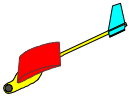
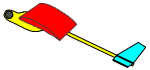
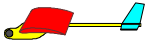
Materiały do wykładu



Fizyka w doświadczeniach





Krzysztof Korona

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

2010 - 2025

Materiały do celów dydaktycznych przeznaczone dla studentów Uniwersytetu Warszawskiego,
Wykorzystanie ich w innych celach jest możliwe pod warunkiem uzyskania zgody autora.

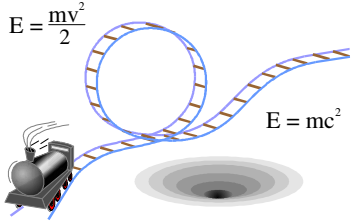
3. Materia i zasady zachowania

3.1 Wstęp

Wykład ten poświęcony jest pewnym wielkością fizycznym wykazującym interesującą cechę: niezmienność. Przykładami mogą być tu masa, energia i pęd. Wielkości tych nie da się wytworzyć, ani zniszczyć, można je tylko przemieszczać.

Plan wykładu

1. Wstęp
2. Materia, wielkości zmienne i niezmienne
3. Zderzenia. Prawa zachowania pędu i energii.
4. Energia, praca i moc
5. Energia płynów
6. Zasady zachowania w ruchu obrotowym
7. Składniki materii.



Rys. 3.1 Energia

Możemy zamienić masę w energię lub uzyskać energię dzięki pracy. Nie możemy mieć energii z niczego.

3.2 Materia, wielkości zmienne i niezmienne

Wielkości zmienne - objętość

W przypadku wielu cieczy i ciał stałych przyzwyczailiśmy się, że możemy je odmierzać podając ich objętość (litr soku, szklanka mąki itp.). Jednak objętość nie zawsze jest stała, o czym przekonuje poniższe doświadczenie.

Nadymanie balonika sodą.

Przyrządy i materiały

- butelka,
- gumowy balonik,
- ocet i soda spożywcza

Przebieg doświadczenia

Wsypujemy sodę do butelki i nalewamy octu do balonika. Zakładamy balonik na szyjkę butelki, uważając, aby nie wylać octu. Gdy balonik jest szczelnie zamocowany na butelce, przechylamy go, przelewamy ocet i mieszamy sodę i ocet ze sobą.

W butelce zachodzi reakcja:

$$NaHCO_3 + CH_3COOH \rightarrow CO_2 + H_2O + CH_3COO^- + Na^+ \qquad (3.1)$$

Obserwujemy, jak w miarę przebiegu reakcji objętość balonika rośnie.

Rys. 3.2 Doświadczenie z balonem

Widać, że w eksperymencie tym zmienia się objętość, a jedne związki chemiczne przechodzą w inne. Możemy wyróżnić jednak pewne

wielkości niezmienne:

- liczby atomów poszczególnych pierwiastków,

- sumaryczną masę.

Zarówno liczba atomów, jak i masa są wielkościami zachowywanymi w przemianach chemicznych i w wielu zjawiskach fizycznych.

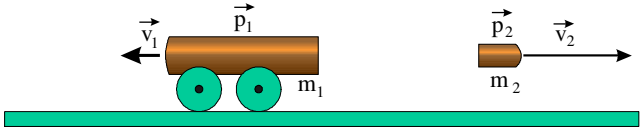
Co prawda obecnie, w przemianach jądrowych potrafimy zamieniać jedne atomy w inne a masę na energię, jednak są to eksperymenty ekstremalne.

Coś co jest trwałe, niezmienne uznajemy za obiekt materialny. Masa jest wielkością na tyle stabilną i niezmienną, że przyjmujemy, iż masa jest miarą ilości materii.

Jakie inne wielkości niezmienne występują w przyrodzie?

3.3 Zderzenia. Prawa zachowania pędu i energii.

W prostym doświadczeniu z armatą wystrzeliwującą pocisk obserwujemy, że armata jest odrzucana do tyłu. Dlaczego?



Rys. 3.3 Armata i pocisk

Odpowiedź 1. Na skutek trzeciej zasady Newtona: reakcja równa się akcji.

Odpowiedź 2. Jest to konsekwencja zasady zachowania pędu.

Obie odpowiedzi są dobre, zastanówmy się jednak, dlaczego prędkości armaty i pocisku są różne i jak przewidzieć ich wartości.

Armata ma duża masę, *M,* i uzyskuje niewielką prędkość do tyłu, *v*.

Pocisk ma niewielką masę, *m,* ale uzyskuje dużą prędkość *V*.
Doświadczenie (i obliczenia) pokazują, że iloczyn masy i prędkości dla armaty jest taki sam jak dla pocisku (co do wartości bezwzględnej): $m*V = M*v$. Natomiast znaki prędkości są przeciwne, a więc suma tych iloczynów pozostaje zerowa.

Iloczyn masy i prędkości nazywamy **pędem**:

$$p = m*v, \qquad (3.2)$$

Pęd, podobnie jak prędkość, jest wektorem. Zwrot i kierunek pędu równe są zwrotowi i kierunkowi prędkości ciała.

Zasada zachowania pędu (!)

