

"ELEKTROMAGNETYZM"

Materiały dla gimnazjum
i liceum

Autorzy:

Dr Magdalena Grygiel, absolwentka Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, jest nauczycielką w Zespole Szkół Zawodowych im. Zesłańców Sybiru w Kaliszu obejmującym: Gimnazjum dla Dorosłych, Zasadniczą Szkołę Zawodową oraz Technikum. Prowadzi prace badawcze nad innowacyjnymi rozwiązaniami w nauczaniu fizyki. Brała udział w projektach i grantach dydaktycznych: HIPST (History and Philosophy in Science Teaching), TPiSS (Teaching Physics in Secondary School, EEA grant); MOSEM (Minds-On experimental equipment kits in Superconductivity and ElectroMagnetism); Grant Wyszehradzki: Visegrad Fund. Obecnie pracuje w projekcie "Cyforwa szkoła. Podręczniki do kształcenia ogólnego - fizyka".

Dr Andrzej Karbowski, absolwent Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, jest asystentem w Zakładzie Dydaktyki Fizyki UMK. Zajmuje się spektroskopią pozytonów w ciele stałym. Kierował pakietem „Hands-on-experiments: Low-tech kit” w Projekcie MOSEM.

Konsultacja merytorczna i metodyczna

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz, z wykształcenia mgr inż. fizyki (Politechnika Gdańska) i ekonomista (handel zagraniczny, Uniwersytet Gdański), prowadzi prace badawcze w dziedzinie fizyki atomowej i fizyki ciała stałego. Jest autorem ponad 120 artykułów naukowych, 200 komunikatów konferencyjnych oraz 4 monografii. Od 15 lat zajmuje się popularyzacją fizyki, organizując między innymi wystawy interaktywne „Fizyka zabawek”; był koordynatorem projektu UE „Physics is Fun” i MOSEM. Obecnie jest kierownikiem Zakładu Dydaktyki Fizyki UMK.

Wstęp

Opisywane poniżej doświadczenia powstały w wyniku zespołowej pracy wielu grup. O ile przedstawione opisy są wyłącznie wynikiem pracy Zakładu Dydaktyki Fizyki UMK, w szczególności mgr Magdaleny Sadowskiej, doświadczenia są, między innymi efektem dwóch projektów EU w panelu Leonardo da Vinci - „Supercomet2” i „MOSEM”, ten ostatni koordynowany przez UMK w Toruniu (GK).

W projekcie „MOSEM” koordynatorem pakietu doświadczeń z elektromagnetyzmu był mgr Andrzej Karbowski. Dzięki jego zaangażowaniu, wspólnie z mgr Krzysztofem Służewskim, udało się sfinalizować wytworzenie zestawów doświadczalnych, wyprodukowanych ze środków UMK, w ramach kredytu JM Rektora.

Grupa pakietu „Low-Tech kit” Projektu „MOSEM” obejmowała szereg osób. Największy wkład w przygotowanie koncepcji doświadczeń mieli, oprócz ZDF UMK:

- Prof. Marisa Michelini z Uniwersytetu w Udine (Włochy) i jej grupa
- Prof. Wim Peters z Uniwersytetu w Antwerpii (Belgia)
- Prof. Josef Trna w Uniwersytetu w Brnie (Republika Czech)

Niniejsze opisy doświadczeń powstały w ramach pracy doktorskiej mgr Sadowskiej (przy współpracy GK). Druk niniejszych materiałów został sfinansowany przez Dyрекcję Instytutu Fizyki UMK.

Prof. Grzegorz Karwasz

Toruń, listopad 2010

1.2: Magnetyczny „pies na smyczy”

Cel: wykazanie, że oddziaływanie magnetyczne zachodzi na odległość.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- dwa silne magnesy (neodymowe),
- płytkę z żelaza,
- statyw,
- sznurek o długości 0,3 – 0,5 m.



Zdjęcie 1. Sposób umieszczenia elementów doświadczenia.

Wykonanie:

Weź statyw, płytkę i magnesy. Przymocuj płytkę do statywu (tak jak pokazane jest to na zdjęciu powyżej). Jeden z magnesów połóż na płytce od spodu. Drugi włóż do małego woreczka foliowego. Zawiaż woreczek sznurkiem. Zbliż magnes w woreczku do magnesu znajdującego się na płytce. Spróbuj poruszyć magnesem przy użyciu sznurka. Co się dzieje? Odłóż na chwilę magnes w woreczku, odwróć go i teraz przysuń do drugiego magnesu. Co się dzieje?

Wytłumaczenie:

Między dwoma magnesami działa siła magnetyczna. Raz jest to siła przyciągająca, a raz siła odpychająca. Dwa magnesy przyciągają się, ponieważ zostały zbliżone biegunami odmiennego typu. Gdy jeden z magnesów odwrócimy, to odpychają się, czyli zostały zbliżone biegunami tego samego rodzaju. Wynika z tego, że istnieją dwa rodzaje biegunów magnetycznych.

Uwagi metodologiczne:

1. Doświadczenie to, bardzo widowiskowe, bo widzimy magnes wiszący pozornie w powietrzu bez przyczyny. Ma ono na celu zwrócenie uwagi ucznia (*eye-catching*). Można je ustawić np. w oknie lub w drzwiach wejściowych do klasy. Uczniowie, ciągnąc psa, mierzą siłę oddziaływania.

2. W doświadczeniu należy zachować środki ostrożności, jak przy pracy z silnymi polami magnetycznymi (uwaga na karty magnetyczne, osoby noszące pace-maker etc.)

1.4. Pływające magnesy

Cel: badanie oddziaływań między dwoma magnesami pływającymi po wodzie.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- dwa magnesy typu « geomag »
- dwie małe styropianowe łódeczki.



Zdjęcie 1. Łódeczki z magnesami

Wykonanie:

Położ dwa magnesy na małych styropianowych łódeczkach. Następnie połącz łódeczki na wodzie pamiętając o tym, aby zachować między nimi odstęp. Co się dzieje? Przyjrzyj się łódeczkom. Jeśli położysz je na wodzie tak, że przeciwne bieguny magnesów będą na przeciwko siebie, zobaczysz, że magnesy się przyciągają aż do momentu zetknięcia się.

Ponownie połącz łódeczki na wodzie, ale jedną z nich umieść odwrotnie niż poprzednio. Co się dzieje? Przyjrzyj się łódeczkom. Jeśli magnesy umieścimy na wodzie tak, że na przeciw będą te same bieguny, to zobaczysz, że jeden z nich obróci się o kąt 180° . Po czym, magnesy będą się przyciągać do momentu zetknięcia się.

Wyjaśnienie:

Między dwoma magnesami działa siła magnetyczna. Gdy magnesy zbliżone są do siebie przeciwnymi biegunami (tzn. północnym i południowym), to przyciągają się i po chwili stykają się. Jeśli natomiast zbliżone są tym samym biegunem (tzn. północnym - północnym lub południowym – południowym), to odpychają się. Po pewnym czasie jedna z łódek obraca się o 180° , magnesy zaczynają się przyciągać, a w efekcie łączą się w jeden magnes.

Oddziaływania magnesów obserwujemy nawet wtedy, gdy są one daleko od siebie. Zauważ, jak łódeczki przyspieszają w miarę zbliżania się.

Uwagi metodologiczne:

1. Doświadczenie z łódeczkami, opisane w „Rozprawie o metodzie” Kartezjusza jest niezwykle bogate dydaktycznie. Warto zacząć od jednej łódeczki i zauważyć, jak się ona obraca, jeśli została położona „niewłaściwie”: bieguny magnesu ustawiają się w kierunku północ- południe. Zbudowaliśmy kompas!

2. Pole ziemskie wpływa na ruch łódeczek. Spróbujcie puszczać je z różnych rogów miski.

3. Oddziaływanie, o ile nie ma w pobliżu obiektów magnetycznych jak choćby gwoździe w stole, rzeczywiście może być obserwowane na dużą odległość. Łódeczki przyspieszają „znacznie”, w miarę zbliżania, bo rośnie siła ich wzajemnego oddziaływania. Ruch jest więc „bardziej przyspieszony niż jednostajnie przyspieszony”. Należy przypomnieć uczniom warunek ruchu *jednostajnie* przyspieszonego, tj. stałość siły. Siła oddziaływania między magnesami zależy od odległości – im bliżej siebie łódeczki, tym większa siła.

2.1. Badanie pola magnetycznego za pomocą opiłków żelaza

Cel: badanie pola magnetycznego za pomocą opiłków żelaza.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- jeden magnes,
- opiłki żelaza (umieszczone w pudełku od płyty CD).



Zdjęcie 1. Magnes i opiłki. Badanie pola magnetycznego za pomocą opiłków.

