

Eksperymentuj!

Wirujące krzesło

Dlaczego łyżwiarze figurowi, zaczynając piruet, mają rozłożone ręce i wysuniętą nogę? Wykorzystują zasadę zachowania momentu pędu, by wirować jak najszybciej. Ta sama zasada sprawia, że koty spadają na cztery łapy, a dzieci mogą bawić się kolorowymi bączkami. Muszą ją także uwzględnić konstruktorzy śmigłowców.



CENTRUM NAUKI
KOPERNIK

Partner strategiczny:



→ Trochę teorii

Kiedy usiądziesz na ruchomym krześle, trzymając w ręku rozkręcone koło, nic się nie dzieje. Dopiero gdy zaczniesz zmieniać kierunek osi rozpędzonego koła, ze zdziwieniem zaobserwujesz, że zaczynasz obracać się wraz z krzesłem. A przecież nie odpychałeś się od podłogi! Dzieje się tak dzięki temu, że wielkość fizyczna opisująca wirujące obiekty, zwana momentem pędu, jest stała. Przechyłane rozkręcone koło „stara się” zachować swój moment pędu, przekazując ruch obrotowy tobie i krzesłu, na którym siedzisz.

Intuicyjnie moment pędu stanowi miarę „ilości ruchu obrotowego”, podobnie jak pęd jest „ilością ruchu postępowego”. Odwołując się dalej do tej analogii, można powiedzieć, że podobnie jak pistolet w czasie wystrzału odskakuje do tyłu, tak kręcący się wirnik nadaje przeciwny ruch obrotowy korpusowi silnika (jeśli ten korpus jest ruchomy). W pierwszym przypadku daje o sobie znać zasada zachowania pędu, zgodnie z którą pęd uzyskany przez pocisk równa się przeciwnemu pędowi uzyskanemu przez pistolet. W drugim przypadku tę samą funkcję pełni zasada zachowania momentu pędu. Ścisłą definicję momentu pędu i zasad zachowania znajdziesz w podręczniku fizyki lub w internecie.

Przyjrzyjmy się nieco dokładniej przeprowadzonemu doświadczeniu. Jeśli krzeselko nie jest wprawiane w ruch obrotowy ani hamowane przez siłę zewnętrzną, to łączny moment pędu krzeselka, eksperymentatora i wirującego koła rowerowego pozostaje stały. Gdy np. eksperymentator trzyma oś wirującego koła pionowo, a następnie obróci ją o 180° (tak że górny koniec osi znajdzie się na dole i na odwrót), to wektor momentu pędu samego koła ulegnie odwróceniu. Aby łączny moment pędu pozostał niezmienny, krzeselko wraz z eksperymentatorem musi zacząć wirować w przeciwną stronę.

Zasady zachowania są jedynymi prawami fizyki, o których sądzi się, że są absolutnie ściśle. Obok momentu pędu do wielkości zachowanych „zawsze i wszędzie” należą jeszcze pęd, energia i ładunek. Ciekawe, że istnieje związek między niektórymi zasadami zachowania a symetrias

czasoprzestrzeni. Na przykład zasada zachowania energii wynika z symetrii względem przesunięć w czasie, tzn. z faktu, że wszelkie zjawiska fizyczne zachodzą tak samo wcześniej, jak i później. Podobnie symetria względem przesunięć przestrzennych pociąga za sobą zasadę zachowania pędu, a symetria względem obrotów – zasadę zachowania momentu pędu. Gdyby ta symetria została naruszona, np. gdyby we Wszechświecie jeden kierunek okazał się z jakichś względów wyróżniony, to zasada zachowania momentu pędu przestałaby obowiązywać!

Cząstki elementarne mają moment pędu nie tylko wskutek ruchu wokół pewnej osi, lecz także z powodu swojej budowy wewnętrznej. Ten drugi moment pędu nazywa się spinem, a cząstkę o spinie różnym od zera można przedstawić obrazowo (i niezbyt ściśle) w postaci wirującego bąka. Wartość spinu cząstki bardzo silnie wpływa na jej właściwości, np. spin elektronu odgrywa decydującą rolę w wyjaśnieniu budowy atomu i natury wiązań chemicznych.

