

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.

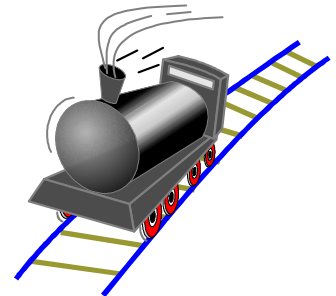
2. Opis i przewidywanie ruchu

2.1 Wstęp

Wykład ten poświęcony jest analizie i opisywaniu ruchu. Zajmujący się tym dział fizyki nazywamy kinematyką. Następnie rozważać będziemy zmiany występujące pod wpływem sił. Dział fizyki, który zajmuje się przyczynami ruchu nazywa się dynamiką.

Plan wykładu:

1. Wstęp
2. Czas, przestrzeń i prędkość
3. Względność ruchu
4. Ruch pod wpływem sił
5. Grawitacja
6. Ruch obrotowy



Aby wprawić w ruch, potrzebna jest siła.

2.2 Czas, przestrzeń i prędkość

W teorii klasycznej **położenie** jest niezależnym parametrem, określającym miejsce, w którym dzieją się zjawiska fizyczne.

Położenie określamy względem wybranego obiektu – układu współrzędnych.

Jeżeli położenie zmieni się, to zmianę tę określimy podając **przesunięcie**. Przestrzeń jest trójwymiarowa, a więc położenie i przesunięcie są wektorami.

Przestrzeń mierzymy w jednostkach długości. Podstawowa jednostką jest metr [m] (i pochodne cm, km ...). Ponadto spotyka się też:

angstremy [Å], $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$,
cale ["], $1'' = 0,0254 \text{ m}$,
mile itp.

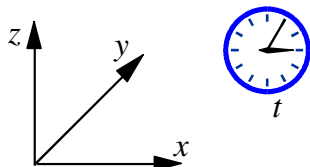
W teorii klasycznej **czas** jest niezależnym parametrem, na który nie mamy wpływu, a do którego odnosimy wszystkie zjawiska dynamiczne, czyli zmienne w czasie.

Czas jest wielkością skalarną.

Podstawowa jednostką jest sekunda [s] (i pochodne ms, μs ...).

Ponadto używamy minut [min], godzin [h] itd.

Obecnie jesteśmy w stanie mierzyć czas z dokładnością do femtosekund $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$.



Rys. 2.1 Przestrzeń i czas

W teorii klasycznej mamy zatem trójwymiarową przestrzeń (x, y, z) oraz niezależny parametr, czas, t .

Obecnie wiemy, że czas i przestrzeń nie są niezależnymi parametrami i tworzą razem czterowymiarową czasoprzestrzeń. W przestrzeni tej czas i odległości są względne, różne dla różnych układów odniesienia. Wielkości fizyczne w czasoprzestrzeni opisywane są przy pomocy czterowektorów, na przykład, położenie: (ct, x, y, z) .

Prędkość jest to droga przebyta w jednostkowym czasie. Stwierdzenie to zapisujemy za pomocą wzoru:

$$v = s/\Delta t, \quad (2.1)$$

gdzie: v – prędkość, s – przebyta droga, Δt - upływ czasu.

Wzór ten podpowiada nam najprostszy sposób wyznaczenia prędkości: należy zmierzyć drogę i czas, a potem policzyć prędkość. Do wyznaczania drogi używamy mierników odległości. Czas wyznaczamy przy pomocy zegarów, stoperów itp. Na wykładzie do automatyzacji pomiaru prędkości wykorzystujemy między innymi fotokomórki, licznik, mikrofon, oscyloskop i komputer.

Wyznaczanie prędkości przechodzącej osoby (!)

Przyrządy i materiały

- eksperymentator z deską o znanej długości,
- fotokomórka,
- stoper sterowany fotokomórką lub komputer,

Przebieg doświadczenia

Eksperymentator idzie niosąc przedmiot o znanej długości (np. deskę o długości 1 m). Przedmiot ten przesłania fotokomórkę. Układ cyfrowy mierzy czas zasłonięcia fotokomórki. Prędkość obliczamy (my lub komputer) na podstawie wzoru (2.1).

Wyznaczona w ten sposób prędkość jest średnią prędkością eksperymentatora na drodze 1 m.

Idący człowiek porusza się z prędkością 1-2 m/s.

Jednostki prędkości są pochodnymi jednostek, w których mierzymy czas i przestrzeń:

1 m/s = 3,6 km/h

1 węzeł [kn] (mila m./h) = 1,852 km/h

1 mile per hour [mph] = 1,609 km/h

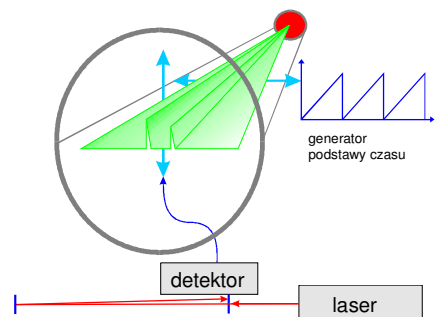
Uwaga 1:

W przestrzeni trójwymiarowej, droga (przesunięcie) może być wektorem, a więc prędkość też: $\vec{v} = \vec{s}/t$.

