal spełniają ciekawą zależność wyrażoną tzw. wzorem Balmera-Rydberga:

$$(\text{wzór 122}) \nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

gdzie n to liczby całkowite większe niż 2 ($n = 3, 4, 5, \dots$); odpowiednie długości fal, możemy wyznaczyć ze wzoru:

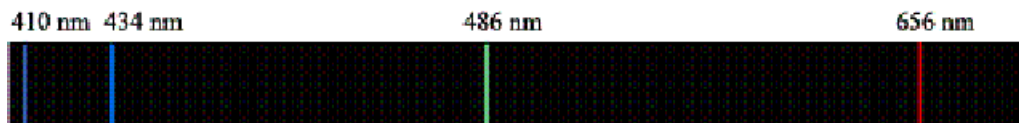
$$(\text{wzór 123}) \lambda = \frac{c}{\nu}$$

Stała R ma wartość:

$$(\text{wzór 124}) R = 3,28985 \cdot 10^{15} \text{s}^{-1}$$

Ze stałą R związana jest wielkość R' - nosi ona nazwę *stałej Rydberga* i jest przydatna przy wyznaczaniu długości fali. $R' = R/c$ (c - prędkość światła), $R' = 1,096 \cdot 10^7 \text{m}^{-1}$.

Linie widmowe odpowiadające długościom fal wyrażonym za pomocą wzorów ([wzór 122](#) na stronie 138 oraz [wzór 123](#) na stronie 138) tworzą grupę albo serię linii zwanych *serią Balmera*.



Rysunek 2.19: Widmo emisyjne atomów wodoru (seria Balmera)

Przykład: Seria Balmera

Seria Balmera znajduje się w części widzialnej widma. Oblicz długości fal odpowiadające tej serii oraz liczbę linii widmowych, które można zobaczyć. Przyjmij, że widmo widzialne obejmuje zakres długości fal $380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$.

Rozwiązanie: Wzór (wzór 122 na stronie 138) daje możliwość obliczenia częstotliwości ν linii widmowych serii Balmera. Aby obliczyć odpowiednie długości fal, należy skorzystać ze wzoru $\lambda = \frac{c}{\nu}$. Prędkość światła $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Zatem długości fal wynoszą:

$$(\text{wzór 125}) \lambda = \frac{c}{R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)} = \frac{c}{R} \cdot \frac{4n^2}{n^2 - 4} = 91,2 \cdot \frac{4n^2}{n^2 - 4} \text{ nm}$$

❗ **Ważne:** 1 nm (*nanometr*) to jedna miliardowa część metra: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

Stąd:

$$(\text{wzór 126}) \lambda_1 = 91,2 \cdot \frac{4 \cdot 3^2}{3^2 - 4} \text{ nm} = 656 \text{ nm}$$

$$(\text{wzór 127}) \lambda_2 = 91,2 \cdot \frac{4 \cdot 4^2}{4^2 - 4} \text{ nm} = 486 \text{ nm}$$

$$(\text{wzór 128}) \lambda_3 = 433 \text{ nm}$$

$$(\text{wzór 129}) \lambda_4 = 441 \text{ nm}$$

$$(\text{wzór 130}) \lambda_5 = 377 \text{ nm}$$

$$(\text{wzór 131}) \dots$$

Ponieważ zakres widma światła widzialnego przypada dla $380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$, więc można zobaczyć tylko cztery linie widma wodoru (*Rysunek 2.19: Widmo emisyjne atomów wodoru (seria Balmera)* na stronie 138).

W późniejszych latach wykryto istnienie innych serii widmowych wodoru, leżących w nadfiolecie i podczerwieni. Częstotliwości fali we wszystkich seriach widmowych można przedstawić za pomocą jednego wspólnego wzoru:

$$(\text{wzór 132}) \nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

gdzie k i n są liczbami naturalnymi. Liczba k odpowiada kolejnemu numerowi serii. Dla określonej serii $n = k + 1, k + 2, \dots$

Fizyka klasyczna nie potrafiła wyjaśnić charakteru widma liniowego. Stało się ono zrozumiałe po przyjęciu dwóch zasadniczych założeń:

1. światło występuje pod postacią fotonów,
2. energia atomu może przyjmować tylko pewne określone wartości (które nazywamy energiami dozwolonymi atomu).

Podczas emisji światła atom skokowo obniża swoją energię, wysyłając kwant światła o energii

$$(\text{wzór 133}) E_f = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

gdzie h jest stałą Plancka, ν - częstotliwość, λ - długość fali światła, c - prędkość światła w próżni.

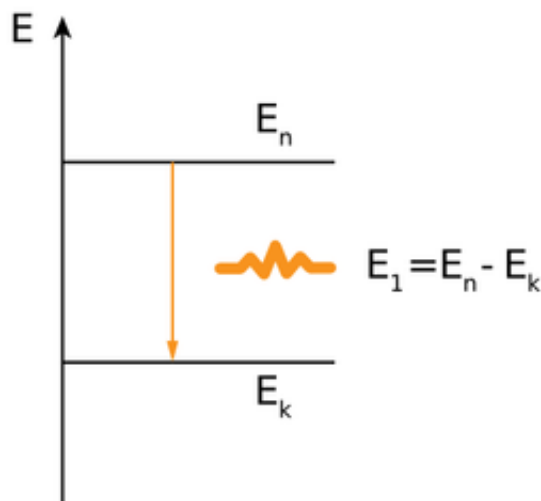
Obniżenie energii atomu podczas emisji światła oznacza, że atom przechodzi ze stanu o wyższej energii E_n do stanu o energii niższej E_k . Obowiązuje *zasada zachowania energii*.

Energia stracona przez atom równa się energii wypromieniowanego fotonu:

$$(\text{wzór 134}) E_f = E_n - E_k$$

Ⓜ **Zamknięta:** Atom może wypromieniować foton tylko o określonej energii - dokładnie równej różnicy między dozwolonymi energiami atomu.

Gdy atom przechodzi ze stanu o wyższej energii E_n do stanu o niższej energii E_k , wypromieniowuje foton o energii równej różnicy między energią początkową i końcową



$$E_f = E_n - E_k$$

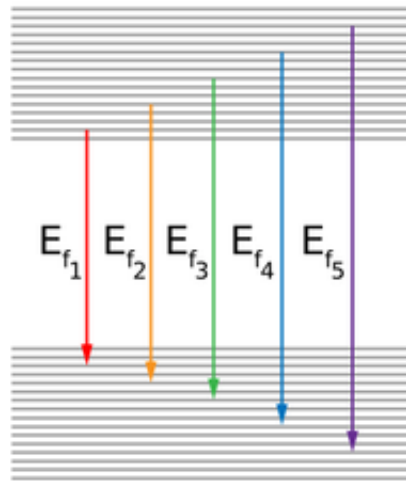
Rysunek 2.20: Atom nie może mieć dowolnej energii, dozwolone są tylko pewne określone wartości E_n i E_k

⚠ **Wskazówka:**

Ciała stałe również składają się z atomów. Dlaczego więc rozgrzane ciała stałe emitują widmo ciągłe a nie liniowe?

Widmo promieniowania rozgrzanych ciał stałych jest ciągłe, co świadczy o tym, że poziomy energetyczne różnych atomów różnią się od siebie o bardzo małe wartości. W ciele stałym atomy są blisko siebie i ich oddziaływanie prowadzi do zmiany oddzielonych od siebie poziomów energetycznych atomów w ciągłe pasma energetyczne (*Rysunek 2.21: W ciele stałym oddziaływanie atomów prowadzi do zmiany poziomów energetycznych w pasma energetyczne* na stronie 141)

Elektrony podczas przejść między poziomami emitują fotony różniące się długościami fali - powstaje widmo



ciągłe

Rysunek 2.21: W ciele stałym oddziaływanie atomów prowadzi do zmiany poziomów energetycznych w pasma energetyczne

Sąsiednie energie emitowanych kwantów promieniowania tak niewiele różnią się wartościami, że ich rozkład jest ciągły, a więc ciągły jest również rozkład częstotliwości (energia $E = h\nu$, gdzie ν - częstotliwość). Dotyczy to również długości fal ($\lambda = c/\nu$). Dlatego widma promieniowania rozgrzanych ciał stałych są ciągłe (*Rysunek 2.3: Światło żarówki wolframowej ma widmo ciągłe składające się z fal o wszystkich długościach* na stronie 125).

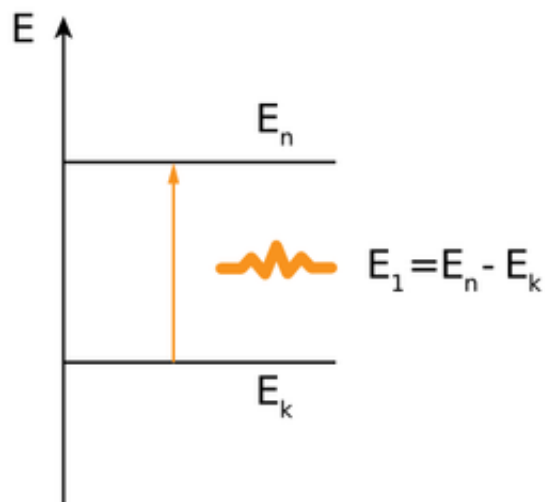
Wiemy już, że świecenie gazów charakteryzuje się widmem liniowym, tzn. że tylko fale o niektórych długościach są wysyłane przez atomy gazu. Jeśli światło o ciągłym widmie przechodzi przez chłodny gaz, to w jego widmie na ciągłym kolorowym tle widoczne są ciemne linie. Są to linie widma absorpcyjnego.

Absorpcja to inaczej pochłanianie. Widmo absorpcyjne to widmo otrzymane w wyniku pochłaniania przez atomy padającego na nie światła.

Oznacza to, że atomy gazu pochłaniają fale tylko o niektórych długościach. Ciemne linie widma absorpcyjnego znajdują się dokładnie w tych miejscach, w których znajdują się linie widma emisyjnego danego gazu. Zatem, każdy atom pochłania takie światło, które sam jest w stanie emitować (*Rysunek 2.22: Absorpcja światła* na stronie 141).

Atom może pochłoniąć tylko taki foton, którego energia jest dokładnie równa różnicy między dozwolonymi energiami atomu $E_f = E_n - E_k$. Podczas absorpcji

fotonu atom przechodzi ze stanu o niższej energii E_k do stanu o energii wyższej

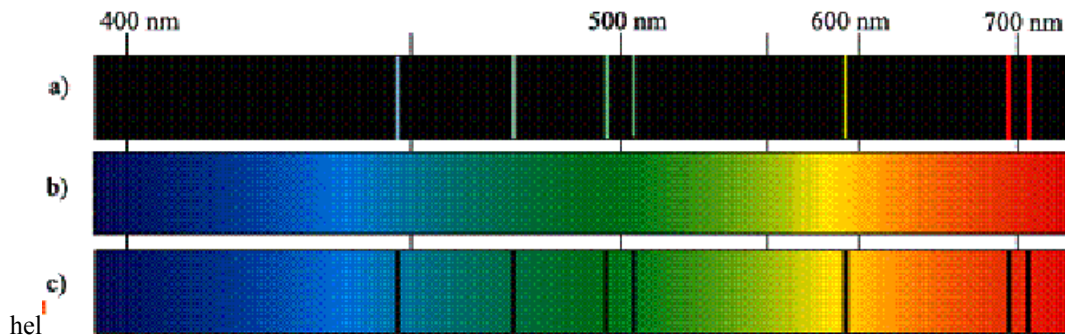


E_n

Rysunek 2.22: Absorpcja światła

Gdy gaz oświetlimy światłem o widmie ciągłym, atomy gazu będą pochłaniać fotony o pewnych energiach charakterystycznych dla atomów danego pierwiastka. Rysunek *Rysunek 2.23: Przykłady widm* na stronie 142c pokazuje widmo absorpcyjne helu otrzymane, gdy rozszczepiono światło o widmie ciągłym przepuszczone przez chłodny gazowy hel.

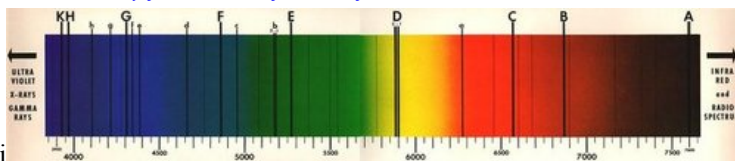
- a) Widmo emisyjne helu, b) widmo ciągłe światła słonecznego padającego na gaz,
c) widmo absorpcyjne po przejściu światła słonecznego przez chłodny gazowy



Rysunek 2.23: Przykłady widm

W widmie światła słonecznego występuje wiele linii absorpcyjnych. Są to tak zwane linie Fraunhofera (*Rysunek 2.24: Linie Fraunhofera - linie absorpcyjne w widmie światła słonecznego* na stronie 143). Każda z nich wskazuje na obecność w atmosferze słonecznej jakiegoś pierwiastka. W ten sposób odkryto, że w atmosferze słonecznej występuje między innymi hel.

źródło: <http://www.harmsy.freeuk.com/fraunhofer.html>; oznaczenia literowe są stosowane zwyczajowo w





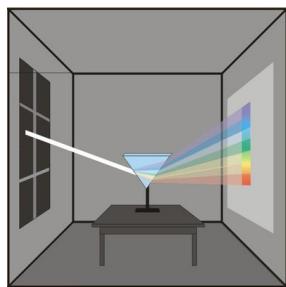
spektroskopii

Rysunek 2.24: Linie Fraunhofera - linie absorpcyjne w widmie światła słonecznego

Widma liniowe odgrywają ważną rolę, ponieważ ich struktura jest związana z budową atomu. Dzięki temu możemy "zajrzeć" do wnętrza atomu. Wynika to z zasady zachowania energii. Jeżeli atom wypromieniuje kwant energii, to tyle energii musi stracić. Jeżeli zaabsorbuje światło, to taką ilość energii uzyska. Innymi słowy, badając energie światła emitowanego lub absorbowanego przez atom, możemy stwierdzić, jakie energie może mieć atom.

Pytania i problemy

1. Dlaczego widma promieniowania gazów są liniowe?
2. Czym różni się widmo emisyjne od absorpcyjnego gazów? Jakie są ich cechy wspólne?
3.  **Wskazówka:** Wykaż stosując wzór ([wzór 132](#) na stronie 139), że długości fal (tzw. serii Lymana) przy $k = 1$, wychodzą poza zakres promieniowania widzialnego (uwzględnij zakres długości fal światła widzialnego, patrz [Przykład](#)). Jak nazwiesz promieniowanie tej serii?
4.  **Wskazówka:** Sprawdź, czy potrafisz wykonać doświadczenie rozszczepienia światła słonecznego, stosując pryzmat w zaciemnionym pokoju. Staraj się by wiązka wchodzącego światła białego była możliwie wąska. Tak uczynił to swego czasu Newton ([Rysunek 2.25: Doświadczenie Newtona z rozszczepieniem światła w pryzmacie](#) na stronie 143). Wykonaj zdjęcie otrzymanego widma i opisz je (pryzmat możesz pożyczyć ze szkolnej pracowni fizycznej).



Rysunek 2.25: Doświadczenie Newtona z rozszczepieniem światła w pryzmacie

2.4 Budowa atomu

Olbrzymi postęp w technice i technologii XX wieku zawdzięczamy w dużej mierze poznaniu budowy atomu. Powinniśmy zatem wiedzieć, jak jest zbudowany atom, i poznać przynajmniej podstawowe jego własności. Zapoznamy się z modelem atomu wodoru Bohra. Mimo, że model ten jest bardzo uproszczony i dzisiaj ma raczej historyczne znaczenie, to bardzo dokładnie opisuje całe widmo promieniowania wodoru, a symbole wprowadzone przez Bohra są stosowane do dzisiaj.

Rysunek 2.26: Model atomu Bohra

Pierwszą nieklasyczną teorię atomu opracował w 1913 roku **Niels Bohr**. Bohr próbował wyjaśnić znane w owym czasie wyniki doświadczeń uzyskanych głównie z badania atomowych widm emisji i absorpcji światła.



Rysunek 2.27: Niels Bohr (1885 - 1962) wybitny duński fizyk atomowy

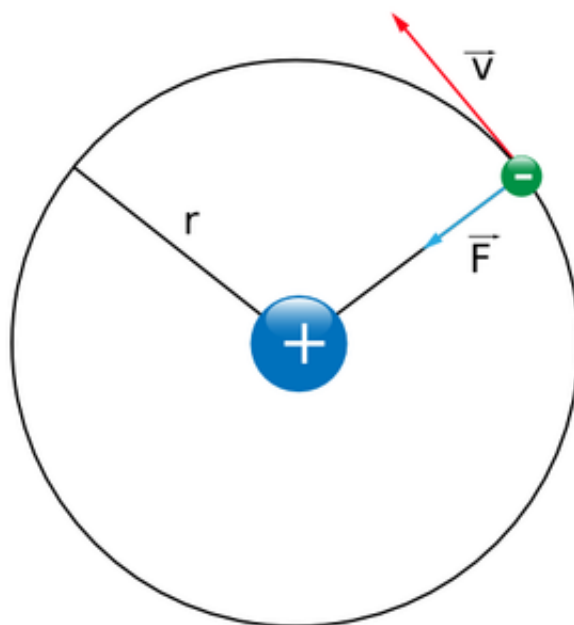
Na atom wodoru składają się dwie cząstki znajdujące się blisko siebie: *elektron* i *proton*. Proton jest cięższy od elektronu około 1 840 razy. Elektron ma ujemny ładunek o wartości $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Ładunek protonu jest dodatni, a jego wartość równa jest wartości ładunku elektronu. Proton i elektron przyciągają się więc siłami elektrostatycznymi. Średnia odległość elektronu od jądra:

$$(\text{wzór 135}) r = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,5 \text{ \AA}$$

Symbol Å (angstrzem) oznacza jednostkę długości charakterystyczną dla atomów, $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$.

Bohr założył, że elektron porusza się wokół protonu po orbicie kołowej. Siłą dośrodkową działającą na elektron jest przyciągająca siła elektrostatyczna wywierana przez proton ([Rysunek 2.28: Atom wodoru według Bohra](#) na stronie 145).

Elektron krąży na orbicie kołowej wokół dodatniego jądra -



protonu

Rysunek 2.28: Atom wodoru według Bohra

Ruch elektronów według Bohra można porównać do ruchu planet wokół Słońca. Taki model atomu był jednak sprzeczny z fizyką klasyczną, która przewiduje, że ładunek poruszający się z przyspieszeniem (w tym przypadku dośrodkowym) emituje promieniowanie elektromagnetyczne o widmie ciągłym. Gdyby światem atomów rządziła fizyka klasyczna, atom nie mógłby istnieć. Emisja promieniowania powodowałaby straty energii elektronu, który szybko spadłby na jądro.

Aby wyjaśnić liniowy charakter widm promieniowania emitowanego przez atomy, potrzebujemy zasady, która dopuszczałaby tylko pewne wartości energii elektronu. Oznacza to, że promienie orbit nie mogą być dowolne, a muszą spełniać określone zasady.

Energia elektronu na orbicie zależy od promienia orbity. Bohr doszedł do wniosku, że dozwolone są tylko takie orbity, dla których iloczyn pędu elektronu i promienia jego orbity jest całkowitą wielokrotnością h - stałej Plancka podzielonej przez 2π .

⚠ **Ważne:** Pęd to iloczyn masy i prędkości ciała $p = mv$.

Ten iloczyn pędu elektronu i promienia nazywa się *momentem pędu*. Zatem moment pędu elektronu na orbicie może przybierać tylko wartości różniące się od siebie całkowitą wielokrotnością $\frac{h}{2\pi}$.

$$(\text{wzór 136}) \quad mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

gdzie: m - masa elektronu, v - jego prędkość, r - promień dopuszczalnej orbity kołowej elektronu, a n przybiera wartości liczb naturalnych ($n = 1, 2, \dots$). Wzór ten nosi nazwę *pierwszego postulatu Bohra*.

Dlaczego taki właśnie warunek ma spełniać orbita elektronu? Bohr tak dobrał warunek na dozwolone orbity elektronów, aby model atomu wyjaśniał obserwowane widma promieniowania. Po prostu, dopasował wzór ([wzór 136](#) na stronie 145) do danych doświadczalnych.

Drugi postulat Bohra to stwierdzenie, że stany elektronu znajdującego się na dozwolonych orbitach, zgodnych z pierwszym postulatem, są stacjonarne, czyli elektron znajdujący się na tych orbitach nie wysyła fal elektromagnetycznych.

Drugi postulat, o czym już wspomnieliśmy, jest sprzeczny z klasyczną fizyką. W skali atomowej dochodzą do głosu efekty kwantowe (patrz [2.6 Korpuskularno-falowa natura materii](#) na stronie 153). W związku z tym prawa elektrodynamiki obowiązujące w skali makroskopowej (sprawdzone doświadczalnie) nie sprawdzają się w pełni w skali mikroświata. Elektron na orbicie musiałby promieniować fale elektromagnetyczne – traciłby energię i po krótkim czasie spadłby na jądro, a atom przestałby istnieć. Jednakże doświadczenie pokazuje, że nic takiego się nie dzieje i atomy są trwałe. Dlatego Bohr zapostulował istnienie orbit stacjonarnych.

Trzeci postulat Bohra głosi, że podczas przejścia elektronu z jednego stanu stacjonarnego do drugiego jest wypromieniowany albo pochłonięty jeden kwant energii. Atom emituje kwant energii podczas przejścia elektronu z orbity o wyższej energii (bardziej oddalonej od jądra) na orbitę o niższej energii (bliższą jądra). Pochłanianie kwantu (absorpcja) zachodzi przy odwrotnym przejściu elektronu - z orbity bliższej jądra na bardziej odległą ([Rysunek 2.29: Emisja i absorpcja fotonu w atomie](#) na stronie 146). Częstotliwość ν fali elektromagnetycznej wypromieniowanej lub pochłoniętej przy tych przejściach wynika z bilansu energii:

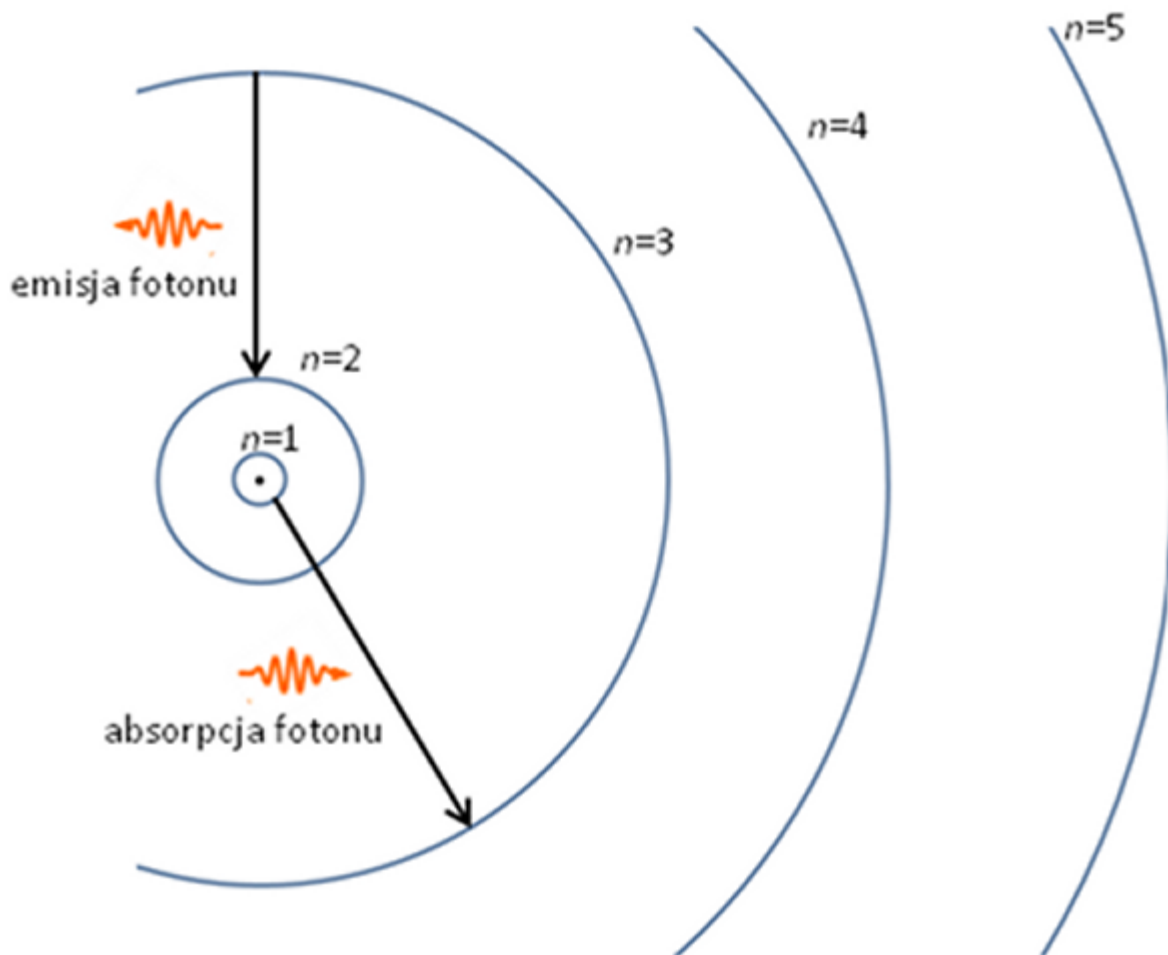
$$(\text{wzór 137}) \quad h\nu = E_n - E_k$$

gdzie E_n i E_k są energiami odpowiednich stanów elektronu w atomie.

Zauważmy, że foton może być pochłonięty przez atom tylko wtedy gdy jego energia jest dokładnie równa różnicy między dozwolonymi energiami elektronu. Fotony o innej energii nie mogą zostać pochłonięte przez atom - atom jest dla nich przezroczysty.

Elektron może znajdować się tylko na orbitach spełniających pierwszy postulat Bohra. Emisja fotonu następuje, gdy elektron przeskakuje z wyższej orbity na niższą, zmniejszając swą energię o energię wypromieniowanego fotonu,

a absorpcja - gdy elektron przeskakuje z niższej orbity na wyższą i zwiększa energię o energię pochłoniętego



fotonu

Rysunek 2.29: Emisja i absorpcja fotonu w atomie

R **Zamąpiętać:** *Postulaty Bohra:*

I. Dozwolone są tylko takie orbity, dla których moment pędu elektronu jest całkowitą wielokrotnością stałej Plancka h dzielonej przez 2π

$$(\text{wzór 138}) \quad mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

II. Elektron znajdujący się na tych orbitach stacjonarnych, czyli zgodnych z pierwszym postulatem nie wysyła fal elektromagnetycznych.

III. Podczas przejścia z jednej orbity stacjonarnej na drugą stacjonarną elektron wypromieniowuje albo pochłania kwant energii:

$$(\text{wzór 139}) \quad h\nu = |E_n - E_k|$$

Model atomu Bohra pozwala wyznaczyć r_n - promienie kolejnych dozwolonych orbit elektronu w atomie wodoru.

! **Wskazówka:** Na elektron poruszający się wokół jądra działa przyciągająca siła kulombowska:

$$(\text{wzór 140}) \quad F = k \frac{e^2}{r^2}$$

Siła oddziaływania między dwoma ładunkami q_1 i q_2 jest wprost proporcjonalna do wartości obu ładunków i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości r między nimi:

$$(\text{wzór 141}) F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

gdzie k jest stałą.

W atomie wodoru oba ładunki: elektronu i protonu mają wartość e (ładunek elementarny). Oczywiście, oddziaływanie grawitacyjne protonu z elektronem możemy pominąć wobec siły elektrycznej.

Siła ta pełni rolę siły dośrodkowej:

$$(\text{wzór 142}) F_r = \frac{mv^2}{r}$$

Możemy więc przyrównać obie siły i otrzymamy równanie:

$$(\text{wzór 143}) k \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Jeśli zestawimy to równanie z pierwszym postulatem Bohra, otrzymamy układ dwóch równań z dwiema niewiadomymi r i v :

$$(\text{wzór 144}) \begin{cases} k \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \\ mvr = n \frac{h}{2\pi} \end{cases}$$

Z układu równań można wyznaczyć r_n - promienie kolejnych dozwolonych orbit.

$$(\text{wzór 145}) r_n = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 k m e^2}$$

gdzie n to numer orbity ($n = 1, 2, 3, \dots$)

Po podstawieniu wartości stałych (h - stała Plancka, m - masa elektronu, e - ładunek elementarny) otrzymamy promień pierwszej orbity atomu wodoru: $r_1 = 0,5 \text{ \AA}$. Wartość ta jest zgodna z wynikami pomiarów.

Elektron zwykle przebywa na pierwszej orbicie - jest to *stan podstawowy atomu*. Energia elektronu na pierwszej orbicie jest najmniejsza. Promienie kolejnych dozwolonych orbit szybko się zwiększają.

$$(\text{wzór 146}) r_2 = 2^2 \cdot 0,5 \text{ \AA} = 2 \text{ \AA}$$

$$(\text{wzór 147}) r_3 = 3^2 \cdot 0,5 \text{ \AA} = 4,5 \text{ \AA}$$

$$(\text{wzór 148}) r_4 = 4^2 \cdot 0,5 \text{ \AA} = 8 \text{ \AA}$$

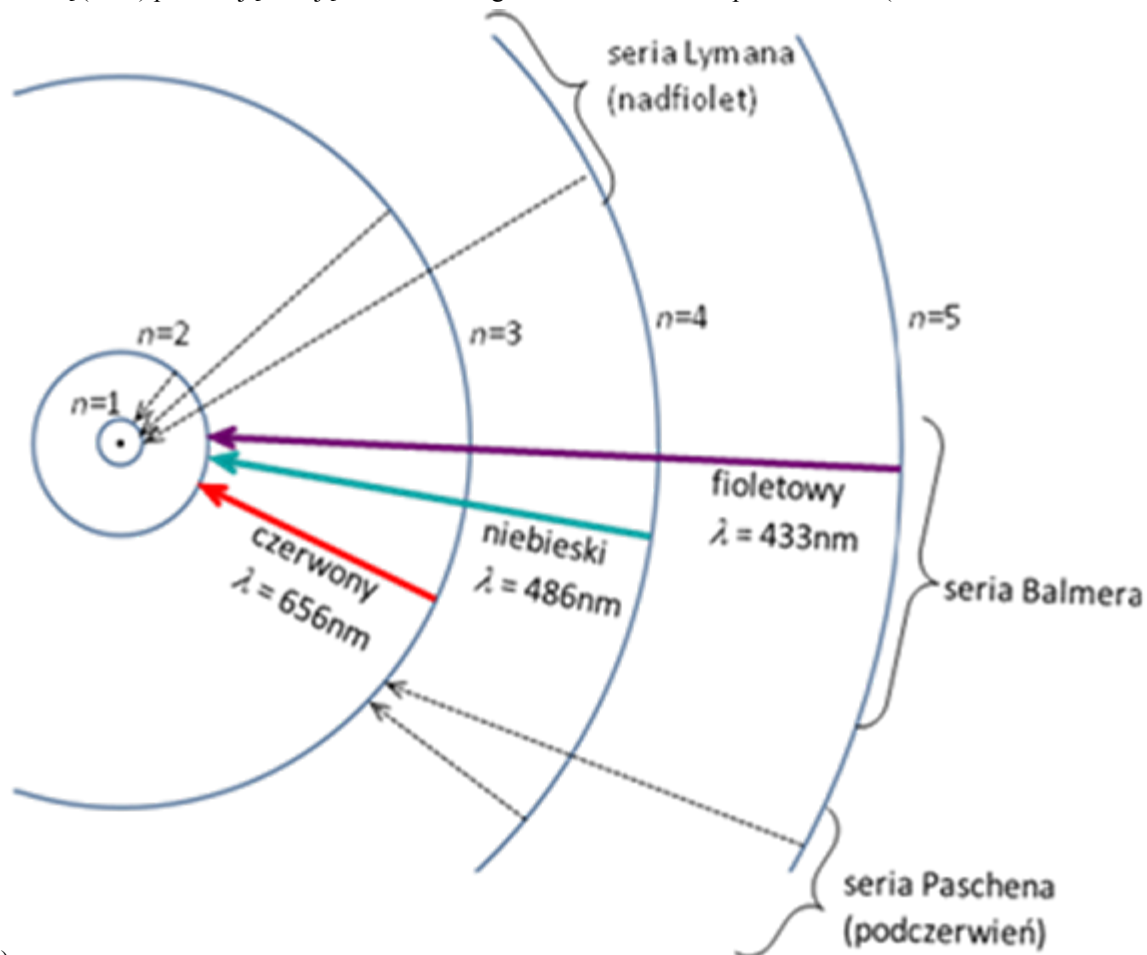
$$(\text{wzór 149}) r_5 = 5^2 \cdot 0,5 \text{ \AA} = 12,5 \text{ \AA}$$

Jeśli elektron znajduje się na wyższej orbicie ($n > 1$), atom jest w *stanie wzbudzonym*. Aby wzbudzić atom, czyli spowodować przejście elektronu na wyższą orbitę, trzeba mu dostarczyć odpowiednią energię. Może to być energia termiczna - atom otrzymuje energię potrzebną do wzbudzenia w trakcie zderzenia z innym atomem. Atom może też zostać wzbudzony przez pochłonięcie fotonu, którego energia odpowiada różnicy między energią stanu wzbudzonego, a energią stanu podstawowego. Stan wzbudzony nie trwa długo. Elektron powraca do stanu podstawowego w czasie rzędu 10^{-8} s. Elektron przeskakuje na niższe orbity, za każdym przeskokiem emitując foton.

i Wskazówka: Czy potrafisz przejść z jednego kąta pokoju do drugiego, tak aby nawet na moment nie znaleźć się w punktach między startem a metą? Oczywiście, to niemożliwe. Ale elektrony w atomie tak właśnie się zachowują! Gdy elektron przeskakuje z drugiej orbity na pierwszą, ani przez moment nie przebywa w pośrednich odległościach. świat w skali atomowej jest naprawdę zadziwiający!

Rysunek *Rysunek 2.30: Jak powstaje seria Balmera (i inne serie) w widmie wodoru?* na stronie 149 pokazuje schematycznie jak powstaje seria Balmera, i inne serie, w widmie wodoru.

Podczas przejść elektronów w atomie wodoru na drugą orbitę ($n = 2$) emitowane są fotony o długościach fal należących do widzialnego zakresu widma (seria Balmera). Gdy elektrony przeskakują na pierwszą orbitę ($n = 1$), emitowane jest promieniowanie leżące w nadfiolecie (seria Lymana). Przeskoki elektronów na orbitę trzecią ($n = 3$) powodują emisję fotonów o długościach fal z zakresu podczerwieni (seria



Paschena)

Rysunek 2.30: Jak powstaje seria Balmera (i inne serie) w widmie wodoru?

Poziomy energii atomu i widmo promieniowania - wyprowadzenie wzorów

W podrozdziale 2.3 *Widma promieniowania gazów* na stronie 137 stwierdziliśmy, że atom wodoru promieniuje fale światła tylko o wybranych częstotliwościach zgodnych ze wzorem (wzór 132 na stronie 139):

$$(\text{wzór 150}) \nu = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Bohr zapostulował, że częstotliwość ν fali elektromagnetycznej wynika z bilansu energii E elektronu w atomie:

$$(\text{wzór 151}) h\nu = E_n - E_{n'}$$

Oba wzory mają cechę wspólną częstotliwość ν . Wzór (wzór 150 na stronie 149) wyznacza doświadczalne wartości ν , zaś wzór (wzór 151 na stronie 149) wyznacza teoretyczne wartości ν .

Z doświadczalnego wzoru (wzór 150 na stronie 149) Bohr mógł wywnioskować jakiego kształtu wzór powinna mieć energia elektronu w atomie wodoru. Wystarczy przekształcić równanie (wzór 150 na stronie 149) następująco: pomnożyć obie strony przez h i rozbić prawą stronę równania na dwa wyrazy:

$$(\text{wzór 152}) h\nu = hR \frac{1}{n'} - hR \frac{1}{n}$$

Porównując ten wzór z (wzór 151 na stronie 149) otrzymamy, że energia elektronu w stanie n i n' atomie może być wyrażona wzorem:

$$(\text{wzór 153}) E_n = -hR\frac{1}{n}$$

$$(\text{wzór 154}) E_{n'} = -hR\frac{1}{n'}$$

Pokażemy teraz, jak z pierwszego postulatu Bohra wynika wzór na energie poziomów elektronowych w atomie wodoru i że wzór ten ma postać (wzór 153 na stronie 150). Elektron mający ujemny ładunek, $-e$, krąży wokół dodatniego jądra - protonu, o ładunku $+e$. Energia elektronu wynosi

$$(\text{wzór 155}) E_n = \frac{mv^2}{2} + U$$

gdzie U jest energią potencjalną elektronu w centralnym polu elektrostatycznym jądra:

$$(\text{wzór 156}) U = -k_0\frac{e^2}{r}$$

Kulombowska siła przyciągania elektronu do jądra jest siłą dośrodkową. Mamy stąd równanie

$$(\text{wzór 157}) k_0\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

zatem

$$(\text{wzór 158}) mv^2 = k_0\frac{e^2}{r}$$

Korzystając ze wzoru (wzór 155 na stronie 150), otrzymamy

$$(\text{wzór 159}) E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}k_0\frac{e^2}{r} = \frac{1}{2}|U|$$

Po uwzględnieniu wzoru (wzór 156 na stronie 150) mamy

$$(\text{wzór 160}) E_n = \frac{1}{2}|U| - |U| = -\frac{1}{2}|U| = -k_0\frac{e^2}{r}$$

Widzimy, że wystarczy tylko obliczyć wartość r , aby móc wyznaczyć energię E_n (gdyż wartości k_0 i e są znane). Korzystamy z pierwszego postulatu Bohra, podnosząc obie strony równości (wzór 136 na stronie 145) do kwadratu i wprowadzając oznaczenie $\hbar = \frac{h}{2\pi}$:

$$(\text{wzór 161}) m^2v^2r^2 = n^2\hbar^2$$

oraz przekształcamy równanie (wzór 158 na stronie 150) następująco:

$$(\text{wzór 162}) mv^2r = k_0e^2$$

Dzieląc obustronnie równanie (wzór 161 na stronie 150) przez (wzór 162 na stronie 150), wyeliminujemy v i otrzymamy:

$$(\text{wzór 163}) r = n^2\frac{\hbar^2}{k_0me^2}$$

Jak widać, model Bohra daje prostą odpowiedź na pytanie, jak duży jest atom wodoru. Podstawiając odpowiednie, znane wartości do wzoru (wzór 163 na stronie 150), dla $n = 1$ otrzymamy wartość promienia pierwszej orbity Bohra:

$$(\text{wzór 164}) r_1 = 0,5 \text{ \AA}$$

Wartość ta zgadza się dobrze z doświadczeniem.

Aby otrzymać ostateczny wzór na energię elektronu w atomie wodoru, wystarczy wyrażenie (*wzór 163* na stronie 150) podstawić do wzoru (*wzór 160* na stronie 150). Wówczas otrzymamy:

$$(\text{wzór 165}) E_n = - \frac{k_0^2 m e^4}{2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

albo $E_n = - \frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$, skorzystaliśmy tutaj z wzorów $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ oraz $k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$.

Widzimy, że teoria Bohra daje właściwy (pochodzący z doświadczenia) wzór na energię elektronu w atomie wodoru. Mało tego! porównanie wzoru (*wzór 165* na stronie 151) ze wzorem (*wzór 153* na stronie 150) pozwala na teoretyczne wyrażenie stałej Rydberga R (za pomocą znanych stałych fizycznych):

$$(\text{wzór 166}) R = - \frac{k_0^2 m e^4}{2 \hbar^3}$$

Obliczona wartość R - stałej Rydberga z powyższego wzoru zgadza się doskonale z wartością z najdokładniejszych pomiarów.

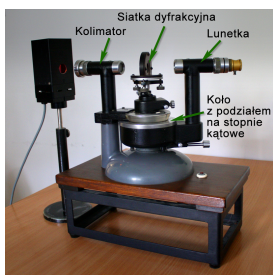
Okazuje się ponadto, że wyrażenie na energii poziomów elektronowych w atomie wodoru (*wzór 165* na stronie 151) jest dokładnie takie samo, jak otrzymywane we współczesnej teorii kwantowej.

Pytania i problemy

1. Przedstaw model atomu wodoru. Nazwij cząstki jakie wchodzi w jego skład, podaj jakie mają ładunki, i jaki jest stosunek ich mas. Jakimi siłami te cząstki działają na siebie?
2. Jak, według Bohra, porusza się elektron w atomie wodoru (po jakim torze?). Przedstaw pierwszy postulat Bohra.
3. Co oznacza stacjonarność dozwolonych orbit elektronu (drugi postulat Bohra). Jak by się zachowywał elektron w atomie, gdyby nie obowiązywał ten postulat?
4. Przedstaw trzeci postulat Bohra w postaci wzoru oraz wyjaśnij opisowo, jaki ma związek z widmem atomu wodoru.
5. Wyjaśnij, co to jest widmo promieniowania atomu. Jak powstają widma emisyjne i absorpcyjne?
6. Dlaczego najpierw została odkryta seria Balmera, a dopiero później inne serie widmowe? **Wskazówka:** weź pod uwagę następujący *Przykład*.

2.5 Doświadczenie - Spektrum

Do doświadczenia będzie potrzebny spektrometr (*Rysunek 2.31: Spektrometr szkolny* na stronie 151 i *Rysunek 2.32: Bieg promienia monochromatycznego w spektrometrze* na stronie 152).

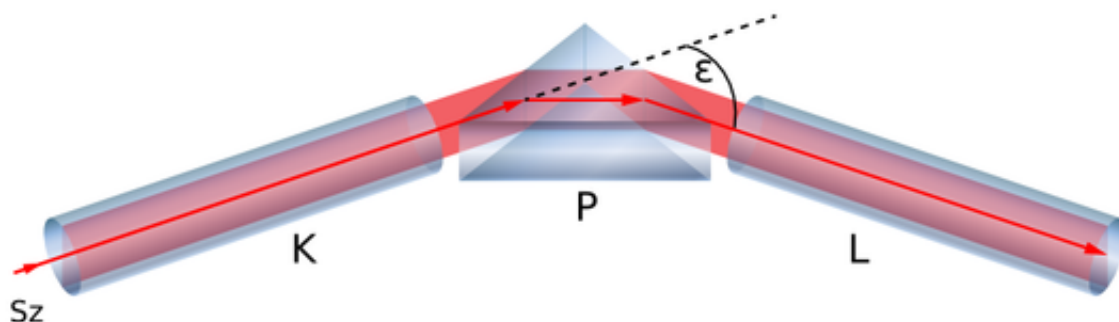


Rysunek 2.31: Spektrometr szkolny

Doświadczenie będziemy mogli wykonać, jednakże w skromniejszym zakresie, jeżeli zamiast spektrometru zastosujemy tylko siatkę dyfrakcyjną. Siatka dyfrakcyjna to układ równych, równoległych i jednakowo rozmieszczonych szczelin. Zwykle wykonana jest w postaci przezroczystej płytki z naniesioną serią nieprzezroczystych linii rozmieszczonych w małych odstępach od siebie - od kilkunastu linii na milimetr aż do tysiąca. Ponadto potrzebne będą rurki wyładowcze z różnymi gazami, np. z wodorem lub helem oraz świetlówki.

Jeżeli będziemy dysponować rurką wyładowczą z wodorem, to może uda nam się zaobserwować prążki widmowe serii Balmera. Jeżeli będziemy dysponować tylko, wspomnianymi wyżej, świetłówkami akwariowymi, to widma, które uzyskamy będą podobne do gazowych, gdyż będziemy mogli zaobserwować je w postaci układu kolorowych linii na tle widma ciągłego. Światło z tych świetłówek pochodzi bowiem głównie z luminoforu, którym pokryte są wewnętrzne ścianki świetłówek. Potrzebna będzie również żarówka wolframowa.

Promień pada na szczelinę Sz kolimatora K , po czym załamuje się w pryzmacie P i wpada do lunetki L , całkowity kąt odchylenia promienia wynosi



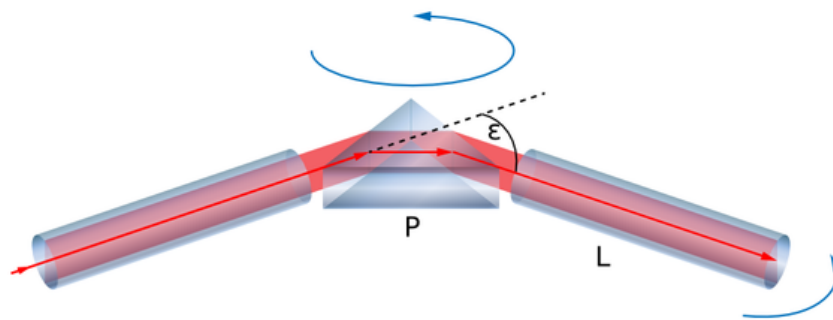
ε

Rysunek 2.32: Bieg promienia monochromatycznego w spektrometrze

Doświadczenie: Spektrum

Na stoliku spektrometru ustaw pryzmat. Zmieniając położenie katowe lunetki spektroskopu, ustaw ją tak, aby zaobserwować linie widmowe. Przedtem ustaw przed szczeliną kolimatora świecące źródło światła - kolejno: rurkę wyładowczą, świetłówkę akwariową i żarówkę z włóknem wolframowym.

Spektrometr pozwala na zmianę ustawienie pryzmatu na stoliku obrotowym. Najlepsze ustawienie uzyskasz wtedy, gdy kąty załamania promieni w pryzmacie będą minimalne. Aby ustawić taki minimalny kąt dla określonego prążka, należy powoli obracać pryzmat w takim kierunku, żeby obserwowana linia widmowa w lunecie była odchylana pod coraz to mniejszymi kątami (*Rysunek 2.33: Strzałkami w kolorze niebieskim pokazano kierunek obracania pryzmatu i lunetki w celu uzyskania minimalnego kąta odchylenia promienia w spektrometrze na stronie 153*).



Rysunek 2.33: Strzałkami w kolorze niebieskim pokazano kierunek obracania pryzmatu i lunetki w celu uzyskania minimalnego kąta odchylenia promienia w spektrometrze

W pewnym momencie linia widmowa zatrzyma się, po czym zacznie zawracać. Kąt załamania promienia w pryzmacie będzie minimalny w momencie zawracania linii. Wtedy i pozostałe linie też będą odchylane pod minimalnymi kątami

Zamiast pryzmatu można zastosować siatkę dyfrakcyjną, dzięki czemu można uzyskać szersze widmo z lepszą rozdzielczością linii widmowych.

Włącz kolejno poszczególne rurki wyładowcze, świetlówki i żarówkę wolframową. Umieść siatkę dyfrakcyjną blisko oka i obserwuj ich światło za jej pośrednictwem. Jeżeli masz spektrometr, obserwuj światło przez lunetkę spektrometru. Zmierz kąt odchylenia promienia dla każdego prążka widma określonego gazu.

W przypadku żarówki wolframowej otrzymasz widmo ciągłe - zmierz kąty odchylenia skrajnych promieni widma.

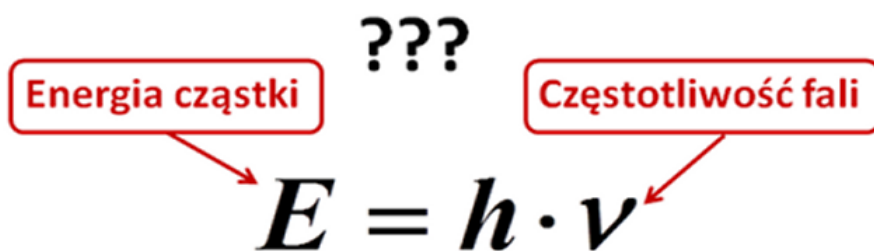
Wykonaj rysunki widm (jedne pod drugim), umieszczając na nich kolorowe linie w odpowiednich położeniach katowych.

Wyciągnij wnioski z przeprowadzonych doświadczeń, odpowiadając na pytania:

- Dlaczego widma gazów rozrzedzonych (w rurkach wyładowczych) są liniowe, a nie ciągłe?
- Dlaczego położenia linii widmowych różnych gazów różnią się od siebie?
- Dlaczego linie widmowe grupują się w przypadku świetlówki?
- Dlaczego widmo światła żarówki z włóknem wolframowym jest ciągłe?

2.6 Korpuskularno-falowa natura materii

Materia, która nas otacza, z której sami się składamy, wykazuje zadziwiające własności. Przyjrzyjmy się jeszcze raz wzorowi na energię fotonu: $E = h \cdot \nu$. Po lewej stronie mamy energię fotonu - cząstki światła. Po prawej stronie - częstotliwość fali elektromagnetycznej, jaką jest światło.



Odpowiedź jest zaskakująca. Foton to jednocześnie cząstka i fala. Światło w niektórych zjawiskach ukazuje swą naturę falową, na przykład ulega interferencji. W innych przypadkach zachowuje się jak zbiór cząstek, na przykład w zjawisku fotoelektrycznym

Rysunek 2.34: Czym więc jest foton? Cząstką czy falą?

! **Ważne:** *Interferencja* polega na nakładaniu się fal, które przeszły przez dwa (lub więcej) otwory. W wyniku tego nakładania się, w pewnych miejscach fale ulegają wzmocnieniu, w innych wygaszeniu. Na przykład, po przejściu światła przez siatkę dyfrakcyjną, składającą się z wielu drobnych szczelin, obserwujemy na ekranie na przemian jasne i ciemne prążki.

Foton łączy w sobie cechy zarówno falowe, jak i korpuskularne. Własność tę nazywamy *dualizmem falowo-korpuskularnym*.

! **Wskazówka:** Dwoistość natury światła charakteryzuje się bardzo ważną prawidłowością. Promieniowanie długofalowe (np. światło podczerwone) wykazuje wyraźniej cechy falowe, natomiast cechy korpuskularne - kwantowe - przejawiają się w jego wypadku w mniejszym stopniu. Wiele zjawisk optycznych - interferencję, dyfrakcję, polaryzację - teoria falowa tłumaczy całkowicie. Jeżeli będziemy przechodzić na skali długości fal elektromagnetycznych od fal dłuższych do krótszych, to falowe cechy światła będą się przejawiać coraz słabiej, ustępując miejsca bardziej wyraźnie przejawiającym się własnościom kwantowym. Własności falowe promieniowania krótkofalowego, na przykład rentgenowskiego, można wykazać jedynie w przypadku wykorzystania jako siatki dyfrakcyjnej sieci krystalicznej ciał stałych. Najkrótsze fale elektromagnetyczne, promienie γ , wykazują w zasadzie już tylko naturę kwantową - wykrywa się je za pomocą liczników. Uzyskanie dyfrakcji tych promieni jest bardzo trudne.

i **Wskazówka:** Podwójna, korpuskularno-falowa, natura światła wydaje się bardzo tajemnicza. Ale to nie wszystko! Okazuje się, że taką podwójną naturę ma cała otaczająca nas materia. Obiekty, które zawsze uważaliśmy za cząstki, jak na przykład elektrony, wykazują również naturę falową.

Na pomysł, dualizmu korpuskularno-falowego wpadł uczony francuski **Louis de Broglie** [wym. broj]. W 1924 roku postawił hipotezę, że nie tylko światło ma naturę dualistyczną, ale również takie obiekty materii, jak elektrony, protony, atomy, itd. Założył, że związek między długością fali materii a pędem jest taki sam, jak związek między długością fali elektromagnetycznej a pędem fotonu

$$(\text{ wzór 167 }) \lambda = \frac{h}{p}$$

gdzie p oznacza pęd cząstki. Każdej cząstce materialnej, poruszającej się z określoną prędkością, jest przyporządkowana fala materii. Jak wynika ze wzoru (*wzór 167* na stronie 154), długość tej fali jest odwrotnie proporcjonalna do pędu cząstki. Fala jest krótsza, gdy cząstka porusza się z większą prędkością.

® **Zamapiętać:** Fale materii de Broglie'a: Każdej cząstce materialnej, poruszającej się z określoną prędkością, jest przyporządkowana fala materii, której długość wynosi:

$$(\text{ wzór 168 }) \lambda = \frac{h}{p}$$

gdzie p jest pędem cząstki.

! **Wskazówka:** Obecnie, podobnie jak dla fotonów, *fale materii* mają interpretację statystyczną (probabilistyczną). Jednakże fale materii nie są falami elektromagnetycznymi, ale falami prawdopodobieństwa. Jest to prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w danym miejscu w przestrzeni. Sens dwoistości falowo-korpuskularnej zawiera się w tym, że cząstki materialne występują zawsze w

porcjach, o określonej masie, pędzie i energii, ale ruchem ich rządzą probabilistyczne prawa o charakterze falowym. Oznacza to, że nie mamy pewności, gdzie cząstka trafi, w jakie miejsce, możemy tylko wyznaczyć prawdopodobieństwo znalezienia się jej w określonych miejscach. Należy wyraźnie powiedzieć, że cząstki takie, jak np. elektrony nie poruszają się po określonych torach. W przypadku cząstek makroskopowych (np. piłki, kulki stalowej, czy samolotu lub samochodu) zawsze możemy określić tory, po których się poruszają.

Obecnie dysponujemy wynikami wielu doświadczeń wykazujących, że dualizm falowo-korpuskularny jest zjawiskiem powszechnym. Interferencję wykazują nie tylko elektrony, ale dowolne cząstki, jak neutrony, protony, cząstki α , a nawet całe atomy i cząsteczki chemiczne.

Falowe własności mają wszystkie obiekty. Dlaczego więc nie obserwujemy tych własności w życiu codziennym? Popatrzmy na wzór na długość fali materii ([wzór 167](#) na stronie 154). W liczniku mamy stałą Plancka, bardzo małą liczbę rzędu 10^{-34} (zapisaną w jednostkach SI - czyli w skali makroskopowej). W mianowniku jest pęd ciała, czyli iloczyn masy m i prędkości v ($p = mv$). Długość fali materii dla ciała makroskopowego, czyli takiego, które możemy bezpośrednio obserwować, jest bardzo, bardzo mała. Aby obserwować zjawiska typowe dla fal, jak interferencja, trzeba dysponować szczelinami o rozmiarach podobnych do długości fali. Oczywiście tak małe szczeliny w ogóle nie istnieją. Dlatego nie obserwujemy falowych własności materii w świecie makroskopowym.

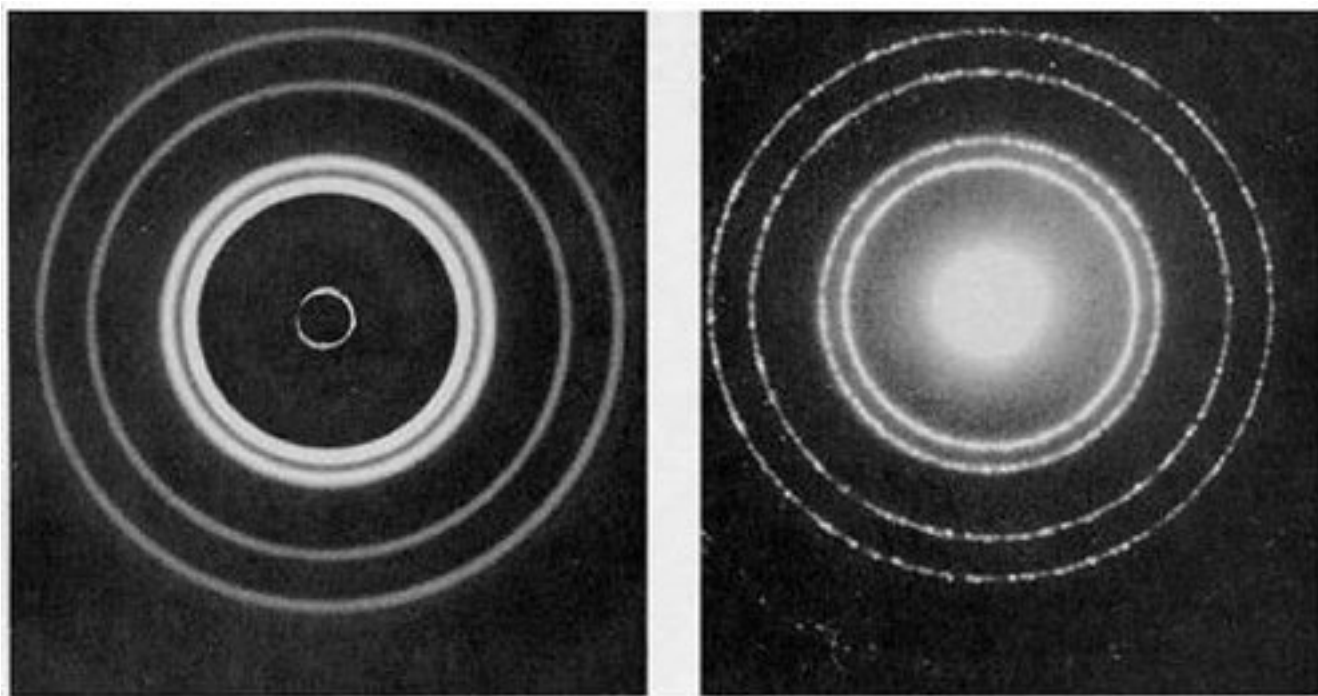
Przykład: Długość fali materii pocisku

Jaka jest długość λ - fali materii pocisku karabinowego o masie $m = 10\text{g} = 10^{-2}\text{kg}$ lecącego z prędkością $v = 1000\text{m/s}$?

Odpowiedź: Zgodnie ze wzorem ([wzór 167](#) na stronie 154) mamy

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}\text{Js}}{10^{-2}\text{kg} \cdot 10^3\text{m/s}} = 6,6 \cdot 10^{-35}\text{m}$$

Widzimy, że długość fali de Broglie'a pocisku jest dużo, dużo mniejsza od rozmiarów jądra atomowego ($\sim 10^{-14}\text{m}$). Nie jest możliwe zbudować układ o tak małych szczelinach.



Wiązka elektronów przepuszczona przez folię aluminiową tworzy obraz interferencyjny (z prawej) podobnie jak promieniowanie rentgenowskie (z lewej)

Rysunek 2.35: Dowód na falowy charakter elektronów

2.7 Atomowe orbitale elektronowe - bardziej zaawansowane wyobrażenie atomu

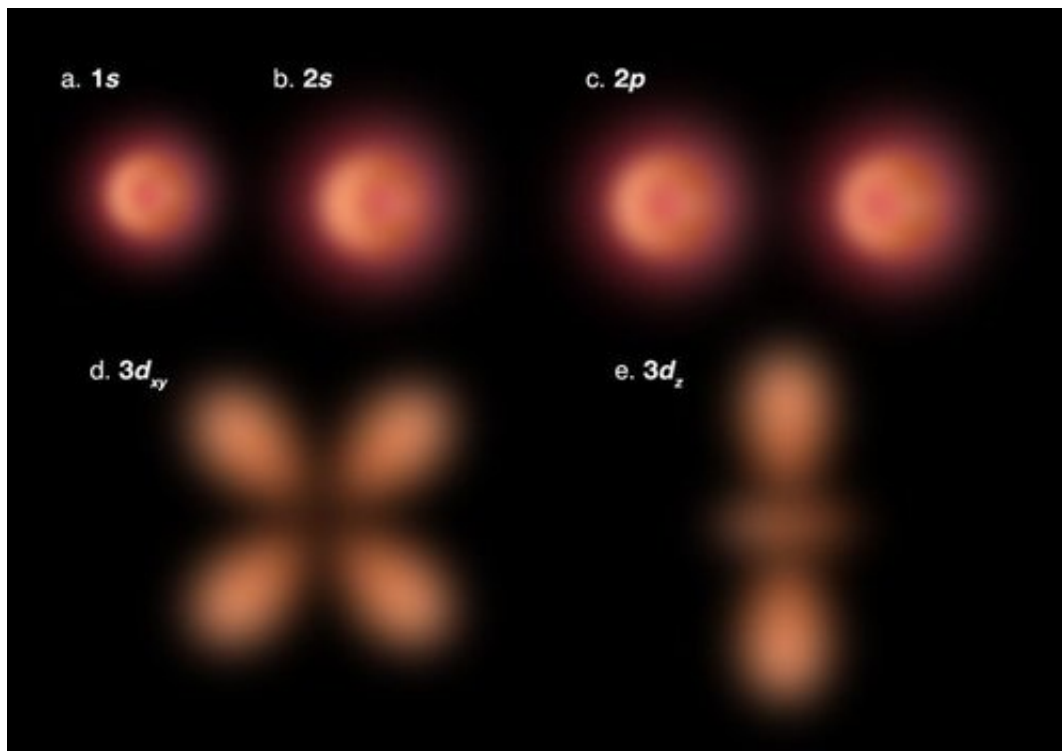


Wskazówka:

W modelu atomu Bohra elektron porusza się po orbicie kołowej, czyli torze o określonym kształcie. Jednak w rzeczywistości elektron nie porusza się po określonym torze. Obecnie wiemy, że model Bohra tylko w przybliżeniu zgadza się z rzeczywistością. Może to zabrzmieć paradoksalnie, ale dokładniejszym modelem atomu jest taki, w którym elektrony nie poruszają się po orbitach, ale przebywają w pewnych miejscach z określonych prawdopodobieństwem.

Poznamy teraz prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w określonych miejscach w atomie. Te rozkłady prawdopodobieństwa nazwano *atomowymi orbitalami elektronowymi*. Nazwa "orbital elektronowy" odzwierciedla pokrewieństwo między przybliżonym obrazem ruchu elektronu po orbicie z rzeczywistym rozkładem prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w atomie. Pochodzą one z dokładnych obliczeń fizyki kwantowej. Będziemy mogli wyobrazić sobie, "jak wygląda atom" w różnych stanach kwantowych. Zastosowaliśmy tutaj cudzysłów, gdyż tak naprawdę nie jesteśmy w stanie zobaczyć atomu. Możemy tylko wyobrazić sobie rozkład prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w przestrzeni, co jest jak gdyby rozmytym obrazem atomu.

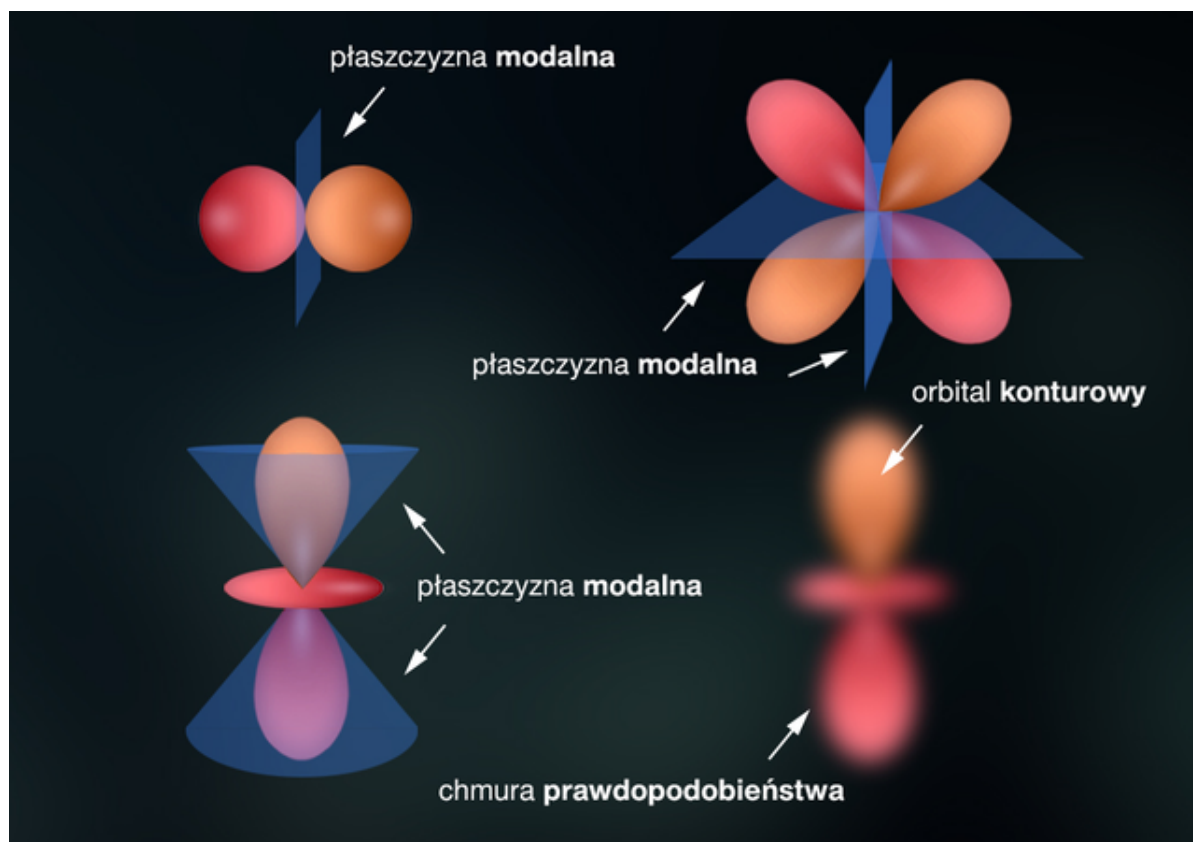
Orbitale elektronowe są rozłożone w przestrzeni trójwymiarowej. W związku z tym rozkład prawdopodobieństwa znalezienia elektronu jest rozkładem przestrzennym, który można sobie wyobrazić jako "chmurę prawdopodobieństwa". Zdjęcia na [Rysunek 2.36: Zdjęcia chmur prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w niektórych stanach kwantowych atomu wodoru](#) na stronie 157 pokazują rozkład przestrzenny prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w różnych stanach kwantowych. Dają one pojęcie o tym, jak wyglądałby atom wodoru, gdyby rozkłady prawdopodobieństwa znalezienia elektronu były widzialne. Rozkłady te w przestrzeni są wyobrażone w postaci tzw. chmur elektronowych. Nie należy sobie oczywiście wyobrażać, że elektron w atomie jest rozmyty w przestrzeni. Zdjęcia te przedstawiają jedynie przestrzenne rozkłady prawdopodobieństwa.



Obrazy są rozmyte, ponieważ rozmyte są elektronowe chmury prawdopodobieństwa

Rysunek 2.36: Zdjęcia chmur prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w niektórych stanach kwantowych atomu wodoru

Innym sposobem przedstawienia rozkładu prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w przestrzeni w różnych orbitalach elektronowych jest konstruowanie tzw. *konturów orbitali*, a więc powierzchni, na których występuje ustalone jednakowe prawdopodobieństwo znalezienia elektronu. Przykłady konturów orbitali elektronowych atomu wodoru przedstawia [Rysunek 2.37: Kontury orbitali elektronowych atomu wodoru](#) na stronie 157 (oznaczenia konturów za pomocą symboli s , p_x , d_{xy} są związane z nazwami stanów kwantowych, których nie podajemy). Na rysunkach przedstawiono również *powierzchnie nodalne* (zaciemnione), tzn. powierzchnie, na których prawdopodobieństwo znalezienia elektronu jest równe zero. Są więc to miejsca, gdzie elektron nie może przebywać. Są one rozmieszczone na płaszczyznach lub powierzchniach zakrzywionych, np. w postaci stożka.



Są to rysunki powierzchni o jednakowym prawdopodobieństwie znalezienia elektronu. Przedstawiono również powierzchnie nodalne, tzn. powierzchnie, na których prawdopodobieństwo znalezienia elektronu jest równe zero. Na rysunku d) pokazano usytuowanie konturu w chmurze prawdopodobieństwa orbitalu dla stanu $3d_z$

Rysunek 2.37: Kontury orbitali elektronowych atomu wodoru

Przedstawione wyżej chmury prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w atomie wodoru nie są wszędzie jednakowej gęstości. ścisłe obliczenia wykazują, że te gęstości prawdopodobieństwa mają maksima w określonych odległościach od jądra.

Okazuje się, że odległość od jądra głównego maksimum gęstości prawdopodobieństwa jest równa dokładnie wartości promienia orbity Bohra w określonym stanie. Widzimy ponownie na czym między innymi polega przybliżony charakter modelu Bohra. W tym modelu elektron miał ograniczoną możliwość poruszania się tylko po płaskiej orbicie w miejscu, gdzie w rzeczywistości występuje tylko maksimum przestrzennie rozłożonego prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w atomie.

Obliczenia wykazują, że to maksimum prawdopodobieństwa oddala się od jądra wraz ze wzrostem energii elektronu, a to oznacza, że atom staje się większy w wyższych stanach energetycznych (podobnie jak to ma miejsce z orbitami Bohra).

Charakterystyczną cechą kwantową jest także występowanie miejsc zerowego prawdopodobieństwa znalezienia elektronu - elektron w tych miejscach nie może przebywać.

Z III postulatu Bohra ($h\nu = E_n - E_k$) można było otrzymać wzór na częstotliwość fali wypromieniowanej przez atom, podczas przejścia elektronu z poziomu wyższego E_n na poziom niższy E_k

$$(\text{wzór 169}) \nu = \frac{E_n - E_k}{h}$$

Wzór ten wynika z zasady zachowania energii podczas promieniowania atomu. Jednak model Bohra nie wyjaśniał mechanizmu tego zjawiska. Jak wiadomo, warunkiem koniecznym do emisji fali są drgania ładunków elektrycznych. Drgania ładunków elektrycznych prowadzą do zmian pola elektromagnetycznego, które rozchodzi się w przestrzeni w postaci fali. Częstotliwość tej fali jest równa częstotliwości drgań ładunku.

Model czysto kwantowy wyjaśnia mechanizm promieniowania fal przez atom. Z modelu tego wynika, że podczas promieniowania przy przejściu elektronu między wspomnianymi poziomami energetycznymi chmura elektronowa doznaje drgań (pulsuje). Częstotliwość tych drgań odpowiada dokładnie wartości określonej wzorem ([wzór 169](#) na stronie 158). Skutkiem drgań chmury elektronowej są zmiany pola elektromagnetycznego, które w postaci ciągów falowych - fotonów - są emitowane w przestrzeń.