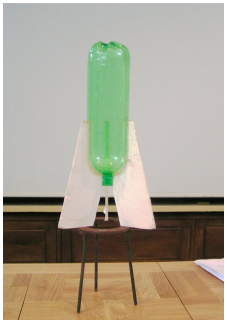
Fakt niezmienności sumy pędów ujmujemy w następującą zasadę:

Zasada zachowania pędu

Jeżeli suma sił działających na dany układ równa się zeru, to pęd układu nie zmienia się

Jeśli występują jakieś siły zewnętrzne, to zawsze możemy znaleźć większy układ obejmujący te siły i przeciwne im siły reakcji (ich istnienie wyniki z III zasady dynamiki). W tym większym układzie suma pędów będzie zachowana.

Popęd (impuls)



Rys. 3.4 Rakieta na wodę

W doświadczeniu z rakieta na wodę, rakieta, dzięki sprężonemu powietrzu działa pewną siłą F na wodę przez czas Δt, a woda z siłą F na rakietę.
Rakieta uzyskuje przyspieszenie: $a_R = F/m$, a dzięki temu prędkość:

$$v_R = \Delta t\ F/m. \qquad (3.3)$$

Wiemy już, że iloczyn prędkości i masy to pęd (równanie 3.1). Mnożąc obie strony równania (3.3) obliczamy zmianę pędu.
Zmianę tą oznaczymy Δp ($= \Delta v_R*m$). Otrzymujemy zatem równanie:

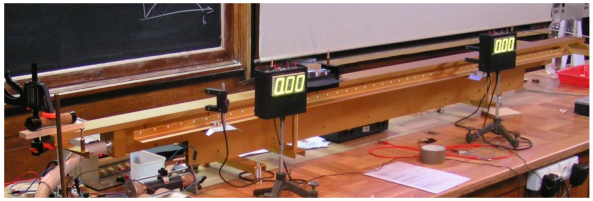
$$\Delta p = F*\Delta t. \qquad (3.4)$$

Iloczyn siły i czasu nazywamy popędem (lub impulsem), czyli zmiana pędu, Δp, równa jest popędowi (impulsowi), *I*.

Woda wrzucana z rakiety uzyskuje ten sam pęd co rakieta, ale trudniej to policzyć, bo woda cały czas płynie a prędkość się zmienia. Trudno podać m i v, ale na podstawie zasady zachowania pędu wiemy, że przekaz pędu wynosi: $\Delta p_w = \Delta t\ F$.

Tor powietrzny (!)

Aby móc analizować ruch ciał należy zmniejszyć, na ile tylko się da, siłę tarcia. Służy do tego np. tor powietrzny, po którym poruszają się wózki podtrzymywane poduszkami powietrznymi.

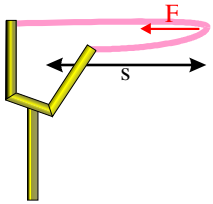


Rys. 3.5 Tor powietrzny

Rozpędzanie wózka ze stałą pracą (!)

Przebieg doświadczenia

Praca to iloczyn siły i drogi na jakiej działa, W = F*s. Aby uzyskać za każdym razem ta sama prace musimy kontrolować siłę i drogę.
Rozpędzanie przy pomocy siły działającej za każdym razem tak samo na tej samej drodze najłatwiej można zrealizować przy pomocy sprężyny lub gumki – swego rodzaju procy.
Przy pomocy naszej procy rozpędzamy wózki o różnych masach i mierzymy ich prędkości.



Rys. 3.6 Rozpędzanie przy pomocy procy

Ta sama praca oznacza tą sama energię nadawaną wózkom o różnej masie. Mierząc prędkość wózka o 2 razy większej masie stwierdzamy, że jego prędkość jest 1,41 razy mniejsza. Wartość 1,41 odpowiada pierwiastkowi z 2. Zatem otrzymujemy wynik, że prędkość jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z masy. Wyciągamy wniosek, że iloczyn kwadratu prędkości i masy jest stały. Wynik ten

stanowi doświadczalne potwierdzenie wzoru na energię kinetyczną (3.6).

Zderzenia na torze powietrznym

Jeżeli przy zderzeniu ciało odkształci się tylko na chwilę, a potem wróci do pierwotnego kształtu odbijając się, to mówimy o zderzeniu sprężystym.
Natomiast zderzenia niesprężyste zachodzą wtedy, gdy część energii zostaje zużyta na zmianę stanu ciała, na przykład, na rozbicie go.

Rys. 3.7 Zderzenie całkowicie niesprężyste

Ciekawym przypadkiem są zderzenie niesprężyste, w których dwa ciała łączą się ze sobą (rys. 3.4). Oznacza to, że po zderzeniu mają tę samą prędkość.
Załóżmy, że na spoczywające ciało o masie m wpadnie z prędkością v_p poruszające się ciało o tej samej masie. Po zderzeniu, połączone ciała będą miały masę 2m. Z zasady zachowania pędu ($p_p = p_k$) otrzymamy następujące równanie:

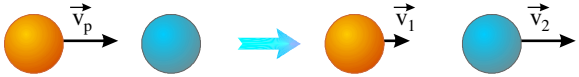
$$0 + mv_p = 2mv_k \qquad (3.5)$$

Rozwiązując równanie (3.3) otrzymamy: $v_k = v_p/2$, to znaczy prędkość połączonych ciał będzie połową prędkości początkowej.

W zderzeniu niesprężystym, część energii zużywamy na odkształcenie zderzających się obiektów, a więc nie możemy wypisać bilansu energii. Natomiast w zderzeniu całkowicie sprężystym zachowany jest nie tylko pęd, ale też energia, a w szczególności energia kinetyczna. Energia kinetyczna, E_k, jest proporcjonalna do kwadratu prędkości ciała, v.

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \qquad (3.6)$$

gdzie m - masa ciała.