Uwaga 2:

Wartość wektora prędkości nazywamy szybkością. Mówiąc "prędkość" w zasadzie mamy na myśli wektor, a więc także kierunek, w którym ktoś się porusza. Poza fizyką rozróżnienie to nie jest respektowane.

Do pomiaru czasu możemy wykorzystać oscyloskop. Na przykład można wysłać okresowo impulsy z lasera i rejestrować je przy pomocy detektora podłączonego do oscyloskopu.



Rys. 2.2 Pomiar czasu przy pomocy oscyloskopu

Oscyloskop jest urządzeniem, które na swoim ekranie wyświetla sygnał w funkcji czasu. Dawniej oscyloskop po prostu przesuwiał w poziomie płamkę. Nadchodzący sygnał odchyłał tę płamkę w pionie. Obecnie oscyloskopy zapamiętują sygnał w postaci cyfrowej, a następnie tworzą wykres z osią poziomą, jako osią czasu.

Dzięki oscyloskopowi, możemy zmierzyć czas odczytując odległość pomiędzy impulsami.

Oscyloskopy są naturalnym narzędziem do badania przebiegów sygnałów elektrycznych. Jednak przetwarzając różne efekty mechaniczne lub optyczne na prąd, możemy wykorzystać oscyloskop do badania innych szybkich zjawisk. Obecnie przy pomocy najszybszych oscyloskopów można mierzyć zjawiska dziejące się w skali czasu rzędu 10^{-11} s.

Pierwsza zasada dynamiki (!)

Spośród różnych rodzajów ruchu, najprostszym przypadkiem jest taki ruch, w którym nie występują żadne siły. Mówi o tym pierwsza z zasad dynamiki:

Pierwsza zasada dynamiki Newtona

Ciało, na które nie działa żadna siła, albo działają siły równoważące się, pozostaje w spoczynku albo **porusza się** ruchem jednostajnym po linii prostej.

Fakt że ciało, na które nie działa żadna siła, porusza się, jest być może sprzeczny z naszą intuicją, ale zgodny ze starannymi doświadczeniami.

Ruch jednostajny to ruch ze stałą prędkością.

W ruchu jednostajnym, zależność drogi od czasu można opisać wzorem:

$$s(t) = s_0 + v \cdot t. \quad (2.2)$$

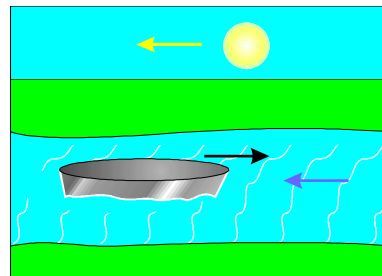
Wykres tej zależności jest linią prostą. Mówimy, że $s(t)$ jest funkcją liniową.

Ruch jednostajny możemy zaobserwować, gdy pozbedziemy się sił oporu, na przykład: w próżni, na torze powietrznym lub gdy zrównoważymy siły oporu, na przykład, jadąc na rowerze i naciskając lekko na pedały, tak by utrzymać stałą prędkość.

W większości przypadków na poruszające się ciała działają istotne siły oporu zatrzymując z czasem ich ruch. Często jako przykład ruchu 'wiecznego' podaje się ruch ciał niebieskich lub ruch wahadła. Przykłady te pomagają nam wyobrazić sobie, jak wygląda ruch bez wpływu sił, ale należy pamiętać, że zarówno ruch po orbicie jak i ruch drgający **nie** są ruchami jednostajnymi. W przypadku ruchu po orbicie zmienia się kierunek prędkości.

2.2 Względność ruchu

Mówiąc o ruchu musimy wskazać, względem jakiego układu odniesienia ten ruch się odbywa.



Rys. 2.3 Co porusza się względem czego?

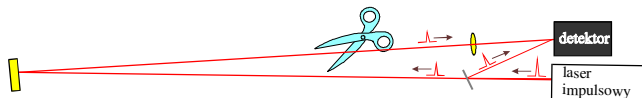
Zwracał na to uwagę już Zenon z Elei, podając przykład wyścigu rydwanów. Znany jest też przykład podany przez Galileusza, mówiący o pasażerze podróżującym statkiem. Pasażer statku płynącego po spokojnej wodzie, nie mając możliwości wyjrzenia na zewnątrz, nie wie, czy statek stoi, czy płynie. Można by sobie zadać pytanie, czy ten pasażer mógłby wykonać jakiś eksperyment, przy pomocy którego, nie wychodząc na zewnątrz, mógłby sprawdzić prędkość. Doświadczenie mówi, że to nie jest możliwe, gdyż wszystkie eksperymenty będą przebiegały tak samo, bez względu na to jaką prędkość będzie miał statek. Pod warunkiem oczywiście, że będzie to prędkość stała.

Zasadę tą określamy jako **zasadę względności Galileusza**. Możemy ją wyrazić słowami:

Każdy układ poruszający się ze stałą prędkością jest równoważny.