Rozdział

3

Fizyka jądrowa

Podrozdziały:

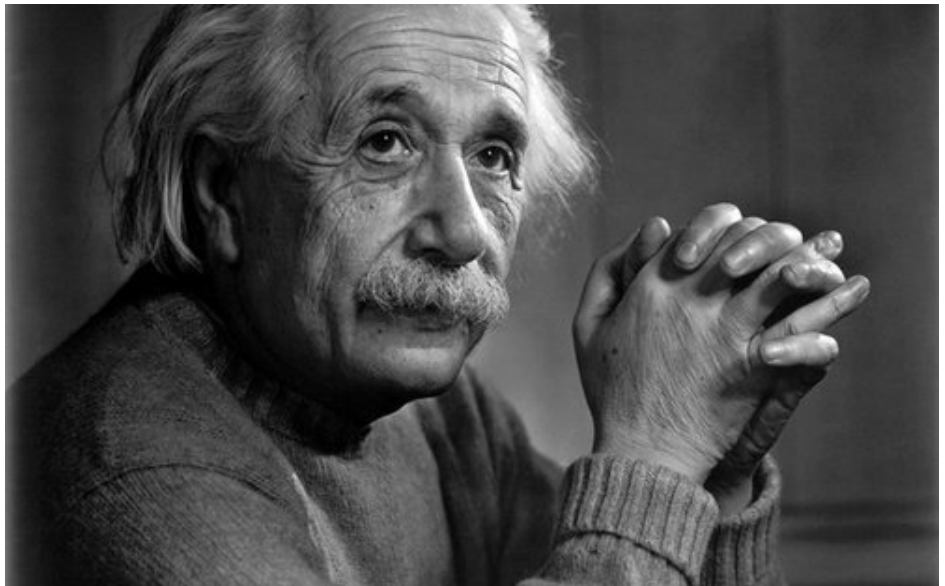
- [3.1 Miejsce jądra atomowego w strukturze materii](#)
- [3.2 Własności jąder atomowych](#)
- [3.3 Przemiany jądrowe](#)
- [3.4 Prawo zaniku promieniotwórczego](#)
- [3.5 Doświadczenia "Radiacja"](#)
- [3.6 Reakcje jądrowe](#)
- [3.7 Reakcje rozszczepiania jąder ciężkich. Korzyści i zagrożenia energetyki jądrowej](#)
- [3.8 Reakcje syntezy jąder lekkich. Gwiazdy, bomba wodorowa, reaktor termojądrowy](#)
- [3.9 Oddziaływanie promieniowania jądrowego z materią; jego detekcja i jego wpływ na organizmy żywe](#)
- [3.10 Cząstki elementarne \(materiał nadobowiązkowy\)](#)

Po wpisaniu w wyszukiwarkę internetową (np. *Google*) wzoru (*wzór 170* na stronie 159) można zobaczyć mnóstwo obrazków podobnych do tych na *Rysunek 3.1: Albert Einstein jest autorem najśłynniejszego wzoru świata* na stronie 159. Wszyscy wiedzą, że autorem tego wzoru jest **Albert Einstein**. Niestety, nie wszyscy wiedzą, co ten wzór naprawdę oznacza.

$$(\text{wzór 170}) E = mc^2$$

E – to energia, m – masa, c – prędkość światła w próżni

⚠ **Ważne:** $c = 299\,792\,458$ m/s – jest to uniwersalna stała fizyczna, będąca wzorcem dla innych wielkości. Podana tu wartość jest wartością dokładną. W praktyce często używa się wartości przybliżonej: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.



Rysunek 3.1: Albert Einstein jest autorem najśłynniejszego wzoru świata



Wzór ([wzór 170](#) na stronie 159) oznacza równoważność masy i energii, a prędkość światła podniesiona do kwadratu jest współczynnikiem przeliczenia masy na energię. Okazuje się, że ten jeden, zdawałoby się prosty, wzór jest bardzo twórczy. Można z niego od razu obliczyć energię wewnętrzną ciała, jeżeli znana jest jego masa.

Obserwujemy **spoczywające** ciało o masie m (wtedy jego masa bywa niekiedy nazywana masą „spoczynkową” ciała lub masą „własną” ciała). W takiej sytuacji masa bywa oznaczana symbolem m_0 , a wzór ([wzór 170](#) na stronie 159) jest zapisywany jako:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$

E_0 nazywana jest **energią spoczynkową** ciała. Określa ona całkowitą energię wewnętrzną nieruchomego ciała.

Wzór ([wzór 170](#) na stronie 159) stosowany jest także do opisu procesów, w których pojawia się tzw. defekt masy, o czym będzie mowa w rozdziale [3.2 Własności jąder atomowych](#) na stronie 177. Wtedy często zapisujemy go w postaci:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

W fizyce jądrowej (także w fizyce atomowej) energię wyrażamy nie w dżulach, lecz w *elektronowoltach*, ozn. *eV*. Wielokrotnościami tej jednostki są: kiloelektronowolt (ozn. *keV*, 1 keV = 1 000 eV) oraz megaelektronowolt (ozn. *MeV*, 1 MeV = 1 000 keV = 1 000 000 eV = 10^6 eV).



Ważne: Jeden *eV*, to energia, jaką nabywa elektron przyspieszony w polu elektrycznym wytworzonym różnicą potencjałów 1V. Jednostka ta jest bardzo wygodna w praktyce, gdy opisujemy energie w procesach dotyczących atomów i cząsteczek, a także jąder atomowych i cząstek elementarnych.

Elektronowolty można przeliczyć na znane z mechaniki i stosowane do opisu zjawisk makroskopowych jednostki energii (dżule) zgodnie ze wzorem:

$$(\text{wzór 171}) \quad 1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Korzystając z zależności ([wzór 170](#) na stronie 159) masę cząstek w fizyce jądrowej wyraża się zwykle w jednostkach energii (najchętniej w eV), a nie w kilogramach. Zilustrujemy to przykładem.

Przykład: Energia spoczynkowa elektronu

Masa elektronu wynosi: $m_{0e} = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg. Ile będzie równa odpowiadająca tej masie energia spoczynkowa, E_{0e} ?

Rozwiązanie: Korzystamy z wzoru ([wzór 170](#) na stronie 159):

(wzór 172)

$$E_{0e} = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 81,9 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

Pamiętając, że 1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J, otrzymujemy

(wzór 173)

$$E_{0e} = (81,9 \cdot 10^{-15} \text{ J}) / (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) = 5,11 \cdot 10^5 \text{ eV} = 0,511 \text{ MeV}$$

Energia spoczynkowa elektronu wynosi więc: 0,511 MeV. Mówimy w skrócie, że **masa** elektronu wynosi 0,511 MeV.

W podobny sposób będziemy wyrażać także energie spoczynkowe innych cząstek, a do wzoru ([wzór 170](#) na stronie 159) będziemy jeszcze wielokrotnie powracać.

Pytania i problemy

1. Podaj interpretację fizyczną wzoru ([wzór 170](#) na stronie 159).
2. Energia spoczynkowa protonu wynosi 933 MeV. Wyraż tę energię w dżulach. Oblicz masę spoczynkową protonu.

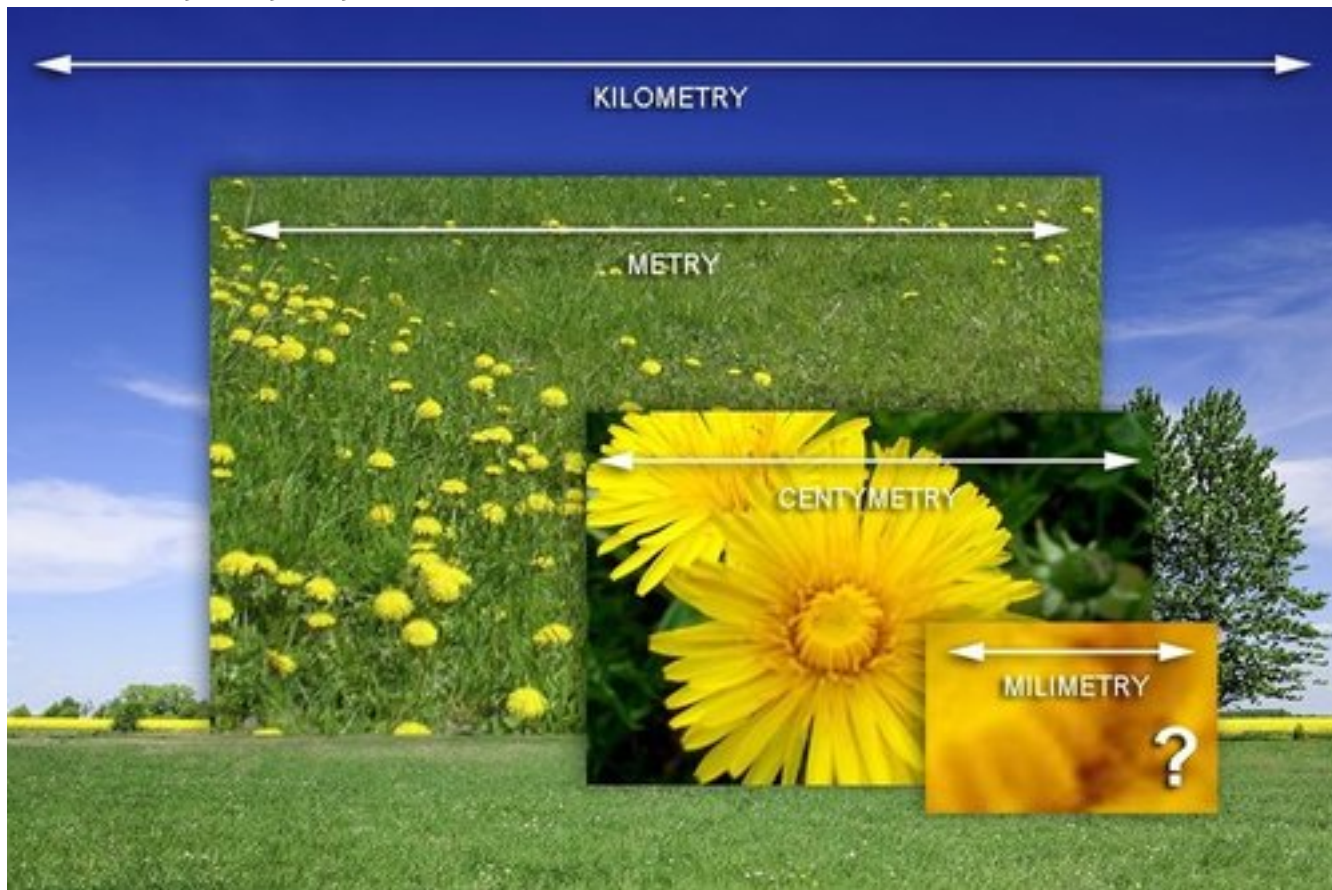
3. Rodzina przetwarza w swoim mieszkaniu średnio 250 kWh energii elektrycznej miesięcznie. Rachunek za tę usługę jest drukowany na kartce formatu A4, o tzw. gramaturze 80 g/m^2 . Zbadaj, czy całkowita zamiana masy tej kartki papieru na energię pokryłaby miesięczne zapotrzebowanie tej rodziny.

3.1 Miejsce jądra atomowego w strukturze materii

Świat jest piękny i ciekawy, poraża swą różnorodnością, a jednocześnie prostotą praw, które rządzą całą przyrodą. Wśród wszystkiego, co na świecie istnieje, człowiek wyróżnia się tym, że ma świadomość swego istnienia i stara się zrozumieć strukturę materii, której sam jest częścią.

Jeśli więc podziwiasz górskie krajobrazy, zachwyca Cię tęcza, uśmiechasz się do bajecznie kolorowych kwiatów, to wiedz, że dostrzegasz tylko ostatni element piękna, które odnajdziesz wchodząc w świat struktury atomów i poznając prawa jakimi kierują się elementarne składniki materii, aby tworzyć kolejne stopnie tej struktury prowadzące ostatecznie do tego, co podziwiasz swymi zmysłami.

Co na świecie jest najmniejsze?



Rysunek 3.2: A gdyby tak powiększać coraz bardziej i bardziej?

Można też zapytać inaczej. Czy istnieją takie najmniejsze cząstki, które już z niczego mniejszego się nie składają? Nazwiemy je *cząstkami elementarnymi*.

Starożytny filozof – **Demokryt** z Abdery uważał, że wszystko na świecie składa się z *atomów*, które są wieczne i niepodzielne (Rysunek 3.3: *Demokryt z Abdery, starożytny uczony, uważał, że wszystko składa się z atomów* na stronie 164).



Rysunek 3.3: Demokryt z Abdery, starożytny uczony, uważał, że wszystko składa się z atomów

Poglądy Demokryta zyskały pełne uznanie dopiero w XIX wieku. Prace Johna Daltona oraz wielu innych wybitnych fizyków i chemików doprowadziły do sformułowania tzw. kinetyczno-molekularnej teorii materii, o której mowa była w gimnazjum. Zakładając istnienie atomów, teoria ta wyjaśniała wiele zjawisk, w tym właściwości materii w różnych stanach skupienia, reakcje chemiczne, zjawiska cieplne, a także niektóre zjawiska elektryczne. Ogromnym sukcesem było utworzenie układu okresowego pierwiastków - tzw. tablicy Mendelejewa, o której wspomnimy w dalszej części tego paragrafu.

Jak to jednak w fizyce często bywa, wraz z ugruntowaniem się przekonania o tym, że materia składa się z atomów, pojawiło się pytanie: czy atomy naprawdę są niepodzielne? Przecież wiemy o istnieniu ładunków elektrycznych, które są składnikami atomów!

Doświadczenie: Elektryzowanie

Elektryzowanie, to rozdzielanie ładunków elektrycznych. Wykonaj prosty eksperyment pokazany na fotografii (*Rysunek 3.4: Ilustracja doświadczenia Elektryzowanie* na stronie 165). Weź najprostszy długopis, potrzyj go chusteczką i zobacz, że przyciąga skrawki papieru. Przyciąga, bo rozdzieliłeś ładunki elektryczne, a ładunki różnoimienne przyciągają się.



Rysunek 3.4: Ilustracja doświadczenia Elektryzowanie

Elektryzowanie przez indukcję

Rysunek 3.5: Animacja**Ewolucja poglądów na strukturę materii w XIX i XX wieku**

Skoro ładunki elektryczne – składniki atomów – można rozdzielać, to atom musi być podzielny! Wiemy, że ładunki elektryczne są dodatnie i ujemne. Ale jak one są rozmieszczone w atomie? Na początku XX wieku proponowano kilka modeli struktury atomu. Wszystkie one musiały uwzględniać znane w owym czasie właściwości atomów. Przypomnijmy je tutaj pokrótce.

- **Rozmiary atomu** szacowano na nieco ponad 10^{-10} m. Ciekawostką jest tu fakt, że rozmiary atomów różnych pierwiastków są do siebie zbliżone.
Ziemia ma średnicę ok. 12 700 km = $1,27 \cdot 10^7$ m, ziarnko maku ma średnicę ok.
1 mm = $1 \cdot 10^{-3}$ m, zaś atom ma średnicę ok. $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m. Gdyby ziarnko maku

powiększać tak, że miałyby rozmiary kuli ziemskiej, to atom miałby rozmiary ziarnka

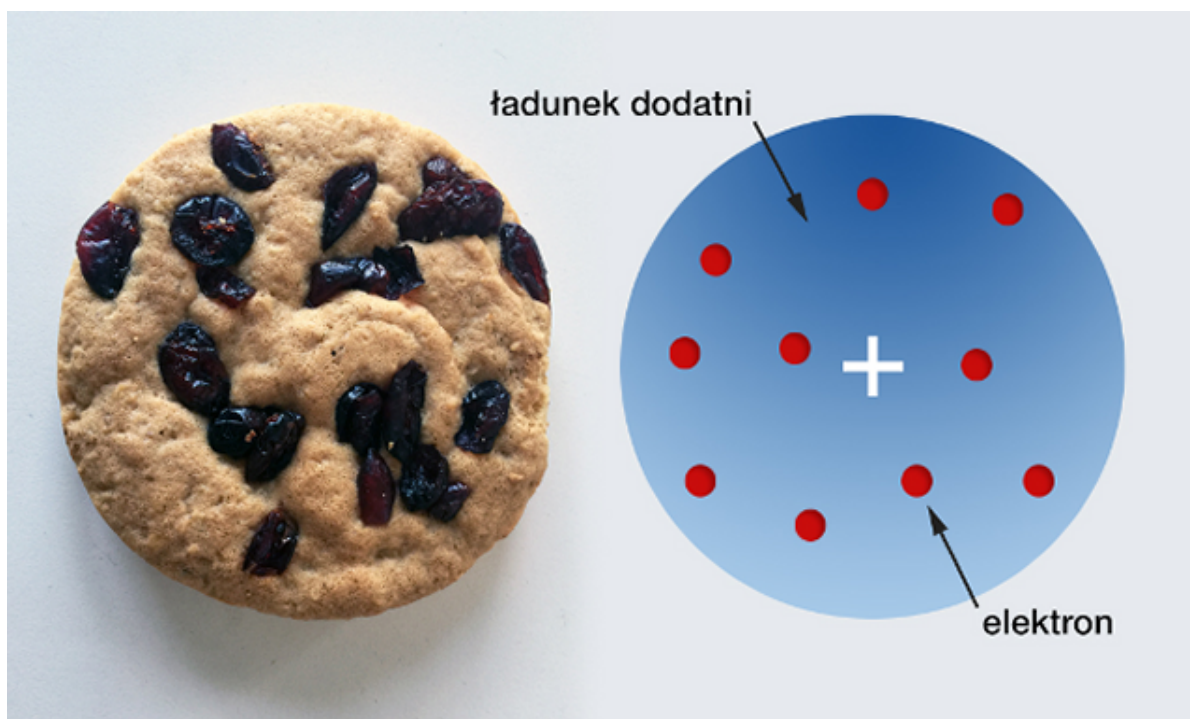


maku

Rysunek 3.6: Skala porównawcza rozmiarów atomu

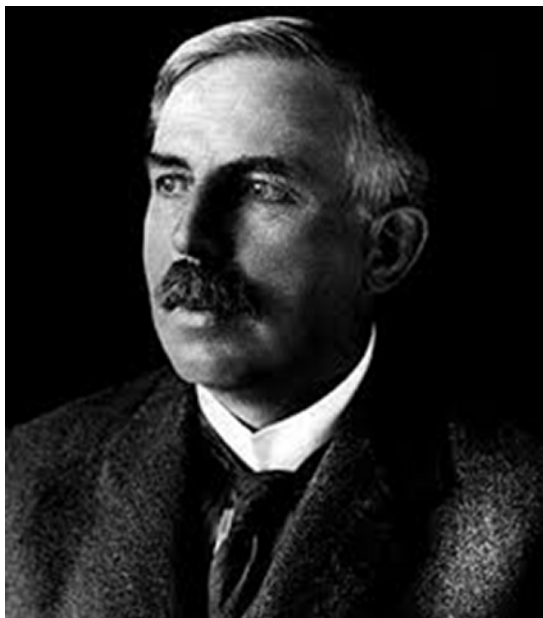
- **Masy atomów są różne:** od ok. 10^{-27} kg dla atomu wodoru do ponad 10^{-25} kg dla atomów pierwiastków najcięższych.
- **W skład każdego atomu wchodzi elektrony** o masach znacznie mniejszych od masy atomu oraz o ładunku ujemnym.
- **Atomy są elektrycznie obojętne.** Znana była możliwość **jonizowania** atomu, czyli pozbawiania go (ewentualnie przyłączanie do niego) jednego lub kilku elektronów.
- **Atomy nie pozbywają się** (ani nie przyłączają) **ładunku dodatniego**. Nie stwierdzono istnienia procesów, w których ładunki dodatnie byłyby wymieniane między atomami.

Podstawowym problemem do rozstrzygnięcia była kwestia natury i rozłożenia ładunku dodatniego w atomie. Jedno z wyjaśnień podał **Joseph J. Thomson**, którego propozycję nazwano żartobliwie „modelem ciasta z rodzynkami” (*Rysunek 3.7: Model atomu Thomsona i jego kulinarna analogia* na stronie 167).



Rysunek 3.7: Model atomu Thomsona i jego kulinarna analogia

W modelu Thomsona ładunek dodatni stanowi praktycznie całą masę atomu i jest rozłożony w całej jego objętości. We wnętrzu tego ładunku, jak rodzynki w cieście, rozmieszczone są ujemnie naładowane elektrony. Był to model bardzo przyzwoity - wyjaśniał on niemal wszystkie znane ówczesnie właściwości atomów. Okazał się jednak być niezgodny z wynikami późniejszych eksperymentów i musiał przez to przejść do historii.

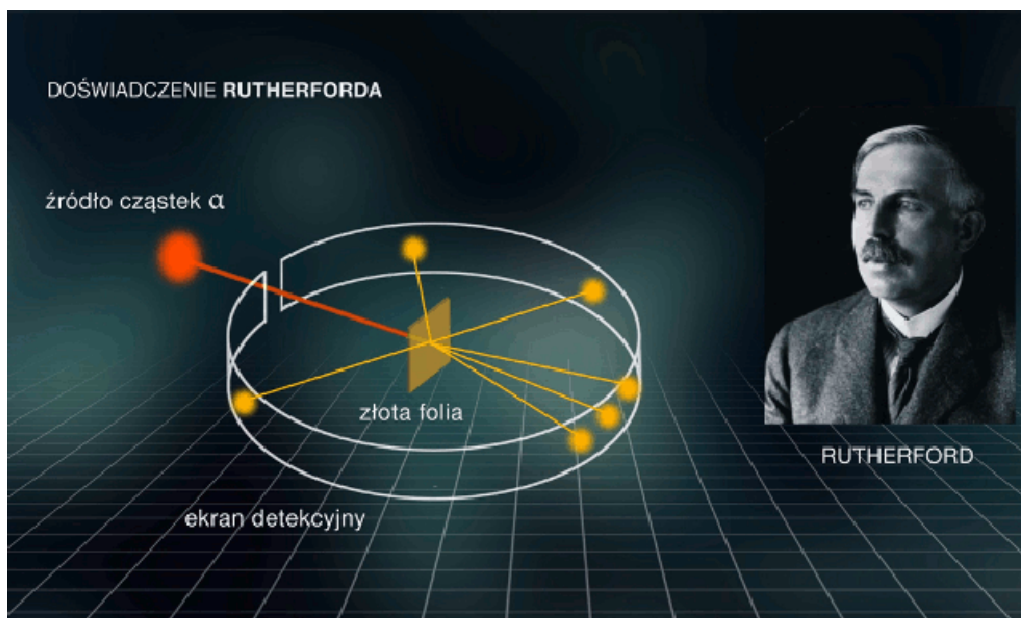


Rysunek 3.8: Ernest Rutherford

Angielski fizyk Ernest Rutherford chciał w pierwszych latach XX wieku poznać bliżej strukturę atomu. Wraz ze swymi współpracownikami: Geigerem i Marsdenem „bombardował” cienką folię ze złota (o grubości 0,0004 mm) cząstkami α z odkrytego przed kilkoma laty przez małżonków Curie źródła radu. Obserwowali błyski świetlne w detektorach ustawionych dookoła miejsca uderzenia cząstek α w folię (*Rysunek 3.9: Schemat doświadczenia*

Rutherforda na stronie 168). Wiedzano już wówczas, że cząstki α mają masę dużo większą niż masa elektronu, ale mniejszą od masy pojedynczego atomu złota.

❗ **Ważne:** Cząstka α – tak nazywamy układ składający się z dwóch protonów i dwóch neutronów, czyli jądro helu.

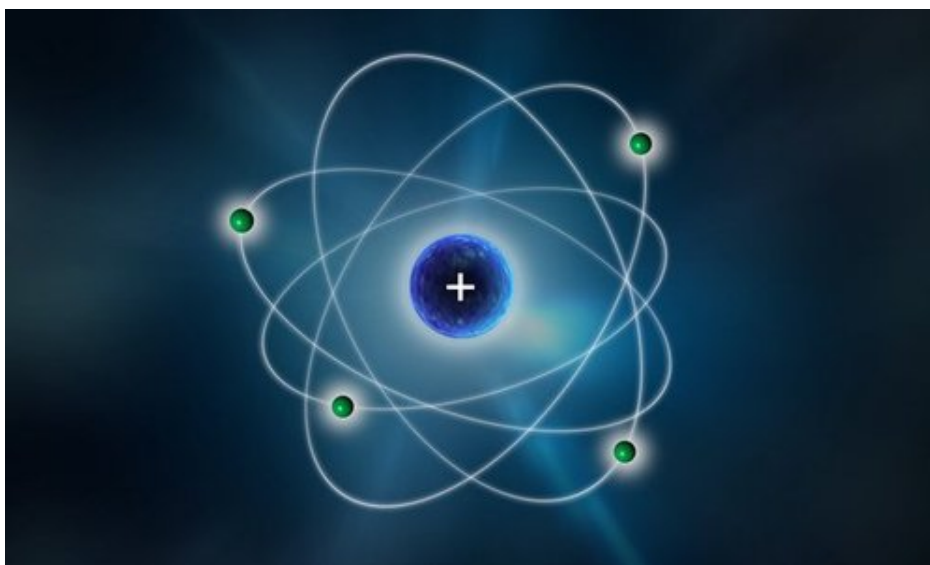


Rysunek 3.9: Schemat doświadczenia Rutherforda

Cząstki α padały na folię ze złota, która je rozpraszała pod różnymi kątami, także w kierunku do tyłu. Choć rozproszenia do tyłu zdarzały się bardzo rzadko (jeden raz na 20 000 rozproszeń do przodu), było to sprzeczne z modelem Thomsona, bowiem w tak luźnej strukturze jego atomu, cząstki α nie miały od czego się odbijać i rozproszeń do tyłu w ogóle być nie powinno.

i **Wskazówka:** Wspomina się, że Rutherford zdumiony tym, że cząstki alfa rozpraszają się do tyłu opowiadał: „*To było tak, jakbyś wystrzelił piętnastocalowy pocisk do kawałka bibułki, a ten pocisk odbił się od bibułki i uderzył w ciebie*”. Źródło: A. K. Wróblewski, Historia Fizyki, PWN, Warszawa, 2006

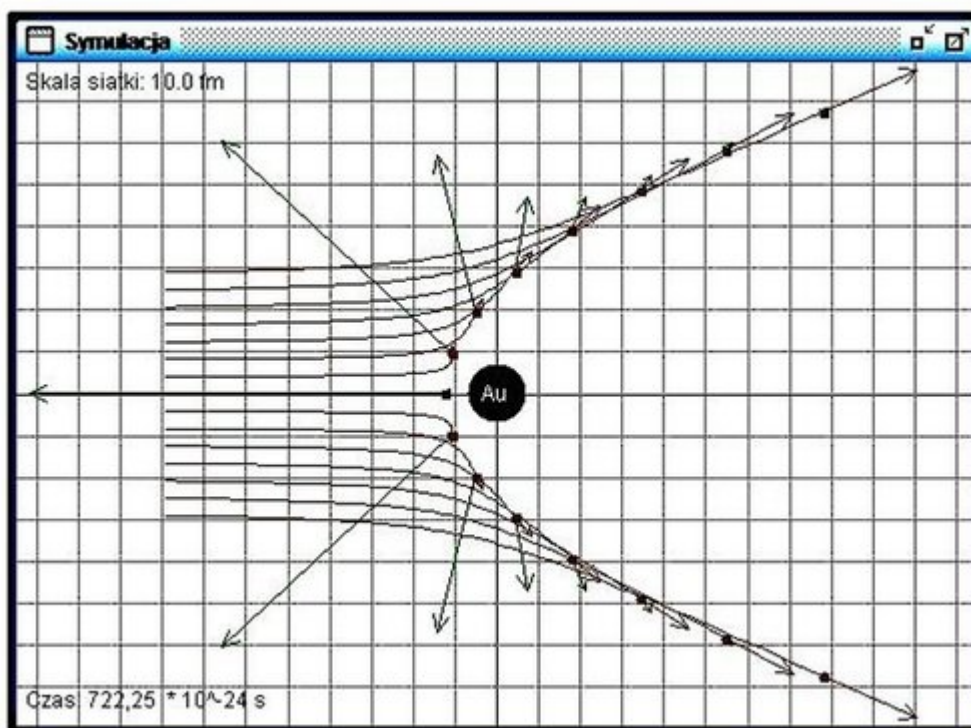
Rutherford zaproponował więc model, w którym prawie cała masa atomu skupiona jest w bardzo małym obiekcie, znajdującym się w centrum atomu. Elektrony natomiast krążą na zewnątrz, na podobieństwo planet krążących wokół Słońca.



Ten rysunek nie zachowuje skali. Gdyby atom był wielkości takiej, jak na rysunku (kilka centymetrów), to jądro atomowe byłoby wielkości kilku tysięcznych części milimetra

Rysunek 3.10: Atom Rutherforda

Dla sprawdzenia tego założenia Rutherford wykonał obliczenia zakładając, że centralny obiekt działa na cząstkę α siłą odpychania elektrostatycznego. Pod wpływem tej siły torów cząstek odchylają się od pierwotnego kierunku (*Rysunek 3.11: Cząstki α są odchylane od pierwotnego kierunku ruchu tym bardziej, im przelatują bliżej jądra* na stronie 169). Kąt odchylenia jest tym większy, im bliżej obiektu przelatuje cząstka. Nadlatująca na wprost cząstka zmienia całkowicie kierunek swego lotu i wraca – jest odbijana do tyłu. Wyniki obliczeń były zgodne z rezultatami pomiarów. Wyniki swych badań Rutherford opublikował w 1911 roku.



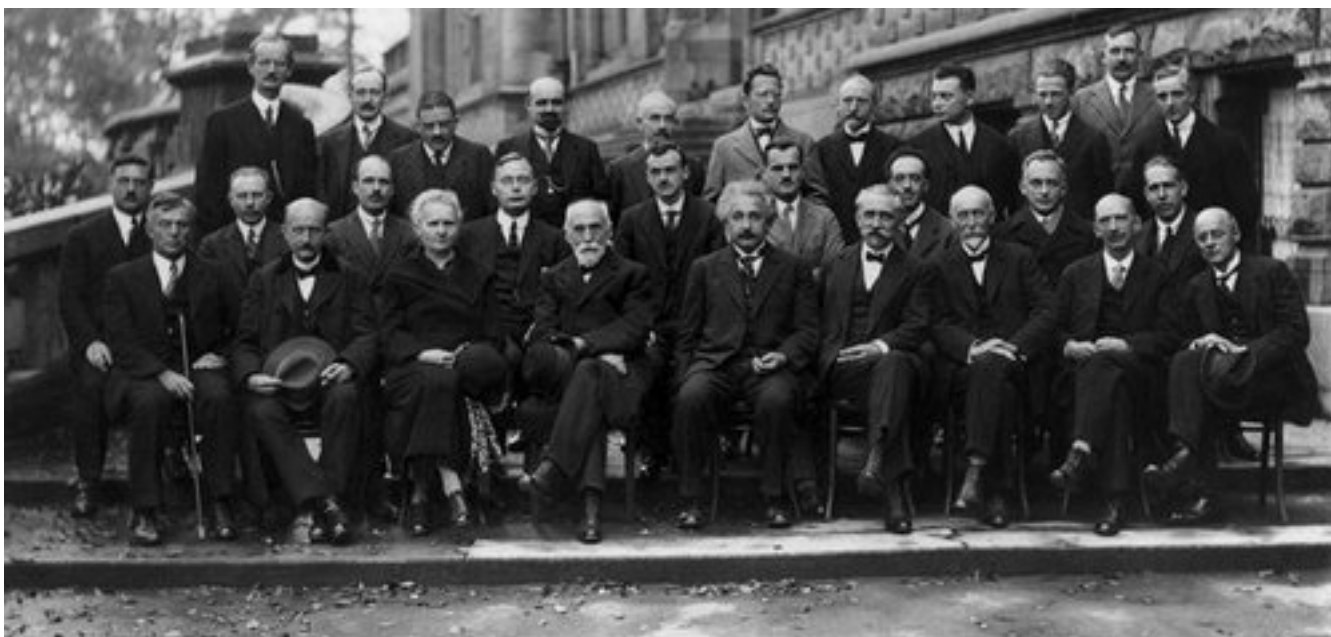
Rysunek 3.11: Cząstki α są odchylane od pierwotnego kierunku ruchu tym bardziej, im przelatują bliżej jądra

Dodatkowo naładowany obiekt o bardzo małych rozmiarach, ale skupiający prawie całą masę atomu nazwano *jądrem atomowym*. Jądro atomowe – element składowy struktury atomu – znajduje się w jego centrum i skupia ponad 99,9% jego masy. Rozmiary jądra są ok. 10 000 razy mniejsze niż rozmiary atomu. Gęstość materii jądrowej jest ok. 10^{13} razy większa niż gęstość materii zbudowanej z atomów (10^{13} to dziesięć milionów milionów).

Zgodnie z tym modelem, atom staje się obojętny elektrycznie dlatego, że jądro otacza się tyłoma elektronami, ile ma dodatnich ładunków elementarnych w jądrze.

- Wskazówka:** W końcu XIX wieku uważano fizykę za „naukę zamkniętą” na podobieństwo geometrii. Uważano, że wszystkie prawa fizyki zostały już sformułowane, wszystkie zjawiska odkryte i tylko drobne szczegóły wymagają doprecyzowania. Dopiero wiek XX pokazał, jak daleki od rzeczywistości był ten obraz. Zasady fizyki wymagały poważnego uzupełnienia i rozszerzenia, co doprowadziło między innymi do powstania nowych jej dziedzin – **mechaniki kwantowej i teorii względności**.

Atom Rutherforda musiał jeszcze przejść dalsze koleje losu, aby mógł być uznany za obiekt stabilny i niesprzeczny z zasadami fizyki. Więcej informacji na ten temat znajdziesz w znakomitej książce A.K. Wróblewskiego „Historia fizyki”.



SOLVAY CONFERENCE 1927

A. PICARD E. HENRIOT P. EHRENFEST Ed. HERSEN Th. DE DONDER E. SCHRÖDINGER E. VERSCHAFFELT W. PAULI W. HEISENBERG R.H. FOWLER L. BELLOUIN
 P. DEBYE M. KNUDSEN W.J. BRAGG H.A. KRAMERS P.A.M. DIRAC A.H. COMPTON L. de BROGUE M. BORN N. BOHR
 L. LANGMUIR M. PLANCK Mme CURIE H.A. LORENTZ A. EINSTEIN P. LANGEVIN C.E. GUYE C.T.R. WILSON O.W. RICHARDSON
 Absents: Sir W.J. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUDEL

Rysunek 3.12: Zdjęcie z V kongresu Solvaya (1927 r.). Osoby widoczne na fotografii przyczyniły się w zasadniczym stopniu do zmiany poglądów na temat fizyki i struktury materii. Wśród nich jest Maria Skłodowska-Curie - jedyna kobieta

Rysunek 3.13: Fizyka jądrowa 1

Składniki jąder atomowych

Po odkryciu przez Rutherforda istnienia jądra atomowego, fizycy stanęli przed zadaniem rozstrzygnięcia, czy jest ono obiektem elementarnym, czy też posiada jakąś strukturę. Od początku skłaniano się ku tej drugiej hipotezie. Przyjęto, że nośnikami dodatnich ładunków w jądrze są *protony*. Proton to cząstka elementarna o masie $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, 1836 razy większej od masy elektronu. W skład jądra, oprócz protonów, wchodzi też *neutrony*. Neutron (odkryty w 1934 roku) to cząstka obojętna elektrycznie o masie nieco większej od masy protonu.

Obydwie cząstki wchodzące w skład jądra – proton i neutron – mają wspólną nazwę: *nukleon* ([Rysunek 3.14: Nukleony taką nazwą określamy składniki jądra atomowego – protony i neutrony](#) na stronie 171).



Rysunek 3.14: Nukleony taką nazwą określamy składniki jądra atomowego - protony i neutrony

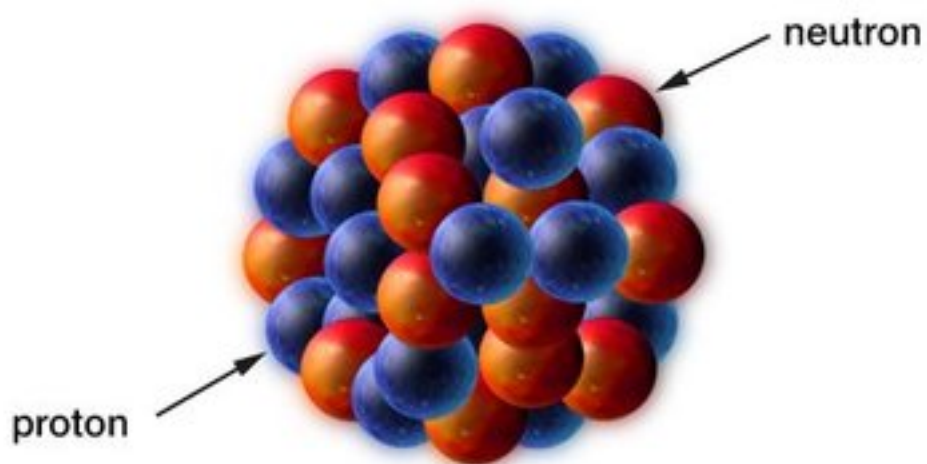
Strukturę jądra atomowego opisują dwie liczby: A i Z . Z – liczba atomowa – to liczba protonów w jądrze atomowym, A – liczba masowa to sumaryczna liczba protonów i neutronów w jądrze atomowym. Liczbę neutronów w jądrze oznaczamy zwykle przez N . Miedzy tymi liczbami zachodzą następujące zależności:

$$\text{(wzór 174) } A = Z + N, \quad N = A - Z$$

Ładunek elektryczny jądra równa się sumie ładunków protonów:

$$\text{(wzór 175) } Q = Ze$$

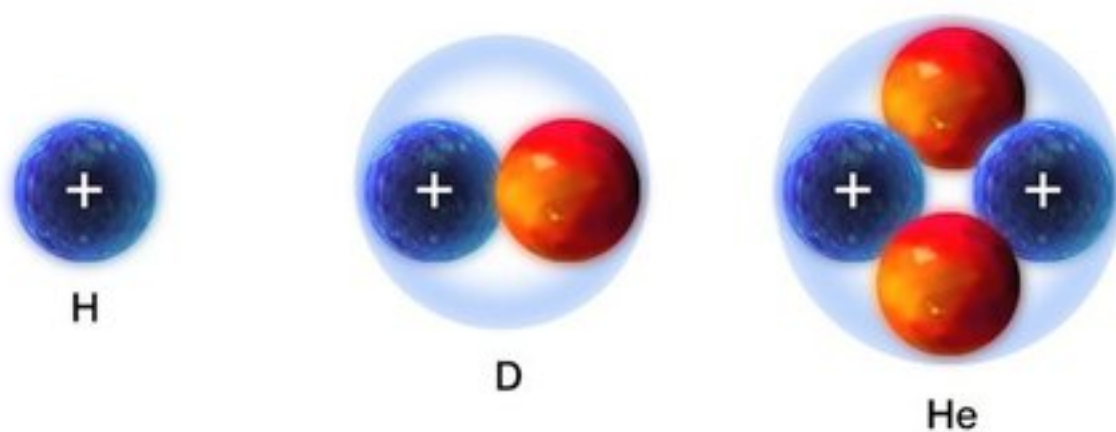
gdzie Q – ładunek elektryczny jądra atomowego, e – dodatni ładunek elementarny, czyli taki sam – co do wartości – jak ładunek elektronu, ale o przeciwnym znaku.



Rysunek 3.15: Schematyczny rysunek jądra atomowego

Na *Rysunek 3.16: Schematyczne przedstawienie składu jąder* na stronie 172 przedstawiono schematycznie skład trzech jąder: wodoru H (pojedynczy proton), deuteru D (ciężki wodór – proton i neutron) i jądra helu He (cząstki α) składającego się z dwóch protonów i dwóch neutronów.

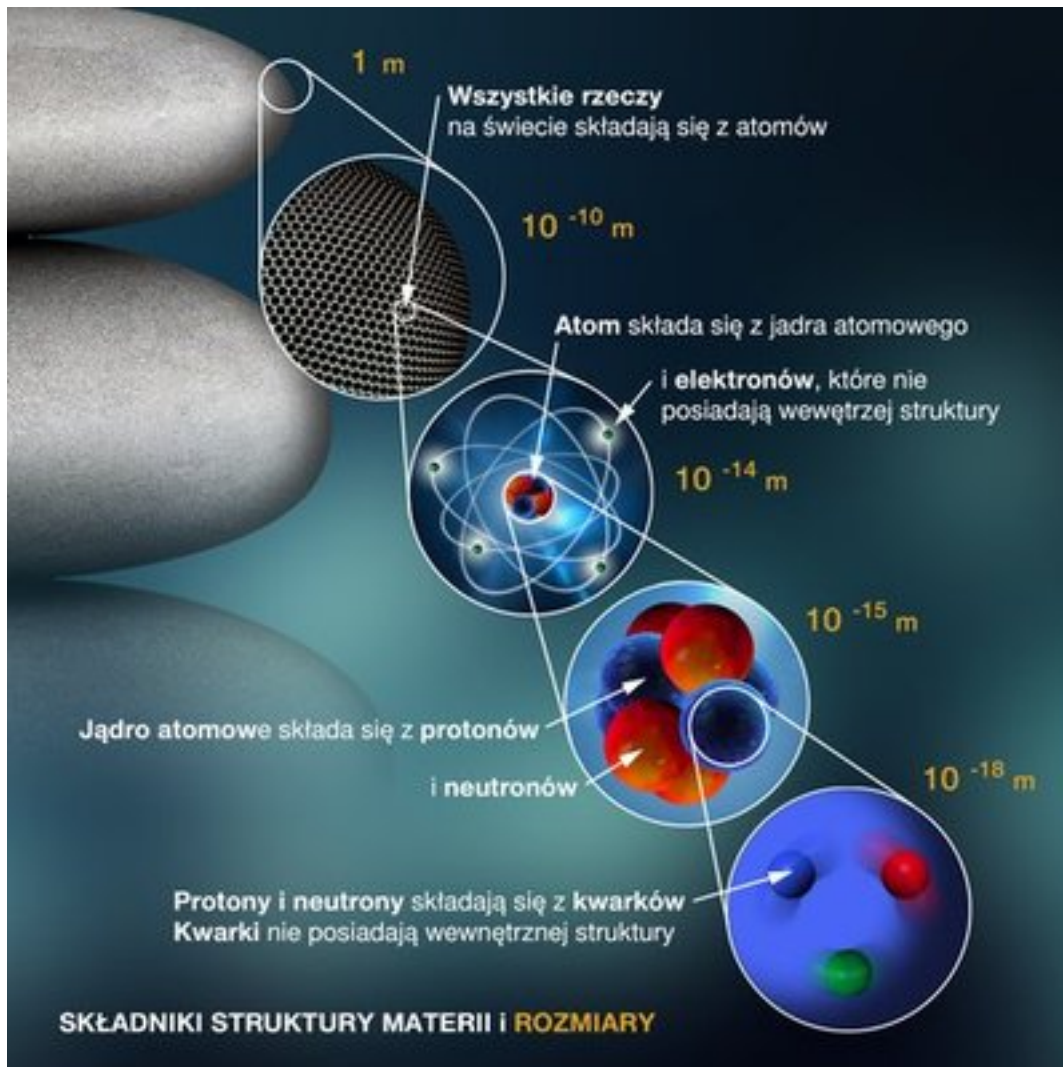
wodoru H, deuteru D i jądra helu



He

Rysunek 3.16: Schematyczne przedstawienie składu jąder

- Wskazówka:** W latach sześćdziesiątych XX wieku amerykański fizyk Murray Gell-Mann wysunął hipotezę, że neutrony i protony (a także inne cząstki zwane wówczas elementarnymi) zbudowane są z *kwarków*. Hipoteza ta uzyskała doświadczalne potwierdzenie w następnych dekadach, stając się obowiązującą dziś teorią. Kwarki i elektrony są najmniejszymi składnikami budowy materii i według aktualnej wiedzy nie posiadają struktury wewnętrznej. Jeśli „wejdziemy” w głąb struktury materii widzimy ją tak, jak na [Rysunek 3.17: Tak postrzegamy obecnie najmniejsze „cegiełki” materii](#) na stronie 173. Jest to stan dzisiejszej wiedzy, ale można przypuszczać, że za 5, 10, 20, ... lat ten rysunek się wydłuży...



Rysunek 3.17: Tak postrzegamy obecnie najmniejsze „cegiełki” materii

Struktura jądra atomowego a układ okresowy pierwiastków chemicznych

Wiemy z chemii, że układ okresowy pierwiastków ([Rysunek 3.18: Układ okresowy pierwiastków](#) na stronie 174) porządkuje je według rosnącej liczby atomowej i grupuje w okresy i grupy określające ich własności chemiczne. Okazuje się, że to uporządkowanie ma swoje podłoże w strukturze jąder atomowych.

Diagram showing the periodic table of elements, color-coded by groups and states. The table is organized into blocks: Metals (Metale), Nonmetals (Niemetale), and Gases (Gazy). The legend indicates states: C (Ciało stałe), Hg (Ciecze), and H (Gaz). The color scale at the top right indicates atomic weight (273).

Legend for states:

- C: Ciało stałe
- Hg: Ciecze
- H: Gaz

Legend for groups:

- Metale: Metale alkaliczne, Metale ziem alkalicznych, Lantanowce, Metale przejściowe, Metale bloku p
- Niemetale: Półmetale, Niemetalizacja, Halogeny, Gazy szlachetne

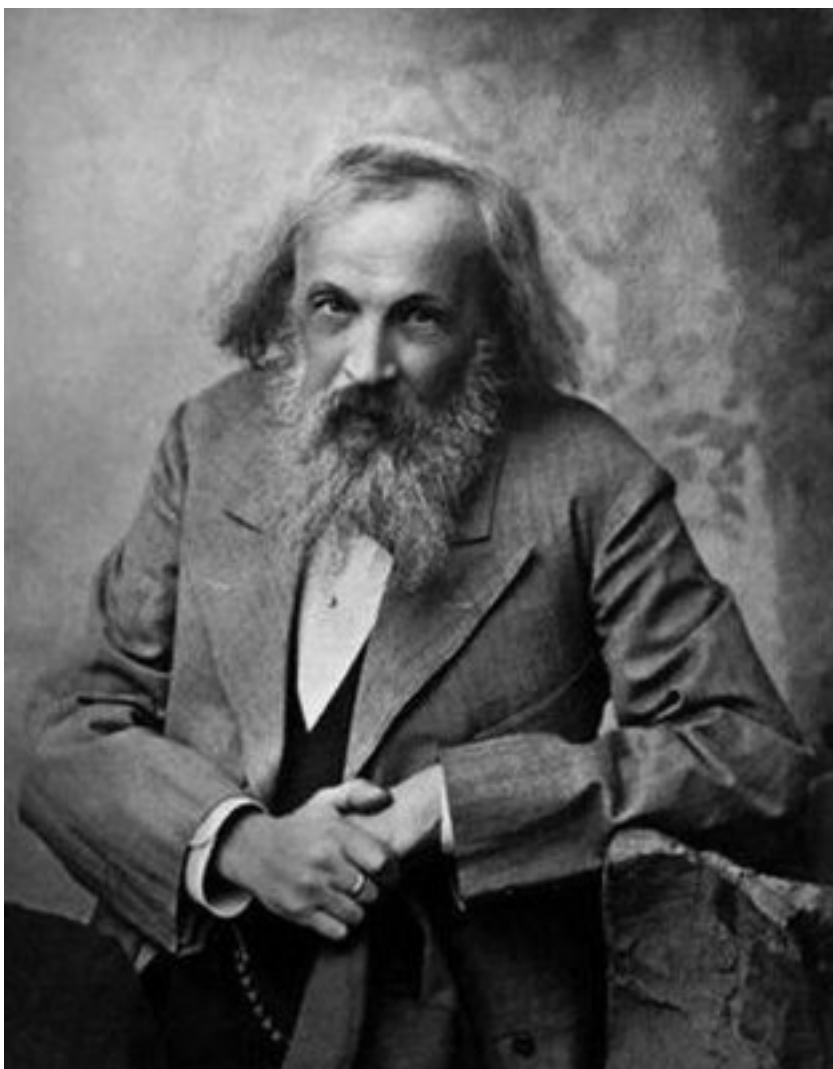
For elements without stable isotopes, the mass number of the most stable isotope is given in parentheses.

Copyright © 1997 Michael Davyab. Ostatnia aktualizacja 11 lut. 2013.

źródło: <http://www.ptable.com/?lang=pl>

Rysunek 3.18: Układ okresowy pierwiastków

Dmitrij Mendelejew – twórca układu okresowego pierwiastków – uporządkował znane pierwiastki według ich własności chemicznych, rezygnując w kilku przypadkach z obowiązującej wcześniej zasady porządkowania zgodnie ze wzrastającym ciężarem atomowym. Dzięki temu przewidział on istnienie nieznanych w tamtych czasach pierwiastków, i to jeszcze zanim zostało odkryte jądro atomowe!



Rysunek 3.19: Dmitrij Mendelejew (1834-1907)

Przypomnijmy, że pierwiastek chemiczny to substancja, w skład której wchodzi atomy o tej samej liczbie protonów w jądrach atomowych, czyli o tej samej *liczbie atomowej*. Jest ona tożsama z numerem pierwiastka w układzie okresowym i określa ona jego własności chemiczne. Każdej liczbie atomowej przypisana jest inna, unikatowa nazwa pierwiastka. Struktura jądra atomowego jest więc podstawą klasyfikacji pierwiastków chemicznych.

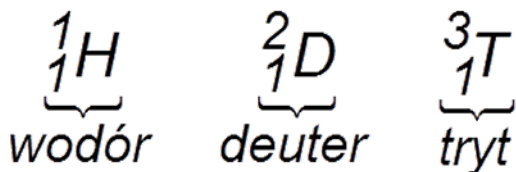
Atomy tego samego pierwiastka mogą mieć różne masy. Wynika to z faktu, że jądra atomowe o jednakowej liczbie protonów mogą zawierać różne liczby neutronów. Takie odmiany atomów noszą nazwę *izotopów* danego pierwiastka chemicznego. Większość pierwiastków ma kilka (niekiedy kilkanaście) izotopów, których atomy różnią się *liczbą masową*, oznaczaną symbolem A . Właściwości chemiczne różnych izotopów tego samego pierwiastka są praktycznie jednakowe. Natomiast właściwości fizyczne jąder atomowych różnych izotopów są na ogół różne: jedne mogą być stabilne, inne zaś promieniotwórcze.

- i **Wskazówka:** Nazwa „izotop” pochodzi od greckiego *izos topos* – co oznacza „jednakowe miejsce”. Chodzi o podkreślenie faktu, że wszystkie izotopy danego pierwiastka przypisane są temu samemu miejscu (numerowi) w układzie okresowym pierwiastków.

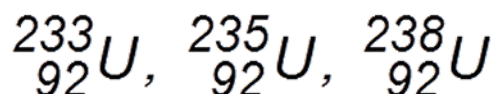
liczba masowa A
liczba atomowa Z X *symbol pierwiastka*

Rysunek 3.20: Oznaczenia izotopów

Izotopy wodoru



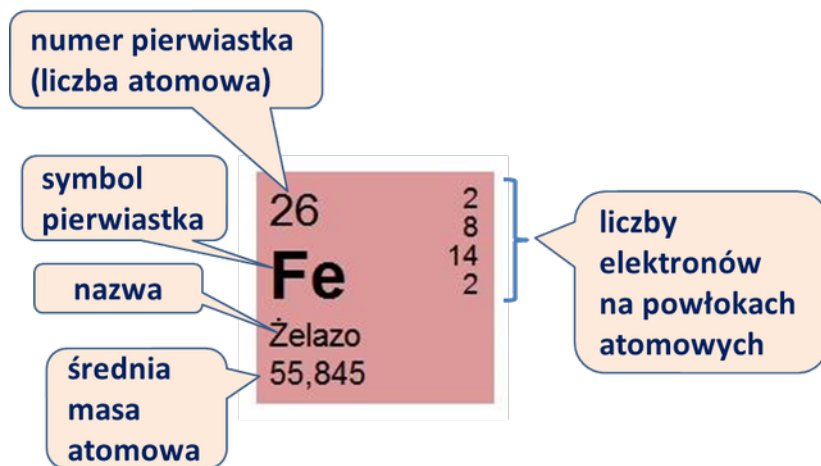
Izotopy uranu



Rysunek 3.21: Przykłady izotopów

Na [Rysunek 3.22](#): *Co oznaczają informacje podawane na tablicy układu okresowego* na stronie 176 podano typowe informacje o pierwiastku zawarte w układzie okresowym:

- Nazwę i symbol pierwiastka (dla żelaza: Fe, z łacińskiego *ferrum*);
- Numer pierwiastka, czyli jego liczbę atomową Z , (dla żelaza $Z = 26$); oznacza to, że w jądrach atomów żelaza jest 26 protonów;
- Średnią masę atomową A (dla żelaza $A_{\text{sr}} = 55,845$); odzwierciedla ona sumaryczną liczbę protonów i neutronów w jądrach atomowych, uśrednioną po wszystkich izotopach pierwiastka.
- Liczbę elektronów na poszczególnych powłokach.



Rysunek 3.22: Co oznaczają informacje podawane na tablicy układu okresowego

Obecnie znamy 118 pierwiastków chemicznych, z których 90 istnieje na Ziemi i w bezpośrednim jej otoczeniu. Pierwiastki o liczbach atomowych $Z > 82$ są niestabilne: wszystkie ich izotopy samorzutnie ulegają przemianom promieniotwórczym, o czym będzie mowa szerzej w rozdziale [3.3 Przemiany jądrowe](#) na stronie 183. Pierwiastki o liczbach atomowych 43, 61 i większych od 92 zostały wytworzone przez człowieka w reakcjach jądrowych. Powstają one także w wybuchach masywnych gwiazd, w końcowych stadiach ich ewolucji. Dochodzi wtedy, na masową skalę, do różnych reakcji jądrowych, których skutkiem jest zamiana jednych pierwiastków w inne - efekt niemożliwy do uzyskania w reakcjach chemicznych.

Pytania i problemy

1. Podaj nazwy cząstek wchodzących w skład atomów. Określ, czy są one naładowane dodatnio, ujemnie czy obojętne elektrycznie.
2. Podaj kilka przykładów z codziennego życia, w których daje się zauważyć elektryzowanie ciał lub skutki takiego naelektryzowania.
3. Zapisz sześć rozbudowanych zdań, porównujących model atomu Thomsona i model atomu Rutherforda. Każde ze zdań odnosi się do jednego z zaproponowanych niżej zagadnień. Postaraj się, by zdania zawierały możliwie szczegółowe przedstawienie podobieństw lub różnic między modelami, wynikających z powyższego opisu.

Przykład:

Atomy przepuszczają padające na nie cząstki α praktycznie nie wpływając na kierunek ich ruchu.

Model Thomsona przewiduje, że cząstki alfa mogą być odchylane przez atomy, choć o bardzo niewielki kąt. Model Rutherforda dopuszcza odchylenia dochodzące nawet do 180° od pierwotnego kierunku ruchu, choć zdarzają się one niezmiernie rzadko.

1. Atom jest elektrycznie obojętny.
2. Atom zawiera obiekty naładowane ujemnie.
3. Atom zawiera obiekty naładowane dodatnio.
4. Atom zawiera obiekty elektrycznie obojętne.
5. Materia w atomie jest równomiernie rozłożona w jego wnętrzu.
6. Atom składa się w dużej części z próżni.
4. Podaj właściwość jąder atomowych, która decyduje o miejscu pierwiastka w układzie okresowym.
5. Podaj właściwość jąder atomowych, która leży u podstaw grupowania atomów w izotopy.
6. Znane są cztery stabilne izotopy żelaza: ${}^{54}_{26}\text{Fe}$; ${}^{56}_{26}\text{Fe}$; ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ i ${}^{58}_{26}\text{Fe}$. Podaj liczbę neutronów w jądrze atomu każdego z tych izotopów. Oceń, czy ten zestaw izotopów jest spójny ze średnią liczbę masową żelaza podaną w układzie okresowym pierwiastków.
7. Oblicz stosunek liczby neutronów do liczby protonów w ciężkim jądrze atomowym, w którym stosunek $A/Z = 2,5$.

3.2 Własności jąder atomowych

Jądro atomowe jest strukturą niepodobną do czegokolwiek, co znamy ze świata makroskopowego. W tym paragrafie poznamy dwa nowe aspekty właściwości jąder atomowych. Zaczniemy od przypomnienia poznanych już cech.

- Skład. Jądro atomowe pierwiastka „X” zawiera Z protonów, A nukleonów oraz $A - Z$ neutronów, co zapisujemy jako:

$$(\text{ wzór 176 }) \text{}^A_Z\text{X}$$

- **Masa jądra.** Jest ona określona przede wszystkim liczbą masową A . Można byłoby przypuszczać, że masa jądra jest sumą mas nukleonów zawartych w jądrze. Przekonamy się jednak w tym paragrafie, że masa jądra **jest mniejsza** od sumy mas nukleonów, z których złożone jest jądro! Co ważniejsze, jest to skutek słynnego wzoru (*wzór 170* na stronie 159).
- **Rozmiary jądra.** Będziemy traktować jądro atomowe jako kulę, choć wiele jąder jest nieco spłaszczonych, podobnie jak Ziemia. Promień jądra także zależy od jego liczby masowej A . Dobrym przybliżeniem jest stosowany empiryczny wzór:

$$(\text{ wzór 177 }) R = R_0 \sqrt[3]{A}$$

gdzie: $R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$ m, zaś A to liczba masowa. Zatem rozmiary jąder atomowych zawierają się w granicach $(1,2 \div 6,3) \cdot 10^{-15}$ m. Często mówimy, że jądro atomowe to kula o promieniu kilku femtometrów ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$).



Wskazówka: Jądra, tak jak i inne cząstki mikroświata, podlegają zasadom mechaniki kwantowej. W szczególności mają one również falowy charakter. Fala nie jest dokładnie zlokalizowana w jednym punkcie. Dlatego rozmiary jąder można określić tylko z pewną dokładnością i granice obszaru zajmowanego przez jądro należy uznać za rozmyte.

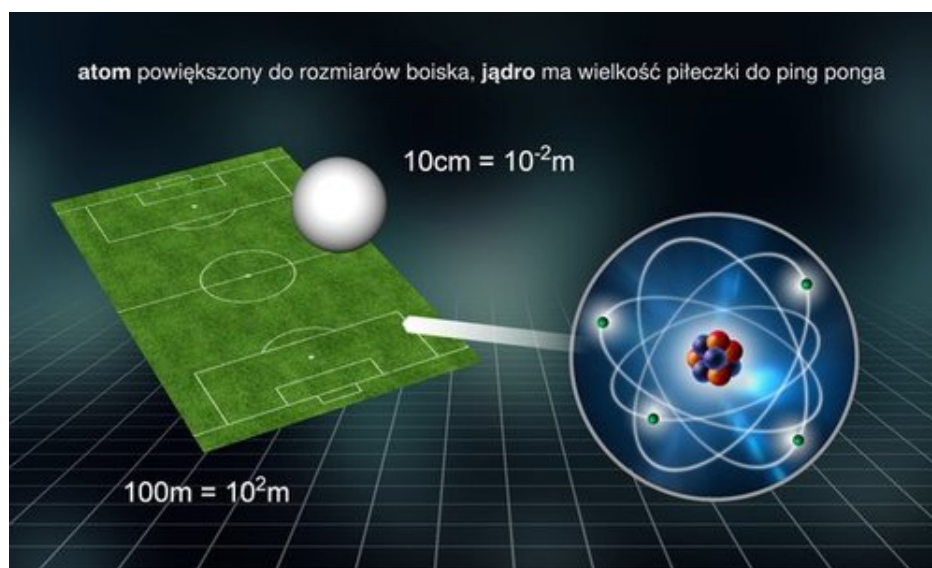
Przykład: Rozmiary jądra a rozmiary atomu

Oszacujmy jakie są rozmiary jądra atomowego w stosunku do rozmiarów atomu

Rozwiązanie: Typowa średnica jądra atomowego to 10 fm, czyli 10^{-14} m, zaś typowa średnica atomu to 1Å , czyli 10^{-10} m. Tak więc stosunek rozmiaru jądra atomowego do rozmiaru atomu jest rzędu:

$$(\text{ wzór 178 }) 10^{-14} / 10^{-10} = 10^{-4}$$

Okazuje się, że rozmiary jądra atomowego stanowią jedną dziesięciotysięczną część rozmiarów atomu.



Rysunek 3.23: Jeśli jądro atomowe byłoby wielkości piłki do ping-ponga, to atom byłby wielkości boiska

Gdyby rozmiary atomu powiększyć do rozmiarów boiska do piłki nożnej, to rozmiary jądra atomowego byłyby mniejsze niż rozmiary piłki i to nie piłki nożnej, ale piłeczki do ping-ponga.

Równocześnie pamiętamy, że masa niewielkiego jądra atomowego, to więcej niż 99,9% masy całego atomu. Reszta to „pustka”. Dla cząstek, których rozmiary są podobne jak rozmiary jąder atomowych, materia jest praktycznie pusta. Jednak trzeba mieć na uwadze, że w świecie atomów i jąder atomowych obowiązują prawa nieznanne w świecie dostrzeganym naszymi oczami. W dalszym ciągu tego paragrafu zapoznamy się z dwoma aspektami tych praw: z problematyką energii wiązania jąder atomowych oraz z właściwościami sił jądrowych.

Energia wiązania i defekt masy

Jądro atomowe to układ oddziałujących ze sobą nukleonów, związanych siłami jądrowymi. Gdybyśmy chcieli rozdzielić nukleony wchodzące w skład jądra, to musielibyśmy dostarczyć pewnej energii ΔE , by je oddalić od siebie. Oczywiście, taki proces wymaga dostarczenia energii, czyli energii wiązania jądra.

Będziemy operowali pojęciem *energii wiązania* jądra atomowego. Energia wiązania jądra atomowego to energia, którą **trzeba dostarczyć** do jądra atomowego, by rozdzielić je na swobodne nukleony, wchodzące w jego skład. W odwrotnym procesie (często wieloetapowym), gdy swobodne nukleony łączą się w jądra atomowe, **wydzielana** jest energia wiązania o łącznej wartości ΔE .

Wskazówka: Pojęcie energii wiązania ma zastosowanie do dowolnego układu, w którym wyodrębnimy, choćby myślowo, przyciągające się składniki. Na przykład by rozdzielić cząsteczkę wody na atom tlenu i atomy wodoru trzeba dostarczyć jej energii. Na odwrót, w przypadku łączenia się atomów tlenu i wodoru w cząsteczkę wody wydziela się energia, makroskopowo rejestrowana jako wybuch.

Wydzielanie się energii wiązania (grawitacyjnego) występuje również w skali kosmicznej. Tu przykładem może być zapadanie się obłoku materii kosmicznej przy tworzeniu się gwiazdy. Wydzielona w tym procesie energia objawia się w postaci drastycznego wzrostu temperatury – gwiazda „się zapala”.

Pamiętamy słynny wzór Einsteina:

$$(\text{wzór 179}) E = mc^2$$

Zastanówmy się, jakie są jego konsekwencje w związku z energią wiązania ΔE . Po lewej stronie tego równania wystąpi właśnie ΔE , zaś po prawej iloczyn Δm i c^2 :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Co znaczy Δm ? Skoro ΔE oznacza *ubytek* energii (w procesie tworzenia jądra energia wiązania jest wydzielana), to Δm musi oznaczać *ubytek* masy. Jeśli więc protony i neutrony tworzą związany układ nukleonów (jądro atomowe), to tracą część swojej masy wraz z energią wypromieniowaną w procesie tworzenia się jądra. Konsekwencją tego jest fakt, że **masa jądra jest mniejsza od sumy mas tworzących to jądro nukleonów**. Ten niezwykle ważny efekt nosi nazwę *defektu masy*. Doświadczalne porównanie mas jąder atomowych z masami swobodnych nukleonów, wchodzących w ich skład, jednoznacznie potwierdza ten wzór.

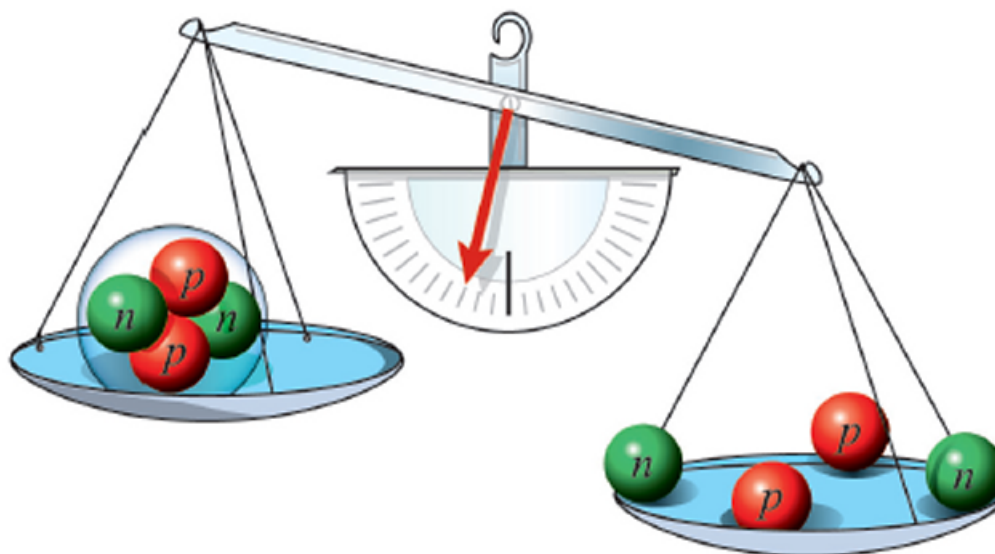
Nietrudno wyznaczyć jak duży jest ten deficyt korzystając z zależności Einsteina wiążącej masę z energią. Możemy to zapisać następująco:

$$E_w = \left[\underbrace{Zm_p + (A - Z)m_n}_{\substack{\text{suma mas} \\ \text{protonów i neutronów}}} - \underbrace{\frac{A}{Z}m_j}_{\substack{\text{masa} \\ \text{jądra}}} \right] c^2$$

Rysunek 3.24: Deficyt masy

gdzie E_w to energia wiązania jądra, A i Z – liczby: masowa i atomowa, m_p , m_n , m_j – masy protonu, neutronu i całego jądra, c – prędkość światła w próżni. Zauważmy, że Zm_p – to suma mas protonów, a $(A - Z)m_n$ – suma mas neutronów.

Masa jądra (tutaj jądra ${}^4_2\text{He}$) jest mniejsza od sumy mas neutronów i protonów, z których jądro jest



zbudowane

Rysunek 3.25: Poglądowe przedstawienie deficytu masy

Rysunek 3.26: Fizyka jądrowa 2

Przykład: Deficyt masy deuteronu

Jądro ciężkiego wodoru (deuteru), czyli tzw. deuteron, składa się z dwóch nukleonów – protonu i neutronu. Korzystając z wartości mas podanych w jednostkach energii, w megaelektronowoltach: masa jądra deuteru $m_D = 1\,875,62$ MeV, masa protonu $m_p = 938,27$ MeV i masa neutronu $m_n = 939,57$ MeV, oblicz energię wiązania deuteronu.

Rozwiązanie: Rachunek jest uproszczony dzięki wyrażeniu masy w jednostkach energii. Deficyt masy wyrażony w tych jednostkach jest zarazem energią wiązania deuteronu $E_w = \Delta E$, więc postępując zgodnie ze wzorem przedstawionym na [Rysunek 3.24: Deficyt masy](#) na stronie 179 otrzymujemy:

$$(\text{wzór 180}) E_w = (m_p + m_n) - m_D = (1\,877,84 - 1\,875,62) \text{ MeV} = 2,22 \text{ MeV}$$

Wydawałoby się, że energia wiązania wszystkich nukleonów w jądrze będzie tym większa, im więcej nukleonów jądro zawiera, czyli im większa jest liczba masowa A . Okazuje się, że nie do końca tak jest. Energie przypadające na związanie pojedynczego nukleonu w jądrze zależą w bardzo ciekawy sposób od A . Zależność ta przedstawiona jest na załączonym poniżej wykresie ([Rysunek 3.27: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej \$A\$](#) na stronie 181). Wykres ten nie bez powodu nazywany jest czasami „Najważniejszym wykresem Wszechświata”, ale stanie się to jasne dopiero pod koniec naszego kursu.

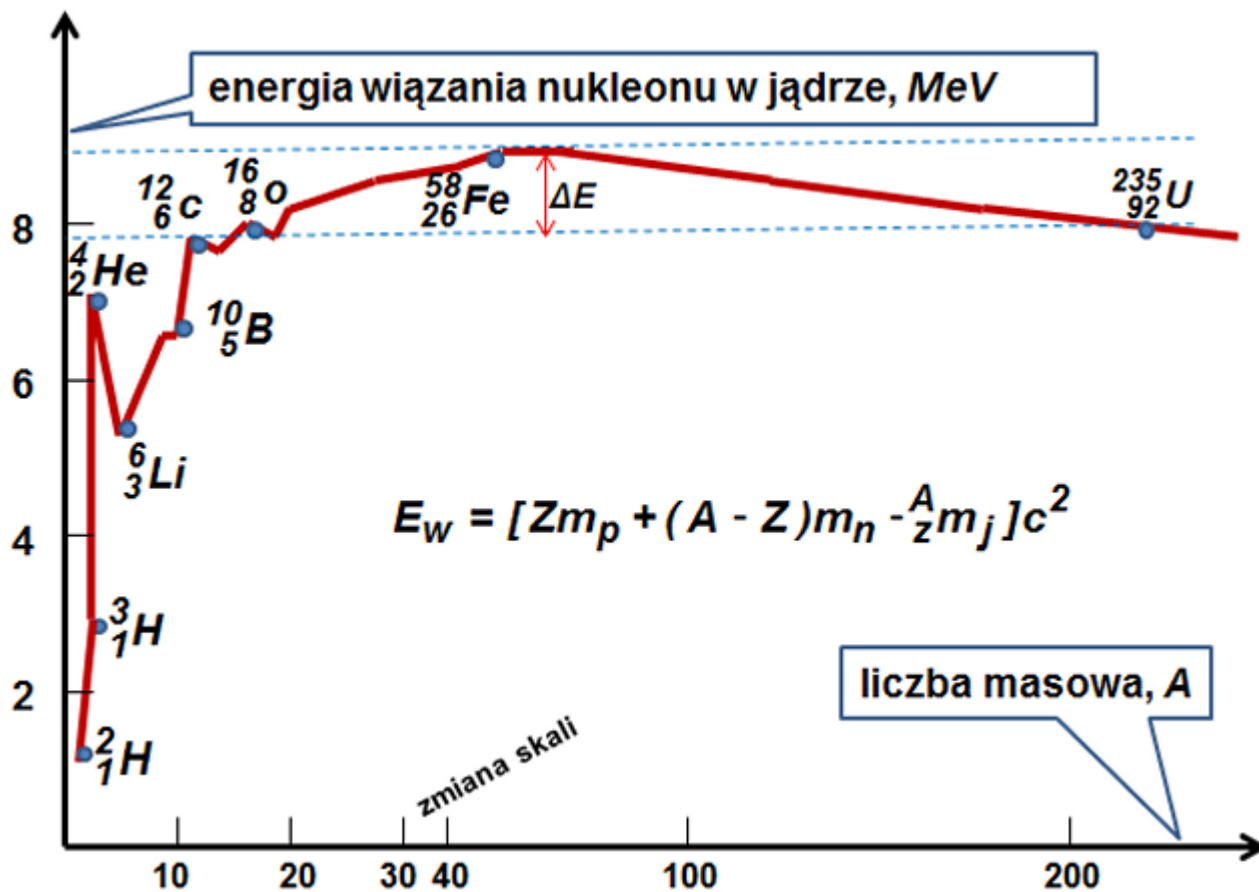


Wskazówka:

Podobnie jak energia wiązania, tak i deficyt masy występuje w każdym układzie związanym. Jednakże w układach ciał makroskopowych, a nawet atomów i cząsteczek, deficyt ten jest tak mały, że niemożliwy do zmierzenia przy dzisiejszej technice (patrz zadania 2. i 3.). Skutkiem tego było m.in. sformułowanie przez Antoine’a Lavoisiera, pod koniec XVIII wieku, empirycznego prawa zachowania masy. Głosi ono, że suma mas produktów reakcji jest równa sumie mas jej substratów. Wykrycie odstępstw od tego prawa (np. w postaci deficytu masy jąder atomowych) potwierdziło słuszność wzoru $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Co więc z prawem zachowania masy? Jest ono po dziś dzień stosowane - jako bardzo dobre przybliżenie - do opisu reakcji chemicznych.

