matura

ZGODNE Z WYTYCZNYMI CKE

USZCZUPLONA PODSTAWA PROGRAMOWA

Teoria do matury

do powtórek zamiast z podręczników

fizyka

VADEMECUM

OPERON

Vademecum

matura

fizyka

zakres rozszerzony

Izabela Okrzesik-Frąckowiak
Roman Frąckowiak

OPERON
Edukacja jest podróżą
2025

Projekt okładki: **Paweł Kwacz**
Redaktor prowadzący: **Zespół**
Redakcja językowa: **Marlena Dobrowolska**
Redakcja graficzna i skład: **Mateusz Zaborowski**
Korekta: **Katarzyna Kupracz**
Rysunki: **Jan Kortas**

Zdjęcia: Shutterstock, Roman Frąckowiak

© Copyright 2022 by Wydawnictwo Pedagogiczne Operon Sp. z o.o. & Izabela Okrzesik-Frąckowiak, Roman Frąckowiak
Gdynia 2025

Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie w całości lub we fragmentach bez zgody wydawcy zabronione.
N8710

Wydawca:
Wydawnictwo Pedagogiczne Operon Sp. z o.o.
81-451 Gdynia, al. Zwycięstwa 96/98
tel. centrali 58 679 00 00
e-mail: info@operon.pl
www.operon.pl

ISBN 978-83-8197-591-9

Zgodnie z decyzją MEN od września 2024 r. obowiązuje zmieniona, uszczuplona o ok. 20% podstawa programowa.

Takim symbolem oznaczono treści usunięte z podstawy programowej.

Spis treści

1. KINEMATYKA

1.1. Zjawisko ruchu . . . 14
1.2. Ruch prostoliniowy jednostajny . . . 15
1.3. Ruch jednostajny względem różnych układów odniesienia . . . 15
1.4. Ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony . . . 16
1.5. Swobodne spadanie, rzut pionowy w dół w próżni . . . 17
1.6. Ruch prostoliniowy jednostajnie opóźniony . . . 17
1.7. Rzut poziomy w próżni . . . 18
1.8. Ruch po okręgu . . . 19

2. DYNAMIKA

2.1. Podstawowe pojęcia dynamiki . . . 22
2.2. Pierwsza zasada dynamiki . . . 22
2.3. Druga zasada dynamiki . . . 23
2.4. Trzecia zasada dynamiki . . . 23
2.5. Zasada zachowania pędu . . . 24
2.6. Siły tarcia . . . 24
2.7. Siły bezwładności, nieinercjalne układy odniesienia . . . 24
2.8. Siły w ruchu po okręgu . . . 24
2.9. Praca . . . 25
2.10. Energia potencjalna . . . 26
2.11. Energia kinetyczna . . . 26
2.12. Zasada zachowania energii . . . 27
2.13. Moc . . . 27
2.14. Zderzenia . . . 28
2.15. Ciśnienie hydrostatyczne . . . 29
2.16. Równowaga cieczy w naczyniach połączonych . . . 30
2.17. Prawo Pascala i prawo Archimedesa oraz warunki pływania ciał . . . 30
2.18. Sprawność urządzeń mechanicznych . . . 32

3. MECHANIKA BRYŁY SZTYWNEJ

3.1. Ruch postępowy i obrotowy bryły sztywnej . . . 34
3.2. Moment siły . . . 35
3.3. Energia kinetyczna w ruchu obrotowym. Moment bezwładności . . . 35
3.4. Druga zasada dynamiki dla ruchu obrotowego . . . 37
3.5. Moment pędu. Zasada zachowania momentu pędu . . . 37
3.6. Złożenie ruchu postępowego i obrotowego . . . 38
3.7. Warunki równowagi bryły sztywnej . . . 38

4. GRAWITACJA I ELEMENTY ASTRONOMII

4.1. Prawo powszechnego ciążenia . . . 42
4.2. Siła grawitacji a siła ciężkości . . . 42
4.3. Pole grawitacyjne. Natężenie pola . . . 43
4.4. Praca i energia potencjalna w polu grawitacyjnym . . . 44
4.5. Prawa Keplera . . . 44
4.6. Nieważkość i przeciążenie . . . 46
4.7. Elementy kosmonautyki . . . 46
4.8. Wielki Wybuch . . . 48

5. DRGANIA

5.1. Ruch harmoniczny . . . 50
5.2. Energia w ruchu harmonicznym . . . 52
5.3. Wahadło matematyczne . . . 52
5.4. Drgania wymuszone. Rezonans mechaniczny . . . 53
5.5. Fale mechaniczne . . . 54
5.6. Zasada Huygensa. Odbicie i załamanie fali . . . 55
5.7. Ugięcie i interferencja fal. Fale stojące . . . 56
5.8. Fale dźwiękowe . . . 59

6. TERMODYNAMIKA

6.1. Cząsteczkowa budowa materii . . . 62
6.2. Model gazu doskonałego. Podstawowy wzór teorii kinetyczno-molekularnej gazu . . . 62
6.3. Temperatura. Równanie stanu gazu doskonałego . . . 62
6.4. Energia wewnętrzna i ciepło . . . 64
6.5. Pierwsza zasada termodynamiki. Praca przy zmianie objętości gazu . . . 65
6.6. Izochoryczna przemiana stałej masy gazu doskonałego . . . 65
6.7. Izobaryczna przemiana stałej masy gazu doskonałego . . . 65
6.8. Izotermiczna przemiana stałej masy gazu doskonałego . . . 66
6.9. Adiabatyczna przemiana gazu doskonałego . . . 66
6.10. Silnik cieplny. Druga zasada termodynamiki . . . 67
6.11. Zmiany stanów skupienia ciał . . . 68
6.12. Wyznaczanie ciepła właściwego cieczy za pomocą kalorymetru . . . 69
6.13. Wartość energetyczna . . . 70

7. ELEKTROSTATYKA

7.1. Ładunek elektryczny. Elektryzowanie ciał . . . 72
7.2. Prawo Coulomba. Pole elektryczne . . . 73
7.3. Natężenie pola elektrycznego . . . 74
7.4. Kształt linii pola elektrycznego . . . 74
7.5. Rozkład ładunków w przewodniku . . . 75
7.6. Praca i energia potencjalna w polu elektrostatycznym . . . 77
7.7. Potencjał pola elektrostatycznego i potencjał przewodnika . . . 77
7.8. Pojemność elektryczna przewodnika . . . 78
7.9. Kondensatory. Energia naładowanego kondensatora . . . 78
7.10. Ruch cząstki naładowanej w jednorodnym polu elektrostatycznym w próżni . 80

8. PRĄD ELEKTRYCZNY

8.1. Prąd elektryczny. Źródła napięcia . . . 82
8.2. Praca i moc prądu . . . 83
8.3. Prawo Ohma. Opór elektryczny . . . 84
8.4. Badanie charakterystyk prądowo-napięciowych . . . 85
8.5. Tabliczka znamionowa . . . 86
8.6. Łączenie oporników. I prawo Kirchhoffa . . . 86
8.7. Domowa sieć elektryczna . . . 88
8.8. Podział urządzeń ze względu na przewodnictwo elektryczne . . . 89
8.9. Urządzenia elektryczne i elektroniczne . . . 90
8.10. II prawo Kirchhoffa . . . 91

9. MAGNETYZM

9.1. Magnesy. Pole magnetyczne . . . 94
9.2. Ferromagnetyki, paramagnetyki i diamagnetyki . . . 96
9.3. Kształt linii pola magnetycznego . . . 96
9.4. Siła Lorentza. Wektor indukcji magnetycznej . . . 97
9.5. Pole magnetyczne Ziemi a wiatr słoneczny . . . 98
9.6. Pole magnetyczne przewodników z prądem elektrycznym . . . 98
9.7. Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym. Cyklotron . . . 100
9.8. Siła elektrodynamiczna. Silnik elektryczny . . . 101
9.9. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej . . . 104
9.10. Prądnica prądu przemiennego . . . 105
9.11. Prąd przemienny . . . 106
9.12. Transformator . . . 107

10. FALE I OPTYKA

10.1. Światło i jego właściwości . . . 110
10.2. Fale elektromagnetyczne . . . 111
10.3. Dyfrakcja i interferencja światła . . . 112
10.4. Doświadczenie Younga – interferencja światła na dwóch szczelinach . . . 112
10.5. Badanie dyfrakcji światła na siatce dyfrakcyjnej i płycie kompaktowej . . . 112
10.6. Polaryzacja światła . . . 113
10.7. Odbicie i załamanie światła . . . 115
10.8. Przykłady zjawisk optycznych w przyrodzie . . . 119
10.9. Zwierciadła płaskie i kuliste . . . 122
10.10. Konstruowanie obrazów w zwierciadłach kulistych wklęsłych . . . 123
10.11. Konstrukcja obrazu w zwierciadle sferycznym wypukłym . . . 126
10.12. Równanie zwierciadła kulistego . . . 127
10.13. Powiększenie w zwierciadłach . . . 127
10.14. Soczewki sferyczne . . . 128
10.15. Konstruowanie obrazów w soczewkach . . . 130
10.16. Konstrukcja obrazu za pomocą soczewki skupiającej . . . 130
10.17. Konstrukcja obrazu w soczewce rozpraszającej . . . 132
10.18. Badanie obrazów otrzymywanych za pomocą soczewek . . . 132
10.19. Przechodzenie światła przez pryzmat . . . 133
10.20. Przyrządy optyczne . . . 134

11. FIZYKA ATOMOWA

11.1. Promieniowanie termiczne ciał . . . 136
11.2. Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne. Fotokomórka . . . 137
11.3. Kwantowa teoria promieniowania . . . 137
11.4. Dwoista natura światła i cząstek materii . . . 137
11.5. Budowa atomu . . . 139
11.6. Emisja wymuszona. Laser . . . 141
11.7. Promieniowanie rentgenowskie . . . 142

12. ELEMENTY FIZYKI RELATYWISTYCZNEJ I FIZYKA JĄDROWA

12.1. Względność równoczesności . . . 144
12.2. Odkrycie i właściwości jądra atomowego . . . 144
12.3. Promieniotwórczość naturalna . . . 145
12.4. Rozpady promieniotwórcze . . . 145
12.5. Reakcje jądrowe . . . 146
12.6. Energia jądrowa i deficyt masy . . . 146
12.7. Czas połowicznego rozpadu . . . 147
12.8. Wpływ promieniowania jonizującego na materię i organizmy żywe . . . 148
12.9. Zastosowania zjawiska promieniotwórczości . . . 149
12.10. Reakcje rozszczepienia . . . 149
12.11. Energetyka jądrowa . . . 150
12.12. Reakcje termojądrowe . . . 150
12.13. Ewolucja gwiazd . . . 151

Wybrane wzory i stałe fizykochemiczne na egzamin maturalny z biologii, chemii i fizyki . . . 152

Indeks . . . 169

Rok maturzysty

Zdasz, tylko pamiętaj o...

optymalizacji nauki pod kątem wybranej dla siebie drogi rozwoju; ucz się tych przedmiotów, które będą Ci potrzebne podczas rekrutacji na studia

systematyczności w nauce; zacznij od planu na początku roku szkolnego i go realizuj

stopniowym **zwiększaniu intensywności nauki**; nie tylko Ty przyśpieszasz po studniówce

higienie czasu; wysypiaj się

higienie psychiki; nie rezygnuj ze wszystkich swoich przyjemności i zajęć dodatkowych

Wybierz przedmioty na maturę, a zacznij od...

1 **WYTYPOWANIA**
tych kierunków studiów, które są dla Ciebie wymarzonymi

2 **SPRAWDZENIA**
na poszczególnych uczelniach, jakie są kryteria przyjęć na te kierunki

3 **UPEWNIENIA SIĘ,**
że dobrze rozumiesz zawód, który Cię interesuje; porozmawiaj z kimś, kto go wykonuje

4 **DOWIEDZENIA SIĘ,**
jako kto i gdzie możesz pracować po rozpatrywanym kierunku studiów

5 **WYTYPOWANIA**
alternatywnych kierunków studiów

6 **ROZWAŻENIA**
stacjonarnego i niestacjonarnego trybu nauki oraz możliwych po nim tytułów zawodowych

7 **ZAPOZNANIA SIĘ**
z listami uczelni publicznych i niepublicznych

W nauce pomoże Ci...

stosowanie tych technik pamięciowych, które masz już sprawdzone

wyłączenie aplikacji z mediami społecznościowymi

autogratyfikacja, wręczanie sobie małych i większych nagród za przebycie kolejnych etapów nauki

wypróbowanie słuchania webinarów/wykładów oraz videolekcji i podkastów podczas innych czynności, np. sprzątania czy uprawiania sportu

znalezienie dla siebie **najlepszej pory dnia** lub nocy na naukę

Miej plan B na przyszłość, czyli...

wiedz, że są **inne opcje rozwoju** niż studia

odwiedź **biura karier**

poszukaj **staży i praktyk** w dużych firmach i organizacjach

zainteresuj się **wolontariatem**

zaangażuj się w **działalność organizacji pozarządowych**

ucz się **języków obcych** i decyduj, jak je wykorzystasz

znajdź w swoim otoczeniu programy z serii **„Work & Travel"**

a może... zechcesz **poprawić wyniki z matury** dzięki udziałowi w kursach

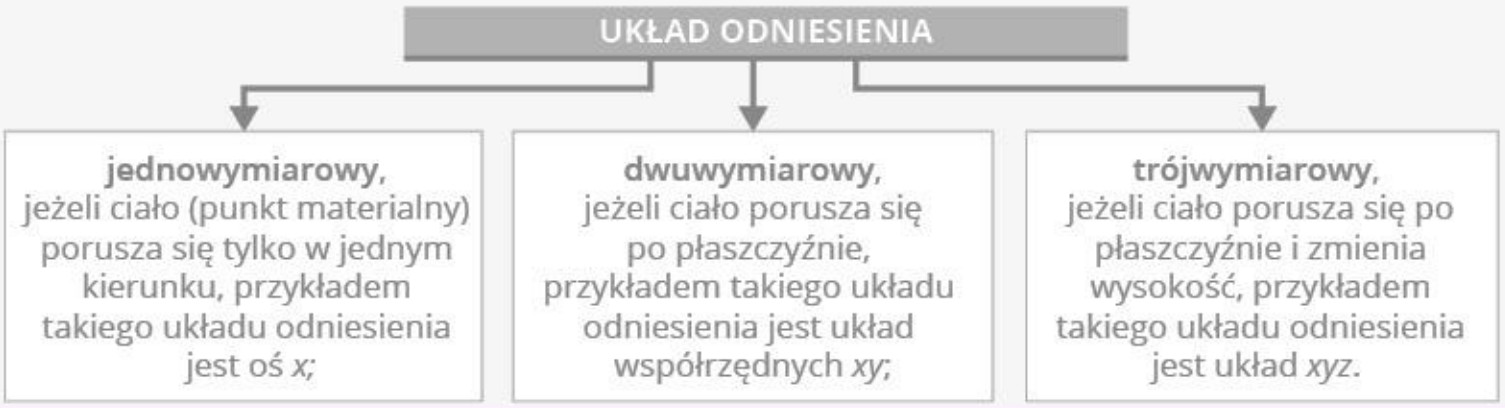
1

KINEMATYKA

1.1. Zjawisko ruchu

Ruch – zmiana położenia ciała w czasie względem wybranego układu odniesienia.

Układ odniesienia – punkt, względem którego opisujemy położenie ciała.



Wielkości opisujące ruch

Punkt materialny – masa punktowa – ciało fizyczne, które ma masę oraz nieskończenie małe rozmiary.

Tor – niewidoczna linia zakreślana przez poruszające się ciało.

Droga, *s* – długość odcinka toru; jednostką drogi w układzie SI jest metr (m).

Przemieszczenie (wektor przemieszczenia, wektor przesunięcia), $\Delta\vec{r}$ – wektor, którego początek znajduje się w punkcie początkowym, w którym znajdowało się ciało (*A*), a koniec znajduje się w punkcie, w którym ciało zakończyło ruch (*B*).

Prędkość, $\vec{v}$ – wielkość wektorowa, która opisuje zmianę położenia ciała w czasie. Kierunek wektora $\vec{v}$ jest styczny do toru ruchu ciała, a zwrot wskazuje, w którą stronę odbywa się ruch tego ciała.

Prędkość średnia – stosunek wektora przemieszczenia $\Delta\vec{r}$ do czasu Δt, w którym to przemieszczenie nastąpiło.

$$\vec{v}_{śr} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$$

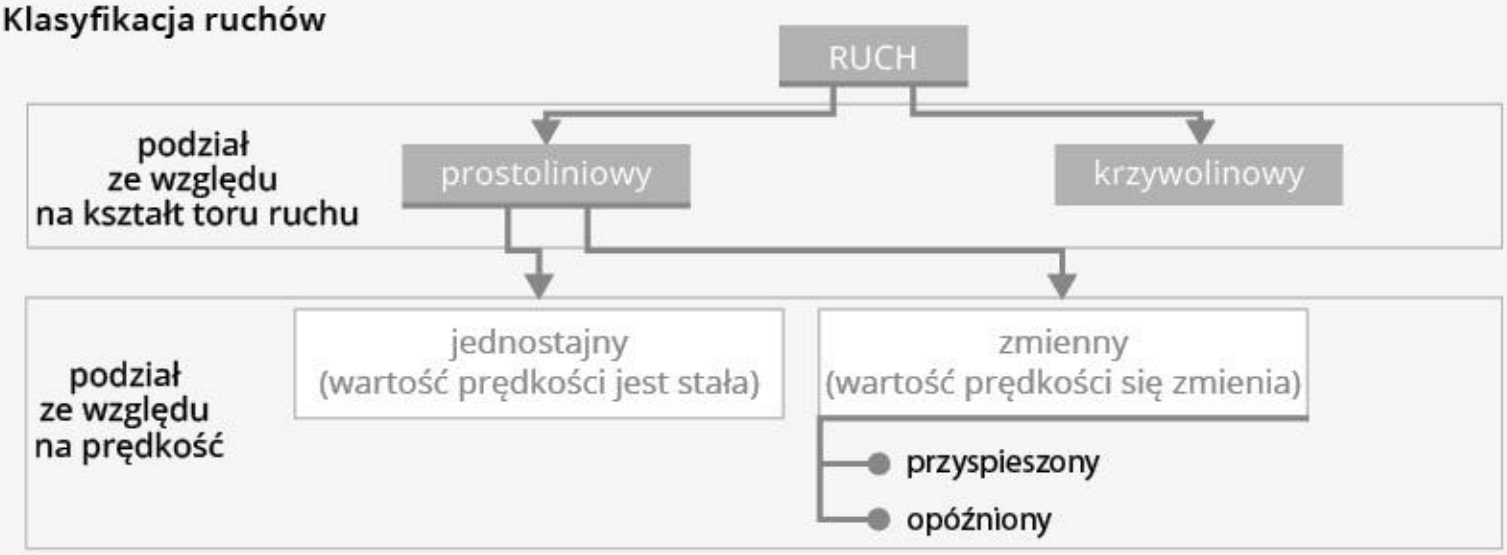
Średnia wartość prędkości (szybkość średnia) – stosunek całkowitej przebytej drogi s_c do całkowitego czasu trwania ruchu t_c.

$$v_{śr} = \frac{s_c}{t_c}$$

Jednostką szybkości w układzie SI jest metr na sekundę $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$.

Prędkość chwilowa – prędkość mierzona na bardzo małym odcinku drogi, np. przez radar policyjny, fotobramkę.

Klasyfikacja ruchów

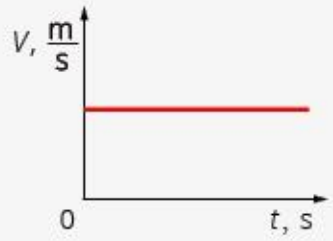


1.2. Ruch prostoliniowy jednostajny

Ruch jednostajny prostoliniowy to ruch, w którym ciało pokonuje jednakowe odcinki drogi w takich samych odstępach czasu, a torem jest linia prosta. **Wartość prędkości (szybkość)** w ruchu jednostajnym jest wartością stałą.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \text{const}$$

v – wartość prędkości (szybkość) w ruchu jednostajnym prostoliniowym
Δs – przebyta droga $\Delta s = s - s_0$
Δt – czas trwania ruchu $\Delta t = t - t_0$



Wykres wartości prędkości od czasu w ruchu jednostajnym prostoliniowym

Ponieważ: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s - s_0}{t - t_0}$, to dla $t_0 = 0$ s mamy: $s = s_0 + vt$

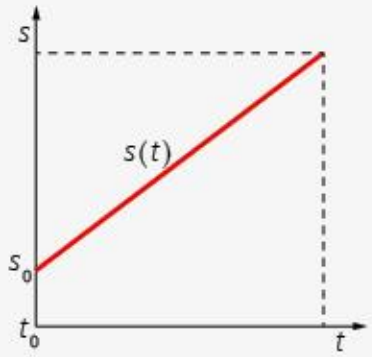
Wzór na **drogę w ruchu jednostajnym prostoliniowym**:

$$s(t) = s_0 + vt$$

Gdy $s_0 = 0$, równanie drogi w ruchu jednostajnym przyjmuje postać:

$$s(t) = vt$$

v – wartość prędkości ciała (szybkość)
t – czas trwania ruchu



Wykres zależności przemieszczenia od czasu w ruchu jednostajnym prostoliniowym

W ruchu jednostajnym prostoliniowym: $\vec{v} = \text{const}$

1.3. Ruch jednostajny względem różnych układów odniesienia

Ruch – zmiana położenia ciała w czasie względem wybranego układu odniesienia. To samo ciało względem jednego układu odniesienia może być w ruchu, a względem innego układu odniesienia może pozostać w spoczynku. Tę cechę określa się jako względność ruchu. Dla przykładu: dwóch kajakarzy płynących rzeką z prędkością o tej samej wartości, mających ten sam kierunek ruchu i zwrot. Kajakarze względem siebie znajdują się w spoczynku, a względem rybaka łowiącego ryby w rzece (obserwatora) znajdują się w ruchu.

Szybkość względna
Rozważmy dwa ciała poruszające się wzdłuż prostej. Prędkość pierwszego ciała względem Ziemi wynosi $\vec{v}_1$, a prędkość drugiego wynosi $\vec{v}_2$.

- Jeżeli ciała poruszają się w tym samym kierunku, to prędkość drugiego ciała względem pierwszego ciała wynosi:

$$v = v_2 - v_1$$

- Jeżeli ciała poruszają się w przeciwnym kierunku, to prędkość drugiego ciała względem pierwszego ciała wynosi:

$$v = v_2 + v_1$$

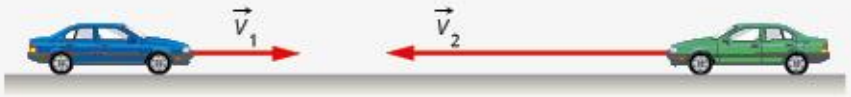
Przykład

Jeżeli pojazd pierwszy porusza się z szybkością $36\,\frac{km}{h}$, a pojazd drugi – z szybkością $54\,\frac{km}{h}$, to ich prędkość względna wynosi:

– gdy poruszają się w tym samym kierunku: $54\,\frac{km}{h} - 36\,\frac{km}{h} = 18\,\frac{km}{h}$;

$v_2 > v_1$

– gdy poruszają się w przeciwnym kierunku: $54\,\frac{km}{h} + 36\,\frac{km}{h} = 90\,\frac{km}{h}$.



Przyspieszenie, *a* – wielkość wektorowa, której wartość jest równa stosunkowi zmiany prędkości do czasu trwania tej zmiany.

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$$

a – wartość przyspieszenia
v – szybkość końcowa (po upływie czasu Δt)
v_0 – szybkość początkowa
Δt – czas trwania ruchu

1.4. Ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony

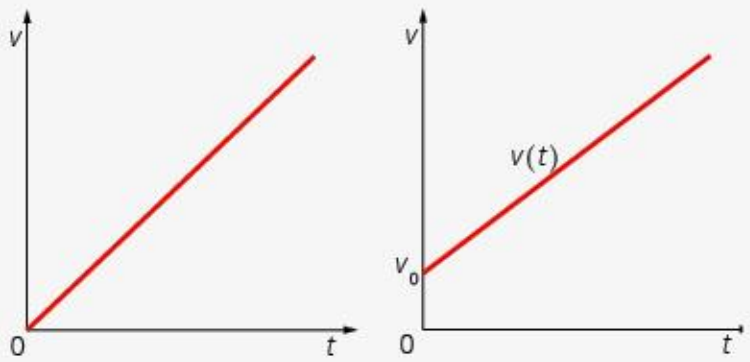
Ruch jednostajnie przyspieszony – ruch, w którym przyspieszenie ma wartość stałą, prędkość rośnie w każdej sekundzie o taką samą wartość, a torem jest linia prosta.

W ruchu prostoliniowym jednostajnie przyspieszonym kierunek i zwrot wektora przyspieszenia są takie same jak kierunek i zwrot wektora prędkości chwilowej ciała.

Prędkość, *v*

$$v(t) = v_0 + at$$

a – wartość przyspieszenia
v – szybkość końcowa (po upływie czasu Δt)
v_0 – szybkość początkowa
t – czas trwania ruchu



Wykresy przedstawiające zależność szybkości od czasu, gdy $v_0 = 0$ i $v_0 > 0$

Równanie drogi

$$s(t) = v_0 t + \frac{at^2}{2}$$

$s(t)$ – droga przebyta w czasie t
a – przyspieszenie
v_0 – szybkość początkowa

Wykres drogi od czasu trwania ruchu w ruchu jednostajnie przyspieszonym prostoliniowym

1.5. Swobodne spadanie, rzut pionowy w dół w próżni

Spadek swobodny – ruch ciała pod wpływem siły grawitacji. Spadające swobodnie ciała poruszają się ruchem jednostajnie przyspieszonym z jednakowym przyspieszeniem ziemskim $g = 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Szybkość początkowa w spadku swobodnym wynosi $v_0 = 0$. Jeżeli ciało spada swobodnie bez szybkości początkowej, to pokonuje drogę $s = \frac{at^2}{2}$. Po przyjęciu założenia, że $s = h$ oraz $a = g$, ta zależność przyjmuje postać

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

h – wysokość, z jakiej następuje spadek ciała
t – czas swobodnego spadania

Czas swobodnego spadania ciała z wysokości h nie zależy od masy ciała.

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Szybkość końcowa w spadku swobodnym nie zależy od masy ciała.

$$v = \sqrt{2gh}$$

Rzut pionowy w dół w próżni – ruch ciała w dół z szybkością początkową v_0. Ciało rzucone pionowo w dół z wysokości h porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem $a = g$:

$$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$$

$$v = v_0 + gt$$

Rzut pionowy w górę w próżni

Jeżeli ciało rzucimy w górę, nadając mu szybkość początkową, możemy obliczyć maksymalną wysokość, na jaką się wzniesie. Po osiągnięciu maksymalnej wysokości szybkość końcowa będzie wynosiła 0. Równanie ruchu przyjmie postać: $0 = v_0 + gt$, stąd $v_0 = -gt$. Czyli ciało będzie poruszało się ruchem opóźnionym, a czas wznoszenia będzie wprost proporcjonalny do szybkości początkowej i odwrotnie proporcjonalny do wartości przyspieszenia ziemskiego.

$$t = \frac{v_0}{g}$$

Maksymalna wysokość, jaką osiągnie ciało rzucone w górę:

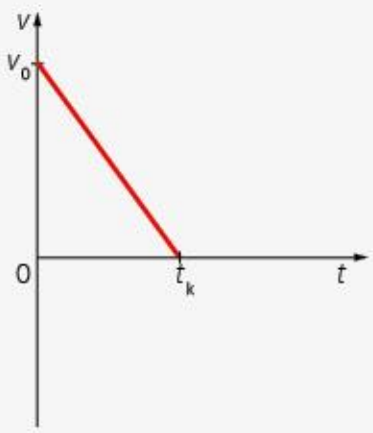
$$h = \frac{v_0^2}{2g}$$

W rzucie pionowym czas wznoszenia ciała jest taki sam jak czas jego spadania.

1.6. Ruch prostoliniowy jednostajnie opóźniony

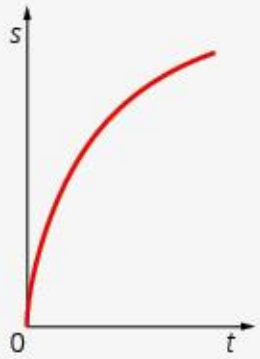
Ruch jednostajnie opóźniony – ruch, w którym przyspieszenie (opóźnienie) ma wartość stałą, prędkość maleje w każdej sekundzie o taką samą wartość, a torem jest linia prosta. Wektor przyspieszenia jest zwrócony przeciwnie do wektora prędkości chwilowej ciała.

$$v = v_0 - at$$

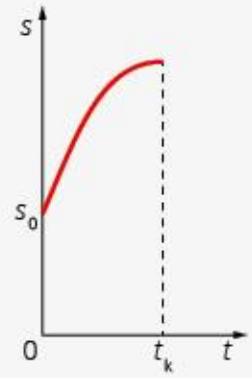


Droga w ruchu opóźnionym

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$$



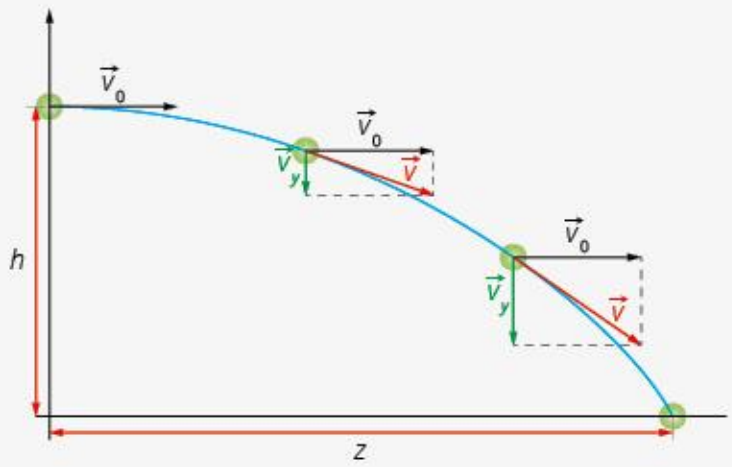
$$s = s_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2}$$



Wykresy przedstawiające zależność drogi od czasu, gdy $s_0 = 0$ i $s_0 > 0$

1.7. Rzut poziomy w próżni

Rzut poziomy – ruch, który traktujemy jako złożenie dwóch ruchów:
– w pionie – ruch jednostajnie przyspieszony z prędkością początkową równą 0, czyli spadek swobodny;
– w poziomie – ruch jednostajny z prędkością v_0.



Jeśli znamy wysokość h, z jakiej rzucono ciało, na podstawie wzoru $h = \frac{gt^2}{2}$ możemy wyznaczyć czas, po którym ciało spadnie na ziemię: $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$. Skoro w tym czasie ciało spadnie na ziemię, to w tym samym czasie osiągnie również maksymalną odległość – **zasięg rzutu** z:

$$z = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Aby wyznaczyć wartość prędkości w dowolnej chwili podczas ruchu ciała rzuconego poziomo, stosujemy twierdzenie Pitagorasa:

$$v^2 = v_0^2 + v_y^2$$

Po przekształceniach otrzymujemy:

$$v = \sqrt{v_0^2 + v_y^2}$$

W chwili upadku na ziemię:

$$v_y = gt, \text{ gdzie } t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

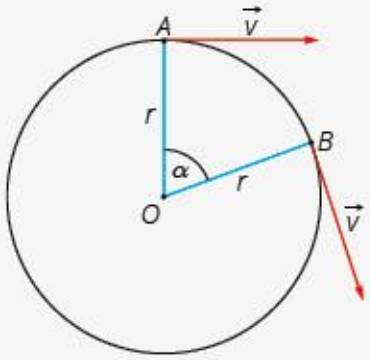
Po podstawieniu do wcześniejszego wzoru otrzymamy:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

1.8. Ruch po okręgu

Ruch jednostajny po okręgu

Ruch jednostajny po okręgu to ruch, w którym tor ma kształt okręgu, a wartość prędkości jest stała.



Okres, *T* – czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego obiegu po okręgu; jednostką okresu jest sekunda (s).

Częstotliwość, *f* – liczba obiegów po okręgu wykonanych w czasie 1 sekundy, $f = \frac{n}{t}$.

Częstotliwość jest odwrotnością okresu, $f = \frac{1}{T}$.

Jednostką częstotliwości w układzie SI jest herc (Hz) $1\,\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$.

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

Wzór na prędkość liniową w ruchu jednostajnym po okręgu:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f$$

v – prędkość liniowa

r – promień okręgu

T – okres

Prędkość kątowa, ω – stosunek kąta α zakreślonego przez promień wodzący r do czasu, w którym został zakreślony:

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

ω – prędkość kątowa

α – zakreślony kąt

t – czas

Jednostką prędkości kątowej jest $1\frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

Jeżeli droga odpowiada kątowi 2π, to:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ lub } \omega = 2\pi f$$

Związek między prędkością liniową a prędkością kątową:

$$v = \omega r$$

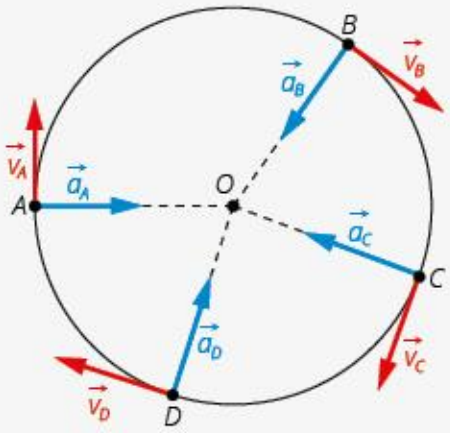
Przyspieszenie kątowe, ε – iloraz zmiany prędkości kątowej i czasu, w którym ta zmiana nastąpiła:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t}$$

ε – przyspieszenie kątowe

Jednostką przyspieszenia kątowego jest $1\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$.

Przyspieszenie dośrodkowe jest skierowane wzdłuż promienia okręgu i do środka tego okręgu.



$$a_{do} = \frac{v^2}{r}$$

v – wartość prędkości liniowej

r – promień okręgu

Po skorzystaniu z zależności:

$$v = \omega r \text{ otrzymujemy } a_{do} = \omega^2 r$$

$$\omega = 2\pi f \text{ otrzymujemy } a_{do} = 4\pi^2 f^2 r$$

$$T = \frac{1}{f} \text{ otrzymujemy } a_{do} = \frac{4\pi^2}{T^2} r$$

ω – prędkość kątowa

f – częstotliwość

r – promień okręgu

T – okres

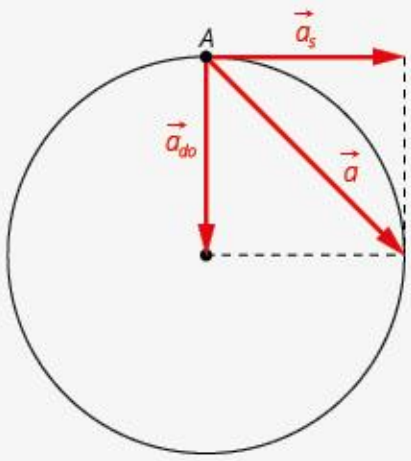
Ruch niejednostajny w ruchu po okręgu

Jeżeli w ruchu krzywoliniowym zmienia się wartość prędkości, to wówczas ciało ma przyspieszenie styczne, które wyraża szybkość zmian wartości prędkości w czasie. Kierunek przyspieszenia stycznego jest styczny do okręgu. Przyspieszenie chwilowe, które występuje przy zmianie prędkości, ma dwie składowe: składową prostopadłą i składową styczną. W ruchu zmiennym po okręgu przyspieszenie jest sumą wektora przyspieszenia stycznego i wektora przyspieszenia dośrodkowego.

$$\vec{a} = \vec{a}_{do} + \vec{a}_s$$

a_{do} – przyspieszenie dośrodkowe

a_s – przyspieszenie styczne



Wartość przyspieszenia chwilowego obliczamy z twierdzenia Pitagorasa.

$$a = \sqrt{a_{do}^2 + a_s^2}$$

2

DYNAMIKA

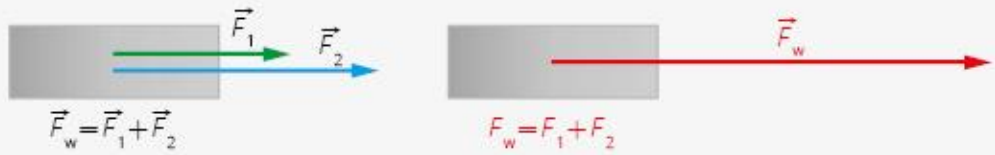
2.1. Podstawowe pojęcia dynamiki

Rodzaje oddziaływań i ich nośniki:
– grawitacyjne (grawiton – cząstka hipotetyczna),
– elektromagnetyczne (foton),
– jądrowe słabe (bozon),
– jądrowe silne (gluony).

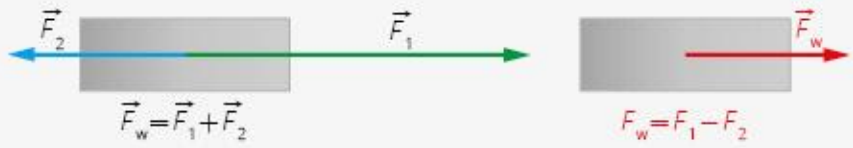
Wielkością opisującą oddziaływania jest **siła**. Siła jest wektorem o określonych cechach: kierunku, zwrocie, wartości i punkcie przyłożenia.

Jednostką siły jest **niuton**: $1\,\mathrm{N} = 1\,\mathrm{kg} \cdot 1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. Siła ma wartość 1 N, jeżeli ciału o masie 1 kg nadaje przyspieszenie $1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

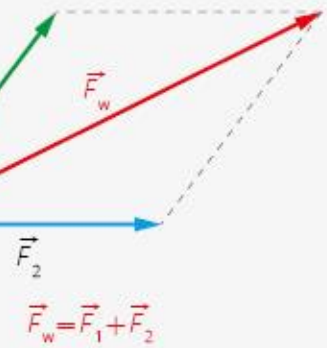
Dodawanie dwóch sił o wspólnym punkcie przyłożenia oraz:
– jednakowych kierunkach i zwrotach,



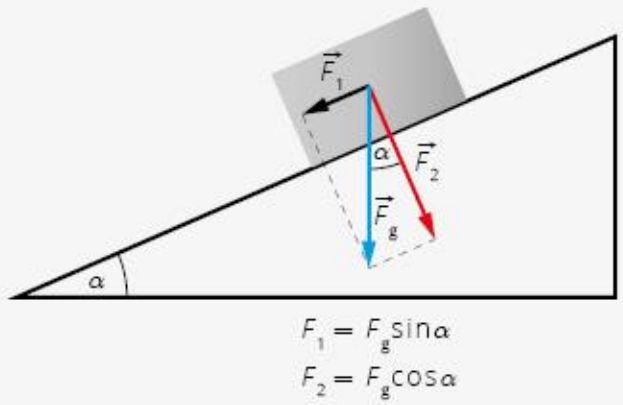
– jednakowych kierunkach i przeciwnych zwrotach,



– różnych kierunkach (metoda równoległoboku),



Rozkładanie sił ciężkości na składowe



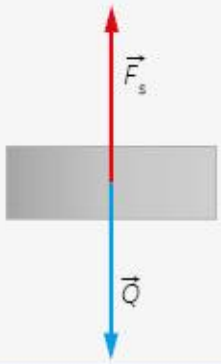
2.2. Pierwsza zasada dynamiki

Jeżeli na ciało nie działa żadna siła albo siły działające na nie się równoważą, to ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Przyczyny spoczynku ciał

$\vec{F_s}$ – siła sprężystości podłoża

$\vec{Q}$ – siła ciężkości



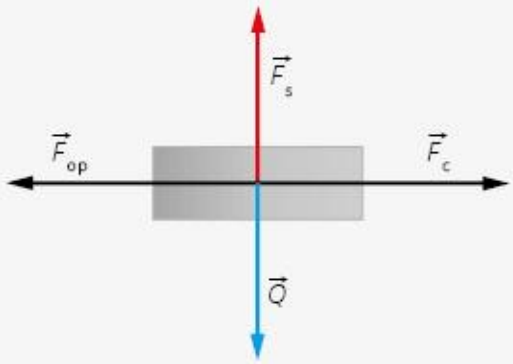
Przyczyny ruchu jednostajnego

$\vec{F_s}$ – siła sprężystości podłoża

$\vec{Q}$ – siła ciężkości

$\vec{F_c}$ – siła ciągu

$\vec{F_{op}}$ – siła oporu



2.3. Druga zasada dynamiki

Jeżeli na ciało działa niezrównoważona siła, to ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do siły i odwrotnie proporcjonalnym do jego masy.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Kierunek i zwrot przyspieszenia są takie jak kierunek i zwrot siły.

2.4. Trzecia zasada dynamiki

Jeżeli ciało *A* działa na ciało *B* z siłą $\overrightarrow{F_{AB}}$, to ciało *B* działa na ciało *A* siłą $\overrightarrow{F_{BA}}$ o takiej samej wartości, lecz przeciwnie zwróconą.

Pęd ciała jest wielkością wektorową, kierunek i zwrot wektora pędu są takie same jak kierunek i zwrot wektora prędkości, a wartość pędu równa jest iloczynowi masy m i prędkości ciała $\vec{v}$.

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Jednostką pędu jest $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}}$.

Drugiej zasady dynamiki w postaci $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ nie można stosować do opisu ruchu ciała, którego masa się zmienia. Powyższe równanie możemy zapisać w postaci: $\frac{\overrightarrow{v_2} - \overrightarrow{v_1}}{\Delta t} = \frac{\vec{F}}{m}$, stąd $\vec{F}\cdot\Delta t = m\cdot\overrightarrow{v_2} - m\cdot\overrightarrow{v_1}$, czyli $\vec{F}\cdot\Delta t = \overrightarrow{p_2} - \overrightarrow{p_1}$.

Druga uogólniona zasada dynamiki:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\cdot\Delta t$$

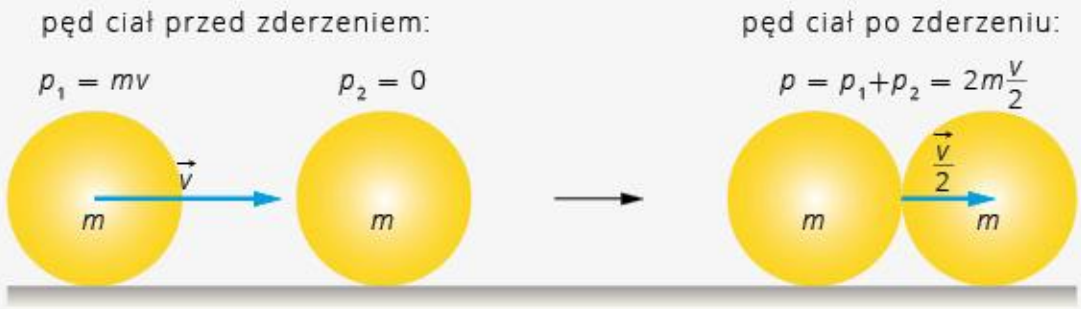
Zmiana pędu układu ciał zachodzi jedynie na skutek działania sił zewnętrznych.

$$\Delta\vec{p} = \overrightarrow{F_{zew}}\cdot\Delta t$$

2.5. Zasada zachowania pędu

Jeżeli na ciało lub układ ciał nie działają siły zewnętrzne lub działające siły się równoważą, to pęd tego ciała lub tego układu ciał nie ulega zmianie.

$$\overrightarrow{F_{zew}} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = 0 \Rightarrow \Delta\vec{p} = 0$$



2.6. Siły tarcia

Siły oporów ruchu:
– **tarcie** – działa między ciałami, które się stykają; zależy od rodzaju powierzchni i siły nacisku:

$$F_T = \mu \cdot F_N$$

μ – współczynnik tarcia
F_N – siła nacisku

– **opór ośrodka** – działa na ciało w powietrzu, wodzie i zależy od:
  – rodzaju ośrodka,
  – prędkości.

Rodzaje sił tarcia między ciałem a podłożem:
– **siła tarcia statycznego** może przyjmować różne wartości wynoszące od zera do $F_{T_{max}}$;
– **siła tarcia kinetycznego** jest mniejsza niż maksymalna wartość tarcia statycznego.

Współczynnik tarcia statycznego ma większą wartość niż współczynnik tarcia kinetycznego: $\mu_s > \mu_k$.

2.7. Siły bezwładności, nieinercjalne układy odniesienia

Siły bezwładności – siły pozorne, które nie wynikają z żadnych oddziaływań. Ich działanie obserwujemy tylko wtedy, gdy układ odniesienia porusza się ruchem przyspieszonym. Występują podczas przyspieszania i hamowania.

W **układzie inercjalnym** działają wyłącznie rzeczywiste siły, wynikające z oddziaływania ciał.

W **układzie nieinercjalnym** oprócz sił rzeczywistych działają siły pozorne, związane ze zmianą prędkości układu.

Zwrot siły bezwładności zawsze jest przeciwny do zwrotu przyspieszenia układu nieinercjalnego.

2.8. Siły w ruchu po okręgu

Ruch po okręgu jest ruchem przyspieszonym. Nawet jeżeli nie zmienia się wartość prędkości w takim ruchu, to nieustannie zmienia się jej kierunek. Tak więc ciało w ruchu jednostajnym po okręgu doznaje **przyspieszenia dośrodkowego** zgodnie ze wzorem:

$$a_{do} = \frac{v^2}{r}$$

Jeśli wprowadzimy do opisu ruchu po okręgu wielkości ω (prędkość kątowa), f (częstotliwość obiegu) oraz T (okres obiegu), to związki tych wielkości z prędkością v oraz promieniem okręgu r pozwalają zapisać przyspieszenie dośrodkowe na jeszcze trzy inne sposoby:

$$a_{do} = \omega^2 r$$

$$a_{do} = 4\pi^2 f^2 r$$

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

Przyspieszenie dośrodkowe jest wektorem zawsze prostopadłym do wektora prędkości i skierowanym ku środkowi okręgu.

Druga zasada dynamiki mówi, że przyspieszenie ciała jest wywołane siłą. Zatem w ruchu po okręgu przyczyną występowania przyspieszenia dośrodkowego jest siła zwana siłą dośrodkową (F_d). Siłę dośrodkową zgodnie ze wzorem Newtona: $F_d = ma_{do}$, możemy przedstawić następująco:

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

m – masa ciała
a_{do} – przyspieszenie dośrodkowe
v – prędkość
r – promień
T – czas obiegu

Siła dośrodkowa może być wyrażona za pomocą trzech równoważnych wzorów:

$$F_d = m\omega^2 r$$

$$F_d = 4\pi^2 m f^2 r$$

$$F_d = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$$

Według drugiej zasady dynamiki kierunek i zwrot przyspieszenia są zgodne z kierunkiem i zwrotem działającej siły. Siła dośrodkowa jest skierowana do środka okręgu.

Siła bezwładności działająca na ciało w poruszającym się wzdłuż okręgu układzie odniesienia to **siła odśrodkowa**. Jej wartość to:

$$F_{od} = \frac{mv^2}{r} = F_d$$

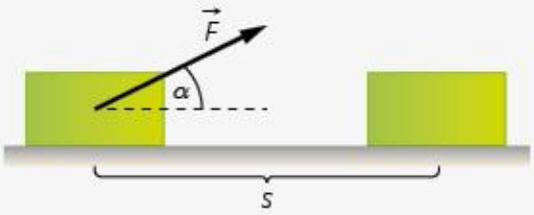
Ta siła jest skierowana wzdłuż promienia na zewnątrz okręgu.

Siła odśrodkowa występuje w układzie nieinercjalnym, a siła dośrodkowa – w układzie inercjalnym.

2.9. Praca

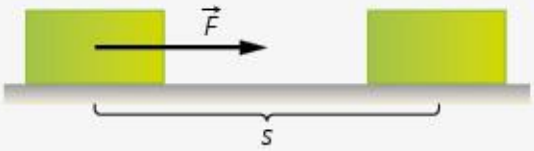
Praca mechaniczna – iloczyn siły działającej na ciało, przesunięcia na drodze s oraz cosinusa kąta między siłą a kierunkiem przesunięcia.

$$W = F \cdot s \cdot \cos\alpha$$



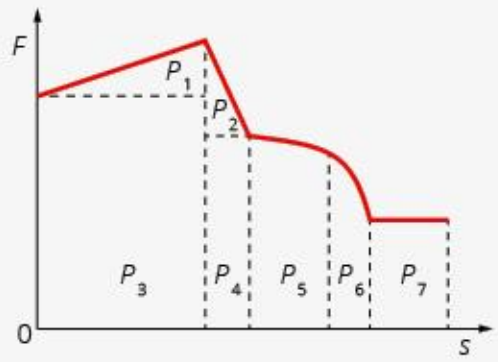
Jednostką pracy jest **dżul** (1 J): 1 J = 1N·1m.

W zależności od kąta między wektorem siły a kierunkiem ruchu ciała wartość pracy:
– jest maksymalna, gdy $\alpha = 0°$, wówczas $W = F \cdot s$,



– wynosi zero, gdy $\alpha = 90°$,
– jest ujemna, gdy $90° < \alpha \leq 180°$.

Praca jest równa polu pod wykresem zależności siły od przemieszczenia ciała.



$$W = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7$$

2.10. Energia potencjalna

Jeżeli ciało może wykonywać pracę, to mówimy, że ma zgromadzoną energię. Zmiana energii jest równa wykonywanej pracy:

$$\Delta E = W$$

Energia potencjalna – jedna z form energii mechanicznej. Mają ją ciała, które przyciągają się lub odpychają, a jej wartość zależy od położenia tych ciał względem siebie. Jeśli między ciałami działa siła grawitacji, to mówimy o **energii potencjalnej grawitacji**, a jeśli siła sprężystości, to – o **energii potencjalnej sprężystości**.

Energia potencjalna grawitacji to energia układu ciał oddziałujących siłami grawitacyjnymi. Wartość tej energii zależy od mas ciał oraz od odległości między nimi; rośnie, gdy zwiększa się odległość między oddziałującymi ciałami, oraz jest większa dla ciał o większej masie.

Wartość energii potencjalnej grawitacji dla ciała o masie *m* znajdującego się w pobliżu powierzchni ziemi obliczamy ze wzoru:

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

h – wysokość ponad pewien umownie przyjęty poziom

Wartość energii potencjalnej grawitacji zależy od wyboru poziomu, względem którego ją obliczamy. Przyjmuje się, że na tym umownym poziomie energia potencjalna jest równa zero.

Przyrost energii potencjalnej grawitacji nie zależy od wyboru poziomu odniesienia i jest wprost proporcjonalny do masy ciała i zmiany wysokości.

Energia potencjalna sprężystości – energia zgromadzona w ciałach odkształconych sprężyście, czyli rozciągniętych, ściśniętych, wygiętych lub skręconych. Wartość tej energii jest wprost proporcjonalna do kwadratu odkształcenia oraz zależy od własności sprężystych odkształcanego ciała. Zawsze jest równa pracy, jaką trzeba włożyć, aby odkształcić ciało.

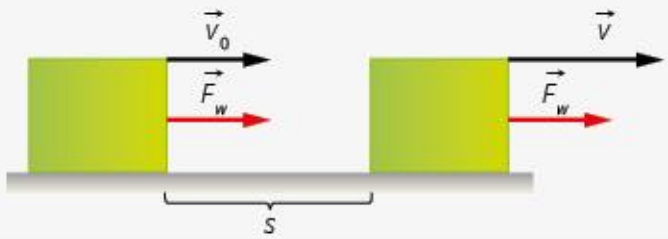
2.11. Energia kinetyczna

Energia kinetyczna – energia związana z ruchem ciała.

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Każde ciało, które ma energię kinetyczną, jest zdolne do wykonywania pracy. Energia kinetyczna jest proporcjonalna do kwadratu wartości prędkości, z jaką porusza się ciało. Zmienia się, gdy siły działające na to ciało się nie równoważą. Zmiana energii kinetycznej ciała jest równa pracy siły wypadkowej działającej na to ciało.

$$\Delta E_{kin} = W_{F_{wypadkowej}}$$



Jeśli $E_{kin0} = \frac{m \cdot v_0^2}{2}$ oraz $E_{kin1} = \frac{m \cdot v^2}{2}$, to $\Delta E_{kin} = E_{kin1} - E_{kin0}$, a zatem:

$$\Delta E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} - \frac{m \cdot v_0^2}{2}$$

Z drugiej strony, praca to $W = F \cdot s$. Po podstawieniu $F = m \cdot a$ oraz $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$ otrzymujemy:

$$W_F = m \cdot a\left(v_0 t + \frac{at^2}{2}\right) = m \cdot a \cdot t\left(v_0 + \frac{at}{2}\right) = m(v - v_0)\left(v_0 + \frac{v - v_0}{2}\right) = m(v - v_0)\left(\frac{v_0 + v}{2}\right) = \frac{m(v^2 - v_0^2)}{2}$$

Zatem skoro $W_F = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$, to:

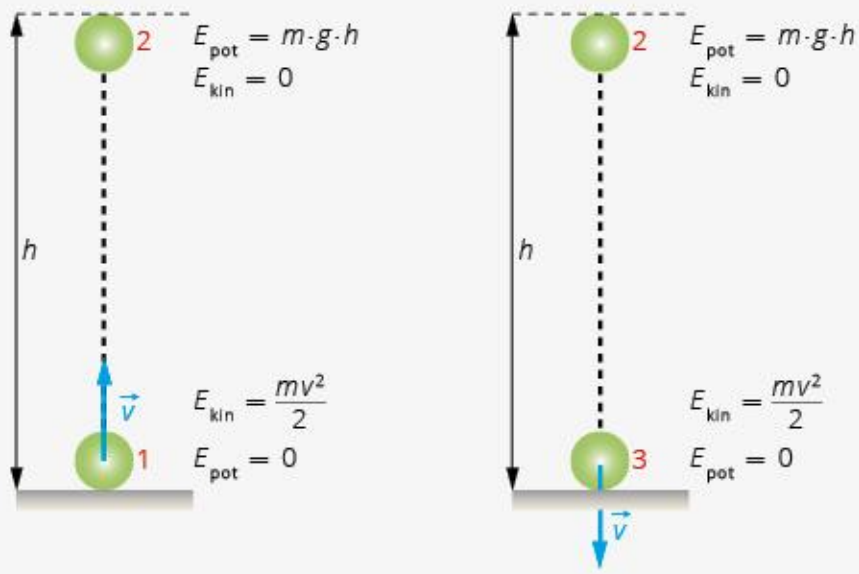
$$W_F = \Delta E_{kin}$$

Energia kinetyczna nigdy nie jest ujemna, natomiast równa 0 jest tylko dla ciała spoczywającego w danym układzie. Energia kinetyczna ciała ma wartość liczbową zależną od układu odniesienia, gdyż prędkość zależy od wyboru układu odniesienia.

Sumę energii kinetycznej i potencjalnej nazywamy **energią mechaniczną ciała**:

$$E_m = E_{kin} + E_{pot}$$

2.12. Zasada zachowania energii



Zmiany energii potencjalnej i kinetycznej ciała w czasie rzutu pionowego w górę:
1 – energia potencjalna równa jest 0, energia kinetyczna ma wartość maksymalną
2 – podczas wznoszenia się w górę energia potencjalna wzrasta, natomiast energia kinetyczna spada i w najwyższym punkcie energia kinetyczna jest równa 0, a wartość energii potencjalnej jest równa początkowej wartości energii kinetycznej
3 – ciało spada na powierzchnię z prędkością i energią kinetyczną o takiej samej wartości jak na początku ruchu

Dla każdego układu oddziałujących ciał, dla których można zaniedbać opory ruchu i oddziaływanie sił zewnętrznych, suma energii kinetycznych wszystkich ciał i energii potencjalnych oddziaływań między nimi jest wartością stałą:

$$E_{kin} + E_{pot} = \text{const}$$

2.13. Moc

Moc – stosunek wykonanej pracy W do czasu t, w którym została wykonana.

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

Jednostką mocy jest **wat** (1 W). Moc ma wartość 1 W, jeżeli urządzenie w czasie 1 s wykonuje pracę 1 J.

$$1\,\text{W} = \frac{1\,\text{J}}{1\,\text{s}}$$

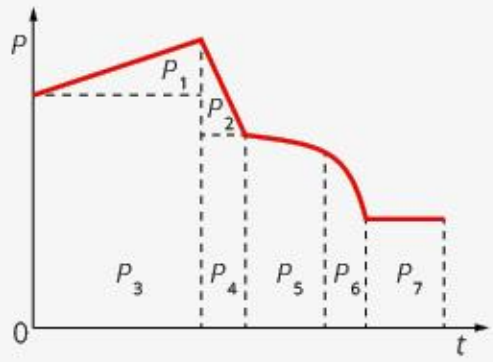
Gdy stała siła działa w tę samą stronę, w którą porusza się ciało, do wzoru na moc można podstawić zależność: $W = F \cdot s$:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot \frac{s}{t} = F \cdot v$$

Moc można także obliczyć jako iloczyn siły i prędkości:

$$P = F \cdot v$$

Praca jest równa polu pod wykresem zależności mocy od czasu.



$$W = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7$$

2.14. Zderzenia

Zderzenie dwóch ciał nazywamy **sprężystym**, jeżeli suma energii zderzających się ciał przed zderzeniem i po zderzeniu jest taka sama i suma pędów przed zderzeniem i po zderzeniu jest taka sama.

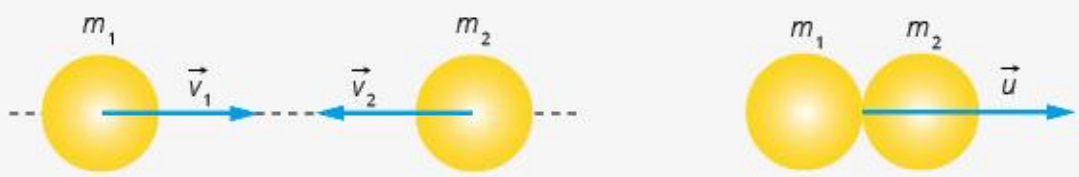
$$\frac{m_2 \cdot u_2^2}{2} + \frac{m_1 \cdot u_1^2}{2} = \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_1^2}{2} \text{ oraz } m_1 \cdot \vec{u_1} + m_2 \cdot \vec{u_2} = m_1 \cdot \vec{v_1} + m_2 \cdot \vec{v_2}$$

Wzory na prędkości ciał po zderzeniu sprężystym centralnym:

$$u_1 = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \cdot v_1 + \frac{2m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

$$u_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_2 + m_1} \cdot v_2 + \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1$$

Zderzenie dwóch ciał nazywamy **niesprężystym**, jeżeli suma energii kinetycznych po zderzeniu jest mniejsza niż przed zderzeniem, a suma pędów po zderzeniu i przed zderzeniem jest jednakowa.

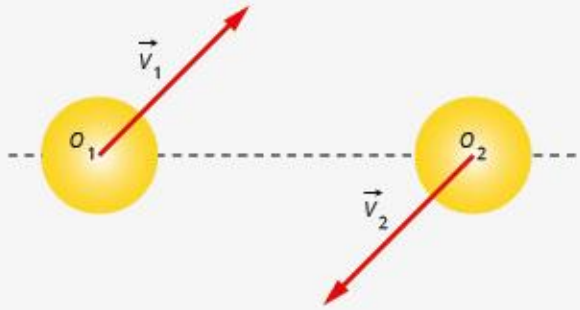


$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot u$$

$$\frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) \cdot u^2}{2} = W + Q$$

Zderzenie dwóch ciał nazywamy **centralnym**, jeżeli wektory prędkości zderzających się ciał należą do prostej łączącej środki tych ciał.

Zderzenie dwóch ciał nazywamy **niecentralnym (skośnym)**, jeżeli choć jeden z wektorów prędkości zderzających się ciał nie należy do prostej łączącej środki tych ciał.



Odrzut – zjawisko, w którym dwa ciała, początkowo nieruchome, na skutek wzajemnego oddziaływania zaczynają się poruszać w przeciwne strony.

2.15. Ciśnienie hydrostatyczne

Gęstość – wielkość tablicowa, która określa, ile substancji mieści się w jednostce objętości:

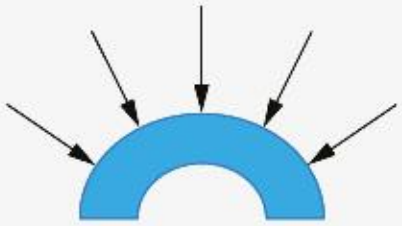
$$\rho = \frac{m}{V}$$

m – masa substancji wyrażona w kilogramach

V – objętość substancji wyrażona w metrach sześciennych

Jednostką gęstości jest $1\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Parcie – siła nacisku wywierana przez ciecz lub gaz na powierzchnię danego ciała. Siła nacisku jest wielkością wektorową, kierunek jest zawsze prostopadły do powierzchni, na którą działa ta siła.



Ciśnienie – iloraz wartości siły nacisku (parcia) i pola powierzchni, na którą ta siła działa:

$$p = \frac{F_n}{S}$$

p – ciśnienie

F_n – wartość siły nacisku (parcie)

S – pole powierzchni

Jednostką ciśnienia w układzie SI jest **paskal** $1\,\text{Pa} = 1\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.

Ciśnienie ma wartość 1 Pa, jeżeli siła 1 N naciska na powierzchnię 1 m².

Jednostki pochodne to:

– hektopaskal: $1\,\text{hPa} = 10^2\,\text{Pa} = 100\,\text{Pa}$,

– kilopaskal: $1\,\text{kPa} = 10^3\,\text{Pa} = 1000\,\text{Pa}$,

– megapaskal $1\,\text{MPa} = 10^6\,\text{Pa} = 1000000\,\text{Pa}$.

Ciśnienie hydrostatyczne – ciśnienie słupa cieczy oddziałujące na ciało we wszystkich kierunkach, powodowane przez grawitację. Ciśnienie hydrostatyczne zależy od wysokości słupa cieczy i gęstości cieczy.

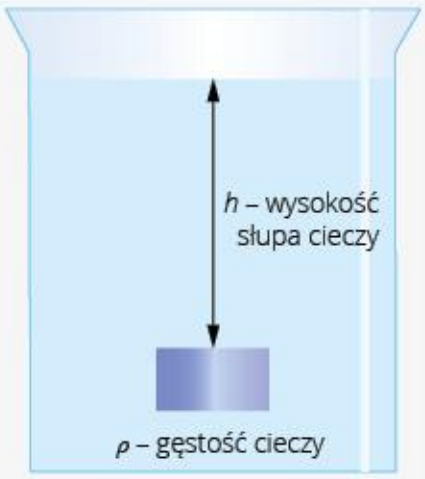
$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

p – ciśnienie hydrostatyczne

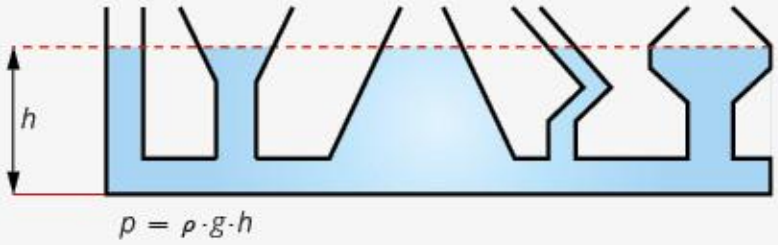
ρ – gęstość cieczy

g – przyspieszenie grawitacyjne

h – wysokość słupa cieczy



Na wartość ciśnienia hydrostatycznego nie wpływa kształt naczynia oraz wielkość naczynia, w którym znajduje się ciecz.



Ciśnienie atmosferyczne – ciśnienie, jakie wywiera powietrze na Ziemię i wszystkie ciała znajdujące się w atmosferze ziemskiej. Zależy ono od wielu czynników, a w szczególności od warstwy atmosfery w tym miejscu. Ciśnienie powietrza maleje wraz ze wzrostem wysokości. Przyczyną zmian ciśnienia atmosferycznego jest siła ciężkości działająca na cząsteczki powietrza.

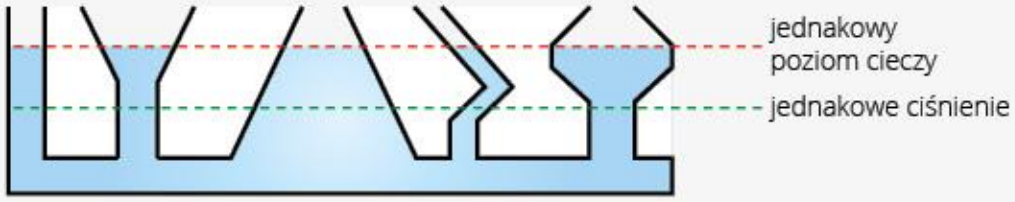
Ciśnienie atmosferyczne mierzymy **barometrem**, a ciśnienie gazu w naczyniu zamkniętym mierzymy **manometrem**.

Ciśnienie normalne – ciśnienie o wartości 1013,25 hPa.

2.16. Równowaga cieczy w naczyniach połączonych

Naczynia połączone to co najmniej dwa naczynia połączone ze sobą w taki sposób, że ciecz swobodnie przepływa z jednego naczynia do drugiego.

Jeżeli w naczyniu znajduje się ciecz jednorodna to w stanie równowagi jej poziom w każdym naczyniu jest taki sam. Ciśnienie w każdym naczyniu panujące w cieczy na tej samej wysokości jest takie samo.

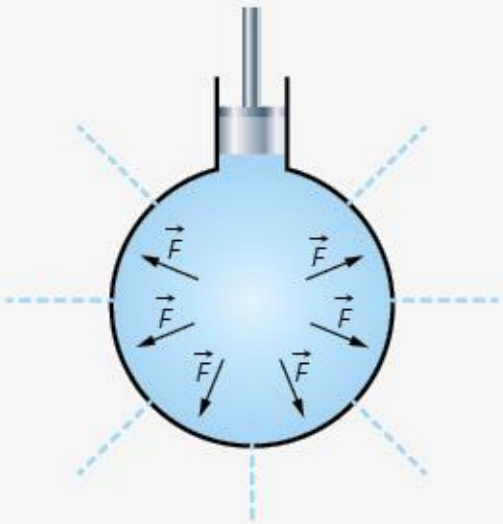


Naczynia połączone mają zastosowanie przy budowie śluz wodnych.

2.17. Prawo Pascala i prawo Archimedesa oraz warunki pływania ciał

Prawo Pascala

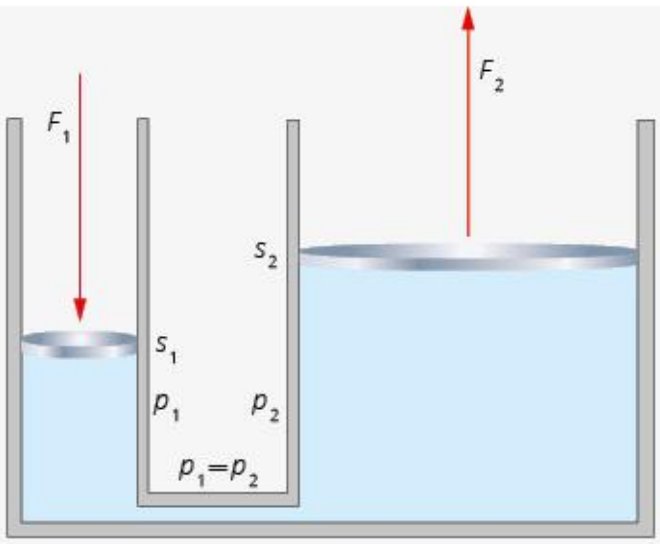
Ciśnienie zewnętrzne wywierane na ciecz lub gaz rozchodzi się równomiernie we wszystkich kierunkach.



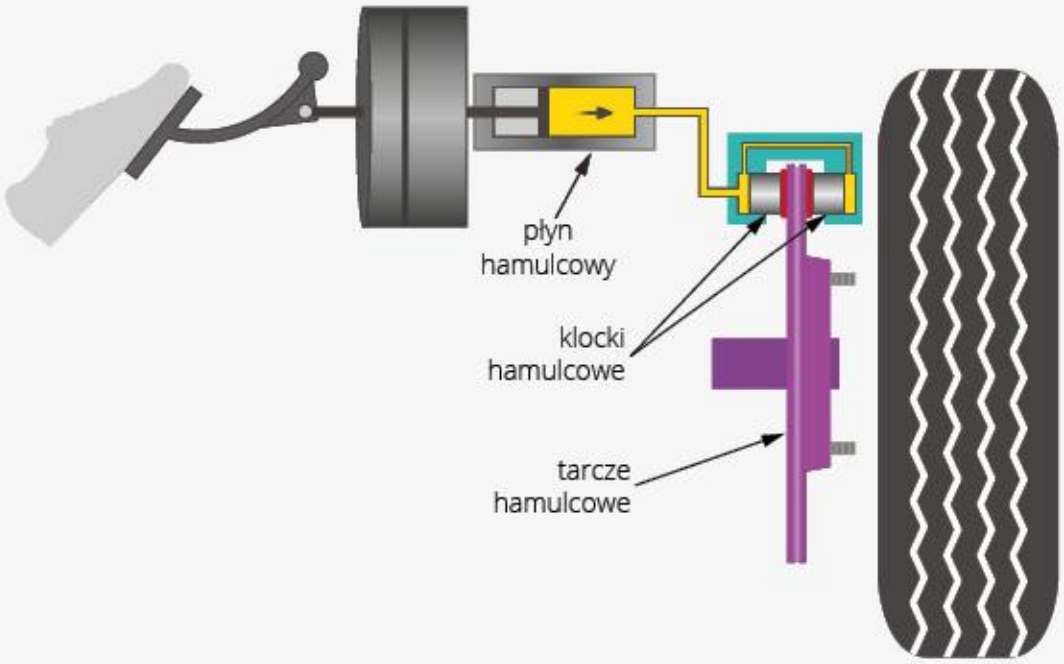
Przykłady zastosowania prawa Pascala

Prasa hydrauliczna – składa się z dwóch cylindrów połączonych rurą wypełnioną cieczą i zaopatrzonych w ruchome tłoki o różnych powierzchniach S_1 i S_2, przy czym $S_1 < S_2$. Siła F_1, działając na powierzchnię S_1, wywiera ciśnienie $p_1 = \frac{F_1}{S_1}$. Siła F_2, działając na powierzchnię S_2, wywiera ciśnienie $p_2 = \frac{F_2}{S_2}$.

Zgodnie z prawem Pascala $p_1 = p_2$, czyli $\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$.



Hamulec hydrauliczny – działa na zasadzie prasy hydraulicznej. Kierowca, naciskając pedał hamulca, doprowadza do tłoczenia płynu hamulcowego do tłoczków znajdujących się przy cylindrach hamulców kół, które dociskają klocki hamulcowe do tarczy, dzięki czemu pojazd hamuje, co prowadzi do jego zatrzymania.



Prawo Archimedesa

Na każde ciało zanurzone w cieczy lub gazie działa skierowana ku górze siła wyporu równa ciężarowi wypartej cieczy lub wypartego gazu. Obliczamy ją według wzoru:

$$F_w = \rho_c \cdot g \cdot V$$

F_w – wartość siły wyporu

ρ_c – gęstość cieczy lub gazu

g – przyspieszenie grawitacyjne

V – objętość ciała zanurzonego w cieczy lub gazie

Warunki pływania ciał

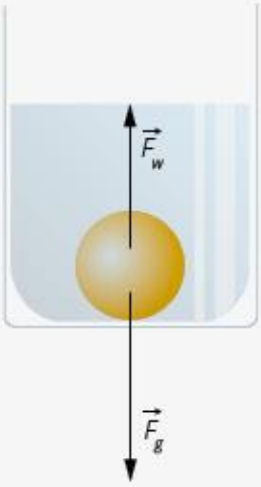
a) Ciało tonie – jeżeli gęstość zanurzonego ciała jest większa od gęstości cieczy, wówczas siła ciężkości jest większa od siły wyporu.

$$\rho_{ciała} > \rho_{cieczy}$$

$$\vec{F}_w < \vec{F}_g$$

$\vec{F}_w$ – siła wyporu

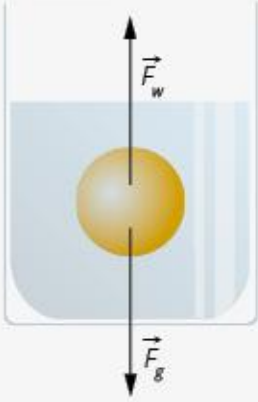
$\vec{F}_g$ – siła ciężkości



b) **Ciało pływa całkowicie zanurzone w cieczy** – jeżeli gęstość ciała zanurzonego jest równa gęstości cieczy, wówczas siła ciężkości jest równa sile wyporu.

$$\rho_{\text{ciała}} = \rho_{\text{cieczy}}$$

$$\vec{F}_w = \vec{F}_g$$



c) **Ciało wypływa** – jeżeli gęstość ciała zanurzonego jest mniejsza od gęstości cieczy, wówczas siła ciężkości jest mniejsza od siły wyporu.

$$\rho_{\text{ciała}} < \rho_{\text{cieczy}}$$

$$\vec{F}_w > \vec{F}_g$$

2.18. Sprawność urządzeń mechanicznych

Sprawność urządzeń mechanicznych określa, jaka część energii dostarczonej została zamieniona na energię użyteczną.

$$\eta = \frac{E_u}{E_d}$$

E_u – energia użyteczna

E_d – energia dostarczona

η – sprawność urządzenia

3

MECHANIKA BRYŁY SZTYWNEJ

3.1. Ruch postępowy i obrotowy bryły sztywnej

Bryła sztywna – ciało zachowujące stałą odległość między punktami ciała, nawet podczas działania sił zewnętrznych.

Przykładami brył sztywnych są wszystkie ciała wykonane z metalu, drewna, tworzywa sztucznego, które się nie odkształcają. Siły zewnętrzne działające na ciało powodują ruch ciała, ale nie zmieniają kształtu ciała.

Bryła sztywna może wykonywać ruch postępowy i obrotowy. Wówczas taki ruch nazywamy **ruchem złożonym**. Przykładem ruchu złożonego jest toczenie się beczki po równi pochyłej.