Wykonanie:

Weź pudełko po płycie CD wypełnione opiłkami żelaza. Weź magnes i połącz go pod pudełkiem tak, aby było widać opiłki. Poruszaj magnesem. Co się dzieje? Opiłki żelaza poruszają się za magnesem tzn. ich ruch odpowiada ruchowi magnesu. Połącz magnes pod pudełkiem. Co się dzieje? Opiłki żelaza układają się w charakterystyczny sposób.

Wyjaśnienie:

Gdy poruszasz magnesem opiłki żelaza poruszają się za nim, ponieważ działa siła przyciągania magnetycznego. Opiłki żelaza stają się małymi magnesami.

Gdy położysz magnes pod pudełkiem opiłki układają się w specyficzny sposób. Wiele z nich znajduje się w pobliżu obu biegunów – północnego i południowego, a reszta układa się tworząc linie (tak jak pokazuje to powyższe zdjęcie). Położenie opiłków jest różne tzn. część z nich leży, a część „stoi”. Rozmieszczenie opiłków obrazuje linie pola magnetycznego powstające wokół magnesu.

Uwagi metodologiczne:

1. Opiłki znane z laboratoriów szkolnych są kłopotliwe w użyciu (brudzą). Wyżej pokazany „czytnik linii pola” można zbudować we własnym zakresie, tnąc na wiórki stalowy zmywak do naczyń.

2. Doświadczenie pochodzi od Faradaya. Pokazanie linii sił pola magnetycznego jest znacznie prostsze niż linii sił pola elektrycznego (dla tego ostatniego potrzebna jest kasza manna, olej, i źródło silnego pola elektrycznego jak maszyna elektrostatyczna). W opisie dla ucznia podajemy, że opiłki są „przyciągane”. W rzeczywistości *indukują* się w każdym wiórce dwa bieguny magnetyczne – bliżej magnesu biegun przeciwny, dalej - taki sam. Opiłki tworzą ładne linie, bo powstaje łańcuch wzajemnie przyciągających się magnesów (dipoli).

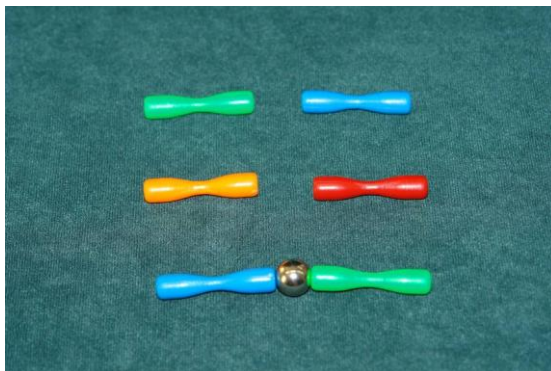
Doświadczenie to składa się na serię kilku różnych „detektorów pola magnetycznego” w zestawie UMK do nauczania elektromagnetyzmu.

2.3. Badanie pola magnetycznego za pomocą klocków magnetycznych i kulek (Geomag)

Cel: badanie pola magnetycznego za pomocą klocków GeomagTM.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnetyczne pręciki,
- małe stalowe kulki.



Zdjęcie 1. Magnetyczne pręciki i kulka (GEOMAGTM)

Wykonanie:

Weź magnetyczne sztabki i stalową kulkę. Między pręciki zbliżone do siebie przeciwnymi biegunami włóż kulkę. Zaobserwuj co się dzieje. Następnie między sztabki zbliżone tymi samymi biegunami włóż kulkę. Co się dzieje tym razem?

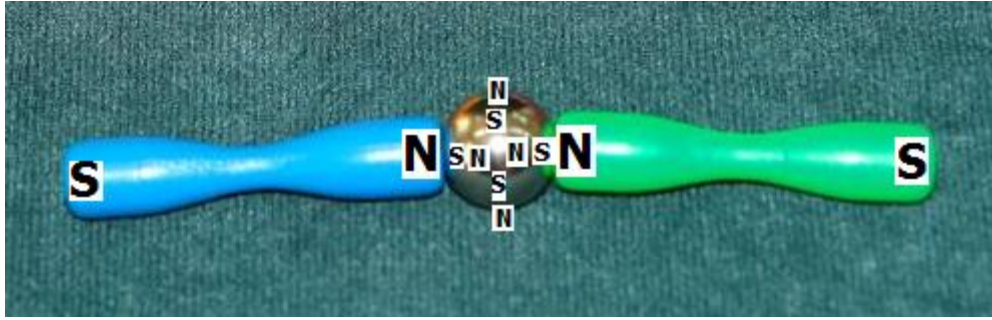
Wyjaśnienie:

Kulka wykonana jest ze stali, a więc z materiału ferromagnetycznego. Jeśli włożysz ją między sztabki zbliżone biegunami różnoimiennymi, to w kulce indukuje się pole magnetyczne w charakterystyczny sposób. Od strony pręcika zbliżonego biegunem północnym w kulce indukuje się biegun południowy, a po przeciwnej stronie biegun północny. Biegun północny kulki oddziałuje z drugim pręcikiem powodując wzajemne przyciąganie się. W wyniku wzajemnych oddziaływań kulki i pręcików w kulce indukowany jest *dipol magnetyczny*.



Rysunek 2. Pręciki magnetyczne zbliżone biegunami różnoimiennymi oraz indukowane pole magnetyczne w kulce.

Jeśli kulkę włożysz między pręciki zbliżone do siebie biegunami jednoimiennymi, również jest przyciągana. Wyjaśnienie tej sytuacji jest bardziej skomplikowane. Spójrz na rysunek 3.



Rysunek 3. Pręciki magnetyczne zbliżone biegunami jednoimiennymi oraz indukowane pole magnetyczne w kulce.

Rysunek 3 pokazuje, że pole magnetyczne wytworzone w sferze przypomina kształtem „latający dysk”: bieguny południowe wychodzą z góry i dołu dysku a na całym (poziomym) brzegu dysku leży biegun północny. Tak zbudowane są magnesy używane są do zakrzywiania biegu cząstek w wielkich akceleratorach. Nazywamy te konfigurację „kwadrupolem”.

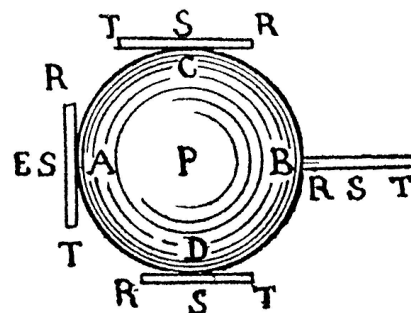
Uwagi metodologiczne:

1. Doświadczenie wprowadza trudne pojęcia, jak kwadrupol magnetyczny. Proponujemy je jako rozszerzenie zainteresowań uczniów a nie jako część głównej ścieżki dydaktycznej. Co więcej, niepełne lub niewłaściwe wytłumaczenie doświadczenia może podważyć główną przesłankę nauczania o magnesach: „wszystkie magnesy mają zawsze dwa bieguny” (innymi słowy, strumień magnetyczny przechodzący przez zamkniętą powierzchnię wynosi zero, lub jeszcze inaczej, *nie istnieją monopole magnetyczne*).

2. Wprowadziliśmy to doświadczenie również z uwagi na rozpowszechnienie zabawek konstrukcyjnych typu „geomag”. Przy zabawie z nimi rodzi się pytanie: jeżeli koniec S przyciąga się z końcem N drugiego elementu, to jak dołożyć trzeci element w tym samym wierzchołku? I jaki N czy S? W rzeczywistości, kulki są zasadniczym elementem zabawki. Same w sobie są niemagnetyczne (zbudowane z *miękkiej* magnetycznie stali), ale w pobliżu magnesów indukują się w nich *właściwe*, tj. zawsze przeciwne bieguny. Proszę zauważyć, że na tej samej zasadzie działają np. opiłki magnetyczne. Istnienie więcej niż dwóch biegunów w stalowej kulce obserwował już Kartezjusz.



Rys. 45



Rys. 43

Ryc.4 Magnesy według Kartezjusza: konfiguracje biegunów z jego pracy z 1644 roku

3. Opis „geomagu” i biegunów w różnych konfiguracjach zawiera praca G. Karwasza i współpracowników „Geomag paradoxes” w Physics Education, no.1 (2006)

3.2. Kolumnienka magnesów - obwarzanków

Cel: badanie (jakościowe) oddziaływania między kilkoma magnesami.

Środki dydaktyczne: z zestawu doświadczalnego:

- kolumnienka magnesów – obwarzanków
- linijka



Zdjęcie 1. Kolumnienka magnesów

Wykonanie:

Weź dwa magnesy – obwarzanki i nałóż je na kolumnienkę tak, aby były zwrócone do siebie tymi samymi biegunami. Co się dzieje? Weź następny magnes i dołóż go na kolumnienkę tak, aby był skierowany tym samym biegunem, co poprzedni magnes. Co zaobserwowałeś? Dołóż czwarty magnes. Co się stało?