W świecie atomów, gdzie obowiązują prawa mechaniki kwantowej, zasada zachowania momentu pędu jest formułowana jako reguły zachowania pewnych liczb kwantowych. Reguły te opisują m.in., w jaki sposób atom oddziałuje z fotonem, czyli kwantem światła. Można by zadać pytanie, co ma wspólnego foton z zasadą zachowania momentu pędu? Otóż okazuje się, że foton, mimo że jest cząstką nieposiadającą masy spoczynkowej, unosi ze sobą pewien moment pędu! Oczywiście nie wiadomo, jak sobie wyobrazić taki obiekt. Model wirującego bąka nic nam tutaj nie pomoże. Zapominając o tym kłopotliwym fakcie, możemy jednak dojść do logicznego wniosku, że skoro foton niesie ze sobą moment pędu, to znaczy, że może on dodawać lub odejmować ilość ruchu obrotowego innym obiektom kwantowym, np. elektronom krążącym po orbicie atomowej. I tak jest w istocie, co potwierdzają liczne eksperymenty, w których atomy oddziałują ze światłem. ■



Zmiany położenia obracającego się koła rowerowego powodują, że wirować zaczyna osoba siedząca na obrotowym krześle. Wynik tego doświadczenia jest dla wielu osób zaskakujący

→ O historii

Wirującymi bąkami bawiły się dzieci już w starożytności, ale pierwszym zbadanym naukowo przykładem zachowania momentu pędu był ruch planet. Około 1610 roku niemiecki astronom Johannes Kepler zauważył, że planety zwiększają swoją prędkość podczas zbliżania się do Słońca, a zmniejszają podczas oddalania. Wynika to z zasady zachowania momentu pędu (czyli stałej ilości ruchu obrotowego). Fundamenty fizyczne i matematyczne pod powyższą obserwację położył Izaak Newton w dziele „Podstawy matematyczne filozofii przyrody”, opublikowanym w 1687 roku.

Z zasadą zachowania momentu pędu ściśle wiąże się pojęcie efektu żyroskopowego, czyli stabilnego wskazywania określonego kierunku przez szybko wirujące obiekty (żyroskopy). Odkrycie efektu żyroskopowego w 1817 roku i skonstruowanie pierwszego działającego żyrokompassu (1903 rok) otworzyło nowy rozdział w nawigacji morskiej. W czasach, kiedy o potęgde militarnej decydowały rozmiar i sprawność marynarki wojennej, zastosowanie żyrokompassu dawało ogromną



Wirujący bąk, ruch planet, dozwolone przejścia kwantowe – wszystkie te pojęcia łączy jedna uniwersalna zasada zachowania momentu pędu

przewagę. Każdy kraj, który miał aspiracje do bycia mocarstwem, posiadał swoich specjalistów i konstruktorów, którzy tworzyli osobną gałąź przemysłu żyroskopowego. Doświadczenia zdobyte w konstrukcji urządzeń nawigacyjnych dla marynarki wojennej wykorzystano później w lotnictwie

(żyroskopowe wskaźniki kursu – ang. *Inertial Navigation Systems*) oraz przy konstruowaniu systemów stabilizujących ruch satelitów okołozemskich (ang. *Control Moment Gyroscope*). Mimo że żyroskop ma już ponad 200 lat, wciąż znajdują się nowe sposoby jego wykorzystania. ■

→ Współczesne zastosowania

Stałość momentu pędu przydaje się wszędzie tam, gdzie... potrzebny jest stabilny ruch obrotowy, czyli we wszelkiego rodzaju kołach zamachowych. W elektrowniach stosuje się specjalną konstrukcję turbin, które mają dołączone potężne koła zamachowe, których masa jest rozłożona na obwodzie. Mówimy, że mają duży moment bezwładności. Im większy moment bezwładności, tym większy moment pędu (przy zachowanej prędkości obrotowej). Dzięki temu rozkręcona turbina może kręcić się bardzo długo, nawet bez istnienia zewnętrznej siły napędzającej.

Są jednak sytuacje, gdy zasada zachowania momentu pędu sprawia kłopoty. Dzieje się tak w przypadku śmigłowca. Kiedy silnik napędzający łopatki wirnika jest wyłączony, wówczas całkowita ilość ruchu

obrotowego układu śmigła – kabina wynosi zero. Po włączeniu silnika wirnik nabiera ogromnego momentu pędu i jeśli zasada zachowania momentu pędu ma być w mocy, to musi istnieć jakiś inny ruch obrotowy, który go zrównoważy. Gdyby pozbawić helikopter śmigła ogonowego, kabina zaczęłaby się kręcić przeciwnie do ruchu głównego wirnika. Niektóre śmigłowce mają więc układ napędowy zbudowany z dwóch wirników ułożonych jeden nad drugim. Jeden kręci się w lewo, a drugi w prawo, nie ma więc problemu z niekontrolowaną rotacją kabiny pilota. ■

Dwa wirniki nośne śmigłowca Kamow Ka-50 obracają się w przeciwne strony, dając całkowity moment pędu równy zero