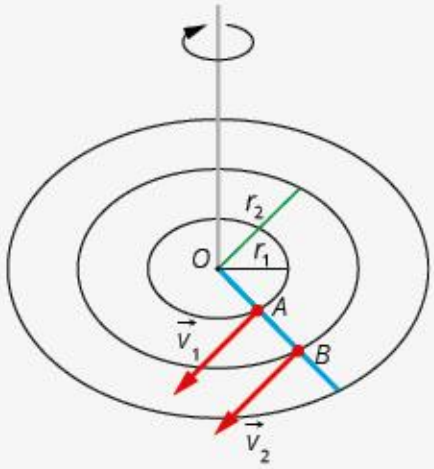
Aby opisać **ruch postępowy** dowolnego ciała, należy wybrać co najmniej dwa punkty należące do tego ciała i połączyć te punkty odcinkiem. W ruchu postępowym bryły sztywnej odcinek łączący dwa dowolne punkty przemieszcza się równolegle do siebie.

Przykładem ruchu postępowego jest ruch pociągu po torze prostym, ale nie ruch po zakręcie – jest to już ruch obrotowy. Inne przykłady ruchu obrotowego to ruch siodełka karuzeli czy otwieranie okna.

Podczas ruchu obrotowego wszystkie punkty ciała zakreślają okręgi, których środki leżą na wspólnej osi, nazywanej osią obrotu. Różne punkty znajdujące się w różnych odległościach od osi obrotu mają różne prędkości liniowe, ale wszystkie punkty mają taką samą prędkość kątową ω.

Ruch postępowy

W **ruchu obrotowym** ciała (bryły) prędkości liniowe różnych punktów są różne, ale prędkość kątowa jest taka sama dla każdego punktu.



Ruch obrotowy

Prędkość liniową wyrażamy wzorem:

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

Δs – przyrost drogi
t – czas pokonywania drogi

Prędkość kątową wyrażamy wzorem:

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

$\Delta \alpha$ – przyrost kąta wyrażony w radianach

Jeżeli ciało wykona jeden pełen obrót, to pokona drogę $\Delta s = 2\pi r$ oraz zakreśli kąt $\Delta \alpha = 2\pi$.

W przypadku pełnego obrotu wzory na prędkość przyjmują postać:
– prędkość liniowa:

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

– prędkość kątowa:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

gdzie T – okres ruchu (czas trwania jednego obrotu).

Związek prędkości liniowej z prędkością kątową opisuje wzór:

$$\omega \cdot r = v$$

Z równania wynika, że prędkość liniowa zależy od promienia okręgu. Im dalej od osi znajduje się wybrany punkt ciała, tym wartość prędkości liniowej tego punktu jest większa.

3.2. Moment siły

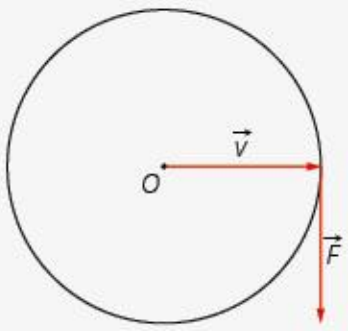
Moment siły – iloczyn wektorowy przyłożonej do ciała siły $\vec{F}$ i wektora wodzącego $\vec{r}$. Wektor wodzący to wektor łączący oś obrotu bryły z punktem przyłożenia siły działającej na bryłę.

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

Jednostką momentu siły jest **niutonometr** (Nm).

Wartość momentu siły obliczamy ze wzoru:

$$M = rF\sin\alpha$$



Kąt α jest zawarty między wektorem $\vec{r}$ a wektorem $\vec{F}$.

Moment siły nazywamy **momentem obrotowym**.

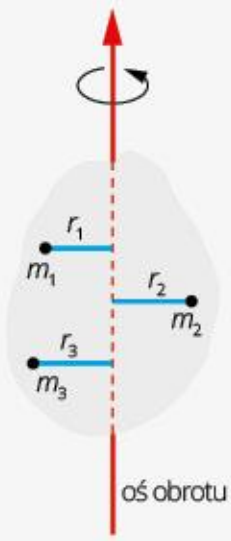
3.3. Energia kinetyczna w ruchu obrotowym. Moment bezwładności

Moment bezwładności bryły dla n punktów, położonych w odległościach r od osi obrotu:

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \ldots + m_n r_n^2$$

$$I = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2$$

Jednostką miary momentu bezwładności w układzie SI jest $1\ \mathrm{kg \cdot m^3}$.

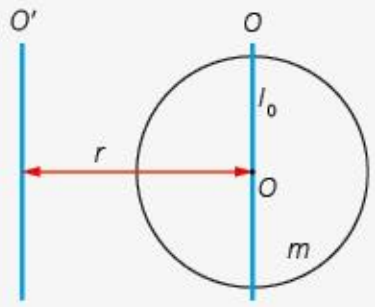


Twierdzenie Steinera

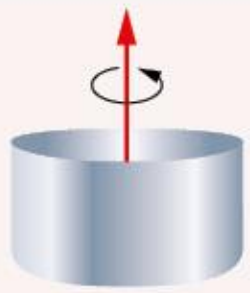
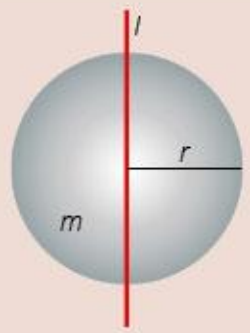
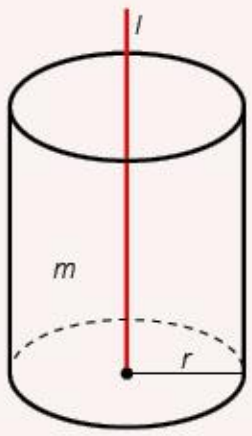
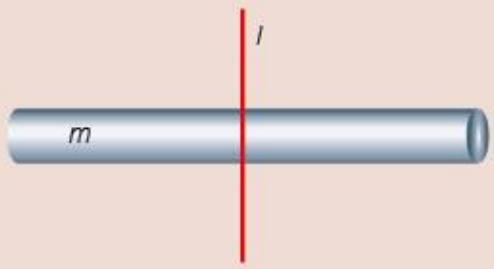
Moment bezwładności zależy nie tylko od masy, lecz także od położenia osi obrotu.

$$I = I_0 + mr^2$$

I_0 – moment bezwładności bryły względem osi przechodzącej przez środek masy bryły o masie m



Momenty bezwładności brył o masie *m* względem osi przechodzącej przez ich środki mas

Rura o cienkiej ściance i promieniu *r*: $I = mr^2$	
Jednorodna kula o promieniu *r*: $I = \frac{2}{5}mr^2$	
Jednorodny walec o promieniu *r*: $I = \frac{1}{2}mr^2$	
Pręt o długości *l* (względem osi prostopadłej do pręta i przechodzącej przez jego środek): $I = \frac{1}{12}ml^2$	

Energia kinetyczna ruchu obrotowego ciała względem osi, dla której moment bezwładności tego ciała wynosi I, jest wprost proporcjonalna do kwadratu szybkości kątowej:

$$E_{kin} = \frac{I\omega^2}{2}$$

W ruchu obrotowym miarą bezwładności jest moment bezwładności. Im większy jest moment bezwładności ciała, tym większą pracę trzeba wykonać, aby wprowadzić ciało w ruch obrotowy.

Energia kinetyczna w ruchu złożonym bryły, czyli gdy jednocześnie występuje ruch postępowy i obrotowy, jest wyrażona wzorem:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

m – masa ciała
v – wartość prędkości środka masy
I – moment bezwładności ciała względem osi przechodzącej przez środek masy
ω – prędkość kątowa ciała

3.4. Druga zasada dynamiki dla ruchu obrotowego

Jeżeli na bryłę sztywną działa wypadkowy moment siły działający równolegle do osi obrotu, to ta bryła porusza się ruchem obrotowym z przyspieszeniem kątowym wprost proporcjonalnym do wartości działającego na nią momentu siły i odwrotnie proporcjonalnym do momentu bezwładności tej bryły:

$$\varepsilon = \frac{M}{I}$$

ε – przyspieszenie kątowe
M – moment siły
I – moment bezwładności

3.5. Moment pędu. Zasada zachowania momentu pędu

Moment pędu bryły sztywnej L jest sumą momentów pędu poszczególnych punktów x, z których składa się bryła:

$$L = I\omega$$

L – moment pędu
I – moment bezwładności
ω – prędkość kątowa

Jednostką momentu pędu jest $1\frac{kg \cdot m^2}{s}$.

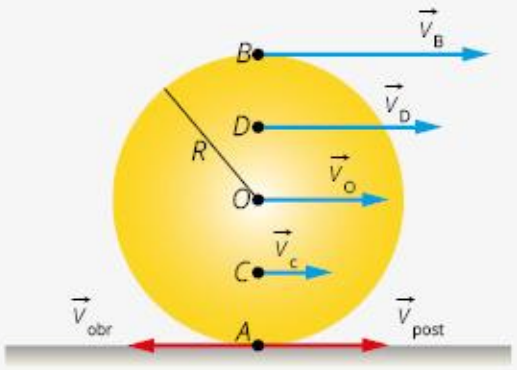
Zasada zachowania momentu pędu
Jeżeli wypadkowy moment sił działających na bryłę sztywną jest równy 0, wówczas moment pędu jest stały:

$$L = \text{const}$$

Przykładem zasady zachowania momentu pędu jest obracający się łyżwiarz na lodzie. Jeżeli chce kręcić się szybko, unosi ręce nad głowę. Z kolei aby zmniejszyć szybkość obrotu (szybkość kątową), rozkłada ręce w bok – wówczas zwiększa się odległość punktów ciała od osi obrotu, szybkość kątowa maleje. Za zmianę położenia masy, a tym samym momentu bezwładności względem osi obrotu odpowiadają siły wewnętrzne, co powoduje zmianę szybkości kątowej, z jaką wiruje ciało, moment sił zewnętrznych jest ciągle równy 0.

3.6. Złożenie ruchu postępowego i obrotowego

Rozważmy bryłę, która toczy się po płaskiej powierzchni. Jej środek masy *O* przemieszcza się z prędkością $\vec{v}_{post}$. Ruch dowolnego punktu bryły rozpatrujemy jako złożenie dwóch ruchów: ruchu postępowego względem powierzchni, po której porusza się bryła, i ruchu obrotowego wokół osi przechodzącej przez środek symetrii.



Ruch punktów położonych w obrębie bryły:
– w punkcie *O* – jest równa szybkości ruchu postępowego: $v_0 = v_{post}$;
– w punkcie *A* – wypadkowa szybkości jest równa 0:

$$v_A = v_{post} - \omega R = v_{post} - v_{post} = 0;$$

– w punkcie *C*, którego odległość od osi obrotu jest równa połowie promienia *R* bryły – prędkość jest równa $0{,}5v_{post}$:

$$v_C = v_{post} - \frac{1}{2}\omega R = v_{post} - \frac{1}{2}v_{post} = \frac{1}{2}v_{post}$$

– w punkcie *D*, którego odległość od osi obrotu jest równa połowie promienia *R* bryły – prędkość jest równa $1{,}5v_{post}$:

$$v_D = v_{post} + v_{obr} = v_{post} + \frac{\omega R}{2} = v_{post} + \frac{v_{post}}{2} = 1{,}5v_{post}$$

– w punkcie *B* – szybkość jest równa $2v_{post}$:

$$v_B = v_{post} + \omega R$$

$$v_B = v_{post} + \frac{v_{post}}{R}R = 2v_{post}$$

3.7. Warunki równowagi bryły sztywnej

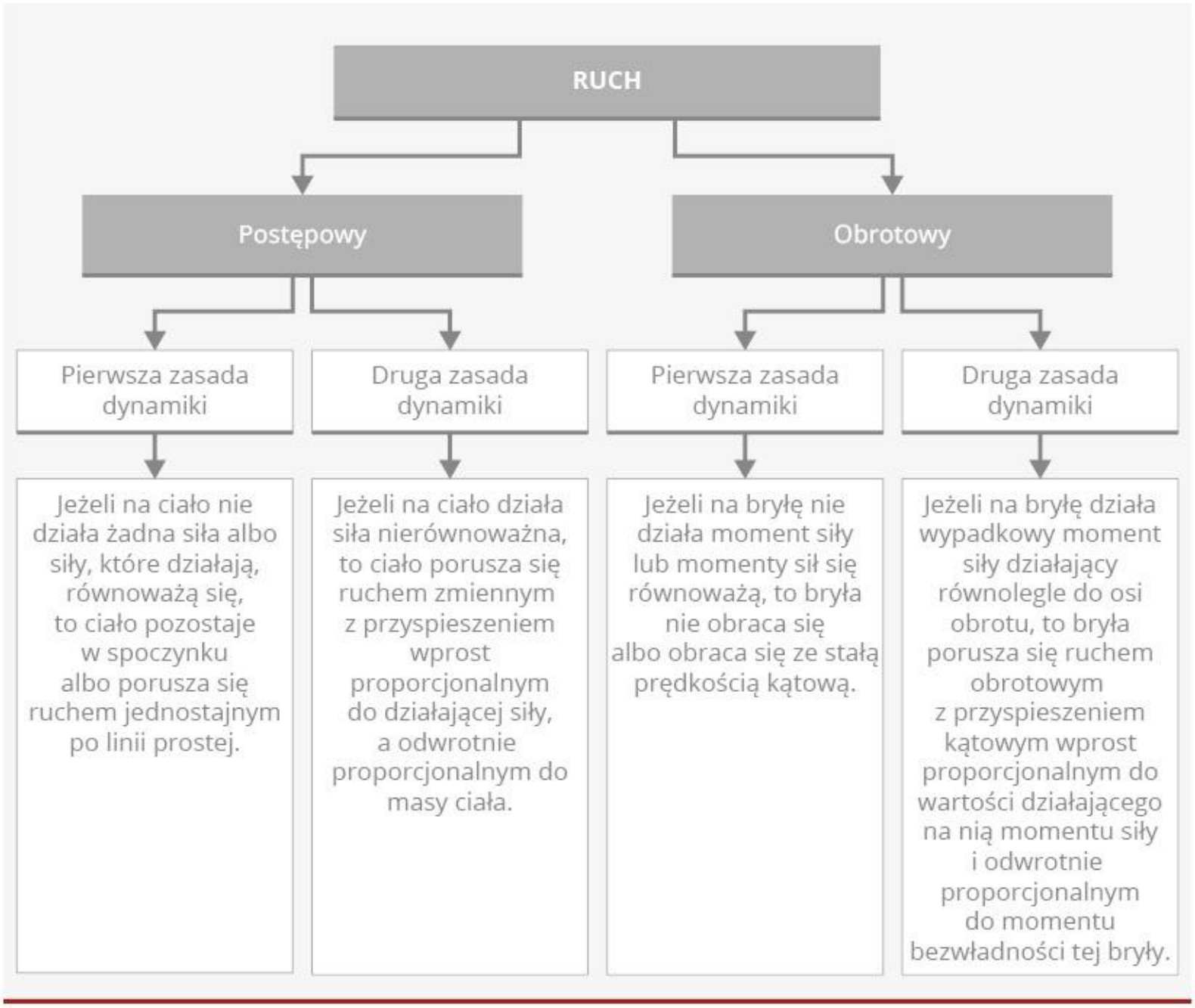
Aby bryła była w równowadze, siły działające na bryłę oraz momenty sił działające na bryłę muszą równoważyć się.

$$\sum \vec{F} = 0 \quad \text{oraz} \quad \vec{M} = 0$$

Rodzaje równowagi:
– **obojętna** – środek ciężkości ciał po jego wychyleniu z położenia równowagi znajduje się na tej samej wysokości;
– **stabilna** – środek ciężkości ciała po wychyleniu się z położenia równowagi samoczynnie wróci do położenia równowagi;
– **niestabilna** – środek ciężkości ciała po wychyleniu się z położenia równowagi znajduje się w najwyższym punkcie, nie wraca nigdy do tego punktu.

Porównanie wielkości opisujące ruch postępowy i ruch obrotowy

Ruch postępowy			Ruch obrotowy		
Wielkość	**Wzór**	**Jednostka**	**Wielkość**	**Wzór**	**Jednostka**
prędkość liniowa	$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	prędkość kątowa	$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$	$\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}$
przyspieszenie liniowe	$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	przyspieszenie kątowe	$\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$	$\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}^2}$
przyspieszenie liniowe	$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	przyspieszenie kątowe	$\vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{I}$	$\frac{1}{\mathrm{s}^2}$
siła	$\vec{F}$	N	moment siły	$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$	$\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot \mathrm{m} = \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}$
masa	m	kg	moment bezwładności	$I = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2$	$\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2$
pęd	$\vec{p} = m\vec{v}$	$\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	moment pędu	$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ $\vec{L} = I\vec{\omega}$	$\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$
energia kinetyczna	$E = \frac{1}{2} m v^2$	$\mathrm{kg} \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} = \mathrm{J}$	energia kinetyczna	$E = \frac{1}{2} I \omega^2$	$\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} = \mathrm{J}$


RUCH
Postępowy
Obrotowy
Pierwsza zasada dynamiki
Druga zasada dynamiki
Pierwsza zasada dynamiki
Druga zasada dynamiki
Jeżeli na ciało nie działa żadna siła albo siły, które działają, równoważą się, to ciało pozostaje w spoczynku albo porusza się ruchem jednostajnym po linii prostej.
Jeżeli na ciało działa siła nierównoważna, to ciało porusza się ruchem zmiennym z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do działającej siły, a odwrotnie proporcjonalnym do masy ciała.
Jeżeli na bryłę nie działa moment siły lub momenty sił się równoważą, to bryła nie obraca się albo obraca się ze stałą prędkością kątową.
Jeżeli na bryłę działa wypadkowy moment siły działający równolegle do osi obrotu, to bryła porusza się ruchem obrotowym z przyspieszeniem kątowym wprost proporcjonalnym do wartości działającego na nią momentu siły i odwrotnie proporcjonalnym do momentu bezwładności tej bryły.

4

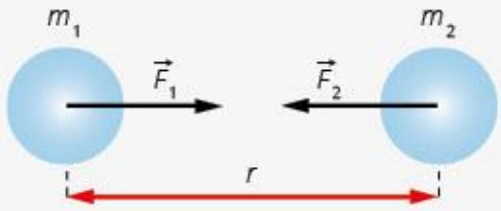
GRAWITACJA I ELEMENTY ASTRONOMII

4.1. Prawo powszechnego ciążenia

Siła grawitacji – oddziaływanie ciała mającego masę na inne ciało obdarzone masą. Siła grawitacji jest siłą przyciągającą.

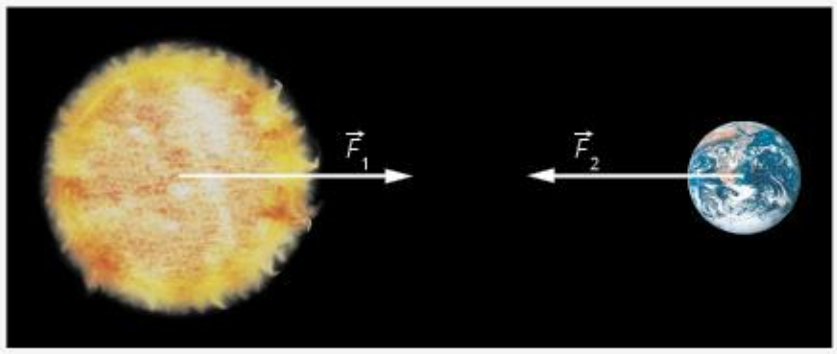
Prawo powszechnego ciążenia
Dwie punktowe lub kuliste masy przyciągają się siłą wprost proporcjonalną do iloczynu ich mas, a odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi.

Powyższe prawo sformułowano na podstawie analiz, jakie Newton prowadził nad siłą powodującą krążenie planet dookoła Słońca.



Dwa ciała o budowie kulistej oddziałują na siebie siłami grawitacji

III zasada dynamiki mówi o tym, że siły przyciągania są wzajemne – jeżeli Słońce przyciąga Ziemię pewną siłą, to Ziemia przyciąga Słońce siłą o takiej samej wartości i kierunku, lecz o przeciwnym zwrocie.



Oddziaływanie grawitacyjne Ziemi na Słońce i Słońca na Ziemię

Dowolne dwa punkty materialne przyciągają się wzajemnie siłą wprost proporcjonalną do iloczynu dwóch mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi:

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

m_1, m_2 – masy ciał
r – odległość między ciałami
G – stała grawitacji, $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$

4.2. Siła grawitacji a siła ciężkości

Siła ciężkości – siła, z jaką Ziemia przyciąga dane ciało. **Ciężar** w przybliżeniu jest równy sile ciężkości.

Jednostka ciężaru to **niuton** (1 N).

Ciężar ciała na Ziemi obliczamy ze wzoru:

$$F_g = m \cdot g$$

m – masa ciała
g – przyspieszenie ziemskie (grawitacyjne), $g = 9{,}81 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}} \approx 10 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}} = 10 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}$

Przyspieszenie grawitacyjne przy powierzchni kulistego ciała niebieskiego można obliczyć ze wzoru:

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

M – masa ciała
R – promień ciała
G – stała grawitacji, $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$

4.3. Pole grawitacyjne. Natężenie pola

Natężenie pola grawitacyjnego (γ) – wektorowa wielkość fizyczna zdefiniowana jako stosunek siły grawitacji działającej na próbną masę umieszczoną w polu grawitacyjnym do wartości tej masy:

$$\vec{\gamma} = \frac{\vec{F_g}}{m}$$

$\vec{F_g}$ – siła grawitacji

m – masa ciała

Jednostką natężenia pola jest niuton na kilogram: $1\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}$.

Siłę grawitacji działającą na masę m umieszczoną w polu grawitacyjnym, którego źródłem jest masa M, oblicza się ze wzoru:

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

Po wstawieniu tego równania do wzoru na natężenie pola otrzymamy:

$$\gamma = \frac{GM}{r^2}$$

Natężenie pola zależy jedynie od własności ciała, które to pole wytwarza. Im większa jest masa ciała, tym większe jest natężenie pola, które ona wokół siebie wytwarza. Natomiast im większa jest odległość od ciała wytwarzającego pole grawitacyjne, tym natężenie pola jest słabsze. Z kolei gdy odległość jest nieskończenie duża, natężenie pola jest równe zero.

Wewnątrz ciała, które wytwarza pole grawitacyjne, także jest pole grawitacyjne. Przy założeniu, że Ziemia jest jednorodną kulą, natężenie pola we wnętrzu Ziemi można zapisać tak:

$$\gamma(r) = \frac{GM_Z}{R_Z^3} \cdot r$$

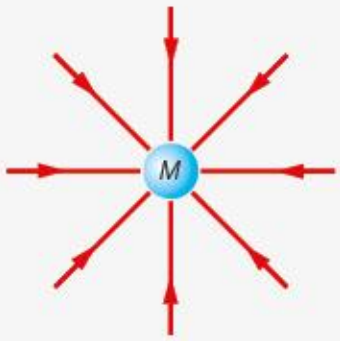
Jest to funkcja liniowa, w której:

r – odległość od środka Ziemi

R_Z – promień Ziemi

M_Z – masa Ziemi

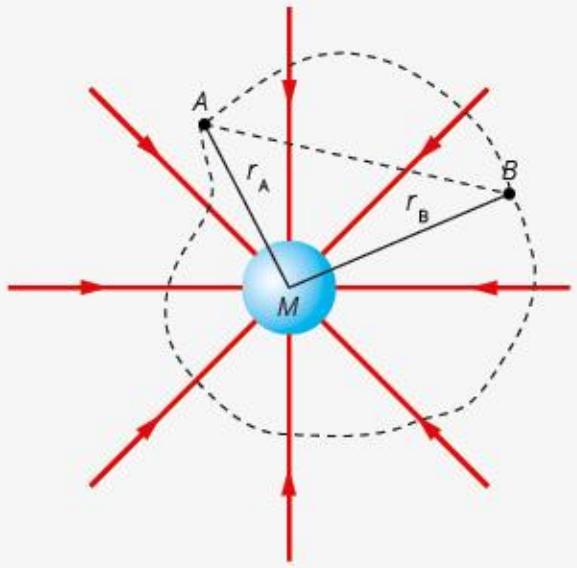
Pole grawitacyjne można ilustrować za pomocą **linii natężenia pola grawitacyjnego**. Wskazują one kierunek i zwrot natężenia pola w każdym punkcie. W przypadku pojedynczego źródła pola te linie układają się promieniście. Jeżeli źródłem pola jest kilka ciał, stosujemy zasadę superpozycji pól (wektorową sumę natężeń). W takim też przypadku linie pola nie są prostymi, a wektor natężenia pola jest wówczas styczny do linii pola w każdym jej punkcie.



Jeżeli linie pola grawitacyjnego są do siebie równoległe, mówimy, że pole grawitacyjne określa się jako **jednorodne**.

4.4. Praca i energia potencjalna w polu grawitacyjnym

Siła grawitacji to siła zachowawcza, co oznacza, że praca przez nią wykonana przy przemieszczaniu ciała w polu grawitacyjnym nie zależy od drogi i toru ruchu, ale zależy od położenia początkowego i końcowego ciała w polu grawitacyjnym. Ta zasada dotyczy pól niezmiennych (stacjonarnych).



Praca wykonana przez siłę zewnętrzną, równoważącą siłę grawitacji przy przesunięciu ciała o masie *m* z punktu *A* do punktu *B* w polu grawitacyjnym źródła pola o masie *M*, jest równa:

$$W_{z,A\to B} = GMm\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

Praca sił pola grawitacyjnego w powyższych warunkach jest równa:

$$W_{g,A\to B} = -GMm\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

Zgodnie z tymi wzorami praca w polu grawitacyjnym na drodze zamkniętej jest równa zero.

Położenie ciała o masie *m* w polu grawitacyjnym ciała o masie *M* się zmienia, dlatego zmienia się też energia potencjalna i jest ona równa pracy wykonanej przez siłę zewnętrzną, równoważącą w każdym punkcie siłę grawitacji.

$$\Delta E_{pot} = GMm\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

Energia potencjalna rośnie, gdy ciało próbne oddala się od źródła pola, a maleje, gdy zbliża się do źródła.

Wartość energii potencjalnej w nieskończoności jest równa zero. Zgodnie z tymi wnioskami energia potencjalna może być tylko ujemna lub równa zero w nieskończoności. $r_A \to \infty$, więc $\frac{1}{r_B} \to 0$ i:

$$E_{pot\,A} = -\frac{GMm}{r_A}$$

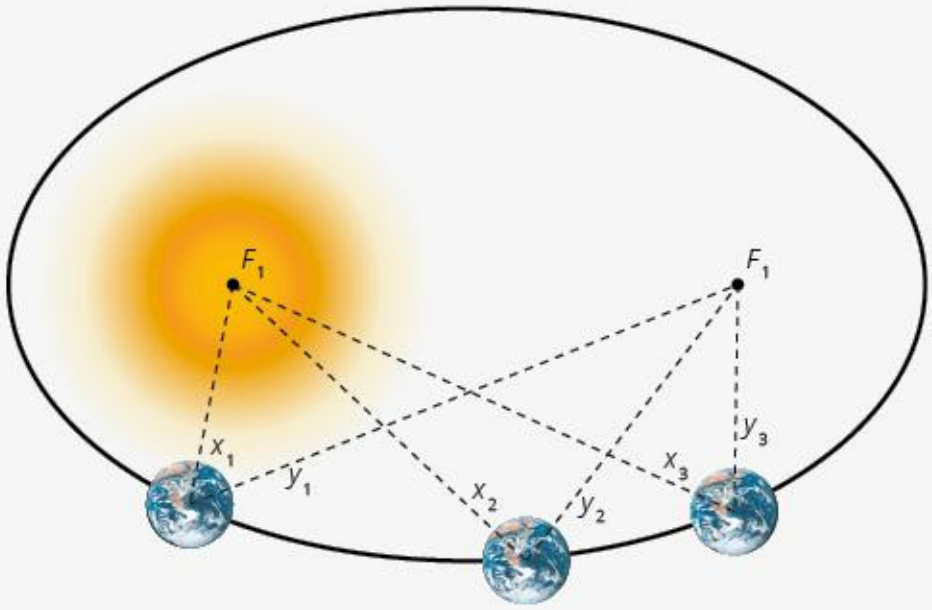
4.5. Prawa Keplera

Johannes Kepler na podstawie obserwacji, które przeprowadził Tycho Brahe, sformułował trzy prawa opisujące ruch planet w naszym Układzie Słonecznym.

Pierwsze prawo Keplera

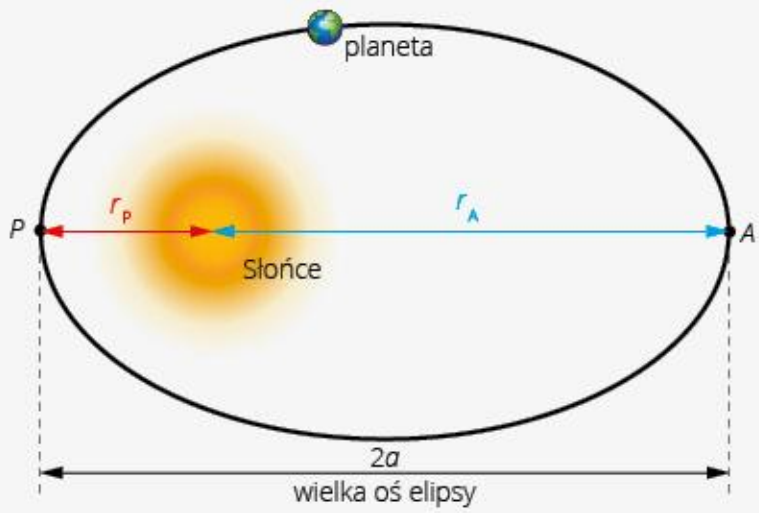
Ruch wszystkich planet wokół Słońca odbywa się po orbitach eliptycznych, a Słońce znajduje się w jednym z ognisk elipsy.

To prawo opisuje kształt orbit planet.



F_1, F_2 – ogniska elipsy

$$x_1 + y_1 = x_2 + y_2 = x_3 + y_3$$

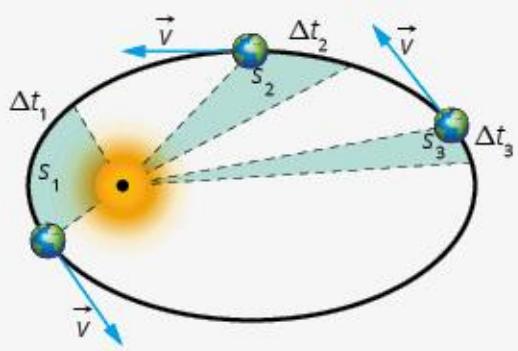


P – punkt na orbicie położony najbliżej Słońca
A – punkt na orbicie położony najdalej Słońca
a – średnia odległość planety od Słońca
r_P – najmniejsza odległość do Słońca
r_A – największa odległość do Słońca

Drugie prawo Keplera

Promień wodzący planety zakreśla równe pola w równych odstępach czasu.

To prawo wynika z zasady zachowania momentu pędu.



Drugie prawo Kepplera można zapisać w następujący sposób:

Jeżeli $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$, to $S_1 = S_2 = S_3$, Δt – czas pomiaru, S – pole zakreślone przez promień wodzący planety.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \text{const}$$

Drugie prawo Keplera wynika z zasady zachowania momentu pędu $\vec{L}$ planety. Dla punktów P i A:

$$mv_A r_A = mv_B r_B$$

m – masa planety
v_A – prędkość planety w punkcie A
v_B – prędkość planety w punkcie B

Trzecie prawo Keplera
Kwadraty okresów obiegu T planet są proporcjonalne do sześcianów ich średnich odległości r od Słońca.

To prawo podaje zależność między okresem obiegu planety wokół Słońca a jej średnią odległością od Słońca.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3}$$

Trzecie prawo Keplera można przedstawić jako stałą, którą tworzy iloraz sześcianu średniej odległości r planety od Słońca i kwadratu okresu obiegu T:

$$\frac{r^3}{T^2} = \text{const}$$

4.6. Nieważkość i przeciążenie

Przeciążenie – stan przeciążenia występuje wówczas, gdy na ciało oprócz siły ciężkości $\vec{F_g}$ działa siła bezwładności $\vec{F_b}$ zwrócona zgodnie z siłą grawitacji.

Występuje np. podczas startu i lądowania rakiety kosmicznej.

Nieważkość – stan nieważkości występuje wówczas, gdy w nieinercjalnym układzie odniesienia siła grawitacji jest równoważona przez siłę bezwładności.

Występuje np. w stacji kosmicznej orbitującej wokół Ziemi, między lądowaniem a startem rakiety kosmicznej.

$$F_b = F_g, \text{ czyli } Q = 0$$

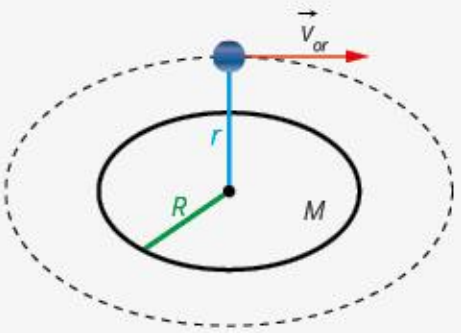
F_b – wartość siły bezwładności

F_g – wartość siły grawitacji

Q – ciężar

4.7. Elementy kosmonautyki

Prędkość orbitalna – prędkość, z jaką porusza się ciało o masie m na orbicie wokół ciała centralnego o masie M. Zależy ona od masy ciała centralnego i promienia r orbity.



Podczas ruchu po okręgu na ciało działa siła dośrodkowa, którą jest siła grawitacji.

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv_{or}^2}{r}$$

Po przekształceniu otrzymamy $v_{or} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$, co oznacza, że im dalej od powierzchni ciała centralnego krąży satelita, tym wartość jego prędkości orbitalnej jest mniejsza.

Dla satelity okrążającego Ziemię wartość jego prędkości orbitalnej wynosi:

$$v_{or} = \sqrt{\frac{GM_z}{r}}$$

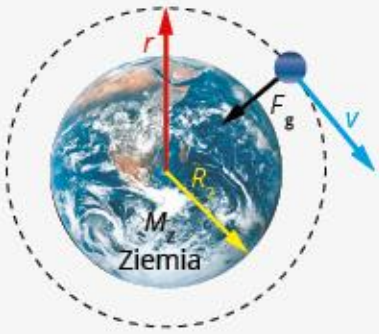
F_g – siła grawitacji, która jest siłą dośrodkową

r – promień orbity satelity o masie m

R_z – promień Ziemi

M_z – masa Ziemi

v_{or} – prędkość orbitalna satelity



I prędkość kosmiczna dla Ziemi – wartość prędkości, którą należy nadać ciału (stycznie do powierzchni Ziemi), aby mogło ono krążyć po orbicie kołowej o promieniu równym promieniowi Ziemi.

$$v_I = \sqrt{\frac{GM_z}{R_z}} = 7{,}92\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$$

II prędkość kosmiczna (prędkość ucieczki) dla Ziemi – prędkość, jaką należy nadać ciału na Ziemi, aby mogło ono uciec z pola grawitacyjnego Ziemi.

Wartość II prędkości kosmicznej zależy od masy i odległości od środka ciała przyciągającego. Za wartość charakteryzującą drugą prędkość kosmiczną przyjmuje się wartość odpowiadającą oddaleniu od środka ciała przyciągającego, równemu jego średniemu promieniowi. Dla Ziemi, tuż przy jej powierzchni, II prędkość kosmiczna wynosi $11{,}2\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Aby ją obliczyć, należy znaleźć różnicę w energii obiektu znajdującego się na powierzchni danego ciała kosmicznego oraz w nieskończoności. Energia w nieskończoności jest równa zero, natomiast na powierzchni jest sumą energii potencjalnej oraz energii kinetycznej.

Dostajemy więc równanie: $\frac{mv^2}{2} - \frac{GM_m}{R} = 0$, z którego wynika, że $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$.

Po podstawieniu danych liczbowych dla Ziemi otrzymamy:

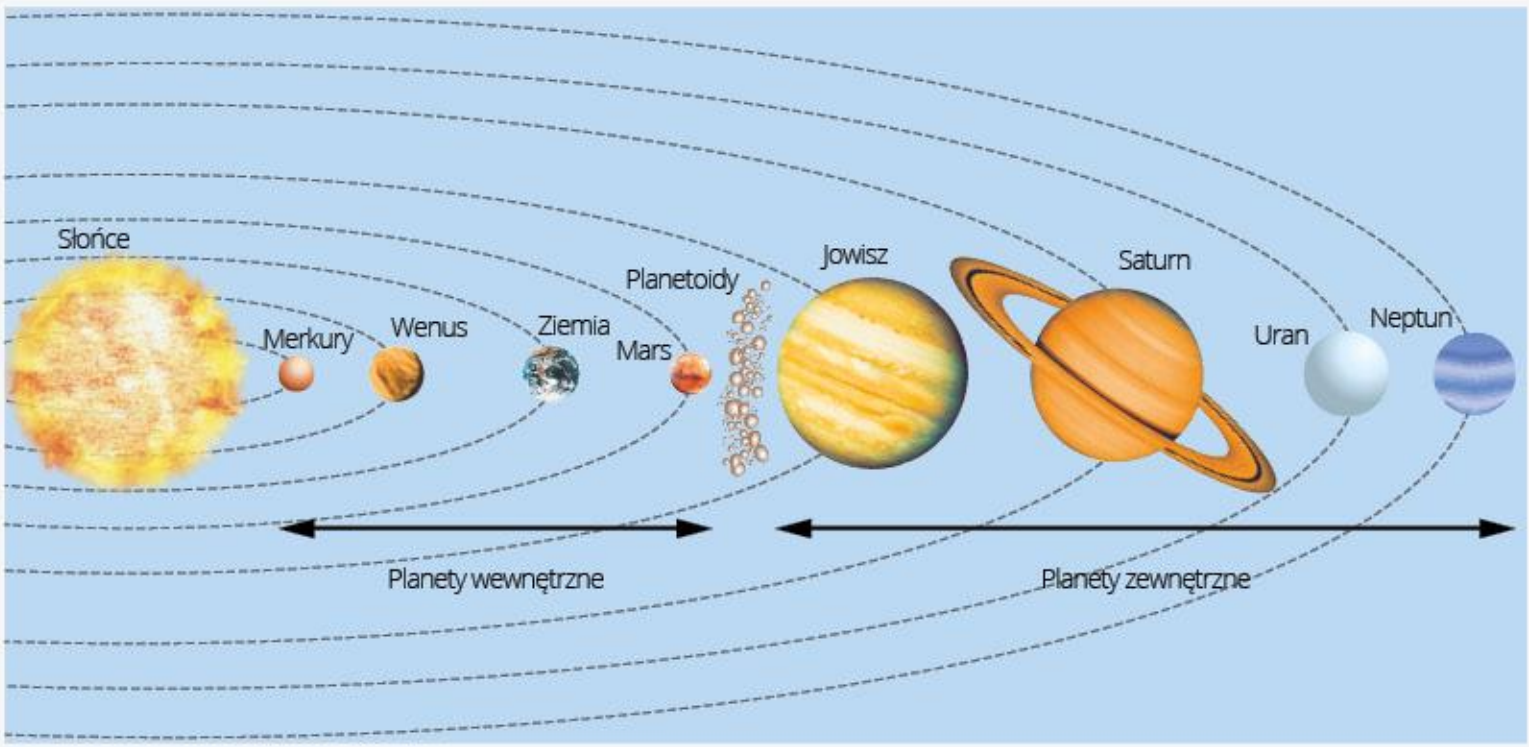
$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_z}{R_z}} = 11{,}19\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Budowa Układu Słonecznego

- **Wszechświat** to przestrzeń, w której w nieustannym ruchu znajdują się ciała niebieskie.
- **Ciała niebieskie** to: gwiazdy, planety, komety, planetoidy, meteoryty oraz satelity naturalne (księżyce) i satelity sztuczne.
- **Układ Słoneczny** tworzą Słońce i krążące wokół niego planety.
- Planety znajdujące się najbliżej Słońca to **planety wewnętrzne**: Merkury, Wenus, Ziemia, Mars.
- **Planety zewnętrzne** to: Jowisz, Saturn, Uran i Neptun.

Teoria heliocentryczna sformułowana przez Mikołaja Kopernika

Układ Słoneczny jest zbudowany w taki sposób, że w jego centrum znajduje się Słońce, a dookoła niego krążą planety, w tym również Ziemia.



4.8. Wielki Wybuch

Big Bang, czyli **Wielki Wybuch**, był początkiem Wszechświata. W chwili Wielkiego Wybuchu cały Wszechświat był skomasowany w jednym punkcie mającym nieskończoną gęstość i temperaturę. Uformował się w ciągu kilku minut, a w miarę upływu lat rozrastał się, aby osiągnąć średnicę 30 mld lat świetlnych. Ewolucję Wszechświata nazywamy teorią rozszerzającego się Wszechświata. Z powodu dużego zagęszczenia materii powstały gwiazdy. Gwiazdy stworzyły galaktyki, które zgrupowały się w gromady galaktyk i supergromady.

Podczas ewolucji Wszechświata powstały oddziaływania: jądrowe słabe i silne oraz elektromagnetyczne i grawitacyjne.

5

DRGANIA

5.1. Ruch harmoniczny

Ruch drgający – ruch ciała, który zachodzi wokół stałego położenia równowagi.
Taki ruch może być **okresowy (periodyczny)**, polegający na tym, że stan ciała powtarza się w jednakowych odstępach czasu, określanych jako okres drgań. **Okres drgań** oznaczamy literą T i mierzymy w sekundach.

Wyróżnia się też ruch **nieokresowy**, który nie jest ruchem periodycznym.

Opis matematyczny

Zależność położenia punktu materialnego na osi x w chwili t możemy zapisać: $x(t) = x(t + T)$.

To oznacza, że położenie punktu w chwili $t = t_0$ i $t = t_0 + T$ jest takie samo (T to okres drgań), czyli powtarza się co pewien czas równy T.

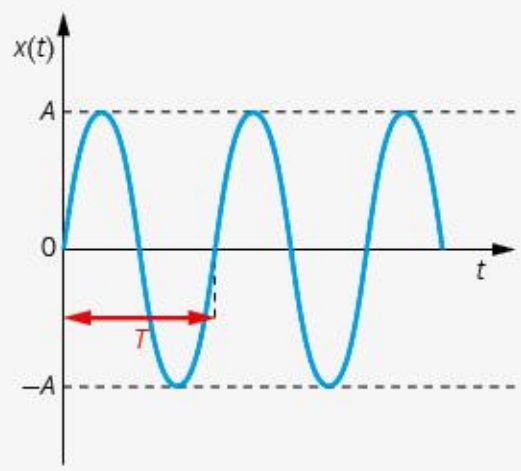
Drgania opisane równaniem zależności położenia x punktu materialnego od czasu t nazywamy **drganiami harmonicznymi**.

$$x = A\sin\left(\omega t + \varphi_0\right)$$

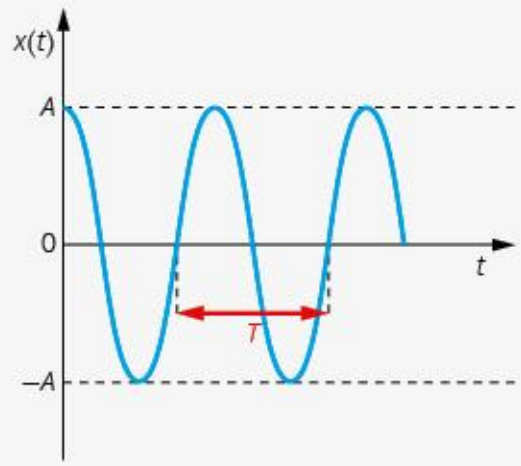
A – amplituda drgań (największe wychylenie z położenia równowagi)
ω – częstotliwość (częstość) kątowa drgań, pulsacja
$\omega t + \varphi_0$ – faza drgań, w szczególności dla $t = 0$, faza drgań jest równa φ_0 – tzw. faza początkowa

Wykresy zależności położenia od czasu w ruchu harmonicznym

Wykres zależności $x(t)$ w ruchu harmonicznym dla fazy początkowej równej 0:

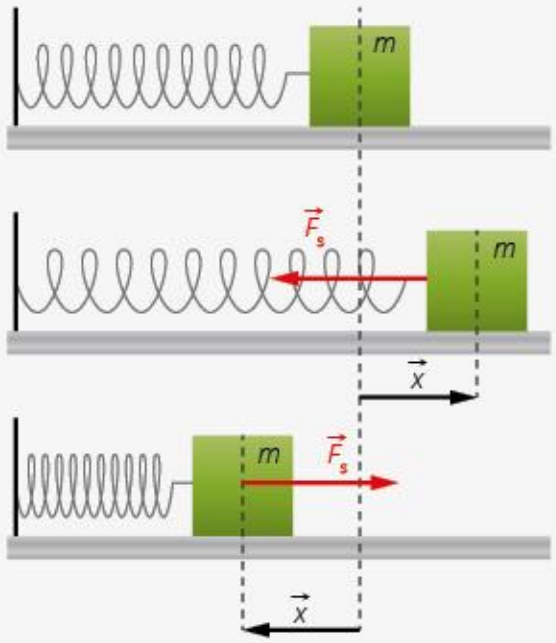


Wykres zależności położenia od czasu w ruchu harmonicznym dla fazy początkowej $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ rad:



Ruch harmoniczny – ruch, w którym działająca na ciało siła jest wprost proporcjonalna do wychylenia i przeciwnie do niego zwrócona.

Przykładem takiej siły jest siła sprężystości $\vec{F_s}$, która powoduje powrót odkształconej sprężyny do pierwotnego kształtu:



Dla małych odkształceń wartość siły sprężystości zapisuje się wzorem:

$$F_s = -kx$$

k – stała sprężystości, zależna od materiału sprężyny, jej kształtu i rozmiaru
x – odkształcenie (wydłużenie) sprężyny

Okres drgań harmonicznych – czas potrzebny do zakończenia jednego pełnego cyklu drgania harmonicznego.

W ruchu harmonicznym **okres drgań** jest określony wzorem: $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Związek częstości kątowej drgań z częstotliwością drgań jest następujący: $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$.

Wzór na **prędkość w ruchu harmonicznym**:

$$v(t) = A\omega\cos(\omega t + \varphi_0)$$

Wzór na **przyspieszenie w ruchu harmonicznym**:

$$a(t) = -A\omega^2\sin(\omega t + \varphi_0)$$

Z porównania powyższego wzoru z równaniem ruchu harmonicznego wynika zależność:

$$a = -\omega^2 x$$

Siła w ruchu harmonicznym

Zgodnie z II zasadą dynamiki siła F jest iloczynem masy ciała m i jego przyspieszenia a:

$$F = ma$$

Przyspieszenie ciała w ruchu harmonicznym wyraża się wzorem $a = -A\omega^2\sin(\omega t)$, więc siła działająca na ciało musi być równa:

$$F = -mA\omega^2\sin(\omega t)$$

A – amplituda drgań
ω – częstość kołowa
ωt – faza drgań

Wyrażenie $A\sin(\omega t)$ jest wychyleniem ciała – x, więc **siłę harmoniczną** można zapisać następująco:

$$F_h = -m\omega^2 x$$

W przypadku drgań ciała o masie m doczepionego do sprężyny o stałej sprężystości k, gdy te drgania odbywają się wzdłuż osi x:

$$F_s = F_h$$

$$-kx = -m\omega^2 x$$

5.2. Energia w ruchu harmonicznym

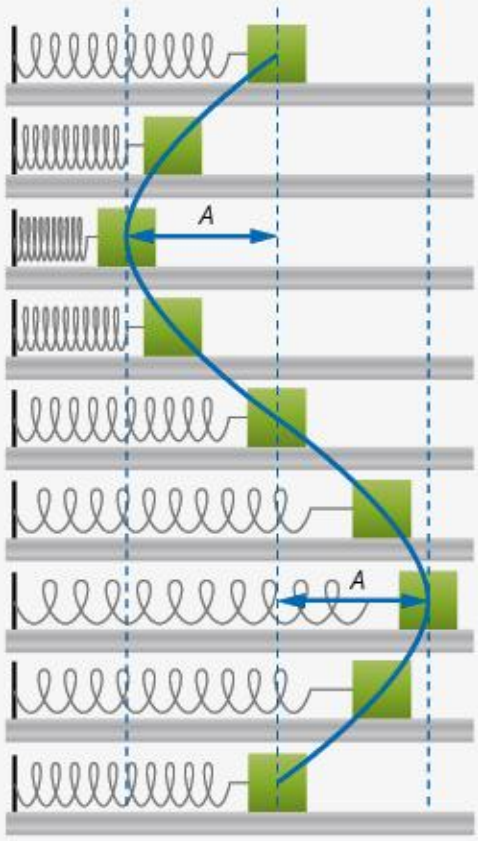
Gdy ruch odbywa się bez żadnych strat energii na pokonywanie oporów, to całkowita energia E_c równa sumie energii kinetycznej i potencjalnej w każdym położeniu (w dowolnej chwili) jest równa energii dostarczonej oscylatorowi przy jego uruchamianiu i wynosi

$$W = \frac{1}{2}kA^2$$

Dla dowolnej chwili:

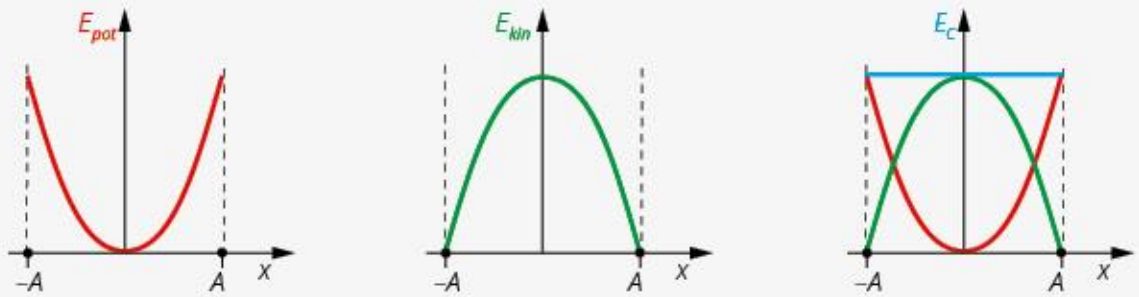
– energia potencjalna $E_{pot} = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2 \sin^2 \omega t$,

– energia kinetyczna $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2 \omega t$.



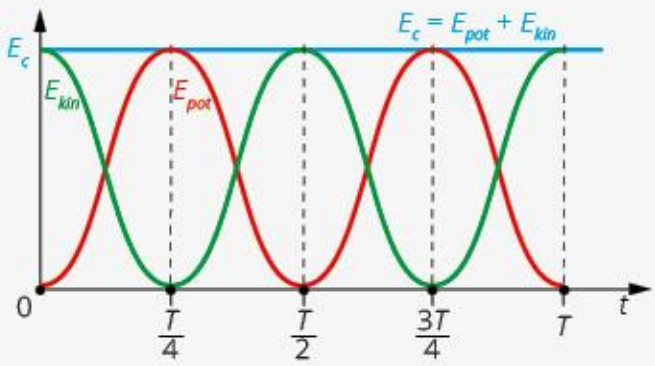
Energia całkowita jest proporcjonalna do kwadratu amplitudy:

$$E_c = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2$$



$E_{pot} = \frac{1}{2}kx^2$ $\qquad$ $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$ $\qquad$ $E_c = \frac{1}{2}kA^2$

Zależność obu rodzajów energii od wychylenia jest funkcją kwadratową.



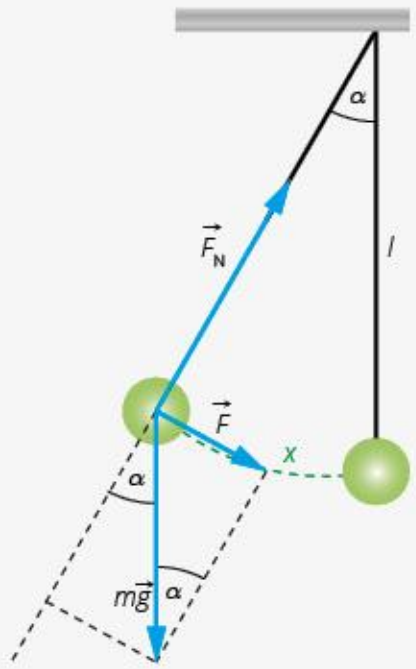
5.3. Wahadło matematyczne

Wahadło matematyczne – punkt materialny zawieszony na nieważkiej i nierozciągliwej nici wychylonej z położenia równowagi o kąt α.

Na rysunku przedstawiono siły działające na wahadło matematyczne wychylone z położenia równowagi o kąt α. Siła F, wymuszająca ruch harmoniczny, jest równa:

$$F = -mg \sin\alpha$$

W przypadku małych kątów (mniejszych niż 7°) można zastosować przybliżenie $\sin\alpha = \alpha$, więc można napisać, że $F = -mg\alpha$.



Zgodnie z II zasadą dynamiki siła jest iloczynem masy i przyspieszenia: $F = ma$. Po porównaniu dwóch ostatnich równań otrzymamy:

$$ma = -mg\alpha$$

$$a = -g\alpha$$

Przyspieszenie w ruchu harmonicznym oraz kąt α są odpowiednio równe:

$$a = -\omega^2 x$$

$$\alpha = \frac{x}{l}$$

Stąd: $-\omega^2 x = -g\frac{x}{l}$

Po prostych przekształceniach otrzymamy $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$, ponieważ $\omega = \frac{2\pi}{T}$, to okres drgań wahadła matematycznego jest równy:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Okres wahadła nie zależy od jego masy, a jedynie od jego długości.

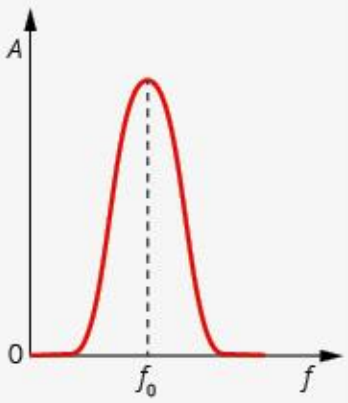
5.4. Drgania wymuszone. Rezonans mechaniczny

Każdy układ ma charakterystyczny dla siebie okres drgań, a także częstotliwość.

Częstotliwość drgań własnych układu (f_0) zależy m.in. od masy, momentu bezładności, długości oraz współczynnika sprężystości.

Jeżeli oscylator harmoniczny jest pobudzany do drgań siłą, która jest okresowo zmienna, to porusza się on z częstotliwością wymuszenia (f). W takim przypadku amplituda drgań (A) silnie zależy od częstotliwości.

Jeżeli częstotliwość zmian siły wymuszającej drgania jest równa częstotliwości drgań własnych układu ($f = f_0$), to amplituda osiąga wartość maksymalną – wówczas zachodzi zjawisko **rezonansu**.



Rezonans wyróżnia się wyjątkowo intensywnym pochłanianiem energii pochodzącej z pracy wykonywanej przez siłę wymuszającą drgania układu.

Przykładem rezonansu jest huśtawka – można wprawić ją w ruch harmoniczny stosunkowo niewielką siłą, a mimo to huśtawka ma dużą amplitudę drgań. Taki stan osiąga się wówczas, gdy każde pchnięcie huśtawki odbywa się w kierunku zgodnym z jej ruchem oraz gdy częstotliwość pchnięć jest zgodna z częstotliwością ruchu własnego huśtawki.

5.5. Fale mechaniczne

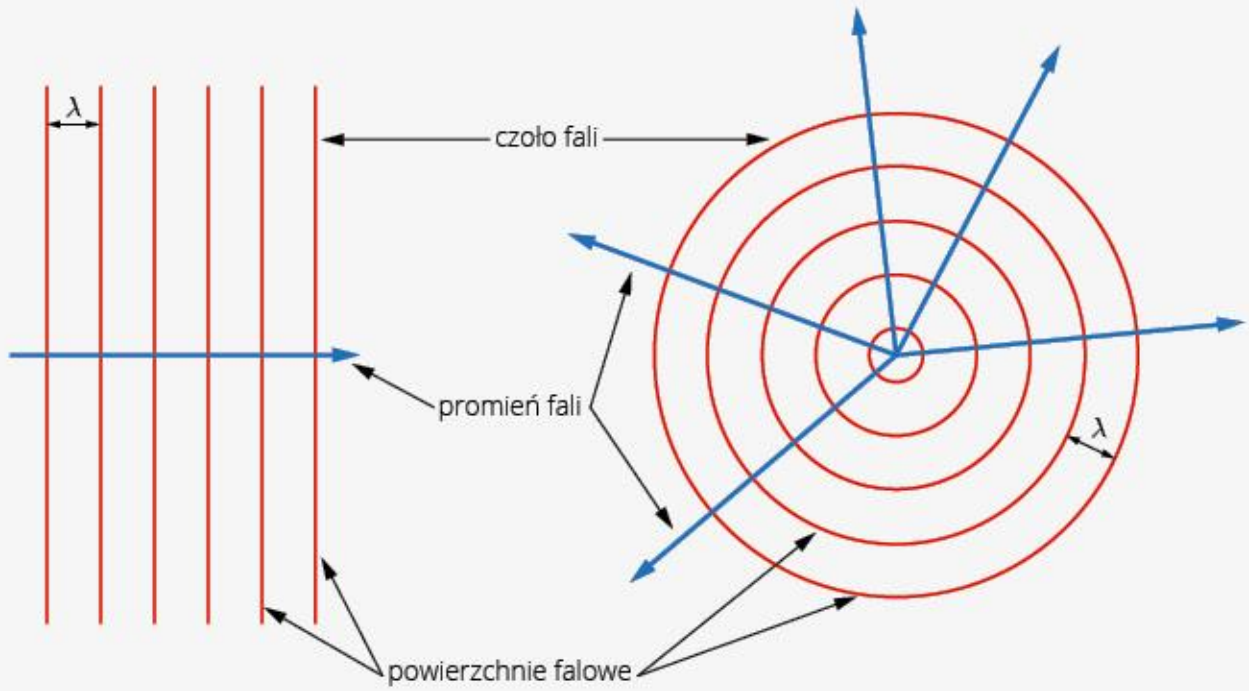
Jeżeli wychylimy jakiś fragment ośrodka sprężystego z jego położenia równowagi, to będzie on wykonywał drgania wokół tego położenia. Dzięki właściwościom sprężystym ośrodka drgania są przekazywane na kolejne części ośrodka, które zaczynają drgać. W ten sposób zaburzenie przechodzi przez cały ośrodek.

Ruch falowy – rozchodzenie się zaburzenia w ośrodku.

Ze względu na kierunek drgań cząstek ośrodka względem kierunku rozchodzenia się fale dzielimy na **fale podłużne** i **fale poprzeczne**. Fala jest podłużna, gdy kierunek drgań cząstek ośrodka jest równoległy do kierunku rozchodzenia się fali i zarazem do kierunku transportu energii; np. fale dźwiękowe w powietrzu, drgania naprzemiennie ściskanej i rozciąganej sprężyny.

O punktach ośrodka mających takie samo wychylenie, znajdujących się po tej samej stronie położenia równowagi i poruszających się w tę samą stronę mówimy, że mają **jednakowe fazy**. W przypadku fali przestrzennej punkty o jednakowej fazie tworzą całą powierzchnię (np. kulistą), którą nazywamy **powierzchnią falową**. Dla fali płaskiej powierzchnie falowe mogą być płaszczyznami.

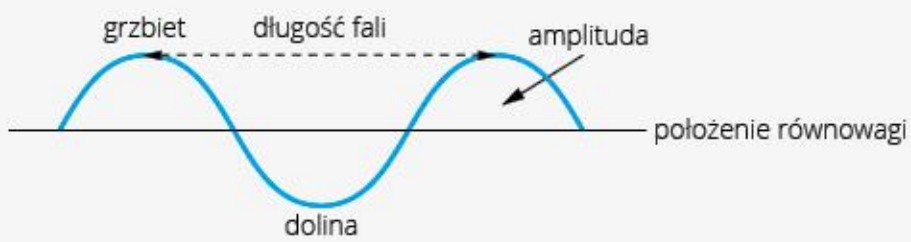
Jeżeli w przestrzeni rozchodzi się impuls falowy, to w każdej chwili możemy utworzyć powierzchnię łączącą punkty, do których w tej właśnie chwili dotarła fala. Przesuwanie się tej powierzchni obrazuje rozchodzenie się fali. Taką powierzchnię określa się jako **czoło fali** (lub powierzchnię falową), a każdą linię prostą, prostopadłą do czoła fali, wskazującą kierunek ruchu fali nazywa się **promieniem fali**. Ze względu na kształt powierzchni falowej wyróżnia się **fale płaskie** i **fale kuliste**.



Szybkość fali (*v*) jest stała w danym ośrodku, zatem grzbiety i doliny fali przesuwają się ruchem jednostajnym.

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$$

Długość fali (*l*) jest równa drodze, jaką przebywa fala w czasie jednego okresu (gdy cząstka ośrodka wykona jedno pełne drganie).



Ważną cechą fali jest przenoszenie przez nią energii. Ilość energii przenoszonej przez falę w czasie 1 s przez powierzchnię 1 m² ustawioną prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali nazywamy **natężeniem fali**.

Jednostką natężenia fali jest $\frac{W}{m^2}$.

Fala dźwiękowa jako przykład fali mechanicznej

Natężenie fali – moc fali, która przypada na jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali:

$$I = \frac{P}{S}$$

Jednostką natężenia fali jest $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$.

W przypadku fal kulistych mamy:

S – pole kuli, $S = 4\pi r^2$

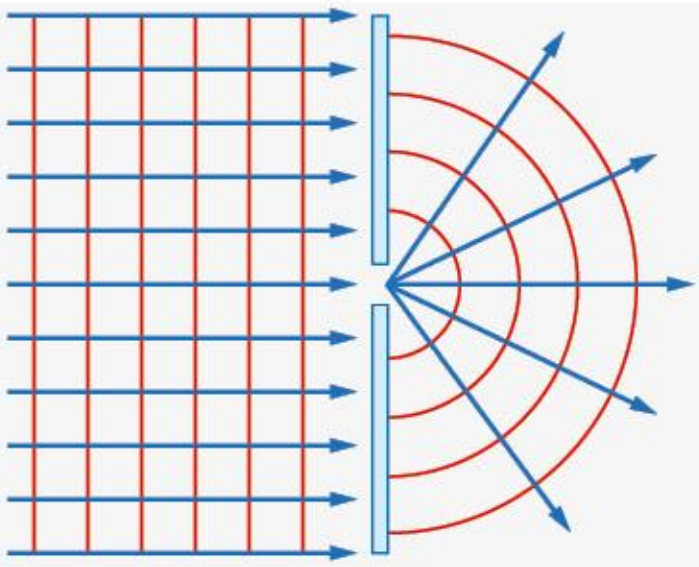
$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Zatem natężenie dźwięku jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości od źródła dźwięku.

Natężenie dźwięku jest wprost proporcjonalne do kwadratu amplitudy A drgań ośrodka.

$$I \sim A^2$$

5.6. Zasada Huygensa. Odbicie i załamanie fali

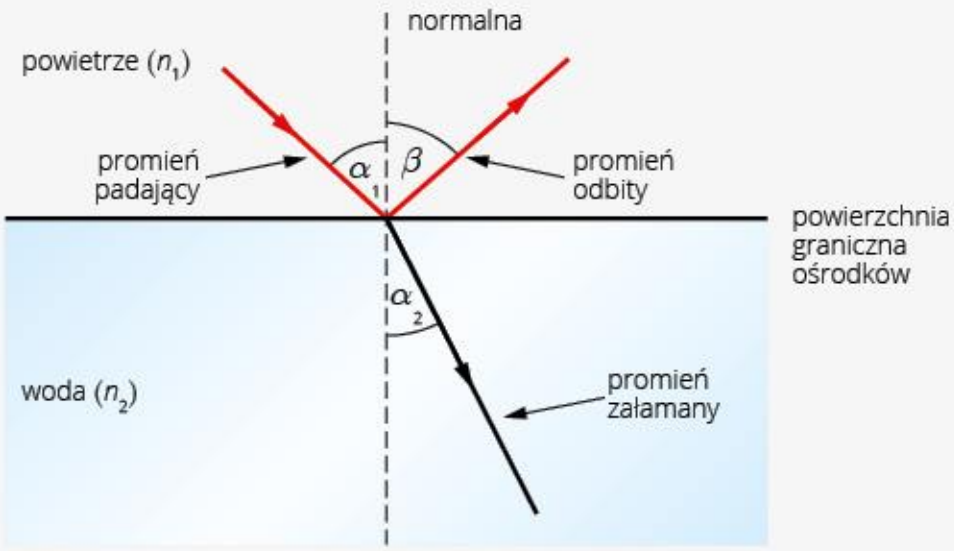


Zgodnie z **zasadą Huygensa** każdy punkt ośrodka, do którego dotarło czoło fali, można uważać za źródło nowej fali kulistej. Te nowe fale, nazywane **falami cząstkowymi**, się nakładają. Wypadkową powierzchnię falową tworzy powierzchnia styczna do powierzchni fal cząstkowych i tylko ją obserwujemy w ośrodku.

Odbicie fali polega na tym, że fala docierająca do granicy dwóch ośrodków zmienia swój kierunek i ponownie rozchodzi się w ośrodku, z którego dotarła. Czoło fali odbitej tworzy z płaszczyzną odbijającą taki sam kąt jak czoło fali padającej. Kierunki fal padającej i odbitej są określane przez podanie kątów, jakie tworzą promienie tych fal z prostopadłą (nazywaną również normalną) do powierzchni odbijającej. Kąt padania α_1 jest to kąt zawarty między promieniem fali padającej a prostą prostopadłą do powierzchni odbijającej. Kąt odbicia β jest to kąt zawarty między promieniem odbitej fali odbijającej a prostą prostopadłą do powierzchni odbijającej.

Prawo odbicia fali

Kąt padania fali jest równy kątowi odbicia, czyli kąt α_1 = kąt β. Promień fali padającej, promień fali odbitej i prosta prostopadła do powierzchni odbijającej leżą w tej samej płaszczyźnie.



Załamanie fali polega na zmianie kierunku rozchodzenia się fali przy jej przechodzeniu z jednego ośrodka do drugiego, w którym rozchodzi się z inną szybkością.

Zjawisko to możemy zaobserwować na powierzchni wody, gdy fala przechodzi z głębszej wody na płytszą.

Kąt α_2 między promieniem fali załamanej i prostą prostopadłą do powierzchni rozdzielającej dwa ośrodki, nazywamy **kątem załamania**.

Stosunek szybkości rozchodzenia się fali w obu ośrodkach $n_{2,1}$ nazywamy współczynnikiem załamania ośrodka drugiego względem pierwszego.

Prawo załamania fali (prawo Snelliusa)
Dla danych dwóch ośrodków stosunek sinusa kąta padania α_1 do sinusa kąta załamania α_2 jest stały i nazywa się współczynnikiem załamania ośrodka drugiego względem pierwszego $n_{2,1}$. Promień fali padającej, załamanej i prosta prostopadła do granicy dwóch ośrodków leżą na tej samej płaszczyźnie.

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{2,1} = \text{const}$$

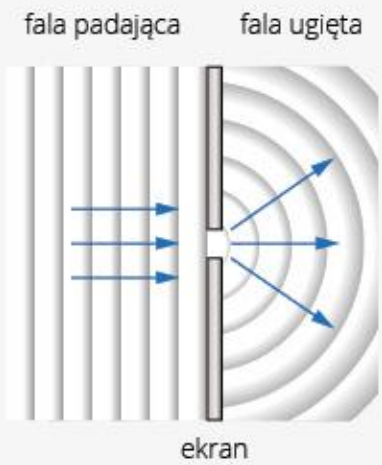
Przy przejściu fali z jednego ośrodka do drugiego jej okres i częstotliwość pozostają bez zmian. Zmienia się długość fali wskutek zmiany szybkości rozchodzenia się fali.

5.7. Ugięcie i interferencja fal. Fale stojące

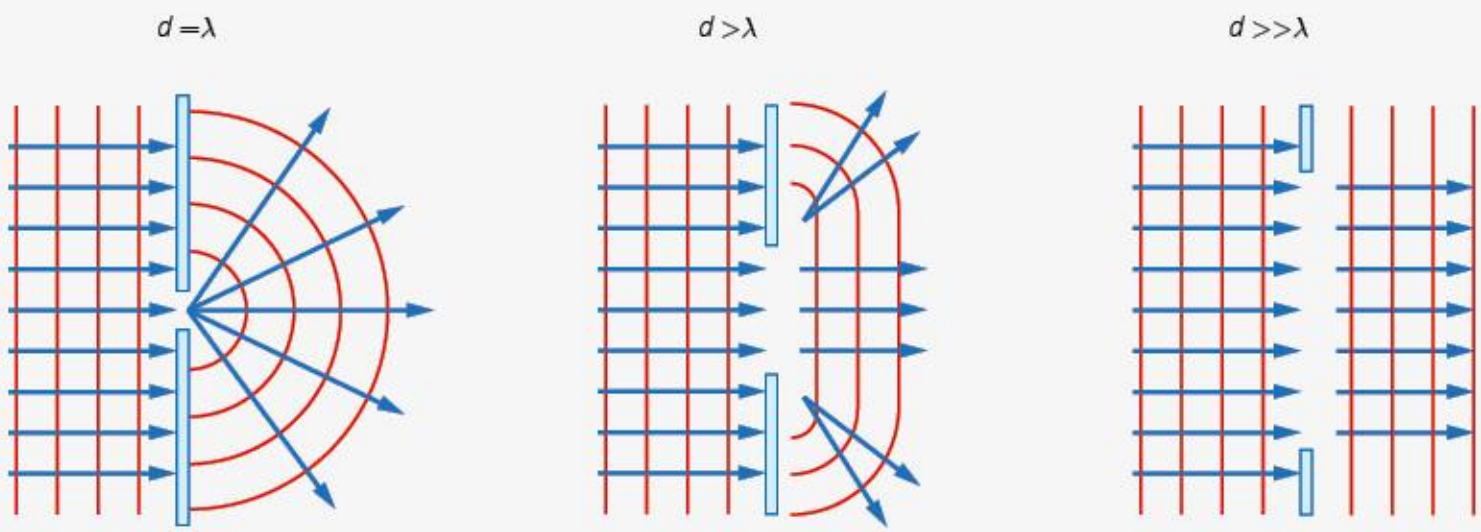
Dyfrakcja (ugięcie fali)

Dyfrakcja polega na zmianie kierunku rozchodzenia się fali w wyniku napotkania przez nią przeszkody, której wielkość jest porównywalna z długością fali.

Zjawisko **ugięcia fali** zachodzi wówczas, gdy fala płaska trafia na przeszkodę, a w przeszkodzie znajduje się szczelina albo szczeliny.



Jeśli wielkość szczeliny jest w przybliżeniu równa długości padającej na nią fali, to wówczas fala płaska po przejściu przez nią staje się **falą kolistą**. Gdy rozmiary szczelin są większe od długości fali, to ugięcie fali jest widoczne tylko na brzegach. W przypadku szczeliny o bardzo dużych rozmiarach nie obserwuje się zjawiska dyfrakcji.

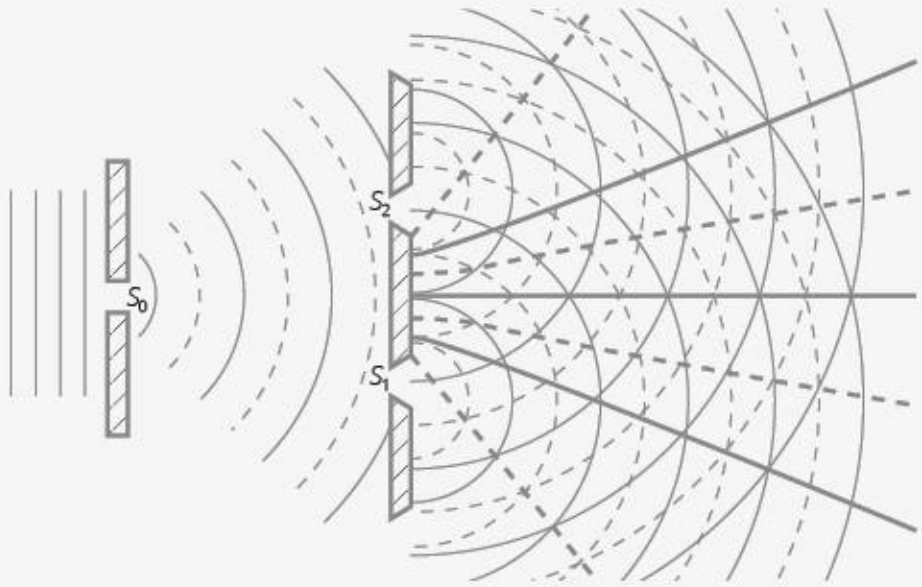


Zjawisko dyfrakcji opisuje **zasada Huygensa**, która mówi, że każdy punkt ośrodka, do którego dotrze fala, staje się źródłem nowej fali kolistej o tej samej częstotliwości jak fala padająca. Zgodnie z zasadą Huygensa, nowo powstałe fale nie mogą się rozchodzić w kierunku, z którego nadeszły. Wynikiem nałożenia się na siebie bardzo wielu fal kolistych jest fala płaska.

Zasada superpozycji
Jeżeli w danym ośrodku rozchodzi się więcej niż jedna fala, to wychylenie powstałej fali jest sumą algebraiczną wszystkich nakładających się wychyleń.

Interferencja fal

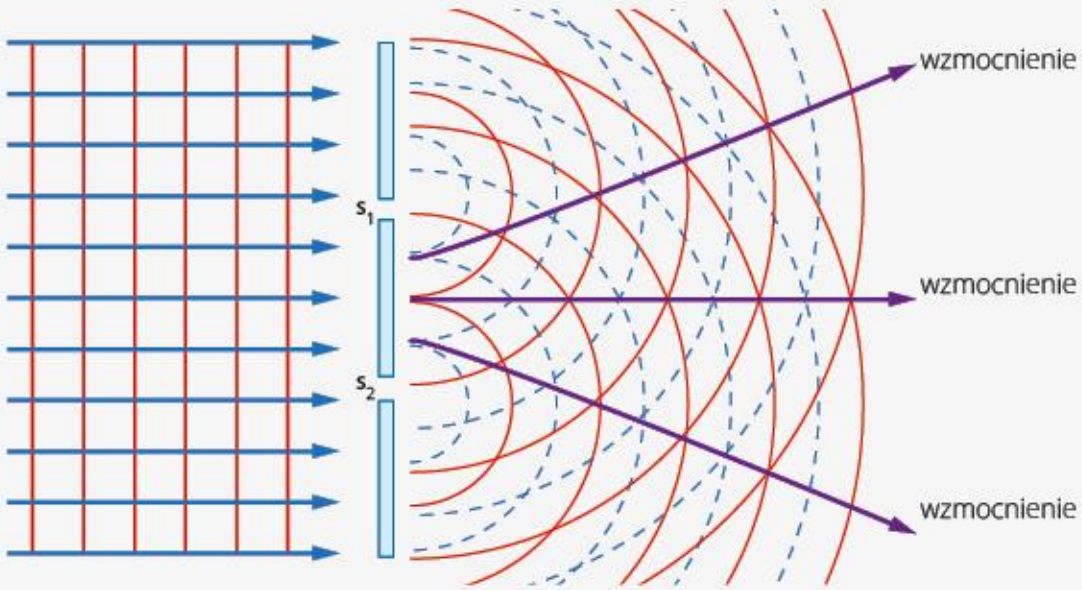
Interferencja fal jest szczególnym przypadkiem superpozycji fal. Gdy fala płaska przechodzi przez szczelinę, to w wyniku przejścia przez tę szczelinę powstaje nowa fala kolista. Gdy powstała fala kolista napotka ponownie na przeszkodę, w której będą dwie szczeliny, to wówczas powstaną dwie nowe fale koliste. Jeżeli te fale będą miały taką samą amplitudę i częstotliwość, nastąpi nałożenie się tych fal.