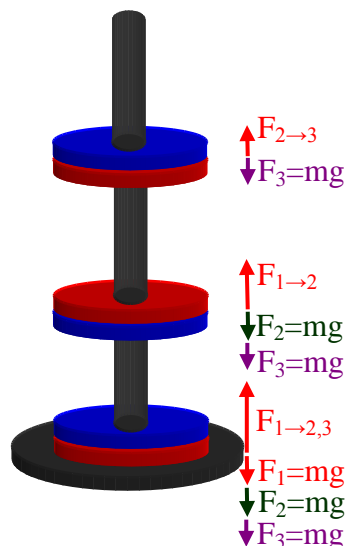
Zdejmij magnesy. Nałóż na kolumnienkę dwa magnesy biegunami jednoimiennymi do siebie. Zmierz odległość między nimi i zanotuj ją. Dołóż trzeci magnes. Zmierz odległości między: pierwszym i drugim magnesem, drugim i trzecim magnesem. Zanotuj wyniki pomiarów. Dołóż kolejny magnes. Ponownie zmierz odległości między: pierwszym i drugim magnesem, drugim i trzecim magnesem, trzecim i czwartym. Przeanalizuj otrzymane wyniki.

Wyjaśnienie:

Wiesz już, że magnesy zbliżone do siebie biegunami jednoimiennymi odpychają się. Na podstawie trzeciej zasady dynamiki Newtona można stwierdzić, że magnesy odpychają się siłami o tych samych wartościach.

Po dołożeniu trzeciego magnesu mamy do czynienia z większą ilością działających sił tzn. między magnesem pierwszym i drugim, drugim i trzecim. Siła ciężkości trzeciego magnesu musi być zrównoważona przez siłę odpychającą pochodzącą od drugiego magnesu. Oznacza to, że na drugi magnes działa nie tylko jego siła ciężkości, ale i siła reakcji pochodząca do trzeciego magnesu.

Wyjaśnijmy to jeszcze raz: jeżeli nad dolnym magnesem wisi tylko jeden magnes, musi być on odpychany w górę siłą równą jego ciężarowi. Jeśli nad dolnym magnesem wiszą dwa magnesy (masa dwukrotnie większa), odpychająca siła magnetyczna musi być dwa razy większa. Dwa razy większa siła odpychająca występuje, jeśli magnesy są bliżej siebie.



Rysunek 2: Schemat pokazujący oddziaływania między magnesami. Magnesy pozostają w spoczynku, więc siły na nie działające pozostają w równowadze.

Po dołożeniu następnego magnesu ponownie odległości między magnesami ulegają zmianie, ponieważ dodatkowa siła ciężkości powoduje kolejne siły reakcji między sąsiadującymi magnesami.

Uwagi metodologiczne:

1. Doświadczenie to, oprócz ilustracji oddziaływania między magnesami, jest jednym z najlepszych dydaktycznie przykładów na III zasadę dynamiki Newtona. Rozważmy po kolei siły działające na poszczególne magnesy na powyższym rysunku.

1) na magnes najwyższy (nr 3) musi działać siła równoważąca jego ciężar $F_{32}=mg$

2) źródłem tej siły może być tylko magnes nr 2. Magnes nr 2 działa siłą F_{32} na magnes nr 3. Wskutek III zasady, magnes 3 działa siłą równą co do wartości ale o przeciwnym zwrocie na magnes nr 2 (siła F_{23}). Jeżeli magnes nr 2 pozostaje w spoczynku (a tak jest, bo „wisi”), to siła ta musi być zrównoważona przez inną siłę. Źródłem tej innej siły może być tylko magnes nr 1 (siła F_{12}). Magnes nr 1 musi wywierać na magnes nr 2 siłę równoważącą zarówno F_{32} jak i siłę ciężkości działającą na magnes nr 2. Mamy więc $F_{12} = - F_{23} - mg = - 2mg$.

3) kontynuując ten tok myślenia dochodzimy do wniosku, że na podstawie działa siła $F_{21} = - 3 mg$.

Innymi słowy, na podstawkę ciężą wszystkie trzy magnesy, mimo, że między sobą nie stykają się. Siły przenoszą się na odległość.

2. Przypominamy jak specyficzna była konfiguracja biegunów w magnetycznych pieczętkach i kulkach „geomagu”. W magnetycznych „obwarzankach” jest ona nie mniej ciekawa: przeciwstawne bieguny magnesów znajdują się w górnej i dolnej podstawie obwarzanka.

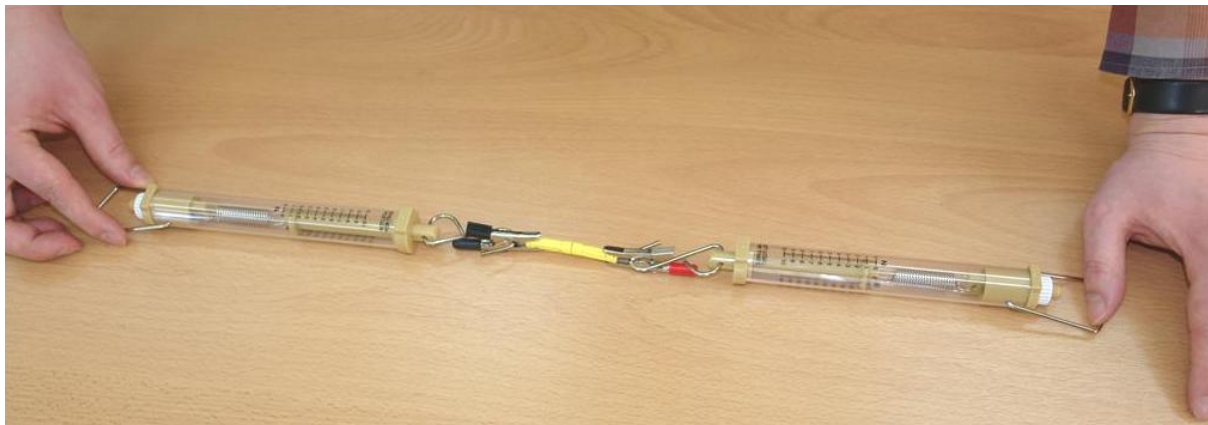
3. Bardzo ciekawe jest wprowadzenie w drgania góra - dół najwyższego obwarzanka: zaczynają się poruszać wszystkie magnesy. Wzdłuż kolumny propaguje swego rodzaju fala (podłużna, jak fala głosowa).

3.4. Siła przyciągania: pomiar przy użyciu dynamometru

Cel: badanie (ilościowe) siły przyciągania między dwoma patyczkami magnetycznymi.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- dwa magnetyczne patyczki (GEOMAG™)
- dwa połączenia krokodylowe
- dwa dynamometry



Zdjęcie 1. Badanie siły przyciągania przy użyciu dynamometru.

Wykonanie:

Weź dwa pręciki magnetyczne, złącza krokodylowe i dynamometry. Patyczki zbliz biegunami różnoimiennymi, połącz je z dynamometrami tak, jak pokazuje powyższe zdjęcie. Następnie odczytaj wartość siły przyciągania z dynamometrów, porównaj odczytane wartości. Zastanów się, jak wyjaśnić wskazania dynamometrów.

Wyjaśnienie:

Wiesz już, że magnesy zblizone do siebie biegunami różnoimiennymi przyciągają się. Magnes pierwszy przyciąga magnes drugi siłą o pewnej wartości (odczytałeś ją z dynamometru). Korzystając z trzeciej zasady dynamiki Newtona wiesz, że oddziaływania są wzajemne czyli magnes drugi przyciąga magnes pierwszy z siłą o tej samej wartości (co odczytałeś z drugiego dynamometru).

Uwagi metodologiczne:

Doświadczenie jest znacznie dokładniejsze, jeśli do pomiaru siły użyjemy prostej elektronicznej wagi kuchennej. Wagi te mają zazwyczaj podstawki ze stali magnetycznej, więc „patyczek” geomag stoi na niej stabilnie. Waga mierzy siłę ciężkości działającą na ten patyczek. Zblizanie do stojącego patyczka innego magnesu, przeciwnym biegunem, powoduje powstanie siły przyciągającej, stojący patyczek pozornie traci na wadze. Możliwy jest dokładny pomiar siły przyciągania magnesów w funkcji ich wzajemnej odległości.

Uwaga: zblizanie tym samym biegunem nie mierzy wagi drugiego magnesu, ale siłę z jaką nasza ręka dociska do siebie dwa magnesy.

Pamiętać też należy, że w odróżnieniu od oddziaływań elektrycznych, w oddziaływaniach magnesów występujących sił jest więcej: oddziałują zarówno bieguny te blisko siebie, jak i te z przeciwnych końców magnesu.

3.5. Siła odpychania: magnesy sztabkowe (GEOMAG™) w rurce

Cel: badanie siły odpychania między dwoma patyczkami magnetycznymi.

Środki dydaktyczne: z zestawu doświadczalnego:

- dwa magnetyczne patyczki (GEOMAG™)
- plastikowa rurka
- linijka



Zdjęcie 1. Badanie siły odpychania.