Wiele podstawowych właściwości jąder atomowych zależy od liczby masowej A ; energia wiązania nie jest tu wyjątkiem. Ogólnie rzecz ujmując łączna energia wiązania wszystkich nukleonów w jądrze jest tym większa, im więcej nukleonów jądro zawiera. Okazuje się jednak, że zależność ta nie jest proporcjonalna, co prowadzi do wyjątkowo ciekawych efektów.

By fakt ten uwydatnić, rozpatrzmy jak od liczby masowej A zależy energia przypadająca na związanie pojedynczego nukleonu w jądrze. Zależność ta przedstawiona jest na załączonym poniżej wykresie (*Rysunek 3.27: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A* na stronie 181). Wykres ten nie bez powodu nazywany jest czasami „Najważniejszym wykresem Wszechświata”, co stanie się bardziej jasne dopiero pod koniec naszego kursu.



Rysunek 3.27: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A

Wskazówka:

Można zapytać – czy przebieg zależności energii wiązania nukleonu w jądrze jest ważny, czy coś z niego wynika? Odpowiedź brzmi – TAK! Jest bardzo ważny i wynika z niego bardzo wiele. Oto najprostsze przykłady: z wykresu na *Rysunek 3.27: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A* na stronie 181 wyczytujemy możliwość skonstruowania reaktora jądrowego (i bomby atomowej), widzimy źródła energii gwiazd, w tym Słońca, objaśniamy zawartość pierwiastków na Ziemi. Można także postawić tezę, że gdyby zależność z wykresu (*Rysunek 3.27: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A* na stronie 181) miała inny przebieg, to nasz Wszechświat wyglądałby inaczej, a może wcale nie mógłby istnieć. Odnosi się również do życia na naszej planecie.

Zwróćmy już teraz uwagę na podstawowe cechy wykresu z *Rysunek 3.27: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A* na stronie 181:

- Dla małych liczb masowych obserwujemy ogólny wzrost energii wiązania nukleonu w jądrze, ale wzrost ten jest bardzo nieregularny i są przypadki, kiedy dla większych wartości liczby masowej A energia wiązania jest mniejsza. Należy tu wskazać na obecność kilku stosunkowo silnie związanych jąder atomowych: ${}^4_2\text{He}$; ${}^{12}_6\text{C}$ i ${}^{16}_8\text{O}$.

- Dla A przyjmujących wartości około 60 energie wiązania przypadające na jeden nukleon są największe – wynoszą ok. 8,8 MeV. Oznacza to, że jądra atomowe żelaza oraz pierwiastków z nim sąsiadujących są najsilniej związane spośród wszystkich jąder atomowych.
- Wraz z dalszym wzrostem liczb masowych (powyżej $A = 60$) energie wiązania nukleonów zmniejszają się. Energie wiązania nukleonów w jądrach o największych wartościach A są o ok. 1 MeV mniejsze niż największe energie wiązania.

Siły jądrowe

Wspomnieliśmy w rozdziale 2.4 *Budowa atomu* na stronie 143, przy okazji omawiania oddziaływania elektronów z jądrem atomowym, że ładunki elektryczne oddziałują siłą proporcjonalną do ich iloczynu $q_1 \cdot q_2$ i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi, $1/r^2$. W szczególności, dwa dodatnio naładowane protony odpychają się siłą F daną wyrażeniem:

$$(\text{ wzór 181 }) F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

gdzie k – jest współczynnikiem proporcjonalności.

W jądrach atomowych protony znajdują się w bardzo małych odległościach od siebie. Działają więc między nimi ogromne siły odpychające. Obecność obojętnych elektrycznie neutronów nie wpływa na to odpychanie, a pomimo tego jądro stanowi zwarty, zwały obiekt. Wypływa stąd wniosek, że pomiędzy protonami (a także neutronami) w jądrach atomowych muszą działać jakieś inne siły (oprócz elektrycznych), które są przyciągające i większe od sił odpychania elektrostatycznego. Siły te powinny działać również na neutrony, gdyż są one także związane w jądrach. Z drugiej strony, siły te muszą mieć mały zasięg, bo nie są obserwowane w odległościach większych niż typowy rozmiar jądra atomowego. Nie stwierdzamy przykładowo, by jądra atomowe różnych atomów (oddalone od siebie o pojedyncze angstromy) oddziaływały na siebie inaczej, niż siłą elektryczną.

W przyrodzie występują oddziaływania *grawitacyjne* i *elektromagnetyczne*. Wynikające z nich siły nie mogą jednak wytłumaczyć mechanizmu wiązania nukleonów w jądra atomowe. Przyciągające siły grawitacyjne są bowiem o wiele słabsze od sił elektromagnetycznych. Siły elektromagnetyczne są przyciągające dla cząstek o ładunkach różnoimiennych, ale są odpychające odpychające dla cząstek o jednakowym ładunku.

Siły wiążące protony i neutrony w jądrach atomowych są przejawem występowania w przyrodzie tzw. *oddziaływań silnych*. Wiążą one kwarki w nukleonach. Gdy mówimy zaś o oddziaływaniu między nukleonami wewnątrz jąder atomowych, to nazywamy je *siłami jądrowymi*.

i Wskazówka: Natura oddziaływań silnych i sił jądrowych jest wciąż przedmiotem badań doświadczalnych, a teoria oddziaływań silnych – *chromodynamika kwantowa* – jest nadal rozwijana. Fizycy konstruują modele jądrowe opisujące niektóre z obserwowanych efektów i prawidłowości. Modelem, który całkiem dobrze odzwierciedla wiązanie nukleonów w jądrach atomowych jest *model kroplowy*. Specyficzne cechy wiązania nukleonów w jądrach opisuje się w tym modelu poprzez analogię do sił wiązania kropli cieczy.

Sformułujmy ważniejsze własności sił jądrowych:

- są **niezależne od ładunku elektrycznego**. Swym działaniem obejmują zarówno protony, jak i neutrony, praktycznie na jednakowych zasadach.
- są **krótkozasięgowe**, ich zasięg jest rzędu 10^{-15} m.
- są **przyciągające**, ale stają się odpychające na bardzo małych odległościach, rzędu 10^{-16} m i poniżej.
- siły te **działają tylko pomiędzy sąsiednimi nukleonami** w jądrze atomowym, a nie obejmują całego jądra. Jest to konsekwencją ich krótkiego zasięgu.
- w obszarze swego działania, na małych odległościach, są **wielokrotnie silniejsze niż siły grawitacyjne i elektromagnetyczne**.

Jądro atomowe jest więc strukturą, w której występują oddziaływania „spajające” (przyciągające siły jądrowe, obejmujące tylko sąsiednie nukleony) oraz „stabilizujące” (odpychające siły jądrowe na małych odległościach, które uniemożliwiają zapadnięcie się jednych nukleonów w drugie). Oprócz tego jednak, w jądrze atomowym występuje oddziaływanie „rozrywające” - jest nim elektrostatyczne odpychanie między protonami, obejmujące całe jądro. Taki „układ sił” nie zawsze zapewnia równowagę - daleko nie każda kombinacja protonów i neutronów zapewnia

stabilność i trwałość uzyskanego zbioru nukleonów. Fakt ten ilustruje tzw. ścieżka stabilności jąder atomowych, omówiona bliżej w rozdziale [3.4 Prawo zaniku promieniotwórczego](#) na stronie 200.

Pytania i problemy

1. Opisz, co to jest deficyt masy jądra atomowego. Podaj jego związek z energią wiązania tego jądra.
2. Skorzystaj z wyniku [przykładu](#) i oblicz „procentowy deficyt masy” jądra deuteru, wyrażony jako stosunek deficytu masy do łącznej masy jego składników.
3. Energia wiązania cząsteczki wody H_2O wynosi około 3 eV. Przyjmij przybliżone wartości masy: atomu wodoru $m_H = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg oraz atomu tlenu $m_O = 16,0 \cdot 10^{-27}$ kg i oblicz „procentowy deficyt masy” cząsteczki wody. Porównaj wynik z otrzymanym w zadaniu 2.
4. Opisz podstawowe cechy zależności energii wiązania pojedynczego nukleonu w jądrze od liczby masowej tego jądra. Postaw hipotezę o związku pomiędzy jedną z tych cech a składem jądra Ziemi.

3.3 Przemiany jądrowe

! Ważne: Co to są przemiany jądrowe?

Jądro atomowe może tracić lub zyskiwać nukleony, może też rozpadać się, w wyniku czego powstają mniejsze jądra. Czyli istotą przemian jądrowych jest zmiana liczby nukleonów jąder.

Dlaczego jądra mogą zmieniać swoją zawartość – liczbę protonów i neutronów? Otóż głównym czynnikiem decydującym o liczbie jego składników jest energia wiązania jądra.

Jądro, tak jak i każdy układ fizyczny, osiąga stan stabilny, gdy jego energia jest jak najniższa (ta sama zasada występuje w mechanice, gdzie w zależności od wartości energii, mamy do czynienia z równowagą, trwałą, obojętną lub chwijną).

Energie wiązania nukleonów w jądrach zależą nie tylko od liczby masowej, ale także od liczby protonów i neutronów. Przy niektórych kombinacjach liczb Z i N , określających różne izotopy danego pierwiastka, jądra atomowe są stabilne. Inne kombinacje liczb Z i N prowadzą do jąder niestabilnych, które mogą ulegać rozpadom (przemianom). W wyniku takich rozpadów z jądra emitowane są różne cząstki. Mówimy wówczas, że są to *izotopy promieniotwórcze*. Do pomyslenia są jeszcze inne kombinacje liczby protonów i neutronów, które nie występują w przyrodzie, gdyż nie tworzą w ogóle układu związanego. Fakty te ilustruje tzw. ścieżka stabilności jąder atomowych, o której mówić będziemy w dalszej części tego rozdziału.

i Wskazówka:

Zjawisko promieniotwórczości zostało odkryte w 1896 roku przez francuskiego fizyka Henry Becquerela [wym. bekrela], który stwierdził, że znany od dawna metal uran jest promieniotwórczy. Zjawisko to było następnie badane szczegółowo przez Marię Skłodowską-Curie i jej męża Piotra Curie (fotografia na [Rysunek 3.28: Maria Skłodowska-Curie i Piotr Curie w swoim laboratorium](#) na stronie 184). W roku 1898 odkryli oni istnienie nieznanymi wcześniej pierwiastków promieniotwórczych, którym nadali nazwy: polon i rad. Badania te stanowiły podstawę dla rozwoju nowych dziedzin nauki, techniki, medycyny itd.



Rysunek 3.28: Maria Skłodowska-Curie i Piotr Curie w swoim laboratorium

Zjawisko promieniotwórczości naturalnej polega na samorzutnej przemianie jądra atomowego i związanej z tym emisji określonej cząstki. Nazwy przemian jądrowych pochodzą od nazwy emitowanej cząstki. Do naturalnych przemian jądrowych należą:

- **Przemiana α (alfa)** – emisja cząstki α , czyli jądra atomu helu ${}^4_2\text{He}$
- **Przemiana β (beta)** – emisja cząstki β , czyli elektronu lub pozytonu. Pozyton jest cząstką antymaterii o masie równej masie elektronu, ale o dodatnim ładunku elektrycznym.
- **Przemiana γ (gamma)** – emisja kwantu promieniowania elektromagnetycznego – fotonu.

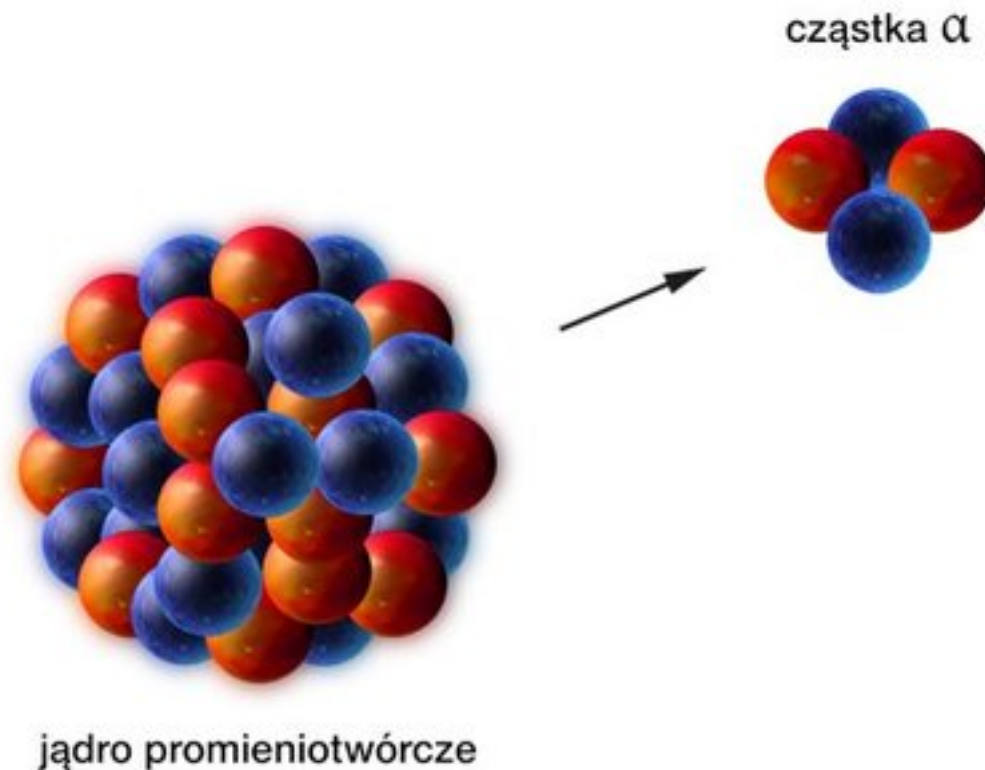
Przemiana gamma towarzyszy zwykle przemianom alfa lub beta. Jądra tworzone w tych przemianach są na ogół w stanach silnie wzbudzonych. Przejście do stanów o niższej energii, a w końcu do stanu podstawowego odbywa się poprzez emisję jednego lub kilku fotonów.

Bardziej szczegółowy opis każdej z przemian przedstawiamy w kolejnych częściach tego rozdziału.

Rysunek 3.29: Fizyka jądrowa 3

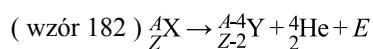
Przemiana α (alfa)

Rozpad (lub przemiana) α to samorzutny proces emisji - z wnętrza jądra - cząstki α , która składa się z dwóch protonów i dwóch neutronów, czyli jest jądrem pierwiastka – helu ${}^4_2\text{He}$.



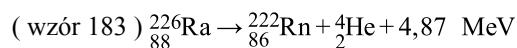
Rysunek 3.30: Schematyczne przedstawienie przemiany α

Zapis przemiany α :



W przemianie α liczba masowa jądra zmniejsza się o 4, $A \rightarrow A - 4$, a liczba atomowa zmniejsza się o 2, $Z \rightarrow Z - 2$. Wskutek tej przemiany część energii wewnętrznej jądra zamienia się w energię kinetyczną cząstki α .

Przykład przemiany α , zapisany w postaci zbliżonej do równania reakcji chemicznej:



Dlaczego z jądra emitowana jest akurat czwórka nukleonów?

Okazuje się, że we wnętrzu jąder atomowych nukleony nie występują pojedynczo, lecz chętnie grupują się w podkłady - tym chętniej, im jądro jest bardziej masywne. Najprostszym takim podkładem jest właśnie cząstka α . Jej powstanie jest energetycznie korzystne - świadczy o tym dość spora energia wiązania pojedynczego nukleonu w cząstce α (około 7 MeV na nukleon), co zostało pokazane na „najważniejszym wykresie Wszechświata” (*Rysunek 3.27: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A* na stronie 181).

Można więc sobie wyobrazić, że w masywnym jądrze atomowym mamy do czynienia z wyodrębnionymi cząstkami α ; każda z nich oddziałuje z pozostałymi nukleonami, z których jakaś część też jest pogrupowana w czwórki.

Przemiana α zachodzi bez jakiegokolwiek ingerencji z zewnątrz. Podlegają jej przede wszystkim jądra atomowe o dużej liczbie masowej A (czyli o dużej liczbie nukleonów), zdecydowanie przekraczającej $A = 200$.

Dlaczego czwórka nukleonów jest wypychana z wnętrza jądra?

Odpowiedzialne za to jest odpychające oddziaływanie elektrostatyczne między protonami w takiej wyodrębnionej czwórce a pozostałymi protonami w jądrze. To odpychanie jest kompensowane przez przyciągające siły jądrowe. Jednak im większa liczba masowa jądra (A za tym większa liczba protonów i neutronów), tym silniej odpychana jest owa wyodrębniona czwórka. Tymczasem przyciąganie siłami jądrowymi wcale nie musi stawać się silniejsze - to ze względu na ograniczony zasięg sił jądrowych, o którym wspominaliśmy w poprzednim paragrafie (patrz [3.2 Własności jąder atomowych](#) na stronie 177). Dlatego właśnie przemianie α podlegają przede wszystkim masywne jądra pierwiastków z końca układu okresowego.

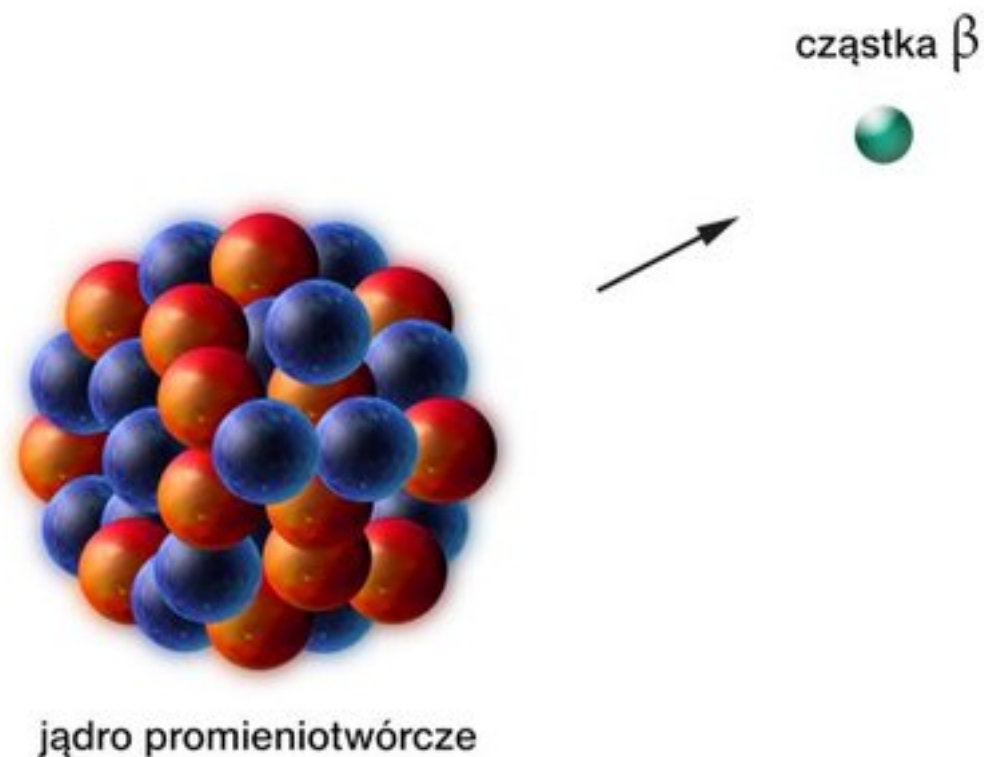
Z energetycznego punktu widzenia można to sobie wyobrazić tak, że w masywnym jądrze atomowym większość czwórek związana jest z jądrem „bezwzględnie”. Oznacza to, że ich wyrwanie z jądra (jest to proces analogiczny do wyrwania elektronu z atomu, czyli do jego jonizacji) wymaga dostarczenia odpowiedniej porcji energii (jest procesem endoenergetycznym). Natomiast niektóre czwórki związane są z jądrem stosunkowo słabiej - wyrwanie takiej czwórki jest procesem egzoenergetycznym, choć z punktu widzenia klasycznej mechaniki wymagałby on wstępnego dostarczenia porcji energii z zewnątrz dla jego inicjacji. Takie jądro jest α -promieniotwórcze.

Przemiana β (beta)

Rozróżniamy dwie wersje przemiany β : przemianę β^- oraz przemianę β^+ . W obu przypadkach przemiana polega na samorzutnej emisji z wnętrza jądra elektronu (przemiana β^-) lub pozytonu (przemiana β^+). Emitowanej cząstce β towarzyszy jeszcze jedna cząstka, o której piszemy w sekcji [O „cząstce-widmie” w przemianie \$\beta\$, czyli co to są neutrina?](#) na stronie 187.

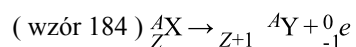
Przemianie β^- podlegają te jądra atomowe, które mają nadmiar neutronów w stosunku do jąder stabilnych o tej samej liczbie masowej A . Z kolei przemianie β^+ podlegają takie jądra, które mają nadmiar protonów w stosunku do jąder stabilnych o tej samej liczbie masowej A .

⚠ **Ważne:** Pozyton jest cząstką antymaterii, antycząstką elektronu o takiej samej masie, ale przeciwnym ładunku elektrycznym.

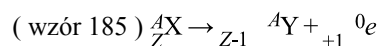


Rysunek 3.31: Schematyczne przedstawienie przemiany β

Zapis przemiany β^- :



Zapis przemiany β^+ :

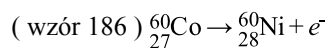


Symbolem e^- oznaczony jest tu elektron, zaś symbolem e^+ pozyton. Wskutek tej przemiany część energii wewnętrznej jądra zamienia się w energię kinetyczną wyemitowanych cząstek.

W przemianie β liczba masowa jądra nie zmienia się, a liczba atomowa zmniejsza się lub zwiększa o 1:

- przemiana β^- $Z \rightarrow Z + 1$
- przemiana β^+ $Z \rightarrow Z - 1$

Przykład przemiany β^- :



O „cząstce-widmie” w przemianie β , czyli co to są neutrina?

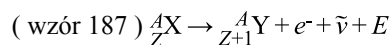
Gdy na początku XX wieku odkryto i badano promieniowanie β , to sądzono, iż w tej przemianie emitowane są wyłącznie elektrony (cząstki β^-) bądź pozytony (cząstki β^+). Jednak w latach dwudziestych stwierdzono, że cząstki

β emitowane przez określony izotop promieniotwórczy nie mają jednakowych energii kinetycznych! Ich energie zawierały się w określonym przedziale, tworząc ciągle widmo energetyczne.

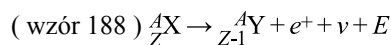
Odkrycie to było wielce zagadkowe, bowiem zarówno mechanika klasyczna, jak i powstająca wtedy mechanika kwantowej przewidują, że emitowane w takich warunkach cząstki β powinny mieć jedną wartość energii kinetycznej. Przekonanie to było tak silne, że rozważano nawet hipotezę, iż przemiana β podlega zasadzie zachowania energii „średnio rzecz biorąc”, a nie w każdym akcie przemiany. Takie podejście wymagałoby dokonania poważnego odstępstwa od zasady zachowania energii, będącej jednym z podstawowych filarów fizyki.

W 1930 roku Wolfgang Pauli, austriacki fizyk pracujący w Zurichu, zaproponował przyjęcie, że w przemianie β emitowana jest nie jedna, lecz dwie cząstki: elektronowi towarzyszy emisja antyneutrino, zaś pozytonowi towarzyszy emisja neutrino. W myśl tej „desperackiej” hipotezy (tak ją określił sam autor - chodziło przecież o ratowanie zasady zachowania energii!), reakcje tych przemian wyglądają następująco:

β^- :



β^+ :



Symbolem ν oznaczono tu neutrino, zaś symbolem $\bar{\nu}$ jego antycząstkę. Dostępna w reakcji energia E dzieli się losowo pomiędzy cząstkę β i neutrino. Dlatego właśnie elektrony (pozytony) rejestrowane w przemianie β nie mają zawsze jednakowych energii.

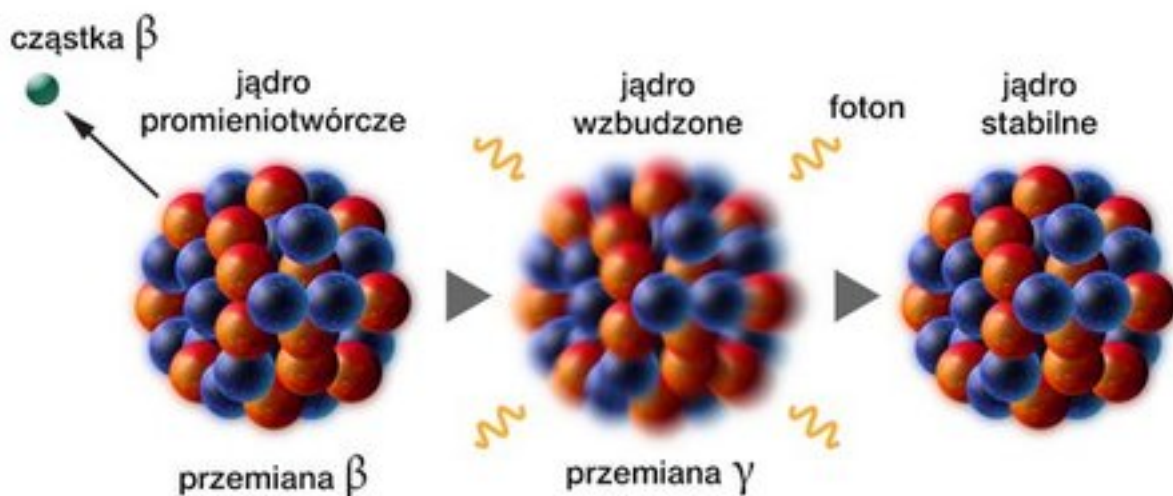
Zasadniczym problemem w hipotezie Pauli'ego był fakt, że nigdy dotąd nie zarejestrowano, w żadnym doświadczeniu, obecności neutrino w przemianie β . Mimo tego, hipoteza zyskała aprobatę fizyków, a odkrycie reakcji wywołanej neutrino w 1956 roku (po upływie ponad ćwierci wieku!) ostatecznie potwierdziło tę hipotezę.

Podstawową cechą neutrino jest nie tylko brak zdolności do oddziaływań silnych (tę zdolność mają jedynie kwarki), ale także brak zdolności do oddziaływań elektromagnetycznych (tę mają zarówno kwarki jak i elektron). Neutrino mają zdolność jedynie do oddziaływań słabych - jest to czwarte oddziaływanie podstawowe w przyrodzie, obok grawitacyjnego, elektromagnetycznego i silnego. Zajście oddziaływania słabego jest znacznie mniej prawdopodobne niż oddziaływania silnego czy elektromagnetycznego - to zasadniczy powód, dla którego tak trudno jest doświadczalnie wykryć obecność neutrin.

Dzisiaj przyjmujemy, że neutrino jest pełnoprawną cząstką elementarną, na równi z elektronem i kwarkami. Wiemy także, że oprócz elektronu i „jego” neutrino, w przyrodzie występują bardziej masywne, niestabilne odmiany elektronu (mion i taon) oraz stowarzyszone z nimi neutrino. Więcej na ten temat możesz przeczytać w Internecie - wprowadź w wyszukiwarce nazwę lepton - jest to wspólne określenie elektronu, mionu, taonu oraz ich neutrin.

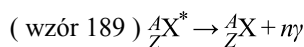
Przemiana γ (gamma)

W przemianie γ z wnętrza jądra atomowego emitowane są *fotony*, czyli kwanty promieniowania elektromagnetycznego. Przemiana γ jest na ogół następstwem przemiany α lub β . Jądro powstałe w wyniku takiej przemiany znajduje się najczęściej w stanie wzbudzonego (przypomnij sobie pojęcie stanu wzbudzonego atomu rozdz. 2.4 *Budowa atomu* na stronie 143). Oznacza to, że dysponuje ono swoistą „nadwyżką” energii, którą może wypromieniować na zewnątrz, właśnie w postaci fotonu (zwanego w tym przypadku „gamma”).



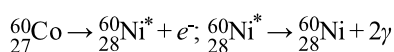
Rysunek 3.32: Schematyczne przedstawienie przemiany γ

W przemianie γ liczba masowa jądra i liczba atomowa nie zmieniają się. Zmienia się natomiast stan wzbudzenia jądra. Zdarza się, że już po emisji jednego kwantu gamma jądro atomowe osiąga stan podstawowy i przestaje być γ -promieniotwórcze. Częściej jednak przejście z początkowego stanu wzbudzonego do stanu podstawowego odbywa się etapami - jądro emituje kilka fotonów jeden po drugim, w bardzo krótkich odstępach czasu (rzędu nawet 10^{-12} s), przechodząc po każdej emisji do stanu coraz mniej wzbudzonego. Uwzględniamy to w zapisie przemiany γ :



w którym symbol z gwiazdką, X^* , oznacza jądro wzbudzone, zaś n oznacza liczbę fotonów γ wyemitowanych w trakcie przechodzenia do stanu podstawowego.

Przykład przemiany β , której towarzyszy przemiana γ :



Energie fotonów emitowanych w jądrowych przemianach γ są znacznie większe (o kilka rzędów wielkości) od energii fotonów światła widzialnego, a nawet nadfioletu. Te ostatnie są rzędu kilku elektronowoltów, podczas gdy najniższe energie fotonów γ są rzędu dziesiątek **kilo** elektronowoltów, a najwyższe sięgają nawet dziesięciu **mega** elektronowoltów.

Tak ogromne energie kwantów powodują możliwość ich wykorzystywania w wielu sytuacjach, w których światło widzialne byłoby zupełnie nieprzydatne. Z drugiej jednak strony obcowanie z kwantami o tak wysokich energiach wymaga stosowania odpowiednich środków bezpieczeństwa. O zagadnieniach tych będziemy mówić w rozdziale [3.9 Oddziaływanie promieniowania jądrowego z materią; jego detekcja i jego wpływ na organizmy żywe](#) na stronie 248 naszego kursu.



Wskazówka:

Poziomy energetyczne w jądrze atomowym

W drugim rozdziale, w rozdziale [2.4 Budowa atomu](#) na stronie 143, mowa była o poziomach energetycznych atomu. Jednym ze skutków faktu, iż atom może przyjmować tylko wybrane (skwantowane) stany energetyczne jest liniowy charakter widma emisyjnego atomu (rozdział [2.3 Widma promieniowania gazów](#) na stronie 137). Mechanika kwantowa przewiduje, że skwantowane stany energetyczne nie są wyłączną cechą atomów, lecz dowolnego związanego układu oddziałujących cząstek.

Oznacza to, że jądro atomowe, będące układem protonów i neutronów związanych oddziaływaniami jądrowym i elektromagnetycznym, także ma określony stan podstawowy oraz skwantowane poziomy wzbudzone. Układ tych stanów jest na ogół dość skomplikowany - do tej pory nie sformułowano pełnej i jednolitej teorii, pozwalającej taki układ uzasadnić.

Podobnie jak w przypadku atomów, następstwem skwantowanego charakteru poziomów energetycznych jest nieciągły charakter widma promieniowania γ emitowanego przez jądro atomowe. Energia kwantu γ emitowanego przez wzbudzone jądro nie może przyjmować wartości dowolnej, lecz określoną. Wynika ona z różnicy pomiędzy energiami: stanu początkowego E_1 (przed przemianą γ) oraz końcowego E_2 (po emisji fotonu γ):

$$(\text{ wzór 190 }) E_{\gamma} = |E_2 - E_1|$$

Badając doświadczalnie widmo promieniowania γ jądra atomowego, czyli zestaw energii fotonów γ emitowanych przez to jądro, możemy odtworzyć poziomy energetyczne tego jądra. Możemy także jednoznacznie **rozpoznać** jądro atomowe na podstawie jego widma - analogicznie jak w przypadku atomów, układ poziomów energetycznych każdego rodzaju jądra jest jego unikatową cechą. Podobnie więc, unikatową cechą jądra jest jego widmo energetyczne. Analogicznie, odcisk palca jednoznacznie identyfikuje człowieka.

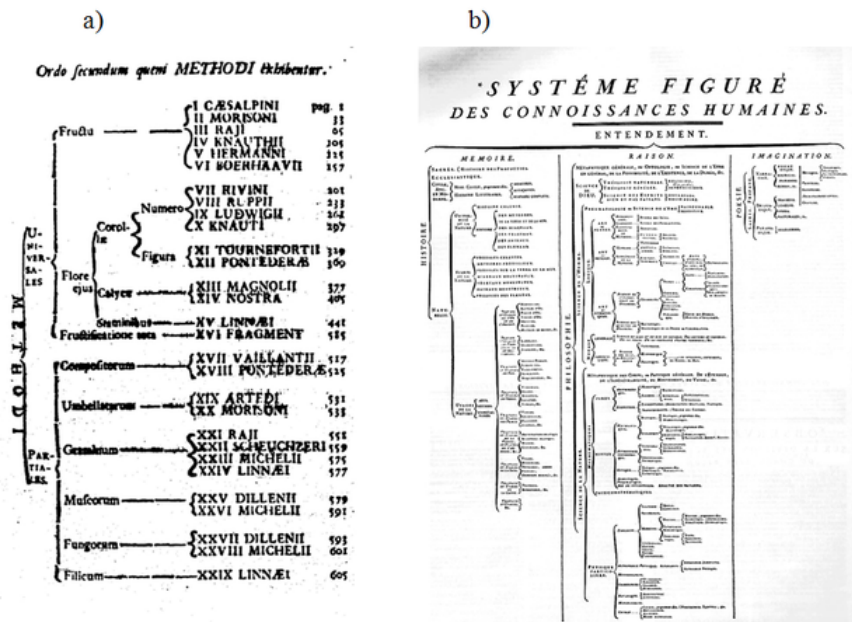
Tablica nuklidów. Ścieżka stabilności (podsumowanie i rozszerzenie wiadomości o przemianach promieniotwórczych)

W naukach przyrodniczych obowiązuje zasada systematyzowania i klasyfikowania poznawanych obiektów. Przypomnij sobie, dla przykładu, podstawowe informacje o trzech znanych układach klasyfikujących, stosowanych w biologii, w chemii i w astronomii.

! **Wskazówka: 1. Organizmy żywe**

Ogromna różnorodność otaczających nas organizmów żywych skłoniła badaczy już w starożytności do wprowadzenia początków systematyki biologicznej. Stworzono wtedy podwaliny pod **hierarchiczny układ** systematyczny, który pozwala opisywać podobieństwa organizmów oraz wnioskować o ich pochodzeniu i ewolucji. Warto zaznaczyć, że układ ten rozwijał się i zmieniał na przestrzeni dziejów, a zasady jego tworzenia ulegają modyfikacji po dziś dzień.

a) Według Linneusza, b) Według Diderota. (fragmenty - za Wikipedią <http://pl.wikipedia.org/wiki/>)



Klasyfikacja biologiczna

Rysunek 3.33: Klasyfikacja organizmów żywych z XVIII wieku

! **Wskazówka: 2. Pierwiastki chemiczne**

Gdy w XVIII wieku wprowadzono pojęcie pierwiastka chemicznego i zaczęto wyodrębniać coraz to nowe pierwiastki, pojawiła się potrzeba ich usystematyzowania. Po wielu mniej lub bardziej udanych próbach przyjęto stosowany do dziś tzw. *układ okresowy* Mendelejewa, który systematyzował pierwiastki według wzrastającej masy atomowej z jednoczesnym uwzględnieniem powtarzających się ich właściwości chemicznych.

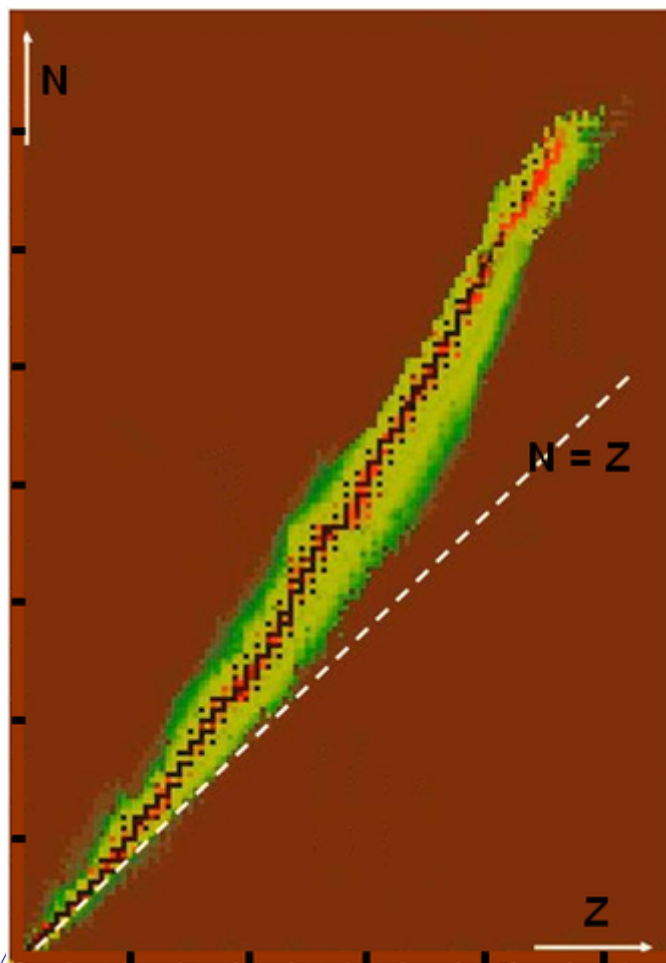


Wskazówka: 3. Gwiazdy

Na przełomie XIX i XX wieku gwałtownie wzrosło zainteresowanie różnymi właściwościami gwiazd. Stosowane wcześniej proste katalogi przestały astronomom wystarczać, nie pozwalały bowiem na wyłapywanie pewnych prawidłowości zachodzących w świecie gwiazd. Wśród wielu proponowanych klasyfikacji znany jest **dwuwymiarowy diagram** Hertzsprunga-Russela (wspominaliśmy o nim w jednej z sekcji rozdziału *1.9 Ewolucja i klasyfikacja gwiazd* na stronie 78). Na jego osiach odłożone są temperatura powierzchni gwiazdy oraz jej jasność absolutna. Jego ogromną zaletą jest właśnie owa „dwuwymiarowość” - pozwala ona wydobyć korelacje pomiędzy tymi wielkościami i opisać ewolucję różnych typów gwiazd.

Gdy odkryto, że wchodzące w skład atomu jądro samo składa się z protonów i neutronów, to niemal oczywistym pomysłem na klasyfikację jąder atomowych było przyjęcie dwuwymiarowego diagramu. Na jego osiach odkłada się liczbę protonów Z oraz liczbę neutronów N , składających się na jądro atomowe. Diagram ten nazywany jest **tablicą nuklidów** i zawiera informacje o wszystkich znanych jądrach atomowych, stabilnych, promieniotwórczych, zarówno występujących naturalnie na Ziemi jak i wytworzonych sztucznie w laboratoriach.

Bardziej szczegółową wersję tablicy nuklidów, pozwalającą powiększać wybrane jej obszary, znajdziesz na <http://atom.kaeri.re.kr/>

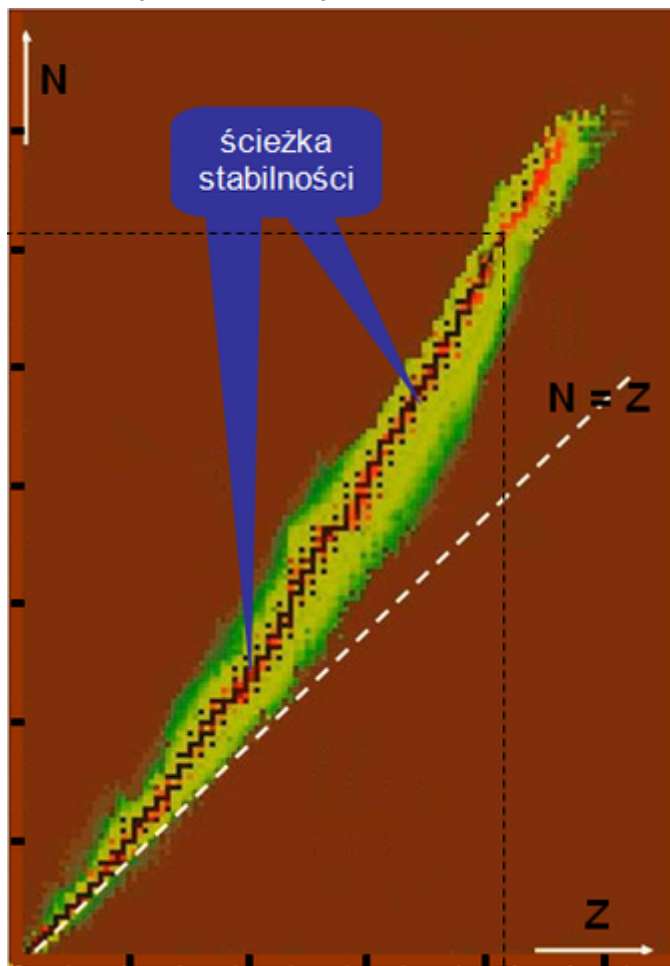


atom.kaeri.re.kr/

Rysunek 3.34: Tablica nuklidów

Z tablicy nuklidów można odczytać wiele ciekawych i istotnych informacji o jądrach atomowych.

Jak układają się stabilne jądra atomowe?

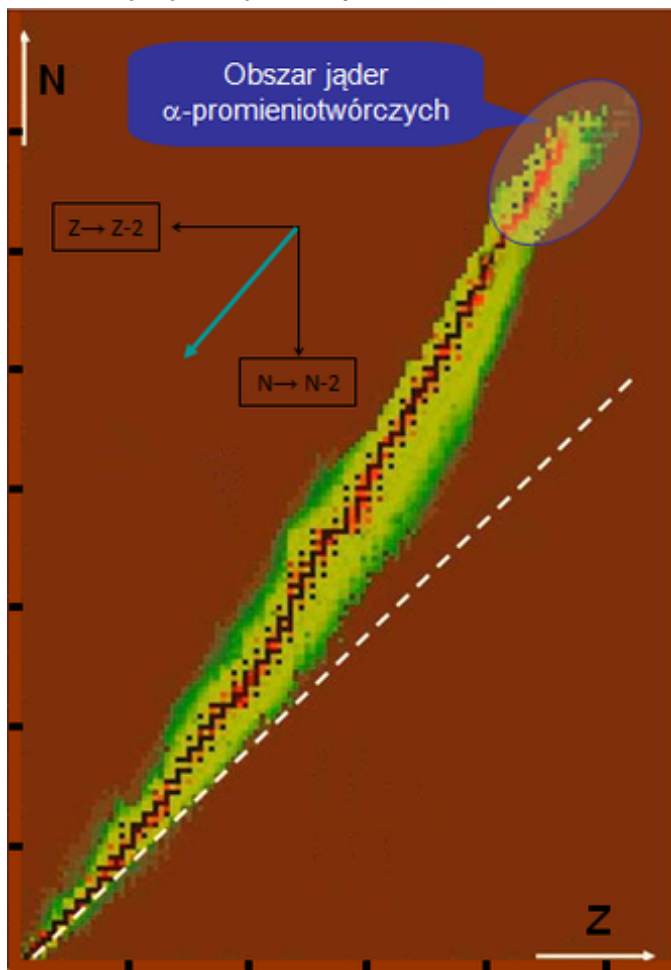


Rysunek 3.35: Tablica nuklidów z zaznaczeniem ścieżki stabilności

Stabilne jądra atomowe zaznaczone są kolorem czarnym. Układają się one w dość wąskim obszarze. Pokrywa się on – dla jąder lekkich – z przerywaną linią $N = Z$. Jednak im bardziej masywne jądro, tym obszar stabilności bardziej odchodzi ponad tę linię. Dlaczego tak się dzieje?

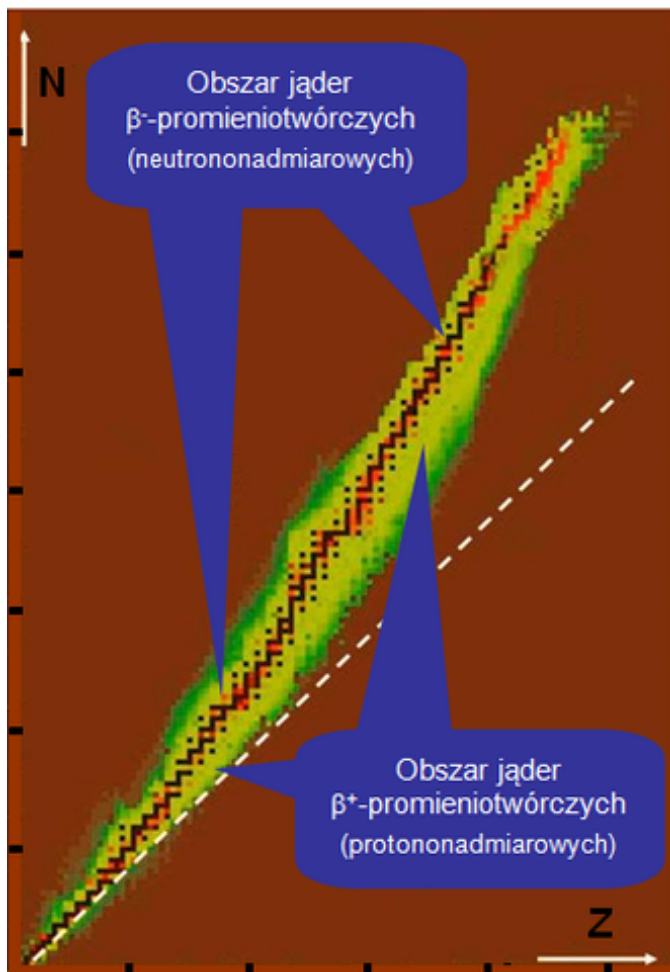
W miarę wzrostu liczby atomowej Z , dla zapewnienia stabilności jądra potrzebna jest nadwyżka liczby neutronów w jądrze nad liczbą protonów. Wynika to z coraz silniejszego odpychania elektrostatycznego pomiędzy coraz liczniejszymi protonami.

Najcięższe stabilne jądra atomowe, o $Z \approx 80$, zawierają około 120 neutronów. Tak więc stosunek N/Z dla tych jąder jest zbliżony do 1,5. Przykładem jest tu jądro ołowiu $^{208}_{82}\text{Pb}$. W jego okolicach kończy się znana nam ścieżka stabilności.

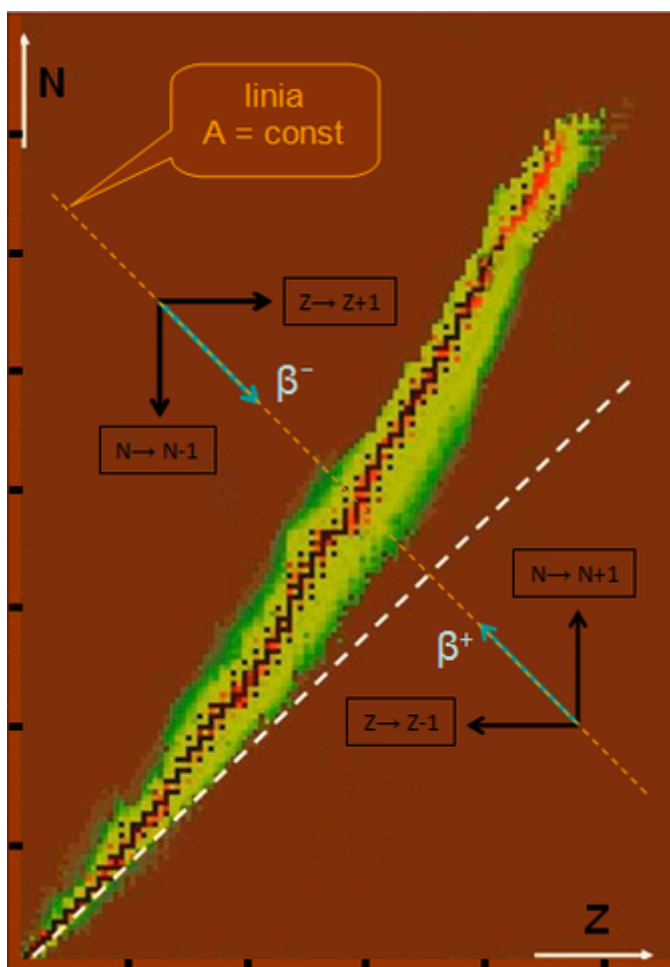
Gdzie znajdują się jądra α -promieniotwórcze?Rysunek 3.36: Tablica nuklidów z zaznaczeniem jąder α -promieniotwórczych

Większość jąder α -promieniotwórczych zajmuje obszar na przedłużeniu ścieżki stabilności w prawo i w górę, choć pamiętać należy, że w tym obszarze znajdują się także jądra β -promieniotwórcze. Przemiana α podlegają jądra „nukleononadmiarowe”, tzn. takie, w których liczba dodatnio naładowanych protonów jest tak duża, że ich odpychanie elektrostatyczne nie może zostać w pełni skompensowane obecnością neutronów i przyciąganiem sił jądrowych. W takiej sytuacji pozbycie się czwórki nukleonów, w tym dwóch protonów, jest energetycznie korzystne dla układu.

Wskutek przemiany α jądro pozbywa się dwóch protonów ($Z \rightarrow Z - 2$) oraz dwóch neutronów ($N \rightarrow N - 2$). W rezultacie jądro zbliża się ku ścieżce stabilności (kierunek jego „przemieszczenia” zaznaczono w zwiększonej skali niebieską strzałką, obok ścieżki stabilności), niemal równoległe do niej. Kilkakrotna przemiana α (towarzyszą temu na ogół przemiany β) doprowadza wreszcie niestabilne początkowo jądro do ścieżki stabilności.

Gdzie leżą jądra β -promieniotwórcze?Rysunek 3.37: Tablica nuklidów z zaznaczeniem jąder β -promieniotwórczych

Jądra β -promieniotwórcze odnajdziemy po obu stronach ścieżki stabilności, choć pamiętać należy, że w tym obszarze znajdują się także nieliczne jądra α -promieniotwórcze. Ponad ścieżką stabilności i w lewo od niej mamy jądra podlegające przemianie β^- , zaś pod ścieżką i w prawo od niej znajdują się jądra podlegające przemianie β^+ . Należy zwrócić uwagę, że określenia „neutrononadmiarowe” i „protononadmiarowe” nie dotyczą prostego porównania liczby protonów i neutronów w jądrze. Nadmiar określa się tu w stosunku do ścieżki stabilności.



Rysunek 3.38: Tablica nuklidów z zaznaczeniem linii stałej wartości liczby masowej A

Wskutek przemiany β^- jeden z neutronów wewnątrz jądra neutrononadmiarowego zamienia się w proton (towarzyszy temu emisja elektronu). W efekcie jądro przemieszcza się ku ścieżce stabilności po linii stałej liczby masowej A , praktycznie prostopadłej do ścieżki stabilności (przemieszczenie to zaznaczono w powiększonej skali niebieską strzałką). Zamiana neutronu w proton jest w takim jądrze energetycznie korzystna, prowadzi bowiem do zwiększenia energii wiązania układu, dlatego też proces ten zachodzi spontanicznie.

Analogiczny opis można także sformułować dla jąder protononadmiarowych.

Jakie znamy izotopy azotu? Które z nich są stabilne?

Spójrzmy na fragment tablicy nuklidów, powiększony wokół $Z = 7$ (taka jest właśnie liczba atomowa azotu). Z tego fragmentu możemy się wiele dowiedzieć.

N = 13	¹⁸ B <10 ⁻³ s	¹⁹ C 0,046 s	²⁰ N 0,130 s	²¹ O 3,4 s	²² F 4,2 s
N = 12	¹⁷ B 0,005 s	¹⁸ C 0,092 s	¹⁹ N 0,271 s	²⁰ O 13,5 s	²¹ F 4,1 s
N = 11	¹⁶ B <10 ⁻³ s	¹⁷ C 0,173 s	¹⁸ N 0,622 s	¹⁹ O 29 s	²⁰ F 11 s
N = 10	¹⁵ B 0,010 s	¹⁶ C 0,7 s	¹⁷ N 4,1 s	¹⁸ O 0,20%	¹⁹ F 100%
N = 9	¹⁴ B 0,012 s	¹⁵ C 2,4 s	¹⁶ N 7,3 s	¹⁷ O 0,04%	¹⁸ F 1,9 g
N = 8	¹³ B 0,017 s	¹⁴ C 5730 l	¹⁵ N 0,37%	¹⁶ O 99,76%	¹⁷ F 64 s
N = 7	¹² B 0,020 s	¹³ C 1,1%	¹⁴ N 99,63%	¹⁵ O 2,1 m	¹⁶ F <10 ⁻³ s
N = 6	¹¹ B 81,17%	¹² C 98,9%	¹³ N 10,1 m	¹⁴ O 76 s	¹⁵ F <10 ⁻³ s
N = 5	¹⁰ B 18,83%	¹¹ C 20,5 m	¹² N 0,013 s	¹³ O 0,009 s	
N = 4	⁹ B <10 ⁻³ s	¹⁰ C 19 s	¹¹ N <10 ⁻³ s	¹² O <10 ⁻³ s	
N = 3	⁸ B 0,78 s	⁹ C 0,127 s	¹⁰ N <10 ⁻³ s		
	Z = 5 (bor)	Z = 6 (węgiel)	Z = 7 (azot)	Z = 8 (tlen)	Z = 9 (fluor)

Rysunek 3.39: Fragment tablicy nuklidów obejmujący fragment ścieżki stabilności

Azot ma dwa stabilne izotopy (pokazane na czarnym tle): ${}^{14}_7\text{N}$ oraz ${}^{15}_7\text{N}$. Podano przy nich procentową zawartość w azocie występującym naturalnie na Ziemi. Analogiczne informacje możemy odczytać dla pozostałych pierwiastków, widocznych w naszym fragmencie tablicy nuklidów, których stabilne izotopy także pokazano na czarnym tle.

Azot ma cztery izotopy β^+ -promieniotwórcze, oznaczone kolorem niebieskim (tak jak izotopy pozostałych pierwiastków, podlegające przemianom β^+). Ma on także cztery izotopy β^- -promieniotwórcze, oznaczone kolorem pomarańczowym. Przy izotopach niestabilnych podano tzw. czas połowicznego ich zaniku, o którym będziemy mówić w następnym paragrafie. Kursywą oznaczono te izotopy, których czas połowicznego zaniku jest poniżej 1/1000 sekundy - z „ludzkiego” punktu widzenia rozpadają się one natychmiast.

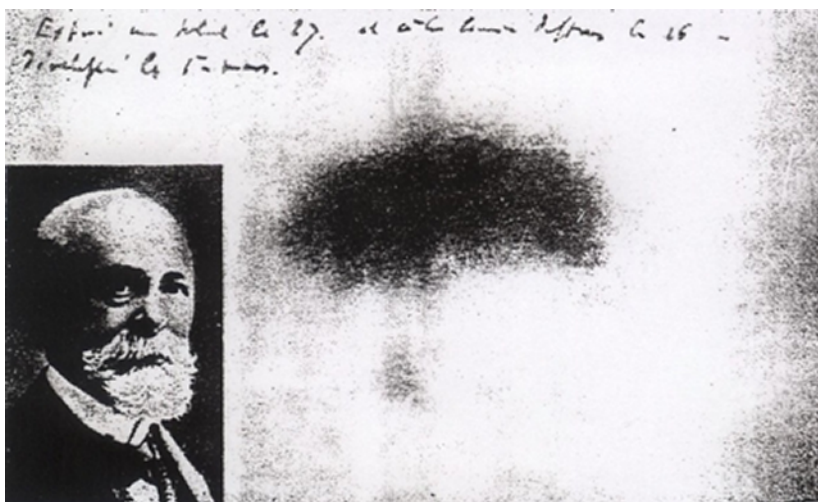
Cztery „wolne” miejsca oznaczają konfiguracje nukleonów, które w ogóle nie tworzą stanu związanego. Przykładem takiej konfiguracji jest układ dziewięciu protonów i pięciu neutronów.

Na szczególną uwagę zasługuje izotop węgla ${}^{14}_6\text{C}$ - czas jego połowicznego zaniku wynosi ponad 5700 lat i jest zaskakująco długi. Ta właściwość, wraz z faktem, iż węgiel jest wszechobecnym składnikiem organizmów żywych, pozwala wykorzystywać ten izotop w ... archeologii. Służy on do określania wieku szczątków organicznych, znajdujących w wykopaliskach. Więcej na ten temat opowiemy w następnym paragrafie.

Notatka historyczna - jak odkryto promieniotwórczość

Pewnego dnia w Paryżu pogoda się popsowała. Po dniach słonecznych stało się pochmurno i francuski fizyk Henri Becquerel, który naświetlał na słońcu minerały, by potem obserwować ich świecenie w ciemności i rejestrować ten efekt na kliszy fotograficznej, musiał zrezygnować z naświetlania i minerał wraz z kliszą owiniętą w czarny papier schował do szuflady. Był to minerał zawierający związki uranu, a wszystko działo się w roku 1896.

Kiedy po kilku dniach wrócił do swej pracy nie był pewien, czy klisza w szufladzie była naświetlona i na wszelki wypadek postanowił ją wywołać. To, co zobaczył pokazuje fotografia obok. Zdziwił się, bo z powodu złej pogody kliszy nie naświetlał, więc skąd zaczernienie? Włożył znowu minerał z kliszą do szuflady, poczekał parę dni, wywołał i znów klisza była zaczerniona. Wtedy ogłosił, że minerały zawierające związki uranu wysyłają samoistnie nieznanne dotychczas promieniowanie. Tak odkrył *promieniotwórczość*.



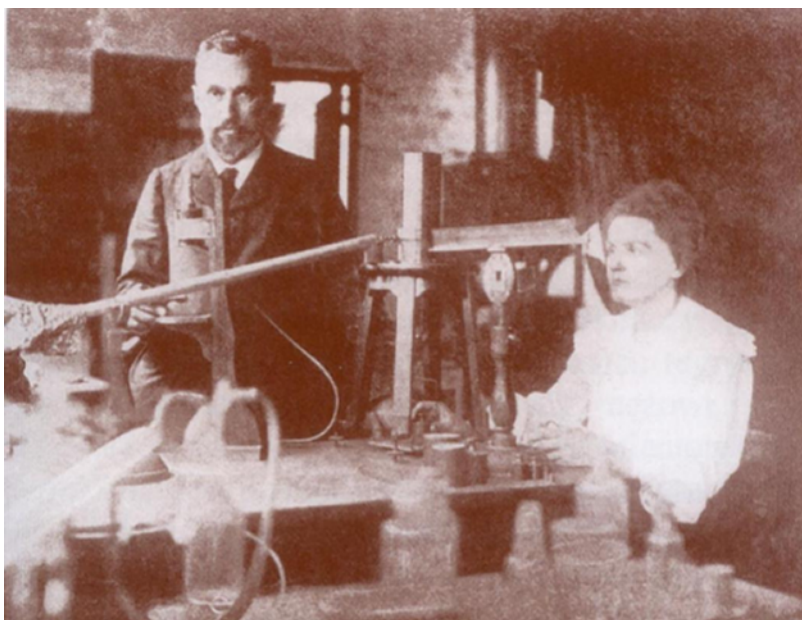
Rysunek 3.40: Becquerel oraz jego zaczerniona klisza

Badał potem własności tego promieniowania i doszedł do wniosku, że jest to promieniowanie podobne do promieniowania odkrytego nieco wcześniej przez Rentgena. Zmniejszyło to jego zapał i dalej niewiele się nim zajmował.

Tymczasem w Paryżu pojawiła się młoda studentka z Polski, **Maria Skłodowska**, która szybko ukończyła studia i poszukiwała tematu dla swej pracy doktorskiej. Po latach w swojej książce (M. Skłodowska-Curie, "Autobiografia i Wspomnienia o Piotrze Curie", GAL, Warszawa, 2004) pisała o tym tak:

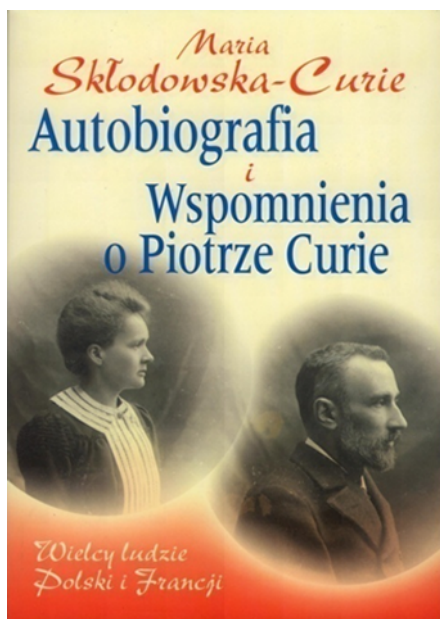
„Zdecydowałam się wreszcie na temat swojej pracy doktorskiej. Uwagę moją zwróciły ciekawe wyniki badań Henri Becquerela nad solami rzadkiego metalu, uranu. Becquerel zauważył, że jeśli umieścić na płycie fotoicznej pokrytej czarnym papierem sól uranu, to zmienia się ona tak, jak gdyby padło na nią światło. Dzieje się to pod wpływem szczególnych promieni, wysyłanych przez sól uranową, różniących się od zwykłych promieni świetlnych, ponieważ mogą one przenikać przez czarny papier. Becquerel wykazał również, że te promienie potrafią rozbrajać elektroskop. Zrazu sądził on, że promienie uranowe powstają na skutek wyeksponowania soli uranowych na światło, lecz doświadczenie przekonało, że sole te, nawet po kilkumiesięcznym trzymaniu ich w ciemności, nie przestają wysyłać swych osobliwych promieni.”

W międzyczasie Maria poślubiła francuskiego fizyka Piotra Curie, który z zapałem włączył się do prowadzonych przez nią badań.



Rysunek 3.41: Maria Skłodowska-Curie i Piotr Curie przy pracy

Przytoczony powyżej fragment pochodzi z autobiologii Marii Skłodowskiej-Curie; unikalnej opowieści pisanej ręką kobiety, która nie ma sobie równych w historii nauki. Zdecydowanie warto przeczytać całość. Tu przytaczamy jeszcze jeden fragment.



Rysunek 3.42: Strona tytułowa autobiologii Marii Skłodowskiej-Curie

„Miałam okazję zbadać sporą ilość mineralów; niewiele z nich okazało się czynnych, te mianowicie, w których znajdował się uran albo tor. Aktywność tych mineralów nie miałaby w sobie nic zadziwiającego, gdyby była proporcjonalna do ilości zawartego w nich uranu lub toru. Ale tak nie było. Niektóre z tych mineralów wykazywały aktywność trzy albo cztery razy większą, aniżeli wypadło z obliczeń dla uranu. Sprawdziłam ten uderzający fakt starannie i nie mogłam wątpić, że jest prawdziwy. Zastanawiając się nad jego przyczyną doszłam do wniosku, że można go było wyjaśnić tylko w jeden sposób, a mianowicie, że musi istnieć w tych mineralach jakaś substancja nieznaną, a bardzo czynną. Mąż mój zgodził się ze mną i nalegał, ażebyśmy od razu zaczęli poszukiwać tej substancji, w nadziei, że połączony nasz wysiłek szybko doprowadzi do jej wykrycia. Żadne z nas nie mogło jednak przewidzieć, że rozpoczynając tę pracę wchodzimy na drogę nowej gałęzi wiedzy, którą podążać już będziemy do końca życia.”

Ten tekst pokazuje jak rodzą się odkrycia naukowe. Szczególną uwagę warto zwrócić na następujące fragmenty, pokazujące cztery spośród wielu aspektów takich narodzin:

1. Tworzenie nowych pojęć i nowego nazewnictwa: „...nie wiele z nich okazało się czynnych”, – Owa „czynność” była nową, nieznaną wcześniej właściwością materii. Dziś powiedzielibyśmy „promieniotwórczych”, ale wtedy takie słowo nie istniało. To autorka wprowadziła słowo „promieniotwórczość” (angielskie „radioactivity”, francuskie „radioactivité”) do języka nauki.


2. Bazowanie na wynikach eksperymentu: „Niekótre z tych mineralów wykazywały aktywność trzy albo cztery razy większą, aniżeli wypadalo z obliczeń dla uranu. Sprawdziłam ten uderzający fakt starannie i nie mogłam wątpić, że jest prawdziwy.”. Niezgoda wyniku doświadczenia z oczekiwaniami pchnęła badaczkę do dociekania przyczyn takiego stanu rzeczy.

3. Stawianie hipotez i ich weryfikacja: „Zastanawiając się nad jego przyczyną doszłam do wniosku, że ...musi istnieć w tych mineralach jakaś substancja nieznaną, a bardzo czynna.” Rozpoczynając badania, Maria Skłodowska-Curie nie poszukiwała nieznanymi pierwiastków, bo nie wiedziała o ich istnieniu. Dopiero wyznaczenie zawartości uranu i porównanie z własnościami promieniotwórczymi próbki pozwoliło na sformułowanie tej hipotezy; odkrycie polonu oraz radu stanowiło jej potwierdzenie.

4. Przewidywanie konsekwencji naukowych oraz pozanaukowych odkrycia: „Żadne z nas nie mogło jednak przewidzieć...”. Okazało się, że otwierają oni nie tylko nowe dziedziny wiedzy i nie tylko dla siebie samych. Nauka o promieniotwórczości, o zjawiskach zachodzących na poziomie jąder atomowych weszła do dorobku całej ludzkości i dostarczyła ludziom narzędzi, które znalazły wszechstronne zastosowania w różnych dziedzinach; zastosowania te przyniosły różnorakie skutki, w większości bardzo korzystne, ale czasem też negatywne.

[XLS](#) [PDF](#) Szereg promieniotwórczy

Pytania i problemy

1. Rozpatrujemy jądra atomowe żelaza ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ oraz astatu ${}_{85}^{218}\text{At}$. Wskaż to z nich, które podlega przemianie α i zapisz równanie tej przemiany.
2. Rozpatrujemy izotopy trzech pierwiastków: potasu ${}_{19}^{40}\text{K}$, wapnia ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ oraz skandu ${}_{21}^{40}\text{Sc}$. Wiadomo, że jeden z nich jest stabilny, jeden jest β^- -promieniotwórczy a jeden jest β^+ -promieniotwórczy. Rozstrzygnij, którą z tych cech ma każdy z izotopów (wskazówka: zastanów się nad „nadmiarowością” – protonów, neutronów). Zapisz równanie przemiany dla izotopów niestabilnych.
3. Wskaż istotną różnicę pomiędzy przemianą γ jądra atomowego a przemianami α i β .
4. Przedstaw pojęcie ścieżki stabilności jąder atomowych.
5. Opisz przemieszczenie jądra protononadmiarowego na tablicy nuklidów wskutek przemiany β^+ (skorzystaj z podobnego opisu dotyczącego przemiany β^-).
6.  **Wskazówka:** Oceń każdą z poniższych hipotez:
 1. Na każdej linii stałej liczby masowej A (jest ona zaznaczona na [Rysunek 3.38: Tablica nuklidów z zaznaczeniem linii stałej wartości liczby masowej A](#) na stronie 195) znajduje się jeden izotop stabilny.
 2. Im dalej od ścieżki stabilności (patrz [Rysunek 3.39: Fragment tablicy nuklidów obejmujący fragment ścieżki stabilności](#) na stronie 196) leży izotop promieniotwórczy, tym czas jego połowicznego zaniku jest krótszy.
 3. Wśród stabilnych jąder widocznych na [Rysunek 3.39: Fragment tablicy nuklidów obejmujący fragment ścieżki stabilności](#) na stronie 196, najczęściej spotykane są takie, w których zarówno Z jak i N są parzyste. Rzadziej spotyka się jądra, w których jedna z tych liczb jest parzysta, a druga nieparzysta. Najrzadsze są jądra, w których obie liczby, Z i N , są nieparzyste.