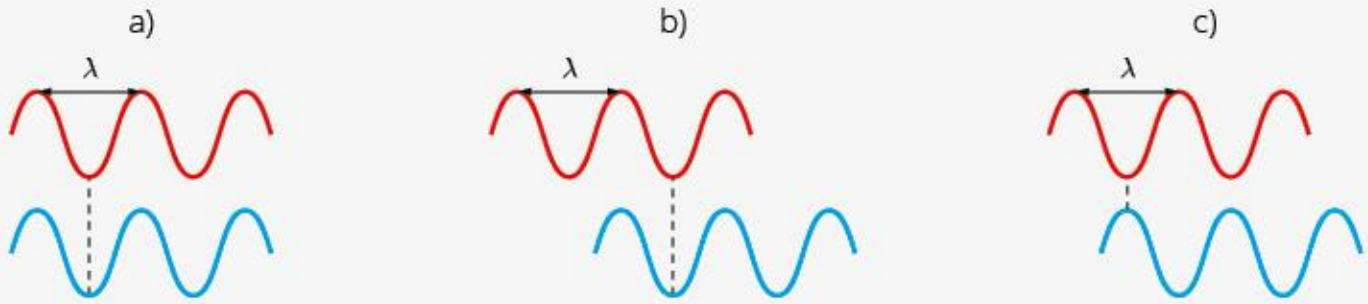


Interferencja fal, inaczej nakładanie się fal, jest to zjawisko polegające na zmianie amplitudy fal. Jeśli grzbiety dwóch fal się spotkają, to powstanie grzbiet wzmocniony – większy, jeśli spotka się grzbiet fali z doliną fali, to powstanie fala płaska.

Interferencję można zaobserwować na wszystkich rodzajach fal, czyli fal na wodzie, fal akustycznych, fal mechanicznych i fal elektromagnetycznych.

Gdy rozpatrujemy fale rozchodzące się w ośrodku sprężystym, to każda z cząsteczek jest poruszana przez każdą falę, dopiero wypadkowa faz tych fal pozwala wyliczyć, czy w danym miejscu wystąpiło wzmocnienie czy wygaszenie fali.





a) Fale w zgodnej fazie. b) Jeśli jedna fala jest przesunięta o długość fali lub całkowitą wielokrotność długości fali, to fale nadal są w zgodnej fazie. c) Jeśli jedna z fal jest przesunięta o połowę długości fali lub nieparzystą wielokrotność połowy długości fali, to fale są w przeciwnej fazie.

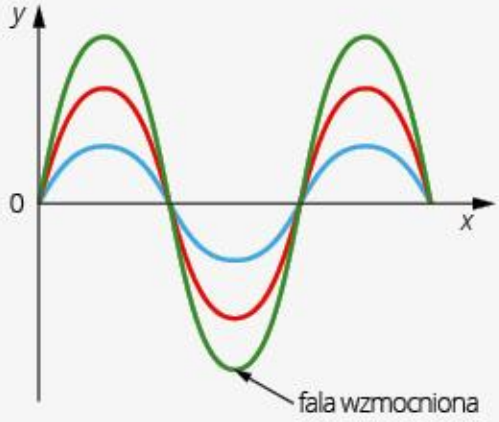
Wzmocnienie fali

Wzmocnienie fali występuje w miejscach, dla których różnica odległości od dwóch różnych źródeł jest równa całkowitej wielokrotności długości fali. Amplituda drgań osiąga wartość maksymalną $2A$.

Warunek na wzmocnienie fal, których źródła drgają w zgodnych fazach:

$$\Delta r = n \cdot \lambda$$

Δr – różnica dróg nakładających się fal
λ – długość fali
n – liczba naturalna ($n = 0, 1, 2, \ldots$)



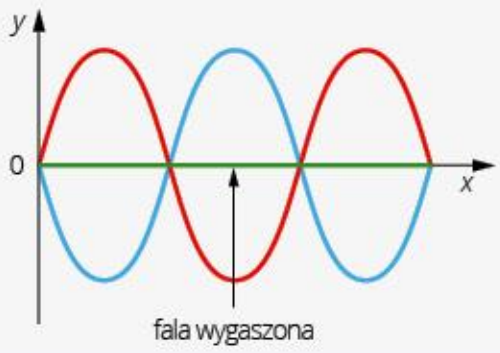
Wygaszenie fali

Wygaszenie fali występuje w punktach, dla których różnica odległości od obu źródeł fal jest równa nieparzystej wielokrotności połowy długości fali.

Warunek wygaszenia fal, których źródła drgają w zgodnych fazach:

$$\Delta r = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

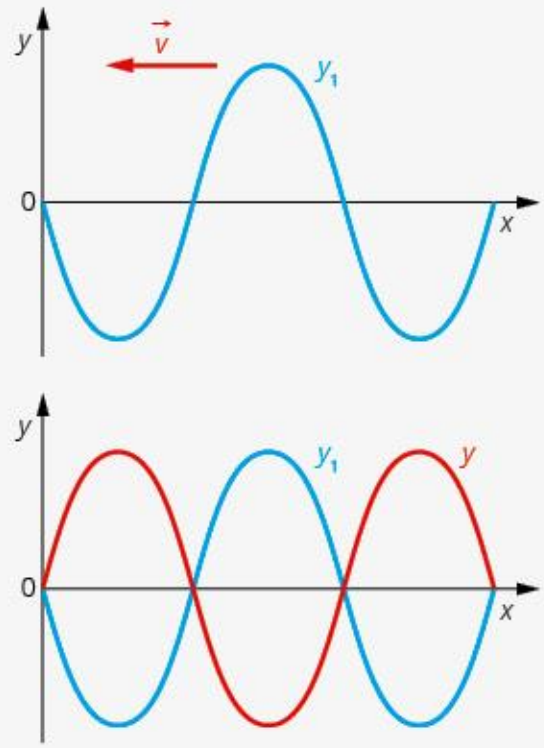
Δr – różnica dróg nakładających się fal
λ – długość fali
n – liczba naturalna ($n = 0, 1, 2, \ldots$)



Fala stojąca

Fala stojąca powstaje w wyniku nakładania się fal o tych samych długościach i amplitudach, lecz poruszających się w przeciwnych kierunkach.

Na ilustracji przedstawiono dwie fale o tych samych długościach i amplitudach, biegnące w przeciwnych kierunkach. Wynikiem ich interferencji (nałożenia się na siebie) jest fala stojąca.



5.8. Fale dźwiękowe

Źródłem dźwięku jest ciało drgające. Człowiek słyszy dźwięki o częstotliwościach od 16 Hz do 20 000 Hz. **Infradźwięki** – dźwięki o częstotliwości mniejszej niż 16 Hz. **Ultradźwięki** to dźwięki o częstotliwości większej niż 20 kHz.

Niektóre zwierzęta, np. pies, szczur, delfin, wieloryb, chomik, nietoperz, mogą emitować i słyszeć ultradźwięki. Są to fale o małej długości, w powietrzu poniżej ok. 15 cm.

Zastosowanie ultradźwięków:
- w przemyśle farmaceutycznym przy produkcji kremów i lekarstw oraz w przemyśle spożywczym do produkcji majonezu;
- do niszczenia bakterii i innych mikroorganizmów;
- w metalurgii do prześwietlania bloków i odlewów metalicznych w celu wykrywania wad;
- w hydrolokacji do określania głębokości dna morza oraz wykrywania skał i ławic ryb;
- w medycynie w urządzeniach zwanych ultrasonografami (do USG), dzięki którym uzyskujemy obraz narządów wewnętrznych.

Cechy fali dźwiękowej:
- wysokość dźwięku – zależy od częstotliwości dźwięku: im częstotliwość drgań jest większa, tym dźwięk jest wyższy;
- natężenie – zależy od amplitudy: im jest ona większa, tym dźwięk głośniejszy;
- barwa – zależy od źródła dźwięku.

Prędkość rozchodzenia się dźwięku w różnych ośrodkach

guma – 17 $\frac{m}{s}$ do 30 $\frac{m}{s}$	wodór – 1284 $\frac{m}{s}$	sosna – 4760 $\frac{m}{s}$
chlor – 206 $\frac{m}{s}$	rtęć – 1500 $\frac{m}{s}$	jodła – 4890 $\frac{m}{s}$
dwutlenek węgla – 259 $\frac{m}{s}$	woda – 1500 $\frac{m}{s}$	stal – 5100 $\frac{m}{s}$ –6000 $\frac{m}{s}$
powietrze – 340 $\frac{m}{s}$	ebonit – 2400 $\frac{m}{s}$	szkło – 6000 $\frac{m}{s}$
korek – 500 $\frac{m}{s}$	lód – 3300 $\frac{m}{s}$	aluminium – 6300 $\frac{m}{s}$
hel – 965 $\frac{m}{s}$	mosiądz – 3500 $\frac{m}{s}$	diament – 18 000 $\frac{m}{s}$
etanol – 1180 $\frac{m}{s}$	beton – 3800 $\frac{m}{s}$	

Dźwięki możemy podzielić na **naturalne**: mowa ludzka, dźwięki wydawane przez organizmy żywe, szum wody, wiatru i drzew, grzmoty, oraz **sztuczne**: odgłosy maszyn i instrumentów muzycznych, pojazdów samochodowych, samolotów, wież wiertniczych.

Zjawisko Dopplera dla fal akustycznych polega na pozornej zmianie częstotliwości odbieranej fali akustycznej z powodu ruchu słuchacza lub źródła fali akustycznej.

$$f_{ob} = f_{źr} \frac{v_d \mp v_{ob}}{v_d \pm v_{źr}}$$

v_d – szybkość fali akustycznej

v_{ob} – szybkość słuchacza

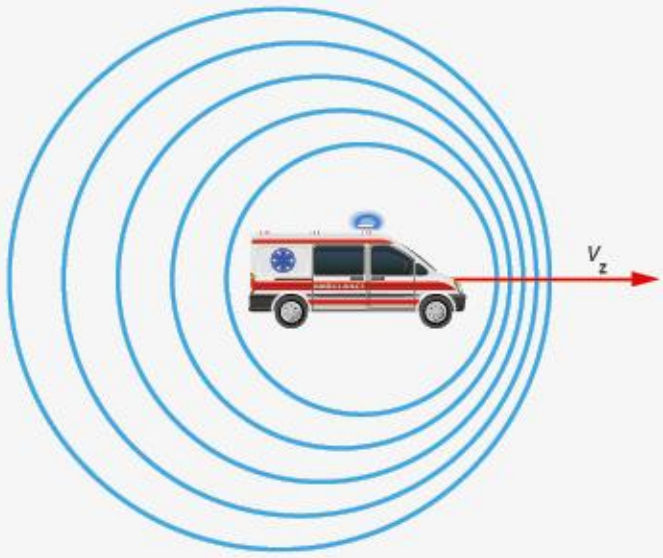
$v_{źr}$ – szybkość źródła dźwięku

f_{ob} – częstotliwość fali odbieranej przez słuchacza

$f_{źr}$ – częstotliwość fali akustycznej emitowanej przez źródło dźwięku

Znaki górne w liczniku i mianowniku odpowiadają oddalaniu się źródła dźwięku i słuchacza.
Znaki dolne w liczniku i mianowniku odpowiadają zbliżaniu się źródła dźwięku i słuchacza.

Powyższy wzór jest słuszny, gdy szybkość słuchacza i szybkość źródła dźwięku są mniejsze od szybkości dźwięku w danym ośrodku.



Zjawisko **rezonansu** polega na tym, że jedno ciało przekazuje drgania drugiemu ciału wówczas, gdy częstotliwość drgań wysyłanych drugiemu ciału jest zgodna z częstotliwością drgań ciała je wytwarzającego.

Echo powstaje w wyniku odbicia się fali dźwiękowej; polega na kilkakrotnym słyszeniu tego samego dźwięku.

Pogłos polega na przedłużeniu czasu trwania dźwięku; polega na dotarciu do ucha dźwięku odbitego od powierzchni położonej w różnej odległości od źródła i odbiornika. Powstaje najczęściej w pomieszczeniach zamkniętych.

6

TERMODYNAMIKA

6.1. Cząsteczkowa budowa materii

Materia jest zbudowana z cząsteczek nazywanych **molekułami** lub **drobinami**. Rozmiar cząsteczki jest rzędu nanometra. **Cząsteczki** są zbudowane atomów. **Atomy** tego samego rodzaju tworzą **pierwiastek**.

Substancje, których cząsteczki składają się z różnych atomów, nazywamy **związkami fizycznymi**. Przykładem związku fizycznego jest woda (w skład cząsteczki wchodzą atomy dwóch pierwiastków: wodoru i tlenu). Substancje mogą występować w trzech stanach skupienia: **stałym**, **ciekłym** oraz **lotnym** (gazowym).

Teoria kinetyczno-cząsteczkowej budowy materii mówi, że każda substancja jest zbudowana z cząsteczek, a cząsteczki tworzące dane ciało znajdują się w nieustannym chaotycznym ruchu. W zależności od substancji odległość między cząsteczkami jest różna. W ciałach stałych odległość jest bardzo mała, a w gazach – duża. Między cząsteczkami występują oddziaływania (siły międzycząsteczkowe). Największe oddziaływania występują w ciałach stałych, a najmniejsze – w gazach.

6.2. Model gazu doskonałego. Podstawowy wzór teorii kinetyczno-molekularnej gazu

Gaz doskonały to gaz spełniający równanie stanu Clapeyrona. Gaz doskonały jest modelem skonstruowanym przy następujących założeniach:
- brak oddziaływań między cząsteczkami gazu;
- znikoma objętość cząsteczek (cząsteczki gazu są rozważane jako punkty materialne mające jednakową masę);
- cząsteczki gazu poruszają się prostoliniowo, a wskutek przypadkowych zderzeń zmieniają kierunek;
- zderzenia cząsteczek gazu są doskonale sprężyste;
- średnia energia kinetyczna cząsteczek jest wprost proporcjonalna do temperatury bezwzględnej.

6.3. Temperatura. Równanie stanu gazu doskonałego

Ciała spotykane na co dzień składają się z atomów, które w wielu substancjach są połączone w cząsteczki. Cząsteczki w ciele stałym drgają wokół położeń równowagi, natomiast w cieczy i w gazach poruszają się po całej objętości naczynia. W ciele stałym i w cieczy odległości między cząsteczkami są niewielkie. W gazie odległości są duże.

Zjawisko **dyfuzji**, czyli samorzutne mieszanie się cząsteczek jednej substancji z cząsteczkami drugiej substancji, wynika z chaotycznego ruchu cząsteczek – **ruchy Browna**.

Im szybszy jest ruch cząsteczek, tym wyższa temperatura ciała. **Temperatura** jest miarą średniej energii kinetycznej cząsteczek, z których jest zbudowane ciało.

Zmianę objętości można uzyskać przez zmianę temperatury ciała. Ciała zwiększają swoją objętość podczas ogrzewania, czyli podczas rozszerzalności cieplnej (rozszerzalności temperaturowej) ciał. Ciała stałe rozszerzają się pod wpływem wzrostu temperatury. Wyróżniamy rozszerzalność temperaturową ciał stałych liniową i objętościową.

Na skutek wzrostu temperatury cieczy zwiększa się jej objętość. Gdy temperatura spada, objętość cieczy się zmniejsza. To zjawisko nazywamy **rozszerzalnością objętościową cieplną**.

Wyjątkiem jest woda, która wraz ze wzrostem temperatury od 0°C do 4°C zmniejsza swoją objętość. Dzięki temu przy dnie głębokich jezior temperatura wody jest stała, co umożliwia organizmom przeżycie zimy.

Dzięki nietypowej rozszerzalności cieplnej wody, a także dzięki temu, że lód pływa po wodzie, na dnie głębokich jezior woda nie zamarza nawet w zimie.

Woda ma duże ciepło właściwe w stosunku do innych substancji, z którymi mamy do czynienia na co dzień. Dodatkowo odparowanie 1 kg wody wymaga więcej energii niż podgrzewanie jej od 0°C do 100°C (wrzenia). Natomiast stopienie 1 kg lodu wymaga niewiele mniejszej energii niż podgrzewanie powstałej wody do 100°C. Duże wartości ciepła właściwego, ciepła topnienia i ciepła parowania wody wpływają na złagodzenie klimatu, ponieważ powodują zmniejszenie różnic temperatury między dniem a nocą, a także między porami roku.

Człowiek, jak każde zwierzę stałocieplne, musi usuwać z organizmu nadmiar ciepła. Osiągamy to dzięki parowaniu potu oraz wydychaniu pary wodnej. Dlatego pocimy się intensywniej podczas wysiłku. Mięśnie mają niewielką sprawność i znaczną część energii dostarczonej w pożywieniu zamieniają na ciepło, a nie na użyteczną pracę.

Gdy wilgotność powietrza jest duża, to ten mechanizm działa słabiej. Dlatego w wilgotny dzień czujemy się gorzej niż przy tej samej temperaturze, ale mniejszej wilgotności. Nadmiaru ciepła pozbywamy się, wydychając parę wodną. Dla zwierząt, które nie mają gruczołów potowych, wydychanie pary i odparowywanie śliny to główne sposoby chłodzenia organizmu.

Rozszerzalność objętościowa cieplna gazu polega na zmianie jego objętości przy stałym ciśnieniu.

Równanie gazu doskonałego określa związek między temperaturą, ciśnieniem i objętością.

$$pV = nRT$$

p – ciśnienie
V – objętość
n – liczba moli gazu
T – temperatura
R – stała gazowa wynosi $8{,}314\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol \cdot K}}$, stała gazowa może przyjąć postać $R = N_A k$

N_A – **liczba Avogadra** – liczba cząstek (np. cząsteczek, atomów, jonów, elektronów) w jednym molu dowolnej substancji: $N_A = 6{,}022137 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$.

Średnia energia kinetyczna pojedynczej cząsteczki wynosi:

$$E_{k\,śr} = \frac{m}{2} v_{śr}^2.$$

Związek między temperaturą a średnią energią kinetyczną nie zależy od struktury cząsteczki i wynosi:

$$E_{k\,śr} = \frac{3}{2} kT$$

k – **stała Boltzmanna**, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$

Średnia energia kinetyczna cząsteczek gazu doskonałego jest wprost proporcjonalna do temperatury bezwzględnej gazu.

Ciśnienie gazu jest proporcjonalne do liczby cząsteczek gazu N w jednostce objętości i średniej energii kinetycznej cząsteczki:

$$p = \frac{2}{3}\frac{N}{V} E_{k\,śr}$$

$$p = \frac{nN_A}{V} kT$$

$$R = kN_A$$

R – stała gazowa

Dla n moli gazu doskonałego związek między parametrami p, V, T nazywamy **równaniem Clapeyrona**.

$$pV = nRT$$

$$\frac{pV}{T} = const$$

Dla stałej masy gazu doskonałego stosunek iloczynu ciśnienia i objętości do temperatury w skali Kelwina jest stały.

6.4. Energia wewnętrzna i ciepło

Energia wewnętrzna ciała – suma energii kinetycznych wszystkich cząsteczek, z których jest zbudowane ciało i energii potencjalnych związanych z wzajemnym oddziaływaniem tych cząsteczek.

Temperatura ciała jest miarą średniej energii kinetycznej cząsteczek, z których jest zbudowane ciało.

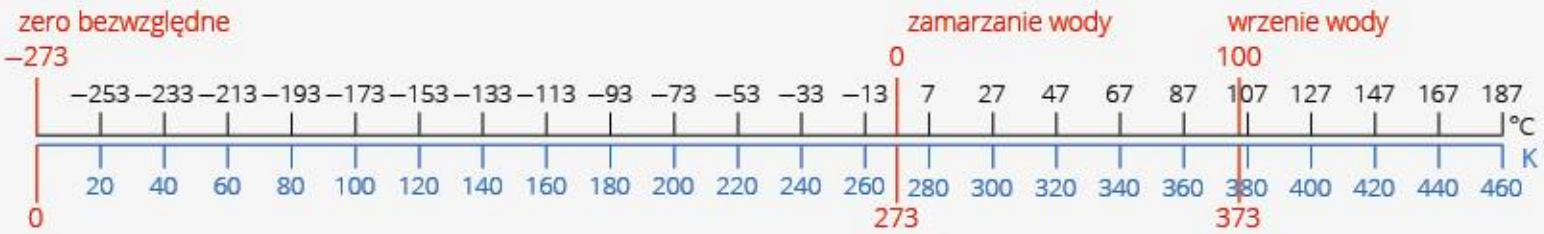
Jednostką temperatury w układzie SI jest kelwin (K).

$$0\ \mathrm{K} = -273°\mathrm{C}$$

Temperatura 0 K jest najniższą teoretycznie możliwą temperaturą we Wszechświecie i nosi nazwę **zera bezwzględnego**.

W Polsce na co dzień używa się skali temperatur Celsjusza.

$$0°\mathrm{C} = 273\ \mathrm{K}$$



Energia wewnętrzna ciała danego rodzaju i o danej temperaturze jest tym większa, z im większej liczby cząsteczek ciało się składa.

Energię ciała można zwiększyć, wykonując na nim pracę. Wzrost energii wewnętrznej następuje również wskutek przekazywania energii w postaci ciepła od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze.

Ciepło (Q) to ilość energii wewnętrznej przekazanej między ciałami o różnych temperaturach bez wykonywania pracy. Przepływ ciepła następuje od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze.

Sposoby przekazywania ciepła

Wyróżnia się trzy sposoby przekazu ciepła: **przewodnictwo cieplne**, **konwekcję** oraz **promieniowanie**. **Przewodnictwo cieplne** zachodzi przy bezpośrednim kontakcie ciał o różnych temperaturach, np. łyżeczkę wkładamy do szklanki z gorąca herbatą i po chwili łyżeczka robi się ciepła.

Konwekcja (unoszenie) polega na przemieszczeniu się ogrzanej cieczy (lub gazu) do góry, podczas gdy chłodniejsza ciecz (gaz) zajmuje miejsce ogrzanej, np. unoszenie się ogrzanego powietrza podczas grillowania.

Promieniowanie to sposób przekazywania ciepła na odległość, np. promieniowanie słoneczne.

Ciepło właściwe

Ilość pobranego przez ciało ciepła potrzebna do zwiększenia temperatury o tę samą wartość zależy od rodzaju substancji, z której jest zbudowane ciało.

Ciepło pobrane przy ogrzewaniu substancji o masie m, aby jej temperatura wzrosła o ΔT, można obliczyć ze wzoru:

$$Q = mc\Delta T$$

Q – ciepło pobrane przez ciało
m – masa ciała
c – ciepło właściwe

ΔT – przyrost temperatury

Ciepło właściwe c określa, ile energii trzeba dostarczyć, aby zwiększyć temperaturę 1 kg danej substancji o 1 stopień (1 K lub o 1°C).

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Jednostką ciepła właściwego w układzie SI jest $1\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}}$.

6.5. Pierwsza zasada termodynamiki. Praca przy zmianie objętości gazu

Pierwsza zasada termodynamiki

Jeżeli praca wykonana nad ciałem prowadzi w całości do przyrostu energii wewnętrznej, to całkowity przyrost energii wewnętrznej ciała jest równy sumie pracy wykonanej nad ciałem i pobranego ciepła.

$$\Delta U = Q + W$$

ΔU – zmiana energii wewnętrznej ciała
Q – ciepło dostarczone do ciała
W – praca wykonana nad ciałem

Jednostką energii wewnętrznej jest dżul (J).

Pamiętaj:
$\Delta U > 0$, gdy energia wewnętrzna ciała wzrasta
$\Delta U < 0$, gdy energia wewnętrzna ciała maleje
$\Delta U = 0$, gdy energia wewnętrzna ciała się nie zmienia

$Q > 0$, gdy ciało pobiera ciepło z otoczenia
$Q < 0$, gdy ciało oddaje ciepło
$Q = 0$, gdy nie ma wymiany ciepła z otoczeniem

$W > 0$, gdy pracę nad ciałem wykonuje siła zewnętrzna
$W < 0$, gdy układ wykonuje pracę kosztem energii wewnętrznej
$W = 0$, gdy praca nie została wykonana

6.6. Izochoryczna przemiana stałej masy gazu doskonałego

Przemiana izochoryczna – przemiana, podczas której gaz nie zmienia swojej objętości. Gdy $V = \text{const}$, to równanie gazu przyjmuje postać:

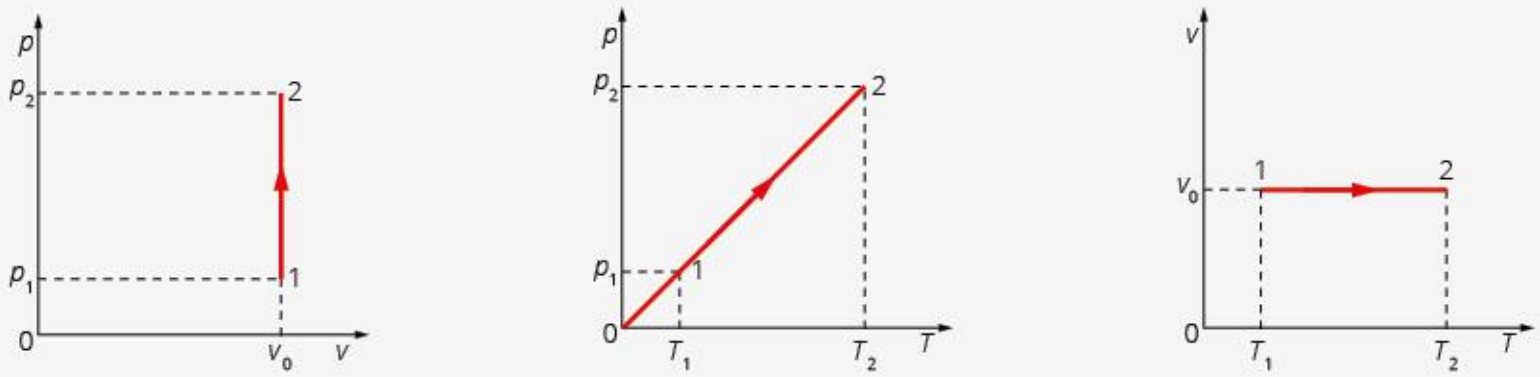
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Tę prawidłowość opisuje **prawo Charlesa**:

W izochorycznej przemianie gazu ciśnienie panujące w gazie jest wprost proporcjonalne do jego temperatury.

Z prawa Charlesa wynika, że podczas ogrzewania gazu rośnie temperatura gazu, a ze wzrostem temperatury rośnie jego ciśnienie; gdy gaz jest oziębiany, jego temperatura maleje, a także maleje jego ciśnienie.

Prawo Charlesa przedstawione za pomocą wykresów $p(V)$, $p(T)$, $V(T)$ podczas ogrzewania gazu o stałej objętości V_0:



6.7. Izobaryczna przemiana stałej masy gazu doskonałego

Przemiana izobaryczna – przemiana, podczas której gaz nie zmienia ciśnienia. Gdy $p = \text{const}$, to równanie gazu przyjmuje postać:

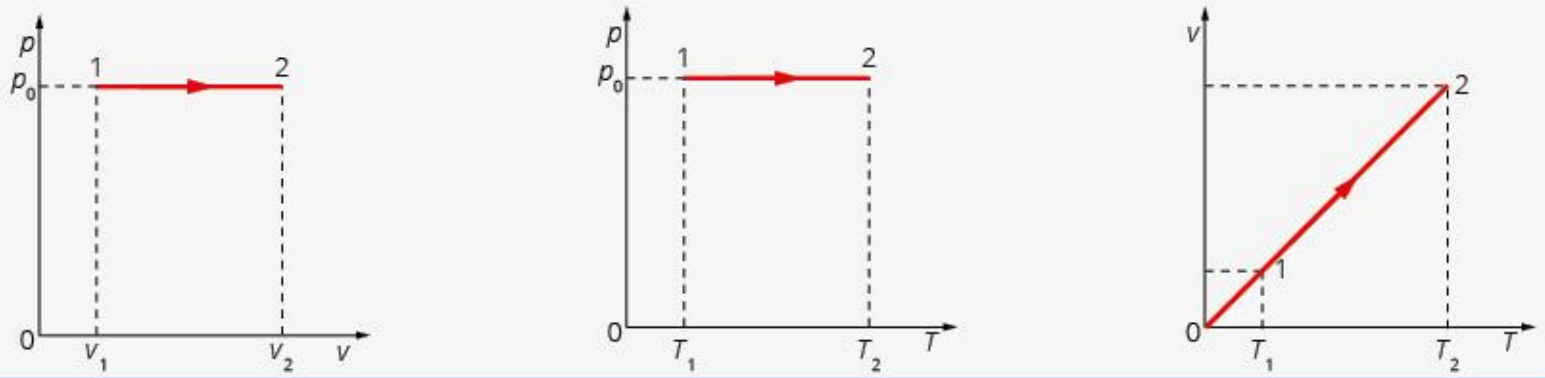
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Tę prawidłowość opisuje **prawo Gay-Lussaca:**

W izobarycznej przemianie gazu objętość gazu jest wprost proporcjonalna do jego temperatury.

Z prawa Gay-Lussaca wynika, że podczas ogrzewania gazu rośnie temperatura gazu, ze wzrostem temperatury nastąpi wzrost objętości tego gazu, a gdy będziemy ochładzać gaz, to będzie obniżała się temperatura gazu i automatycznie zmniejszy się objętość gazu.

Prawo Gay-Lussaca przedstawione za pomocą wykresów $p(V)$, $p(T)$, $V(T)$ podczas rozprężania gazu, którego ciśnienie wynosi p_0:



6.8. Izotermiczna przemiana stałej masy gazu doskonałego

Przemiana izotermiczna – przemiana, podczas której temperatura gazu się nie zmienia. Gdy $T = \text{const}$, to równanie gazu przyjmuje postać:

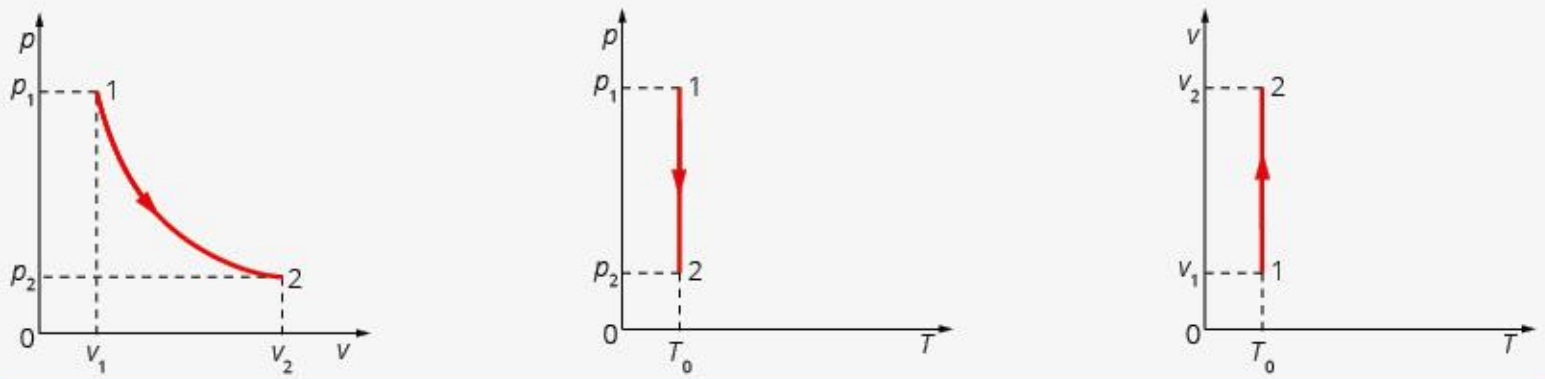
$$p_1V_1 = p_2V_2$$

Tę prawidłowość opisuje **prawo Boyle'a-Mariotte'a:**

W izotermicznej przemianie gazu ciśnienie panujące w gazie jest odwrotnie proporcjonalne do jego objętości.

Z prawa Boyle'a-Mariotte'a wynika, że podczas zmniejszania objętości gazu (sprężania gazu) wzrasta jego ciśnienie, a podczas rozprężania izotermicznego objętość gazu będzie rosła, a ciśnienie tego gazu będzie malało.

Prawo Boyle'a-Mariotte'a przedstawione za pomocą wykresów $p(V)$, $p(T)$, $V(T)$ podczas rozprężania gazu o temperaturze T_0.



6.9. Adiabatyczna przemiana gazu doskonałego

Przemiana adiabatyczna – przemiana, podczas której zmieniają się trzy parametry stanu gazu, czyli objętość, ciśnienie i temperatura. W czasie przemiany gaz nie wymienia ciepła z otoczeniem, dlatego podczas sprężania adiabatycznego rośnie temperatura gazu, a podczas rozprężania temperatura maleje. Podczas sprężania, gdy rośnie temperatura, rośnie również ciśnienie. Równanie przyjmuje postać:

$$p_1V_1^K = p_2V_2^K$$

K – **współczynnik adiabatyczny**, ta liczba zależy od rodzaju gazu: dla gazów jednoatomowych $K = 1{,}67$, dla gazów dwuatomowych $K = 1{,}4$, a dla gazów trzyatomowych $K = 1{,}3$

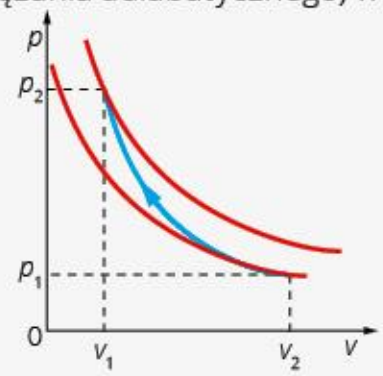
$$K = \frac{C_p}{C_V}$$

C_p – ciepło molowe przy stałym ciśnieniu
C_V – ciepło molowe przy stałej objętości

Tę prawidłowość opisuje **prawo (równanie) Poissona:**

$$pV^{K} = \text{const}$$

Wykres przemiany adiabatycznej (sprężania adiabatycznego) w układzie (p, V) wygląda następująco:



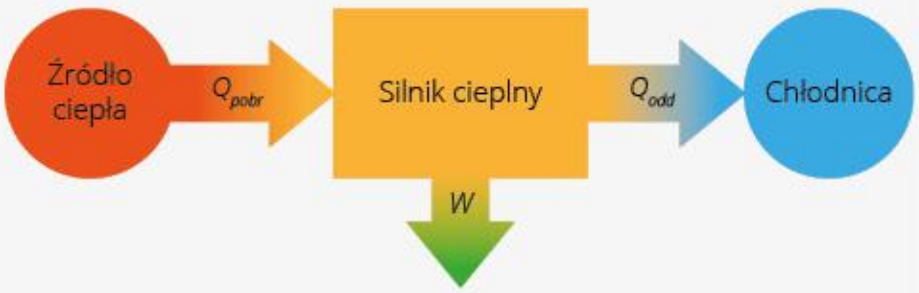
6.10. Silnik cieplny. Druga zasada termodynamiki

Silnik cieplny – urządzenie, które zamienia energię cieplną na pracę mechaniczną, pracujące w zamkniętym cyklu termodynamicznym.

Substancją roboczą w takim silniku jest gaz doskonały, który podlega przemianom termodynamicznym.

Aby silnik mógł pracować cyklicznie, musi nie tylko pobierać ciepło, lecz także je oddawać. Do pracy silnika niezbędne są zatem dwa zbiorniki: jeden o wysokiej temperaturze, z którego gaz pobiera ciepło (źródło ciepła), i drugi o niskiej temperaturze, do którego gaz oddaje ciepło (chłodnica).

Po każdym cyklu gaz, jako substancja robocza, powraca do stanu początkowego. Kosztem ciepła pobranego ze źródła (Q_{pobr}) jest wykonana przez silnik praca mechaniczna (W), a część tego ciepła jest zwracana do chłodnicy (Q_{odd}).



Sprawność silnika

Sprawność silnika informuje o tym, na ile efektywnie jest w nim wykorzystywane ciepło pobrane ze źródła ciepła. Sprawność silnika cieplnego jest równa stosunkowi wartości pracy W wykonanej przez silnik do ilości energii pobranej w czasie jednego cyklu.

$$\eta = \frac{|W_{calk}|}{|Q_{pob}|} = \frac{|Q_{pob}| - |Q_{odd}|}{|Q_{pob}|}$$

Druga zasada termodynamiki

Ciepło nie może samorzutnie przejść od ciała zimniejszego do ciała cieplejszego lub niemożliwe jest skonstruowanie urządzenia, które w całości zmieniłoby dostarczone ciepło w pracę mechaniczną. Wszystkie zjawiska w przyrodzie przebiegają w jednym kierunku, którego nie można odwrócić.

Zjawiska w przyrodzie są nieodwracalne:
- Ciepło samoistnie płynie od ciała cieplejszego do chłodniejszego. Nigdy odwrotnie.
- Dwa gazy lub dwie ciecze po zmieszaniu się nie rozdzielą się samodzielnie.
- Hamujący samochód całkowicie zamienia swoją energię mechaniczną na wewnętrzną (hamulce się ogrzewają). Nie obserwujemy procesu odwrotnego.
- Tylko część energii wewnętrznej można zamienić na mechaniczną. Część trzeba oddać do otoczenia.
- Gaz samoistnie rozpręży się z jednego do drugiego pustego naczynia. Sam nie wróci do pierwszego.

Druga zasada termodynamiki określa kierunek przemian termodynamicznych w przyrodzie.

W silniku idealnym wszystkie przebiegające procesy są odwracalne i nie ma strat związanych z niepożądanymi przemianami energii (tarcie, turbulencje).

Pompa ciepła – urządzenie, w którym, w wyniku dostarczonej z zewnątrz energii, ciepło z obszaru o niższej temperaturze jest przenoszone do obszaru o wyższej temperaturze.

Przykładem pompy ciepła są lodówka lub zamrażarka oraz klimatyzator.

W lodówkach ciepło jest odprowadzane z przechowywanych produktów (co powoduje obniżenie ich temperatury) do pomieszczenia znajdującego się z tyłu urządzenia, a w klimatyzatorze ciepło jest odprowadzane z wnętrza budynku na zewnątrz (w lecie) albo z zewnątrz do wnętrza (w zimie).

6.11. Zmiany stanów skupienia ciał

Substancja może wystąpić w trzech podstawowych **stanach skupienia**:
– w stanie stałym,
– w stanie ciekłym,
– w stanie lotnym.

Stan skupienia substancji zależy od ilorazu energii kinetycznej cząsteczek i energii oddziaływań między tymi cząsteczkami. Jeżeli ten iloraz jest mały, to materia występuje w stanie stałym. Jeżeli iloraz rośnie, to może nastąpić zmiana stanu skupienia, będąca tzw. przejściem fazowym.

Aby zmienić stan skupienia substancji, musimy dostarczyć energię (ciepło) albo substancja musi oddać ciepło do otoczenia. Zjawiska fazowe zachodzą w stałej temperaturze charakterystycznej dla danej substancji.

Wyróżniamy następujące zmiany stanu skupienia:
– krzepnięcie – przejście substancji ze stanu ciekłego do stanu stałego,
– topnienie – przejście substancji ze stanu stałego do stanu ciekłego,
– parowanie – przejście substancji ze stanu ciekłego do stanu lotnego,
– skraplanie – przejście substancji ze stanu lotnego do stanu ciekłego,
– sublimacja – przejście substancji ze stanu stałego do stanu lotnego,
– resublimacja – przejście substancji ze stanu lotnego do stanu stałego, z pominięciem stanu ciekłego.

Krzepnięcie lub topnienie danej substancji przy danym ciśnieniu zachodzą w tej samej temperaturze. Parowanie lub skraplanie zachodzi przy różnej temperaturze. Natomiast wrzenie, czyli gwałtowne parowanie, które zachodzi w całej objętości cieczy, zachodzi również w ściśle określonej wartości temperatury przy danym ciśnieniu.

Ciepło topnienia jest ilościowo równe ilości ciepła, które jest potrzebne, aby 1 kg substancji będącej w stanie stałym zamienić w ciecz (w temperaturze topnienia).

$$L_t = \frac{Q}{m}$$

Ciepło krzepnięcia jest ilościowo równe ilości ciepła, które jest potrzebne, aby 1 kg substancji będącej w stanie ciekłym zamienić w stan stały (w temperaturze krzepnięcia).

$$L_k = \frac{Q}{m}$$

Ciepło parowania jest ilościowo równe ilości ciepła, które jest potrzebne, aby 1 kg substancji będącej w stanie ciekłym zamienić w gaz (w temperaturze parowania).

$$L_p = \frac{Q}{m}$$

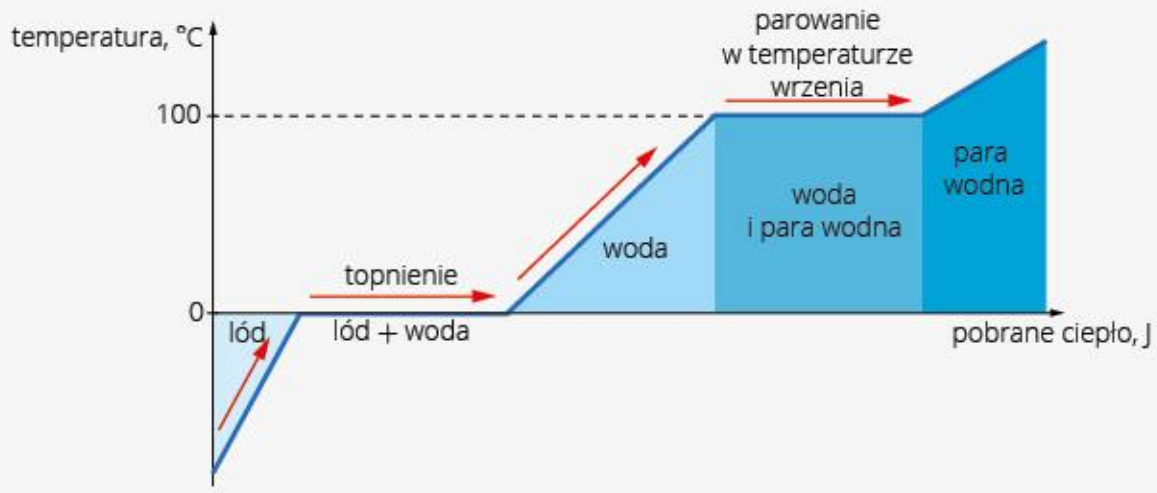
Ciepło skraplania jest ilościowo równe ilości ciepła, które jest potrzebne, aby 1 kg substancji będącej w stanie lotnym zamienić w ciecz (w temperaturze skraplania).

$$L_s = \frac{Q}{m}$$

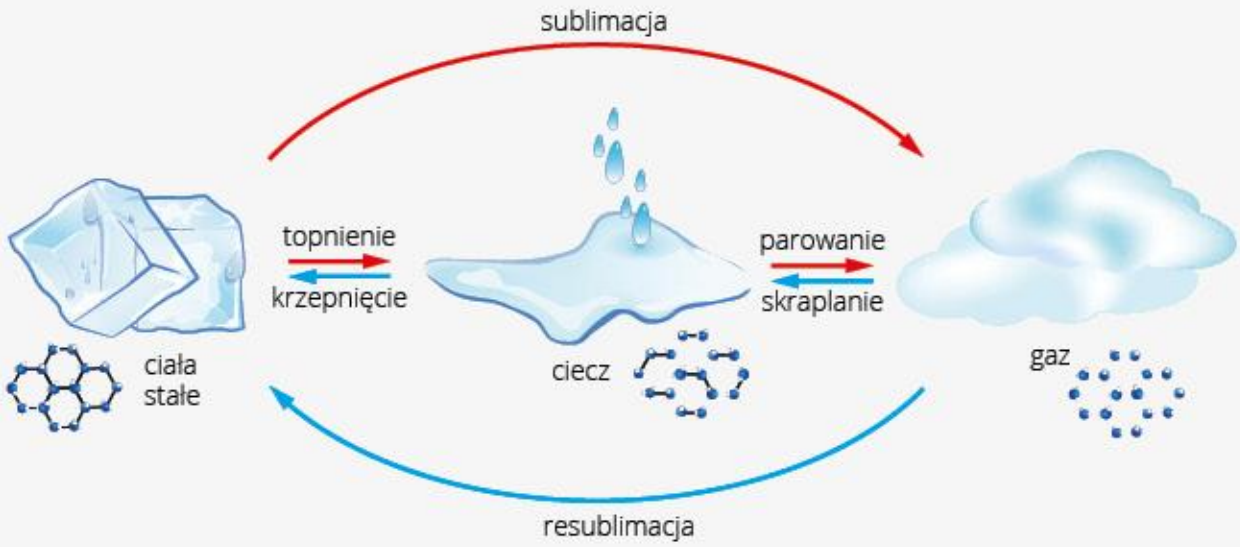
Ciała o regularnie uporządkowanym układzie atomów lub cząsteczek to ciała o budowie krystalicznej (kryształy), a ciała, w których atomy i cząsteczki są ułożone chaotycznie, to tzw. **ciała bezpostaciowe** (amorficzne).

Szybkość parowania zależy od:
– rodzaju cieczy,
– temperatury (im wyższa temperatura cieczy, tym szybciej ciecz paruje),
– ruchu powietrza w otoczeniu parującej cieczy (im wyższy ruch powietrza, tym szybciej ciecz paruje),
– wielkości powierzchni swobodnej cieczy (im większa powierzchnia, tym szybciej ciecz paruje),
– wilgotności powietrza (im wyższa wilgotność, tym wolniejsze parowanie).

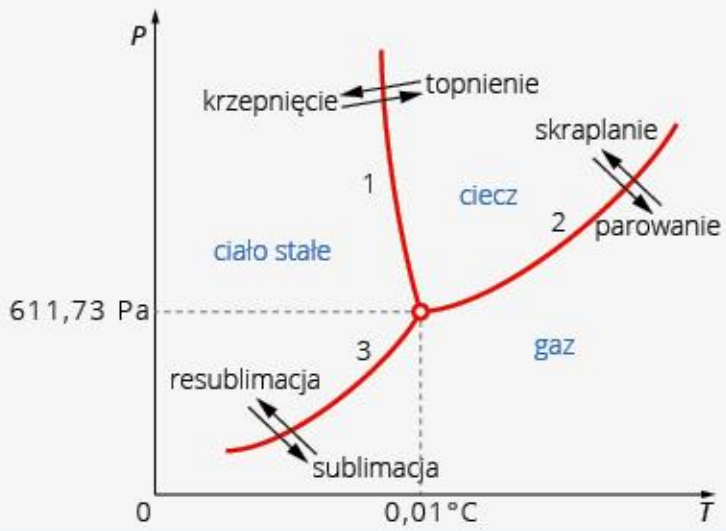
Wrzenie to parowanie, które zachodzi w całej objętości cieczy. **Temperatura wrzenia** danej substancji zależy od ciśnienia. Każda ciecz ma charakterystyczną dla siebie temperaturę wrzenia.



Woda w stanie stałym, czyli lód przy ciśnieniu atmosferycznym 1 atm = 101 325 Pa, topi się w temperaturze 0°C. Wrzenie wody przy tym samym ciśnieniu zachodzi w temperaturze 100°C.



Punkt potrójny jest to stan, w jakim dana substancja może istnieć jednocześnie w trzech fazach w równowadze termodynamicznej. Punkt ten określony jest przez temperaturę i ciśnienie punktu potrójnego. Temperatura punktu potrójnego wody wynosi 0,01°C, a ciśnienie punktu potrójnego dla wody wynosi 611,73 Pa.



6.12. Wyznaczanie ciepła właściwego cieczy za pomocą kalorymetru

Doświadczenie

Przyrządy: kalorymetr, termometr, waga laboratoryjna, kolba, próbki ciał stałych, piecyk elektryczny.

Przebieg:

1. Wyznaczamy masę naczynia (m_k).

Za pomocą wagi laboratoryjnej wyznaczamy masę wewnętrznego naczynia kalorymetrycznego wraz z przykrywką.

2. Obliczamy masę wody w naczyniu (m_w).

Do wewnętrznego naczynia kalorymetrycznego wlewamy wodę i wyznaczamy masę wody z kalorymetrem (m_{kw}). Z różnicy mas ($m_{kw} - m_k$) obliczamy masę wody m_w w kalorymetrze.

3. Mierzymy temperaturę początkową (T_p) kalorymetru z wodą.

Zamknięte naczynie kalorymetryczne umieszczamy w obudowie kalorymetru. Do wnętrza naczynia kalorymetrycznego z wodą przez otwór w przykrywce wprowadzamy termometr i mieszadełko.

4. Wyznaczamy masę ciała stałego (m_s).

5. Wyznaczamy temperaturę końcową (T_k).

Napełniamy wodą szklaną kolbę znajdującą się w płaszczu grzejnym piecyka elektrycznego. Badane ciało zawieszone na drucie umieszczamy wewnątrz kolby w taki sposób, aby było zanurzone całkowicie w wodzie. Włączamy piecyk do sieci i podgrzewamy wodę, aż doprowadzimy ją do wrzenia. Wygrzewamy przez 5–10 minut. Wyjmujemy badane ciało z wrzącej wody i jak najszybciej wkładamy je do wnętrza kalorymetru z wodą.

Mieszając wodę w kalorymetrze za pomocą mieszadełka, obserwujemy wzrost temperatury wewnątrz kalorymetru. Gdy temperatura zacznie opadać, odczytujemy wartość temperatury. Odczytana wartość jest temperaturą końcową.

6. Określanie temperatury początkowej badanego ciała (T_w).

Odczytujemy na barometrze wartość ciśnienia atmosferycznego i znajdujemy w tablicach odpowiadającą mu temperaturę wrzenia wody, przyjmując, że jest to początkowa temperatura badanego ciała stałego.

W opisanym doświadczeniu zastosowano metodę kalorymetryczną wyznaczania ciepła właściwego ciała stałego. Ta metoda opiera się na **zasadzie bilansu cieplnego** (w układzie izolowanym ciała o wyższej temperaturze tracą taką ilość ciepła, jaką zyskują ciała o niższej temperaturze) przy zastosowaniu kalorymetru.

Badane ciało o masie m_s, podgrzane do temperatury wrzenia wody T_w, zostało wrzucone do kalorymetru o masie m_k i znanym cieple właściwym c_k, zawierającego m_w wody o temperaturze początkowej T_p i o cieple właściwym c_w. W czasie procesu następuje wymiana ciepła i ustala się temperatura końcowa T_k, odpowiadająca stanowi równowagi termodynamicznej układu. Zgodnie z zasadą bilansu cieplnego: ciepło oddane Q_1 jest równe ciepłu pobranemu przez kalorymetr Q_2 i wodę Q_3.

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$m_s c_s (T_w - T_k) = m_k c_k (T_k - T_p) + m_w c_w (T_k - T_p)$$

Po przekształceniach otrzymujemy wyrażenie na **ciepło właściwe**:

$$c_s = \frac{(m_k c_k + m_w c_w)(T_k - T_p)}{m_s (T_w - T_k)}$$

6.13. Wartość energetyczna

Bardzo często do ogrzewania wykorzystuje się energię chemiczną paliw: gazu w kuchence, benzyny w samochodzie, węgla w piecach czy w elektrowni. Na opakowaniach paliwa umieszcza się informacje np. 26–28 $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$, czyli spalanie 1 kg substancji pozwala uzyskać 26–28 MJ energii.

Wartość energetyczna (opałowa) paliwa to wielkość, która określa, ile energii dostarcza jednostka masy danego paliwa podczas spalania. W przypadku paliw gazowych mierzymy bezpośrednio objętość, a nie masę paliwa. Dlatego wartość energetyczną podajemy w stosunku do objętości w $\frac{\text{J}}{\text{m}^3}$.

W przypadku paliw płynnych, np. benzyny, wartość energetyczną podajemy w $\frac{\text{J}}{\text{l}}$.

Wartość energetyczna żywności to energia, jaką organizm uzyskuje z pożywienia, w przeliczeniu na jednostkę masy tego pożywienia. Jednostką w układzie SI jest $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$. Jednak na opakowaniach żywności podaje się energię w przeliczeniu nie na 1 kg, ale na 100 g pokarmu. Energia jest podawana w J lub kcal.

$$1\ \text{kcal} = 4186\ \text{J}$$

7

ELEKTROSTATYKA

7.1. Ładunek elektryczny. Elektryzowanie ciał

Rodzaje ładunków elektrycznych

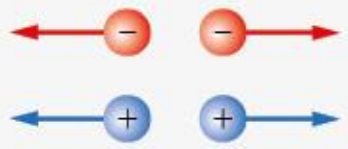
(+) ładunek dodatni

(−) ładunek ujemny

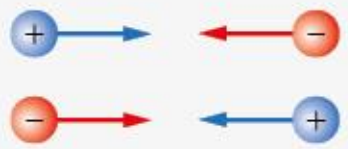
Elektryzowanie ciał polega na przepływie ładunków elektrycznych z jednego ciała na drugie.

Prawo oddziaływania ładunków

Ładunki tego samego znaku (jednoimienne) odpychają się, a ładunki o różnych znakach (różnoimienne) przyciągają się.



Ładunki jednoimienne – odpychają się



Ładunki różnoimienne – przyciągają się

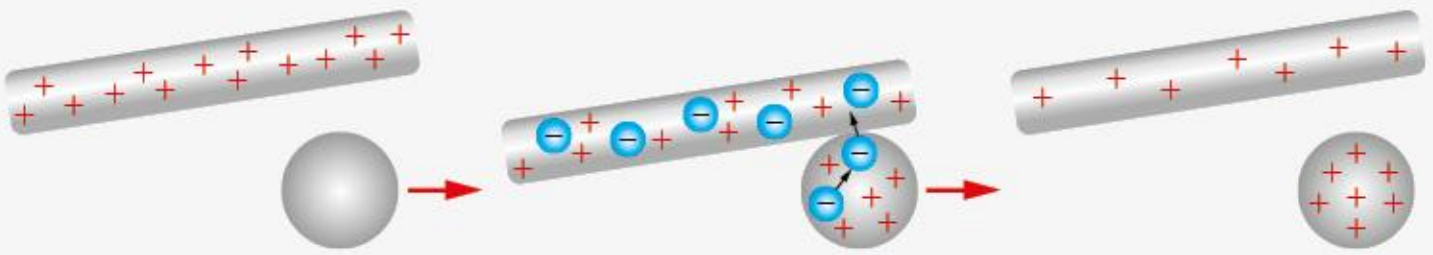
Sposoby elektryzowania ciał

1. **Elektryzowanie ciał przez potarcie** o siebie ciał zbudowanych z dwóch różnych substancji

Oba ciała elektryzują się ładunkami o przeciwnych znakach. Elektryzowanie przez potarcie polega na przejściu elektronów z jednego ciała na drugie. Ciało mające nadmiar elektronów jest naelektryzowane ujemnie, a ciało mające niedobór elektronów jest naelektryzowane dodatnio.

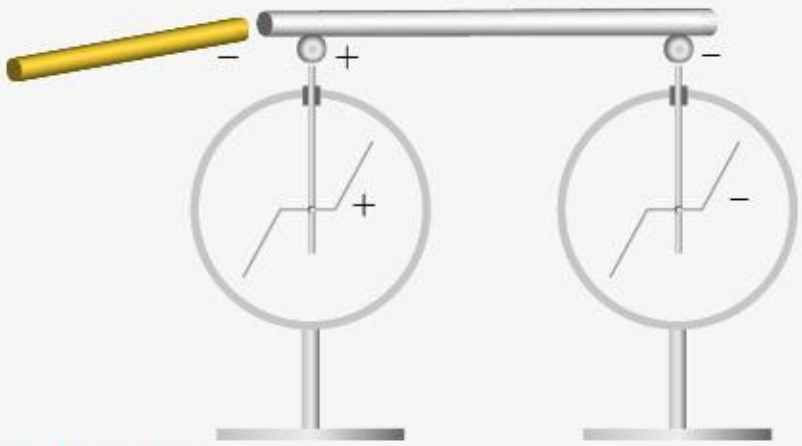
2. **Elektryzowanie przez dotyk** ciała naelektryzowanego z nienaelektryzowanym

Jeżeli ciało naelektryzowane jest ładunkiem ujemnym, to podczas zetknięcia elektrony z ciała naelektryzowanego przechodzą do ciała obojętnego elektrycznie. Oba ciała będą naelektryzowane ujemnie tak, że suma ich ładunków jest równa ładunkowi ciała naelektryzowanego ujemnie przed zetknięciem.



3. Elektryzowanie ciał przez indukcję

Polega ono na przemieszczeniu elektronów wewnątrz ciała pod wpływem zewnętrznego pola elektrostatycznego.



Zasada zachowania ładunku elektrycznego
W układzie ciał izolowanych elektrycznie od wszystkich innych ciał ładunek może przemieszczać się z jednego ciała do drugiego, ale jego całkowita wartość nie może ulec zmianie.

7.2. Prawo Coulomba. Pole elektryczne

Prawo Coulomba opisuje siłę wzajemnego oddziaływania dwóch naładowanych elektrycznie punktów materialnych znajdujących się w odległości r od siebie w próżni.

Dwa punktowe ładunki elektryczne oddziałują siłą o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu tych ładunków i odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi.

$$F_e = k\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

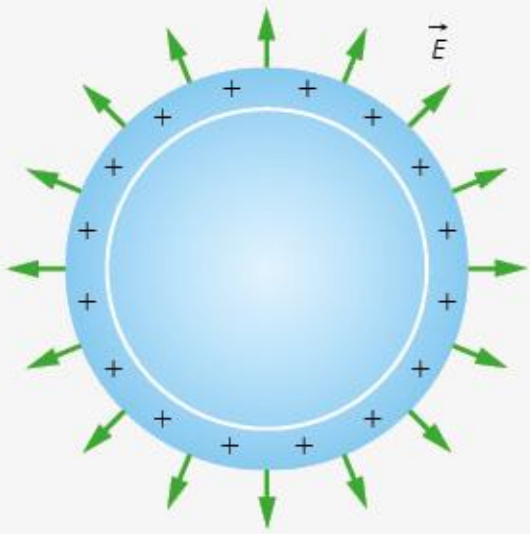
q_1, q_2 – oddziałujące ze sobą ładunki punktowe
r – odległość między ładunkami punktowymi
k – stała elektrostatyczna; dla próżni $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$

$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$ – współczynnik przenikalności elektrycznej próżni

Oddziaływanie ładunków zależy od ośrodka, w jakim znajdują się ładunki. Ten fakt uwzględniamy, wprowadzając **stałą materiałową** ε_r, zwaną **względną przenikalnością elektryczną ośrodka**, tak, że prawo Coulomba przyjmuje postać:

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

Pole wytworzone przez ciało, którego ładunek jest rozmieszczony równomiernie i symetrycznie, tak jak w kuli, sferze – na zewnętrznej powierzchni kuli jest takie samo, jakie miałoby to ciało, gdyby cały ładunek był zgromadzony w jego środku. Mamy do czynienia z **polem centralnym**.



7.3. Natężenie pola elektrycznego

Wokół każdego ładunku elektrycznego jest pole elektryczne. Na umieszczony w nim inny ładunek działa siła elektryczna. Ładunek wytwarzający pole elektryczne nazywamy **źródłem pola elektrycznego**.

W celu zbadania pola elektrycznego umieszcza się w nim drugi ładunek, zwany **ładunkiem próbnym**. Przyjmuje się, że ładunek próbny jest zawsze dodatni.

Natężenie pola elektrycznego to iloraz wektora siły działającej na ładunek próbny i wartość tego ładunku:

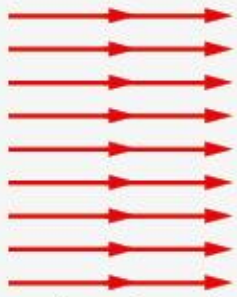
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}$$

$\vec{F}_e$ – siła elektryczna działająca na ładunek próbny
q – ładunek próbny

Jednostką natężenia pola elektrycznego jest: $1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.

Pole wytworzone przez pojedynczy ładunek nazywamy **polem centralnym**.

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



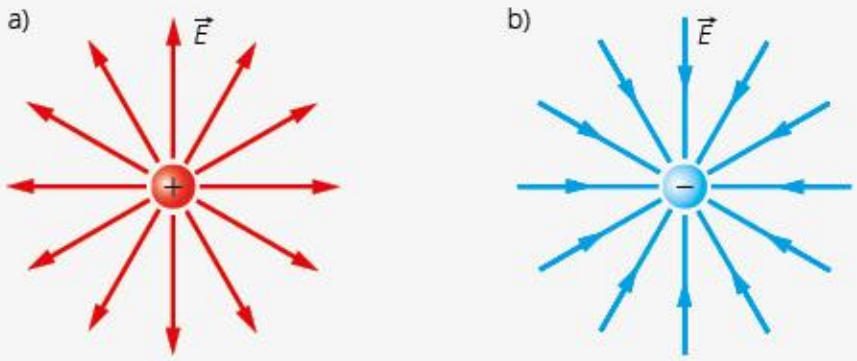
Linie pola jednorodnego

7.4. Kształt linii pola elektrycznego

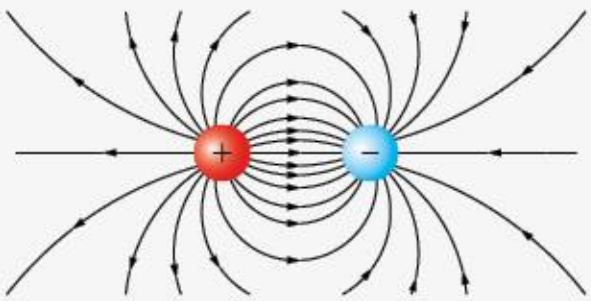
Pole elektryczne można zilustrować za pomocą linii pola elektrycznego.

Linia pola (inaczej linia natężenia pola lub linia sił) to linia, do której wektor natężenia pola $\vec{E}$ jest styczny w każdym jej punkcie. Ma ona zwrot zgodny ze zwrotem wektora natężenia.

Zaczynają się zawsze na ładunkach dodatnich, a kończą na ujemnych. Czasem linia biegnie do nieskończoności. Zagęszczenie linii ilustruje wielkość natężenia pola.



Linie sił pola elektrycznego pochodzącego od dwóch jednakowych ładunków przeciwnego znaku są to linie tzw. **dipola**. Pole wytworzone przez każdy oddzielny ładunek jest zniekształcone na skutek obecności w pobliżu drugiego ładunku. Gęstsze ułożenie linii sił w określonym miejscu pola oznacza, że jest tam większe natężenie pola, a w miejscach, w których są one rzadsze, natężenie pola jest mniejsze.



Właściwości linii sił pola elektrycznego:

1. Wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ styczny do linii sił.
2. Liczba linii przypadająca na jednostkę powierzchni ustawioną prostopadle do nich jest proporcjonalna do wartości wektora natężenia pola.
3. Linie zaczynają się na ładunku dodatnim lub w nieskończoności albo kończą się na ładunku ujemnym lub w nieskończoności.
4. Liczba linii w pobliżu ładunku elektrycznego jest proporcjonalna do jego wartości.
5. Linie sił nie przecinają się.

7.5. Rozkład ładunków w przewodniku

Przewodniki to materiały, w których ładunki elektryczne mogą swobodnie się przemieszczać. W metalach ładunkami tymi są **elektrony** zwane **swobodnymi**, które mogą przemieszczać się łatwo w całej objętości.

Wyróżnić można tu dwa przypadki:

1. Kiedy neutralny przewodnik znajduje się w zewnętrznym polu elektrycznym, wówczas na swobodne elektrony działają siły proporcjonalne do natężenia pola. Następuje przegrupowanie ładunków aż do momentu, kiedy siły działające na ładunki znikają, czyli natężenie pola w dowolnym punkcie wewnątrz przewodnika staje się równe 0.
2. Na powierzchni naładowanego przewodnika wektor natężenia pola musi być prostopadły do powierzchni, gdyż w przeciwnym razie składowa styczna do powierzchni powodowałaby przemieszczanie się ładunków w przewodniku. Zarówno objętość przewodnika, jak i jego powierzchnia stanowią obszary ekwipotencjalne, a niezrównoważone ładunki elektryczne rozłożone są jedynie na powierzchni przewodnika.

Natężenie pola na powierzchni naładowanej przewodzącej kuli

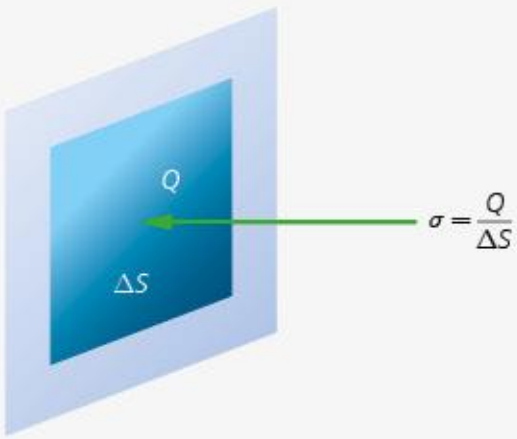
Natężenie pola na powierzchni naładowanej przewodzącej kuli można wyrazić za pomocą wzoru:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$$

σ – powierzchniowa gęstość ładunku na kuli, którą definiujemy za pomocą wzoru: $\sigma = \frac{Q}{\Delta S}$

ΔS – fragment powierzchni

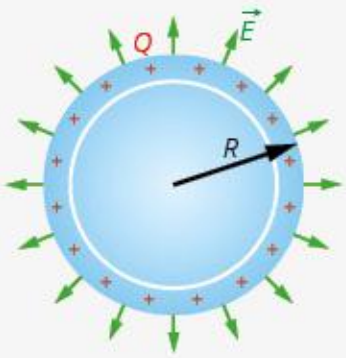
Q – ładunek zgromadzony w tym fragmencie



Cały ładunek Q gromadzi się na powierzchni przewodzącej kuli, zgodnie z definicją gęstości ładunku:

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

S – powierzchnia kuli, czyli $S = 4\pi R^2$



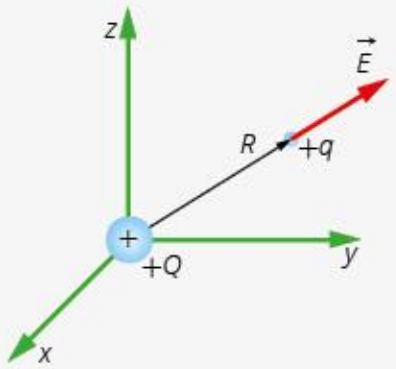
Po podstawieniu do wzoru na natężenie pola elektrycznego na powierzchni przewodzącej kuli naładowanej ładunkiem Q, otrzymamy:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = \frac{\frac{Q}{4\pi R^2}}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_r \varepsilon_0 4\pi R^2}$$

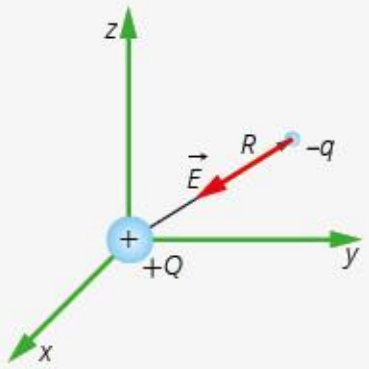
Gdy kula znajduje się w próżni:

$$E = \frac{kQ}{R^2}$$

Kierunek i zwrot wektora natężenia pola są określone przez siłę $\vec{F}$ działającą na dodatni ładunek próbny. Jeżeli ładunek Q źródła pola umieścimy w początku układu współrzędnych, to w przypadku dodatniego znaku ładunku Q wektor natężenia w danym punkcie jest zwrócony tak samo, jak wektor wodzący, natomiast w przypadku znaku ujemnego – zwrot natężenia pola jest przeciwny.



a) zgodny – dla próbnego ładunku dodatniego



b) przeciwny – dla próbnego ładunku ujemnego

Jeżeli mamy więcej punktowych źródeł pola, to – ponieważ wiemy, że natężenie pola jest wektorem i znamy zasadę dodawania wektorów – łatwo możemy znaleźć wypadkowe natężenie pola jako sumę wektorową natężeń pól pochodzących od wszystkich źródeł. Wektorowe dodawanie natężeń pól nazywa się **zasadą superpozycji pól**.

Kondensatory płaskie stosowane w obwodach elektrycznych są opatrywane informacją o ich pojemności oraz o maksymalnym napięciu pracy. Maksymalne napięcie pracy określa granicę, poniżej której nie następuje samoczynny przepływ ładunku przez izolator oddzielający płytki kondensatora. Upływ taki nazywa się **przebiciem kondensatora**; jest on na ogół niekorzystny, a często prowadzi do nieodwracalnych zmian w izolatorze między okładkami, a więc do uszkodzenia kondensatora.

Bezpośrednią przyczyną przebicia kondensatora, czyli przekształcenia się izolatora między jego płytkami w przewodnik, jest pole elektryczne panujące wewnątrz tego izolatora. Odpowiednio silne pole może wymusić powstanie w izolatorze swobodnych ładunków. Takie swobodne ładunki, elektrony i jony, są przyspieszane w panującym polu elektrycznym i mogą doprowadzić do wtórnej jonizacji w ośrodku. W ten sposób lawinowo narasta liczba swobodnych ładunków; to właśnie powoduje zamianę izolatora w przewodnik.

Lokalna krzywizna powierzchni przewodnika, oznaczana grecką literą ρ, jest dla okręgu stała (w każdym jego punkcie taka sama) i równa odwrotności promienia r tego okręgu:

$$\rho = \frac{1}{r}$$

Powierzchnia naładowanego przewodnika wytwarza – w swoim bezpośrednim sąsiedztwie – najsilniejsze pole elektryczne tam, gdzie jest najbardziej zakrzywiona.

Obszar na powierzchni przewodnika, w którym najprawdopodobniej rozpocznie się upływ ładunku, to obszar najsilniej zakrzywiony, w którym pole elektryczne jest najsilniejsze. W tych okolicach dojdzie do jonizacji izolatora (np. powietrza) otaczającego przewodnik, co pozwoli odpłynąć ładunkowi zgromadzonemu na tym przewodniku lub dopłynąć ładunkowi zebranemu wokół przewodnika.

Zjawisko to nazywa się **efektem ostrza** lub **zjawiskiem ostrzowym**, gdyż ostrze jest takim obszarem (miejscem) powierzchni, który ma największą krzywiznę.

7.6. Praca i energia potencjalna w polu elektrostatycznym

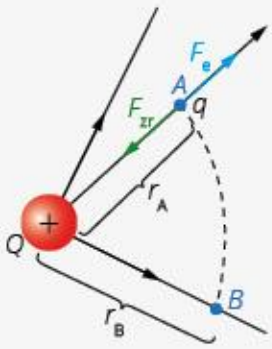
Praca w polu jednorodnym elektrostatycznym

$$W = F_{zr} \cdot \Delta r = F_e \cdot \Delta r = E \cdot q \cdot \Delta r$$

F_{zr} – siła zewnętrzna przenosząca ładunek próbny z punktu A do punktu B, równoważąca siłę elektryczną
Δr – wartość przemieszczenia

Praca w polu jednorodnym zależy tylko od wartości przemieszczenia ładunku q wzdłuż linii pola, a nie zależy od długości toru, co czyni to pole polem zachowawczym.

Praca w centralnym polu elektrostatycznym



F_e – siła elektryczna
F_{zr} – siła zewnętrzna równoważąca siłę elektryczną
r_A – odległość od źródła w punkcie początkowym
r_B – odległość od źródła w punkcie końcowym

$$W_{AB} = -k \cdot q \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

k – stała elektrostatyczna
q – wartość ładunku przenoszonego
Q – wartość ładunku źródłowego

Praca w polu centralnym również nie zależy od toru ruchu, zatem pole centralne także jest polem zachowawczym.

Energia potencjalna ładunku w polu elektrostatycznym

Energia potencjalna ładunku w polu elektrostatycznym, w odległości r od źródła pola (przenosimy ładunek z nieskończoności do konkretnego miejsca, $r_A \to \infty$)

$$E_{pot} = \frac{k \cdot q \cdot Q}{r}$$

r – odległość ładunku q od ładunku źródłowego Q

Dla ładunków Q i q jednoimiennych energia potencjalna ma wartość dodatnią, a dla ładunków Q i q różnoimiennych energia potencjalna jest ujemna.

7.7. Potencjał pola elektrostatycznego i potencjał przewodnika

Energia potencjalna ładunku w polu elektrycznym zależy od wartości tego ładunku. Jeśli ładunek jest większy, to proporcjonalnie większa jest siła, jaką trzeba działać na ten ładunek, aby go przemieścić. Wielkością fizyczną charakteryzującą pole elektryczne niezależnie od ładunku q jest iloraz energii potencjalnej i ładunku, nazywany **potencjałem pola elektrycznego**. Ten potencjał jest równy liczbowo energii ładunku próbnego 1 C. Potencjał pola elektrycznego w danym punkcie to iloraz energii potencjalnej ładunku w tym punkcie i wartości tego ładunku:

$$V = \frac{E_{pot}}{q}$$

Jeśli znamy potencjał pola, możemy obliczyć pracę wykonaną przez siły zewnętrzne w trakcie przemieszczania ładunku q z punktu A do punktu B.

$$W_{AB} = q\left(V_B - V_A\right) = q \cdot V$$

$\Delta V = \left(V_B - V_A\right)$ – różnica potencjałów, czyli napięcie między punktami A i B (U_{AB})

$$U_{AB} = V_B - V_A$$

Różnicę potencjałów między dwoma punktami nazywamy **napięciem**.

Jednostką potencjału i napięcia jest **wolt**: $1\,\text{V} = 1\,\frac{\text{J}}{\text{C}}$.