Rys. 3.8 Zderzenie całkowicie sprężyste

Jeżeli na spoczywające ciało o masie m wpadnie z prędkością v_p poruszające się ciało o tej samej masie, to w zderzeniu sprężystym będą musiały być spełnione 2 warunki:

Z zasady zachowania pędu: $mv_p = mv_1 + mv_2$,

Z zasady zachowania energii: $mv_p^2 = mv_1^2 + mv_2^2$.

Mnożenie energii przez ½ zostało opuszczone po obu stronach równania na energię. W obu równaniach skracają się też masy. Z górnego równania wynika, że $v_p = v_1 + v_2$. Po podstawieniu tej sumy pod v_p w dolnym równaniu i podniesieniu do kwadratu, otrzymamy warunek $2v_1v_2 = 0$. Tak więc, powyższe równania mogą być spełnione, gdy $v_1 = 0$, $v_2 = v_p$. lub $v_1 = v_p$, $v_2 = 0$. Drugie rozwiązanie odrzucamy ponieważ kulka 1 nie może wyprzedzić kulki 2.

Zatem po takim zderzeniu poruszające się ciało stanie, a spoczywające przejmie jego prędkość.

Jak widać, zderzenia sprężyste równych mas prowadzą do wymiany prędkości pomiędzy zderzającymi się ciałami. Efekt ten sprawdzamy w trakcie wykładu przeprowadzając zderzenia na torze powietrznym.

Wykorzystujący zasady zachowania energii i pędu efekt wymiany prędkości (dla ciał o równych masach) zastosowany został w przyrządzie zwanym "kołyską Newtona".

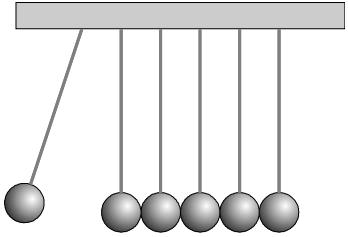
Kołyska Newtona (!)

Przyrządy i materiały

- stojak,
- identyczne stalowe kulki,
- żyłka lub cienki drut do zawieszenia kulek.

Przebieg doświadczenia

Kulki zawieszamy wzdłuż prostej poziomej tak, aby dotykały do siebie. Najlepiej każdą zawiesić na dwóch rozwidlonych żyłkach w taki sposób, aby nie mogły poruszać się w kierunku prostopadłym do łączącej je prostej.



Rys. 3.9 Kołyska Newtona

Po wprawieniu w ruch skrajnej kulki np. lewej obserwujemy, że w momencie gdy uderzy ona w pozostałe kulki, zatrzymuje się w miejscu. Środkowe kulki pozornie pozostają nieruchome. Natomiast prawa kulka odskakuje z prędkością równą początkowej prędkości lewej kulki. Po chwili prawa zawraca i proces powtarza się w druga stronę. Prawa nieruchomieje, środkowe pozostają na swoich miejscach, a lewa odskakuje.

Fakt, że kulka padająca zatrzymuje się, nadając identycznej kulce dokładnie taką samą prędkość, tłumaczony jest jedynie przez równoczesne zastosowanie zasad zachowania energii i pędu. Doświadczenie z kołyską Newtona, w której pomimo wielokrotnych zderzeń cały pęd i energia zostają przekazane od pierwszej do ostatniej

kulki dowodzi, że zasady zachowania są bardzo dokładnie spełnione.

Zasada zachowania energii kinetycznej:
W układzie zamkniętym, na który nie działają żadne zewnętrzne siły, całkowita energia kinetyczna pozostaje stała.

$$\sum E_i = {}^1/_2 \sum m_i v_i^2 = \text{const} \qquad (3.7)$$

gdzie m_i to masy a v_i to prędkości ciał tworzących dany układ zamknięty.

3.4 Energia, praca i moc

Energia i prawo jej zachowania (!)

Energia kinetyczna jest związana z ruchem, znamy jednak także inne rodzaje energii. W ogólności zachowywana jest suma wszystkich rodzajów energii.

Zasada zachowania energii

W układzie odosobnionym całkowita energia nie zmienia się.

Energia relatywistyczna

W mechanice klasycznej zachowywana jest masa, energia i pęd.
Gdy prowadzimy dokładniejsze pomiary okazuje się, że masa może zamieniać się w energię, a w różnych układach inercjalnych (czyli spoczywających lub poruszających się z prędkością jednostajną) wartości pędu i energii są różne. Problem został rozwiązany przez A. Einsteina w ramach teorii względności. Okazuje się, że między masą , a energią istnieje związek:

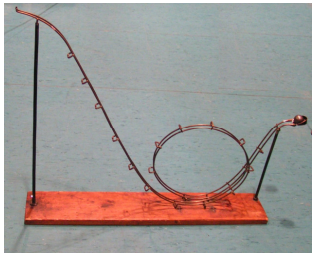
$$E = mc^2 \qquad (3.8)$$

Gdzie E i m to energia i masa relatywistyczna ciała. Ponadto, energia wraz z trzema przestrzennymi składowymi trójwymiarowego wektora pędu tworzą czterowektor (wektor w 4-wymiarowej czasoprzestrzeni). Energia jest zerową (pierwszą) składową tego czterowektora. Czyli energia ma się tak do pędu, jak czas do przestrzeni.
Położenie w czasoprzestrzeni: (ct, x, y, z).
Czterowektor energii i pędu: (E/c, p_x, p_y, p_z).
Długość tego czterowektora energii i pędu jest niezmiennikiem

równym masie ciała mnożonej przez c.

