Materiały do wykładu

Fizyka w doświadczeniach

Krzysztof Korona

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

2010 - 2024

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

Wstęp

Fizycy zajmują się budową i funkcjonowaniem materii, poczynając od cząstek elementarnych, poprzez atomy, elementy maszyn, planety, aż do całego wszechświata.

Tak naprawdę jednak fizyka nie dzieli się według obiektów badań, czyli na fizykę cząstek elementarnych, fizykę atomów czy fizykę gwiazd (prawdą jest, że fizycy czasem tak się grupują). Fizyka złożona jest z działów obejmujących pewne problemy i metody ich rozwiązania.

Na przykład termodynamika, zajmująca się zjawiskami cieplnymi, może mieć zastosowania zarówno w przypadku modelu jądra atomowego jak i do liczenia entropii czarnych dziur. Każdy z działów ma swoje metody i narzędzia. Termodynamika posługuje się, na przykład, metodami statystycznymi.

Z drugiej strony, aby zrozumieć w pełni jakieś zjawisko fizyczne, trzeba posłużyć się wiedzą z wielu dziedzin. Na przykład, aby zaprojektować balon na rozgrzane powietrze, trzeba wykorzystać zarówno wiedzę z mechaniki jak i nauki o cieple.

W ramach tego cyklu wykładów omówione będą następujące zagadnienia z różnych działów fizyki:

I Siła i ruch - mechanika klasyczna i relatywistyczna.
II Drgania i fale - od makroskopowego ruchu falowego do mechaniki falowej.
III Ciepło i cząsteczki - termodynamika, fizyka statystyczna.
IV Pola i prądy - elektrodynamika, elektronika.
V Światło widzialne i niewidzialne - optyka.

I Siła i ruch

1. Podstawowe pojęcia mechaniki

1.1 Wstęp.

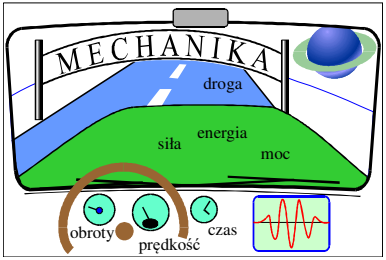
W ramach pierwszego wykładu z działu 'Siła i ruch' zajmiemy się podstawowymi pojęciami mechaniki.

Plan wykładu:

1. Wstęp. Czym zajmuje się mechanika?
2. Siła i inne podstawowe pojęcia
3. Ciśnienie, prawa Archimedesa i Pascala
4. Równowaga, warunki, środek ciężkości
5. Moment siły
6. Podsumowanie

Zamianą energii wiatru na siłę i ruch zajmuje się mechanika.
Wdzydze, lipiec 2009

1.2 Siła i inne podstawowe pojęcia

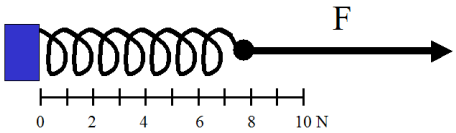


Rys. 1.1
Wielkości mechaniczne

Wiele pojęć z fizyki, a w szczególności z mechaniki, przeszło do codziennego języka i są ogólnie rozumiane. Należą do nich prędkość, siła, moc, praca i inne. Lecz czy wszyscy pamiętają, że moc (w rozumieniu mechaniki) to praca wykonywana w jednostce czasu, co jest równe iloczynowi prędkości i siły? Wypada zatem przypomnieć podstawowe definicje.

Siła i ciężar (!)

Jeśli dane ciało ulega odkształceniu, oznacza to, że podlega jakiemuś oddziaływaniu. Mówimy, że działa na nie siła.



Rys. 1.2 Na wykładzie siłę mierzymy przez rozciągnięcie sprężyny.

Siła to wielkość fizyczna będąca miarą oddziaływania jednego ciała na drugie.
Siłę mierzymy dynamometrem. Dynamometr może być sprężynowy albo elektroniczny, mierzący w oparciu o czujnik piezoelektryczny.
Możemy użyć też wagi. Waga jest przyrządem do pomiaru ciężaru lub masy ciała.

Ciężarem nazywamy siłę przyciągania grawitacyjnego.

Jednostką siły jest niuton [N], ale używamy też kilogramów-siła [kG].
1 kG = 9,81 N

Ciężar ciała jest proporcjonalny do masy. Związek pomiędzy masą a ciężarem zadany jest przez natężenie pola grawitacyjnego.

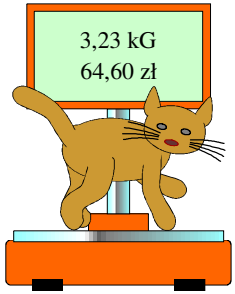
Masa jest parametrem danego ciała opisującym jego zdolność oddziaływania grawitacyjnego (masa grawitacyjna) i jego bezwładność (masa bezwładna), a także po prostu ilość materii.

Masę mierzymy w gramach, g, w kilogramach, kg, tonach, t, lub w innych jednostkach. Podstawową jednostką układu SI jest kilogram.