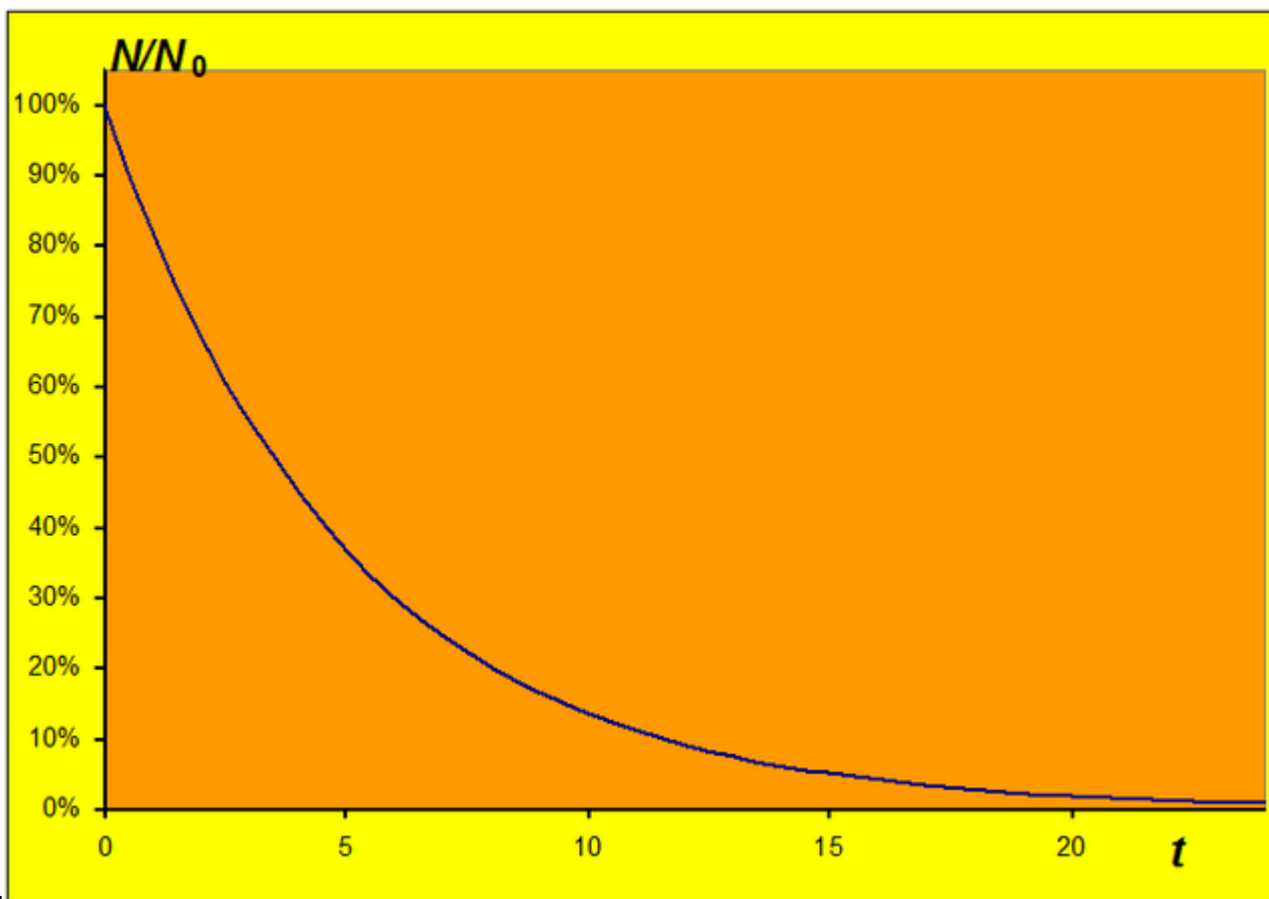
3.4 Prawo zaniku promieniotwórczego

Wyobraźmy sobie próbkę zawierającą początkowo N_0 jąder promieniotwórczych. Jądro promieniotwórcze – to takie, które może ulec przemianie (tutaj - przemianie α , bądź β). Oczywiście liczba N jąder pierwotnych w próbce, które nie ulegają przemianie maleje w czasie t .

Jak maleje liczebność próbki promieniotwórczej?

Doświadczalne badanie próbek promieniotwórczych jąder pokazuje, że liczba jąder N , które **nie uległy** przemianie po czasie t maleje według krzywej przedstawionej na wykresie - *Rysunek 3.43: Zależność czasowa liczebności próbki promieniotwórczej* na stronie 200.

Na osi rzędnych pokazano stosunek chwilowej liczebności próbki N do jej liczebności początkowej N_0 , wyrażony w procentach; na osi odciętych nie sprecyzowano jednostki



czasu

Rysunek 3.43: Zależność czasowa liczebności próbki promieniotwórczej

Wykres ten obrazuje prawo zaniku promieniotwórczego. Zwrócimy uwagę na cztery jego cechy. Trzy pierwsze są widoczne „gołym okiem”:

1. Zależność jest malejąca. Cecha ta jest oczywista: w miarę upływu czasu jakies jądra atomowe się rozpadają, natomiast nie ma powodu, by do próbki dołączały „nowe” jądra.
2. Wykres nie przebiega wzdłuż linii prostej - liczba promieniotwórczych jąder pozostałych w próbce maleje nieliniowo wraz z upływem czasu. Uzasadnienie tej cechy podamy w dalszej części paragrafu; tutaj stwierdzimy tylko, że związana jest ona ze statystycznym charakterem rozpadu jądra (procesu emisji cząstki α bądź β z wnętrza jądra).
3. Wykres nie osiąga wartości $N = 0$ po żadnym określonym, z góry przewidywalnym czasie. Mówimy, że liczebność próbki **dąży do zera asymptotycznie**. Ta właściwość prawa zaniku promieniotwórczego także wynika ze

statystycznego charakteru zjawiska - nie da się przewidzieć, po jakim czasie pojedyncze jądro atomowe ulegnie czekającej je przemianie.

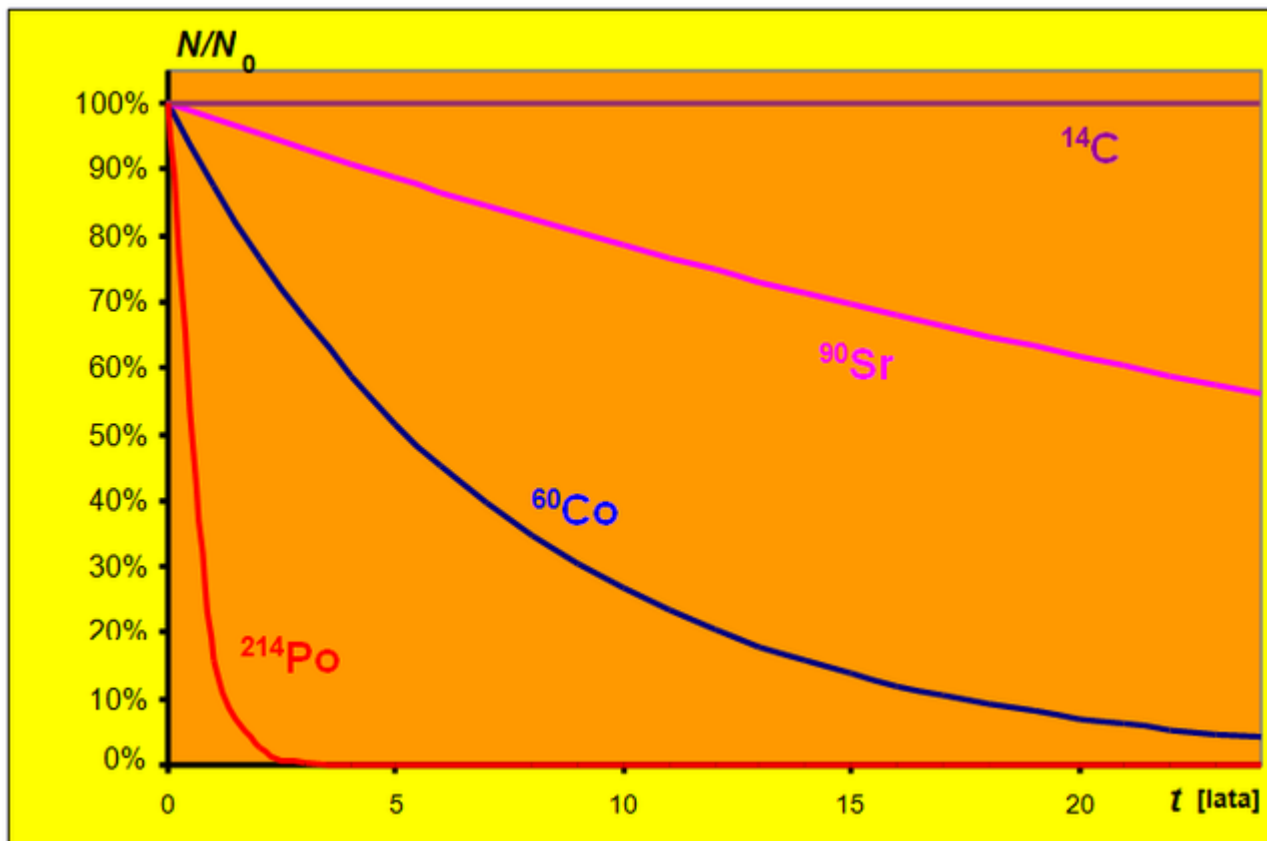
Gdybyśmy nawet potrafili śledzić losy **pojedynczego jądra** w takiej próbce, to nie umielibyśmy przewidzieć, w jakiej chwili jądro to ulegnie „czekającej” je przemianie. Wynika to z faktu, że emisja cząstki α czy β z wnętrza jądra jest dziełem przypadku: może nastąpić po sekundzie, godzinie, roku... . Mówimy, że proces emisji cząstki ma charakter statystyczny, zachodzi lub nie z określonym prawdopodobieństwem. Podobnie jest z wynikiem **pojedynczego rzutu monetą**: może ona upaść bądź „orłem” do góry, bądź „reszką” (każda z tych możliwości jest realizowana z prawdopodobieństwem 50%), ale wyniku pojedynczego rzutu nie da się jednoznacznie przewidzieć. Nie da się też przewidzieć, po ilu rzutach wreszcie uzyska się „orła”.

Jeśli jednak poprosimy **wiele osób** o jednoczesne wykonanie rzutu monetą, to możemy się spodziewać, że około połowa z nich uzyska „orła”. To oczekiwanie zostanie spełnione tym dokładniej, im więcej osób wykona taki rzut. Podobnie, jeśli będziemy obserwować liczebność **całej próbki jąder promieniotwórczych**, to stwierdzimy, że maleje ona w czasie według określonego „przepisu”, zwanego prawem zaniku promieniotwórczego.

Czwarta cecha wykresu związana jest ze skalą czasową wykresu. Przyjrzymy się teraz bliżej tej problematyce.

Skala czasowa zaniku próbki jąder promieniotwórczych

Promieniotwórcze jądra atomowe pierwiastków różnią się prawdopodobieństwem rozpadu. Jeśli więc wyodrębnimy kilka próbek jąder różnych pierwiastków promieniotwórczych (dla uproszczenia przyjmijmy, że początkowe liczebności jąder N_0 są jednakowe), to wykresy ich liczebności N w czasie nie będą się pokrywać, choć będą miały jednakowy „kształt”. Sytuacja taka jest przedstawiona na *Rysunek 3.44: Zależność czasowa liczebności czterech próbek promieniotwórczych* na stronie 201.



Rysunek 3.44: Zależność czasowa liczebności czterech próbek promieniotwórczych

Linią niebieską przedstawiliśmy zanik jąder izotopu kobaltu $^{60}_{27}\text{Co}$. Rozpoznamy w niej kształt z *Rysunek 3.43: Zależność czasowa liczebności próbki promieniotwórczej* na stronie 200.

Jądra izotopu polonu ${}^{214}_{84}\text{Po}$ charakteryzują się prawdopodobieństwem rozpadu ok. 14 razy większym niż jądra ${}^{60}_{27}\text{Co}$. Skutkiem tego jest znacznie szybszy zanik liczebności tej próbki: po około 3-4 latach spada ona - w skali wykresu - praktycznie do zera. Spadek ten jest tak szybki, że rozpoznanie charakterystycznego kształtu krzywej zaniku może wydawać się trudne.

Odwrotnie jest dla próbki jąder strontu ${}^{90}_{38}\text{Sr}$: prawdopodobieństwo ich rozpadu jest ponad pięć razy mniejsze niż jąder ${}^{60}_{27}\text{Co}$. W efekcie, zanik tej próbki jest znacznie wolniejszy; odnosimy wręcz wrażenie, że w skali dwudziestu kilku lat zanik ten jest jednostajny, choć uważne spojrzenie na wykres pozwala zauważyć nieliniowy jego charakter. Wreszcie ostatni izotop, ${}^{14}_6\text{C}$, którego jądra mają prawdopodobieństwo rozpadu ok. 1000 razy mniejsze niż jądra ${}^{60}_{27}\text{Co}$. Tu widzimy, że w skali wykresu liczebność próbki praktycznie nie ulega zmianie - wnioskujemy, że upływ 20-30 lat w ogóle nie pozwala na zauważenie zaniku próbki.

Podsumujmy tę część rozważań następującym stwierdzeniem: dla każdego izotopu promieniotwórczego należy dobrać właściwą skalę czasu, w którym obserwowany jest zanik próbki. Skala ta związana jest z prawdopodobieństwem zajścia przemiany dla tego izotopu. W naszym przykładzie, dogodnymi skalami czasowymi są: dla ${}^{214}_{84}\text{Po}$ ok. 2 lata, dla ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ok. 30 lat, dla ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ ok. 100-200 lat zaś dla ${}^{14}_6\text{C}$ raczej dziesiątki tysięcy lat.

Wskazówka: Warto wiedzieć, że rozpiętość właściwych skal czasowych dla znanych izotopów promieniotwórczych jest ogromna. Obejmuje ona 28 rzędów wielkości i rozciąga się od nanosekund ($1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ s}$) do setek miliardów lat (przypomnijmy, że wiek Wszechświata szacuje się na kilkanaście miliardów lat, a 300 miliardów lat to ok. 10^{19} s).

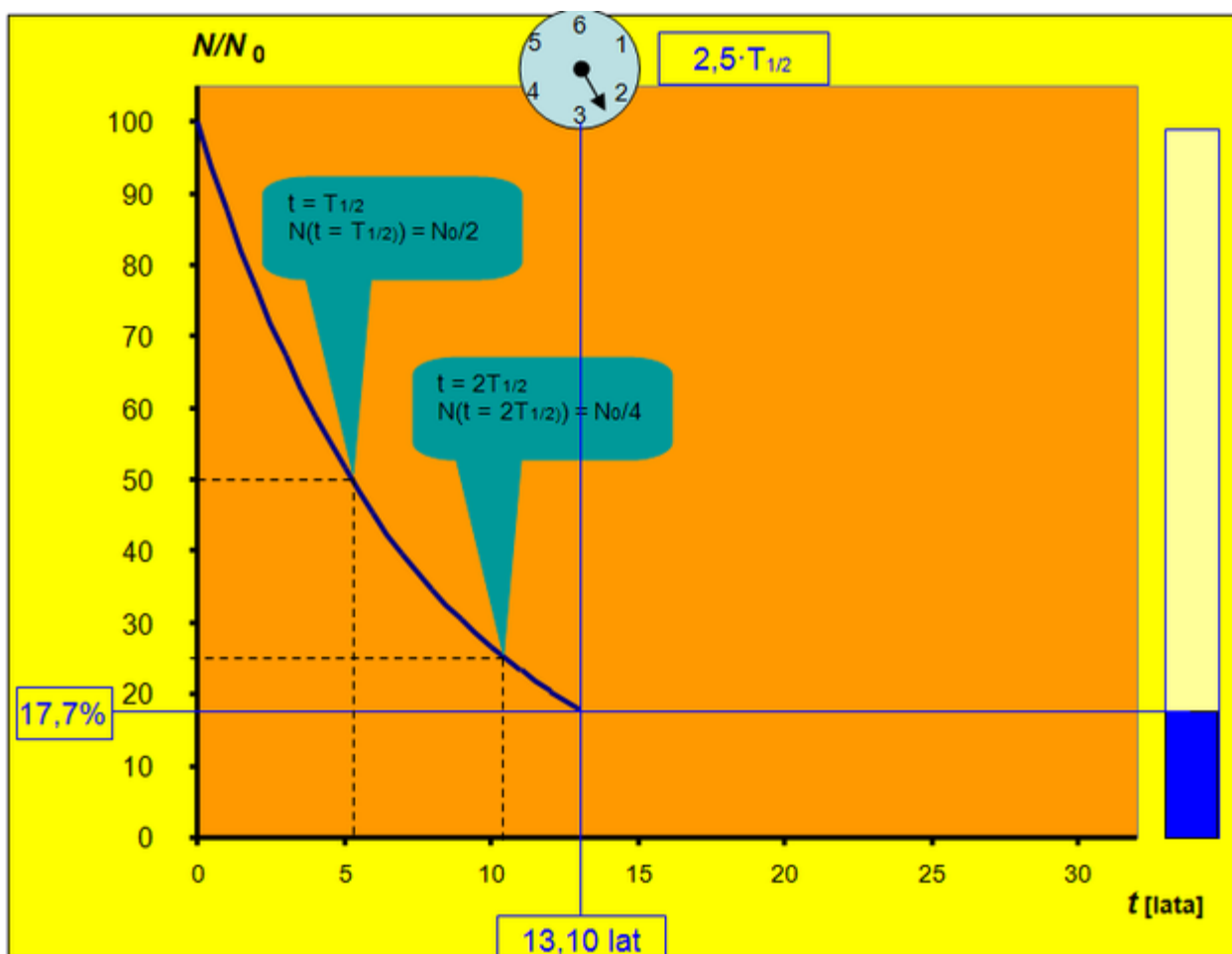
Czas połowicznego zaniku próbek jąder promieniotwórczych

Prawo zaniku promieniotwórczego ma charakterystyczną cechę: pozwala ono wyróżnić charakterystyczny czas, zwany *czasem połowicznego zaniku* liczebności próbki (także okresem połowicznego rozpadu próbki). Jest to czas, po upływie którego liczebność próbki maleje dwukrotnie. Oznaczamy go symbolem $T_{1/2}$; jest on wielkością charakteryzującą dany izotop promieniotwórczy.

Wskazówka:

W nazwie „czas połowicznego zaniku” tkwi rodzaj pułapki. Można byłoby przypuszczać, że kiedy miną dwa okresy połowicznego rozpadu tj. po czasie równym $2T_{1/2}$, rozpadną się wszystkie jądra. Nie jest to jednak prawda. Kiedy bowiem drugi raz zaczynamy liczyć czas, to w próbce jest już tylko połowa z początkowej liczby jąder promieniotwórczych. W czasie drugiego okresu rozpadnie się więc połowa, ale z tej połowy, czyli jedna czwarta początkowej liczby jąder, a jedna czwarta pozostanie nadal promieniotwórcza. Jeśli liczyć będziemy czas po raz trzeci, to rozpadnie się połowa z tej jednej czwartej, czyli jedna ósma pozostanie promieniotwórcza itd.

Przedstawimy to na przykładzie izotopu ${}^{60}_{27}\text{Co}$, którego $T_{1/2} \approx 5,24$ lata. Uruchom animację - przekonasz się, że czas połowicznego zaniku pozwala przewidywać liczebność próbki.



Rysunek 3.45: Animacja wykresu $N/N_0(t)$

Przykład: Ile jąder pozostanie w próbce

Zastanówmy się, jaka część początkowej liczby jąder pozostanie promieniotwórcza po pięciu okresach połowicznego zaniku.

Rozwiązanie: Zauważ, że jedna czwarta, to $1/2^2$, jedna ósma, to $1/2^3$ itd. Po pięciu okresach w próbce pozostanie więc $1/2^5$, czyli $1/32$ początkowej liczby jąder. Oznacza to, że stosunek N/N_0 po upływie czasu $T = T_{1/2}$ wynosi 3,125 %.

Posiłkując się tym wynikiem zapytajmy teraz bardziej ogólnie: ile jąder promieniotwórczych pozostanie w próbce po n okresach, jeśli początkowa liczba jąder była N_0 ? Nietrudno odpowiedzieć, że po n okresach pozostanie w próbce liczba jąder promieniotwórczych dana wzorem:

$$(\text{wzór 191}) \quad N_n = N_0 \cdot \frac{1}{2^n}$$

Wzór ten pozwala przewidzieć liczebność próbki w dowolnej chwili t . Wystarczy zauważyć, że liczba okresów połowicznego rozpadu n , to po prostu stosunek $t/T_{1/2}$, gdzie t jest czasem obserwacji. Czas ten niekoniecznie musi być równy całkowitej wielokrotności czasu połowicznego rozpadu, więc n niekoniecznie musi być liczbą całkowitą.

Badania rzeczywistych próbek jąder promieniotwórczych pokazują, że liczebność takich próbek zmienia się zgodnie z wykresem na [Rysunek 3.43: Zależność czasowa liczebności próbki promieniotwórczej](#) na stronie 200 i zależnością ([wzór 191](#) na stronie 203). W następnym paragrafie przedstawimy i omówimy doświadczenie, którego przebieg jest uwarunkowany prawdopodobieństwem, podobnie jak rozpad jąder promieniotwórczych.

W przyrodzie występują różne izotopy promieniotwórcze, których czasy połowicznego zaniku zawierają się w bardzo szerokim zakresie: od nanosekund do miliardów lat. W tabeli ujęto kilka przykładowych izotopów, dla których podano czasy połowicznego ich zaniku wraz z kanałem rozpadu oraz wybrane o nich informacje.

Izotop	$T_{1/2}$, rozpad	Warto wiedzieć
^{14}C	5730 lat; β^-	produkowany w górnych warstwach atmosfery ziemskiej, stosowany do datowania radiowęglowego w skali archeologicznej
^{238}U	4,5 miliarda lat; α	wykryto na jego przykładzie zjawisko promieniotwórczości naturalnej; stosowany do datowania w skali geologicznej
^{214}Po	139 dni; α	najtrwalszy izotop polonu, odkryty przez Marię Skłodowską-Curie (wraz z radem ^{226}Ra) jako jeden z produktów przemiany ^{238}U
^{235}U	700 milionów lat; α	jest używany jako paliwo w reaktorach jądrowych i bombie atomowej
^3H	12,3 lat; β^-	stosowany do znakowania związków chemicznych i jako paliwo w reaktorze termojądrowym i bombie wodorowej
^{60}Co	5,3 lat; β^- ; 2γ	stosowany w radioterapii, przy sterylizacji żywności, do radiografii strukturalnej
^{90}Sr	28,8 lat; β^-	produkt rozszczepiania ^{235}U w bombie atomowej, niebezpieczny ze względu na możliwość gromadzenia się w tkance kostnej

Rysunek 3.46: Tabela - czasy połowicznego zaniku

„Naturalny zegar promieniotwórczy”. Datowanie izotopowe

Prawo rozpadu promieniotwórczego jest jak zegar, który tyka z czasem równym okresowi połowicznego rozpadu. Jednym z bardziej znanych praktycznych zastosowań tego zaniku promieniotwórczego to datowanie. Jest to metoda oznaczania wieku minerałów lub przedmiotów pochodzących z odległych okresów historycznych bądź prehistorycznych tj. odnoszących się do czasów liczonych w tysiącach, milionach a nawet miliardach lat. Jest ona stosowana m. in. przez historyków, archeologów i geologów. Datowanie izotopowe polega, w najprostszym ujęciu, na porównaniu koncentracji w badanej próbce wybranych izotopów promieniotwórczych w stosunku do izotopów stabilnych.

Każdy niemal słyszał o możliwości wyznaczenia wieku szczątków organicznych, np. roślin lub zwierząt, które żyły na Ziemi w okresie od kilkuset do kilkudziesięciu tysięcy lat temu. W metodzie tej wykorzystuje się promieniotwórczy izotop węgla ^{14}C , którego okres połowicznego rozpadu wynosi 5 730 lat.

zobacz więcej: http://pl.wikipedia.org/wiki/Ca%C5%82un_Tury%C5%84ska 

Rysunek 3.47: Wiek słynnego całunu turyńskiego był także badany metodą węgla ^{14}C

Węgiel jest jednym z podstawowych pierwiastków w organizmach żywych. Najczęściej jest to stabilny izotop węgla ^{12}C , ale w przyrodzie występuje też, choć w bardzo małych ilościach, promieniotwórczy izotop ^{14}C . Kiedy organizm żyje, to następuje w nim stale wymiana materii z otoczeniem i stosunek ilości izotopu węgla ^{14}C do ilości izotopu ^{12}C jest taki, jak w atmosferze. Kiedy jednak organizm żyć przestaje, zmniejsza się w nim ilość promieniotwórczego izotopu ^{14}C zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego. Wykonując pomiar rozpadów promieniotwórczych w szczątkach organizmów żywych można wyznaczyć jak zmienił się ten stosunek, a wykorzystując znaną wartość czasu połowicznego zaniku izotopu ^{14}C , ocenić wiek badanych szczątków.

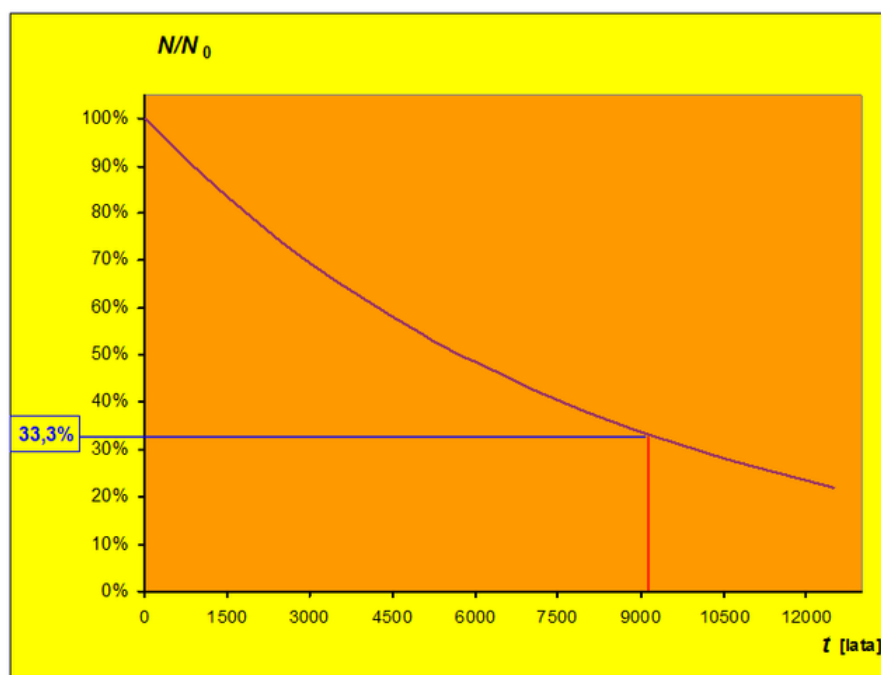
❗ **Wskazówka:** Pojawia się przy tym ciekawy problem: czy zawartość izotopu ^{14}C w atmosferze jest stała? Z jednej strony wiemy przecież, że ulega on rozpadowi promieniotwórczemu. Z drugiej strony, jeśli opisana

metoda ma dawać wiarygodne wyniki, to musimy przyjąć, że znana dzisiaj procentowa zawartość ${}^6_{14}\text{C}$ w atmosferze jest taka sama, jaka była wtedy, gdy badane szczątki przestały wymieniać materię organiczną z otoczeniem. Rozstrzygnięcie tego problemu podamy w następnym paragrafie, poświęconym reakcjom jądrowym.

Zastanówmy się, jak można to osiągnąć. Wzór ([wzór 191](#) na stronie 203) pozwala obliczyć liczebność próbki N po czasie t , gdy znamy początkową liczebność N_0 oraz czas połowicznego zaniku $T_{1/2}$. Dokonajmy jednak prostego „zabiegu”: zamieńmy wielkość szukaną w tym wzorze (N) na daną, a w zamian niech będzie szukany czas t . Wtedy mamy zadanie takie: „Określ czas t , jaki upłynął od chwili, gdy liczebność próbki wynosiła N_0 , jeśli znasz N_0 oraz N - jej liczebność obecną (czyli w chwili t). Dany jest także czas połowicznego zaniku $T_{1/2}$ tej próbki”. To zadanie trzeba rozwiązać.

Przykład

Stwierdzono, że próbka materii organicznej pobrana ze znalezionej podczas wykopalisk kawałka drewna zawiera trzy razy mniej izotopu ${}^6_{14}\text{C}$ (w porównaniu z izotopem ${}^6_{12}\text{C}$) niż w czasach współczesnych. Na podstawie wykresu z [Rysunek 3.48: Zależność czasowa zawartości izotopu \${}^6_{14}\text{C}\$ we fragmencie drewna](#) na stronie 205 oceń wiek artefaktu. Czasu połowicznego zaniku węgla ${}^6_{14}\text{C}$ $T_{1/2} = 5730$ lat.



Rysunek 3.48: Zależność czasowa zawartości izotopu ${}^6_{14}\text{C}$ we fragmencie drewna

Rozwiązanie Przyjmijmy, że zawartość ${}^6_{14}\text{C}$ w drzewie, które posłużyło do wykonania znalezionej fragmentu, w chwili jego ścięcia dawno temu, to umownie 100% na wykresie na [Rysunek 3.48: Zależność czasowa zawartości izotopu \${}^6_{14}\text{C}\$ we fragmencie drewna](#) na stronie 205. W chwili obecnej zawartość ta zmalała trzykrotnie, więc osiągnęła poziom 33,3% poziomu początkowego. Prowadzimy więc na wykresie poziomą linię (niebieską), odpowiadającą 33,3% na osi rzędnych i szukamy jej przecięcia z wykresem. Z tego punktu prowadzimy pionową linię (czerwoną) i odczytujemy z osi odciętych, że wiek artefaktu wynosi nieco ponad 9000 lat.



Wskazówka:

Umiejętność posługiwania się logarytmami pozwala obliczyć czas t . Przekształćmy wzór (wzór 191 na stronie 203).

$$(\text{wzór 192}) N_n = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = N_0 \cdot (2)^{-n}$$

$$(\text{wzór 193}) (2)^{-n} = \frac{N_n}{N_0}$$

$$(\text{wzór 194}) -n = \log_2\left(\frac{N_n}{N_0}\right)$$

W ostatnim przekształceniu wykorzystaliśmy logarytm przy podstawie 2. Szukana wartość n wynosi więc:

$$(\text{wzór 195}) n = -\log_2\left(\frac{1}{3}\right) = \log_2(3) \approx 1,585$$

a szukany czas $t \approx 1,585 \cdot T_{1/2} = 1,585 \cdot 5730 \text{ lat} \approx 9082 \text{ lata}$, co doskonale zgadza się z wartością odczytaną z wykresu.



Wskazówka:

Prawo zaniku promieniotwórczego jest funkcją wykładniczą, najczęściej wyrażaną w postaci:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Prawo to jest przykładem „**poezji fizyki**”. Poeta z pomocą kilku wierszy potrafi ukazać głębię uczuć, piękna, strachu czy nadziei. W fizyce jedno prawo wyrażone prostym wzorem matematycznym potrafi opisać efekty w mechanice, akustyce, optyce, elektryczności itd. Takie jest właśnie prawo zaniku promieniotwórczego. Ten sam typ wzoru opisuje procesy relaksacyjne w wielu działach fizyki np.: zanik amplitudy drgań sprężyny, wyciszanie głosu struny w instrumentach muzycznych, ochładzanie się cieczy pozostawionej w niższej temperaturze, rozładowanie się kondensatora w obwodach elektrycznych i wiele innych zjawisk; także w dziedzinie chemii, biologii, a nawet nauk społecznych.

Nabycie umiejętności dostrzeżenia piękna i elegancji w prostym, jednolitym opisie matematycznym ogromnej różnorodności przyrody, zgodnie z maksymą *e pluribus unum* (łac. *jedno z wielu*), jest zaiste warte wielu wysiłków; dlatego zachęcamy wszystkich, by przeczytali cały rozdział do końca.

Komputerowe modelowanie zaniku promieniotwórczego (rozszerzenie wiadomości dla uczniów zainteresowanych fizyką)

Naturalne przemiany promieniotwórcze zachodzą spontanicznie, bez ingerencji zewnętrznych, w sposób losowy. Nie potrafimy przewidzieć, czy dane jądro rozpadnie się w określonym odcinku czasu, czy też nie. By więc opisać rozpad promieniotwórczy musimy posłużyć się pojęciem prawdopodobieństwa, które najlepiej jest zdefiniować dla licznej próbki.

Obserwujemy próbkę jąder promieniotwórczych, powiedzmy izotopu kobaltu ${}^{60}_{27}\text{Co}$, o pewnej liczebności N ; stwierdzamy, po czasie Δt , że liczebność próbki zmalała do N' . Możemy wtedy powiedzieć, że prawdopodobieństwo p rozpadu pojedynczego jądra kobaltu jest ilorazem liczby jąder $|\Delta N|$, które się rozpadły do liczby jąder N , które miały taką możliwość:

$$(\text{wzór 196}) p = \frac{|\Delta N|}{N}$$

W tym wzorze ΔN jest liczbą ujemną, gdyż oznacza różnicę pomiędzy końcową liczebnością próbki N' a jej liczebnością początkową N :

$$(\text{wzór 197}) \Delta N = N' - N$$



Wskazówka:

Wielkość p rzeczywiście ma wszelkie cechy prawdopodobieństwa p . Przekonuje nas o tym analiza wzoru (wzór 196 na stronie 206) w przekształconej formie:

$$(\text{wzór 198}) \quad p = \frac{|N' - N|}{N}$$

Prawdopodobieństwo uzyskania „sukcesu” jest stosunkiem liczby przypadków (prób), w których odniesiono umowy „sukces”, do wszystkich przypadków, w których ten sukces mógł zostać odniesiony.

Tak zdefiniowane prawdopodobieństwo nie odzwierciedla, niestety, w sposób jednoznaczny właściwości jąder ${}^{60}_{27}\text{Co}$ stanowiących naszą próbkę. Wynika to z faktu, że zależy ono od arbitralnie ustalonego odcinka czasu Δt , po którym określamy liczebność N' . Przyjęto wobec tego zasadę przedstawiania prawdopodobieństwa p w postaci iloczynu:

$$(\text{wzór 199}) \quad p = \lambda \cdot \Delta t$$

w którym λ określa jednoznacznie właściwości jąder ${}^{60}_{27}\text{Co}$. Wielkość tę nazywamy *stałą rozpadu promieniotwórczego* - każdy niestabilny izotop, podlegający którejkolwiek z poznanych przez nas przemian promieniotwórczych, charakteryzuje się określoną wartością λ . Z kolei taki zapis narzuca warunek na odcinek czasu Δt : musi on być na tyle krótki, by zachować warunek $p < 1$. Dla potrzeb takich, jak komputerowe doświadczenie, które przedstawimy w dalszym ciągu tego paragrafu, przyjmujemy wartości Δt możliwie małe.

Z powyższego zapisu wynika także, że wielkość λ jest mianowana: $[\lambda] = \text{s}^{-1}$. Jednostce tej nie nadajemy jednak nazwy „Herc”, gdyż samo zjawisko rozpadu promieniotwórczego nie ma bezpośrednio charakteru okresowego. Nasz przykładowy izotop ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ma $\lambda \approx 0,13 \text{ 1/rok}$.

Połączenie wzorów (wzór 196 na stronie 206) i (wzór 199 na stronie 207) daje nam matematyczny przepis na śledzenie zmian liczebności próbki promieniotwórczej - w jednakowych (możliwie krótkich) odcinkach czasu Δt liczebność ta zmienia się (maleje) o ΔN dane wzorem:

$$(\text{wzór 200}) \quad \Delta N = -\lambda \cdot N \cdot \Delta t$$

Należy jednak pamiętać, że we wzorze tym wielkość N nie jest stała! Po każdym odcinku czasu jej wartość maleje, więc ubytki ΔN nie są jednakowe.

Przeprowadzimy „doświadczenie komputerowe” symulujące rozpad wirtualnej próbki jąder promieniotwórczych zgodnie ze wzorem (wzór 200 na stronie 207). Do tego doświadczenia przyjmujemy następujące założenia:

1. Początkowa liczebność próbki $N_0 = 4 \ 000$.
2. Będziemy obserwować liczebność próbki w umownych odstępach czasu $\Delta t = 1 \text{ s}$.
3. Przyjmujemy, że prawdopodobieństwo zajścia rozpadu pojedynczego jądra w jednosekundowym odstępie czasu wynosi 0,1. Oznacza to, że każde z jąder rozpada się w tym czasie z prawdopodobieństwem 10%.
4. Jeśli jądro nie ulegnie rozpadowi, to prawdopodobieństwo jego rozpadu w następnym odstępie czasu Δt pozostaje stałe i nadal wynosi 10%.

Tabela (*Rysunek 3.49: Wyniki wirtualnego doświadczenia* na stronie 208) obrazuje wynik takiego wirtualnego doświadczenia (dla uproszczenia podano jedynie kilka pierwszych wierszy tabeli), uzyskanego w arkuszu kalkulacyjnym. W każdym jej wierszu pokazano czas, liczbę jąder, które nie uległy rozpadowi do tego czasu oraz liczbę jąder ΔN , które ulegają rozpadowi w kolejnym odstępie czasu $\Delta t = 1 \text{ s}$; liczbę tę obliczono zgodnie ze wzorem (wzór 200 na stronie 207):

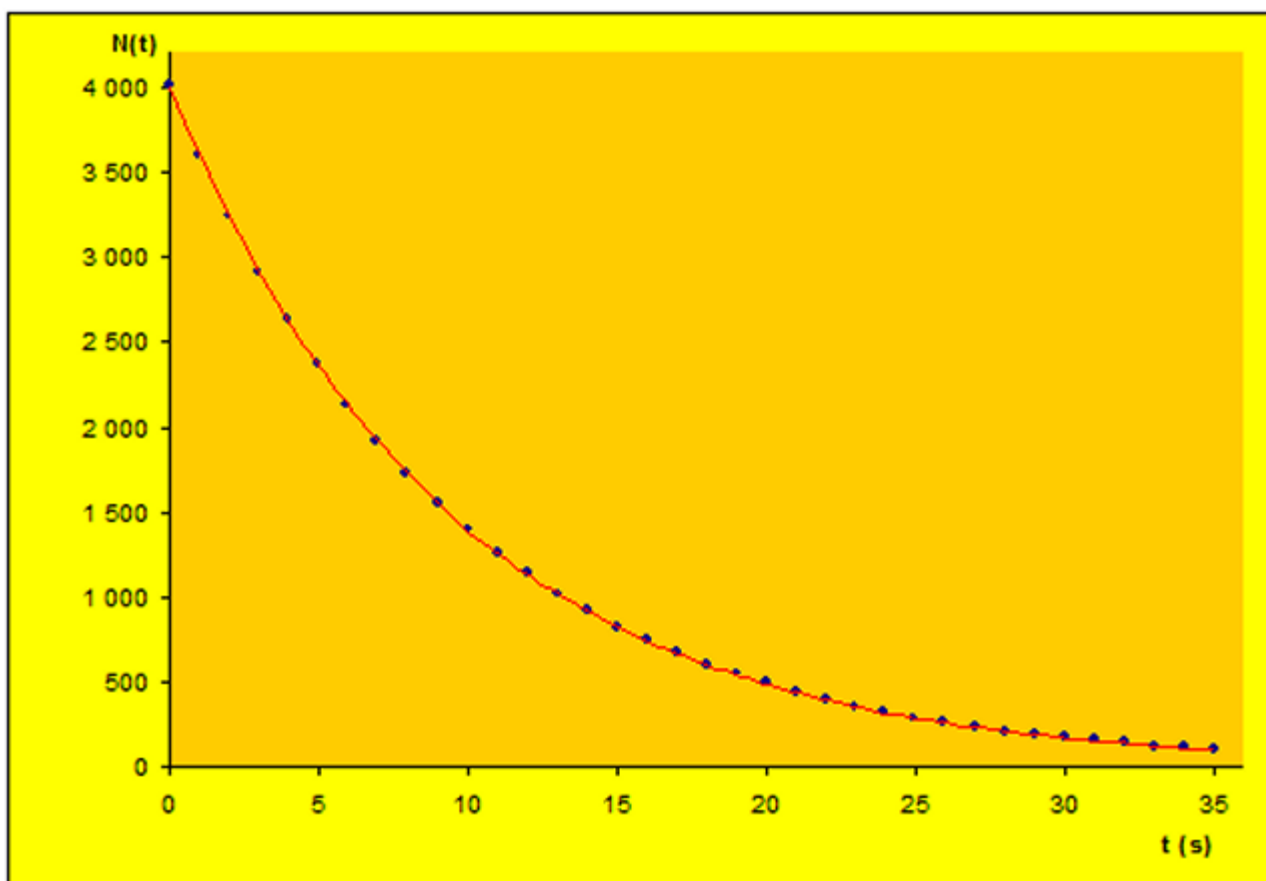
$$(\text{wzór 201}) \quad |\Delta N| = \lambda \cdot \Delta t \cdot N$$

Zwróćmy uwagę, że ΔN stanowi zawsze 10% aktualnej wartości N (zaokrąglone do liczby całkowitej). W każdym kolejnym wierszu czas zostaje powiększony o Δt , zaś liczebność N zostaje pomniejszona o ΔN z poprzedniego wiersza.

t (s)	N	$ \Delta N $
0	4 000	400
1	3 600	360
2	3 240	324
3	2 916	292
4	2 624	262
5	2 362	236
6	2 126	213
7	1 913	191
...

Rysunek 3.49: Wyniki wirtualnego doświadczenia

Rysunek 3.50: Zależność czasowa liczby N jąder próbki promieniotwórczej, które nie uległy rozpadowi do czasu t na stronie 209 pokazuje wykres uzyskanej zależności $N(t)$. Ma ona wszystkie cechy prawa zaniku promieniotwórczego, o których wspominaliśmy wcześniej w tym rozdziale.



Rysunek 3.50: Zależność czasowa liczby N jąder próbki promieniotwórczej, które nie uległy rozpadowi do czasu t

! **Wskazówka:**

Czas połowicznego zaniku jest bezpośrednio związany ze stałą rozpadu λ wzorem, w którym występują logarytmy (wyprowadzenie tego związku znajdziesz w dalszej części tego rozdziału):

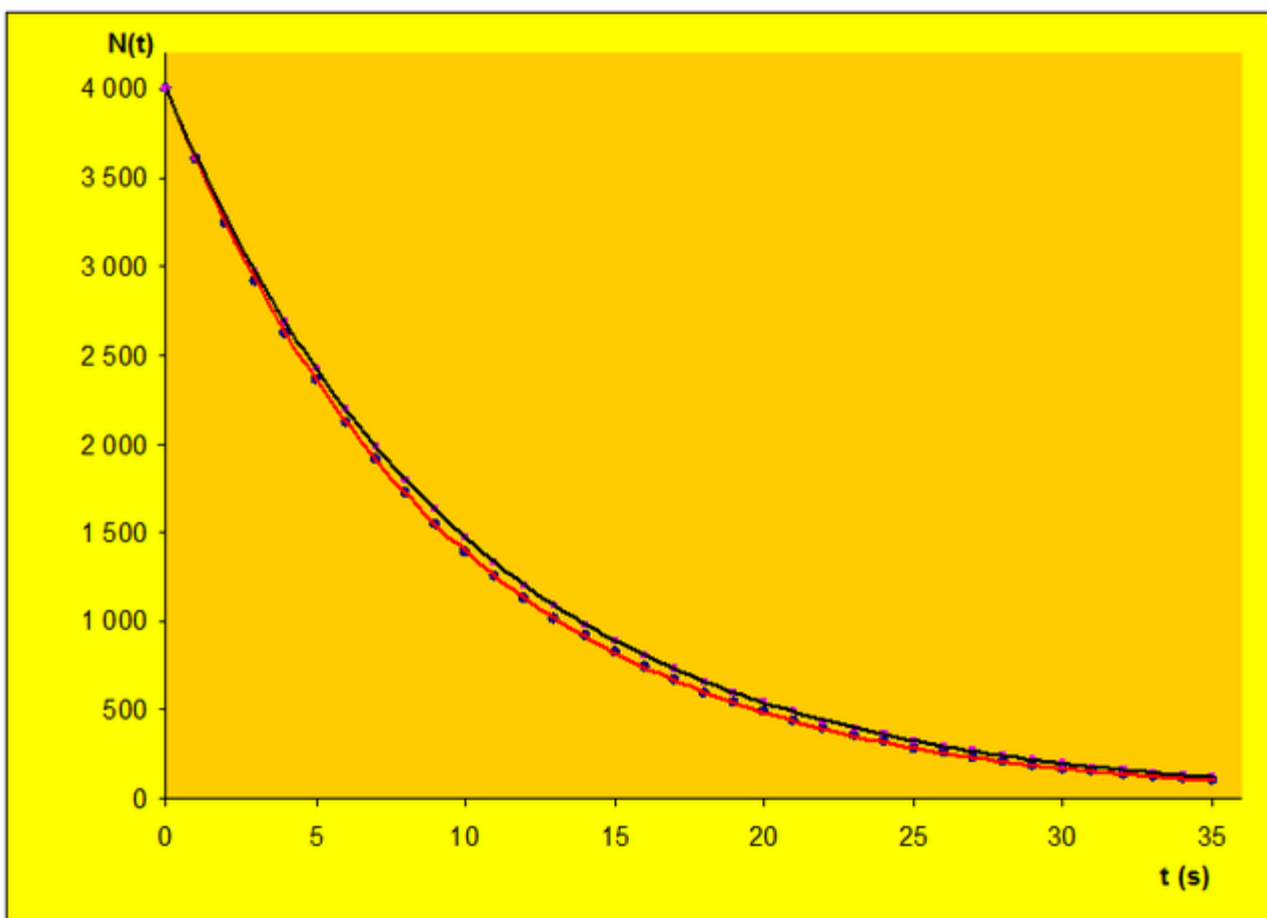
$$(\text{wzór 202}) T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Ponieważ $\ln(2) \approx 0,69$ a $\lambda = 0,1 \text{ 1/s}$, więc w naszej symulacji komputerowej uzyskaliśmy $T_{1/2}$ nieco poniżej siedmiu sekund.

Na koniec pokażemy, że uzyskany w komputerowym doświadczeniu wykres jest w dobrym przybliżeniu z wykresem uzyskanym z funkcji danej wzorem (*wzór 191* na stronie 203):

$$(\text{wzór 203}) N_n = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

w którym podstawimy za n iloraz $t/T_{1/2}$. *Rysunek 3.51: Porównanie zależności $N(t)$ uzyskanej w symulacji komputerowej (linia czerwona) z zależnością dokładną (linia czarna) uzyskaną z prawa zaniku promieniotwórczego* na stronie 210 przedstawia oba wykresy. Odstępstwa pomiędzy nimi wynikają z przybliżonego charakteru naszej symulacji komputerowej, w której przyjęliśmy jednosekundowe odstępy czasowe dla określania kolejnych wartości liczebności próbki. Im krótszy czas Δt zostałby w niej przyjęty, tym wykres czerwony (przybliżony) bardziej zbliżyłby się do wykresu czarnego (dokładnego).



Rysunek 3.51: Porównanie zależności $N(t)$ uzyskanej w symulacji komputerowej (linia czerwona) z zależnością dokładną (linia czarna) uzyskaną z prawa zaniku promieniotwórczego

Wyprowadzenie prawa zaniku promieniotwórczego (materiał nadobowiązkowy)

Wyprowadzimy prawo rozpadu promieniotwórczego, wychodząc z ogólnych przesłanek i przyjmując całkowicie przypadkowy charakter promieniotwórczości jąder.

Przyjmijmy zatem, że rozpad promieniotwórczy danego jądra zachodzi zupełnie przypadkowo. Załóżmy także, że prawdopodobieństwo rozpadu jest stałe w czasie, tzn. zawsze po określonym odcinku czasu liczba jąder zanika jednakowo, np. po określonym czasie $T_{1/2}$, (tzw. okresie połowicznego rozpadu) zanika do połowy, po czym znowu do połowy itd.

Oznaczmy początkową liczbę jąder przez N_0

Po czasie $t = T_{1/2}$ będzie ich $N_1 = \frac{N_0}{2}$, czyli

po czasie $t = T_{1/2}$: $\frac{N_1}{N_0} = \frac{1}{2}$.

Po czasie $t = 2T_{1/2}$ będzie ich $N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4}$, czyli

po czasie $t = 2T_{1/2}$: $\frac{N_2}{N_0} = \frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$.

Po następnym odcinku czasu $T_{1/2}$ ich liczba jeszcze raz zmniejszy się o połowę, czyli łącznie po czasie $t = 3T_{1/2}$ będzie ich $\frac{N_3}{N_0} = \frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3$ itd.

Widzimy, że po czasie $t = nT_{1/2}$ ich liczba zmniejsza się według wzoru:

$$(\text{wzór 204}) \frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

Uogólnijmy ten wzór. Najpierw zauważmy, że $n = \frac{t}{T_{1/2}}$ i dla dowolnego czasu t mamy zależność:

$$(\text{wzór 205}) \frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Stąd

$$(\text{wzór 206}) N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Otrzymaliśmy wzór - równoważny wzorowi ([wzór 191](#) na stronie 203) - określający prawo rozpadu promieniotwórczego wyrażone za pomocą okresu połowicznego rozpadu $T_{1/2}$.

Aby uzyskać wzór w postaci postaci wykładniczej, należy przekształcić ([wzór 206](#) na stronie 211) w następujący sposób. Najpierw logarytmujemy obustronnie równość ([wzór 206](#) na stronie 211)

$$(\text{wzór 207}) \ln \frac{N}{N_0} = \ln \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

stąd

$$(\text{wzór 208}) \ln \frac{N}{N_0} = \frac{t}{T_{1/2}} \ln \left(\frac{1}{2}\right)$$

Zatem

$$(\text{wzór 209}) \ln \frac{N}{N_0} = -t \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2}}\right)$$

Oznaczmy wyrażenie w nawiasie przez λ :

$$(\text{wzór 210}) \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

(λ – tzw. stała rozpadu promieniotwórczego). Otrzymamy, że

$$(\text{wzór 211}) \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

Funkcją odwrotną do logarytmu naturalnego jest funkcja wykładnicza, więc


$$(\text{wzór 212}) \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

Stąd ostateczna postać prawa rozpadu promieniotwórczego:

$$(\text{wzór 213}) N = N_0 e^{-\lambda t}$$

gdzie: $e = 2,7183\dots$ – podstawa logarytmu naturalnego, λ – stała rozpadu; jej wartość jest charakterystyczna dla danego pierwiastka promieniotwórczego, N_0 – liczba jąder pierwotnych w chwili $t = 0$, N – liczba jąder pierwotnych po czasie t .

Pytania i problemy

1. W podsumowaniu pod *Rysunek 3.44: Zależność czasowa liczebności czterech próbek promieniotwórczych* na stronie 201 podano orientacyjne skale czasowe, dogodnie do przedstawiania zaniku czterech izotopów promieniotwórczych. Uzasadnij, że są one związane z prawdopodobieństwami zajścia przemiany dla tych izotopów. Skorzystaj z informacji w tekście bezpośrednio pod *Rysunek 3.44: Zależność czasowa liczebności czterech próbek promieniotwórczych* na stronie 201.
2. zilustruj graficznie fakt, że czas połowicznego zaniku nie musi być liczony od chwili zero. Wydrukuj wykres na *Rysunek 3.43: Zależność czasowa liczebności próbki promieniotwórczej* na stronie 200 i zaznacz na nim odcinek odpowiadający $T_{1/2}$ liczony od początku obserwacji. Następnie pokaż, przykładowo, że od chwili osiągnięcia liczebności na poziomie 80% do chwili osiągnięcia 40% także mija $T_{1/2}$.
3. Uzupełnij wydrukowany wykres z *Rysunek 3.43: Zależność czasowa liczebności próbki promieniotwórczej* na stronie 200 o linie obrazujące zanik próbki promieniotwórczej o czasie połowicznego zaniku dwa razy krótszym oraz dwa razy dłuższym niż pokazano na wykresie.
4. W wykopaliskach pod Kaliszem znaleziono fragment drewnianej palisady. Poddano go datowaniu metodą radiowęglową i stwierdzono, że zawartość w nim izotopu ^{14}C stanowi $\frac{3}{4}$ zawartości oryginalnej. Oceń na tej podstawie, czy ta palisada mogła powstać za panowania pierwszych Piastów.
5.  **Wskazówka:** Uczeń stwierdził, że skoro po czasie połowicznego zaniku rozpada się połowa początkowej zawartości próbki promieniotwórczej, to po czasie równym połowie $T_{1/2}$ powinna się rozpaść jedna czwarta zawartości próbki. Oceń, czy teza ta jest prawdziwa; uzasadnij swoją ocenę.
6. Przedstaw, w możliwie ogólnym ujęciu, pojęcie stałej rozpadu promieniotwórczego λ .
7. Wydrukuj wykres 5. (*Rysunek 3.50: Zależność czasowa liczby N jąder próbki promieniotwórczej, które nie uległy rozpadowi do czasu t* na stronie 209) i zaznacz na nim odcinek odpowiadający $T_{1/2}$, liczony od początku obserwacji. Następnie pokaż, że kolejnym odcinkom $T_{1/2}$ odpowiadają połówkowe zaniki liczebności próbki.

3.5 Doświadczenia "Radiacja"

Wykonamy teraz dwa doświadczenia, które na pozór mają niewiele wspólnego z fizyką jądrową: zbadamy losowe zjawisko przewracania się kapsli oraz zjawisko stygnięcia wody. Okaże się, że uzyskane w tych doświadczeniach wyniki mają wspólny opis matematyczny, tożsamy z prawem zaniku promieniotwórczego. Dzieje się tak dlatego, że te trzy różne w swej istocie zjawiska podlegają takiemu samemu prawu statystycznemu. Każdy opis matematyczny zjawiska musi opierać się na określonym prawie fizycznym. Oczekujemy od Ciebie, abyś w sprawozdaniach z tych doświadczeń napisał, **jakie to prawo statystyczne jest wspólne dla tych trzech różnych zjawisk**.

Przeprowadzenie tych doświadczeń pozwoli nam lepiej zrozumieć prawo zaniku promieniotwórczego próbki promieniotwórczych jąder atomowych oraz powiązane z nim pojęcie czasu połowicznego zaniku, poznane w rozdziale *3.4 Prawo zaniku promieniotwórczego* na stronie 200.

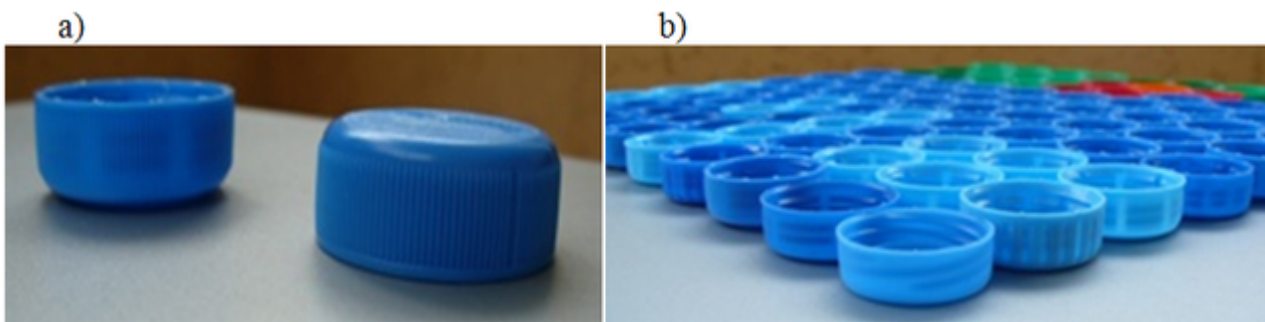
Przekonamy się wreszcie, że przebieg wszystkich tych procesów zachodzi według takiego samego prawa wykładniczego, którego wyprowadzenie podaliśmy w dodatku do poprzedniego paragrafie, przeznaczonego dla uczniów szczególnie zainteresowanych matematyką.

„Prawo promieniowania” a statystyczny zanik ilości nieodwróconych kapsli

Do przeprowadzenia doświadczenia potrzebne jest około stu jednakowych kapsli (nakrętek po napojach). Stanowią one „próbkę” obiektów, mogących się „przemienić” - tutaj: odwrócić dnem do góry.

Kapsle ułóż na desce dnem do dołu (*Rysunek 3.52: Kapsle - niezbędne elementy doświadczenia* na stronie 213b.). Przygotuj wolny obszar podłogi o rozmiarze rzędu metr na metr; obszar ten warto odgrodzić, by kapsle nie uciekały zbyt daleko.

Wysyp „z impetem” kapsle z deski na podłogę. Następnie zbierz kapsle z podłogi, odkładając z powrotem na deskę tylko te, które upadły dnem do dołu; należy je policzyć i zapisać ich liczbę N_i . Te zaś kapsle, które się odwróciły i upadły dnem do góry (*Rysunek 3.52: Kapsle - niezbędne elementy doświadczenia* na stronie 213a), odłóż na bok - uznajemy, że „wypromieniowały” one z próbki.



a) Kapsel nieodwrócony i odwrócony, b) Sto jednakowych (w miarę) kapsli

Rysunek 3.52: Kapsle - niezbędne elementy doświadczenia

Powyższe czynności powtórz wielokrotnie, każdorazowo zliczając liczbę kapsli, które się nie odwróciły po kolejnym rzucie. Połóż je na desce przed następnym rzutem.

Wyniki zliczeń N_i umieść w tabeli wykonanej wg poniższego wzoru (*Rysunek 3.53: Tabelka pomiarów* na stronie 213). Zapełnij pierwsze dwie kolumny tabeli (*Kolejny numer rzutu* i N_i).

Kolejny numer rzutu	Liczba kapsli przed kolejnym rzutem	Liczba kapsli odwróconych w kolejnym rzucie	Prawdopodobieństwo odwrócenia pojedynczego kapsla	Uśrednione prawdopodobieństwo odwrócenia pojedynczego kapsla	
i	N_i	ΔN_i	$\lambda = \Delta N_i / N_{i-sr}$	$\lambda = \Delta N / N$	$T_{1/2}$
1	2	3	4	5	6

Rysunek 3.53: Tabelka pomiarów

W celu obliczenia prawdopodobieństwa odwrócenia kapsla najpierw wypełnij kolumnę 3-cią tabeli; oblicz ΔN_i - liczbę kapsli, które odwróciły się w i -tym rzucie. Następnie oblicz prawdopodobieństwa odwrócenia pojedynczego kapsla w każdym rzucie i wypełnij kolumnę 4-tą tabeli korzystając ze wzoru

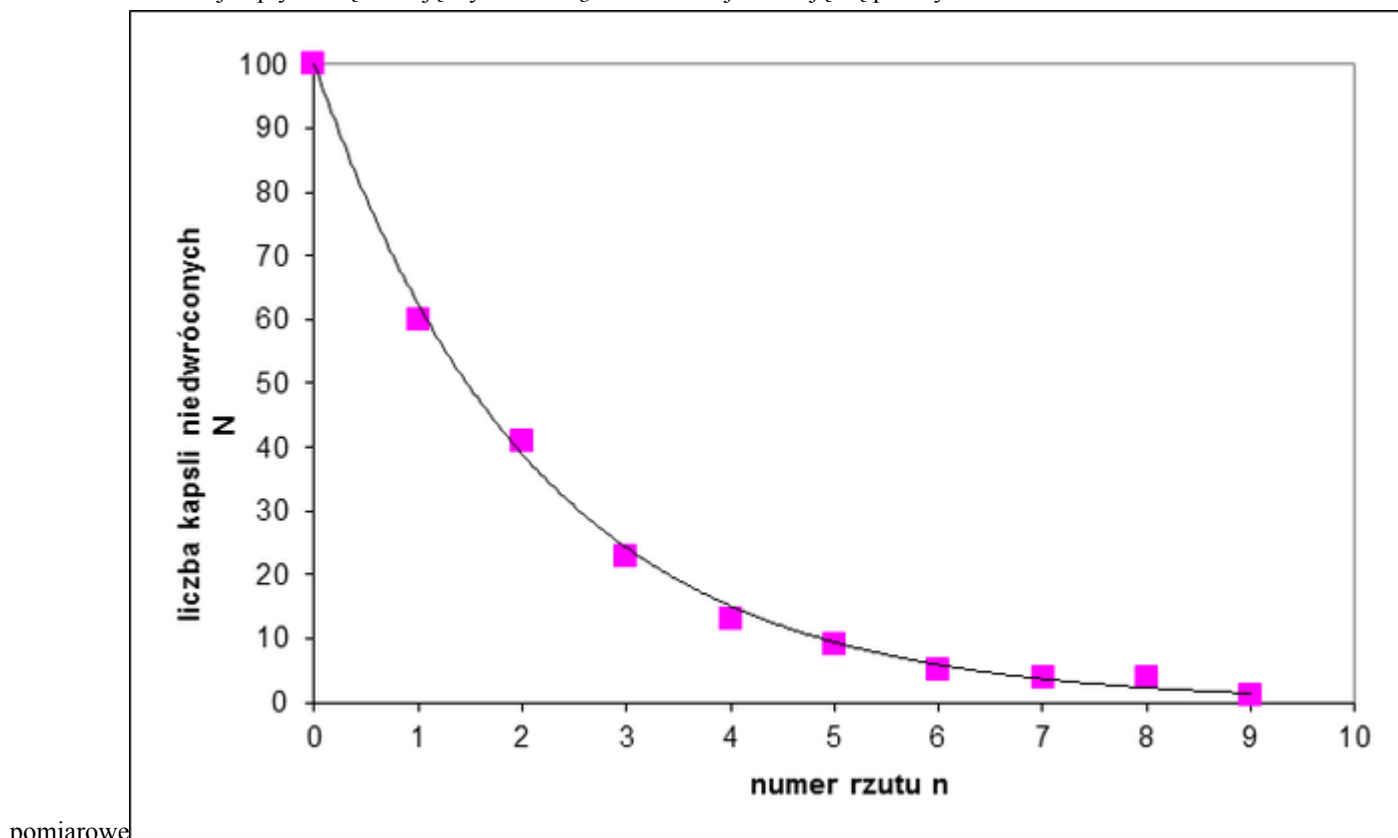
$$\lambda_i = \frac{\Delta N_i}{N_{i-sr}} \text{ gdzie } N_{i-sr} = \frac{N_i + N_{i-1}}{2}.$$

Kolejny numer rzutu i	Liczba kapsli przed kolejnym rzutem N_i	Liczba kapsli odwróconych w kolejnym rzucie ΔN_i	Prawdopodobieństwo odwrócenia pojedynczego kapsla $\lambda_i = \Delta N_i / N_{i-1}$	Uśrednione prawdopodobieństwo odwrócenia pojedynczego kapsla $\lambda = \Delta N / N$	$T_{1/2}$
1	2	3	4	5	6
0	100	-	-	0,472 (średnia z 5 pierwszych wyników)	1,47
1	60	40	0,5		
2	41	19	0,38		
3	23	18	0,56		
4	13	10	0,56		
5	9	4	0,36		
6	5	4	(0,57)		
7	4	1	(0,22)		
8	4	0	-		
9	1	3	-		

Rysunek 3.54: Tabelka pomiarów - dane przykładowe

Wykonaj wykres zależności N_i od i . Przykładowy wykres znajduje się na [Rysunek 3.55: Zależność \$N\$ i \$\(i\)\$ - liczby nieodwróconych kapsli od liczby rzutów](#) na stronie 214.

Czarna linia obrazuje optymalną funkcję wykładniczą, wokół której układają się punkty



pomiarowe

Rysunek 3.55: Zależność $N_i(i)$ - liczby nieodwróconych kapsli od liczby rzutów

Zwróćmy uwagę na trzy istotne cechy wykresu. Te same cechy ma wykres zależności od czasu liczby jąder, które nie uległy przemianie w zjawisku rozpadu promieniotwórczego, opisanym w rozdziale [3.4 Prawo zaniku promieniotwórczego](#) na stronie 200.

1. Uzyskana zależność jest malejąca.
2. Wykres nie przebiega wzdłuż linii prostej - liczba nieodwróconych kapsli maleje nieliniowo wraz z liczbą rzutów.
3. Wykres nie osiąga wartości $N = 0$ po żadnej określonej, z góry przewidywalnej liczbie rzutów.

Pierwsza cecha jest oczywista: w warunkach doświadczenia nie może **przybywać** nieodwróconych kapsli.

Ciekawa jest za to druga cecha wykresu. Związana jest ona z pojęciem **prawdopodobieństwa** odwrócenia się kapsla. W kolumnie 3. tabeli pokazano wielkość ΔN_i - liczbę kapsli, które odwróciły się w i -tym rzucie. Z kolei wielkość N_{i-1} to liczba kapsli przed i -tym rzutem, które **mogły** się odwrócić w tym rzucie.

W celu obliczenia prawdopodobieństwa odwrócenia kapsla zastosowaliśmy wzór ([wzór 214](#) na stronie 215) wyrażający stosunek liczby kapsli, które się odwróciły, do średniej liczby kapsli, które potencjalnie odwrócić się mogły.

$$(\text{wzór 214}) \lambda_i = \frac{\Delta N_i}{N_{i-SR}}$$

! Wskazówka:

Dlaczego obliczamy prawdopodobieństwa odwrócenia kapsla jako stosunek liczby kapsli, które się odwróciły, do średniej liczby kapsli N_{i-SR} przed i po rzucie, a nie do początkowej liczby kapsli N_i ?

Otóż ta druga możliwość byłaby właściwa wtedy, gdy mielibyśmy do czynienia z bardzo małym prawdopodobieństwem λ_i odwrócenia kapsla w rzucie i z bardzo dużą liczbą kapsli. Wtedy liczba N_{i-SR} tylko nieznacznie różniłaby się od liczby N_i . Z taką sytuacją statystyczną mamy zwykle do czynienia w przypadkach rozpadu atomów pierwiastków promieniotwórczych.

Doświadczalne wartości λ_i zamieszczono w 4. kolumnie tabeli (tabela na [Rysunek 3.54: Tabelka pomiarów - dane przykładowe](#) na stronie 214). Widzimy, że wartości te są w przybliżeniu jednakowe, czego należało oczekiwać.

To że nie są dokładnie jednakowe, raz są nieco większe, raz nieco mniejsze wynika nie tyle z niepewności pomiarowej, lecz z losowego charakteru odwracania się kapsli i z niewielkiej próbki statystycznej, jaką dysponujemy w tym doświadczeniu. Oczywiście nie ma powodu przypuszczać, by prawdopodobieństwo odwrócenia się kapsla zależało od tego, ile rzutów przeszedł pojedynczy kapsel bez odwrócenia. Na podstawie sześciu pierwszych rzutów możemy wyznaczyć średnią wartość $\lambda = 0,472$.

Wzór ([wzór 214](#) na stronie 215), odpowiednio przekształcony:

$$(\text{wzór 215}) \Delta N_i = \lambda \cdot N_{i-SR}$$

pokazuje, że liczba odwróconych kapsli w kolejnych rzutach **nie jest stała**, ale jest proporcjonalna do aktualnej malejącej liczby nieodwróconych kapsli, o czym mówi kształt wykresu z [Rysunek 3.55: Zależność \$N\$ i \(\$i\$ \) - liczby nieodwróconych kapsli od liczby rzutów](#) na stronie 214.

Na koniec zwróćmy uwagę na istotną, choć pozorną różnicę pomiędzy doświadczeniem z kapslami a zjawiskiem zaniku próbki promieniotwórczych jąder atomowych - to kwestia odcinka czasowego Δt . W poprzednim paragrafie czas ten spowodował konieczność rozróżnienia pomiędzy stałą rozpadu λ a pojęciem prawdopodobieństwa rozpadu. W przedstawionym wyżej rozumowaniu dla kapsli, pojęcia te zostały utożsamione. Czy to postępowanie jest uprawnione? Tak, gdyż w doświadczeniu z kapslami rolę „odcinka czasu” odgrywają kolejne rzuty. „Czasu trwania” tych rzutów nie można regulować, więc liczba zarejestrowanych odwróceń ΔN zależy tylko od właściwości kapsli. Można jednak przypisać kolejnym rzutom interpretację zbliżoną do czasu - w zadaniu 3. wyrazisz "czas połowicznego zaniku" próbki kapsli.

! Wskazówka:

Napisałiśmy: „**Rolę 'odcinka czasu' odgrywają tam kolejne rzuty, których 'czasu trwania' nie można regulować**”. Otóż tu dotykamy ważnego problemu:

Czym jest czas?

Można powiedzieć, że sens upływu czasu w prawie zaniku promieniowania jest dokładnie taki sam jak w powyższym opisie naszego eksperymentu z kapsłami. Ogólnie: w fizyce statystycznej (w termodynamice, fizyce kwantowej) sens upływu czasu jest taki: mamy do czynienia z różnymi stanami układu fizycznego, odcinek czasu to właśnie jest przejście z jednego stanu do drugiego. W tym sensie czas występuje tu jako miara liczby przejść (stanów) zmieniającego się układu fizycznego (również i całego Świata).

Stygnięcie cieczy (materiał nadobowiązkowy)

Przeprowadzając doświadczenie, przekonamy się, że spadek temperatury rozgrzanego ciała zachodzi według takiego samego prawa wykładniczego, co zanik promieniowania radioaktywnego (wyprowadzenie wzoru znajduje się w końcowej części tego rozdziału):

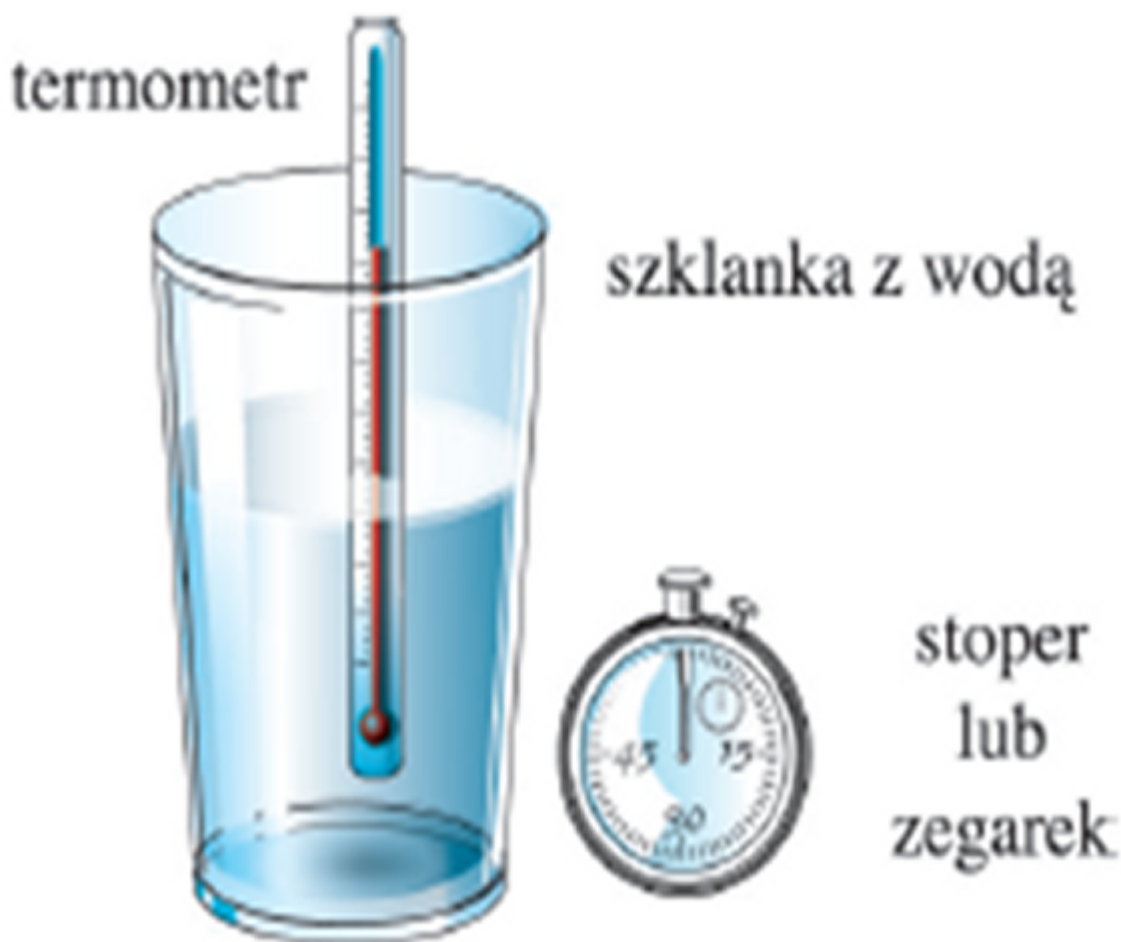
$$(\text{wzór 216}) \quad T - T_{ot} = \left(T_0 - T_{ot} \right) \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

gdzie: T - temperatura rozgrzanego ciała, T_{ot} - temperatura otoczenia (temperatura końcowa po ostygnięciu ciała), T_0 - temperatura początkowa rozgrzanego ciała, t - czas, $T_{1/2}$ - czas, po którym temperatura osiąga połowę początkowej nadwyżki temperatury nad temperaturą otoczenia ($T_0 - T_{ot}$).