Energia potencjalna – kulka na torze

Na wykładzie przeprowadzamy eksperyment z kulką na pochyłym torze. Tor może mieć nawet kształt pętli. Gdy ciało umieścimy w najwyższym punkcie i puścimy, to rozpędzi się ono uzyskując pewną energię kinetyczną. Energia ta może wystarczyć np. do pokonania pętli jak na rys. 3.7.
Źródłem energii ruchu jest energia umieszczonego wysoko ciężaru. Energię taką nazywamy energią potencjalną ciężkości.



Rys. 3.10 Tor w kształcie pętli

Energia potencjalna jest proporcjonalna do ciężaru Q i wysokości h: $E_p = Q*h$. Biorąc pod uwagę, że ciężar zależy od masy ciała, m: Q = mg, otrzymujemy wzór na energię potencjalną:

$$E_p = mgh. \qquad (3.9)$$

Współczynnik g to przyspieszenie grawitacyjne (równe natężeniu pola grawitacyjnego).

Skąd jednak wzięła się w naszym doświadczeniu energia potencjalna? Otóż powstała ona w trakcie podnoszenia kulki, na skutek wykonanej przez eksperymentatora pracy. Wniosek:

Źródłem energii jest praca.

Obserwacja ta pozwala nam zdefiniować czym jest energia:
Energia jest to zdolność do wykonania pracy (zmagazynowana praca).

Powinniśmy jednak wiedzieć też, co to jest praca.

Praca (!)

W fizyce przyjmujemy następującą definicję:

Praca jest to efekt działania siły na pewnej drodze.

Co zapisujemy przy pomocy równania:

$$W = F*s, \qquad (3.10)$$

Pracą jest np. podniesienie ciężaru, wejście na schody, naciągnięcie sprężyny itp.

Jednostką pracy i energii w układzie SI jest dżul [J].
Używamy też innych jednostek pracy i energii:
kilowatogodzina: 1 kWh = 3,6 mln J = 3,6 MJ,
kaloria: 1 cal = 4,19 J,
elektronowolt: 1 eV = $1{,}6*10^{-19}$ J.
Dżul to stosunkowo niewielka jednostka energii. Na przykład, wejście na piętro człowieka o masie 60 kg, wymaga wykonania pracy:
W = 600 N * 3 m = 1800 J = 1,8 kJ.
Odpowiada to energii 0,43 kcal.

Perpetuum mobile

Od dawna ludzie próbowali stworzyć maszynę, która sama poruszała by się i mogłaby się tak poruszać wiecznie - "perpetuum mobile". Maszyna taka wykonywałaby pracę bez żadnego źródła energii. Sama byłaby niewyczerpanym źródłem energii.
Istnienie perpetuum mobile jest sprzeczne z zasadą zachowania energii. Tym niemniej, na przykład, w latach 1855 - 1903 brytyjski urząd

patentowy przyjął 575 patentów na perpetuum mobile. Żadna maszyna nie zadziałała.

Oprócz energii kinetycznej i energii potencjalnej ciężkości możemy mówić też o energii sprężystości, energii elektrycznej, cieplnej, chemicznej i innych formach energii.

Moc

Moc jest to praca wykonywana w jednostce czasu.

$$P = W/t, \qquad (3.11)$$

W przypadku silnika, moc to zdolność do wykonania pracy w jednostkowym czasie.

Rozważmy dwie czynności, w których występuje ta sama droga, ta sama siła (a więc jest wykonywana ta sama praca), ale prędkości z jakimi są wykonywane są różne.

Jeśli prędkość ruchu jest mała, to ruch będzie trwał długo, a zgodnie ze wzorem (3.9), dzieląc pracę przez długi czas otrzymujemy małą moc. Wnioskujemy, że:

- mała prędkość, długi czas = mała moc.
- duża prędkość, krótki czas = duża moc.

Widać więc związek pomiędzy prędkością, a mocą. W przypadku pracy mechanicznej moc można wyrazić jako iloczyn siły, F i prędkości, v:

$$P = F*v. \qquad (3.12)$$

Jednostką mocy jest wat [W]:

$$1\ W = 1\ J/s$$

Na przykład:

Człowiek o masie 60 kg wchodzący na piętro w 3 s ma moc:

$$P = 600\ N * 3\ m / 3\ s = 1800\ J / 3\ s = 600\ W.$$

1000 W = 1 kW (kilowat)

Uwaga, iloczyn mocy i czasu daje energię.

Kilowatogodzina 1 kWh = 3 600 000 J jest jednostką energii.

3.5 Energia płynów

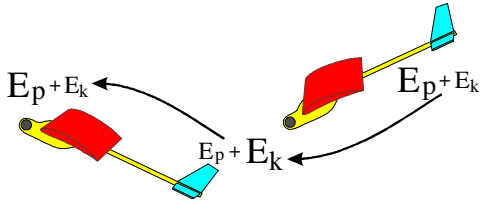
Samoloty z papieru i modele szybowców

Przyrządy i materiały

- model papierowy: kartki papieru,
- model szybowca: lekkie drewna (balsy) i papier lub styropian.

Przebieg doświadczenia

Szybowiec wypuszczamy z niewielkiej wysokości i nadając mu pewną prędkość początkową. Zatem szybowiec posiada energię potencjalną i kinetyczną. Szybowiec potrzebuje pewnej minimalnej prędkości, aby się unosić w powietrzu. Gdy zwolni za bardzo, prawidłowo zrobiony model szybowca powinien przechylić się do przodu i zanurkować. W wyniku opadania prędkość modelu rośnie. Dzięki temu energia potencjalna szybowca zamienia się na energię kinetyczną.