7.8. Pojemność elektryczna przewodnika

Podczas elektryzowania przewodnika ładunek rozkłada się na jego powierzchni, ale nie zawsze równomiernie. Jeśli jednak naelektryzujemy metalową kulę o promieniu R, to ładunek rozłoży się równomiernie, a natężenie pola na jej powierzchni będzie takie, jakby cały ładunek Q był skupiony w jej środku. Tak samo jest z potencjałem. Potencjał na powierzchni kuli można więc wyrazić wzorem:

$$V = k\frac{Q}{R}$$

Stosunek ładunku Q wprowadzonego na przewodnik do potencjału V tego przewodnika nazywamy **pojemnością C elektryczną przewodnika**.

$$C = \frac{Q}{V}$$

Jednostką pojemności jest **farad**: $1\text{F} = \frac{1\text{C}}{1\text{V}}$.

Pojemność elektryczna przewodnika zależy od jego rozmiarów, kształtu i obecności innych ciał w pobliżu.

7.9. Kondensatory. Energia naładowanego kondensatora

Układ dwóch przewodników przedzielonych warstwą izolatora nazywamy **kondensatorem**.

Najprostszym kondensatorem jest układ dwóch równoległych płytek metalowych przedzielonych izolatorem (dielektrykiem). Jest to tzw. kondensator płaski, a tworzące go płytki nazywamy okładkami (okładzinami).

Po naładowaniu kondensatora jego okładki mają różnoimienne ładunki i między nimi istnieje jednorodne pole elektrostatyczne o natężeniu:

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$

ΔV – różnica potencjałów między okładkami

d – odległość między okładkami

$$E = \frac{U}{d}$$

Stosunek ładunku zgromadzonego na okładkach do różnicy potencjałów (napięcia) między nimi jest równy pojemności elektrycznej kondensatora.

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{Q}{U}$$

Pojemność kondensatora zależy od pola (S) powierzchni okładek (wprost proporcjonalnie), odległości (d) między okładkami oraz od rodzaju izolatora przedzielającego okładki.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{r}$$

ε_r – stała dielektryczna izolatora

Energia zgromadzona w kondensatorze

Podczas ładowania kondensatora jest wykonywana pewna praca, która gromadzi energię. Energię możemy odzyskać podczas rozładowania kondensatora, jeżeli początkowo rozładowany kondensator o pojemności C jest stopniowo ładowany przez przenoszenie ładunku z jednej okładki na drugą. W chwili, gdy między okładkami został przeniesiony ładunek Q, napięcie między okładkami wynosi:

$$U = \frac{Q}{C}$$

Wówczas możemy obliczyć pracę włożoną w przeniesienie ładunku. Jeżeli w czasie ładowania kondensatora napięcie się zmienia – rośnie proporcjonalnie do ładunku zgromadzonego w kondensatorze od wartości 0 do $\frac{Q}{C}$. Przyjmujemy, że średnie napięcie podczas ładowania kondensatora jest równe:

$$U_{sr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{C}$$

Zatem:

$$W = Q \cdot U_{sr} = \frac{Q^2}{2C}$$

Energia zgromadzona w kondensatorze jest równa wyrażonej pracy:

$$E_c = W = \frac{Q^2}{2C}$$

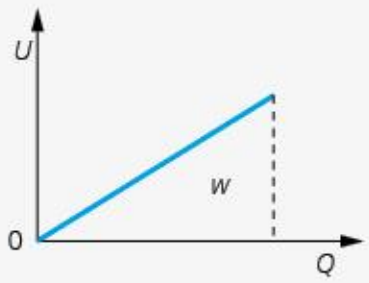
Q – zgromadzony ładunek

C – pojemność kondensatora.

Po podstawieniu wzoru $Q = U \cdot C$ otrzymamy:

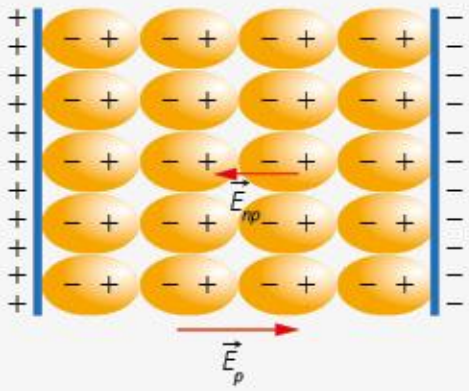
$$E_c = \frac{U^2 \cdot C}{2}$$

Zatem przy określonej pojemności kondensatora zgromadzona w nim energia jest proporcjonalna do kwadratu zgromadzonego w nim ładunku, więc kwadratu napięcia między okładkami.

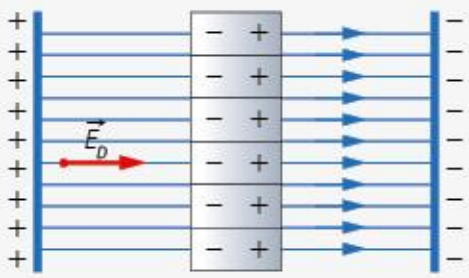


Dielektryki w polu elektrostatycznym

Dielektryki nie mają ładunków swobodnych, wszystkie elektrony w atomie są mocno związane ze swym jądrem. Gdy atom znajdzie się w polu elektrostatycznym, siły pola mogą spowodować nieznaczne (mniejsze od średnicy atomu) przesunięcie ładunków ujemnych względem dodatnich. Zachodzi zjawisko zwane **polaryzacją deformacyjną**. Może ona wystąpić tylko wtedy, gdy możliwy jest obrót cząstek. Atom czy cząsteczkę spolaryzowaną można uważać za elementarny dipol elektryczny. Cząsteczki, które mają budowę symetryczną (centrum ładunków dodatnich pokrywa się z centrum ładunków ujemnych), nazywają się **niepolarnymi**. Bez działania zewnętrznego pola nie wykazują one właściwości elektrycznych. Cząsteczki niektórych dielektryków mają budowę niesymetryczną (centra ładunków dodatnich i ujemnych są rozsunięte), wytwarzają one własne pole elektryczne. Nazywamy je polarnymi.



Ze względu na przypadkowy sposób ułożenia dipoli w przestrzeni, dielektryk polarny nie wykazuje właściwości elektrycznych. Umieszczenie go w polu powoduje obrót dipoli i wyindukowanie się pola o natężeniu E_{ind} o kierunku zgodnym z polem zewnętrznym, a zwrocie przeciwnym. Zjawisko porządkowania ustawień dipoli nazywamy **polaryzacją orientacji**. Ruchy cieplne cząsteczek utrudniają pełne uporządkowanie i sprawiają, że po usunięciu pola elektrostatycznego dielektryk wraca do chaotycznego stanu orientacji dipoli, czyli niespolaryzowania. W myśl zasady superpozycji natężenie całkowite pola zapisujemy $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{ind}$.

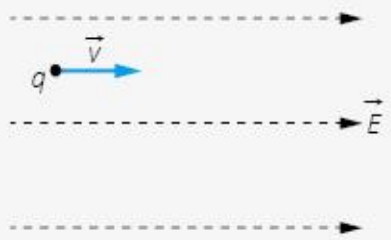


A zatem wypadkowe natężenie pola w obszarze zajętym przez dielektryk jest różnicą natężeń obu pól $E = E_0 - E_{ind}$. W dielektryku wprowadzonym do pola elektrostatycznego powstaje pole o natężeniu mniejszym od natężenia pola pierwotnego E_0, zatem gęstość linii sił w dielektryku jest mniejsza.

7.10. Ruch cząstki naładowanej w jednorodnym polu elektrostatycznym w próżni

Ruch cząstki o ładunku q i masie m zgodnie z kierunkiem linii pola elektrycznego o natężeniu $\vec{E}$

Przyjmujemy, że siłę grawitacji działającą na cząstkę można pominąć.



Naładowana cząstka jest wprowadzona do jednorodnego pola elektrycznego z prędkością $\vec{v}$ równoległą do wektora natężenia $\vec{E}$. Na cząstkę o ładunku q w polu elektrycznym o natężeniu $\vec{E}$ działa siła:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

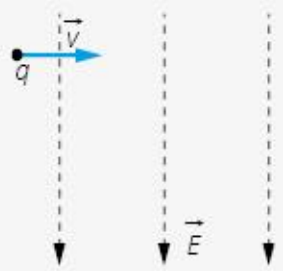
Zwrot tej siły zależy od znaku ładunku i zwrotu wektora natężenia pola. Jeżeli siła elektryczna ma zwrot zgodny ze zwrotem prędkości cząstki lub przeciwny do niego, to może zwiększać lub zmniejszać wartość prędkości cząstki. Z drugiej zasady dynamiki wynika, że wartość przyspieszenia cząstki wynosi:

$$a = \frac{q \cdot E}{m}$$

q – ładunek cząstki
E – natężenie pola elektrycznego
m – masa cząstki $\vec{v}$

Ruch cząstki o ładunku q i masie m z prędkością początkową prostopadłą do wektora natężenia pola elektrycznego

Przyjmujemy, że siłę grawitacji działającą na cząstkę można pominąć.



Gdy naładowana cząstka jest wprowadzona do jednorodnego pola elektrycznego z prędkością $\vec{v}$ prostopadłą do kierunku wektora natężenia pola $\vec{E}$ i cząstka ma masę m oraz dodatni ładunek $q > 0$, to na cząstkę o masie m działa siła $F = q \cdot E$, która nadaje jej przyspieszenie o wartości:

$$a = \frac{q \cdot E}{m}$$

Kierunek i zwrot wektora przyspieszenia tej cząstki są zgodne z kierunkiem i zwrotem wektora siły elektrycznej. Oznacza to, że przyspieszenie cząstki jest skierowane równolegle do linii pola, a prostopadle do prędkości początkowej ciała. Sytuacja jest podobna do rzutu poziomego. W kierunku osi x (prostopadłej do linii pola elektrycznego) na cząstkę nie działa żadna siła, więc ta cząstka porusza się ruchem jednostajnym:

$$a_x = 0, \quad v_x = v_0$$

$$x = x_0 + v_0 t$$

W kierunku osi y (zgodnej z kierunkiem i zwrotem linii pola elektrycznego) cząstka porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym:

$$a_y = \frac{q \cdot E}{m}$$

$$v_y = \frac{q \cdot E}{m} \cdot t$$

$$y = y_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{q \cdot E}{m} \cdot t^2$$

x_0, y_0 – współrzędne punktu, w którym cząstka znajdowała się początkowo

Ruchy w pionie i w poziomie są niezależne, a efektem ich złożenia jest ruch cząstki wzdłuż paraboli.

8

PRĄD ELEKTRYCZNY

8.1. Prąd elektryczny. Źródła napięcia

Prąd elektryczny jest to uporządkowany ruch nośników elektrycznych. Nośnikiem prądu elektrycznego w metalach (przewodnikach) są ładunki ujemne (swobodne elektrony), a w cieczach i gazach mamy do czynienia z ruchem jonów zarówno ujemnych, jak i dodatnich. Ładunki dodatnie będą płynęły w jedną stronę, a ładunki ujemne – w drugą. Dlatego przyjmujemy, że prąd płynie od bieguna dodatniego do bieguna ujemnego.

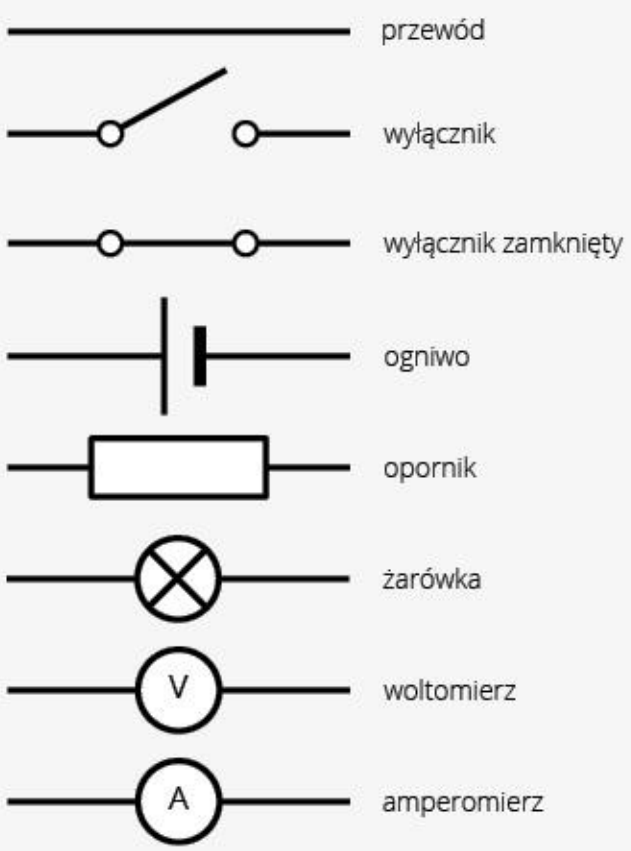
Uporządkowany ruch, tzw. **dryf elektronów**, odbywa się powoli – z prędkością rzędu $0{,}1\,\frac{mm}{s}$, natomiast ruch chaotyczny jest znacznie szybszy – jego prędkość to ok. $100\,\frac{km}{s}$. Dryf elektronów można porównać do wiatru, czyli ukierunkowanego ruchu znacznej masy powietrza.

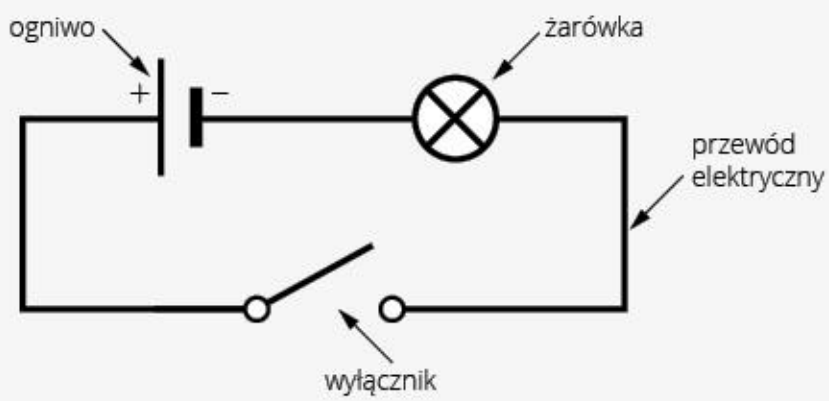
W metalach w stanie ciekłym występują elektrony swobodne, a przepływ prądu następuje na takiej samej zasadzie jak w metalach w stanie stałym. Prąd elektryczny w gazach polega na przepływie elektronów i jonów powstałych w wyniku jonizacji gazu.

Jonizacja może zachodzić pod wpływem wielu czynników, które często występują jednocześnie:
- promieniowania, gdy wysokoenergetyczne cząstki promieniowania kosmicznego uderzają w cząsteczki powietrza i wybijają z nich elektrony;
- pola elektrycznego, w silnym polu elektrycznym jony i elektrony rozpędzają się, uderzają w cząsteczki powietrza i wybijają z nich elektrony, co powoduje dalszą jonizację;
- wysokiej temperatury, w takich warunkach cząsteczki gazu mają dużą energię kinetyczną; cząsteczki gorącego gazu zderzają się ze sobą częściej niż cząsteczki zimnego gazu; podczas takich zderzeń może dochodzić do wybijania elektronów z atomów.

Najważniejszymi skutkami przepływu prądu są skutki:
- świetlne – drut znajdujący się w żarówce rozgrzewa się do wysokiej temperatury i świeci;
- cieplne – przewodnik, przez który płynie prąd, nagrzewa się (np. grzałka, czajnik elektryczny, żelazko);
- magnetyczne – wokół przewodnika, przez który płynie prąd, powstaje pole magnetyczne (np. dzwonek do drzwi);
- chemiczne – przepływ prądu stałego przez roztwory kwasów, zasad i soli (np. akumulator);
- mechaniczne – wykonanie pracy mechanicznej w silnikach (np. silnik elektryczny, robot kuchenny).

Prąd elektryczny płynie w obwodzie, który jest układem kilku połączonych ze sobą elementów. Najprostszy **obwód elektryczny** składa się ze **źródła prądu**, **przewodów**, **włącznika** i **odbiornika** (np. żarówki). Warunkiem przepływu prądu elektrycznego w obwodzie jest różnica potencjału na źródle prądu oraz to, by obwód był zamknięty. Elementy obwodu przedstawiamy w postaci symboli graficznych, a obwód elektryczny rysujemy w postaci schematu:





Wielkością charakteryzującą prąd elektryczny jest jego natężenie.

Natężeniem prądu elektrycznego *I* płynącego przez przewodnik nazywamy iloraz ładunku *q*, który przepłynął przez poprzeczny przekrój tego przewodnika w ciągu czasu *t*, i czasu tego przepływu.

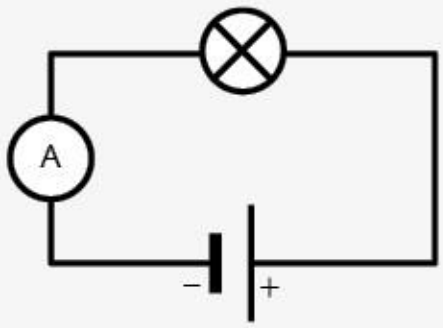
$$I = \frac{q}{t}$$

Jednostką natężenia prądu jest **amper** (A).

W przewodniku popłynie prąd o natężeniu 1 A, jeżeli w czasie 1 s przez poprzeczny przekrój przewodnika przepłynie ładunek 1 C.

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

Natężenie prądu mierzymy za pomocą **amperomierza**, który do obwodu włączamy szeregowo z odbiornikiem.



Napięcie elektryczne jest to różnica potencjałów elektrycznych między dwoma punktami obwodu elektrycznego lub pola elektrycznego. Symbolem napięcia jest *U*. Napięcie elektryczne to stosunek pracy wykonanej przeciwko polu podczas przenoszenia ładunku elektrycznego między punktami, dla których określa się napięcie, do wartości tego ładunku.

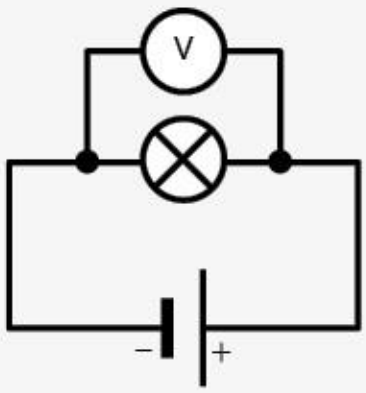
$$U = \frac{W}{q}$$

U – napięcie między dwoma punktami *A* i *B* przewodnika
W – praca wykonana podczas przemieszczania ładunku z punktu *A* do punktu *B*
q – ładunek elektryczny

Jednostką napięcia elektrycznego jest **wolt** (V). Napięcie między dwoma punktami ma wartość 1 V, jeżeli ładunek 1 C podczas przemieszczania wykona pracę 1 J.

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

Napięcie elektryczne mierzymy za pomocą przyrządu o nazwie **woltomierz**. Woltomierz podłączamy równolegle do odbiornika.



8.2. Praca i moc prądu

Prąd elektryczny płynący w obwodzie wykonuje pracę w odbiornikach energii elektrycznej.

Pracę prądu elektrycznego obliczamy ze wzoru:

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

W – praca prądu
U – napięcie elektryczne przyłożone do końców odbiornika
I – natężenie prądu płynącego przez odbiornik
t – czas przepływu prądu

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

Często używaną jednostką pracy prądu elektrycznego jest kilowatogodzina (kWh). Wykorzystuje się ją do określenia zużycia prądu oraz ilości dostarczonego ciepła.

1 kWh = 1000 W · 3600 s = 3 600 000 Ws = 3 600 000 J = 3,6 MJ

Do pomiaru zużytego przez odbiorniki prądu służy licznik energii elektrycznej.

Moc *P* prądu obliczamy z zależności:

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

Jednostką mocy jest **wat** (W): 1 W = 1 V ·1 A.

Jeżeli mamy do czynienia z odbiornikiem energii zawierającym tylko opornik (np. grzejnik), to cała energia stracona przez ładunek q poruszający się przy napięciu U wydziela się w oporniku w postaci energii cieplnej. Elektrony przewodnictwa poruszające się w przewodniku zderzają się z atomami (jonami) przewodnika i tracą energię (którą uzyskały w polu elektrycznym), co objawia się wzrostem temperatury opornika.

Na podstawie prawa Ohma możemy równanie zapisać w postaci:

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

Równania opisują przemianę energii elektrycznej na energię cieplną, którą nazywamy **ciepłem Joule'a**.

8.3. Prawo Ohma. Opór elektryczny

Dla danego przewodnika i stałej temperatury tego przewodnika stosunek napięcia między końcami przewodnika do natężenia prądu płynącego przez ten przewodnik jest wartością stałą.

$$\frac{U}{I} = \text{const}$$

Ten stały dla danego przewodnika stosunek nazwano **oporem elektrycznym** R tego przewodnika (rezystancją).

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

Jednostką oporu elektrycznego jest **om** (Ω). Opór (rezystancja) ma wartość 1 Ω, jeżeli przyłożone napięcie 1 V wywołuje przepływ prądu o natężeniu 1 A.

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

Używane wielokrotności jednostki oporu:
1 miliom (1 mΩ) = 0,001 Ω
1 kiloom (1 kΩ) = 1000 Ω
1 megaom (1 MΩ) = 1000000 Ω

Opór przewodnika

Opór elektryczny przewodnika zależy od materiału, z którego wykonano przewodnik. Każdy materiał ma inną wartość tzw. **oporu właściwego**.

Opór elektryczny przewodnika jest wprost proporcjonalny do jego długości. Im dłuższy przewód, tym większa wartość oporu, czyli im dłuższy przewodnik, tym przez ten przewodnik płynie prąd o mniejszym natężeniu.

Opór elektryczny przewodnika jest odwrotnie proporcjonalny do pola powierzchni jego przekroju poprzecznego i możemy go przedstawić za pomocą wzoru:

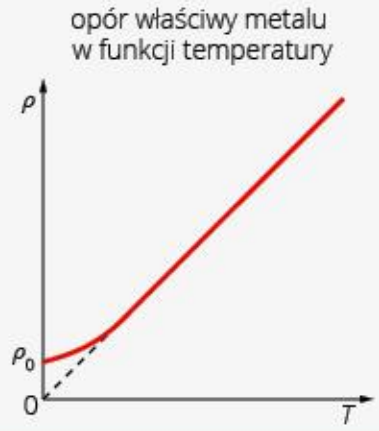
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

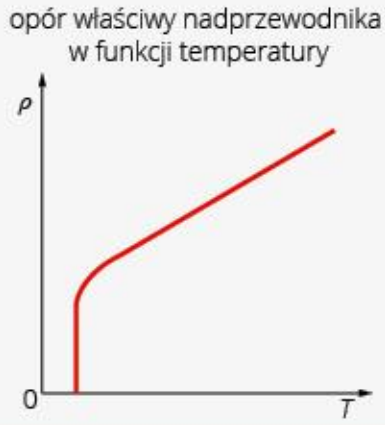
R – opór przewodnika
ρ – opór właściwy materiału, z którego wykonano przewodnik
l – długość przewodnika
S – pole powierzchni przekroju poprzecznego przewodnika

Opór właściwy materiału ρ zależy od temperatury. Wiąże się to z tym, że prędkość ruchu cząsteczek zależy od temperatury, podobnie jak drgania atomów sieci krystalicznej przewodnika.

Opór właściwy metalu w funkcji temperatury jest z dobrym przybliżeniem zależnością liniową $\rho \sim T$, z wyjątkiem temperatur bliskich zera bezwzględnego. Wtedy zaczyna odgrywać rolę tzw. opór resztkowy ρ_0 zależny w dużym stopniu od czystości metalu.

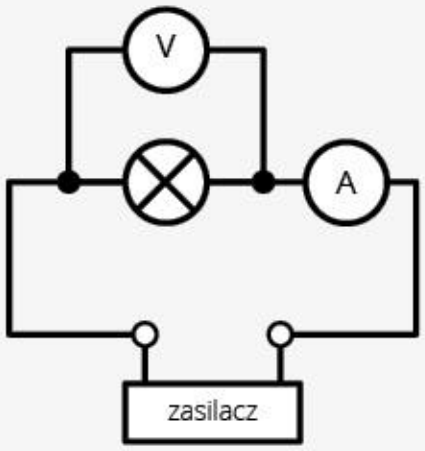
Istnieją jednak metale i stopy, dla których obserwujemy w dostatecznie niskich temperaturach całkowity zanik oporu. To zjawisko nosi nazwę **nadprzewodnictwa**.





8.4. Badanie charakterystyk prądowo-napięciowych

Charakterystyka prądowo-napięciowa – zależność natężenia płynącego prądu od napięcia przyłożonego do elementu obwodu; dostarcza informacji o właściwościach elektrycznych danego elementu, np. o jego oporze elektrycznym, dzięki czemu można przewidywać zachowanie tego obwodu w obwodach elektrycznych.



Aby wyznaczyć charakterystykę prądowo-napięciową odbiornika, należy zbudować obwód złożony ze źródła regulowanego napięcia, badanego elementu i mierników: woltomierza i amperomierza.

Jeśli badanym odbiornikiem ma być żarówka, to ważne, aby była to żarówka zawierająca żarnik w formie cienkiego drucika zamknięty w szklanej bańce. Żarówki LED, halogenowe i neonowe nie sprawdzą się w tym doświadczeniu. Najlepiej użyć żarówek do zasilania niskimi napięciami (używanych np. w samochodach). Żarówki żarnikowe o napięciu znamionowym 230 V wycofano ze sprzedaży, a używanie mniejszego napięcia niż sieciowe będzie bezpieczniejsze.

W zależności od wybranej żarówki należy odpowiednio dopasować zasilacz oraz zakresy mierników pomiarowych. Obwód trzeba zasilać napięciem stałym, zmieniającym się od 0 do wartości napięcia znamionowego żarówki lub przekraczającej je o nie więcej niż 10%.

Natężenie prądu płynącego przez żarówkę nie jest wprost proporcjonalne do napięcia na tej żarówce. Żarówka nie spełnia prawa Ohma. Im większe napięcie przykładamy do żarówki, tym większy staje się opór jej włókna. Wolfram, z której wykonano włókno żarówki, dla stałej temperatury spełnia prawo Ohma. Oznacza to, że zmiana oporu włókna wynika nie bezpośrednio ze zwiększania się przyłożonego napięcia, ale ze wzrostu temperatury włókna. Podobnie zachowuje się większość metali – dlatego że w wyższej temperaturze elektrony poruszają się szybciej, więc częściej zderzają się z jonami i tracą więcej energii. Opór przewodnika rośnie z temperaturą.

$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha \Delta T)$$

$$\Delta T = T - T_0$$

$R(T)$ – opór przewodnika w temperaturze T

$R(T_0)$ – opór przewodnika w temperaturze $T_0 = 273\text{K}$

α – współczynnik temperaturowy oporu

Również w półprzewodnikach wraz ze wzrostem temperatury elektrony poruszają się szybciej, co powoduje większe straty energii przy zderzeniach z jonami i wzrost oporu. Jednak w miarę wzrostu temperatury coraz więcej elektronów odrywa się od atomów i staje się elektronami swobodnymi. Opór półprzewodnika maleje z temperaturą aż do pewnej granicznej wielkości.

8.5. Tabliczka znamionowa

Tabliczka znamionowa zawiera najważniejsze informacje o danym urządzeniu elektrycznym: jego numer fabryczny, nazwę, typ, model lub numer katalogowy. Dzięki temu znamy wszystkie istotne parametry techniczne danego sprzętu – przydatne, gdy trzeba dokupić część zamienną lub wyposażenie dodatkowe, albo oddać urządzenie do naprawy.

Na tabliczce znamionowej znajdują się też istotne wskazówki dotyczące sposobu użytkowania sprzętu, np. napięcie znamionowe oraz rodzaj prądu, do jakiego urządzenie można podłączyć: stały albo przemienny. Prąd przemienny wymaga najczęściej napięcia 110 V lub 230 V. Czasem obie wartości są dopuszczalne, a urządzenie automatycznie dopasowuje się do podłączonego zasilania. Prąd przemienny może być jednofazowy lub trójfazowy. Prądem trójfazowym są zasilane urządzenia o dużej mocy, np. silniki napędzające maszyny w warsztatach i fabrykach. Napięcie prądu trójfazowego w Polsce wynosi 400 V. Dla prądu przemiennego podaje się również jego częstotliwość. W Europie wynosi ona 50 Hz, a w niektórych krajach – 60 Hz (np. w większości krajów amerykańskich). Tabliczka znamionowa zawiera informację wskazującą, czy urządzenie można podłączyć do pierwszego, drugiego czy do obu rodzajów prądu.

KUCHNIA ELEKTRYCZNA
TYP: 7080E
MODEL: 7080E2.33

Napięcie znamionowe: 230 V, ~50 Hz
Moc znamionowa: 2300 W
Moc grzałki: 2000 W

CE 1451–16

Kod wyrobu 54023
Nr fabryczny 00705402308216

WYPRODUKOWANO W POLSCE

Na tabliczce znamionowej zapisuje się też moc urządzenia elektrycznego. Na niektórych tabliczkach jest to moc wejściowa, czyli moc prądu zasilającego urządzenie, a na innych podaje się moc wyjściową, czyli użytkową, z jakiej może korzystać użytkownik tego urządzenia. Zdarza się, że producenci podają obie wartości lub sprawność urządzenia.

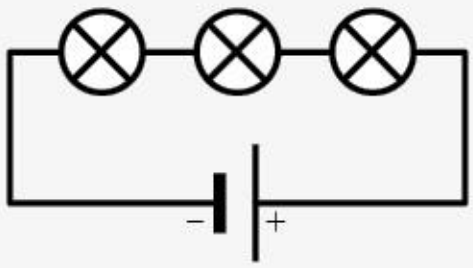
Zgodnie z polskimi i unijnymi przepisami, niektóre dane dotyczące bezpieczeństwa użytkowania urządzeń muszą być umieszczone na ich tabliczkach znamionowych, np. certyfikat CE, klasa ochronności, klasa szczelności IP lub klasa izolacji.

Inne dane umieszczane na tabliczkach znamionowych to np. dla silnika: prędkość obrotowa, dla pralki: ładowność, dla lodówki: wymiary itd.

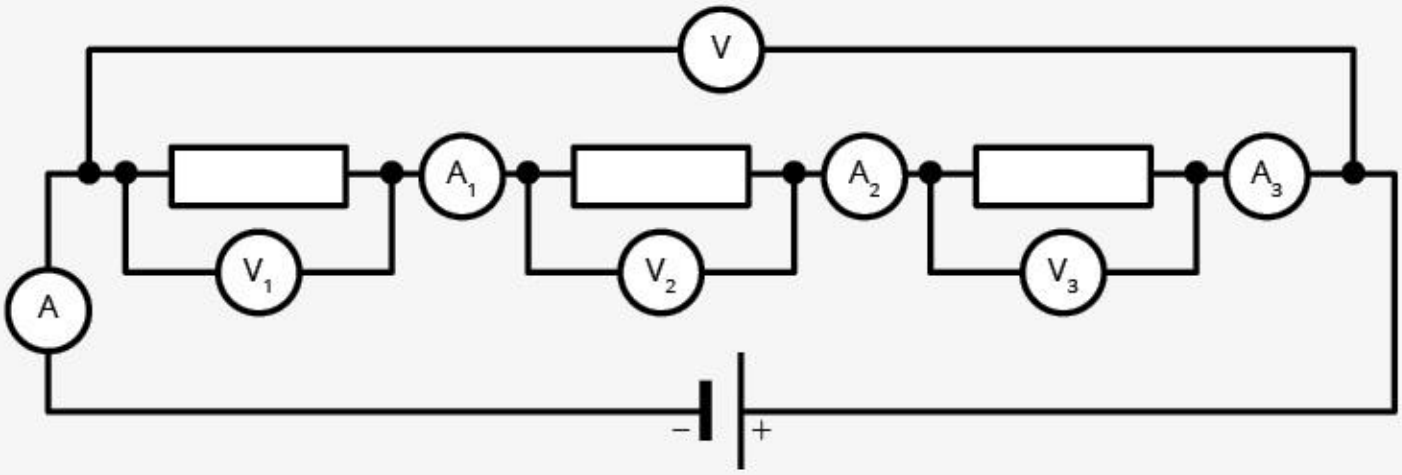
8.6. Łączenie oporników. I prawo Kirchhoffa

Połączenie szeregowe

Połączenia szeregowe są stosowane w lampkach choinkowych (obecnie stosuje się specjalne diody, rzadko żarówki, które po przepaleniu – mimo że nie świecą – to dalej przewodzą prąd elektryczny, dzięki czemu reszta układu działa).



Chcąc zbadać, jak w połączeniach szeregowych zmienia się napięcie i natężenie, należy podłączyć woltomierze i amperomierze według przedstawionego schematu i zmierzyć napięcie i natężenie w obwodzie głównym oraz spadki napięć na każdym z elementów obwodu.



Napięcie w obwodzie głównym jest równe spadkom napięć na każdym z elementów obwodu.

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Natężenie prądu w każdym miejscu obwodu jest takie same.

$$I = \text{const}$$

$$R = \frac{U}{I} \; / \cdot I$$

$$R \cdot I = U$$

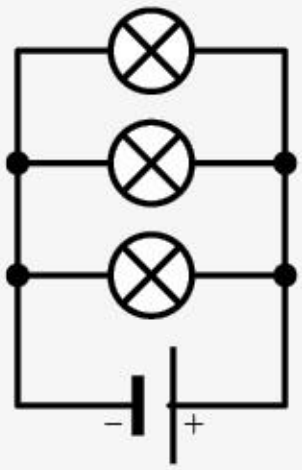
$$R \cdot I = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I$$

$$R \cdot I = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3) \; / : I$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Opór całkowity oporników połączonych szeregowo jest równy sumie ich oporów.

Połączenie równoległe



Przykładem połączeń równoległych w obwodzie jest instalacja domowa.

Po podłączeniu przyrządów do pomiaru napięcia i natężenia w obwodzie równoległym oraz po zmierzeniu napięcia i natężenia w każdym miejscu obwodu elektrycznego stwierdza się, że napięcie w każdym miejscu obwodu ma wartość stałą, nie następuje spadek napięcia.

$$U = \text{const}$$

Natężenie w obwodzie głównym jest równe sumie natężeń, czyli suma prądów wpływających do węzła jest równa sumie prądów wypływających z węzła.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$R = \frac{U}{I} \; / \cdot I$$

$$R \cdot I = U \; / : R$$

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

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

$$U \cdot \frac{1}{R} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \; / : U$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

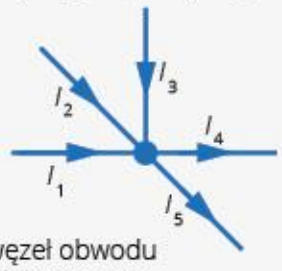
Odwrotność oporu całkowitego oporników połączonych równolegle jest równa sumie odwrotności oporów poszczególnych oporników.

Prawa Kirchhoffa, czyli I prawo (prądowe) i II prawo (napięciowe) Kirchhoffa, pozwalają nam na analizę natężenia prądu oraz napięcia prądu w obwodach elektrycznych. Węzeł obwodu elektrycznego to punkt, w którym łączą się co najmniej dwa przewody elektryczne.

I prawo Kirchhoffa

Suma natężeń prądów wpływających do węzła obwodu elektrycznego jest równa sumie natężeń prądów wypływających z tego węzła.

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$$



węzeł obwodu elektrycznego

8.7. Domowa sieć elektryczna

W mieszkaniach i domach znajduje się wiele urządzeń elektrycznych zasilanych prądem – to prąd przemienny, doprowadzany do domów za pomocą tzw. przyłączy. Przyłącza to odgałęzienia od sieci ulicznej, najczęściej układane pod ziemią. Napięcie w przewodach doprowadzanych do mieszkań w Polsce wynosi 230 V (lub 400 V dla urządzeń trójfazowych, np. płyt indukcyjnych w kuchniach). Większość odbiorników w mieszkaniu wymaga napięcia 230 V, dlatego są one połączone równolegle. Po włączeniu kilku odbiorników w każdym z nich popłynie prąd o określonym, zwykle różnym natężeniu.

Przewody mieszkaniowej sieci elektrycznej są układane w ścianach ze względu na bezpieczeństwo. Na zewnątrz (na ścianach) znajdują się gniazdka wtyczkowe, wyłączniki, lampy, liczniki energii elektrycznej czy **bezpieczniki** – urządzenia rozłączające obwód, gdy natężenie prądu przekroczy dopuszczalną wartość. Może się tak zdarzyć, gdy zostanie włączonych zbyt wiele urządzeń jednocześnie lub dojdzie do zwarcia instalacji elektrycznej. Do zwarcia dochodzi, jeśli zetkną się ze sobą przewody pozbawione izolacji lub gdy odbiornik energii elektrycznej zostanie zalany wodą. W momencie zwarcia następuje najczęściej jasny, krótkotrwały błysk, który jest najczęściej przyczyną pożarów podczas zwarcia.

Stosuje się różnego rodzaju bezpieczniki. Cześć z nich jest umieszczana przed licznikami energii elektrycznej, część za licznikami w tzw. rozdzielnicach elektrycznych, a część bezpośrednio w urządzeniach.

Najstarszy typ to **bezpiecznik topikowy**. Obecnie najczęściej stosuje się je przed licznikami elektrycznymi oraz w urządzeniach elektrycznych. Bezpiecznik taki składa się z drucika wykonanego z łatwo topliwego materiału. Opór drucika dobiera się tak, aby spowodować jego stopienie przy odpowiednio dużym natężeniu prądu elektrycznego, co spowoduje przerwanie obwodu i trwałe uszkodzenie bezpiecznika, któy należy wymienić.

Współcześnie w rozdzielnicach elektrycznych najczęściej używa się **bezpieczników automatycznych** oraz **wyłączników nadmiarowoprądowych**. Te urządzenia samoczynnie przerywają dopływ prądu w przypadku zwarcia lub przeciążenia sieci elektrycznej. Po zadziałaniu nie ulegają uszkodzeniu jak bezpieczniki topikowe – można je włączyć po usunięciu usterki i przywrócić dopływ prądu.

Użytkowanie domowej sieci elektrycznej wymaga ostrożności. Pamiętajmy, aby:
– nie dotykać gołymi rękami nieizolowanych części obwodu elektrycznego;
– nie wykonywać napraw elektrycznych, gdy urządzenia lub przewody znajdują się pod napięciem;
– używać do pracy izolowanych narzędzi, przeznaczonych do tego celu.

Przewody instalacji elektrycznej oraz zasilające urządzenia elektryczne posiadają dwie lub trzy żyły: przewód pod napięciem (pokryty czarnym lub brązowym izolatorem), przewód zerowy (niebieski), a często także przewód ochronny (żółto-zielony). Przewód ochronny służy jako element zabezpieczający człowieka przed porażeniem prądem elektrycznym. Jeśli wskutek awarii obudowa urządzenia zostanie połączona ze źródłem zasilania, to przez przewód ochronny popłynie prąd, co poskutkuje awaryjnym wyłączeniem sieci przez wyłączniki **różnicowo-prądowe**. Można je rozpoznać po dodatkowym przycisku popisanym „test" lub samą literą „T".

Urządzenia elektroniczne używane na co dzień są czułe na nagłe pojawianie się w sieci wysokiego napięcia, do czego dochodzi np. w wyniku wyładowań atmosferycznych w pobliżu domu. Do ochrony odbiorników elektrycznych przed skutkami działania wysokiego napięcia służą układy przeciwprzepięciowe, umieszczane czasami w rozdzielnicach domowych, a także w listwach zasilających.

8.8. Podział urządzeń ze względu na przewodnictwo elektryczne

Przewodzenie prądu elektrycznego w materiałach zależy od stopnia łatwości, z jaką z zewnętrznej powłoki elektronowej atomów tworzących je pierwiastków uwalniają się elektrony. Łatwość uwalniania się elektronów swobodnych zależy od liczby elektronów na zewnętrznej powłoce; największa jest dla liczby 1, a najmniejsza – dla liczby 8.

Ze względu na przewodnictwo elektryczne materiały dzielimy na:

Izolatory nie przewodzą prądu elektrycznego, ponieważ elektrony znajdujące się na zewnętrznych powłokach ich pierwiastków są silnie przyciągane przez dodatnio naładowane jądra.

Przewodniki przewodzą prąd elektryczny, ponieważ znajdujące się na zewnętrznych powłokach swobodne elektrony mogą się oderwać od atomów i stać się nośnikami prądu elektrycznego – liczba elektronów na zewnętrznych powłokach wynosi od 1 do 3.

Półprzewodniki są zbudowane z pierwiastków, które w stanie czystym nie przewodzą prądu elektrycznego. Najczęściej stosowanym materiałem półprzewodnikowym jest krzem i german.

Przewodnictwo w półprzewodnikach uzyskuje się przez ich domieszkowanie atomami np. glinu, galu i boru albo fosforu, arsenu, antymonu.

Z domieszkowanych półprzewodników buduje się diody i tranzystory.

8.9. Urządzenia elektryczne i elektroniczne

Opornik (rezystor) – element elektroniczny ograniczający prąd w obwodzie.

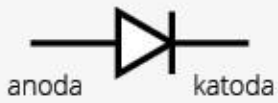
Kondensator – element elektroniczny, zbudowany z dwóch przewodników rozdzielonych dielektrykiem. Służy do gromadzenia i oddawania ładunku elektrostatycznego.

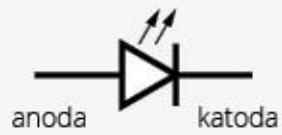
Zwojnica (cewka) – element elektroniczny utworzony z pewnej liczby zwojów przewodnika nawiniętych na powierzchni walca pierścienia lub na płaszczyźnie. Wewnątrz może znajdować się rdzeń z materiału magnetycznego, diamagnetycznego lub ferromagnetycznego.

Dioda półprzewodnikowa

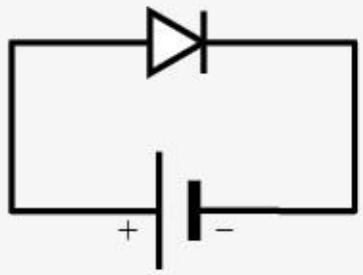
Dioda to element elektroniczny przewodzący prąd tylko w jednym kierunku. Diody świecące podczas przepływu prądu nazywamy **diodami świecącymi (LED)**.

Na schematach elektrycznych diodę przedstawia się symbolem. Strzałka na nim wskazuje kierunek przepływu prądu przez diodę.





Aby dioda przewodziła prąd elektryczny, trzeba do jej końców odpowiednio przyłożyć źródło napięcia. Mówimy wówczas, że dioda półprzewodnikowa jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia.



Tradycyjne żarówki z rozgrzanym włóknem zamieniają na energię światła tylko ok. 4% dostarczonej energii elektrycznej. Dla świetlówki energooszczędnej ten odsetek wynosi 25%, a dla LED – 40%.

Dzięki odpowiedniemu domieszkowaniu półprzewodnika można uzyskiwać pożądaną barwę światła emitowanego przez diodę LED.

Diody, które nie świecą, mają zastosowanie do zamiany prądu przemiennego na stały. Urządzenie zamieniające napięcie przemienne na napięcie stałe, to **prostownik**.

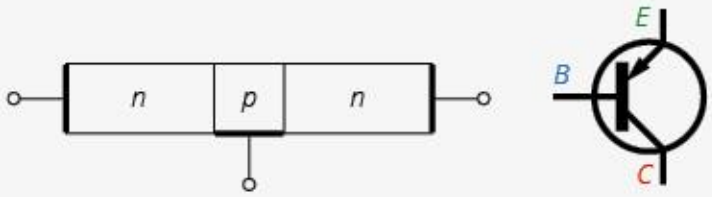
Tranzystor

Tranzystor to najprostszy wzmacniacz sygnałów elektrycznych.

Tranzystor *pnp* jest rodzajem tranzystora bipolarnego. W takich tranzystorach w przewodzeniu prądu uczestniczą dwa typy nośników prądu występujące w półprzewodnikach: elektrony i dziury. Dominuje jednak jeden typ nośnika – w tranzystorach *pnp* są to dziury. Tranzystory *pnp* najczęściej wykonuje

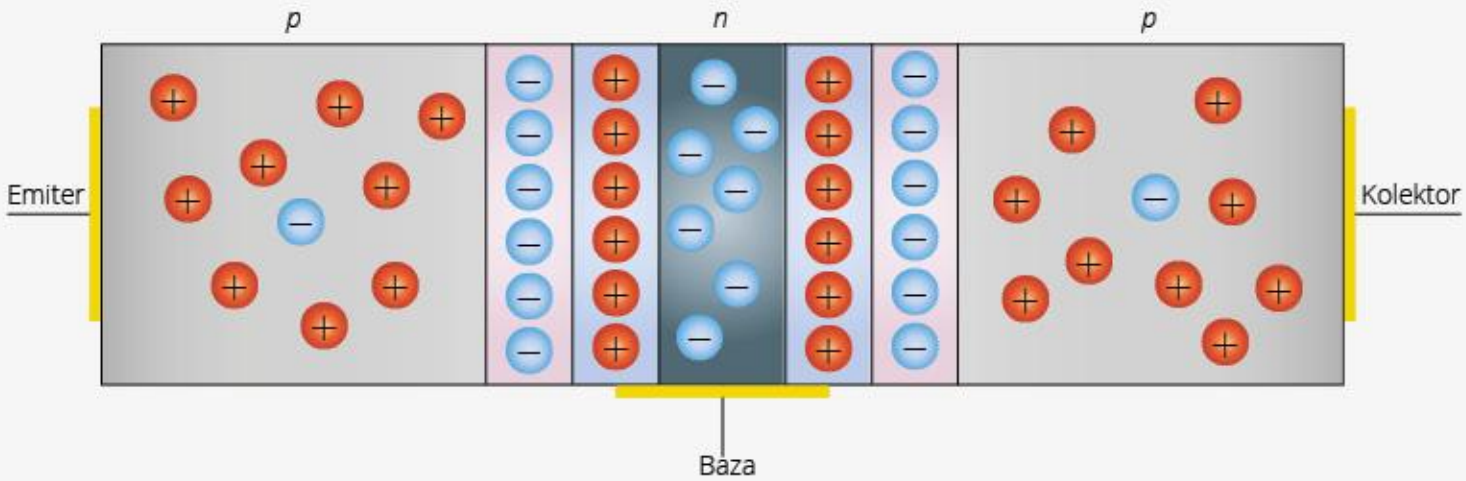
się z krzemu, ale można użyć też innych półprzewodników, np. germanu, arsenku galu, azotku galu. Tranzystory powstają z połączenia trzech warstw półprzewodników *p* i *n* ułożonych w kolejności: *pnp*.

Schemat układu warstw półprzewodnikowych oraz symbol graficzny tranzystora *pnp* wygląda następująco:



W półprzewodniku typu *n* w wyniku domieszkowania zwiększa się ilość elektronów swobodnych. Z kolei w półprzewodniku typu *p* domieszkowanie zwiększa ilość dziur – dodatnich nośników prądu. Dziurą określa się brak elektronu w wiązaniu międzyatomowym. Dziura może się przemieszczać w materiale, mając cechy dodatniego nośnika ładunku.

Na styku warstw półprzewodnikowych w tranzystorze powstają dwa złącza *pn*, przez które dyfundują nośniki. To doprowadza do powstania przestrzennego rozkładu ładunku i wynikającego z tego rozkładu napięcia elektrycznego między sąsiednimi obszarami tranzystora. Z powodu istnienia bariery ładunku złącze *pn* ma właściwość dobrego przewodzenia prądu tylko w kierunku od obszaru *p* do *n*.



Poszczególne warstwy tranzystora to:

– **emiter** (E) – warstwa silnie domieszkowana, stanowi źródło nośników prądu (dziur w tranzystorze *pnp*);

– **baza** (B) – warstwa cienka i słabo domieszkowana; steruje prądem przepływającym przez tranzystor;

– **kolektor** (C) – „zbiera" ładunki przepływające przez tranzystor.

Tranzystory są wykorzystywane także do tworzenia układów cyfrowych, dzięki którym można prowadzić operacje na liczbach zapisanych za pomocą 0 i 1 (0 – brak napięcia, 1 – ustalone napięcie).

8.10. II prawo Kirchhoffa

II prawo Kirchhoffa dotyczy spadków napięć na elementach obwodu. Napięcia w obwodzie nie biorą się znikąd, zatem jeżeli w którymś miejscu na oporniku jest napięcie, to znaczy, że istnieje źródło, które wywołało prąd przepływający przez opornik. Wszystkie napięcia pochodzące od źródeł muszą sumować się z napięciami odkładającymi się na opornikach.

Ogniwo – źródło stałego napięcia, które składa się z dwóch elektrod wykonanych z różnych substancji oraz elektrolitu znajdującego się między elektrodami. Źródłem napięcia w ogniwie są zachodzące w nim reakcje chemiczne między elektrodami a elektrolitem. Aby uzyskać wyższe napięcie, ogniwa łączy się szeregowo – tak powstaje bateria.

Siła elektromotoryczna ogniwa (SEM ogniwa, $\mathcal{E}$) – ilość energii zamienianej z energii chemicznej w elektryczną w przeliczeniu na 1 C przepływającego ładunku.

Prąd w obwodzie płynie nie tylko poza ogniwem, lecz także w jego wnętrzu, w którym przepływ ładunku wiąże się z pewnym oporem, zwanym oporem wewnętrznym (R_w) ogniwa. Napięcie między biegunami ogniwa jest równe różnicy siły elektromotorycznej $\mathcal{E}$ i spadku napięcia na oporze wewnętrznym R_w:

$$U = \mathcal{E} - IR_w$$

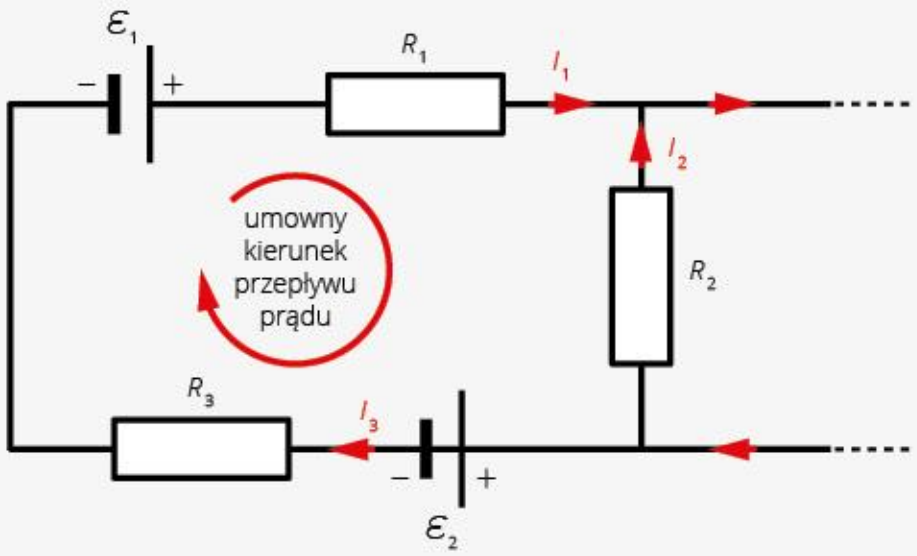
Siła elektromotoryczna jest równa napięciu między biegunami źródła napięcia, z którego nie pobieramy prądu.

W obwodzie złożonym z rzeczywistego ogniwa (o sile elektromotorycznej $\mathcal{E}$ i oporze wewnętrznym R_w) oraz odbiornika energii elektrycznej o oporze R natężenie płynącego prądu elektrycznego opisuje wyrażenie:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_w}$$

Im mniejszy opór R podłączymy do ogniwa, tym większy prąd przez nie popłynie. Przy zwarciu biegunów (czyli dla $R = 0$) natężenie prądu osiąga maksymalną wartość $\frac{\mathcal{E}}{R_w}$.

Rozważmy wartości potencjałów elektrycznych w obwodzie.



Aby móc zapisać równanie oczka, należy założyć umowny przepływ prądu. Każde źródło włączone w kierunku przepływu prądu (na rys. $\mathcal{E}_1$) podnosi potencjał elektryczny, a włączone ($\mathcal{E}_2$) go obniża. Z kolei na każdym oporze R (odbiorniku) następuje spadek potencjału. Zapisana w ten sposób suma wszystkich źródeł napięcia i spadków napięć jest równa 0.

$$\mathcal{E}_1 - I_1R_1 + I_2R_2 - \mathcal{E}_2 - I_1R_3 = 0$$

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = I_1R_1 - I_2R_2 + I_1R_3$$

Ta prawidłowość ma zastosowanie do każdego zamkniętego obwodu elektrycznego (tzw. oczka), niezależnie od tego, czy jest on fragmentem większej całości, czy nie jest.

II prawo Kirchhoffa

W zamkniętym obwodzie elektrycznym algebraiczna suma sił elektromotorycznych jest równa sumie spadków napięć na odbiornikach.

To prawo wynika z zasady zachowania energii. Rozważane zmiany potencjału elektrycznego przekładają się na zmiany potencjalnej energii elektrycznej ładunków w obwodzie. W obwodzie zamkniętym suma energii nadanych ładunkom przez źródła jest równa sumie energii wykorzystanych przez te ładunki w odbiornikach prądu. Zmiana energii jest równa pracy, więc można stwierdzić także, że praca wykonana przez źródła nad ładunkami elektrycznymi jest równa pracy wykonanej przez te ładunki w odbiornikach.

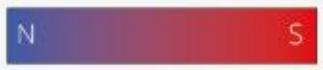
9

MAGNETYZM

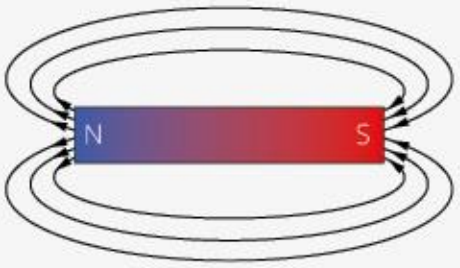
9.1. Magnesy. Pole magnetyczne

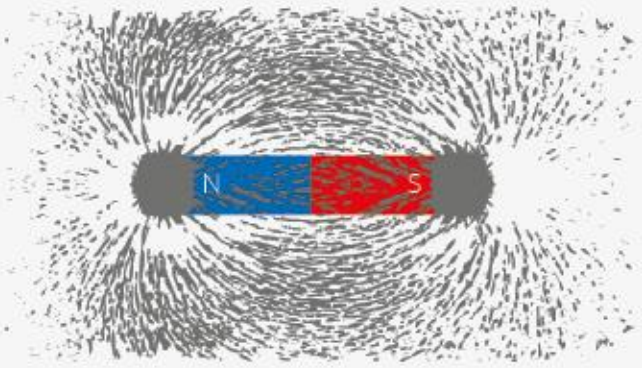
Każdy magnes ma dwa bieguny:
- **biegun magnetyczny północny**, oznaczany literą N i zwykle kolorem niebieskim;
- **biegun magnetyczny południowy**, oznaczany literą S i zwykle kolorem czerwonym.

Jeżeli magnes przetniemy na dwie części, to każda z nich stanie się dwubiegunowym magnesem.



Pole magnetyczne – obszar, w którym działa siła magnetyczna. Pole na rysunku przedstawiamy za pomocą linii pola magnetycznego. Zwrot linii jest zwrócony od bieguna północnego do bieguna południowego.

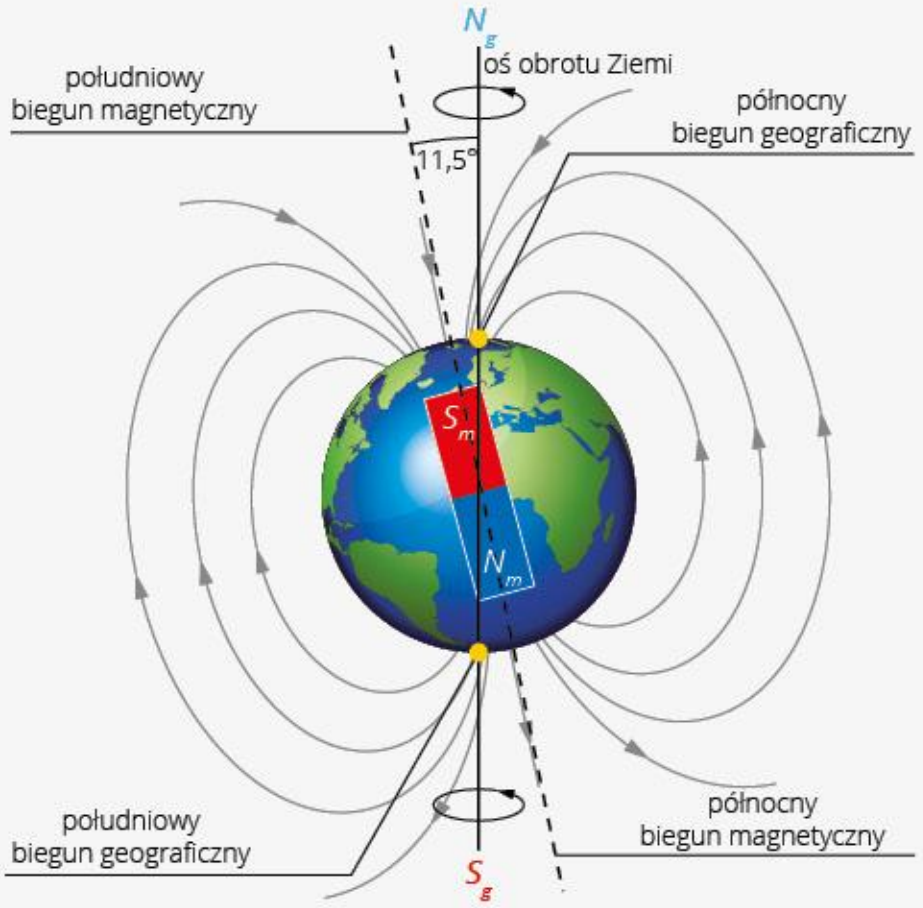




Oddziaływanie między biegunami magnetycznymi

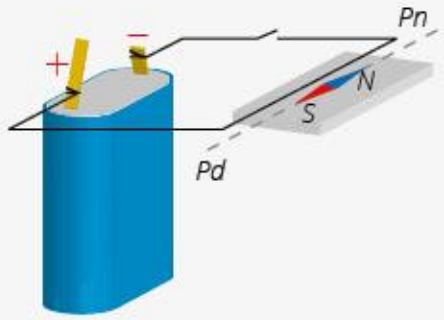
Bieguny jednoimienne (N i N oraz S i S) odpychają się, a różnoimienne (N i S) się przyciągają.

Ziemia zachowuje się tak, jakby w jej wnętrzu był olbrzymi magnes. Bieguny magnetyczne i geograficzne się nie pokrywają. Oś magnetyczna Ziemi jest odchylona od osi obrotu planety w jej ruchu obrotowym. W pobliżu północnego bieguna geograficznego znajduje się południowy biegun magnetyczny, a w pobliżu południowego bieguna geograficznego znajduje się północny biegun magnetyczny. Z tego względu igła magnetyczna ustawia się w kierunku zgodnym z liniami ziemskiego pola magnetycznego, więc jej północny biegun magnetyczny wskazuje w przybliżeniu geograficzną północ.



Jeśli nad igłą magnetyczną ustawiono prostoliniowy przewodnik, przez który nie płynie prąd, to igła magnetyczna zgodnie z oddziaływaniem biegunów magnetycznych ustawia się w kierunku północnym, bo igła magnetyczna oddziałuje tylko z ziemskim polem magnetycznym. Jeżeli przez przewodnik popłynie prąd, to igła magnetyczna ustawi się w innym kierunku niż kierunek północny dlatego, że w otoczeniu przewodnika pojawia się dodatkowe oddziaływanie.

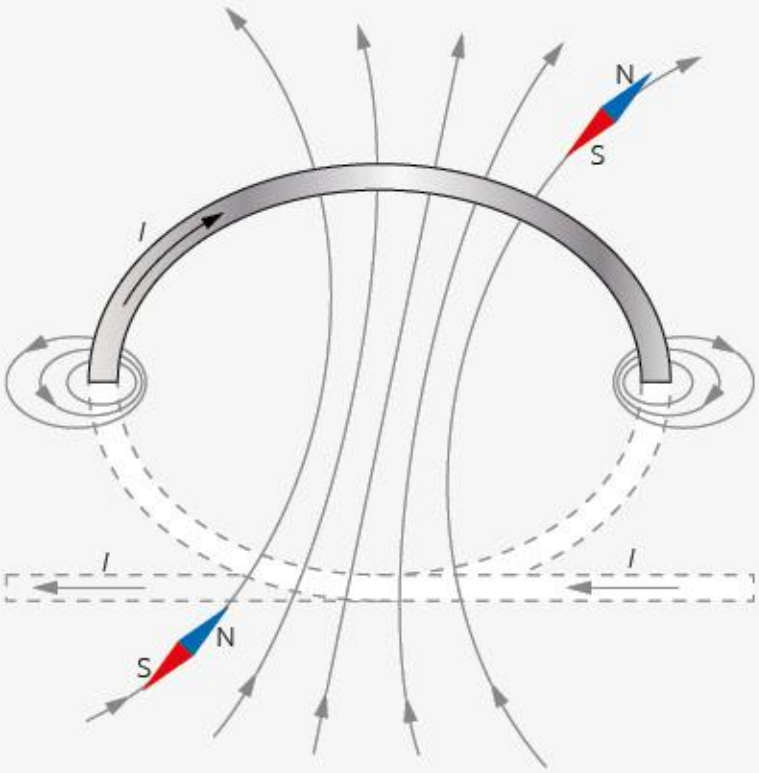
Dowodzi to, że wokół przewodnika, przez który płynie prąd, pojawia się pole magnetyczne.



Kierunek linii sił pola magnetycznego zależy od tego, w którą stronę płynie prąd elektryczny.

Układ linii sił pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem zależy od kształtu przewodnika.

Pole magnetyczne wokół
– prostoliniowego przewodnika z prądem ma kształt współśrodkowych okręgów,
– zwojnicy przypomina kształtem pole magnetyczne wokół magnesu sztabkowego.

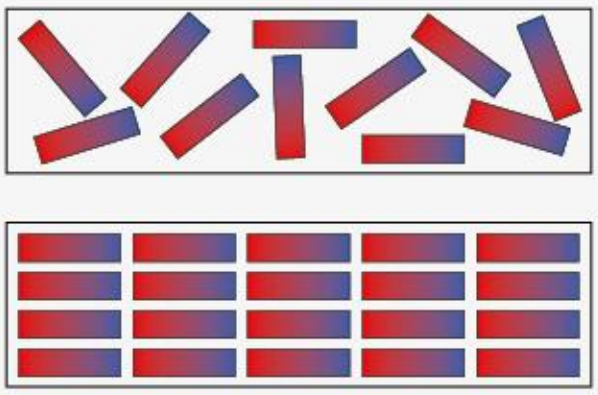


Reguła prawej dłoni służy do wyznaczania kierunku linii pola magnetycznego wokół przewodnika prostoliniowego z prądem elektrycznym. Prawą dłoń należy ustawić w taki sposób, aby obejmowała przewód, a kciuk wskazywał kierunek przepływu prądu – wówczas zakrzywione palce wskażą zwrot linii pola magnetycznego.

9.2. Ferromagnetyki, paramagnetyki i diamagnetyki

W przyrodzie występują substancje zwane **ferromagnetykami**, które mają silne właściwości magnetyczne, np. żelazo, kobalt, nikiel. Ferromagnetyki mają specyficzną budowę wewnętrzną, która jest przyczyną ich właściwości magnetycznych. Znajdują się w nich obszary namagnesowania, tzw. **domeny magnetyczne**, które zachowują się jak małe magnesy.

Te domeny są najczęściej ułożone chaotycznie, a ich działanie może się wzajemnie znosić. Aby ferromagnetyk stał się magnesem trwałym, należy go namagnesować (umieścić w silnym polu magnetycznym). Namagnesowanie ferromagnetyku polega na uporządkowaniu domen magnetycznych.

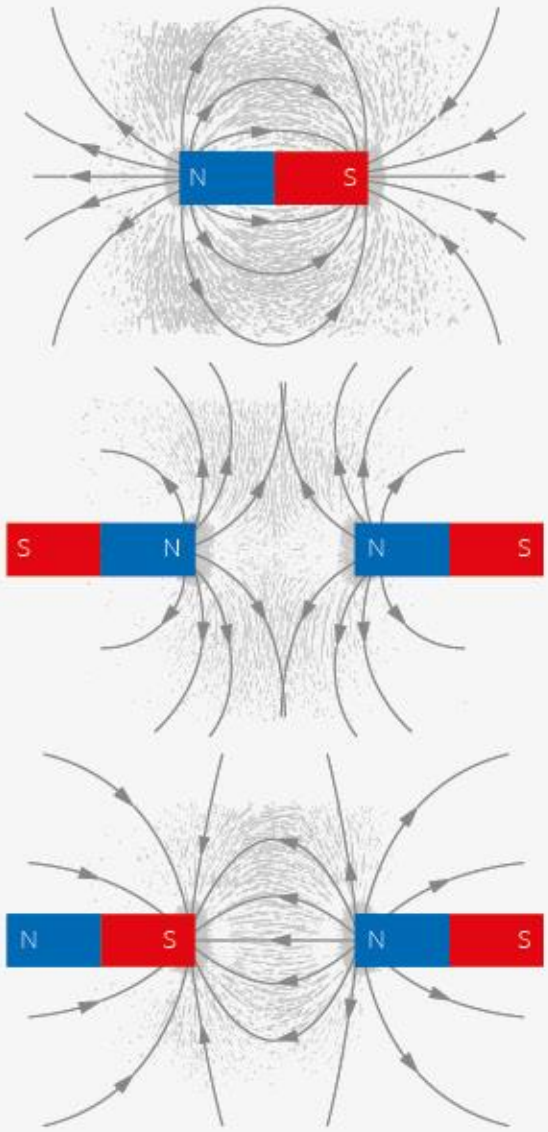


Oprócz ferromagnetyków wyróżnia się **paramagnetyki**, np. aluminium, cyna, tlen, wapń, które magnes słabo przyciąga, oraz **diamagnetyki**, np. miedź, srebro, węgiel, woda, które magnes słabo odpycha.

9.3. Kształt linii pola magnetycznego

Pole magnetyczne przedstawia się za pomocą tzw. **linii pola magnetycznego**, czyli linii wektora indukcji magnetycznej B. Wektor $\vec{B}$ jest styczny do tych linii pola w każdym punkcie. Rozmieszczenie linii odpowiada wielkości pola – im gęściej są rozmieszczone linie, tym silniejsze jest pole.

Linie pola magnetycznego są zawsze liniami zamkniętymi. Pole magnetyczne jest polem wirowym.



Najsilniejsze pole magnetyczne występuje w pobliżu końców magnesu, czyli w pobliżu biegunów magnetycznych. Koniec magnesu, z którego wychodzą linie, określa się jako północny biegun magnesu (N), a ten, do którego wchodzą linie, to biegun południowy (S).

Podobnie jak w przypadku pola magnetycznego Ziemi kierunek linii pola magnesu można wyznaczyć, przesuwając kompas wokół magnesu. Kierunek igły kompasu, która sama jest magnesem sztabkowym, pokazuje kierunek pola magnetycznego. Północny biegun igły magnetycznej wskazuje zwrot linii pola magnetycznego na zewnątrz magnesu. Wynika to z oddziaływania magnesów.

Do wyznaczenia linii pola magnetycznego można wykorzystać także opiłki żelaza, które zachowują się jak małe magnesy (dipole magnetyczne). Opiłki ustawiają się zgodnie z kierunkiem B i dają obraz linii pola magnetycznego.

9.4. Siła Lorentza. Wektor indukcji magnetycznej

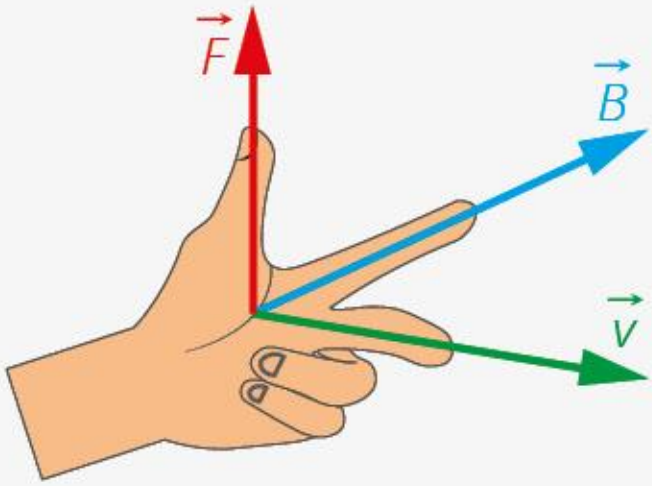
Siła Lorentza – siła działająca na cząstkę obdarzoną ładunkiem elektrycznym, która znajduje się w polu magnetycznym charakteryzowanym przez wektor indukcji magnetycznej $\vec{B}$. Wartość siły Lorenza oblicza się według wzoru:

$$F = qvB \cdot \sin\alpha$$

q – wartość ładunku elektrycznego cząstki, która porusza się z prędkością $\vec{v}$ w polu magnetycznym o indukcji $\vec{B}$

α – kąt zawarty między wektorem prędkości cząstki a wektorem indukcji magnetycznej, $\alpha = \angle(\vec{v}, \vec{B})$

Kierunek siły Lorenza jest prostopadły do płaszczyzny utworzonej przez wektory $\vec{v}$ i $\vec{B}$. Aby wyznaczyć zwrot tej siły, najlepiej skorzystać z **reguły lewej dłoni**.

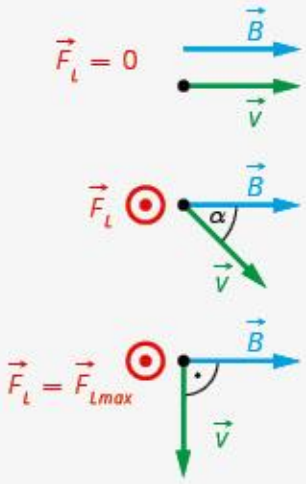


Należy pamiętać, że dla cząstki naładowanej ujemnie siła Lorenza ma zwrot przeciwny do wyznaczonego za pomocą reguły lewej dłoni.

Naładowana cząstka może poruszać się w polu magnetycznym, a siła Lorentza w ogóle nie będzie na nią działała. Z taką sytuacją spotkamy się wtedy, gdy kąt między wektorem prędkości a wektorem indukcji będzie wynosił 0 albo 180° (wówczas sinus tego kąta będzie równy 0). Zatem gdy cząstka porusza się równolegle do linii pola magnetycznego, nie działa na nią siła Lorentza.

Ze względu na kąt α między wektorami $\vec{v}$ i $\vec{B}$ z maksymalną wartością siły Lorentza $\vec{F}_{max}$ mamy do czynienia wtedy, gdy $\alpha = 90°$ lub 270°. Wartość siły Lorentza jest wtedy równa: $|\vec{F}_{max}| = |q| \cdot v \cdot B$.

Dla cząstki naładowanej dodatnio:



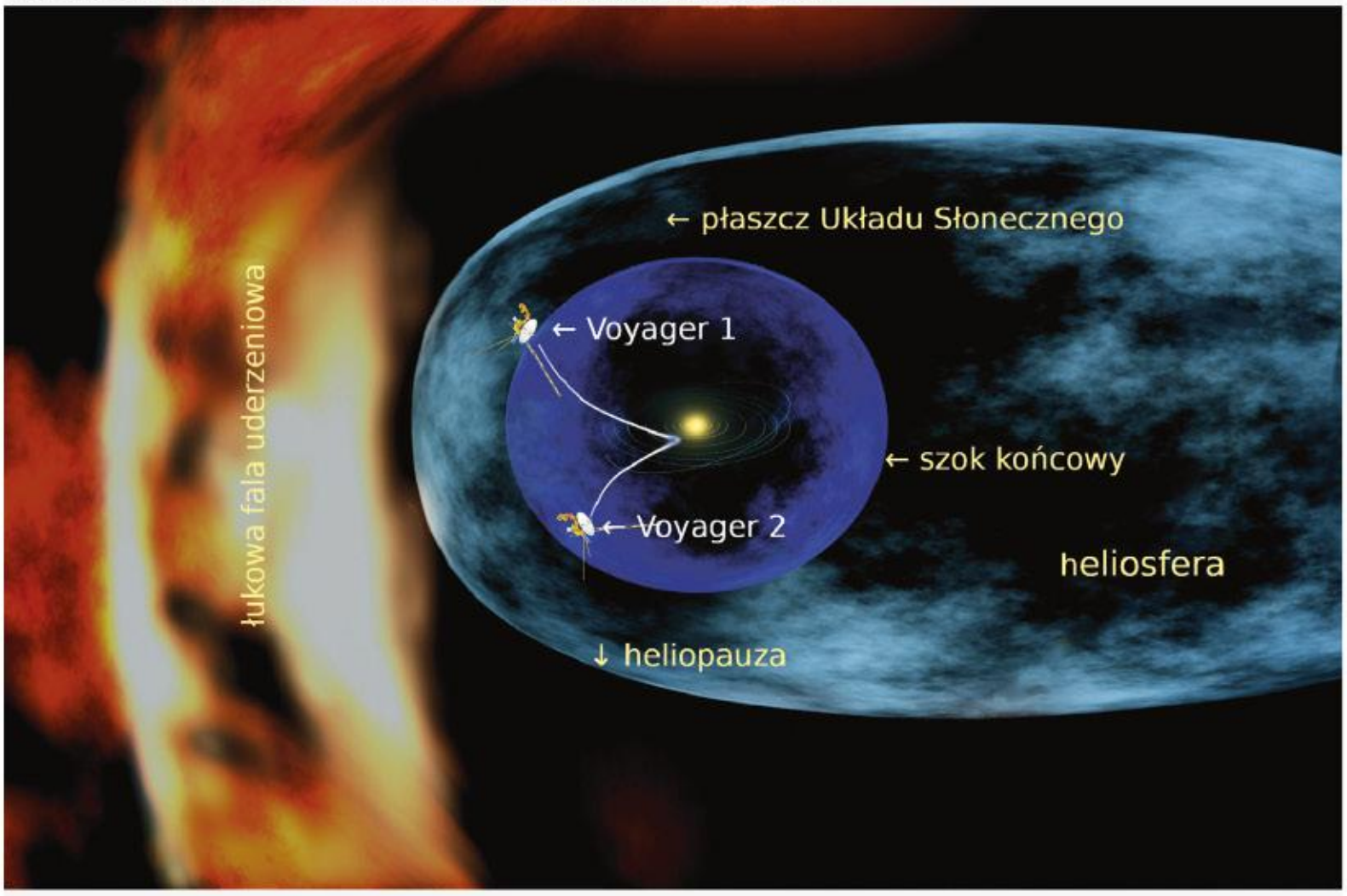
Siła Lorentza, która działa na cząstkę poruszającą się w polu magnetycznym, jest skierowana prostopadle do wektora prędkości $\vec{v}$, a więc i prostopadle do wektora przesunięcia $\overrightarrow{\Delta r}$. Praca $W = F \cdot \Delta r \cdot \cos 90°$. Praca siły Lorentza jest zawsze równa 0. Ta siła nie może zmienić energii kinetycznej naładowanej cząstki – nie może jej przyspieszyć. Jednak może zmienić kierunek jej ruchu.