Wszystkie prawa fizyki w takich układach są identyczne.

Pomiar prędkości światła



Rys. 2.4 Pomiar prędkości światła

Na wykładzie przy pomocy fotodetektora sprzężonego z oscyloskopem mierzymy prędkość światła. Wysyłamy impuls lasera wzdłuż stołu i odbijamy go z powrotem w kierunku detektora. Równocześnie część impulsu kierujemy krótszą drogą. W ten sposób do detektora docierają dwa impulsy, które przebyły różną drogą. Drogę tę mierzymy miarką (w metrach). Sygnał z detektora podajemy na oscyloskop i mierzymy różnicę czasu pomiędzy impulsami: pierwszym, który odbity został przez płytkę światłodzielną i drugim, który przebył całą drogę wzdłuż stołu i odbity został przez zwierciadło. Czas mierzymy w nanosekundach, ns, $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$. Dzieląc drogę przez czas otrzymujemy wynik około 0,3 m/ns.

Zgodnie z układem S.I. prędkość światła wynosi dokładnie:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s.}$$

W przybliżeniu jest to:

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s} = \mathbf{0,3 \text{ m/ns}}$$

Tak więc wynik otrzymany na wykładzie dobrze zgadza się z wartością rzeczywistą.

Zasada względności Einsteina jest rozszerzeniem zasady względności Galileusza na prędkość światła.

Zasada względności Einsteina:

We wszystkich układach poruszających się ze stałą prędkością, prędkość światła jest taka sama.

Aby prędkość światła była stała, czas musi płynąć wolniej, a odległości muszą ulec skróceniu. Aby to pogodzić, musimy przyjąć, że geometria czasoprzestrzeni jest inna niż nam się wydaje. W układach poruszających się czas biegnie wolniej, a odległości skracają się. Skrócenie odległości i spowolnienie upływu czasu możemy obliczyć

dzieląc te wielkości przez współczynnik $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Elektrony w lampach kineskopowych poruszają się z prędkościami relatywistycznymi, $\gamma = 1,02$.

Z powodu spowolnienia czasu wywołanego prędkością, zegary na satelitach GPS spóźniałyby się o 7 μs na dobę ($\gamma = 1,0000000001$).

2.3 Ruch pod wpływem sił

Arystoteles (384 - 322 p.n.e.) podał następujące twierdzenia opisujące ruch pod wpływem siły (a w szczególności siły ciężkości):

- Do istnienia ruchu potrzebna jest siła.
- Ciała spadają ze stałą prędkością, proporcjonalną do ciężaru.
- Powietrze podtrzymuje ruch.

Aby uniknąć problemu ruchu w przypadku braku powietrza stwierdził, że natura nie znosi próżni.

Inne zdanie miał Izaak Newton (1643 - 1727 n.e.), który oparł się na doświadczeniach własnych i swoich poprzedników:

- Ruch jednostajny nie wymaga siły podtrzymującej.
- W próżni wszystkie ciała, niezależnie od ciężaru, spadają z tym samym przyspieszeniem.
- Powietrze stawia opór.

Pierwsze dwa stwierdzenie Newton odbierane są jako sprzeczne z intuicją. Niemniej jednak, doświadczenia wykonane w XVII i XVIII wieku jednoznacznie potwierdziły teorię Newtona.

Bardzo ważnym pojęciem, na którym opiera się dynamika Newtona, jest bezwładność.

Bezwładność

Wszystkie ciała materialne mają pewną cechę - sprzeciwiają się wprawieniu ich w ruch lub zatrzymaniu. Cechę tą nazywamy bezwładnością. Nie należy bezwładności mylić z oporem ruchu. Opór zawsze spowalnia ciało, a bezwładność sprawia między innymi, że rozpędzone ciało trudno jest zatrzymać.

W fizyce pojęcie bezwładności jest ściśle związane z pojęciem masy. Mówimy, że masa jest miarą bezwładności danego ciała.

Rolę bezwładności dobrze ilustruje doświadczenie ze zrywaniem nitki, na której wisi ciężarek:

Zrywanie nitki powyżej lub poniżej ciężarka (!)

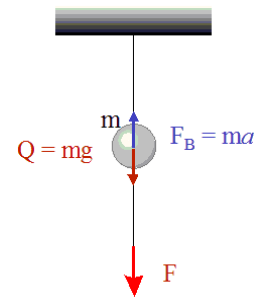
Przyrządy i materiały

- kulka z dwoma haczykami do zaczepienia nitek,
- stojak,
- nitka,
- rękawiczka.

Przebieg doświadczenia

Jeżeli za nitkę będziemy ciągnąć ostrożnie, powoli ją naprężając, to zerwiemy górną nitkę, bo będzie działała na nią siła, z którą ciągniemy plus ciężar kulki.

Jeżeli za nitkę szarpniemy, to zerwiemy dolną nitkę. Wytworzona przez nas siła nie będzie działała na górną nitkę, bo zostanie zrównoważona na skutek bezwładności kulki.



Rys. 2.5 Siły działające na nitkę

Druga zasada dynamiki (!)