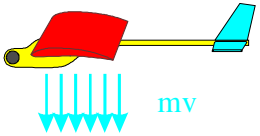
Rys. 3.11 Zmiany energii w trakcie lotu szybowca

Szybowiec powinien być tak wyprofilowany, aby pod wpływem większej prędkości rosnąca siła aerodynamiczna unosiła dziób do góry i szybowiec przechodził do lotu poziomego, albo lekko wznoszącego. Szybowiec jednak nie uniesie się na poprzednią wysokość, bo wytworzenie siły nośnej wymaga wykonania pracy, aby skierować

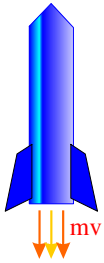
strumień powietrza w dół.

Doświadczenie to pokazuje, że do utrzymania się w powietrzu samolot czy szybowiec potrzebuje energii. Samolot uzyskuje ją z silnika, natomiast lot szybowca odbywa się dzięki zamianie energii potencjalnej na kinetyczną, która następnie zużywana jest na wytworzenie siły nośnej i pokonanie oporu powietrza.

Siła nośna i siła ciągu



Rys. 3.12 Siła nośna działająca na samolot



Rys. 3.12a Siła ciągu rakiety

Wyrzucając gazy uzyskujemy siłę ciągu. Wiemy, że zmiana pędu (popęd) jest proporcjonalna do iloczynu siły i czasu. Jeżeli więc gazom nadany został pęd Δp w czasie Δt, to znaczy, że działała na nie średnia siła:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} \qquad (3.13)$$

Na przykład, rakieta wyrzuca strumień gazów o prędkości v. Jeżeli w ciągu czasu Δt wyrzuci gazy o masie Δm, to uzyska siłę ciągu:

F = Δmv/ Δt.

Analogicznie można obliczyć siłę nośną samolotu, wiedząc, ile powietrza i z jaką prędkością jego skrzydła skierują w dół.

Przepływ cieczy

Gdy ciecz przepływa przez przewężenie musi przyspieszyć, co oznacza, że jej energia kinetyczna rośnie. Aby suma energii była stała, zmniejsza się jej energia potencjalna związana z ciśnieniem. Energia ta jest równa iloczynowi ciśnienia, *P*, i objętości V:

$$E_P = P * V \,. \qquad (3.14)$$

Ciśnienie oznaczone jest dużą literą *P*, aby nie pomylić go z pędem.

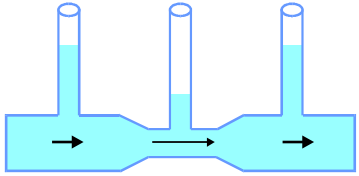
Prawo Bernoulliego (!)

Aby przy przepływie cieczy energia została zachowana, musi być spełnione równanie:

$$E = P \cdot V + \frac{mv^2}{2} \,. \qquad (3.15)$$

Biorąc pod uwagę zasadę zachowania energii otrzymujemy: **prawo Bernouliego**.

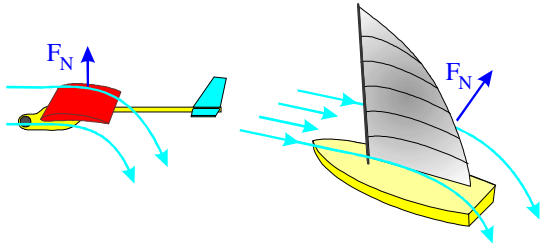
Ciecz lub gaz przepływająca w naczyniach o różnej średnicy zmienia swoje ciśnienie. W miejscach szerszych ciśnienie rośnie, a w węższych - maleje.



Rys. 3.13 Przyrząd Venturiego

Prawo Bernoulliego można przetestować przy pomocy przyrządu Venturiego (rys. 3.13). W naczyniu tym ciśnienie wody płynącej przez poziomą rurkę kontrolujemy obserwując poziom wody w pionowych rurkach. Poziom wody jest taki sam, gdy ciecz jest nieruchoma. Gdy woda zacznie płynąć, poziom wody w rurce nad przewężeniem opada.

Siła nośna



Rys. 3.14 Powstawanie siły nośnej w przypadku samolotu i żaglówki.

Siła nośna jest rodzajem siły aerodynamicznej. Aby wytworzyć siłę nośną należy doprowadzić do tego, aby powietrze zmieniło kierunek swojego przepływu. Poprzednio siła nośna wyjaśniona była przez zmianę pędu. Tu widzimy, że zakrzywienie toru powietrza oznacza, że strumień nad skrzydłem będzie miał dłuższą drogę, a więc musi mieć większą prędkość. Zgodnie z prawem Bernoulliego obniży się zatem jego ciśnienie, które działając na powierzchnię skrzydła lub żagla wytworzy siłę nośną. Oba wyjaśnienia są równoważne.

3.6 Zasady zachowania w ruchu obrotowym

Jak pamiętamy z drugiego wykładu, miarą bezwładności w ruchu obrotowym jest moment bezwładności $I = mr^2$, wzór (2.9). Znaczenie tego pojęcia możemy sprawdzić w następującym doświadczeniu:

Obrót na krześle z hantlami (!)