Do przeprowadzenia doświadczenia wystarczy mieć termometr o zakresie skali od 0°C do 55°C , szklanę z podgrzaną wodą i stoper lub zegarek. Pomocny również może być minutnik do sygnalizacji upływu czasu.

Do szklanki wlej wodę zagrzaną do temperatury nieco powyżej $T_0 = 55^\circ\text{C}$ i wstaw termometr (*Rysunek 3.56: Zestaw do doświadczenia "Stygnięcie cieczy"* na stronie 217).

Ustaw szklanę w miejscu nieprzewiewnym, aby warunki stygnięcia były cały czas jednakowe i włącz stoper. Notuj wskazania termometru w czasie spadku temperatury np. co 5 minut (do sygnalizacji upływu czasu możesz zastosować minutnik). Pomiary możesz wykonać bardziej precyzyjnie, jeżeli sfilmujesz przebieg doświadczenia za pomocą kamery (lub komórki) i przy odtwarzaniu filmu zatrzymasz odpowiednie klatki filmu.



Rysunek 3.56: Zestaw do doświadczenia "Stygnięcie cieczy"

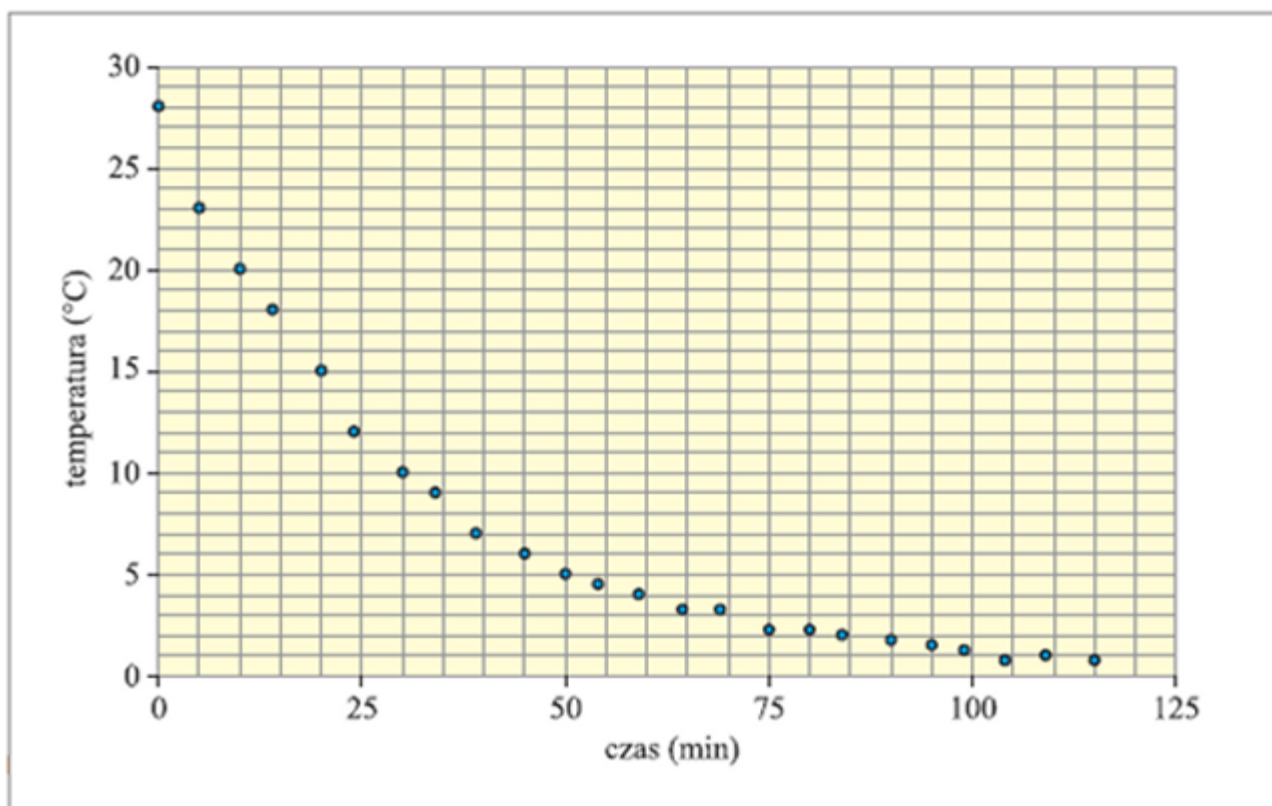
Wyniki pomiarów umieść w kolumnach 2, 3 i 5 tabeli wykonanej wg poniższego wzoru (tabela na [Rysunek 3.57: Tabelka pomiarów](#) na stronie 217). Jednocześnie stopniowo wypełniaj kolumnę 4 - nadwyżka temperatury wody nad temperaturą otoczenia.

Lp.	Temperatura bieżąca T (°C)	Temperatura otoczenia T_{ot} (°C)	Nadwyżka temperatury $T - T_{ot}$ (°C)	Czas t (s)
1	2	3	4	5

Rysunek 3.57: Tabelka pomiarów

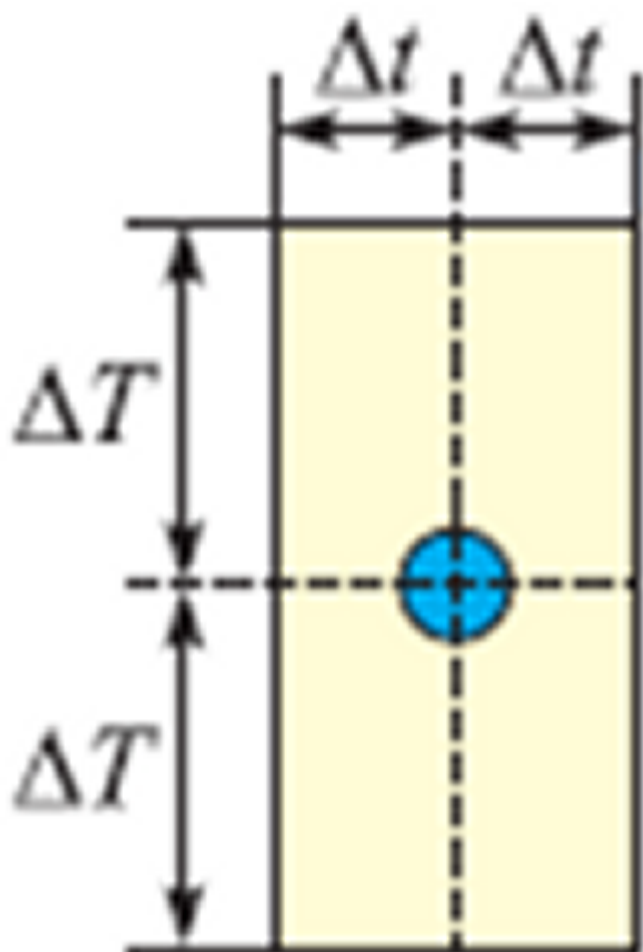
Określ niepewności pomiarowe: temperatury ΔT - jako połowę najmniejszej podziałki, np. $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$, czasu Δt - przy pomiarze czasu uwzględnij czas reakcji na sygnalizację czasu oraz niezbędny czas potrzebny do odczytu wskazań stopera i termometru, np. $\Delta t = 15\text{ s} = 0,25\text{ min}$. Dane te wstaw do tabelki pomiarowej. Posłużą ci one do wykreślenia prostokątów niepewności pomiarowych.

Korzystając z danych z kolumn 4 i 5 tabelki pomiarów, wykonaj wykres punktowy zależności nadwyżki temperatury wody ($T - T_{ot}$) od czasu stygnięcia t ([Rysunek 3.58: Przykładowy wykres punktów doświadczalnych procesu stygnięcia](#) na stronie 218).



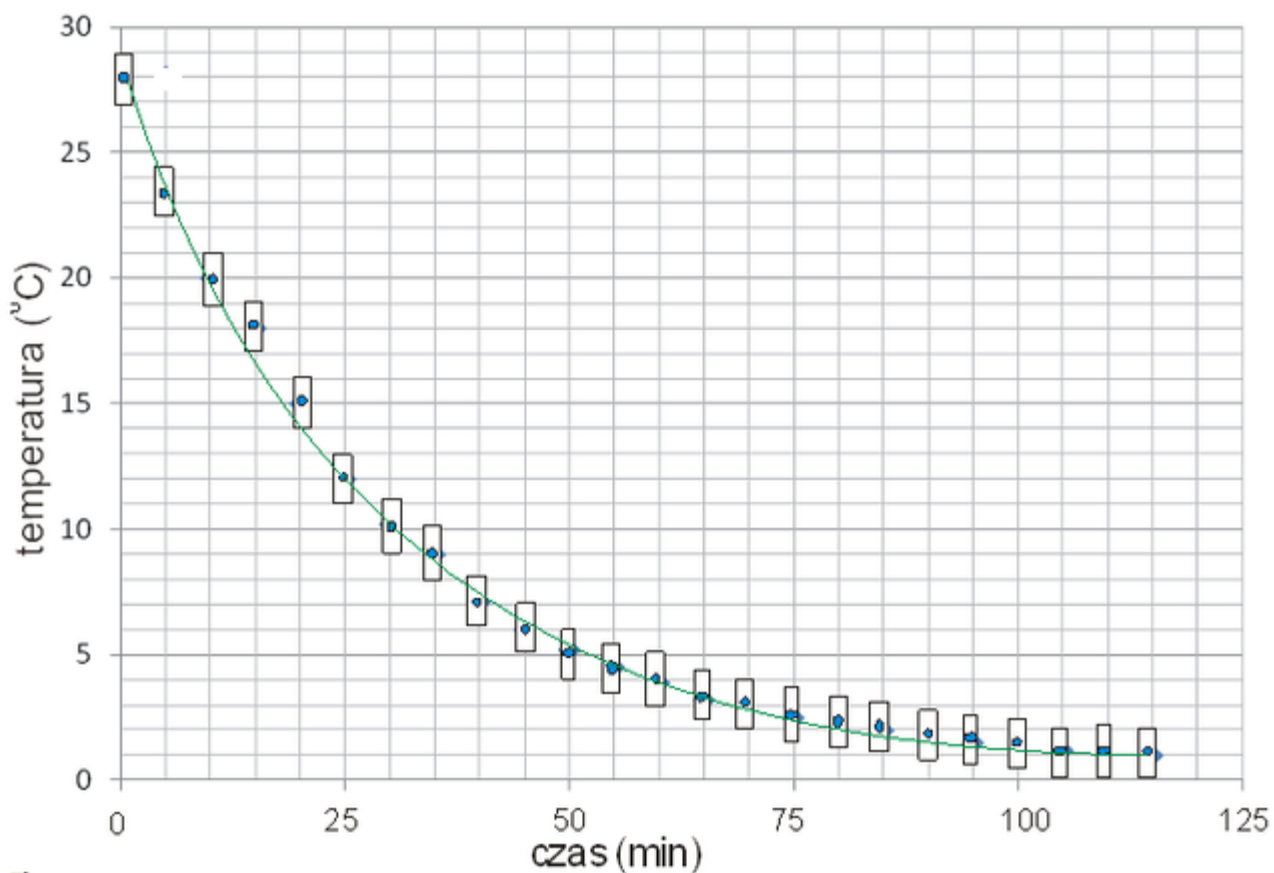
Rysunek 3.58: Przykładowy wykres punktów doświadczalnych procesu stygnięcia

Każdy punkt otocz prostokątem niepewności pomiarowych wykonanych według [Rysunek 3.59: Prawidłowe wykreślenie prostokąta niepewności pomiarowych w otoczeniu punktu pomiarowego, zaznaczonego kolorem](#) na stronie 219.



Rysunek 3.59: Prawidłowe wykreślenie prostokąta niepewności pomiarowych w otoczeniu punktu pomiarowego, zaznaczonego kolorem

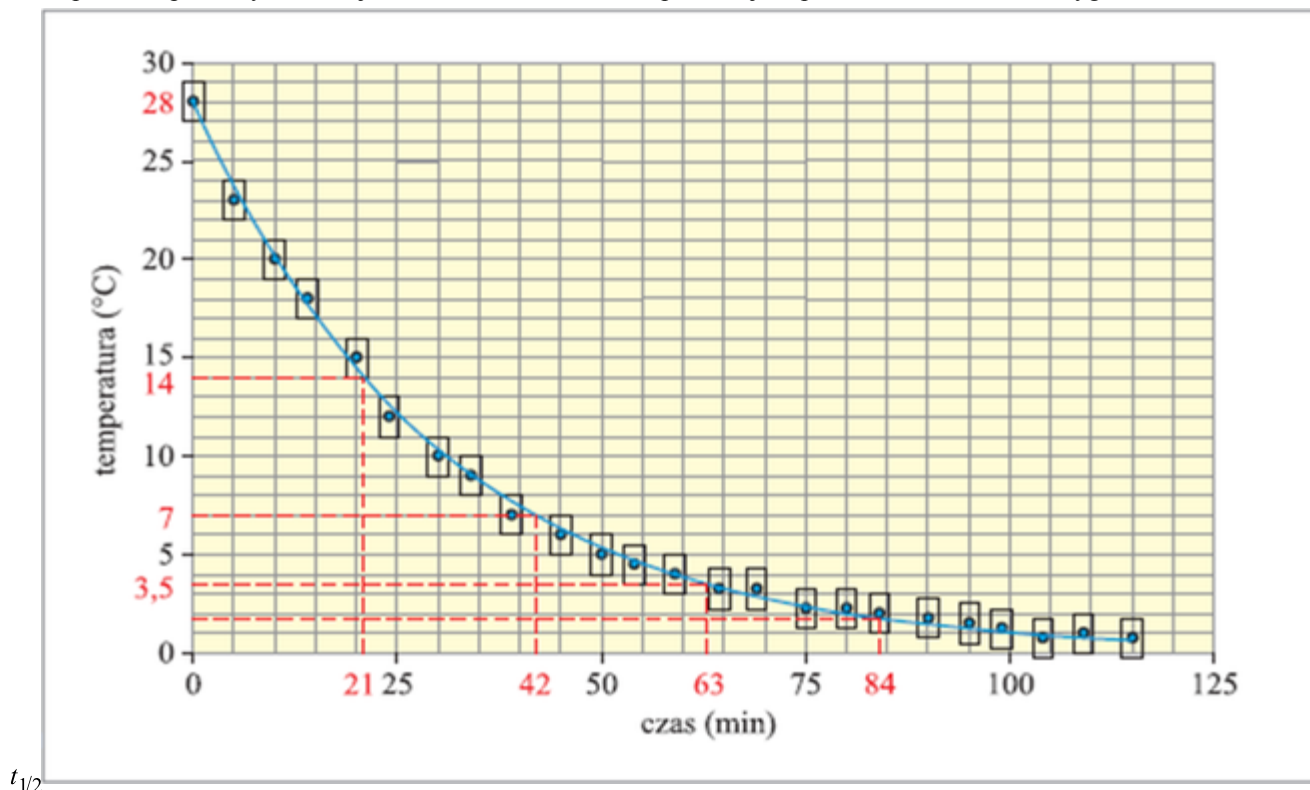
Następnie "od ręki" wykreśl krzywą, która będzie przebiegać przez obszary wszystkich prostokątów niepewności pomiarowych (*Rysunek 3.60: Prawidłowe wykreślenie krzywej stygnięcia* na stronie 220). Uwaga: Krzywa powinna być "gładka", a nie powinna być łamaną przebiegającą od punktu do punktu, wystarczy, że będzie przebiegać przez wspomniane prostokaty. Dzięki temu będzie lepiej odpowiadać rzeczywistemu przebiegowi procesu stygnięcia, gdyż proces ten nie przebiega według krzywej łamanej.



Rysunek 3.60: Prawidłowe wykreślenie krzywej stygnięcia

Na koniec zaznacz na wykresie linie poziome połowicznego zaniku nadwyżki temperatury nad temperaturą otoczenia (w skrócie: linie połowicznego zaniku temperatury) przebiegające jak na [Rysunek 3.61: Linie poziome oznaczają kolejne połowiczne obniżenia nadwyżki temperatury](#) na stronie 221.

Linie pionowe powinny odcinać jednakowe odcinki czasu odpowiadające połowicznemu czasowi stygnięcia



Rysunek 3.61: Linie poziome oznaczają kolejne połowiczne obniżenia nadwyżki temperatury

Pierwsza linia przecina oś temperatur w połowie odcinka łączącego punkt temperatury początkowej ($T_0, 0$) i punkt początkowy układu współrzędnych $(0, 0)$.

Druga linia pozioma odcina następną połowę połowy tego odcinka itd. (na przykładowym wykresie zaznaczono cztery takie poziome linie).

Linie połowicznego zaniku temperatury przecinają krzywą w określonych punktach, z których należy poprowadzić pionowe linie. Linie te na osi czasu odcinają odcinki czasu, przy których nadwyżka temperatury nad otaczającą maleje o połowę. Przekonaj się, że te wszystkie odcinki są sobie równe (z dokładnością do niepewności pomiarowych); to właśnie jest czas połowicznego stygnięcia $t_{1/2}$ (z przykładowego wykresu – [Rysunek 3.61: Linie poziome oznaczają kolejne połowiczne obniżenia nadwyżki temperatury](#) na stronie 221 otrzymano $t_{1/2} = 21$ min). Zauważ, że krzywa ta ma identyczny charakter co krzywa rozpadu promieniotwórczego, gdzie $t_{1/2}$ odpowiada okresowi połowicznego rozpadu.

Zapisz swoje spostrzeżenia i wnioski z przeprowadzonego doświadczenia.

Stygnięcie cieczy - wyprowadzenie wzorów (materiał nadobowiązkowy)

Gdy dostarczymy jakiemuś ciału energii w postaci ciepła Q , przez co ogrzejemy go do temperatury T wyższej od temperatury otoczenia T_{ot} , po czym pozwolimy mu swobodnie stygnąć, to jego temperatura będzie stopniowo opadać, zbliżając się asymptotycznie do temperatury otoczenia T_{ot} .

Pokażemy, że temperatura będzie obniżać się podobnie, jak zanika liczba aktywnych jąder w preparacie promieniotwórczym, czyli zgodnie z krzywą rozpadu promieniotwórczego ([Rysunek 3.51: Porównanie zależności \$N\(t\)\$ uzyskanej w symulacji komputerowej \(linia czerwona\) z zależnością dokładną \(linia czarna\) uzyskaną z prawa zaniku promieniotwórczego](#) na stronie 210).

Jeżeli ciało ma temperaturę T , to ciepło odprowadzone do otoczenia wyniesie

$$(\text{wzór 217}) \quad Q = mc(T - T_{ot})$$

Przekaz ciepły energii od ciała cieplejszego do otoczenia zachodzi stopniowo, w określonym odcinku czasu t zostanie przekazane ciepło

$$(\text{wzór 218}) \Delta Q = mc \Delta T = mc \Delta (T - T_{ot})$$

gdzie m - masa ciała, c - ciepło właściwe.

Przy czym proces przekazu ciepła podlega formalnie prawu statystycznemu (podobnemu do prawa rozpadu radioaktywnego). Przyjmijmy zatem, że względny przekaz ciepła jest jednakowy w jednakowym odcinku czasu t , czyli że

$$(\text{wzór 219}) \frac{\Delta Q}{Q} = -kt$$

gdzie k - stały współczynnik. Podstawiając wzory ([wzór 218](#) na stronie 222) i ([wzór 217](#) na stronie 221) do ([wzór 219](#) na stronie 222), otrzymamy

$$(\text{wzór 220}) \frac{\Delta (T - T_{ot})}{T - T_{ot}} = -kt$$

Wzór ([wzór 220](#) na stronie 222) wyraża fakt, że zawsze po określonym odcinku czasu ciało jednakowo stygnie - zawsze w jednakowych odstępach czasu, np. w określonym czasie $t_{1/2}$ (tzw. okresie połowicznego zaniku) różnica temperatury ciała od temperatury otoczenia zanika do połowy, po czym - w czasie $t_{1/2}$ - znów do połowy itd.

Oznaczmy początkową temperaturę przez T_0 .

Po czasie $t = t_{1/2}$ różnica temperatury wyniesie $T_1 - T_{ot} = \frac{(T_0 - T_{ot})}{2}$, czyli po czasie $t = t_{1/2}$,

$$(\text{wzór 221}) \frac{T_1 - T_{ot}}{T_0 - T_{ot}} = \frac{1}{2}$$

Po czasie $2t_{1/2}$: $T_2 - T_{ot} = \frac{(T_1 - T_{ot})}{2}$, więc $T_2 - T_{ot} = \frac{(T_1 - T_{ot})}{2} = \frac{(T_1 - T_{ot})}{4}$; czyli po czasie $t = 2t_{1/2}$

$$(\text{wzór 222}) \frac{T_2 - T_{ot}}{T_0 - T_{ot}} = \frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

Po następnym odcinku czasu różnica temperatury $t_{1/2}$ jeszcze raz zmniejszy się o połowę, czyli łącznie po czasie

$$t = 3t_{1/2}: \frac{T_3 - T_{ot}}{T_0 - T_{ot}} = \frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3 \text{ itd.}$$

Widzimy, że po czasie $t = nt_{1/2}$ różnica temperatury zmniejsza się według wzoru:

$$(\text{wzór 223}) \frac{T - T_{ot}}{T_0 - T_{ot}} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

Uogólnimy ten wzór. Najpierw zauważmy, że $n = \frac{t}{t_{1/2}}$ i dla dowolnego czasu t mamy zależność:

$$(\text{wzór 224}) \frac{T - T_{ot}}{T_0 - T_{ot}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Stąd

$$(\text{wzór 225}) T - T_{ot} = \left(T - T_{ot}\right) \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Otrzymaliśmy wzór określający prawo zaniku nadwyżki temperatury ciała podczas stygnięcia, wyrażone za pomocą okresu połowicznego zaniku $t_{1/2}$.


Widzimy, że prawo zmiany temperatury ciała podczas stygnięcia ma podobny charakter do prawa rozpadu promieniotwórczego.

Można wykazać, podobnie jak w wyprowadzeniu prawa rozpadu promieniotwórczego w rozdziale [3.4 Prawo zaniku promieniotwórczego](#) na stronie 200, że prawo zmiany temperatury ciała podczas stygnięcia może być wyrażone w postaci:

$$(\text{ wzór 226 }) \quad T - T_{ot} = (T - T_{ot})e^{-kt}$$

gdzie: $e = 2,7183\dots$ - podstawa logarytmu naturalnego.

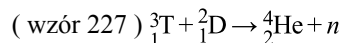
Pytania i problemy

- W omówieniu doświadczenia z kapslami wskazano trzy cechy wykresu ([Rysunek 3.55: Zależność \$N\$ i \$\(i\)\$ - liczby nieodwróconych kapsli od liczby rzutów](#) na stronie 214) i uzasadniono je. Przedstaw uzasadnienie dla każdej z tych cech wykresu obrazującego zależność od czasu liczby jąder, które nie uległy przemianie w zjawisku rozpadu promieniotwórczego (rozdz. [3.4 Prawo zaniku promieniotwórczego](#) na stronie 200).
- W komputerowym doświadczeniu obrazującym rozpad próbki promieniotwórczych jąder atomowych przyjęto pewne założenia; zostały one podane niżej. Zapisz przy każdym z nich analogiczne założenie obowiązujące dla doświadczenia z kapslami. Rozstrzygnij, czy stwierdzone podobieństwa i różnice mają znaczenie istotne, czy tylko formalne. Przykładową wypowiedź podano dla założenia 'a'.
 - Liczebność próbki obserwujemy w umownych odstępach czasu $\Delta t = 1$ s. Wartość Δt można dowolnie zmieniać. Rolę 'odcinka czasu' odgrywają kolejne rzuty, których 'czasu trwania' nie można regulować.
 - Początkowa liczebność próbki $N_0 = 4\ 000$.
 - Przyjmujemy, że prawdopodobieństwo p zajścia rozpadu pojedynczego jądra w kolejnym odstępie czasu jest iloczynem stałej rozpadu λ i odstępu czasu Δt i wynosi 0,1, czyli 10%.
 - Prawdopodobieństwo, o którym mowa w punkcie 'c' można dowolnie zmieniać.
 - Jeśli jądro nie ulegnie rozpadowi w pewnym odcinku czasu Δt , to prawdopodobieństwo jego rozpadu w następnym odstępie czasu nadal wynosi 10%.
- Wydrukuj w odpowiednim powiększeniu wykres na [Rysunek 3.55: Zależność \$N\$ i \$\(i\)\$ - liczby nieodwróconych kapsli od liczby rzutów](#) na stronie 214 i określ graficznie "czas połowicznego odwracania się" próbki kapsli. Wyraż ten czas w rzutach; przyjmij dla potrzeb zadania, że możliwe jest wykonanie niecałkowitej liczby rzutów.
- Przeprowadź doświadczenie podobne do tego z kapslami; użyj jednak 100 prostopadłościennych klocków (pomyśl może o wykorzystaniu cukierków odpowiedniego kształtu albo pudełek po zapałkach), 100 kostek do gry lub 100 monet. Ustal, że po każdym rzucie z próbki eliminowane są te klocki, które upadły „na sztorc”, czyli na najmniejszą podstawę, te kostki, które upadły „jedyneką do góry”, czy te monety, które upadły „orłem w dół”.
 - Zapisz wyniki doświadczenia w tabelce.
 - Sporządź wykres obrazujący liczbę pozostających w próbce obiektów po każdym z rzutów. Poprowadź „od ręki” krzywą najlepiej pasującą do punktów doświadczalnych.
 - Z wykresu odczytaj „czas połowicznego zaniku” $n_{1/2}$ próbki - jest to „liczba” rzutów, po której liczebność próbki maleje o połowę. Zwróć uwagę, że $n_{1/2}$ nie musi być liczbą całkowitą.
 -  **Wskazówka:** Na podstawie odczytanej wartości $n_{1/2}$ oblicz prawdopodobieństwo wyeliminowania pojedynczego obiektu z próbki w jednym rzucie.

3.6 Reakcje jądrowe

Nazwa reakcje jądrowe została utworzona przez analogię do reakcji chemicznych. Te ostatnie polegają na łączeniu się atomów w cząsteczki, a także na łączeniu się cząsteczek lub ich rozpadzie. W tych przemianach zasadniczą rolę odgrywają siły elektryczne. Jądra – podobnie jak cząsteczki – mogą się łączyć i ulegać rozpadowi. Jednakże te przemiany zachodzą z udziałem sił nie tylko elektrostatycznych, ale także i jądrowych. W zapisie reakcji jądrowych przyjęto konwencje zbliżone do stosowanych przy reakcjach chemicznych; podobnie, wyróżnia się substraty i produkty reakcji jądrowej. Z tego punktu widzenia rozróżniamy trzy podstawowe kategorie reakcji.

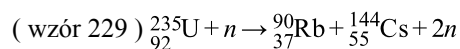
- Reakcje syntezy (reakcje fuzji) – łączyć mogą się pojedyncze nukleony lub ich układy (jądra), tworząc większe jądra atomowe lub przyłączają się do już istniejących jąder. Tego typu reakcje wymagają dużych energii dlatego zachodzą m.in. we wnętrzu gwiazd, w bombach wodorowych i innych urządzeniach termojądrowych. Przykładem takiej reakcji jest łączenie się jąder deuteru i trytu (są to tzw. ciężkie izotopy wodoru) w jądro helu:



- Reakcje wymiany - substratem jest pojedynczy nukleon lub niewielkie jądro (np. cząstka α), drugim substratem jest inne jądro, ich połączeniu towarzyszy usunięcie z jądra innego nukleonu lub innej ich grupy (np. deuteronu). Takiego typu była pierwsza, zaobserwowana w roku 1919 przez Ernesta Rutherforda reakcja jądrowa. Znajdujące się w powietrzu jądra azotu „bombardował” cząstkami α emitowanymi przez źródło promieniotwórczego radu. W rezultacie tworzone były jądra tlenu i emitowane były protony, które wywoływały błyski światła w detektorze. Reakcja przebiegała według schematu:



- Reakcje podziału (reakcje rozszczepienia, rozpadu) - substratem jest jądro atomowe sporych rozmiarów oraz pojedynczy nukleon, najczęściej neutron. Wśród produktów są dwa jądra atomowe porównywalnych rozmiarów oraz pojedyncze nukleony. Do tej kategorii zalicza się reakcje rozpadu α i β naturalnych izotopów promieniotwórczych, o których była mowa w rozdz. 3.3 *Przemiany jądrowe* na stronie 183. Przede wszystkim jednak, gdy mówimy o reakcjach rozszczepienia, to mamy na myśli rozszczepienie ciężkich jąder, na przykład uranu czy plutonu. Reakcje takie zachodzą w reaktorach jądrowych i bombach atomowych. W poniższym przykładzie jądro uranu, po wchłonięciu neutronu, dzieli się na jądra rubidu i cezu a podziałowi towarzyszy emisja dwóch neutronów:

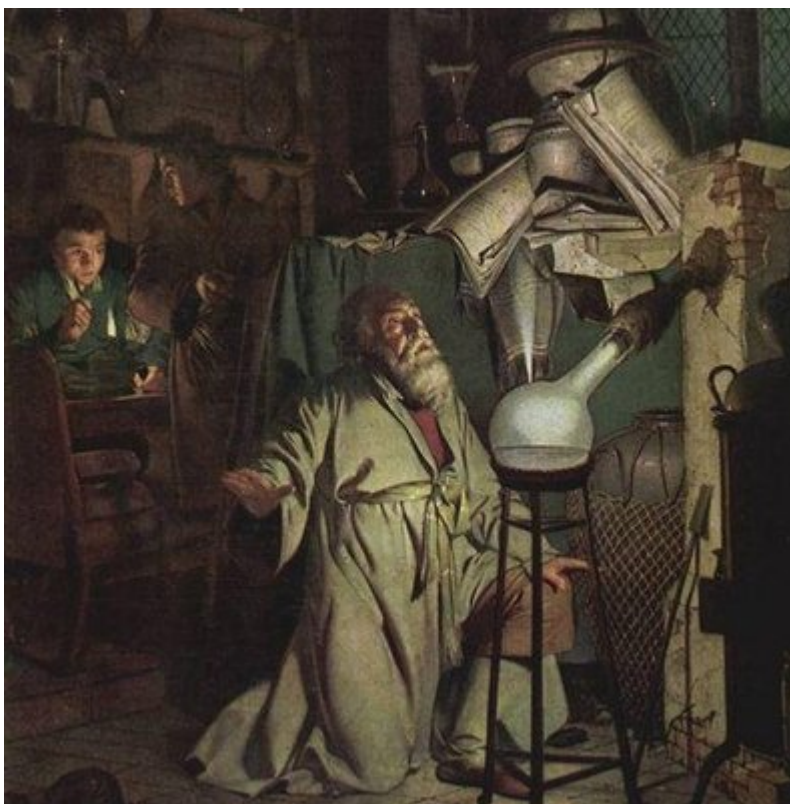


Podział na te trzy typy nie zawsze jest jednoznaczny - na przykład reakcję (wzór 228 na stronie 224) można byłoby zaklasyfikować jako reakcję syntezy, gdyż powstaje w jej wyniku jądro tlenu, większe od jądra azotu.

Reakcjom rozszczepiania i syntezy poświęcimy dwa następne paragrafy. W tym paragrafie zapoznamy się z ogólnymi cechami reakcji jądrowych.

Transmutacja pierwiastków

Czy można zamienić jeden pierwiastek w inny? To pytanie zadawali sobie alchemicy. Przez wieki całe próbowali metodami chemicznymi wyprodukować złoto z pomocą cudownej substancji zwanej „kamieniem filozoficznym”. Nie wiedzieli jednak, że chemia na nic się tu nie przyda. Reakcje chemiczne dotyczą zjawisk na poziomie powłok atomowych i wiązań cząsteczkowych, a pierwiastek chemiczny to substancja, której nie da się zamienić w inną metodami chemicznymi.

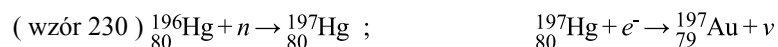


Rysunek 3.62: Alchemicy próbowali wyprodukować złoto metodami chemicznymi

Do tego potrzebna jest wiedza z zakresu fizyki, i to fizyki jądrowej. To, że jakaś substancja jest złotem, jest określone liczbą protonów w jądrze atomowym. Jak długo liczba ta wynosi 79, mamy do czynienia ze złotem, ale kiedy ta liczba jest inna, to substancja złotem się nie stanie choćbyśmy ją zalewali kwasami, grzali, czy poddawali działaniu innych substancji w procesach chemicznych. Dzieje się tak, ponieważ reakcje chemiczne zachodzą na skutek oddziaływań tylko między powłokami elektronowymi, których budowa zależy od liczby dodatnich ładunków w jądrach atomów biorących udział w tych reakcjach.

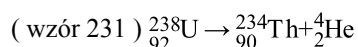
Co innego w przemianach i reakcjach jądrowych. Tu może zmieniać się zarówno liczba masowa, jak i liczba atomowa jąder. Oznacza to, że można zmieniać jedne pierwiastki w inne, zgodnie ze schematami ich rozpadów lub równaniami reakcji jądrowych – zobacz, dla przykładu, przy opisie przemiany beta (rozdział 3.3 *Przemiany jądrowe* na stronie 183), w co zmieni się jądro kobaltu ${}^{60}_{27}\text{Co}$, kiedy wyemituje elektron. Zamianę jednego pierwiastka chemicznego w inny pierwiastek po raz pierwszy spowodował Rutherford, przeprowadzając reakcję (wzór 228 na stronie 224).

Jądra złota można otrzymać, przykładowo, w wyniku reakcji wychwytu neutronu przez jądro rtęci ${}^{196}_{80}\text{Hg}$ w reaktorze jądrowym. Powstałe jądro ${}^{197}_{80}\text{Hg}$ następnie wychwytuje elektron z powłoki atomowej i zamienia się w jądro złota, emitując neutrino.



Trzeba tu jednak dodać, że otrzymywane tym sposobem złoto jest o wiele droższe od złota naturalnego wydobywanego z ziemi. Warto dodać, że złoto znajdujące się w złożach mineralnych pochodzi też z reakcji jądrowych; z gwiazd supernowych, z „popiołów” których powstała i nasza Ziemia.

Do transmutacji pierwiastków, czyli zamiany jednego pierwiastka chemicznego w inny, dochodzi także przy naturalnym rozpadzie jąder promieniotwórczych. Rozważmy reakcję:



Zastanówmy się, co dzieje się z jądrami uranu, które się rozpadły. Powstały z nich jądra toru; a te zaś - czy gdzieś znikają, rozpadają się dalej, czy może dzieje się z nimi jeszcze coś innego? Jądra, które się rozpadły i zmieniona została ich liczba atomowa, stają się innym pierwiastkiem chemicznym. W tym przykładzie, są to nadal jądra promieniotwórcze, które dalej będą się rozpadać. W ten właśnie sposób tworzą się naturalne szeregi promieniotwórcze. Kolejne pierwiastki w takim szeregu mogą występować w innym stanie skupienia, np. z metalu może powstać gaz. Przykładem jest tworzenie się gazu radonu wskutek rozpadu radu. Na końcu szeregu promieniotwórczego znajduje się izotop stabilny.

Przykład - rozpad neptunu

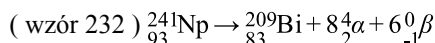
W wyniku reakcji rozpadu neptunu ${}_{93}^{241}\text{Np}$ powstaje trwały izotop bizmutu ${}_{83}^{209}\text{Bi}$. Oblicz liczbę rozpadów α i β^- .

Odpowiedź: Cząstka α to cztery nukleony: 2 protony i 2 neutrony. Zatem cząstkę α można zapisać jako ${}^4_2\alpha$.

Emisja z jądra jednej cząstki α pociąga za sobą stratę czterech nukleonów, czyli liczba masowa jądra zmniejsza się o 4 jednostki, oraz stratę dwóch protonów, więc ładunek jądra zmniejsza się o 2 jednostki.

Cząstka β^- to elektron, który można zapisać jako ${}^0_{-1}\beta$. Emisja z jądra jednej cząstki β^- pociąga za sobą wzrost ładunku jądra o jedną jednostkę, a nie pociąga za sobą zmiany liczby masowej.

Widzimy więc, że w reakcji zamiany neptunu w bizmut uczestniczyło 8 cząstek α i 6 cząstek β^- :



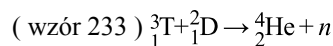
Bilans energii w reakcjach jądrowych

Podobnie jak w przypadku reakcji chemicznych, reakcje jądrowe mogą mieć charakter egzoenergetyczny bądź endoenergetyczny. W reakcjach pierwszego typu wydzielana jest energia, głównie w postaci energii kinetycznej produktów reakcji. W reakcjach endoenergetycznych konieczne jest dostarczenie energii - w postaci energii kinetycznej substratów - dla ich przeprowadzenia.

Zasadnicza różnica pomiędzy reakcjami chemicznymi i jądrowymi polega na ilości wydzielanej bądź pochłanianej energii. Zilustrujmy tę różnicę za pomocą dwóch przykładów.

Przykład - energia wiązania

Energie wiązania jąder biorących udział w reakcji ([wzór 227](#) na stronie 224):



wynoszą odpowiednio: trytu $E_T = 8,3 \text{ MeV}$, deuteru $E_D = 2,2 \text{ MeV}$, helu $E_{\text{He}} = 28,2 \text{ MeV}$.

Przypomnij sobie niezbędne pojęcia z rozdz. [3.2 Własności jąder atomowych](#) na stronie 177; zwróć przy tym uwagę na położenie jąder trytu, deuteru i helu na wykresie obrazującym zależność energii wiązania na jeden nukleon od liczby masowej jądra.

Oblicz energię E wydzielaną przy syntezie jednego jądra helu z wodoru i trytu.

Odpowiedź: Skorzystajmy z faktu, że w reakcjach jądrowych obowiązuje zasada zachowania energii, z uwzględnieniem defektu masy. Tak więc „energetyczny” zapis reakcji ([wzór 227](#) na stronie 224) wygląda następująco:

$$(\text{wzór 234}) \quad m_T \cdot c^2 + m_D \cdot c^2 = m_{\text{He}} \cdot c^2 + m_n \cdot c^2 + E$$

Masy poszczególnych jąder można wyrazić poprzez sumę mas nukleonów pomniejszoną o energię wiązania:

$$(\text{wzór 235}) (m_p + 2m_n) \cdot c^2 - E_T + (m_p + m_n) \cdot c^2 - E_D = (2m_p + 2m_n) \cdot c^2 - E_{He} + mn \cdot c^2 + E$$

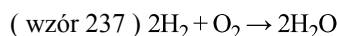
Rozwiązując to równanie zauważamy, że masy nukleonów się redukują; otrzymujemy:

$$(\text{wzór 236}) E = E_{He} - E_T - E_D = 17,7 \text{ MeV}$$

Porównajmy to z energią wydzielaną przy spalaniu cząsteczkowego wodoru w tlenie.

Przykład - energia wydzielona w reakcji chemicznej

Ciepło spalania wodoru Q w chemicznej reakcji:



wynosi 143 MJ na każdy kilogram cząsteczkowego wodoru. Oblicz energię Q' wydzielaną przy syntezie jednej cząsteczki wody.

Odpowiedź: Masa molowa cząsteczkowego wodoru wynosi 2 g/mol. Oznacza to, że w jednym kilogramie wodoru znajduje się 500 moli tej substancji, czyli $500 \cdot N_A$ cząsteczek wodoru. Symbolem N_A oznaczamy tu liczbę Avogadro, czyli liczbę cząsteczek w jednym molu substancji; $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$ sztuk. Tak więc ciepło spalania Q' , odniesione do jednej cząsteczki wodoru wynosi:

$$(\text{wzór 238}) Q' = \frac{Q}{500 \cdot N_A} = \frac{143 \cdot 10^6 \text{ J}}{500 \cdot 6 \cdot 10^{23}} \approx 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Przypomnijmy, że energia 1 eV to $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Zatem $Q' = 3 \text{ eV}$.

Widać więc, że w energia wydzielona w reakcji chemicznej jest co najmniej o sześć rzędów wielkości mniejsza od wydzielanej w reakcji jądrowej. Ta orientacyjna relacja dotyczy wszystkich znanych reakcji.

Energia progowa reakcji

Oddziaływania jądrowe są krótkozasięgowe, więc ich udział w reakcji wymaga zbliżenia do siebie oddziałujących obiektów na odległość rzędu 10^{-14} m i mniej. Oznacza to, że dodatnio naładowane cząstki - substraty reakcji - muszą pokonać barierę wzajemnego odpychania elektrostatycznego. Należy więc choć jednemu z nich nadać energię kinetyczną większą od pewnej minimalnej energii, zwanej energią progową.

Problemu tego nie ma jednak w przypadku neutronów, które nie posiadając ładunku elektrycznego mogą wnikać do jądra nawet przy bardzo niewielkich prędkościach. Dlatego też wiele reakcji przeprowadza się z udziałem neutronu jako jednego z substratów. Dotyczy to zwłaszcza sytuacji, gdy drugim substratem jest ciężkie jądro: wraz ze wzrostem liczby atomowej Z , pole elektryczne wytwarzane przez jądro staje się coraz silniejsze.

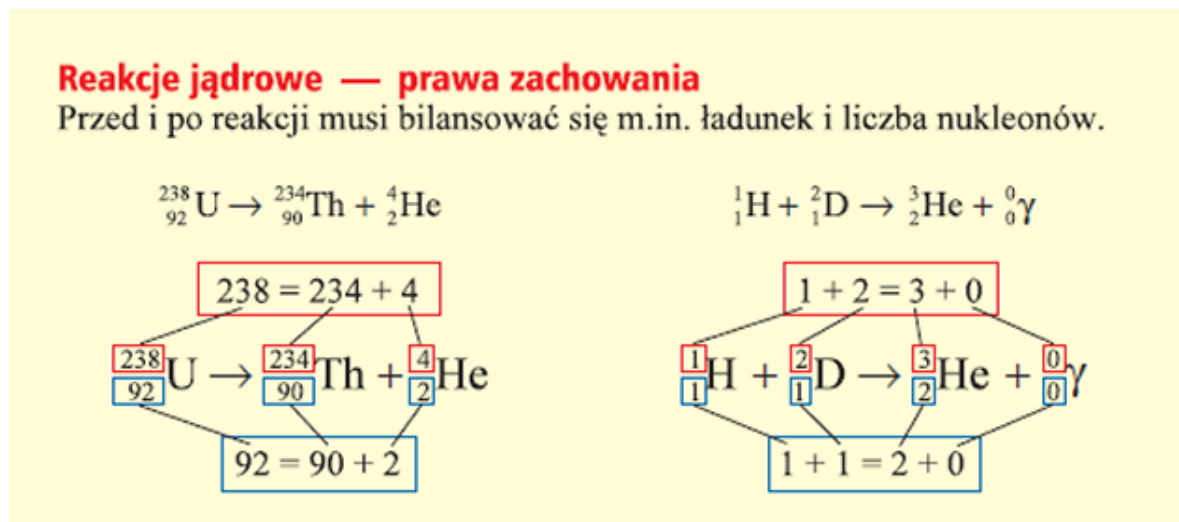
Zasady zachowania w reakcjach jądrowych

W reakcjach jądrowych muszą być spełnione znane już w fizyce klasycznej prawa zachowania:

- energii - widzieliśmy w przykładzie (*Przykład - rozpad neptunu* na stronie 226), że trzeba przy jego stosowaniu uwzględnić nie tylko energie kinetyczne substratów i produktów reakcji, ale także energie ich wiązania (defekty masy);
- ładunku elektrycznego, w którym trzeba uwzględnić nie tylko dodatnie ładunki protonów, ale także dodatnie bądź ujemne ładunki ewentualnych elektronów czy pozytonów, emitowanych w przemianach β ;
- pędu i momentu pędu, które wymieniamy tu dla kompletności obrazu; z tymi dwiema wielkościami fizycznymi oraz zasadami ich zachowania zapoznasz się bliżej w rozszerzonym kursie fizyki.

W mikroświecie muszą być też spełnione prawa charakterystyczne dla procesów jądrowych, nie mające swych odpowiedników w fizyce klasycznej. Wymienimy tu jedno z nich, które w odniesieniu do reakcji zachodzących przy

niezbyt wysokich energiach można sformułować jako prawo zachowania całkowitej liczby nukleonów. Oznacza to, że liczba nukleonów przed i po reakcji musi być taka sama. Nie odnosi się to oddzielnie do protonów i neutronów. Może zmienić się liczba protonów, ale wtedy liczba neutronów musi się zmienić tak, by całkowita liczba nukleonów pozostała niezmienniona.



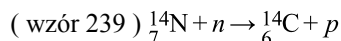
Rysunek 3.63: Ilustracja zasady zachowania ładunku elektrycznego i liczby nukleonów

⚠ **Wskazówka:** Jeśli w reakcji jądrowej dostępne są energie rzędu gigaelektronowoltów i więcej, może w niej dojść do produkcji antyprotonów i antyneutronów, a także innych krótko życiowych cząstek, (tzw. barionów). Są to, przykładowo, cząstki Δ (delta), Λ (lambda), Σ (sigma), Ξ (ksi) i Ω (omega); niektóre z nich mogą przybierać różne ładunki: elementarne dodatnie, ujemne bądź zerowe. W takiej sytuacji obowiązuje zasada zachowania liczby barionów, przy czym antycząstką przypisuje się „liczbę barionową” równą minus jeden.

Produkcja radioaktywnego węgla w atmosferze ziemskiej

W rozdziale 3.4 *Prawo zaniku promieniotwórczego* na stronie 200, przy omawianiu metody datowania szczątków organicznych za pomocą izotopu węgla ${}^{14}\text{C}$, zasygnalizowaliśmy pewien problem. Chodziło o stwierdzenie, czy zawartość tego izotopu w atmosferze jest stała. Tak w istocie jest, mimo iż jest to izotop promieniotwórczy, podlegający przemianie β^- z czasem połowicznego zaniku ponad 5500 lat.

Izotop ${}^{14}\text{C}$ powstaje w górnych warstwach atmosfery w wyniku pochłonięcia neutronu przez jądro atomu azotu ${}^{14}\text{N}$ w reakcji wymiany:

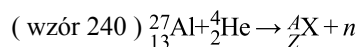


Neutrony powodujące tę reakcję albo pochodzą bezpośrednio z promieniowania kosmicznego (jest to strumień cząstek pochodzących przede wszystkim ze Słońca, składający się głównie z protonów, ale także z cząstek α i neutronów), albo powstają w wyniku oddziaływania innych składników tego promieniowania z jądrami atomowymi różnych pierwiastków obecnych w atmosferze. W każdym przypadku neutrony te obdarzone są odpowiednio dużą energią kinetyczną, by zapewnić przebieg reakcji (*wzór 239* na stronie 228), która jest endoenergetyczna. Tak długo jak aktywność Słońca pozostaje na niezmiennym poziomie - średnio rzecz biorąc w skali co najmniej tysięcy lat - stężenie neutronów w górnych warstwach atmosfery pozostaje praktycznie niezmiennione. Zapewnia to stałe tempo powstawania jąder ${}^{14}\text{C}$. Z drugiej strony, tempo ubywania tych jąder jest proporcjonalne do ich liczby. W efekcie powstaje stan równowagowy, w którym liczba jąder ${}^{14}\text{C}$ jest praktycznie stała w czasie.

[XLS PDF](#) Funkcja wykładnicza cz.2

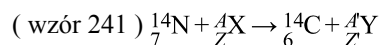
Pytania i problemy

1. Określ liczbę masową A , liczbę atomową Z oraz symbol jądra X powstającego w reakcji:



Rozstrzygnij, czy jest to reakcja syntezy, wymiany czy rozpadu.

2. Zaproponuj sekwencję przemian α i β^- , która doprowadzi izotop toru powstały w reakcji (wzór 231 na stronie 225) do izotopu ołowiu ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. Wskazówka: nie jest tu istotna kolejność, w jakiej zachodzą przemiany α i β^- ; dobierz odpowiednią liczbę przemian każdego rodzaju. Wykorzystaj do tego także *Przykład - rozpad neptunu* na stronie 226.
3. Rozpatrujemy następującą reakcję wymiany:

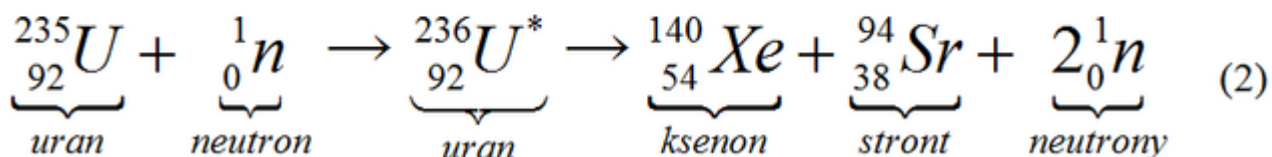
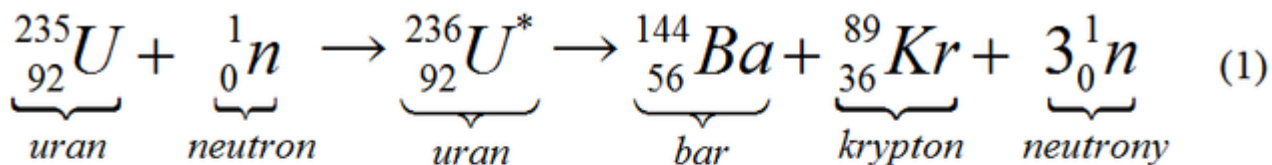


- a. Nazwij cząstki X i Y wiedząc, że są to najmniejsze możliwe jądra (ale nie pojedyncze nukleony!) spełniające warunki tej reakcji.
- b. Przyjmij, że energia wiązania: jądra azotu wynosi $E_N = 104,1$ MeV a jądra węgla $E_C = 91,7$ MeV; wyszukaj w tekście energie wiązania jąder X i Y . Rozstrzygnij, czy reakcja jest endoenergetyczna czy egzoenergetyczna. Oblicz energię wymienianą w tej reakcji.
4. Podaj jakościowy argument przemawiający za tym, że reakcja (wzór 239 na stronie 228) jest endoenergetyczna. Wskazówka: uwzględnij fakt, że jądro ${}_{7}^{14}\text{N}$ jest stabilne, natomiast jądro ${}_{6}^{14}\text{C}$ jest promieniotwórcze - podlega przemianie β^- .

3.7 Reakcje rozszczepiania jąder ciężkich. Korzyści i zagrożenia energetyki jądrowej

W poprzednim paragrafie omówiliśmy ogólne aspekty reakcji jądrowych. Do silnie egzoenergetycznych reakcji jądrowych należą reakcje rozszczepienia ciężkich jąder atomowych. Przykładem może być reakcja, w której neutron o niewielkiej energii jest pochłonięty przez jądro jednego z izotopów uranu, ${}_{92}^{235}\text{U}$. Powstałe w rezultacie silnie wzbudzone jądro izotopu uranu ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ rozszczepia się na dwa mniejsze jądra. Wśród produktów reakcji są nie tylko te dwa fragmenty, ale także swobodne neutrony. Zapiszmy dwie przykładowe reakcje tego typu.

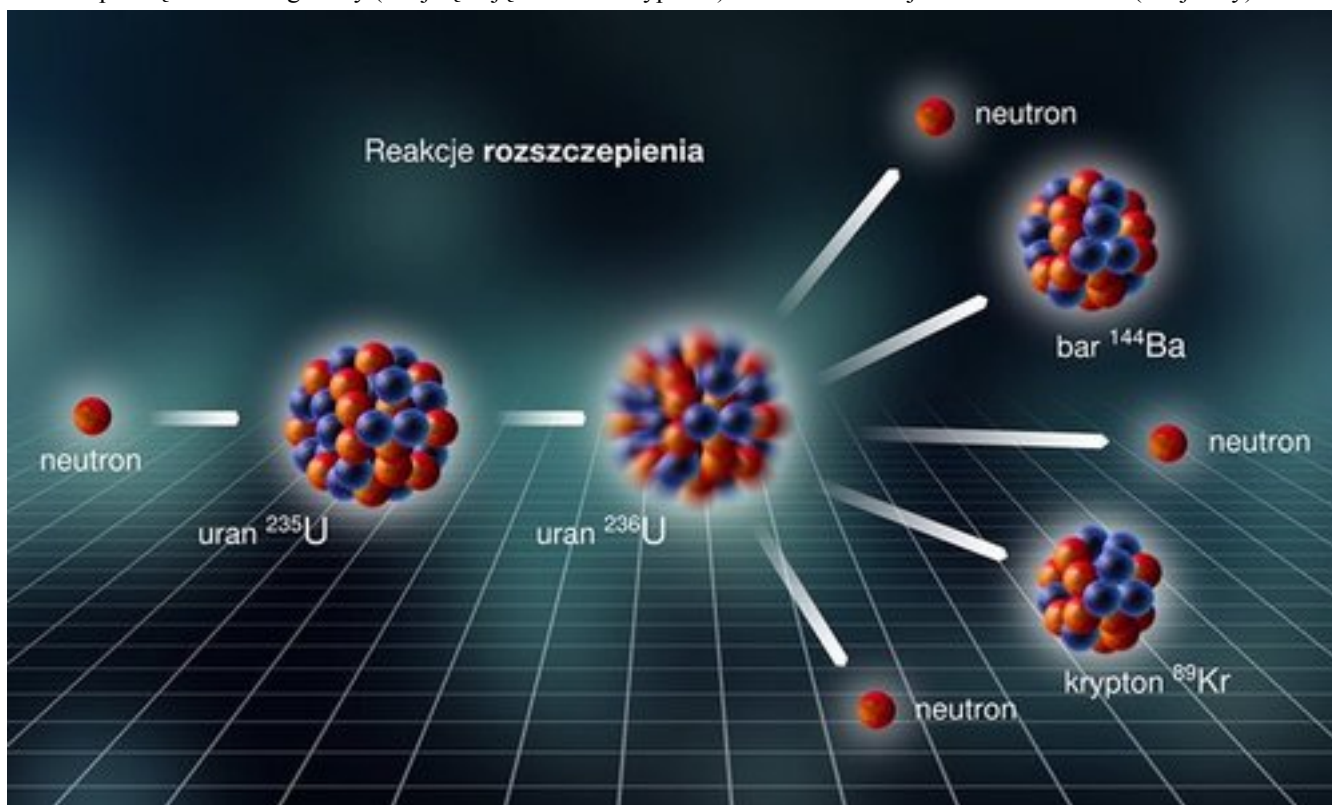
Rysunek 3.64: Fizyka jądrowa 4



Rysunek 3.65: Dwie przykładowe reakcje rozszczepienia

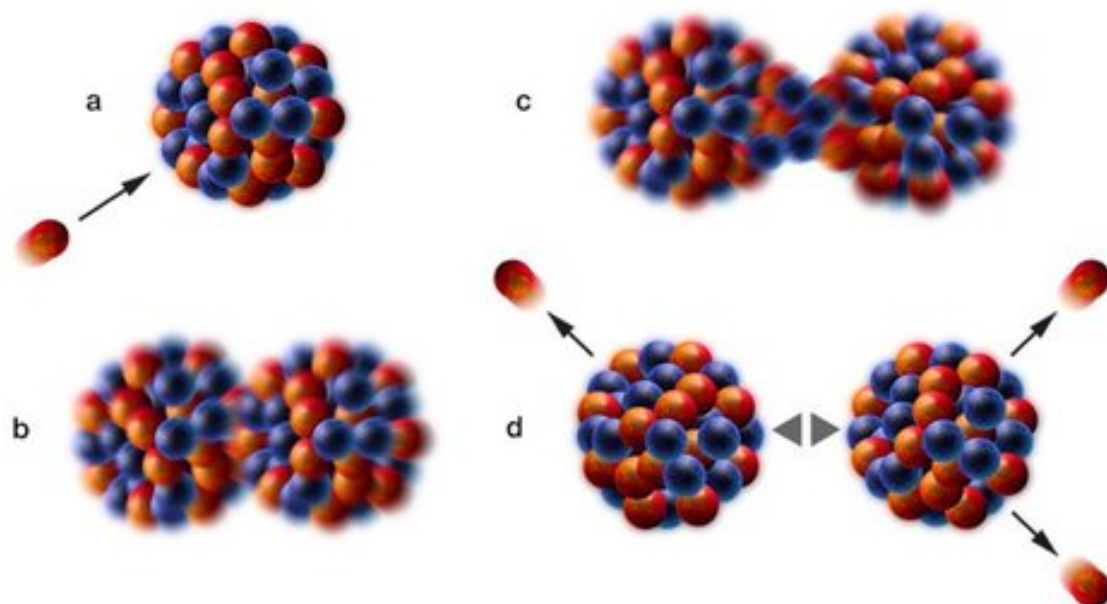
Na *Rysunek 3.66: Trzy etapy reakcji rozszczepiania* na stronie 230 pokazano trzy etapy reakcji (1).

1 – neutron uderza w jądro uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$ i jest absorbowany; 2 – tworzy się silnie wzбудzone jądro ${}^{236}_{92}\text{U}$ 3 – jądro ${}^{236}_{92}\text{U}$ rozszczepia się na dwa fragmenty (tutaj są to jądra baru i kryptonu) oraz emitowane jest kilka neutronów (tutaj: trzy)



Rysunek 3.66: Trzy etapy reakcji rozszczepienia

- ⚠ **Wskazówka:** Na [Rysunek 3.67: Etapy rozpadu jądra uranu](#) na stronie 231 pokazano, że rozpad jądra ${}^{236}_{92}\text{U}$ jest procesem, który można rozciągnąć w czasie. Jądro ${}^{236}_{92}\text{U}$ przypomina kroplę naładowanej dodatnio cieczy o praktycznie kulistym kształcie ([Rysunek 3.67: Etapy rozpadu jądra uranu](#) na stronie 231a). Siły międzycząsteczkowe wiążące ciecz są krótko zasięgowe, tak jak siły jądrowe w jądrze uranu. Wiążą one nukleony, mimo wzajemnego odpychania elektrostatycznego między protonami. Tak jest, dopóki jądro ma kształt kulisty. Jednak po pochłonięciu neutronu, powstałe jądro ${}^{236}_{92}\text{U}$ zaczyna się deformować, przybierając wydłużony kształt ([Rysunek 3.67: Etapy rozpadu jądra uranu](#) na stronie 231b). Wskutek wzrostu odległości pomiędzy dwiema jego częściami, siły elektrostatyczne zaczynają przeważać nad siłami jądrowymi i jądro jeszcze bardziej się deformuje ([Rysunek 3.67: Etapy rozpadu jądra uranu](#) na stronie 231c). W efekcie dochodzi do rozpadu jądra na dwa fragmenty o zbliżonych rozmiarach, z których emitowane są pojedyncze neutrony ([Rysunek 3.67: Etapy rozpadu jądra uranu](#) na stronie 231d).



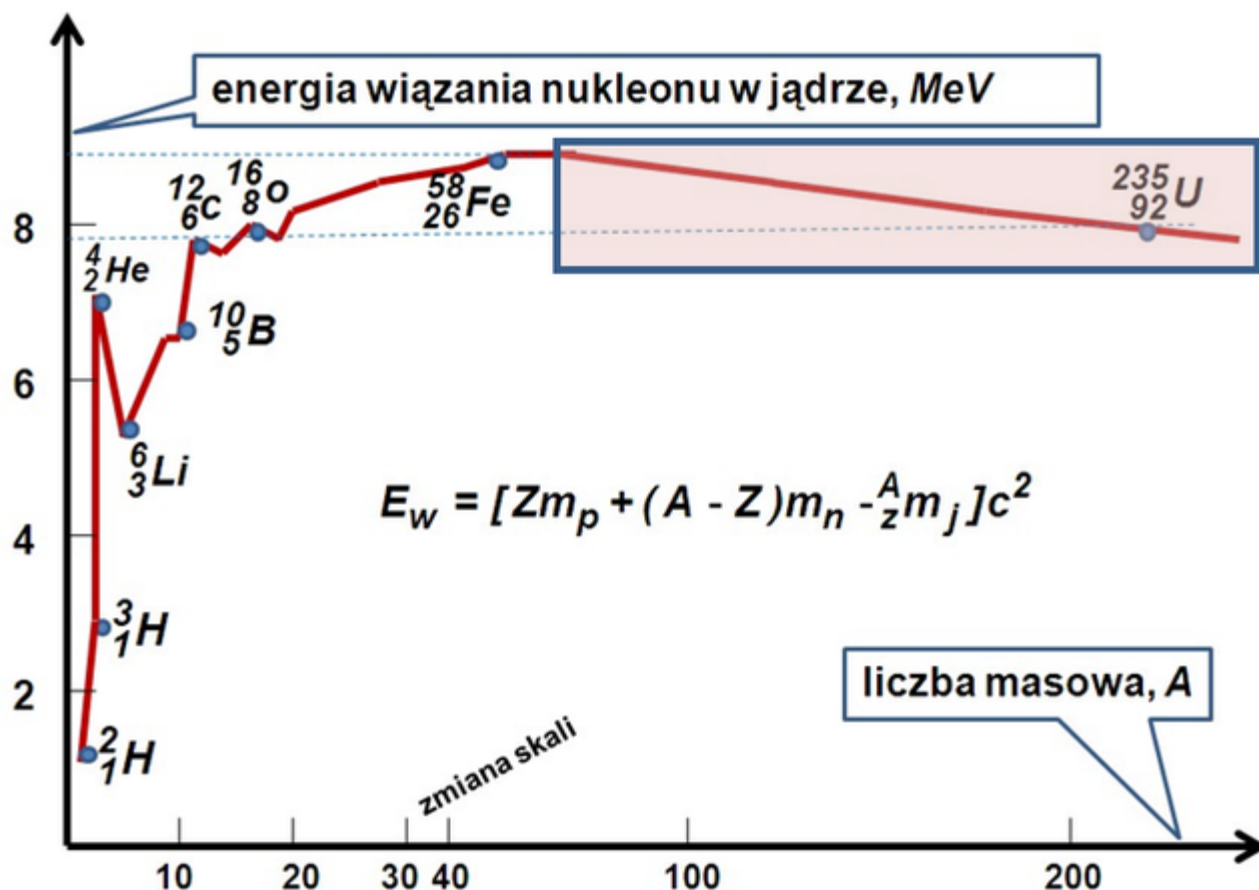
Rysunek 3.67: Etapy rozpadu jądra uranu

Siły elektrostatycznego odpychania nadają fragmentom prędkości rzędu kilku procent prędkości światła. Uzyskaną energię kinetyczną fragmenty przekazują otaczającej je materii, co skutkuje m.in. jej jonizacją i wzrostem jej temperatury.

Bilans energii w reakcji rozszczepiania

Przypomnijmy sobie wykres przedstawiający zależność energii wiązania nukleonu od liczby masowej jądra A (rozdz. 3.2 *Własności jąder atomowych* na stronie 177 - „*Najważniejszy wykres Wszechświata*”).

Zwróćmy uwagę na zaznaczony obszar wykresu, gdzie energia wiązania nukleonu zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby masowej jądra. Zauważmy, że różnica w energii wiązania nukleonów dla jąder z obszaru, gdzie znajdują się produkty rozszczepienia uranu (czyli nieco poniżej i powyżej wartości $A = 100$) i dla jąder gdzie znajduje się ulegający rozszczepieniu uran ($A = 235$), wynosi ok. $0,8 - 0,9$ MeV na każdy nukleon. W jądrze uranu jest 236 nukleonów, które mogą być silniej związane, jeśli zostaną zgrupowane w dwóch jądrach atomowych, a nie w jednym.



Rysunek 3.68: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A

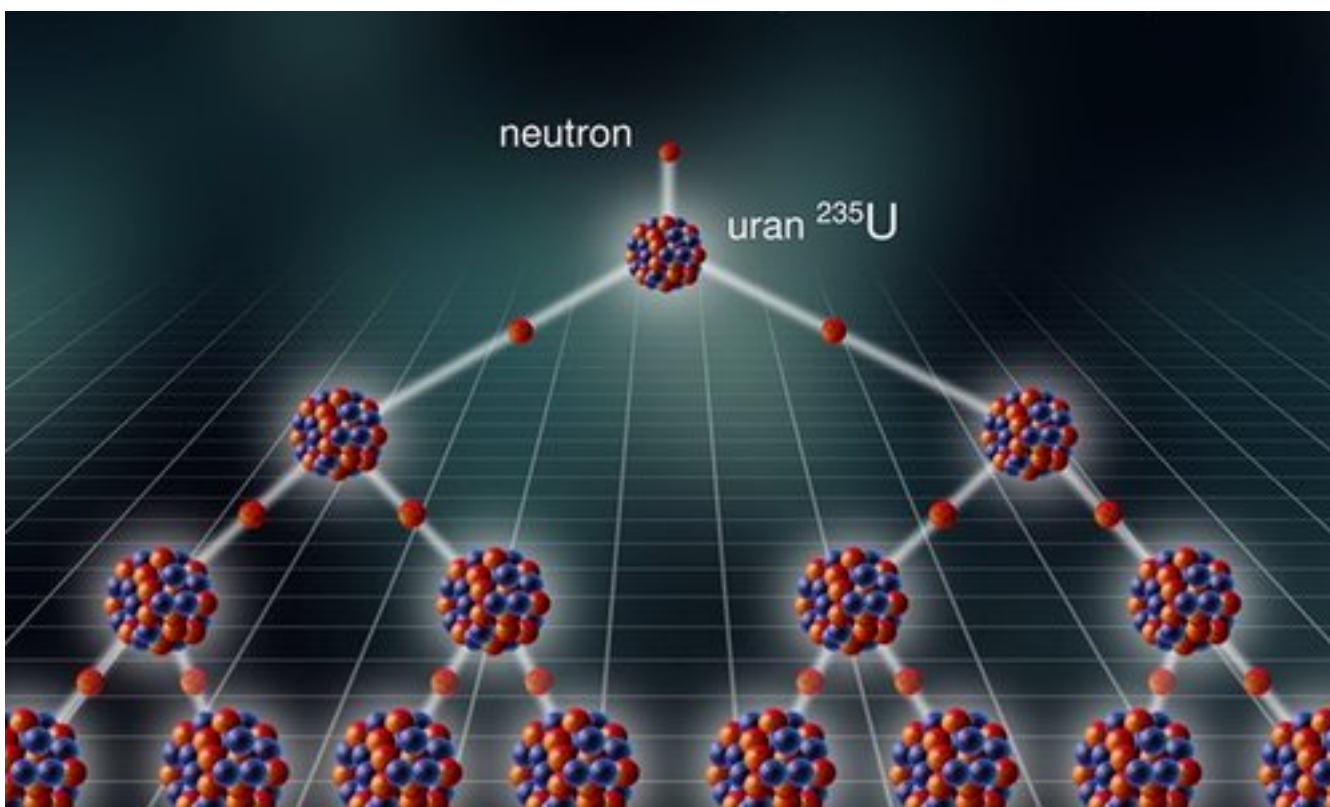
Uwolniona w tej reakcji energia jest iloczynem różnicy w energiach wiązania nukleonów pomnożonej przez liczbę nukleonów, co daje ok. 200 MeV. Energia ta zawarta jest przede wszystkim w energii kinetycznej produktów rozszczepienia (ok. 70%), które rozlatują się z ogromnymi prędkościami odpychane siłami elektrostatycznymi. Pozostała część, to energie neutronów oraz fotonów i elektronów emitowanych w następujących później rozpadach promieniotwórczych.

Reakcja łańcuchowa

Z pozoru niewiele znaczący fakt, że w procesie rozszczepienia uwalnianych jest także kilka neutronów, odgrywa zasadniczą rolę w wyzwoleniu energii jądrowej na wielką skalę. Jeśli bowiem ulegające rozszczepieniu jądro uranu otoczone jest innymi jądrami uranu, to uwolnione neutrony mogą zderzać się z nimi i powodować dalsze reakcje rozszczepienia uwalniając kolejne neutrony. Neutrony te mogą powodować dalsze reakcje rozszczepienia itd. Tworzy się *reakcja łańcuchowa*, gdzie w kolejnych generacjach procesu uczestniczy coraz więcej jąder, uwalnianych jest coraz więcej neutronów i wyzwalane są coraz większe energie.

Warunkiem samopodtrzymującej się reakcji jest, by liczba neutronów zdolnych do rozszczepienia jąder uwalnianych w następnej generacji była nie mniejsza niż ich liczba w generacji wcześniejszej. Stosunek tych liczb nosi nazwę współczynnika mnożenia lub współczynnika powielenia.

Należy zwrócić uwagę na to, że niektóre neutrony mogą opuścić próbkę materiału rozszczepialnego nie napotykając po drodze innych jąder i te neutrony są tracone dla reakcji łańcuchowej. Jednakże przy dostatecznie dużej próbce takich „bezproduktywnych” neutronów będzie stosunkowo mało. Dlatego zdefiniowano tzw. masę krytyczną. Masa krytyczna, to taka masa substancji rozszczepialnej przy której wspomniany współczynnik osiąga wartość 1.



Rysunek 3.69: Schemat reakcji łańcuchowej

Powyższy rysunek pokazuje schemat reakcji łańcuchowej, w której uwalniane są w każdej reakcji po dwa neutrony i każdy z nich wywołuje dalsze reakcje rozszczepienia. Widzimy, że w każdej generacji procesu uczestniczy dwukrotnie większa liczba jąder niż w poprzedniej. Liczby te są pokazane na schemacie. Nie są na nim jednak pokazane produkty rozszczepienia.

Jest to oczywiście mocno wyidealizowany obraz tego procesu. W rzeczywistości, liczby neutronów uwalnianych na poszczególnych etapach są różne i nie każdy z nich wywołuje dalsze reakcje - część może „ucieć” poza obszar próbki uranu. Zależnie od celu, w jakim dokonujemy reakcji, materiał rozszczepialny jest rozmieszczany na różne sposoby. Tak więc bomba atomowa ma swoją specyficzną konstrukcję, zapewniającą osiągnięcie możliwie dużego współczynnika mnożenia. Zupełnie inna zaś jest konstrukcja reaktora jądrowego, w którym zależy nam na utrzymaniu współczynnika powielenia możliwie bliskiego jedności.

Bomba atomowa

Paliwem w bombie atomowej, czyli materiałem rozszczepialnym, są najczęściej izotopy ${}_{92}^{235}\text{U}$; ${}_{92}^{233}\text{U}$; ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. W bombie tej (tak jak w każdej innej, „klasycznej” bombie), zależy nam na możliwie szybkim, niekontrolowanym przebiegu reakcji łańcuchowej. Aby zainicjować taką reakcję w bombie jądrowej, wystarczy jedynie doprowadzić materiał rozszczepialny do stanu nadkrytycznego. Masa krytyczna tych izotopów jest rzędu 10-20 kg - odpowiada to niewielkiej kuli o promieniu 4-6 cm!