Wykonanie:

Jeden patyczek magnetyczny wrzucić do rurki plastikowej, której koniec oparty jest np. o ławkę. Włożyć do rurki drugi magnetyczny patyczek skierowany tym samym biegunem do pierwszego patyczka. Zmierzyć odległość między nimi.

Wyjaśnienie:

Magnetyczna siła odpychania zależy od odległości między magnesami oraz wartości biegunów. Zachodzi tu pewne podobieństwo, chociaż jedynie dość ogólne, z oddziaływaniem ładunków elektrycznych, których to oddziaływanie opisał Coulomb. Można zapisać siłę Coulomba dla biegunów magnetycznych:

$$F = k \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

gdzie: m_1, m_2 – magnetyzacja; r – odległość, k – współczynnik proporcjonalności.

Widzisz, że siła odpychania jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między biegunami. Sformułowanie to oznacza, że im dalej patyczki będą znajdowały się od siebie, tym wartość siły odpychania będzie mniejsza. Obserwowaliśmy podobną zależność w doświadczeniu z magnetycznymi „obwarzankami”.

Uwaga dydaktyczna:

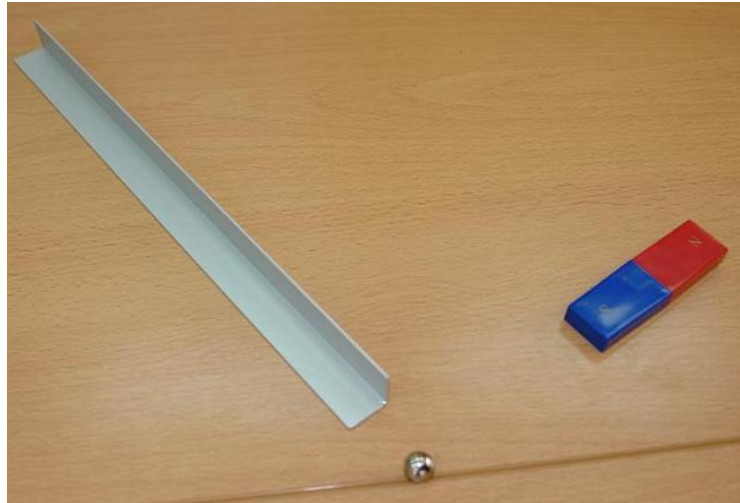
W rzeczywistości siła oddziaływania między biegunami magnesów ma bardziej skomplikowaną zależność, ale wykracza to poza kurs fizyki na poziomie szkoły średniej. (zob. np. Mazzoldi i in. Fisica II – elettromagnetismo, Zanichelli editore, Padova)

3.6: Tory kulek w polu magnetycznym

Cel: badanie wpływu pola magnetycznego na ruch metalowej kulki.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnes sztabkowy
- „rynienka” z aluminium lub drewna
- stalowa kulka



Zdjęcie1. Ruch kulki w polu magnetycznym.

Wykonanie:

Przytrzymaj rynienkę tak, by była lekko uniesiona w górę, a drugi koniec oprzyj o stół, następnie włóż w nią kulkę. Zaobserwuj, jak porusza się kulka po stole. Wykonaj dokładnie to samo, ale tym razem poproś kolegę / koleżankę o pomoc, aby w pobliżu wylotu do rynienki umieścił(a) magnes. Jak teraz porusza się kulka?

Wyjaśnienie:

W pierwszym przypadku kulka porusza się po stole po linii prostej wzdłuż rynienki, wówczas na kulkę działa tylko siła grawitacji. Po zbliżeniu magnesu kulka nie porusza się po linii prostej, ale zaczyna skręcać. Jej tor ruchu jest krzywoliniowy. Przyczyną takiego ruchu jest to, że zaczyna działać dodatkowa siła – siła magnetyczna. Magnes oddziałuje na kulkę i powoduje, że zmienia się kierunek jej ruchu.

Uwagi metodologiczne:

1. Jest to bardzo ciekawe doświadczenie, wprowadzające do pozornie innego działu fizyki, jakim jest fizyka jądrowa. Otóż odchylenie od toru prostoliniowego zależy od: 1) „siły” magnesu, 2) odległości początkowej trajektorii (prostoliniowej) od magnesu, 3) masy kulki oraz 4) jej prędkości początkowej.

Doświadczenie to bardzo przypomina doświadczenia Rutherforda nad rozpraszaniem cząstek alfa w folii złota.

Uczniowie mogą przeprowadzić „prawdziwe” pomiary rozpraszania, zmieniając kąt nachylenia i położenie początkowe kulki oraz odległość toru od magnesu. Z odrobiną cierpliwości, doświadczenie to może służyć do pomiaru prędkości kulki na końcu równi.

4.1: Magnes zakręcający na równi pochyłej

Cel: badanie istnienia ziemskiego pola magnetycznego.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnes (cylindryczny)
- równia pochyła



Zdjęcie 1. Magnes na równi pochyłej.

Wykonanie:

Ustaw magnes na szczycie równi i przyjrzyj się, w jaki sposób porusza się w dół. Po jakim torze porusza się magnes? Jaki może być tego przyczyna?

Zmień orientację równi i puść magnes ponownie. Znajdź taką orientację, aby magnes poruszał się po linii prostej.

Wyjaśnienie:

Magnes porusza się po torze krzywoliniowym – skręca. Działają na niego siły: grawitacji oraz jeszcze jedna siła, która pochodzi z „wnętrza Ziemi” – siła magnetyczna. Gdyby nie działała ta druga siła, magnes poruszałby się po linii prostej. Siła magnetyczna pochodząca od Ziemi przyczynia się do zakrzywiania toru ruchu magnesu. Ziemia ma dwa bieguny magnetyczne tak, jak magnes sztabkowy. Magnes zakręca, ponieważ oddziałuje z polem magnetycznym Ziemi. Ustawia się, jak igła magnetyczna, w kierunku północ - południe.

Uwagi metodologiczne

1. Doświadczenie jest bardzo proste, a przynosi zaskakujący wynik. O ile jesteśmy przyzwyczajeni, że pole magnetyczne odchyła „lekkie” obiekty jak igły magnetyczne, to nie spodziewamy się podobnego efektu dla „ciężkich” magnesów. W rzeczywistości, jak to pokazuje doświadczenie powyższe i doświadczenia z pływającymi łódkami, pole magnetyczne Ziemi działa na wszystkie magnesy.

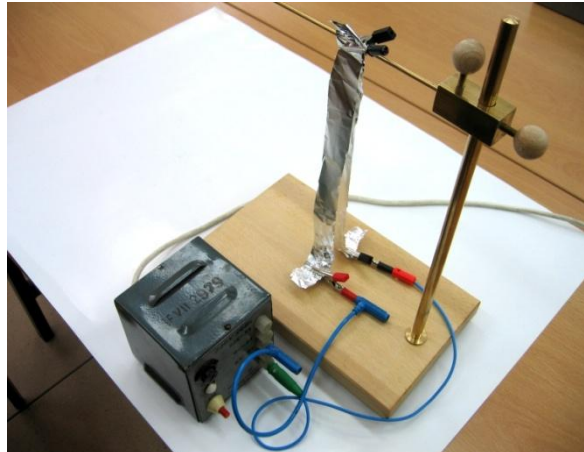
2. W doświadczeniu bardzo istotne jest nachylenie równi oraz jej kierunek w stosunku do linii sił pola ziemskiego. Zaznaczając jeden z biegunów magnesu (bieguny znajdują się zazwyczaj na podstawach cylindra), możemy pokazać, że odwrócenie biegunów powoduje zakrzywienie w odwrotnym kierunku. Jeżeli magnes nie zbacza, to stacza się on w kierunku wschód-zachód. Dlaczego?

5.4: Siła magnetyczna między dwoma równoległymi przewodami (doświadczenie Ampère'a)

Cel: badanie oddziaływania między przewodami, przez które przepływa prąd elektryczny.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- dwa kable z połączeniem krokodylowym
- dwa paski folii aluminiowej
- zasilacz niskiego napięcia (np. 12 V), możliwie dużego prądu (do 10 A)
- statyw



Zdjęcie 1. Ustawienie zestawu do demonstracji doświadczenia Ampère'a.

Wykonanie:

Do statywu przymocuj dwa paski folii aluminiowej – tak jak pokazano to na zdjęciu 1. Następnie połącz je z zasilaczem. Włącz zasilacz. Zaobserwuj, co się dzieje z paskami. Jak myślisz, dlaczego się odpychają?