Siła Lorentza działająca prostopadle do wektora prędkości cząstki jest więc siłą dośrodkową. Powoduje zakrzywienie toru ruchu cząstki.

9.5. Pole magnetyczne Ziemi a wiatr słoneczny

Wiatr słoneczny to strumień naładowanych cząstek (protonów i elektronów) docierających do Ziemi ze Słońca.

Astronomowie twierdzą, że to wiatr słoneczny „wywiał" znaczną część atmosfery Marsa. Na szczęście Ziemię chroni pole magnetyczne, nieobecne w przypadku Marsa. W odległości kilkudziesięciu tysięcy kilometrów od powierzchni Ziemi pole magnetyczne jest na tyle silne, że siła magnetyczna działająca na cząstki wiatru słonecznego powoduje zmianę toru ich ruchu.



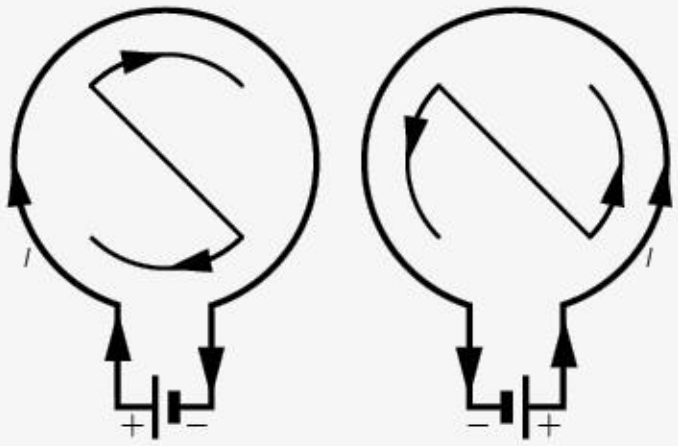
Siła działająca na naładowane cząstki wiatru słonecznego w polu magnetycznym Ziemi chroni nas przed nadmiernym działaniem tego zjawiska i powoduje powstanie zorzy polarnej.

9.6. Pole magnetyczne przewodników z prądem elektrycznym

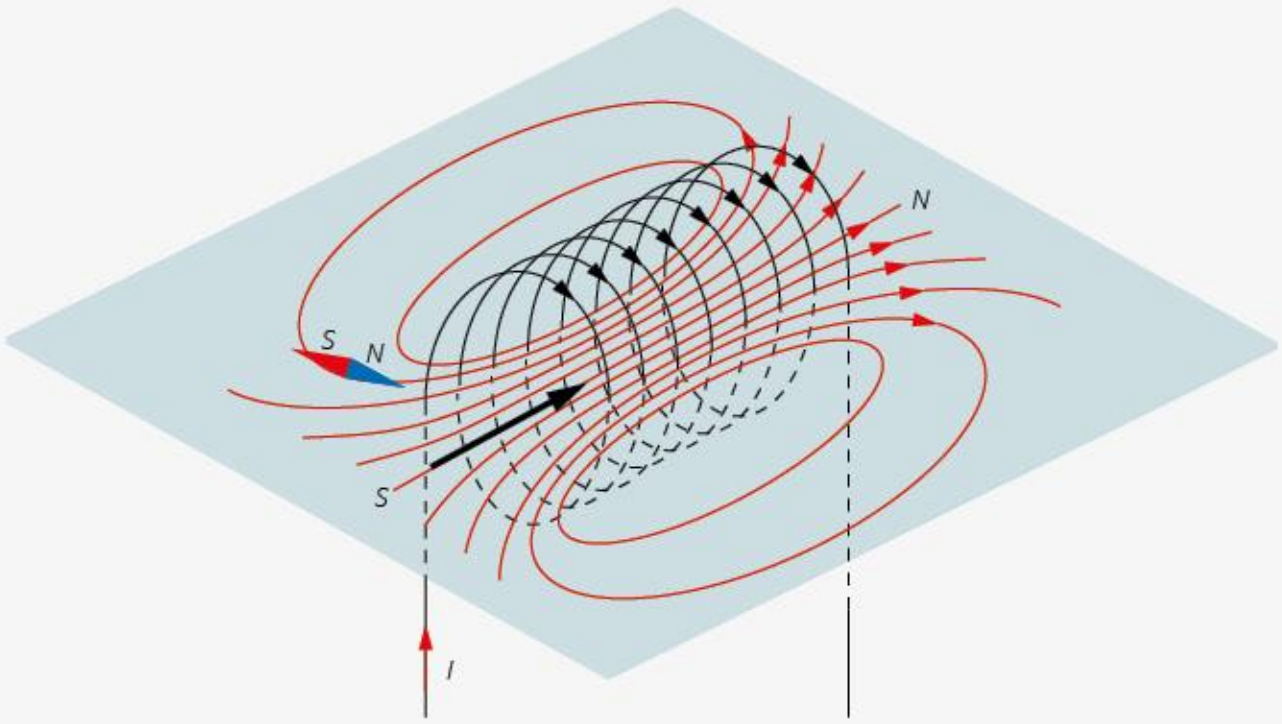
Jeśli rozsypiemy drobne opiłki metalowe wokół magnesu i przewodnika, przez który przepływa prąd elektryczny, to ułożą się one w określone kształty geometryczne. Przyczyną tego zjawiska jest pole magnetyczne wytwarzane przez magnes.

Przewodnik kołowy – przewód zwinięty w kształcie koła

Bieguny magnetyczne przewodnika kołowego z prądem elektrycznym określa się za pomocą reguły śruby prawoskrętnej.

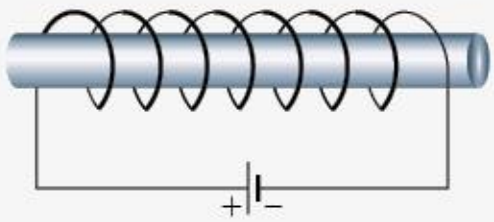


Zwojnica – kilka połączonych przewodników kołowych

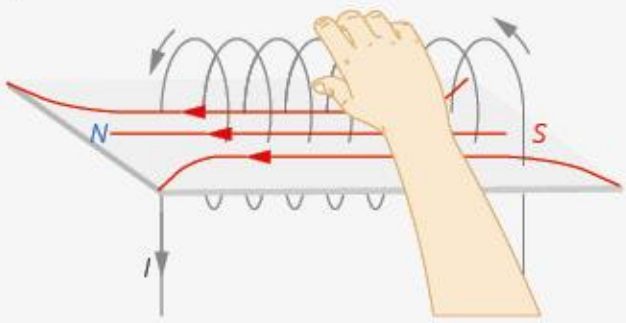


Elektromagnes

Elektromagnes – magnes, którego pole magnetyczne powstaje w wyniku przepływu prądu elektrycznego. Jest to zwojnica, wewnątrz której znajduje się ferromagnetyczny rdzeń (np. ze stali, żelaza).



Elektromagnes działa dzięki polu magnetycznemu wokół przewodnika z prądem. Zwrot linii pola magnetycznego określa **reguła prawej dłoni**. Jeżeli prawą dłonią obejmujemy zwojnicę tak, aby cztery palce były skierowane zgodnie z przepływem prądu elektrycznego, to odchylony kciuk wskaże biegun północny pola magnetycznego.



Elektromagnesów używa się np. w zamkach elektrycznych stosowanych w instalacjach domofonowych – elektromagnes wytwarza silne pole magnetyczne, które działa na metalowy (stalowy) element zamka (zasuwę). Przesunięcie zasuwy powoduje możliwość otwarcia drzwi. Po odłączeniu napięcia od elektromagnesu umieszczona odpowiednio sprężyna cofa zasuwę i blokuje zamek.

Elektromagnesy montuje się np. na dźwigach elektromagnetycznych, które służą do podnoszenia wraków samochodów na złomowiskach.

Najsilniejsze elektromagnesy są używane w akceleratorach służących do kontrolowania ruchu cząstek mających wysoką energię.

Pole magnetyczne wytwarzane przez przewodniki z prądem sterowało dawniej ruchem elektronów w kineskopach telewizyjnych, monitorach komputerowych i lampach oscyloskopowych.

9.7. Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym. Cyklotron

Dowolna cząstka nieobdarzona ładunkiem lub naelektryzowana, ale spoczywająca albo poruszająca się wzdłuż linii pola magnetycznego, w polu magnetycznym nie doznaje działania żadnej siły ze strony tego pola. Cząstka naelektryzowana, wpadająca w obszar pola magnetycznego z prędkością *v*, podlega działaniu siły Lorentza i osiąga największą wartość, gdy ruch cząstki odbywa się w kierunku prostopadłym do linii pola. Wartość maksymalnej siły Lorentza wynosi:

$$F = q \cdot v \cdot B$$

q – ładunek cząstki

v – prędkość cząstki

B – indukcja magnetyczna pola, w którym cząstka się porusza

Ta siła jest prostopadła do prędkości cząstki. Kierunek i zwrot siły określa reguła lewej dłoni (zwaną regułą Fleminga).

Na podstawie siły Lorentza można zdefiniować **indukcję magnetyczną**: jest to wielkość fizyczna o wartości równej stosunkowi siły Lorenza *F* działającej na cząstkę poruszającą się prostopadle do linii pola magnetycznego do iloczynu ładunku *q* cząstki i jej prędkości *v*.

$$B = \frac{F}{q \cdot v}$$

Jednostką indukcji magnetycznej jest **tesla** (T): 1 T.

$$1\,\mathrm{T} = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{C} \cdot 1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{m}}$$

Siła Lorentza działająca na cząstkę poruszającą się prostopadle do linii pola magnetycznego jest prostopadła do wektora prędkości tej cząstki. Taka siła jest siłą dośrodkową, zakrzywiającą tor ruchu tej cząstki. Pod wpływem siły dośrodkowej cząstka o masie *m*, obarczona ładunkiem *q*, poruszająca się z prędkością *v* prostopadle do linii pola magnetycznego o indukcji *B* zatacza okrąg, którego promień *r* wyznaczamy, przyrównując siłę Lorentza do siły dośrodkowej:

$$B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}, \text{ czyli } r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

Okres ruchu cząstki wzdłuż okręgu o promieniu $r = \frac{mv}{qB}$ wynosi:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

To oznacza, że okres ruchu nie zależy ani od wartości prędkości cząstki, ani od promienia zataczanego przez tę cząstkę okręgu. Zostało to wykorzystane w cyklotronach.

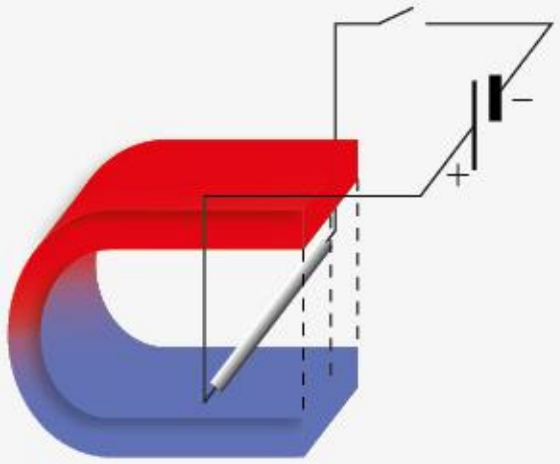
Cyklotron to urządzenie służące do przyspieszania cząstek naładowanych w celu uzyskania dużej energii cząstki.

Takie cząstki wykorzystuje się m.in. w celach naukowych i w medycynie. Cyklotron stanowią dwie, opróżnione z powietrza, części metalowej puszki, tzw. duanty, umieszczone w jednorodnym, prostopadłym, polu magnetycznym o indukcji *B*. W przestrzeni między duantami jest wytwarzane pole elektryczne przez dołączenie do duantów zmieniającego się okresowo napięcia. W środku przestrzeni między duantami umieszcza się źródło cząstek, np. protonów. Pole elektryczne przyspiesza cząstki, które wpadają do wnętrza duantu i w polu magnetycznym zataczają połowę okręgu, w czasie połowy okresu, i docierają do szczeliny między duantami. W tym momencie zwrot linii pola elektrycznego jest przeciwny do poprzedniego i pole znowu przyspiesza cząstki. Cząstki o większej prędkości, wpadając w pole magnetyczne, zataczają połowę okręgu o większym promieniu, ale w tym samym czasie znowu docierają do szczeliny między duantami. Każdorazowo podczas ruchu cząstek przez szczelinę między duantami pole elektryczne przyspiesza cząstki, a podczas ruchu w duantach pole magnetyczne zakrzywia tor ich ruchu, aż do momentu, gdy promień okręgu stanie się prawie równy promieniowi duantu. Wtedy cząstki wydostają się na zewnątrz i mogą być wykorzystane np. do bombardowania nimi jąder atomowych pierwiastków w celu uzyskania innych jąder lub cząstek.

9.8. Siła elektrodynamiczna. Silnik elektryczny

Podczas przepływu prądu przez przewodnik umieszczony między biegunami magnesu podkowiastego pojawiała się siła, która albo wypycha przewodnik z przestrzeni między biegunami, albo wciągała go w głąb podkowy magnesu. To oznacza, że siła działała prostopadle do przewodnika. Zwrot tej siły zależy od tego, w którą stronę płynie prąd i jak są ustawione bieguny magnesu.

Jeśli przewodnik, przez który płynie prąd, zostanie umieszczony w polu magnetycznym, to na ten przewodnik będzie działała siła o kierunku prostopadłym do przewodnika. To **siła elektrodynamiczna**, jaką pole magnetyczne działa na przewodnik, w którym płynie prąd elektryczny.



Wartość **siły elektrodynamicznej** zależy od natężenia prądu, długości przewodnika, właściwości magnesu (magnes słabszy lub silniejszy).

$$F = B \cdot I \cdot l$$

F – siła elektrodynamiczna
I – natężenie prądu
l – długość przewodnika

Po przekształceniu otrzymamy:

$$B = \frac{F}{I \cdot l}$$

Na podstawie powyższego wzoru można określić jednostkę indukcji magnetycznej (**tesla**):

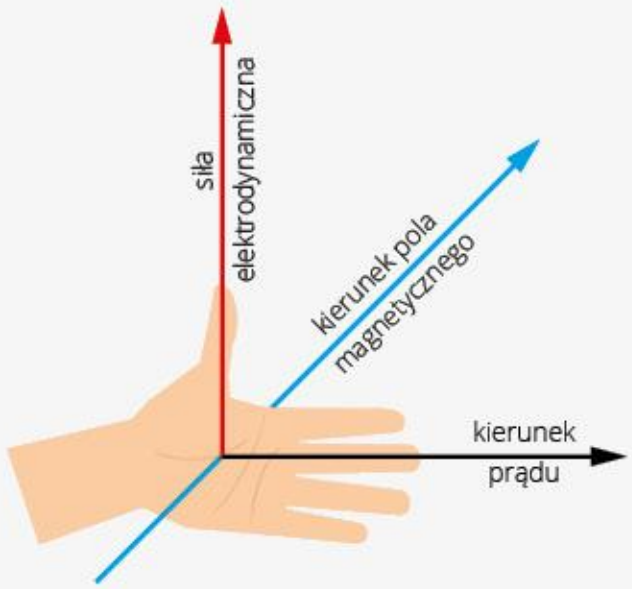
$$1\,\mathrm{T} = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{m}}$$

Indukcja magnetyczna ma wartość 1 T w takim polu magnetycznym, w którym siła elektrodynamiczna 1 N działa na przewodnik z prądem o długości 1 m, przez który płynie prąd o natężeniu 1 A.

Kierunek wychylenia się ramki

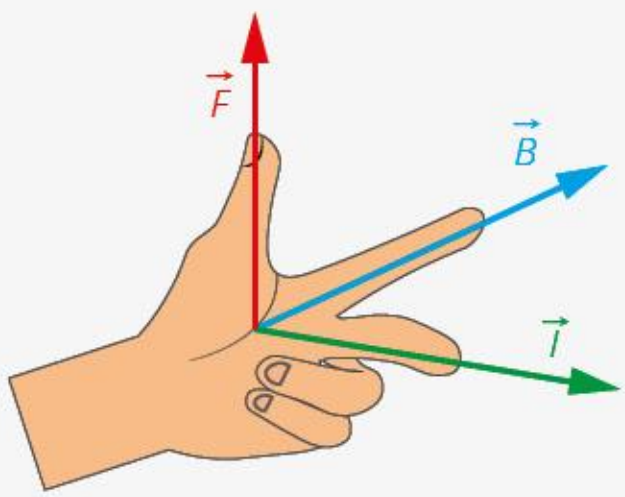
Kierunek wychylenia się ramki określa kolejna reguła lewej dłoni.

Lewą dłoń należy ustawić w taki sposób, że złączone palce będą wskazywały kierunek przepływu prądu, do wewnętrznej strony dłoni muszą być skierowane linie pola magnetycznego, a odchylony kciuk pod kątem 90° wskazuje kierunek działania siły elektrodynamicznej.



Do określania kierunku działania siły elektrodynamicznej możemy używać również **reguły trzech palców**.

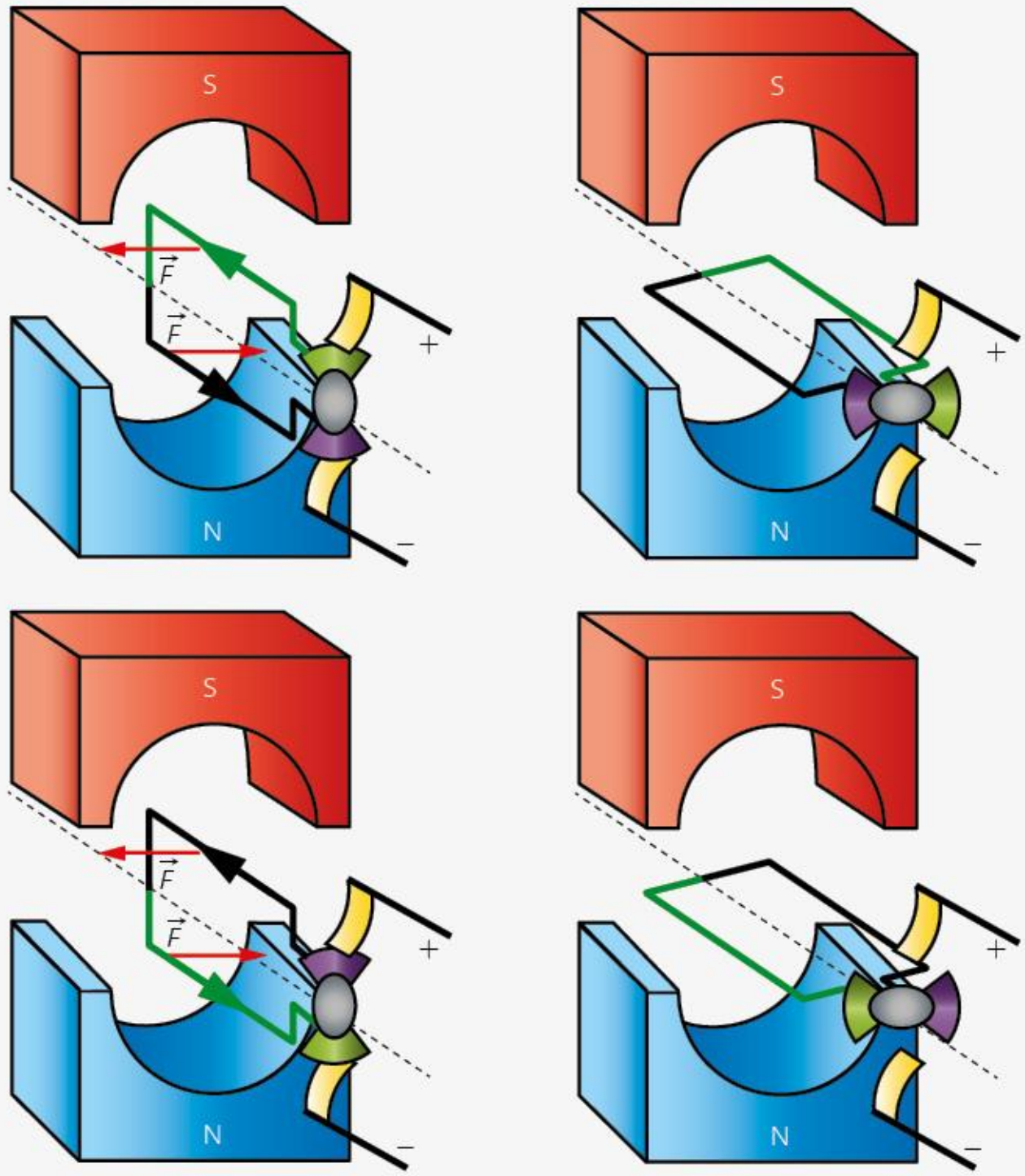
Trzeba użyć trzech palców lewej dłoni: – ustawić kciuk, palec wskazujący i palec środkowy prostopadle do siebie. Palec wskazujący ustawiamy wzdłuż kierunku linii pola magnetycznego, biegnących od bieguna północnego do południowego. Środkowy palec ustawiamy wzdłuż przewodnika, w kierunku przepływu prądu. Gdy ustawimy tak te dwa palce, to kciuk będzie wskazywał kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.



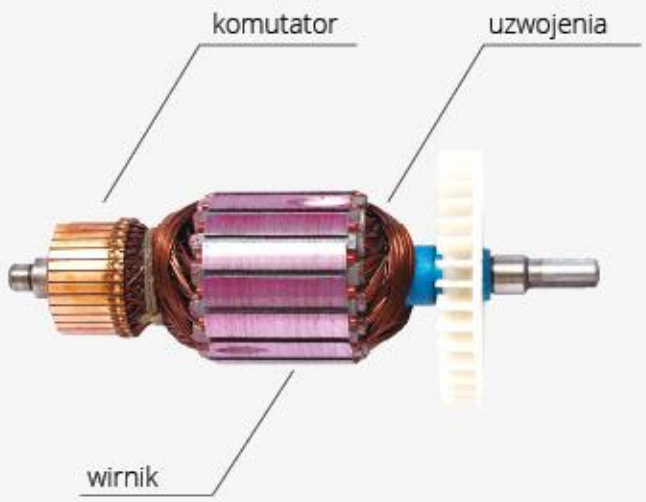
Silnik elektryczny

Silnik elektryczny jest zbudowany ze **stojana** i **wirnika**. Stojan składa się z minimum dwóch magnesów stałych lub elektromagnesów, a wirnik – z kilku metalowych ramek, dwóch metalowych półpierścieni, do których przylegają przewodzące elementy nazywane szczotkami (do szczotek za pomocą przewodów jest doprowadzony prąd elektryczny). Ruch wirnika jest spowodowany oddziaływaniem magnesów (lub elektromagnesów) na przewodnik z prądem (wirnik).

Silnik elektryczny zamienia energię elektryczną na pracę mechaniczną.



Zgodnie z powyższym rysunkiem na boki ramki działa siła elektrodynamiczna mająca zwrot w prawo i w lewo. Pod wpływem obu sił ramka zacznie się obracać. Kiedy ramka obróci się o 90°, nastąpi tzw. punkt martwy; prąd nie płynie, ale ramka obraca się dalej dzięki wcześniej uzyskanej energii kinetycznej. Aby ramka mogła obracać się o kąt większy niż 180°, zastosowany został komutator, czyli przełącznik służący do automatycznego poruszania się ramki. Ramka wraz z komutatorem tworzy wirnik, który obraca się wokół osi.



9.9. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

Przeprowadzone w 1831 r. przez Michała Faraday'a doświadczenia wykazały, że pole magnetyczne może wywołać przepływ prądu w obwodzie niepodłączonym do źródła napięcia. Aby to się zdarzyło, obwód musi być zamknięty i pole magnetyczne nie może być stałe, tzn. musi zmieniać się np. odległość obwodu od źródła pola magnetycznego, ustawienie obwodu względem linii pola magnetycznego lub wartość indukcji magnetycznej. Wzbudzany w obwodzie prąd nazywamy **prądem indukcyjnym**, a zjawisko wzbudzania prądu indukcyjnego – **zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej**.

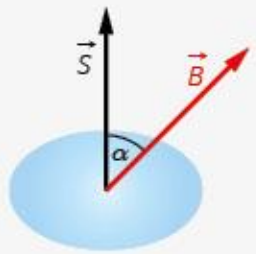
W obwodzie zamkniętym wzbudza się prąd indukcyjny. To oznacza, że między końcami obwodu wzbudza się różnica potencjałów. Tę różnicę potencjałów nazywamy **siłą elektromotoryczną SEM indukcji**, oznaczamy literą $\mathcal{E}$ i wyrażamy w woltach.

Prawo indukcji – siła elektromotoryczna SEM indukcji jest wprost proporcjonalna do szybkości zmian strumienia magnetycznego przenikającego przez obwód.

Strumień indukcji magnetycznej

Strumień indukcji magnetycznej jest miarą całkowitej ilości pola magnetycznego, które przechodzi przez daną powierzchnię.

Strumień przechodzący przez powierzchnię S jest zdefiniowany jako iloczyn skalarny wektora indukcji magnetycznej i wektora powierzchni S.



Dla powierzchni płaskiej i jednorodnego pola magnetycznego wzór na strumień ma postać:

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

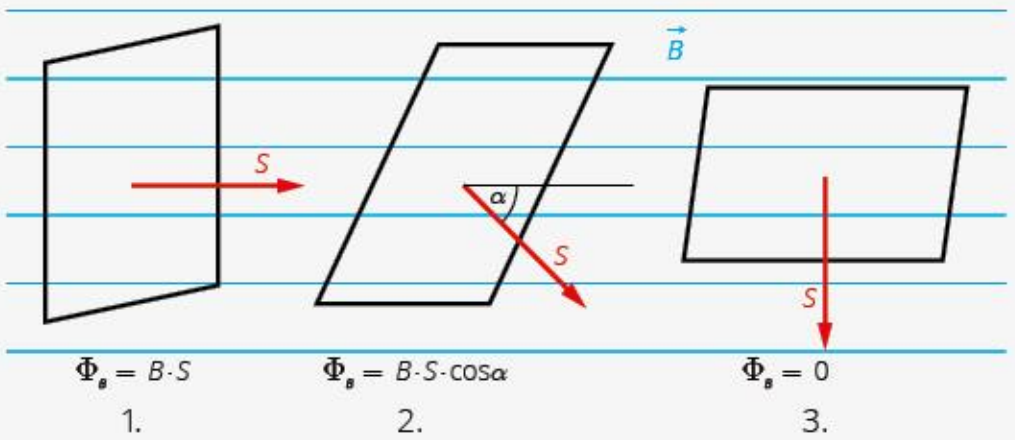
$\vec{B}$ – wektor indukcji magnetycznej

$\vec{S}$ – wektor powierzchni S

α – kąt między wektorami $\vec{B}$ i $\vec{S}$

Jednostką strumienia magnetycznego jest **weber** (Wb): 1 Wb.

$$1\,\text{Wb} = 1\,\text{T} \cdot 1\,\text{m}^2$$



1. Gdy linie jednorodnego pola magnetycznego są prostopadłe do wybranej przez nas powierzchni, to wartość strumienia przenikającego przez tak ustawioną powierzchnię obliczamy z wzoru: $\Phi_B = B \cdot S$.
2. Gdy pole jest jednorodne, ale jego linie nie są prostopadłe do wybranej przez nas powierzchni S, to uwzględniamy wyłącznie składową B wektora indukcji magnetycznej, prostopadłą do tej powierzchni.
3. Gdy linie jednorodnego pola magnetycznego są równoległe do wybranej przez nas powierzchni S, to strumień magnetyczny ma wartość 0.

Prawo Faradaya zapisuje się w postaci:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

$\Delta\Phi_B$ – zmiana strumienia magnetycznego przenikającego przez obwód

Δt – czas, w którym ta zmiana nastąpiła

Jeśli obwód zawiera cewkę mającą n zwojów, to SEM będzie n razy większa:

$$\mathcal{E} = -n\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

Znak minus jest związany z kierunkiem wzbudzającego się prądu indukcyjnego. Mówi o tym reguła Lenza, według której prąd indukcyjny ma taki kierunek, że jego własne pole magnetyczne przeciwdziała zmianom strumienia magnetycznego, który jest przyczyną jego wzbudzenia. Ta reguła wynika z zasady zachowania energii.

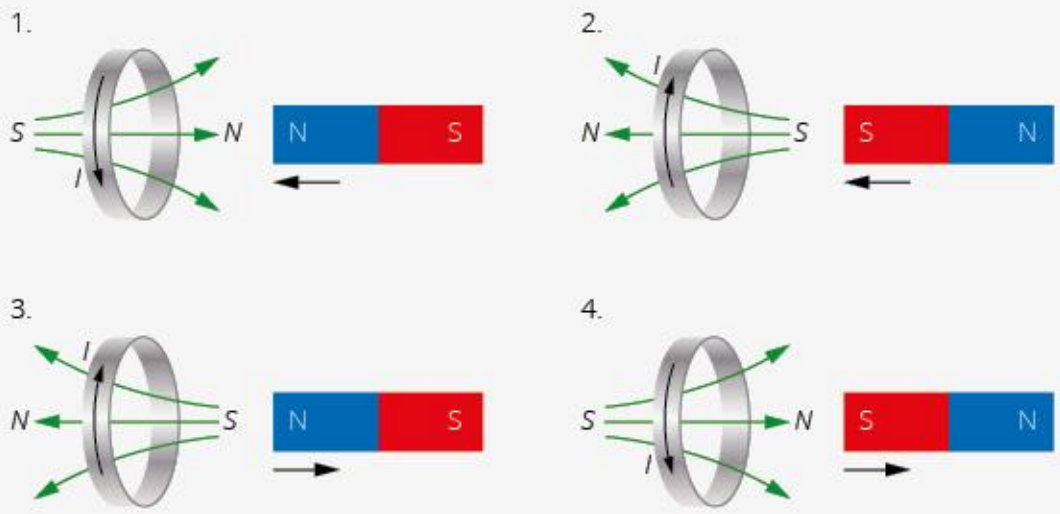
Zjawisko indukcji elektromagnetycznej wykorzystuje się m.in. do wytwarzania prądu zmiennego.

Reguła Lenza
Prąd indukcyjny płynie w takim kierunku, aby pole magnetyczne przez niego wytworzone przeszkadzało zmianom pola magnetycznego, dzięki którym ten prąd powstał.

Na rysunku przedstawiono cztery przypadki wzbudzania prądu indukcyjnego w obwodzie kołowym przy ruchu magnesu:

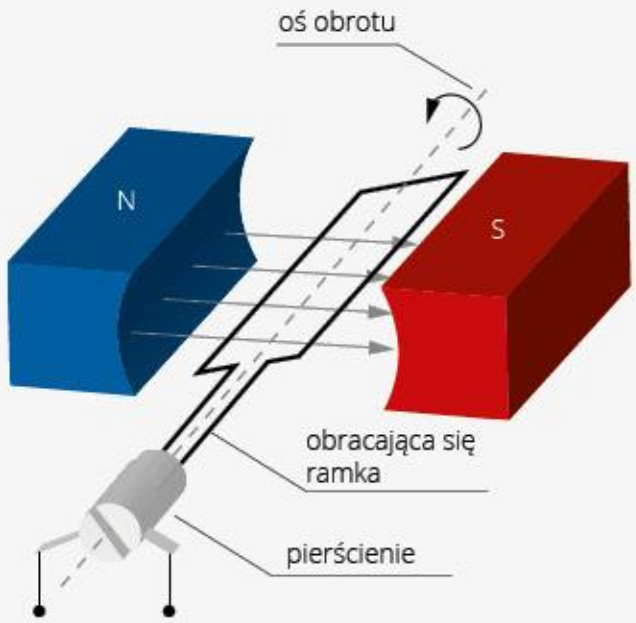
1. Magnes jest zbliżany do pętli biegunem N, co sprawia, że powstaje pole magnetyczne pętli, skierowane biegunem N w stronę magnesu. Jednoimienne bieguny się odpychają, więc ruchowi magnesu przeciwstawia się pole magnetyczne wytworzone przez prąd wzbudzony w pętli.
2. Jeśli magnes zostanie zbliżony do pętli biegunem S, powstanie pole magnetyczne w pętli, skierowane biegunem S w stronę magnesu. W pętli popłynie prąd w stronę przeciwną niż w przypadku 1.

Przypadki 2 i 3 można podobnie przeanalizować: oddalaniu się magnesu od pętli będzie się przeciwstawiać pole magnetyczne pętli pochodzące od wzbudzonego w niej prądu.

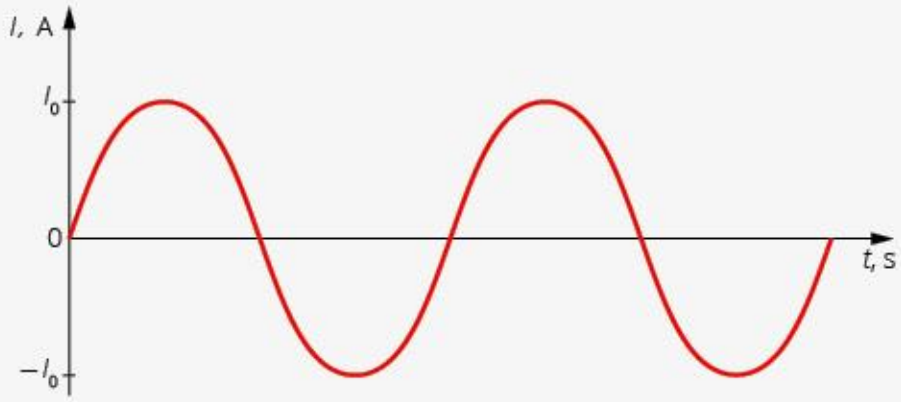


9.10. Prądnica prądu przemiennego

Prądnica prądu przemiennego to urządzenie, które zamienia pracę mechaniczną (obracanie ramki) na energię elektryczną. Obrót ramki, będącej częścią urządzenia, w polu magnetycznym sprawia, że ramka w pewnym sensie znajduje się w zmiennym polu magnetycznym. Przez powierzchnię obracającej się ramki przechodzi coraz to inna liczba linii pola magnetycznego. W ramce w wyniku zjawiska indukcji powstaje prąd indukcyjny, który będzie zmienny, czyli jego kierunek i natężenie ulegają okresowym zmianom. Zmienność prądu jest skutkiem tego, że gdy ramka zbliża się jedną stroną do bieguna magnesu N, to zgodnie z regułą Lenza powstaje po tej stronie ramki biegun N, aby przeciwdziałać jej zbliżaniu się. Z kolei gdy ramka zacznie się oddalać, powstanie tam biegun S. Zatem z każdym obrotem ramki zmienia się kierunek przepływu prądu.



Na wykresie natężenia od czasu dla prądu przemiennego, przejście przez miejsce zerowe oznacza zmianę kierunku przepływu prądu.



Napięcie skuteczne – wartość skuteczna okresowego napięcia elektrycznego równa jest stałemu napięciu przyłożonemu do danego oporu, powodującemu wydzielanie się na tym oporze takiej samej energii, jak przy napięciu zmiennym. Jeżeli opornik podłączymy do napięcia przemiennego o amplitudzie U_0, to średnia moc prądu będzie taka sama jak w sytuacji, gdy zostałby on podłączony do napięcia stałego o pewnej wartości U_{sk}:

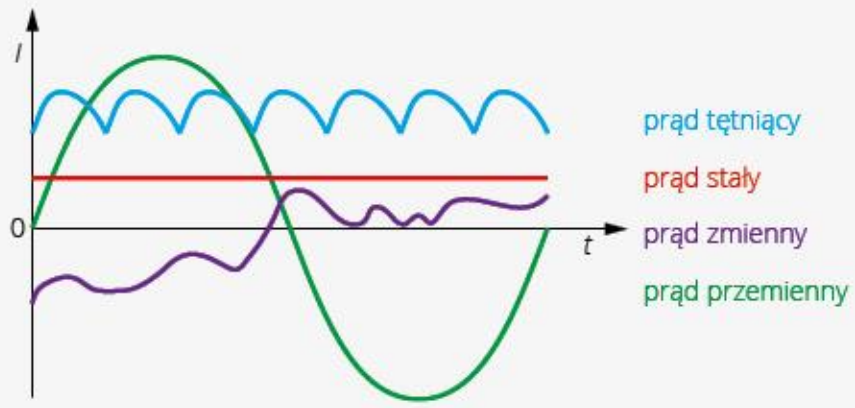
$$U_{sk} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

Jeśli w obwodzie prądu przemiennego zmienia się napięcie, natężenie prądu również ulega zmianom. Wartość skuteczna natężenia prądu wyraża się wzorem:

$$I_{sk} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

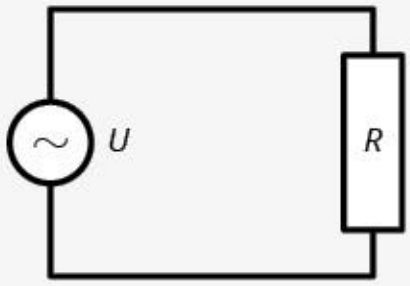
9.11. Prąd przemienny

Prąd przemienny to szczególny rodzaj prądu okresowo zmiennego, w którym wartości chwilowe przyjmują naprzemiennie wartości dodatnie i ujemne. Zmieniają się one z określoną częstotliwością i w sposób okresowy według przebiegu sinusoidalnego.



Prąd przemienny jest powszechnym rodzajem prądu, z którym każdy człowiek ma styczność na co dzień. Najpopularniejszym wykorzystaniem tego prądu są domowe odbiorniki energii elektrycznej zasilane z gniazd elektrycznych. Z nich czerpany jest prąd o stałych parametrach: napięciu skutecznym o wartości 230 V i częstotliwości 50 Hz.

Najprostszy obwód prądu przemiennego stanowi odbiornik o oporze *R* zasilany ze źródła napięcia przemiennego:



Chwilowa wartość natężenia prądu płynącego przez opornik *R* wynosi:

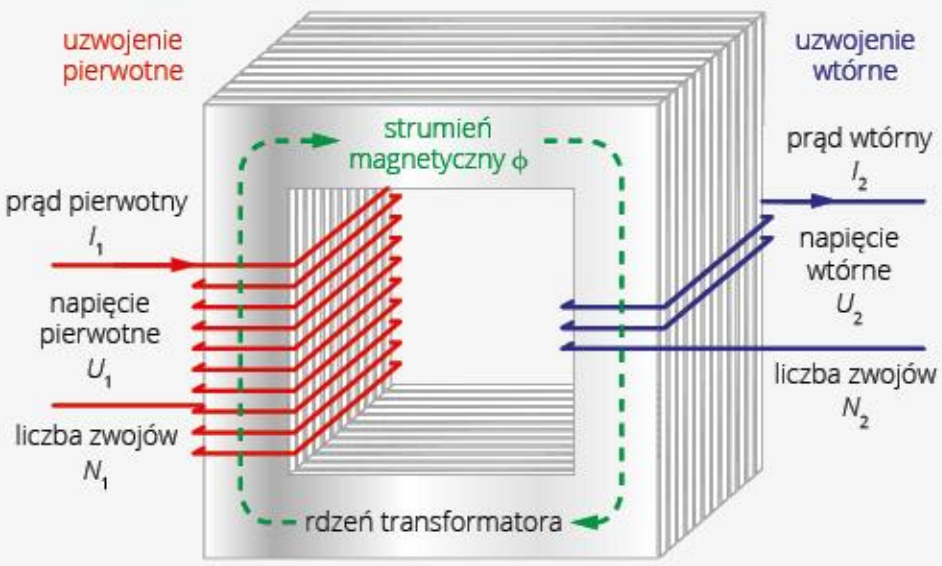
$$I = I_0 \cdot \sin \omega t$$

Chwilowa wartość napięcia między końcami tego opornika wynosi:

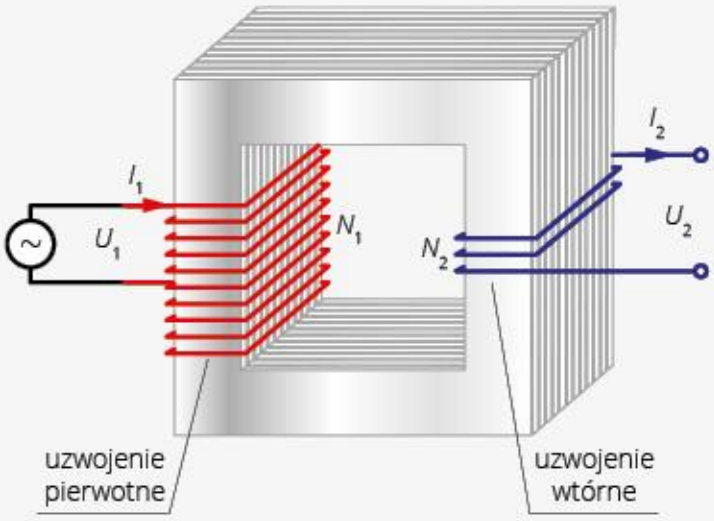
$$U = U_0 \cdot \sin \omega t \qquad U = I_0 \cdot R \cdot \sin \omega t$$

9.12. Transformator

Transformator to maszyna elektryczna najczęściej wykorzystywana do zmiany właściwości przepływającego prądu przemiennego. Do jego najważniejszych elementów należą **stalowy rdzeń** oraz **dwa uzwojenia: pierwotne i wtórne**, wykonane z izolowanych przewodów z miedzi lub aluminium.



Uzwojenie pierwotne transformatora jest zasilane przemiennym napięciem, dzięki czemu przez to uzwojenie płynie prąd przemienny. Ten prąd powoduje powstanie zmiennego strumienia magnetycznego wewnątrz uzwojenia pierwotnego. Zmienny strumień magnetyczny przenosi się przez stalowy rdzeń do wnętrza uzwojenia wtórnego. Dzięki zjawisku indukcji elektromagnetycznej na końcach uzwojenia wtórnego powstaje napięcie przemienne.



Dla idealnego transformatora, w którym nie występują straty energii, obowiązują wzory:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad I_1U_1 = I_2U_2$$

U_1 – maksymalna wartość napięcia na uzwojeniu pierwotnym
U_2 – maksymalna wartość napięcia na uzwojeniu wtórnym
I_1 – maksymalna wartość natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym
I_2 – maksymalna wartość natężenia prądu w uzwojeniu wtórnym
N_1 – liczba zwojów pierwotnych
N_2 – liczba zwojów wtórnych

Jeżeli liczba zwojów uzwojenia wtórnego jest większa od liczby zwojów uzwojenia pierwotnego ($N_2 > N_1$), to transformator podwyższa napięcie. Jeżeli liczba zwojów uzwojenia wtórnego jest mniejsza od liczby zwojów uzwojenia pierwotnego ($N_2 < N_1$), to transformator obniża napięcie.

Transformatory stosuje się np. we wzmacniaczach mocy, telewizorach, zasilaczach do komputera, ładowarkach do telefonu, a także w liniach elektrycznych.

Transformatory pozwalają na uzyskanie w uzwojeniu wtórnym prądu o dużym natężeniu, dlatego wykorzystano je w lutownicy transformatorowej i zgrzewarce punktowej. Transformator w takim urządzeniu ma w uzwojeniu wtórnym mniej zwojów niż w pierwotnym, dzięki czemu uzyskuje się obniżenie napięcia i podwyższenie natężenia prądu. Inaczej niż w liniach przesyłowych energii elektrycznej – tu przewody uzwojenia wtórnego mają się grzać tak, aby cyna w kontakcie z nimi topiła się, a także by możliwa stała się obróbka termiczna metali.

Inne zastosowanie transformatory znalazły w takich urządzeniach, jak spawarka transformatorowa, przecinarka plazmowa i transformatorowy piec hutniczy. Wykorzystano w nich wysokie napięcie wytworzone we wtórnym uzwojeniu transformatora i powstanie przy otwartym obwodzie łuku plazmowego, w którym płynie prąd o bardzo dużym natężeniu i jest wytwarzana bardzo wysoka temperatura.

10

FALE I OPTYKA

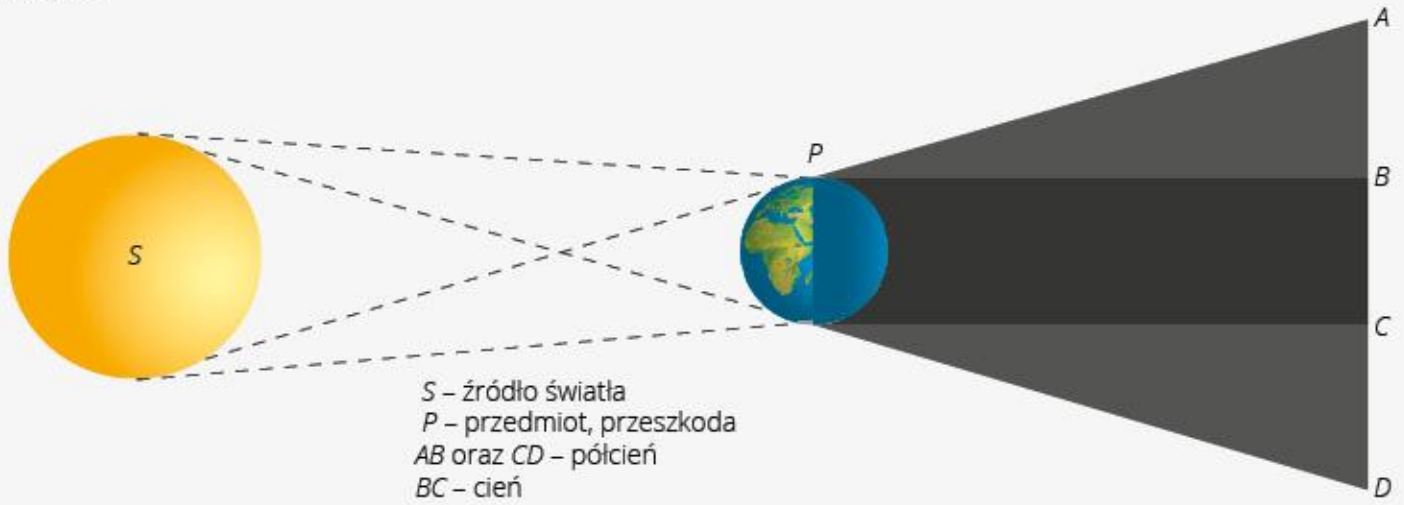
10.1. Światło i jego właściwości

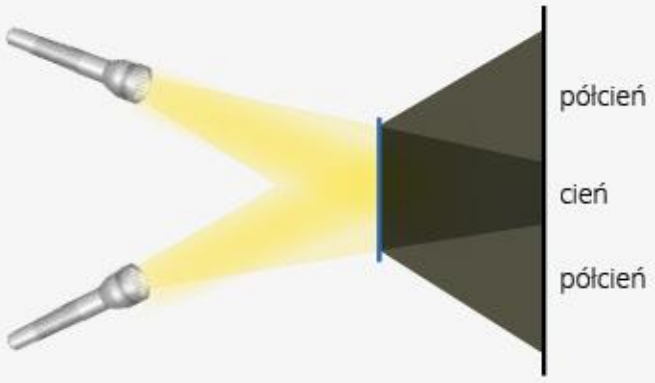
Źródłem światła jest każde ciało, które emituje, wysyła promienie świetlne. Ze względu na pochodzenie źródła światła dzielimy na:
- naturalne, np. Słońce, gwiazdy, błyskawica,
- sztuczne, wytworzone przez człowieka, np. żarówka, laser, świeca.

Światło ma dwoistą naturę: **falową** i **korpuskularną**. Rozchodzi się ruchem jednostajnym z prędkością rozchodzenia się fali elektromagnetycznej, czyli w próżni z prędkością ok. $c = 300000\,\frac{\text{km}}{\text{s}} = 3 \cdot 10^8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Zjawiska cienia, półcienia i zaćmienia

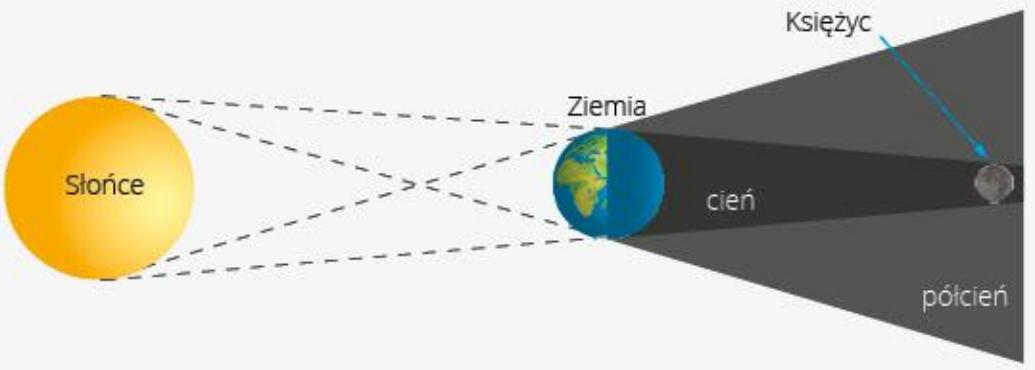
Cień jest to obszar, do którego światło nie dociera, a **półcień** to obszar, do którego światło dociera częściowo.





Do **zaćmienia Słońca** dochodzi, gdy Księżyc znajduje się między Słońcem a Ziemią.

Do **zaćmienia Księżyca** dochodzi, gdy Ziemia znajduje się między Słońcem a Księżycem.



10.2. Fale elektromagnetyczne

Fala elektromagnetyczna – okresowe zaburzenia (zmiany) pola elektrycznego i magnetycznego rozchodzące się w przestrzeni.

W przeciwieństwie do fal mechanicznych fale elektromagnetyczne mogą rozchodzić się w próżni. Prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej zależy od ośrodka (np. w wodzie prędkość fali elektromagnetycznej wynosi ok. 224 000 $\frac{km}{s}$). Z największą prędkością rozchodzi się fala elektromagnetyczna w próżni. Wynosi ona ok. 300 000 $\frac{km}{s} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, jest oznaczana literą *c*.

Długość fali elektromagnetycznej

$$\lambda = v \cdot T \quad T = \frac{1}{f} \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

v – prędkość rozchodzenia się fali
T – okres
λ – długość fali
f – częstotliwość fali

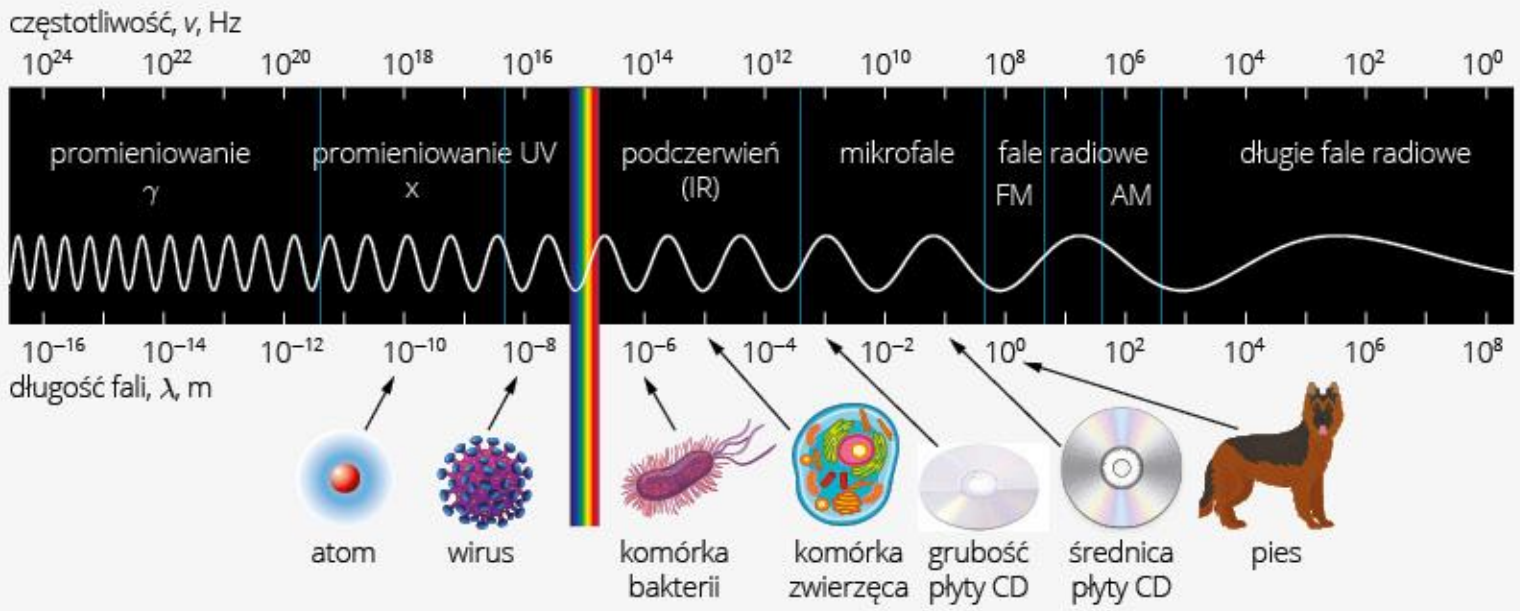
Natężenie fali elektromagnetycznej

$$I = \frac{P}{S} \quad P = \frac{E}{t} \quad I = \frac{E}{S \cdot t}$$

I – natężenie fali
S – powierzchnia, na którą pada światło pod kątem prostym
E – energia światła
t – czas padania światła na powierzchnię

Przegląd fal elektromagnetycznych

Widmo fali elektromagnetycznej

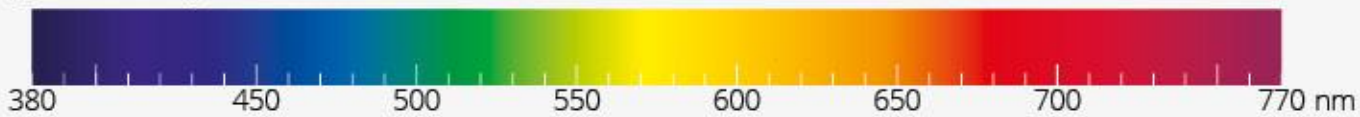


Fale radiowe – fale wykorzystywane do przesyłania sygnału radiowego oraz telewizyjnego; długość tych fal jest większa niż 1 m.

Mikrofale – fale o długościach od 1 mm do 1 m, stosowane w łączności satelitarnej, telefonii komórkowej, nawigacji GPS i łączności bluetooth.

Podczerwień – fala o długości od 1 mm do 780 nm; te fale są wykorzystywane w urządzeniach do wykrywania i wskazywania ciał oraz miejsc o wyższej temperaturze, a także w urządzeniach sprzętu audiowizualnego.

Światło widzialne – fale elektromagnetyczne o długości od 380 nm do 780 nm, na które reaguje ludzkie oko. Widmo światła widzialnego składa się z barw: fioletowej, niebieskiej, zielonej, żółtej, pomarańczowej i czerwonej.



Nadfiolet – fala o długości od 380 nm do 10 nm; jest to promieniowanie wysyłane przez Słońce, odpowiadające za tworzenie się opalenizny, w nadmiarze szkodliwe dla skóry i oczu. Nadfiolet można wytworzyć sztucznie w świetlówkach, lampach antybakteryjnych i służących do dezynfekcji.

Promieniowanie X (inaczej: rentgenowskie) – fala o długości 10 nm do 5 pm; promieniowanie wykorzystywane w medycynie oraz do tworzenia obrazów na matrycach światłoczułych.

Promieniowanie gamma – fala o długości poniżej 5 pm; powstaje w przemianach jąder atomowych, w zderzeniach cząstek elementarnych w akceleratorach i w Kosmosie.

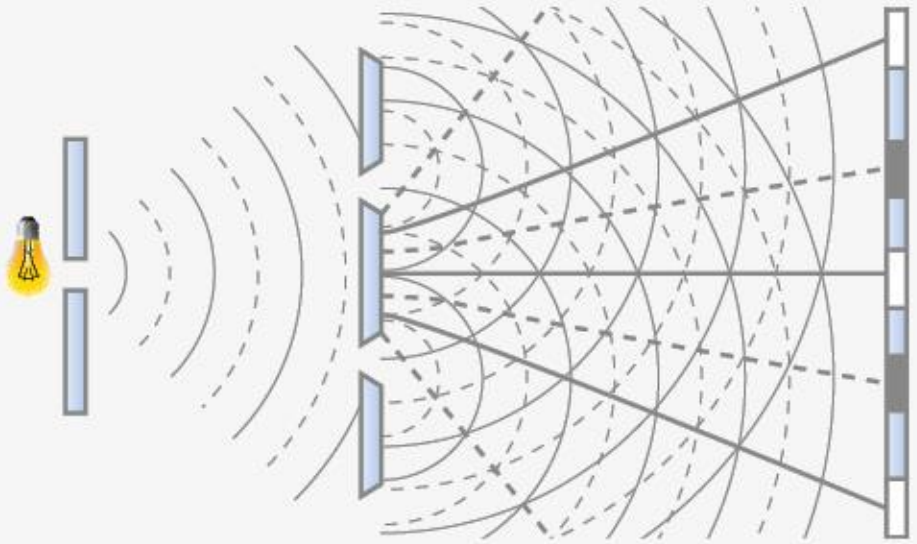
10.3. Dyfrakcja i interferencja światła

Zjawisko **dyfrakcji**, czyli **ugięcia fali**, zachodzi wtedy, gdy długość fali jest większa lub porównywalna z wielkością przeszkody. W momencie przechodzenia przez przeszkodę na krawędzi szczeliny światło ulega ugięciu, czyli zmienia się kierunek rozchodzenia fali.

Interferencja – zjawisko nakładania się fal po przejściu przez szczeliny; jest dowodem, że światło ma naturę falową.

10.4. Doświadczenie Younga – interferencja światła na dwóch szczelinach

Young wykazał, że światło ma charakter falowy.



Światło słoneczne padało na przesłonę, w której była wykonana jedna szczelina. Po przejściu przez szczelinę trafiało na drugą przesłonę, w której znajdowały się dwie szczeliny, a następnie trafiało na ekran, na którym powstawały prążki jaśniejsze i ciemniejsze. Powstałe prążki są dowodem, że światło po przejściu przez szczelinę rozchodziło się w postaci fali. Każda ze szczelin jest źródłem nowej fali.

10.5. Badanie dyfrakcji światła na siatce dyfrakcyjnej i płycie kompaktowej

Siatka dyfrakcyjna to płytka z dużą liczbą równoległych szczelin przepuszczających światło. Ich liczba może dochodzić nawet do kilku tysięcy na 1 mm. Używamy jej do obserwacji zjawisk dyfrakcji i interferencji światła.

Elementem zastępującym siatkę dyfrakcyjną może być płyta CD, DVD lub Blu-ray.

Jeżeli na siatkę dyfrakcyjną skierujemy wiązkę światła, która będzie prostopadła, to po drugiej stronie siatki zaobserwujemy wiązkę bez zmiany kierunku; taką wiązkę nazywamy wiązką zerową.

Jeżeli siatkę dyfrakcyjną oświetlimy wiązką monochromatyczną, to na ekranie otrzymamy szereg jasnych prążków. Jeżeli siatkę dyfrakcyjną oświetlimy światłem wielobarwnym, to na ekranie otrzymamy widmo wielobarwne.

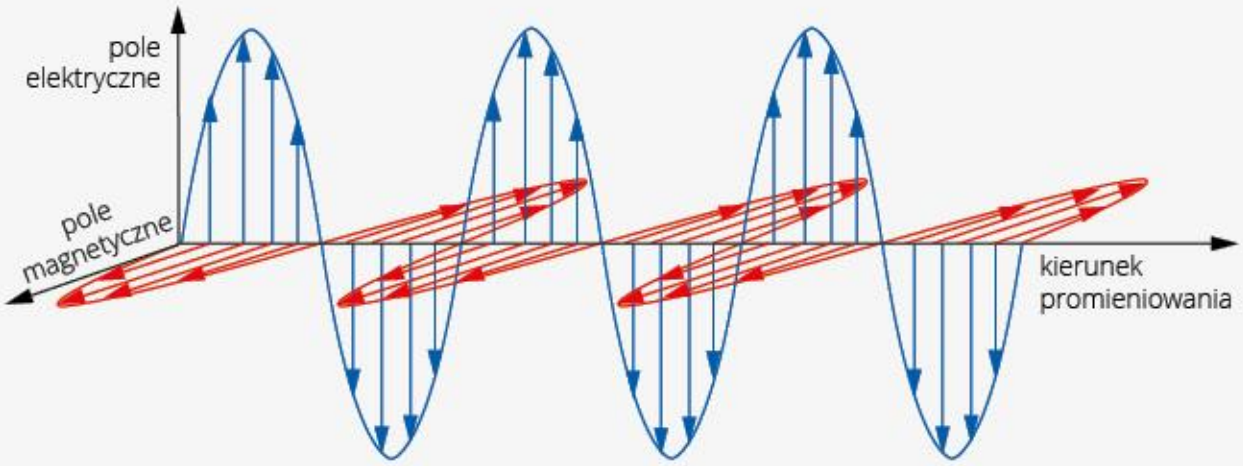
Położenie prążków możemy wyznaczyć za pomocą równania siatki dyfrakcyjnej:

$$n\lambda = d\sin\alpha_n$$

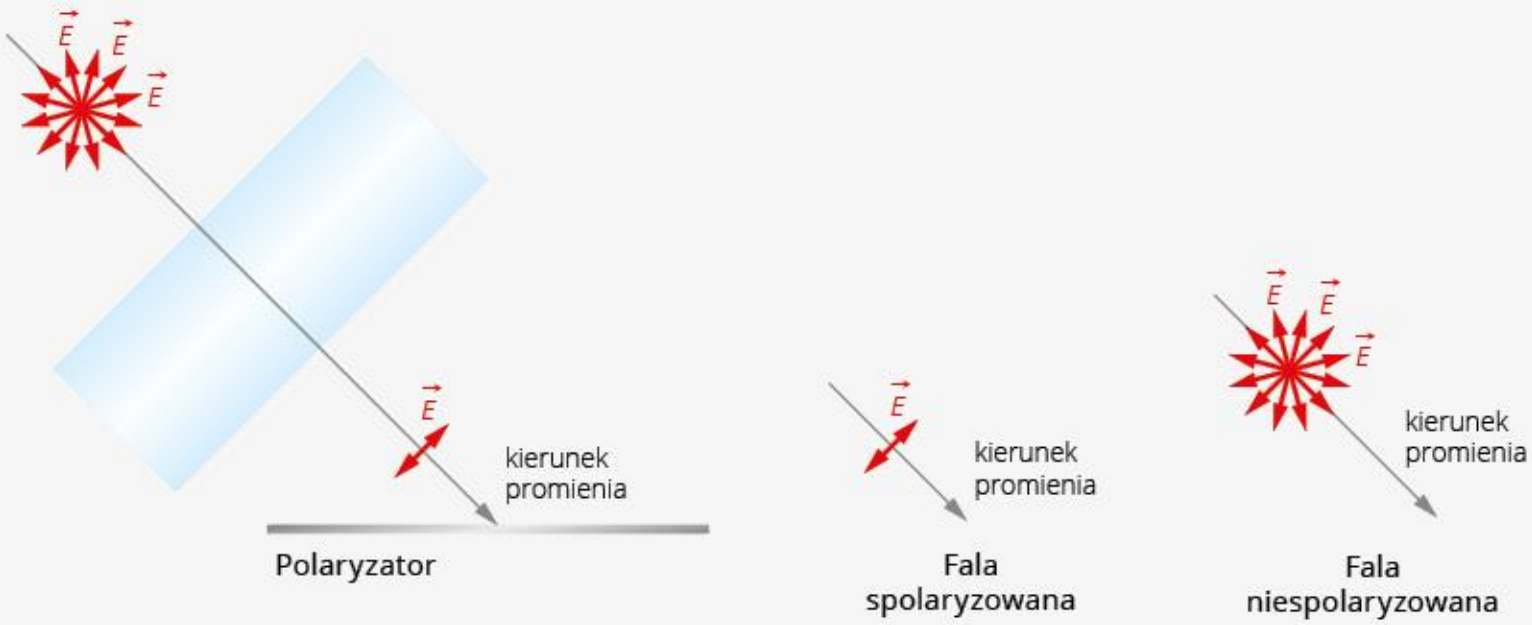
d – stała siatki dyfrakcyjnej – odległość między sąsiednimi szczelinami
α_n – kąt, pod jakim obserwowany jest jasny prążek dyfrakcyjny
n – numer rzędu widma
λ – długość fali

10.6. Polaryzacja światła

Fala spolaryzowana – fala, w której drgania zachodzą w jednej płaszczyźnie. Taką falę uzyskuje się po przejściu światła (fali elektromagnetycznej) przez polaryzator – przyrząd, który przepuszcza światło tylko w jednym kierunku: wzdłuż osi polaryzatora.



Jeżeli w obszarze rozchodzenia się fali elektromagnetycznej umieścimy ładunek, to pole elektryczne związane z falą spowoduje ruch prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali, fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną.



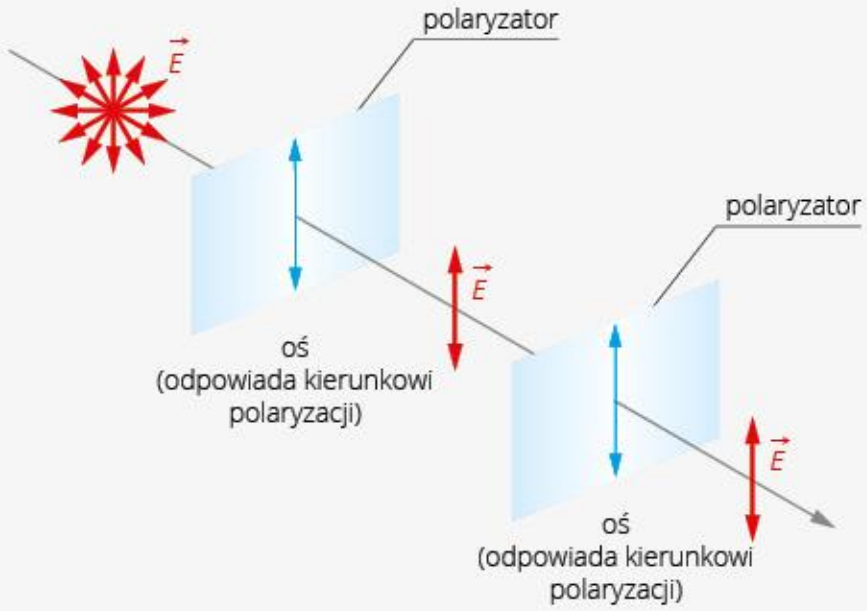
Światło niespolaryzowane po przejściu przez polaryzator staje się **falą spolaryzowaną**, tzn. uporządkowaną. Drgania natężenia pola elektrycznego będą zachodziły w jednym kierunku, zgodnym z ustawieniem polaryzatora. Zmienia się natężenie światła zgodnie z prawem Malusa:

Natężenie światła spolaryzowanego liniowo po przejściu przez polaryzator jest równe iloczynowi natężenia światła padającego i kwadratu cosinusa kąta między płaszczyzną polaryzacji światła padającego a płaszczyzną światła po przejściu przez polaryzator.

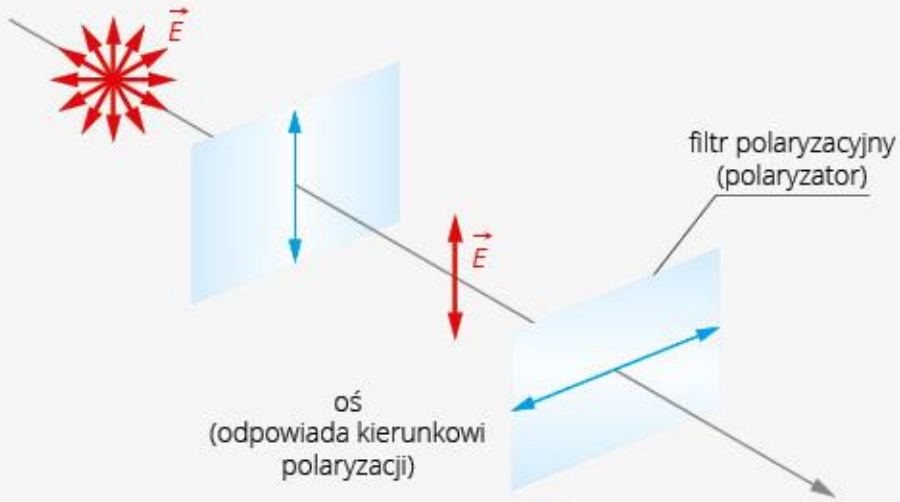
$$I = I_0 \cos^2\theta$$

I_0 – natężenie światła padającego
θ – kąt między płaszczyzną polaryzacji światła padającego i płaszczyzną polaryzacji polaryzatora

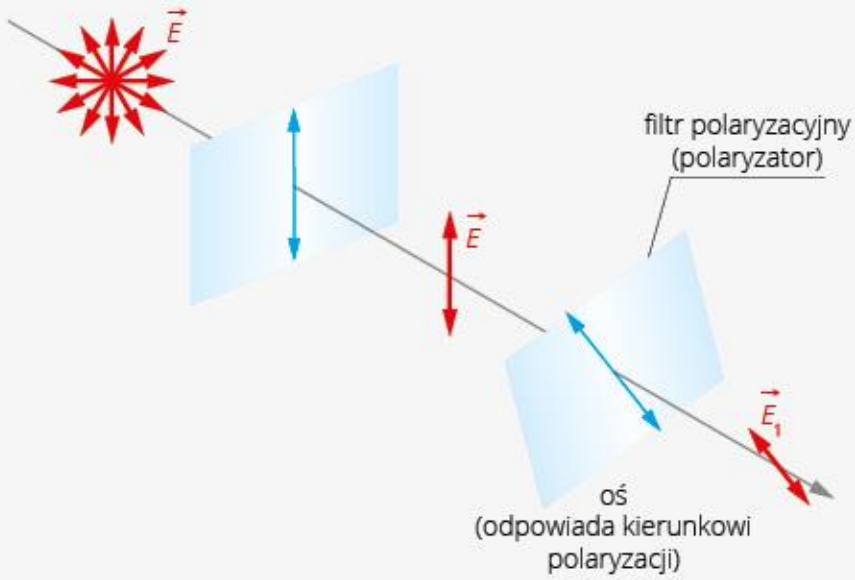
Jeżeli światło przechodzi przez dwa polaryzatory o zgodnych kierunkach polaryzacji, to całe spolaryzowane światło przechodzi przez drugi polaryzator, nie zmieniając swojego natężenia.



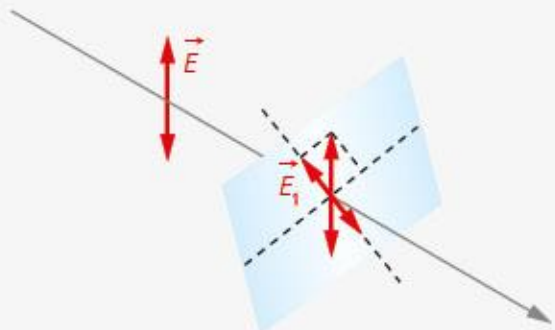
Jeżeli światło przechodzi przez polaryzator pionowy i polaryzator poziomy (skręcony o 90° do poprzedniego), światło zostaje wygaszone.



Przy przejściu światła spolaryzowanego przez drugi polaryzator, skręcony o kąt $0° < \theta < 90°$ do poprzedniego, światło zostanie częściowo wygaszone.



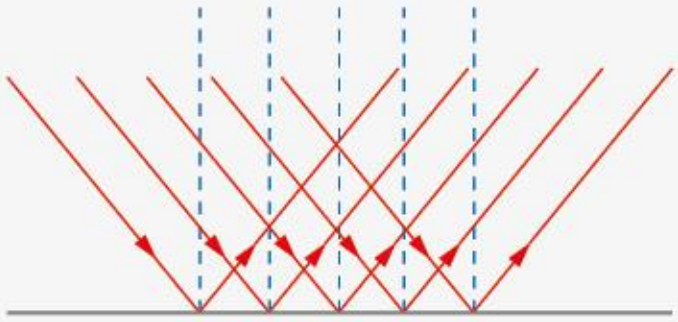
Wektor się skraca, ponieważ:



10.7. Odbicie i załamanie światła

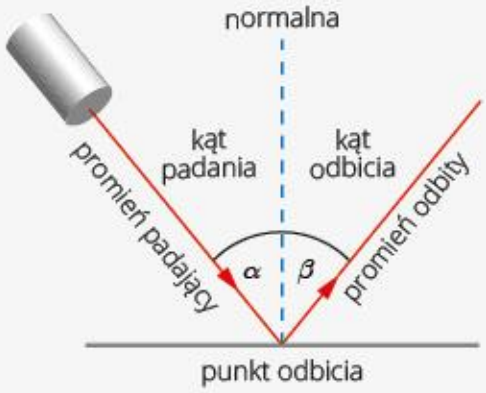
Zjawisko odbicia światła

Gdy światło pada na gładką wypolerowaną i nieprzezroczystą powierzchnię płaską lub sferyczną, ulega odbiciu. Kąt odbicia zależy od kąta padania.



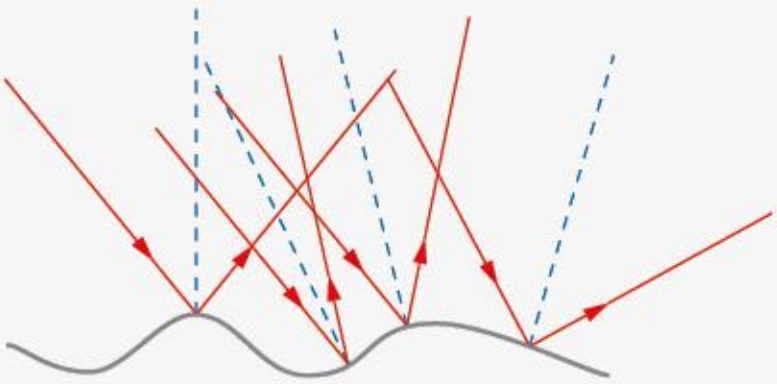
Kąt padania α – kąt zawarty między promieniem padającym a normalną (prostą prostopadłą do zwierciadła) w punkcie odbicia.

Kąt odbicia β – kąt zawarty między promieniem odbitym a normalną (prostą prostopadłą do zwierciadła) w punkcie odbicia.



Prawo odbicia światła
Kąt padania α jest równy kątowi odbicia β, czyli $\alpha = \beta$. Promień padający, promień odbity i prosta prostopadła do płaszczyzny odbijającej (normalna) leżą w tej samej płaszczyźnie.

