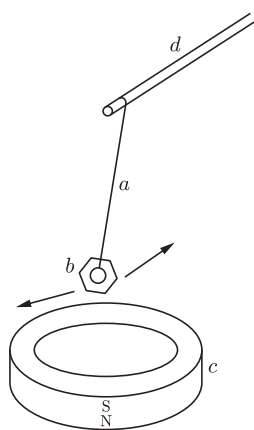




Do doświadczeń potrzebne będą: stalowa nakrętka, kawałki mocnej nici, magnes pierścieniowy o średnicy kilku centymetrów (np. wymontowany ze starego głośnika), kilka małych magnesów walcowych, kawałek blachy stalowej, sprężyna, kulka, plastikowa płytką, kij od szczotki, nożyczki i klej epoksydowy lub cyjanoakrylowy.



Budowa wahadła magnetycznego; a – nić, b – nakrętka, c – magnes, d – kij od szczotki.

Powszechnie wiadomo, co to jest wahadło matematyczne i jaki wykonuje ruch. Łatwo też odpowiedzieć na pytanie, jak zmieni się ruch tego wahadła, gdy zadziała na nie dodatkowa siła, np. w przyspieszającym wagonie. A co się stanie, gdy ta dodatkowa siła będzie siłą magnetyczną? Spróbujemy to sprawdzić, wykonując kilka prostych doświadczeń.

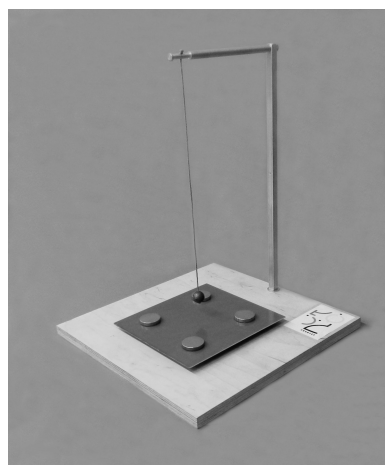
Kij od szczotki, przywiązany poziomo kawałkami nici wzdłuż oparcia krzesła, posłuży nam za statyw. Do końca innego kawałka nici przywiązujemy stalową nakrętkę średniej wielkości (M5-M10), a drugi koniec tej nici przywiązujemy do wystającej części kija od szczotki. W ten sposób sporządziliśmy model wahadła matematycznego. Jeżeli takie wahadło odchylimy od pionu i puścimy swobodnie, to będzie ono wykonywało drgania w ustalonej płaszczyźnie. Spróbujmy jednak umieścić pod nakrętką magnes pierścieniowy (rysunek). Między stalową nakrętką i magnesem będzie teraz działać dodatkowa siła przyciągania, zwrócona, podobnie jak ciężar nakrętki, ku dołowi. W wyniku tego siła kierująca zwrócona ku położeniu równowagi nakrętki i powodująca występowanie drgań jest większa. Można stąd wyciągnąć wniosek, że przyspieszenie wzrośnie, a okres wahań będzie krótszy. Odchylimy nakrętkę i sprawdzimy to doświadczalnie. Okazuje się, że puszczona swobodnie nakrętka niespodziewanie zmienia kierunek wahań i tor jej ruchu staje się bardzo skomplikowaną krzywą. W końcowym etapie ruchu kształt toru ustala się i dąży do pewnej linii granicznej. Jeżeli ponownie odchylimy nakrętkę dokładnie o ten sam kąt i puścimy swobodnie, to okaże się, że po wykonaniu kilku początkowych wahań tor będzie miał inny kształt, ale również będą występowały niespodziewane zmiany kierunku i w końcowym etapie uda się zauważyć pewną krzywą graniczną. Za pomocą telefonu, kamery lub aparatu fotograficznego możemy sfilmować ruchy nakrętki i dokładnie porównać kształty torów.

Zaobserwowany ruch jest przykładem drgań chaotycznych. Jest to chaos deterministyczny, a w ruchu możemy wyróżnić dające się przewidywać określone prawidłowości. Jedną z nich jest istnienie atraktora, czyli pewnej linii granicznej dla toru. Kształt toru bardzo silnie zależy od warunków początkowych i od niewielkich, przypadkowych zakłóceń, trudnych do kontrolowania, np. lekkiego powiewu powietrza. Z tego powodu, mimo puszczenia nakrętki z takiego samego położenia początkowego, prawie niemożliwe jest zaobserwowanie dokładnie dwóch takich samych torów. Z matematycznego punktu widzenia przyczyną obserwowanego chaosu deterministycznego w ruchu naszego wahadła jest to, że zależność działających na nakrętkę sił nie jest liniowo proporcjonalna do wychylenia nakrętki. W naszym doświadczeniu siła przyciągania magnetycznego między nakrętką i magnesem (traktowanymi jako dipole) zależy odwrotnie proporcjonalnie od trzeciej potęgi odległości między ich środkami.

Inny wariant wahadła magnetycznego przedstawiony jest na fotografii. Wyposażone jest w cztery niewielkie magnesy neodymowe przyklejone w narożnikach kwadratu. Także w tym przypadku można zauważyć pojawianie się atraktorów nad różnymi magnesami i przejść między nimi.

Drgania chaotyczne występują również w sytuacji, gdy na ciało pobudzone regularnie do drgań działa siła oporu, zależna w nieliniowy sposób od prędkości ruchu, np. od jej kwadratu. Spiralną sprężynę zaopatrzmy od góry w uchwyt, a od dołu obciążmy kulką. Trzymając taką sprężynę za jeden koniec, zanurzymy kulkę całkowicie w cieczy. Jeżeli będziemy wymuszali drgania przez regularne poruszanie uchwytem z różnymi częstotliwościami górze i w dół, to zauważymy interesujący efekt. Polega on na tym, że przy pewnych częstotliwościach drgania kulki będą regularne, a przy innych chaotyczne. W miarę zwiększania częstotliwości efekt ten może powtórzyć się kilkakrotnie.

Na zakończenie propozycja zastosowania, która pozwoli zdziwić naszych znajomych. Zbudujmy wahadło podobne to tego z rysunku, ale magnes pierścieniowy schowajmy pod nieprzezroczystą, plastikową zakrętką. Do górnej powierzchni zakrętki przyklejmy papierowy krążek z wypisanymi na nim w różnych miejscach słowami opisującymi pożądane dobra lub zdarzenia, takimi jak *pieniądze*, *powodzenie*, *podróże*, *sława* itd. Osobie zainteresowanej swoją przyszłością proponujemy, żeby odchyliła kulkę i puściła ją swobodnie. Skuteczność przepowiedni nie powinna być gorsza niż tych uzyskanych u wróżki.



Wygląd jednego ze zbudowanych wahadeł z układem magnesów.