Wyjaśnienie:

Paski z folii aluminiowej są przymocowane w taki sposób do statywu, że są do siebie równoległe. Paski stanowią część obwodu elektrycznego, a więc przepływa przez nie prąd. Kierunek przepływu prądu jest antyrównoległy tzn. prąd w paskach płynie w przeciwnych kierunkach. Z pewnością zauważyłeś, że paski działają na siebie siłami odpychającymi. Jak już wiesz wokół przewodu, przez który przepływa prąd powstaje pole magnetyczne. Paski są właśnie przewodem z prądem, więc wokół nich też powstaje pole magnetyczne. Stąd można wnioskować, że między paskami działają magnetyczne siły odpychające. Jak z pewnością pamiętasz, dwa magnesy odpychają się, gdy zbliżysz je biegunami jednoimiennymi. Podobnie jest w przypadku przewodników z prądem tzn. w przewodniki odpychają się, ponieważ powstające dwa pola magnetyczne są zwrócone tymi samymi biegunami. Można to sprawdzić korzystając z reguły prawej dłoni.

Paski są z cienkiej folii aluminiowej, gdyż siła działająca jest niewielka. Przyjmijmy, że paski są odległe o $r = 1 \text{ cm}$, o długości $l = 20 \text{ cm}$ i płynie przez nie prąd $I = 10 \text{ A}$. Do obliczenia tej siły musimy najpierw (z prawa Ampère'a) znaleźć wielkość indukcji pola.

Korzystamy ze wzoru $B = \mu_0 I / 2\pi r = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 10 / 0,01 \text{ [T]} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

Siłę działającą (na cały pasek) obliczamy ze wzoru $F = IBl = 10 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2 \text{ [N]} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ N}$

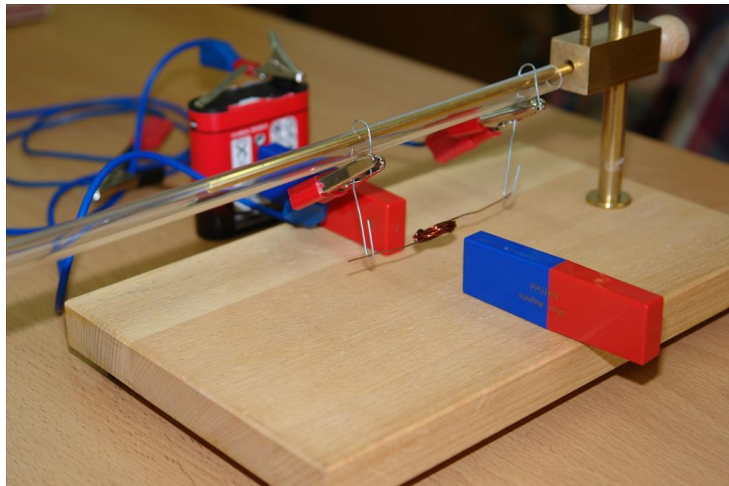
Przypominamy, że definicja ampera (a przez to i kulomba) korzysta z powyższego wzoru.

6.2. Zwój z przewodnika między biegunami magnesów

Cel: badanie siły działającej na zwój z prądem umieszczony w polu magnetycznym .

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- zwój z przewodnika
- 2 przewody ze złączami krokodylowymi
- bateria
- 2 spinacze
- 2 magnesy sztabkowe
- statyw



Zdjęcie 1. Sposób połączenia elementów zestawu doświadczalnego.

Wykonanie:

Na statywie zamocuj za pomocą spinaczy zwój z przewodnika, pamiętaj o umieszczeniu plastikowej nakładki na ramię statywu. Ustaw dwa magnesy skierowane do siebie przeciwnymi biegunami (tak jak pokazano to na zdjęciu powyżej). Podłącz za pomocą złączy krokodylowych baterię i zwój z przewodnika. Co się dzieje? Następnie podłącz baterię odwrotnie, by zmienić kierunek przepływu prądu. Co zaobserwowałeś? Przetaw magnesy - zamień bieguny. Jak teraz zachowuje się zwój?

Wyjaśnienie:

Podobnie, jak w poprzednim doświadczeniu (6.1.) zwój zaczyna się poruszać. Tym razem nie jest to jednak tylko wychylenie, ale obrót wykonywany przez zwój. Po zmianie kierunku przepływu prądu, zwój obraca się w przeciwną stronę niż za pierwszym razem. Gdy zamienimy bieguny magnesów, wówczas też zmienia się kierunek obrotu zwoju. Ponownie przyczyną ruchu zwojownicy jest działanie siły Lorentza. Tym razem siła ta działa w ruchu po okręgu, gdyż zwój w przybliżeniu jest okręgiem.

Przypominamy, że siła Lorentza zależy od wartości i prędkości poruszających się ładunków oraz natężenia pola magnetycznego.

Uwaga dydaktyczna:

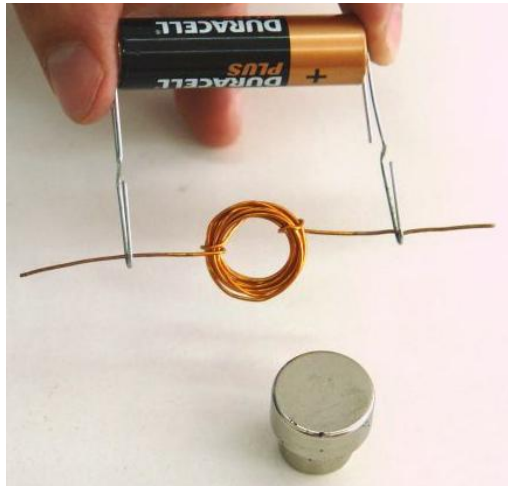
Pamiętajmy też, że zwój przewodnika z prądem jest *dipolem* magnetycznym, czyli zachowuje się jak magnes sztabkowy. Obrót zwoju to jakby ustawianie się magnesu sztabkowego w polu magnetycznym Ziemi (zob. doświadczenie z pływającymi magnesami).

6.3.a. Silnik na spinaczach

Cel: badanie siły działającej na zwoj umieszczony w polu magnetycznym .

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- zwoj z przewodnika
- 2 spinacze
- bateria paluszek
- magnes neodymowy



Zdjęcie 1. Model silnika na spinaczach.

Wykonanie:

Końce spinaczy ułóż na końcach baterii, a po przeciwnej stronie włóż zwoj z przewodnika. Trzymając baterię zbliż ją do magnesu. Co się dzieje? Odwróć magnes tak, aby był ustawiony do baterii przeciwnym biegunem niż za pierwszym razem. Jak zachowuje się teraz zwoj?

Wyjaśnienie:

Powyższy model jest modelem silnika elektrycznego na prąd stały, który ma szerokie zastosowanie w wielu urządzeniach. Zwoj z przewodnika obraca się, ponieważ znajduje się w polu magnetycznym i przepływa przez niego prąd. Źródłem prądu jest bateria - paluszek, a obwód jest zamknięty dzięki spinaczom i zwojowi. Po umieszczeniu obwodu w pobliżu magnesu na zwoj zaczyna działać znana Ci już siła Lorentza. Po odwróceniu magnesu zmienia się kierunek pola magnetycznego, więc zwoj obraca się w przeciwną stronę niż za pierwszym razem.

Uwaga dydaktyczna:

Skonstruowaliśmy prosty silnik elektryczny. „Prawdziwy” silnik prądu stałego używa *komutatorów* dla zmiany kierunku przepływu prądu po obrocie silnika o 180° . Nasz silnik takiego komutatora nie posiada. Dlaczego więc kręci się? Powinien zatrzymać się po wykonaniu półobrotu.

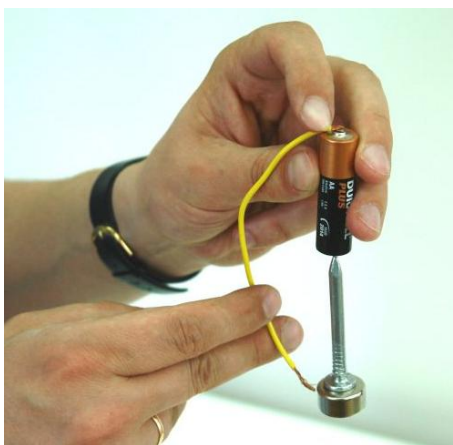
Przewodnik jest częściowo izolowany, kontakty przewodnika ze spinaczami nie są doskonałe, magnes nie jest doskonałym dipolem, koniec końców, raz zakręcony silnik kręci się!

6.3.b. Silnik z "jedną pętlą"

Cel: badanie zasady działania silnika elektromagnetycznego.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- bateria paluszek
- gwóźdź
- magnes neodymowy
- kawałek przewodu izolowanego



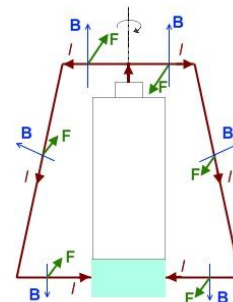
Zdjęcie 1. Model silnika z "jedną pętlą".

Wykonanie:

Zdejmij izolację z końców przewodnika. Na magniesie postaw gwóźdź, a na nim baterię i przytrzymaj ją palcami. Całą konstrukcję podnieś w górę, aby nie dotykała podłoża. Jednym końcem przewodu dotknij do magnesu, a drugim do baterii. Zaobserwuj co się dzieje? Dotykaj końcem przewodu do różnych części magnesu. Dla jakiego położenia przewodu przy magniesie obraca się on najszybciej, a dla jakiego najwolniej?