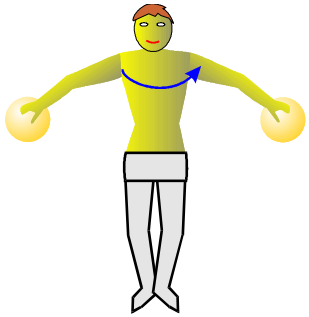
Przyrządy i materiały

- dwa ciężkie, łatwe do utrzymania obiekty np. hantle,
- krzesło obrotowe.

Przebieg doświadczenia

Doświadczenie można wykonać siedząc na krześle, a sprawniejsi mogą spróbować zrobić piruet bez pomocy krzesła

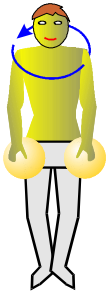
Rozpoczynamy od tego, że mając ciężarki w rękach, szeroko rozkładamy ramiona i odpychając się od czegoś wprawiamy się w powolny ruch obrotowy.



Z rozłożonymi rękami mamy duży moment bezwładności I_1, i choć mamy niewielką prędkość obrotową ω_1, iloczyn $I_1\omega_1$ jest znaczny.

Rys. 3.15 Obrót z rozłożonymi rękami

Następnie szybko przyciągamy ręce od ciała.



Rys. 3.16 Wirowanie ze ściągniętymi rękami

Ze złożonymi rękami mamy mały moment bezwładności I_2, natomiast nasza prędkość obrotowa ω_2, jest wyraźnie większa tak, że iloczyn $I_2\omega_2$ jest taki jak poprzednio.

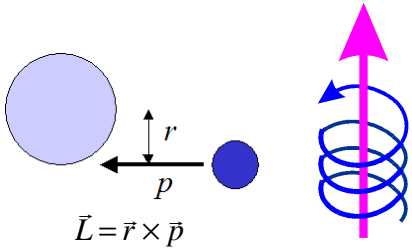
Możemy wyciągnąć wniosek, że iloczyn momentu bezwładności i prędkości obrotowej jest w tym przypadku stały: $I_1*\omega_1 = I_2*\omega_2$. Jest to zatem wielkość zachowywana w ruchu obrotowym.

Iloczyn momentu bezwładności i prędkości obrotowej nazywamy **momentem pędu**. Można go wyrazić wzorem:

$$\vec{L} = \hat{I}\vec{\omega} = \text{const.} \qquad (3.16)$$

Wzór ten stosuje się dla bryły sztywnej o momencie bezwładności I i prędkości obrotowej ω.

Moment pędu możemy obliczyć też dla dowolnego ciała o pędzie *p*, poruszającego się względem jakiegoś punktu w przestrzeni w położeniu danym wektorem *r* względem centrum obrotu.



Rys. 3.17 Definicja momentu pędu i jego kierunku.

Skorzystamy wtedy ze wzoru:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \text{const.} \qquad (3.17)$$

Wzór (3.16) używany jest często w astrofizyce do obliczania ruchu ciał krążących po orbitach. Kierunek wektora momentu pędu określamy przy pomocy reguły śruby prawoskrętnej.

Zasada zachowania momentu pędu:

W układzie zamkniętym, na który nie działają żadne momenty sił (lub suma momentów wynosi zero), moment pędu jest stały.

Z zasadą zachowania momentu pędu wiążą się prawa Keplera odkryte doświadczalnie przez Jana Keplera około 1605 r.

I prawo Keplera

Planety krążą dookoła Słońca po orbitach eliptycznych. Słońce znajduje się w jednym z ognisk tych elips.

II prawo Keplera

Promień wodzący planety zakreśla w równych odstępach czasu równe pola.

Pole zakreślane przez planetę, o którym mówi II prawo Keplera, dane jest przez iloczyn promienia orbity r i zakreślonego łuku $l = v*\Delta t$. Dla stałego Δt, drugie prawo Keplera oznacza, że:

$$r*v = \text{const.} \qquad (3.18)$$

Równanie to możemy pomnożyć przez masę planety m (która też jest stała). Otrzymamy wtedy

$$r*v*m = \text{const},$$

czyli

$$r*p = \text{const.}$$

Przez porównanie ze wzorem (3.17) stwierdzamy, że z II prawa Keplera wynika stałość momentu pędu planety:

$$L = \text{const}$$

I na odwrót, wiedząc, że obowiązuje zasada zachowania momentu pędu możemy wyprowadzić II prawo Keplera.

Wir w butelce

Przyrządy i materiały

- duża butelka najlepiej plastikowa, zamknięta korkiem z dziurką o średnicy kilku milimetrów,
- woda.

Przebieg doświadczenia

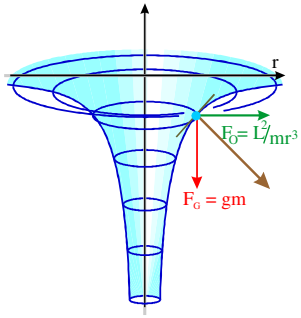
Butelkę napełniamy do połowy wodą i zamykamy korkiem. Następnie najpierw trochę przechylamy i wprawiamy w ruch obrotowy, a potem odwracamy do góry dnem. Wirująca i wypływająca przez

otwór w korku woda, utworzy wir.

Rys. 3.18. Jak powstaje ten charakterystyczny kształt?

Przypominający lejek, kształt wiru jest bardzo charakterystyczny.

Kształt ten powstaje dzięki współdziałaniu siły odśrodkowej, F_O, i siły ciężkości, F_G.