Początkowo materiał rozszczepialny w bombie jest podzielony na dwie lub więcej części, z których każda ma masę mniejszą od masy krytycznej. Przejście do stanu nadkrytycznego odbywa się przez szybkie połączenie tych części w całość. Reakcja łańcuchowa zostaje zapoczątkowana przez neutrony występujące w promieniowaniu kosmicznym i neutrony powstające w wyniku rozszczepienia samoistnego paliwa.

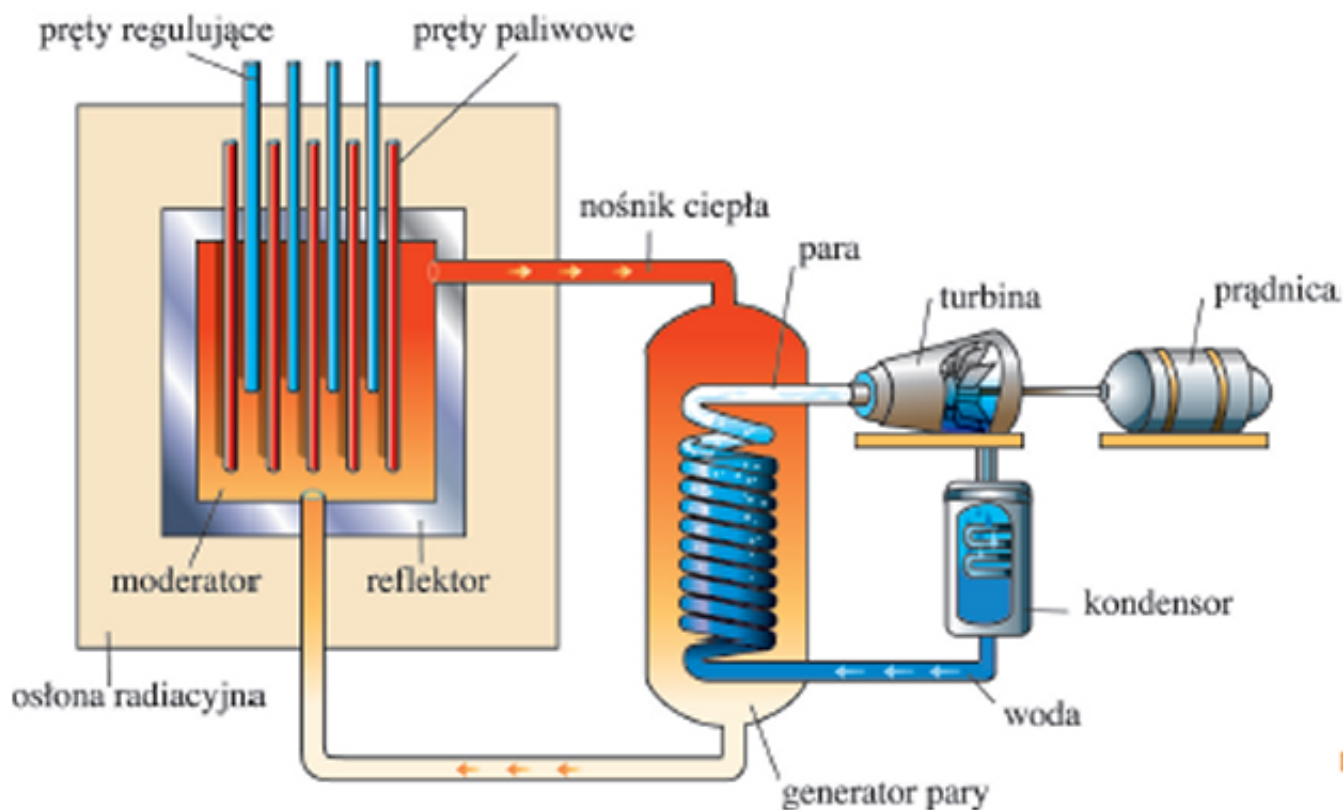


Rysunek 3.70: Wybuch bomby atomowej

Podczas wybuchu wydziela się ogromna energia a temperatura w centralnych obszarach wybuchu dochodzi do 10^7K . Towarzyszy mu rozchodzenie się silnego impulsu elektromagnetycznego, zdolnego uszkodzić urządzenia elektroniczne lub „zagliżyć” ich pracę nawet w sporej odległości od miejsca wybuchu. Rozchodzi się także mechaniczna fala uderzeniowa, znacznie silniejsza niż podczas wybuchu konwencjonalnego. Podczas wybuchu powstają radioaktywne fragmenty rozszczepienia, niektóre o bardzo długich czasach połowicznego zaniku - stanowi to dalsze, poważne zagrożenie dla istot żywych.

Reaktor jądrowy

Na *Rysunek 3.71: Najprostszy schemat reaktora jądrowego, zasilającego turbinę, która obraca prądnicę* na stronie 235 przedstawiono schemat reaktora jądrowego. Jest on zasilany prętami paliwowymi, które zawierają uran, wzbogacony w izotop ${}_{92}^{235}\text{U}$. Stężenie tego izotopu w uranie naturalnym, pozyskiwanym w kopalniach, jest rzędu 0,7% (resztę stanowi izotop ${}_{92}^{238}\text{U}$). Jest to za mało, by uzyskać stabilną pracę reaktora - wzbogacanie polega więc na eliminowaniu z uranu izotopu ${}_{92}^{238}\text{U}$ aż do uzyskania stężenia ${}_{92}^{235}\text{U}$ na poziomie od około 3% do ok. 20% (zależnie od typu reaktora). Jest to poziom wzbogacenia znacznie niższy niż w przypadku paliwa przeznaczonego dla bomby atomowej.



Rysunek 3.71: Najprostszy schemat reaktora jądrowego, zasilającego turbinę, która obraca prądnicą

Film opisuje zasadę działania elektrowni jądrowej. Przedstawia reakcję rozszczepienia jądra uranu, przebieg reakcji łańcuchowej oraz moderowania neutronów. Pokazano działanie reaktorów wrzących i wodnych ciśnieniowych.

Rysunek 3.72: Reaktor jądrowy

Pręty paliwowe zawierają, prócz paliwa, także substancje spowalniające neutrony uwolnione w reakcjach rozszczepiania - spowolnione neutrony znacznie częściej wywołują kolejne reakcje rozszczepiania niż neutrony szybkie. Prócz prętów paliwowych w rdzeniu reaktora znajdują się tzw. pręty regulujące. Zawierają one materiał pochłaniający neutrony. Głębokość ich zanurzenia w rdzeniu jest regulowana, by sterować współczynnikiem powielenia i w efekcie mocą reaktora. Rdzeń otoczony jest reflektorem neutronów (ogranicza to ich ucieczkę z rdzenia). Na zewnątrz reaktor otoczony jest betonową osłoną radiacyjną, pochłaniającą promieniowanie γ i neutrony, które nie zostały zawrócone przez reflektor.

Rdzeń jest także wypełniony wodą (w reaktorach starszego typu stosowany bywał także ciekły sód). Spełnia ona rolę nośnika ciepła, a więc chłodziwa reaktora. Krążąc pod sporym ciśnieniem w obiegu zamkniętym, woda wyprowadza wyzwolone w reakcjach rozszczepiania ciepło poza obszar reaktora. W wymienniku ciepła podgrzewa ona wodę krążącą w tzw. obiegu wtórnym - woda ta zamienia się w parę i napędza generator elektryczny jak w każdej klasycznej elektrowni cieplnej.

Reaktor jądrowy jest skomplikowanym urządzeniem technologicznym, projektowanym i budowanym przy współpracy specjalistów z wielu dziedzin, w tym fizyków, chemików i inżynierów wielu specjalności. Utrzymywanie reaktora w ruchu i dbanie o bezpieczną jego eksploatację także wymaga nieustannej pracy wielu różnych specjalistów.



Rysunek 3.73: Zdjęcie reaktora

Energetyka jądrowa

Trudno wyobrazić sobie życie bez energii elektrycznej. Aby ją jednak uzyskać, trzeba wykorzystać inne źródła energii, które w elektrowniach zamieniamy na energię elektryczną. Najczęściej stosowane są elektrownie ciepłone, w których spala się paliwa chemiczne: węgiel, gaz, paliwa płynne lub biomasę. Do tej grupy można zaliczyć także elektrownie jądrowe, w których jednak spala się nie paliwo chemiczne, lecz jądrowe, najczęściej izotop uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Jak działa elektrownia jądrowa? W reaktorach jądrowych wydziela się energia, głównie w postaci energii kinetycznej produktów rozszczepienia uranu. Energia ta jest rozpraszana w materiale reaktora, na skutek czego wzrasta jego temperatura, podobnie jak w piecu, w którym spala się paliwo chemiczne. Wydzielone ciepło podgrzewa wodę, woda zamienia się w parę napędzającą turbiny, które z kolei wprawiają w ruch generatory prądu elektrycznego. Różnica między zwykłą elektrownią na paliwo chemiczne, a elektrownią jądrową jest tylko w konstrukcji pieca (reaktora dostarczającego ciepło). Cała reszta jest w zasadzie taka sama.

Jest jednak wiele bardzo ważnych różnic praktycznych; oto jedna z nich. Energia wydzielana w procesie spalania jednego atomu węgla wynosi około 4 eV. Energia wydzielana w procesie rozszczepienia jednego jądra uranu wynosi około 200 MeV, czyli 200 milionów eV. To około 50 milionów razy więcej, zgodnie zresztą z wnioskiem z przykładów *Przykład - energia wiązania* na stronie 226 i *Przykład - energia wydzielona w reakcji chemicznej* na stronie 227 z poprzedniego paragrafu. Tak więc stosunek masy paliwa uranowego do masy węgla, która może dostarczyć taką samą ilość ciepła, to setne części promila. W rezultacie, do pracy elektrowni jądrowej o mocy 1000 MW potrzeba około 30 ton paliwa uranowego na rok, a do pracy analogicznej elektrowni węglowej – kilka milionów ton węgla na rok. Ujmijmy to bardziej obrazowo: w elektrowni jądrowej wystarczy jedna wymiana paliwa w roku, a ten „wsad” do reaktora mógłby zostać przetransportowany jedną węglarką (typ kolejowego wagonu towarowego, na ogół o nośności 40-60 ton). Do elektrowni węglowej zaś muszą codziennie przybywać kilkudziesięciowagonowe pociągi z paliwem.

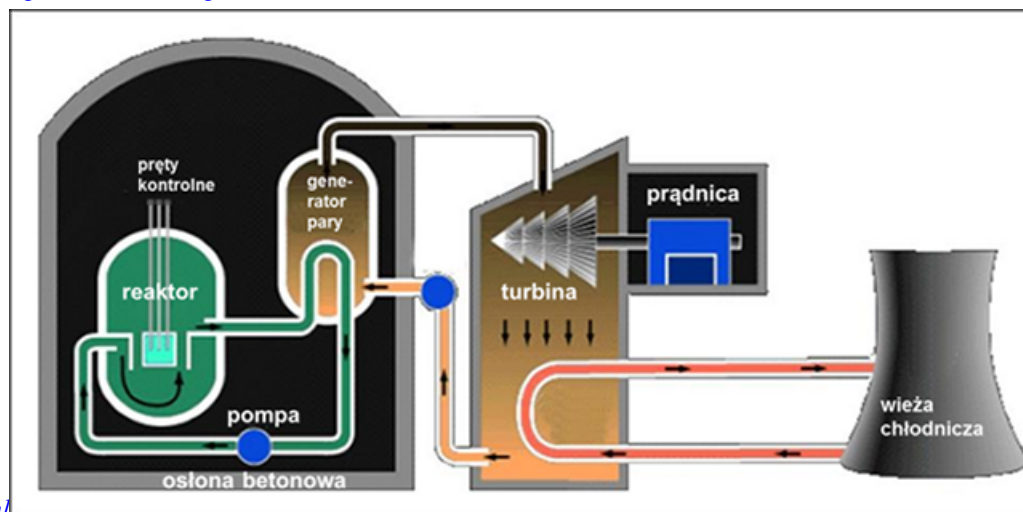
Pomyśl sam, co z tego wynika, uwzględnij przy tym kolejną różnicę: produkty pracy elektrowni (odpady) trzeba gdzieś wywieźć i składować - najchętniej w bezpieczny sposób. W przypadku elektrowni jądrowej odpadów jest - podobnie jak paliwa - znacznie mniej niż w elektrowni węglowej i są one zabezpieczane na mocy przepisów obowiązujących od samego początku istnienia takich elektrowni. Eksploatacja elektrowni węglowych dopiero od

niedawna zaczyna być obwarowywana coraz bardziej rygorystycznymi uregulowaniami dotyczącymi odpadów. Przez ponad połowę XX wieku odpady stałe trafiały tam, gdzie to było wygodne a lotne wprost do atmosfery. Sytuacja ta zmieniała się stopniowo, począwszy od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, choć problem ilości odpadów nie zostanie nigdy rozwiązany - wynika on z samej technologii. Dziś energetyka węglowa jest na etapie ograniczania ilości emisji CO₂, jednak można to uzyskać tylko poprzez ograniczenie produkcji energii w elektrowniach węglowych.

Konstrukcja i działanie elektrowni jądrowej

Na schemacie poniżej pokazane są zasadnicze elementy najczęściej stosowanej elektrowni jądrowej „PWR” (*Pressurized Water Reactor* - reaktor wodny ciśnieniowy). Wytwarzający ciepło reaktor jądrowy umieszczony jest w zbiorniku ciśnieniowym. Reaktor chłodzony jest przepływającą wodą pod wysokim ciśnieniem (ok. 15MPa czyli 150 atmosfer). Temperatura wody utrzymywana jest w granicach 300 °C - 350 °C, ale przy tak wysokim ciśnieniu woda nie wrze. Jest to pierwotny obieg wody, całkowicie hermetyczny. Woda ta oddaje ciepło wodzie z drugiego (wtórnego) obiegu w generatorze pary. Para w nim wytwarzana napędza turbinę, a ta prądnicę prądu elektrycznego. Po przejściu przez turbinę para zostaje ochłodzona w kontakcie z wodą krążącą w wieży chłodniczej, skrapla się i zostaje wpompowana do generatora pary.

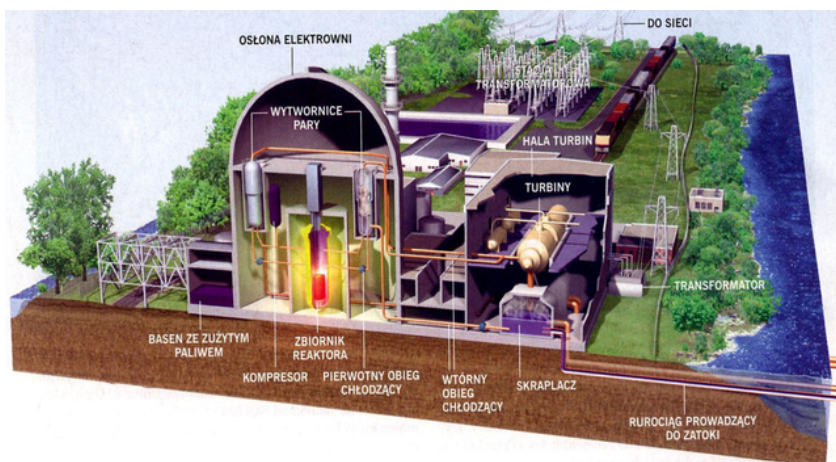
Więcej na ten temat: <http://www.nuclear.pl/>



energetyka.pwr/0.html

Rysunek 3.74: Schemat typowej elektrowni jądrowej

Bardzo ciekawy i znacznie bardziej szczegółowy opis elementów elektrowni można znaleźć na portalu „Świadomie o atomie”. Zobacz tam animowane schematy budowy różnego typu reaktorów.



Rysunek 3.75: Główne elementy elektrowni jądrowej

Obecnie na świecie czynnych jest ponad 400 energetycznych reaktorów jądrowych dostarczając ok. 15% światowej produkcji energii elektrycznej. Największy udział energetyki jądrowej w produkcji energii elektrycznej jest we Francji - ok. 80%, najwięcej reaktorów jest w USA, ponad 100.



Rysunek 3.76: Elektrownia jądrowa widziana z lotu ptaka

Powyższą fotografię elektrowni jądrowej wykonano z okna samolotu na trasie Warszawa - Genewa. Wyraźnie widoczna jest charakterystyczna wieża chłodnicza, z której wydobywa się para i mgiełka - jak z czajnika. Nie są to, jak się często błędnie sądzi, wydobywające się spaliny czy dym, jak z komina elektrowni węglowej. Na prawo od wieży widać betonową osłonę reaktora w kształcie kopuły. W pobliżu elektrowni przepływa rzeka i znajduje się osiedle mieszkaniowe.

Obawy dotyczące bezpieczeństwa i eksploatacji elektrowni jądrowych

W efektywność energetyki jądrowej nikt nie wątpi, ale przedmiotem niegasnących dyskusji jest bezpieczeństwo. Ogromne energie wyzwolane w reakcjach jądrowych budzą emocje i strach. Jest to w dużym stopniu strach przed nieznanym; strach ten jest dodatkowo podsycany skojarzeniami z bombą atomową. Dlatego warto wiedzieć, co naprawdę stanowi zagrożenie, a co jest wynikiem niewiedzy. Przedstawmy więc krótko i omówmy obawy pojawiające się najczęściej.

1. Czy reaktor jądrowy może wybuchnąć na podobieństwo bomby atomowej?

Nie, nie może. W reaktorze jądrowym paliwo wypala się systematycznie, a intensywność reakcji jądrowych nie zmienia się w czasie. Wspomniany wcześniej współczynnik powielenia neutronów jest utrzymywany na poziomie bardzo bliskim jedynki - służy temu wiele różnych systemów, automatycznych i „naturalnych”, pracujących niezależnie od siebie. Przy wybuchu bomby, paliwo w bardzo krótkim czasie wypala się całkowicie. Konstrukcja obu urządzeń jest zupełnie inna. Nie można bomby przerobić na reaktor ani reaktora na bombę. Ponadto, paliwo stosowane w elektrowniach jądrowych zawiera zwykle kilka procent rozszczepialnego uranu 235; w bombach jądrowych jest o wiele więcej - ponad 80%.

2. Czy może nastąpić awaria podobna do tej w Czarnobylu?

Reaktory RBMK (z jęz. rosyjskiego: *r'eaktor bolshoi mośčnosti, kanal'ny* - reaktor kanałowy dużej mocy) czyli typu czarnobylskiego, budowane były wyłącznie w Związku Radzieckim. Konstrukcja takiego reaktora umożliwia produkcję plutonu do celów wojskowych. Możliwość ta była jednak okupiona tym, że w przypadku awarii, moc reaktora rośnie. Wynika to z jego konstrukcji oraz zastosowania grafitu do spowalniania neutronów. Jego właściwości powodują, że w miarę wzrostu temperatury reaktora spowalnia on neutrony coraz efektywniej. Prowadzi to do wzrostu mocy reaktora, co może doprowadzić – w braku innych zabezpieczeń do awarii. Tymczasem stosowanie wody w roli spowalnicza (tak działają wszystkie obecnie budowane reaktory) daje efekt odwrotny. Wzrost temperatury wody powoduje coraz mniej efektywne spowalnianie neutronów i w rezultacie

spadek mocy reaktora. Kiedy więc wskutek sekwencji ludzkich błędów praca reaktora w Czarnobylu wymknęła się spod kontroli, nastąpił wzrost intensywności reakcji jądrowych, w rezultacie wzrost temperatury i ciśnienia, a w konsekwencji – klasyczny wybuch, podobny do wybuchu gazu. We wszystkich innych typach reaktorów jest na odwrót. Reaktor przestaje pracować i moc jego maleje.

Zupełnie inne były przyczyny i przebieg awarii trzech reaktorów w elektrowni Fukushima I w 2011 roku. Była ona skutkiem splotu wielu czynników niezależnych od człowieka, począwszy od wystąpienia fali tsunami o niespotykanej wysokości ok. 10 m, która spowodowała zalanie terenu elektrowni. Istniejące zabezpieczenia, zaprojektowane na podstawie wcześniejszych obserwacji, przewidywały maksymalną wysokość fali do ok. trzech metrów i były w stanie wytrzymać falę sześciometrową, a więc z dwukrotnym zapasem. System bezpieczeństwa natychmiast wyłączył czynne reaktory; jednak konieczne było dalsze ich chłodzenie. Zasilanie w energię elektryczną niezbędną do pracy pomp tłoczących wodę nie mogło pochodzić z samej elektrowni Fukushima, a dostawy energii elektrycznej z zewnątrz zostały przerwane ze względu na zniszczenie przez to samo tsunami sieci przesyłowej. W zaistniałej sytuacji system bezpieczeństwa uruchomił awaryjne generatory energii, napędzane silnikami Diesla; te jednak nie wystarczyły do opanowania sytuacji. Na dodatek, z powodu wyczerpania się awaryjnych baterii, przestały działać systemy kontroli reaktorów, pozbawiając ludzi pracujących przy opanowywaniu awarii możliwości śledzenia stanu reaktorów. Doszło do odsłonięcia rdzeni reaktorów, ich stopienia i wybuchu pożarów. Jednak dzięki ciągłej pracy ludzi odpowiedzialnych za reaktory, skutki całej awarii – mierzone przede wszystkim liczbą ofiar a także stopniem i rozległością skażenia promieniotwórczego – ocenia się jako około dziesięciokrotnie mniejsze niż po awarii w Czarnobylu.

3. Czy odpady promieniotwórcze zanieczyszczają środowisko?

Na ogół nie wiemy, że paliwo jądrowe w postaci prętów uranowych ma znikomą aktywność promieniotwórczą i praktycznie nie stanowi zagrożenia nawet w przypadku przedostania się do otoczenia. Natomiast wypalone paliwo jest rzeczywiście silnie promieniotwórcze. Wykorzystane pręty paliwowe i inne materiały, które miały z nim styczność przechowuje się przez okres kilku lat na terenie elektrowni, po czym umieszcza w przechowalniku głęboko pod ziemią. Czynią tak od kilkudziesięciu lat kraje, w których pracują elektrownie jądrowe i żadnego zagrożenia z tym związanego nie stwierdzono.

4. Terrorysta może zniszczyć reaktor i uwolnić materiały radioaktywne...

Po 11 września 2001 roku do zagrożeń terrorystycznych dopisano jeszcze jedno – uderzenie samolotu w obiekt o wielkim znaczeniu. Konsekwencją stała się potrzeba wzmocnienia bloku reaktora i niestety, kosztów budowy, aby ewentualne uderzenie samolotu nie spowodowało awarii. Element ten jest włączony do projektów budowanych obecnie reaktorów.

5. Czy elektrownia jądrowa jest dużo droższa od elektrowni konwencjonalnych?

Koszty budowy elektrowni jądrowej są rzeczywiście wyższe niż koszty budowy elektrowni na paliwa chemiczne. Kompensowane to jest jednak znacznie niższymi kosztami zakupu i transportu paliwa oraz czasem pracy elektrowni (około 60 lat). Spośród wszystkich technologii produkcji energii elektrycznej, sumaryczny koszt jednostki wyprodukowanej energii elektrycznej jest najniższy w elektrowniach jądrowych.

6. Ale paliwo jądrowe trzeba kupować, a węgla własnego mamy pod dostatkiem...

Wiele obaw i wątpliwości dotyczy Polski, jej specyficznego położenia i gospodarki. Mamy w Polsce duże zasoby węgla, więc około 93% energii elektrycznej pochodzi ze spalania tego surowca. W rezultacie, do atmosfery emitowane są ogromne ilości dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń, w tym substancji promieniotwórczych. Zgodnie z wymogami Unii Europejskiej, za emisję dwutlenku węgla Polska może już niedługo płacić nawet kilka miliardów euro rocznie. Poza tym, węgiel jest bardzo cennym surowcem w wielu procesach i technologiach chemicznych. Spalanie go w piecach elektrowni na wielką skalę zakrawa momentami na wandalizm.

7. Energetyka jądrowa jest gorszym rozwiązaniem niż tzw. odnawialne źródła energii...

Słońce, woda, wiatr, biomasa, źródła geotermalne, to ciekawe możliwości i warto je stosować tam, gdzie jest to uzasadnione potrzebami i możliwościami. Bilans możliwości i kosztów pokazuje jednak, że te źródła w polskich warunkach nie mogą się stać podstawowym zabezpieczeniem dla energetyki, mogą jedynie stanowić zasoby uzupełniające.

8. Cała Polska jest od dawna zelektryfikowana. Po co więc nam energetyka jądrowa?

Cała Polska jest zelektryfikowana - ale to oznacza, że mamy możliwość szerokiego korzystania z energii elektrycznej. Czy odczuwamy potrzebę zwiększania zużycia energii elektrycznej? Może nie bezpośrednio, ale zasady zrównoważonego rozwoju podpowiadają, że zużycie to powinno rosnać, by zapewnić wzrost ogólnego

poziomu życia. Polska zajmuje obecnie jedno z ostatnich miejsc w średnim zużyciu energii elektrycznej przypadającym na jednego mieszkańca wśród krajów Europy i to powinno nam dawać wiele do myślenia.

Energia jądrowa jest „darem przyrody”, podobnie jak energia węglowa, słoneczna, wiatrowa i każde inne rozpoznane i eksploatowane przez człowieka źródło energii. Człowiek ma prawo korzystać z każdego z tych źródeł - w sposób umiarkowany i rozumny, z poszanowaniem całej przyrody i z uwzględnieniem potrzeb nie tylko bieżących, ale i przyszłych. Najgorszymi doradcami w tej kwestii są strach, niewiedza i krótkowzroczność. Pomyślmy o korzystaniu z elektryczności. Nie boimy się włączyć lampki nocnej do kontaktu chociaż wiemy, że dostępna tam energia może zabić. Nie boimy się, bo wiemy kiedy energia ta jest użyteczna, a potrafimy przewidzieć, kiedy może stać się niebezpieczna. Energii jądrowej też nie trzeba się bać - trzeba wiedzieć, kiedy jest użyteczna i przewidywać kiedy może stać się niebezpieczna.

Rysunek 3.77: Elektrownia jądrowa

[EXE PDF](#)Ćwiczenie: Symulator elektrowni jądrowej typu PWR

Pytania i problemy

1. Do przeprowadzenia reakcji rozszczepienia uranu 235 używa się neutronów. Tymczasem istnieją ciężkie jądra atomowe, które po pochłonięciu protonu także podlegają rozszczepieniu, wydzielając przy tym porównywalne ilości energii. Podaj możliwy powód, dla którego tej ostatniej możliwości nie wykorzystuje się w praktyce.
2. Sprawdź, czy w równaniach (1) i (2) - [Rysunek 3.65: Dwie przykładowe reakcje rozszczepienia](#) na stronie 229, spełnione są zasady zachowania ładunku i liczby nukleonów w kolejnych etapach tych reakcji.
3. Gdyby na jednej szalce odpowiednio czulej wagi położyć jądro ${}_{92}^{236}\text{U}$, a na drugiej powstałe wskutek rozszczepienia jądra kryptonu, baru i trzy neutrony (patrz reakcja (1) na [Rysunek 3.65: Dwie przykładowe reakcje rozszczepienia](#) na stronie 229), to która szalka byłaby wyżej, a która niżej? Uzasadnij swoją odpowiedź.
4. Podaj definicję współczynnika mnożenia (powielenia) reakcji łańcuchowej. W jakim etapie wybuchu bomby atomowej współczynnik ten jest mniejszy od jedności? W jakim etapie pracy reaktora jądrowego współczynnik ten jest celowo utrzymywany na poziomie nieco większym od jedności?
5. Wymień podstawowe podobieństwa i różnice pomiędzy elektrownią na paliwo konwencjonalne a elektrownią jądrową.
6. Przedstaw, w formie krótkiej wypowiedzi pisemnej, swoją opinię na temat wybranego aspektu - technicznego, ekologicznego, ekonomicznego bądź społecznego - wykorzystywania energetyki jądrowej. Wybierz aspekt, który najbardziej przemawia do Twojej wyobraźni w tej kwestii. Możesz, ale nie musisz, odnieść się do jednego z zagadnień omówionych w tekście.
7. Poniższe zdjęcie przedstawia widok elektrowni atomowej w Stanach Zjednoczonych. Wskaż podobieństwa z widokiem elektrowni atomowej, zamieszczonym w tekście ([Rysunek 3.76: Elektrownia jądrowa widziana z lotu ptaka](#) na stronie 238). Skomentuj te podobieństwa.

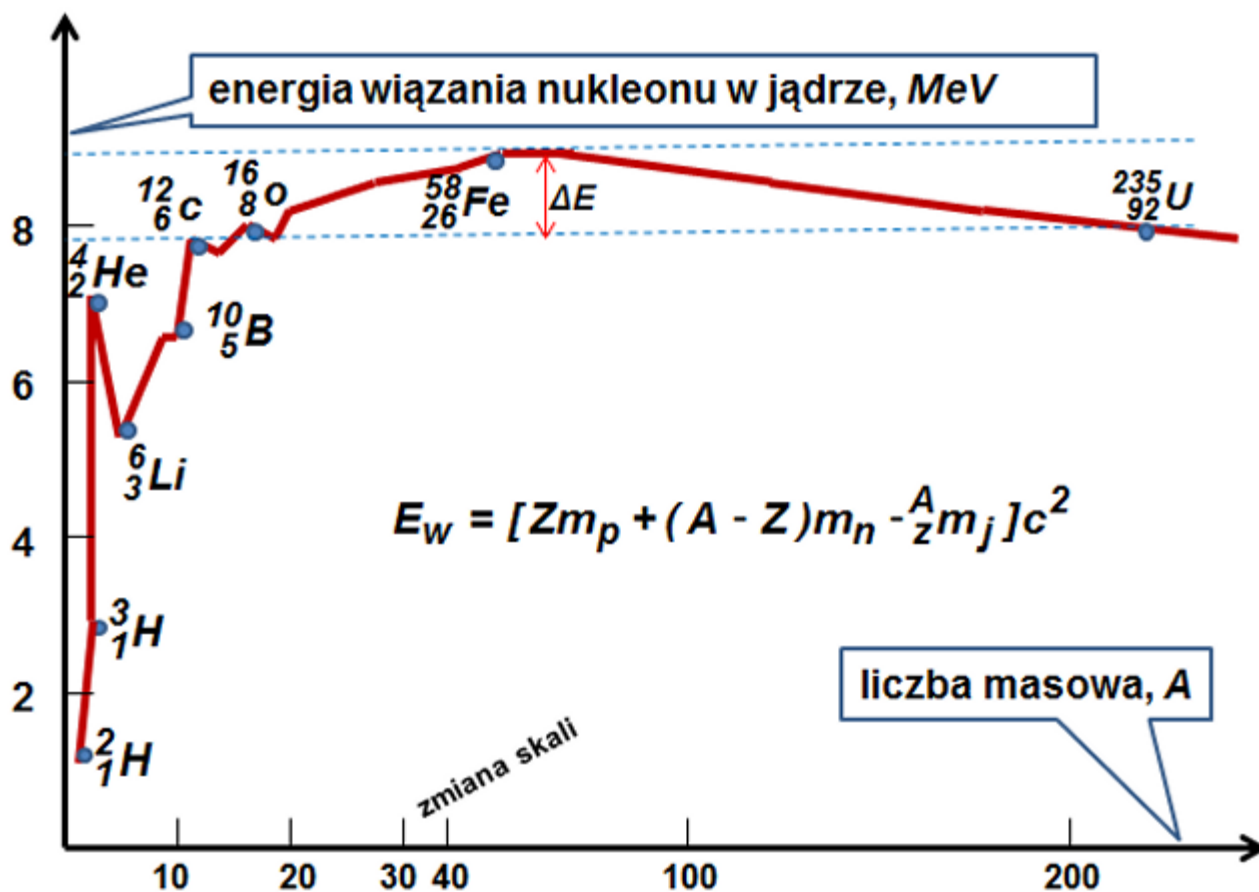


Rysunek 3.78: Widok na teren elektrowni jądrowej

3.8 Reakcje syntezy jąder lekkich. Gwiazdy, bomba wodorowa, reaktor termojądrowy

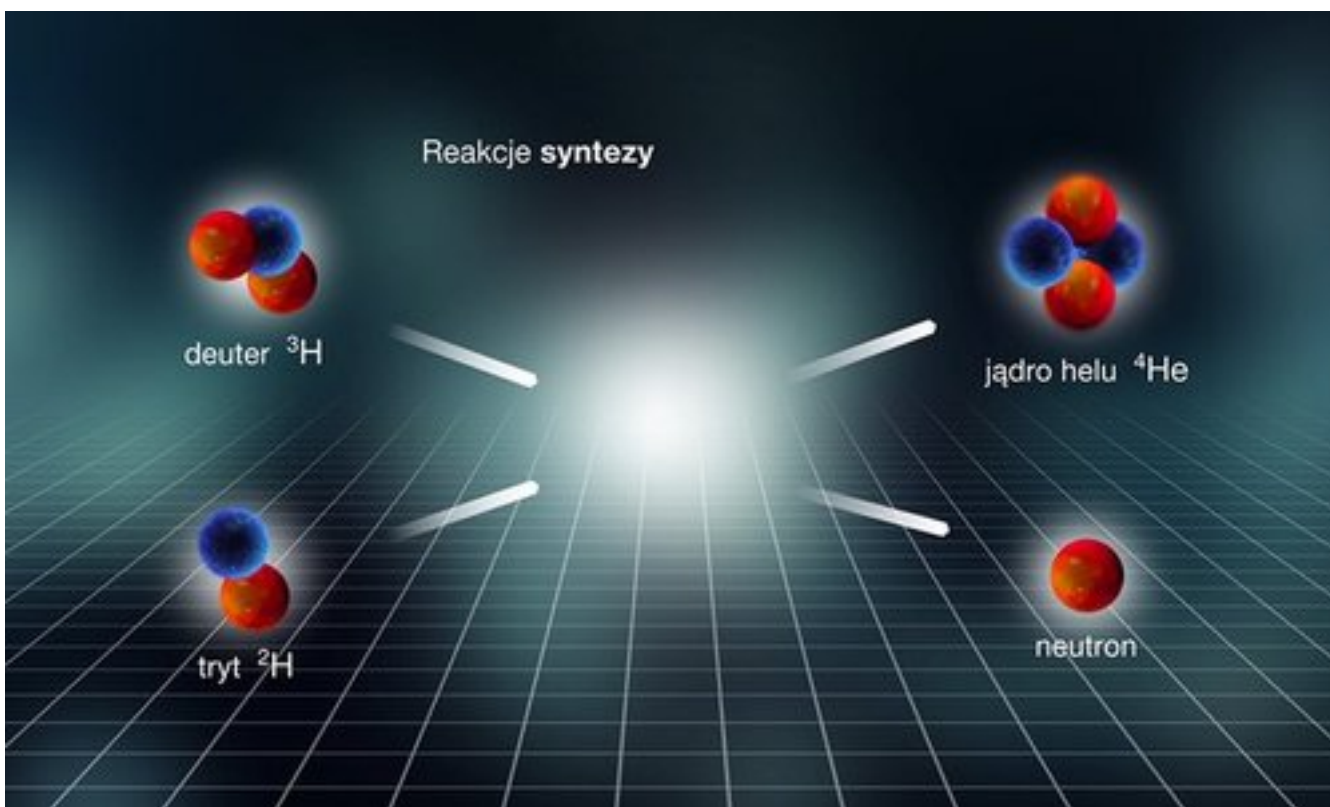
W poprzednim rozdziale rozpoczęliśmy rozważania o reakcjach rozszczepiania od przypomnienia wykresu zależności energii wiązania nukleonu od liczby masowej jądra (*Rysunek 3.68: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A* na stronie 232, *Rysunek 3.79: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A* na stronie 242). Rozważania o reakcjach syntezy także rozpoczniemy od spojrzenia na ten wykres, ale tym razem na jego początkowy fragment.

Obserwujemy tu ogólną tendencję wzrostu energii wiązania wraz ze wzrostem liczby masowej A . Wzrost ten jest o wiele większy niż zmniejszanie się energii wiązania dla dużych wartości liczb masowych. Następuje też o wiele szybciej: od ok. 1 MeV na nukleon dla dwunukleonowego deuteru do ponad 7 MeV na nukleon dla czternukleonowego ${}^4_2\text{He}$. Widzimy również wyraźne nieregularności. Niektóre jądra o większych A mają energię wiązania nukleonu mniejszą niż jądra o mniejszych wartościach A . Wzrost ten kończy się - na poziomie ponad 8 MeV na nukleon - dla jąder atomowych o liczbie A rzędu 60. Typowo podaje się jądro żelaza ${}^{58}_{26}\text{Fe}$ jako przykład jądra najsilniej związanego, oczywiście w przeliczeniu na jeden nukleon. Powstaje pytanie – co wynika z takiego właśnie przebiegu tej zależności?



Rysunek 3.79: Zależność energii wiązania nukleonu w jądrze od liczby masowej A

Wiemy już, że różnice w energiach wiązania mają ścisły związek z różnicą mas cząstek przed i po reakcji. Wiemy też, że takie reakcje, których produktami są jądra o większych energiach wiązania mogą dostarczyć ogromnych energii wynikających z tej różnicy. Droga wydaje się więc być bardzo prosta: przeprowadzajmy reakcje, w których substratami są jądra lekkie, słabo związane, np. deuter ${}^2_1\text{H}$ i tryt ${}^3_1\text{H}$, zaś produktami są jądra bardziej złożone i silniej związane, np. ${}^4_2\text{He}$ (Rysunek 3.80: *Reakcja syntezy $2\ 4\text{He}$ z deuteru i trytu* na stronie 243). Innym rozwiązaniem mogłoby być łączenie jąder relatywnie słabo związanych (przykładami na wykresie są jądra litu ${}^6_3\text{Li}$ i boru ${}^{10}_5\text{B}$); produktami tych reakcji mogłyby być jądra węgla ${}^{12}_6\text{C}$ lub tlenu ${}^{16}_8\text{O}$.



W rozdz. 3.6 *Reakcje jądrowe* na stronie 223 obliczyliśmy, że energia wydzielana w tej reakcji wynosi prawie 18 MeV

Rysunek 3.80: Reakcja syntezy ${}^4_2\text{He}$ z deuteru i trytu

Wiemy jednak również, że aby reakcje jądrowe mogły zajść, jądra muszą zbliżyć się na odległość w której zaczną działać siły jądrowe. I tu doszliśmy do najważniejszego problemu: przy próbach zbliżania do siebie jąder atomowych odpychają się one elektrostatycznie, bo wszystkie mają dodatni ładunek elektryczny. Odpychanie to będzie coraz silniejsze w miarę malenia odległości między nimi. Jak więc doprowadzić do reakcji **syntezy** (fuzji) **jądrowej**, w której nastąpi łączenie się jąder lżejszych w cięższe, o większych energiach wiązania?

Gwiazda jako reaktor termojądrowy

Opisane wyżej egzotermyczne reakcje zachodzą na masową skalę we wnętrzu gwiazd, w kolejnych etapach ich ewolucji. Jest to możliwe dzięki wysokim temperaturom w ich wnętrzu (rzędu 10^7K i więcej), a także ogromnej gęstości i ciśnieniu tam panującym.

W tych warunkach atomy nie istnieją: elektrony nie są związane z żadnymi konkretnymi jądrami atomowymi, lecz z konglomeratem wielu jąder - taki stan materii nazywamy plazmą. Jądra wodoru i innych lekkich pierwiastków stale przebywają więc w niewielkich od siebie odległościach, rzędu 10^{-13}m i mniej. Przypomnijmy, że w zwykłej materii na Ziemi odległości między jądrami atomowymi sąsiadujących ze sobą atomów są nie mniejsze niż 10^{-10}m ($10^{-10}\text{m} = 1 \text{ \AA}$ to typowy rozmiar niewielkiego atomu).



Rysunek 3.81: We wnętrzu Słońca zachodzą reakcje termojądrowe

Z kolei wysoka temperatura oznacza, że jądra mają odpowiednio dużą energię kinetyczną, dzięki której mogą pokonywać odpychającą barierę elektrostatycznej energii potencjalnej wzajemnego odpychania. Ze względu na tę rolę temperatury reakcje syntezy zwane są też reakcjami *termojądrowymi*.

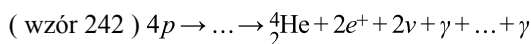
W niektórych masywnych gwiazdach zachodzi wiele innych reakcji jądrowych, w których syntetyzuje się wiele cięższych izotopów. Przyjrzyjmy się raz jeszcze „najważniejszemu wykresowi Wszechświata”: z jąder węgla i tlenu powstają jądra o liczbach masowych A ok. 25-30 (przykładowo: jądra magnezu ${}_{12}^{24}\text{Mg}$, krzemu ${}_{14}^{28}\text{Si}$ i siarki ${}_{16}^{32}\text{S}$). W etapach końcowych ewolucji gwiazd najbardziej masywnych, powstają jądra o liczbach A ok. 60. Są to najsilnie związane jądra znane w przyrodzie, więc „wspinaczka” po lewej stronie wykresu kończy się właśnie na nich.

Dalsze reakcje syntezy byłyby już endoenergetyczne, gdyż powstawałyby z nich jądra słabiej związane (w przeliczeniu na jeden nukleon), niż jądra żelaza. Reakcje takie nie mogłyby więc służyć podtrzymaniu świecenia gwiazdy. Zachodzą one jednak, w trakcie wybuchu gwiazdy supernowej, kosztem energii grawitacyjnej zapadającego się jądra takiej gwiazdy. W tych reakcjach powstają jądra o liczbach masowych ponad 60, w tym złoto (wspominaliśmy o tym w rozdziale [3.6 Reakcje jądrowe](#) na stronie 223). Powstałe izotopy - stabilne i promieniotwórcze - zostają wyrzucone w otoczenie gwiazdy w postaci materialnej fali uderzeniowej. Gdy natrafi ona w przestrzeni międzygwiazdnej na obłok wodoru, powoduje jego zagęszczenie, co może doprowadzić do uformowania się nowej gwiazdy. Tak powstał nasz układ słoneczny; wiemy o tym dlatego, że zawiera on - prócz pierwotnej materii, czyli wodoru i helu - także pierwiastki cięższe, które powstały zapewne w innej gwiazdzie.

O różnych stadiach ewolucji gwiazd i zachodzących przy tym procesach i przemianach wspominaliśmy w rozdziale [1.9 Ewolucja i klasyfikacja gwiazd](#) na stronie 78 e-podręcznika.

! Wskazówka:

W Słońcu (także w innych gwiazdach ciągu głównego) synteza helu ${}^4_2\text{He}$ przebiega kilkietapowo, w całej serii (lub cyklu) reakcji. Sumaryczny efekt każdego cyklu można zapisać następująco:

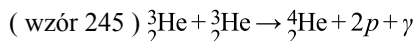
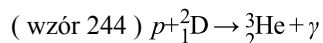
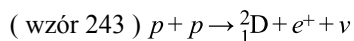


Niektóre reakcje w cyklu mogą być endoenergetyczne. Jednak w sumie każdy akt syntezy jądra helu powoduje wyzwolenie ok. 27 MeV energii, w postaci energii kinetycznej produktów oraz różnej liczby kwantów promieniowania γ . Każdy powstały pozyton oddziałuje z elektronem w tzw. reakcji anihilacji, co powoduje powstanie dwóch dodatkowych kwantów γ o energii ok. 0,5 MeV każdy.

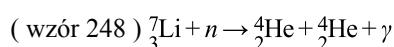
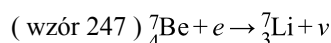
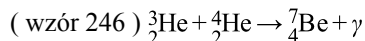
Obecność pozytonów i neutrin wśród produktów cyklu reakcji świadczy o udziale w nim przemiany β . Ten udział jest najczęściej czynnikiem spowalniającym przebieg całego cyklu (wynika to z głębszych rozważań opartych na tzw. modelu standardowym). Wnętrze gwiazdy ciągu głównego znacznie bardziej przypomina więc stabilnie pracujący reaktor termojądrowy niż wybuchającą bombę wodorową. W późniejszych stadiach ewolucji gwiazd, gdy takich reakcji regulujących tempo syntezy nie ma, zjawiska wewnątrz gwiazdy coraz bardziej przypominają wybuch.

Na koniec tej dygresji podajmy zestaw reakcji w dwóch najlepiej poznanych cyklach syntezy helu:

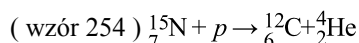
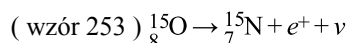
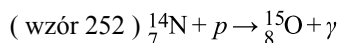
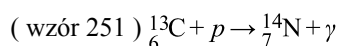
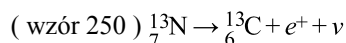
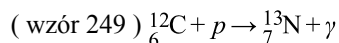
Cykl Bethego (tzw. cykl czteroprotonowy) - dominuje w temperaturach stosunkowo niskich, rzędu 5 milionów kelwinów:



Gdy we wnętrzu gwiazdy jest już sporo ${}^4_2\text{He}$ i jego temperatura osiąga kilkanaście milionów kelwinów, to otwierają się nowe gałęzie tego cyklu, w których powstają pośrednie jądra berylu i litu. Najczęściej realizowany przebieg to:



Cykl CNO - dominuje w temperaturach wyższych, rzędu 15 milionów kelwinów i więcej; jego sześćoetapowy przebieg wymaga, by we wnętrzu gwiazdy zsyntetyzowane zostały już wcześniej jądra węgla, azotu i tlenu:



W przebiegu tego cyklu wyraźnie widać cztery reakcje, w których do różnych izotopów węgla i azotu kolejno przyłączane są protony. Widać też dwie reakcje rozpadu β^+ , w których emitowane są pozytony i neutrino.

Reakcje syntezy w warunkach ziemskich

Jak wywołać takie reakcje na Ziemi? Jak zapewnić materii odpowiednią gęstość i - przede wszystkim - odpowiednio wysoką temperaturę? Odpowiedzi na te dwa pytania, udzielone w połowie ubiegłego wieku, wystarczyły do skonstruowania bomby wodorowej. Widocznie jednak naukowcy uznali to za wątpliwe osiągnięcie, bo ze swoimi dociekaniem poszli dalej: jak utrzymać materię w tym egzotycznym stanie znacznie dłużej niż przez czas trwania wybuchu? Jak spowolnić proces syntezy, by móc kontrolować tempo jej przebiegu i nadażać odbierać uwolnioną w nim energię? Czy można przeprowadzić fuzję termojądrową w mniej „egzotycznych” warunkach? Ponadto wyłania się wiele innych trudnych, bardziej szczegółowych, problemów technicznych. Jednym z nich jest problem zapewnienia izolacji wysokotemperaturowej plazmy od ścianek pojemnika. Temperatura plazmy jest rzędu dziesiątek milionów stopni, takiej temperatury nie wytrzymują żadne ognioodporne materiały, przy styku z nią natychmiast by wyparowały.

To wszystko są pytania na miarę XXI wieku. Dlaczego są one takie ważne? Przede wszystkim dlatego, że paliwa kopalne: węgiel, ropa, gaz, a także uran, służące obecnie do produkcji energii elektrycznej wystarczą na kilkadziesiąt lat, w najlepszym przypadku może na kilkaset lat - pod warunkiem, że nauczymy się wykorzystywać, na masową skalę, tzw. odnawialne źródła energii. Powstaje pytanie, z czego potem będzie ludzkość zaspokajała rosnące

zapotrzebowanie na energię? Jeśli pozostawimy ten problem naszym potomkom, kiedy paliw zacznie brakować, może być za późno.

Synteza termojądrowa jest źródłem energii Słońca i gwiazd. Człowiek też jest w stanie dokonać syntezy termojądrowej, ale nie potrafi jeszcze czynić tego w sposób kontrolowany. Warto się jednak tego nauczyć - uzyskamy wtedy dostęp do niewyobrażalnie dużych zasobów energii w postaci wodoru (dokładniej: deuteru), zmagazynowanych w wodzie na naszej planecie. Warto dodać, że 1 litr wody morskiej zawiera tyle deuteru, że przy jego „spaleniu” może się wyzwolić energia porównywalna ze spalaniem ok. 300 litrów benzyny wysokooktanowej.

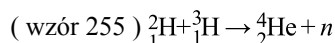
Reaktor termojądrowy

Warunki panujące na Słońcu zasadniczo odbiegają od tych na Ziemi. Słońce jest kulą zjonizowanego gazu, w którym - jak już wspomnieliśmy wyżej - elektrony nie są związane z jądrami atomowymi. Stan taki nosi nazwę plazmy. Gaz ten składa się głównie z wodoru i helu. Duża masa (ponad 300 tysięcy mas Ziemi) sprawia, że ogromne siły grawitacji utrzymują w jądrze Słońca gigantyczne ciśnienia, co przy temperaturach powyżej 10 milionów stopni stwarza dogodne warunki dla samopodtrzymujących się reakcji termojądrowych.

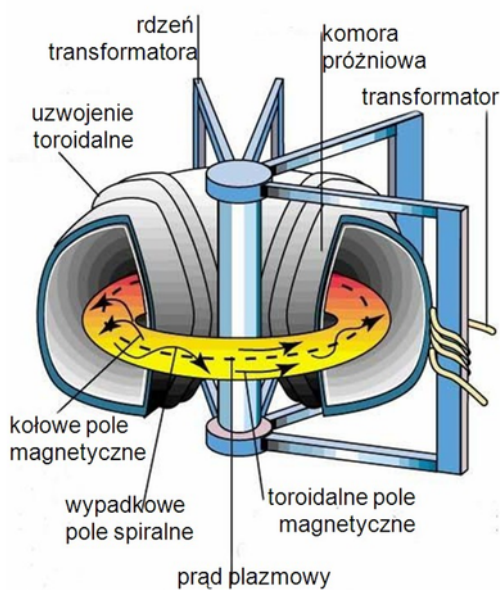
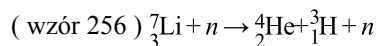
Problem więc, jak stworzyć podobne warunki lokalnie na Ziemi. Należy wytworzyć plazmę składającą się np. z izotopów wodoru: deuteru i trytu, podgrzać do temperatury milionów stopni i przy wystarczającej gęstości utrzymywać taki stan dostatecznie długo. Wtedy zaczną zachodzić reakcje syntezy, a wytworzona energia cieplna może być wykorzystana do produkcji energii elektrycznej. Problemów technicznych jest bardzo wiele i są one na tyle poważne, że mimo pięćdziesięciu lat starań, nie zostały one rozwiązane w sposób zadowalający.

Obiecującym rozwiązaniem jest **TOKAMAK** (z języka rosyjskiego: *toroidalnaja kamiera s magnitymi katuszkami* - toroidalna komora z cewkami magnetycznymi). Jest to komora o kształcie toroidu (*Rysunek 3.82: Schemat reaktora termojądrowego typu „Tokamak”* na stronie 246) - podobnym do opony koła samochodowego, ale zamknięta.

Reakcja termojądrowa będąca źródłem energii, to znana nam już reakcja ciężkich izotopów wodoru: deuteru i trytu.



Deuter na paliwo może być łatwo pozyskiwany z wody morskiej. Tryt może być produkowany w samej komorze w rezultacie oddziaływania wyzwalanych neutronów z jądrami litu wprowadzanymi do komory wraz z paliwem. Lit jest pierwiastkiem o liczbie atomowej $Z = 3$ i jest dostępny w dużych ilościach na Ziemi. Reakcja zachodzi zgodnie ze schematem

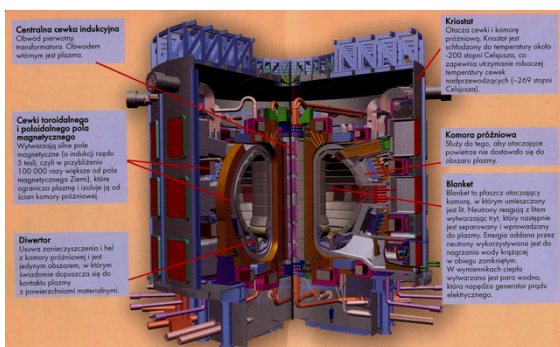


Rysunek 3.82: Schemat reaktora termojądrowego typu „Tokamak”

Znajdująca się w komorze plazma (substraty reakcji dostarczane są w postaci kolejnych „wstrzyknięć”, na podobieństwo porcji paliwa w silniku spalinowym) poddana jest działaniu pól magnetycznych wytworzonych przez układ elektromagnesów i skierowanych wzdłuż i w poprzek toroidu. Prowadzi to do wypadkowego pola o kształcie linii śrubowej. Prąd elektryczny indukowany w plazmie przez transformator i płynący wzdłuż obwodu toroidu podgrzewa plazmę a wytworzone pole magnetyczne także ją ściska, nie pozwalając przy tym na kontakt ze ściankami komory. Ciekawą rolę spełniają produkowane w reakcji neutrony. Są one elektrycznie obojętne, więc nie reagują na obecność pola magnetycznego, uciekają z obszaru, w którym zachodzą reakcje syntezy i są pochłaniane przez wewnętrzną osłonę tokamaka. Chłodzenie tej osłony cieczą pozwala wyprowadzić wyzwoloną w reakcji energię na zewnątrz reaktora.

Pierwsze tokamaki powstały w drugiej połowie lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku w Związku Radzieckim. W następnej dekadzie podobne urządzenia zaczęły działać w Europie Zachodniej i w USA. Jednak mimo upływu pół wieku, nie udało się dotąd uzyskać na tyle stabilnej pracy tych urządzeń, by można było pozyskiwać z nich energię elektryczną na skalę przemysłową. Nadal jeszcze bilans energetyczny pracy tokamaków, jak też innych urządzeń służących kontrolowanej fuzji termojądrowej, jest niezadowolający. Ujmując rzecz w sposób uproszczony można rzec, że uzyskiwana z nich energia nie pozwala w pełni odzyskać energii włożonej w ich działanie!

Od 2010 roku budowany jest w Cadarache (Francja) wielki eksperymentalny reaktor termojądrowy typu Tokamak. Ma on zademonstrować możliwości pozyskiwania energii z syntezy termojądrowej w warunkach ziemskich. Urządzenie nosi nazwę **ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor - Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy)**, co po łacinie oznacza „droga”. ITER to także nazwa programu badawczego, którego celem jest zbadanie możliwości produkowania na wielką skalę energii z kontrolowanej fuzji termojądrowej. Przewiduje się, że uruchomienie reaktora nastąpi w 2020 roku.



Rysunek 3.83: Schemat reaktora termojądrowego ITER

Pytania i problemy

1. Porównaj możliwe do uzyskania energie w reakcjach syntezy z energiami uzyskiwanymi w reakcjach rozszczepiania. Skorzystaj przy tym z przebiegu zależności energii wiązania nukleonu w jądrze od jego liczby masowej. Przeprowadź porównanie w dwóch wersjach: energie uzyskiwane z pojedynczej reakcji syntezy lub rozszczepienia oraz energie uzyskiwane w przeliczeniu na jeden nukleon.
2. Gdyby na jednej szalce odpowiednio czulej wagi położyć jądra deuteru i trytu, a na drugiej cząstkę alfa i neutron (patrz reakcja ([wzór 255](#) na stronie 246)), to która szalka byłaby wyżej, a która niżej? Uzasadnij swoją odpowiedź.
3. Dlaczego do przeprowadzenia reakcji syntezy jąder potrzebna jest wysoka temperatura i wysoka gęstość materii jądrowej?
4. Fuzję termojądrową wykorzystano do produkcji bomby wodorowej, natomiast nie udało się jeszcze uzyskać zadowolającego zastosowania fuzji do produkcji energii elektrycznej na masową skalę. Wypunktuj powody takiego stanu rzeczy, związane z fizyką i technologią.

3.9 Oddziaływanie promieniowania jądrowego z materią; jego detekcja i jego wpływ na organizmy żywe

Słowo „promieniowanie” (lub „radiacja”) zrobiło w XX wieku oszałamiającą karierę; można by rzec, że „trafiło pod strzechy”. Nie zawsze jednak jest ono właściwie rozumiane, głównie ze względu na towarzyszące mu określenia (np. promieniowanie jonizujące) - jedne kojarzą się ze zniszczeniem, wywołanym wybuchem bomby atomowej, inne wywołują obawę o zdrowie, wiele też należy do świata pseudonauki; te są używane w celu zaimponowania innym lub wręcz osiągnięcia korzyści finansowych.



Wskazówka:

Wspólnym źródłem braku zrozumienia i związanych z tym obaw jest nieuchwytny charakter wielu rodzajów promieniowania. Nie jest ono rejestrowane przez ludzkie zmysły, oddziałuje jednak na ludzki organizm (są od tego wyjątki: na przykład promieniowanie elektromagnetyczne z odpowiedniego zakresu częstotliwości jest rejestrowane przez zmysł wzroku, z innego zakresu jest rejestrowane przez zmysł dotyku, ale światła widzialnego, i podczerwieni się nie boimy, gdyż jesteśmy do nich przyzwyczajeni). Owa możliwość oddziaływania bez możliwości zauważenia (nim będzie za późno) niesie w sobie znamiona magii; zaś strach przed magią i jej „dysponentami” jest zakorzeniony w ludzkiej kulturze od zarania dziejów.

Warto zauważyć, że podobny problem pojawił się w drugiej połowie XIX wieku po odkryciu drobnoustrojów, wywołujących choroby. Bakterie i wirusy weszły do świadomości ludzi, a potem do kultury, jako coś, co człowiekowi zagraża, czego powinniśmy unikać i co wymaga tępienia. Takie przekonania są często podtrzymywane - wbrew ustaleniom naukowym - wskutek zwyczajnej niewiedzy lub z chęci osiągnięcia korzyści. Człowiek wykształcony doskonale zdaje sobie sprawę, że taka postawa jest błędna - obecność bakterii i wirusów w naszym biotopie (także w ludzkim organizmie) jest niezbędną do prawidłowego jego funkcjonowania.



Rysunek 3.84: Znaki ostrzegawcze

Podobnie jest z promieniowaniem. Nie unikniemy jego obecności w naturalnym biotopie, a w XXI wieku także w technice i innych dziedzinach ludzkiej działalności. Im więcej o nim wiemy, tym mniej się go boimy i tym lepiej i bezpieczniej potrafimy je wykorzystać dla naszych celów. Może warto więc zacząć od uświadomienia sobie, że dwa znaki przedstawione na [Rysunek 3.84: Znaki ostrzegawcze](#) na stronie 249 mają ze sobą wiele wspólnego: oba to znaki ostrzegawcze. Ich rolą nie jest wzbudzenie strachu przed nieznanym, lecz zapowiedzenie konieczności zwrócenia szczególnej uwagi na to, co przed nami czy wokół nas i zachowania większej niż zwykle ostrożności przy tym, co zaraz będziemy robić. Mówi o tym znane wśród „fizyków-jądrowców” porzekadło: „Jeden gram rozumu często stanowi lepszą osłonę przed promieniowaniem niż dziesięć ton ołowiu”.

Rodzaje promieniowania jądrowego

Promieniowanie to nic innego jak rozchodzący się ze źródła strumień cząstek lub rozchodząca się fala. Gdy mowa jest o *promieniowaniu jądrowym*, zwanym też *jonizującym*, mamy na myśli *strumień cząstek* powstałych w wyniku przemian i reakcji jądrowych. Podobne znaczenie ma określenie promieniowanie kosmiczne - różnica polega na tym, że reakcje, w których powstają docierające do Ziemi cząstki tego promieniowania, zachodzą w Słońcu lub obiektach spoza Układu Słonecznego. Nie mamy też wpływu na skład ani na energię cząstek w promieniowaniu kosmicznym, podczas gdy potrafimy wytworzyć, niezależnie jeden od drugiego, kilka rodzajów promieniowania jądrowego:

- alfa (czyli jądra helu ${}^4_2\text{He}$, podobne właściwości wykazuje strumień protonów, który jednak nie ma swej własnej nazwy);
- beta (czyli elektrony e^- lub pozytony e^+);
- gamma (fotony, m. in. promienie rentgenowskie);

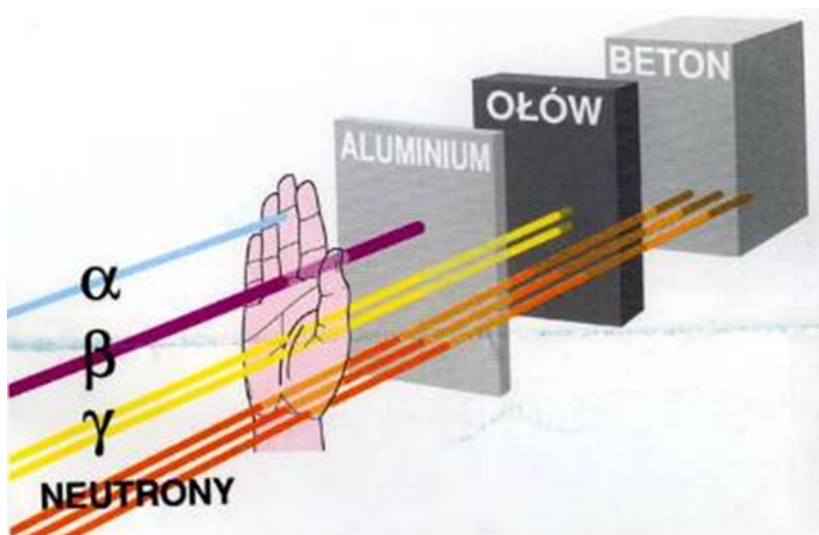
- strumień neutronów (nie ma on swojej własnej nazwy).

Co dzieje się z tym promieniowaniem po emisji? Przez co przenika, a co je zatrzymuje? Czy wszystkie rodzaje promieniowania mają takie same własności przenikania przez różne materiały? Czy i dlaczego promieniowanie to może być dla nas szkodliwe, a do czego możemy je wykorzystać? Jak się przed nim chronić a jak przeprowadzać zaplanowaną ekspozycję na promieniowanie? Jak możemy sprawdzić, że jakaś substancja jest źródłem takiego czy innego promieniowania, czyli że jest promieniotwórcza? Pytań jest wiele; spróbujmy na nie odpowiedzieć.

Oddziaływanie promieniowania jądrowego z materią

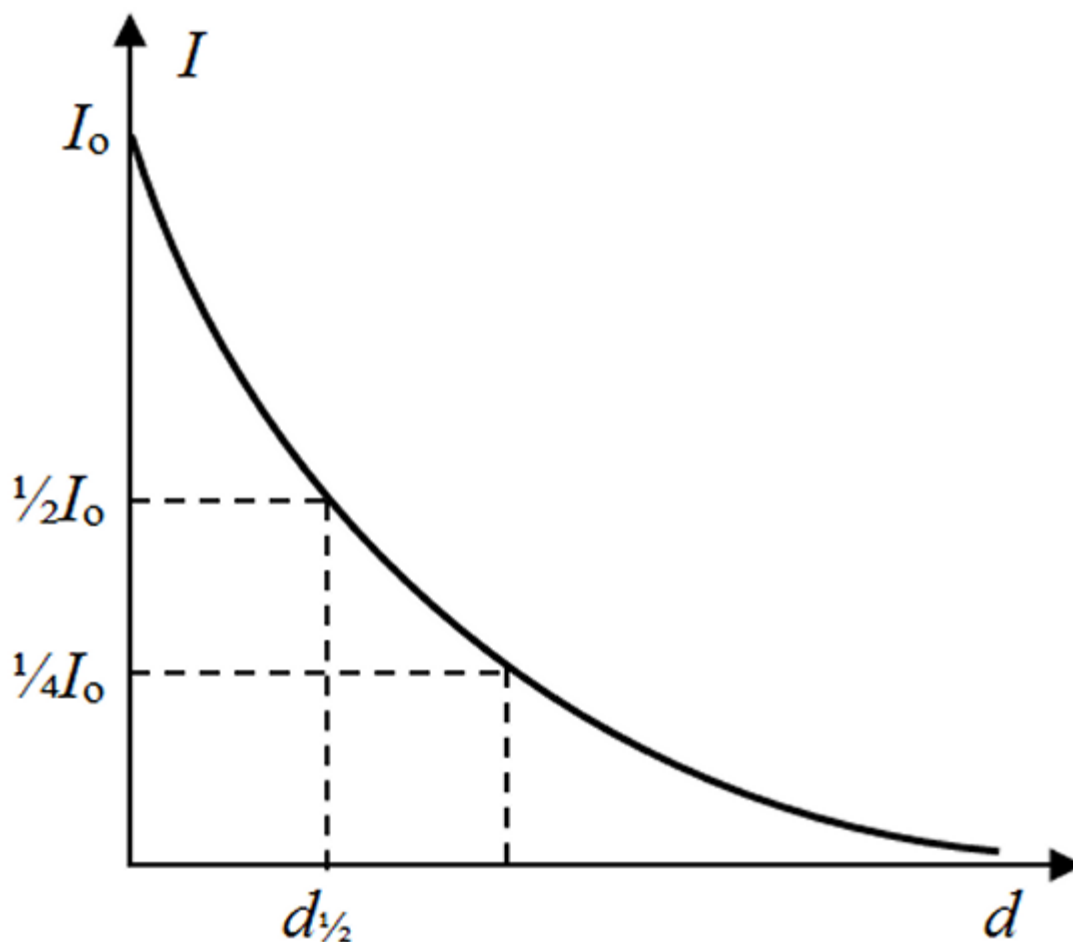
Na ilustracji poniżej (*Rysunek 3.85: Przenikanie przez materię różnych rodzajów promieniowania jądrowego* na stronie 250) pokazane jest symbolicznie przez co przenikają różne rodzaje promieniowania emitowanego przez źródła promieniotwórcze, a co je zatrzymuje.

- Promieniowanie α jest zatrzymywane przez naskórek ręki (podobnie jak wiązka protonów), choć wsuwanie ręki w wiązkę promieniowania nie zawsze jest dobrym pomysłem;
- promieniowanie β zostaje pochłonięte przez płytkę aluminiową;
- do osłabienia natężenia wiązki promieniowania γ potrzebna jest płyta z ołowiu;
- do spowolnienia neutronów potrzeba grubej warstwy betonu.



Rysunek 3.85: Przenikanie przez materię różnych rodzajów promieniowania jądrowego

- ⚠ **Wskazówka:** Gdy mówimy o zatrzymywaniu czy pochłanianiu promieniowania jonizującego przez materię, to musimy pamiętać, że nie jest to proces nagły. Każdy rodzaj materii osłabia wiązkę promieniowania stopniowo - tym bardziej, im grubsza jego warstwa. Zależność natężenia wiązki I od grubości d warstwy materii ma charakter wykładniczy. Można przy tym wprowadzić pojęcie „grubości połowicznego zaniku $d_{1/2}$ ”, na podobieństwo czasu połowicznego zaniku próbki promieniotwórczej. Ilustruje to wykres na *Rysunek 3.86: Wykładniczy zanik natężenia wiązki promieniowania jonizującego w funkcji grubości warstwy pochłaniającej* na stronie 251, na którym symbolem I_0 oznaczono początkowe natężenie wiązki.



Rysunek 3.86: Wykładniczy zanik natężenia wiązki promieniowania jonizującego w funkcji grubości warstwy pochłaniającej

Każdy materiał charakteryzuje się inną wartością $d_{1/2}$ dla różnych rodzajów promieniowania. Analogicznie, każdy rodzaj promieniowania charakteryzuje się mniejszą lub większą przenikliwością, czyli inną wartością $d_{1/2}$ dla różnych materiałów. Z [Rysunek 3.85: Przenikanie przez materię różnych rodzajów promieniowania jądrowego](#) na stronie 250 można więc odczytać, że cząstki α mają najmniejszą wartość $d_{1/2}$ (są najmniej przenikliwe), promienie β i γ mają odpowiednio coraz większe $d_{1/2}$, zaś neutrony (najbardziej przenikliwe) mają największą wartość $d_{1/2}$.

Skąd te różnice, z czego one wynikają?

Przyczyną jest fakt, że każdy rodzaj promieniowania w inny sposób oddziałuje z materią. Każdy wymaga więc oddzielnego omówienia. Niezależnie od tego, oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią zależy od jej własności oraz od energii niesionej przez cząstkę. Dla potrzeb naszego porównania przyjmijmy, że energia ta jest charakterystyczna dla procesów zachodzących samoistnie na Ziemi (np. naturalnych rozpadów promieniotwórczych), czyli że nie przekracza kilku megaelektronowoltów na cząstkę. Przedstawimy skrótowy opis tego oddziaływania; pełniejszy opis znajdziesz w drugiej części rozdziału - wiadomości bardzo ciekawe choć nadobowiązkowe.

Jonizacja materii i jej biologiczne skutki

Cząstki promieniowania jądrowego typu α , β i γ mają zdolność do **oddziaływania z elektronami materii** (neutrony takiej zdolności praktycznie nie mają, ze względu na ich zerowy ładunek elektryczny). Mogą powodować jonizację atomów i cząsteczek (odrywanie elektronów od macierzystych atomów) lub ich wzbudzenie (przeniesienie elektronów na wyższe poziomy energetyczne w atomie lub cząsteczce). Takie procesy mogą prowadzić do rozpadu związków chemicznych, także do powstawania cząsteczek, rodników lub jonów silnie reaktywnych chemicznie.

Pojedyncza cząstka promieniowania jądrowego może wywołać wiele takich procesów. Wynika to z porównania zasobów jej energii - rzędu megaelektronowoltów - z energią potrzebną do jonizacji atomów czy cząsteczek, która jest rzędu elektronowoltów. Jednak trzeba mieć na uwadze, że nawet milion (10^6) aktów jonizacji spowodowanych przez pojedynczą cząstkę to niewiele wobec liczby cząsteczek w ciele człowieka, którą można szacować na ok. 10^{25} .

Skutki procesów jonizacji i wzbudzenia w materii nieorganicznej na ogół nie są istotne. Inaczej jest w przypadku materii organicznej - może w niej dojść do istotnych zmian składu chemicznego komórek. Prowadzi to na ogół do śmierci komórki; w przypadku masowego zaniku komórek może dojść do śmierci całej tkanki, narządu, a wskutek tego nawet całego organizmu. Może także nastąpić zmiana w funkcjonowaniu komórek wskutek zmian w jej kodzie genetycznym - takie zmiany noszą nazwę mutacji.

Nie wszystkie opisane tu skutki muszą być niekorzystne dla człowieka. Jako przykład odnoszonej korzyści wymienić można sterylizację (narzędzi w szpitalach, żywności). Więcej przykładów podajemy w uzupełnieniu na końcu rozdziału.

Wtórne reakcje elektromagnetyczne i jądrowe w materii

Przejęciu promieniowania jądrowego przez materię mogą towarzyszyć różnego rodzaju skutki wtórne. Neutrony mogą wnikać do jąder atomowych, wywołując reakcje jądrowe. Produkty tych reakcji (np. fotony γ czy protony) rozchodzą się w materii, powodując jonizację. Podobnie, cząstki promieniowania β^+ , czyli pozytony, oddziałują z elektronami materii - w tzw. procesie anihilacji $e^+ e^-$ produkowane są fotony γ . Może też zajść proces odwrotny: foton (o energii rzędu 1 MeV i więcej) może w zderzeniu z jądrem atomowym wyprodukować parę elektron-pozyton.

We wszystkich takich procesach powstają jednak znane nam cząstki promieniowania jądrowego - nie powstają żadne inne, nowe obiekty, które oddziaływałyby z materią inaczej, niż zostało tu opisane.

Detekcja i rejestracja promieniowania jądrowego

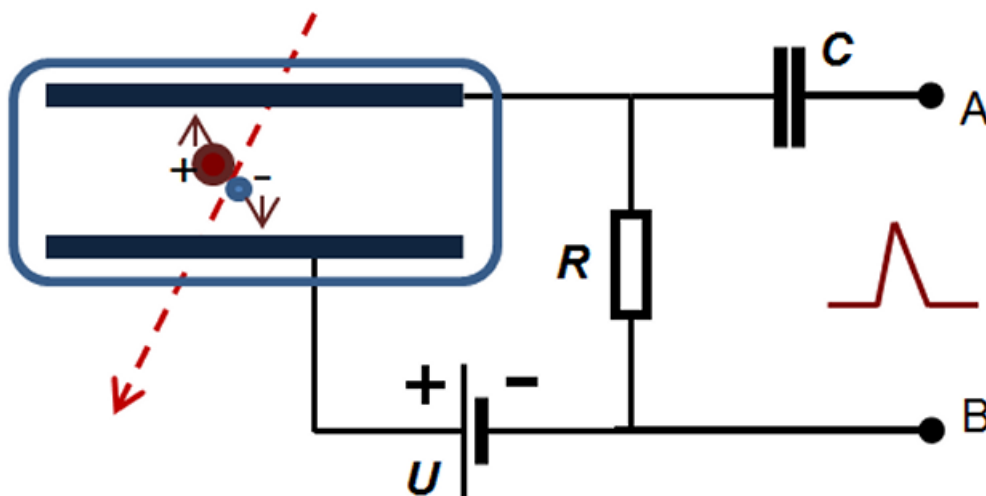
Jak wspomnieliśmy wcześniej, człowiek nie jest wyposażony w zmysł, który rejestrowałby promieniowanie jądrowe. Takiego promieniowania nie możemy ani zobaczyć, ani usłyszeć, dotknąć, posmakować czy powąchać, niezależnie od tego, czy pochodzi ono z przemian jądrowych, sztucznych czy naturalnych, czy też dociera do nas z kosmosu.

Stan ten jest wynikiem setek milionów lat ewolucji w środowisku, w którym promieniowanie to było od zawsze obecne, ale nie stanowiło - ze względu na niską intensywność - zagrożenia dla organizmów żywych. Drugim powodem niewykształcenia zmysłu odbierającego promieniowanie jonizujące może być niewielka ilość informacji, jakie ono niesie z punktu widzenia dostosowania się organizmów do środowiska.

Jednak w ostatnich stu latach promieniowanie jądrowe pojawia się w otoczeniu człowieka coraz częściej wskutek jego własnej działalności. Jest ono wciąż przedmiotem badań naukowych oraz wykorzystywane jest w wielu dziedzinach nauki, techniki, medycyny itd. Jest więc niezwykle ważne, by równoległe z wykorzystaniem opracowywać coraz nowsze i skuteczniejsze metody detekcji i rejestrowania tego promieniowania.

Przedstawimy tutaj opis najprostszego *detektora jonizacyjnego*, będącego podstawą działania wielu typów detektorów, w tym znanego licznika Geigera-Müllera. Pełniejszy opis takich detektorów, a także *detektorów śladowych*, zamieszczony jest w drugiej części paragrafu.

Na *Rysunek 3.87: Schemat detektora jonizacyjnego* na stronie 253 pokazano najprostszy schemat detektora jonizacyjnego. W niewielkim naczyniu wypełnionym gazem znajdują się dwie elektrody podłączone do źródła napięcia U przez opór o dużej wartości R . W obwodzie prąd nie płynie, bowiem elektrody nie są ze sobą połączone, więc na oporniku R nie odkłada się żadne napięcie.



Rysunek 3.87: Schemat detektora jonizacyjnego

Kiedy jednak przez obszar detektora przebiegnie cząstka jonizująca, to uwolnione wskutek jonizacji elektrony zaczną poruszać się w kierunku elektrody dodatniej, a dodatnio naładowane jony w kierunku elektrody ujemnej.

Spowoduje to krótkotrwały przepływ prądu i pojawienie się różnicy potencjałów na oporniku R . Ten krótkotrwały impuls napięciowy zostanie zarejestrowany pomiędzy punktami A i B , które łączy się z oscyloskopem lub innym, odpowiednio czułym urządzeniem. Obecność kondensatora C ma znaczenie „techniczne” - służy on do zablokowania tzw. składowej stałej napięcia elektrycznego.

Zastosowania promieniowania jądrowego

Naturalne oraz wytwarzane sztucznie źródła promieniotwórcze, strumienie neutronów z reaktorów jądrowych, wiązki cząstek naładowanych przyspieszanych w akceleratorach, wiązki promieniowania rentgenowskiego i promieniowanie gamma - to unikatowe narzędzia, którymi można sięgać w niedostępne miejsca i które w związku z tym znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach działalności człowieka. Symbolizuje to drogowskaz ([Rysunek 3.88: Drogowskaz pokazuje różne zastosowania promieniowania jądrowego](#) na stronie 254), pokazujący niektóre z kierunków, gdzie metody i urządzenia jądrowe znajdują praktyczne zastosowania. Są to:

Medycyna – radiodiagnostyka i radioterapia, sterylizacja radiacyjna;

Rolnictwo – dekontaminacja środków spożywczych;

Ochrona środowiska – pomiar zapylenia powietrza, czujniki przeciwpożarowe, radioznacznikowe badanie rozchodzenia się zanieczyszczeń, także oczyszczanie gazów spalinowych z elektrowni konwencjonalnych i ciepłowni;

Przemysł – aparatura radiometryczna: pomiar gęstości, stężenia, składu chemicznego, masy, grubości, szczelności itd., poszukiwania ropy naftowej, gazów i innych surowców mineralnych, profilowanie odwiertów, defektoskopia, czyli poszukiwania ukrytych wad w materiałach konstrukcyjnych;

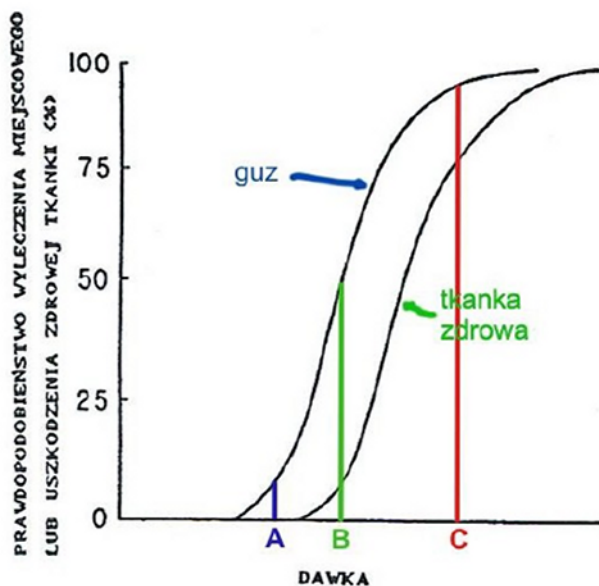
Geologia i Archeologia – datowanie obiektów ceramicznych i krzemiennych, skamielin i szczątków organicznych, badanie wieku, struktury i składu pokładów skalnych.



Rysunek 3.88: Drogowskaz pokazuje różne zastosowania promieniowania jądrowego

Wymienione tu zastosowania to tylko niektóre przykłady, a nie pełna lista. Omówimy bardziej szczegółowo podstawy radioterapii w leczeniu choroby nowotworowej oraz podstawy tomografii komputerowej, jako metody diagnostyki obrazowej. Wiele innych przykładów zastosowania promieniowania jądrowego zamieszczono w drugiej części paragrafu. Tam też omówiono działanie dwóch urządzeń, dzięki którym dysponujemy wiązkami cząstek (akceleratory) oraz źródłami promieniotwórczymi (reaktory).

Radioterapia to wykorzystanie promieniowania jonizującego w celach leczniczych. W chorobie nowotworowej leczonej radioterapią zasadniczym zadaniem fizyków medycznych jest takie zaplanowanie zabiegu, by zniszczyć nowotwór, ale nie uszkodzić organów zdrowych. Ilustruje to *Rysunek 3.89: Prawdopodobieństwo wyleczenia guza lub uszkodzenia zdrowej tkanki w funkcji zaaplikowanej dawki promieniowania* na stronie 254. Tkanka nowotworowa będąca w trakcie rozwoju jest bardziej podatna na działanie promieniowania. Należy więc tak dobrać dawkę, by prawdopodobieństwo zniszczenia nowotworu (na rysunku - guz), było jak największe, zaś uszkodzenia zdrowej tkanki – jak najmniejsze.



Rysunek 3.89: Prawdopodobieństwo wyleczenia guza lub uszkodzenia zdrowej tkanki w funkcji zaaplikowanej dawki promieniowania

Jak widać z rysunku, nie jest to zadanie łatwe. Dawka „A” jest za słaba - daje niewielkie szanse na zniszczenie nowotworu, choć nie powoduje praktycznie żadnych uszkodzeń tkanki zdrowej. Dawka „C” jest za silna - choć praktycznie zapewnia wyleczenie guza, ale przy ogromnym, bo 75-procentowym zagrożeniu uszkodzeniem zdrowej tkanki.

Dobór dawki musi więc być precyzyjny. Dlatego wykorzystuje się tomografię komputerową dla dokładnego zlokalizowania guza, a następnie wykonuje się szereg naświetlań (frakcji) z różnych kierunków. Guz naświetlany jest za każdym razem, a zdrowa tkanka jest naświetlana tylko raz. W ten sposób zdrowa tkanka otrzymuje dawkę która jej nie zniszczy, a guz otrzymuje dawkę niszczącą.



Rysunek 3.90: Akcelerator medyczny w warszawskim Centrum Onkologii

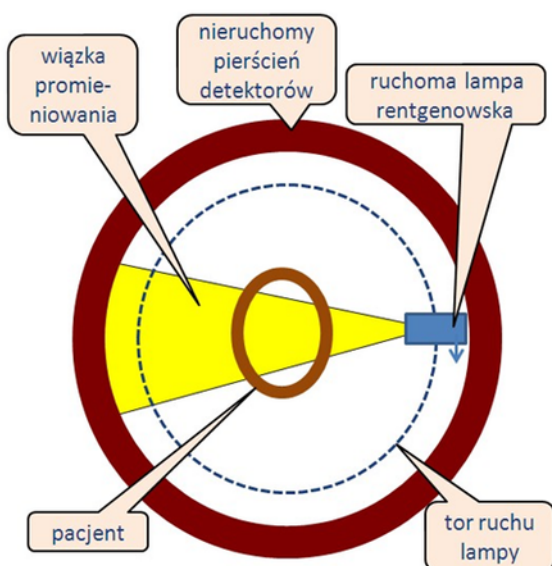
Zasadniczo wyróżnia się dwa typy radioterapii:

teleterapia - to aplikowanie dawki promieniowania z zewnątrz. Źródłem wiązek promieniowania gamma (fotonów) lub elektronów o energii kilku do kilkudziesięciu MeV są obecnie akceleratory. Widok takiego akceleratora pokazany jest na fotografii (*Rysunek 3.90: Akcelerator medyczny w warszawskim Centrum Onkologii* na stronie 255). W ostatnich latach rozwija się intensywnie terapia z pomocą wiązek protonów lub ciężkich jonów. Ten rodzaj terapii zwany jest terapią hadronową.

brachyterapia – to leczenie z pomocą źródeł promieniotwórczych wprowadzanych do ciała pacjenta bezpośrednio do nowotworu lub w jego pobliżu. Metoda ta ma wiele zalet: jest bardziej precyzyjna i przez to mało szkodliwa dla zdrowych tkanek. Jest jednak trudniejsza w realizacji i nie zawsze może być stosowana.

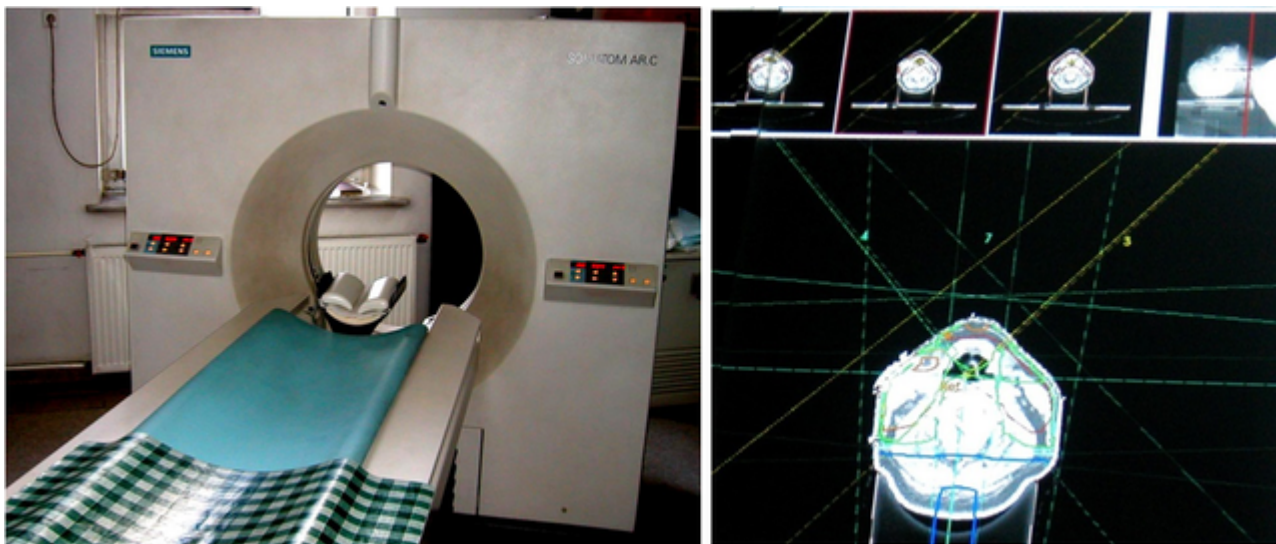
Tomografia komputerowa to obecnie powszechnie stosowana metoda diagnostyczna. Pozwala ona zobaczyć w przekrojach wnętrze badanego obiektu (np. ciała człowieka) bez potrzeby wykonywania operacji.

Uproszczony schemat tomografu pokazuje *Rysunek 3.91: Uproszczony schemat tomografu komputerowego* na stronie 256. Wokół pacjenta znajduje się układ wielu detektorów promieniowania rentgenowskiego ułożonych w kształcie pierścienia. Liczba detektorów może sięgać kilku tysięcy.



Rysunek 3.91: Uproszczony schemat tomografu komputerowego

Wewnątrz nieruchomego układu detektorów porusza się po okręgu lampa emitująca promieniowanie rentgenowskie, które rejestrowane jest przez detektory umieszczone po przeciwnej stronie. Promieniowanie pochłaniane jest przez narządy wewnętrzne pacjenta tworząc wiele obrazów odpowiadających danej konfiguracji kątowej. Zarejestrowana seria obrazów rentgenowskich opracowywana jest programem komputerowym, który wykonuje rekonstrukcję przestrzenną elementów pochłaniających promieniowanie, czyli narządów wewnętrznych pacjenta. Fotografia (*Rysunek 3.92: Z lewej - tomograf komputerowy tak, jak widzi go pacjent; z prawej - obraz z tomografu komputerowego wraz z naniesionym planem przyszłych naświetlań terapeutycznych* na stronie 256) pokazuje wygląd tomografu z punktu widzenia pacjenta oraz przykładowy obraz zrekonstruowany tomografem komputerowym.



Rysunek 3.92: Z lewej - tomograf komputerowy tak, jak widzi go pacjent; z prawej - obraz z tomografu komputerowego wraz z naniesionym planem przyszłych naświetlań terapeutycznych

Na tym kończymy podstawowy przegląd zagadnień związanych z promieniowaniem jądrowym. Zachęcamy jednak wszystkich, by choćby pobieżnie zapoznali się z dodatkowymi informacjami, prezentowanymi niżej. Dają one znacznie szerszy wgląd w kwestie właściwości promieniowania jądrowego, jego wytwarzania i wykorzystania a

także ochrony przed niepożądanymi jego skutkami. Przedstawiają także nieporuszone dotąd zagadnienia, jak pomiar intensywności promieniowania i pochłoniętych jego dawek.

Uzupełnienie i rozszerzenie wiadomości o promieniowaniu jądrowym (materiał nadobowiązkowy)

Rozliczne zastosowania promieniowania jądrowego nie mogą dziś polegać, jak przed wiekiem, na naturalnych źródłach promieniotwórczych. Podobnie, rozwijające się badania naukowe w dziedzinie fizyki jądrowej i cząstek elementarnych wymagają dysponowania w eksperymentach znacznie większymi energiami niż dostarczają zjawiska naturalne. Potrzebny jest więc „budulec” w postaci sztucznych źródeł promieniotwórczych, których aktywność można regulować oraz specjalnie przygotowanych wiązek cząstek naładowanych, fotonów i neutronów, którymi można sterować. Do tego celu służą dwa największe urządzenia fizyki i techniki jądrowej: reaktor jądrowy i akcelerator. Zapoznajmy się nieco bliżej z tymi urządzeniami.

Reaktor jądrowy to urządzenie w którym następują reakcje jądrowe w sposób kontrolowany przez człowieka. Są to głównie reakcje rozszczepienia, ale w trakcie uruchamiania i testów są też reaktory termojądrowe, gdzie zachodzą reakcje syntezy. Omawialiśmy już, w dwóch poprzednich paragrafach, reaktory dostarczające ciepło do produkcji energii elektrycznej. Mogą one służyć do napędu okrętów, do celów militarnych.

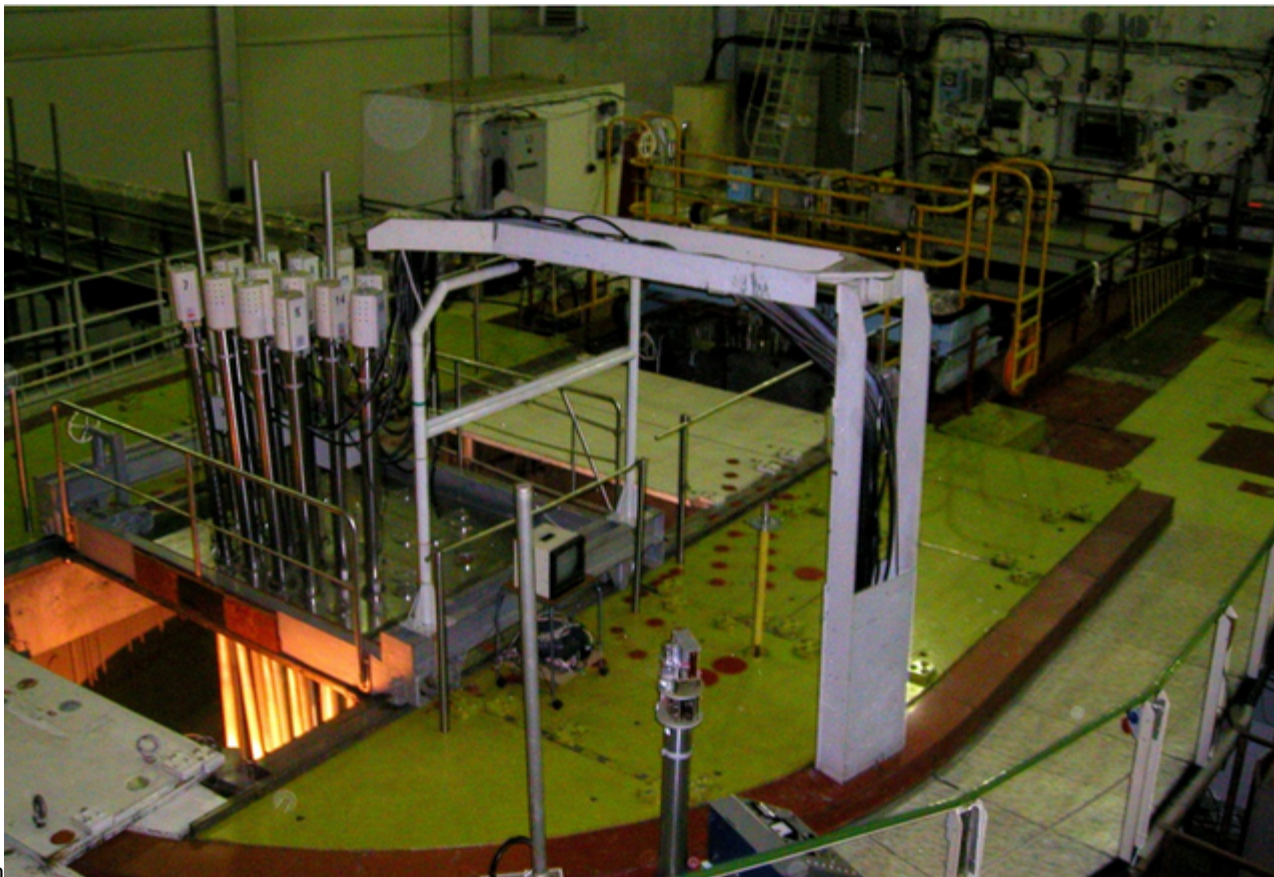
Istnieją jednak także reaktory jądrowe stosowane do celów badawczych i gospodarczych, niezwiązanych bezpośrednio z energetyką. Wykorzystuje się je przede wszystkim jako źródło intensywnych strumieni neutronów. Pamiętajmy, że neutrony pozbawione ładunku elektrycznego mogą łatwo wnikać do jąder atomowych i wywoływać tam reakcje jądrowe. Odpowiednie sterowanie wiązką neutronów i wywołanymi przez nie procesami pozwala uzyskać wiele różnych efektów.

W Polsce działa obecnie jeden tylko reaktor jądrowy - „Maria” w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku w pobliżu Warszawy. Jest to reaktor badawczy, który służy też do celów gospodarczych. takich jak:

- produkcja radioizotopów dla celów medycznych i technicznych;
- medyczne zastosowania strumieni neutronów;
- neutronowe domieszkowanie materiałów półprzewodnikowych;
- modyfikacja własności materiałów strumieniami neutronów;
- badania neutronograficzne, np. badania dzieł sztuki (obrazów);
- badania materiałowe i technologiczne.

Moc reaktora „Maria” wynosi 30 MW. Reaktor znajduje się w dużym basenie z wodą (*Rysunek 3.93: Fotografia reaktora badawczego „Maria” w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku* na stronie 258), która spełnia tam potrójną rolę: spowalnicza neutronów, chłodziwa oraz osłony przed promieniowaniem. Więcej o NCBJ, prowadzonych tam badaniach i o samym reaktorze „Maria” dowiesz się na stronie www.ncbj.gov.pl. Warto też pamiętać, że zwiedzanie reaktora może być ciekawym i wartościowym celem szkolnej wycieczki.

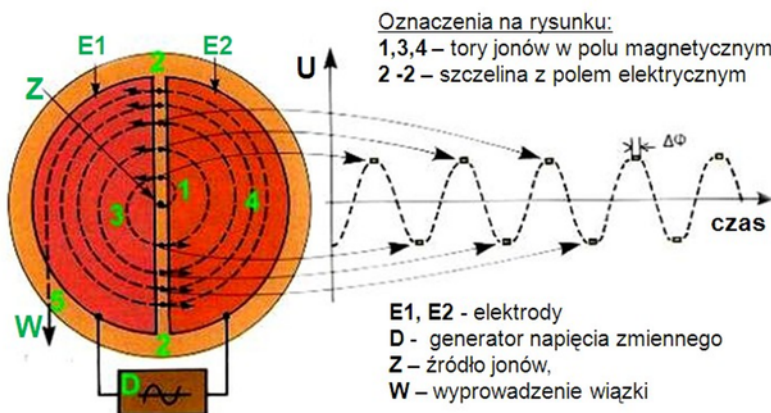
Z lewej strony widoczne są pręty regulacyjne, a rdzeń reaktora znajduje się poniżej, pod warstwą wody o głębokości ok. 7



Rysunek 3.93: Fotografia reaktora badawczego „Maria” w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku

Akcelerator to urządzenie do przyspieszania cząstek elektrycznie naładowanych. Kiedy taka cząstka znajdzie się w polu elektrycznym, będzie przyspieszana wzdłuż linii sił pola, a zwrot siły zależy od znaku ładunku. Kiedy cząstka znajdzie się w polu magnetycznym prostopadłym do kierunku jej ruchu, będzie poruszać się po okręgu, którego promień będzie proporcjonalny do pędu cząstki. Te zasady fizyki, które bardziej szczegółowo poznasz w trakcie nauki w starszych klasach, stały się podstawą działania akceleratorów kołowych.

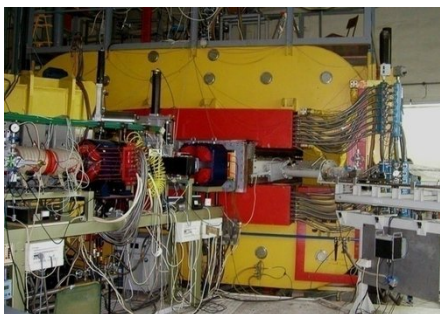
Schemat takiego akceleratora, zwanego *cyklotronem*, pokazany jest na [Rysunek 3.94: Schemat cyklotronu; pole magnetyczne skierowane jest prostopadle do ekranu](#) na stronie 259. Cząstki wprowadzane są do akceleratora ze źródła Z . Ich tor zakrzywia się w polu magnetycznym jak pokazuje symbol I . Po zatoczeniu połowy okręgu cząstka wpada do obszaru 2, zwanego szczeliną, w której panuje pole elektryczne wytwarzane przez generator D . Cząstka doznaje przyspieszenia i wpadając do obszaru 3 posiada już większy pęd niż w obszarze 1. Dzięki temu porusza się ona po okręgu o większym promieniu. Cały ten proces powtarza się wielokrotnie, aż w punkcie W przyspieszona cząstka zostaje wyprowadzona z akceleratora.



Rysunek 3.94: Schemat cyklotronu; pole magnetyczne skierowane jest prostopadle do ekranu

Akceleratory służą wyłącznie celom badawczym i gospodarczym. Są one źródłem wiązek promieniowania jądrowego różnego typu; właściwości tych wiązek - natężenie, energia, gęstość cząstek w wiązce - mogą być zmieniane, w zależności od przeznaczenia, w dość szerokim zakresie.

Największym w Polsce akceleratorem ciężkich jonów jest cyklotron (*Rysunek 3.95: Fotografia akceleratora w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego* na stronie 259) użytkowany w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego. Może on przyspieszać jony różnych pierwiastków do energii 10 MeV na nukleon. Akcelerator ten służy głównie do badań naukowych, prowadzonych przez zespoły z całej Polski, także przy współpracy naukowców zagranicznych. Więcej informacji o pracy Laboratorium znajdziesz pod adresem <http://www.slcj.uw.edu.pl/>. Podobnie jak w przypadku reaktora „Maria”, zwiedzanie ŚLCJ i pracującego tam cyklotronu może znakomicie uatrakcyjnić szkolną wycieczkę.



Rysunek 3.95: Fotografia akceleratora w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego

Oddziaływanie promieniowania jądrowego z materią

Promieniowanie alfa

Jak pamiętamy, promieniowanie α to jądra atomów helu składające się z dwóch protonów i dwóch neutronów. Są to więc cząstki naładowane, o ładunku dodatnim, równym dwóm ładunkom elementarnym. Masa cząstek α jest ponad siedem tysięcy razy większa od masy elektronu. Opisuując oddziaływanie z materią cząstek α zaliczamy je do klasy ciężkich cząstek naładowanych.



Rysunek 3.96: Schematyczne przedstawienie cząstki alfa

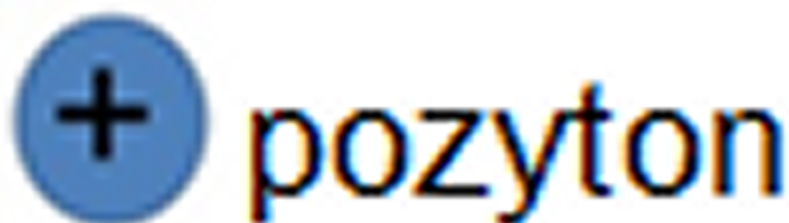
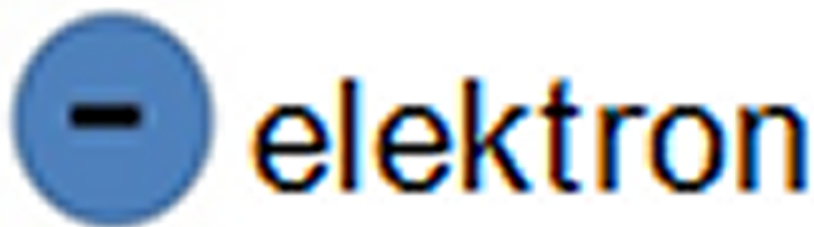
Aby zrozumieć mechanizm oddziaływania cząstek α , przypomnijmy sobie atomową strukturę materii. Pamiętamy, że materia widziana „oczami” atomów, jąder atomowych i cząstek elementarnych, wygląda zupełnie inaczej, niż kiedy my na nią patrzymy naszymi oczami. Kartka papieru o grubości jednej dziesiątej części milimetra, to dla cząstek α materiał składający się z około miliona warstw atomowych. Z drugiej strony, jądra atomowe rozmieszczone są w odległościach wielu tysięcy razy większych niż rozmiary cząstki α , a więc jest całkiem możliwe, że cząstka może przelecieć przez kartkę nie trafiając w żadne jądro.

A co z elektronami, które wypełniają przestrzeń pomiędzy atomami? Mają one ładunek ujemny i będą przyciągane przez cząstki α . W rezultacie mogą zostać oderwane od atomów, z którymi były związane. Tak się rzeczywiście dzieje, a proces ten nazywamy **jonizacją**. W wyniku jonizacji neutralny atom zmienia się w dodatnio naładowany jon, a elektron staje się swobodny i może przemieszczać się w materiale. Oczywiście, cząstka α traci na jonizację część swej energii. Ma ona podwójny ładunek, więc silnie jonizuje i szybko wytraca swą energię. To jest właśnie powodem, że zasięg cząstek α w materiałach jest niewielki i kartka papieru jest całkowicie w stanie zatrzymać strumień cząstek α , emitowanych przez źródło promieniotwórcze. Trzeba też mieć na uwadze, że ponieważ masa cząstek α jest kilka tysięcy razy większa niż masa elektronu, to cząstki α niewiele zmieniają swój kierunek przy przechodzeniu przez materię. Mówimy, że słabo się rozpraszają.

- Ⓡ **Zamapiętać:** Warto zapamiętać, że cząstki α emitowane przez źródła promieniotwórcze silnie jonizują i mają stosunkowo mały zasięg w materiałach - rzędu dziesiątych części milimetra.

Promieniowanie beta

Promieniowanie β to strumień elektronów bądź pozytonów, cząstek naładowanych ujemnie lub dodatnio, o masach takich samych jak masy elektronów ośrodka, przez które cząstki się przemieszczają. Wiadomo już, że cząstki te będą powodować jonizację, chociaż jonizować będą słabiej niż cząstki α , bo ładunek ich jest dwukrotnie mniejszy. Rozpraszają natomiast będą się bardzo silnie, bo ich masa równa jest masie atomów ośrodka.

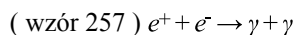


Rysunek 3.97: Dwa rodzaje promieniowania beta

Trzeba też powiedzieć o jeszcze jednej zależności, dotychczas nie omawianej. Wszystko, co do tej pory powiedziano, odnosiło się do promieniowania emitowanego przez źródła promieniotwórcze. Energie tego promieniowania nie przekraczają kilku MeV. Od zarania dziejów jesteśmy jednak poddani działaniu promieniowania kosmicznego, które stanowią cząstki o energiach liczonych w milionach MeV i większych; umiemy też przyspieszać cząstki naładowane do wysokich energii z pomocą akceleratorów. Mówiąc o oddziaływaniu promieniowania jądrowego z materią trzeba więc uwzględniać także zależność tego oddziaływania od energii cząstki.

Warto na to zwrócić uwagę omawiając oddziaływanie z energią elektronów, bowiem elektrony o energiach rzędu MeV i większych oddziałując z materią tracą swą energię głównie poprzez emisję tzw. *promieniowania hamowania*, które stanowią kwanty promieniowania elektromagnetycznego, czyli fotony o szerokim zakresie energii. Tylko mała część energii tracona jest wtedy na jonizację.

Na koniec wspomnimy o jeszcze jednym zjawisku, dotyczącym wyłącznie promieniowania β^+ . Pozytony oddziałują z elektronami materii w tzw. reakcji anihilacji:



Skutkiem jej jest powstanie dwóch kwantów promieniowania γ , które rozchodzą się w materii i mogą ją jonizować.

Ⓜ **Zamapiętać:** Warto zapamiętać, że cząstki β silnie jonizują tylko w obszarze stosunkowo niskich energii i że są bardziej przenikliwe od promieniowania α .

Promieniowanie gamma - fotony

Foton, czyli porcja (kwant) promieniowania elektromagnetycznego, pozbawiony jest ładunku elektrycznego i masy, ale niesie energię pola elektromagnetycznego, którą umiemy związać z częstotliwością odpowiadającej mu fali elektromagnetycznej związkiem

$$(\text{wzór 258}) E_\gamma = h \cdot \nu$$

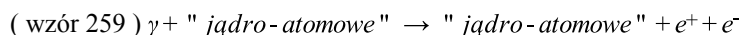
gdzie E_γ – energia fotonu, h – stała Plancka, ν – częstotliwość fali elektromagnetycznej. Jako fala elektromagnetyczna, foton porusza się z prędkością światła.



Rysunek 3.98: Wiązka fotonów - schemat

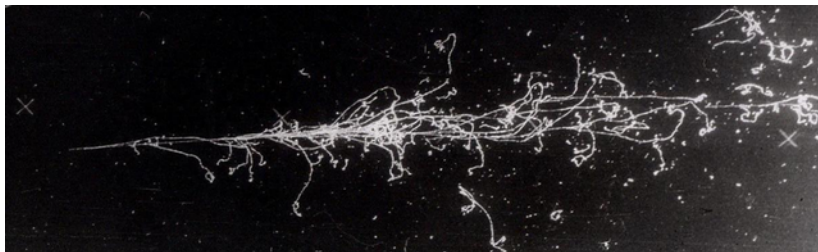
Mimo braku ładunku, foton oddziałuje z obiektami naładowanymi elektrycznie - elektronami i jądrami atomowymi. Skutkiem tych oddziaływań może być odrywanie elektronów od ich macierzystych atomów, które zostają w ten sposób zjonizowane. Najczęściej zachodzące oddziaływania to:

- efekt fotoelektryczny, czyli pochłonięcie fotonu przez atom i wybitcie elektronu z powłoki atomowej, zachodzące najczęściej przy stosunkowo niskich energiach fotonów;
- zjawisko Comptona, czyli zderzenie z elektronem fotonu o energii na tyle dużej (rzędu dziesiątków i setek keV), że elektron jest odrzucany od atomu niemal nie odczuwając jego obecności. W efekcie powstaje jon, a foton traci część swej energii i zmienia kierunek lotu.
- reakcja tworzenia par elektron-pozyton w oddziaływaniu z jądrem atomowym (jest to poniekąd reakcja odwrotna do opisanej wyżej reakcji anihilacji):



reakcja ta wymaga, by foton γ miał minimalną energię około 1,022 MeV, równą podwojonej energii spoczynkowej elektronu. Jądro atomowe nie ulega przemianie w tej reakcji, musi jednak w niej uczestniczyć - inaczej nie byłoby możliwe jednoczesne spełnienie zasady zachowania energii i zasady zachowania pędu w tej reakcji.

Rysunek 3.99: Fotografia komory pęcherzykowej wypełnionej ciekłym ksenonem z kaskadą fotonowo-elektronową na stronie 262 przedstawia piękny przykład oddziaływania fotonów i elektronów z materią. Foton niosący ogromną energię (rzędu GeV) spowodował utworzenie pary (e^+ ; e^-) po lewej stronie zdjęcia. Powstałe elektrony i pozytony wysyłają promieniowanie hamowania, czyli kolejne fotony. Te zaś tworzą drugą generację par (e^+ ; e^-), dalej powstają kolejne, aż do wyczerpania energii oryginalnego fotonu. W ten sposób powstaje tzw. kaskada elektronowo-fotonowa, widoczna na fotografii.



Rysunek 3.99: Fotografia komory pęcherzykowej wypełnionej ciekłym ksenonem z kaskadą fotonowo-elektronową

- Ⓜ **Zamapiętać:** Warto zapamiętać, że promieniowanie γ jest najbardziej przenikliwym rodzajem promieniowania jonizującego. Jest ono najefektywniej pochłaniane przez materię w stanie skupienia stałym o możliwie dużej liczbie atomowej - typowo używanym materiałem jest ołów.

Wiązka neutronów

Neutron jest cząstką elektrycznie obojętną, nie wywołuje więc procesów jonizacji. Z tego samego jednak względu może łatwo wnikać do jąder atomowych i wywoływać reakcje jądrowe - wspominaliśmy już o tym wcześniej. Pamiętajmy, że jądra atomowe znajdują się w odległościach tysiące razy większych niż rozmiary samych jąder, neutrony mogą więc znacznie łatwiej przenikać przez materię niż inne cząstki.

Prawdopodobieństwo wywoływania przez neutrony reakcji jądrowych w materiałach i sam rodzaj reakcji zależą bardzo silnie od energii neutronów i rodzaju materiału. Poznaliśmy już reakcje rozszczepienia uranu, które powodowane są przez neutrony niewielkich energii; poznaliśmy też reakcję, w której produkowany jest tryt wskutek oddziaływania neutronu z jądrem litu. Neutrony wysokich energii głównie rozpraszają się elastycznie na jądrach atomowych na podobieństwo zderzenia się dwóch kulek. Wynik takiego zderzenia zależy od masy jądra, z którym zderza się neutron. Jeśli jest to jądro ciężkie, czyli o masie wielokrotnie większej od masy neutronu (np. jądro atomu ołowiu, którego masa jest ponad 200 razy większa od masy neutronu) to neutron odbije się jak piłka od ściany, zmieni kierunek swojego ruchu, ale wartość jego prędkości zmaleje w niewielkim stopniu. Jeśli jednak neutron zderza się z jądrem o masie porównywalnej z jego własną (np. z jądrem atomu wodoru, czyli z protonem), to w wyniku zderzenia neutron może nawet się zatrzymać, a dalej polecą protony, który jest cząstką jonizującą. Jeżeli chcemy więc osłabiać wiązkę neutronów i skutecznie je spowalniać, musimy używać do tego materiałów zawierających lekkie pierwiastki, takie jak wodór.

Przyzwyczajaliśmy się do myśli, że przed promieniowaniem jądrowym trzeba odgradzać się ciężkimi płytami ołowiu. Warto więc przyjrzeć się fotografii na *Rysunek 3.100: Osłona zakończenia jonowodu w laboratorium GANIL we Francji* na stronie 263. Pokazana jest na niej osłona przed promieniowaniem emitowanym w miejscu, gdzie zatrzymywana jest wiązka jonów w jednym z francuskich laboratoriów. Z tyłu z lewej strony widać ciemną warstwę ołowiu, a przed nią grubą ściankę płytek z... parafiny. Pierwsza warstwa chroni przed promieniowaniem jonizującym - fotonami γ i cząstkami naładowanymi, druga przed neutronami. W skład parafiny wchodzi bowiem węgiel i wodór.



Rysunek 3.100: Osłona zakończenia jonowodu w laboratorium GANIL we Francji

- Ⓡ **Zamapiętać:** Warto zapamiętać, że strumień neutronów jest najbardziej przenikliwym składnikiem promieniowania jądrowego. Neutrony praktycznie nie wywołują jonizacji ośrodka, ale wzbudzają w nim wtórne reakcje jądrowe. Dlatego też symboliczny „pojemnik z wodą” stanowi skuteczniejszą ochroną przed neutronami niż osłona z ołowiu.

Rejestracja promieniowania jonizującego

Wspomnieliśmy już o dwóch zasadniczych kategoriach detektorów promieniowania jądrowego: jonizacyjne i śladowe (istnieje jeszcze wiele innych metod rejestracji promieniowania jądrowego; każda ma swe specyficzne cechy oraz zastosowania). W obu wykorzystuje się zdolność cząstek promieniowania do jonizacji atomów ośrodka w którym się one przemieszczają. Liczbę uwolnionych ładunków można „policzyć” umieszczając materiał poddany działaniu

promieniowania jonizującego w polu elektrycznym i mierząc wywołany przepływem tych ładunków krótkotrwały impuls elektryczny. Działające na tej zasadzie urządzenia należą do klasy *detektorów jonizacyjnych*. Przypomnij sobie schemat takiego detektora, przedstawiony na [Rysunek 3.87: Schemat detektora jonizacyjnego](#) na stronie 253 oraz jego działanie.

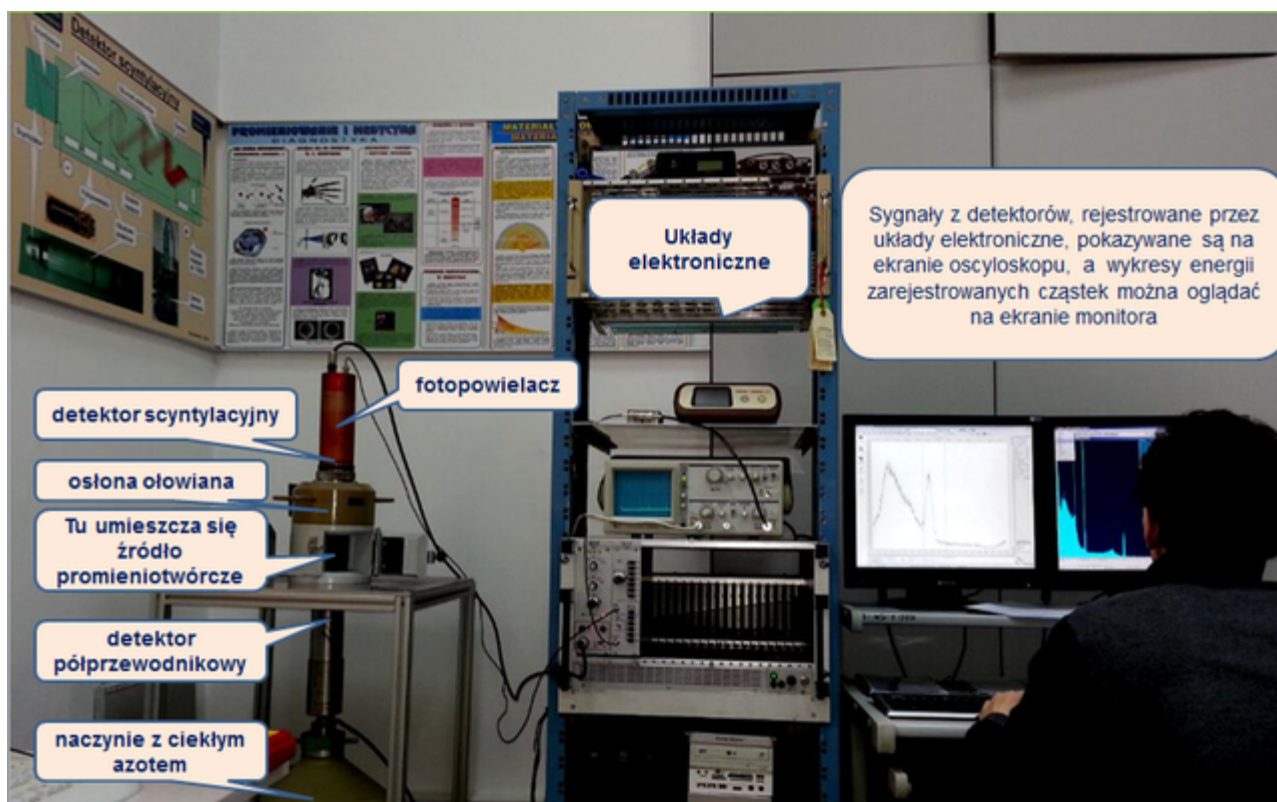
Bardzo podobne rozwiązanie stosowane jest w *detektorach półprzewodnikowych*. Rolę gazu pomiędzy elektrodami spełnia złącze półprzewodnikowe spolaryzowane w kierunku zaporowym - jest to „obszar czynny” detektora. Jonizacja atomów w tym obszarze powoduje krótkotrwały przepływ prądu przez złącze, czyli powstanie impulsu elektrycznego.

Istnieje też wiele odmian detektorów jonizacyjnych. Zauważmy najpierw, że impuls napięciowy będzie tym większy, im więcej jonów pojawi się w detektorze wskutek jonizacji, czyli im więcej energii straci cząstka na jonizację w detektorze. To bardzo cenna informacja, która może pomóc w rozpoznaniu rodzaju promieniowania, z jakim mamy do czynienia, bo straty energii zależą zarówno od właściwości cząstki, jak i od jej energii. Na takiej zasadzie działają *komory jonizacyjne*.

Możliwe jest także wzmocnienie impulsu na wyjściu detektora poprzez przyłożenie do elektrod napięcia na tyle dużego, by przyspieszone elektrony spowodowały wtórne akty jonizacji. Układy z takim wzmocnieniem gazowym – to *liczniki proporcjonalne*.

Przyłożenie jeszcze wyższego napięcia spowoduje lawinową jonizację ośrodka. Impuls na wyjściu będzie wtedy duży i łatwy do zarejestrowania, ale jego wysokość nie będzie już proporcjonalna do energii straconej przez cząstkę w detektorze. Działające na tej zasadzie układy to *liczniki Geigera-Millera*.

Efektom jonizacji atomów jest powstawanie pojedynczych krótkotrwałych błysków świetlnych. W *detektorach scyntylacyjnych* są one rejestrowane z pomocą fotopowielacza, który wzmacnia błysk poprzez jego zwielokrotnianie. Taki detektor wykorzystywany jest na fotografii ([Rysunek 3.101: Stanowisko pomiarów promieniowania \$\gamma\$ w studenckim laboratorium Fizyki i Techniki Jądrowej na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej](#) na stronie 265). Pokazuje ona wyposażenie stanowiska pomiarowego promieniowania γ w pracowni studenckiej. Sygnały z detektora rejestrowane są przez układy elektroniczne, pokazywane na ekranie oscyloskopu. Wykresy energii zarejestrowanych cząstek można oglądać na ekranie monitora.

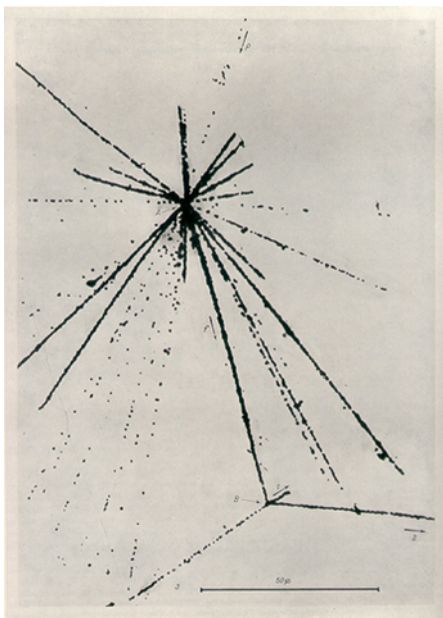


Rysunek 3.101: Stanowisko pomiarów promieniowania γ w studenckim laboratorium Fizyki i Techniki Jądrowej na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej

Detektory śladowe

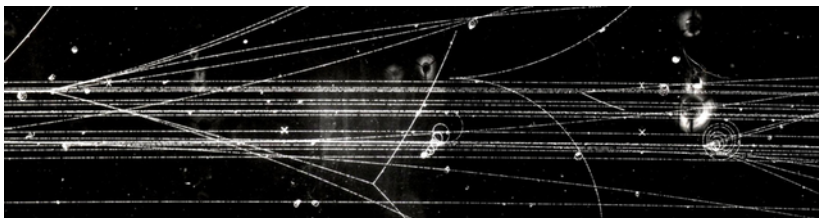
Jonizacja materii oznacza uwalnianie w niej swobodnych ładunków elektrycznych. Uwalnianie to następuje wzdłuż drogi, którą przebyła cząstka w materiale, a zjonizowane atomy, to ślady pozostawione przez cząstkę, podobnie jak ślady pozostawione na śniegu przez niezauważone zwierzę. Zjonizowane atomy zmieniają lokalnie strukturę materiału i jeśli znajdzie się sposób na utrwalenie tej zmiany, można zobaczyć ślad cząstki. Urządzenia pozwalające na zarejestrowanie śladów cząstki w materiale nazywamy *detektorami śladowymi*. Są one używane w fizyce jądrowej i cząstek elementarnych od początku XX wieku i od tego czasu ogromnie się zmieniły: od stosunkowo prostych w konstrukcji i działaniu komór Wilsona (dziś takie komory wykonują studenci, możesz się o tym przekonać na <http://kne.itc.pw.edu.pl/projekty/komora-wilsona>) do niezmiernie rozbudowanych i skomplikowanych elektronicznych systemów detektorów. Wymieńmy kilka z nich.

W *emulsjach jądrowych* można było rejestrować ślady cząstek na podobnej zasadzie, jak wykonuje się zdjęcia na kliszy fotograficznej. Technika ta była szczególnie przydatna w badaniu promieniowania kosmicznego - niewielkie i lekkie skrzyneczki z emulsją łatwo było umieścić w balonie i wysłać w górne warstwy atmosfery. W laboratoriach technikę tę stosowano do końca lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Za jej pomocą polscy fizycy, Marian Danysz i Jerzy Pniewski, odkryli w 1952 roku pierwsze tzw. hiperjądro - zawierające oprócz protonów i neutronów egzotyczną cząstkę Λ .



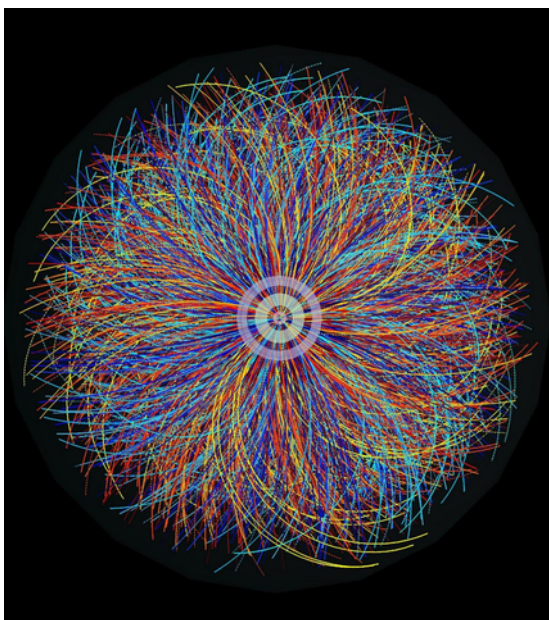
Rysunek 3.102: Pierwsza rejestracja hiperjader w emulsji jądrowej

W komorach pęcherzykowych wytworzone są takie warunki temperatury i ciśnienia, że wrzenie cieczy wypełniającej komorę rozpoczyna się na atomach zjonizowanych przez przechodzące przez komorę naładowane cząstki. Komory są na ogół umieszczone w polu magnetycznym, dzięki czemu torę cząstek są zakrzywione. Pozwala to odtworzyć pęd cząstki, a dodatkowe informacje pozwalają określić także jej prędkość i jednoznacznie ją zidentyfikować.



Rysunek 3.103: Fotografia komory pęcherzykowej wypełnionej ciekłym wodorem i naświetlonej wiązką protonów

Ślady cząstek zapisuje się elektronicznie w pozycyjnych *detektorach półprzewodnikowych* i w komorach projekcji czasowej (*TPC*) na podobieństwo zapisu informacji w cyfrowych aparatach fotograficznych.



Rysunek 3.104: Tysiące śladów cząstek zarejestrowanych elektronicznie w komorze projekcji czasowej detektora ALICE w Europejskim Laboratorium Fizyki Jądrowej CERN w pobliżu Genewy

Bezpieczeństwo jądrowe. Dozymetria

Promieniowanie jonizujące towarzyszy nam od zarania dziejów. Pochodzi ono zarówno z przestrzeni kosmicznej, jak i z wnętrza naszego globu. Promieniowanie jest obecne wokół nas i wewnątrz nas, bo przecież oddychamy i spożywamy posiłki, a zarówno w powietrzu, jak i w środkach spożywczych zawarte są substancje promieniotwórcze. Przykładem może być izotop węgla ^{14}C , obecny w każdym żywym organizmie. Czasami mówi się o „naturalnym tle” promieniowania, w którym żyjemy. Człowiek również wytwarza źródła promieniowania jonizującego dla celów naukowych, technicznych, medycznych a także - co najbardziej kontrowersyjne - militarnych.

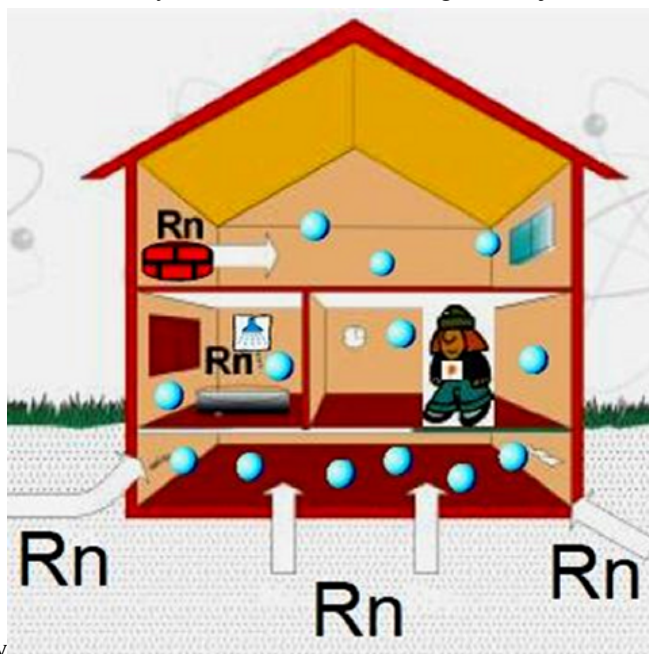


W zachodzących tam oddziaływaniach, zarówno elektromagnetycznych jak i jądrowych, tworzone jest promieniowanie wtórne, które dociera do powierzchni Ziemi

Rysunek 3.105: Promieniowanie kosmiczne, to strumień cząstek o bardzo wysokich energiach, głównie protonów, które docierają do atmosfery ziemskiej

Promieniowanie jonizujące wywołuje zmiany w komórkach organizmów żywych, które na ogół nie są obojętne dla zdrowia. Zmiany te dotyczą między innymi cząsteczek DNA, które odgrywają ważną rolę w funkcjonowaniu komórki a także zawierają informacje genetyczne. Wprawdzie uszkodzenia cząsteczek DNA mogą być powodowane także przez inne czynniki, a w organizmach żywych istnieją mechanizmy naprawcze, ale zbyt duże dawki promieniowania są niewątpliwie niebezpieczne dla zdrowia.

Jednym z produktów ich rozpadów jest promieniotwórczy gaz radon, który przedostaje się do atmosfery i znajduje się w powietrzu, którym oddychamy. Koncentracja radonu jest większa w pomieszczeniach zamkniętych, niż na zewnątrz, dlatego warto jest często wietrzyć pomieszczenia, w których



przebywamy

Rysunek 3.106: W skorupie ziemskiej znajdują się pierwiastki radioaktywne

Możliwie ścisłe określenie pojęcia „dawki promieniowania” jest więc bardzo ważną umiejętnością. Zajmuje się tym *dozymetria*. Posiadanie urządzeń, które mogłyby mierzyć dawki promieniowania, określenie dopuszczalnych dawek, które nie zagrażają zdrowiu oraz znajomość możliwych skutków w przypadku przekroczenia dawek dopuszczalnych są niezbędnymi elementami kompleksowego systemu bezpiecznego obchodzenia się z substancjami radioaktywnymi.

Ma on postać tzw. „koniczynki” czerwonego lub czarnego koloru na żółtym tle. Warto go znać - ostrzega przed obecnością promieniowania i substancjami promieniotwórczymi. Znaki takie umieszcza się na opakowaniach

transportowanych materiałów promieniotwórczych, na drzwiach pomieszczeń, gdzie stosowane są materiały



promieniotwórcze itp.

Rysunek 3.107: Znak ostrzeżenia przed substancjami promieniotwórczymi

Ilościowe określenie dawki promieniotwórczej

W celu ilościowego określenia wpływu promieniowania jonizującego na organizmy żywe, zostały zdefiniowane wielkości charakteryzujące otrzymane dawki i ich biologiczne skutki dla organizmu. Jest to dość rozbudowany system wielkości fizycznych, z którym trzeba zapoznać się krok po kroku. Miarą dawki jest energia wydzielona wskutek różnorodnych procesów oddziaływania promieniowania z materią. Ilość wydzielonej w materiale energii zależy od rodzaju i energii promieniowania oraz od własności materiału w którym energia jest wydzielana.

Podstawową wielkością fizyczną jest *aktywność źródła promieniotwórczego*. Określa ona liczbę rozpadów promieniotwórczych, zachodzących w tym źródle na jednostkę czasu. Jednostką aktywności jest jeden bekerel: 1 Bq odpowiada aktywności źródła, w którym następuje jeden rozpad na sekundę. Jednak z punktu widzenia dozymetrii aktywność opisuje jedynie potencjalne zagrożenie napromieniowaniem organizmu żywego.

Skutki napromieniowania opisuje *dawka pochłonięta* przez organizm. Ma ona niejaki związek z aktywnością źródła, ale mierzy nie liczbę cząstek, które przeszły, przykładowo, przez ciało ludzkie, lecz wydzieloną przy tym przejściu całkowitą energię. Dodatkowo, energia ta dzielona jest przez masę ciała. Jeden grey (jednostka dawki pochłoniętej) jest więc równy jeden dżul przez jeden kilogram ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$).

Okazuje się jednak, że jednoznaczne określenie wartości dawki pochłoniętej nie wystarcza do określenia jej skutku biologicznego z punktu widzenia konkretnego organizmu - skoncentrujemy się na człowieku. Istotną rolę odgrywa przy tym szereg innych czynników. Jedne są obiektywne, np. rodzaj pochłoniętego promieniowania (alfa, beta czy gamma), rozkład dawki w czasie czy rodzaj napromieniowanego narządu. Inne są indywidualne jak wiek, płeć i szeroko rozumiany stan zdrowia człowieka. Z tego powodu wprowadzono pojęcie *dawki skutecznej*, która uwzględnia wspomniane czynniki i lepiej oddaje rzeczywiste zagrożenie dla wybranego organizmu. Jednostką dawki skutecznej jest sivert ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$). Wymiar tej dawki jest taki sam jak dawki pochłoniętej, ale wartość jest na ogół inna, bowiem dawka ta uwzględnia wspomniane wyżej i inne czynniki. Dla przykładu, tzw. czynnik wagowy dla promieniowania α wynosi 20, a dla promieniowania β i γ równy jest 1. Dlatego dawce pochłoniętej od promieniowania α (wyrażonej w greyach) odpowiada dwudziestokrotnie większa dawka skuteczna wyrażona w siverdach. Obie dawki są natomiast jednakowe w przypadku promieniowania beta i gamma. Więcej informacji na ten temat znaleźć można na stronie WWW [Państwowej Agencji Atomistyki](http://www.państwowej.agencji.atomistyki).



Rysunek 3.108: Stacja monitoringu ASS-500 w CLOR

Agencja ta czuwa nad bezpieczeństwem radiacyjnym naszego kraju. W Polsce działa bez przerwy kilkanaście stacji monitoringu promieniowania jonizującego, rozrzuconych po terytorium kraju. Na fotografii ([Rysunek 3.108: Stacja monitoringu ASS-500 w CLOR](#) na stronie 270) pokazana jest stacja ASS-500 zainstalowana w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, CLOR w Warszawie. Dane rejestrowane przez stacje badane są systematycznie, a w przypadku nadzwyczajnego zagrożenia stacja automatycznie powiadamia osobę odpowiedzialną za monitoring radiologiczny.

Warto też wiedzieć, **jakie dawki są duże a jakie małe**. By oswoić się nieco z jednostką siwert, przytoczymy kilka danych; dotyczą one w większości terenów Polski.

- Według danych Państwowej Agencji Atomistyki dawka skuteczna (całkowita) otrzymana przez statystycznego Polaka w 2011 roku wyniosła 3,30 mSv (**milisiverta**); dla innych lat dawki średnie były podobne.
- Promieniotwórczy radon, który wdychamy wraz z powietrzem, zapewnia nam dawkę ok. 1,2 mSv rocznie (jest to ok. 36% dawki całkowitej).
- Promieniowanie kosmiczne dostarcza na poziomie morza dawkę ok. 0,3-0,5 mSv/rok; kto mieszka na wysokości 3000 m n.p.m. pochłania średnio ok. 1,2 mSv rocznie; hipotetyczny mieszkaniec szczytu Mount Everest pochłaniałby ok. 10 mSv rocznie.
- Diagnostyka medyczna (prześwietlenia rentgenowskie, tomografia itp.) jest źródłem - średnio rzecz biorąc - ok. 0,8 mSv rocznie, czyli prawie 25% całej dawki. Niektórzy wyprowadzają z takiego faktu „zalecenia” o bezwzględnej konieczności unikania takiej diagnostyki. Nie jest to słuszna argumentacja, bo są obszary na Ziemi (np. w Finlandii), gdzie średnia dawka skuteczna pochodząca ze źródeł naturalnych jest kilkakrotnie większa niż w Polsce, a średnia długość życia mieszkańca jest większa niż w naszym kraju.
- Dawka otrzymywana ze sztucznych źródeł to ok. 0,9 mSv na rok.
- Dopuszczalna dawka dla osób zawodowo narażonych na działanie promieniowania jonizującego wynosi 6 mSv rocznie lub 20 mSv rocznie, zależnie od kategorii pracowników, do której są zakwalifikowani.

Dawka promieniowania a jej skutki

Wspominaliśmy już, że proces oddziaływania promieniowania jonizującego z materią ma charakter statystyczny, losowy. Dotyczy to także skutków tego oddziaływania. Przy otrzymaniu bardzo dużych dawek bez wątpienia

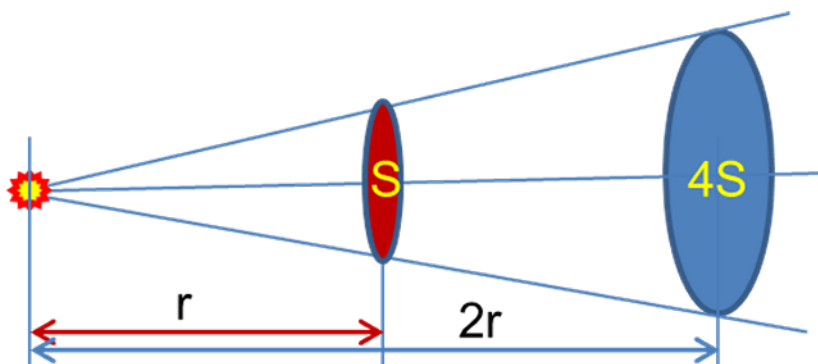
pojawi się i skutek, najczęściej w postaci zachorowania na tzw. chorobę popromienną. Skutki takie nazywamy **deterministycznymi**. Można przyjąć, że wszystkie takie zachorowania wśród ludzi mieszkających w bezpośredniej bliskości czarnobylskiego reaktora były skutkiem tej katastrofy.

Inaczej jest przy mniejszych dawkach. Wzrostowi otrzymanej dawki towarzyszy, owszem, wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia skutku (np. zachorowania). Nie można jednak jednoznacznie powiązać stwierdzonej zmiany chorobowej w organizmie z konkretnym przypadkiem napromienienia. Skutki takie nazywamy **stochastycznymi** (czyli losowymi). Dlatego słyszane często stwierdzenia, że ktoś, na przykład w Polsce, zachorował na pewno z powodu katastrofy w Czarnobylu, bo choroba została zdiagnozowana pół roku po katastrofie, są - z naukowego punktu widzenia - nieuzasadnione. Co było przyczyną każdego konkretnego zachorowania nigdy się nie dowiemy. Skutki stochastyczne możemy stwierdzić tylko stosując metody statystyczne, na przykład przez określenie liczby zachorowań na 1000 osób z danego terenu i porównując to z podobną liczbą wyznaczoną dla innego obszaru lub w innym czasie.

Naukowcy stosują dwie hipotezy co do związku pomiędzy dawką a skutkiem; do tej pory nie udało się jednoznacznie rozstrzygnąć między nimi. Jedna to tzw. **hipoteza liniowa**, według której prawdopodobieństwo wystąpienia skutku jest proporcjonalne do otrzymanej dawki, poczynając od dawek najmniejszych. Drugą jest **hipoteza hormezy radiacyjnej**, według której małe dawki mają wręcz pozytywny skutek dla zdrowia, zwiększając m.in. odporność organizmu, a skutki negatywne pojawiają się - także z określonym prawdopodobieństwem - dopiero po przekroczeniu określonej dawki granicznej. Druga hipoteza jest nieco podobna do przyjmowania lekarstw. Jedna lub dwie tabletki aspiryny bez wątplenia pomogą w opanowaniu przeziębienia, ale gdyby połknąć na raz całe opakowanie, skutek mógłby być niebezpieczny dla zdrowia i życia. Więcej o tych dwóch hipotezach możesz przeczytać w artykule Z. Jaworowskiego, zamieszczonego w miesięczniku "Wiedza i Życie": <http://archiwum.wiz.pl/1997/97031700.asp>

Co chroni przed niepożądanym napromienianiem?

Jak należy postępować, by w przypadku zagrożenia otrzymać jak najmniejszą dawkę? Jedna zasada jest bardzo prosta – przebywać jak najdalej od źródła promieniowania. Fizycy ujmują to lapidarnym stwierdzeniem: „Najlepszą osłoną antyradiacyjną jest jeden nad r kwadrat”. Wyjaśnia to *Rysunek 3.109: Ilustracja zależności $1/r^2$* na stronie 271. Przy zwiększaniu odległości r od źródła intensywność promieniowania zmniejsza się jak $1/r^2$. Przykładowo, jeśli oddalimy się na dwukrotnie większą odległość od źródła, to intensywność docierającego do nas promieniowania czterokrotnie zmaleje; przy trzykrotnym zwiększeniu odległości uzyskamy dziewięciokrotne obniżenie natężenia promieniowania itd.



przy dwukrotnym wzroście odległości od źródła powierzchnia obejmowana tym samym kątem czterokrotnie wzrośnie, więc dawka na jednostkę powierzchni zmaleje czterokrotnie

Rysunek 3.109: Ilustracja zależności $1/r^2$

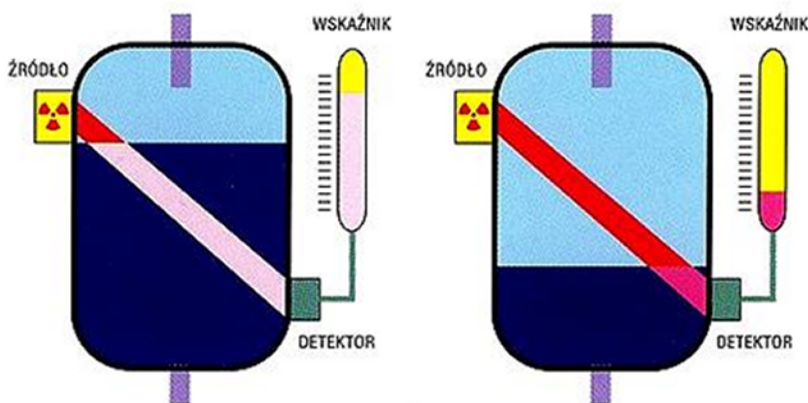
W przypadkach zagrożenia na ogół nie ma czasu na rozglądanie się za ołowianą osłoną. Za to warto pamiętać, że zwykły mur z cegły czy betonu nieźle pochłania promieniowanie jądrowe - lepiej więc przebywać w domu niż na wolnym powietrzu. Przeciętny człowiek, ani grupa ludzi, niczego więcej nie jest w stanie zrobić - odpowiednie działania mogą podjąć tylko wyspecjalizowane służby.

Zastosowania promieniowania jądowego

Na koniec naszego rozszerzonego przeglądu przedstawimy kilka mało znanych przykładów wykorzystywania promieniowania jonizującego w różnych dziedzinach.

Aparatura radiometryczna - Jak wyznaczyć poziom cieczy w zbiorniku nie mając dostępu (w „klasycznym” rozumieniu) do jego wnętrza?

Z jednej strony pojemnika (*Rysunek 3.110: Schemat działania miernika poziomu cieczy w zamkniętym naczyniu* na stronie 272) umieszczamy w górnej części źródło promieniotwórcze, z drugiej strony u dołu umieszczamy detektor. Ciecz w pojemniku powoduje absorpcję promieniowania. Wystarczy raz wyskalować zależność mierzonej intensywności promieniowania od poziomu cieczy w zbiorniku i miernik jest gotowy do użytku.



Im wyższy poziom cieczy, tym słabsza wiązka dociera od źródła do detektora

Rysunek 3.110: Schemat działania miernika poziomu cieczy w zamkniętym naczyniu

Defektoskopia przemysłowa - Jak zbadać szczelność rurociągu w terenie, jak sprawdzić jakość zespawanych połączeń?

Sonda zawierająca źródło promieniotwórcze oraz detektor (*Rysunek 3.111: Badanie defektoskopowe rurociągu* na stronie 272) mierzy intensywność promieniowania rozproszonego przez badany materiał. Kiedy struktura materiału jest jednorodna, sygnał utrzymuje się na tym samym poziomie. Wszelkie niejednorodności sygnalizuje zmiana rejestrowanej przez detektor promieniowania.

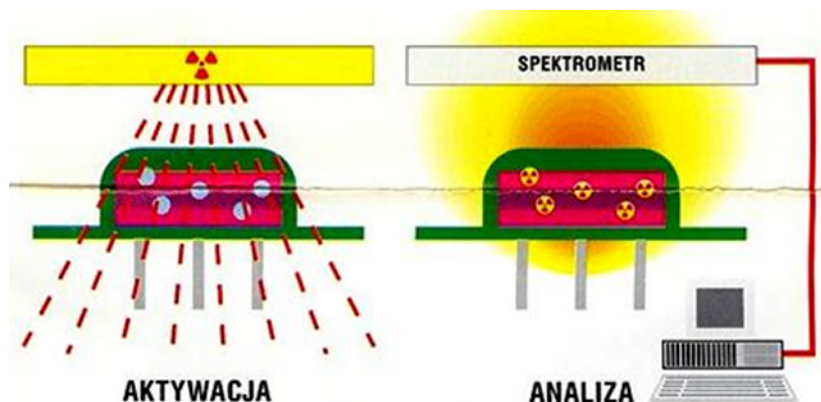


Rysunek 3.111: Badanie defektoskopowe rurociągu

Analiza aktywacyjna - Jak zbadać skład chemiczny nieznanego materiału bez wykonywania skomplikowanej analizy chemicznej?

Badany materiał napromieniamy strumieniem cząstek naładowanych lub neutronów (*Rysunek 3.112: Dwa etapy analizy aktywacyjnej* na stronie 273). Materiał ulega aktywacji - niewielka część jego atomów lub jąder

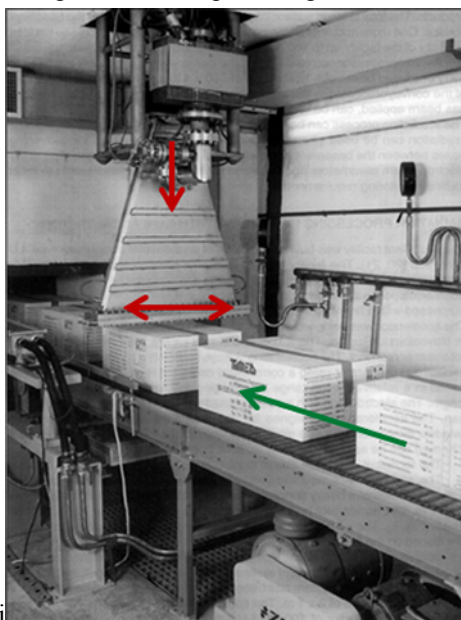
atomowych wysyła promieniowanie, najczęściej X lub γ . Każdy atom czy jądro atomowe ma inne, specyficzne dla siebie widmo promieniowania. Wykonujemy, za pomocą spektrometru, pomiar widma, analizujemy otrzymane wyniki i wyznaczamy skład atomowy badanego materiału.



Rysunek 3.112: Dwa etapy analizy aktywacyjnej

Sterylicacja radiacyjna materiałów medycznych, czyli niszczenie wszelkich mikroorganizmów w tych materiałach z pomocą wiązki elektronów przyspieszonych w akceleratorze, umożliwia wykonanie tej operacji bez wyjmowania materiałów z opakowania. W niektórych przypadkach jest to bardzo istotne z punktu widzenia użytkowego. Wielkość dawki można zmieniać dobierając intensywność wiązki i prędkość przesuwania pudełek z materiałami pod głowicą układu sterowania wiązką, co ilustruje fotografia ([Rysunek 3.113: Sterylicacja materiałów medycznych w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie](#) na stronie 273).

Pionowa strzałka czerwona pokazuje początkowy kierunek ruchu wiązki elektronów, pozioma strzałka pokazuje zakres „przemiatania” poziomego. Strzałka zielona pokazuje ruch pudełek z materiałami



medycznymi

Rysunek 3.113: Sterylicacja materiałów medycznych w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie

Pomiar zapylenia powietrza atmosferycznego stanowi ważny element ochrony środowiska naturalnego.

Zasada pomiaru ([Rysunek 3.114: Izotopowy Miernik Zapylenia Powietrza AMIZ produkowany w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej](#) na stronie 274) polega na wyznaczeniu masy osadzonego na filtrze pyłu z przepuszczonego przez filtr powietrza. Objętość powietrza określa czas przepompowywania powietrza przez filtr. Masa osadzonego

pyłu wyznaczona jest przez pomiar osłabiania promieniowania beta pochodzącego ze źródła promieniotwórczego, którym jest izotop węgla ^{14}C .

Strzałka czerwona pokazuje wlot pompowanego powietrza. Strzałka zielona pokazuje próbki pyłu zebranego na filtrze. Symbol ^{14}C wskazuje miejsce, gdzie znajduje się izotop promieniotwórczy. Symbolem D oznaczono detektor. Filtr w postaci taśmy przesuwają się automatycznie po zebraniu próbki pyłu umożliwiając bezobsługową pracę



urządzenia

Rysunek 3.114: Izotopowy Miernik Zapylenia Powietrza AMIZ produkowany w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej

Bardzo ważną dziedziną zastosowania metod radiacyjnych i aparatury jądrowej jest **medycyna**. Wspominaliśmy już o **radiodiagnostyce** i **radioterapii**. Oto kilka innych, powszechnie dziś stosowanych metod radiograficznych prowadzących do **obrazowania medycznego**. Każdy z krótkich opisów jest ilustrowany obrazem uzyskanym dzięki opisywanej metodzie.

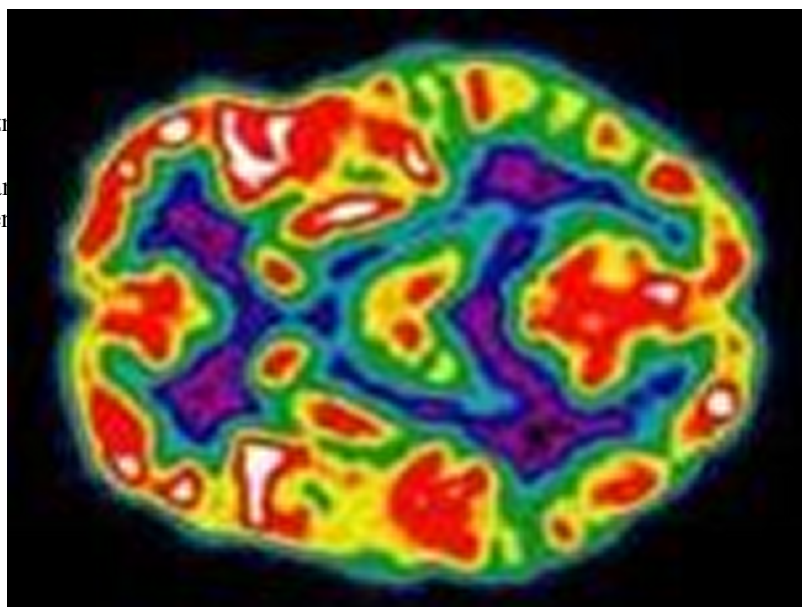
Historycznie najstarszą metodą stanowią **prześwietlenia promieniami Rentgena**. Przenikliwość tego promieniowania maleje wraz ze wzrostem liczby atomowej pierwiastka, zawartego w materii. Różne rodzaje tkanek zawierają różne pierwiastki (np. kości zawierają niemała wapnia i fosforu), więc pochłaniają promienie X w różnym stopniu. Pozwala to na zobrazowanie rozmieszczenia narządów wewnętrznych.



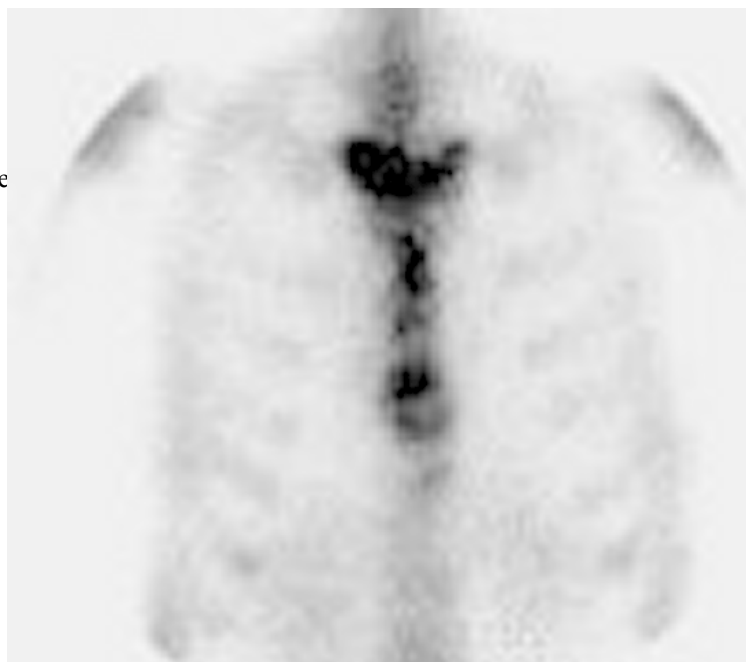
tomografia komputerowa, tzw. CT - pozwala uzyskać przekrojowe obrazy wnętrza obiektu (ciała) w wyniku komputerowego opracowania wielu obrazów rentgenowskich wykonanych z różnych kierunków



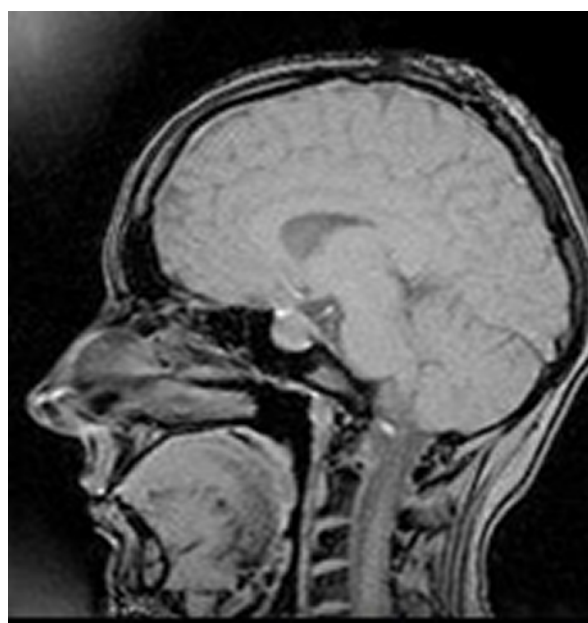
pozytonowa tomografia emisyjna, tzw. PET - różni się od tomografii komputerowej tym, że źródło promieniowania (najczęściej izotop β^+ -promieniotwórczy) znajduje się wewnątrz organizmu w miejscach, gdzie mogą być chorobowo zmienione tkanki wewnętrzne. Jest to bardzo pomysłowe zastosowanie zjawiska anihilacji pozytonu emitowanego w procesie β^+ .



scyntygrafia - polega na wprowadzeniu do organizmu takiego farmaceutyka, który będzie gromadził się w badanym narządzie, a wraz z nim izotopu promieniotwórczego, który poprzez emisję promieniowania, rejestrowanego następnie układem detektorów, dostarczy informacji dotyczących położenia struktury badanego organu.



metoda rezonansu magnetycznego – nie należy wprawdzie do metod radiacyjnych, ale wykorzystuje zjawisko jądrowego rezonansu magnetycznego. Badana próbka (narząd, organ) poddana jest działaniu silnego pola magnetycznego i fal elektromagnetycznych wywołujących zjawisko rezonansu. Proces ten zależy od typu tkanki, co umożliwia lokalizację organów wewnętrznych.



EXE PDF Ćwiczenie: Osłabienie promieniowania gamma przy przechodzeniu przez materię

OPIS Doświadczenie zdalne: Osłabienie promieniowania gamma

OPIS Doświadczenie zdalne: Charakterystyka licznika Geigera

Pytania i problemy

1. Opisz zasadę działania wybranego detektora promieniowania jonizującego.
2. Na czym polega biologiczne oddziaływanie promieniowania jądrowego?
3. Uzasadnij konieczność rozróżniania pomiędzy dawką pochłoniętą a dawką skuteczną.
4. Często stosuje się pojęcie *mocy dawki*, czyli dawki otrzymanej w jednostce czasu np. w ciągu godziny. Podaj jednostkę *mocy dawki*. Podaj wzór pozwalający wyznaczyć dawkę całkowitą za pomocą *mocy dawki* i czasu napromieniania.

5. Opisz wybrane zastosowanie promieniowania jądrowego.
6. Uzasadnij, dlaczego ochrona przed promieniowaniem jonizującym jest inna niż przed strumieniem neutronów.

3.10 Cząstki elementarne (materiał nadobowiązkowy)

Co obecnie jest przedmiotem badań w fizyce jądrowej? Jakie stawiamy pytania? Co już wiemy, a czego nie wiemy? Aby zdać sobie z tego sprawę, przypomnijmy jak kształtował się rozwój poglądów na budowę materii w minionych dwóch wiekach.

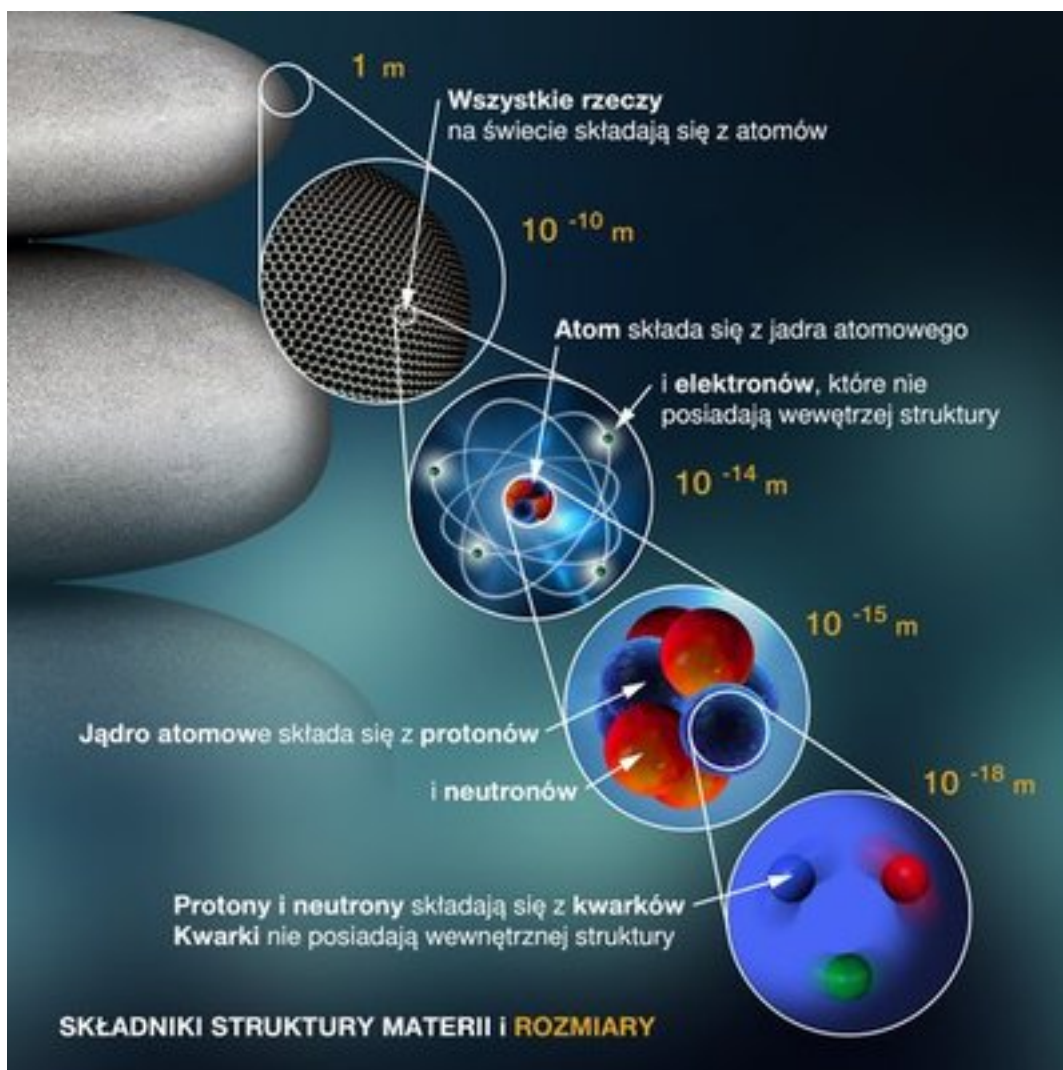
Poglądy fizyków na temat cząstek elementarnych zmieniły się w ostatnich dwóch stuleciach diametralnie. Na przełomie XVIII i XIX wieku obowiązywał pogląd o „płynowej”, czyli ciągłej strukturze materii. Pogląd ten był niejako przeciwieństwem wysuwanych od starożytności koncepcji atomistycznych. Taka wizja materii - jako dowolnie podzielonego płynu - z istoty swojej wykluczała pojęcie elementarności.

Koncepcje atomistyczne odżyły już w pierwszej połowie XIX wieku. W odróżnieniu od starożytności były one poparte poważnymi, choć pośrednimi danymi doświadczalnymi. Rozwój chemii oraz termodynamiki doprowadził do ugruntowania się pojęcia atomu i cząsteczki (związku chemicznego) jako składników materii oraz do sformułowania tzw. kinetyczno-molekularnej teorii materii.

Badania materii wykazały istnienie olbrzymiej ilości (miliardów?) różnych substancji chemicznych. W trakcie badań chemicznych okazało się, że ta różnorodność wynika z łączenia się w rozmaity sposób dużo mniejszej ilości (ok. stu) substancji pierwotnych zwanych pierwiastkami chemicznymi. Ogólnie stwierdzono, że substancje chemiczne są związkami prostych pierwiastków chemicznych. Następnie przyjęto, że makroskopowa porcja określonego pierwiastka chemicznego składa się z jednakowych – bardzo małych – atomów. Założono, że jedne pierwiastki różnią się od innych dzięki temu, że składają się z różnych atomów. Atomy łączą się ze sobą tworząc molekuly – czyli cząsteczki chemiczne. Główną cechą atomów charakterystycznych dla danego pierwiastka jest ich masa. Stąd był już tylko krok do wykazania, że atomy składają się z jeszcze bardziej elementarnych cząstek, jakimi są protony, neutrony oraz elektrony.

Później okazało się, że nukleony (protony i neutrony) składają się z jeszcze mniejszych cząstek zwanych kwarkami.

Na *Rysunek 3.115: Symboliczne przedstawienie odkryć składników materii* na stronie 278 pokazano przebieg odkryć dotyczących najważniejszych składników materii.



Rysunek 3.115: Symboliczne przedstawienie odkryć składników materii

Dlaczego cząstki łączą się ze sobą? Nietrudno było się domyśleć, że oddziałują wzajemnie na siebie siłami przyciągania. Od dawna znane były siły elektromagnetyczne. Dzięki nim przyciągają się ujemnie naładowane elektrony z dodatnimi protonami jądra tworząc atom. Podobnie i jądro (składające się z nukleonów) utrzymuje się w całości dzięki przyciągającym siłom jądrowym. Jeżeli weźniemy pod uwagę elementarne wzajemne oddziaływanie tylko dwóch cząstek, to należało przyjąć, że istotą tego oddziaływania jest wymiana trzeciej cząstki – nośnika sił. Te cząstki – nośniki oddziaływań, to tzw. bozony. Poszukiwaniom elementarnych składników materii towarzyszyły więc poszukiwania i odkrycia elementarnych nośników oddziaływań.

Koncepcję oddziaływania poprzez wymianę nośników wysunięto w latach dwudziestych XX wieku, wraz z rozwojem mechaniki kwantowej. W kolejnych dziesięcioleciach, obok cząstek będących „cegiełkami materii” odkrywano coraz to nowe bozony - cząstki spełniające rolę „spoiwa materii”. Najbardziej znanym bozonem jest foton, nośnik oddziaływania elektromagnetycznego, uznawany dziś za elementarny. Ostatnim odkryciem w tej dziedzinie jest wytworzenie i rozpoznanie bozonu Higgsa w **LHC** (**L**arge **H**adron **C**ollider, czyli wielki zderzacz hadronów) w CERN pod Genewą (*Rysunek 3.116: Widok na prawobrzeżną Genewę i Jezioro Genewskie* na stronie 279). Odkrycia tego dokonano w 2012 roku, a więc niemal pół wieku po teoretycznym przewidzeniu istnienia tej cząstki.



Rysunek 3.116: Widok na prawobrzeżną Genewę i Jezioro Genewskie

CERN (j. francuski: Centre Européen pour la Recherche Nucléaire - Europejskie Centrum Badań Jądrowych) jest międzynarodowym laboratorium, gdzie bada się reakcje jądrowe przy najwyższych osiągniętych przez człowieka energiach. Największym w CERNie urządzeniem przyspieszającym cząstki do prędkości różniących się tylko o milionowe części od prędkości światła jest właśnie LHC. Na [Rysunek 3.117: Tunel LHC](#) na stronie 280 pokazano fragment tunelu z rurą, w której poruszają się przyspieszane cząstki.



Rysunek 3.117: Tunel LHC

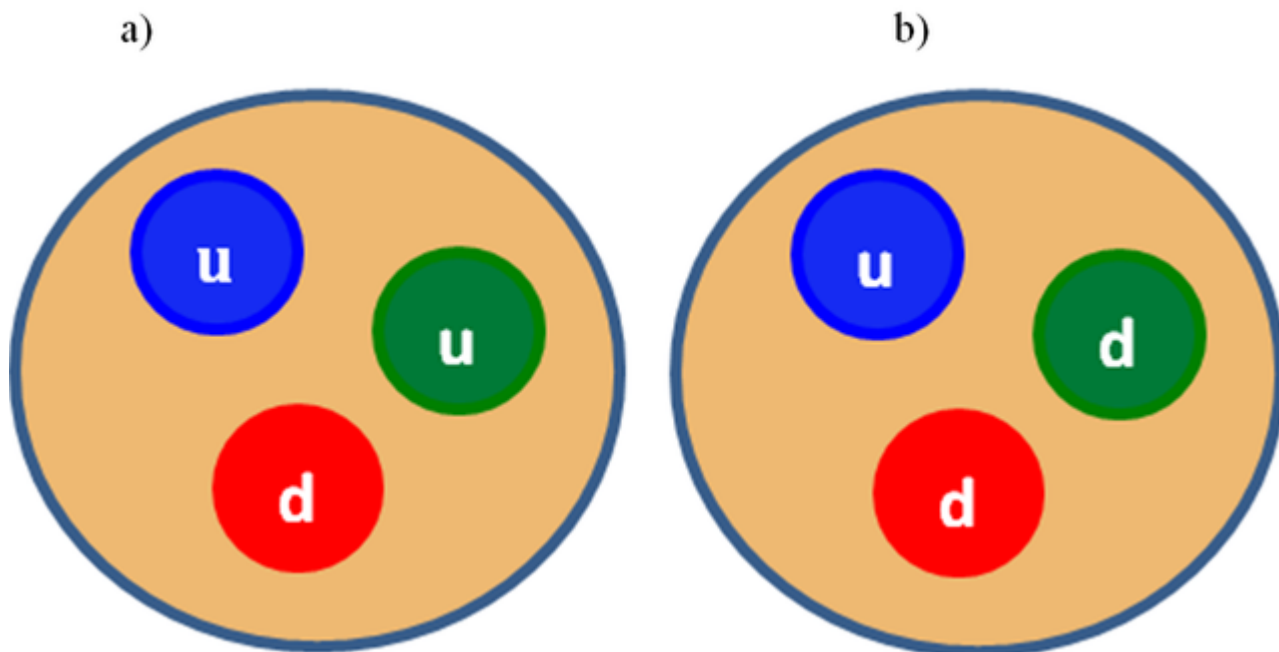
Za tymi wszystkimi odkryciami kryje się wiele nazwisk i faktów; kryją się też fascynujące historie dążeń, emocji, niedowierzania, zdziwienia, niespodzianek, dramatycznych zwrotów akcji, potwierdzonych i obalonych hipotez, wątpliwości i zachwytu kilku pokoleń fizyków. Nie sposób wymienić tu wszystkich, ani nawet tych, którzy zostali uhonorowani nagrodą Nobla. Znacznie pełniejszy opis tych poszukiwań znajdziesz w znakomitej książce „Historia fizyki. Od czasów najdawniejszych do współczesności” autorstwa Andrzeja K. Wróblewskiego. Warto do niej zajrzeć, jak i do innych książek, czasopism opisujących przebieg odkryć naukowych współczesnych i dawnych. Historia fizyki i całego przyrodznawstwa jest bardzo ciekawa, jest inaczej ciekawa niż historia państw i narodów, niż historia wojen (prawdziwych czy gwiazdnych). Dotyczy ona bowiem nie tylko wydarzeń i ludzi, ale też ich umysłów, ich unikatowych dialogów z przyrodą. Dotyczy odkrywania praw rządzących ewolucją przyrody od początku Wszechświata, a wiele aspektów tej ewolucji do tej pory jeszcze stanowi niezwykle atrakcyjną zagadkę.

Kwarki

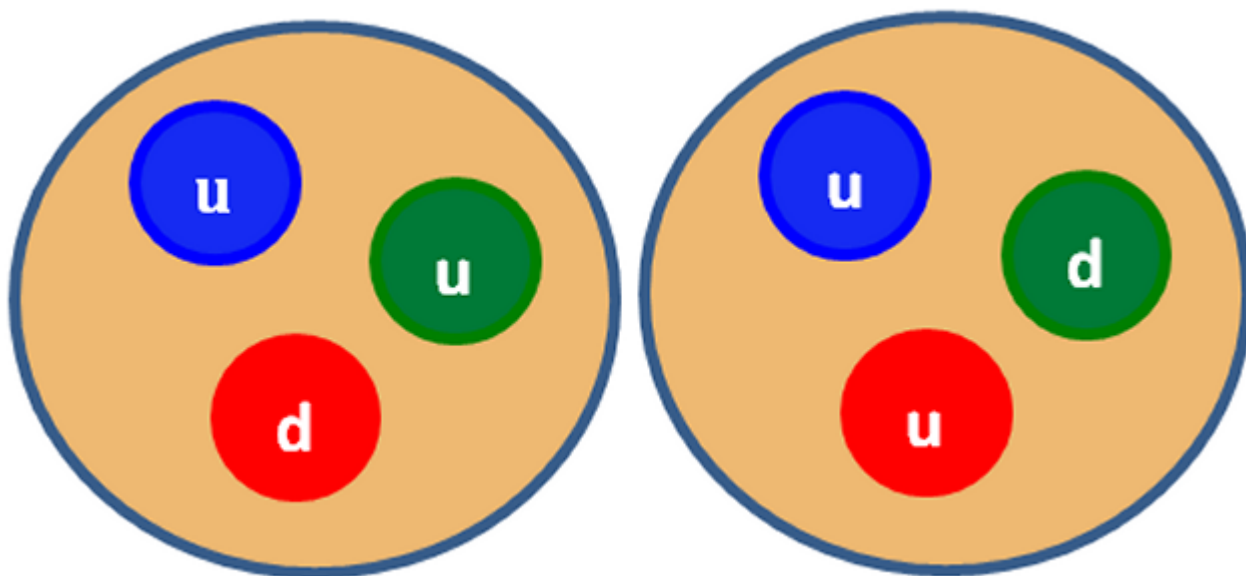
Wiemy już, że jądro atomowe składa się z protonów i neutronów. Szybko okazało się, że protony i neutrony nie są jedynymi cząstkami ciężkimi, ale należą do licznej grupy hadronów. Wszystkie hadrony to masywne cząstki i do ich wytworzenia stosuje się potężne akceleratory przyspieszające cząstki do olbrzymich energii. W przeciwieństwie do sześciu leptonów, hadronów jest bardzo dużo i już to skłania do przypuszczenia, że są to cząstki złożone z bardziej elementarnych składników. Przyjęto, że wszystkie hadrony (w tym protony i neutrony) składają się z kwarków. Jednak natychmiast musi pojawić się pytanie: jak to jest możliwe, skoro proton posiada elementarny ładunek elektryczny i mniejszych ładunków w przyrodzie nikt nigdy nie obserwował? Jakie są więc ładunki kwarków? Czyżby były mniejsze niż ładunek protonu i elektronu, uznawany za elementarny? Tak jest. Hipoteza, którą w 1964 roku wysunęli amerykańscy fizycy Gell-Mann i Zweig zakłada, że kwarki posiadają ładunki stanowiące $\frac{2}{3}$ oraz $-\frac{1}{3}$ ładunku protonu. Kwark posiadający ładunek $\frac{2}{3}$ nazwano górnym (po angielsku „up”) i oznaczono symbolem „u”, a kwark posiadający ładunek $-\frac{1}{3}$ nazwano dolnym (po angielsku „down”) i oznaczono symbolem „d”.

Czy można „zbudować” proton i neutron z trójek kwarków u i d ? Proponujemy Ci małą łamigłówkę: zanim zaczniesz czytać dalej, spróbuj „skonstruować” proton i neutron z trójek kwarków u i d tak, aby ładunek protonu równy był $+1$, a ładunek neutronu 0 .

Rozwiązanie łamigłówki jest dość proste: proton składa się z dwóch kwarków u i jednego d , a neutron z dwóch kwarków d i jednego u . Można to graficznie pokazać jak na *Rysunek 3.118*: a) Kwarkowa struktura protonu, skład: uud , ładunek: $2 \cdot \frac{2}{3} e + \frac{1}{3} e = e$; b) Kwarkowa struktura neutronu, skład: udd , ładunek: $\frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e - \frac{1}{3} e = 0$ na stronie 281.



Rysunek 3.118: a) Kwarkowa struktura protonu, skład: uud , ładunek: $\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e = e$; b) Kwarkowa struktura neutronu, skład: udd , ładunek: $\frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e = 0$



Rysunek 3.119: Dwa protony o różnym składzie uud są identyczne

Na rysunkach kwarki oznaczono kolorami: niebieskim, zielonym i czerwonym. Nie zrobiono tego przypadkowo! Te kolory symbolizują ładunki kwarkowe. Znamy ładunki elektryczne (plus i minus) dzięki którym cząstki oddziałują elektrycznie. Kwarki mają też swoje ładunki dzięki którym oddziałują między sobą. Jednakże jest trzy (w przeciwieństwie do dwóch rodzajów ładunków elektrycznych). Ładunki kwarkowe mają podobne cechy do cech kolorów podstawowych (też jest ich trzy, z ich złożenia można otrzymać dowolny kolor, mogą się wysycić oraz neutralizować w postaci koloru białego). Oddziaływania międzykwarkowe noszą nazwę oddziaływań silnych.

Kwarki oddziałują za pomocą tzw. ładunków silnych, które są w pewnym sensie analogią ładunków elektrycznych. Wiemy, że istnieje tylko jedna „para rodzajów” ładunku elektrycznego: tzw. dodatni, np. ładunek protonu czy pozytonu oraz przeciwny mu ujemny, (pomyśl o nim jako o „antyododatnim”), np. ładunek antyprotonu czy elektronu.



Wskazówka:

Istnieją aż trzy „pary rodzajów” ładunku silnego (zwanego w skrócie kolorem kwarku): czerwony i antyczerwony, niebieski i antyniebieski oraz zielony i antyzielony. Widzimy, że kwarki mogą mieć ładunki czerwony, zielony lub niebieski; antykwarki (składniki antymaterii) mają ładunki antyczerwony, antyzielony lub antyniebieski. Warto wiedzieć, że dwa protony składające się z kwarków *uud* o różnym zestawie kolorów (*Rysunek 3.119: Dwa protony o różnym składzie uud są identyczne* na stronie 281) mają identyczne właściwości - są nierozróżnialne. Podobnie jest z neutronami i innymi cząstkami zbudowanymi z kwarków.

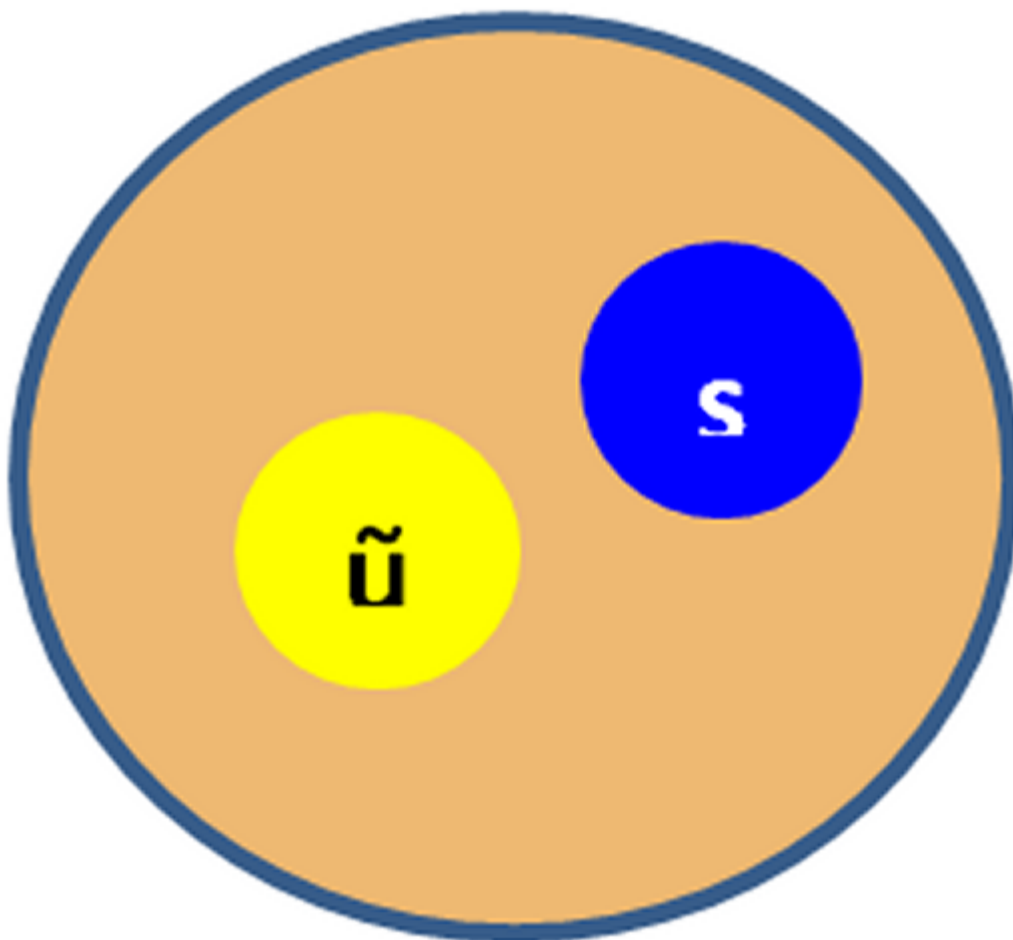
Kolory stanowią fundamentalną własność kwarków, tworzących protony, neutrony i inne cząstki. Kwarki występują w nich w trzech różnych „kolorach”, bowiem zgodnie z zasadami *mechaniki kwantowej*, w danym układzie kwantowym nie może być dwóch cząstek o takich samych wartościach wszystkich *liczb kwantowych* (wspominaliśmy już, że mechanika kwantowa jest teorią opisująca oddziaływania atomów i jąder atomowych).

Taką liczbą kwantową jest właśnie kolor kwarku. Każdy z kwarków tworzących proton lub neutron musi więc mieć inny kolor. Pamiętajmy jednak, że nie chodzi tu o kolor w sensie dosłownym. „Kolor” kwarku – to własność umowna i nie można jej mylić z kolorem, który postrzegamy naszymi oczami, chociaż pewna analogia występuje, o czym powiemy później.

Zgodnie ze stanem obecnej wiedzy, kwarki są elementarne i nie mają wewnętrznej struktury. Znamy sześć rodzajów kwarków i tyleż rodzajów antykwarków. Kwarki *u* i *d* składają się na jedną z trzech dwuelementowych rodzin kwarków, jakie do dziś odkryto. Istnieją teoretyczne podstawy, by sądzić, że więcej takich rodzin w przyrodzie nie ma. Pozostałe dwie rodziny zawierają kwarki *s* i *c* (z angielskiego strange - dziwny i charm - powabny) oraz *b* i *t* (*beauty* - piękno i *truth* - prawda).

Bariony i mezony

W przyrodzie występują trzejelementowe kombinacje kwarków (każdy w innym kolorze), tworzące dość liczną rodzinę cząstek zwanych barionami. Jedyny stabilny barion to proton (swobodny neutron, z połowicznym czasem życia około kilkunastu minut, podlega przemianie β^- , jednak może istnieć dowolnie długo jako składnik stabilnych jąder atomowych). W pozostałych barionach kwarki *s* i *c* oraz *b* i *t* ulegają kolejnym przemianom analogicznym do przemiany β , co ostatecznie doprowadza do zamiany tych barionów w protony. Połowiczne czasy życia niestabilnych barionów są bardzo różne: od ok. 10^{-8} s do ok. 10^{-23} s. W tej skali swobodny neutron zasługuje na miano cząstki niemal stabilnej.

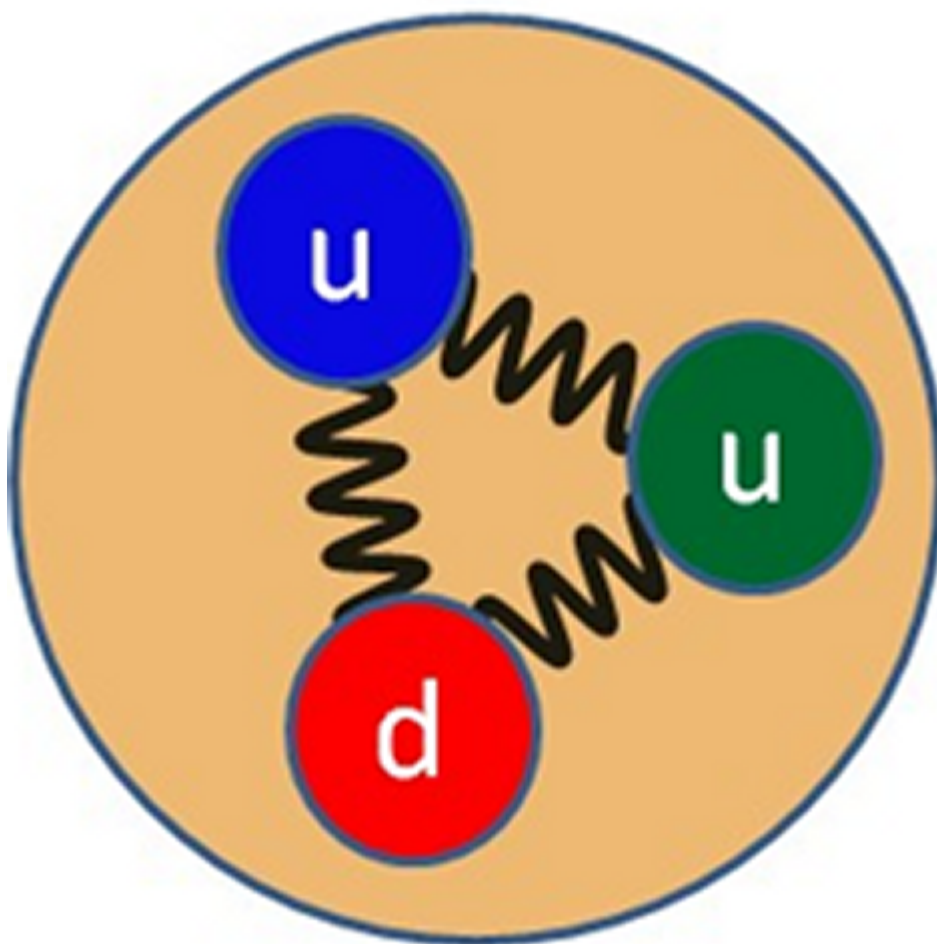


Rysunek 3.120: Mezon K^- może składać się z antyniebieskiego (czyli żółtego) antykwarku u i niebieskiego kwarku dziwnego s

Oprócz barionów istnieje druga grupa cząstek oddziałujących silnie - są to mezony. W skład każdego wchodzi para kwark - antykwark. Przykładem jest mezon π - znane są jego trzy odmiany: π^+ , π^0 i π^- . Na [Rysunek 3.120: Mezon \$K^-\$ może składać się z antyniebieskiego \(czyli żółtego\) antykwarku \$u\$ i niebieskiego kwarku dziwnego \$s\$](#) na stronie 283 pokazano skład mezonu K^- . Nie jest znany żaden stabilny mezon. Na początku rozwoju fizyki jądrowej mezonom przypisywano rolę elementarnych nośników oddziaływania silnego pomiędzy nukleonami - dziś wiemy, że obraz ten był jedynie przybliżeniem, a za elementarne nośniki oddziaływania silnego uważamy gluony.

Gluony

Kwarki tworzą zwarte obiekty, takie jak protony i neutrony dzięki oddziaływaniom silnym; te same oddziaływania wiążą protony i neutrony w jądra atomowe. Teoria, która opisuje oddziaływania kwarków jest nazywana chromodynamiką kwantową. Zgodnie z nią, łączenie kwarków w obiekty złożone odbywa się za pośrednictwem nośników oddziaływań, którymi są cząstki zwane *gluonami*. Oddziaływanie odbywa się poprzez wymianę gluonów pomiędzy kwarkami. Analogiczny opis występuje w elektrodynamice kwantowej - przyjmuje się, że oddziaływanie pomiędzy naładowanymi elektrycznie obiektami następuje poprzez wymianę fotonów. Obrazowo przedstawia się gluony w postaci „sprężynek” łączących parę kwarków ([Rysunek 3.121: Oddziaływanie silne między kwarkami zaznaczono w postaci linii podobnych do sprężyny](#) na stronie 284).



Rysunek 3.121: Oddziaływanie silne między kwarkami zaznaczono w postaci linii podobnych do sprężyny

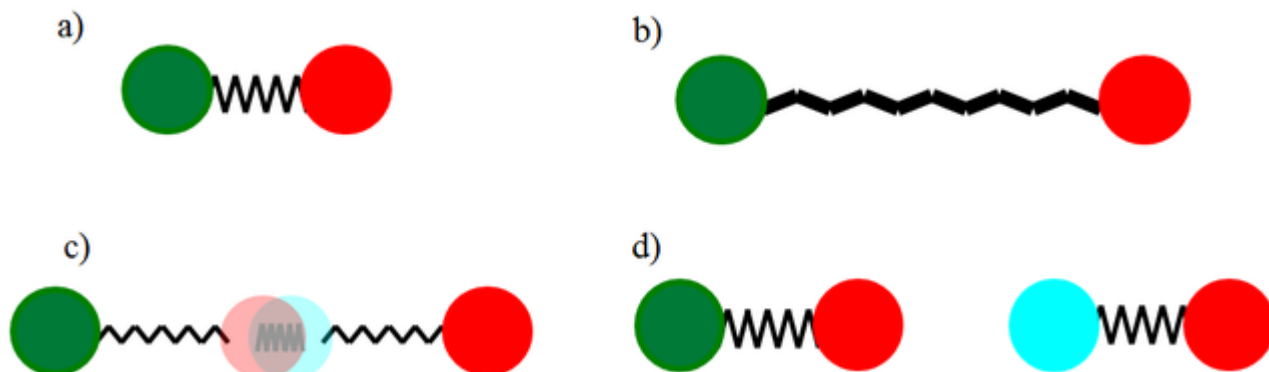
Niezwykłą cechą oddziaływań silnych jest to, że ich siła rośnie wraz ze wzrostem odległości pomiędzy oddziałującymi kwarkami. Jest to odwrotnie niż w znanych nam oddziaływaniach: grawitacyjnych lub elektromagnetycznych, gdzie siła oddziaływania zmniejsza się kiedy odległość wzrasta. Gdy więc kwarki znajdują się bardzo blisko siebie to zachowują się tak, jakby były swobodne. Kiedy jednak odległość między nimi się powiększa i staje się porównywalna z rozmiarami nukleonu, to siła oddziaływania nie pozwala na dalszy wzrost ich wzajemnej odległości. Mówimy, że kwarki i gluony są uwięzione w protonach i neutronach (także w innych barionach i w mezonach).

Przy tej okazji możemy objaśnić odpowiedniość pomiędzy kolorami (ładunkami) kwarków, a kolorami znanymi z optyki. W optyce kombinacja kolorów RGB (czerwonego, zielonego i niebieskiego) w jednakowych proporcjach daje kolor biały. Przyjmuje się zasadę, zgodnie z którą bariony są „białe”, czyli mają „zerowy” wypadkowy ładunek kolorowy. Jest to zapewnione trzema różnymi kolorami kwarków wchodzących w jego skład. W przypadku mezonów zasada ta jest realizowana poprzez połączenie w parę kwarku (wybranego koloru) i antykwarku koloru dopełniającego do wybranego koloru, tak jak na [Rysunek 3.120: Mezon K - może składać się z antyniebieskiego \(czyli żółtego\) antykwarku u i niebieskiego kwarku dziwnego s](#) na stronie 283.

Niemożliwość rozdzielenia kwarków obrazowo można przedstawić za pomocą łączącej je sprężyny. Kiedy sprężyna nie jest naciągnięta, kwarki zachowują się jakby były swobodne wewnątrz nukleonu. Kiedy próbujemy je rozdzielić sprężyna się naciąga, a kiedy energia ich wzajemnego oddziaływania jest tak duża, że wystarcza do wyprodukowania nowej pary kwark - antykwark, sprężyna pęka i z uwolnionej energii tworzy się właśnie taka para. Proces ten jest zobrazowany na [Rysunek 3.122: Próba rozdzielenia pary kwarków](#) na stronie 284.

a) Para kwarków, którą próbujemy od siebie oddalić... (na rysunku pominięto gluony pośredniczące w oddziaływaniu z innymi kwarkami); b) ... rośnie więc energia ich wzajemnego oddziaływania...; c) ... co

doprowadza do pęknięcia gluonowej sprężyny i powstania pary kwark-antykwar...; d) ... np. czerwonego i antyczerwonego (czyli „cyjanowego”); tworzą one jakiś mezon, ale oryginalne dwa kwarki pozostały związane



Rysunek 3.122: Próba rozdzielania pary kwarków

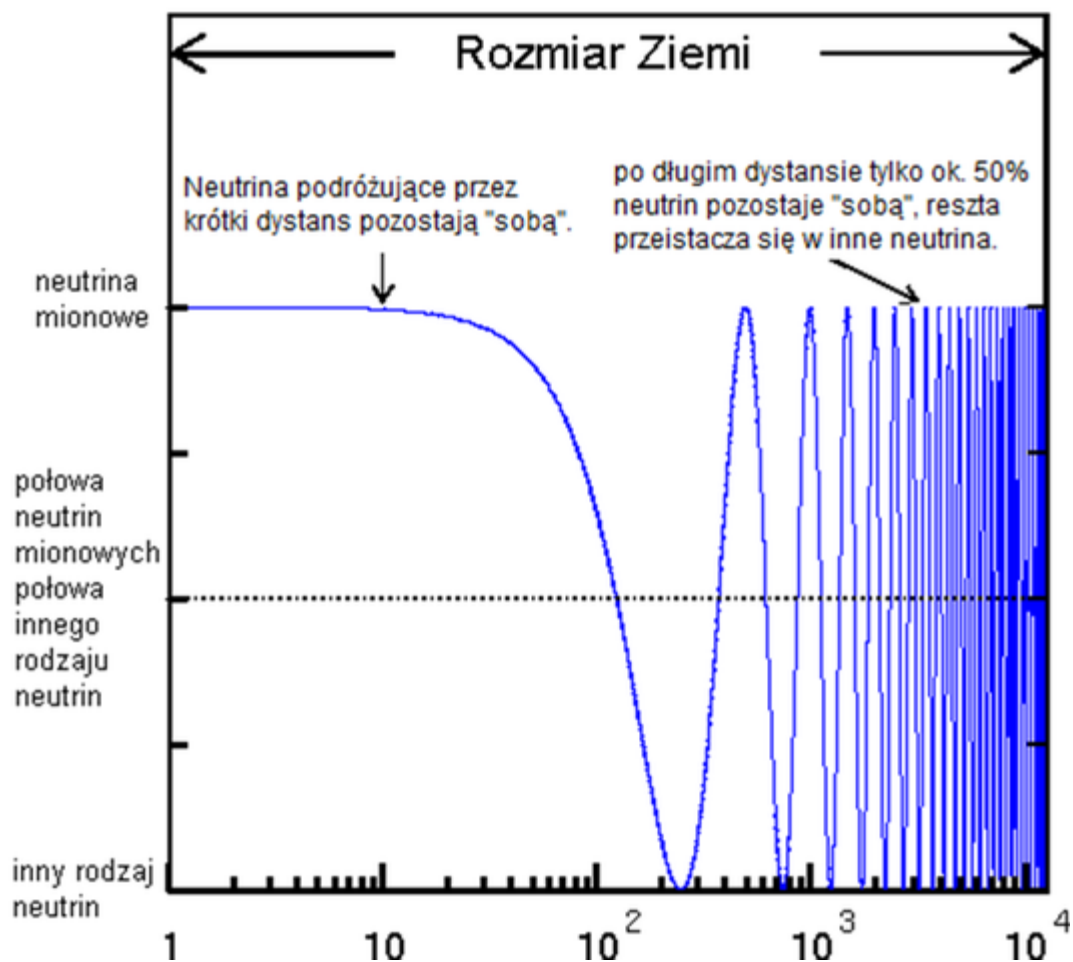
Jeśli nie odkryjemy żadnych nowych zjawisk w tym zakresie, to kwarków w stanie swobodnym - poza wnętrzem barionów i mezonów - nigdy się nie da zaobserwować.

Leptony

Inną niż kwarki grupę cząstek uznawanych dziś za elementarne tworzą leptony. Podstawową ich cechą jest brak zdolności do oddziaływań silnych. Grupujemy je - podobnie jak kwarki - w trzy dwuskładnikowe rodziny:

- $(e^-; \nu_e)$ - elektron i neutrino elektronowe;
- $(\mu^-; \nu_\mu)$ - mion i neutrino mionowe;
- $(\tau^-; \nu_\tau)$ - taon i neutrino taonowe.

Najbardziej znanym leptonem jest elektron - jest stabilną cząstką. Natomiast mion i taon są nietrwałe - orientacyjne średnie czasy ich życia to odpowiednio $2 \cdot 10^{-6}$ s i $3 \cdot 10^{-13}$ s. Zaskakujące jest pod tym względem zachowanie neutrino: nie zaobserwowano ich rozpadów, ale w ich wiązках stwierdzono zjawisko zwane oscylacją: neutrino z jednej rodziny przeobrażają się w neutrino innej i z powrotem. Ilustruje to wykres na *Rysunek 3.123: Matematyczny model oscylacji neutrino mionowych i ich przeistaczanie się w inny rodzaj neutrino (głównie taonowe) w funkcji drogi przebytej przez wiązkę* na stronie 286, pochodzący ze strony <http://neutrino.fuw.edu.pl/pl>, poświęconej doświadczeniom neutrinowym z udziałem polskich naukowców.



Rysunek 3.123: Matematyczny model oscylacji neutrin mionowych i ich przeistaczanie się w inny rodzaj neutrin (głównie taonowe) w funkcji drogi przebytej przez wiązkę

Elektron, mion i taon oddziałują elektromagnetycznie z otoczeniem; mają też zdolność do oddziaływań słabych. Elektrony są składnikami materii na poziomie atomowym. Miony i taony mogą zastępować elektrony w atomach, ale takie struktury są nietrwałe ze względu na krótki czas życia tych leptonów.

Neutrino nie wchodzi w żadne znane kompleksowe struktury materii. Są one pozbawione ładunku elektrycznego, mają więc tylko zdolność do oddziaływań słabych. Z tego wynika stosunkowo niewielki zasób naszej wiedzy o neutrinach - bardzo rzadko zdarza się uchwycić oddziaływanie neutrina z materią; nie tworzą one też stanów związanych z pozostałą materią. Nie potrafimy - pomimo prowadzonych badań - nawet dokładnie określić masy neutrin; dziś wiadomo jedynie, że cząstki te mają masy różne od zera, ale kilkaset tysięcy razy mniejsze niż masa elektronu. Więcej informacji o współczesnych doświadczeniach z neutrinami znajdziesz też na stronie www.fuw.edu.pl/~neutrino/.

Bozony oddziaływania słabego

Współczesna fizyka przyjmuje, że oddziaływania pomiędzy elementarnymi obiektami polegają na wymianie pomiędzy nimi elementarnych nośników oddziaływania. Wspólna nazwa tych nośników to bozon. Zgodnie ze współczesną wiedzą bozonami są fotony, które przenoszą oddziaływanie elektromagnetyczne (dokładniej: składową elektromagnetyczną oddziaływania elektro-słabego). Bozonami są także gluony, które przenoszą oddziaływania silne pomiędzy kwarkami. Oddziaływanie słabe (dokładniej: składowa słaba oddziaływania elektro-słabego) może być przenoszone przez którykolwiek z trzech bozonów oddziaływania słabego: W^+ , W^- lub Z^0 .

Istotną cechą oddziaływania słabego jest jego bardzo krótki zasięg - ok. 10^{-18} m (przypomnijmy, że zasięg oddziaływania elektromagnetycznego jest dowolnie duży a zasięg oddziaływania jądrowego między nukleonami jest

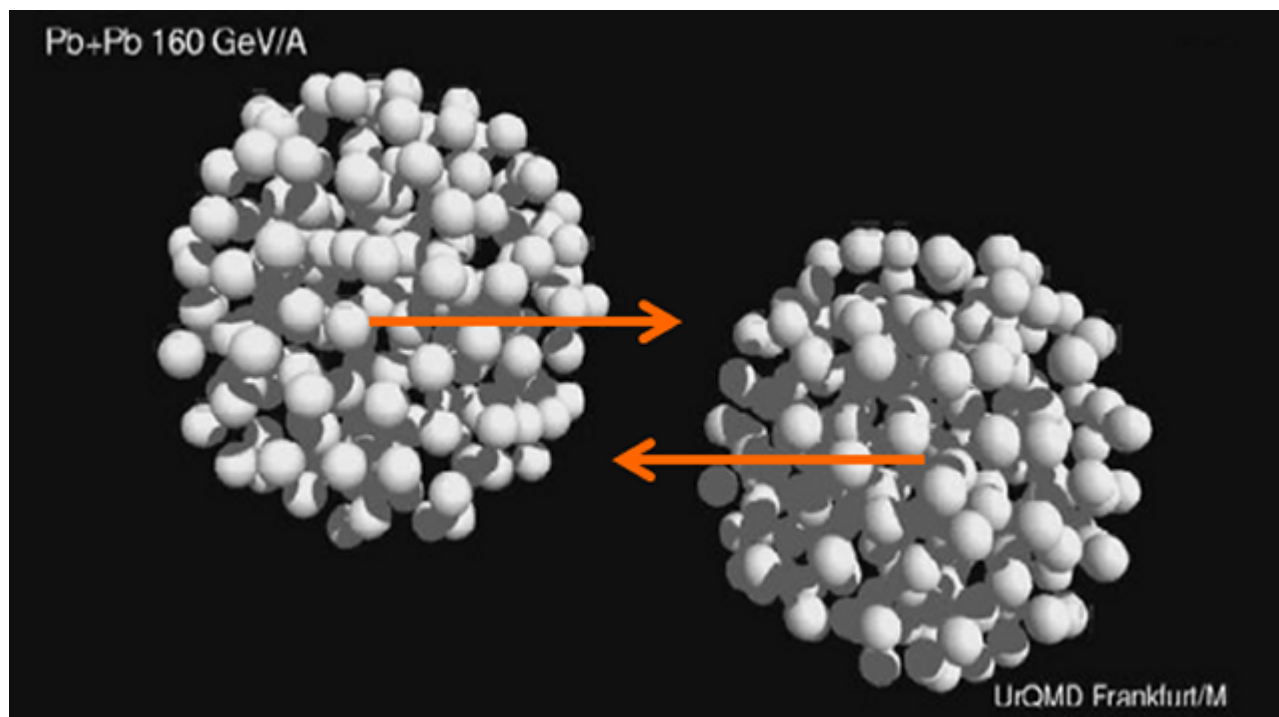
nieduży niż 10^{-15} m). Ma to związek z dość dużą masą bozonów W i Z , kilkadziesiąt razy większą od masy nukleonu. Analogiczny związek występuje pomiędzy zerową masą fotonu a nieskończonym zasięgiem przenoszonego przez niego oddziaływania. Tych związków nie możemy tu omawiać, gdyż musielibyśmy posłużyć się pojęciami z zakresu fizyki kwantowej.

Uzupełnieniem zestawu bozonów jest hipotetyczny jeszcze grawiton. Przypuszczamy, na drodze analogii, że taki bozon istnieje, że przenosi oddziaływanie grawitacyjne oraz że ma zerową masę (bo oddziaływanie to ma dowolnie duży zasięg). Nie potrafimy jeszcze wytworzyć warunków do zarejestrowania pojedynczych grawitonów, ponieważ oddziaływanie grawitacyjne jest najsłabszym ze znanych oddziaływań. Takie doświadczenia, podobnie jak detekcja i nadawanie fal grawitacyjnych, mogą być możliwe dopiero w przyszłości.

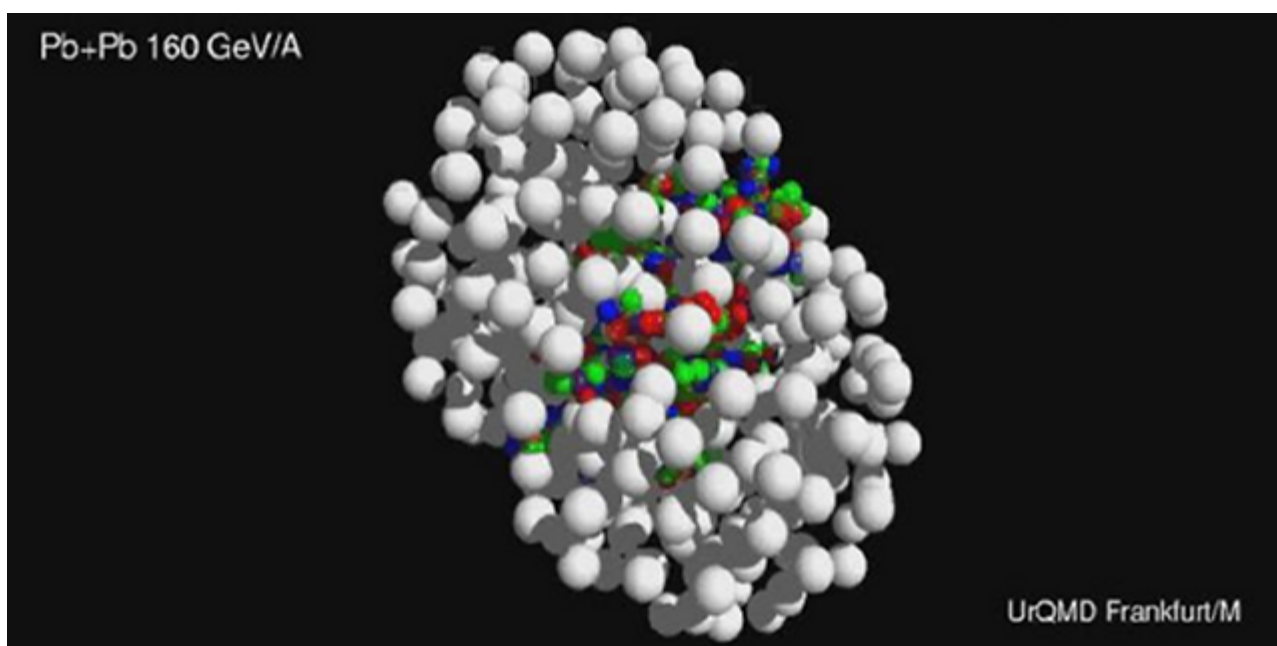
Struktura materii a ewolucja Wszechświata. Plazma gluonowo-kwarkowa

Prowadzone obecnie badania reakcji jądrowych przy najwyższych osiągniętych w laboratoriach energiach to nie tylko poszukiwanie tego, co najmniejsze. To także „podróż do początków Wszechświata”. Na jednym z wczesnych etapów jego ewolucji, z kwarków i gluonów zaczęły formować się nukleony. Przed tym etapem temperatura i gęstość Wszechświata były na tyle duże, że kwarki nie były połączone w wyraźne trójki, lecz wraz z gluonami tworzyły plazmę (ten stan materii bywa nazywany „zupą gluonowo-kwarkową”). Taką właśnie plazmę potrafimy już dziś wytworzyć za pomocą akceleratorów na Ziemi, w materii jądrowej podczas zderzenia dwóch ciężkich jąder.

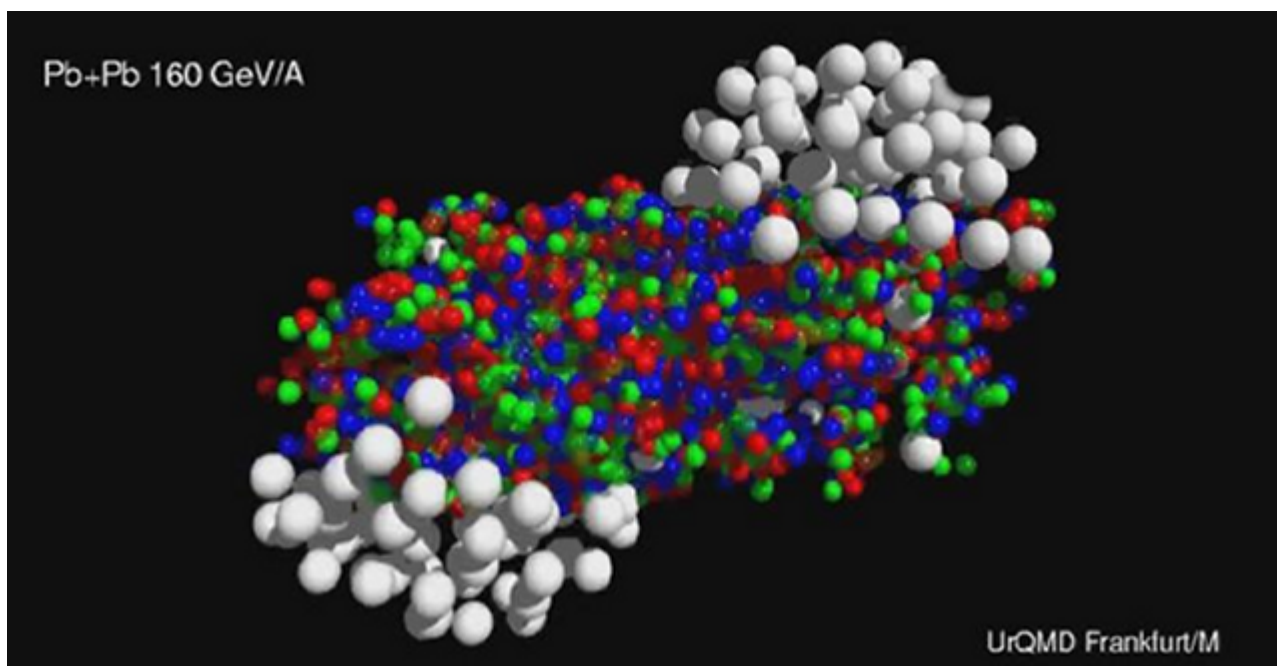
Na [Rysunek 3.124: Jądra ołowiu zbliżają się do siebie z prędkością ok. \$0,999337 \cdot c\$](#) na stronie 287 - [Rysunek 3.127: W miarę spadku gęstości i temperatury w obszarze występowania plazmy gluonowo-kwarkowej następuje jej zanik; gluony łączą kolorowe kwarki w białe cząstki \(bariony i mezony\), rejestrowane jako produkty zderzenia](#) na stronie 289 pokazano cztery etapy takiego procesu, symulowanego za pomocą modelu UrQMD (j. angielski: Ultrarelativistic Quantum Molecular Dynamics model), który stosowany jest obecnie do opisu reakcji jądrowych wysokich energii. Zderzenie dwóch jąder ołowiu następuje przy energii równej 160 GeV na nukleon. Gdyby każda cząstka „zwykłej materii” obdarzona była, średnio rzecz biorąc, taką energią, to temperatura tej materii wynosiłaby ok. $6 \cdot 10^{14}$ K. Materia kwarkowa w takim zderzeniu istnieje przez około 10^{-23} sekundy, po czym kwarki łączą się w cząstki (bariony i mezony), które mogą być rejestrowane przez urządzenia detekcyjne.



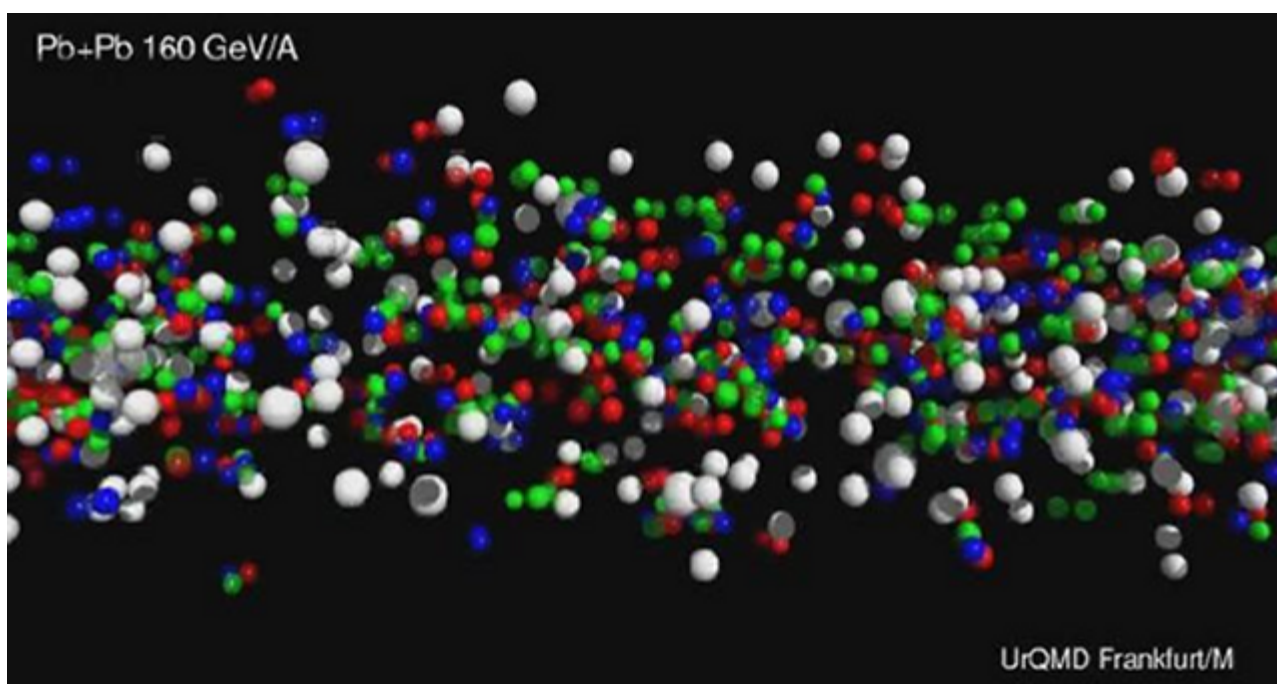
Rysunek 3.124: Jądra ołowiu zbliżają się do siebie z prędkością ok. $0,999337 \cdot c$



Rysunek 3.125: Rozpoczyna się zderzenie, czyli oddziaływanie silne i pojawiają się pierwsze kwarki, zaznaczone na kolorowo; są one swobodne - nie są uwięzione wewnątrz żadnego nukleonu



Rysunek 3.126: Obszar plazmy gluonowo-kwarkowej, w którym dominują swobodne kwarki oraz łączące je gluony (nie zostały pokazane na tym rysunku), ma rozmiar dwukrotnie większy od średnicy pojedynczego jądra ołowiu



Rysunek 3.127: W miarę spadku gęstości i temperatury w obszarze występowania plazmy gluonowo-kwarkowej następuje jej zanik; gluony łączą kolorowe kwarki w białe cząstki (bariony i mezony), rejestrowane jako produkty zderzenia

A czy stan plazmy kwarkowo-gluonowej istnieje obecnie gdzieś w przyrodzie? Jeśli tak, to tylko w centralnych obszarach gwiazd neutronowych. Istniał zapewne w pierwszych chwilach po Wielkim Wybuchu. Właśnie wtedy, w pierwszych mikrosekundach, spełnione były odpowiednie warunki; olbrzymia gęstość, a przede wszystkim niezwykle wysoka temperatura – czyli olbrzymia energia zderzających się cząstek. Kolejne etapy ewolucji Wszechświata, następujące wraz z jego ochładzaniem się i rzadnięciem, to tworzenie się nukleonów (jako oddzielnych zgrupowań trzech kwarków), jąder atomowych (jako oddzielnych zgrupowań nukleonów), atomów (powstałych po przywiązaniu elektronów do jąder) i wreszcie skupisk materii takich jak galaktyki, gwiazdy, planety.

Rysunek 3.128: Ewolucja wszechświata

Historia Wszechświata w jednym obrazku

Fizycy w swoich eksperymentach nad materią poznają ewolucję Wszechświata. Odtwarzamy ją niejako wstecz: im większymi dysponujemy energiami, tym większe temperatury i gęstości materii potrafimy wytworzyć i tym samym sięgamy do coraz wcześniejszego etapu tej ewolucji. Odtworzenie to choć odbywa się, co oczywiste, na znacznie mniejszą skalę w stosunku do całego Wszechświata, to jednak pozwala na przyzwoity opis tego, co działo się po Wielkim Wybuchu.

Na [Rysunek 3.129: Historia Wszechświata w jednym obrazku](#) na stronie 290 zamieszczamy wkładkę do jednego z numerów miesięcznika „Wiedza i Życie”.



Rysunek 3.129: Historia Wszechświata w jednym obrazku

Przedstawia ona zwarty obraz przebiegu ewolucji Wszechświata, ukazując jak malała jego temperatura w miarę upływu czasu. Pokazane są także postępujące zmiany w strukturze i organizacji materii.

Po około 10 miliardach lat od Wielkiego Wybuchu, na peryferiach dość sporej galaktyki pojawiła się dość przeciętna gwiazda, a wokół niej uformowała się stosunkowo mała planeta. Po kolejnych czterech miliardach lat pojawiła się na tej planecie żywa istota, która zapragnęła poznać siebie, swoje pochodzenie, swą historię i swoje miejsce w tym, co widziała wokół siebie. Nazwała się człowiekiem, planetę na której przyszło jej żyć nazwała Ziemią, ową gwiazdę Słońcem, a swoją galaktykę Drogą Mleczną.

Tym człowiekiem jesteś także Ty.

Pytania i problemy

1. Na ile sposobów można utworzyć proton z trzech kwarków uud, jeśli uwzględnimy, że każdy kwark może występować w jednym z trzech kolorów?
2. Podaj skład kwarkowy każdego z mezonów π ; wskazówka: mezony π składają się z kwarków (antykwareków) wyłącznie z pierwszej rodziny (u , d).
3. Uważa się, że natężenie oddziaływania silnego pomiędzy kwarkami rośnie wraz z odległością pomiędzy nimi. Z drugiej strony, oddziaływaniom tym przypisuje się ograniczony zasięg - rzędu 10^{-15} m. Wskaż fragment w tekście, który pozwala objaśnić, że te dwa poglądy nie są ze sobą sprzeczne.