→ A to ciekawe

Co ma wspólnego kot lądujący zawsze na czterech łapach i zasada zachowania momentu pędu? Okazuje się, że bardzo wiele. Na spadającego kota nie działają żadne siły zewnętrzne (jest w stanie nieważkości), więc na mocy zasady zachowania momentu pędu spadający zwierzak nie może ani zwiększyć, ani zmniejszyć ilości swojego ruchu obrotowego. Może jednak, dzięki sprytnym wygibasom, zmniejszać lub zwiększać szybkość rotacji różnych części ciała. Dokładna analiza kolejnych etapów spadania pokazuje, że kot w początkowej fazie przyciąga przednie łapy do tułowia, a tylne maksymalnie rozkłada (1). To powoduje, że przednia część ciała kręci się szybciej niż tylna (patrz: eksperyment z obrotowym stolikiem i ciężarkami). Kiedy głowa i przednie łapy są już zwrócone ku ziemi, kot zmienia strategię, tzn. podwija tylne łapy, a rozkłada przednie (2). To powoduje spowolnienie obrotu przedniej części ciała, a przyspieszenie tylnej. Kiedy przednie i tylne łapy są zwrócone ku dołowi, kot maksymalnie rozprostowuje wszystkie kończyny i lekko rozkłada je na boki (3). Prędkość obrotowa znacznie spada (ciągle jednak ilość ruchu obrotowego jest taka sama jak na początku),

a kot zaczyna wyhamowywać niczym spadochroniarz (4).

Często powtarzane, aczkolwiek nieprawdziwe, jest twierdzenie, że o stabilności roweru decyduje efekt żyroskopowy. Rzeczywiście, obracające się koła stanowią dwa żyroskopy, jednakże masa kół w porównaniu z łączną masą roweru i rowerzysty jest tak mała, że moment pędu, jaki posiadają (czyli ilość ruchu obrotowego wokół pewnej osi), jest zbyt mały, aby mógł stabilnie utrzymać rower w pionie. Gdyby koła rzeczywiście mocno „trzymały” oś własnej rotacji, to skręcanie kierownicą byłoby czynnością niezwykle męczącą, a przecież każdy z nas robi to bez większego wysiłku. W rzeczywistości o stabilności roweru decydują dwa czynniki. Pierwszym jest możliwość skręcania przedniego koła, a drugim odpowiednio duża prędkość jazdy. Nie wnikając w szczegóły: rower nie przewraca się, ponieważ kierowca, wykonując delikatne ruchy kierownicą, „podjeżdża” pod opadający środek ciężkości, nie pozwalając w ten sposób na zbyt duży przechył roweru. Kiedy prędkość jest zbyt mała, podjeżdżanie nie wystarczy, aby podtrzymać opadający środek ciężkości. To dlatego znacznie trudniej utrzymać równowagę podczas wolnej jazdy. ■

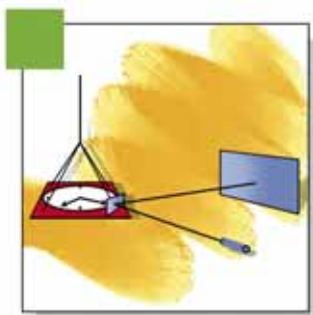


→ Więcej doświadczeń

1. Usiądź na krześle obrotowym, i trzymając w dłoniach dwie hantle lub inne ciężarki o masie 2–5 kg. Następnie wyciągnij ręce z hantlami w bok i poproś drugą osobę, aby nadała ci niezbyt szybki ruch obrotowy. Następnie przyciągnij ręce do siebie, unikając gwałtownych ruchów, aby się nie wywrócić, i rozstaw ręce ponownie.

2. Poszukaj zegarka ręcznego z napędem sprężynowym (może to być trudne, bo zostały one dzisiaj niemal całkowicie wyparte przez zegarki elektroniczne). Zdejmij zegarek z paska i przymocuj do niego mały kawałek lusterka albo wygładzony skrawek folii aluminiowej, który będzie spełniał funkcję lusterka. Zawieś zegarek na nitce w pozycji poziomej (przy czym płaszczyzna lusterka powinna być

pionowa). Teraz wytłum obroty i drgania uzyskanego wahadła, doprowadzając je do położenia równowagi. Następnie skieruj na lusterko poziomo wiązkę światła z nieruchomego lasera (najlepiej użyć wskaźnika laserowego). Obserwuj odbity „zajączek” na zaciemnionym ekranie w odległości co najmniej 2 m od zegarka. Widoczne ruchy „zajączka” są powodowane przez ruchy tzw. balansu (kółka obracającego się tam i z powrotem pod wpływem cienkiej sprężynki) wewnątrz zegarka. ■



→ W internecie

Moment pędu

http://pl.wikipedia.org/wiki/Moment_p%C4%99du

Dlaczego kot zawsze ląduje na czterech łapach

www.ocf.berkeley.edu/~barneye/kitty.html

Wykład na temat zasady zachowania momentu pędu

www.vias.org/physics/wrapnt_conservation_of_angular_momentum262.html

Jak działa stabilizator obrazu

http://en.wikipedia.org/wiki/Image_stabilization