Rys. 3.19. Rozkład sił w wirze

Znając zasadę zachowania momentu pędu możemy obliczyć prędkość

kątową ω cieczy w odległości r od osi wiru: $\omega = L/mr^2$.

Ciecz tworząca wir będzie w równowadze, gdy powierzchnia cieczy ustawi się pod odpowiednim kątem α (tg $\alpha = L^2/m^2gr^3$). Pozwala to obliczyć kształt wiru:

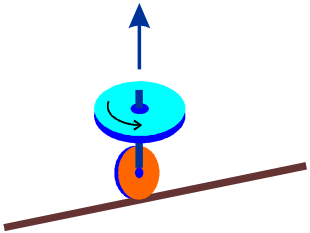
$$z = \frac{-L^2}{2m^2 g\, r^2}. \qquad (3.19)$$

Wyliczony z tego równania krzywej kształt narysowany został na rysunku 3.18, jak widać dość dokładnie oddaje to, co obserwujemy.

Żyroskop

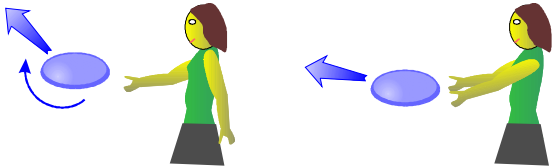
Żyroskopem nazywamy przyrząd złożony z koła zamocowanego w taki sposób, że jego oś może swobodnie wybierać kierunek. Żyroskop wprawiony w szybki ruch obrotowy zachowuje kierunek osi.

Żyroskopy wykorzystywane są w nawigacji i lotnictwie do utrzymywania kierunku, jako żyrokompasy.



Rys. 3.20 Żyroskop utrzymuje równowagę na drucie

Żyroskop utrzymuje kierunek, bo nie może zmienić swojego momentu pędu. Moment pędu jest wektorem i zachowuje nie tylko wartość, ale również i kierunek.

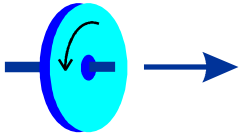


Rys. 3.21 Talerz rzucony z obu rąk nie wiruje. Bez wirowania talerz traci równowagę i spada.

Efekt żyroskopowy wykorzystywany jest w stabilizacji lotu bumerangu i "latającego talerza". Przykładem żyroskopu jest wirujący bąk (zabawka). Inny przykładem może być (demonstrowane na wykładzie) koło rowerowe zawieszone za jeden z końców osi.

Lewitujące koło rowerowe

Koło rowerowe ma zamiast opony ołowianą obręcz dającą duży moment bezwładności. Po rozpędzeniu przy pomocy linki nawiniętej na oś, koło można zawiesić za jeden koniec osi ustawiając oś poziomo. Gdyby koło nie obracało się opadłoby zwisając z osią w pionie.



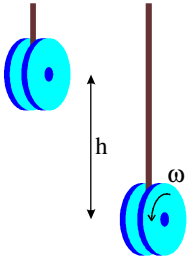
Rys. 3.22 Koło - żyroskop utrzymuje się zawieszone za koniec osi

Moment siły pochodzący od siły ciężkości obraca oś w bok, a nie do dołu. Koło zachowuje kierunek momentu pędu w poziomie.

Jojo albo wahadło Maxwella (!)

Przebieg doświadczenia

Na oś szpulki zwanej jojo (lub wahadło Maxwella) nawijamy nitkę. Trzymając koniec nitki pozwalamy opadać szpulce. Moment siły od rozwijającej się nitki wprawia jojo w ruch wirowy. Po rozwinięciu nitki do końca, jojo nie może opadać, ale ciągle wirując nawija nitkę i unosi się do góry.



Rys. 3.23 Wahadło Maxwella

Wahadło Maxwella (jojo) jest przykładem przyrządu zamieniającego energię potencjalną) na energię kinetyczną ruchu obrotowego (i na odwrót).

Energia kinetyczna ruchu obrotowego dana jest wzorem:

$$E_{ko} = \frac{I\omega^2}{2} \qquad (3.20)$$

Wzór ten jest analogiczny do wzoru na energię kinetyczną ruchu postępowego (3.5), ale masę m zastępuje moment bezwładności *I*, a prędkość v - prędkość kątowa ω

Energię kinetyczną ruchu obrotowego można magazynować w kołach zamachowych. Koło takie ma masę rozłożoną z dala od osi, co zapewnia duży moment bezwładności. Takie koło można rozpędzić magazynując w nim energię, a następnie wykorzystać, na przykład do napędzania pojazdu.

Koło zamachowe i cały zestaw systemu odzysku energii używany jest między innymi w samochodach Formuły 1 pod nazwą KERS - Kinetic Energy Recovery System.

3.7 Składniki materii

Z pojęciem materii kojarzą nam się pewne obiekty, które są trwałe, niezmienne, może nie pod względem kształtu, ale ilości. Na przykład liczba atomów lub masa. W fizyce oprócz masy znane są inne wielkości, których sumaryczna wartość jest niezmienna, a wiec zachowywana:

- pęd ($p = m*v$),
- energia, będąca sumą różnych rodzajów energii. Można wymienić energię potencjalną ciężkości $E_p = mgh$ i ciśnienia $E_p = pV$, kinetyczną ruchu postępowego $E_k = mv^2/2$ i obrotowego $E_{ko} = I\omega^2/2$ oraz energię relatywistyczną $E = mc^2$.
- w teorii względności: suma masy, energii i pędu,
- moment pędu ($L = I\omega$),
- ładunek elektryczny, q.