Wyjaśnienie:

Silnik ten jest bardzo podobny do silnika z następnego doświadczenia (6.3c). Na półpętlę z przepływającym prądem działa siła Lorentza, jak na schemacie obok.



Rys. 2. Siły działające na dwie pętle z przewodnikiem.

K. Gołębiowski, W Peeters i G. Karwasz „Mikser z magniesem (na deser)” Foton **104**, Wiosna 2009.

Pętla powinna się więc kręcić. Ale ten jest przytrzymywany ręką, tym razem nie porusza się przewód, ale magnes. Dzieje się tak, gdyż przewód - pętla jest przytrzymywana ręką, zatem zgodnie z trzecią zasadą dynamiki (akcja i reakcja) magnes się obraca.

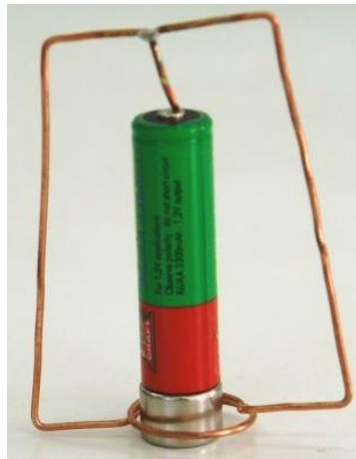
Na pewno zauważyłeś, że magnes się nie obraca - zatrzymuje się, gdy przewód dotyka magnesu na dole. W takim ustawieniu przewód obejmuje oba bieguny magnesu i wypadkowy strumień pola magnetycznego jest zerowy. Jeśli przewód dotyka magnesu w połowie jego wysokości, to przewód obejmuje tylko jeden biegun i magnes obraca się najszybciej.

6.3.c. Silnik z dwoma "skrzydełkami" (silnik - mikser)

Cel: badanie zasady działania silnika elektromagnetycznego.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- bateria paluszek
- magnes neodymowy
- ramka z przewodnika w kształcie trapezu "z pętlą"



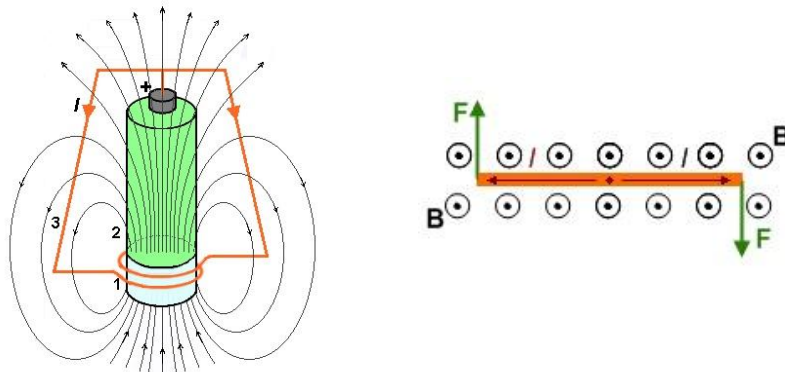
Zdjęcie 1. Silnik - mikser.

Wykonanie:

Baterię postaw na magnesie. Na baterii oprzyj ramkę, jak pokazano na zdjęciu. Co się dzieje? Odwróć magnes, jak teraz zachowuje się ramka? Odwróć baterię, jak się porusza ramka?

Wyjaśnienie:

Przez obie części ramki (lewą i prawą) przepływa prąd. Obwód jest zamknięty dzięki temu, że co jakiś czas pętla dotyka do magnesu. Jednocześnie magnes wytwarza pole magnetyczne, które oddziałuje z ramką. Na skutek działania siły Lorentza ramka obraca się tak długo, dopóki utrzymuje się na baterii. Po odwróceniu baterii zmienia się kierunek przepływu prądu, co z kolei powoduje zmianę kierunku obrotu ramki. Jak pokazuje poniższy rysunek, układ linii pola magnetycznego i kierunki przepływu prądu są takie, że na każdy element ramki działają momenty sił w tym samym kierunku, zgodnie ze wzorem $F = I L \times B$.



Rys. 1 Rozkład linii pola magnetycznego w obszarze silnika (lewy panel) i siły działające na górny element ramki (widok z góry).

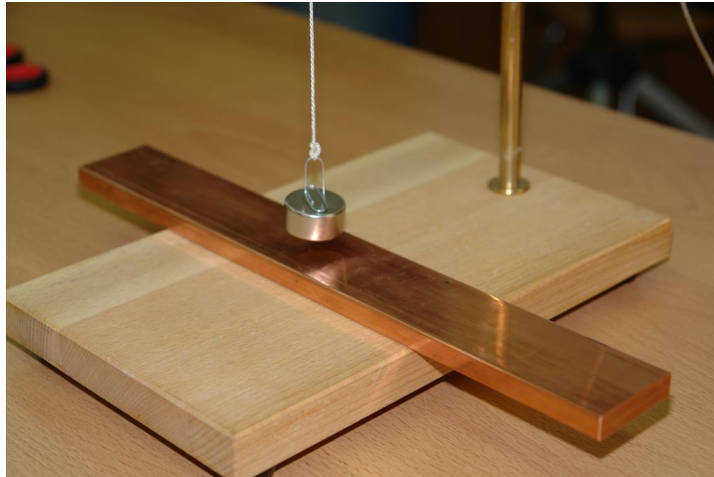
K. Gołębiowski, W Peeters i G. Karwasz „Mikser z magnesem (na deser)” Foton **104**, Wiosna 2009.
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/TPSS/Pliki/Mikser_z_magnesem_na_deser.pdf

7.3.a. Leniwe wahadło

Cel: badanie powstawania prądów wirowych.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy
- spinacz
- sznurek
- statyw
- miedziana sztabka



Zdjęcie 1. Leniwe wahadło

Wykonanie:

Przywiąż sznurek do spinacza. Spinacz połóż na magnesie. Na podstawie statywu pod magnesem połóż miedzianą sztabkę. Wychyl magnes z położenia równowagi. Przyjrzyj się, jak zachowuje się magnes.

Wyjaśnienie:

Z poprzednich doświadczeń wiesz, że zmienne pole magnetyczne indukuje przepływ prądu w przewodniku. W tym doświadczeniu jest podobnie. Magnes wychylony z położenia równowagi porusza się jak wahadło, ale w zwolnionym tempie. Przyczyną takiego ruchu magnesu jest miedziana sztabka, a dokładnie to, co się dzieje z elektronami przewodnictwa w jej wnętrzu, z pewnością pamiętasz, że miedź jest przewodnikiem.

Nad sztabką znajduje się wahający się magnes. Zmienne pole magnetyczne (magnes się porusza) powoduje, że wewnątrz sztabki indukują się prądy, tak samo jak w przypadku cewki. O ile jednak w przypadku cewki prądy płyną w dobrze określonym kierunku (tj. wzdłuż drutu), to w sztabce miedzi prądy mogą płynąć we wszystkich kierunkach. I tak się właśnie dzieje!

W jakich kierunkach płyną indukowane prądy? W takich, jak to definiuje reguła Lenza: zawsze tak, że pole magnetyczne wytworzone przez indukowane prądy przeciwstawia się zmianom *zewnętrznego* pola magnetycznego.

Korzystając z prawa Ohma wiemy, że wartość prądu zależy od oporu obwodu. W przypadku przewodnika o dużej masie - takiego jak sztabka miedziana, wartość oporu jest mała. Z kolei

mała wartość oporu umożliwia powstanie prądów wirowych o znacznej wartości, nawet gdy pole magnetyczne zmienia się wolno. Wartość natężenia prądów wirowych można obliczyć w przybliżeniu ze wzoru:

$$I_{\text{wir}} \sim f B_{\text{max}} \sigma,$$

gdzie f - częstotliwość zmian pola magnetycznego, B_{max} - amplituda zmian indukcji, σ - przewodność właściwa ciała.

Zagadnienie:

„Normalne” wahadło nie zatrzymuje się w położeniu równowagi, ale wychyla się w drugą stronę, po czym wraca. „Leniwe” wahadło staje w położeniu równowagi. Gdzie się podziewa jego energia kinetyczna?

