

Doświadczenia z elastyczną kulą wodną (część 2)

Stanisław BEDNAREK

Dzisiaj będziemy kontynuowali doświadczenia z elastyczną kulą wodną. Do przeprowadzenia niektórych z nich potrzebne są dwie takie kule. Na szczęście, są one tanie i łatwo dostępne w sklepach z zabawkami lub kioskach, a także na bazarach i u ulicznych sprzedawców.

Mając już dwie kule, zabieramy się do pierwszego eksperymentu. Wykorzystamy w nim kule wodne w charakterze interesującej karuzeli. Uchwyty dwóch zabawek składamy razem i przytrzymujemy palcami jednej ręki, tak żeby kule i taśmy zwisały swobodnie. Palcami drugiej ręki ujmujemy obie kule, po czym, obracając je kilkadziesiąt razy wokół osi pionowej, skręcamy taśmy (fot. 1). Następnie puszczamy kule swobodnie. Zauważamy, że taśmy się rozkręcają, a kule poruszają się po okręgu w płaszczyźnie poziomej. Taśmy podtrzymujące kule odchylają się przy tym od pionu (fot. 2). Jest to spowodowane działaniem sił odśrodkowych, podobnie jak w doświadczeniu z kulą poruszającą się ruchem jednostajnym po okręgu w płaszczyźnie poziomej.

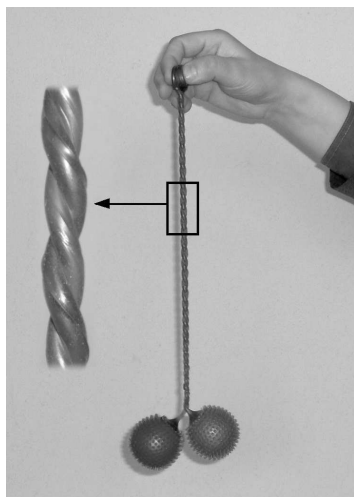
Wraz z rozkręcaniem się taśm prędkość kątowna kul i ich kąt odchylenia wzrastają. Ponieważ kule oddalają się od osi obrotu, wzrasta również ich sumaryczny moment bezwładności. Rozpędzone kule ponownie skręcają taśmy w odwrotnym kierunku i opisane efekty się powtarzają, przy czym energia mechaniczna układu stopniowo maleje wskutek występowania oporów ruchu. Doświadczenie to w interesujący sposób ilustruje dynamikę ruchu obrotowego układu o zmiennym momencie bezwładności i przemiany energii mechanicznej.

Zastanówmy się jeszcze chwilę nad opisem ruchu kul. Po skręceniu taśm zostaje w nich zmagazynowana energia potencjalna sprężystości. Kiedy kule puścimy swobodnie, energia ta zmienia się na energię kinetyczną ruchu obrotowego kul oraz grawitacyjną energię potencjalną. (Pomijamy tutaj niewielką energię potencjalną sprężystości taśm spowodowaną ich rozciągnięciem przez wypadkowe siły działające na kule). Rozpędzone kule dzięki swojej bezwładności poruszają się nadal w tym samym kierunku,

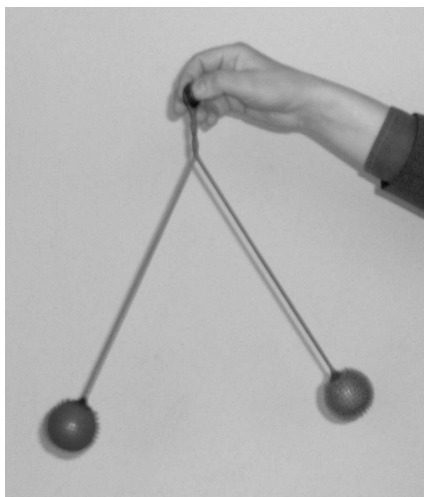
co powoduje ponowne skręcanie taśm. W tym czasie energia kinetyczna ruchu obrotowego zmienia się w energię potencjalną sprężystości. Gdy kule zatrzymają się, układ znowu ma tylko energię potencjalną sprężystości. Następnie opisany cykl przemian energii się powtarza. Gdyby nie straty energii mechanicznej w wyniku tarcia o powietrze i niedoskonałej sprężystości taśm, to ilości obu rodzajów energii byłyby dokładnie równe i ruch układu trwałby nieskończenie długo.

Wraz ze wzrostem prędkości ruchu kul wzrasta wartość działającej na każdą z nich siły odśrodkowej. Siły odśrodkowe mają tu kierunek poziomy. Z kolei siła ciężkości każdej z kul ma kierunek pionowy. Taśmy ustawiają się wzdłuż wypadkowej tych sił, która, jak łatwo zauważyć, ma kierunek ukośny. Gdy prędkość ruchu kul wzrasta, to również zwiększa się wartość siły odśrodkowej i wypadkowa tych sił zostaje bardziej odchylona od pionu. Przejawia się to większym kątem odchylenia taśm od pionu. Ponieważ kształt układu nie jest stały – zmienia się kąt nachylenia taśm i odległość kul od osi obrotu – więc moment bezwładności układu też się zmienia. Wzrasta on wraz ze wzrostem odległości między kulami i jest wprost proporcjonalny do kwadratu tej odległości. Sprawi to trudność tym, którzy chcieliby opisać ilościowo ruch układu, stosując do tego celu prostą postać drugiej zasady dynamiki dla ruchu obrotowego, znaną, być może, ze szkoły. Oczywiście, druga zasada dynamiki stosuje się do tego przypadku, ale trzeba skorzystać z jej postaci różniczkowej, czym tutaj nie będziemy się zajmowali.

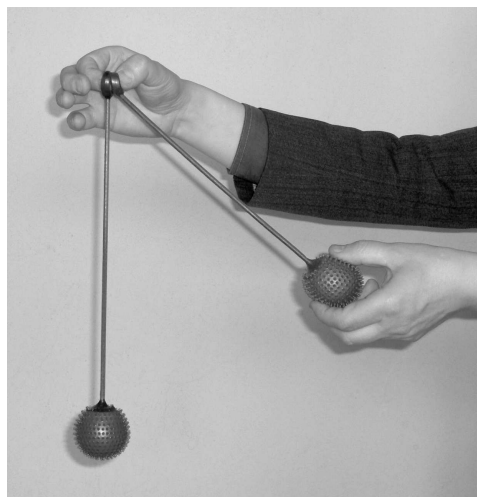
W następnym doświadczeniu zbadamy zderzenie ciał częściowo sprężystych. Uchwyty dwóch zabawek składamy razem i trzymamy palcami jednej ręki, tak żeby taśmy i kule zwisały swobodnie, a kule stykały się. Jedną z kul chwytamy



Fot. 1. Przygotowanie elastycznych kul wodnych do uruchomienia karuzeli.



Fot. 2. Działanie karuzeli złożonej z dwóch elastycznych kul wodnych.



Fot. 3. Przygotowanie elastycznych kul wodnych do badania zderzenia ciał częściowo sprężystych.

palcami drugiej ręki, odchylamy od pionu o pewien kąt i puszczamy swobodnie (fot. 3). Odchylona kula, wracając do położenia równowagi, uderza w nieruchomą kulę i powoduje jej ruch. Sama przy tym zmniejsza swoją prędkość i też wychyla się o pewien kąt. Między kulami zachodzi zderzenie częściowo sprężyste, które jest charakteryzowane przez współczynnik sprężystości k ($0 < k < 1$). Pęd kul w tym zderzeniu jest zachowany, natomiast energia kinetyczna zachowana jest częściowo. Ilość zachowanej energii określa właśnie współczynnik sprężystości k .

Warto tutaj dodać, że zderzenie częściowo sprężyste jest najbardziej adekwatnym modelem rzeczywistych zderzeń i występuje np. podczas kolizji pojazdów. Dlatego też doświadczenie to jest przykładem realistycznego typu zderzenia. Jeżeli dwie zabawki zawiesimy jedną obok drugiej za uchwyty, np. nakładając je na jeden lub dwa poziome pręty albo przywiązując je do prętów kawałkami nici, to będziemy mogli badać bardziej złożone przypadki zderzeń. Mogą to być zderzenia, w których obie kule mają niezerowe prędkości początkowe, zderzenia skośne i zderzenia niecentralne.

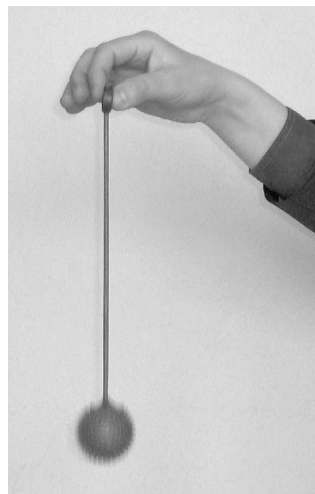
Zderzenia niecentralne często występują w mikroświecie, z tym że zderzenie określa się wtedy jako sprężyste (elastyczne), jeśli przed i po zderzeniu mamy do czynienia z tymi samymi obiektami. Przykładem sprężystego zderzenia niecentralnego jest rozpraszanie Rutherforda, które polega na odchyleniu kierunku ruchu cząstek alfa, przelatujących w pobliżu jądra atomowego. Zarówno jądro, jak i cząstki alfa mają dodatnie ładunki elektryczne, które, odpychając się wzajemnie, powodują odchylenie toru ruchu cząstki alfa. Jądro związane z siecią krystaliczną ciała stałego pozostaje praktycznie nieruchome. Z kolei akceleratory cząstek elementarnych buduje się zwykle do badania zderzeń niesprężystych, czyli takich, w których produkowane są nowe cząstki.

Tematem kolejnego doświadczenia będzie wahadło sprężynowe. Nieruchoma zabawka zwisa, trzymana palcami jednej ręki za uchwyt.

Pociągamy palcami drugiej ręki za kulę pionowo w dół i puszczamy ją swobodnie (fot. 4). Zauważamy, że kula zaczyna wykonywać drgania w kierunku pionowym wokół położenia równowagi (fot. 5).



Fot. 4. Elastyczna kula wodna przed wykorzystaniem jej w roli wahadła sprężynowego.



Fot. 5. Wahadło sprężynowe wykonane z elastycznej kuli wodnej.

Ponieważ siła sprężystości ma wartość wprost proporcjonalną do wychylenia i jest zwrócona w stronę położenia równowagi, są to drgania harmoniczne. Elastyczna taśma spełnia w tym przypadku rolę zwykle używanej do tego celu sprężyny spiralnej.

Kulę wodną możemy także wykorzystać do doświadczeń o charakterze ilościowym. Masę drgającej kuli łatwo zwiększyć, nakładając na nią obciążniki o znanej masie, np. wykonane z kawałków plasteliny. Z kolei długość początkową elastycznej taśmy można skracać bez jej ucinania. Wystarczy chwycić palcami lub zamocować zabawkę za taśmę poniżej uchwytu. Pozwala to na sprawdzenie znanego dla wahadła sprężynowego wzoru na jego okres drgań T :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

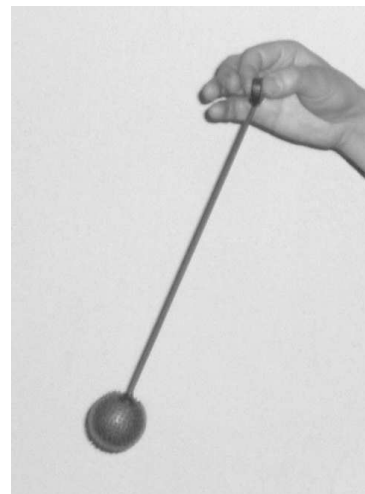
gdzie m oznacza masę kuli wraz z ewentualnymi dodatkowymi obciążnikami, a k jest współczynnikiem sprężystości aktualnie drgającej części taśmy (nie mylić z oznaczanym tą samą literą współczynnikiem sprężystości zderzenia!).

Zobaczymy teraz, jak działa wahadło o zmiennej długości. W tym celu przytrzymujemy palcami jednej ręki uchwyt zabawki – tak żeby taśma miała kierunek pionowy i kula zwisała swobodnie. Drugą ręką chwytamy kulę, odchylamy ją od pionu o pewien kąt i puszczamy swobodnie. Odchylona kula wraz z taśmą wraca do położenia równowagi, wychyla się w przeciwną stronę i znowu wraca do tego położenia (fot. 6). Następnie opisane ruchy powtarzają się, a ich amplituda, czyli maksymalne wychylenie z położenia równowagi, stopniowo maleje na skutek istnienia oporów ruchu. Uważnie obserwując ruch kuli, stwierdzamy, że długość taśmy ulega przy tym zmianom.

Obserwowany efekt wyjaśniamy tym, że na kulę poruszającą się po łuku działa siła odśrodkowa, która powoduje rozciąganie elastycznej taśmy. Wartość tej siły jest proporcjonalna do kwadratu prędkości kuli i jest większa przy przechodzeniu kuli w pobliżu położenia równowagi, kiedy jej prędkość też jest większa. W doświadczeniu tym kula wykonuje ruch złożony z dwóch prostych ruchów – ruchu posuwisto-zwrotnego wzdłuż taśmy i ruchu wahadłowego po łuku. Ruch wzdłuż taśmy jest szybciej tłumiony niż ruch wahadłowy, dlatego w krótkim czasie

drgania kuli stają się zbliżone do drgań wahadła fizycznego. Zanim to nastąpi, ruch kuli ma bardzo widowiskowy i interesujący charakter. Ilościowy opis całego ruchu nie jest zadaniem łatwym i wykracza poza ramy tego kącika.

Tyle doświadczeń z elastycznymi kulami wodnymi na dzisiaj. Zachowajmy te kule, ponieważ przydadzą nam się jeszcze za miesiąc, kiedy będziemy kontynuowali doświadczenia z ich wykorzystaniem.



Fot. 6. Elastyczna kula wodna jako wahadło o zmiennej długości.