Ruch pod wpływem sił, w przypadku ciał obdarzonych masą opisuje następujące twierdzenie:

Druga zasada dynamiki Newtona

Przyspieszenie wywołane przez wypadkową siłę jest wprost proporcjonalne do tej siły a odwrotnie proporcjonalne do masy ciała. Kierunek i zwrot przyspieszenia są zgodne z kierunkiem i zwrotem wypadkowej siły.

Drugą zasadę dynamiki Newtona można zapisać za pomocą wzoru podającego zależność przyspieszenia a od masy ciała, m , i działającej na nie siły, F :

$$a = F/m \quad (2.3)$$

W twierdzeniu tym występuje przyspieszenie, czyli wielkość fizyczna opisująca zmianę prędkości, Δv , w czasie, $a = \Delta v/t$. Można powiedzieć, że przyspieszenie jest prędkością zmiany prędkości.

Ruch pod wpływem stałej siły

Tak więc zgodnie z II prawem dynamiki, prędkość ruchu zmienia się pod wpływem siły. Ruch, w którym prędkość nie jest stała, możemy opisać podając prędkość średnią v_{sr} lub prędkość chwilową $v(t)$.

Prędkość średnią obliczymy dla długiego odcinka czasu Δt , w którym przebyta została droga Δs jako $v_{sr} = \Delta s / \Delta t$. Analogicznie, jak we wzorze (2.1) podanym dla stałej prędkości.

Jeżeli ruch odbywa się pod wpływem stałej siły, to przyspieszenie jest stałe. Mówimy wtedy o ruchu jednostajnie przyspieszonym.

Prędkość w takim ruchu rośnie liniowo w funkcji czasu:

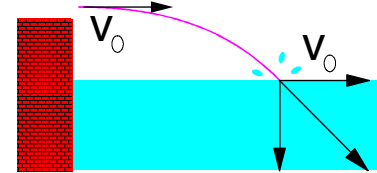
$$v(t) = v_0 + a \cdot t. \quad (2.4)$$

Jeśli ciało było początkowo nieruchome ($v_0 = 0$), to otrzymujemy zależność prędkości od czasu w postaci: $v(t) = a \cdot t$. Prędkość na początku wynosiła 0, a więc średnia po czasie t wyniesie $(0+v(t))/2 = v(t)/2$, czyli $v_{sr} = a \cdot t/2$.

Wiedząc, że droga $s = v_{sr} \cdot t$, otrzymujemy zależność drogi od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym (w przypadku $v_0 = 0$, $s_0 = 0$):

$$s = \frac{at^2}{2} \quad (2.5)$$

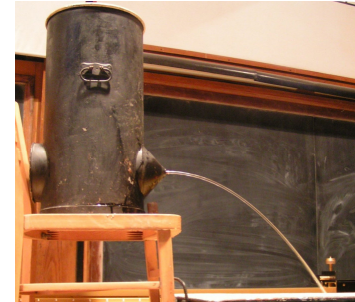
Rzut poziomy



Rys. 2.6 Rzut poziomy

W przypadku rzutu poziomego zakładamy, że prędkość w poziomie, w trakcie lotu obiektu jest stała i wynosi v_0 .

Prędkość w pionie dana jest wzorem (2.5), to znaczy rośnie proporcjonalnie do t^2 . Ponieważ położenie w poziomie, $x = v_0 t$, jest proporcjonalne do czasu, jakościowo kształt krzywej, $h(x)$, (czyli zależność wysokości od czasu) będzie taki sam, jak kształt krzywej $h(t)$ (czyli zależności wysokości od czasu).



Rys. 2.7 Strumień wody wypływający poziomo zakrzywia się w kształt paraboli.

W efekcie otrzymujemy tor o kształcie paraboli:

$$h(t) = h_0 - \frac{gt^2}{2} \quad (2.6).$$

gdzie g , to przyspieszenie ziemskie, $= 9,81 \text{ m/s}^2$

Kształt toru ciała wprawionego w swobodny ruch poziomy w polu grawitacyjnym możemy zobaczyć obserwując strumień wody (rys. 2.7). Analiza kształtu takiego strumienia pokazuje, że jest on praktycznie idealną parabolą.

Znajomość kształtu toru ciała wyrzuconego w powietrze wykorzystywana jest na przykład w artylerii, w lotnictwie, a także w sporcie, między innymi przy projektowaniu skoczni narciarskich.

Układ dwóch ciał

Do tej pory zakładaliśmy, że siła pochodzi od układu zewnętrznego i jest po prostu zadaną wartością. Ważnym przypadkiem w dynamice jest taki ruch, gdy siła działająca na dane ciało pochodzi od drugiego ciała, którego ruch w tej sytuacji też musimy brać pod uwagę.

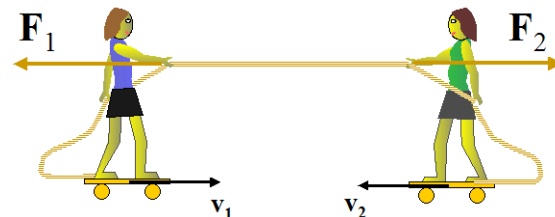
Przyciąganie się na wózkach

Przyrządy i materiały

- dwa wózki, mogą być desko-rolki,
- lina.