W 1918 r. Emma Noether udowodniła fundamentalne twierdzenie, **twierdzenie Noether**, które wiąże symetrie (niezmienniczości) praw ruchu z zachowaniem pewnych wielkości fizycznych.

Tak więc:

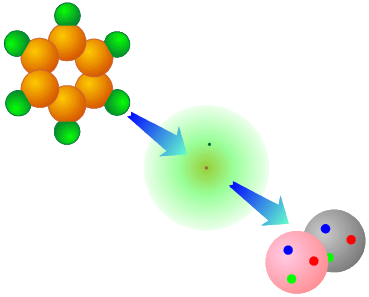
- Z symetrią przesunięcia w czasie, wiąże się prawo zachowania energii.
- Z symetrią przesunięcia w przestrzeni, wiąże się prawo zachowania pędu.
- Cząstki poruszające się w (znanych z wyraźnej symetrii) kryształach obowiązuje prawo zachowania kwazipędu.
- Z symetrią obrotu, wiąże się prawo zachowania momentu pędu.

Piętra budowy materii

Cząsteczki chemiczne składają się z **atomów**. Największe z nich, białka liczą wiele tysięcy atomów.

Kiedyś atomy uważano za niepodzielne obiekty łączące się w związki

chemiczne. Obecnie znamy już ponad 100 rodzajów atomów (pierwiastków chemicznych) i wiemy, że ich właściwości systematycznie zmieniają wraz z kolejnym numerem pierwiastka, tworząc układ okresowy pierwiastków. Niedawno 112 pierwiastkowi układu okresowego nadano nazwę kopernik (copernicium Cn). Znajduje się on w tej samej kolumnie układu okresowego co cynk, kadm i rtęć.



Rys. 3.24 Poziomy budowy materii: cząsteczka chemiczna, atom i nukleony (złożone z kwarków)

Rozmiary atomów są rzędu 1 Å = 10^{-10} m, czyli są tyle razy mniejsze od ziarenka piasku, ile razy ziarenko piasku jest mniejsze od Giewontu.

Atomy składają się z jądra i z elektronów. Cząstki te są związane przez pole elektryczne. Cząstką pola elektrycznego jest **foton**.

Elektrony są uważane za cząstki punktowe. Sprawdzono, że są mniejsze niż 10^{-18} m, czyli są co najmniej tyle razy mniejsze od atomu, ile razy atom jest mniejszy od kuli bilardowej.

Jądra składają się z nukleonów czyli **protonów** i **neutronów**.

Trwałe nukleony zbudowane są z kwarków: **górnego u** i **dolnego d**. Kwarki związane są oddziaływaniem silnym przenoszonym przez

gluony.

Wśród cząstek rozróżniamy bozony i fermiony. Bozony mają tę właściwość, że możemy w dowolnym miejscu zmieścić dowolną ich liczbę. Przykładowo, promień lasera składa jest strumieniem identycznych fotonów (które są właśnie bozonami). Z kolei fermiony obowiązuje zakaz Pauliego, który mówi, że w danym stanie kwantowym może przebywać tylko jeden fermion. Dzięki temu kolejne elektrony (które są własnie fermionami) muszą obsadzać w atomie coraz wyższe stany.

W zasadzie można powiedzieć, że otaczająca nas materia składa się z trzech rodzajów trwałych cząstek zaliczanych do fermionów: kwarków u i d oraz elektronów. Ponadto występują wiążące je bozony: fotony i gluony.

Okazuje się jednak, że istnieje sporo nietrwałych cząstek wytwarzanych w przemianach jądrowych, obecnych w promieniowaniu kosmicznym i odkrywanych w akceleratorach. Lista cząstek uważanych obecnie za fundamentalne i niepodzielne znajduje się w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Cząstki fundamentalne. W dolnym wierszu podany został ładunek cząstek występujących w poszczególnych kolumnach.

fermiony				**bozony**
kwarki		**leptony**		
u up - górny	d down - dolny	e^- elektron	ν_e neutrino e	g gluony
c charm - powabny	s strange - dziwny	μ^- mion	ν_μ neutrino μ	γ foton
t top - wysoki	b bottom - niski	τ^- taon	ν_τ neutrino τ	W^+, Z^0, W^- bozony słabe
+2/3	-1/3	-1	0	+1, 0, -1

3.8 Podsumowanie

Niektóre wielkości fizyczne są zmienne (objętość, położenie, prędkość, siła), a niektóre są zachowywane (ich sumaryczne wartości są stałe):

- masa, m,
- pęd ($p = m*v$),
- energia ($E = mgh$, $E_k = mv^2/2$, $E_{ko} = I\omega^2/2$),
- moment pędu ($L = I\omega$),
- ładunek, q.

Wprowadzone zostało pojęcie pracy (równej sile działającej na pewnej drodze, $W = F*s$) jako źródła energii.

Najważniejsze prawa:

Zasada zachowania energii:

W układzie zamkniętym, na który nie działają żadne zewnętrzne siły, całkowita energia pozostaje stała.

Zasada zachowania pędu:

Jeżeli suma działających na układ sił równa się zeru, to pęd układu nie zmienia się.

Zasada zachowania momentu pędu

W układzie zamkniętym, na który nie działają żadne momenty sił (lub suma momentów wynosi zero), moment pędu jest stały.

Prawo Bernoulliego

Ciecz lub gaz przepływająca w naczyniach o różnej średnicy zmienia swoje ciśnienie. W miejscach szerszych ciśnienie rośnie, a w węższych - maleje.