Przykład:
Ziemia przyciąga **masę** 1 kg **siłą** ok. 9,81 N (= 1 kG). Księżyc tę samą masę przyciąga z siłą 1,62 N, a inne obiekty tę samą masę przyciągają z innymi siłami.

W fizyce klasycznej masa jest wielkością nie podlegającą zmianom. Mówimy, że obowiązuje zasada zachowania masy. Elementy składowe jakiegoś układu fizycznego mogą się wymieniać masą (można coś przelać lub przesypać), ale suma mas pozostaje stała.
Fakt, że masy nie da się zmienić, ma duże znaczenie gospodarcze. Możemy się posługiwać masą (lub ciężarem) jako wyznacznikiem wartości. Kilogram złota zawsze będzie ważył kilogram, niezależnie jak go ukształtujemy, czy podzielimy na kawałki.

Nauki empiryczne (do jakich zalicza się fizyka) swoje metody badań opierają na doświadczeniach, których centralnym elementem jest pomiar. Pomiar ciężaru jest jedną z najstarszych technik pomiarowych i być może najpowszechniej stosowanych do dziś.



Rys. 1.3 Zamiana wielkości fizycznej na liczby

Waga sklepowa zamienia pewne właściwości obiektów fizycznych (ciężar, masę) na liczby. Podaje ciężar w kG i cenę w zł. Jest to wygodna metoda, bo ułatwia rozliczanie i planowanie zakupów.
Fizycy w trakcie pomiarów zamieniają w swoich eksperymentach różne wielkości na liczby. Potem dzięki obliczeniom mogą dociekać przyczyn zjawisk fizycznych bądź przewidywać ich efekty. Oprócz ciężaru istnieje wiele innych wielkości fizycznych, które można łatwo zamienić na liczby.
Wielkości fizyczne mierzymy, posługując się odpowiednimi jednostkami. Poznaliśmy już siłę i ciężar, które mierzymy w niutonach, czyli w jednostkach siły. Ze względu na bogactwo zjawisk używamy wielu różnych wielkości fizycznych, które mają na ogół swoje własne jednostki. W ogólności wielkości fizyczne i ich jednostki możemy podzielić na podstawowe i pochodne.

Podstawowe wielkości fizyczne i ich jednostki

Do niedawna układ SI był oparty o kilka podstawowych jednostek. Zalicza się do nich:

Czas: 1 s = 9 192 631 770 drgań fali emitowanej przez atom cezu.
Odległość: 1 m to droga przebyta przez światło w 1/299692458 s.
Masa: 1 kg = masie wzorca przechowywanego w Sevres.
Natężenie prądu: 1 A (amper) = natężeniu prądu potrzebnemu do wytworzenia pomiędzy dwoma przewodami odległymi o 1 m siły $2*10^{-7}$ N na metr przewodu.
Temperatura: 1 K (kelwin) = 1/273,16 temperatury punktu potrójnego wody.
Ilość materii: 1 mol = ilość atomów w 12 g węgla 12 (^{12}C).
Światłość: 1cd (kandela)

Jak widać, czas i odległość oparte były na stałych fizycznych, a pozostałe jednostki na pewnych wzorcach. Obecnie konferencja metrologów CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures) wprowadziła układ oparty w całości na stałych fizycznych.

– częstość przejścia nadsubtelnego ^{133}Cs, $\Delta\nu_{Cs} = 9\ 192\ 631\ 770$ Hz
– prędkość światła, $c = 299\ 792\ 458$ m/s,
– stała Plancka, $h = 6{,}626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J*s [= kg*m^2/s],
– ładunek elementarny, $e = 1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
– stała Boltzmanna, $k = 1{,}380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
– stała Avogadro, $N_A = 6{,}022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ /mol,
– skuteczność świetlna fali 540 THz, $K_{cd} = 683$ lm/W.

Widać, że niektóre jednostki w prosty sposób wynikają z tych definicji, na przykład:

Ładunek elektryczny: 1 C (kulomb) jest równy $\frac{10^{19}\,e}{1{,}602\,176\,634}$.

Temperatura: 1 K (kelwin) = 1 J/*k*.
Ilość materii: 1 mol = $6{,}022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}$ cząstek .

Natomiast kilogram zdefiniowany jest przez pomiar, przy założeniu ustalonej wartości liczbowej stałej Plancka, $h = 6{,}62607015 \times 10^{-34}$ kg*m^2/s, przy czym metr i sekunda określone są przez c i $\Delta\nu_{Cs}$.

Stała Plancka nie jest używana przy pomiarach mas dużych obiektów, ale ma znaczenie przy pomiarach mas cząstek i atomów. Dzięki miej można bardzo precyzyjnie wyznaczyć masę atomu krzemu, przy życiu spektrometru mas. Następnie można wytworzyć duży kryształ krzemu (najlepiej w kształcie kuli), w którym policzymy dokładnie wszystkie atomy i stąd będziemy znali jego masę.