Przebieg doświadczenia

Dwie osoby stają na wózkach lub desko-rolkach i łapią za linę. Najpierw za linę ciągnie pierwsza osoba, potem druga. Należy ciągnąć dość energicznie, ale uważając, aby nie zrzucić partnera i nie doprowadzić do zbyt silnego zderzenia.



Rys. 2.8 Przyciąganie się na wózkach

Jeśli pierwsza osoba ciągnie drugą, to sama też jest wprawiana w ruch. Analogicznie, jeśli druga osoba ciągnie pierwszą, to również obie są wprawiane w ruch. Okazuje się przy tym, że $F_1 = -F_2$.

Trzecia zasada dynamiki Newtona

Jeżeli pierwsze ciało działa na drugie ciało pewną siłą (akcja), to ciało drugie działa na pierwsze ciało siłą (reakcja) o takiej samej wartości i kierunku, lecz o przeciwnym zwrocie.

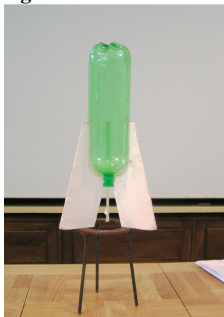
Dzięki temu prawu może powstać siła odrzutu, co sprawdzamy doświadczalnie przy pomocy rakiety na wodę.

Rakieta na wodę (!)

Przyrządy i materiały

- duża butelka plastikowa zamknięta korkiem, w który wbita jest rurka,
- karton lub styropian na stateczniki,
- rurka i pompka - optymalnie jest użyć elektrycznej pompki (sprężarki) samochodowej.

Przebieg doświadczenia



Rys. 2.9 Rakieta na wodę

Butelkę napełniamy do 1/3 wodą i pompujemy.

Gdy korek wystrzeli, ciśnienie powietrza będzie wyrzucać wodę wprawiając rakieta w ruch dzięki sile odrzutu.

Zgodnie z III prawem dynamiki, spodziewamy się, że siła jaka popycha rakieta jest równa sile jaką wytwarza ciśnienie powietrza działające na wyrzucaną wodę. Otrzymujemy w ten sposób siłę odrzutu.

Uwaga: eksperymentatorowi nie uchodzi to na sucho. Zasięg rakiety wynosi kilka metrów. Należy się upewnić, czy na jej drodze nie ma szyb ani innych delikatnych przedmiotów.

Masa i gęstość ciał (!)

Gęstość ciała definiujemy jako masę przypadającą na jednostkową objętość.

Obliczany ja zgodnie ze wzorem:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.7)$$

Jednostki gęstości:

kg/m³ - jednostka układu SI

oraz kg/l lub g/cm³.

1000 kg/m³ = 1 kg/l = 1 g/cm³.

Przykłady:

wodór 0,08 kg/m³,

woda 1000 kg/m³ (1 kg/l, 1 g/cm³),

platyna 21410 kg/m³.

Masa Ziemi $m_Z = 6 \cdot 10^{24}$ kg, a jej średnia gęstość $d = 5,5$ g/cm³.

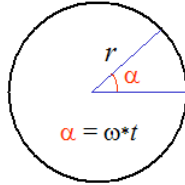
Gęstość ρ jest związana z ciężarem właściwym: $d = \rho \cdot g$, gdzie g , przyspieszenie grawitacyjne, = 9,81 m/s².

W fizyce nie należy mylić gęstości z lepkością (w języku potocznym gęstość może mieć te dwa znaczenia). Miód lub smoła mają dużą lepkość, natomiast przykładem cieczy o dużej gęstości może być rtęć. Rtęć ma około 10 razy większą gęstość od miodu, ale znacznie bardziej płynna, bo ma małą lepkość.

2.4 Ruch obrotowy

Przejście do ruchu obrotowego

W ruchu obrotowym występują wielkości analogiczne do już poznanych dla ruchu postępowego. Zazwyczaj jedno powiązane są z drugimi przez prostą operację mnożenia lub dzielenia przez promień okręgu, po którym odbywa się ruch obrotowy (r).



Rys. 2.10 Kąt i promień

Prędkość $v \rightarrow$ **prędkość kątowa:**

$$\text{skalarmie, } \omega = v/r. \quad \text{wektorowo: } \vec{\omega} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{r^2} \quad (2.8)$$

Prędkość kątową mierzymy miarą łukową (na jednostkę czasu), a więc w radianach na sekundę. Na ogół nie zapisuje się rad/s , ale s^{-1} .

Masa \rightarrow **moment bezwładności**

$$I = m r^2. \quad (2.9)$$

Miara momentu bezwładności jest: $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.

Siła \rightarrow **moment siły:**

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}. \quad (2.10)$$

Miarą momentu siły jest $\text{N} \cdot \text{m}$.