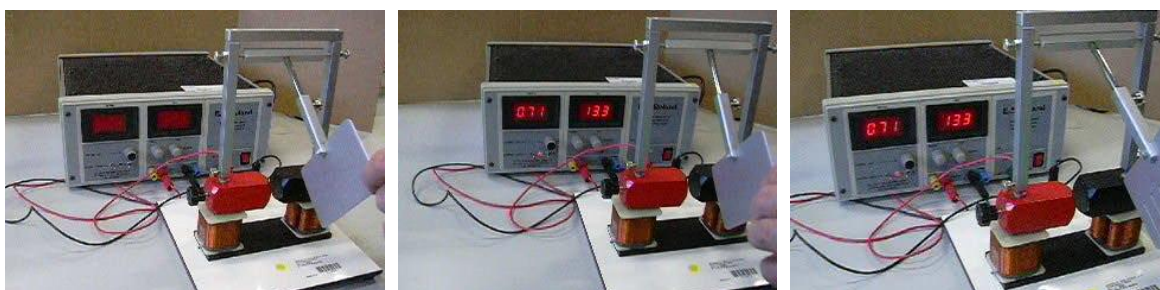
Oczywiście, energia kinetyczna wahadła jest źródłem powstania prądów indukowanych. Te z kolei, przepływając w materiale o określonej oporności, wytwarzają ciepło.

Uwagi dydaktyczne:

1. Doświadczenie pokazuje jeszcze raz, że powstająca siła elektromagnetyczna zależy od *strumienia* pola magnetycznego (a w zasadzie od szybkości jego zmian). W doświadczeniu używamy magnesu o dużej powierzchni: strumień pola jest więc duży (wszystkie magnesy neodymowe wytwarzają pola o indukcji rzędu 1 T na ich powierzchni).

2. Powstające prądy nazywamy prądami „wirowymi”. W rzeczywistości ich kierunek jest określony przez regułę Lenza. W obecnym doświadczeniu, przesuwanego się magnesu nad płytką miedzi, prądy te płyną w przekroju poprzecznym płytki. Siła hamująca zależy więc od grubości płytki; można powtórzyć doświadczenie dla cieńszej blachy miedzianej – efekt hamowania będzie znacznie słabszy.

3. Do pokazania prądów indukowanych w materiale służy też doświadczenie w konfiguracji jak na zdjęciach poniżej. Blacha aluminiowa waha się między nabiegunkami elektromagnesu. Jeśli przez elektromagnes nie przepływa prąd, ruch ten nie jest hamowany. Kiedy prąd przepływa (drugie zdjęcia) blacha jest silnie hamowana (zob. filmy w wersji internetowej). Ruch nie jest hamowany, jeśli blacha ma nacięcia jak grzebień (trzecie zdjęcie).



Zdjęcie 2. Doświadczenie ilustrujące prądy wirowe

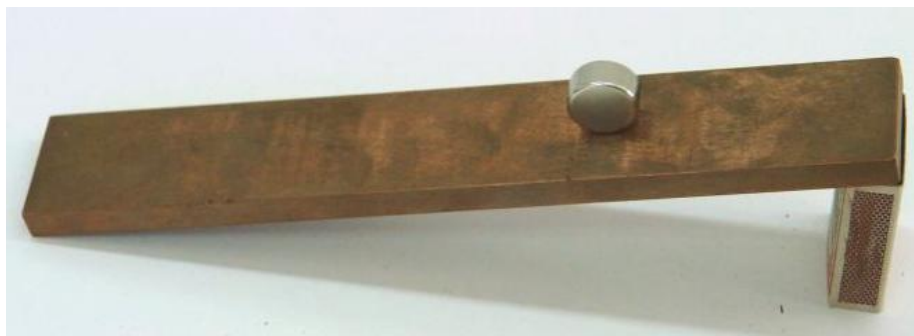
G. Karwasz, Uniwersytet w Udine, Studia podyplomowe dla nauczycieli
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/conf/UDINE/fou02.mov

7.3.c. Pijany magnes

Cel: badanie przyczyny krzywoliniowego ruchu magnesu na miedzianej równi.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy
- miedziana sztabka



Zdjęcie 1. Sposób przeprowadzenia doświadczenia

Wykonanie:

Zbuduj równię pochyłą ze sztabki miedzianej i np. pudełka po zapalkach (tak jak pokazano to na zdjęciu powyżej). Na szczycie równi ustaw magnes ("na kant") i przyjrzyj się, w jaki sposób się porusza. Zmień kąt nachylenia równi poprzez zmianę punktu jej podparcia czyli ustawienie pudełka. Czy zmiana kąta nachylenia równi zmienia tor ruchu magnesu? Kładź magnes w różnych punktach równi, bliżej i dalej od jej brzegu i obserwuj, jak się porusza.

Wyjaśnienie:

Na pewno zauważyłeś, że niezależnie od kąta nachylenia i położenia początkowego magnesu porusza się po pewnej krzywej (czasem po prostej, ale nie jest to tak interesujące). Można nawet powiedzieć, że zatacza się po równi od prawej do lewej strony, ale nie z niej nie spada.

Zauważmy przede wszystkim, że staczanie się magnesu po równi z miedzi jest znacznie wolniejsze niż po równi drewnianej (doświadczenie 4.1). Powodem spowolnienia ruchu są prądy wirowe, tak jak w kilku innych doświadczeniach z obecnego rozdziału. Obecne doświadczenie pokazuje jednak nieco więcej: magnes nie tylko spowalnia, ale „broni się” przed spadnięciem z równi!

To jasne! Gdyby magnes spadł z miedzianej płytki, to strumień pola magnetycznego wewnątrz tej płytki spadłby do zera. A to byłoby znaczną zmianą. Reguła Lenza mówi, że takim zmianom przeciwstawiają się indukowane prądy elektryczne.

W jakim kierunku płyną te prądy? W takim, aby magnes nie spadł, o ile „próbuje” spaść.

Uwaga dydaktyczna:

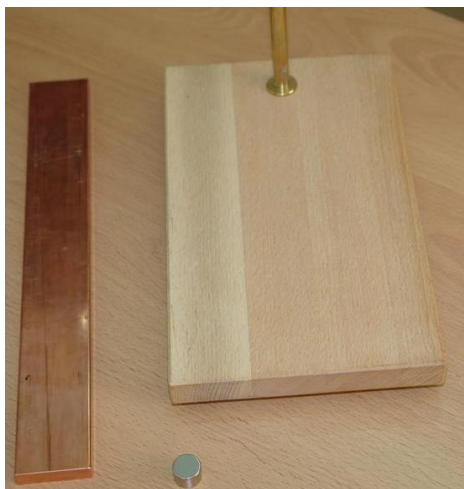
Wszystkie te doświadczenia są znakomitą ilustracją prawa Lenza: magnes nie spada z równi, sztabka miedziana jest raz wciągana, raz wypychana. Zjawisko indukcji jest takie, że stara się „zapobiec” zmianie strumienia magnetycznego. „Prądy wirowe” są korzystnym pojęciem, ale traktujmy je jako swego rodzaju metaforę dydaktyczną. Prądy indukowane powinniśmy raczej nazywać prądami Lenza (a właściwie Faradaya-von Neumana-Lenza-Foucalta), jako że w odkryciu praw indukcji uczestniczyli uczeni różnych nacji).

7.3.d. Magnes zsuwający się po miedzianej równi

Cel: badanie przyczyny zsuwania się magnesu na miedzianej równi.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy
- miedziana sztabka
- statyw



Zdjęcie 1. Potrzebne elementy z zestawu doświadczalnego.

Wykonanie:

Oprzyj miedzianą sztabkę o statyw. Na szczycie równi połóż magnes (tym razem "płasko", tak jak pokazano na zdjęciu). Zaobserwuj, w jaki sposób porusza się magnes. Odwróć magnes i przyjrzyj się jego ruchowi.

Wyjaśnienie:

Jest to kolejne doświadczenie potwierdzające istnienie prądów indukowanych w przewodniku pod wpływem zmian zewnętrznego pola magnetycznego. wirowych. Magnes nie porusza się szybko po równi, jak podpowiada intuicja, ale zsuwa się powoli. Gdyby na magnes działała tylko siła grawitacji, to zsunąłby się w krótszym czasie. Zastanówmy się dlaczego magnes zsuwa się wolniej.

Wyberzmy jeden punkt na równi - niech będzie to punkt znajdujący się w połowie długości sztabki. Gdy magnes zsuwa się ze szczytu, zbliża się do środka, ale gdy go minie - oddala się od niego. Środek równi znajduje się pod wpływem *zmieniającego się* pola magnetycznego. Najpierw indukcja tego pola wzrasta – magnes się zbliża, a gdy magnes już minie środek indukcja pola maleje. Dla dowolnego punktu na miedzianej równi pole magnetyczne ulega zmianie. Indukowane są więc w sztabce prądy elektryczne.

Gdy pole magnetyczne rośnie, indukowane prądy mają taki kierunek, że *wytworzone* przez te prądy *nowe* pole magnetyczne *odpycha* zbliżający się magnes. Gdy magnes się oddala, powstające prądy mają taki kierunek, że magnes jest przyciągany.

Rozumowanie to możemy powtórzyć dla dowolnego punktu miedzianej sztabki. W rezultacie, ruch magnesu zostaje spowolniony a początkowa energia potencjalna magnesu na górze równi zamienia się w ciepło wytworzone przez indukowane prądy.