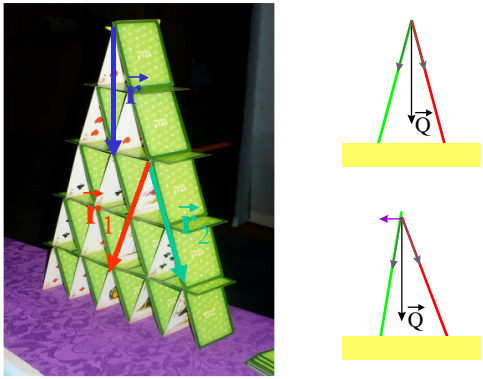
Inne wielkości fizyczne są w pewien sposób zależne od tych podstawowych. Ich jednostki są jednostkami pochodnymi. **Jednostki pochodne** tworzymy z jednostek podstawowych przez mnożenie i dzielenie:

Siła, ciężar: 1 N (niuton) = 1 kg * 1 m/s^2.
Energia: 1 J (dżul) = 1 N * 1 m.
Moc: 1 W (wat) = 1 J / 1 s.

Wektory

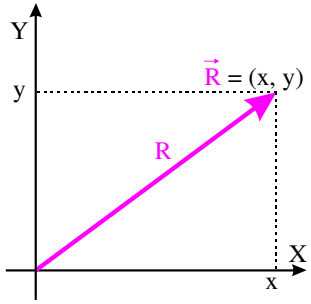
Zjawiska fizyczne dzieją się w trójwymiarowej przestrzeni (czasem wystarczą 2 wymiary, ale czasem posługujemy się też czterema).
Zatem aby je opisać, potrzebujemy odpowiednich wielowymiarowych wielkości fizycznych. Wielkości takie opisujemy przy pomocy wektorów.

Na przykład, gdy ustawiamy domek z kart, musimy pamiętać, że karty w takiej konstrukcji przenoszą tylko siły działające w określonym kierunku, czyli dokładnie wzdłuż ich płaszczyzn.



Rys. 1.4. Rozkład sił w 2-wymiarowej konstrukcji

Jeżeli źle ustawimy karty (i kierunki sił), to powstanie siła przewracająca. Ten prosty przykład pokazuje, że musimy umieć obliczać wielkości fizyczne z uwzględnieniem kierunków.



Rys. 1.5 Wektor R można przedstawić w postaci pary liczb (x,y)

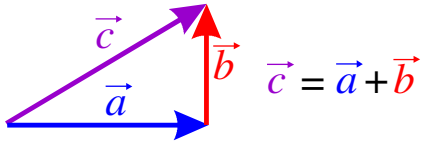
Wektor to wielkość fizyczna mająca nie tylko wartość, ale też zwrot i kierunek. Wektor jest elementem wielowymiarowej przestrzeni.

Wektorami są między innymi siła, przesunięcie i prędkość.

Wielkości niebędące wektorami (dla odróżnienia) nazywamy **skalarami**. Przykładami skalarów są między innymi masa, objętość i czas.

Wektor może mieć postać pary liczb (w przestrzeni 2-wymiarowej), jak też trójki, czwórki lub dłuższego ciągu liczb w przestrzeniach o większej liczbie wymiarów.

Wektory można dodawać, mnożyć przez liczby i przez inne wektory, rozkładać itp.



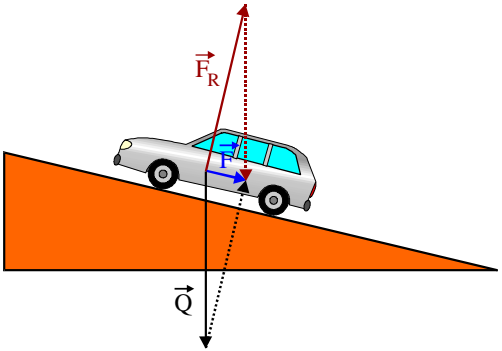
Rys 1.6 Dodawanie wektorów

Wektory można dodawać graficznie (rys.1.6) dorysowując drugi wektor na końcu pierwszego. Wektor będący sumą ciągniemy od początku pierwszego wektora do końca drugiego.

Na przykład, przyjmijmy, że interesują nas tylko 2 wymiary – odpowiadające dwóm kierunkom w przestrzeni – poziomy i pionowy. Siła ciężkości działająca w dół ma składową poziomą zero, a składową pionową ujemną, np. –1000 N. Taki wektor zapiszemy:

Q = (0, -1000) N.

Siła reakcji podłoża na równi pochyłej będzie skierowana prostopadle do podłoża (pochyłego), a więc będzie odchylona od pionu. Zatem posiadać będzie zarówno składową poziomą jak i pionową, $\mathbf{F}_R$ = (225, 947) N.



Rys. 1.7 Sumowanie wektorów sił

Wektory zapisane przy pomocy pary liczb, dodajemy, sumując poszczególne składowe. Na przykład, aby obliczyć wypadkową siłę ściągającą samochód w dół, należy dodać **Q** + $\mathbf{F}_R$.
Otrzymamy w tym wypadku siłę ściągającą:
F = (0 + 225, -1000 + 947) N.
F = (225, -53) N.
Siła ta ma składową 225 N w poziomie i składową 53 N w dół.

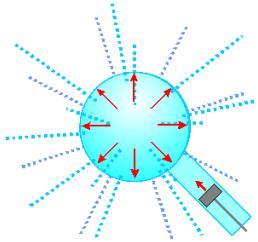
1.3 Ciśnienie, prawa Archimedesa i Pascala

Blaise Pascal (1623-1662 r.) sformułował następujące prawo:

Prawo Pascala

Ciśnienie zewnętrzne wywierane na płyn w zbiorniku zamkniętym rozchodzi się we wszystkich kierunkach tak, że ciśnienie wewnątrz zbiornika jest wszędzie jednakowe i równe ciśnieniu zewnętrznemu.

Pomijamy przy tym ciśnienie hydrostatyczne - powstające pod wpływem ciężaru cieczy.
Czasem, widząc wypływającą z kranu i spływająca na dół wodę, mamy chęć zatkać kran palcem. Okazuje się wtedy, że woda zaczyna sikać we wszystkich kierunkach. Ktoś, kto wyszedł mokry z takiego eksperymentu, wie już, o co chodzi w prawie Pascala.
Na wykładzie przedstawialiśmy kolbę z dziurkami.



Rys 1.8 Kolba do demonstracji prawa Pascala

Kolba była napełniona wodą. Gdy tłok został wciśnięty do cylindra, z

otworów w sferycznej części kolby wyrzucone zostały strumienie wody tak, jak to przedstawia rysunek 1.7. Woda leciała we wszystkich kierunkach równomiernie, potwierdzając słuszność prawa Pascala.
Pozostaje jeszcze pytanie: czym dokładnie jest ciśnienie?

Ciśnienie (!)

Ciśnienie p to siła działająca na jednostkę powierzchni:

$$p = F/S, \qquad (1.1)$$

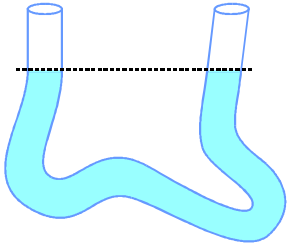
gdzie: F – siła, S - powierzchnia, na którą działa.

Jednostka ciśnienia: 1 Pa = 1 N/m^2 ≈ 0,00001 at
1 at = 1 kG/cm^2 (atmosfera techniczna)

Ciśnienie mierzymy barometrem lub ciśnieniomierzem.
Ciśnienie jest skalarem.

Ciśnienie atmosferyczne wynosi 100 000 Pa = 1000 hPa = 0,1 MPa = 1 bar ≈ 1 atm

Naczynia Pascala



Rys. 1.9
Zgodnie z prawem Pascala, bez względu na kształt naczynia ciśnienie będzie takie samo.

Dzięki prawu Pascala wiemy, że poziom jednorodnej cieczy w

naczyniach połączonych będzie taki sam. Ponadto wnioskujemy, że ciśnienie zależy tylko od wysokości słupa cieczy.

$$p = h\rho, \qquad (1.2)$$

gdzie: ρ - ciężar właściwy cieczy.

Nurek Kartezjusza (!)

Przyrządy i materiały
- duża butelka plastikowa ze szczelną zakrętką,
- mała buteleczka (np. po aromacie do ciasta) albo rurka o średnicy 5 – 10 mm z zamkniętym jednym końcem,
- plastelina.

Przebieg doświadczenia
Nurka wykonujemy z małej buteleczki (lub rurki) obciążonej plasteliną u wylotu tak, aby pływał otwartym końcem do dołu, nie wynurzając się ponad powierzchnię wody. Tak wyważonego nurka umieszczamy w dużej butelce napełnionej po brzegi wodą. Następnie szczelnie zakręcamy butelkę.

Gdy ściśniemy butelkę, ciśnienie wewnątrz wzrośnie (o ile będzie szczelna).

Ponieważ ciśnienie działa we wszystkich kierunkach, na wszystkie obiekty w cieczy, wzrost ciśnienia wody spowoduje zmniejszenie objętości powietrza w nurku, co zmniejszy siłę wyporu i nurek opadnie na dno.

Rys. 1.10 Nurek pływający w butelce.

Gdy puścimy butelkę, ciśnienie spadnie. Rozprężające się powietrze wypchnie wodę z wnętrza nurka i nurek wypłynie.

Jeżeli korek nie będzie należycie szczelny, ściśnięcie butelki spowoduje jedynie wylanie się wody, a ciśnienie nie wzrośnie. Nurek będzie cały czas pływał.

Doświadczenie to ilustruje prawo Pascala, ale pokazuje też, że siła wyporu zależy od objętości wypartej wody, co jest treścią prawa Archimedesa.

Prawo Archimedesa

Ciało zanurzone w płynie (cieczy, gazie) traci na wadze tyle, ile waży wyparty przez nie płyn.

Mówimy, że na ciała zanurzone w płynie działa do góry **siła wyporu** cieczy, która przeciwstawia się ciężarowi ciała.

Balon z worka na śmieci (!)

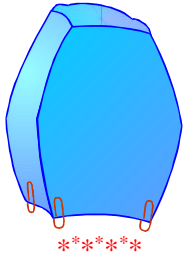
Przyrządy i materiały

- worek na śmieci 35-litrowy, cienki,
- 4 spinacze biurowe, świeczki, 5 – 7 sztuk.

Przebieg doświadczenia

Worek foliowy obciążamy spinaczami na brzegach. Zapalamy świeczki i napełniamy balon rozgrzanym powietrzem. Należy uważać, aby folia nie zaczęła się topić.

Balon unosi się dzięki sile wyporu. Ciepłe powietrze wewnątrz balonu ma mniejszy ciężar właściwy niż wyparte przez nie zimne powietrze. Ciężar balonu z ciepłym powietrzem jest zatem mniejszy od siły wyporu.



Rys. 1.11 Balon

Dane dla balonu z wykładu:
Ciężar worka = 4,6 G,
ciężar 4 spinaczy = 1,6 G,
razem Q_S = 6,2 G.
Pojemność worka = 35 *l*.

Ciężar powietrza w worku w temperaturze pokojowej Q_0 = 42 G.
Ciężar powietrza w worku w wyższej temperaturze:
77°C = 350 K → Q_1 = 37 G,
127°C = 400 K → Q_2 = 32 G.
A więc balon uniesie się, gdy temperatura powietrza w środku osiągnie około 100°C.

Ciężar właściwy

Ciężar właściwy ρ jest to ciężar ciała o jednostkowej objętości.

$$\rho = \frac{Q}{V} \qquad (1.3)$$

gdzie Q – ciężar ciała, a V – jego objętość.

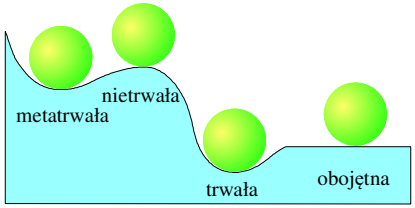
Jednostką ciężaru właściwego jest N/m^3.
Często używa się też 1 kG/*l* = 1 G/cm^3 = 9810 N/m^3.
Przykłady:
woda: 1000 kG/m^3 (1 kG/*l*, 1 G/cm^3),
drewno: 700 kG/m^3,
stal: 7800 kG/m^3,
złoto: 19280 kG/m^3,
powietrze: 1,25 kG/m^3.

Widać, że powietrze jest ponad 10 tysięcy razy lżejsze od złota. Nie można jednak powiedzieć, że nic nie waży.
Na przykład, w typowym pokoju o powierzchni 20 m^2 i wysokości 2,5 m (czyli objętości V = 50 m^3) jest ponad 60 kG powietrza!

1.4 Równowaga, środek ciężkości

Równowagę możemy osiągnąć, gdy jakiejś sile przeciwstawimy drugą o tej samej wartości.
Ten warunek wystarczyłby w przestrzeni jednowymiarowej (np. wewnątrz rurki, czy wzdłuż liny). Czy wystarczy w wielowymiarowej przestrzeni? - Nie. W przestrzeni siły muszą mieć dokładnie przeciwne kierunki. Punkty, do których są przyłożone, powinny też być na tej samej prostej, co siły.

Rodzaje równowagi (!)



Rys. 1.12 Ilustracja obrazująca rodzaje równowagi.

Ciało, które znajduje się w równowadze, może zostać poruszone krótko działającą siłą i wytrącone z równowagi. To co się stanie dalej zależy od rodzaju równowagi w jakim znajduje się ciało.

1. **Równowaga obojętna** występuje wtedy, gdy ruch w bok nie zmienia warunków równowagi
2. **Równowaga trwała** będzie wtedy, gdy po wyjściu ciała z punktu równowagi pojawi się siła zwrotna, sprowadzająca ciało z powrotem do punktu równowagi.
3. Ciało jest w **równowadze nietrwałej**, gdy po wyjściu ciała z

punktu równowagi pojawi się siła odpychająca ciało dalej od punktu równowagi.

Powyższe kryteria równowagi wykorzystują pojęcie siły. W bardziej ogólnym przypadku o równowadze decydować mogą inne wielkości fizyczne. Na przykład, w ruchu obrotowym równowaga występuje, gdy momenty sił sumują się do zera; a w hydrodynamice, gdy przepływy sumują się do zera.

Jak postawić korek z widelcami na gwoździu?

Przyrządy i materiały
- Korek, gwóźdź, 2 widelce.
- Podstawka np. butelka.

Przebieg doświadczenia

Gwóźdź wbijamy w korek.
Gwóźdź z korkiem postawiony na czubku oczywiście przewróci się.
W korek wbijamy widelce w taki sposób, aby ich trzonki opadały mocno w dół.
Całą konstrukcję stawiamy na czubku gwoździa, na podstawce. Jeśli widelce będą skierowane mocno w dół, to cały układ będzie w równowadze.

Rys. 1.13 Korek z widelcami

Wniosek:
Aby utrzymać równowagę, środek ciężkości układu musi być nisko.

Wyznaczanie środka ciężkości (!)

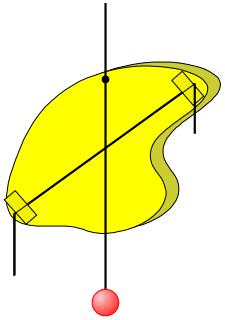
Przyrządy i materiały
- badane ciało (najlepiej, aby było płaskie, np. deska, blacha),
- wieszak i nici,
- plastelina i plaster klejący.

Przebieg doświadczenia

Nić jest ważnym przyrządem. Ze swej natury ustawia się ona zawsze wzdłuż kierunku przyłożonej siły (lub sumy sił). Jeśli siła zmieni kierunek, to nić natychmiast przesunie się tak, aby ułożyć się wzdłuż linii wyznaczonej przez tą siłę.

Przywiązujemy na końcu nitki kulkę z plasteliny. Obciążona nić pokazuje kierunek pionowy (taki przyrząd nazywa się pionem).
Wieszamy badany obiekt obok nici, a następnie przyklejamy nitkę plastrem do badanego ciała, zaznaczając w ten sposób prostą, wzdłuż której działa siła ciężkości.

Następnie wieszamy badany obiekt za inny jego punkt i powtarzamy procedurę z wyznaczaniem pionu.



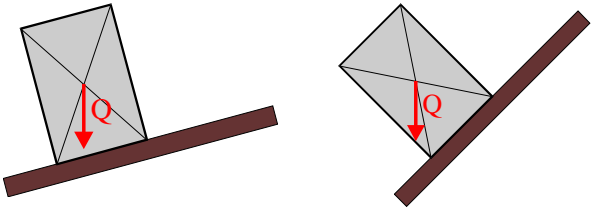
Rys. 1.14 Pion na tle badanego ciała

Punkt przecięcia się dwóch prostych, wzdłuż których działały siły ciężkości, jest poszukiwanym punktem będącym umownym miejscem przyłożenia siły ciężkości, czyli środkiem ciężkości ciała.

Kryteria równowagi układów sztywnych (!)

Doświadczenie z wieszaniem ciała na nitce przekonało nas, że ciało będzie w równowadze, gdy powiesimy je w punkcie powyżej jego środka ciężkości.

Wiele ciał jest w równowadze, nawet jeśli ich środek ciężkości jest wysoko. Ma to miejsce na przykład wtedy, gdy zamiast pojedynczego punktu mamy podparcie rozciągłe.



Rys. 1.15 Klocek na desce. Po lewej - w równowadze, po prawej - przewracający się.

Prostopadłościan spoczywa w równowadze trwałej, pomimo,że jego środek ciężkości znajduje się powyżej podparcia, ponieważ ma podparcie o dużej powierzchni. Mówimy, że jest to podparcie rozciągłe. Gdy prostopadłościan zaczniemy przechylać (patrz rys. 1.14), to w pewnym momencie przewróci się.

Dokładna obserwacja pokazuje, że prostopadłościan jest w równowadze dopóty, dopóki **rzut pionowy** środka ciężkości przechodzi **wewnątrz obrysu podstawy**.

Musimy zatem uwzględniać różne kryteria równowagi dla ciał o różnych podparciach.

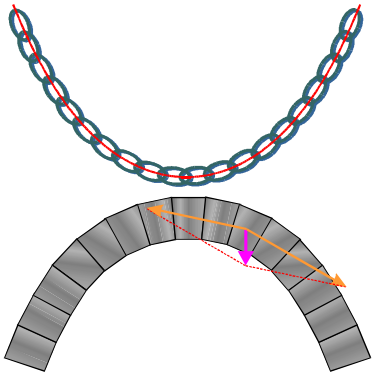
Kryteria równowagi:

Podparcie punktowe:	Podparcie rozciągłe
Jeżeli **podparcie** (zawieszenie) znajduje się **powyżej środka ciężkości**, to ciało jest w równowadze trwałej.	Jeżeli **rzut pionowy** środka ciężkości przechodzi **wewnątrz obrysu podstawy**, to ciało jest w równowadze trwałej.

Ciekawym przykładem elementów opierających się na powierzchniach rozciągłych jest konstrukcja portalu w kształcie łuku, czyli arkady.

Sklepienie w takiej konstrukcji złożone jest z wielu elementów o zbiegających się ścianach bocznych. Kolejne elementy opierają się na sąsiednich i całość budowli zachowuje równowagę.

Optymalny sposób konstrukcji łuku polega na takim dobraniu kształtu poszczególnych elementów, aby siły działające na stykające się powierzchnie były prostopadłe do płaszczyzn styku. Wektory te będą zatem styczne do krzywej przeciągniętej przez środki elementów.

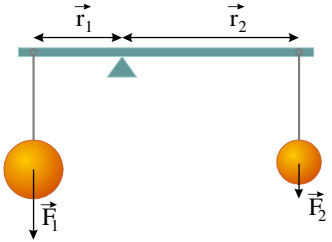


Rys. 1.16 Łańcuch i arkada. Wektory przedstawiają rozkład sił.

Ta obserwacja podpowiada nam, jak wyznaczyć optymalny kształt łuku. Otóż ogniwa wiszącego łańcucha też muszą się tak ustawić, aby wypadkowe siły były równoległe do krzywej wyznaczonej przez środki ogniw. Zatem kształt łuku powinien być taki sam jak kształt łańcucha.

1.5 Moment siły

Równowaga momentów (!)



Rys. 1.17 Równowaga dźwigni dwustronnej

Dźwigni dwustronna (waga) jest w równowadze, jeżeli siły są odwrotnie proporcjonalne do ramion. Czyli małe ramię – duża siła. Dzięki temu, używając dźwigni, można podnosić duże ciężary. Matematycznie oznacza to, że stały musi być iloczyn siły i ramienia.

$$r_1 F_1 = r_2 F_2 \qquad (1.4)$$

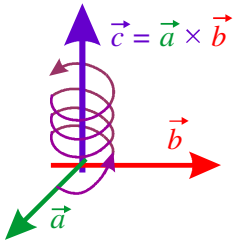
Widać, że iloczyn siły i ramienia ma tu większe znaczenie niż siła. Iloczyn taki nazywamy momentem siły.

Moment siły (!)
jest iloczynem (wektorowym) ramienia siły i siły:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}, \qquad (1.5)$$

Moment siły można zwiększyć, zwiększając siłę lub ramię tej siły. Możliwość tę wykorzystujemy, używając dźwigni. Ma ona znaczenie także w przypadku przekładni i innych urządzeń mechanicznych.

Iloczyn wektorowy



Rys. 1.18 Mnożenie wektorów: reguła śruby prawoskrętnej

Kierunek wektora ***c***, będącego iloczynem wektorowym wektorów ***a*** i ***b,*** jest ustalany przy pomocy reguły śruby prawoskrętnej.
Jeżeli wektory ***a*** i ***b*** tworzą kąt α, to ich iloczyn dany jest wzorem:

$$\vec{a} \times \vec{b} = ab\sin(\alpha) \qquad (1.6)$$

Z właściwości funkcji sinus wynika, że jeżeli $\boldsymbol{a} \parallel \boldsymbol{b}$, *to* $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = 0$.
Jeżeli $\boldsymbol{a} \perp \boldsymbol{b}$, to długość wektora $\boldsymbol{c} = \boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$ wynosi $c = ab$.

Jeżeli siła jest prostopadła do ramienia, to moment siły wynosi po prostu $M = r \cdot F$. Jeżeli natomiast siła jest równoległa, to właściwości iloczynu wektorowego sprawiają, że $M = 0$.

Środek ciężkości i środek masy

Ponieważ siła ciężkości F jest proporcjonalna do masy ($F = mg$), to środek ciężkości będzie też środkiem masy danego ciała.
Ciało podparte w środku ciężkości będzie w równowadze, co daje nam receptę na wyznaczenie środka ciężkości przy pomocy obliczeń. Wystarczy znaleźć punkt, dla którego suma momentów sił ciężkości

$(\Sigma_i \, r_i F_i)$ wynosi zero.

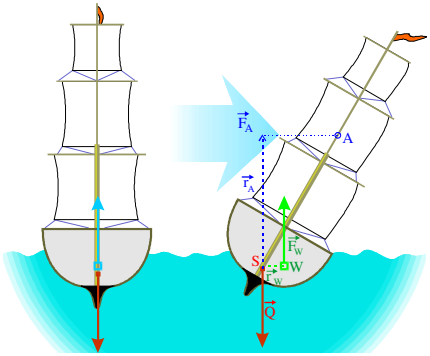
W ogólności, ciało może być złożone z elementów o masach m_1, m_2,.. m_i,.. m_n mogą być opisane wektorami r_1, r_2,.. r_i,.. r_n.

Wtedy środek masy można wyliczyć ze wzoru:

$$\vec{r}_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} \qquad (1.7)$$

Położenie środka ciężkości (i środka masy) jest wektorem.

Model okrętu



Rys. 1.19 Równowaga momentów działających na żaglowiec

W układach rzeczywistych siły działają często w różnych kierunkach. Przykładem może być tu równowaga sił działających na żaglowiec (patrz rys. 1.19).

S - środek ciężkości – miejsce przyłożenia siły ciężkości Q.

W - środek wyporu – miejsce przyłożenia siły wyporu F_W.

$\mathbf{r}_W$ – ramię siły wyporu.

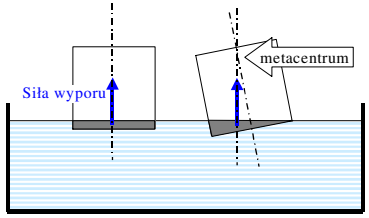
A - środek ożaglowania – miejsce przyłożenia siły aerodynamicznej, F_A.

r_A – ramię siły aerodynamicznej (narysowana jest składowa prostopadła do siły).

Aby statek unosił się na wodzie, wystarczy, że $\mathbf{F}_W = Q$. Gdy nie ma wiatru, żeby statek był stabilny, jego środek wyporu musi się znajdować powyżej środka ciężkości.

Chcąc uwzględnić siłę wiatru, musimy rozważyć momenty siły aerodynamicznej i siły wyporu. Gdy statek przechyla się pod wpływem wiatru, część nawietrzna kadłuba wynurza się, a część zawietrzna zanurza się. Dzięki temu środek objętości wody wypartej przez kadłub (środek wyporu) przesuwa się na zawietrzną. Zakładając, że statek obraca się dookoła środka ciężkości, należy przyjąć, że przesunięcie pomiędzy środkiem wyporu, a środkiem ciężkości, jest ramieniem siły wyporu. Zatem możemy obliczyć moment siły wyporu: $\mathbf{M}_W = \mathbf{r}_W \times \mathbf{F}_W$. Analogicznie policzymy moment siły aerodynamicznej, $\mathbf{M}_A = \mathbf{r}_A \times \mathbf{F}_A$. Aby statek był w równowadze, momenty sił wyporu i aerodynamicznej muszą być równe (ale przeciwnie skierowane): $\mathbf{r}_W \times \mathbf{F}_W = -\mathbf{r}_A \times \mathbf{F}_A$.

Metacentrum



Rys. 1.20 Równowaga pływającego klocka

Gdy pływające ciało przechylimy, punkt przyłożenia siły wyporu

przesunie się. Aby wyznaczyć warunek równowagi, konieczne jest pojecie metacentrum siły wyporu.

Metacentrum to punkt przecięcia linii działania siły wyporu i osi symetrii ciała.

Warunek równowagi ciała pływającego:
Aby obiekt pływający był w równowadze, metacentrum musi być powyżej środka ciężkości.

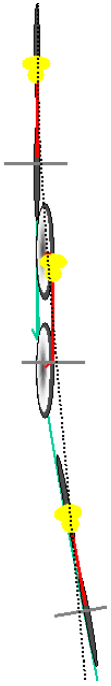
Metacentrum sił podparcia możemy znaleźć także dla innych ciał, które na skutek nietypowego zawieszenia mają podparcie zmienne. Wtedy zawsze obowiązywać będzie kryterium równowagi, mówiące, że metacentrum podparcia musi być powyżej środka ciężkości.

Różne kryteria równowagi zamieszczone są w poniższej tabeli.

Kryteria równowagi trwałej

Podparcie punktowe:	Podparcie rozciągłe	Podparcie zmienne
Jeżeli **podparcie** (zawieszenie) znajduje się **powyżej środka ciężkości**, to ciało jest w równowadze trwałej.	Jeżeli **rzut pionowy** środka ciężkości przechodzi **wewnątrz obrysu podstawy**, to ciało jest w równowadze trwałej.	Jeżeli **metacentrum** siły podparcia jest **powyżej środka ciężkości**, to ciało jest w równowadze trwałej.

Zachowanie równowagi na rowerze



Rys. 1.21

Gdy rower stoi nieruchomo, równowagę można utrzymać tylko przez balansowanie ciałem, co jest bardzo trudne.
Na szczęście, gdy jedziemy, wspomaga nas mechanika.
Gdy rower porusza się, możemy kontrolować równowagę przez drobne zmiany kierunku jazdy.

Na rysunku 1.21 niebieska, ciągła linia oznacza tor roweru, natomiast czarna przerywana krzywa pokazuje ruch środka ciężkości układu rower + rowerzysta.

Jeśli rower przechyli się i środek ciężkości znajdzie się poza podparciem, wtedy wystarczy wykonać lekki skręt.

Rower zmieni kierunek jazdy i podjedzie pod środek ciężkości układu. W ten sposób równowaga zostanie odzyskana.

Zmiany kierunku są tak drobne, że jadąc nawet nie zauważamy, że odruchowo poruszamy kierownicą.

1.6 Podsumowanie

Podstawą fizyki jest doświadczenie i towarzyszący mu pomiar. Pomiar pozwala przedstawić wielkości fizyczne przy pomocy liczb.

Wielkości fizyczne mogą być skalarami lub wektorami Na tym wykładzie omówione zostały, miedzy innymi, następujące wielkości:

- **skalarne:**
  - ciśnienie,
  - masa,
  - ciężar właściwy;
- **wektorowe**
  - położenie (w tym położenie środka ciężkości),
  - siła,
  - moment siły.

Ciała mogą znajdować się w równowadze trwałej, nietrwałej (chwiejnej) lub obojętnej.

Kryteria równowagi trwałej

Podparcie punktowe:	Podparcie rozciągłe	Podparcie zmienne
Jeżeli **podparcie** (zawieszenie) znajduje się **powyżej środka ciężkości**, to ciało jest w równowadze trwałej.	Jeżeli **rzut pionowy** środka ciężkości przechodzi **wewnątrz obrysu podstawy**, to ciało jest w równowadze trwałej.	Jeżeli **metacentrum** siły podparcia jest **powyżej środka ciężkości**, to ciało jest w równowadze trwałej.