Odpowiednika liniowego nie ma częstość (częstotliwość) f , która jest odwrotnością okresu obrotu, $T: f = 1/T$. Częstość wiąże się z prędkością kątową $\omega = 2\pi f$.

W ruchu obrotowym występują też inne zjawiska odróżniające ten rodzaj ruchu. Ciekawy efekt można zaobserwować, między innymi, w prostym doświadczeniu ze szpulką:

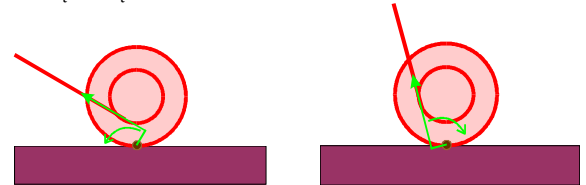
Szpulka tocząca się w dwie strony

Przyrządy i materiały

- szpulka o szerokiej osi,
- tasiemka do nawinięcia na szpulkę.

Przebieg doświadczenia

Nawijamy tasiemkę na szpulkę, kładziemy szpulkę na stole i ciągniemy za tasiemkę raz opuszczając ją płasko, a raz unosząc koniec wysoko. W zależności od ustawienia tasiemki, szpulka albo ucieka od nas, albo toczy się w naszą stronę.

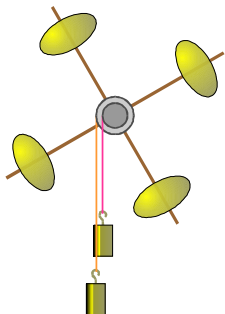


Rys. 2.11A Przyciąganie szpulki Rys. 2.11B Odpychanie szpulki

Kierunek w jakim porusza się szpulka zależy od ustawienia działającej siły względem osi obrotu.. Siła działa wzdłuż tasiemki, a osią obrotu układu jest punkt zetknięcia szpulki z podłożem. Odległość pomiędzy osią obrotu, a prostą, wzdłuż której działa siła, to ramię siły. W zależności od ułożenia tasiemki, prosta ta przechodzi powyżej (rys. 2.11A) lub poniżej (rys. 2.11B) osi obrotu. Zwrot momentu siły zależy też od zwrotu ramienia siły. Dzięki temu, zmieniając położenie tasiemki, zmieniamy zwrot ramienia, zwrot momentu siły i zwrot prędkości nadanej szpulce.

Wahadło Oberbecka

Przyrząd zwany wahadłem (krzyżem) Oberbecka składa się ze skrzyżowanych prętów, na których znajdują się cztery masywne ciała. Układ może obracać się na osi. Układ możemy wprawić w ruch przy pomocy ciężarków, które możemy powiesić na nitce nawiniętej na grubszą lub cieńszą część bębna znajdującego się na osi. Uzyskujemy w ten sposób większe lub mniejsze ramie siły.



Rys. 2.12 Wahadło (krzyż) Oberbecka

Obowiązuje tutaj zasada dynamiki podobna do II zasady dynamiki Newtona.

Druga zasada dynamiki dla ruchu obrotowego:

Przyspieszenie kątowe jest proporcjonalne do momentu siły i odwrotnie proporcjonalne do momentu bezwładności.

Obserwujemy, że:

Gdy nitka nawinięta jest na mały bęben ramie jest małe i przyspieszenie też jest niewielkie.

Nitka nawinięta na bęben o dużej średnicy → duże ramie → większe przyspieszenie.

Wniosek:

Przyspieszenie kątowe jest proporcjonalne do momentu siły - analogicznie jak w przypadku liniowym.

Prawo to można zapisać wzorem:

$$\text{skalarnie: } \varepsilon = M/I, \quad \text{wektorowo: } \vec{\varepsilon} = \hat{I}^{-1} \vec{M} \quad (2.11)$$

gdzie: ε - przyspieszenie kątowe (wektor), M - moment siły (wektor), I - moment bezwładności (tensor). Zapis \hat{I}^{-1} oznacza tensor odwrotny do tensora \hat{I} .

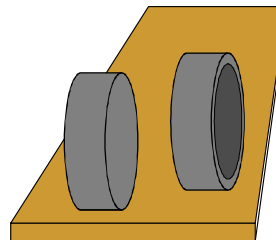
Aby wyjaśnić znaczenie momentu bezwładności przeprowadzimy kolejne doświadczenia.

Wyścigi walców (!)

Przyrządy i materiały

- deska służąca za tor,
- dwa walce o tej samej masie, ale mające różną budowę. Jeden jednorodny, zrobiony lekkiego materiału. Drugi wykonany z ciężkiej obryczy, pusty w środku.

Przebieg doświadczenia



Rys. 2.13 Dwa walce

Ustawiamy walce na równi i puszczamy jednocześnie.

Walec z jednorodnego materiału będzie staczał się szybciej.

Walec pusty w środku będzie się wolniej rozpędzał.

Ponieważ momenty siły działające na oba walce są takie same, wnioskujemy, że drugi walec ma większy moment bezwładności.

Masy walców są takie same, ale rozkłady tych mas inne, co pokazuje, że moment bezwładności zależy od rozkładu masy.