7.3.e. Spadający magnes w miedzianej rurze (bez nacięć i z nacięciami)

Cel: badanie ruchu magnesu w miedzianej rurze.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy
- miedziana rura bez nacięć
- miedziana rura z nacięciami



Zdjęcie 1. Sposób wykonania doświadczenia.

Wykonanie:

Do miedzianej rury bez otworów wrzucić magnes. Słysząc, jak się obija o ściany rurki? Popatrz, jak magnes porusza się w jej wnętrzu. Jak określiłbyś, „co robi magnes”?

Podaj rurkę ze spadającym magnesem w środku koledze. Magnes nadal jest w środku rurki?

Ten sam magnes wrzucić do miedzianej rury z nacięciami. Jak się tym razem porusza? Opisz słownie ten sposób spadania.

Wyjaśnienie:

W przypadku rury miedzianej bez nacięć magnes poruszał się w charakterystyczny sposób: nie tylko spada powoli, ale spada *nie dotykając* ścianek rurki. Tak jakby byłby od tych ścianek odpychany! Można powiedzieć, że magnes „lewituje”.

Poruszający się wewnątrz rury bez nacięć magnes wywołał powstanie przepływu prądu. Ponownie mamy do czynienia ze zmiennym polem magnetycznym, które wywołuje przepływ prądu. W jakim kierunku płyną te prądy? Zgodnie z regułą Lenza w takim, aby pole magnetyczne *indukowane* (czyli wytworzone przez indukowane *prądy*) przeciwstawiało się ruchowi magnesu. Ponieważ magnes *spada*, indukowane prądy *podtrzymują* magnes – wydaje się, że magnes *lewituje* (jak latający spodek, o ile takie istnieją).

Spadający magnes ma bieguny skierowane pionowo – indukowany magnes też powinien być ustawiony w pionie. Z doświadczeń z cewkami wiemy już, że wytwarzają pole wzdłuż ich osi. Czyli w rurce indukowane prądy muszą tworzyć okręgi, po obwodzie rurki.

W rurce z nacięciami te okręgi zostały przecięte. Prądy są nadal indukowane, ale nie mają one *właściwego* kierunku. Magnes więc nie może lewitować i spada obijając się o wnętrze rurki (obejrzyj to dokładnie i wyciągnij wnioski samodzielnie).

Uwagi dydaktyczne:

Wbrew „widowiskowemu” charakterowi doświadczenia w rurce z nacięciami, jest to doświadczenie bardzo trudne i w zasadzie „zastrzeżone” dla dydaktyki na poziomie uniwersyteckim.

Idea tego doświadczenia zrodziła się z dydaktyki na Uniwersytecie w Trydencie, gdzie bardzo dobrze skąd inąd przygotowani studenci mieli poważne kłopoty z połączeniem „klasycznego” sformułowania prawa indukcji z prawami Maxwella

Podręcznikowe sformułowanie prawa indukcji operuje pojęciem „siły elektromotorycznej” \mathcal{E}

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

i strumienia pola magnetycznego Φ_B . O ile strumień pola magnetycznego występuje również w równaniach Maxwella (w równaniach Maxwella dla *próżni*, w szczególności), to siły elektro-motorycznej w równaniach tych nie ma.

Co to jest siła elektromotoryczna? W zadaniach z bateriami i opornikami jest to „siła”, która powoduje przepływ prądu. Dokładniej, jest to napięcie mierzone na baterii, kiedy prąd *nie przepływa*, lub innymi słowy na baterii bez oporu *wewnętrznego*, albo napięcie mierzone miernikiem o *nieskończenie dużej* oporności wewnętrznej.

W każdym bądź razie, dla zdefiniowania siły elektromotorycznej musi istnieć przewód elektryczny, tworzący obwód a w tym obwodzie miernik napięcia (woltomierz). Taka próżnia oczywiście próżnią już nie jest! Czy w próżni bez przewodnika (i elektronów w nim zawartych) można poprawnie zapisać prawo indukcji?

Oczywiście, ale musimy najpierw przypomnieć czym jest napięcie. Zgodnie z prawami elektrostatyki, napięcie jest całką z pola elektrycznego. Napięcie to jakby różnica wysokości między piętrami w szkole. Pole elektryczne (albo grawitacyjne) to przyczyna staczania się po schodach lub drodze o określonym nachyleniu. Aby stwierdzić, ile wynosi różnica między poziomami w szkole, musimy policzyć ilość schodów (i znać ich nachylenie).

Matematycznie różnica potencjałów U_{AB} między punktami A i B jest równa całce z pola elektrycznego po trajektorii od A do B (iloczyn skalarny pojawia się, gdyż zarówno pole \mathbf{E} jak i element $d\mathbf{l}$ trajektorii są wektorami a znak minus gdyż pole elektryczne ma zwrot w kierunku malejącego potencjału).

$$V_{AB} = -\int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

Jako przyczynę przepływu prądu podajemy zazwyczaj różnicę potencjału między końcami przewodnika. Tak! tak jest, ale równie dobrze (i nawet właściwiej) można stwierdzić, że powodem przepływu prądu jest *pole* elektryczne wewnątrz przewodnika. Oczywiście! Bo w jaki sposób elektrony w środku przewodnika mają „wiedzieć”, że na jego końcach istnieje różnica potencjałów? (Rozumowanie to odnajdujemy w podręcznikach uniwersyteckich w rozdziałach o „mikroskopowym ujęciu prawa Ohma”.)

Jesteśmy już gotowi do zapisania prawa indukcji w postaci prawa Maxwella

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Całka po trajektorii zamkniętej pojawia się, gdyż szukamy nie jakiegokolwiek różnicy potencjałów ale *siły elektromagnetycznej* czyli różnicy potencjałów dla obwodu *zamkniętego*.

Nacięcia w rurce to właśnie zamiana całki z całki po prostej trajektorii w postaci okręgu na całkę po jakiejś skomplikowanej wstążce między szczelinami. Prądy indukowane powstają,

ale nie mają już „właściwego”, obwodowego kierunku – magnes obija się o ścianki i przykleja do rurki właśnie wzdłuż szczelin.

Uproszczone wyjaśnienie doświadczenia w rurce z nacięciami jest oczywiście możliwe, ale nauczyciel powinien mieć świadomość, że nacięcia w rurce pojawiły się nie przypadkowo, ale jako odpowiedź na trudności dydaktyczne na poziomie uniwersyteckim. A za szczególnie niewłaściwe dydaktycznie należy uznać porównywanie czasów spadków. Bo i tak czasów tych *policzyć* nie umiemy!

7.3.f. Łagodnie lądujący magnes

Cel: badanie przyczyny łagodnego lądowania magnesu.

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy
- gwóźdź
- miedziana sztabka



Zdjęcie 1. Potrzebne środki dydaktyczne.

Wykonanie:

Położ gwóźdź na magnecie. Na stole ułóż miedzianą sztabkę. Z pewnej wysokości puść magnes z gwoździem. Przyjrzyj się, jak magnes ląduje na sztabce. Puść magnes z innej wysokości. Czy lądowanie wyglądało podobnie jak w poprzedniej sytuacji?

Wyjaśnienie:

Magnes spadając zbliża się do sztabki, więc mamy do czynienia ze zmieniającym się polem magnetycznym (niezależnie od wysokości, z jakiej spada). Bieguny magnesu znajdują się w jego podstawach. Pole magnetyczne w obszarze miedzianej sztabki rośnie szczególnie szybko, gdy magnes na niej „ląduje”.

Pamiętasz, że zmienne pole magnetyczne powoduje przepływ prądu wewnątrz przewodnika - miedzi. Nasz przewodnik ma dużą powierzchnię, więc są to prądy wirowe. To one są odpowiedzialne za "miękkie" lądowanie magnesu. Prądy wirowe przyczyniają się do powstania pola magnetycznego wewnątrz sztabki. Zgodnie z regułą Lenz'a *powstałe* pole magnetyczne przeciwstawia się przyczynie, która je wywołała. Innymi słowy sztabka odpycha magnes i tym samym zapewnia mu łagodne lądowanie.

Doświadczenie dodatkowe:

Umieść sztabkę miedzianą na jakichkolwiek rolkach, np. z dwóch wykałaczek. Przesuwaj magnes w poziomie blisko nad sztabką: zbliżaj szybko magnes do sztabki i oddalaj go od jej brzegu. Co zauważyłeś?

Gdy zbliżamy magnes do sztabki, jest ona odpychana. Gdy oddalamy magnes od sztabki, jest ona przyciągana. Oto cała natura prawa Lenza: zawsze przeciwnie do przyczyny zewnętrznej. Jeśli strumień zewnętrznego pola maleje, to powstające prądy ten strumień *wzmacniają*, czyli magnes indukowany i zewnętrzny (indukujący) przyciągają się. Jeśli strumień pola rośnie, to dwa strumienie (indukowany i indukujący) nawzajem się znoszą: dwa magnesy mają bieguny skierowane przeciwnie (czyli S jednego do S drugiego lub N do N) i się odpychają.