Rozproszenie światła polega na odbiciu się światła w różnych kierunkach, gdy światło trafia na nieprzezroczystą chropowatą (nierówną) powierzchnię lub ośrodek przezroczysty o innej gęstości, np. mgłę.



Gdy promienie świetlne padają na chropowatą powierzchnię, to w miejscu zetknięcia się z powierzchnią rysujemy normalną, która jest prostopadła do powierzchni, między promieniem padającym a normalną zaznaczamy kąt padania i zgodnie z prawem odbicia światła rysujemy promień odbity.

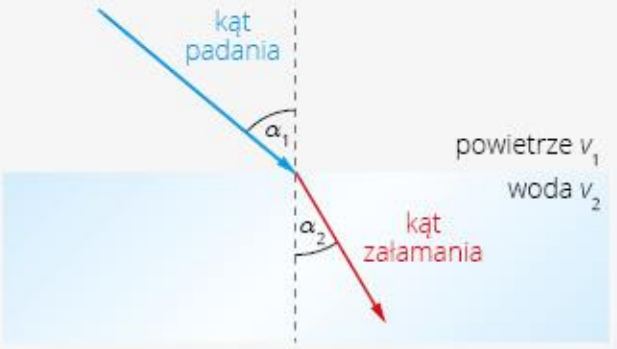
Zjawisko załamania światła

Zjawisko załamania światła zachodzi na granicy dwóch przezroczystych ośrodków materialnych różniących się prędkością rozchodzenia się w nich światła. W ośrodkach o różnej gęstości światło porusza się z inną prędkością.

Prawo załamania światła

Kąt załamania zależy od kąta padania promienia światła na granicę ośrodków oraz od prędkości rozchodzenia się światła w każdym z ośrodków. Promień padający na granicę dwóch ośrodków, normalna oraz promień załamany leżą w jednej płaszczyźnie.

1. Gdy: $v_1 > v_2$, to: $\alpha_1 > \alpha_2$



2. Gdy: $v_1 < v_2$, to: $\alpha_1 < \alpha_2$

3. Gdy $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$, promień nie załamuje się.

Gdy światło przechodzi z ośrodka, w którym rozchodzi się z większą prędkością, do ośrodka, w którym rozchodzi się z mniejszą prędkością, wówczas światło załamuje się do normalnej, czyli kąt padania jest większy od kąta załamania (przypadek 1). Natomiast gdy światło przechodzi z ośrodka, w którym rozchodzi się z mniejszą prędkością, do ośrodka, w którym rozchodzi się z większą prędkością, załamuje się od normalnej, czyli załamuje się w taki sposób, że kąt padania jest mniejszy od kąta załamania się światła (przypadek 2).

Ośrodek, w którym rozchodzi się światło, jest charakteryzowany przez **współczynnik załamania światła** n, który określa, ile razy wolniej rozchodzi się światło w danym ośrodku niż w próżni.

$$n = \frac{c}{v}$$

c – prędkość rozchodzenia się światła w próżni

v – prędkość rozchodzenia się światła w danym ośrodku

Prawo Snelliusa

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

α_1 – kąt padania

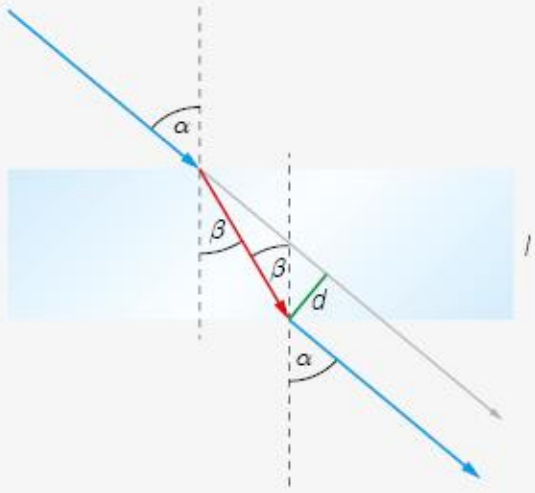
α_2 – kąt załamania

n_1, n_2 – współczynniki załamania światła dla ośrodka pierwszego i ośrodka drugiego

v_1, v_2 – prędkość rozchodzenia się światła w ośrodku pierwszym i prędkość rozchodzenia się światła w ośrodku drugim

Bieg promienia świetlnego w płytce równoległościennej

W płytce równoległościennej promień świetlny ulega dwukrotnemu załamaniu. Promień padający na płytkę jest równoległy do promienia wychodzącego z tej płytki. Przesunięcie promienia *d* zależy m.in. od grubości płytki równoległościennej.



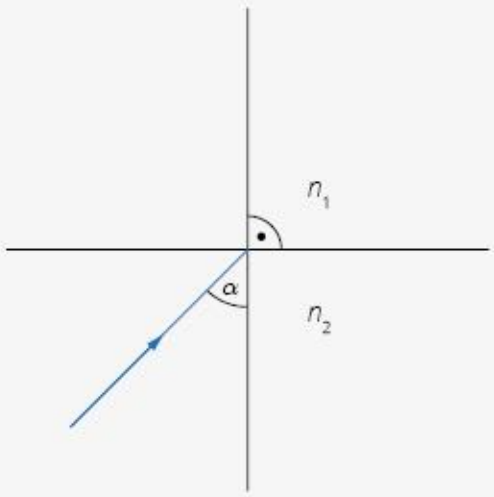
Kąt graniczny

Kąt graniczny – maksymalny kąt, pod jakim promień świetlny może padać na granicę ośrodków i ulegać przy tym załamaniu. Gdy ośrodek, w którym rozchodzi się światło, ma współczynnik załamania większy od współczynnika załamania ośrodka, na który pada, to przy wzroście kąta padania promienia powyżej wartości kąta granicznego promień nie załamuje się i pojawia się efekt całkowitego wewnętrznego odbicia. Wartość kąta granicznego obliczamy ze wzoru Snelliusa:

$$\frac{\sin\varphi_{gr}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_1}{n_2}$$

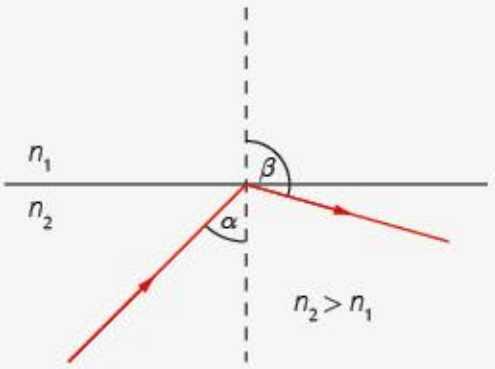
Stąd kąt graniczny:

$$\varphi_{gr} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \text{ dla } n_2 > n_1$$



Całkowite wewnętrzne odbicie

Całkowite wewnętrzne odbicie to zjawisko, w którym światło, rozchodząc się w ośrodku o większym współczynniku załamania, pada na granicę z ośrodkiem, którego współczynnik załamania jest mniejszy, nie ulega załamaniu, ale w całości odbija się od granicy ośrodków. Zjawisko zachodzi wtedy, gdy światło pada na granicę ośrodków pod kątem równym kątowi granicznemu lub większym od niego.



Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia znalazło zastosowanie w światłowodzie. Światłowód jest to przewód, w którym następuje przesyłanie promieniowania świetlnego, który ulega wielokrotnemu zjawisku całkowitego odbicia wiązki światła biegnącej wzdłuż przewodu.

Wyznaczanie wartości współczynnika załamania światła za pomocą pomiaru kąta granicznego

1. Nalewamy wodę do szklanego naczynia, może być akwarium.

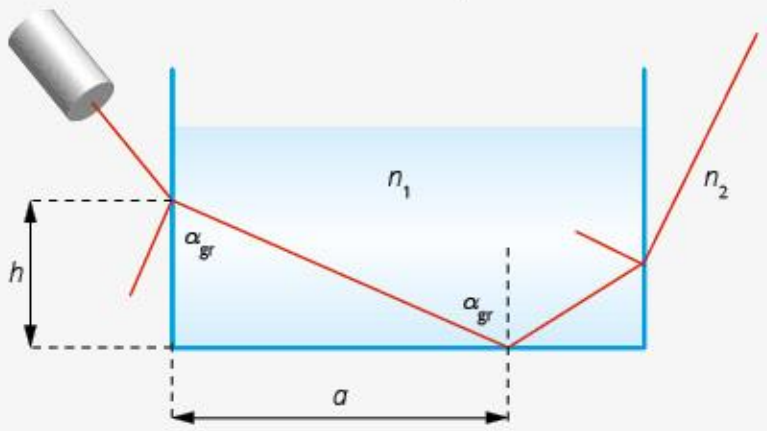
2. Ustawiamy laser pod kątem (tak jak na rysunku) i włączamy. Plamka lasera powinna się załamać, odbić od podłoża i następnie załamać, aż w końcu zniknie. Oznacza to, że wiązka lasera odbiła się od dna pod kątem granicznym.

3. Mierzymy odległość *h* i *a*.

4. Szukamy w tablicach współczynnika załamania powietrza n_2. Przyjmujemy do obliczeń wartość 1.

Na podstawie prawa Snelliusa obliczamy współczynnik załamania wody n_1.

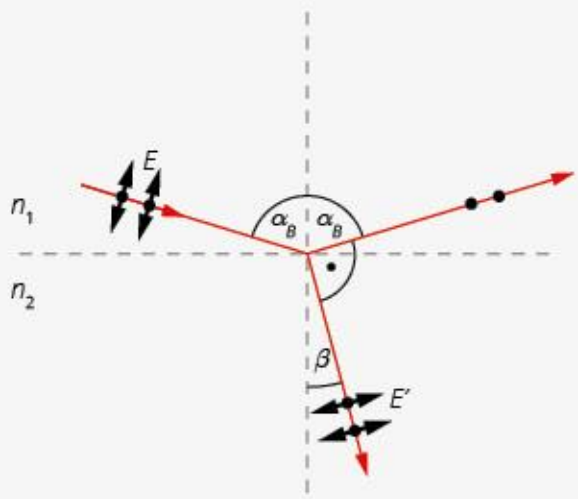
$$\sin\alpha_{gr} = \frac{n_2}{n_1}$$



Kąt Brewstera

Fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną. Falowy charakter światła jest potwierdzony przez zjawiska dyfrakcji i interferencji. Z kolei zjawisko polaryzacji potwierdza, że światło rozchodzi się w postaci fali poprzecznej. Światło pochodzące z naturalnych źródeł jest światłem niespolaryzowanym. Jeżeli światło ulegnie odbiciu od dielektryka, jest już częściowo spolaryzowane, a jeżeli będzie padać pod kątem Brewstera, to po odbiciu będzie spolaryzowane całkowicie, czyli wtedy, gdy kąt między promieniem odbitym a promieniem załamanym wynosi 90°. Kąt Brewstera wyznaczamy z zależności:

$$\mathrm{tg}\alpha_B = \frac{\sin\alpha_B}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$



10.8. Przykłady zjawisk optycznych w przyrodzie

Zjawisko optyczne dotyczy oddziaływania światła z materią. Niektóre zjawiska obserwujemy bardzo często, a inne – rzadko.

Odbicie – zjawisko odbicia światła.

Tęcza – zjawisko rozczepienia światła w kroplach wody, obserwowane na tle chmur, z których pada deszcz, a także np. w kroplach z węża ogrodowego.

Pas Aleksandra – pas między dwoma tęczami. Pociemnienie w pasie jest wywołane kontrastem z jaśniejszym obszarem tęczy pierwotnej i wtórnej oraz wnętrza tęczy pierwotnej. Różnice w jasności tych obszarów wynikają z różnic odbicia światła w różnych kierunkach.

Zorza polarna – zjawisko powstaje na skutek burz magnetycznych na Słońcu.

Iryzacja – zjawisko polegające na powstawaniu tęczowych barw w wyniku interferencji światła białego odbitego od przezroczystych powierzchni substancji, np. benzyny, w atmosferze na małych chmurkach oraz występuje na plamach cieczy.

Gloria – zjawisko polegające na występowaniu barwnych pierścieni tle chmur lub mgły. Powstaje na skutek dyfrakcji i odbicia światła na kroplach wody. Jest widoczne podczas wędrówek po górach albo lotu samolotem. Cień obserwatora pada na chmury, a gloria jest widoczna wokół głowy obserwatora.

Widmo Brockenu, inaczej **zjawisko Brockenu** lub **mamidło** – polega na zaobserwowaniu własnego cienia w chmurze znajdującej się poniżej obserwatora. Zjawisko powstaje na skutek dyfrakcji światła. Występuje w górnych partiach gór. Obserwator musi znajdować się w jednej linii między słońcem a mgłą (chmurą). Mgła (chmura) (musi być położona poniżej obserwatora), pełni funkcję powierzchni, na której powstaje obraz, czyli cień postaci. Wielkość cienia zależy od położenia obserwatora. Im obserwator będzie znajdował się bliżej mgły (chmury), tym cień będzie większy.

Gloria i zjawisko Brockenu mogą wystąpić jednocześnie – wówczas obserwuje się cień i barwne pierścienie.

Miraż – zjawisko powstania pozornego obrazu odległego przedmiotu w wyniku różnych współczynników załamania światła w warstwach powietrza o różnej temperaturze, a co za tym idzie – o różnej gęstości. Wyróżnia się dwa rodzaje tego zjawiska: miraż dolny można zaobserwować na drodze podczas upałów, a miraż górny – podczas zachodu słońca nad morzem w momencie znikania statku na końcu horyzontu.

Zjawisko Tyndalla – rozproszenie światła podczas przechodzenia przez ośrodek zawierający zawiesinę cząstek innego materiału.

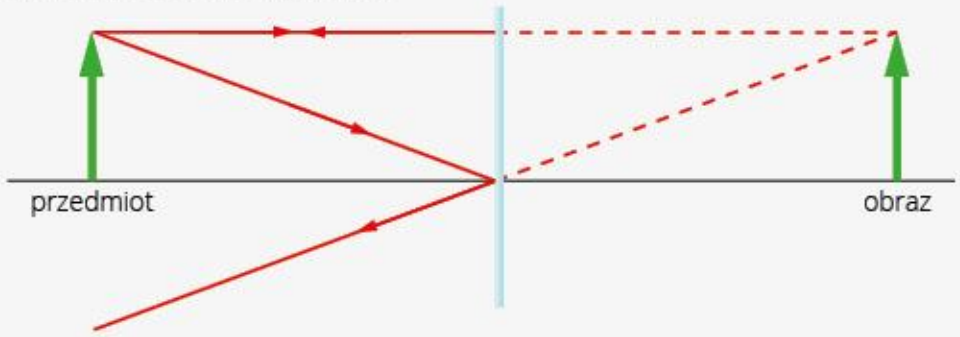
10.9. Zwierciadła płaskie i kuliste

Zwierciadła ze względu na kształt dzielimy na:
- **płaskie** – gładka, wypolerowana powierzchnia odbijająca światło w określonym kierunku (np. lustro łazienkowe, wypolerowana płyta metalowa, powierzchnia wody),
- **kuliste** (sferyczne) – gładka, wypolerowana powierzchnia odbijająca światło, będąca częścią kuli.

Zwierciadła kuliste dzielą się na:
- **wklęsłe** – np. reflektor samochodowy, zwierciadło w teleskopie astronomicznym, lusterko dentystyczne
- **wypukłe** – np. bombka choinkowa, lusterko samochodowe, lustro ostrzegawczo-ochronne.

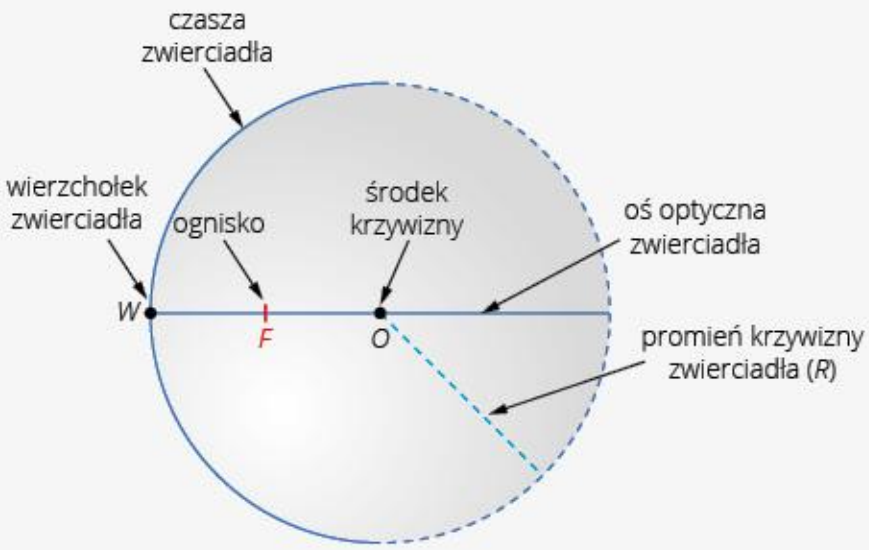
lustro płaskie	**lustro kuliste wklęsłe**	**lustro kuliste wypukłe**

Konstrukcja obrazu w zwierciadle płaskim

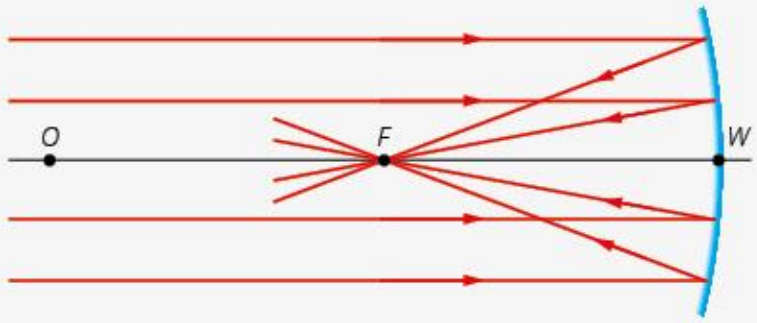


Cechy obrazu: obraz pozorny, tej samej wielkości, prosty.

Elementy zwierciadła kulistego



Ognisko *F* zwierciadła kulistego wklęsłego – punkt znajdujący się w połowie odległości między środkiem krzywizny a wierzchołkiem zwierciadła, przez który przechodzą promienie odbite, które wcześniej biegły równolegle do osi optycznej zwierciadła.



Ogniskowa *f* zwierciadła wklęsłego – odległość ogniska *F* od wierzchołka zwierciadła *W*.

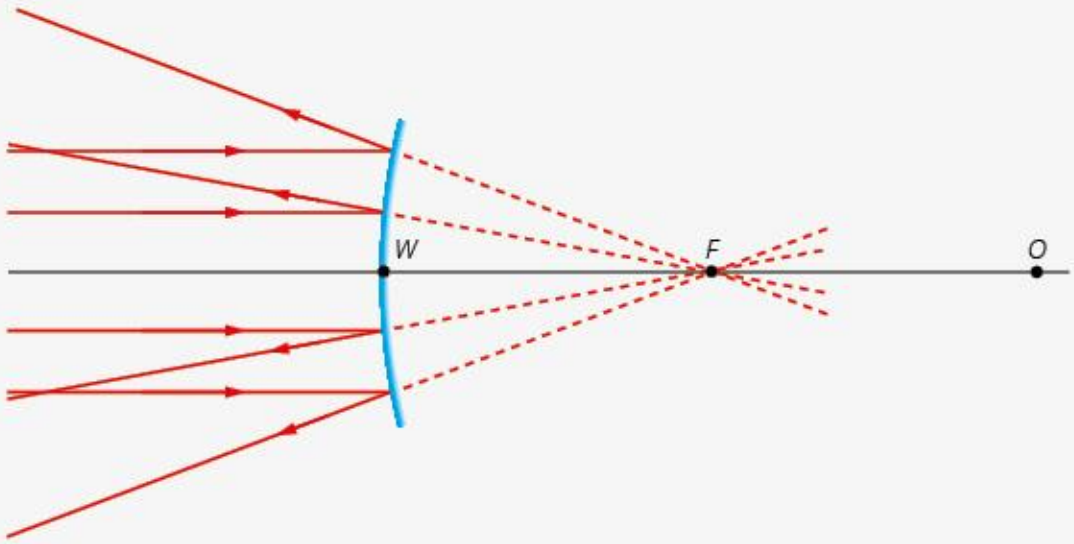
$$f = \frac{R}{2}$$

Dla zwierciadła kulistego wklęsłego ognisko jest nazywane rzeczywistym, a $f > 0$.

Ognisko *F* zwierciadła kulistego wypukłego – punkt leżący na osi optycznej w połowie odległości między środkiem krzywizny a wierzchołkiem zwierciadła, przez który przechodzą wszystkie przedłużenia promieni odbitych od zwierciadła kulistego wypukłego, które wcześniej biegły równolegle do osi zwierciadła.

W przypadku zwierciadła kulistego wypukłego ognisko znajduje się po przeciwnej stronie powierzchni odbijającej – jest to tzw. **ognisko pozorne**.

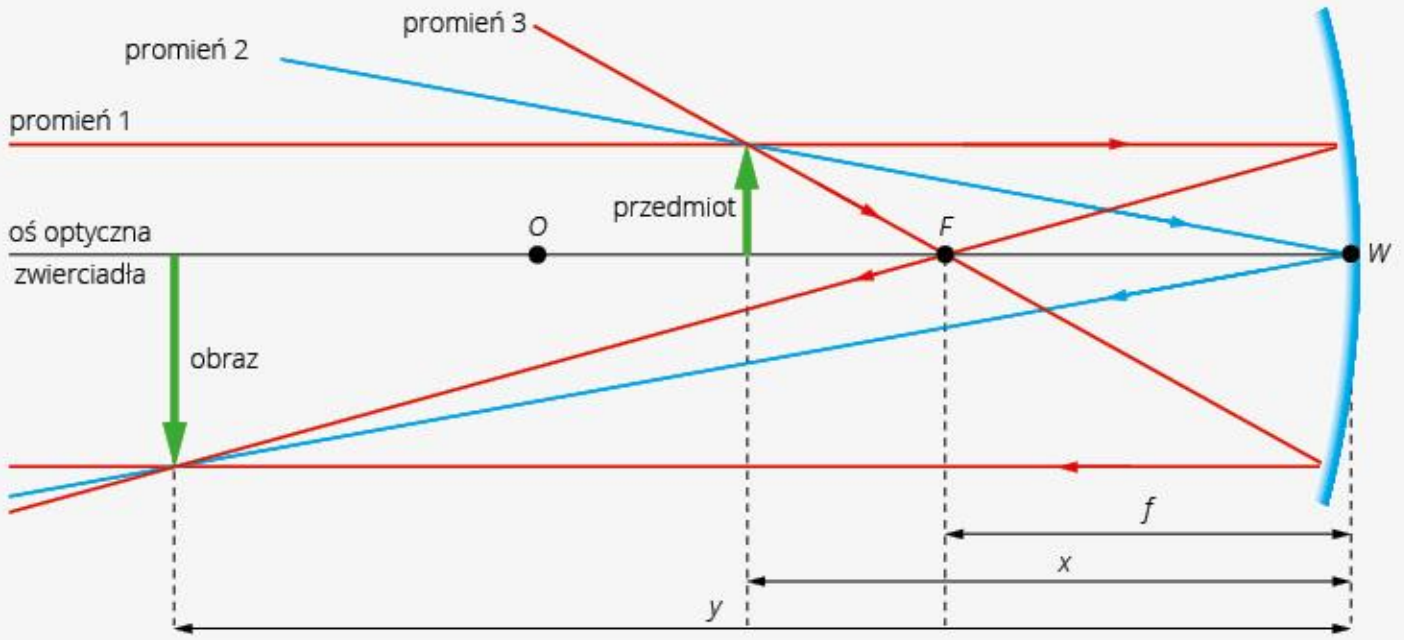
Ogniskowa, czyli odległość ogniska od wierzchołka zwierciadła, jest więc w tym przypadku ujemna.



10.10. Konstruowanie obrazów w zwierciadłach kulistych wklęsłych

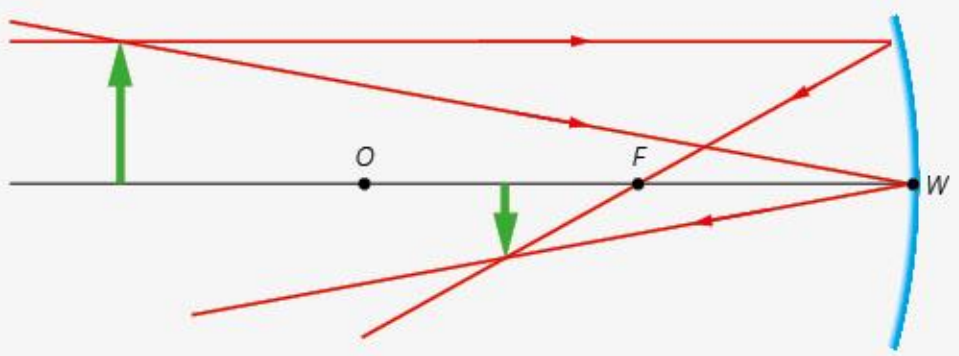
Tworzenie konstrukcji rozpoczynamy od narysowania promienia 1, który biegnie równolegle do osi optycznej, przechodząc przez wierzchołek przedmiotu. Ten promień trafia na czaszę zwierciadła i odbija się od niej tak, że przechodzi przez ognisko. Promień 2 rysujemy w taki sposób, że przechodzi przez wierzchołek przedmiotu i ognisko, trafia na czaszę zwierciadła i dalej biegnie równolegle do osi optycznej. W miejscu przecięcia się promieni odbitych powstaje obraz i rysujemy ten obraz. Promień 3 rysujemy w taki sposób, że przechodzi przez wierzchołek przedmiotu, pada na zwierciadło w punkcie *W* i odbija się zgodnie z prawem odbicia światła pod tym samym kątem.

Podajemy trzy **cechy powstałego obrazu**:
- pierwsza wiąże się z wielkością (powiększeniem) obrazu: **powiększony, tej samej wielkości, pomniejszony**;
- druga wiąże się ze sposobem powstania: jeżeli powstanie na przecięciu promieni rzeczywistych (odbitych), powstaje **obraz rzeczywisty**, a jeżeli powstanie na przedłużeniu promieni odbitych, to powstaje **obraz pozorny**;
- trzecia cecha wiąże się z położeniem obrazu względem przedmiotu: **odwrócony, prosty (nieodwrócony)**.



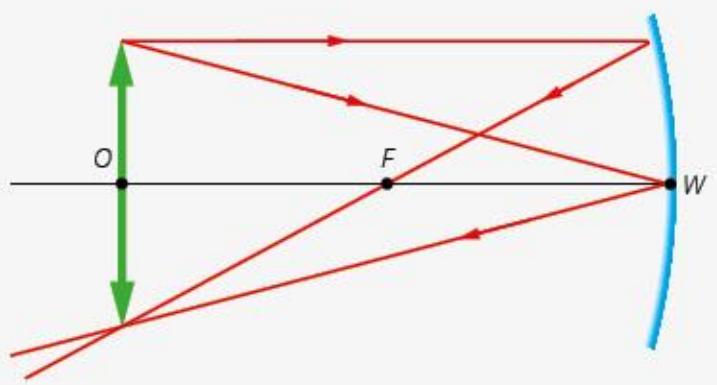
O – środek krzywizny zwierciadła
W – wierzchołek zwierciadła
x – odległość przedmiotu od zwierciadła
y – odległość obrazu od zwierciadła
f – ogniskowa – odległość ogniska od środka zwierciadła
oś optyczna zwierciadła – prosta przechodząca przez środek krzywizny i wierzchołek zwierciadła
F – ognisko zwierciadła

Konstrukcja obrazu, gdy $x > 2f$



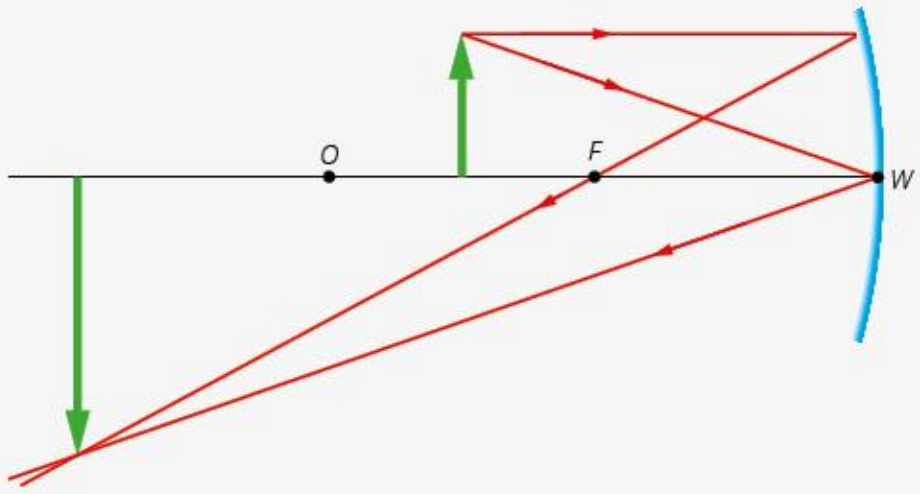
Cechy obrazu: obraz rzeczywisty, pomniejszony, odwrócony.

Konstrukcja obrazu, gdy $x = 2f$



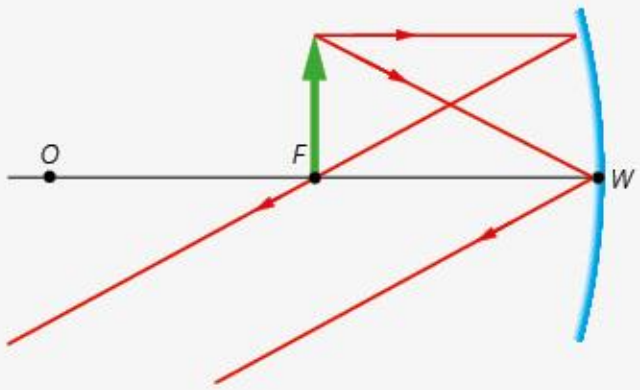
Cechy obrazu: obraz rzeczywisty, tej samej wielkości, odwrócony.

Konstrukcja obrazu, gdy $f < x < 2f$



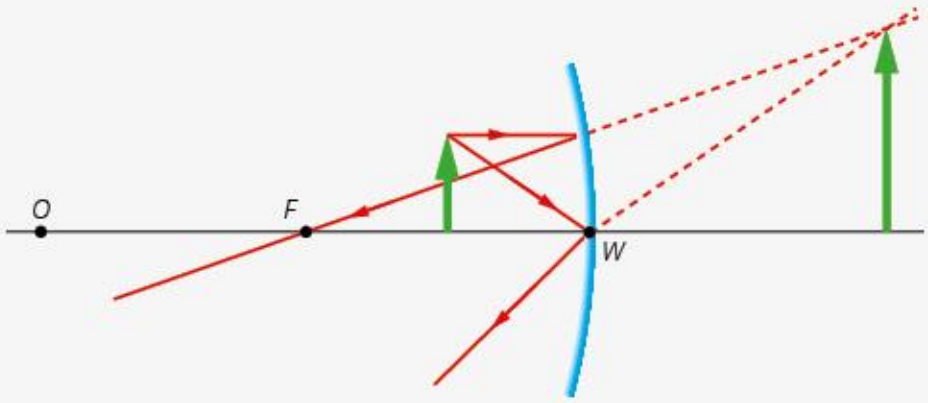
Cechy obrazu: obraz rzeczywisty, powiększony, odwrócony.

Konstrukcja obrazu, gdy $x = f$



Cechy obrazu: obraz nie powstanie.

Konstrukcja obrazu, gdy $x < f$

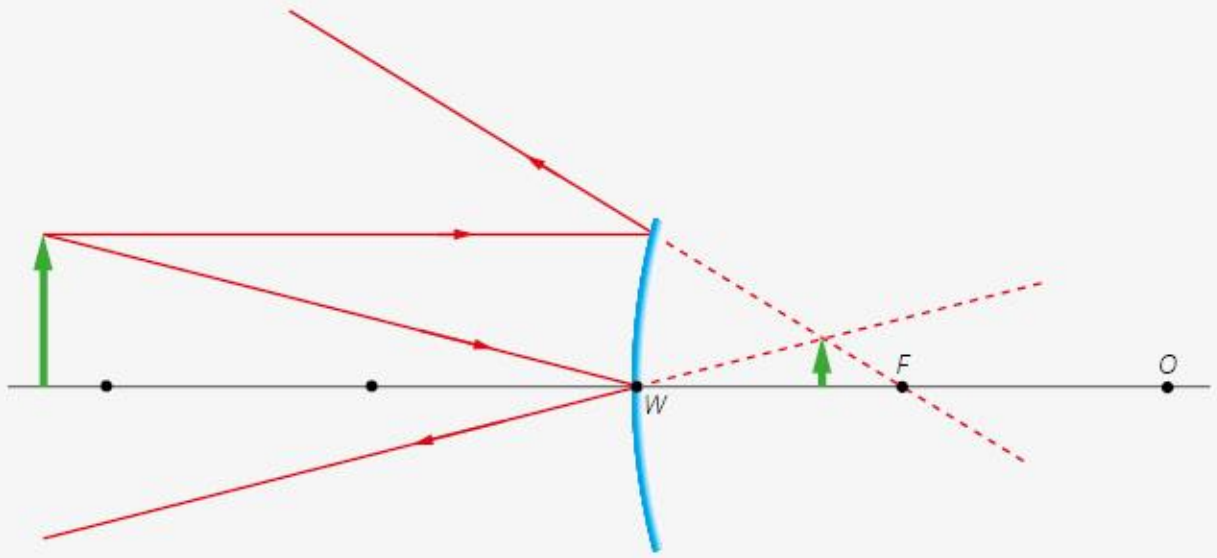


Cechy obrazu: obraz pozorny, prosty, powiększony.

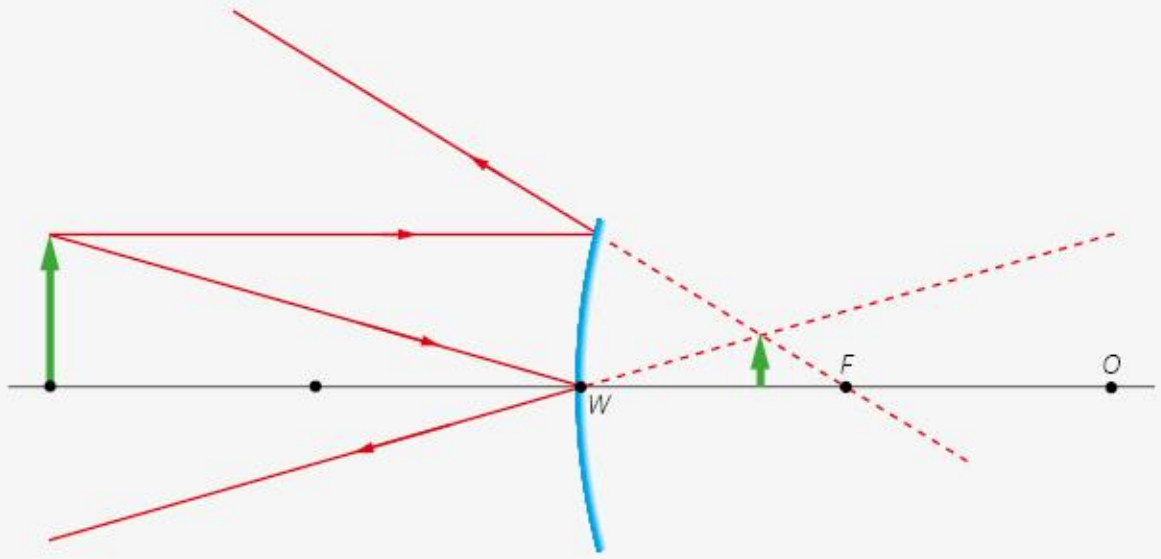
10.11. Konstrukcja obrazu w zwierciadle sferycznym wypukłym

Obrazy powstające w zwierciadle sferycznym wypukłym są obrazami pozornymi, prostymi i pomniejszonymi, niezależnie od odległości przedmiotu od zwierciadła.

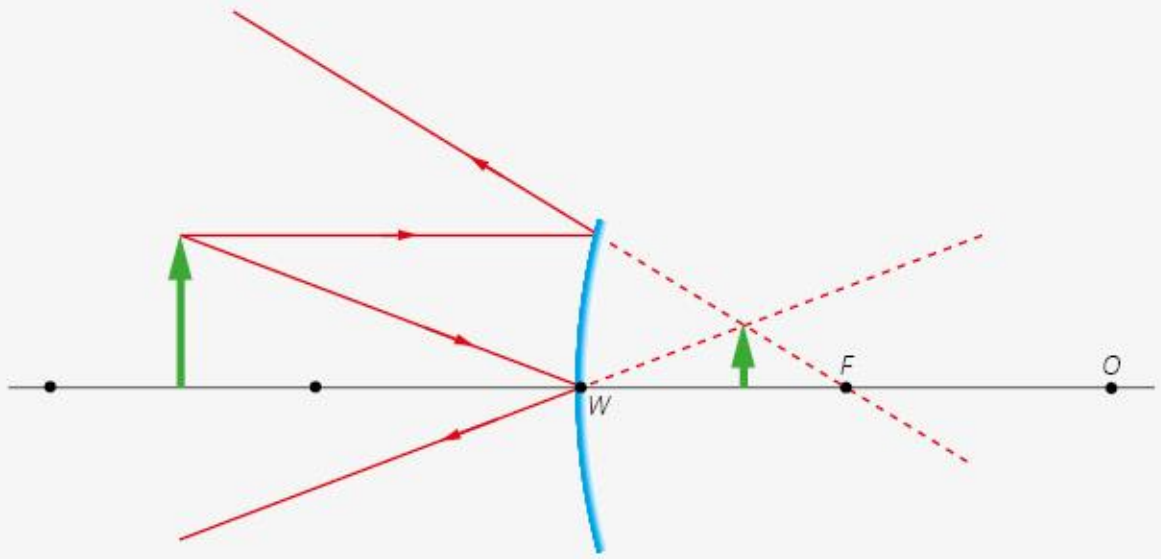
Konstrukcja obrazu, gdy $x > 2f$



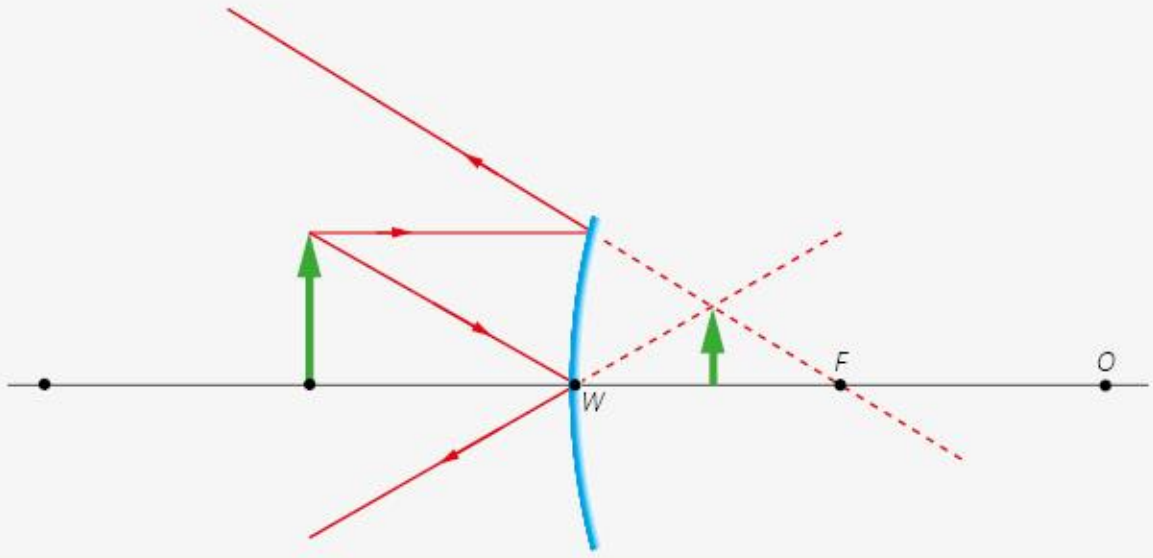
Konstrukcja obrazu, gdy $x = 2f$



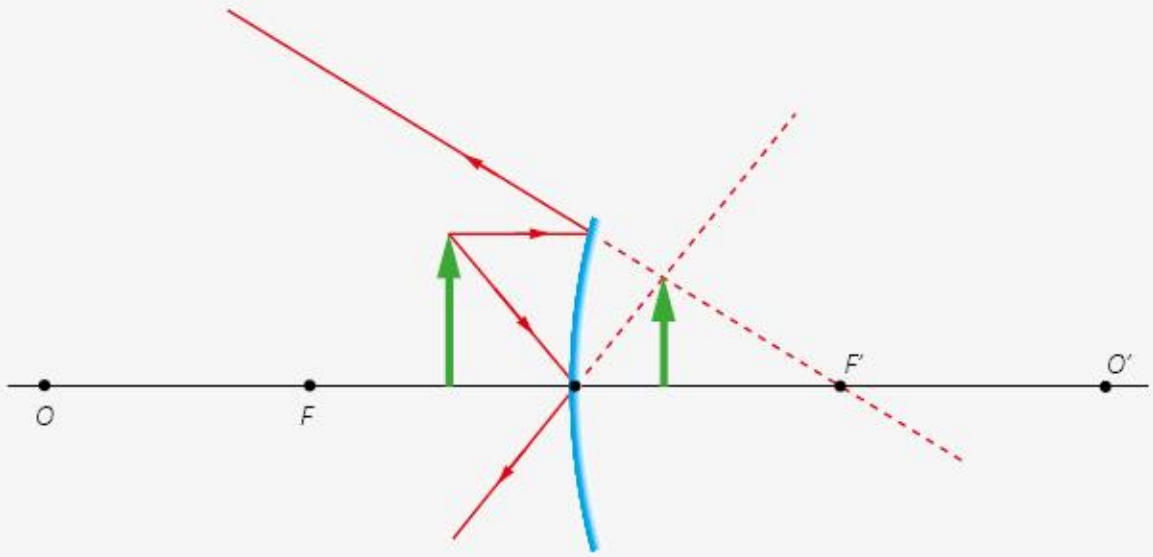
Konstrukcja obrazu, gdy $f < x < 2f$



Konstrukcja obrazu, gdy $x = f$



Konstrukcja obrazu, gdy $x < f$



10.12. Równanie zwierciadła kulistego

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$$

x – odległość przedmiotu od zwierciadła, $x > 0$

y – odległość obrazu od wierzchołka zwierciadła, $y > 0$ dla obrazu rzeczywistego, $y < 0$ dla obrazu pozornego

f – ogniskowa zwierciadła

10.13. Powiększenie w zwierciadłach

$$p = \frac{y}{x}$$

$$p = \frac{h_2}{h_1}$$

h_2 – wysokość obrazu

h_1 – wysokość przedmiotu

x – odległość przedmiotu od zwierciadła

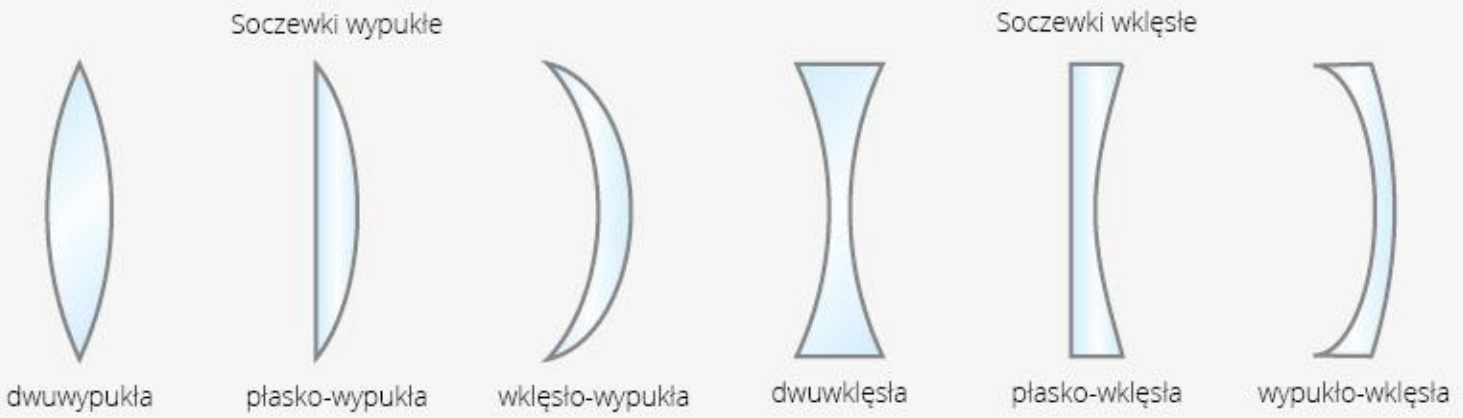
y – odległość obrazu od wierzchołka zwierciadła

10.14. Soczewki sferyczne

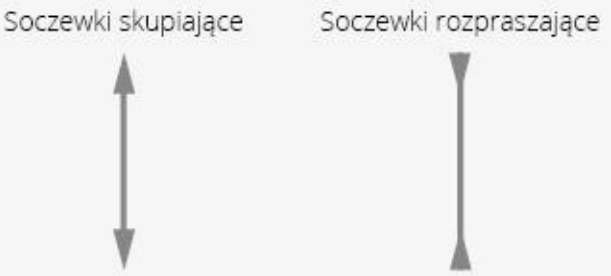
Soczewka – bryła przezroczysta ograniczona jedną lub dwiema powierzchniami kulistymi.

Rodzaje soczewek

1. Ze względu na kształt soczewki dzielimy na wypukłe i wklęsłe:

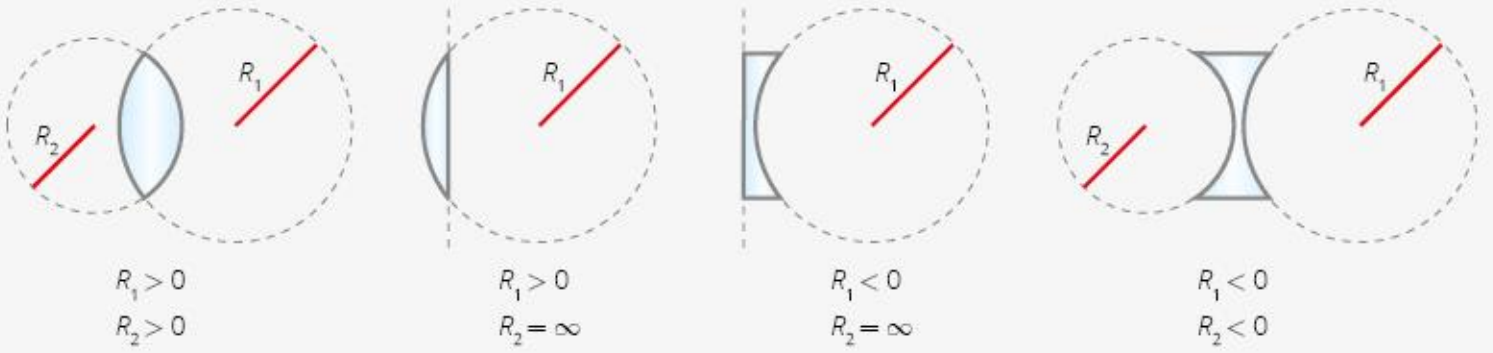


2. Ze względu na własności optyczne soczewki dzielimy na skupiające i rozpraszające:



Elementy soczewek

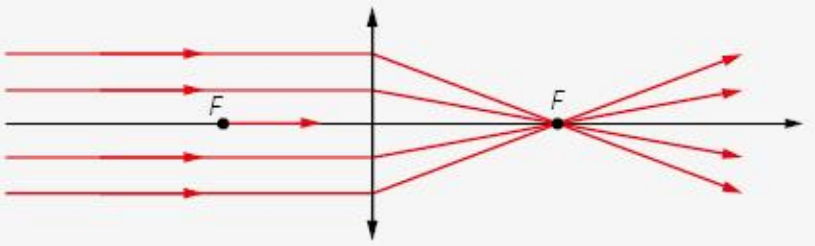
W soczewce wyróżnia się następujące elementy: oś optyczna soczewki, promienie krzywizn soczewki.



R_1, R_2 – promienie krzywizn soczewki, dla powierzchni wklęsłej przyjmujemy znak minus, dla powierzchni płaskiej przyjmujemy $R = \infty$, a dla powierzchni wypukłej przyjmujemy znak plus.

Rozchodzenie się światła przy przejściu przez soczewkę skupiającą

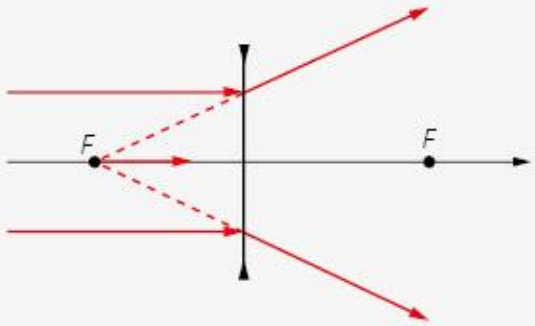
Ognisko soczewki skupiającej – punkt, przez który przechodzą wszystkie promienie załamane, które wcześniej biegły równolegle do osi optycznej soczewki.



Soczewka skupiająca ma dwa rzeczywiste ogniska.

Rozchodzenie się światła przy przejściu przez soczewkę rozpraszającą

Ognisko soczewki rozpraszającej – punkt, przez który przechodzą wszystkie przedłużenia promieni załamanych w soczewce, które wcześniej biegły równolegle do osi optycznej soczewki.



Soczewka rozpraszająca ma dwa pozorne ogniska.

Długość ogniskowej soczewki

$$\frac{1}{f}=\left(\frac{n_{socz}}{n_{otocz}}-1\right)\cdot\left(\pm\frac{1}{R_1}\pm\frac{1}{R_2}\right)$$

n_{soocz} – współczynnik załamania substancji, z której jest wykonana soczewka

n_{otocz} – współczynnik załamania ośrodka optycznego, w którym jest umieszczona soczewka

Równanie soczewki

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{x}+\frac{1}{y}$$

x – odległość przedmiotu od soczewki, $x > 0$

y – odległość obrazu od soczewki, $y > 0$ dla obrazów rzeczywistych, $y < 0$ dla obrazów pozornych

f – ogniskowa soczewki, $f > 0$ dla soczewki skupiającej, $f < 0$ dla soczewki rozpraszającej

Powiększenie obrazu w soczewce

$$p=\frac{h_{obrazu}}{h_{przedmiotu}}$$

$$p=\frac{|y|}{x}$$

p – powiększenie

x – odległość przedmiotu od soczewki

y – odległość obrazu od soczewki

Zdolność skupiająca soczewki

$$Z=\frac{1}{f}$$

f – ogniskowa soczewki

Dla soczewki skupiającej $Z > 0$.

Dla soczewki rozpraszającej $Z < 0$.

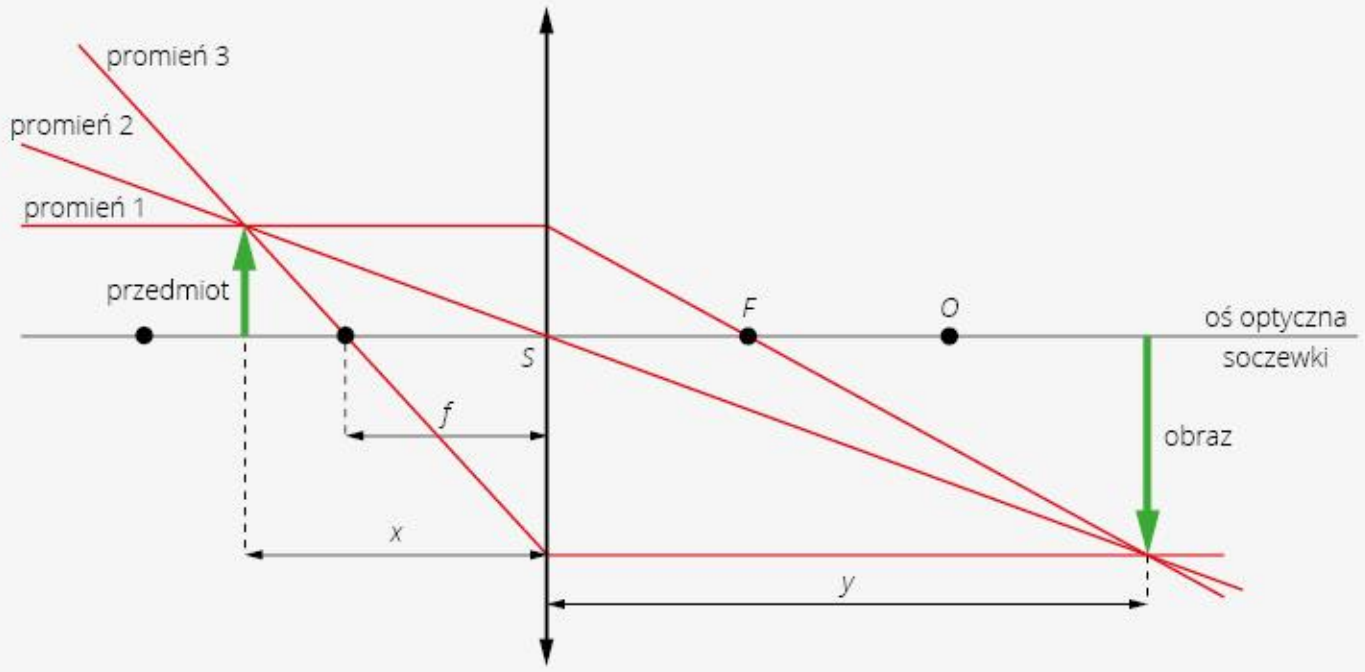
Jednostką zdolności skupiającej jest **dioptria** (D):

$$1\text{D}=\frac{1}{\text{m}}$$

10.15. Konstruowanie obrazów w soczewkach

Tworzenie konstrukcji rozpoczynamy od narysowania promienia 1, który biegnie równolegle do osi optycznej soczewki, przechodząc przez wierzchołek przedmiotu. Ten promień trafia na soczewkę, załamuje się i przechodzi przez ognisko. Promień 2 rysujemy w taki sposób, że przechodzi przez wierzchołek przedmiotu i ognisko, trafia na soczewkę, załamuje się i dalej biegnie równolegle do osi optycznej. W miejscu przecięcia się promieni załamanych powstaje obraz. Rysujemy ten obraz. Promień 3 rysujemy w taki sposób, że przechodzi przez wierzchołek przedmiotu oraz punkt *S* będący środkiem soczewki. Ten promień nie ulega załamaniu.

Podajemy trzy cechy powstałego obrazu:
- pierwsza wiąże się z wielkością (powiększeniem) obrazu: powiększony, tej samej wielkości, pomniejszony;
- druga wiąże się ze sposobem powstania: jeżeli powstanie na przecięciu promieni rzeczywistych (załamanych w soczewce), powstaje obraz rzeczywisty, a jeżeli powstanie na przedłużeniu promieni załamanych w soczewce, to powstaje obraz pozorny;
- trzecia wiąże się z położeniem obrazu względem przedmiotu: odwrócony, prosty (nieodwrócony).



S – środek soczewki

oś optyczna soczewki – prosta przechodząca przez środek soczewki i ogniska

F – ognisko – miejsce przecięcia promieni załamanych, które przed załamaniem biegły równolegle do osi soczewki skupiającej

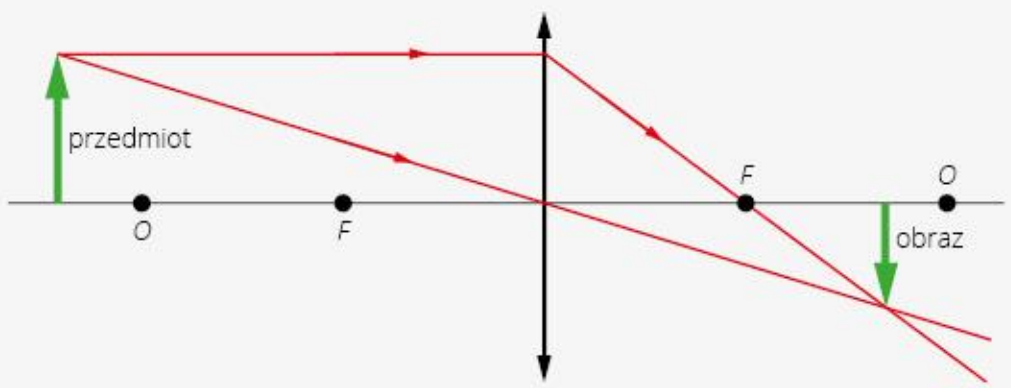
f – ogniskowa – odległość ogniska od środka soczewki

x – odległość przedmiotu od soczewki

y – odległość obrazu od soczewki

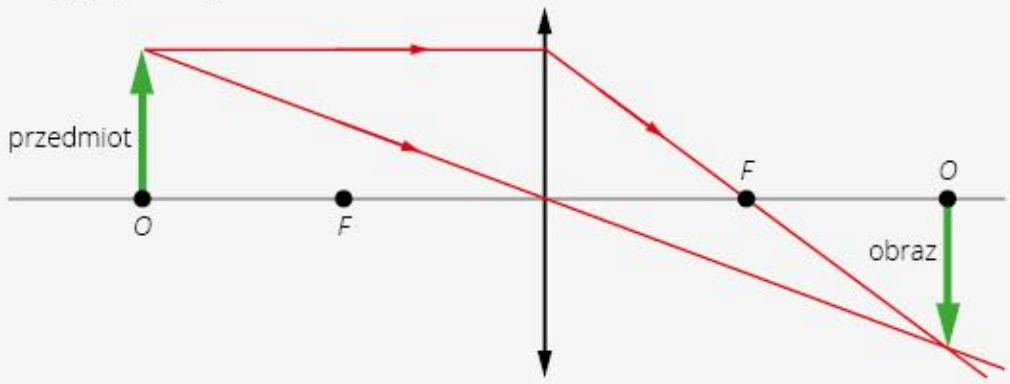
10.16. Konstrukcja obrazu za pomocą soczewki skupiającej

Konstrukcja obrazu, gdy $x > 2f$



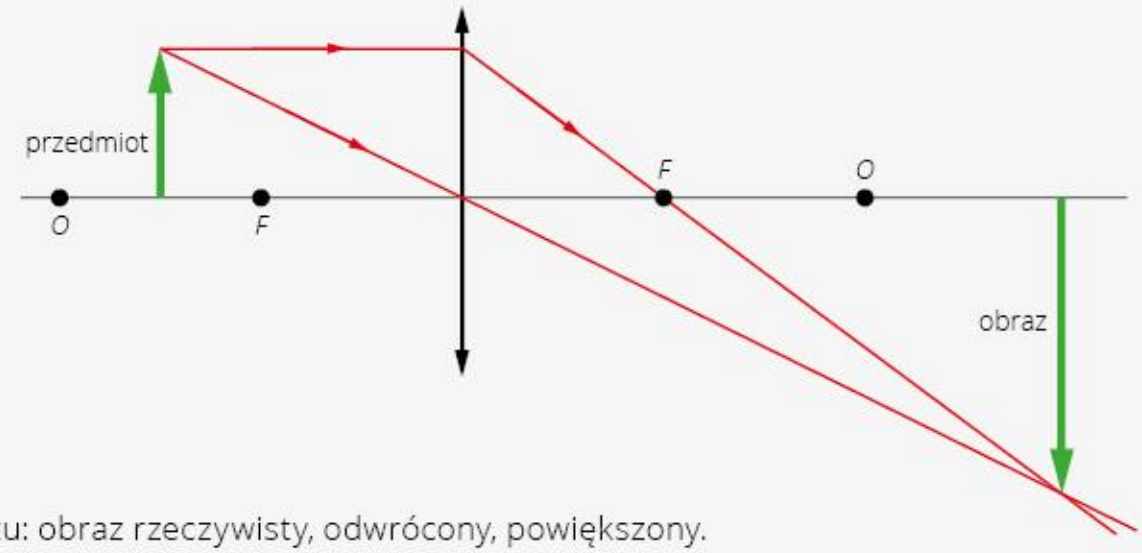
Cechy obrazu: obraz rzeczywisty, odwrócony, pomniejszony.

Konstrukcja obrazu, gdy $x = 2f$



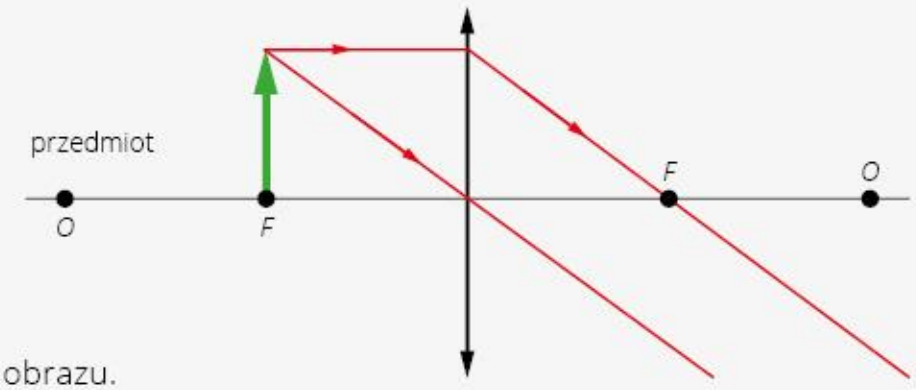
Cechy obrazu: obraz rzeczywisty, odwrócony, tej samej wielkości.

Konstrukcja obrazu, gdy $f < x < 2f$



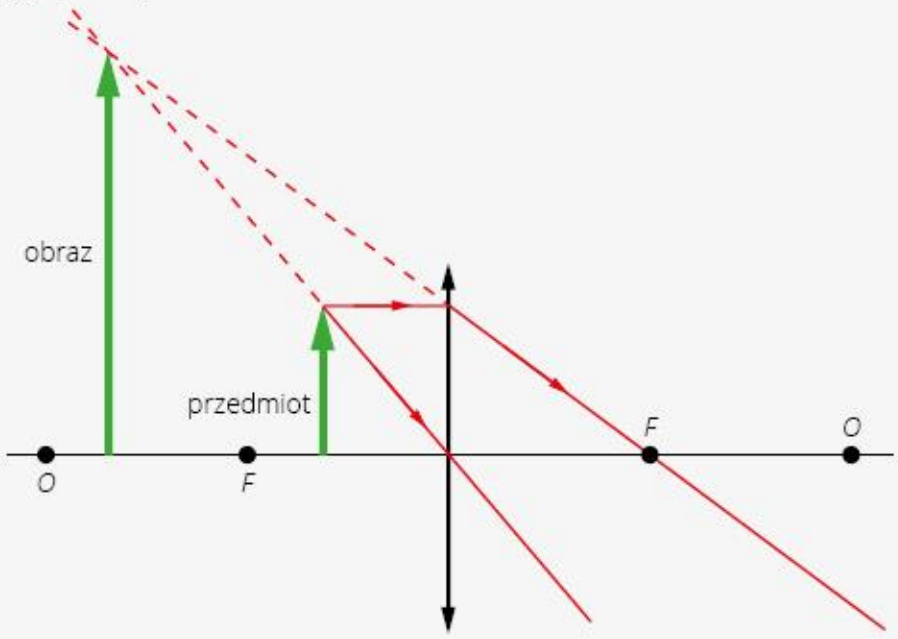
Cechy obrazu: obraz rzeczywisty, odwrócony, powiększony.

Konstrukcja obrazu, gdy $x = f$



Cechy obrazu: brak obrazu.

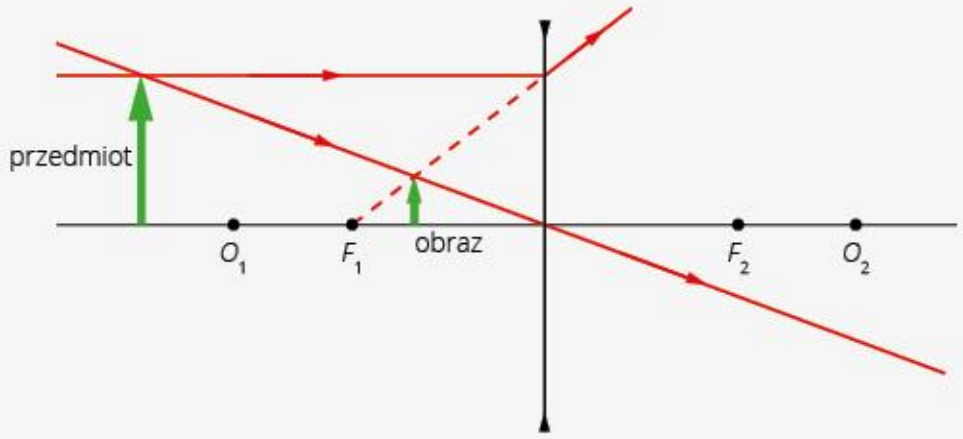
Konstrukcja obrazu, gdy $x < f$



Cechy obrazu: obraz pozorny, prosty, powiększony.

10.17. Konstrukcja obrazu w soczewce rozpraszającej

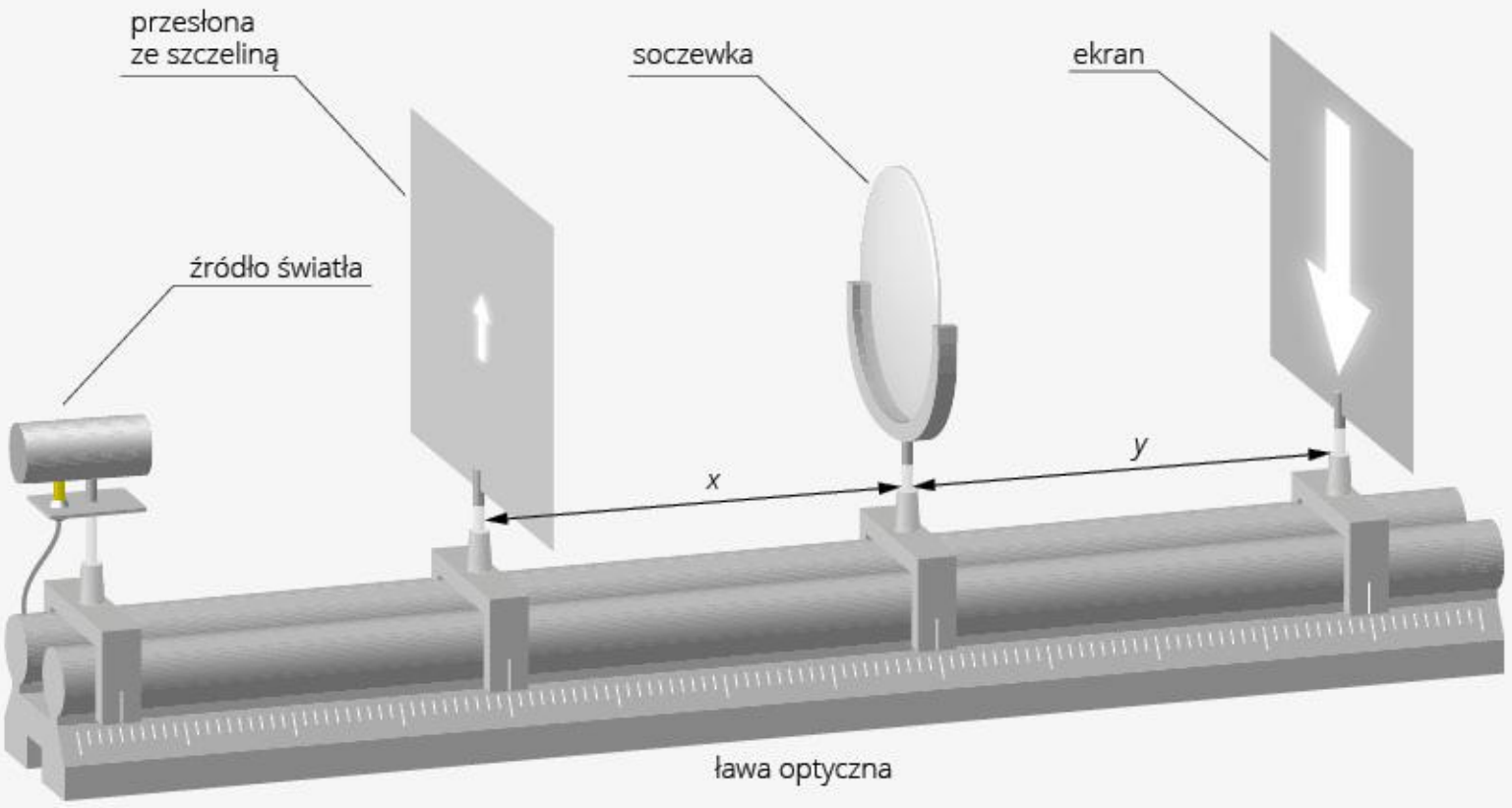
Konstrukcja obrazu, gdy $x > 2f$



Cechy obrazu: obraz pozorny, prosty, pomniejszony.

10.18. Badanie obrazów otrzymywanych za pomocą soczewek

Do badania obrazów otrzymywanych za pomocą soczewek wykorzystamy ławę optyczną. Przedmiot ustawimy w odległości większej niż dwie ogniskowe. Zbliżając przedmiot w kierunku soczewki, obserwuj, jak zmienia się obraz powstający na ekranie.



Gdy przedmiot przesuwa się w kierunku soczewki, jego wielkość się zwiększa. Gdy $x = 2f$, powstały obraz będzie tej samej wielkości co przedmiot. Gdy przedmiot znajduje się w ognisku soczewki, obraz nie powstanie. Gdy przedmiot będzie ustawiony w odległości mniejszej niż ogniskowa, to powstały obraz będzie prosty i pozorny, ale nie zobaczymy go na ekranie.

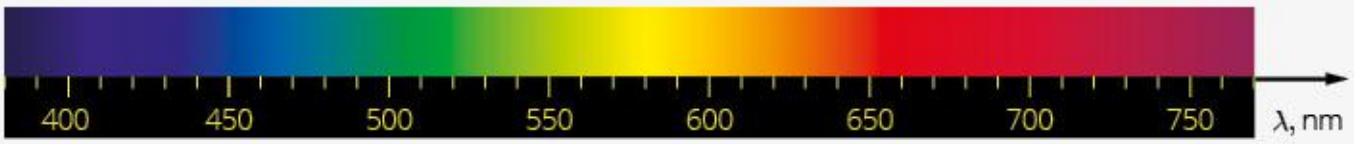
Obraz pozorny powstaje w mózgu człowieka, więc nie można go otrzymać bez bezpośredniego patrzenia przez soczewkę.

10.19. Przechodzenie światła przez pryzmat

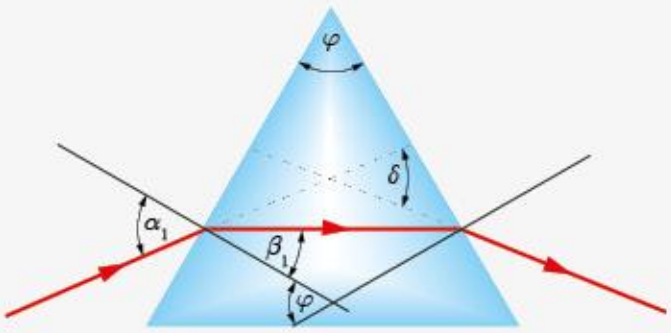
Pryzmat – bryła przezroczysta ograniczona jedną lub dwiema powierzchniami przecinającymi się wzdłuż prostej zwanej krawędzią łamiącą pryzmatu.

Widmo ciągłe to barwna wstęga.

Rozszczepienie światła możemy uzyskać za pomocą płyty kompaktowej (CD, DVD Blu-ray), za pomocą kropli wody (tęcza na niebie po deszczu lub w ogrodzie podczas podlewania).



Światło monochromatyczne, czyli jednobarwne (np. światło lasera), nie ulega rozszczepieniu. Podczas przechodzenia przez pryzmat takie światło ulega tylko załamaniu.



φ – kąt łamiący pryzmatu

α_1 – kąt padania

β_1 – kąt załamania

δ – kąt najmniejszego odchylenia promienia przechodzącego przez pryzmat

Światło lasera jako wiązka skolimowana

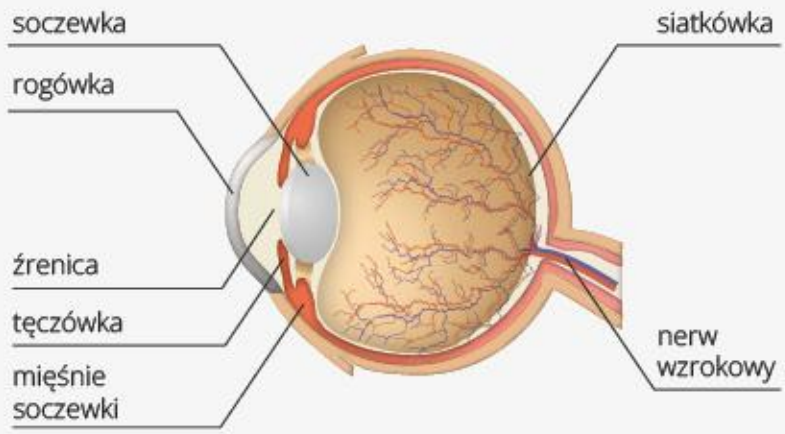
Światło skolimowane – światło, którego promienie są równoległe, czyli stanowią wiązkę fali płaskiej.

Laser to urządzenie wykorzystujące zjawisko emisji wymuszonej do wytwarzania fali. Światło pochodzące z lasera jest falą sinusoidalną (harmoniczną), w której powierzchnia falowa jest prostopadła do ruchu fali, a podczas rozchodzenia jest wiązką równoległą, która nie ulega rozmyciu na bok.

10.20. Przyrządy optyczne

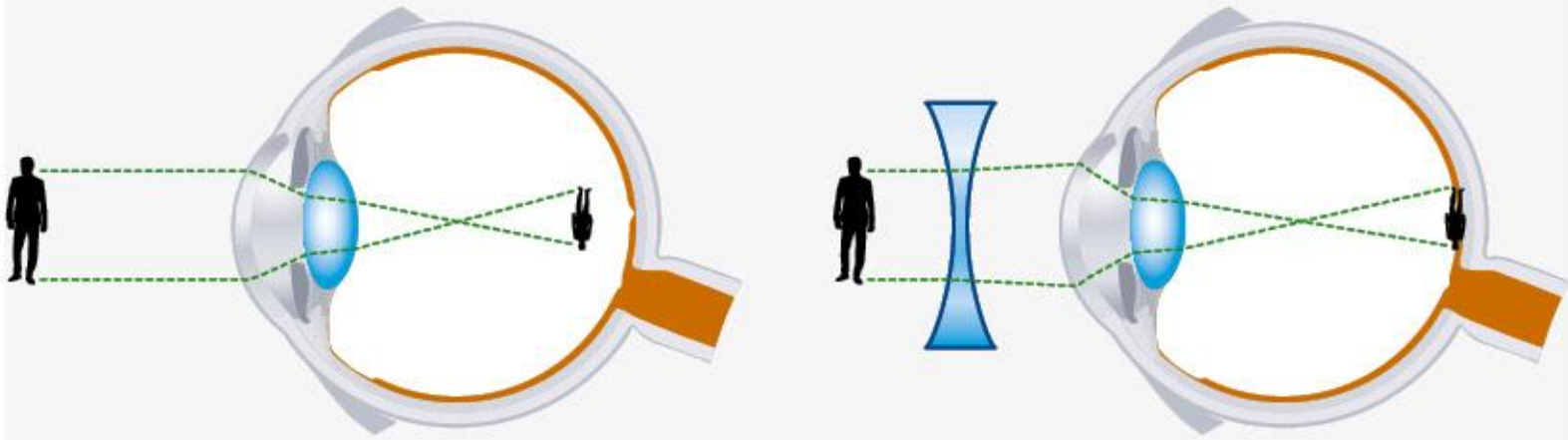
Lupa – przyrząd optyczny służący do obserwacji małych przedmiotów, składa się z jednej soczewki dwuwypukłej. Oglądany przedmiot należy umieścić w odległości mniejszej niż ogniskowa soczewki. Obraz powstający dzięki lupie to obraz pozorny, prosty i powiększony.

Oko – przyrząd optyczny, który składa się z soczewki skupiającej. Ostry obraz oglądanego przedmiotu powstaje na siatkówce; jest to obraz rzeczywisty, odwrócony i pomniejszony. Oko ma zdolność do szybkiej zmiany ogniskowej, dzięki czemu na siatkówce powstaje ostry obraz. Tę cechę nazywamy akomodacją.

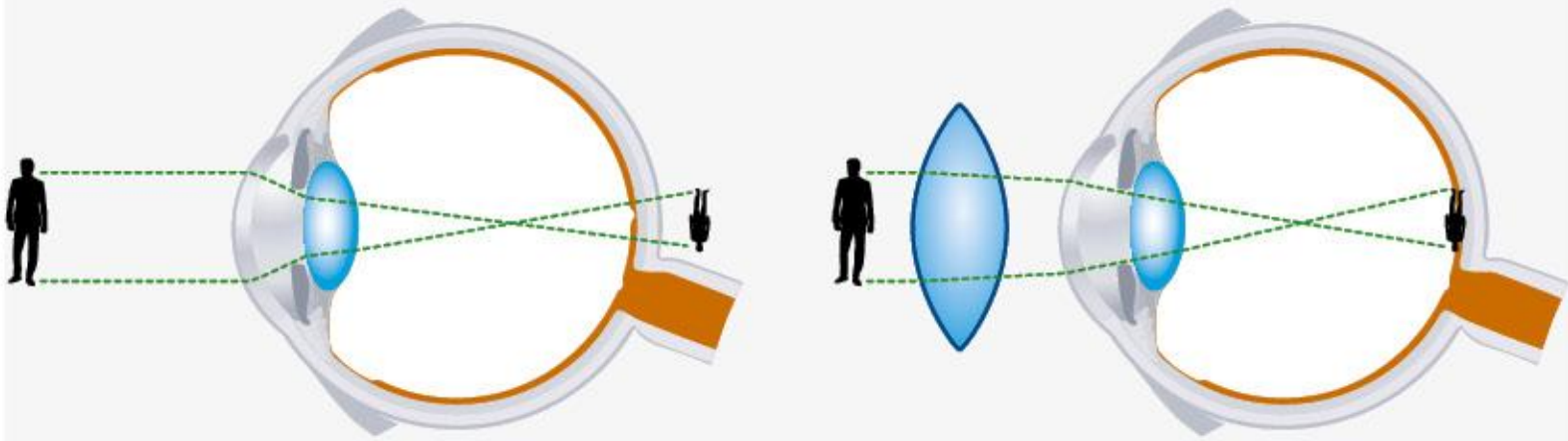


Wady wzroku

Krótkowzroczność – wada polegająca na wyraźnym widzeniu przedmiotów znajdujących się blisko. Obraz w oku powstaje przed siatkówką. Aby skorygować tę wadę, należy zastosować soczewkę rozpraszającą (soczewkę o ujemnej zdolności skupiającej).



Dalekowzroczność – wada polegająca na wyraźnym widzeniu przedmiotów znajdujących się daleko. Obraz w oku powstaje za siatkówką. Aby skorygować tę wadę, wzroku należy zastosować soczewkę skupiającą (soczewkę o dodatniej zdolności skupiającej).



11

FIZYKA ATOMOWA

11.1. Promieniowanie termiczne ciał

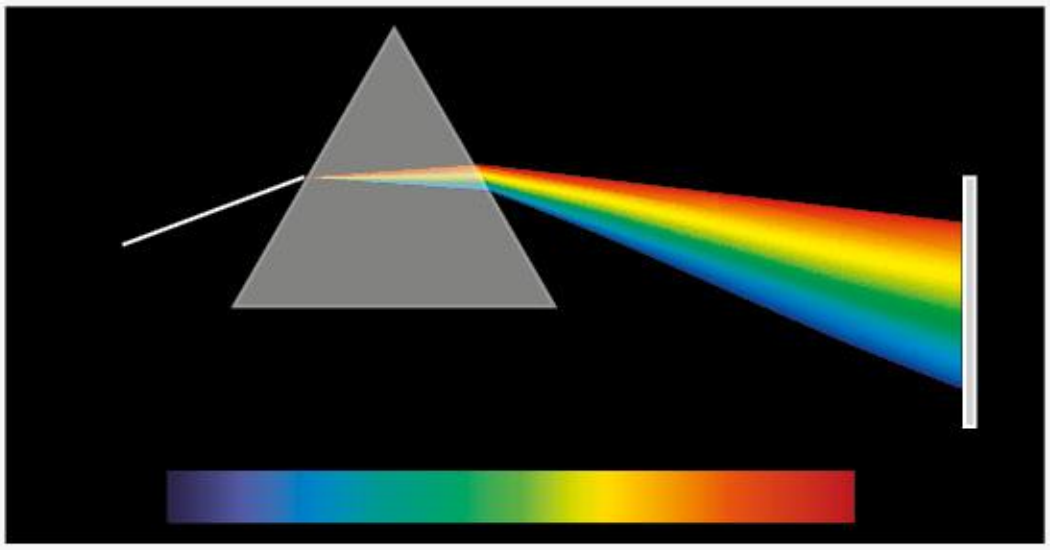
Światło jest strumieniem niezwykle małych cząstek – fotonów – podążających we wspólnym kierunku.

Promieniowanie cieplne (termiczne) – promieniowanie elektromagnetyczne wysyłane przez rozgrzane ciała. Może być to podczerwień, światło widzialne, a nawet nadfiolet.

Rozgrzana materia (np. ciała stałe, ciekły metal, fotosfera Słońca) świecą światłem o widmie ciągłym.

Przykładowy sposób otrzymania widma promieniowania termicznego

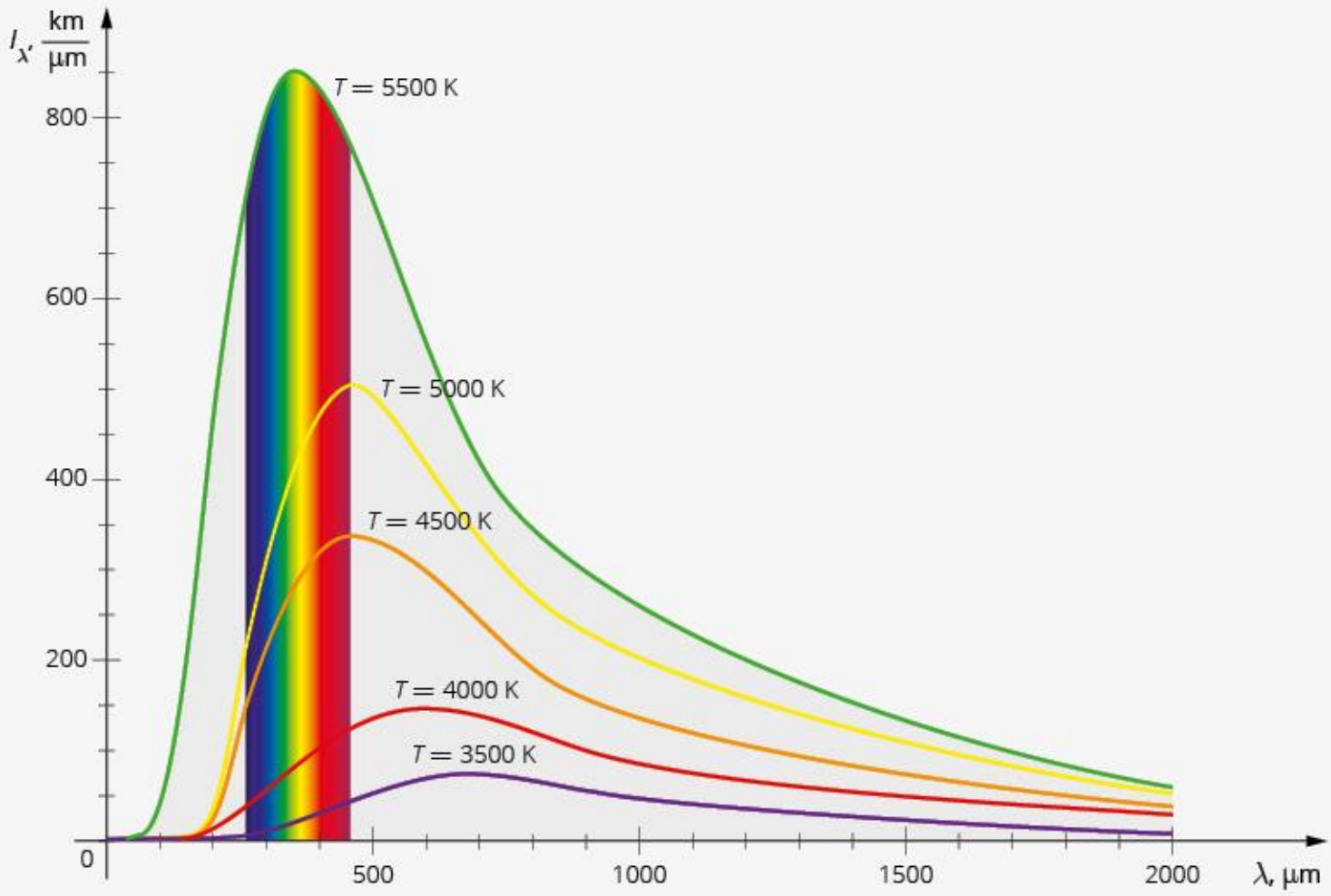
Wystarczy ustawić pryzmat na drodze wiązki światła. Pryzmat rozszczepi światło białe na składowe barwne o określonych długościach fali. Po zrzutowaniu ich na kartkę, uwidaczniamy je w postaci widma.



Wraz z temperaturą istotnie rośnie wysokość krzywych rozkładu widmowego promieniowania termicznego – emitowana energia wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Oznacza to, 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.

Oznacza to, że podgrzewany np. pręt najpierw zaczyna świecić na czerwono, a w miarę wzrostu temperatury jego barwa się zmienia.



11.2. Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne. Fotokomórka

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na wyrzucaniu elektronów z powierzchni metalu pod wpływem padającego promieniowania elektromagnetycznego. Aby elektrony z powierzchni metalu mogły być emitowane, energia fotonu musi być większa albo co najmniej równa pracy wyjścia elektronu z tego metalu. Praca wyjścia jest to najmniejsza energia, jaką należy dostarczyć elektronowi, aby opuścił metal. Dla każdego metalu praca wyjścia jest inna, np. dla miedzi wynosi 4,5 eV.

Dla każdego metalu istnieje pewna najniższa częstotliwość światła, poniżej której zjawisko fotoelektryczne nie zachodzi – taką częstotliwość nazywamy **częstotliwością graniczną**. Maksymalna szybkość fotoelektronów zależy od długości promieniowania wywołującego efekt.

$$E_f = W_{el} + E_{kin\,el\,max}$$

$$\text{lub } hf = W_{el} + \frac{mv_{el\,max}^2}{2}$$

h – stała Plancka

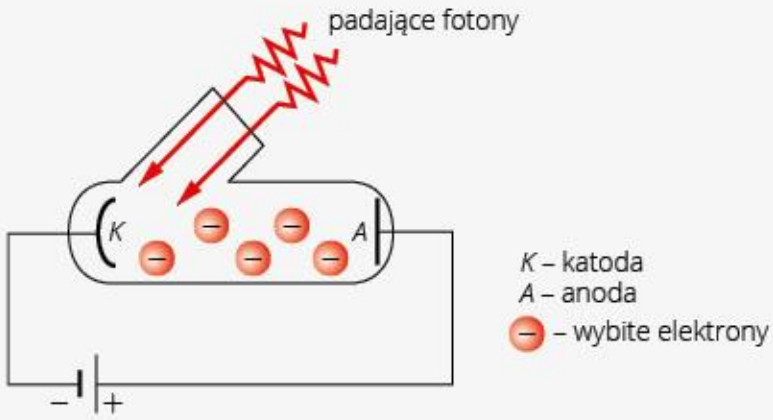
f – częstotliwość promieniowania padającego na powierzchnię metalu

W_{el} – praca wyjścia

E_f – energia fotonu

$E_{kin\,el\,max}$ – maksymalna energia kinetyczna wyemitowanego elektronu

Fotokomórka – bańka szklana, która na wewnętrznej ścianie jest pokryta metalem, np. cezem. W bańce panuje próżnia, warstwa metalu stanowi katodę, a anoda to przymocowany wewnątrz bańki pręt. W fotokomórce z katody w wyniku efektu fotoelektrycznego (oświetlania fotokatody) są wybijane elektrony. Elektrony, przemieszczając się w kierunku anody, niosą ze sobą ładunek, a efektem w wyniku zamknięcia obwodu jest płynący prąd elektryczny.



11.3. Kwantowa teoria promieniowania

Światło rozchodzi się w postaci porcji energii zwanych **kwantami**. Tę energię wyrażamy wzorem:

$$E = hf$$

h – stała Plancka, $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Js

f – częstotliwość promieniowania

11.4. Dwoista natura światła i cząstek materii

Światło ma dwoistą naturę: **korpuskularną** i **falową**. Newton zakładał, że światło jest strumieniem cząstek (korpuskuł), emitowanych przez źródło promieniowania, rozchodzących się po linii prostej. Huygens twierdził, że światło jest falą kolistą, podobną do tej obserwowanej na powierzchni wody.

Zjawiska dyfrakcji i interferencji świadczą o charakterze falowym światła, a szybkość światła wskazuje, że jest ono falą elektromagnetyczną. Zjawisko fotoelektryczne, a następnie efekt Comptona dla promieni rentgenowskich świadczą o charakterze cząsteczkowym (korpuskularnym) światła.

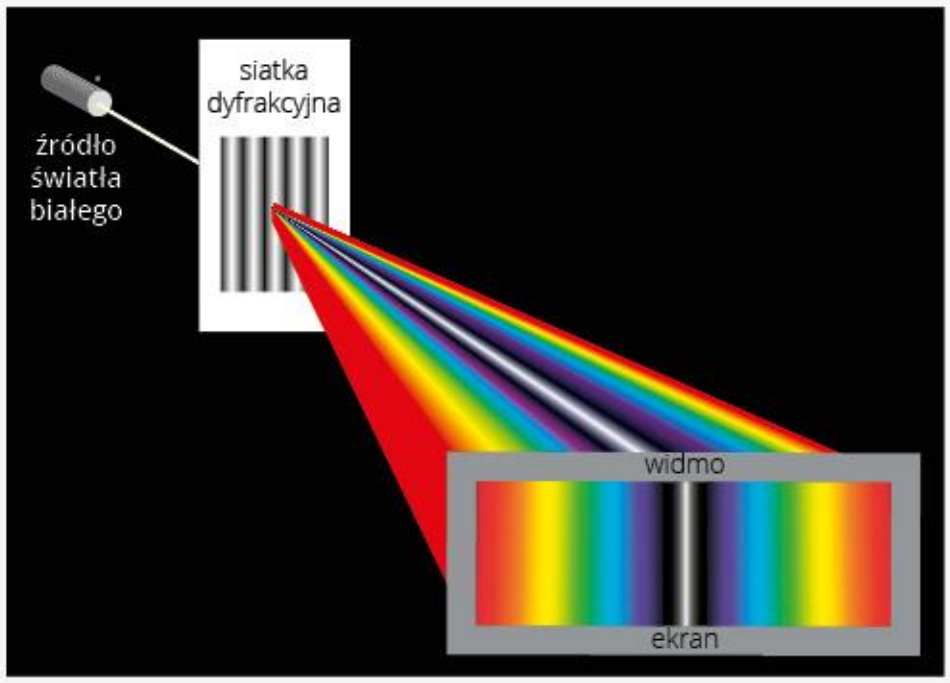
Połączeniem cech korpuskularnych i falowych jest równanie:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

h – stała Plancka

p – pęd fotonu

Dyfrakcja (ugięcie) fali zachodzi na szczelinie lub krawędzi przeszkody o rozmiarach porównywalnych z długością fali. Fala rozchodząca się w jednym kierunku po przejściu przez szczelinę rozchodzi się we wszystkich kierunkach.



$$n\lambda = d \sin \alpha_n$$

n – kolejne liczby określające minimum lub maksimum interferencyjne

λ – długość fali

d – stała siatki dyfrakcyjnej

α_n – kąt ugięcia dla n–tego prążka

Światło jest zbiorem fotonów niosących energię. Tej energii odpowiada określona częstotliwość i długość fali:

$$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Fale materii (de Broglie'a)

Jeżeli cząstka znajduje się w ruchu, to możemy jej przypisać pewną długość fali. **Pęd cząstki** wyrażamy zależnością:

$$p = mv \text{ oraz } p = \frac{h}{\lambda}$$

Długość fali związanej ze swobodną i poruszającą się cząstką wyrażamy za pomocą zależności:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Zjawisko fotochemiczne

Założenie, że światło jest strumieniem fotonów, przyjęto jako wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego, ale jest też wykorzystywane do wyjaśnienia wielu innych zjawisk. Najprostszym z nich jest zjawisko fotochemiczne, w którym światło o odpowiedniej częstotliwości jest potrzebne do tego, aby zaszła reakcja chemiczna.

Przykłady zjawisk fotochemicznych to: opalanie się, synteza witaminy D, fotosynteza, proces widzenia.

Dualizm korpuskularno-falowy opisuje własności promieniowania elektromagnetycznego. Światło w trakcie niektórych doświadczeń, gdy np. ulega dyfrakcji i interferencji, zachowuje się jak fala, a w innych, np. podczas zjawiska fotoelektrycznego – jak strumień cząstek.

Zjawiska świadczące o tym, że światło ma naturę	
falową:	korpuskularną (cząstkowa):
– dyfrakcja	– zjawisko fotoelektryczne
– interferencja	– zjawisko fotochemiczne

Wszystkie ciała wysyłają fale elektromagnetyczne. Im wyższa temperatura ciał, tym wyższa częstotliwość emitowanych fal.

Widmem nazywamy rozszczepione na poszczególne barwy promieniowanie wysyłane przez ciało.

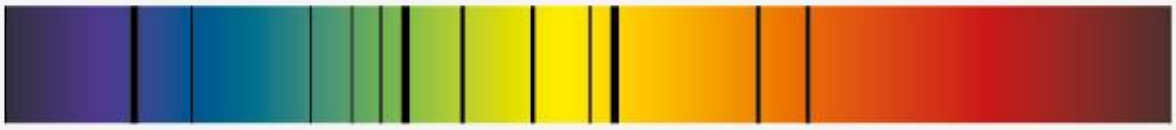
Wyróżnia się widma:

ciągłe – poszczególne barwy światła płynnie przechodzą z jednej w drugą;

liniowe – obserwujemy tylko pojedyncze linie o różnych barwach.

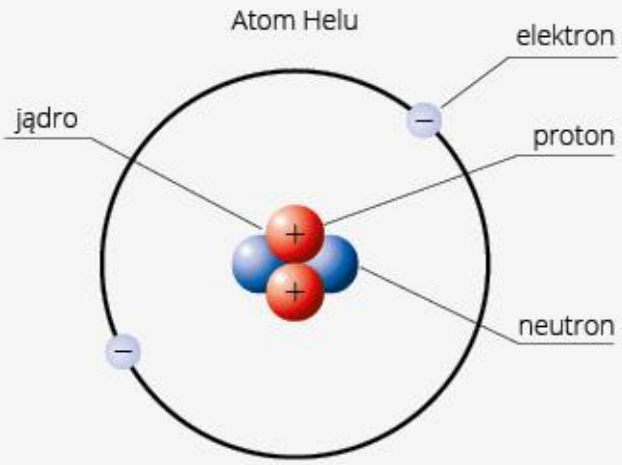
Widmo liniowe może powstać na dwa sposoby:
– pobudzone atomy do świecenia wysyłają (emitują) widmo liniowe o charakterystycznej długości fali, zwane widmem emisyjnym (świetlówki);

– przez gaz przepuszczamy promieniowanie o widmie ciągłym, wówczas fale są pochłaniane (ulegają absorpcji) w wyniku przejścia światła białego przez gaz, powstaje widmo absorpcyjne.



11.5. Budowa atomu

Atom jest zbudowany z jądra, w którym znajdują się protony i neutrony, oraz z krążących po orbitach kołowych elektronów. Atom elektrycznie jest obojętny, czyli liczba protonów i elektronów musi być taka sama. Elektrony w atomie mogą zmieniać orbitę, mogą również zostać przyłączone do atomu lub oderwane od atomu. Cząstka, w której liczba protonów nie jest równa liczbie elektronów, to **jon**. Atom z przyłączonym elektronem nazywamy **jonem ujemnym – anionem**, a atom z niedoborem elektronu nazywamy **jonem dodatnim – kationem**.

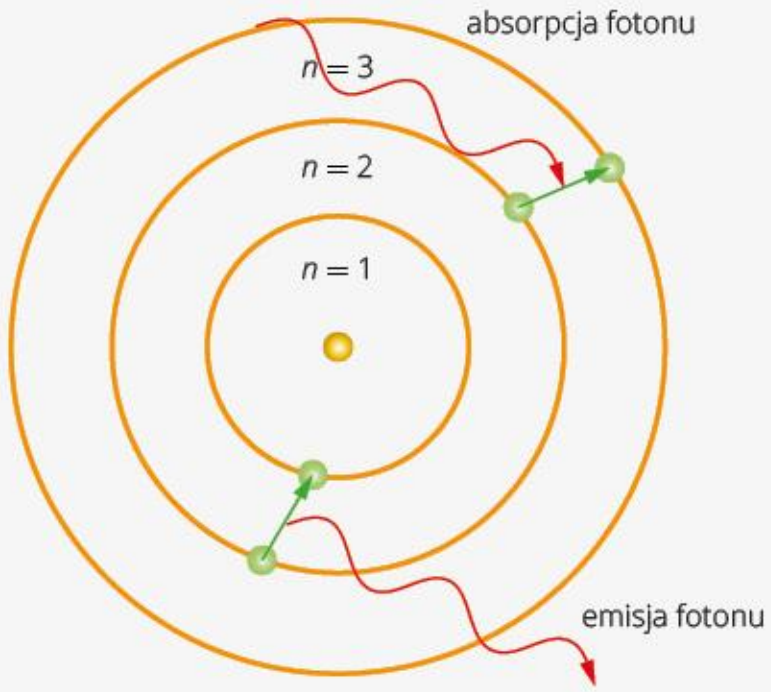


Elektron podczas zmiany orbity absorbuje lub emituje promieniowanie w postaci kwantu energii, przechodząc z jednego stanu energetycznego do drugiego stanu energetycznego.

$$E = E_m - E_n$$

E_m – energia atomu w stanie początkowym
E_n – energia atomu w stanie końcowym

Wypromieniowanie energii następuje, gdy $E_m > E_n$, a pochłanianie energii następuje, gdy $E_m < E_n$.



Podczas wypromieniowania energii:

$$E_m - E_n = h \cdot f_{mn} + E_{odrzutu}$$

f_{mn} – częstotliwość emitowanego promieniowania

Przy założeniu, że przy emisji można pominąć odrzut atomu:

$$E_m - E_n = h \cdot f_{mn}$$

Energia elektronu w atomie wodoru

Według modelu zaproponowanego w 1913 r. przez duńskiego fizyka Nielsa Bohra atom wodoru składa się z dodatnio naładowanego jądra, którym jest proton, oraz z elektronu okrążającego to jądro.

Elektron nie wysyła energii, gdy krąży wokół jądra po ściśle określonych orbitach, które nazywamy dozwolonymi.

Orbity dozwolone numeruje się kolejno od orbity położonej najbliżej jądra, której nadano numer 1.

Gdy elektron znajduje się na orbicie dozwolonej najbliższej jądra (na orbicie 1), mówimy, że atom wodoru znajduje się w **stanie podstawowym**. Wówczas energia elektronu, a tym samym atomu wodoru, jest najmniejsza.

Gdy elektron w atomie wodoru znajduje się na dalszych orbitach, to mówimy, że atom wodoru znajduje się w **stanie wzbudzonym**.

Energię atomu wodoru można obliczyć według wzoru:

$$E_n = -\frac{13{,}606\ \text{eV}}{n^2}$$

n – numer orbity dozwolonej

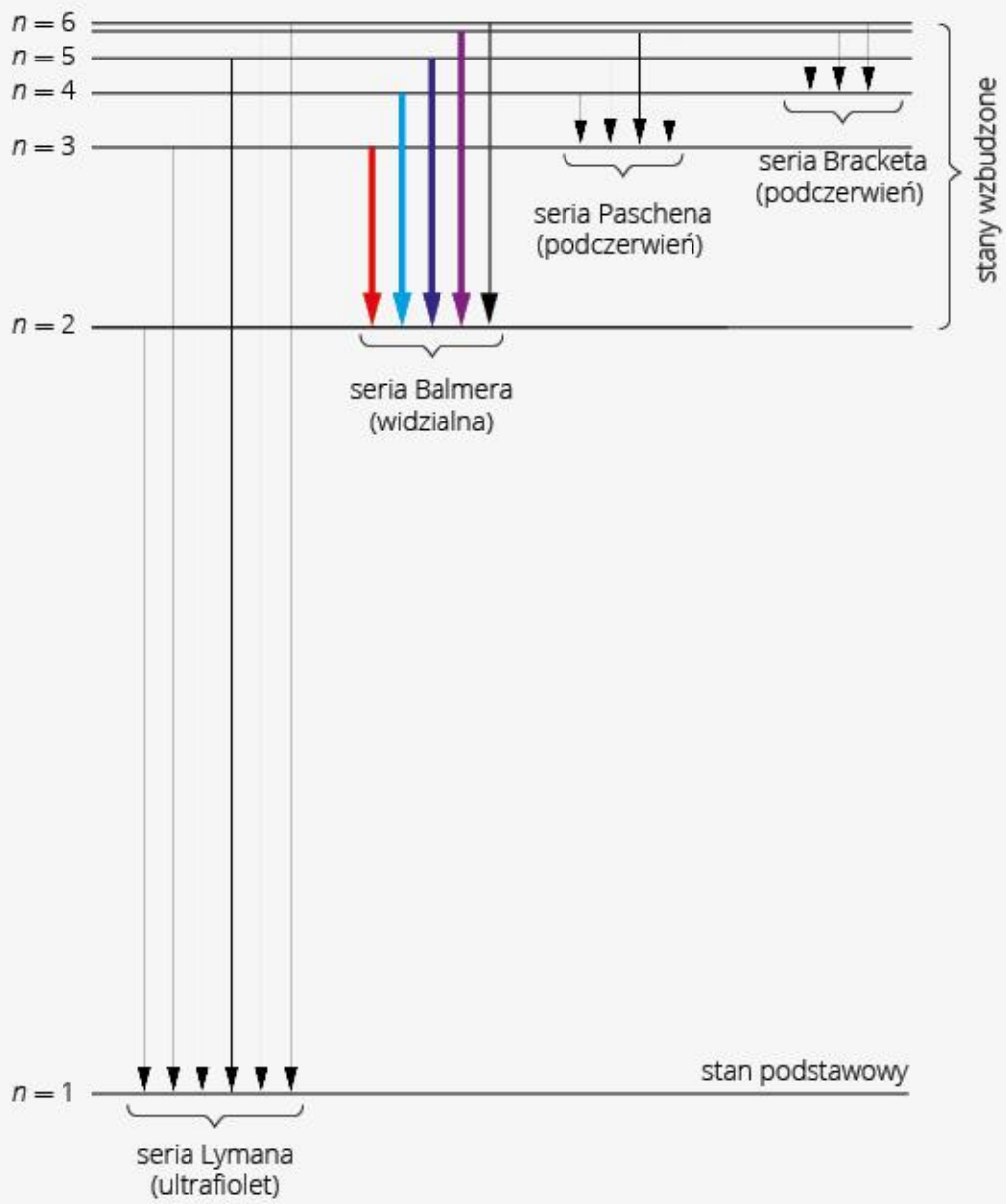
Energia atomu wodoru jest tym większa, im dalej od jądra znajduje się elektron.

Podczas przeskoku elektronu w atomie wodoru z orbity o numerze m na orbitę o numerze n, gdzie $m > n$, i przy pominięciu odrzutu atomu, atom wodoru emituje foton o częstotliwości:

$$f_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$$

Promieniowanie wysyłane podczas przeskoków elektronu na jeden poziom energetyczny (na ustaloną orbitę) tworzy **serię widmową**.

Na ilustracji na następnej stronie przedstawiono powstawanie serii widmowych w atomie wodoru. Przejścia elektronu między orbitami dozwolonymi (stanami energetycznymi) zobrazowano strzałkami. Ich długość odpowiada energii fotonu, który został wysłany z atomu wodoru podczas takiego przejścia.



Długość fali wyemitowanego promieniowania podczas przejścia elektronu z orbity o numerze m na orbitę o numerze n oblicza się ze **wzoru Rydberga**:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

$$m > n$$

R – stała Rydberga, $R = 1{,}097 \cdot 10^7 \ \frac{1}{\text{m}}$

Promień orbity atomu wodoru

$$r_n = n^2 r_1$$

$$r_1 = 5{,}3 \cdot 10^{-11}\ \text{m}$$

Promień orbity elektronu jest proporcjonalny do kwadratu jej numeru.

11.6. Emisja wymuszona. Laser

Laser działa dzięki wykorzystaniu wymuszonej emisji promieniowania. Emisja wymuszona zachodzi wówczas, gdy wzbudzony atom zderza się z fotonem, którego energia jest taka sama, jak różnica energii między stanem podstawowym a stanem wzbudzonym atomu. Foton, który zderza się z atomem, nie ulega pochłonięciu, a powoduje przejście atomu ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego.

Atom, przechodząc do stanu podstawowego, emituje foton o takiej samej energii. Oba fotony poruszają się dalej razem, a fale odpowiadające fotonom są falami spójnymi.

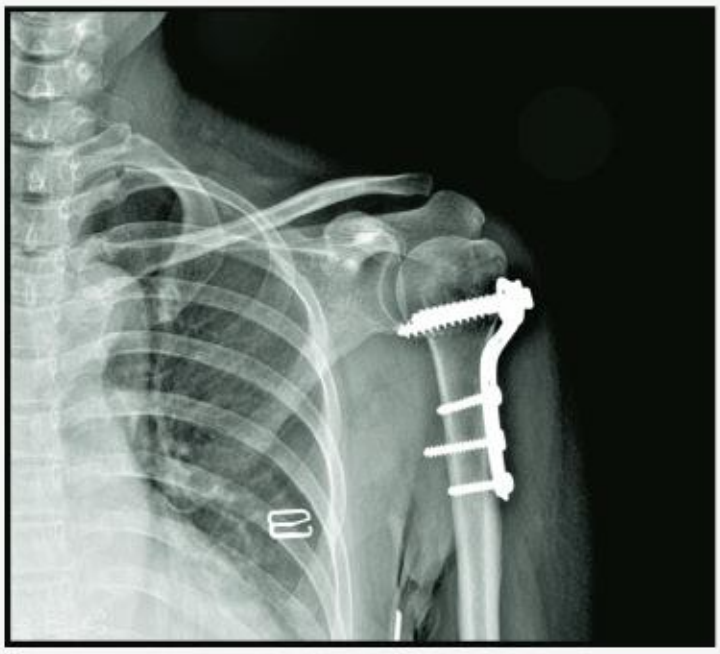
Emitowane wówczas światło jest skupiane w wiązce nazywanej większą laserową.

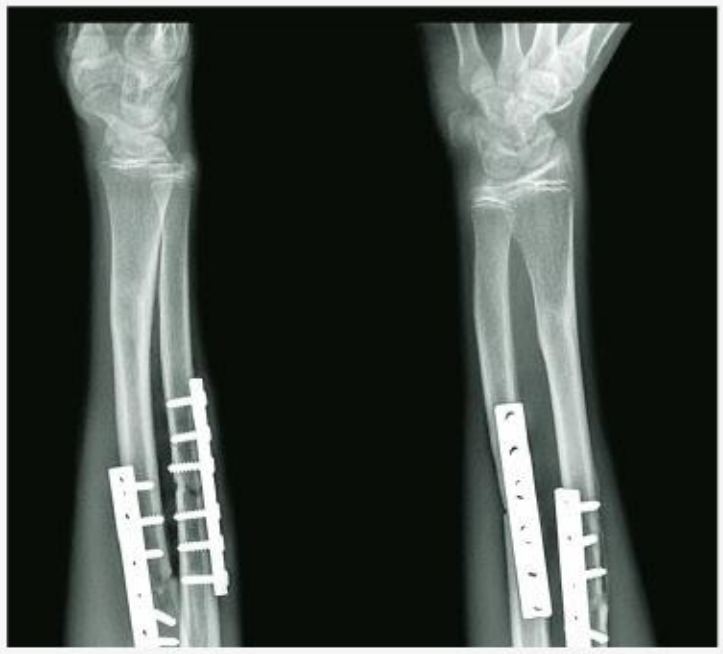
Właściwości promieniowania laserowego:
– monochromatyczność – promieniowanie składa się wyłącznie z fal o jednej długości;
– duża spójność, a w związku z tym zgodność faz;
– fale lasera są w przybliżeniu równoległe ze względu na spójność.

Promieniowanie laserowe jest wykorzystywane we wskaźnikach laserowych, do pomiaru odległości, lokalizacji przedmiotów, w medycynie – w chirurgii, w łączności, do obróbki materiałów – do cięcia metali.

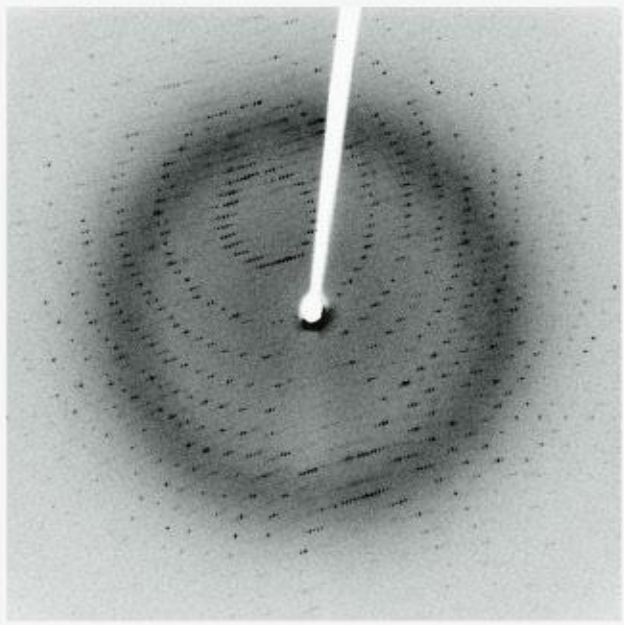
11.7. Promieniowanie rentgenowskie

Promieniowanie rentgenowskie to rodzaj fal elektromagnetycznych o długościach fal większych niż promieniowanie gamma, a mniejszych niż promieniowanie ultrafioletowe. Zostało odkryte przez niemieckiego fizyka Wilhelma Roentgena w 1895 r. Odkryte promieniowanie nazwał promieniami X. Obecnie jest ono nazywane promieniowaniem rentgenowskim.





Obraz dyfrakcyjny uzyskany na skutek rozproszenia promieni rentgenowskich na krysztale powstaje w procesie nazywanym **krystalografią rentgenowską** (nazwa nawiązuje to faktu, że proces pozwala uzyskać dane o strukturze kryształów). Zdjęcia rentgenowskie potwierdzają rozmiar i kształt atomów, a także dostarczają informacji o ich rozmieszczeniu i ułożeniu w materiałach.



Rozproszenie promieni rentgenowskich na kryształach pozwoliło potwierdzić, że promienie to fale elektromagnetyczne o dużej energii.

Fala jest zaburzeniem rozciągłym, istniejącym w wielu miejscach jednocześnie. Jednak w przyrodzie istnieją takie cząstki, jak protony, elektrony czy atomy. Wydawałoby się, że te cząstki są przeciwieństwem fali – są niewielkie i zlokalizowane. W XX w. naukowcom udało się wytworzyć strumień elektronów i skierować je w określone miejsce. W 1927 r. dwaj fizycy amerykańscy – Clinton Davidsson oraz Lester Germer – przeprowadzili doświadczenie, w którym wiązkę elektronów skierowali na tarczę z monokryształu niklu. Przed tarczą umieścili detektor elektronów, aby badać, w jaki sposób będą one „odbijać się" od tarczy. Elektrony pochodziły z metalowego włókna, rozgrzanego do bardzo wysokiej temperatury. Można by oczekiwać, że elektrony zachowają się jak małe kule, czyli odbiją się od tarczy, ale nie zmienią zbytnio swojego kierunku. Wówczas można byłoby zaobserwować bardzo silny sygnał dla detektora ustawionego naprzeciwko tarczy.

W 1923 r. Louis de Broglie wysunął hipotezę, że zachowanie się dwoiste, czyli korpuskularno-falowe, jest cechą zarówno promieniowania, jak i materii. Fotonowi towarzyszy pewna fala świetlna, rządząca jego ruchem. Podobnie i z cząsteczką materialną wiąże się pewna fala materii, określająca jej ruch.

De Broglie zasugerował, by falowe aspekty materii powiązać ilościowo z ich cechami korpuskularnymi w taki sam sposób, jak w przypadku promieniowania.

Fala materii cząstki o masie m poruszającej się z prędkością v ma długość:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

h – stała Plancka

12

ELEMENTY FIZYKI RELATYWISTYCZNEJ I FIZYKA JĄDROWA

12.1. Względność równoczesności

Prędkość światła jest jednakowa we wszystkich inercjalnych układach odniesienia i nie zależy ani od ruchu źródła, ani obserwatora. Jej wartość w próżni jest równa wartości prędkości fali elektromagnetycznej w próżni:

$$c = 297\,792\,458\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \approx 3 \cdot 10^8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Prędkość światła w próżni jest maksymalną wartością przekazu energii i informacji.

Założenie niezależności prędkości światła od układu inercjalnego pozwoliło Einsteinowi rozszerzyć zasadę względności Galileusza również na zjawiska elektrodynamiczne i sformułować ogólniejszą zasadę – obecnie nazywaną **zasadą względności Einsteina**. Ta zasada mówi o tym, że prawa fizyki we wszystkich układach inercjalnych są takie same.

Energia spoczynkowa – energia ciała, jaką wykazuje ciało w danym układzie odniesienia – energia masy ciała niezależna od ruchu i oddziaływań.

$$E_0 = mc^2$$

Zgodnie z zasadą zachowania energii, ta energia może się zmienić, jeżeli ciało będzie emitować lub pochłaniać energię z zewnątrz, co uwidoczni się również zmianą masy ciała.

Energia całkowita – suma energii kinetycznej i energii spoczynkowej.

$$E_c = mc^2 + E_{kin} = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

E_{kin} – energia kinetyczna ciała
v – prędkość ciała
c – prędkość światła w próżni
m – masa ciała

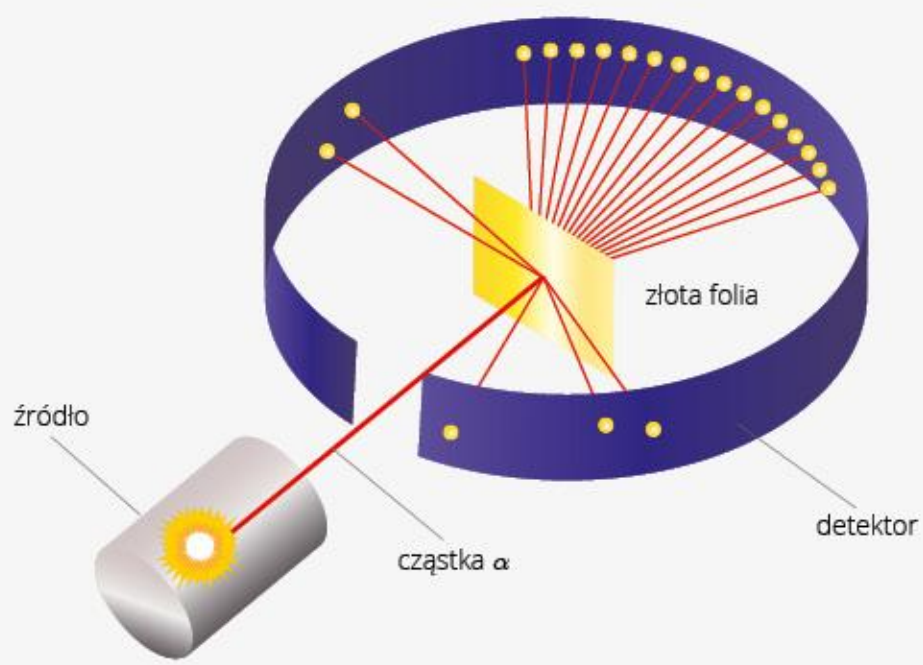
Równoważność masy i energii spoczynkowej

W fizyce klasycznej obowiązuje zasada zachowania masy i zasada zachowania energii, a w fizyce relatywistycznej mamy jedną zasadę – zasadę zachowania energii relatywistycznej. Czyli obydwie wielkości są równoważne i mogą być wyrażane zarówno w jednostkach masy, jak i energii, a wielkością, która wiąże masę i energię, jest wzór:

$$E_0 = mc^2$$

12.2. Odkrycie i właściwości jądra atomowego

Rutherford, badając wewnętrzną strukturę atomu, odkrył, że jądra helu, nazywane również cząstkami alfa, podczas bombardowania cienkiej folii mogą odchylać się od swojego toru ruchu. Odchylenie cząstek było spowodowane napotkaniem na swojej drodze dużego ładunku skupionego w małej objętości. Tym ładunkiem, skupionym w małej objętości, jest jądro atomowe.



Atom ma taką samą liczbę elektronów, poruszających się wokół jądra, co protonów w jądrze. Oprócz protonów w jądrze znajdują się neutrony. Atomy tego samego pierwiastka mogą się różnić liczbą neutronów – takie odmiany danego pierwiastka nazywamy **izotopami**.

Izotopy wodoru:

${}^{1}_{1}H$ **prot** – jądro składa się z pojedynczego protonu.

${}^{2}_{1}H$ **deuter** – jądro składa się z jednego protonu i jednego neutronu.

${}^{3}_{1}H$ **tryt** – jądro składa się z jednego protonu i dwóch neutronów.

Zapis jądra atomu:

$$ {}^{A}_{Z}X $$

X – symbol pierwiastka
A – liczba masowa przybliżona do wartości całkowitej (określa liczbę nukleonów, czyli sumę protonów i neutronów)
Z – liczba atomowa (określa liczbę protonów w jądrze atomowym)

Atom ma rozmiary rzędu 10^{-10} m, a rozmiar jądra wynosi 10^{-15} m. Atom jest elektrycznie obojętny. Protony mają ładunek dodatni, a elektrony – ładunek ujemny. Protony i neutrony znajdujące się w jądrze nazywamy **nukleonami**.

Promień jądra atomowego:

$$ R_j = r_0 \sqrt[3]{A} $$

$$ r_0 = 1{,}2 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{m} $$

12.3. Promieniotwórczość naturalna

Jądra stabilne to takie nuklidy, dla których nie występują samorzutne przemiany jądrowe. Jądra stabilne nie zmieniają się w czasie.

Jądra niestabilne to jądra ulegające przemianom w sposób spontaniczny, bez żadnej ingerencji z zewnątrz. Nie można przewidzieć, kiedy nastąpi rozpad jądra, czy nastąpi to za 1 minutę, czy za 10 lat.

Jądra atomowe	
stabilne	niestabilne
trwałe	samorzutnie przekształcają się w jądra innych pierwiastków i wysyłają przy tym promieniowanie

Promieniotwórczość naturalna – zjawisko samorzutnej emisji z jąder atomowych promieniowania α, β, γ.

12.4. Rozpady promieniotwórcze

Promieniowanie α

Promieniowanie α jest strumieniem jąder helu ${}^{4}_{2}He$, mających ładunek dodatni. Cząstki alfa mają prędkość od $14 \cdot 10^3 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ do $20 \cdot 10^3 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ oraz energię 4–10,5 MeV. Cechują się również niewielką przenikliwością, czyli są pochłaniane przy przejściu przez różne substancje nawet przez cienką kartkę papieru. W powietrzu długość toru cząstki α wynosi kilka centymetrów.

Są stosowane w detektorach dymu, do usuwania statycznych ładunków elektrycznych, np. w urządzeniach kopiujących.

W wyniku wyemitowania cząstki α jądro traci dwa protony i dwa neutrony, czyli liczba masowa maleje o 4, a liczba atomowa – o 2.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He $$

Promieniowanie β

Promieniowanie β jest bardziej przenikliwe niż promieniowanie α. W powietrzu jego zasięg wynosi kilka metrów. Jest pochłaniane przez cienkie metalowe folie. Promieniowanie β stanowi strumień szybko poruszających się elektronów (β^-) lub pozytonów (β^+).

Podczas przemiany β^- neutron ulega przemianie w proton, elektron i antyneutrino elektronowe.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}\beta^- + \widetilde{\nu_e}$$

Przemianie ulegają jądra, w których znajduje się więcej neutronów niż protonów.

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{+1}p + {}^{0}_{-1}e + \widetilde{\nu_e}$$

Podczas przemiany β^+ proton ulega rozpadowi na neutron, pozyton i neutrino elektronowe.

Takiej przemianie ulegają jądra, w których znajduje się więcej protonów niż neutronów.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}\beta^+ + \nu_e$$

$$^{1}_{+1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e^+ + \nu_e$$

Promieniowanie γ

Promieniowanie γ jest falą elektromagnetyczną o bardzo małej długości (bardzo dużej częstotliwości); to strumień fotonów. To promieniowanie jest przenikliwe – przechodzi przez płyty ołowiane o grubości kilku centymetrów.

12.5. Reakcje jądrowe

Reakcją jądrową nazywamy proces, w którym wskutek bombardowania cząstkami o dużej energii następuje przemiana jądra atomowego pierwiastka o liczbie masowej A i liczbie porządkowej Z w jądro innego atomu o innej liczbie masowej A i innej liczbie porządkowej Z. W wyniku reakcji bardzo często powstaje nowa cząstka. W reakcjach jądrowych musi być zachowana zasada zachowania ładunku elektrycznego przed reakcją i po zajściu reakcji oraz zasada zachowania liczby nukleonów przed reakcją i po zajściu reakcji.

Przykład reakcji:

$$^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}\alpha$$

12.6. Energia jądrowa i deficyt masy

Masa jądra atomowego

$$M_j \cong Au$$

u – jednostka masy atomowej, $u = \frac{1}{12}$ masy atomu węgla ^{12}C

Jednostka masy atomowej $u = 1{,}6654^{-27}$ kg.

Wielkością opisującą jądro atomowe jest jego energia wiązania, która mówi, ile energii należy dostarczyć do jądra, aby przezwyciężyć występujące między nukleonami przyciągające oddziaływania i w rezultacie rozbić jądro na jego poszczególne składniki. Energia wiązania jądra jest ilościowo równa energii wyzwolonej w procesie jego powstawania, czyli łączenia się poszczególnych składników.

$$E_w = \Delta mc^2$$

Δm – deficyt masy

c – prędkość światła w próżni

Energia wiązania przypadająca na jeden nukleon

$$W = \frac{E_w}{A}$$

E_w – energia wiązania jądra

A – liczba masowa

Defekt masy

Masa każdego związanego jądra atomowego jest zawsze mniejsza od sumy mas tworzących je protonów i neutronów, co możemy zapisać jako:

$$M_j < Zm_p + Nm_n$$

m_p, m_n – masy protonu i neutronu

M_j – masa jądra zbudowanego z N neutronów i Z protonów

ΔM – różnica mas

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_j$$

Anihilacja – oddziaływanie cząstki z antycząstką, podczas którego cząstka i antycząstka zostają zamienione na fotony o sumarycznej energii równoważnej masom cząstki i antycząstki, zgodnie ze wzorem Einsteina:

$$E = mc^2$$

12.7. Czas połowicznego rozpadu

Każde z jąder danej próbki promieniotwórczej ulega przemianie niezależnie od pozostałych jąder, w sposób przypadkowy i samorzutnie. Jeżeli próbka substancji zawiera wiele jednakowych jąder promieniotwórczych, to możemy z dużym przybliżeniem określić, jak z upływem czasu zmieni się ich liczba. Proces rozpadu promieniotwórczego opisujemy, stosując pojęcie prawdopodobieństwa, np. prawdopodobieństwo rozpadu jądra jodu jest równe 0,5 w ciągu 8 dni. Proces rozpadu promieniotwórczego możemy porównać do rzutu monetą – nie sposób określić, ile rzutów należy wykonać, aby uzyskać reszkę, choć podczas każdego rzutu prawdopodobieństwo uzyskania reszki jest równe $\frac{1}{2}$. Podobnie nie wiadomo, kiedy rozpadnie się dane jądro, chociaż prawdopodobieństwo rozpadu na jednostkę czasu w wypadku pojedynczego jądra jest stałe i wynosi λ. Prawo rozpadu promieniotwórczego ma więc charakter statystyczny.

Czas połowicznego rozpadu *T* to czas, w którym połowa jąder danego izotopu promieniotwórczego ulega rozpadowi.

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

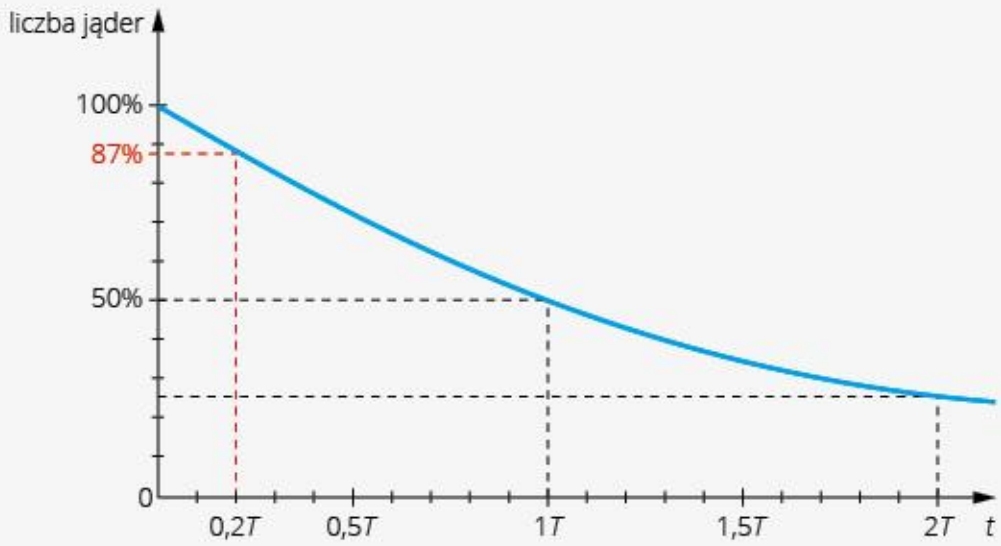
N_0 – początkowa liczba jąder

T – czas połowicznego rozpadu

$N(t)$ – liczna jąder która nie uległa rozpadowi po czasie t

t – czas rozpadu

Na przykład czas połowicznego rozpadu węgla $^{14}_{6}C$ wynosi 5730 lat.



Liczba jąder

$$N \approx \frac{M}{A \cdot u}$$

M – masa próbki
A – liczba masowa pierwiastka
u – jednostka masy atomowej

Aktywność promieniotwórcza – szybkość rozpadu:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

ΔN – liczba rozpadów promieniotwórczych
Δt – czas trwania rozpadu

Aktywność promieniotwórczą wyrażamy w **bekerelach**. 1 Bq odpowiada jednej przemianie (rozpadowi) na sekundę.

$$\mathrm{Bq} = \frac{1}{\mathrm{s}}$$

Datowanie izotopowe – wykorzystanie prawa rozpadu promieniotwórczego do określania wieku próbki.

Na podstawie prawa rozpadu promieniotwórczego: $N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$ możemy obliczyć początkową liczbę jąder N_0 oraz liczbę jąder, która nie uległa rozpadowi N.

Metoda datowania węglem ^{14}C

Jądro atomu węgla ^{14}C składa się z 6 protonów i 8 neutronów, ma o 2 neutrony więcej niż węgiel ^{12}C, który ma 6 protonów i 6 neutronów. Jądra atomu węgla ^{12}C są stabilne, a jądra węgla ^{14}C – niestabilne i rozpadają się, przy czym zostają wyemitowane elektrony i antyneutrina. Czas połowicznego zaniku węgla ^{14}C wynosi ok. 5730 lat. W wyniku rozpadu β^- jądra węgla ^{14}C powstaje jądro azotu ^{14}N.

Dopóki organizm żyje i wymienia z otoczeniem materię, to stosunek węgla ^{14}C do ^{12}C w tym organizmie się nie zmienia.

Przy założeniu, że promieniowanie kosmiczne nie ulega zmianie z biegiem lat, przyjmujemy, że w momencie śmierci organizmu stosunek $\frac{^{14}C}{^{12}C} = 10^{-12}$.

Po śmierci organizm nie absorbuje węgla. Ilość węgla ^{14}C maleje w związku z samorzutnym rozpadem β^-.

Pomiar stosunku $\frac{^{14}C}{^{12}C}$ w przedmiocie pochodzenia organicznego pozwala ustalić wiek tego przedmiotu.

12.8. Wpływ promieniowania jonizującego na materię i organizmy żywe

Promieniowanie α, β, γ powoduje jonizację materii. Promienie jonizujące działają szkodliwie na organizmy żywe, gdyż w wyniku jonizacji zostają zapoczątkowane reakcje chemiczne powodujące poważne zmiany komórek, które decydują o życiu, zaburzenia gospodarki elektrolitami w organizmie oraz zmiany strukturalne DNA.

Dawka promieniowania

$$D = \frac{E}{m}$$

E – energia pochłonięta przez jednostkową masę m materii

Jednostką średniej dawki pochłoniętej jest **grej** (Gy).

$$1\,\mathrm{Gy} = 1\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}} \approx 6{,}25 \cdot 10^{12}\,\frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{kg}}$$

12.9. Zastosowania zjawiska promieniotwórczości

Zjawisko promieniotwórczości jest wykorzystywane w przemyśle, medycynie, archeologii, rolnictwie oraz życiu codziennym człowieka. W przemyśle największe zastosowanie ma w produkcji energii jądrowej, której używa się do zasilania gospodarstw domowych w prąd elektryczny, oraz jest źródłem napędów samolotów, statków kosmicznych i okrętów podwodnych.

Najpoważniejszą konsekwencją stosowania energii jądrowej jest gospodarka odpadami promieniotwórczymi. Odpady promieniotwórcze należy składować przez bardzo wiele lat, aby były nieszkodliwe dla środowiska i człowieka. Do argumentów przemawiających za stosowaniem energii jądrowej należą: bardzo niska emisja gazów cieplarnianych, zerowa emisja dwutlenku węgla, niskie koszty wytwarzania energii oraz nieograniczony dostęp do źródła wytwarzającego energię.

12.10. Reakcje rozszczepienia

Reakcja rozszczepienia – reakcja jądrowa polegająca na podziale ciężkiego jądra atomu na dwa mniejsze elementy o porównywalnych masach. Te fragmenty stają się atomami innych, lżejszych pierwiastków, np. baru i kryptonu. Temu zjawisku towarzyszy emisja neutronów i kwantów γ.

Reakcja rozszczepienia może zachodzić samorzutnie lub w wyniku bombardowania jądra atomu różnymi cząstkami: neutronami, protonami, deuteronami (jądrami deuteru), cząstkami α oraz kwantami γ.

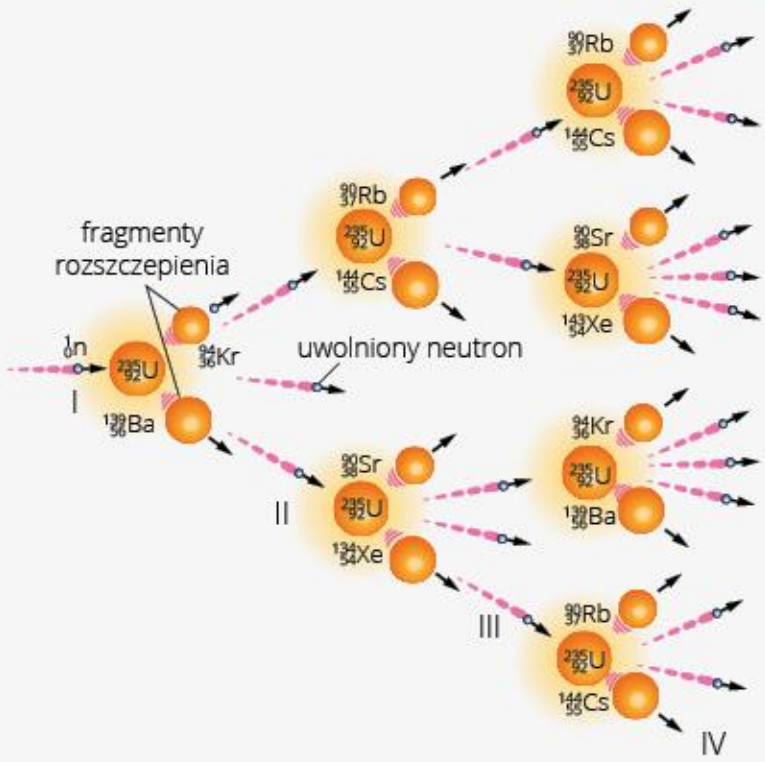
Najczęściej do bombardowania wykorzystuje się neutrony, ponieważ nie mają one ładunku elektrycznego, co umożliwia im w łatwy sposób wniknięcie do jądra atomowego.

W reakcji rozszczepienia jest wyzwalana duża ilość energii. W przypadku rozszczepienia jądra U-235 wydziela się ok. 200 MeV.

Reakcję nazywamy **egzoenergetyczną**, jeżeli podczas reakcji wydziela się energia. W wyniku tej reakcji następuje zwiększenie energii kinetycznej, a suma energii spoczynkowych otrzymanych przed reakcją i po niej maleje.

Reakcję nazywamy **endoenergetyczną**, jeżeli podczas reakcji energia jest pochłaniana. Suma energii spoczynkowych otrzymanych przed reakcją i po niej rośnie, a suma energii kinetycznych maleje.

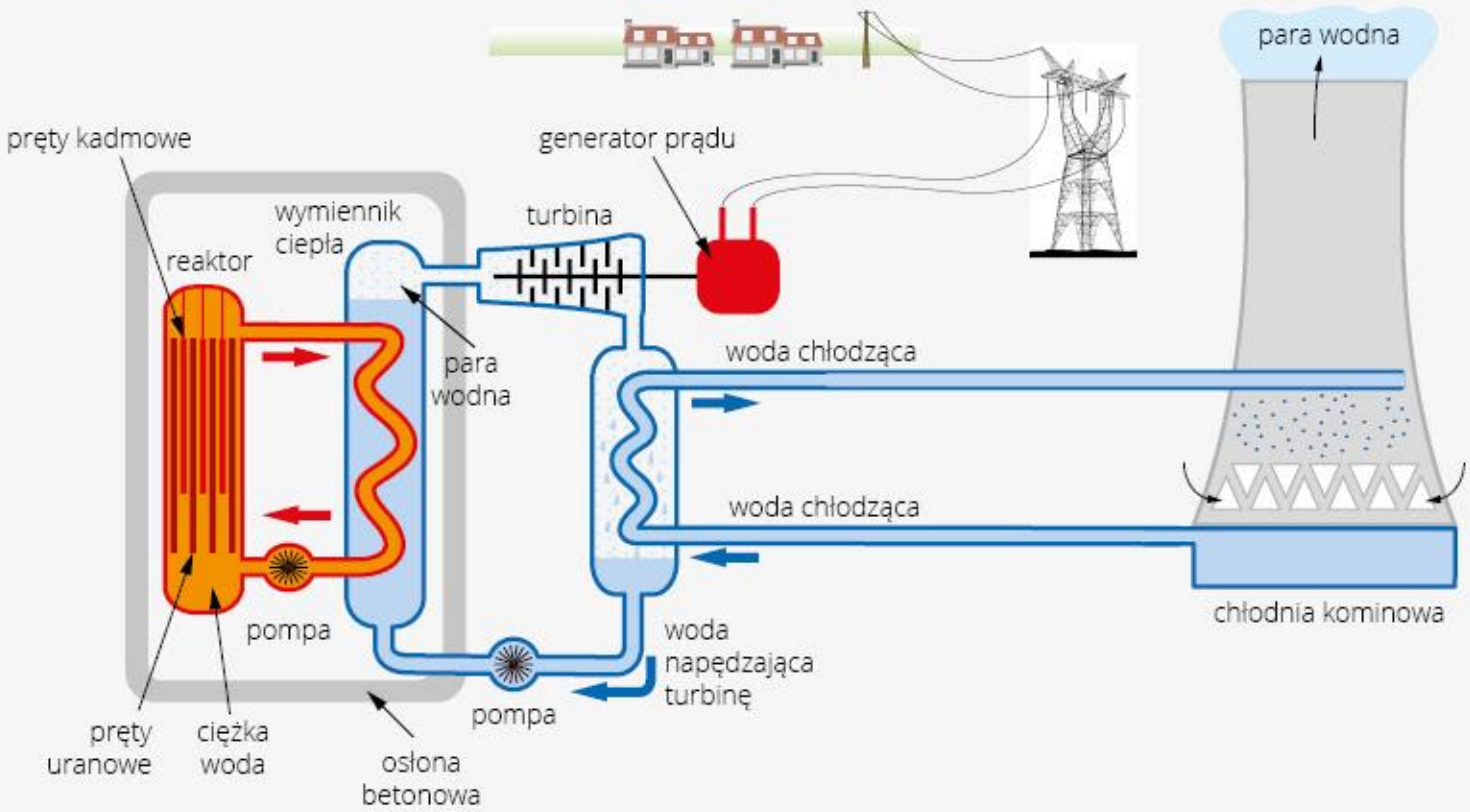
W procesie rozczepienia uwalniane są neutrony. Jeżeli mają one większą prędkość od neutronów wywołujących reakcje rozczepienia, to wówczas uwolnione neutrony wywołują rozczepienie kolejnych jąder i powstaje następna reakcja rozczepienia – taki proces nazywamy **reakcją łańcuchową**.



12.11. Energetyka jądrowa

Zjawisko rozszczepienia jąder w sposób kontrolowany odbywa się w reaktorze jądrowym. Przy rozszczepieniu jednego jądra uranu wyzwalają się dwa lub trzy neutrony, które należy spowolnić. Każdy neutron rozczepia kolejne jądra. Zadaniem reaktora jest kontrolowanie ilości rozszczepień w jednostce czasu oraz ilości wydzielonej energii.

Korzyściami płynącymi ze stosowania energii jądrowej są niski koszt wydobycia surowca oraz niezatruwanie środowiska. Do zagrożeń zaliczamy awarie reaktora atomowego oraz niewłaściwe składowanie zużytego paliwa.



12.12. Reakcje termojądrowe

Synteza termojądrowa – reakcja termojądrowa, w której jądra lekkich pierwiastków łączą się w jądra cięższych pierwiastków. W czasie reakcji syntezy termojądrowej wydziela się energia, a ilość tej energii jest większa niż w reakcji rozszczepienia jądrowego.

Przykład reakcji termojądrowej:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n + \gamma$$

Aby zaszła synteza termojądrowa, należy pokonać siłę odpychania elektrostatycznego między dodatnio naładowanymi jądrami. Prędkość jąder musi być bardzo duża, ponieważ z prędkością jest związana temperatura – powinna być ona rzędu miliona kelwinów.

Reakcja syntezy termojądrowej została wykorzystana w bombie wodorowej.

Reakcje syntezy termojądrowej zachodzą wewnątrz gwiazd, np. w Słońcu. Zachodzi w nim synteza termojądrowa zwana **nukleosyntezą**.

W reakcji nukleosyntezy występują różne cykle, np. **cykl protonowo-protonowy** – dwa protony łączą się ze sobą, a w następstwie powstają jądro deuteru, pozyton oraz neutrino elektronowe; pozyton anihiluje z elektronem, dzięki czemu wytwarza się duża ilość energii:

$$^{1}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{2}_{1}\mathrm{H} + e^{+} + \nu_{e} + \gamma \ (1{,}44\ \mathrm{eV})$$

Do jądra deuteru przyłącza się proton i powstaje jądro helu oraz emitowane jest promieniowanie gama:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma \ (5{,}4\ \mathrm{eV})$$

Następuje połączenie się dwóch powstałych jąder atomu helu, tworzą się jądro ciężkiego izotopu helu oraz dwa protony:

$$^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$$

12.13. Ewolucja gwiazd

Gwiazdy (w tym Słońce) świecą, bo w ich wnętrzu przy bardzo wysokiej temperaturze i pod bardzo wysokim ciśnieniem zachodzą reakcje termojądrowe syntezy jąder wodoru w jądra helu. Kiedy cały wodór w jądrze zamieni się w hel, rozpoczną się przemiany helu w węgiel. Ostatnim elementem, jaki powstaje w reakcji, jest żelazo. Jeżeli masa gwiazdy nie przekracza 8 mas Słońca, gwiazda zapada się i powstaje obiekt typu **biały karzeł**, o wielkości porównywalnej z wielkością Ziemi. Gwiazdy o masie większej od 8 mas Słońca wybuchają i powstaje **supernowa**, a gwiazdy bardzo masywne, rzędu 20–150 mas Słońca, zamieniają się w **czarne dziury**.

Gwiazdy supernowe są to gwiazdy zmienne, odznaczające się wzrostem jasności do ok. 107–108 razy przewyższającej jasność Słońca. Jest to proces wybuchu, podczas którego znaczna część materii zostaje wyrzucona na zewnątrz, co powoduje świecenie. W gwiazdach, których masa jest 10 razy większa od masy Słońca, tworzą się cięższe pierwiastki – żelazo i nikiel. Gdy gęstość jądra rośnie, a zarazem i temperatura do 10 mld stopni, następuje gwałtowny rozpad jąder żelaza i niklu na jądra helu i neutrony. Podczas wybuchu zachodzą reakcje syntezy ciężkich pierwiastków, które następnie rozpraszają się w przestrzeniach międzygwiezdnych. Z takich ciężkich jąder powstałych po wybuchach supernowych są zbudowane Ziemia i człowiek. Jasność gwiazdy po wybuchu supernowej rośnie wówczas dziesiątki, a nawet setki milionów razy, i osiąga blask porównywalny z całą galaktyką, w której się znajduje.

Czarna dziura powstaje, kiedy gwiazda zapada się pod wpływem własnego ciężaru po wyczerpaniu paliwa. Jest to obiekt, który silnie oddziałuje grawitacyjnie na swoje otoczenie, tak że żadna materia nie jest w stanie z niego uciec, dotyczy to również światła. Czarne dziury znajdują się w centrach niektórych galaktyk. Granicę, po przejściu której możliwe jest wydostanie się światła z pola grawitacyjnego czarnej dziury, nazywa się horyzontem zdarzeń.

WYBRANE WZORY I STAŁE FIZYKOCHEMICZNE NA EGZAMIN MATURALNY Z BIOLOGII, CHEMII I FIZYKI

POTENCJAŁ WODY W KOMÓRCE ROŚLINNEJ

$\Psi_W = \Psi_S + \Psi_P$

Ψ_W – potencjał wody

Ψ_S – potencjał osmotyczny

Ψ_P – potencjał ciśnienia

RÓWNANIE HARDY'EGO–WEINBERGA

$p + q = 1$

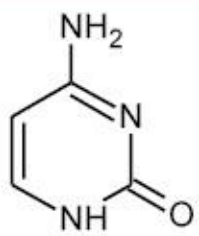
$(p + q)^2 = p^2 + 2pq + q^2 = 1$

gdzie:

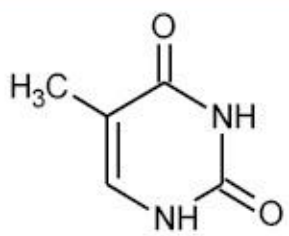
p – częstość allelu dominującego w populacji,

q – częstość allelu recesywnego w populacji.

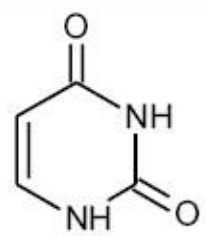
ZASADY AZOTOWE



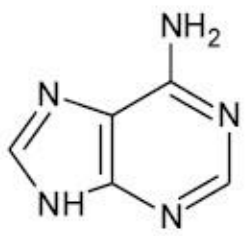
Cytozyna (C)



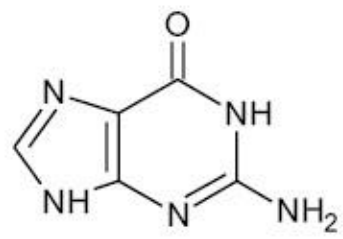
Tymina (T)



Uracyl (U)

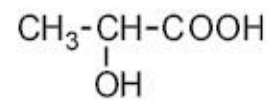


Adenina (A)

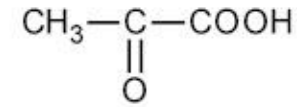


Guanina (G)

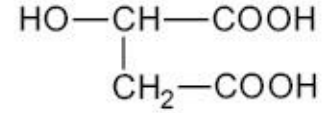
WYBRANE KWASY ORGANICZNE



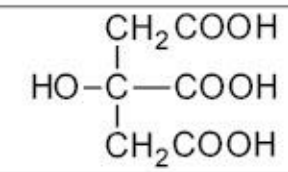
kwas mlekowy



kwas pirogronowy

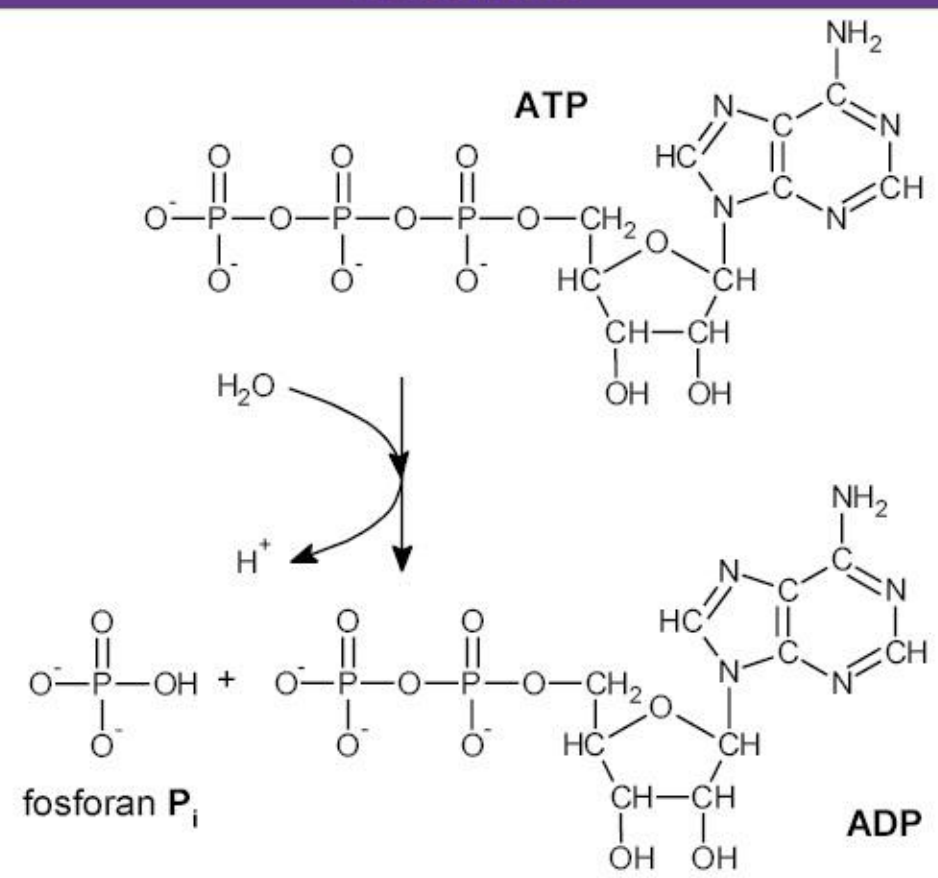


kwas jabłkowy



kwas cytrynowy

HYDROLIZA ATP



PODSTAWOWE WZORY ZE STATYSTYKI

Średnia arytmetyczna

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$$

n – liczebność próby
$x_1, x_2, \ldots, x_n$ – kolejne obserwacje

Średnia ważona

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n}$$

n – liczebność próby
$x_1, x_2, \ldots, x_n$ – kolejne obserwacje
$w_1, w_2, \ldots, w_n$ – wagi przyporządkowane kolejnym obserwacjom

Odchylenie standardowe

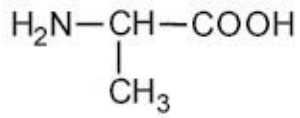
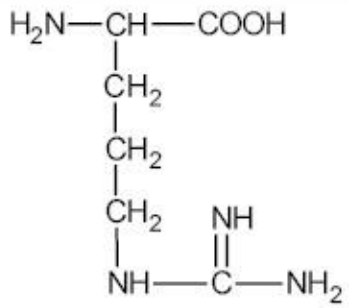
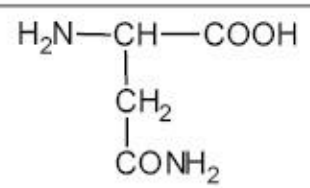
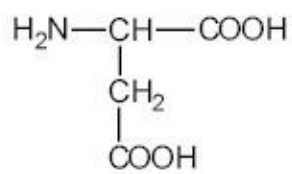
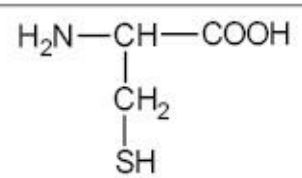
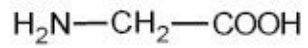
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

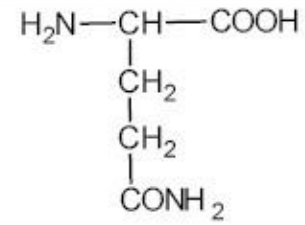
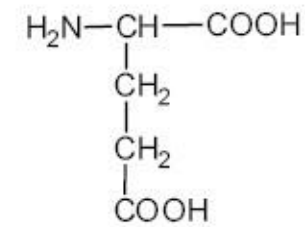
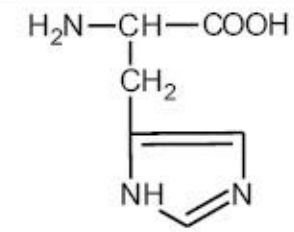
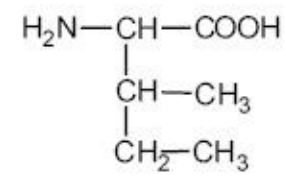
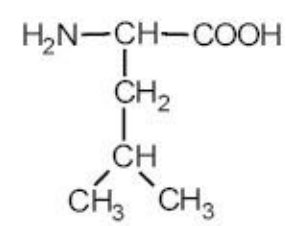
x_i – i-ta obserwacja
$\bar{x}$ – średnia arytmetyczna
n – liczba obserwacji

KOD GENETYCZNY

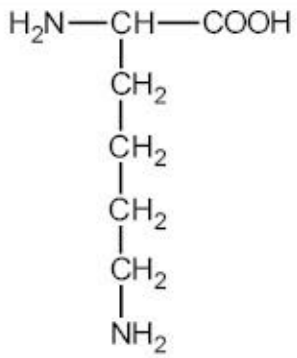
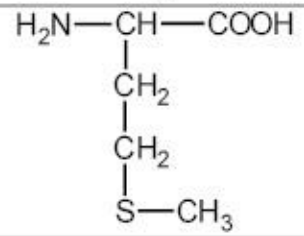
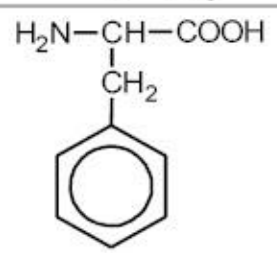
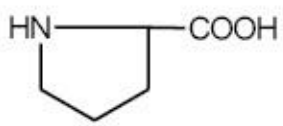
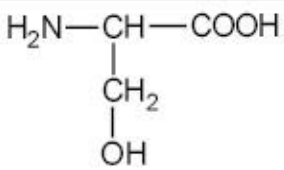
Pierwsza pozycja	Druga pozycja				Trzecia pozycja
	U	C	A	G	
U	UUU fenyloalanina UUC fenyloalanina UUA leucyna UUG leucyna	UCU seryna UCC seryna UCA seryna UCG seryna	UAU tyrozyna UAC tyrozyna UAA *STOP* UAG *STOP*	UGU cysteina UGC cysteina UGA *STOP* UGG tryptofan	U C A G
C	CUU leucyna CUC leucyna CUA leucyna CUG leucyna	CCU prolina CCC prolina CCA prolina CCG prolina	CAU histydyna CAC histydyna CAA glutamina CAG glutamina	CGU arginina CGC arginina CGA arginina CGG arginina	U C A G
A	AUU izoleucyna AUC izoleucyna AUA izoleucyna AUG metionina, *START*	ACU treonina ACC treonina ACA treonina ACG treonina	AAU asparagina AAC asparagina AAA lizyna AAG lizyna	AGU seryna AGC seryna AGA arginina AGG arginina	U C A G
G	GUU walina GUC walina GUA walina GUG walina	GCU alanina GCC alanina GCA alanina GCG alanina	GAU kw. asparaginowy GAC kw. Asparaginowy GAA kw. glutaminowy GAG kw. glutaminowy	GGU glicyna GGC glicyna GGA glicyna GGG glicyna	U C A G

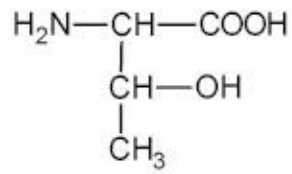
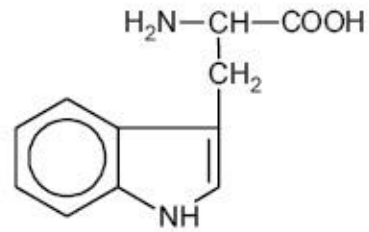
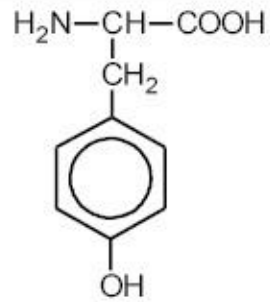
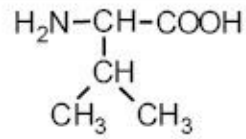
WYBRANE AMINOKWASY BIAŁKOWE

Nazwa aminokwasu	Wzór	Kod	pI
Alanina		Ala	6,00
Arginina		Arg	10,76
Asparagina		Asn	5,41
Kwas asparaginowy		Asp	2,77
Cysteina		Cys	5,07
Glicyna		Gly	5,97

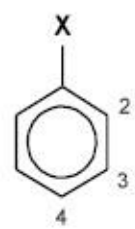
Nazwa aminokwasu	Wzór	Kod	pI
Glutamina		Gln	5,65
Kwas glutaminowy		Glu	3,22
Histydyna		His	7,59
Izoleucyna		Ile	6,02
Leucyna		Leu	5,98

WYBRANE AMINOKWASY BIAŁKOWE – CD.

Nazwa aminokwasu	Wzór	Kod	pI
Lizyna		Lys	9,74
Metionina		Met	5,74
Fenyloalanina		Phe	5,48
Prolina		Pro	6,30
Seryna		Ser	5,68

Nazwa aminokwasu	Wzór	Kod	pI
Treonina		Thr	5,60
Tryptofan		Trp	5,89
Tyrozyna		Tyr	5,66
Walina		Val	5,96

WPŁYW KIERUJĄCY PODSTAWNIKÓW W PIERŚCIENIU AROMATYCZNYM

	Podstawniki **X** kierujące w położenie 2- lub 4-	Podstawniki **X** kierujące w położenie 3-
	–OH albo –O⁻ albo –OR $-NH_2$ albo –NHR albo $-NR_2$ –NHCOR –R, $-C_6H_5$ –Cl, –Br, –I	–CHO, –COR –COOH albo –COOR –CN $-NO_2$ $-NH_3^+$ albo $-NR_3^+$ $-SO_3H$
R – grupa alkilowa		

STAŁE DYSOCJACJI DLA GRUP FUNKCYJNYCH AMINOKWASÓW W TEMPERATURZE 25 °C

Skrót	Nazwa aminokwasu	dla grupy karboksylowej				dla sprotonowanej grupy aminowej				dla innych grup	
		przy atomie C_α		dodatkowej		przy atomie C_α		dodatkowej			
		K_a	pK_a	K_a	pK_a	K_a	pK_a	K_a	pK_a	K_a	pK_a
Ala	alanina	$4{,}68 \cdot 10^{-3}$	2,33	–	–	$1{,}95 \cdot 10^{-10}$	9,71	–	–	–	–
Arg	arginina	$9{,}33 \cdot 10^{-3}$	2,03	–	–	$1{,}00 \cdot 10^{-9}$	9,00	$7{,}94 \cdot 10^{-13}$	12,10	–	–
Asn	asparagina	$6{,}92 \cdot 10^{-3}$	2,16	–	–	$1{,}86 \cdot 10^{-9}$	8,73	–	–	–	–
Asp	kwas asparaginowy	$1{,}12 \cdot 10^{-2}$	1,95	$1{,}95 \cdot 10^{-4}$	3,71	$2{,}19 \cdot 10^{-10}$	9,66	–	–	–	–
Cys	cysteina	$1{,}23 \cdot 10^{-2}$	1,91	–	–	$5{,}25 \cdot 10^{-11}$	10,28	–	–	$7{,}24 \cdot 10^{-9}$	8,14 (–SH)
Gln	glutamina	$6{,}61 \cdot 10^{-3}$	2,18	–	–	$1{,}00 \cdot 10^{-9}$	9,00	–	–	–	–
Glu	kwas glutaminowy	$6{,}92 \cdot 10^{-3}$	2,16	$7{,}08 \cdot 10^{-5}$	4,15	$2{,}63 \cdot 10^{-10}$	9,58	–	–	–	–
Gly	glicyna	$4{,}57 \cdot 10^{-3}$	2,34	–	–	$2{,}63 \cdot 10^{-10}$	9,58	–	–	–	–
His	histydyna	$2{,}00 \cdot 10^{-2}$	1,70	–	–	$8{,}13 \cdot 10^{-10}$	9,09	$9{,}12 \cdot 10^{-7}$	6,04	–	–
Ile	izoleucyna	$5{,}50 \cdot 10^{-3}$	2,26	–	–	$2{,}51 \cdot 10^{-10}$	9,60	–	–	–	–
Leu	leucyna	$4{,}79 \cdot 10^{-3}$	2,32	–	–	$2{,}63 \cdot 10^{-10}$	9,58	–	–	–	–
Lys	lizyna	$7{,}08 \cdot 10^{-3}$	2,15	–	–	$6{,}92 \cdot 10^{-10}$	9,16	$2{,}14 \cdot 10^{-11}$	10,67	–	–
Met	metionina	$6{,}92 \cdot 10^{-3}$	2,16	–	–	$8{,}32 \cdot 10^{-10}$	9,08	–	–	–	–
Phe	fenyloalanina	$6{,}61 \cdot 10^{-3}$	2,18	–	–	$8{,}13 \cdot 10^{-10}$	9,09	–	–	–	–
Pro	prolina	$1{,}12 \cdot 10^{-2}$	1,95	–	–	$3{,}39 \cdot 10^{-11}$	10,47	–	–	–	–
Ser	seryna	$7{,}41 \cdot 10^{-3}$	2,13	–	–	$8{,}91 \cdot 10^{-10}$	9,05	–	–	–	–
Thr	treonina	$6{,}31 \cdot 10^{-3}$	2,20	–	–	$1{,}10 \cdot 10^{-9}$	8,96	–	–	–	–
Trp	tryptofan	$4{,}17 \cdot 10^{-3}$	2,38	–	–	$4{,}57 \cdot 10^{-10}$	9,34	–	–	–	–
Tyr	tyrozyna	$5{,}75 \cdot 10^{-3}$	2,24	–	–	$9{,}12 \cdot 10^{-10}$	9,04	–	–	$7{,}94 \cdot 10^{-11}$	10,10 (–OH)
Val	walina	$5{,}37 \cdot 10^{-3}$	2,27	–	–	$3{,}02 \cdot 10^{-10}$	9,52	–	–	–	–

WARTOŚCI STAŁEJ DYSOCJACJI WYBRANYCH KWASÓW I ZASAD W TEMPERATURZE 25 °C

Kwasy nieorganiczne

Wzór kwasu	Nazwa	Etap	K_a	pK_a
HF	kwas fluorowodorowy		$6{,}31 \cdot 10^{-4}$	3,20
HCl	kwas chlorowodorowy		10^{7}	–7,0
HBr	kwas bromowodorowy		10^{9}	–9,0
HI	kwas jodowodorowy		10^{10}	–10,0
H_2S	kwas siarkowodorowy	1 2	$8{,}91 \cdot 10^{-8}$ 10^{-19}	7,05 19,0
H_2Se	kwas selenowodorowy	1 2	$1{,}29 \cdot 10^{-4}$ 10^{-11}	3,89 11,0
H_2Te	kwas tellurowodorowy	1 2	$1{,}51 \cdot 10^{-3}$ 10^{-11}	2,6 11,0
HClO	kwas chlorowy(I)		$3{,}98 \cdot 10^{-8}$	7,40
$HClO_2$	kwas chlorowy(III)		$1{,}15 \cdot 10^{-2}$	1,94
HNO_2	kwas azotowy(III)		$5{,}62 \cdot 10^{-4}$	3,25
H_2SO_3	kwas siarkowy(IV)	1 2	$1{,}41 \cdot 10^{-2}$ $6{,}31 \cdot 10^{-8}$	1,85 7,20
H_2SO_4	kwas siarkowy(VI)	2	$1{,}02 \cdot 10^{-2}$	1,99
H_3BO_3	kwas borowy	1 2	$5{,}37 \cdot 10^{-10}$ 10^{-14}	9,27 14,0
H_3AsO_4	kwas ortoarsenowy(V)	1 2 3	$5{,}50 \cdot 10^{-3}$ $1{,}74 \cdot 10^{-7}$ $5{,}13 \cdot 10^{-12}$	2,26 6,76 11,29
H_3PO_4	kwas ortofosforowy(V)	1 2 3	$6{,}92 \cdot 10^{-3}$ $6{,}17 \cdot 10^{-8}$ $4{,}79 \cdot 10^{-13}$	2,16 7,21 12,32
H_4SiO_4	kwas ortokrzemowy	1 2 3 4	$1{,}26 \cdot 10^{-10}$ $1{,}58 \cdot 10^{-12}$ 10^{-12} 10^{-12}	9,9 11,8 12,0 12,0
H_2CO_3	kwas węglowy	1 2	$4{,}47 \cdot 10^{-7}$ $4{,}68 \cdot 10^{-11}$	6,35 10,33
Kwasy organiczne				
$H_2C_2O_4$	kwas szczawiowy	1 2	$5{,}62 \cdot 10^{-2}$ $1{,}55 \cdot 10^{-4}$	1,25 3,81

Kwasy organiczne – cd.

Wzór kwasu	Nazwa	K_a	pK_a
HCOOH	kwas mrówkowy	$1{,}78 \cdot 10^{-4}$	3,75
CH_3COOH	kwas octowy	$1{,}75 \cdot 10^{-5}$	4,756
CH_3CH_2COOH	kwas propanowy	$1{,}35 \cdot 10^{-5}$	4,87
C_6H_5COOH	kwas benzoesowy	$6{,}25 \cdot 10^{-5}$	4,20
C_6H_5OH	fenol	$1{,}02 \cdot 10^{-10}$	9,99

Zasady

Wzór zasady	Nazwa	K_b	pK_b
NH_3	amoniak	$1{,}78 \cdot 10^{-5}$	4,75
CH_3NH_2	metanoamina	$4{,}57 \cdot 10^{-4}$	3,34
$CH_3CH_2NH_2$	etanoamina	$4{,}47 \cdot 10^{-4}$	3,35
$CH_3CH_2CH_2NH_2$	propano-1-amina	$3{,}47 \cdot 10^{-4}$	3,46
$(CH_3)_2NH$	*N*-metylometanoamina	$5{,}37 \cdot 10^{-4}$	3,27
$(CH_3)_3N$	*N,N*-dimetylometanoamina	$6{,}31 \cdot 10^{-5}$	4,20
$C_6H_5NH_2$	anilina	$7{,}41 \cdot 10^{-10}$	9,13

ŚREDNIE DŁUGOŚCI WIĄZAŃ W CZĄSTECZKACH W FAZIE GAZOWEJ

Wiązania pojedyncze		Wiązania wielokrotne	
Wiązanie	Długość, pm	Wiązanie	Długość, pm
Br–Br	228	C=C	134
C–C	153	C=O	121
Cl–Cl	199	N=O	118
H–H	74	O=O	121
I–I	267	S=O	148
O–H	96	N≡N	113
H–F	92	C≡C	120
H–Cl	128	C≡N	116
H–Br	141		
H–I	161		
C–O	142		
N–O	143		

WARTOŚCI ILOCZYNU ROZPUSZCZALNOŚCI WYBRANYCH SUBSTANCJI W TEMPERATURZE 25 °C

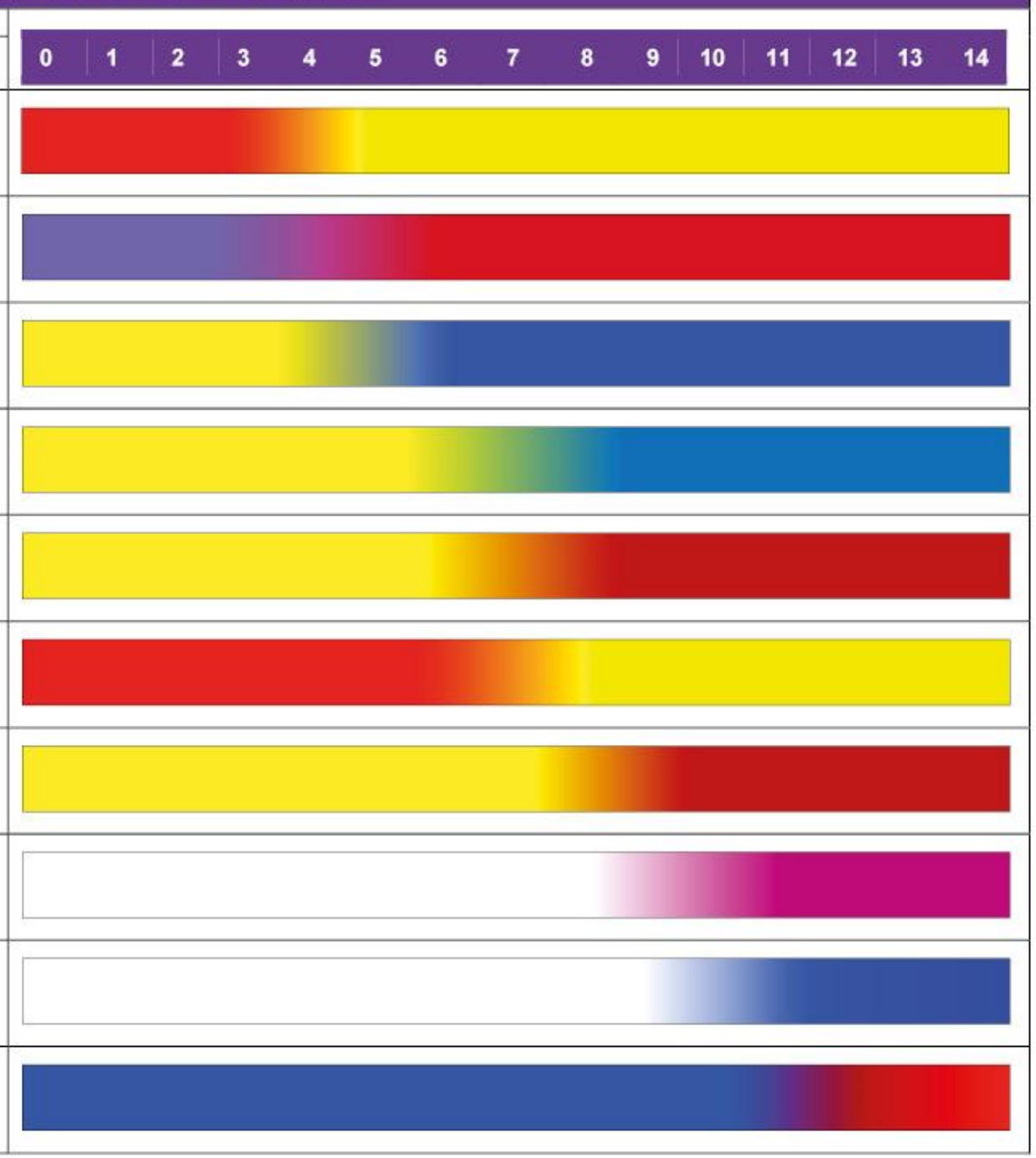
Wzór	Nazwa	K_s	pK_s
AgBr	bromek srebra(I)	$5{,}35 \cdot 10^{-13}$	12,27
AgCl	chlorek srebra(I)	$1{,}77 \cdot 10^{-10}$	9,75
AgI	jodek srebra(I)	$8{,}52 \cdot 10^{-17}$	16,07
Ag_3PO_4	fosforan(V) srebra(I)	$8{,}89 \cdot 10^{-17}$	16,05
Ag_2SO_4	siarczan(VI) srebra(I)	$1{,}20 \cdot 10^{-5}$	4,92
$AlPO_4$	fosforan(V) glinu	$9{,}84 \cdot 10^{-21}$	20,0
$BaCO_3$	węglan baru	$2{,}58 \cdot 10^{-9}$	8,59
$BaCrO_4$	chromian(VI) baru	$1{,}17 \cdot 10^{-10}$	9,93
BaF_2	fluorek baru	$1{,}84 \cdot 10^{-7}$	6,74
$Ba(OH)_2$	wodorotlenek baru	$2{,}55 \cdot 10^{-4}$	3,59
$BaSO_4$	siarczan(VI) baru	$1{,}08 \cdot 10^{-10}$	9,97
$CaCO_3$	węglan wapnia	$3{,}36 \cdot 10^{-9}$	8,47
CaF_2	fluorek wapnia	$3{,}45 \cdot 10^{-11}$	10,46
$Ca(OH)_2$	wodorotlenek wapnia	$5{,}02 \cdot 10^{-6}$	5,30
$Ca_3(PO_4)_2$	fosforan(V) wapnia	$2{,}07 \cdot 10^{-33}$	32,68
$CaSO_4$	siarczan(VI) wapnia	$4{,}93 \cdot 10^{-5}$	4,31
CuBr	bromek miedzi(I)	$6{,}27 \cdot 10^{-9}$	8,20
$Cu_3(PO_4)_2$	fosforan(V) miedzi(II)	$1{,}40 \cdot 10^{-37}$	36,85
$FeCO_3$	węglan żelaza(II)	$3{,}13 \cdot 10^{-11}$	10,50
$Fe(OH)_2$	wodorotlenek żelaza(II)	$4{,}87 \cdot 10^{-17}$	16,31
$Fe(OH)_3$	wodorotlenek żelaza(III)	$2{,}79 \cdot 10^{-39}$	38,55
$FePO_4$	fosforan(V) żelaza(III)	$9{,}91 \cdot 10^{-16}$	15,00
$KClO_4$	chloran(VII) potasu	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	1,98
$MgCO_3$	węglan magnezu	$6{,}82 \cdot 10^{-6}$	5,17
MgF_2	fluorek magnezu	$5{,}16 \cdot 10^{-11}$	10,29
$Mg(OH)_2$	wodorotlenek magnezu	$5{,}61 \cdot 10^{-12}$	11,25
$Mg_3(PO_4)_2$	fosforan(V) magnezu	$1{,}04 \cdot 10^{-24}$	23,98
$PbCl_2$	chlorek ołowiu(II)	$1{,}70 \cdot 10^{-5}$	4,77
PbI_2	jodek ołowiu(II)	$9{,}8 \cdot 10^{-9}$	8,01
$PbSO_4$	siarczan(VI) ołowiu(II)	$2{,}53 \cdot 10^{-8}$	7,60
$Zn(OH)_2$	wodorotlenek cynku	$3{,}00 \cdot 10^{-17}$	16,52
$ZnCO_3$	węglan cynku	$1{,}46 \cdot 10^{-10}$	9,84

TABELA WARTOŚCI LOGARYTMÓW DZIESIĘTNYCH

x	$\log x$	x	$\log x$	x	$\log x$	x	$\log x$
0,01	–2,000	**0,26**	–0,585	**0,51**	–0,292	**0,76**	–0,119
0,02	–1,699	**0,27**	–0,569	**0,52**	–0,284	**0,77**	–0,114
0,03	–1,523	**0,28**	–0,553	**0,53**	–0,276	**0,78**	–0,108
0,04	–1,398	**0,29**	–0,538	**0,54**	–0,268	**0,79**	–0,102
0,05	–1,301	**0,30**	–0,523	**0,55**	–0,260	**0,80**	–0,097
0,06	–1,222	**0,31**	–0,509	**0,56**	–0,252	**0,81**	–0,092
0,07	–1,155	**0,32**	–0,495	**0,57**	–0,244	**0,82**	–0,086
0,08	–1,097	**0,33**	–0,481	**0,58**	–0,237	**0,83**	–0,081
0,09	–1,046	**0,34**	–0,469	**0,59**	–0,229	**0,84**	–0,076
0,10	–1,000	**0,35**	–0,456	**0,60**	–0,222	**0,85**	–0,071
0,11	–0,959	**0,36**	–0,444	**0,61**	–0,215	**0,86**	–0,066
0,12	–0,921	**0,37**	–0,432	**0,62**	–0,208	**0,87**	–0,060
0,13	–0,886	**0,38**	–0,420	**0,63**	–0,201	**0,88**	–0,056
0,14	–0,854	**0,39**	–0,409	**0,64**	–0,194	**0,89**	–0,051
0,15	–0,824	**0,40**	–0,398	**0,65**	–0,187	**0,90**	–0,046
0,16	–0,796	**0,41**	–0,387	**0,66**	–0,180	**0,91**	–0,041
0,17	–0,770	**0,42**	–0,377	**0,67**	–0,174	**0,92**	–0,036
0,18	–0,745	**0,43**	–0,367	**0,68**	–0,167	**0,93**	–0,032
0,19	–0,721	**0,44**	–0,357	**0,69**	–0,161	**0,94**	–0,027
0,20	–0,699	**0,45**	–0,347	**0,70**	–0,155	**0,95**	–0,022
0,21	–0,678	**0,46**	–0,337	**0,71**	–0,149	**0,96**	–0,018
0,22	–0,658	**0,47**	–0,328	**0,72**	–0,143	**0,97**	–0,013
0,23	–0,638	**0,48**	–0,319	**0,73**	–0,137	**0,98**	–0,009
0,24	–0,620	**0,49**	–0,310	**0,74**	–0,131	**0,99**	–0,004
0,25	–0,602	**0,50**	–0,301	**0,75**	–0,125	**1,00**	0,000

WYBRANE WSKAŹNIKI KWASOWO-ZASADOWE

Wskaźnik	Zakres pH zmiany barwy	Barwa w roztworze wodnym	
		forma kwasowa	forma zasadowa
oranż metylowy	3,1 – 4,4	czerwona	żółta
czerwień Kongo	3,0 – 5,0	niebieskofioletowa	czerwona
zieleń bromokrezolowa	4,0 – 5,6	żółta	niebieska
błękit bromotymolowy	6,0 – 7,6	żółta	niebieska
czerwień fenolowa	6,4 – 8,0	żółta	czerwona
czerwień obojętna	6,8 – 8,0	czerwona	żółta
czerwień krezolowa	7,2 – 8,8	żółta	czerwona
fenoloftaleina	8,0 – 10,0	bezbarwna	różowoczerwona
tymoloftaleina	9,4 – 10,6	bezbarwna	niebieska
błękit Nilu	10,1 – 11,1	niebieska	czerwona



POTENCJAŁ STANDARDOWY REDUKCJI	
Równanie reakcji	***E*°, V**
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	0,800
$AgBr + e \rightleftharpoons Ag + Br^-$	0,071
$AgCl + e \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	0,222
$Au^{3+} + 3e \rightleftharpoons Au$	1,498
$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$	–1,676
$Al(OH)_4^- + 3e \rightleftharpoons Al + 4OH^-$	–2,300
$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba$	–2,912
$Be^{2+} + 2e \rightleftharpoons Be$	–1,847
$Bi^{3+} + 3e \rightleftharpoons Bi$	0,308
$Br_2(c) + 2e \rightleftharpoons 2\,Br^-$	1,066
$BrO_3^- + 6H^+ + 6e \rightleftharpoons Br^- + 3H_2O$	1,423
$BrO_3^- + 3H_2O + 6e \rightleftharpoons Br^- + 6OH^-$	0,610
$CO_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HCOOH$	–0,199
$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$	–2,868
$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd$	–0,403
$Cd(OH)_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Cd + 4OH^-$	–0,658
$Cl_2(g) + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	1,358
$ClO_3^- + 6H^+ + 6e \rightleftharpoons Cl^- + 3H_2O$	1,451
$ClO_3^- + 3H_2O + 6e \rightleftharpoons Cl^- + 6OH^-$	0,620
$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co$	–0,280
$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	1,920
$Cr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cr$	–0,913
$Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$	–0,407
$Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr$	–0,744
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1,360
$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e \rightleftharpoons Cr(OH)_3 + 5OH^-$	–0,130
$Cs^+ + e \rightleftharpoons Cs$	–3,026
$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$	0,342
$Cu_2O + H_2O + 2e \rightleftharpoons 2Cu + 2OH^-$	–0,360
$2Cu(OH)_2 + 2e \rightleftharpoons Cu_2O + 2OH^- + H_2O$	–0,080
$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	2,866
$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe$	–0,447
$Fe^{3+} + 3e \rightleftharpoons Fe$	–0,037
$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0,771

POTENCJAŁ STANDARDOWY REDUKCJI – CD.	
Równanie reakcji	***E*°, V**
$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2$	0,000
$2H_2O + 2e \rightleftharpoons H_2 + 2OH^-$	–0,828
$Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg$	0,851
$I_2 + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0,536
$IO_3^- + 6H^+ + 6e \rightleftharpoons I^- + 3H_2O$	1,085
$K^+ + e \rightleftharpoons K$	–2,931
$Li^+ + e \rightleftharpoons Li$	–3,040
$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	–2,372
$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$	–1,185
$MnO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	1,224
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	0,558
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	1,507
$MnO_4^- + 2H_2O + 3e \rightleftharpoons MnO_2 + 4OH^-$	0,595
$MnO_4^{2-} + 2H_2O + 2e \rightleftharpoons MnO_2 + 4OH^-$	0,600
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	0,957
$2NO_3^- + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons N_2O_4 + 2H_2O$	0,803
$Na^+ + e \rightleftharpoons Na$	–2,710
$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni$	–0,257
$O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	0,695
$O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	1,229
$O_2 + 2H_2O + 4e \rightleftharpoons 4OH^-$	0,401
$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb$	–0,126
$PbO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2\,H_2O$	1,455
$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H_2O$	1,691
$PbSO_4 + 2e \rightleftharpoons Pb + SO_4^{2-}$	–0,359
$Pt^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pt$	1,180
$Rb^+ + e \rightleftharpoons Rb$	–2,980
$S + 2e \rightleftharpoons S^{2-}$	–0,476
$SO_4^{2-} + H_2O + 2e \rightleftharpoons SO_3^{2-} + 2OH^-$	–0,930
$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn$	–0,138
$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	0,151
$Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr$	–2,899
$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$	–0,762
$Zn(OH)_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Zn + 4OH^-$	–1,199

WARTOŚCI STANDARDOWEJ MOLOWEJ ENTALPII TWORZENIA	
Wzór związku	ΔH_t^0, **kJ · mol⁻¹**
$Al_2O_3(s)$	–1675,7
$CO(g)$	–110,5
$CO_2(g)$	–393,5
$CaC_2(s)$	–62,8
$CaO(s)$	–634,9
$Ca(OH)_2(s)$	–985,9
$Cr_2O_3(s)$	–1140,6
$FeO(s)$	–266,5
$Fe_2O_3(s)$	–822,1
$FeS(s)$	–95,1
$HBr(g)$	–36,3
$HCl(g)$	–92,3
$HF(g)$	–273,3
$HI(g)$	26,5
$H_2O(c)$	–285,8
$H_2O(g)$	–241,8
$H_2S(g)$	–20,6
$MgO(s)$	–601,6
$MnO_2(s)$	–521,9
$NH_3(g)$	–45,9
$NO(g)$	91,3
$NO_2(g)$	34,2
$NaCl(s)$	– 411,3
$SiO_2(s)$	– 910,7

Objętość 1 mola gazu doskonałego w warunkach normalnych t = 0 °C oraz p = 1013,25 hPa	$V = 22{,}41\ dm^3 \cdot mol^{-1}$
Stała Faradaya	$F = N_A \cdot e \quad F \approx 9{,}6485 \cdot 10^4\ C \cdot mol^{-1}$

WARTOŚCI STANDARDOWEJ MOLOWEJ ENTALPII SPALANIA	
Nazwa związku	ΔH_s^0, **kJ · mol⁻¹**
benzen(c)	–3268,4
butan(g)	–2877,6
etan(g)	–1560,5
etanol(c)	–1357,2
eten(g)	–1411,1
etyn(g)	–1300,3
glicerol(c)	–1655,4
glukoza(s)	–2802,7
heksan(c)	–4163,2
kwas benzoesowy(s)	–3226,9
kwas etanowy(c)	–868,8
kwas stearynowy(s)	–11280,0
metan(g)	–890,6
metanol(c)	–726,3
pentan(c)	–3509,0
propan(g)	–2219,2
sacharoza(s)	–5640,2
toluen(c)	–3910,3

Logarytmem $\log_a c$ dodatniej liczby c przy podstawie a ($a > 0$ i $a \neq 1$) nazywamy wykładnik b potęgi, do której należy podnieść podstawę a, aby otrzymać liczbę c:

$\log_a c = b$ wtedy i tylko wtedy, gdy $a^b = c$

$\log x$ oraz $\lg x$ oznaczają $\log_{10} x$

Dla $x > 0$, $y > 0$ i $a > 0$ oraz $a \neq 0$ prawdziwa jest równość:

$$\log_a (x \cdot y) = \log_a x + \log_a y$$

Równanie kwadratowe $ax^2 + bx + c = 0$, gdzie $a \neq 0$, ma rozwiązania rzeczywiste wtedy i tylko wtedy, gdy $\Delta = b^2 - 4ac \geq 0$. Rozwiązania te wyrażają się wzorami:

$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}, \quad x_2 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}$$

Rozpuszczalność soli i wodorotlenków w wodzie w temperaturze 25 °C, g/(100 g H_2O)

Jon	Cl^-	Br^-	I^-	NO_3^-	CH_3COO^-	S^{2-}	SO_3^{2-}	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	CrO_4^{2-}	PO_4^{3-}	OH^-
Ag^+	T	T	T	R (235)	S (1,0)$^{20\,°C}$	T	T	S (0,8)	T	T	T	T → d
Al^{3+}	R (45,1)	R → d	R → d	R (68,9)	d	d	—	R (38,5)	—	T	T	T
Ba^{2+}	R (37,0)	R (100)	R (221)	R (10,3)	R (79,2)	R → d	T	T	T	T	T	R (4,9)
Ca^{2+}	R (81,3)	R (156)	R (216)	R (144)	R (34,7)	T → d	T	S (0,2)	T	S (2,0)	T	S (0,2)
Cr^{3+}	R	R	R	R (81,2)	R	T → d	—	R (64)	—	T	T	T
Cu^{2+}	R (75,8)	R (126)	—	R (145)	R (6,8)	T	T	R (22)	T → d	T	T	T
Fe^{2+}	R (65,0)	R (120)	R	R (87,2)	R	T	T	R (29,5)	T	—	T	T
Fe^{3+}	R (91,2)	R (455)	d	R (87,5)	—	d	—	R (440)	—	T	T	T
K^+	R (35,5)	R (67,8)	R (148)	R (38,3)	R (269)	R → d	R (106)	R (12,0)	R (111)	R (65,0)	R (106)	R (121)
Mg^{2+}	R (56,0)	R (102)	R (146)	R (71,2)	R (65,6)	d	S (0,5)	R (35,7)	T	R (54,8)	T	T
Mn^{2+}	R (77,3)	R (151)	R → d	R (161)	R (49)	T	T	R (63,7)	T	T	T	T
NH_4^+	R (39,6)	R (78,3)	R (178)	R (213)	R (148)	d	R (64,2)	R (76,4)	R → d	R (37,4)	R (18,3)	R (44,9)
Na^+	R (35,9)	R (94,6)	R (184)	R (91,2)	R (50,5)	R (20,6)	R (30,7)	R (28,1)	R (30,7)	R (87,6)	R (14,4)	R (100)
Pb^{2+}	S (1,1)	S (1,0)	S (0,1)	R (59,7)	R (44,3)	T	T	T	T	T	T	T
Sn^{2+}	R (178)$^{10\,°C}$	R (85)$^{0\,°C}$	S (0,98)	R → d	—	T	—	R (18,8)	—	—	T	T
Zn^{2+}	R (408)	R (488)	R (438)	R (120)	R (30,0)	T	S (0,2)	R (57,7)	T	R (3,1)	T	T

R – substancja dobrze rozpuszczalna (>2 g/100 g H_2O); **S** – substancja średnio rozpuszczalna (0,1 g–2 g/100 g H_2O);
T – substancja trudno rozpuszczalna (<0,1 g/100 g H_2O); **d** – związek ulega rozkładowi w wodzie, (—) związek jest nietrwały, nie został otrzymany lub brak jest danych

Na podstawie: *CRC Handbook of Chemistry and Physics 97th Edition*, CRC Press 2017.

UKŁAD OKRESOWY PIERWIASTKÓW

Liczba atomowa (liczba porządkowa) — Symbol pierwiastka — Nazwa — Masa atomowa, u — Elektroujemność w skali Paulinga

1												13	14	15	16	17	18
1H Wodór 1,008 2,2	2																2He Hel 4,00
3Li Lit 6,94 1,0	4Be Beryl 9,01 1,6											5B Bor 10,81 2,0	6C Węgiel 12,01 2,6	7N Azot 14,01 3,0	8O Tlen 16,00 3,4	9F Fluor 19,00 4,0	10Ne Neon 20,18
11Na Sód 23,00 0,9	12Mg Magnez 24,31 1,3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13Al Glin 26,98 1,6	14Si Krzem 28,09 1,9	15P Fosfor 30,97 2,2	16S Siarka 32,06 2,6	17Cl Chlor 35,45 3,2	18Ar Argon 39,95
19K Potas 39,10 0,8	20Ca Wapń 40,08 1,0	21Sc Skand 44,96 1,4	22Ti Tytan 47,87 1,5	23V Wanad 50,94 1,6	24Cr Chrom 52,00 1,7	25Mn Mangan 54,94 1,6	26Fe Żelazo 55,85 1,8	27Co Kobalt 58,93 1,9	28Ni Nikiel 58,69 1,9	29Cu Miedź 63,55 1,9	30Zn Cynk 65,38 1,7	31Ga Gal 69,72 1,8	32Ge German 72,63 2,0	33As Arsen 74,92 2,0	34Se Selen 78,96 2,6	35Br Brom 79,90 3,0	36Kr Krypton 83,80
37Rb Rubid 85,47 0,8	38Sr Stront 87,62 1,0	39Y Itr 88,91 1,2	40Zr Cyrkon 91,22 1,3	41Nb Niob 92,91 1,6	42Mo Molibden 95,95 2,2	43Tc Technet [97,91] 2,1	44Ru Ruten 101,07 2,2	45Rh Rod 102,91 2,3	46Pd Pallad 106,42 2,2	47Ag Srebro 107,87 1,9	48Cd Kadm 112,41 1,7	49In Ind 114,82 1,8	50Sn Cyna 118,71 2,0	51Sb Antymon 121,76 2,1	52Te Tellur 127,60 2,1	53I Jod 126,90 2,7	54Xe Ksenon 131,29
55Cs Cez 132,91 0,8	56Ba Bar 137,33 0,9	57La* Lantan 138,91 1,1	72Hf Hafn 178,49 1,3	73Ta Tantal 180,95 1,5	74W Wolfram 183,84 1,7	75Re Ren 186,21 1,9	76Os Osm 190,23 2,2	77Ir Iryd 192,22 2,2	78Pt Platyna 195,08 2,2	79Au Złoto 196,97 2,4	80Hg Rtęć 200,59 1,9	81Tl Tal 204,38 1,8	82Pb Ołów 207,2 1,8	83Bi Bizmut 208,98 1,9	84Po Polon [208,98] 2,0	85At Astat [209,99] 2,2	86Rn Radon [222,02]
87Fr Frans [223,02] 0,7	88Ra Rad [226,03] 0,9	89Ac** Aktyn [227,03]	104Rf Rutherford [267,12]	105Db Dubn [268,13]	106Sg Seaborg [271,13]	107Bh Bohr [272,14]	108Hs Has [270,13]	109Mt Meitner [276,15]	110Ds Darmsztadt [281,17]	111Rg Roentgen [280,17]	112Cn Kopernik [285,18]	113Nh Nihon [284,18]	114Fl Flerow [289,19]	115Mc Moskow [288,19]	116Lv Liwermor [293,20]	117Ts Tenes [292,21]	118Og Oganeson [294,21]

*	58Ce Cer 140,12	59Pr Prazeodym 140,91	60Nd Neodym 144,24	61Pm Promet [144,91]	62Sm Samar 150,36	63Eu Europ 151,96	64Gd Gadolin 157,25	65Tb Terb 158,93	66Dy Dysproz 162,50	67Ho Holm 164,93	68Er Erb 167,26	69Tm Tul 168,93	70Yb Iterb 173,04	71Lu Lutet 174,97
**	90Th Tor 232,04	91Pa Protaktyn 231,04	92U Uran 238,03	93Np Neptun [237,05]	94Pu Pluton [244,06]	95Am Ameryk [243,06]	96Cm Kiur [247,07]	97Bk Berkel [247,07]	98Cf Kaliforn [251,08]	99Es Einstein [252,08]	100Fm Ferm [257,10]	101Md Mendelew [258,10]	102No Nobel [259,10]	103Lr Lorens [262,11]

METALE

PÓŁMETALE

NIEMETALE

GAZY SZLACHETNE

Dla pierwiastków promieniotwórczych, które nie mają stabilnych izotopów, podano masę atomową najtrwalszego izotopu.

Na podstawie: *CRC Handbook of Chemistry and Physics 97th Edition*, CRC Press 2017
oraz https://www.nist.gov/pml/atomic-weights-and-isotopic-compositions-relative-atomic-masses

W poniższym zestawie przedstawiono wybrane wzory oraz stałe fizyczne. Przy każdym wzorze zapisano nazwę wielkości lub prawa albo zjawiska, którego wzór dotyczy. Symboli wszystkich wielkości występujących we wzorach nie opisano – przyjęto dla nich powszechnie używane oznaczenia. Podobnie nie opisano warunków i zakresów stosowalności przedstawionych wzorów. Wartości wielkości wektorowych zapisano bez symbolu wektora.

Kinematyka

prędkość	$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$
przyśpieszenie	$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$
prędkość kątowa	$\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$
związek między wartościami prędkości kątowej i liniowej	$v = \omega r$
związki w ruchu jednostajnym po okręgu	$\omega = \frac{2\pi}{T}$; $T = \frac{1}{f}$
przyśpieszenie dośrodkowe	$a_{do} = \frac{v^2}{r} = v\omega = \omega^2 r$
przyśpieszenie kątowe	$\epsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$
przyśpieszenie styczne	$a_{st} = \epsilon r$
prędkość w ruchu jednostajnie zmiennym prostoliniowym	$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$
droga w ruchu jednostajnie zmiennym prostoliniowym	$s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$

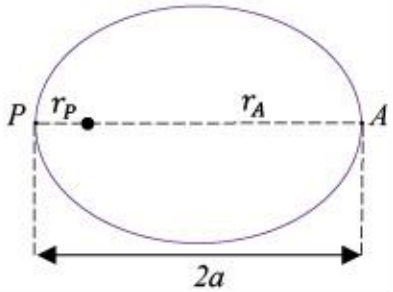
Siły tarcia i siła sprężystości

siła tarcia kinetycznego	$T_k = \mu_k F_N$
siła tarcia statycznego	$T_s \leq \mu_s F_N$
siła sprężystości	$\vec{F}_s = -k\vec{x}$
energia potencjalna sprężystości	$E_{pot} = \frac{1}{2}kx^2$

Dynamika

pęd	$\vec{p} = m\vec{v}$
II zasada dynamiki (w układzie inercjalnym)	$m\vec{a} = \vec{F}$; $\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$
wartość momentu pędu punktu materialnego	$L = rp\sin\sphericalangle(\vec{r},\vec{p})$
wartość momentu siły	$M = rF\sin\sphericalangle(\vec{r},\vec{F})$
moment bezwładności	$I = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2$
związek między wartościami prędkości kątowej i momentu pędu bryły sztywnej	$L = I\omega$
II zasada dynamiki ruchu obrotowego (zapis skalarny)	$I\epsilon = M$
praca siły, praca momentu siły	$W_F = F\Delta r\cos\sphericalangle(\vec{F},\Delta\vec{r})$ $W_M = M\Delta\alpha$
moc	$P = \frac{W}{\Delta t}$
energia kinetyczna ruchu postępowego	$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$
energia kinetyczna ruchu obrotowego	$E_{kin} = \frac{1}{2}I\omega^2$

Grawitacja i elementy astronomii

prawo powszechnego ciążenia	$F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$
natężenie pola grawitacyjnego, przyśpieszenie grawitacyjne	$\vec{\gamma} = \frac{\vec{F}_g}{m}$; $\vec{a}_g = \vec{\gamma}$
energia potencjalna grawitacji	$E_{pot} = -\frac{Gm_1m_2}{r}$
zmiana energii potencjalnej przy powierzchni Ziemi	$\Delta E_p = mg\Delta h$
prędkość na orbicie kołowej	$v_{or} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$
prędkość ucieczki	$v_u = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$
orbita eliptyczna a – półoś wielka r_P – najmniejsza odległość do centrum r_A – największa odległość do centrum	
II prawo Keplera i zachowanie momentu pędu $\vec{L}$ na orbicie (ΔS – pole zakreślone przez promień wodzący planety)	$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \text{const}$; $\vec{L} = \overrightarrow{\text{const}}$
III prawo Keplera (a jest promieniem orbity kołowej lub półosią wielką elipsy)	$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \text{const}$
prawo Hubble'a	$v = Hd$

Drgania, fale mechaniczne i świetlne

równania ruchu harmonicznego	$x(t) = A\sin(\omega t + \varphi_0)$ $v(t) = A\,\omega\cos(\omega t + \varphi_0)$ $a(t) = -A\omega^2\sin(\omega t + \varphi_0)$ $x_{max} = A \quad v_{max} = A\omega \quad a_{max} = A\omega^2$
siła harmoniczna	$\vec{F}_h = -m\omega^2\vec{x}$
częstość kołowa małych drgań masy na sprężynie i wahadła matematycznego	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}\,; \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$
całkowita energia mechaniczna oscylatora	$E = E_k + E_p = \frac{1}{2}mA^2\omega^2$
związki między parametrami ruchu fali	$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f\,; \quad T = \frac{1}{f}$
faza fali w punkcie x i chwili t	$\varphi(t) = \frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \varphi_0$
warunki maksymalnego wzmocnienia i osłabienia fali w punkcie	$\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n$ $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\left(n + \frac{1}{2}\right)$
natężenie fali, jego związek z energią E i amplitudą A fali	$I = \frac{E}{S\Delta t}\,; \quad I \sim A^2$
zależność natężenia fali kulistej od odległości	$I \sim \frac{1}{r^2}$
załamanie fali na granicy ośrodków 1 i 2	$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$

wzory przybliżone na efekt Dopplera dla fali dźwiękowej i świetlnej w kierunku prędkości źródła:

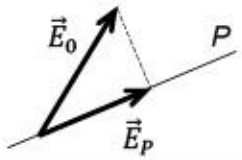
źródło oddala się	źródło zbliża się
$v_{źr} \ll v_d$ $f_{ob} \approx f_{źr}\left(1 - \frac{\lvert v_{źr} - v_{ob}\rvert}{v_d}\right)$	$v_{źr} \ll v_d$ $f_{ob} \approx f_{źr}\left(1 + \frac{\lvert v_{źr} - v_{ob}\rvert}{v_d}\right)$
$v_{źr} \ll c$ $f_{ob} \approx f_{źr}\left(1 - \frac{v_{źr}}{c}\right)$	$v_{źr} \ll c$ $f_{ob} \approx f_{źr}\left(1 + \frac{v_{źr}}{c}\right)$

Drgania, fale mechaniczne i świetlne – cd.

wzory ścisłe na efekt Dopplera dla fali dźwiękowej i świetlnej w kierunku prędkości źródła	$f_{ob} = f_{źr}\frac{v_d \mp v_{ob}}{v_d \pm v_{źr}}$ $f_{ob} = f_{źr}\sqrt{\frac{c \mp v_{źr}}{c \pm v_{źr}}}$
siatka dyfrakcyjna	$d\sin\alpha_n = n\lambda$

światło po przejściu przez polaryzator o osi polaryzacji P

amplitudy pola elektrycznego:
$\vec{E}_0$ – padającego na polaryzator
$\vec{E}_P$ – po przejściu przez polaryzator



Optyka geometryczna

kąt graniczny dla przejścia światła z ośrodka 2 do 1	$\sin\alpha_{2\,gr} = \frac{n_1}{n_2}$
warunek polaryzacji światła przy odbiciu	$\alpha_{pad1} + \alpha_{zał2} = 90°$
równanie soczewki i zwierciadła:	$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}\,; \quad x > 0$

$y > 0\,, y < 0$ – położenie obrazu rzeczywistego, pozornego
$f > 0$ – ogniskowa soczewki/zwierciadła skupiającego
$f < 0$ – ogniskowa soczewki/zwierciadła rozpraszającego

wzór na ogniskową soczewki	$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_{socz}}{n_{otocz}} - 1\right)\left(\pm\frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2}\right)$

(+)/(–) – przy promieniu powierzchni wypukłej / wklęsłej

Hydrostatyka, aerostatyka

siła parcia i ciśnienie	$F = p\Delta S, \quad \vec{F} \perp \Delta S$
zmiana ciśnienia hydro- i aerostatycznego	$\Delta p = \rho g \Delta h$
siła wyporu	$F_{wyp} = \rho V_{zan} g$

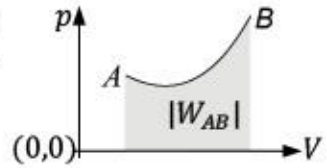
V_{zan} – objętość zanurzonej części ciała
ρ – gęstość cieczy (lub gazu)

Termodynamika

I zasada termodynamiki	$\Delta U = Q + W$
praca siły parcia, gdy p = const	$\lvert W\rvert = p\lvert\Delta V\rvert$

związek pracy siły parcia z polem pod wykresem zależności $p(V)$ – ciśnienia od objętości

$\lvert W_{AB}\rvert =$ Pole pod AB



ciepło właściwe	$c_w = \frac{Q}{m\Delta T}$
ciepło molowe	$C = \frac{Q}{n\Delta T}$
ciepło przemiany fazowej	$L = \frac{Q}{m}$
średnia energia ruchu cząsteczki gazu doskonałego	$E_{śr} = \frac{s}{2}k_BT$

s – liczba współrzędnych opisujących położenie cząsteczki w przestrzeni

równanie stanu gazu doskonałego (Clapeyrona)	$pV = nRT$
związek między ciepłami molowymi gazu doskonałego	$C_p = C_V + R$
praca i ciepło w cyklu silnika i pompy cieplnej	$0 = Q_{całk} + W_{całk}$

$Q_{całk}$ – całkowite ciepło wymienione w cyklu z otoczeniem
$W_{całk}$ – całkowita praca mechaniczna wykonana w cyklu (nad i przez otoczenie)

sprawność silnika cieplnego	$\eta = \frac{\lvert W_{całk}\rvert}{\lvert Q_{pob}\rvert} = \frac{\lvert Q_{pob}\rvert - \lvert Q_{odd}\rvert}{\lvert Q_{pob}\rvert}$

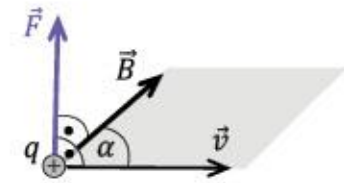
Elektrostatyka

prawo Coulomba	$F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2}$; $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$
natężenie pola elektrycznego	$\vec{E} = \frac{\vec{F_e}}{q}$
wartość natężenia na zewnątrz sferycznego rozkładu ładunku	$E = \frac{kQ}{r^2}$
napięcie pomiędzy punktami *A* i *B* pola elektrycznego	$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$ W_{AB} – praca przeciw sile elektrycznej
związek napięcia z potencjałami elektrycznymi	$U_{AB} = V_B - V_A$
energia potencjalna elektryczna układu ładunków	$E_{pot} = \frac{kq_1q_2}{r}$
związek napięcia z natężeniem w polu jednorodnym	$U = Ed$
natężenie między płytami naładowanymi różnoimiennie	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$; $\sigma = \frac{Q}{\Delta S} = \text{const}$
natężenie pola elektrycznego wewnątrz dielektryka	$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon_r}$ $\vec{E}_0$ – natężenie zewnętrzne
pojemność kondensatora	$C = \frac{Q}{U}$
pojemność kondensatora płaskiego z dielektrykiem	$C = \varepsilon_r\varepsilon_0\frac{S}{d}$
energia elektryczna kondensatora	$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}U^2C$
własności pola wewnątrz i na powierzchni bryły przewodnika	$\vec{E}_{wew} = 0$; $\vec{E}_{pow} \perp \Delta S$

Prąd elektryczny

natężenie prądu	$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
definicja oporu elektrycznego przewodnika	$R = \frac{U}{I}$
prawo Ohma (dla stałej temperatury przewodnika)	$\frac{U}{I} = \text{const}$
związek oporu R przewodnika z drutu z oporem właściwym ρ	$R = \rho\frac{l}{S}$
moc prądu stałego wydzielona na oporniku	$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$
zależność oporu metali od temperatury (w pewnym zakresie temperatur)	$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha\Delta T)$; $\Delta T = T - T_0$
dodawanie napięć pomiędzy punktami przewodnika	$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$
II prawo Kirchhoffa dla obwodu (lub oczka)	$\sum_{i=1}^{k}(\pm\mathcal{E}_i) - \sum_{j=1}^{n}(\pm U_j) = 0$
związek siły elektromotorycznej z napięciem na baterii	$\mathcal{E} = U + IR_w$
opór zastępczy oporników połączonych szeregowo	$R_z = \sum_{i=1}^{n} R_i$
opór zastępczy oporników połączonych równolegle	$\frac{1}{R_Z} = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}$

Magnetyzm

siła Lorentza, wektor indukcji magnetycznej	$F = qvB\sin\alpha$ $\alpha = \sphericalangle(\vec{v}, \vec{B})$ $\vec{F} \perp \vec{v}$ $\vec{F} \perp \vec{B}$ 
siła elektrodynamiczna	$F = I\Delta lB\sin\sphericalangle(\Delta\vec{l}, \vec{B})$
pole w próżni dookoła długiego, prostoliniowego przewodnika	$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$
pole w próżni wewnątrz długiej, gęsto nawiniętej zwojnicy	$B = \mu_0\frac{NI}{L}$
wartość momentu siły działającego na pętlę z prądem w polu mag.	$M = ISB\sin\sphericalangle(\vec{S}, \vec{B})$
strumień pola magnetycznego przez powierzchnię	$\Phi_B = BS\cos\sphericalangle(\vec{S}, \vec{B})$
siła elektromotoryczna indukcji	$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$
siła elektromotoryczna prądnicy	$\mathcal{E} = NBS\omega\sin\sphericalangle(\vec{S}, \vec{B})$ $\sphericalangle(\vec{S}, \vec{B}) = \omega t + \varphi_0$
praca prądu sinusoidalnego w czasie okresu	$W = \frac{1}{2}U_0I_0T$
napięcie i natężenie skuteczne przebiegu sinusoidalnego	$I_{sk} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ $U_{sk} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$
uproszczony model transformatora	$I_1U_1 = I_2U_2$; $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$

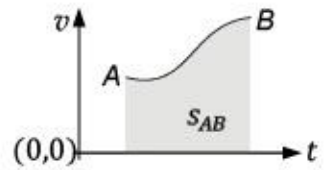
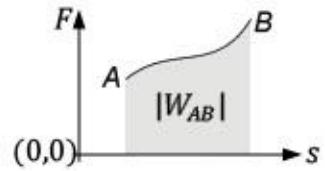
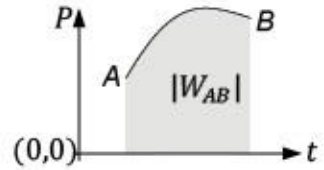
Elementy mechaniki relatywistycznej

energia całkowita ciała poruszającego się w układzie inercjalnym (t, x)	$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$; $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$
równoważność masy i energii spoczynkowej	$E_0 = mc^2$
związek między zmianą masy układu a energią pochłoniętą / emitowaną przez układ	$\Delta E = \Delta mc^2$
pęd	$p = \frac{mv}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$; $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$
niezmiennik relatywistyczny (dynamiczny)	$E_0^2 = E^2 - (cp)^2$
energia kinetyczna poruszającego się ciała	$E_{kin} = E - E_0$

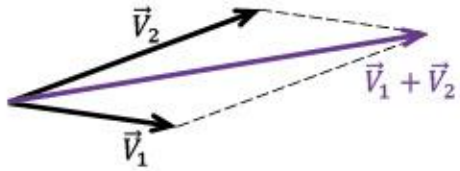
Elementy fizyki atomowej i jądrowej

prawo Wiena (b – stała Wiena)	$\lambda_{max} T = b$
prawo Stefana–Boltzmanna (moc wypromieniowana z jednostki powierzchni ciała)	$I = \sigma T^4$; $[I] = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$
energia i pęd fotonu	$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}$; $p_f = \frac{h}{\lambda}$
Zjawisko fotoelektryczne	$E_f = W_{el} + E_{kin\ el\ max}$
emisja lub absorpcja fotonu przez atom (E_m, E_n – energie elektronu w atomie)	$E_m - E_n = hf_{mn} + E_{\text{odrzutu}}$ $m > n$
poziomy energetyczne atomu wodoru	$E_n = -\frac{13{,}606\ \mathrm{eV}}{n^2}$
długość fali de Broglie'a cząstki swobodnej	$\lambda = \frac{h}{p}$
zasady zachowania (niektóre) w procesach na poziomie fundamentalnym	• zachowanie ładunku układu • zachowanie energii układu • zachowanie pędu układu • zachowanie liczby nukleonów w układzie
statystyczne prawo rozpadu promieniotwórczego	$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$

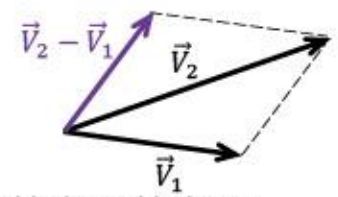
Wybrane zależności

środek masy układu n punktów materialnych	$\vec{r}_{SM} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$
związek drogi z polem pod wykresem zależności $v(t)$ – prędkości od czasu s_{AB} = Pole pod AB	
związek pracy z polem pod wykresem zależności $F(s)$ – siły od drogi $\lvert W_{AB}\rvert$ = Pole pod AB	
związek pracy z polem pod wykresem zależności $P(t)$ – mocy od czasu $\lvert W_{AB}\rvert$ = Pole pod AB	

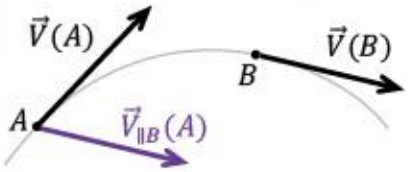
dodawanie wektorów



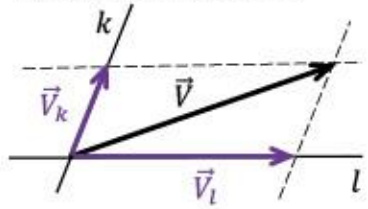
odejmowanie wektorów



przeniesienie równoległe



rozkład na składowe



Podstawowe jednostki układu SI

nazwa	metr	kilogram	sekunda	amper	kelwin	mol	kandela
symbol	m	kg	s	A	K	mol	cd
wielkość	długość	masa	czas	natężenie prądu	temperatura	liczność materii	światłość

Przedrostki jednostek miar

mnożnik	10^{24}	10^{21}	10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^{9}	10^{6}	10^{3}	10^{2}	10^{1}	10^{0}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}	10^{-21}	10^{-24}
nazwa	jotta	zetta	eksa	peta	tera	giga	mega	kilo	hekto	deka		decy	centy	mili	mikro	nano	piko	femto	atto	zepto	jokto
oznaczenie	Y	Z	E	P	T	G	M	k	ha	da		d	c	m	μ	n	p	f	a	z	y

Niektóre wartości stałych fizycznych oraz parametrów astronomicznych podano zaokrąglone z możliwie największą dokładnością – taką, aby ostatnia cyfra zaokrąglenia nie zmieniała się przy uwzględnieniu niepewności pomiaru.

Na podstawie: M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), *Physical Review* D 98, 030001 (2018) and 2019 update.

WARTOŚCI WYBRANYCH STAŁYCH FIZYCZNYCH	
prędkość światła w próżni	c = 299 792 458 m/s (wartość dokładna)
stała Plancka	h = 6,626 070 15·10^{-34} J·s (wartość dokładna)
ładunek elementarny	e = 1,602 176 634·10^{-19} C (wartość dokładna)
Stała Boltzmanna	k_B = 1,380 649·10^{-23} J/K (wartość dokładna)
Stała Avogadro	N_A = 6,022 140 76·10^{23} mol^{-1} (wartość dokładna)
uniwersalna stała gazowa	R = 8,314 462 618 2 J/(K·mol) (wartość dokładna)
stała grawitacji	G = 6,674·10^{-11} N·m^2/kg^2
przenikalność magnetyczna próżni	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2
przenikalność elektryczna próżni, stała elektryczna	ε_0 = 8,854 187 81·10^{-12} C^2/(N·m^2) $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ = 8,987 551 8 · 10^9 N · m^2/C^2
związek między c, μ_0, ε_0	$c^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}$
masa elektronu	m_e = 9,109 383 7·10^{-31} kg
masa protonu	m_p = 1,672 621 92 ·10^{-27} kg
masa neutronu	m_n = 1,674 927 49 ·10^{-27} kg
jednostka masy atomowej	1 u = 1,660 539 066 6·10^{-27} kg

WARTOŚCI WYBRANYCH STAŁYCH FIZYCZNYCH – CD.	
przyśpieszenie ziemskie (standardowe)	g = 9,806 65 m/s^2 (wartość dokładna odpowiadająca przyśpieszeniu na szerokości geograficznej ok. 45,5° na poziomie morza)
Stała Wiena	b = 2,897 771 955… ·10^{-3} m·K (wartość dokładna)
Stała Stefana-Boltzmanna	σ = 5,670 374 419…·10^{-8} W/(m^2·K^4) (wartość dokładna)

WYBRANE STAŁE I PARAMETRY ASTROFIZYCZNE	
jednostka astronomiczna	1 au = 1,49 597 870 7·10^{11} m (wartość dokładna)
parsek	1 pc = 3,085 677 581 49·10^{16} m (wartość dokładna)
rok świetlny	1 ly = 0,946 073…·10^{16} m = 0,306 601… pc
masa Słońca	M_S = 1,988·10^{30} kg
odległość Słońca od centrum galaktyki	R_0 = 27 kly
masa Ziemi	M_Z = 5,972·10^{24} kg
nominalny promień równikowy Ziemi	R_Z = 6,3781·10^6 m (wartość dokładna)
stała Hubble'a	$H_0 \approx$ 70 (km/s)/Mpc
temperatura promieniowania tła	T_0 = 2,7 K

WARTOŚCI WYBRANYCH JEDNOSTEK SPOZA UKŁADU SI		
1 eV = 1,602 176 634·10^{-19} J (wartość dokładna)		0 °C ≡ 273,15 K
1 atmosfera ≡ 101 325 Pa	1 G ≡ 10^{-4} T	1 Å = 0,1 nm

π = 3,141 592 653 589 793… (liczba pi) e = 2,718 281 828 459 045… (liczba Eulera)

Źródło: Centralna Komisja Edukacyjna, *Wybrane wzory i stałe fizykochemiczne na egzamin maturalny z biologii, chemii i fizyki*, cke.gov.pl, czerwiec 2022 r.

Indeks

A

aktywność promieniotwórcza 148
amper 83
amperomierz 83
anihilacja 147
anion 139
atom 62, 139

B

barometr 30
baza 91
bekerel 148
biały karzeł 151
biegun magnetyczny
  południowy 94
  północny 94
Big Bang 48
bryła sztywna 34

C

całkowite wewnętrzne odbicie 118
cechy obrazów
  w soczewkach 130
  w zwierciadłach 123
cewka 90
charakterystyka prądowo-napięciowa 85
ciała niebieskie 48
cień 110
ciepło 64
  Joule'a 84
  krzepnięcia 68
  parowania 68
  skraplania 68
  topnienia 68
  właściwe 64
ciśnienie 29
  atmosferyczne 30
  gazu 63
  hydrostatyczne 29
  normalne 30
cykl
  protonowo-protonowy 150
cyklotron 100
czarna dziura 151
czas
  połowicznego rozpadu 147
  swobodnego spadania 17
cząsteczka 62
częstotliwość 19
  drgań własnych układu 53
czoło fali 54

D

dalekowzroczność 134
datowanie
  izotopowe 148
  węglem 148
dawka promieniowania 148
defekt masy 147
deuter 145
diamagnetyki 96
dielektryk 79
dioda 90
  świecąca 90
dioptria 129
długość
  fali 54, 138
  fali elektromagnetycznej 111
  ogniskowej soczewki 129
domeny magnetyczne 96
doświadczenie Younga 112
drgania harmoniczne 50
drobiny 62
droga 14, 15, 18
dryf elektronów 82
dyfrakcja 56, 112
dyfuzja 62
dżul 25

E

echo 60
efekt ostrza 76
elektromagnes 99
elektryzowanie
  przez dotyk 72
  przez indukcję 73
  przez potarcie 72
emiter 91
energia
  całkowita 144
  kinetyczna 26, 37, 39
  potencjalna 26
    grawitacji 26
    sprężystości 26
  potencjalna ładunku w polu elektrostatycznym 77
  spoczynkowa 144
  wewnętrzna ciała 64
  wiązania 146
  w ruchu harmonicznym 52
  zgromadzona w kondensatorze 78

F

fala
- dźwiękowa 59
- elektromagnetyczna 111
- kolista 56
- radiowa 111
- spolaryzowana 113
- stojąca 59

fale
- cząstkowe 55
- kuliste 54
- materii (de Broglie'a) 138
- płaskie 54
- podłużne 54
- poprzeczne 54

ferromagnetyki 96
fotokomórka 137

G

gaz doskonały 62
gęstość 29
gloria 120
grej 148

H

hamulec hydrauliczny 31
herc 19

I

infradźwięki 59
interferencja 112
- fal 57

iryzacja 120
izotop 145

J

jądra
- atomowe 145
- niestabilne 145
- stabilne 145

jon
- dodatni 139
- ujemny 139

jonizacja 82

K

kation 139
kąt
- Brewstera 118
- graniczny 117
- odbicia 115
- padania 115
- załamania 56

kilowatogodzina 83
klasyfikacja ruchów 14
kolektor 91
kondensator 78, 90
- płaski 76

konwekcja (unoszenie) 64
krótkowzroczność 134
krystalografia rentgenowska 142
kwant 137

L

laser 133, 141
LED 90
liczba Avogadra 63
linie
- natężenia pola grawitacyjnego 43
- pola 74
- pola magnetycznego 96

lupa 134

Ł

ładunek próbny 74
łączenie oporników
- równoległe 87
- szeregowe 86

M

mamidło 121
manometr 30
masa 39
materia 62
metr 14
mikrofala 111
miraż 121
moc 27
- prądu elektrycznego 84

molekuły 62
moment
- bezwładności 35, 39
- obrotowy 35
- pędu 37, 39
- siły 35, 39

N

naczynia połączone 30
nadfiolet 112
nadprzewodnictwo 85
napięcie 77
  elektryczne 83
  skuteczne 106
natężenie
  fali 54, 55
  fali elektromagnetycznej 111
  pola 75
  pola grawitacyjnego 43
  prądu elektrycznego 83
  światła 113
nieważkość 46
niuton 22
nukleon 145
nukleosynteza 150

O

obwód elektryczny 82
odbicie 119
  fali 55
odrzut 29
ognisko
  pozorne 123
  soczewki rozpraszającej 129
  soczewki skupiającej 128
  zwierciadła kulistego wklęsłego 123
  zwierciadła kulistego wypukłego 123
ogniskowa
  zwierciadła wklęsłego 123
ogniwo 91
oko 134
okres 19
  drgań harmonicznych 51
om 84
opornik 90
opór
  elektryczny 84
  ośrodka 24
  właściwy 84

P

paramagnetyki 96
parcie 29
pas Aleksandra 119
paskal 29
pęd 39
planety
  wewnętrzne 48
  zewnętrzne 48
podczerwień 111
pogłos 60
pojemność
  elektryczna przewodnika 78
  kondensatora 78
pole
  centralne 73, 74
  jednorodne 43, 74
  magnetyczne 94
pompa ciepła 67
powierzchnia falowa 54
powiększenie obrazu
  w soczewkach 129
  w zwierciadłach 127
półcień 110
praca
  mechaniczna 25
  prądu elektrycznego 83
  w centralnym polu elektrostatycznym 77
  w polu jednorodnym elektrostatycznym 77
prasa hydrauliczna 31
prawo
  Archimedesa 31
  Boyle'a-Mariotte'a 66
  Charlesa 65
  Coulomba 73
  Faradaya 105
  Gay-Lussaca 66
  indukcji 104
  Keplera
    drugie 45
    pierwsze 44
    trzecie 46
  Kirchhoffa
    drugie 91, 92
    pierwsze 87
  odbicia
    fali 55
    światła 115
  oddziaływania ładunków 72
  Ohma 84
  Pascala 30
  Poissona 67
  powszechnego ciążenia 42
  Snelliusa 56, 116
  załamania
    fali 55, 56
    światła 116

prąd
elektryczny 82
indukcyjny 104
przemienny 106
prądnica prądu przemiennego 105
prędkość 14, 16
chwilowa 14
kątowa 19, 34, 39
kosmiczna I 47
kosmiczna II 47
liniowa 19, 34, 39
orbitalna 46
rozchodzenia się dźwięku 59
średnia 14
światła 144
ucieczki 47
w ruchu harmonicznym 51
promienie fali 54
promieniotwórczość naturalna 145
promieniowanie 64
alfa 145
beta 146
cieplne (termiczne) 136
gamma 112, 146
rentgenowskie 112, 142
X 112
prot 145
pryzmat 133
przebicie kondensatora 76
przeciążenie 46
przemiana
adiabatyczna 66
izobaryczna 65
izochoryczna 65
izotermiczna 66
przemieszczenie 14
przewodnictwo cieplne 64
przewodnik 75
kołowy 99
przyspieszenie 16
dośrodkowe 20, 24
grawitacyjne 42
kątowe 19, 39
liniowe 39
w ruchu harmonicznym 51
punkt
materialny 14
potrójny 69

R

reakcja
egzoenergetyczna 149
endoenergetyczna 149
jądrowa 146
łańcuchowa 149
rozszczepienia 149
reguła
Lenza 105
lewej dłoni 102
prawej dłoni 95, 99
trzech palców 102
rezonans 53, 60
rezystancja 84
rezystor 90
rodzaje oddziaływań 22
rozszczepienie jąder 150
rozpad promieniotwórczy 145
rozproszenie światła 115
rozszerzalnośćć objętościowa cieplna 62
równanie
Clapeyrona 63
drogi 16
gazu doskonałego 63
soczewki 129
zwierciadła kulistego 127
ruch 14, 15
cząstki naładowanej 80
drgający 50
falowy 54
harmoniczny 50
jednostajny po okręgu 19
niejednostajny 20
obrotowy 34, 40
postępowy 34, 40
prostoliniowy
jednostajnie opóźniony 17
jednostajnie przyspieszony 16
jednostajny 15
złożony 34
ruchy Browna 62
rzut
pionowy
w dół 17
w górę 17
poziomy 18

S

sekunda 19
SEM 91, 104
seria widmowa 140
siatka dyfrakcyjna 112
silnik
  cieplny 67
  elektryczny 102
siła 22, 39
  bezwładności 24
  ciężkości 42
  elektrodynamiczna 101
  elektromotoryczna indukcji 104
  elektromotoryczna ogniwa 91
  grawitacji 42
  Lorentza 97, 100
  odśrodkowa 25
  tarcia 24
    kinetycznego 24
    statycznego 24
  w ruchu harmonicznym 51
soczewka 128
spadek swobodny 17
sprawność
  silnika 67
  urządzeń mechanicznych 32
stała
  Boltzmanna 63
  materiałowa 73
stan
  podstawowy 140
  wzbudzony 140
stojan 102
strumień indukcji magnetycznej 104
supernowa 151
synteza termojądrowa 150
szybkość 15
  fali 54
  końcowa 17
  parowania 68
  średnia 14
  względna 15

Ś

średnia wartość prędkości 14
światło 110, 136
  monochromatyczne 133
  skolimowane 133
  widzialne 111

T

tabliczka znamionowa 86
temperatura 62
  ciała 64
  wrzenia 68
teoria heliocentryczna 48
tesla 100, 101
tęcza 119
tor 14
transformator 107
tranzystor 90
tryt 145
twierdzenie Steinera 36

U

ugięcie fali 56
układ
  odniesienia 14
  Słoneczny 48
ultradźwięki 59

W

wahadło matematyczne 52
wartość
  energetyczna (opałowa) paliwa 70
  energetyczna żywności 70
warunki
  pływania ciał 31
  równowagi bryły sztywnej 38
wat 27, 84
weber 104
wektor przemieszczenia (przesunięcia) 14
wiatr słoneczny 98
widmo
  Brockenu 121
  ciągłe 133, 139
  fali elektromagnetycznej 111
  liniowe 139
Wielki Wybuch 48
wirnik 102
wolt 83
woltomierz 83
wrzenie 68
współczynnik
  adiabatyczny 66
Wszechświat 48
wygaszenie fali 58
wysokość
  maksymalna 17
względna przenikalność elektryczna ośrodka 73
wzmocnienie fali 58

Z

zaćmienie
- Księżyca 110
- Słońca 110

zasada
- bilansu cieplnego 70
- dynamiki
  - druga 23, 40
  - druga dla ruchu obrotowego 37
  - druga uogólniona 23
  - pierwsza 22, 40
  - trzecia 23
- Huygensa 55
- superpozycji 57
- termodynamiki
  - druga 67
  - pierwsza 65
- względności Einsteina 144
- zachowania
  - energii 27
  - ładunku 73
  - momentu pędu 37
  - pędu 24

zderzenie
- centralne 28
- niecentralne (skośne) 29
- niesprężyste 28
- sprężyste 28

zdolność skupiająca soczewki 129

zero bezwzględne 64

zjawisko
- Dopplera 60
- fotochemiczne 138
- fotoelektryczne zewnętrzne 137
- odbicia światła 115
- ostrzowe 76
- Tyndalla 121

zorza polarna 120

związek fizyczny 62

zwierciadło
- kuliste 122
- płaskie 122
- wklęsłe 122
- wypukłe 122

zwojnica 90, 99

Ź

źródło
- pola elektrycznego 74
- światła 110