Moment bezwładności

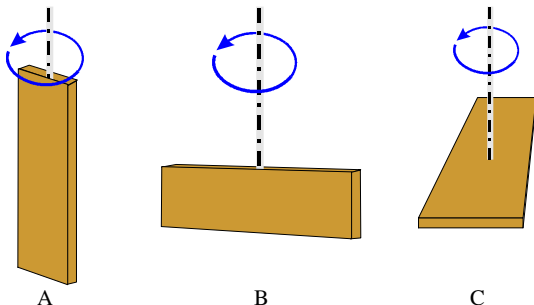
Momentu bezwładności jest miarą tego, na ile ciało przeciwstawia się zmianie prędkości ruchu obrotowego.

Moment bezwładności ciała punktowego jest proporcjonalny do sumy iloczynów masy elementu ciała, m_i , i kwadratu odległości tego elementu od osi obrotu, r_i .

$$I = \sum_i m_i r_i^2 \quad (2.12)$$

We wzorze tym mamy wielkości r_i opisujące położenie poszczególnych elementów ciała. Wynika z tego, że moment bezwładności możemy zmienić bez zmiany masy danego ciała, przez zmianę jego rozmiaru lub zmianę rozkładu masy wewnątrz ciała. Ponieważ zależność od promienia jest kwadratowa, więc np. zwiększając dwukrotnie promień zwiększamy 4-krotnie moment bezwładności.

Obserwację tą możemy sprawdzić przy pomocy opisanego powyżej wahadła Oberbecka (rys. 2.11). Moment bezwładności przyrządu zmieniamy przesuwając ciężarki na ramionach krzyża.

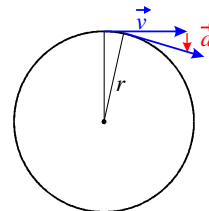


Rys. 2.14 Moment bezwładności deski względem różnych osi obrotu: A) minimalny, B) pośredni, C) maksymalny.

Moment bezwładności obiektu może zależeć od tego, względem której osi go obracamy. Przykładem może być deska (rys. 2.13). Obracana wzdłuż swojej dłuższej osi ma najmniejszy moment bezwładności i najłatwiej jest ją wprawić w taki ruch. W przypadku obrotu dookoła pozostałych dwóch osi moment bezwładności jest istotnie większy. Aby opisać ten fakt musimy uwzględnić, że moment bezwładności jest tensorem.

Siła odśrodkowa

Ruch obrotowy, nawet ze stałą prędkością kątową, ω nie jest ruchem jednostajnym. Stale zmienia się kierunek prędkości v .



Rys. 2.15 Zmiana kierunku prędkości w ruchu obrotowym oznacza istnienie przyspieszenia dośrodkowego.

W związku z tym powstaje siła bezwładności zwana siłą odśrodkową:

$$F_o = ma_o = m\omega^2 \cdot r = m \frac{v^2}{r} \quad (2.13)$$

Siłę odśrodkową odczuwamy, na przykład, na karuzeli, wewnątrz pojazdów, które poruszają się po łuku (zakręcają) itp.



Rys. 2.16 Fontanna pokazująca przyspieszenie Coriolisa

W przypadku ciał poruszających się wewnątrz układu obracającego się z prędkością ω oprócz siły odśrodkowej, pojawia się jeszcze inna siła bezwładności zwana siłą Coriolisa. Siła ta jest proporcjonalna do składowej radialnej (czyli skierowanej do lub od środka) prędkości danego ciała.

$$F_C = m \cdot 2\omega \cdot v_r \quad (2.14)$$

Siły Coriolisa odpowiadają, między innymi, za powstawanie wirów w atmosferze związanych z wyżami i niżami.

2.5 Grawitacja

O sile oddziaływania grawitacyjnego mówi prawo powszechnego ciążenia, opublikowane przez I. Newtona w 1687 roku:

Prawo grawitacji Newtona (!)

Dwa ciała punktowe przyciągają się wzajemnie z siłą proporcjonalną do iloczynu ich mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2.15)$$

Gdzie: G - stała grawitacji = $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, m_1 , m_2 - masy ciał, r - odległość.

Należy zauważyć, że masa z jednej strony jest wielkością, na którą oddziałuje pole grawitacyjne, a z drugiej – jest źródłem tego pola.

Dzięki znajomości prawa grawitacji można bardzo precyzyjnie przewidywać ruch w polu grawitacyjnym. Analiza ruchu znanych ciał niebieskich pozwala wykrywać inne, nieznanne jeszcze ciała, które swoją grawitacją zaburzają ruch obserwowanych obiektów. W ten sposób odkryto najdalsze planety Układu Słonecznego (np. Neptuna) i planety krążące wokół innych gwiazd.

Masa i ciężar

Z II prawa dynamiki wynika, że aby ciału o masie m nadać przyspieszenie a musimy użyć siły $F = ma$ (patrz równanie 2.3). Oznacza to, że przyspieszane ciało, przeciwstawiając się wprawianiu w

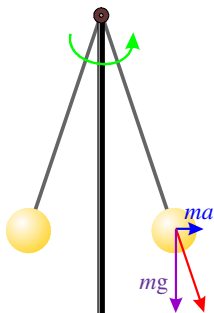
ruch będzie na nas działało z taką samą siłą.

Ta siła, $F = -ma$, nazywa się siłą bezwładności. Siła bezwładności działa pomiędzy przyspieszonym ciałem i więzami.

Siła ciężkości również jest proporcjonalna do masy: $Q = \gamma m$, gdzie γ jest natężeniem pola grawitacyjnego, utożsamianym z przyspieszeniem grawitacyjnym g .

Możemy zatem mówić o masie bezwładnej i masie ciężkiej.

Siły grawitacyjną i bezwładności działające na tę samą masę możemy łatwo porównać, na przykład, analizując funkcjonowanie regulatora Watta (rys. 2.16)



Rys. 2.17 Regulator Watta

Na kulkę w obracającym się regulatorze Watta działają dwie siły: siła ciężkości $= mg$ i siła odśrodkowa $= ma_0$. Siła odśrodkowa jest siłą bezwładności. Stosunek tych dwóch sił możemy wyznaczyć znając kąt wychylenia ramion regulatora.

Doświadczenie pokazuje, że masa bezwładna i masa ciężka są równe, pomimo, że siła bezwładności i ciężar są różnymi siłami, związanymi z różnymi zjawiskami. Dokładne porównanie mas jako pierwszy przeprowadził węgierski fizyk Lard Eötvös. Dziś wiemy, że masa

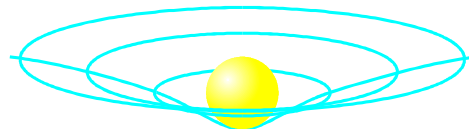
ciężka i masa bezwładna są sobie równe z dokładnością do 11 cyfr.

Ogólna teoria względności

W mechanice klasycznej masa bezwładna (odpowiadająca za siłę bezwładności) i masa ciężka (odpowiadająca za ciężar ciała), są oddzielnymi pojęciami. Tak jak oddzielnymi pojęciami jest przyspieszenie i pole grawitacyjne. Sytuację zmienia ogólna zasada względności sformułowana przez A. Einsteina w 1915 roku.

Zasada względności w ruchu przyspieszonym:

Układy znajdujące się w polu grawitacyjnym są równoważne układom, które przyspieszają. Nie można odróżnić działania pola grawitacyjnego od efektów wywołanych przyspieszeniem.



Rys. 2.18 Odskształcenie przestrzeni przez masę

Aby odnieść taki sam skutek jak przyspieszenie, pole grawitacyjne zakrzywia czasoprzestrzeń. Między innymi powoduje to, że w polu grawitacyjnym czas płynie wolniej.

Z powodu spowolnienia czasu wywołanego stałą prędkością, zegary na satelitach GPS spóźniałyby się o 7 μ s na dobę (zgodnie z przewidywaniami szczególnej teorii względności). Z powodu grawitacji, ziemskie zegary spóźniają się 45 μ s na dobę. Tak więc, w

tym wypadku efekty związane z ogólną zasadą względności przeważają nad efektami szczególnej zasady względności (o 38 μ s na dobę). Różnica czasu 1 μ s daje różnicę położenia 300 m. Oznacza to, że bez poprawek relatywistycznych GPS myliłyby się ponad 10 km/dobę.

Jedną z konsekwencji ogólnej teorii względności są fale grawitacyjne. Fale te można opisać jako naprzemienne ściśnięcia i rozciągnięcia czaso-przestrzeni, albo równoważnie jako wymuszenie drgań spoczywających swobodnie obiektów materialnych, przez które te fale przechodzą.

2.6 Podsumowanie

Na wykładzie wprowadzone zostały takie wielkości fizyczne jak: prędkość, przyspieszenie i masa.

Podane zostały podstawowe prawa rządzące ruchem – zasady dynamiki Newtona

Masa na jednostkę objętości to gęstość ciała.

Masa jest miarą bezwładności, ale też źródłem pola grawitacyjnego.

W ruchu obrotowym występują wielkości analogiczne do już poznanych dla ruchu postępowego: prędkość i przyspieszenie kątowe i moment bezwładności.

Najważniejsze prawa:

Zasady dynamiki

1. Ciało, na które nie działa żadna siła, albo działają siły równoważące się, pozostaje w spoczynku albo porusza się ruchem jednostajnym po linii prostej.
2. Przyspieszenie wywołane przez wypadkową siłę jest wprost proporcjonalne do tej siły a odwrotnie proporcjonalne do masy ciała. Kierunek i zwrot przyspieszenia są zgodne z kierunkiem i zwrotem wypadkowej siły.
3. Jeżeli pierwsze ciało działa na drugie ciało pewną siłą (akcja), to ciało drugie działa na pierwsze ciało siłą (reakcja) o takiej samej wartości i kierunku, lecz o przeciwnym zwrocie.

Prawo ciążenia:

Dwa ciała punktowe przyciągają się wzajemnie z siłą proporcjonalną do iloczynu ich mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi.