# Toruński doświadczalnik z fizyki

## Elektromagnetyzm

# Toruński doświadczalnik z fizyki

## Elektromagnetyzm

pod redakcją
Grzegorza Karwasza i Andrzeja Karbowskiego

WYDAWNICTWO NAUKOWE
UNIWERSYTETU
MIKOŁAJA KOPERNIKA

Toruń 2026

Publikacja recenzowana

Katedra Dydaktyki Fizyki
Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Grudziądzka 5, 87–100 Toruń
Tel: (056) 61-13-253, fax: (056) 62-25-397

Redakcja
*Prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz*
*Dr Andrzej Karbowski*

Zdjęcia doświadczeń
*Krzysztof Służewski, Andrzej Karbowski*

Opracowanie redakcyjne
*Magdalena Mordawska*

Korekta
...

Projekt okładki
*Monika Pest*

Łamanie
*Danuta Kosińska*

ISBN 978-83-231-6334-3

© Copyright by Uniwersytet Mikołaja Kopernika
Toruń 2026

WYDAWNICTWO NAUKOWE UNIWERSYTETU MIKOŁAJA KOPERNIKA
Redakcja: ul. Gagarina 5, 87-100 Toruń
tel. 56 611 42 95, fax 56 611 47 05
e-mail: wydawnictwo@umk.pl
www.wydawnictwo.umk.pl

Dystrybucja: ul. Mickiewicza 2/4, 87-100 Toruń
tel./fax 56 611 42 38
e-mail: books@umk.pl

Druk i oprawa: Drukarnia cyfrowa, Wydawnictwo Naukowe UMK

# Spis treści

**Wstęp** . . . . . **9**

**I. Zestaw dydaktyczny do elektromagnetyzmu** . . . . . **11**
A. Karbowski, K. Służewski, G. Karwasz

**II. Opisy doświadczeń z elektromagnetyzmu** . . . . . **19**
A. Karbowski, K. Służewski, M. Sadowska, K. Rochowicz, G. Karwasz

**1. Magnesy i materiały magnetyczne** . . . . . **19**
1.1. Magnetyczne żuczki . . . . . 19
1.2. Magnetyczny „pies na smyczy" . . . . . 21
1.3. Materiały magnetyczne . . . . . 23
1.4. Pływające magnesy . . . . . 25

**2. Pola magnetostatyczne** . . . . . **26**
2.1. Badanie pola magnetycznego za pomocą opiłków żelaza . . . 26
2.2. Badanie pola magnetycznego za pomocą magnetycznych pieczątek i „wykrywacza" pola magnetycznego . . . . . 28
2.3. Badanie pola magnetycznego za pomocą klocków magnetycznych i kulek (Geomag) . . . . . 30

**3. Oddziaływania magnetostatyczne** . . . . . **33**
3.1. Oddziaływania między dwoma magnesami . . . . . 33
3.2. Kolumienka magnesów – obwarzanków . . . . . 35
3.3. Siła przyciągania: pomiar przy użyciu dynamometru . . . . . 38
3.4. Siła odpychania: magnesy sztabkowe (Geomag) w rurce . . . 39
3.5. Tory kulek w polu magnetycznym . . . . . 41

**4. Pole magnetyczne Ziemi . . . . . 42**
4.1. Oddziaływanie magnesu na igły magnetyczne . . . . . 42
4.2. Magnes zakręcający na równi pochyłej . . . . . 44

**5. Magnetyczne efekty przepływu prądu elektrycznego . . . . . 46**
5.1. Doświadczenie Oersteda – wersja pionowa (czyli doświadczenie Ampère'a) . . . . . 46
5.2. Doświadczenie Oersteda – wersja pozioma . . . . . 49
5.3. Siła magnetyczna między dwoma równoległymi przewodami (definicja ampera) . . . . . 52
5.4. Pole magnetyczne wokół cewki . . . . . 53
5.4.1. Pole magnetyczne wewnątrz pojedynczego zwoju . . . 53
5.4.2. Pole magnetyczne wewnątrz solenoidu . . . . . 55
5.4.3. Wzajemne oddziaływanie cewki i magnesu . . . . . 57
5.5. Żelazny rdzeń wewnątrz cewki . . . . . 59

**6. Siła magnetyczna działająca na przewód z prądem – siła Lorentza . . . . . 61**
6.1. Doświadczenie Pohla (siła działająca na ramkę z prądem) . . . . . 61
6.2. Zwój z przewodnika między biegunami magnesów . . . . . 65
6.3. Silniki elektryczne . . . . . 66
6.3.1. Silnik na spinaczach . . . . . 66
6.3.2. Silnik z jedną „pętlą" . . . . . 68
6.3.3. Silnik z dwoma „skrzydełkami" („silnik-mikser") . . . . . 70

**7. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej . . . . . 72**
7.1. Siła elektromotoryczna indukowana w poruszającym się przewodzie . . . . . 72
7.2. Siła elektromotoryczna indukowana w cewce . . . . . 73
7.3. Prądy wirowe (Foucaulta) . . . . . 77
7.3.1. Leniwe wahadło . . . . . 77
7.3.2. Hamulec elektromagnetyczny . . . . . 80
7.3.3. „Pijany" magnes . . . . . 82
7.3.4. Magnes zsuwający się po miedzianej równi . . . . . 83

7.3.5. Spadający magnes w rurze z miedzi (bez nacięć i z nacięciami) . . . . . 85
7.3.6. Łagodnie lądujący magnes . . . . . 90

**8. Generatory prądu . . . . . 92**
8.1. Latarka „dynamo" . . . . . 92
8.2. Silnik Stirlinga i dynamo . . . . . 94

**9. Zwojnice i transformatory . . . . . 95**
9.1. Indukcja w układzie dwóch zwojnic . . . . . 95
9.2. Transformator z rdzeniem . . . . . 98

**10. Elektrostatyka . . . . . 101**
10.1. Naładowane papierowe cekiny . . . . . 101
10.2. Doświadczenie choinkowe . . . . . 105
10.3. Elektrofor Volty . . . . . 108
10.4. Świeczka w polu elektrycznym . . . . . 112
10.5. Elektrostatyczna kołatka . . . . . 115

**11. Elektrochemia . . . . . 121**
11.1. Stos Volty . . . . . 121
11.2. Matrix, czyli ludzka bateria . . . . . 126
11.3. Miernik „inteligencji" . . . . . 128

**12. Elektromagnetyzm w skali makro . . . . . 131**
12.1. Pole magnetyczne Ziemi . . . . . 131
12.1.1. Pole magnetyczne Ziemi (pomiary jakościowe) . . . . 131
12.1.2. Pole magnetyczne Ziemi (pomiar komputerowy) . . . 133
12.1.3. Pole magnetyczne Ziemi (konfiguracja) . . . . . 135
12.2. Pola magnetyczne w kosmosie . . . . . 137
12.2.1. Pola magnetyczne w kosmosie: Słońce . . . . . 137
12.2.2. Pola magnetyczne w kosmosie: przestrzeń międzygwiazdowa . . . . . 138

**III. Scenariusze lekcji . . . . . 141**
M. Sadowska, G. Karwasz

**Pole magnetyczne wokół magnesu . . . . . 142**
**Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem . . . . . 149**
**Siła elektrodynamiczna . . . . . 158**
**Zjawisko indukcji elektromagnetycznej . . . . . 166**
**Samochód „na wodę" . . . . . 173**

**IV. Artykuły dydaktyczne . . . . . 179**

**Stara, poczciwa maszyna elektrostatyczna („Fizyka w Szkole", 5/2011) . . . . . 180**
M. Grygiel (Sadowska), G. Karwasz

**Eksperymentalne wariacje na temat prawa Lenza („Fizyka w Szkole", 6/2017) . . . . . 200**
A. Karbowski, K. Służewski, K. Fedus, G. Karwasz

**Samochód „na wodę" („Fizyka w Szkole", 4/2019) . . . . . 223**
G. Karwasz, K. Wyborska, A. Karbowski, A. Kamińska, T. Bury

**V. Zakończenie . . . . . 241**

**VI. Spis cytowanych pozycji literaturowych w poszczególnych rozdziałach . . . . . 243**

# Wstęp

Przedstawiamy Państwu *Toruński doświadczalnik*, będący kontynuacją naszej serii *Toruńskich po-ręczników* do fizyki. Korzystamy z neologizmów dla podkreślenia, że nasze książki nie mają formy typowych podręczników czy instrukcji laboratoryjnych. Jest to raczej luźna (ale naukowo i dydaktycznie ścisła) narracja o pasjonującej dziedzinie wiedzy, jaką jest fizyka. Jednocześnie nasze opracowania realizują zasady dydaktyki kognitywistycznej, z których przywołamy tylko trzy: być inter-aktywną, inter-dyscyplinarną i inter-esującą.

Opisywane poniżej doświadczenia są efektem wieloletniej działalności Katedry Dydaktyki Fizyki UMK. Zestaw doświadczeń z magnetyzmu jest częściowo wynikiem projektu EU w panelu Leonardo da Vinci – „MOSEM", koordynowanego przez UMK w Toruniu. Kilkanaście tych zestawów zostało wprowadzone do dydaktyki szkolnej i uniwersyteckiej w Polsce, Włoszech, Belgii, Wielkiej Brytanii i Austrii.

UE

wprowadzonych

Grupa współpracująca w zakresie zdefiniowania pakietu „Low-Tech kit" Projektu „MOSEM" obejmowała wiele osób. Największy wkład w przygotowanie koncepcji doświadczeń spoza ZDF UMK mieli: prof. Marisa Michelini z Uniwersytetu w Udine (Włochy) oraz jej współpracownicy, w szczególności dr Alberto Stefanel i prof. Lorenzo Santi (†), prof. Wim Peters z Uniwersytetu w Antwerpii (Belgia) i prof. Josef Trna z Uniwersytetu w Brnie (Republika Czech).

projektu

Koncepcja zestawu, opisy, szczegółowe wykonanie i realizacja dydaktyczna zostały przygotowane przez prof. Grzegorza Karwasza, dr. Andrze-

ja Karbowskiego i dr. Krzysztofa Służewskiego. Scenariusze lekcji opracowała dr Magdalena Grygiel, w ramach swojej pracy doktorskiej (promotor prof. Grzegorz Karwasz). Ostatnie podrozdziały drugiego rozdziału są poświęcone doświadczeniom z elektrostatyki, a kończą ten rozdział rozważania o zjawiskach elektrycznych i magnetycznych w skali Wszechświata (autor dr Krzysztof Rochowicz). Dodatek zawiera trzy artykuły z opisywanych tematyk, opublikowane w czasopiśmie „Fizyka w Szkole".

*

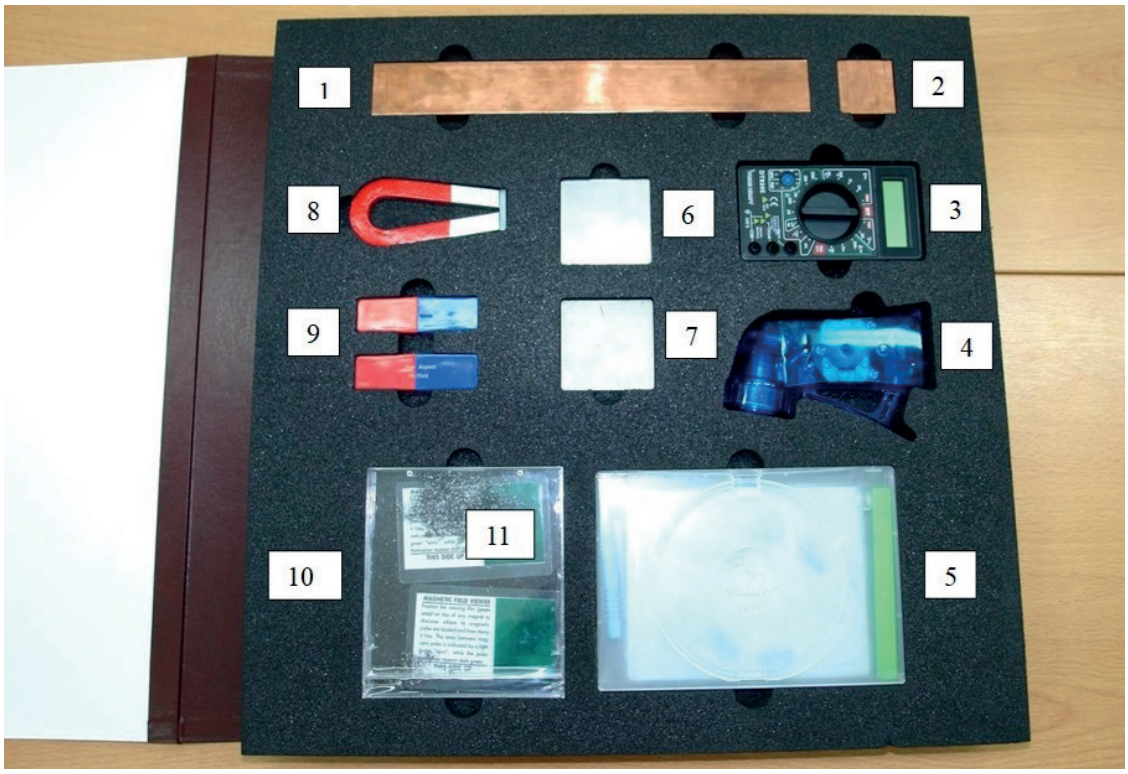
Poziom trudności materiałów jest zróżnicowany, zgodnie z dydaktyczną zasadą ich stopniowania. Czyni to nasze opracowanie potencjalnie użytecznym zarówno dla nauczycieli szkoły podstawowej (we Włoszech elementy fizyki są już w przedszkolu), jak i dla demonstratorów oraz wykładowców wyższych uczelni. Opisy są krótkie, tak aby przypominały instrukcje laboratoryjne. W miarę możliwości podajemy dodatkową literaturę. Prace z czasopism krajowych: „The Physics Teacher" i „Physics Education" są w miarę proste; z „American Journal of Physics" i „European Journal of Physics" – zaawansowane. Podajemy również odnośniki do materiałów filmowych.

Miłej lektury!

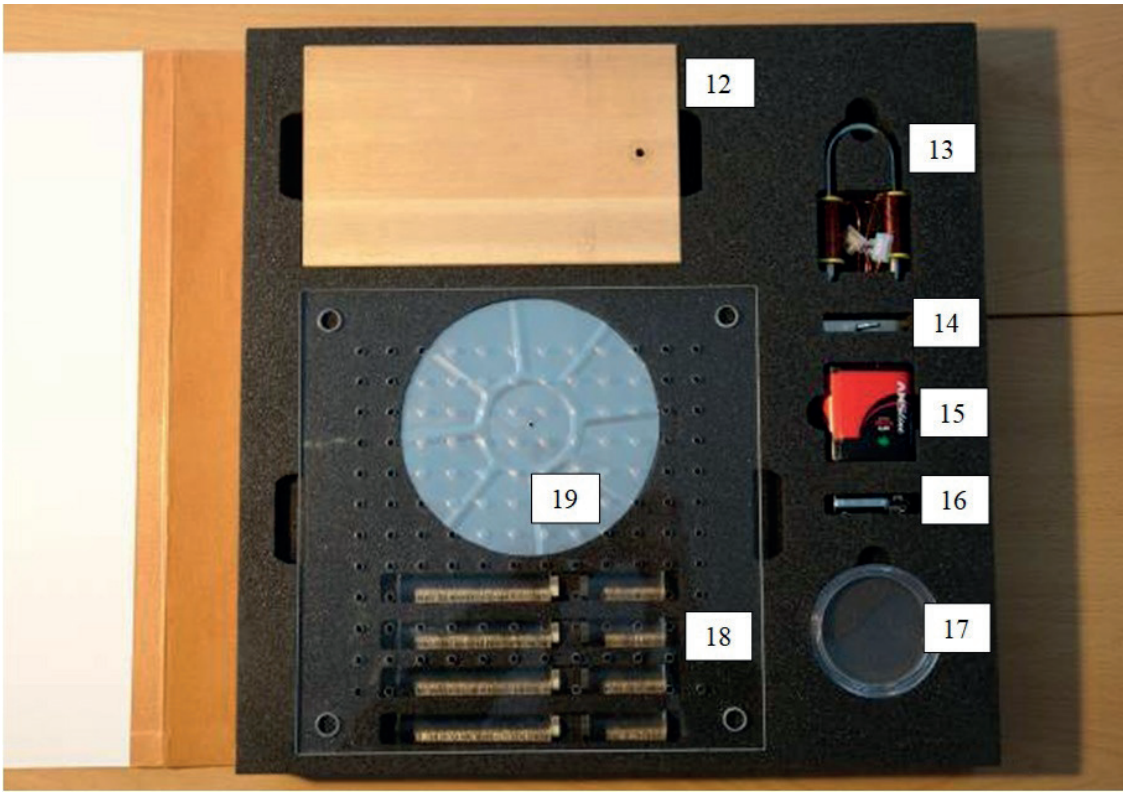
Dr Andrzej Karbowski
Prof. Grzegorz Karwasz
Toruń / Trento, sierpień 2025

Rozdział I

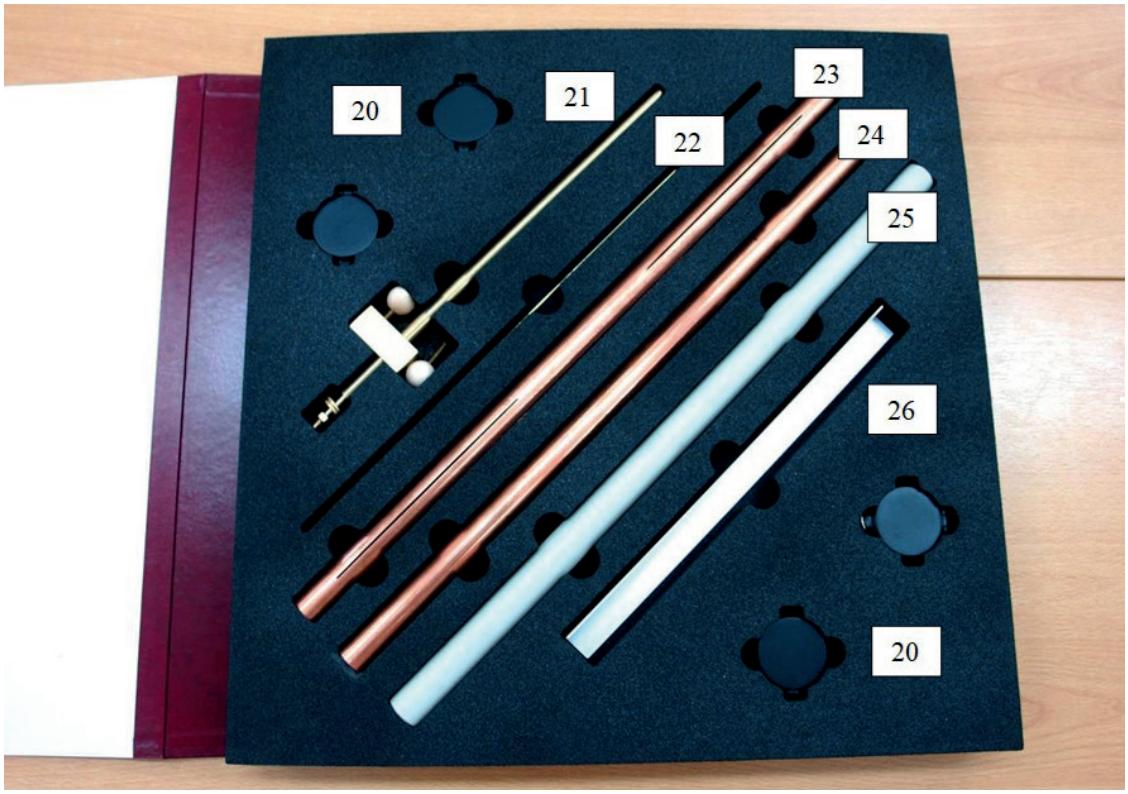
# Zestaw dydaktyczny do elektromagnetyzmu



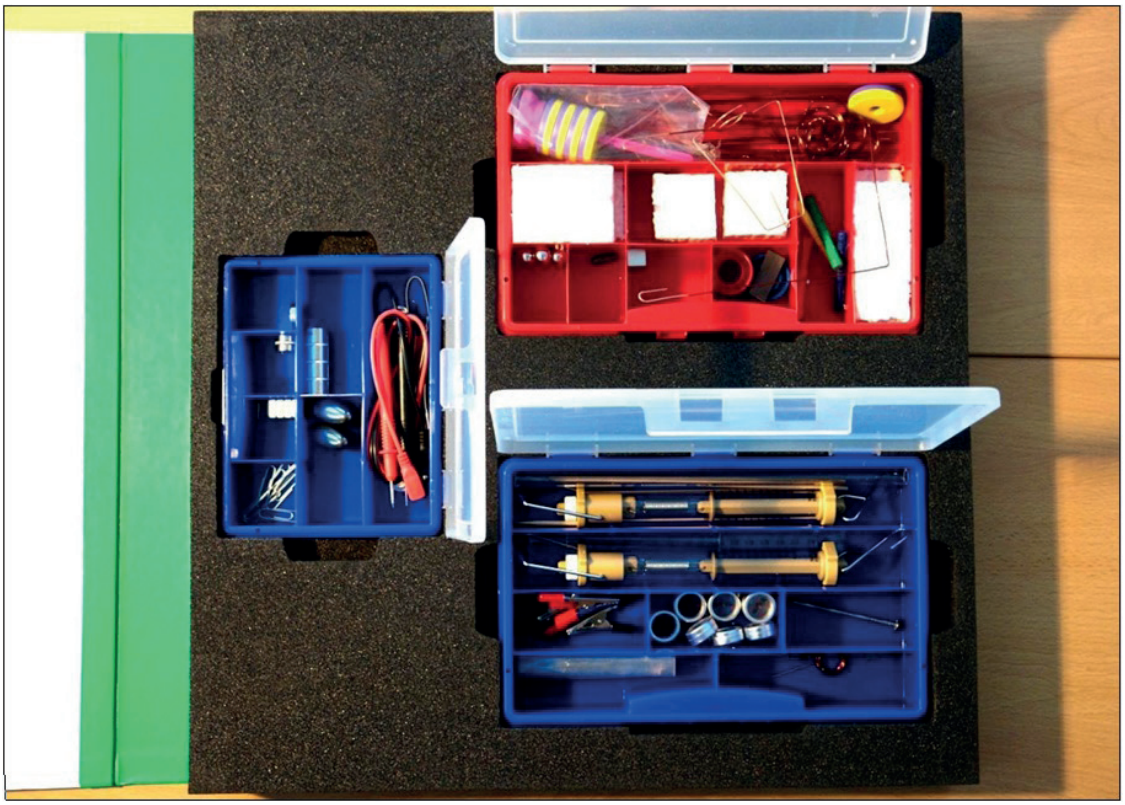

1. Równia miedziana
2. Płytka miedziana
3. Miernik cyfrowy
4. Latarka ręczna
5. Tabliczka magnetyczna
6. Płytka aluminiowa
7. Płytka żelazna
8. Magnes w kształcie litery U
9. Dwa magnesy sztabkowe
10. Plastikowe pudełko z opiłkami
11. Dwa „wyświetlacze” pola magnetycznego

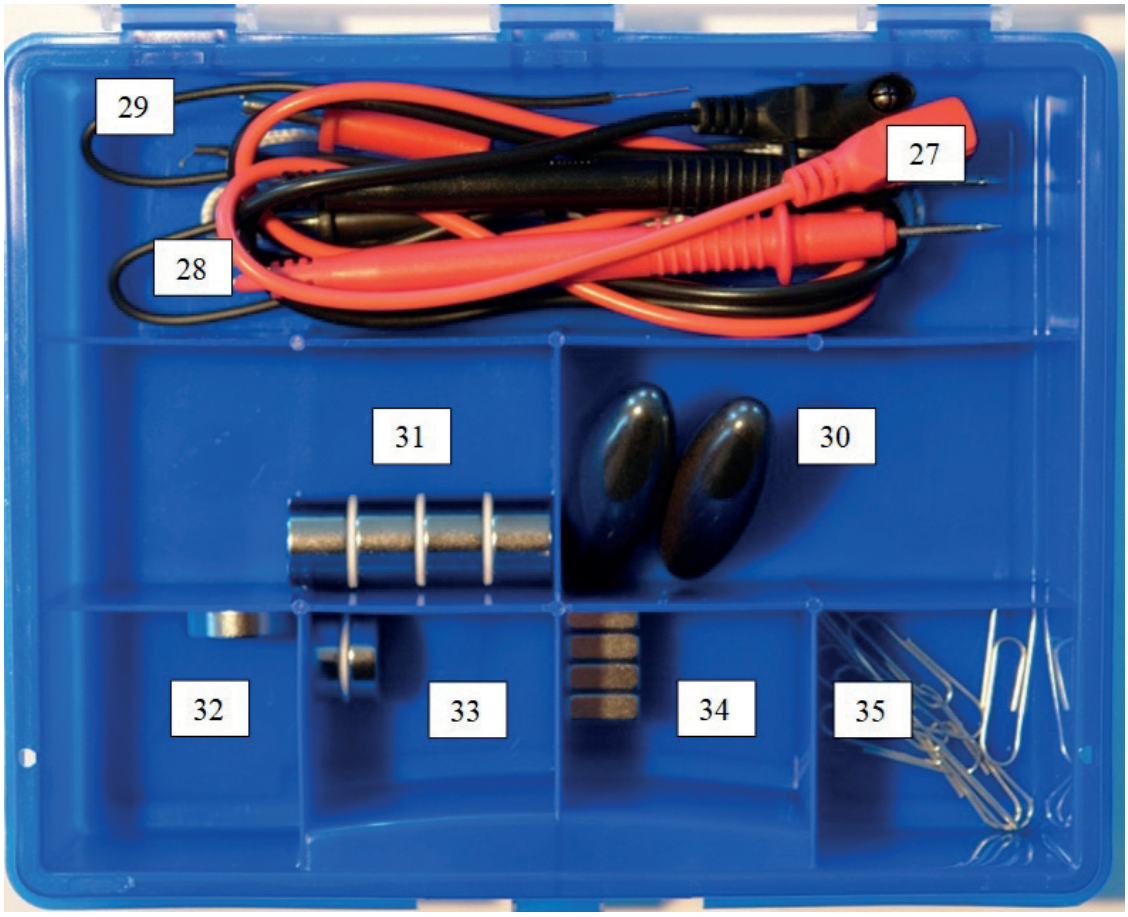



12. Drewniana podstawa do statywu
13. Elektromagnes
14. Płytka metalowa do elektromagnesu
15. Bateria 4,5 V
16. Bateria 1,5 V
17. Okrągłe pudełko plastikowe z opiłkami
18. Stolik z pleksi z czterema długimi nóżkami i czterema krótkimi
19. Dysk aluminiowy

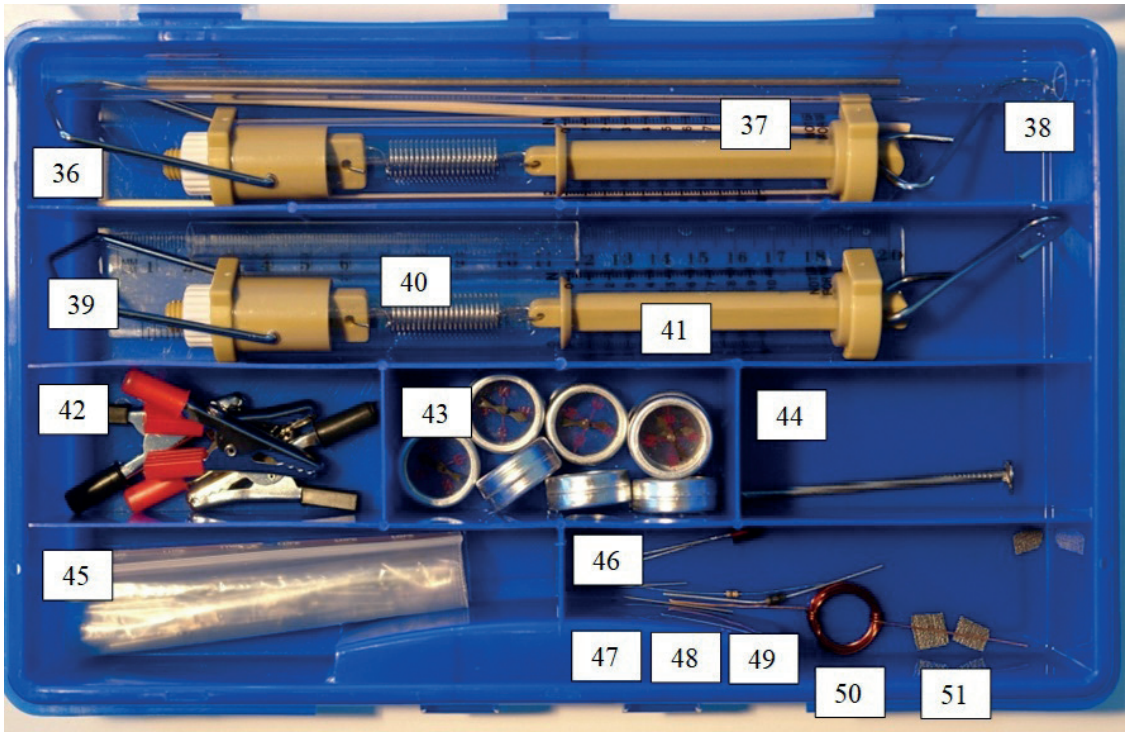



20. Cztery kompasy
21. Część metalowa statywu
22. Drut mosiężny
23. Rurka miedziana z nacięciami
24. Rurka miedziana
25. Rurka z PCV
26. Kątownik aluminiowy

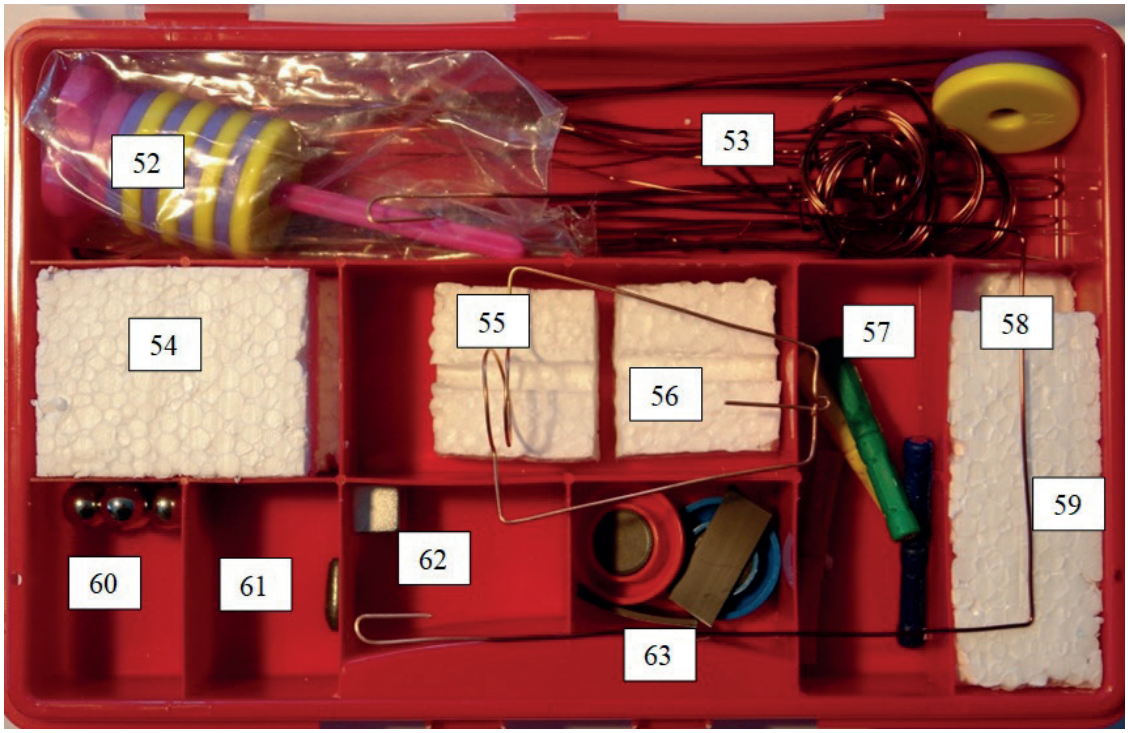





27. Dwa kabelki do miernika cyfrowego
28. Czujnik temperatury (biały kabelek) do miernika cyfrowego
29. Dwa kabelki (czarne)
30. Magnetyczne „żuczki”
31. Cztery neodymowe magnesy cylindryczne 15 x 10 mm
32. Neodymowy magnes cylindryczny 20 x 5 mm
33. Dwa neodymowe magnesy cylindryczne 15 x 5 mm
34. Cztery neodymowe magnesy płytkowe 12,5 x 12,5 x 5 mm
35. Spinacze




36. Drewniane patyki
37. Mosiężna poprzeczka do statywu
38. Rurka z pleksi 250 mm długości
39. Linijka
40. Siłomierz
41. Rurka z pleksi 100 mm długości
42. Krokodylki
43. Małe kompasy transparentne
44. Gwóźdź żelazny
45. Małe gwoździe
46. Dioda LED
47. Grafitowy wkład do ołówka (0,5 mm)
48. Opornik
49. Dioda
50. Silniczek na spinaczach
51. Płytki z grafitu




52. Zestaw pięciu magnesów na patyku
53. Różne typy cewek
54. Magnes do „magnetycznego psa”
55. Silniczek z jedną „pętlą”
56. Pływające łódki
57. Geomag – klocki magnetyczne
58. Ramka do doświadczenia Pohl’a **Pohla**
59. Drugi magnes do „magnetycznego psa”
60. Geomag – kulki metalowe
61. Ciężarek 5 g
62. Magnesy neodymowe płytkowe
63. Zabawkowe magnesy

Opis przygotowali:
Andrzej Karbowski i Grzegorz Karwasz, UMK Toruń.

Rozdział II

# Opisy doświadczeń z elektromagnetyzmu

## 1. Magnesy i materiały magnetyczne

### 1.1. Magnetyczne „żuczki"

**Cel:** odkrycie istnienia dwóch rodzajów biegunów magnetycznych.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- dwa magnetyczne „żuczki".



**Fot. 1.1.** Magnetyczne żuczki

Fot.

**Wykonanie:**

1. Weź dwa magnetyczne „żuczki". Zbliż je do siebie w taki sposób, aby się nie dotykały. Podrzuć je w górę. Co się dzieje? Popatrz i posłuchaj…

2. Przytrzymaj jednego żuczka w palcach jednej dłoni, a drugiego żuczka w palcach drugiej dłoni. Zbliż żuczki do siebie. Co czujesz?

3. Trzymaj nadal żuczki w palcach. Obracaj żuczkami, oddalaj je i przybliżaj. Co zauważyłeś?

**Wyjaśnienie:**

1. Magnetyczne „żuczki" zawierają wewnątrz silne magnesy. Podczas wyrzutu w górę na przemian odpychają się i przyciągają wzajemnie, a rodzaj oddziaływania zależy od ich położenia względem siebie. „Żuczki" poruszają się, dopóki nie spadną na dłoń.

2. W zależności od wzajemnego położenia magnetyczne „żuczki" przyciągają się lub odpychają, więc istnieją dwa rodzaje biegunów magnetycznych. Bieguny te można zidentyfikować: każdy z magnesów w „żuczkach" ma dwa bieguny, chociaż nie leżą one na końcach „żuczków", tak jak w tradycyjnych magnesach.

**Uwagi metodologiczne:**

1. Jest to wstępne doświadczenie, wprowadzające pojęcie „oddziaływania magnetycznego". „Żuczki", wbrew oczekiwaniom, nie mają biegunów położonych na ich wierzchołkach, jak w przypadku magnesów sztabkowych. W rzeczywistości magnesy są ukryte wewnątrz „żuczków". Zadanie ucznia polega na określeniu miejsca, w którym znajdują się bieguny.

2. Podobno oryginalne „żuczki", czyli zabawka chińska, powinny być wykonane z magnetytu. „Żuczki" w zestawie są zrobione z masy ceramicznej i zawierają małe magnesy neodymowe.

3. Magnesy „szkolne”, sztabkowe lub w kształcie litery „U” są uproszczeniem. W rzeczywistości układy biegunów, np. w magnesach na lodówkę, są bardziej skomplikowane, zob. [1].

[1] Mark Olson, *Common Magnets, Unexpected Polarities*, The Physics Teacher 51, 454 (2013).

## 1.2. Magnetyczny „pies na smyczy”

**Cel:** wykazanie, że oddziaływanie magnetyczne zachodzi na odległość.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

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



**Fot. 1.2.** Sposób umieszczenia przyrządów doświadczalnych

**Wykonanie:**

Weź statyw, płytkę i magnesy. Przymocuj płytkę do statywu (tak jak pokazano na zdjęciu 1.2). Pierwszy z magnesów umieść na płytce od spodu. Drugi włóż do małego (możliwie mocnego) woreczka foliowego. Zawiąż woreczek sznurkiem. Zbliż magnes w woreczku do magnesu znajdującego się na płytce. Spróbuj poruszyć magnesem przy użyciu sznurka. Co obserwujesz? 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. Magnesy przyciągają się, ponieważ zostały zbliżone biegunami odmiennego typu. Gdy jeden z magnesów odwrócimy, odpychają się, czyli zostały zbliżone biegunami tego samego rodzaju. Wynika z tego, że istnieją dwa rodzaje biegunów magnetycznych.

**Uwagi metodologiczne:**

1. Doświadczenie to jest bardzo widowiskowe, ponieważ 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. Inne doświadczenia z magnesami neodymowymi zawiera np. praca [1].

2. W doświadczeniu należy zachować środki ostrożności, jak przy pracy z silnymi polami magnetycznymi (uwaga na karty magnetyczne, osoby noszące rozruszniki serca etc.) **itp.**

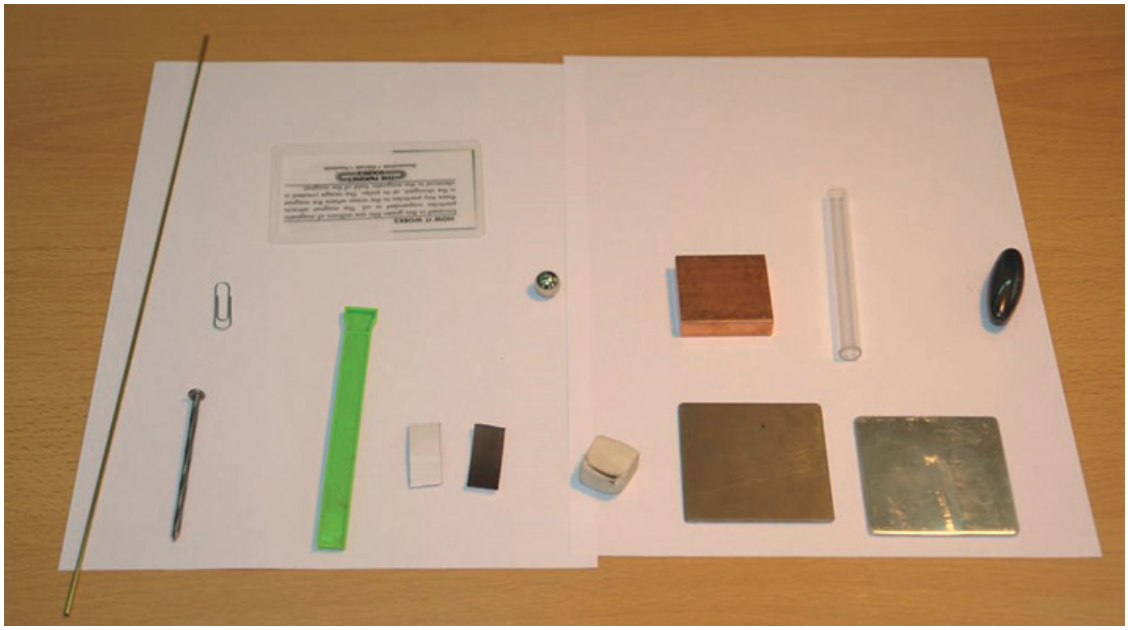
[1] David Featonby, *Experiments with neodymium magnets*, Physics Education, 40, 505 (2005).

## 1.3. Materiały magnetyczne

**Cel:** odkrycie istnienia materiałów magnetycznych i niemagnetycznych

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- magnetyczne i niemagnetyczne materiały (linijka plastikowa, zapałka, spinacz, gwóźdź, metalowe monety, np. grosze i eurocenty)
- magnesy różnego typu, np.: na lodówkę, neodymowe (uwaga! silne), sztabkowe (szkolne)



**Fot. 1.3.** Magnetyczne i niemagnetyczne materiały

**Postępowanie:**

Weź magnes i zbliż go do różnych materiałów. Co się dzieje? Przyjrzyj się, które materiały są przyciągane przez magnes? Z którymi nic się nie dzieje?

Porównaj oddziaływanie magnesu z eurocentami (monety 1-, 2-, 5-centowe są wykonane ze stali i jedynie z wierzchu pokryte miedzią), z polskimi groszami (ze stopu miedzi), z jednozłotówką (ze stopu miedzi i niklu).

**Wytłumaczenie:**

Magnes przyciąga np. spinacze, stalową płytkę, inne magnesy. Magnes przyciąga przedmioty wykonane z żelaza (ale również z kobaltu, niklu) i niektóre stopy z ich domieszkami. Natomiast nie przyciąga np. tworzyw sztucznych, szkła, drewna. Trudne do zauważenia jest oddziaływanie magnesu z takimi metalami jak aluminium czy miedź.

Wnioskujemy, że ze względu na siły magnetyczne potrafimy wyróżnić materiały silnie oddziałujące z magnesami (jak żelazo, stal) i oddziałujące niewiele lub wcale (plastik, drewno, aluminium), zob. też [1].

Uwagi

**Uwaga metodologiczne:**

1. Nauczyciel powinien oczywiście pamiętać, że materiały dzielimy na ferromagnetyczne (silnie przyciągane przez magnesy), diamagnetyczne (słabo odpychane, jak miedź) i paramagnetyczne (jak aluminium). Te dwa ostatnie efekty są jednak zbyt słabe, aby je pokazać w prostym doświadczeniu

[2]. Bogactwo stopów jest tak duże, że doświadczenie to może zawsze dać niespodziewany wynik, jak w przypadku eurocentów, które wydają się zrobione z miedzi, a w rzeczywistości są ze stali, lub z jednozłotówką[lub po prostu: złotówką], która jest zrobiona ze stopu niklu, ale nie jest przyciągana przez magnes.

[1] Kerry Browne and David P. Jackson, *Simple Experiments to Help Students Understand Magnetic Phenomena*, The Physics Teacher, 45, 425 (2007).

[2] Stanisław Bednarek, Jacek Ćwik, *Dia- czy paramagnetyk? Oto jest pytanie!*, Fizyka w Szkole, 136 (2023).

## 1.4. Pływające magnesy

**Cel:** badanie oddziaływań między dwoma magnesami pływającymi po wodzie.



Fot.

**Fot 1.4.** Łódeczki z magnesami: sekwencja zbliżania się

**Wykonanie:**

Połóż dwa magnesy na małych styropianowych łódeczkach. Następnie połóż łódki 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 naprzeciwko siebie, zobaczysz, że magnesy się przyciągają aż do momentu zetknięcia się.

Ponownie połóż łódki na wodzie, ale jedną z nich umieść odwrotnie niż poprzednio. Co się dzieje? Przyjrzyj się łódkom. Jeśli magnesy umieścimy na wodzie tak, że naprzeciw 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.

symbol stopnia

**Wyjaśnienie:**

Między dwoma magnesami działa siła magnetyczna. Gdy magnesy zbliżone są do siebie przeciwnymi biegunami (tzn. północnym i południowym), 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 *Zasadach filozofii* Kartezjusza [1] 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. Spróbuj puszczać je z różnych narożników 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, ponieważ 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.

René

[1] Rene Descartes, *Zasady filozofii*, PWN, Warszawa 1960.

# 2. Pola magnetostatyczne

## 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).



**Fot. 2.1.** Magnes i opiłki. Badanie pola magnetycznego za pomocą opiłków

**Wykonanie:**

Weź pudełko po płycie CD wypełnione opiłkami żelaza. Chwyć magnes i połóż 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. Połóż 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 na zdjęciu 2.1). 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 magnetycznego" 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 prezentacja linii sił pola elektrycznego (dla tego ostatniego potrzebna jest kasza manna, olej i źródło silnego pola elektrycznego, np. maszyna elektrostatyczna). W opisie dla ucznia podajemy, że opiłki są „przyciągane". W rzeczywistości *indukują* się w każdym wiórze dwa bieguny magnetyczne: bliżej magnesu – biegun przeciwny, dalej – taki sam. Opiłki tworzą ładne linie, ponieważ powstaje łańcuch wzajemnie przyciągających się magnesów (dipoli).

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

[1] Szymon Pustelny, *Niezwykła kariera pola magnetycznego*, Foton 93, Lato 2006, s. 17.

## 2.2. Badanie pola magnetycznego za pomocą magnetycznych pieczątek i „wykrywacza" pola magnetycznego

**Cel:** badanie istnienia pola magnetycznego za pomocą „wykrywacza".

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- magnesy sztabkowe, magnesy „Geomag",
- magnetyczne pieczątki o różnych kształtach, np. magnesy na lodówkę,
- wykrywacz pola magnetycznego (teachersource.com, USA).

TeacherSource.com




**Fot. 2.2. a)** „Magnetyczna" pieczątka, b) Wykrywacz pola magnetycznego

**Wykonanie:**

Weź „magnetyczną pieczątkę" i przyłóż ją do wykrywacza. Następnie zabierz pieczątkę i przyjrzyj się, jak wygląda powierzchnia wykrywacza. Czy kolor wykrywacza jest w każdym miejscu taki sam? Weź kolejną pieczątkę i postępuj tak samo. Co zaobserwowałeś?

**Wyjaśnienie:**

Wykrywacz pola magnetycznego służy do znalezienia położenia biegunów magnetycznych w różnych magnesach codziennego użytku. Przestrzeń między biegunami magnetycznymi (obszar słabszego pola) na wykrywaczu zaznacza się na jasnozielony kolor, natomiast kolor ciemnozielony wskazuje na istnienie biegunów (silniejsze pole). Niektóre pieczątki pozostawiają nie dwa ciemnozielone ślady na wykrywaczu, ale więcej, np. trzy lub cztery. Oznacza to, że pieczątka zawiera kilka magnesów [1], a każdy z nich ma dwa bieguny, o czym już wiesz.

**Uwagi metodologiczne:**

1. Doświadczenie pozwala na identyfikację biegunów magnetycznych. Zestawy szkolne zawierają zazwyczaj jedynie magnesy sztabkowe i magnesy podkowiaste, które mają dwa, przeciwne bieguny. Ich położenie jest łatwe do przewidzenia. W zestawie UMK używamy magnesów spotykanych na co dzień. Okazuje się, że nawet małe i pozornie proste magnesy na lodówkę mogą mieć więcej niż dwa bieguny. Ile? Zależy to od ich położenia. Wykrywacz pola może np. pokazać trzy miejsca z biegunami. Oznacza to, że w przedmiocie znajdują się dwa magnesy (każdy z nich jest dwubiegunowy), ale jeden z biegunów jest wspólny dla obu magnesów.

2. Dla uzupełnienia złóżmy stronami magnetycznymi dwa magnesy i spróbujmy je obracać i przesuwać, podobnie jak w doświadczeniu z „żuczkami". Okazuje się, że magnesy mają pewne uprzywilejowane położenia – tak aby przeciwne bieguny były blisko siebie. Czy istnienie więcej niż dwóch biegunów nie przeszkadza w przyciąganiu magnesu do lodówki? Nie, ponieważ w blasze lodówki indukują się zawsze, we *właściwych* miejscach, bieguny przeciwne niż w magnesie.

3. „Wykrywacz” to mikroopiłki umieszczone w zawiesinie z oleju i hermetycznie zamknięte.

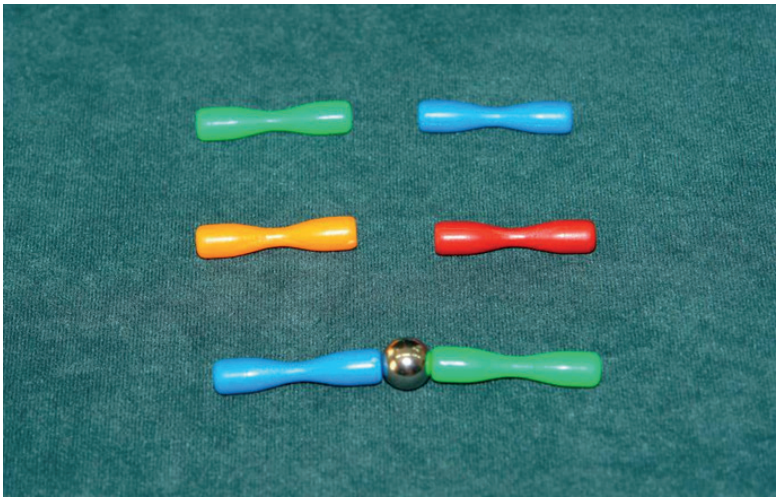
[1] Mark Olson, *Common Magnets, Unexpected Polarities*, The Physics Teacher, 51, 454 (2013).

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

**Cel:** badanie pola magnetycznego za pomocą klocków magnetycznych.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- magnetyczne klocki,
- małe stalowe kulki.



**Fot. 2.3.** Magnetyczne pręciki i kulka (GEOMAGTM)

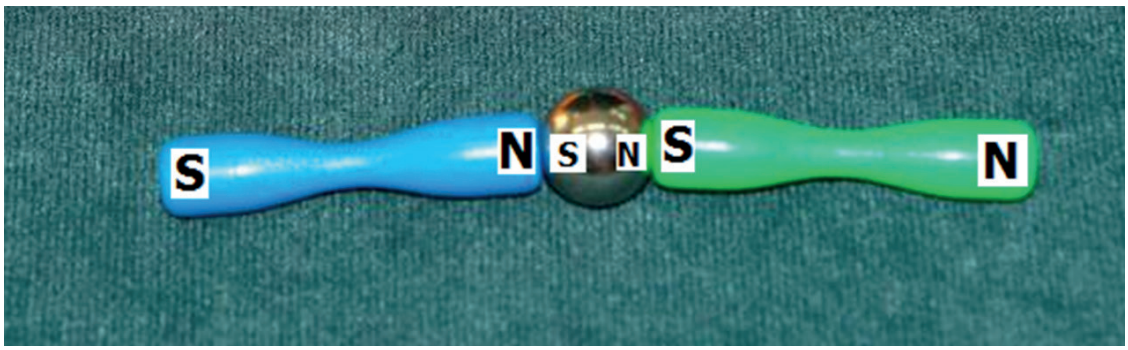
**Geomag**

**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?

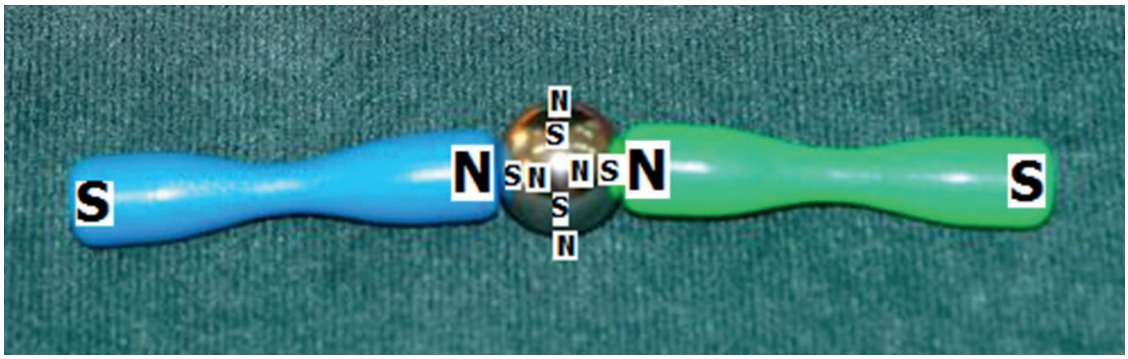
**Wyjaśnienie:**

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 we *właściwy* 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*.




**Fot. 2.4.** 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 fotografię 2.5.



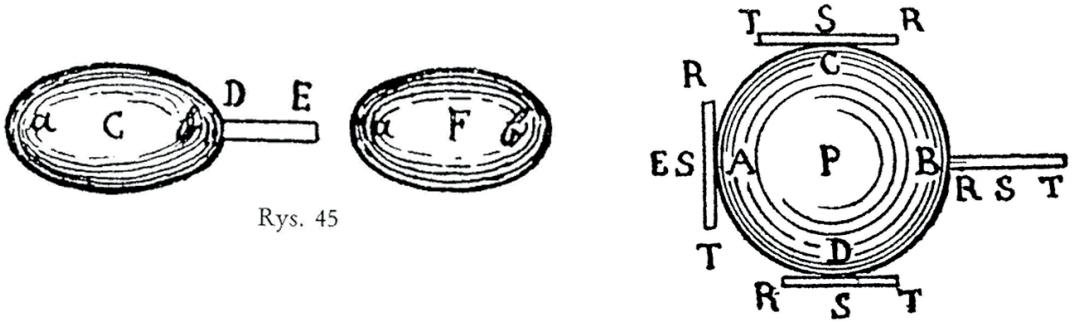

**Fot. 2.5.** Pręciki magnetyczne zbliżone biegunami jednoimiennymi oraz indukowane pole magnetyczne w kulce.

Zdjęcie 2.5 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 magnesy są używane do zakrzywiania biegu cząstek w wielkich akceleratorach. Nazywamy tę 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, czyli stosuje się II prawo Maxwella, lub jeszcze inaczej: *nie istnieją monopole magnetyczne*.

2. Wprowadziliśmy to doświadczenie również ze względu na rozpowszechnienie zabawek konstrukcyjnych typu „Geomag". Przy zabawie 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.




**Ryc. 2.6.** Magnesy według Kartezjusza: konfiguracje biegunów z jego pracy z 1644 roku [1]

3. Opis „Geomagu" i biegunów w różnych konfiguracjach zawiera praca [2].

René

[1] Rene Descartes, *Zasady filozofii*, PWN, Warszawa 1960.

[2] Silvia Defrancesco, Fabrizio Logiurato, Grzegorz Karwasz, *Geomag paradoxes*, Physics Education, 41 (1), (2006).

# 3. Oddziaływania magnetostatyczne

## 3.1. Oddziaływania między dwoma magnesami

**Cel:** badanie (jakościowe) oddziaływania między dwoma magnesami.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- dwa magnesy sztabkowe.




**Fot. 3.1.** Oddziaływanie między magnesami. Uwaga: magnesy z Anglii, mają inne kolory niż polskie!

**Wykonanie:**

Weź dwa magnesy. Zbliż je biegunami przeciwnymi. Co się stało? Zbliż je tymi samymi biegunami, np. oznaczonymi na niebiesko, a następnie na czerwono. Co dzieje się tym razem?

**Wyjaśnienie:**

Siły działające między magnesami nazywamy siłami magnetycznymi. Mogą one być siłami przyciągającymi lub odpychającymi. W zależności od odległości między magnesami siły te mogą mieć różne wartości.

Magnesy zbliżone do siebie biegunami różnoimiennymi, czyli północnym i południowym, przyciągają się. Natomiast magnesy zbliżone do siebie biegunami jednoimiennymi, czyli północnym i północnym lub południowym i południowym, odpychają się.

Każdy magnes ma dwa bieguny – północny (N) i południowy (S). Występujące razem bieguny północny i południowy nazywamy dipolem magnetycznym.

Naukowcy próbowali odkryć istnienie magnesu o jednym biegunie, nazwali go roboczo monopolem. Jednak w wyniku prowadzonych badań okazało się, że nie istnieje taki magnes. Nawet po przecięciu magnesu sztabkowego powstaną dwa magnesy i każdy z nich będzie miał biegun północny i południowy.

**Uwagi metodologiczne:**

1. Doświadczenie ma zasadnicze znaczenie dla poprawnego zrozumienia pojęć magnetyzmu – istnienia w każdym magnesie dwóch, przeciwnych biegunów magnetycznych. Doświadczenie łączy się metodologicznie z doświadczeniem 1.4. „Pływające magnesy".

2. Zwracamy uwagę, że w różnych krajach bieguny północne i południowe mogą być oznaczane odmiennymi kolorami – jest to wynik różnych przyjętych konwencji.

3. Własności magnetyczne ferromagnetyków wynikają ze specyficznego układu orbitali elektronowych w atomach. Elektrony krążące po orbitach to jakby nano-przewodniki z prądem. Mimo że z pracy Einsteina [1] z 1905 roku, wprowadzającej Szczególną Teorię Względności, wiemy, że oddziaływania magnetyczne wynikają z relatywistycznej zmiany gęstości ładunku w przewodach z prądem, dydaktycznie nie proponujemy sprowadzania magnetyzmu jedynie do „oddziaływania przewodników", jak to sugerują niektóre artykuły i podręczniki, zob. np. [2, 3]. Bieguny magnetyczne są obiektami, z którymi uczeń może poeksperymentować, w odróżnieniu od *spinów elektronów* w ferromagnetyku.

[1] A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper. (O elektromagnetyzmie poruszających się ciał)*, Annalen der Physik, 322, 10 (1905), 891–921.

[2] O. D. Jefimenko, *Is magnetic field due to an electric current a relativistic effect?*, European Journal of Physics, 17 (1996), 180–182.

[3] S. J. Blundell, *Magnetism: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2012.

## 3.2. Kolumienka magnesów – obwarzanków

**Cel:** badanie (jakościowe) oddziaływań między kilkoma magnesami.

**Środki dydaktyczne:** z zestawu doświadczalnego UMK:
- kolumienka magnesów – obwarzanków,
- linijka.



**Fot. 3.2.** Kolumienka magnesów

**Wykonanie:**

Weź dwa magnesy – obwarzanki i nałóż je na kolumienkę, tak aby były zwrócone do siebie tymi samymi biegunami. Co się dzieje? Weź następny magnes i dołóż go na kolumienkę, tak aby był skierowany tym samym

biegunem co poprzedni magnes. Co zaobserwowałeś? Dołóż czwarty magnes. Co się stało?

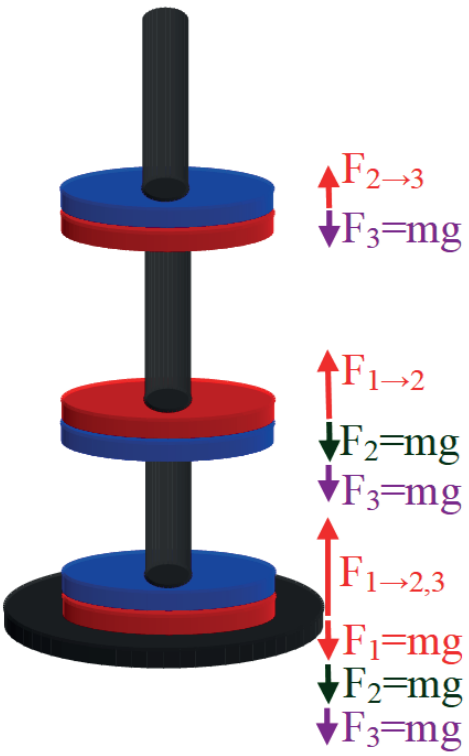
Zdejmij magnesy. Nałóż na kolumienkę dwa magnesy biegunami jednoimiennymi do siebie. Zmierz odległość między nimi i zanotuj ją. Dołóż trzeci magnes. Zmierz odległości między: pierwszym i drugim magnesem, drugim i trzecim magnesem. Zanotuj wyniki pomiarów. Dołóż kolejny magnes. Ponownie zmierz odległości 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, lecz także siła reakcji pochodząca od 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 działa, gdy magnesy są bliżej siebie.




**Rys. 3.3.** 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:**

**przykładów**

**1.** Doświadczenie to, oprócz ilustracji oddziaływania między magnesami, jest jednym z najlepszych dydaktycznie przekładów 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 reakcji równoważąca jego ciężar $F_3 = mg$.
2) Źródłem tej siły może być tylko magnes nr 2. Magnes nr 2 działa siłą $F_{2\to3}$ na magnes nr 3. Wskutek III zasady, magnes nr 3 działa siłą równą co do wartości, ale o przeciwnym zwrocie na magnes nr 2 (siła $F_{3\to2}$). 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 $F_{1\to2}$). Magnes nr 1 musi wywierać na magnes nr 2 siłę równoważącą zarówno $F_{3\to2,}$ jak i siłę ciężkości działająca na magnes nr 2. Mamy więc $F_{1\to2} = - F_{2\to3} - mg = - 2mg$.

**działającą**

3) Kontynuując ten tok myślenia, dochodzimy do wniosku, że na podstawę działa siła $-F_{1\to2,3} - mg = - 3\ mg$.

Innymi słowy, na podstawkę ciążą wszystkie trzy magnesy, mimo że nie stykają się ze sobą. Siły przenoszą się na odległość. Dydaktycznie – możemy umieścić pusta kolumienkę na kuchennej wadze i kolejno dodawać magnesy, notując wskazania wagi.

**2.** Przypominamy, jak specyficzna była konfiguracja biegunów w magnetycznych pieczątkach i kulkach „geomagu". W magnetycznych „obwarzankach" jest ona równie interesująca: przeciwstawne bieguny magnesów znajdują się w górnej i dolnej podstawie obwarzanka.

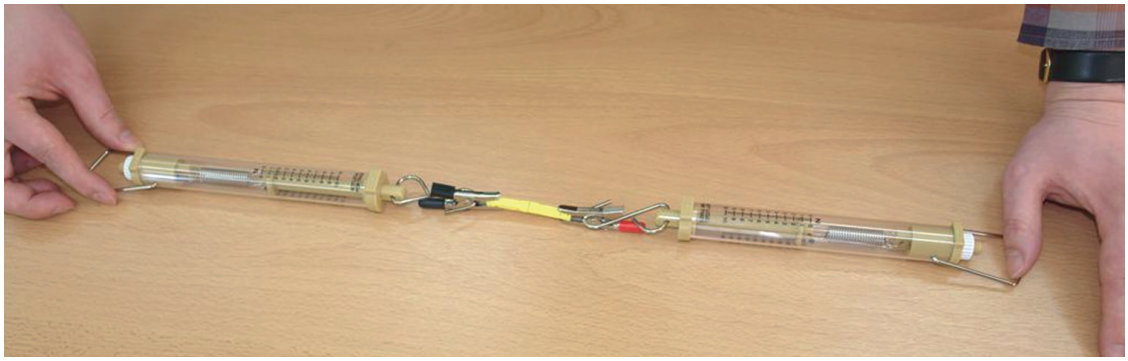
**3.** Bardzo ciekawe jest wprowadzenie w drgania góra – dół najwyższego obwarzanka: zaczynają się poruszać wszystkie magnesy. Wzdłuż kolumny rozchodzi się swego rodzaju fala (podłużna, jak fala głosowa).

## 3.3. 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



**Fot. 3.4.** Badanie siły przyciągania przy użyciu dynamometru

**Wykonanie:**

Weź dwa pręciki magnetyczne, złącza krokodylowe i dynamometry. Patyczki zbliż biegunami różnoimiennymi, połącz je z dynamometrami tak, jak pokazano na zdjęciu 3.4. Następnie odczytaj wartość siły przyciągania z dynamometrów, porównaj odczytane wartości. Odsuń nieznacznie od siebie dwa elementy. Zastanów się, jak wyjaśnić wskazania dynamometrów.

**Wyjaśnienie:**

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

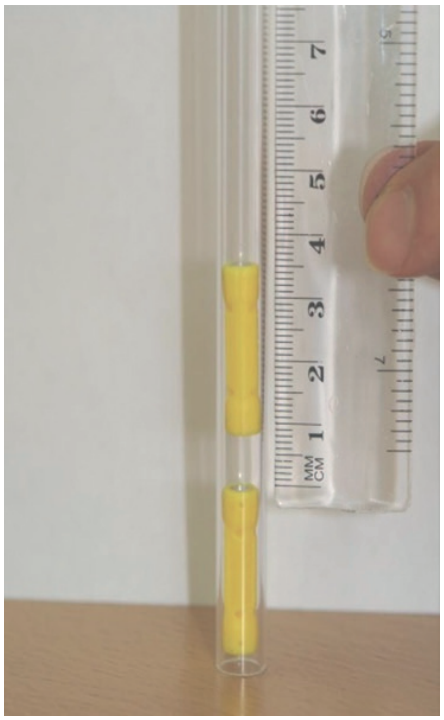
**Uwagi metodologiczne:**

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

Należy też pamiętać, że w odróżnieniu od oddziaływań elektrycznych, w oddziaływaniach magnesów występujących sił jest więcej: oddziaływają zarówno bieguny znajdujące się blisko siebie, jak i te z przeciwnych końców magnesu.

## 3.4. Siła odpychania: magnesy sztabkowe Geomag w rurce



**Cel:** badanie siły odpychania między dwoma patyczkami magnetycznymi.

**Środki dydaktyczne:** z zestawu doświadczalnego UMK:

- dwa magnetyczne patyczki Geomag
- plastikowa rurka
- linijka

**Fot. 3.5.** Badanie siły odpychania dwóch klocków Geomag

**Wykonanie:**

Jeden patyczek magnetyczny wrzuć do rurki plastikowej, której koniec jest oparty np. o ławkę. Włóż do rurki drugi magnetyczny patyczek, skierowany tym samym biegunem do pierwszego patyczka. Zmierz 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, które 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. P. Mazzoldi i in., *Fisica II – Elettromagnetismo*, Zanichelli Editore, Padova).

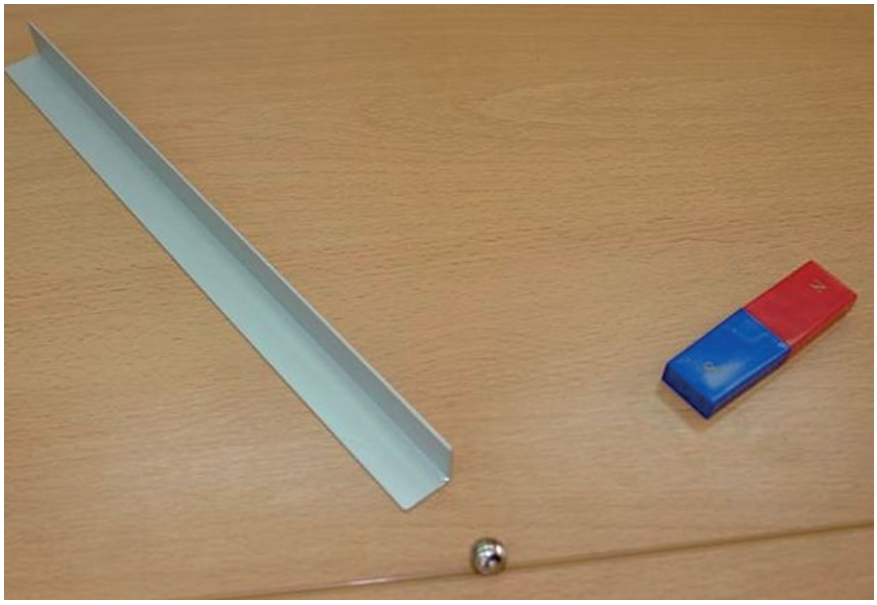
W szczególności piszemy „magnetyzacja”, zamiast podać np. wartość indukcji na powierzchni magnesu.

## 3.5. 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.



**Fot. 3.6.** Ruch kulki w polu magnetycznym

**Wykonanie:**

Przytrzymaj rynienkę tak, by była lekko uniesiona w górę, a drugi koniec oprzyj o stół, a następnie włóż w nią kulkę. Zaobserwuj, jak kulka porusza się po stole. Wykonaj dokładnie to samo, ale tym razem poproś kolegę/koleżankę, 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 dodatkowo 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: a) „siły" magnesu, b) odległości początkowej trajektorii (prostoliniowej) od magnesu, c) masy kulki oraz d) jej prędkości początkowej.

Przypomina ono 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. Przy odrobinie cierpliwości doświadczenie to może służyć do pomiaru prędkości kulki na końcu równi.

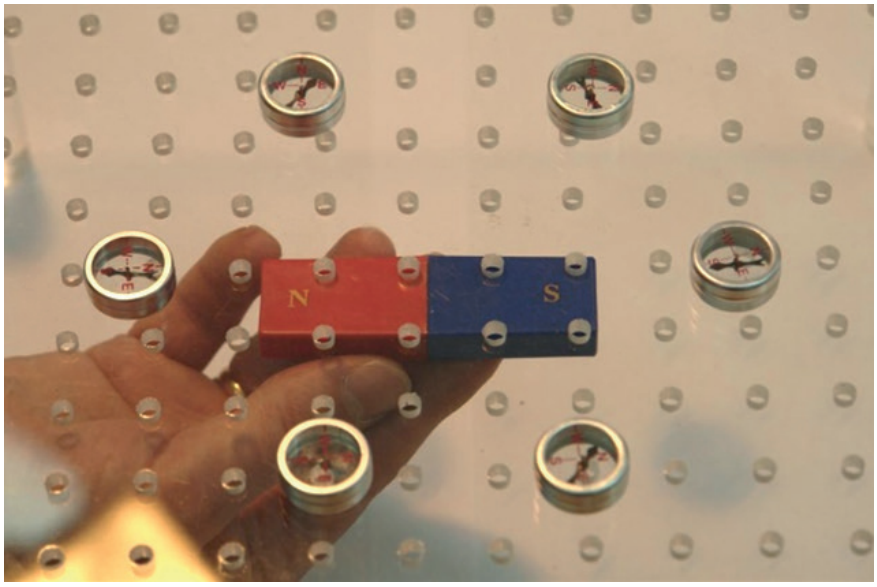
# 4. Pole magnetyczne Ziemi

## 4.1. Oddziaływanie magnesu na igły magnetyczne

**Cel:** badanie oddziaływania magnesu na igły magnetyczne.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- magnes sztabkowy,
- igły magnetyczne,
- mały stolik z pleksi.



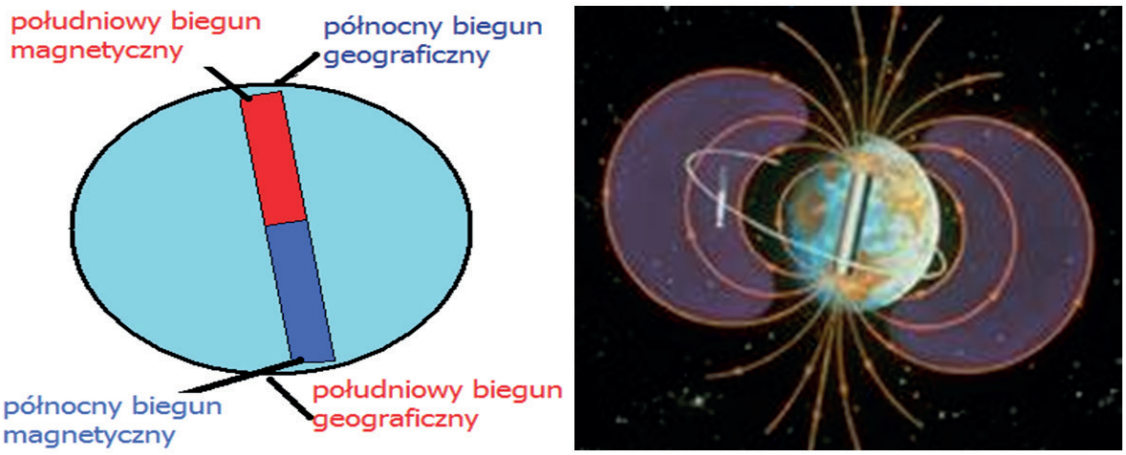

**Fot. 2.7.** Oddziaływanie magnesu na igły magnetyczne

**Wykonanie:**

Na stoliku połóż kilka igieł magnetycznych. Zaobserwuj, jak są ustawione. Jaki kierunek wskazują? Włóż pod stolik (albo połóż na stoliku) magnes. Co teraz wskazują igły? Odwróć magnes tak, aby jego biegun południowy znalazł się po przeciwnej stronie. Co się stało z igłami?

**Wyjaśnienie:**

Leżące na stoliku igły magnetyczne są ustawione identycznie – wskazują północny biegun *geograficzny.* Po zbliżeniu magnesu igły obracają się w taki sposób, że każda z nich jest ustawiona pod innym kątem, ale wszystkie wskazują południowy biegun magnesu. Po odwróceniu magnesu igły również się obracają i ponownie zwrócone są w stronę bieguna południowego magnesu. Ruch igieł magnetycznych świadczy o tym, że magnesy zmieniają właściwości przestrzeni wokół siebie. Mówimy, że magnesy wytwarzają wokół siebie pole magnetyczne. Własność wskazywania bieguna magnetycznego Ziemi przez igły ma zastosowanie w kompasach. Jak wiesz, kompas służy do wyznaczania kierunków geograficznych i jego igła wskazuje północ geograficzną. Jak to jest możliwe? Otóż można powiedzieć, że Ziemia jest ogromnym magnesem, którego bieguny magnetyczne znajdują się w okolicach biegunów geograficznych.




**Rys. 4.1.** a) Bieguny geograficzne i magnetyczne Ziemi, b) Układ linii pola magnetycznego wokół Ziemi, http://www.nature.com/news/2007/070309/full/news070305-14.html

## 4.2. Magnes zakręcający na równi pochyłej

**Cel:** badanie ziemskiego pola magnetycznego.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- magnes (cylindryczny),
- równia pochyła.



**Fot. 4.2.** 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? Jaka może być tego przyczyna? Zmień orientację równi i puść magnes ponownie. Znajdź taką orientację, aby magnes poruszał się po linii prostej.

**Wyjaśnienie:**

W większości przypadków 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 odchyla „lekkie" obiekty, jak igły magnetyczne, o tyle nie spodziewamy się podobnego efektu dla „ciężkich" magnesów. W rzeczywistości, jak to pokazuje powyższy przykład 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?

3. Szereg doświadczeń z magnesami neodymowymi zawiera praca [1].

[1] David Featonby, *Experiments with neodymium magnets*, Physics Education, 40, 505 (2005).

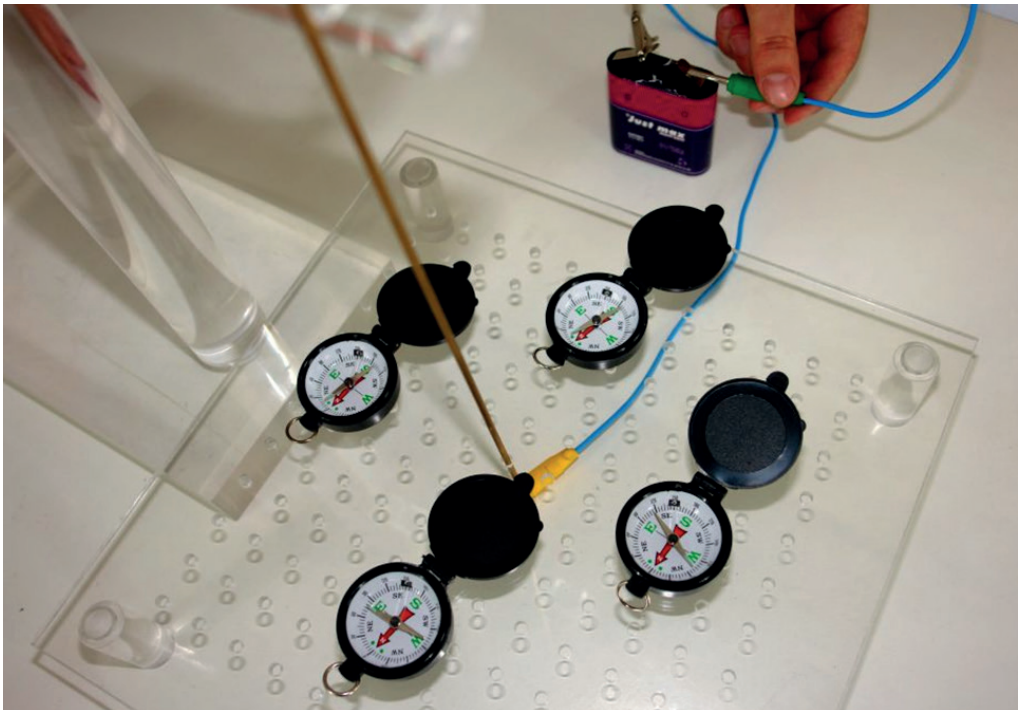
# 5. Magnetyczne efekty przepływu prądu elektrycznego

## 5.1. Doświadczenie Oersteda – wersja pionowa (czyli doświadczenie Ampère'a)

**Cel**: zbadanie zjawiska powstawania pola magnetycznego wokół przewodnika, przez który płynie prąd.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- przewodnik z mosiądzu,
- bateria 4,5 V,
- cztery kompasy,
- cztery krokodylki,
- dwa kable,
- stolik z pleksi z krótkimi nogami,
- uniwersalny statyw.



**Fot. 5.1.** Zestaw do prezentacji pionowej wersji doświadczenia Oersteda

**Wykonanie:**

Umieszczamy cztery kompasy wokół wykonanego z mosiądzu i pionowo ustawionego przewodnika, który jest częścią obwodu elektrycznego. Gdy obwód elektryczny jest otwarty, igły wszystkich kompasów wskazują kierunek północ-południe. Zamknij obwód. Co się dzieje z igłami w kompasach?

Wykonaj doświadczenie jeszcze raz, z innym natężeniem prądu przepływającego przez przewodnik lub z magnesami umieszczonymi w bliższej (dalszej) odległości od przewodnika. Jak zmieniają się wychylenia igieł?

**Wyjaśnienie:**

Gdy zamykamy obwód, przez przewodnik płynie prąd elektryczny, a igły w kompasach obracają się. W omawianym doświadczeniu pokazujemy, że prąd elektryczny może być źródłem siły magnetycznej oraz że linie pola magnetycznego mają kształt okręgów. Od Ampère'a pochodzi ta część doświadczenia, która pokazuje, że natężenie pola magnetycznego (i jego *indukcja* B) maleje wraz ze wzrostem odległości od przewodu i jest proporcjonalne do natężenia prądu:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r},$$

\mu_0 gdzie $\mu_o$ jest przenikalnością magnetyczną próżni (= $4\pi\ 10^{-7}$ N/Am). Jest to ogólny wzór opisujący prawo Ampère'a dla przewodu prostoliniowego.

Pole magnetyczne wytworzone przez przewodnik sumuje się w polem magnetycznym Ziemi, które jest całkiem spore!

**Uwagi metodologiczne:**

1. Linie siły pola dookoła przewodnika liniowego (w powyższej geometrii) są okręgami. Kierunki igieł magnetycznych powinny więc tworzyć elementy okręgu. W rzeczywistym doświadczeniu, przynajmniej z prądami o „rozsądnym" natężeniu (<10 A), igły odchylają się, ale nie tworzą regularnego okręgu. Dlaczego?

Powodem jest znowu pole magnetyczne Ziemi. Co więcej, zarówno to doświadczenie, jak i następne mogą służyć do pomiaru wartości indukcji pola magnetycznego Ziemi. Załóżmy, że przez przewodnik przepływa prąd o natężeniu 10 A, a igła znajduje się w odległości 10 cm. Zgodnie z powyższym wzorem indukcja B w odległości 10 cm od przewodnika wyniesie $2 \cdot 10^{-5}$ T. Pole magnetyczne Ziemi ma wartość około $3 \cdot 10^{-5}$ T. Pole wytworzone przez przewód jest więc prawie takie samo jak pole ziemskie.

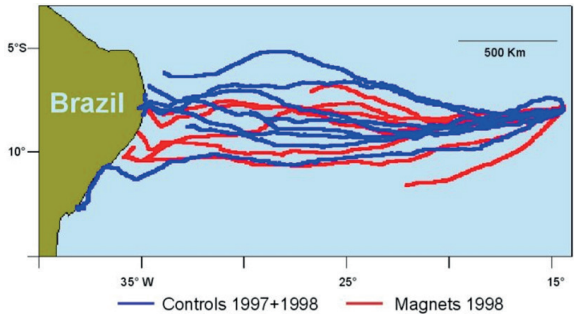
Igła wskaże kierunek będący wypadkową dwóch pól – ziemskiego i pochodzącego od przewodu z prądem. Pomiar kąta, pod jakim wychyla się igła od kierunku północ–południe w obecności dodatkowego pola, pozwala na wyznaczenie wielkości pola magnetycznego Ziemi.

We włoskiej dydaktyce tego rodzaju doświadczenie nazywa się kompasem stycznych.

2. Doświadczenie jeszcze raz pokazuje wszechobecność (i stosunkowo duże natężenie) ziemskiego pola magnetycznego. Należy dodać, że ani Mars, ani Wenus nie mają własnego pola magnetycznego. Pola magnetyczne chroni Ziemię przed napływem szkodliwych dla istot żywych, elektrycznie naładowanych cząstek ze Słońca (głównie protonów i wysokoenergetycznych elektronów).

Co więcej, ostatnie badania wskazują, że z pola magnetycznego Ziemi korzystają żółwie morskie, powracające do swoich miejsc lęgowych dla złożenia jaj, oraz słowiki, odlatujące zimą ze Szwecji na południe. Niewykluczone, że zmysł „magnetyczny”






**Fot. 5.2.** Żółw morski, któremu na pancerzu umieszczono magnesy, oraz szlaki migracji żółwi (badania naukowe – Uniwersytet w Pizie, reprodukcja za zgodą autorów)

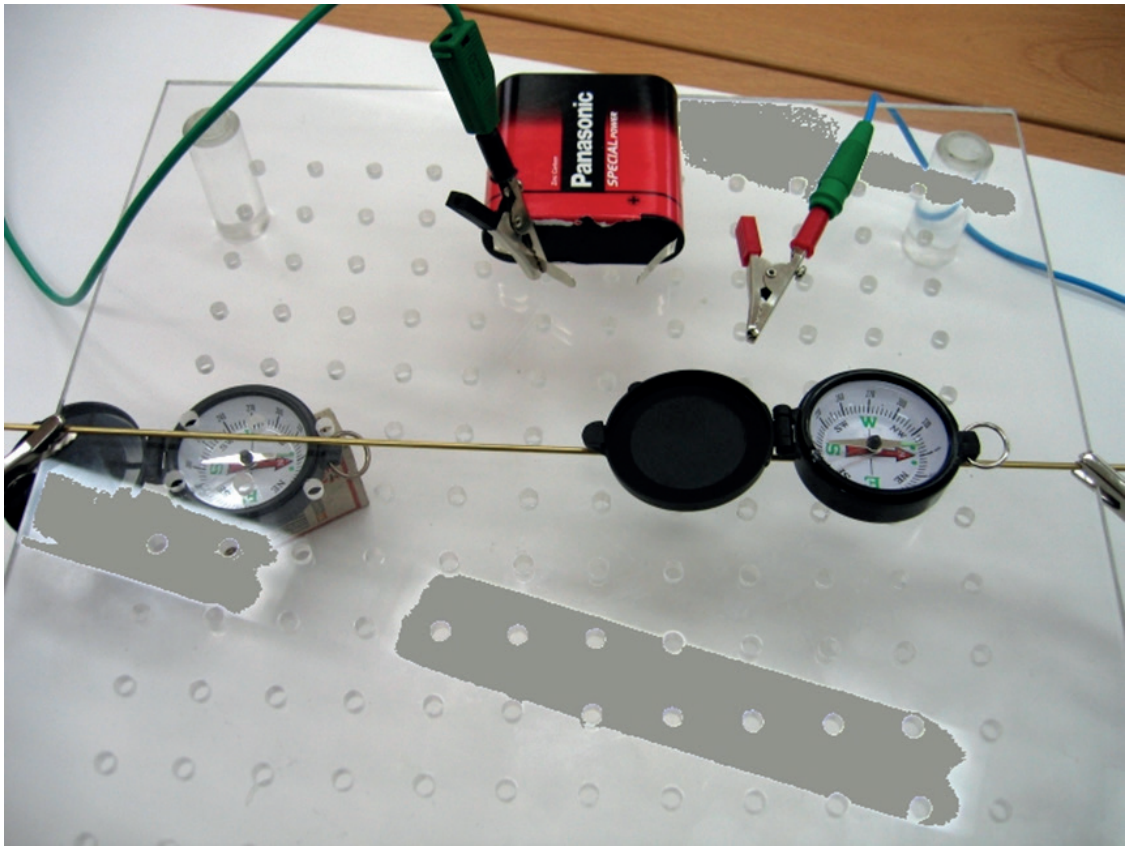
może być obecny również wśród innych istot żywych, zob. artykuł G. Karwasza „Magnetic turtles" https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/html/turtle.html.

## 5.2. Doświadczenie Oersteda – wersja pozioma

**Cel**: zbadanie zjawiska powstawania pola magnetycznego wokół przewodnika, przez który płynie prąd.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

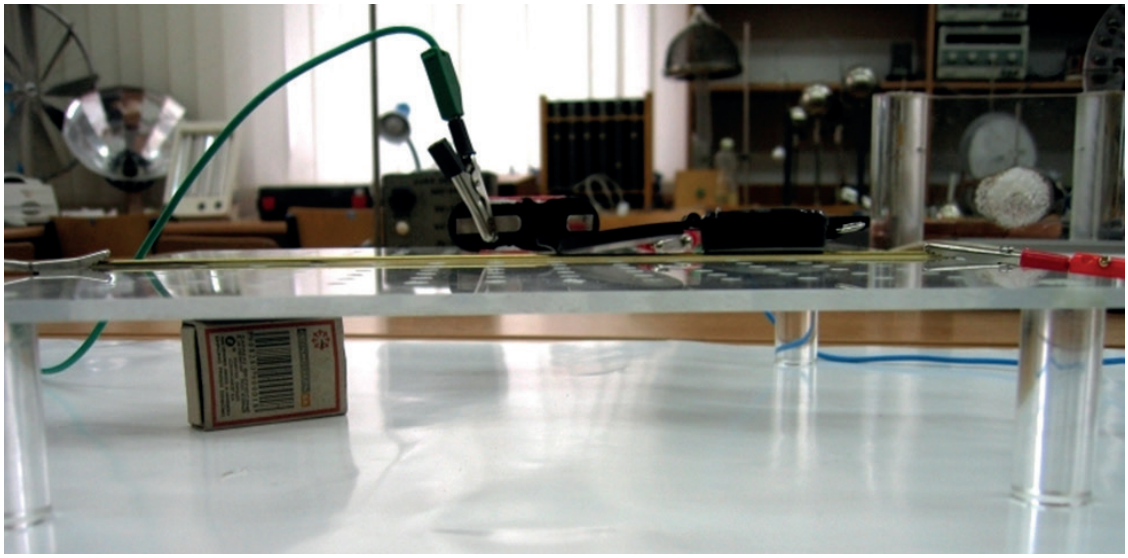
- przewód z mosiądzu,
- bateria 4,5 V,
- dwa kompasy,
- cztery krokodylki i dwa kabelki,
- stolik z pleksi z krótkimi nogami.




**Fot. 5.3.** Zestaw do prezentacji poziomej wersji doświadczenia Oersteda

**Wykonanie:**

Połóż przewód z mosiądzu na stoliku z pleksi. Ustaw dwa kompasy (nad i pod przewodem połóż pudełko zapałek) w pobliżu prostego przewodu z mosiądzu. Połącz ten przewód za pomocą dwóch kabli i czterech krokodylków do baterii 4,5 V.



**Fot. 5.4.** Sposób połączenia wszystkich elementów doświadczalnych

**Wyjaśnienie:**

Umieszczamy dwa kompasy dokładnie nad i pod prostoliniowym przewodnikiem, który jest częścią obwodu elektrycznego. Prostoliniowy przewodnik jest równoległy do kierunku północ-południe, wyznaczonego przez kompasy. Podłącz uchwyty zaciskowe do baterii 4,5 V i zamknij obwód elektryczny. Co się dzieje? Przyjrzyj się igłom w kompasach. Jak można to wytłumaczyć?

Igła kompasu obraca się, dopóki nie znajdzie się w położeniu (prawie) prostopadłym do przewodnika z mosiądzu. Kierunek wskazywany przez igłę nad przewodnikiem jest przeciwny do kierunku wskazywanego przez igłę kompasu umieszczonego pod przewodnikiem. Jeśli odwrócimy kierunek przepływu prądu w przewodniku, to również położenie igieł w kompasach zmieni się na przeciwne. W 1820 roku Oersted pokazał, że prąd elektryczny może być źródłem pola magnetycznego. Pole magnetyczne ist-

nieje nad i pod przewodnikiem. Jego kierunek ulega zmianie, gdy zmienia się kierunek przepływu prądu.

Powtórz doświadczenie zmieniając kierunek przepływu prądu.

**Uwagi metodologiczne:**

1. Ważne, aby pokazać, jak odchyla się igła położona nad przewodem i pod przewodem (służy do tego stolik z pleksi).

2. Podobnie jak w poprzednim doświadczeniu, odchylenie igły może być wykorzystane do znalezienia wielkości pola magnetycznego Ziemi. Ograniczeniem pomiaru jest wielkość prądu przepływającego przez przewodnik. Rozsądną granicą w dłuższych pomiarach są 3 A na 1 $mm^2$ przewodnika.

Użycie baterii jest poważnym ograniczeniem – dużo lepiej wykorzystać jakikolwiek zasilacz prądu stałego, choćby prostownik do akumulatorów samochodowych.

3. Istnieją udokumentowane dane historyczne wskazujące, że doświadczenie „Oersteda" przeprowadził po raz pierwszy, w 1802 roku, Giandomenico Romagnosi, prawnik z Trydentu [1, 2]. Jego praca na ten temat, zgłoszona na konkurs rozpisany przez Napoleona, została negatywnie oceniona przez Ampère'a, który napisał, że nie ma nic bardziej absurdalnego jak twierdzenie, że istnieje jakikolwiek związek między zjawiskami elektrycznymi a magnetycznymi.

Oersted przebywał w Paryżu w czasie rozstrzygnięcia konkursu. Z powodów politycznych Romagnosi trafił, co prawda na krótko, do więzienia (austriackiego). Po ogłoszeniu pracy przez Oersteda Romagnosi próbował protestować, jednakże bez skutku [1].

[1] Sandro Stringari i Robert R. Wilson, *Romagnosi and discovery of electromagnetism*, Atti dell'Accademia dei Lincei, Roma 1998.

https://link.springer.com/article/10.1007/BF02904378

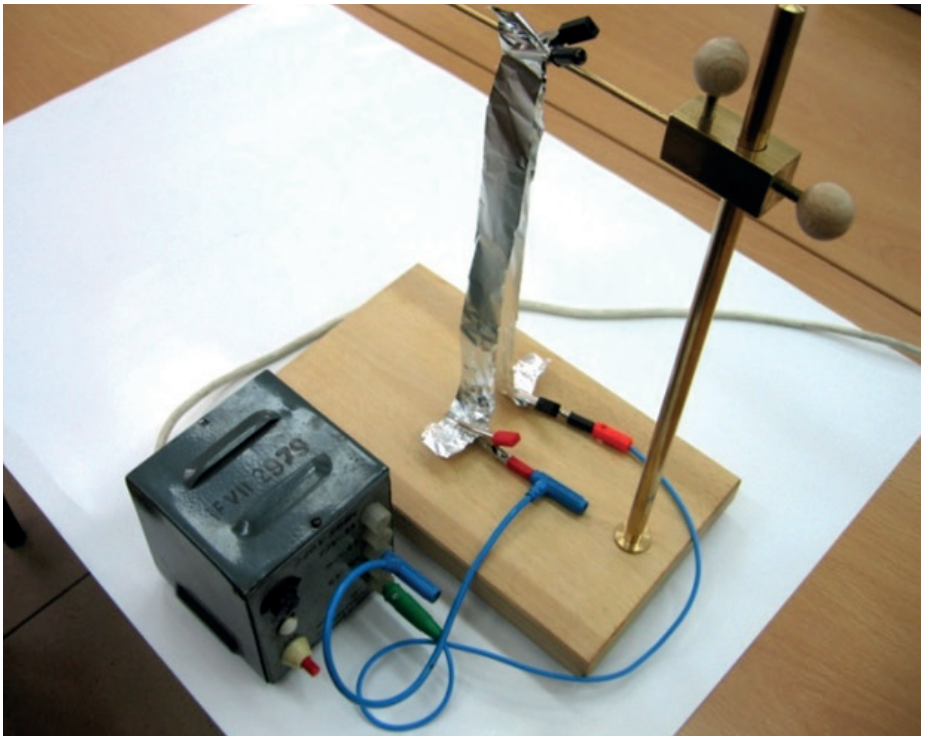
[2] Szymon Pustelny, *Niezwykła kariera pola magnetycznego*, Foton, 93, Lato 2006, s. 17.

## 5.3. Siła magnetyczna między dwoma równoległymi przewodami (definicja ampera)

**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.



**Fot. 5.5.** Ustawienie zestawu do demonstracji doświadczenia Ampère'a

**Wykonanie:**

Do statywu przymocuj dwa paski folii aluminiowej – tak jak pokazano to na zdjęciu 5.5. Następnie połącz je z zasilaczem. Włącz zasilacz. Zaobserwuj, co się dzieje z paskami. Jak myślisz, dlaczego się odpychają?

**Wyjaśnienie:**

Paski z folii aluminiowej przymocowano do statywu w taki sposób, że są do siebie równoległe. Paski stanowią część obwodu elektrycznego, a więc przepływa przez nie prąd. Kierunek przepływu prądu jest anty-równoległy, 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 przewodami 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. przewodniki odpychają się, ponieważ powstające między nimi dwa pola magnetyczne są zwrócone w tym samym kierunku. 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 $r = 1$ cm, o długości $l = 20$ cm i płynie przez nie prąd $I = 10$ A. Do obliczenia tej siły musimy najpierw (z prawa Ampère'a) znaleźć wielkość indukcji pola. Korzystamy ze wzoru $B = \mu_0 I / 2\pi r = 2\ 10^{-7}\ 10/0{,}01$ [T] $= 2\ 10^{-4}$ T. Siłę działającą (na cały pasek) obliczamy ze wzoru $F = IBl = 10\ 2\ 10^{-4}\ 0{,}2$ [N] $= 4\ 10^{-4}$ N

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

[1] Andrzej Zięba, *O definicji i realizacji ampera w fizyce klasycznej*, Foton 125, Lato 2014, 31.

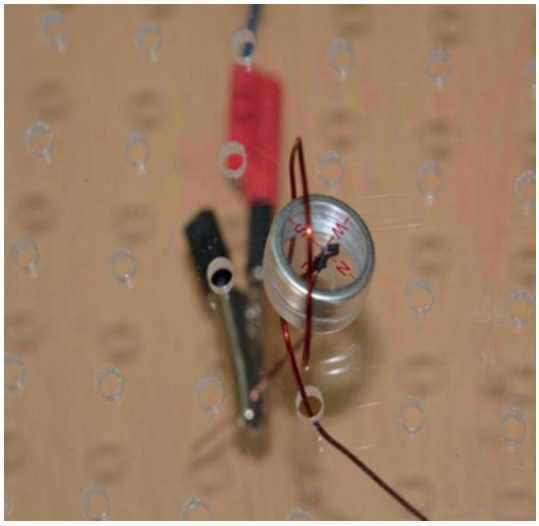
## 5.4. Pole magnetyczne wokół cewki

### 5.4.1. Pole magnetyczne wewnątrz pojedynczego zwoju

**Cel:** badanie istnienia pola magnetycznego wewnątrz pojedynczego zwoju przewodnika.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- cewka z jednym zwojem,
- kompas,
- dwa złącza krokodylowe,
- bateria,
- stolik z pleksi.



**Fot. 5.6.** Ustawienie zestawu do demonstracji powstawania pola magnetycznego wewnątrz cewki

**Wykonanie:**

Przełóż końce cewki pod spód stolika. Następnie włóż kompas w cewkę i podłącz ją do baterii. Co się dzieje?

**Wyjaśnienie:**

Płynący przez cewkę prąd, podobnie jak w przypadku przewodu prostoliniowego, powoduje powstanie pole magnetycznego, o czym świadczy ruch igły kompasu. Igła ustawia się prostopadle do cewki.

Podsumowując – linie pola magnetycznego wewnątrz cewki są do niej prostopadłe.

**Uwagi dydaktyczne:**

1. Początkowe ustawienie (geograficzne) kompasu (i cewki) należy wybrać tak, aby igła magnetyczna była równoległa do zwoju.

2. Dysponując zasilaczem o regulowanej wartości prądu, można pokusić się o wyznaczenie wielkości indukcji pola magnetycznego Ziemi. Ustawiwszy początkowo cewkę i kompas równolegle do kierunku północ-południe, zwiększamy stopniowo natężenie prądu i mierzymy kąt, o jaki wychyli się kompas. Natężenie pola na osi pojedynczej pętli z prądem obliczamy ze wzoru $B = \mu_0 I / r$. **B = mu_0 I / (2r)**

Do wyprowadzenia tego wzoru trzeba skorzystać z prawa Biota-Savarta, co jest bardziej skomplikowane niż korzystanie z prawa Ampère'a. Tangens kąta wychylenia jest równy stosunkowi pola $B$ wytworzonego przez cewkę i pola ziemskiego $B_0$: $\operatorname{tg} \varphi = B/B_0$.

Wartość (składowej poziomej) indukcji pola ziemskiego wynosi około $0{,}3\ 10^{-4}$T.

3. Prosta ilustracja pola magnetycznego wytwarzanego przez zwój prądu występuje w [1].

[1] Marian Braun, Weronika Śliwa, *Odkryć fizykę 2*, *Podręcznik dla liceum ogólnokształcącego i technikum*, Nowa Era, Warszawa 2020, s. 150.

## 5.4.2. Pole magnetyczne wewnątrz solenoidu

**Cel:** badanie istnienia pola magnetycznego wewnątrz solenoidu

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- solenoid,
- kompas,
- dwa złącza krokodylkowe,
- bateria,
- stolik z pleksi.



**Fot. 5.7.** Ustawienie zestawu do demonstracji powstawania pola magnetycznego wewnątrz solenoidu

**Wykonanie:**

Przełóż końce solenoidu pod spód stolika. Następnie włóż kompas w solenoid i podłącz go do baterii. Co się dzieje?

**Wyjaśnienie:**

Po podłączeniu solenoidu do baterii igła kompasu porusza się i ustawia się prostopadle do zwojów solenoidu. Płynący przez solenoid prąd powoduje powstawanie pola magnetycznego wewnątrz solenoidu. Prostopadłe ustawienie się igły świadczy o tym, że linie pola magnetycznego wewnątrz solenoidu są do siebie równoległe. Można stwierdzić, że pole magnetyczne powstające wewnątrz i wokół solenoidu jest podobne do pola magnetycznego magnesu sztabkowego.

**Uwagi dydaktyczne:**

Podobne uwagi jak do ćwiczenia poprzedniego stosują się również do badania pola wewnątrz cewki. Przypominamy, że pole wewnątrz (ideal-

nej, tj. nieskończenie długiej) cewki zależy wyłącznie od natężenia prądu $I$ i liczby $n$, zwojów *na jednostkę długości*

$$B = \mu_0 In,$$

a jest niezależne od wielkości geometrycznych, takich jak długość cewki lub jej promień. Jest to wygodne w rozwiązywaniu zadań, ale kłopotliwe dla konstruktorów cewek do generacji silnych pól. Zwiększenie liczby zwojów na jednostkę długości powoduje kłopoty z odprowadzaniem ciepła, a i sama cewka coraz mniej przypomina cewkę *idealną*, tzn. nieskończenie długą i nieskończenie cienką.

Podobne doświadczenie – pomiar siły oddziaływania między zwojem z prądem a magnesem umieszczonym na swego rodzaju wadze szalkowej, pokazuje praca [1].

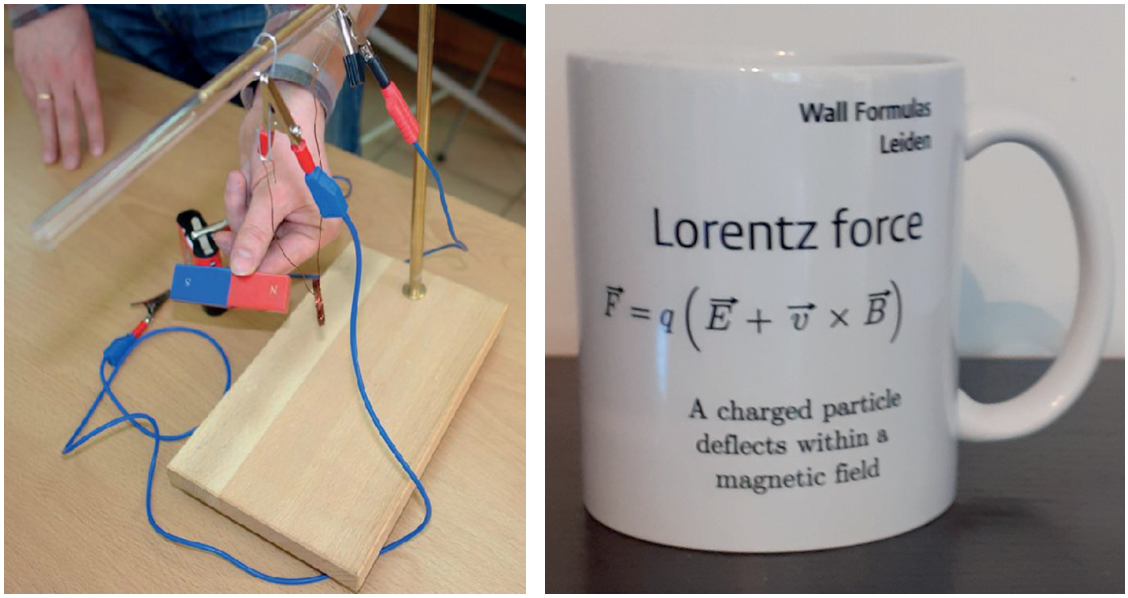
[1] Roberto Hessel, *More on Faraday's and Lenz's laws – Qualitative demonstrations*, Physics Teacher, 1 March 2011, 49 (3), 184–188.

## 5.4.3. Wzajemne oddziaływanie cewki i magnesu

**Cel:** badanie istnienia pola magnetycznego wewnątrz solenoidu.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- statyw oraz plastikowa rurka,
- dwa złącza krokodylowe i dwa spinacze,
- cewka,
- magnes sztabkowy.




**Fot. 5.8.** (a) Ustawienie zestawu do demonstracji siły Lorentza; (b) kubek z Uniwersytetu w Lejdzie

**Wykonanie:**

Na metalową część statywu nałóż plastikową rurkę. Rozegnij spinacze i zamocuj je tak, jak widać to na zdjęciu. Zawieś na spinaczach cewkę. Połącz spinacze z baterią za pomocą złączy krokodylowych. Następnie do cewki zbliż magnes biegunem północnym. Zaobserwuj, co się dzieje. Odwróć magnes i zbliż go do cewki biegunem południowym. Co się dzieje?

**Wyjaśnienie:**

Jak już wiesz, przepływowi prądu przez przewodnik towarzyszy powstanie pola magnetycznego. Jeśli dodatkowo przewodnik z prądem umieścimy w polu magnetycznym, czyli zbliżymy do niego magnes, to wówczas na cewkę zaczyna działać dodatkowa siła, która przyczynia się do ruchu cewki. Siła ta jest nazywana siłą elektrodynamiczną (lub siłą Lorentza). Siła elektrodynamiczna zależy do kierunku pola magnetycznego (na pewno zauważyłeś, że odwrócenie magnesu spowodowało zmianę kierunku ruchu cewki), kierunku przepływu prądu i jego natężenia.

**Uwagi metodologiczne:**

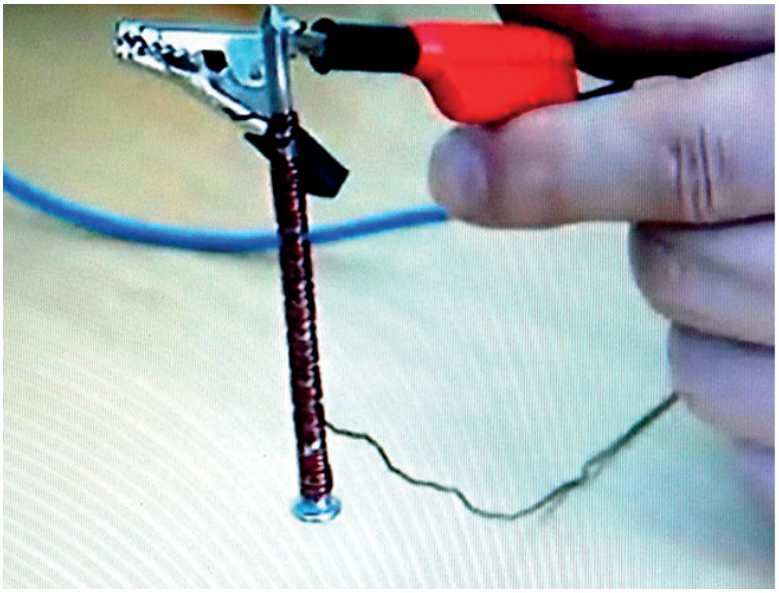
Wyjaśnienie przyczyny siły Lorentza (1853–1928) $\boldsymbol{F} = q\ \mathbf{v} \times \boldsymbol{B}$ (lub $\boldsymbol{F} = I\ \boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$) nie jest takie proste. Siła Lorentza nie wynika bezpośrednio z równań Maxwella. Najprostsze jest wyjaśnienie Einsteina i dotyczy ono przykładu dwóch równoległych przewodników (doświadczenie 5.4): wskutek względnego ruchu ładunków w obu przewodnikach „długość" tych ładunków ulega skróceniu. Oddziaływanie magnetyczne jest równoważne oddziaływaniu elektrostatycznemu nieskompensowanych (bo pozostających we wzajemnym ruchu) gęstości ładunków. Siła działa więc prostopadle do kierunku ruchu ładunków.

## 5.5. Żelazny rdzeń wewnątrz cewki

**Cel:** badanie własności żelaznego rdzenia umieszczonego wewnątrz cewki.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- złącza krokodylowe,
- miedziany przewód,
- gwóźdź,
- bateria.



**Fot. 5.9.** Prosty elektromagnes

**Wykonanie:**

Na gwóźdź nawiń przewód miedziany i za pomocą dwóch złączy krokodylowych podłącz przewód do baterii. Następnie zbliżaj przedmioty wykonane z różnych materiałów, np. spinacze, szpilki, ołówek, linijkę. Zaobserwuj, co się dzieje.

**Wyjaśnienie:**

Po połączeniu zestawu przez przewód przepływa prąd, a wokół przewodu powstaje pole magnetyczne. Jak zauważyłaś(-eś), zestaw zachowuje się tak jak magnes, tzn. przyciąga przedmioty wykonane z żelaza lub stopów metali zawierających żelazo (lub kobalt, lub nikiel), np. stalowe spinacze. Urządzenia, w których żelazny rdzeń jest umieszczony wewnątrz cewki i które po podłączeniu do źródła prądu stają się silnymi magnesami, nazywamy elektromagnesami. Służą one do podnoszenia ciężkich stalowych elementów na złomowiskach.

**Uwagi dydaktyczne:**

1. Oczywiście i bez rdzenia cewka mogłaby być elektromagnesem. Obecność rdzenia z żelaza „wzmacnia" pole. Rzeczywiście, wzrost wartości *indukcji* pola generowanego przez cewkę z rdzeniem można uznać za swoisty efekt „wzmocnienia": pole cewki ustawia domeny magnetyczne w ferromagnetyku równolegle do pola, tak że pole cewki jest większe, nawet o czynnik 100 i więcej.

2. We wzorze na wartość indukcji $B = \mu_0\mu_R In$ (lub $B = \mu_0\mu_R H$) pojawia się $\mu_R$, czyli względna przenikalność magnetyczna. O ile łatwo podać wartość $\mu_R$ dla diamagnetyków i paramagnetyków (w obu przypadkach $\mu_R$ niewiele różni się od 1), o tyle dla ferromagnetyków nie jest to takie proste. Wartość $\mu_R$ zmienia się w zależności od pola zewnętrznego aż do wartości, kiedy wzrost pola $H$ nie powoduje dalszego wzrostu indukcji $B$ (czyli pole $H$ osiąga wartość nasycenia dla danego materiału). Dla niektórych stopów kobaltu i niklu (tzw. *mumetal*) wartości $\mu_R$ dochodzą do 40 000 i więcej.

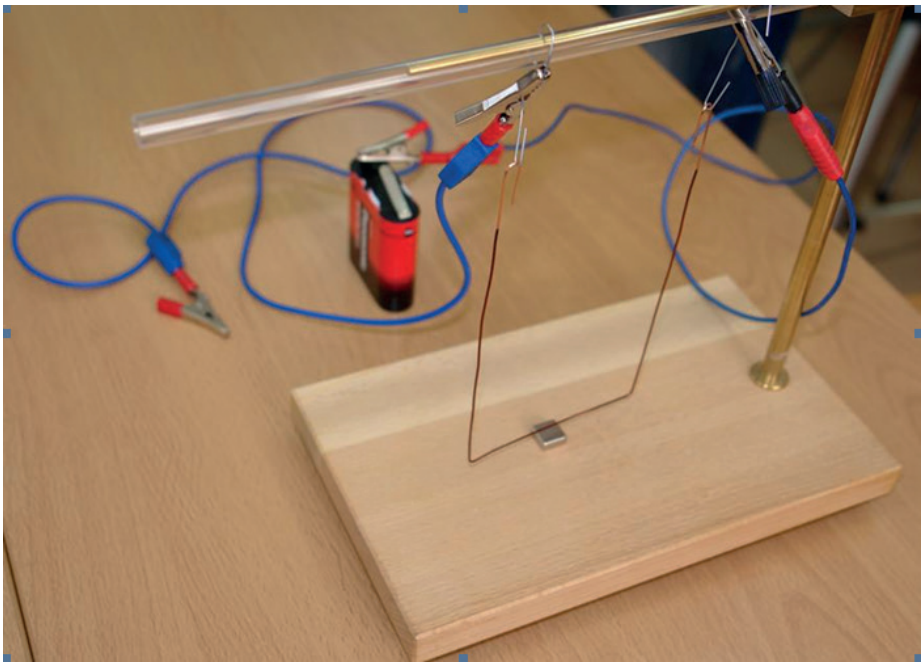
# 6. Siła magnetyczna działająca na przewód z prądem – siła Lorentza

## 6.1. Doświadczenie Pohla (siła działająca na ramkę z prądem)

**Cel:** badanie siły działającej na ramkę z prądem umieszczoną w polu magnetycznym.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- dwa przewody ze złączami krokodylowymi,
- ramka wykonana z miedzi,
- statyw,
- magnes neodymowy (najlepiej kwadratowy),
- bateria,
- dwa spinacze.



**Fot. 6.1.** Sposób połączenia elementów zestawu doświadczalnego

**Wykonanie:**

Ramkę zamocuj na statywie za pomocą spinaczy. Pamiętaj o nałożeniu plastikowej „nakładki" na uchwyt statywu, aby nie przewodził prądu. Pod ramkę podłóż magnes neodymowy. Ramkę połącz z baterią. Zwróć uwagę na to, co dzieje się z ramką. Następnie połącz ramkę tak, aby odwrócić kierunek przepływu. Jak w tym przypadku zachowuje się ramka? Odwróć magnes. Jak teraz ramka się wychyla? Zmień kierunek przepływu prądu.

**Wyjaśnienie:**

Na pewno zauważyłeś/aś, że po połączeniu ramki z baterią, ramka wychyliła się. Zwróć uwagę na to, że fragment poziomy przewodu jest ustawiony prostopadle do magnesu (a dokładnie pola magnetycznego). Przyczyną wychylenia się ramki jest działająca na nią siła. Jest to siła Lorentza. Siła ta działa na przewody, przez które przepływa prąd elektryczny i które umieszczone są w polu magnetycznym. Po odwróceniu kierunku przepływu prądu ramka wychyliła się w przeciwną stronę.

Wiesz, że prąd elektryczny jest uporządkowanym ruchem elektronów. Przypominamy, że elektron jest cząstką elementarną obdarzoną ładunkiem ujemnym. Elektrony w przewodzie poruszają się z pewną prędkością – $\vec{v}$. Dodatkowo nasz przewód jest umieszczony w polu magnetycznym o pewnym natężeniu – $\vec{B}$. Na poruszające się w polu magnetycznym ładunki działa siła Lorentza:

$$F = q\vec{v} \times \vec{B}.$$

Między prędkością i natężeniem pola magnetycznego występuje symbol × którym oznacza się tzw. iloczyn wektorowy. Iloczyn wektorowy zależy od kąta φ. Jest to kąt między wektorami prędkości i natężenia pola magnetycznego, wzór można zapisać w innej postaci:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \phi,$$

gdzie sin $\varphi$ jest funkcją o określonych wartościach. W przypadku, gdy kąt $\varphi$ był równy 90°, a sin 90° = 1, więc wzór uprości się do postaci:

$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\phi$.

**F = q v B**

kursywa, bez pogrubienia

W przypadku, gdy przewód byłby ustawiony równolegle do pola magnetycznego (czyli magnesu), siła byłaby równa zeru, ponieważ sin 0° = 0. Funkcja sinus może przyjmować wartości od 0 do 1, tzn. że dla kątów ostrych przyjmuje ona wartości mniejsze niż 1, a im większy kąt, tym większa wartość funkcji sinus. Można powiedzieć, że im większy kąt (w zakresie kątów ostrych), tym większą wartość będzie miała siła Lorentza.

Wcześniej podany wzór można jeszcze przekształcić, korzystając ze wzoru na natężenie prądu elektrycznego:

$$I = \frac{q}{t},$$

a stąd mamy:

$$q = I \cdot t.$$

Poza tym można założyć, że elektrony poruszają się ruchem prostoliniowym jednostajnym i przebywają drogę równą długości przewodu – L, znajdującego się w polu magnetycznym, z prędkością – v:

$$L = v \cdot t.$$

Z tego wzoru wyznaczamy czas:

$$t = \frac{L}{v}.$$

Wstawiamy wyrażenie określające czas do wzoru na ładunek:

$$q = I\frac{L}{v}.$$

Ostateczny wzór na siłę działającą na przewodnik z prądem umieszczonym w polu magnetycznym, prostopadłym do przewodnika to:

$$F = I\frac{L}{v} \cdot v \cdot B$$

czyli

$$F = I \cdot L \cdot B.$$

Powyższa zależność dotyczy przewodnika umieszczonego prostopadle do pola magnetycznego. Chcą uogólnić powyższy wzór, trzeba uwzględnić inne położenie przewodnika, co można zrobić poprzez wstawienie iloczynu wektorowego:

$$F = I \cdot L \cdot B.$$

Widać, że siła działająca na przewodnik, przez który przepływa prąd, zależy od natężenia prądu, długości przewodu umieszczonego w polu magnetycznym oraz indukcji pola magnetycznego B.

Podsumowując: na przewód znajdujący się w polu magnetycznym i przez który przepływa prąd, działa siła Lorentza. Siła ta zależy od: wartości i prędkości przepływających ładunków, wartości natężenia pola magnetycznego i kąta między wektorem prędkości a wektorem natężenia pola magnetycznego. Siła Lorentza nie działa na przewód, gdy jest on ułożony równolegle do linii pola magnetycznego. Największą wartość siła ta przyjmuje, gdy przewód jest ustawiony prostopadle do linii pola magnetycznego.

**Uwagi dydaktyczne:**

Magnesy neodymowe nie wytwarzają *jednorodnego* pola w dużym obszarze, tak jak duże magnesy podkowiaste, co nie przeszkadza jednak w przeprowadzeniu doświadczenia. Magnes podkowiasty pozwala jednak na *ilościowe* określenie działającej siły [1].

Mimo, że w doświadczeniu nie *mierzymy* działającej siły, jej wielkość możemy określić jakościowo, poprzez obserwację, jak szybko ramka jest wyrzucana z pola magnetycznego magnesu (i do jakiej wysokości). W tym celu można zmieniać natężenia prądu płynącego przez ramkę lub używać magnesów o różnej wartości indukcji na ich powierzchni.

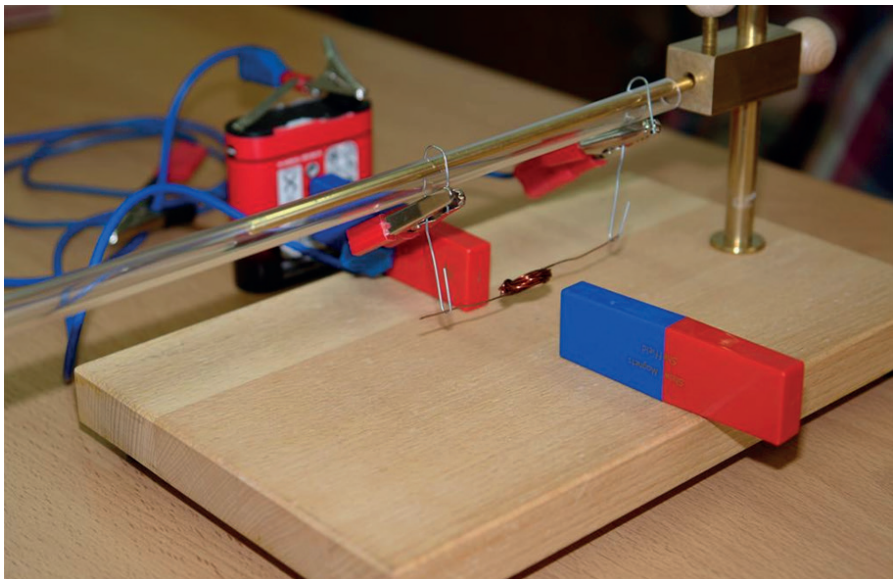
[1] W. Herreman; R. Huysentruyt, *Apparatus for teaching physics: Measuring the magnetic force on a current-carrying conductor*, The Physics Teacher, 33(5), 1995, 288–289.

## 6.2. Zwój z przewodnika między biegunami magnesów

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

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- zwój z przewodnika,
- dwa przewody ze złączami krokodylowymi,
- bateria,
- dwa spinacze,
- dwa magnesy sztabkowe,
- statyw.



**Fot. 6.2.** 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 fot. 6.2). Podłącz za pomocą złączy krokodylowych baterię i zwój z przewodnika. Co się dzieje? Następnie podłącz baterię odwrotnie, by zmienić kierunek przepływu prądu. Co zaobserwowałeś? Przestaw magnesy – zamień bieguny. Jak teraz zachowuje się zwój?

**Wyjaśnienie:**

Podobnie jak w poprzednim doświadczeniu (6.1) zwój zaczyna się poruszać. Tym razem jednak nie jest to tylko wychylenie, lecz także 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 zwojnicy jest działanie siły Lorentza. Tym razem siła ta działa na nośniki prądu poruszające się 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).

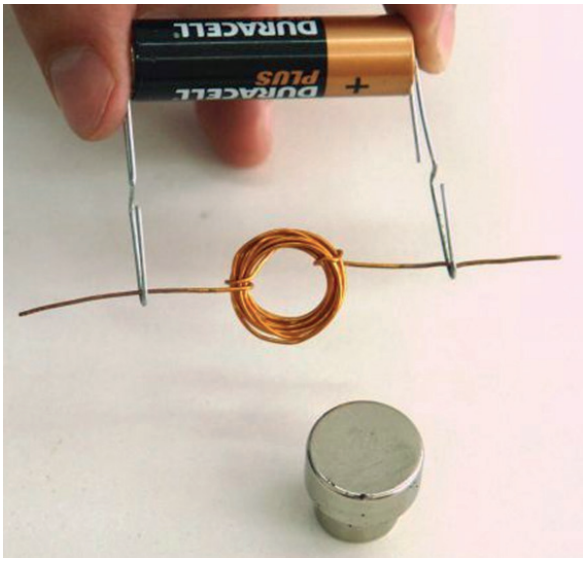
## 6.3. Silniki elektryczne

### 6.3.1. Silnik na spinaczach

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

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- zwój z przewodnika,
- dwa spinacze,
- bateria paluszek,
- magnes neodymowy.




**Fot. 6.3.** Model silnika na spinaczach

**Wykonanie:**

Sporządź zwój drutu jak na fot. 6.3. Połóż zwój na stole. Z końców drutu zeskrob izolację, z jednej, tej samej płaszczyzny drutu. Końce spinaczy przytrzymaj na końcach baterii, a po przeciwnej stronie włóż do spinaczy zwój z przewodnika. Trzymając baterię, zbliż ją do magnesu. Co się dzieje? Zakręć delikatnie zwojem drutu. Silnik się kręci?

**Wyjaśnienie:**

Powyżej zaprezentowano model silnika elektrycznego na prąd stały, który ma szerokie zastosowanie w wielu urządzeniach. Zwój 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 zwój zaczyna działać znana ci już siła Lorentza.

**Uwaga dydaktyczna:**

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

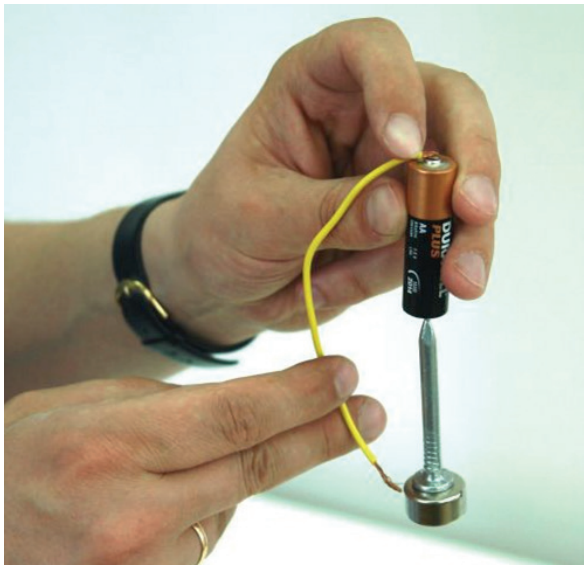
Przewodnik jest częściowo (po jednej stronie) izolowany, kontakty przewodnika ze spinaczami nie są idealne, magnes nie jest doskonałym dipolem: koniec końców, raz zakręcony silnik kręci się! Szkolny model jest inny, ale mimo niedoskonałości silnika z fot. 6.3 „jakoś" działa. Moment siły powodujący obrót jest generowany tylko w jednym położeniu, ale inercja pętli powoduje, że silnik nadal się kręci, o kolejne 180º, do kolejnego „pchnięcia".

Zob. video: https://www.youtube.com/watch?v=iE01AbIhQhE

## 6.3.2. Silnik z jedną „pętlą"

**Cel:** badanie zasady działania silnika elektromagnetycznego.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:
- bateria paluszek,
- gwóźdź,
- magnes neodymowy,
- kawałek przewodu izolowanego.



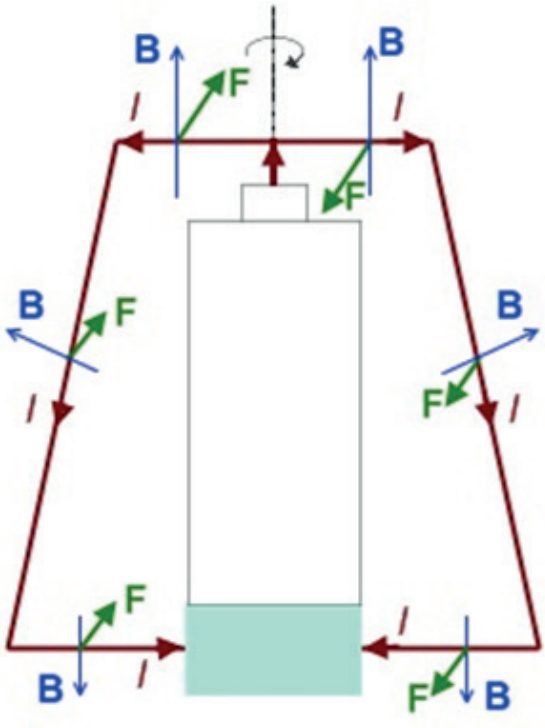
**Fot. 6.4.** Model silnika z jedną „pętlą"

**Wykonanie:**

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

**Wyjaśnienie:**

Silnik ten jest bardzo podobny do silnika z następnego doświadczenia (6.3c). Na półpętlę z przepływający prądem działa siła Lorenza, jak na schemacie obok, zob. też [1, 2].




**Rys. 6.5.** Siły działające na dwie pętle z przewodnikiem

Pętla powinna się więc kręcić. Jest ona jednak przytrzymywana ręką, więc nie porusza się przewód, lecz magnes, zgodnie z trzecią zasadą dynamiki (akcja i reakcja).

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 obejmuje tylko jeden biegun i magnes obraca się najszybciej.

[1] 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

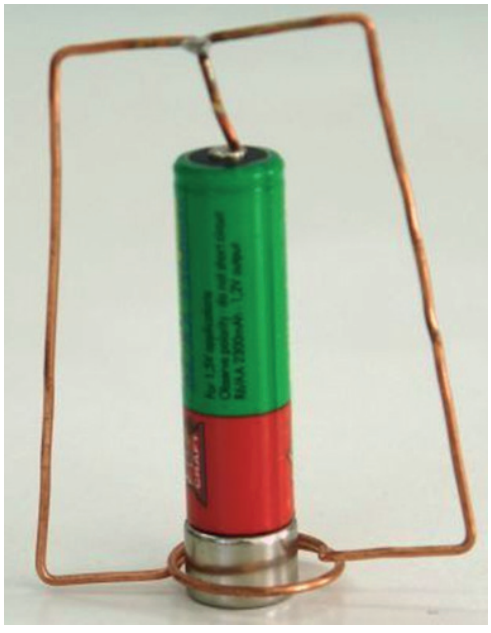
[2] S. Bednarek, *Najprostszy silnik elektryczny*, Delta, 1 (2012), 18.

## 6.3.3. 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".



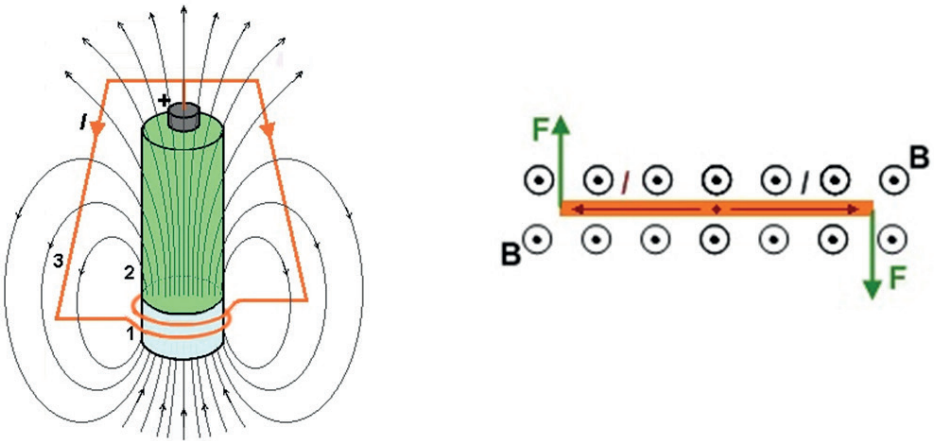
**Fot. 6.6.** Silnik – mikser

**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 pętla dotyka magnesu. Magnes wytwarza pole magnetyczne, które oddziałuje z ramką. Na skutek działania siły Lorentza ramka obraca się dopóki, dopóty utrzymuje się na baterii. Po odwróceniu biegunów 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 $\vec{F} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$; zob. też [1].




**Rys. 6.7.** Rozkład linii pola magnetycznego w obszarze silnika (lewy panel) i siły działające na górny element ramki (widok z góry)

Silnik można zmodyfikować, używając nie ramki, ale aluminiowej puszki, zob. [2].

[1] 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

[2] S. Bednarek, *Silnik unipolarny z wirującą puszką*, Delta, 4 (2012), 20.

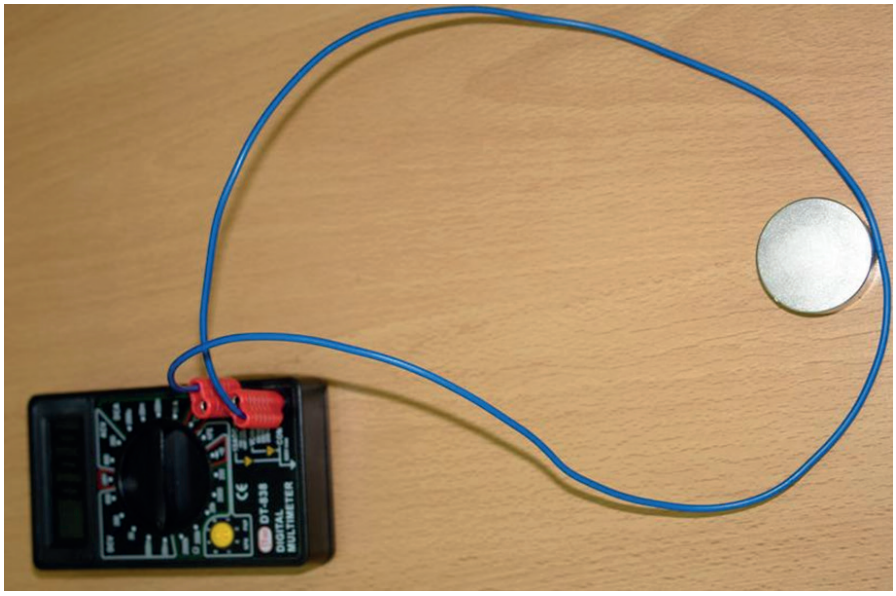
# 7. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

## 7.1. Siła elektromotoryczna indukowana w poruszającym się przewodzie

**Cel:** badanie powstawania prądu indukcyjnego w przewodzie.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy,
- przewód,
- miernik.



**Fot. 7.1.** Sposób ustawienia elementów zestawu doświadczalnego

**Wykonanie:**

Włącz miernik i wybierz odpowiedni zakres pomiarów dla prądu przemiennego. Podłącz przewód do miernika, a w pobliżu przewodu umieść magnes neodymowy. Poruszaj przewodem: co pokazuje miernik? Spróbuj poruszać magnesem w pobliżu przewodu, czy miernik coś wskazu-

je? Spróbuj poruszać równocześnie przewodem i magnesem. Zaobserwuj wskazania miernika.

**Wyjaśnienie:**

We wszystkich przypadkach miernik pokazuje pewną wartość, która się zmienia. W doświadczeniach tych mamy do czynienia z przepływem prądu, mimo że nie ma żadnego źródła prądu. Zbliżając i oddalając magnes od przewodu, powodujemy, że w pobliżu przewodu zmienia się pole magnetyczne – gdy magnes jest blisko przewodu, jest ono „silniejsze", a gdy magnes jest dalej, pole jest „słabsze".

Mówiąc, że pole jest „słabsze" lub „silniejsze", mamy na myśli nie tyle wartość pola (czyli jego indukcji B), ile wartość strumienia pola magnetycznego (czyli iloczyn natężenia pola i powierzchni) obejmującego przewód. W wyniku zmian pola magnetycznego objętego przez obwód w obwodzie zaczyna płynąć prąd, tzw. prąd indukcyjny, którego przepływ jest wywołany względnym ruchem przewodu i magnesu (niezależnie od tego, czym poruszamy).

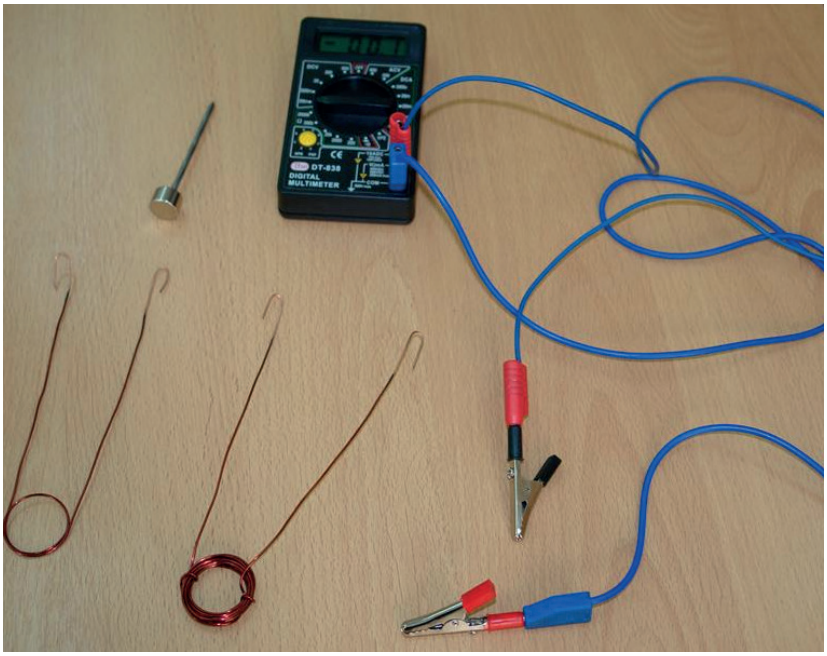
Uogólniając, można stwierdzić, że zmienne pole magnetyczne wymusza, czyli indukuje, powstanie i przepływ prądu w przewodnikach.

## 7.2. Siła elektromotoryczna indukowana w cewce

**Cel:** badanie powstawania prądu indukcyjnego w cewce.

**Środki dydaktyczne**: z zestawu doświadczalnego UMK:

- magnes neodymowy,
- gwóźdź,
- dwie cewki o różnych liczbach zwojów,
- dwa przewody zakończone złączem krokodylkowym,
- miernik.




**Fot. 7.2.** Elementy z zestawu doświadczalnego potrzebne do wykonania doświadczenia

**Wykonanie:**

Włącz miernik i wybierz odpowiedni zakres pomiarów dla prądu przemiennego. Podłącz przewody do miernika, a następnie połącz je jedną z cewek. Trzymaj cewkę w górze jedną ręką, a drugą ręką przysuwaj i odsuwaj gwóźdź z magnesem do cewki. Zaobserwuj wskazania miernika. Odwróć magnes. Jakie są teraz wskazania miernika? Trzymaj magnes nieruchomo, a poruszaj cewką – zbliżaj i oddalaj ją. Co wskazuje miernik? Powtórz wszystkie czynności dla drugiej cewki. Zwróć uwagę na wskazania miernika.

Powtórz doświadczenie, zmieniając szybkość względnego ruchu cewki i magnesu. Jeżeli masz do dyspozycji magnesy (neodymowe) o różnych średnicach, powtórz doświadczenie dla różnych magnesów. Kiedy mierzone napięcie jest większe (choćby chwilowo): kiedy względny ruch jest wolniejszy/szybszy, kiedy magnes jest większy/mniejszy?

**Wyjaśnienie:**

W doświadczeniach miałeś do czynienia ze zjawiskiem powstawania prądu indukcyjnego w cewce, którego przyczyną były: ruch magnesu względem cewki, ruch cewki względem magnesu. Ogólnie można powiedzieć,

że względny ruch cewki i magnesu indukuje w cewce przepływ prądu, co rejestrują wskazania miernika.

Najbardziej dokładne jest stwierdzenie, że zmienne pole magnetyczne powoduje przepływ prądu elektrycznego przez cewkę. Wewnątrz przewodu, z którego zbudowana jest cewka, znajdują się elektrony. Zmienne pole magnetyczne przyczynia się do „popchnięcia" niektórych elektronów – do wprawienia ich w ruch.

Wprawienie w ruch elektronów oznacza, że powstała siła elektromotoryczna – w skrócie SEM, a za jej powstanie odpowiada zmiana pola magnetycznego. Mówiąc, że zmienia się pole magnetyczne, dokładniej mamy na myśli zmianę strumienia pola magnetycznego Φ:

$$\Phi = BS,$$

gdzie $B$ – indukcja magnetyczna, $S$ – pole powierzchni objęte przez strumień.

W naszym przypadku $S$ jest stałe. Gdy przysuwamy magnes w czasie , to $B$ rośnie i równocześnie wzrasta . Gdy odsuwamy magnes, to $B$ maleje i maleje . Podsumowując, zmiana strumienia jest równa[1]:

$$\Delta\Phi = BS,$$

Gdy strumień pola magnetycznego przechodzący przez pętlę (cewkę) zmienia się w czasie, to SEM jest równa szybkości zmian tego strumienia. Dla cewki o $n$ zwojach SEM jest równa:

$$\varepsilon = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Wsuwając magnes do cewki, powodujemy wzrost strumienia, ponieważ rośnie indukcja pola magnetycznego. Indukowany prąd wytwarza własne pole magnetyczne, którego zwrot jest przeciwny do zwrotu pola magne-

[1] Zakładamy, dla uproszczenia, że kierunek pola magnetycznego B jest prostopadły do powierzchni S.

tycznego magnesu. Gdy odsuwamy magnes, strumień maleje, ponieważ maleje indukcja pola magnetycznego. Wówczas indukowany prąd zmienia kierunek przepływu, dlatego na mierniku pojawiały się przeciwne znaki – raz minus, a za chwilę plus. Równocześnie zmienia się zwrot pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd w cewce. Ogólnie można powiedzieć, że indukowany prąd próbuje przeciwstawić się zmianom strumienia. Jest to tzw. reguła Lenza[2].

Wyjaśnijmy to dokładniej: jeżeli magnes wprowadzamy do cewki, to indukowany prąd jest taki, że magnes jest z cewki *wypychany*, natomiast jeżeli magnes wysuwamy z cewki, to indukowany prąd wciąga magnes do środka.

Reguła Lenza nie jest niczym innym jak przejawem zasady *zachowania energii*: prąd nie indukuje się z niczego, ale z pracy siły zewnętrznej (energii kinetycznej wody w turbinie elektrowni wodnej, energii kinetycznej wiatru w elektrowni eolicznej itd.).

**Uwagi dydaktyczne:**

Tradycyjnie wyjaśnia się przepływ prądu jako oddziaływanie zmiennego pola magnetycznego na elektrony w przewodniku. Poprawnej interpretacji zjawiska indukcji dostarczają jednak tylko prawa Maxwella: indukowana „siła elektromotoryczna" to właściwiej indukowane *pole* elektryczne, dookoła zmiennego pola magnetycznego[3].

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

To pole elektryczne wywołuje ruch elektronów! Dlaczego taka interpretacja jest poprawniejsza?

Powyższe równanie pokazuje, że pole elektryczne może powstać również bez przewodnika, czyli w próżni! Innymi słowy, taka interpretacja wyjaśnia powstawanie *fal elektromagnetycznych*.

---

[2] W literaturze pełna nazwa to „prawo Faradaya–Neumanna–Lenza".

[3] W podanym równaniu zapisaliśmy wektory czcionką pogrubioną, a symbol $\nabla \times \boldsymbol{E}$ oznacza operator rotacji. Czytelnika zainteresowanego tym tematem odsyłamy do Feynmana *Wykładów z fizyki*, t. 2.

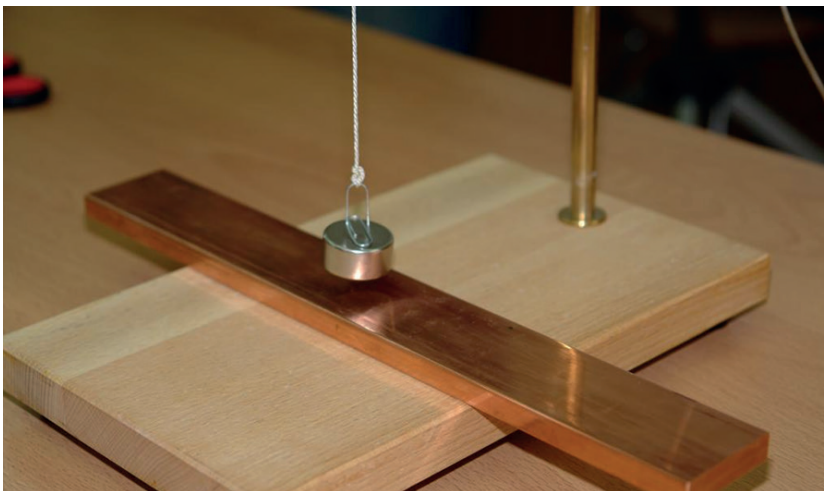
To, że indukowane pole elektryczne jest prostopadłe do kierunku zmian pola magnetycznego, pokazuje nasze doświadczenie z magnesem spadającym w miedzianej rurce z podłużnymi szczelinami.

## 7.3. Prądy wirowe (Foucaulta)

### 7.3.1. Leniwe wahadło

**Cel:** badanie powstawania prądów wirowych.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:
- magnes neodymowy,
- spinacz,
- sznurek,
- statyw,
- miedziana sztabka.



**Fot. 7.3.** 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 dość szybko zwalnia swój ruch. Przyczyną takiego zachowania się 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), o tyle 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:

$$I_{wir} \approx fB_{\max}\sigma ,$$

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?

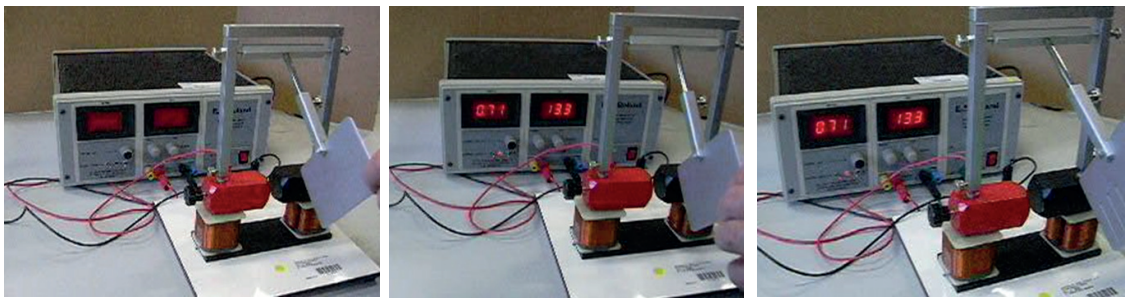
Oczywiście energia kinetyczna wahadła jest źródłem prądów indukowanych. Te z kolei, przepływając w materiale o określonej oporności, wytwarzają ciepło.

**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, przesuwającego 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 [1]. Blacha aluminiowa waha się między nabiegunnikami elektromagnesu. Jeśli przez elektromagnes nie przepływa prąd (obwód elektryczny jest otwarty, pierwsze zdjęcie), 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).



**Fot. 7.4.** Doświadczenie ilustrujące prądy wirowe (Uniwersytet w Udine, doświadczenie i foto G.K.)

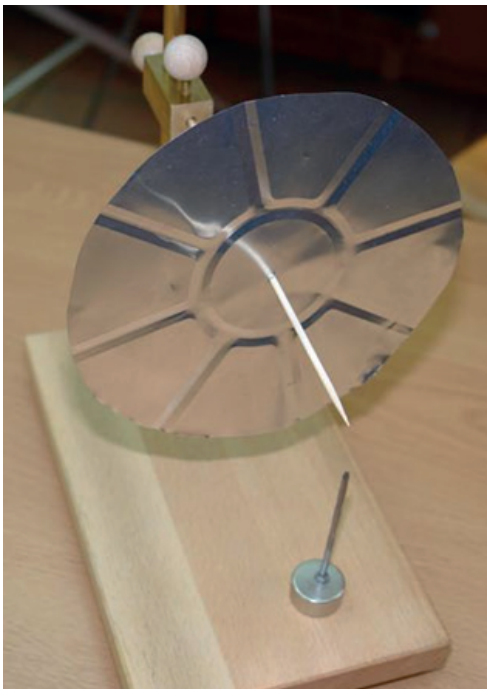
[1] G. Karwasz, Uniwersytet w Udine, Studia podyplomowe dla nauczycieli http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/conf/UDINE/fou02.mov

## 7.3.2. Hamulec elektromagnetyczny

**Cel:** badanie wpływu prądów wirowych na ruch tarczy.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- statyw (z cienkim ramieniem) i drewniana oś (patyk do szaszłyków),
- tarcza aluminiowa w kształcie koła (np. dno jednorazowego talerza aluminiowego),
- magnes neodymowy,
- gwóźdź.



**Fot. 7.5.** Hamulec elektromagnetyczny

**Wykonanie:**

Do statywu przymocuj cienkie ramię, a na nie nałóż aluminiową tarczę. W pobliżu tarczy ustaw magnes, a na nim gwóźdź. Zakręć delikatnie tarczą. Zaobserwuj, jak porusza się tarcza. Powtórz doświadczenie, trzymając magnes nieco dalej od tarczy. Policz, ile obrotów wykona talerz, przy takim samym zakręceniu jak poprzednio.

**Wyjaśnienie:**

Tak jak w poprzednim doświadczeniu 7.3a mamy do czynienia z prądami wirowymi. Tym razem jednak magnes się nie porusza, ale w ruch jest wprawiona tarcza aluminiowa. Aluminium, tak jak miedź, jest przewodnikiem prądu. Poszczególne „kawałki" tarczy zbliżają do źródła pola magnetycznego, czyli magnesu i odsuwają się od niego. Wybierając jeden mały „kawałek" tarczy, możemy powiedzieć, że znajduje się w zmiennym polu magnetycznym, więc w jego wnętrzu indukuje się prąd elektryczny. Składając wszystkie „kawałki" w tarczę, można powiedzieć, że cała tarcza znajduje się w niejednorodnym (czyli zmiennym) polu magnetycznym. Dlatego w całej tarczy indukują się prądy wirowe, dzieje się to wewnątrz przewodzącej aluminiowej płyty. Należy pamiętać, że prądy wirowe są prądami zmiennymi.

Przepływający prąd powoduje wydzielenie się ciepła. Energia kinetyczna tarczy zamienia się wiec w ciepło – tarcza zatrzymuje się. Podobne nieco doświadczenie, z kręceniem aluminiowym kubkiem za pomocą magnesu neodymowego, opisano w pracy [1].

**Doświadczenie dodatkowe:**

Indukowane prądy nie zawsze muszą powodować zatrzymanie się obiektu. W doświadczeniu pokazanym w Internecie pierścień z miedzi umieściliśmy w *zmiennym*, niejednorodnym polu magnetycznym, wytworzonym przez dużą cewkę podłączoną do sieci. Pierścień, początkowo w spoczynku, zaczyna się poruszać po włączeniu zmiennego pola magnetycznego [2].

[1] Carlos Saraiva, *A simple demonstration of Lenz's law*, Physics Education, 41, 288 (2006).

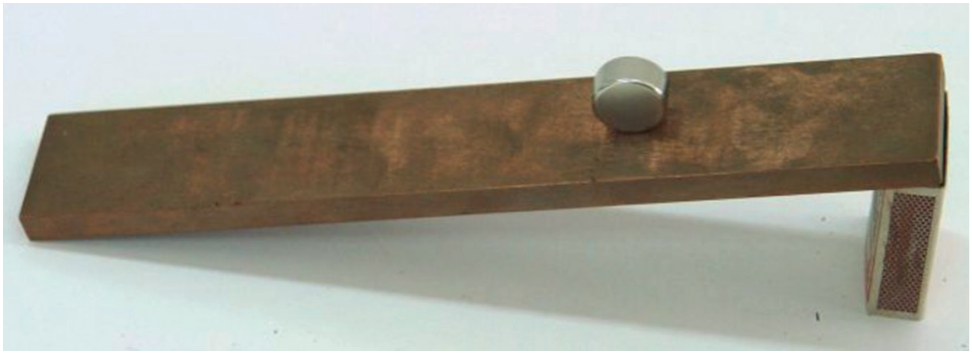
[2] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/157

## 7.3.3. „Pijany" magnes

**Cel:** badanie przyczyny krzywoliniowego ruchu magnesu na miedzianej równi.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy,
- miedziana sztabka.



**Fot. 7.6.** Sposób przeprowadzenia doświadczenia

**Wykonanie:**

Zbuduj równię pochyłą ze sztabki miedzianej i np. pudełka po zapałkach (tak jak pokazano na zdjęciu 7.6). 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 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 zmalałby 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 opisane 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, ponieważ w odkryciu praw indukcji uczestniczyli uczeni różnych nacji).

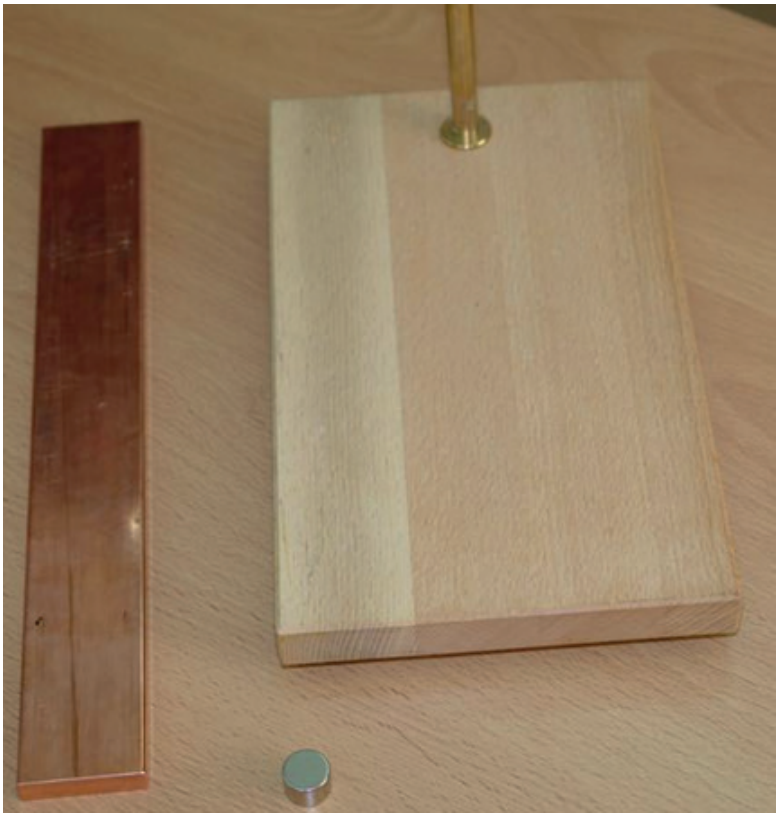
**Faradaya–Neumanna–Lenza–Foucaulta**

### 7.3.4. 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.



**Fot. 7.7.** 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. Magnes nie porusza się szybko po równi, jak podpowiada intuicja, ale zsuwa się powoli. Gdyby na magnes działała wyłącznie siła grawitacji, to zsunąłby się w krótszym czasie. Zastanówmy się, dlaczego magnes zsuwa się wolniej.

Wybierzmy 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 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.

Doświadczenie może mieć również charakter pomiaru (nie tylko pokazu), jak to jest proponowane w pracach [1, 2].

[1] Jose A. Molina-Bolívar, A. J. Abella-Palacios, *A laboratory activity on the eddy current brake*, European Journal of Physics, 33 (2012) 697–707.

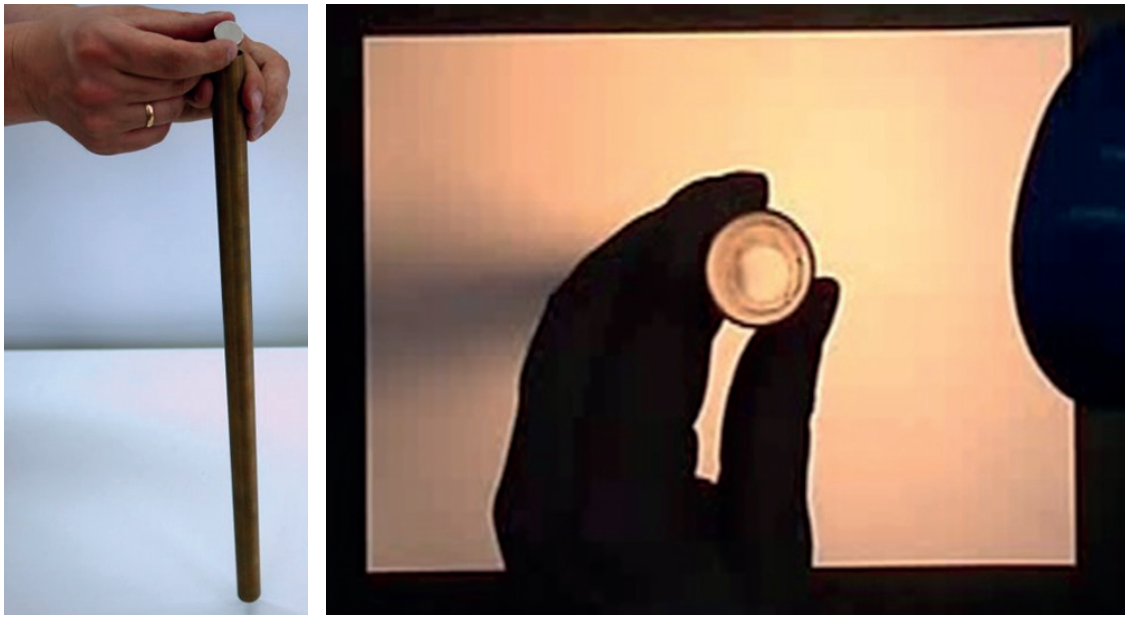
[2] Fernando G. Tomasel, Mario C. Marconi, *Rolling magnets down a conductive hill: Revisiting a classic demonstration of the effects of eddy currents*, American Journal of Physics, 80 (2012) 800–803.

## 7.3.5. 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 podłużnymi pięcioma nacięciami (szerokość nacięć 1 mm, długość 20 cm, z różnych stron rury).



**Fot. 7.8.** (a) Wykonanie doświadczenia: zasadniczo potrzebne są trzy osoby; (b) lewitujący magnes

**Wykonanie:**

Do miedzianej rury bez otworów wrzuć magnes. Słychać, 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 wrzuć 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 był 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 stabilnie lewitować i spada, obijając się o wnętrze rurki (obejrzyj to dokładnie i wyciągnij wnioski samodzielnie).

**Uwagi dydaktyczne:**

1. Doświadczenie można wykonać w sposób „stereotypowy": wrzucamy magnes i mierzymy czas spadku. Zadanie byłoby sensowne, gdybyśmy byli w stanie przewidzieć czas takiego spadku. Niestety, zależy on od wielu czynników.

Proponujemy wersję „widowiskową", która lepiej trafia do percepcji i dzieci, i dorosłych. Wrzucamy magnes i wszyscy oczekują jego natychmiastowego wypadnięcia z dołu rurki. Czas spadku jest tak długi (do 30 sekund), że możemy zadać pytanie: „Gdzie jest magnes? Oddaj go!", po czym przekazać rurkę kolejnej osobie, zanim magnes wypadnie. Dodatkowo możemy zaaranżować podział ról: jedna osoba trzyma rurkę, druga wrzuca magnes, trzecia jest przygotowana do jego natychmiastowego złapania. Zgodnie z zasadami dydaktyki kognitywistycznej emocje wzmacniają funkcje przekazu wiedzy.

2. Rurka użyta do doświadczenia to typowy (1/2'') przewód hydrauliczny, o możliwie grubych ściankach, magnes o wysokości 8 mm i średnicy minimalnie mniejszej niż wewnętrzny rozmiar rurki.

3. 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 prof. Grzegorza Karwasza na Uniwersytecie w Trydencie, gdzie bardzo dobrze skądinąd przy-

gotowani 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 $\Phi_B$. O ile strumień pola magnetycznego występuje również w równaniach Maxwella (w równaniach Maxwella dla *próżni*, w szczególności), to siły elektromotorycznej 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 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 schody (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 dlatego, że zarówno pole **E**, jak i element $d\mathbf{l}$ trajektorii są wektorami, a znak minus, ponieważ pole elektryczne ma zwrot w kierunku malejącego potencjału).

$$V_{AB} = -\int_A^B \boldsymbol{E} \bullet d\boldsymbol{l}$$

(W powyższym równaniu używamy dużej „kropki", ponieważ oznacza ona *iloczyn skalarny* między wektorami pola elektrycznego ***E*** i elementem

długości ***dl***, wzdłuż którego całkujemy pole elektryczne. Ponownie odsyłamy Czytelnika do *Feynmana wykładów z fizyki*).

Jako przyczynę przepływu prądu podajemy zazwyczaj różnicę potencjału między końcami przewodnika. Tak! Tak właśnie 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

$$\oint \mathbf{E} \bullet d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{d\,\mathrm{t}}$$

W powyższym równaniu występuje całka po trajektorii zamkniętej: szukamy nie jakiejkolwiek 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 nie pojawiły się przypadkowo, lecz jako odpowiedź na trudności dydaktyczne na poziomie uniwersyteckim. A za szczególnie niewłaściwe dydaktycznie należy uznać porównywanie czasów spadków, ponieważ i tak nie umiemy tych czasów *policzyć*! A raczej wymaga to nieco bardziej zaawansowanej fizyki [1–3].

4. I w końcu należy dodać, że w programie np. liceum włoskiego prawa Maxwella są integralną częścią kursu, mimo że niektóre z podręczników nie korzystają ani z pojęcia całki, ani z operatorów wektorowych pola, zob. [4–6].

[1] Fred Behroozi, *Weighing a Magnet as it Falls with Terminal Velocity Through an Aluminum Pipe*, The Physics Teacher, 56, 474 (2018).

[2] Sahil Jain et al., *Investigation of a Magnet falling through a copper tube*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 810 012042 (2020).

[3] G Donoso et al., *Magnet fall inside a conductive pipe: motion and the role of the pipe wall thickness*, European Journal of Physics, 30, 855 (2009).

[4] James Walker, *Physics*, Pearson Education, Inc. 2017.

[5] Wyd. włoskie: James Walker, *Dialogo con la Fisica*, 3. *Elettromagnetismo. Fisica moderna* Pearson Italia, Milano–Torino 2018.

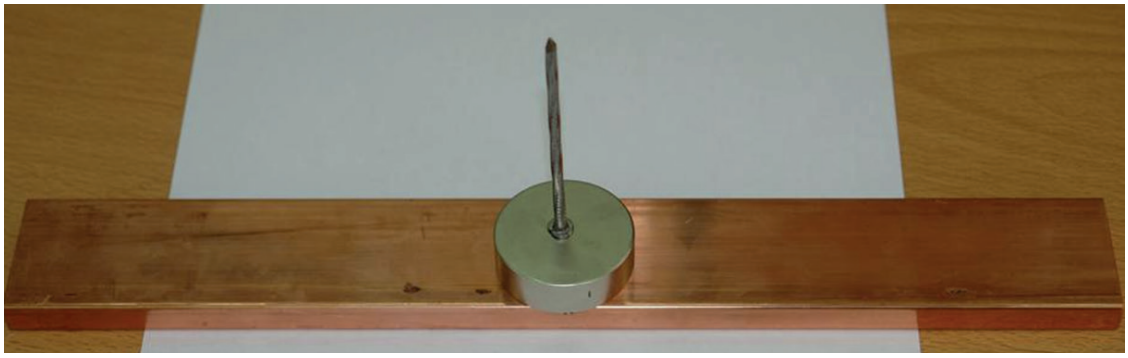
[6] Antonio Caforio, Aldo Ferilli, *Nuova Physica per i licei scientifici*, vol. 3, Le Monnier, 2001.

## 7.3.6. Łagodnie lądujący magnes

**Cel:** badanie przyczyny łagodnego lądowania magnesu.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy,
- gwóźdź,
- miedziana sztabka.



**Fot. 7.9.** Potrzebne środki dydaktyczne

**Wykonanie:**

Połóż gwóźdź na magnesie. 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, mamy więc 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 jest w bezpośredniej bliskości sztabki, czyli na niej „ląduje".

Pamiętasz, że zmienne pole magnetyczne powoduje przepływ prądu wewnątrz przewodnika – miedzi. Użyty przewodnik ma dużą powierzchnię, a spadający magnes jest bardzo silny (indukcja pola magnetycznego, rzędu 0,1–1T, na jego powierzchni jest ponad tysiąc razy silniejsza niż pola magnetycznego Ziemi): zmiana strumienia magnetycznego w miedzianej sztabce jest duża i generowane są silne prądy wirowe. Prądy wirowe z kolei wytwarzają pole magnetyczne wewnątrz sztabki. Zgodnie z regułą Lenza *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: bieguny dwóch magnesów są skierowane przeciwnie i magnesy się odpychają.

# 8. Generatory prądu

## 8.1. Latarka „dynamo"

**Cel:** pokazanie praktycznego zastosowania indukcji elektromagnetycznej

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- latarka „dynamo" z dźwignią (oryginalna ze sklepiku w British Museum, Londyn lub imitacja) lub z przesuwającym się magnesem.



**Fot. 8.1.** Latarka „dynamo": (a) z obracającym się magnesem, (b) z przesuwającym się magnesem

**Wykonanie:**

Naciskaj kilkakrotnie na rączkę latarki. Co się dzieje? Jak myślisz, z jakim zjawiskiem masz do czynienia?

**Wyjaśnienie:**

Działanie tej latarki jest oparte na zjawisku indukcji elektromagnetycznej i zasadzie działania dynama rowerowego, tzn. energia mechaniczna zamienia się w energię elektryczną. Naciskając na rączkę latarki, wykonujemy pracę i w jej wyniku rączka zyskuje energię kinetyczną, czyli jeden z rodzajów energii mechanicznej. Wewnątrz latarki znajduje się koło zębate, które jest wprawiane w ruch poprzez naciśnięcie rączki. Powoduje ono ruch, a dokładniej obracanie się magnesu umieszczonego w pobliżu zwojnicy.

Jak wiesz, względny ruch magnesu i przewodu powoduje przepływ prądu. Za pomocą przewodu prowadzącego od zwojnicy do żarówki jest doprowadzany prąd indukcyjny, a dzięki niemu żarówka świeci. Jeśli będziesz szybciej naciskał na rączkę, żarówka zacznie jaśniej świecić, ponieważ napięcie prądu indukcyjnego będzie miało większą wartość. Napięcie prądu zależy od: liczby zwojów w zwojnicy, indukcji pola magnetycznego magnesu i szybkości obrotów magnesu.

Tego typu latarka jest przykładem prostego generatora prądu, czyli prądnicy. Prądnica to urządzenie służące do zamiany energii mechanicznej na elektryczną, którego działanie jest oparte na zjawisku indukcji elektromagnetycznej.

**Doświadczenie dodatkowe:**

Wykręć żarówkę i ponownie uruchom dynamo. Naciśnij dźwignię pięć razy. Policz, jak długo kręci się magnes przy żarówce wkręconej, a jak długo przy żarówce wykręconej. Sprawdziłeś w ten sposób prawo zachowania *energii*. Jeśli energia nie ma odbiorcy (żarówka nie świeci), to nie jest konsumowana. Energia kinetyczna kręcących się w środku przekładni i magnesu wskutek tarcia zamienia się wówczas jedynie w ciepło: prąd nie jest indukowany!

W drugiej latarce magnes może się przesuwać wewnątrz zwojnicy. Potrząsając w lewo i w prawo przesuwamy magnes i indukuje się prąd, zasilający diodę: latarka się zapala.

Uwaga! Niektóre latarki – nie oryginalne ale ze sklepów z tanimi artykułami mogą mieć dodatkowo zamontowane małe baterie. Ich obecność modyfikuje działanie latarki – doświadczenie nie jest dydaktycznie przekonujące.

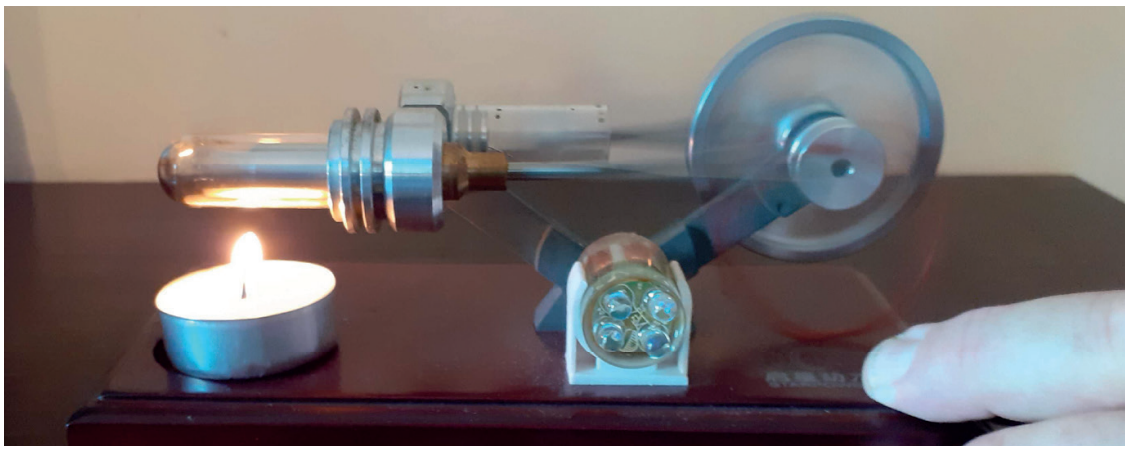
Zob. też opis: https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/elmag/latarka_big-pl.html
https://jangar.pl/pl/przyrzdy-badawcze-w-tym-terenowe/1038-latarka-dynamo-7.html

## 8.2. Silnik Stirlinga i dynamo

**Cel:** pokazanie przemian energii i jej strat.

**Środki dydaktyczne:**

- silnik Stirlinga połączony z dynamem i zespołem LED-ów (producent: no-mark).



**Fot. 8.2.** Silnik Stirlinga (z lewej) i dynamo z niebieskimi LED-ami. Silnik zakręcony ręką G.K.

**Wykonanie:**

1. Zapal świeczkę i poczekaj, aż (szklany) cylinder roboczy się nagrzeje. Czy silnik rusza?

2. Jeśli silnik nie rusza, spróbuj nim zakręcić. Pomogło?

3. Jeśli silnik nadal nie rusza, odłącz prądnicę (zdejmij pasek transmisyjny). Spróbuj teraz poruszyć silnik. Jeśli jest on sprawny, zacznie się kręcić.

4. Teraz zakręć palcem prądnicę. Spróbuj silniej, aż zauważysz, że LED-y się zapaliły.

5. Spróbuj wyjaśnić, co się dzieje.

**Wyjaśnienie:**

Doświadczenie jest, celowo, jednym z tych, które „nie wychodzą". Innymi słowy – nie uzyskujemy efektu spodziewanego (a właściwie obiecanego marketingowo przez sprzedawcę), ale w zamian mamy możność obserwacji całej serii „zakłóceń".

Wydajność silnika Stirlinga, działającego przy małej różnicy temperatur, zob. opis na stronach *Fizyki zabawek*, jest rzędu kilku procent. Mały cylinder, mała świeczka nie dostarczają dostatecznej mocy, aby silnik zaczął sam działać: siły tarcia statycznego są zbyt duże. Poruszenie silnikiem pozwala uzyskać właściwe przesunięcie faz sprężania i rozprężania powietrza w cylindrach i silnik zacznie się kręcić.

Dodanie prądnicy powoduje, że praca uzyskiwana w cyklu termodynamicznym silnika musi wystarczyć również na generację prądu, a po tym na zamianę uzyskanej energii elektrycznej na światło LED-ów i straty ciepła w obwodzie elektrycznym. Producent zaopatrzył urządzenie w LED-y niebieskie, które wymagają większego napięcia (większej prędkości obrotowej prądnicy) niż np. LED-y czerwone. Te wszystkie błędy konstrukcyjne (ale też natura procesów fizycznych) powodują, że silnik z prądnicą „nie działa". Na zdjęciu zakręciliśmy silnikiem ręcznie, aby pokazać działające LED-y.

Obserwacja błędów jest jednym z bardziej efektywnych metod uczenia się.

Opis silnika Stirlinga: https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/silnik-pl.html; Video: https://www.youtube.com/watch?v=9k7dchT3jn8 (Edubawi.pl)

# 9. Zwojnice i transformatory

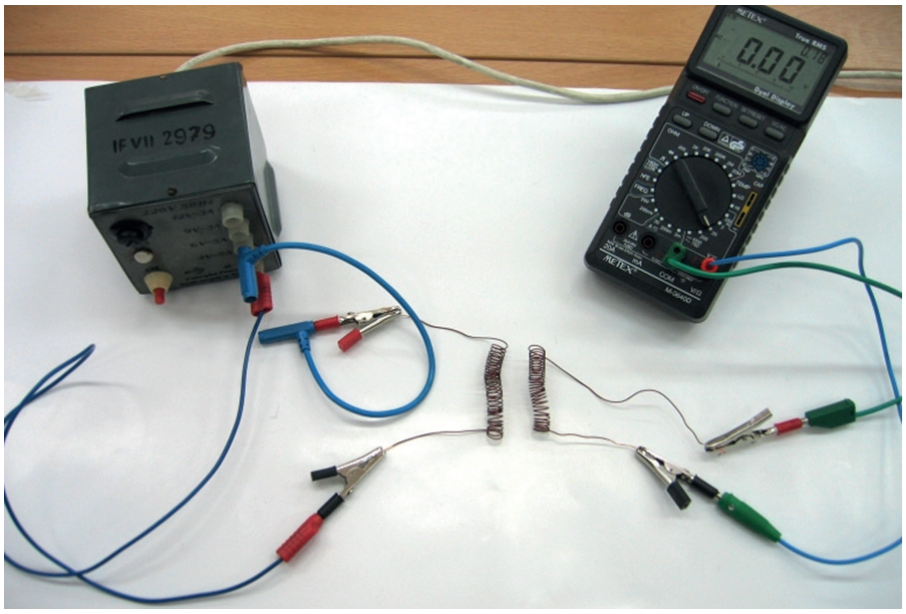
## 9.1. Indukcja w układzie dwóch zwojnic

**Cel:** badanie sposobów wywołania przepływu prądu indukcyjnego.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- dwie zwojnice,
- cztery przewody ze złączami krokodylkowymi,

- miernik,
- zasilacz prądu stałego (nie należy do zestawu).




**Fot. 9.1.** Sposób połączenia elementów zestawu doświadczalnego

**Wykonanie:**

1. Jedną ze zwojnic za pomocą przewodów podłącz do generatora prądu stałego. Drugą zwojnicę podłącz do miernika. Poruszaj drugą zwojnicą, przybliżając ją do pierwszej i oddalając od niej. Jakie są wskazania miernika?

2. Poruszaj zwojnicą podłączoną do generatora. Czy miernik coś pokazuje?

3. Połóż obie zwojnice, a w pierwszej włączaj i wyłączaj dopływ prądu. Co pokazuje miernik?

4. Ustaw zasilacz tak, aby wytwarzał zmienny prąd. Jakie są wskazania miernika?

**Wyjaśnienie:**

1. Zastanówmy się nad pierwszą sytuacją – poruszania zwojnicą. Wewnątrz zwojnicy podłączonej do generatora płynie prąd stały, który powoduje powstanie wokół niej pola magnetycznego. Przysuwając i odsuwając drugą

zwojnicę, powodujemy, że znajduje się ona w silniejszym lub słabszym polu magnetycznym: zmienia się strumień pola objęty przez drugą zwojnicę. Z kolei zmiana strumienia pola magnetycznego wywołuje powstanie siły elektromotorycznej i przepływ prądu indukcyjnego w tej zwojnicy: miernik wskazuje natężenie tego prądu.

2. Gdy przysuwamy i odsuwamy zwojnicę podłączoną do generatora, mamy do czynienia z analogiczną sytuacją. Druga zwojnica znajduje się w zmieniającym się strumieniu pola magnetycznego, co wywołuje przepływ przez nią prądu. Uogólniając, można powiedzieć, że względny ruch zwojnic indukuje prąd, pod warunkiem, że w jednej z nich już przepływa prąd.

3. Trzecie doświadczenie różni się nieco od poprzednich. Nie mamy do czynienia ze względnym ruchem zwojnic, a prąd indukcyjny chwilami płynie – świadczą o tym wskazania miernika. Zarówno włączanie, jak i wyłączanie zasilacza powoduje powstawanie prądu w drugiej zwojnicy. Prąd indukowany płynie jednak *tylko* w momencie włączenia lub wyłączenia zasilacza pierwszej zwojnicy. Jeśli prąd z zasilacza się nie zmienia, prąd w drugiej cewce nie indukuje się.

4. Ostatnie doświadczenie jest zdecydowanie inne, ponieważ przez przewód przepływa prąd zmienny (raz rosnący, raz malejący). W zwojnicy podłączonej do zmiennego źródła napięcia powstaje zmienne pole magnetyczne, które z kolei wywołuje przepływ prądu w drugiej zwojnicy. Ponieważ zmiany prądu zachodzą stale, w drugiej zwojnicy prąd płynie ciągle, ale też jest to prąd o zmieniającym się cyklicznie kierunku. Prąd taki nazywany jest również przemiennym. Prąd w sieci jest prądem przemiennym, zmieniającym kierunek 100 razy na sekundę (120 razy na sekundę w USA).

Podsumowując: aby wywołać przepływ prądu indukcyjnego, wcale nie trzeba dysponować magnesem stałym, wystarczy w dowolny sposób wytworzyć zmieniające się pole magnetyczne.

Prąd indukcyjny jest zmienny. Urządzenia wykorzystujące omówione powyżej zjawisko nazywane są transformatorami. Z pewnych względów (zob. następne ćwiczenie) prąd zmienny jest łatwiej przesyłać z elektrowni do odbiorcy, przy czym łatwiej oznacza tu: bezpieczniej i bardziej ekonomicznie.

**Uwagi dydaktyczne:**

1. Potoczne sformułowanie praw Maxwella, w kontekście powstawania fal elektromagnetycznych wskazuje, że „zmienne pole magnetyczne powoduje powstanie zmiennego pola elektrycznego i wzajemnie".

Prawo indukcji Faradaya, zob. np. doświadczenie 7.3e mówi co innego: powstające pole elektryczne może być *stałe*, jeżeli zmiana pola magnetycznego jest *jednostajna* (czyli $d\Phi/dt = \text{const}$).

2. Pod koniec XIX wieku znano już zjawisko indukcji Faradaya, ale powszechne zastosowanie energii elektrycznej napotykało trudności techniczne. Chorwacki wynalazca Nicola Tesla (1856–1943), emigrant mieszkający w USA, uważał – wbrew Edisonowi, że to nie prąd stały może znaleźć szerokie zastosowanie, a prąd zmienny. Gdy patenty Tesli zostały wykupione przez Westinghouse'a, energia elektryczna w krótkim czasie została wykorzystana do oświetlania miast, napędzania tramwajów i wielu innych urządzeń technicznych.

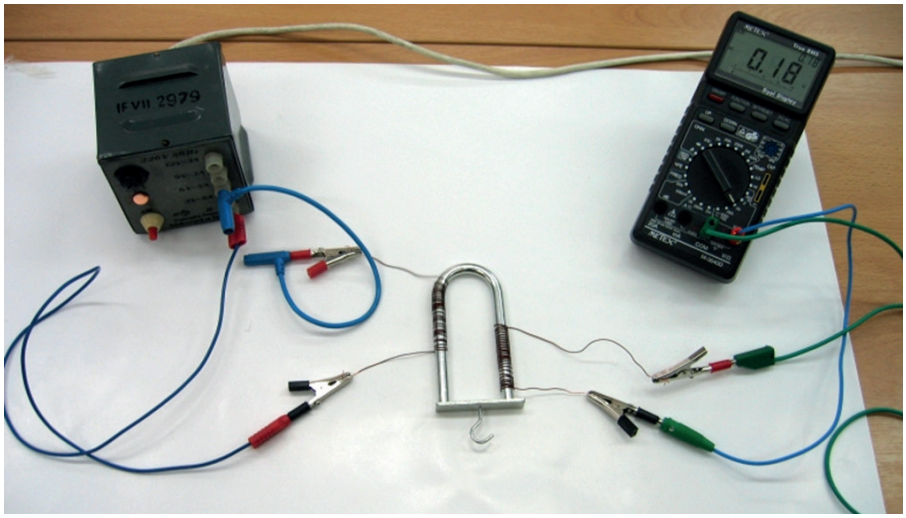
Nikola Tesla zrezygnował z zysków ze swego wynalazku, aby ratować firmę Westinghouse'a. Zmarł w samotności w hotelu w Nowym Jorku. Jednakże to właśnie jemu zawdzięczamy błyskawiczny rozwój systemów elektrycznych. Pierwsze tramwaje elektryczne w Toruniu kursowały już w 1900 roku.

## 9.2. Transformator z rdzeniem

**Cel:** badanie zasady działania transformatora.

**Środki dydaktyczne** z zestawu doświadczalnego:

- dwie zwojnice o różnej liczbie zwojów,
- rdzeń, np. ze stali,
- cztery przewody ze złączami krokodylowymi,
- miernik,
- generator prądu (nie należy do zestawu).




**Fot. 9.2.** Sposób połączenia elementów zestawu doświadczalnego

**Wykonanie:**

Nałóż zwojnice na stalową podkowę. Jedną ze zwojnic za pomocą przewodów podłącz do generatora prądu przemiennego, a drugą – do miernika. Zanotuj maksymalne napięcie wytwarzane przez generator i maksymalne napięcie wskazane przez miernik. Zmień napięcie na transformatorze i podobnie zanotuj odczyt. Możesz kilkakrotnie zmieniać napięcie generatora, odczytywać i notować wskazania miernika. Policz zwoje w każdej zwojnicy. Czy zauważyłeś jakąś zależność?

**Wyjaśnienie:**

Doświadczenie pokazuje, jak działa i do czego służy transformator. Zajmiemy się najpierw sposobem działania. Z doświadczenia 9.1 wiesz, że zmienny prąd płynący przez zwojnicę podłączoną do prądu wywołuje zmienne pole magnetyczne, które z kolei przyczynia się do powstania zmiennego prądu indukcyjnego w drugiej zwojnicy. Zwojnica podłączona do generatora jest nazywana uzwojeniem pierwotnym, a druga zwojnica nosi nazwę uzwojenia wtórnego. Stalowa podkowa, na której znajdują się uzwojenia, nazywa się rdzeniem, natomiast cały układ to transformator.

Zauważyłeś na pewno, że po tej stronie, gdzie znajduje się więcej zwojów, płynie prąd o większym napięciu (porównaj maksymalne napięcia). Transformator zamienia wartość generowanego napięcia zmiennego na inną wartość, korzystając z różnicy liczby zwojów wtórnych i pierwot-

nych. Stosunek liczby zwojów $n_2$ w uzwojeniu wtórnym do liczby zwojów $n_1$ w uzwojeniu pierwotnym nazywamy przekładnią. Stosunek napięć w dwóch uzwojeniach zależy od tej przekładni,

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_1}{I_2},$$

gdzie:

$U_2$ – napięcie na uzwojeniu wtórnym,
$U_1$ – napięcie na uzwojeniu pierwotnym,
$n_2$ – liczba zwojów uzwojenia wtórnego,
$n_1$ – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,
$I_2$ – prąd w uzwojeniu wtórnym,
$I_1$ – prąd w uzwojeniu pierwotnym.

Zgodnie w powyższym wzorem, zmieniając liczbę zwojów, możemy zmienić wartość napięcia prądu indukowanego: większe napięcie na jednym uzwojeniu oznacza mniejszy prąd w tym uzwojeniu. Jest to bardzo pożyteczne podczas przesyłania energii elektrycznej na duże odległości, np. z elektrowni do Twojego domu. Przez linie przesyłowe płynie prąd o bardzo dużym napięciu, stąd są one nazywane liniami wysokiego napięcia. Natomiast domowe urządzenia korzystają z prądu o napięciu 230 V. Po drodze znajdują się transformatory obniżające napięcie do 230 V.

Przesyłanie prądu o dużym napięciu (i mniejszym natężeniu) jest obarczone mniejszymi stratami energii niż przesyłanie prądu o małym napięciu (i dużym natężeniu). Wynika to ze wzoru na pracę $W$ wykonywaną przez prąd o natężeniu $I$ przepływający przez przewodnik o oporze $R$. Praca ta (i w efekcie wytworzone ciepło) wyrażają się wzorem

$$W = I^2Rt.$$

W Japonii i USA w gospodarstwach domowych używa się napięcia 110 V. W efekcie dla uzyskania tej samej *mocy* urządzeń jest wymagane dwukrotnie większe natężenie prądu niż dla napięcia 220 V. Stąd zwoje grubych kabli zwisające z transformatorów na rogach amerykańskich (i japońskich – fot. 9.3) ulic. Napięcie 110 V jest jednak znacznie bezpieczniejsze dla człowieka.

Ostatnie pytanie to: do czego służy stalowy rdzeń?. Odpowiedź na nie jest prosta, jeśli przypomnimy sobie, na czym polega zjawisko indukcji: są to zmiany strumienia pola magnetycznego. Otóż rdzeń służy do „zamknięcia" tego strumienia tak, aby cały strumień generowany przez uzwojenie pierwotne przechodził przez uzwojenie wtórne. Wówczas sprawność transformatora jest najwyższa.



**Fot. 9.3.** Japońskie skrzyżowanie: plątanina grubych kabli wynika z użycia niższego niż w Europie napięcia sieci miejskiej (110 V). Podobne obrazy zobaczysz w Australii i USA (fot. Maria Karwasz)

# 10. Elektrostatyka

## 10.1. Naładowane papierowe cekiny

**Cel:** demonstracja oddziaływania pomiędzy naładowaną rurką i papierowymi cekinami.

**Środki dydaktyczne**:

- rurka z tworzywa sztucznego,
- małe papierowe cekiny o jednakowych rozmiarach przygotowane np. za pomocą dziurkacza,

- „futerko” – z sierści, wełny, włókien sztucznych, jedwabiu itd.



**Fot. 10.1.** Pomoce dydaktyczne potrzebne do wykonania doświadczenia

**Wykonanie:**

1. Rozsyp małe papierowe cekiny na stole (fot. 10.1), a następnie pocieraj „futerkiem” rurkę z tworzywa sztucznego. W ten sposób rurka zostanie naładowana. Czy w tym doświadczeniu ładuje się również futerko?

2. Naładowaną rurkę zbliż do cekinów leżących na stole i zaobserwuj, co się z nimi dzieje. Obracaj wolno rurkę i podnieś ją wyżej.

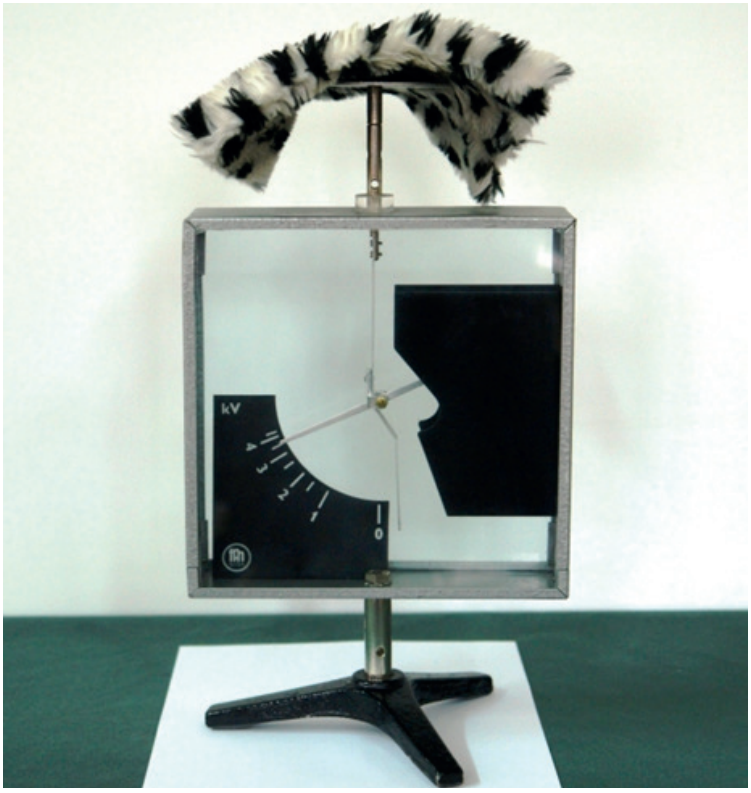


**Fot. 10.2.** Cekiny „przykleiły się” do naładowanej rurki

3. Obserwuj i wyjaśnij, jak zachowują się cekiny na naładowanej rurce. Czy wszystkie spoczywają cały czas na jej powierzchni?

**Wyjaśnienie:**

1. Gdy pocieramy rurkę z tworzywa sztucznego „futerkiem", elektryzuje się zarówno rurka, jak i „futerko". Elektrony z „futerka" przemieściły się na rurkę i w tym przypadku rurka naładowała się ujemnie, a „futerko" dodatnio. Można to sprawdzić, gdy umieści się „futerko" na płycie elektroskopu (fot. 10.3). W naszym doświadczeniu napięcie wskazywane przez elektroskop wynosiło ok. 4 kV. Znak ładunku na „futerku" jest przeciwny do znaku ładunku znajdującego się na rurce. Rurka i „futerko" są naładowane różnoimiennie.




**Fot. 10.3.** Naładowane „futerko" na płycie elektroskopu

2. Na początku doświadczenia naładowaną (ujemnie) rurkę zbliżamy do małych papierowych cekinów i obserwujemy, że cekiny ją „oblepiają". Nie musimy dotykać rurką papierków, wystarczy, że zbliżymy ją do cekinów. W izolatorach, jak papier, ładunki elektryczne nie mogą przepływać. Zewnętrzne pole elektryczne może jednak wymuszać niewielkie przesunięcia ładunków (elektronów) w pojedynczych cząsteczkach (np. ce-

lulozy) lub nawet w atomach. Mówimy wówczas o zjawisku polaryzacji ładunków. Polaryzacja może też zachodzić wskutek wymuszonej orientacji cząsteczek będących *dipolami*, jak np. cząsteczka wody (na tej zasadzie działa ogrzewanie potraw w kuchence mikrofalowej). Polaryzacja przez przesunięcie ładunków lub orientację cząsteczek powoduje, że w naszym doświadczeniu ładunki ujemne są nieco dalej, a dodatnie nieco bliżej rurki. Z tego powodu, zgodnie z prawem Coulomba, cekiny są przyciągane przez (wypadkową) siłę elektrostatyczną, pochodzącą od naładowanej rurki.

3. Gdy ładunki ujemne przejdą z naładowanej rurki na papierowe cekiny, wówczas te naładują się również ujemnie i będą odpychane przez rurkę. W trakcie doświadczenia obserwuje się po pewnym czasie „odskakiwanie" papierków od rurki. Jest to szczególnie efektowne, gdy są jakby „podrzucane" do góry, ponieważ zostają odepchnięte od rurki za pomocą siły elektrostatycznej. Można obserwować piękne trajektorie ruchu cekinów w polu grawitacyjnym i polu elektrycznym (i nie są to parabole!). Obliczenie trajektorii wymagałoby modelowania numerycznego.

**Uwagi metodologiczne:**

1. W metalach przepływają elektrony, w półprzewodnikach mogą przepływać również tzw. „dziury" (choć jest to przepływ „braku" elektronu), w gazach i cieczach jony (w gazach głównie jony dodatnie). Powody, dla których większość tworzyw sztucznych elektryzuje się ujemnie, jest nadal przedmiotem badań naukowych.

2. Doświadczenia z elektrostatyki najlepiej demonstrować zimą, kiedy wilgotność (absolutna) powietrza jest najmniejsza.

3. Małe papierowe cekiny można przygotować za pomocą dziurkacza (mają wtedy jednakowe rozmiary i można np. przeliczyć, ile z nich zostało przez rurkę zebranych).

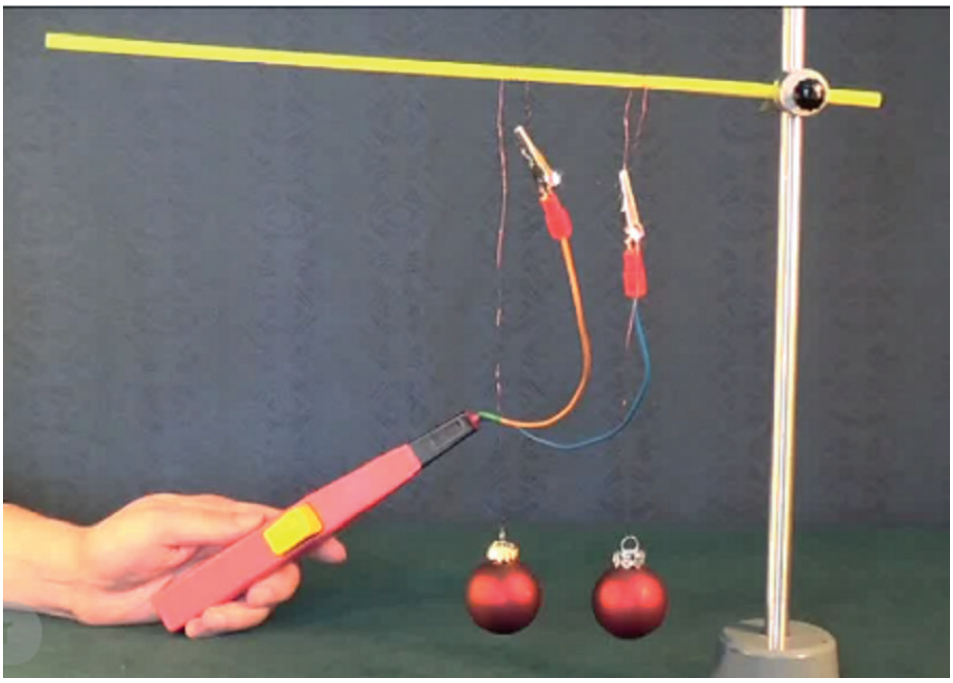
Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/443

## 10.2. Doświadczenie choinkowe[4]

**Cel:** demonstracja oddziaływania pomiędzy ładunkami punktowymi.

**Środki dydaktyczne**:

- rurka lub patyk z plastiku,
- dwie bombki choinkowe,
- zapalacz piezoelektryczny do gazu,
- statyw,
- dwa cienkie (im cieńsze, tym lepiej) druty miedziane o dł. ok. 30 cm,
- dwa krokodylki.



**Fot. 10.4.** Pomoce dydaktyczne potrzebne do wykonania doświadczenia

**Wykonanie:**

Do statywu przymocuj poziomo rurkę lub patyk z plastiku, który jest izolatorem elektrycznym (fot. 10.4). Zdejmij (zeskrob) izolację z drutów

[4] A. Okoniewska, G. Karwasz, *Doświadczenie (Coulomba) pod choinkę*, Foton 83 (Zima 2003), 55.

miedzianych na jego końcach. Następnie zawieś dwie bombki na drutach i przymocuj druty do poziomej poprzeczki statywu tak, aby bombki były oddalone od siebie na odległość około 1 cm. Do odizolowanych końców drutów podłącz różne bieguny zapalacza piezoelektrycznego za pomocą krokodylków. W zapalaczu należy zdjąć metalowy czubek, aby nie przeskakiwała iskra; po zdjęciu kapturka łatwiej jest też podłączyć miedziane druty. Gdy bombki są nieruchome, naciśnij przycisk zapalacza i obserwuj zachowanie się bombek.

**Wyjaśnienie:**

Gdy podłączymy bombki choinkowe do różnych biegunów, naciskamy przycisk zapalacza i obserwujemy zbliżanie się bombek, a właściwie ich szybkie zderzenie. Bombki naładowały się różnoimiennie i przyciągały się wzajemnie siłą elektrostatyczną Coulomba. W przypadku, gdy doświadczenie odbywa się w powietrzu, siłę Coulomba możemy obliczyć następująco:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o\varepsilon_r}\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{r^2}, \qquad (1)$$

gdzie: $q_1$ i $q_2$ to ładunki zgromadzone na bombkach, r – odległość między środkami bombek, $\varepsilon_o$ – przenikalność elektryczna próżni ($8{,}85\cdot10^{-12}$ $C^2/(Nm^2)$), $\varepsilon_r$ – względna przenikalność elektryczna powietrza (1,00054).



**Fot. 10.5.** Bombki zderzają się ze sobą na skutek naładowania ich ładunkami o przeciwnych znakach

Prawo Coulomba dotyczy ładunków punktowych, ale ładunek rozłożony na sferycznej powierzchni bombek można przybliżyć za pomocą ładunków punktowych, umieszczonych w środku bombek[5]. Obliczmy siłę, z jaką oddziałują między sobą naładowane różnoimiennie bombki. Ładunek zgromadzony na powierzchni bombek można obliczyć z ich pojemności elektrycznej. Pojemność elektryczna kuli wyraża się wzorem $C = R/k$, gdzie R jest promieniem kuli, a $k = 1/4\pi\varepsilon_o$ i wynosi $9 \cdot 10^9$ $Nm^2/C^2$. Dla bombek o średnicy 4 cm pojemność elektryczna jest bardzo mała i wynosi około $4 \cdot 10^{-12}$ F.

Zapalacz piezoelektryczny działa poprzez ściskanie kryształu kwarcu (czyli zwykłego, przezroczystego piasku), a wytwarza duże ładunki elektryczne. Zapalacz taki dostarcza napięcia rzędu 10 kV. Ładunek na każdej z bombek jest mały $q = CU$ i np. dla bombek o średnicy 4 cm wynosi $2 \cdot 10^{-8}$ C. Siła Coulomba (1), z jaką przyciągają się bombki odległe od siebie o 5 cm, jest bardzo mała (1,4 mN), podczas gdy wychylenie o 1,5° od pionu (tj. o 0,5 cm bombki zawieszonej na 20 cm drucie) bombki o masie 5 g wymaga siły 1,2 mN. Dlatego, aby zaobserwować zderzenia, bombki muszą być naprawdę blisko siebie. Ponadto bombki zderzają się, poruszając się ruchem „więcej niż" jednostajnie przyspieszonym – siła przyciągania rośnie proporcjonalnie do kwadratu ich „zbliżenia" ($F_C \sim 1/r^2$), podczas gdy siła przeciwdziałająca, wynikająca z odchylenia bombek od pionu rośnie wyłącznie liniowo ($F_G \sim r$).

Należy też dodać, że przybliżenie za pomocą prawa Coulomba pokazujemy w celach dydaktycznych. W rzeczywistości zbliżenie bombek powoduje zmianę *rozkładu ładunku* na nich tak, że siła przyciągająca staje się większa niż dla dwóch ładunków punktowych.

**Uwagi metodologiczne:**

1. Do powyższego doświadczenia można użyć także maszyny elektrostatycznej i styro-pianowych kulek, zawiniętych w aluminiową folię lub pokrytych grafitem koloidalnym, ale nie będzie to już doświadczenie pod choinkę.

[5] Pokazał to Newton, przy okazji rozważań o sile grawitacji między planetami a Słońcem. W przypadku bombek rozkład ładunków na powierzchni zmienia się w trakcie ich zbliżania, więc modelowanie nie jest elementarne.

2. Podłączając trzecią bombkę do jednego z biegunów, obserwujemy jak dwie bombki tego samego znaku odpychają się. Bombkę znaku przeciwnego należy umieścić dalej, aby siła przyciągania była mała. Obecność bombki przeciwnego znaku jest niezbędna dla wypływu ładunku z zapalacza. Można też drugi biegun zapalacza po prostu uziemić.

3. Drut miedziany izolowany, np. o średnicy 0,1 mm, może być uzyskany ze starego transformatora lub słuchawek. Może to być również inny, miękki drut miedziany.

4. Nigdy nie dotykaj naładowanych bombek (ani krokodylków) ręką! Kilka kV nie jest napięciem „przyjemnym". Rozładuj bombki i zapalacz jakimś uziemionym drutem.

5. Przybliżenie oddziaływania naładowanych bombek za pomocą prawa Coulomba jest jedynie dydaktycznym „wybiegiem". W rzeczywistości rozkład ładunków na powierzchni bombek nie jest jednorodny – gęstość ładunku w punktach styku bombek jest większa niż na ich częściach oddalonych. Dokładne obliczenie rozkładów gęstości ładunków (i siły oddziaływania bombek) wymaga jednak modelowania numerycznego. Wynik wskazuje, że siła oddziaływania jest większa niż ta, która wynika z prawa Coulomba. Jest to szczególnie dobrze widoczne, kiedy bombki są blisko siebie.

Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/443

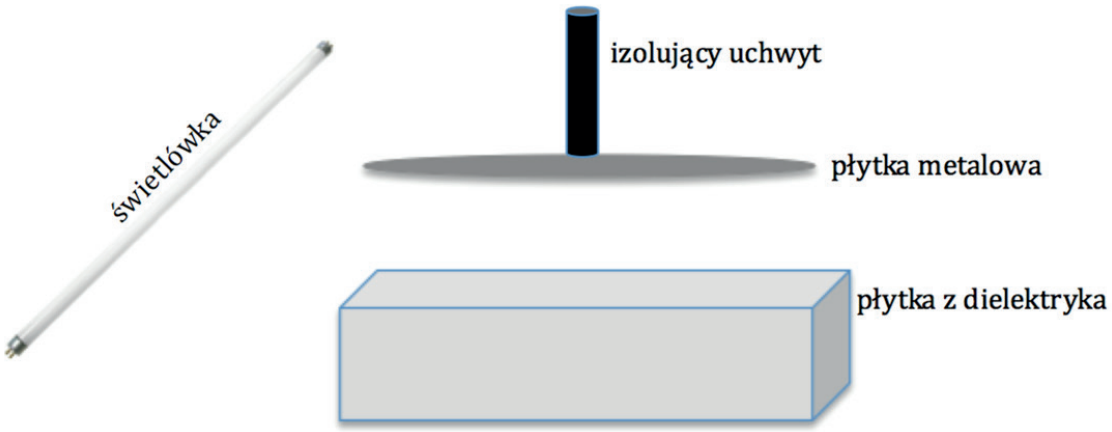
## 10.3. Elektrofor Volty

**Cel:** Elektrofor – pozorne „perpetuum mobile" elektrostatyki.

**Środki dydaktyczne:**

- elektrofor: płytka dielektryczna (tworzywo sztuczne jak teflon, plexi) oraz płytka metalowa wyposażona w uchwyt odizolowany elektrycznie od płyty,

- świetlówka,
- sucha szmatka do pocierania.




**Rys. 10.6.** Schemat doświadczenia

**Wykonanie:**

1. Naelektryzuj płytę z dielektryka przez potarcie za pomocą suchej szmatki.

2. Połóż na naelektryzowanej płytce drugą płytkę z metalu, trzymając ją za uchwyt odizolowany od płyty.

3. Pozostałą część eksperymentu wykonujemy w przyciemnionym pomieszczeniu. Dotknij końcówką świetlówki górnej części płytki metalowej w celu uziemienia znajdującego się na niej ładunku – zaobserwuj rozbłyski świadczące o przepływie uziemianego ładunku elektrycznego.

4. Podnieś płytkę górną na niewielką wysokość za pomocą uchwytu – staraj się nie dotknąć ręką jej metalicznej części. Następnie ponownie przyłóż końcówkę świetlówki do górnej części płytki, obserwując rozbłyski świetlne.

5. Czynności z poprzednich punktów powtórz kilkakrotnie bez ponownego elektryzowania dolnej płytki dielektryka.

**Wyjaśnienie:**

Słowo *elektrofor* pochodzi od dwóch greckich słów ‚*elektron*' i ‚*phero*', oznaczających razem *nośnik elektryczności* (lub *nośnik ładunku elektrycznego*). Elektrofor składa się z dwóch płytek: dielektrycznej wykonanej najczęściej z tworzywa sztucznego jak teflon, polichlorek winylu lub szkło akrylowe (PMMA) oraz metalowej wyposażonej w uchwyt odizolowany od płyty. W pierwszej kolejności płyta dielektryka jest elektryzowana przez pocieranie przy użyciu suchej szmatki. W wyniku tego procesu płyta zyskuje nadmiar ładunku elektrycznego (dodatniego lub ujemnego – w zależności od materiału, z jakiego wykonany jest dielektryk). W następnym kroku płyta metalowa zostaje umieszczona na naładowanej elektrycznie płycie dielektryka. Ten nie przekazuje jednak znaczącej ilości nadmiarowego ładunku ze swojej powierzchni do metalu ze względu na słabą, w ogólności, jakość kontaktu (w skali mikroskopowej) pomiędzy obydwiema płytami. Pole elektryczne nadmiarowego ładunku zgromadzonego na dielektryku wpływa jednak na rozkład ładunków swobodnych w metalu, rozsuwając je na skutek zjawiska indukcji elektrostatycznej. Innymi słowy, ładunek swobodny o znaku przeciwnym do nadmiarowego ładunku na dielektryku jest gromadzony, w wyniku sił przyciągania, w dolnej części płyty metalowej (w pobliżu kontaktu). Ładunek swobodny jednoimienny z ładunkiem dielektryka gromadzi się, w wyniku sił odpychania, w górnej części płyty metalowej.

Następny etap polega na uziemieniu płyty metalowej, np. poprzez dotknięcie górnej części płyty palcem lub końcem świetlówki, powodując odpływ porcji ładunku z obszaru uziemiania. W przypadku użycia świetlówki proces uziemiania obrazują rozbłyski światła. Ostatnim krokiem jest podniesienie płyty metalowej, która teraz jest naładowana ładunkiem o znaku przeciwnym do ładunku dielektryka. Ładunek zgromadzony na płycie metalowej może zostać wykorzystany na wiele sposobów w eksperymencie lub pokazie dydaktycznym. W obecnym doświadczeniu ładunek ten wykorzystuje się do rozświetlenia lampy „neonowej". Obecność błysków świetlnych świadczy o odpływie ładunku, co w konsekwencji prowadzi do neutralizacji ładunku płyty metalowej. Należy zauważyć, że ładunek zgromadzony na części metalowej jest na tyle duży, że różnica potencjałów pomiędzy płytą a ziemią (człowiekiem trzymającym w ręce

świetlówkę) jest większa lub równa 230 V potrzebne do rozświetlenia komercyjnej żarówki.

Nadmiarowy ładunek elektryczny zgromadzony na dielektryku nie jest znacząco zubożany w wyniku opisanego powyżej procesu elektryzowania neutralnej płyty metalowej, w związku z czym czynność ta może być powtórzona wielokrotnie. Z tego powodu włoski badacz Alessandro Volta, który w XVIII wieku badał właściwości elektroforu, nazwał to urządzenie trwałym nośnikiem ładunku (*elettroforo perpetuo*). W rzeczywistości ładunek zgromadzony na dielektryku w ciągu relatywnie krótkiego czasu (najwyżej kilku dni) „wycieka" do otoczenia, ponieważ idealne izolatory nie istnieją.

Bogate źródło ładunku, jakim jest elektrofor, nie oznacza jednocześnie, że jest on rezerwuarem wielkiej ilości energii. Energia jest bowiem dostarczana do układu każdorazowo podczas pracy mechanicznej, wykonywanej w czasie separacji różnoimiennie naładowanych płyt – metalowej i dielektrycznej. Praca ta jest zamieniana na energię potencjalną pola elektrycznego, występującego w obszarze pomiędzy płytkami, zgodnie ze wzorem $E = CU^2 / 2$, gdzie $C$ to pojemność elektryczna układu i $U$ to napięcie pomiędzy okładkami. Elektrofor można więc traktować jako kondensator o ruchomych okładkach. Ładunek kondensatora $Q = UC$ oraz wartość ładunku zgromadzonego na izolowanej płycie metalowej nie mogą ulec zmianie, natomiast pojemność i napięcie (a za tym i energia) elektroforu zmieniają się wraz z odległością separacji okładek w taki sposób, aby wartość $Q$ była stała. Dla stosunkowo małych odległości separacji $d$ elektrofor można traktować jak kondensator płaski, wówczas $C \sim 1/d$, implikując $U \sim d$ oraz $E \sim d$. Innymi słowy, napięcie i energia rosną wraz ze wzrostem odległości pomiędzy okładkami! Efekt ten wykorzystuje się chociażby do demonstracji, przy użyciu elektroforu, zjawiska wyładowania iskrowego pojemnościowego w atmosferze par substancji łatwopalnych (minimalna energia zapłonu ściśle zależy od napięcia między okładkami kondensatora). Badania pokazują, że natężenie iskry rośnie wraz z wysokością części metalowej elektroforu [1].

**Uwagi:**
Doświadczenie może nie działać, jeżeli w pomieszczeniu jest zbyt wilgotno! Wówczas elektrofor (i futerko) trzeba wysuszyć na kaloryferze.

Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/506.

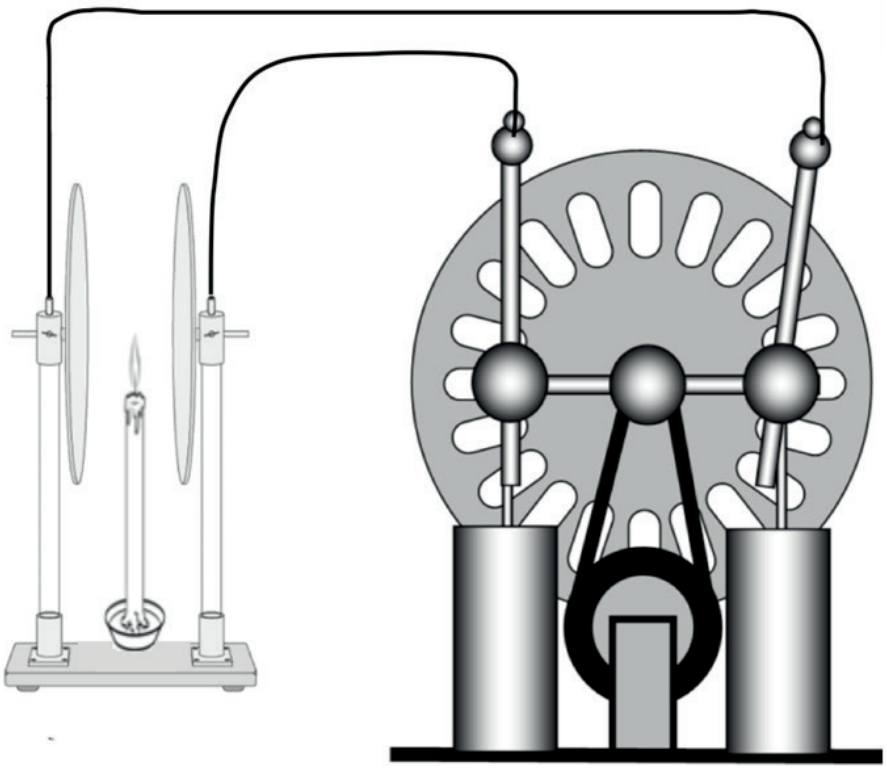
[1] Jerry Touger, *Bigger gap…bigger spark*, Physics Teacher, 30, 454 (1992).

## 10.4. Świeczka w polu elektrycznym

**Cel:** Badanie zachowania płomienia świecy w jednorodnym polu elektrycznym.

**Środki dydaktyczne:**

- świeczka,
- dwa kable połączeniowe z krokodylkami,
- kondensator powietrzny (dwie metalowe płyty umieszczone na statywach),
- maszyna elektrostatyczna.



**Rys. 10.7.** Schemat doświadczenia

**Wykonanie:**

1. Ustaw dwie metalowe płyty, zamocowane na sztywnych statywach, naprzeciw siebie, w odległości kilkunastu centymetrów (w taki sposób, aby utworzyły konfigurację kondensatora płaskiego).

2. Ustaw świeczkę pośrodku pomiędzy równoległymi płytami, tak aby jej knot znajdował się mniej więcej na wysokości ich geometrycznego środka. Na razie nie zapalaj świeczki.

3. Podłącz kondensator powietrzny do kulek (iskierników) maszyny elektrostatycznej za pomocą kabli połączeniowych z krokodylkami (upewnij się wcześniej, że nie ma na nich ładunku – złącz na chwilę kulki ze sobą).

4. Pokręć kilka razy korbką maszyny elektrostatycznej, po czym zbliż do siebie kulki iskiernika, tak aby przeskoczyła iskra. Zapamiętaj odległość między kulkami iskiernika w momencie przeskoczenia iskry.

5. Zapal świeczkę i powtórz czynności z poprzedniego punktu w tej samej sekwencji czasowej. Zauważ, że tym razem iskra nie przeskakuje, co oznacza, że okładki kondensatora rozładowały się.

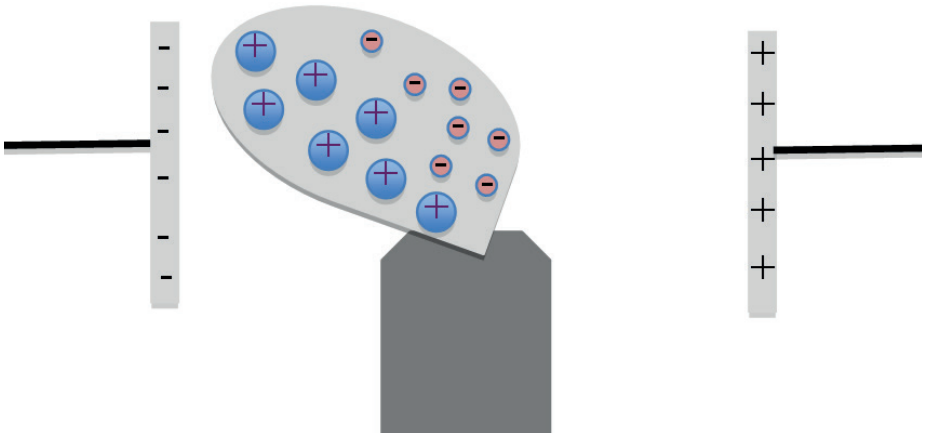
6. Powtórz czynności z poprzedniego punktu, tym razem zwracając uwagę na niesymetryczny kształt płomienia podczas kręcenia korbką maszyny elektrostatycznej. Wykonaj tę samą obserwację, zmieniając polaryzację okładek kondensatora.

**Wyjaśnienie:**

Płomień świecy jest przykładem *plazmy*, tj. czwartego stanu materii (obok gazów, cieczy i ciał stałych). Niektóre cząsteczki w powietrzu i w parafinie, rozgrzane do wysokiej temperatury, tracą elektrony. W efekcie w płomieniu świecy znajduje się mieszanina elektronów i dodatnio (zazwyczaj) zjonizowanych cząsteczek gazów. Łączny, tj. dodatni i ujemny ładunek takiej mieszaniny kompensuje się, jednak obecność swobodnych nośników (elektronów i jonów) pozwala na przepływ prądu. Plazma jest więc bardzo dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego.

Przy braku płomienia powietrze pomiędzy okładkami odgrywa rolę izolatora i przepływ prądu w zasadzie nie zachodzi – maszyna elektrostatyczna po prostu ładuje płyty metalowe ładunkiem różnoimiennym. Stąd zbliżenie kulek iskierników maszyny na pewną odległość skutkuje przeskokiem iskry (ładunku), spowodowanym znaczącą różnicą potencjałów pomiędzy kulkami.

Obecność płomienia zmienia właściwości przewodzące obszaru pomiędzy płytkami, umożliwiając przepływ prądu elektrycznego. Ciągły odpływ i dopływ ładunku skutkuje tym, że ładunek zgromadzony na obydwu płytkach i połączonych z nimi iskiernikach jest znacznie mniejszy niż przy braku płomienia. Dlatego przeskok iskry pomiędzy kulkami iskierników jest obserwowany dla znacznie mniejszych odległości między nimi, o ile w ogóle zachodzi.



**Rys. 10.8.** Płomień świeczki w polu elektrycznym

W obecności pola elektrycznego w przestrzeni pomiędzy okładkami kondensatora obserwujemy, że płomień świecy spłaszcza się i jednocześnie odchyla się w kierunku jednej z elektrod. Deformacja ta ma charakter niesymetryczny, ponieważ płomień odchyla się znacznie bardziej w kierunku elektrody ujemnej, czyli w stronę, w którą wędrują jony dodatnie. Te ostatnie, zderzając się z neutralnymi cząsteczkami gazów, przekazują im znacznie więcej pędu w akcie odrzutu niż sporo lżejsze od nich elektrony: płomień poszerza się kierunku elektrody ujemnej. Niemniej jednak i elektrony, poruszające się w kierunku elektrody dodatniej, pociągają za sobą, dzięki oddziaływaniu elektrostatycznemu, niewielką część zjonizowanych

cząsteczek, powodując niewielkie, ale obserwowalne odchylenie płomienia i w tę stronę (zjawisko to nazywa się *dyfuzją bipolarną*) – płomień przyjmuje kształt „kapelusza Napoleona". Zjawisko niesymetrycznego odchylenia płomienia dobrze ilustruje zmiana polaryzacji metalowych płytek.

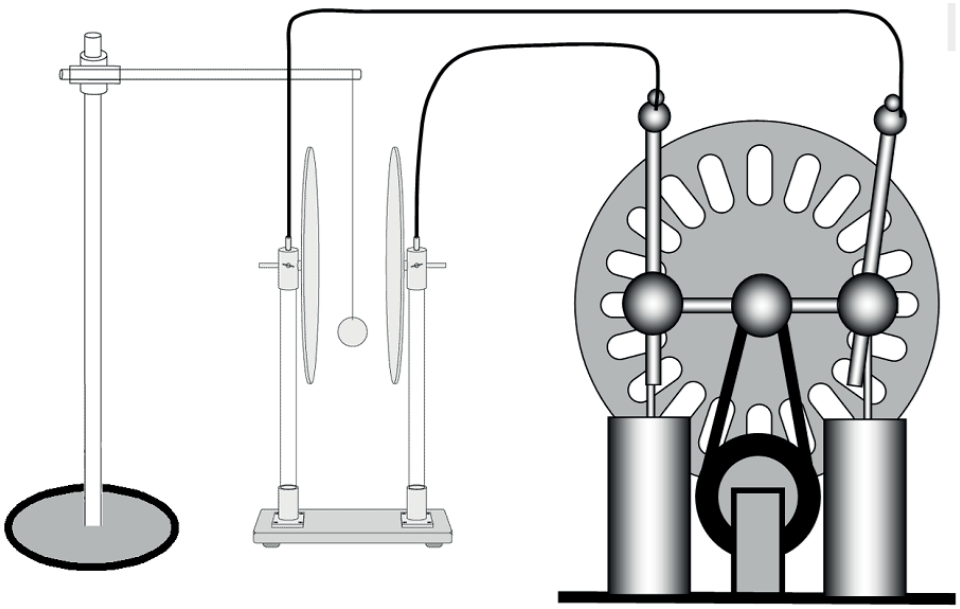
Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/507

## 10.5. Elektrostatyczna kołatka

**Cel:** Badanie ruchu metalowej kulki w jednorodnym polu elektrycznym, między dwiema metalowymi płytami.

**Środki dydaktyczne:**

- maszyna elektrostatyczna,
- metalowa (lub pingpongowa, owinięta folią aluminiową) piłeczka wisząca na nitce,
- kondensator powietrzny (dwie płaskie metalowe płyty na statywach),
- kable połączeniowe z krokodylkami.



**Rys. 10.9.** Schemat układu

**Wykonanie:**

1. Powieś kulkę tak, żeby znajdowała się pomiędzy okładkami kondensatora powietrznego.

2. Podłącz kondensator powietrzny do kulek maszyny elektrostatycznej za pomocą kabli połączeniowych z krokodylkami (upewnij się wcześniej, że nie ma na nich ładunku – złącz na chwilę kulki ze sobą).

3. Zakręć kilka razy korbą maszyny elektrostatycznej. Co zauważyłeś? Nic? To dobrze! (Czasami, jeżeli powierzchnia kulki nie jest zbyt gładka, zauważysz minimalne jej ruchy).

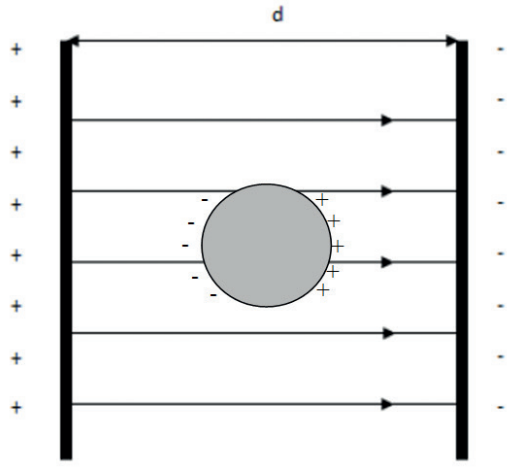
4. Wykonaj doświadczenie jeszcze raz. Zakręć kilka razy korbą maszyny elektrostatycznej, ale tym razem dotknij kulką jednej z okładek kondensatora (możesz to zrobić, wychylając nitkę, na której wisi, najlepiej za pomocą długiego szklanego lub plastikowego pręta. Nie dotykaj okładek, ani kulki!). Kulka zacznie poruszać się od jednej okładki do drugiej – na początku szybko, potem coraz wolniej. Zmierz czas do momentu, kiedy kulka przestanie dotykać okładek.

5. Powtórz doświadczenie jeszcze dwa razy (wychylając kulkę). Za pierwszym razem zakręć korbą maszyny cztery razy, za drugim osiem razy. W obu przypadkach policz, ile razy kulka dotknęła elektrod.

**Wyjaśnienie (I):**

Pomiędzy okładkami naładowanego kondensatora płaskiego tworzy się jednorodne pole elektryczne.

W pierwszym przypadku wydawałoby się, że doświadczenie „nie wyszło", ponieważ nic się nie dzieje. Nic bardziej mylnego. W przewo-

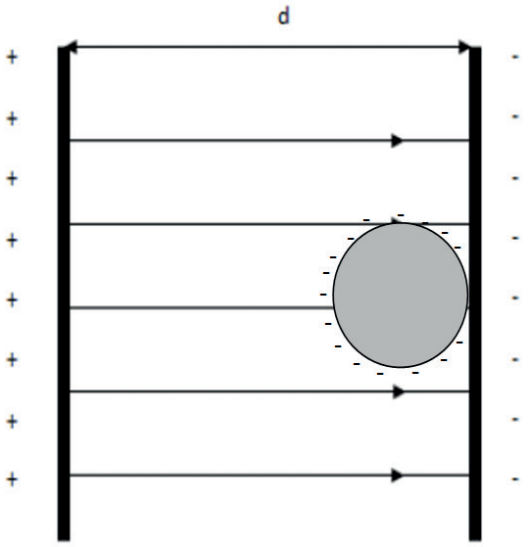



**Rys. 10.10.** Kulka w polu elektrycznym

dzącej obojętnej metalowej kulce indukują się ładunki dodatnie i ujemne, po przeciwnych stronach kulki i o identycznych wartościach bezwzględnych (ładunek sumaryczny kulki ma wartość zero). Siły elektrostatyczne działające na te ładunki (w idealnym jednorodnym polu) są identyczne, ale skierowane przeciwnie. Kulka nie ma prawa się poruszyć!

Co więcej, idealne pole jednorodne charakteryzuje się tym, że działa na kulkę w taki sam sposób, niezależnie od punktu, w którym się ona znajduje. W pierwszym przybliżeniu więc nieważne jest, czy wisi idealnie pomiędzy okładkami kondensatora, czy też jest zbliżona (ale nie dotyka) do którejś z nich.

Dopiero po dotknięciu jednej z okładek kulka przejmuje z niej część ładunku: jest więc od tej okładki odpychana, a jednocześnie druga okładka ją przyciąga. Kulka porusza się więc (ze stałym przyspieszeniem) w kierunku drugiej okładki i w końcu się z nią zderza, przejmując tym samym jej ładunek. Sytuacja powtarza się wiele razy. Kulka przenosi ładunki z jednej okładki na drugą, powoli rozładowując układ. Jak długo kulka się porusza, zależy od ładunku początkowego na okładkach.




**Rys. 10.11.** Kulka dotyka okładki kondensatora

**Dodatkowe informacje:** Jednorodne pole elektryczne o natężeniu $\boldsymbol{E}$ pomiędzy okładkami kondensatora działa na naładowaną kulkę siłą $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$, gdzie $q$ jest ładunkiem kulki. Z drugiej strony z drugiej zasady dynamiki Newtona wiemy, że $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$. Przyrównując strony, możemy obliczyć, z jakim przyspieszeniem porusza się kulka pomiędzy okładkami:

$$q\boldsymbol{E} = m\boldsymbol{a} \Rightarrow \boldsymbol{a} = \frac{q\boldsymbol{E}}{m}.$$

Przyspieszenie kulki pomiędzy okładkami jest wprost proporcjonalne do jej ładunku $q$ oraz do natężenia pola elektrycznego $\boldsymbol{E}$ (zależnego od

odległości pomiędzy okładkami *d* i potencjału U, do jakiego naładowała je maszyna elektrostatyczna; dla pola jednorodnego

$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{U}}{d}$ , gdzie *d* jest odległością okładek kondensatora.

Podczas doświadczenia ***E*** sukcesywnie maleje, maleje też z każdym stuknięciem ładunek przejmowany przez kulkę (ładunek ten rozdziela się między kulkę a okładkę w proporcjach ich pojemności elektrostatycznej – w momencie dotknięcia kulka przyjmuje potencjał metalowej okładki). Ruch odbywa się z coraz mniejszym przyspieszeniem[6].

Spróbuj zbadać, czy liczba „stuknięć" jest proporcjonalna do liczby zakręceń korbką.

**Wyjaśnienie (II):** dlaczego kulka czasem zaczyna się wychylać w kierunku jednej z okładek, a nawet „startuje" sama?

W wyjaśnieniach zapomnieliśmy o:

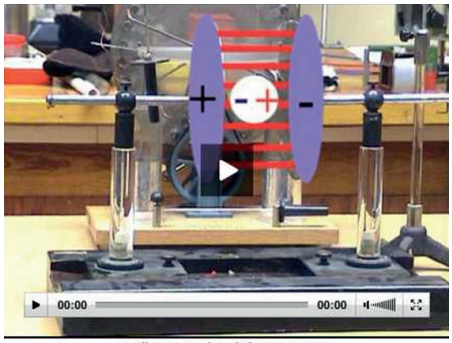
1) obecności metalowych płytek (a właściwie o rozmiarach kulki, porównywalnych z odległością między okładkami);
2) obecności powietrza.

1) Obecność metalowych płytek w zasadniczy sposób zmienia sytuację – pole przestaje być jednorodne. Dlaczego? Rozumowanie należy zacząć od przypomnienia, że powierzchnia metalu, z definicji posiadania wolnych, zdolnych do przemieszczania się ładunków, jest powierzchnią o stałym potencjale (*ekwipotencjalną*).

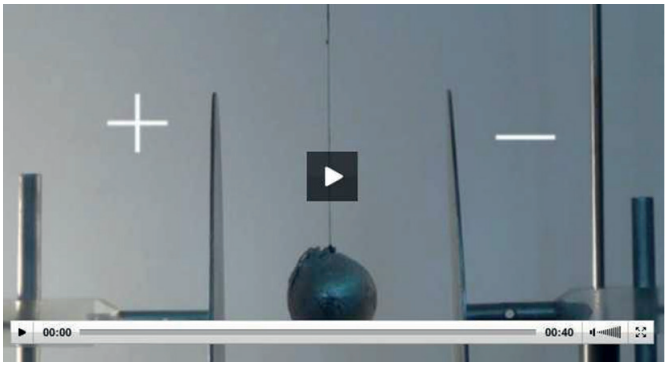
W układzie kondensatora płaskiego linie (a raczej powierzchnie) ekwipotencjalne są równoległe do powierzchni okładek kondensatora. Obecność metalowej kulki ten rozkład potencjału zmienia: teraz także powierzchnia kulki musi być powierzchnią ekwipotencjalną: na powierzchni kulki powstaje taki rozkład ładunków, że i płytka, i kulki tworzą powierzchnie ekwipotencjalne. Ładunki indukujące się na kulce oddziałują z ładunkami na płytach – pole wokół kulki nie jest idealnie jednorodne.

[6] Natężenie ***E*** pola elektrycznego między okładkami zależy od gęstości $\sigma$ ładunku na ich powierzchni $E = \sigma/\varepsilon_0$, gdzie $\varepsilon_0$ jest przenikalnością dielektryczną próżni (a w tym przypadku właściwie powietrza).

Aby przywrócić ekwipotencjalny rozkład pola na powierzchni okładek, w ich środkowej części, najbliższej kulce, indukuje się pewien dodatkowy ładunek (a raczej następuje odpowiednie przesunięcie ładunku na płytkach). Jeżeli kulka wisi dokładnie w środku między okładkami, pozostaje nadal w spoczynku. Gdy jednak kulka nie jest zawieszona dokładnie w środku, ładunki indukowane w centrum dwóch okładek są inne. Z tego powodu kulka jest przyciągana niewielką siłą (rzędu mN w warunkach doświadczalnych jak na zdjęciach poniżej) w kierunku bliższej z okładek.



Kulka w polu elektrycznym




**Fot. 10.12.** „Stop-klatki" filmów z doświadczeń z „kołatką": a) schemat, b) piłeczka pingpongowa, dość niedbale owinięta folią aluminiową, w obecności powietrza odchyla się nieco w kierunku elektrody ujemnej, nawet gdy jest w położeniu centralnym; powodem jest wyładowanie „koronowe" na ostrzach uformowanych przez załamania folii

**2)** Obecność powietrza dodatkowo komplikuje analizę. Wiemy z młynka Franklina, że obecność powietrza może spowodować ruch metalowego wiatraczka niejako „samoistnie". To samoistnie oznaczało oddziaływanie wiatraczka z jonami powietrza, zjonizowanego w pobliżu ostrzy (tam, gdzie pole elektrostatyczne pochodzące od wiatraczka jest najsilniejsze). Z kolei z doświadczenia z płomieniem w pobliżu ostrza wiemy, że inaczej „wieje wiatr" jonów dodatnich, a inaczej wiatr elektronów. Podobnego efektu można spodziewać się w przypadku kulki. Nie jest ona idealnie owinięta (a im więcej nierówności, tym lepiej). Obecność zjonizowanego powietrza powoduje więc, że kulka jest lekko przyciągana w kierunku elektrody ujemnej.

Dokładniej, w silnym polu elektrycznym, jakie powstaje przy powierzchni kulki, a szczególnie na załamaniach folii, powietrze zostaje zjo-

nizowane. Jony zostają przyspieszone w polu elektrycznym i „wiatr jonów" wywiera dodatkową siłę na kulkę. Elektrony powstałe w wyniku jonizacji też są przyspieszane, ale w kierunku przeciwnym. Znaczna różnica mas elektronów i jonów powoduje, że siła jest niesymetryczna[7].

Reasumując, doświadczenie z kulką, gdy „nie wychodzi", pokazuje prostą fizykę, z podręczników uniwersyteckich: między nieskończenie dużymi i nieskończenie odległymi płytami metalowymi pole jest jednorodne, a obecność małej, metalowej, nienaładowanej kulki tego rozkładu pola nie zmienia.

Kulka „startuje", ponieważ w położeniu niecentralnym jej obecność zmienia rozkład ładunku, szczególnie na bliższej okładce – ładunek jest „ściągany" z całej okładki i jego gęstość w środku jest większa niż na pozostałej powierzchni okładki. Ten „indukowany" ładunek jest przeciwnego znaku niż indukowany ładunek na kulce, po stronie tej okładki – dwa ładunki się przyciągają i działa na kulkę wypadkowa siła w kierunku bliższej okładki. Nawet mała siła wystarczy, aby odchylić piłeczka pingpongową (lub bombkę choinkową) o kilkanaście stopni: kołatka startuje!

Dodatkowe efekty obserwujemy dzięki obecności powietrza. Sprawdź, jak kulka staruje w różnych warunkach wilgotności powietrza.

Doświadczenia z „kołatką" można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/495

[7] Tak właściwie zjonizowany gaz i elektrony dryfują niejako razem w polu elektrycznym. Zjawisko nosi nazwę „dyfuzji ambipolarnej" i jest nadal przedmiotem badań naukowych.

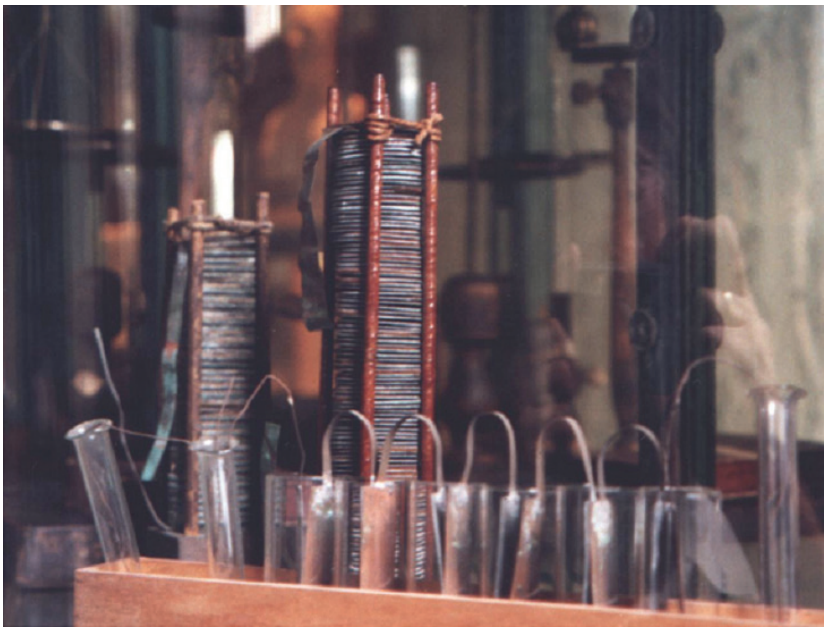
# 11. Elektrochemia

## 11.1. Stos Volty

**Cel:** Wyjaśnienie działania ogniwa Volty.

**Środki dydaktyczne**:

- kilka par blaszek miedź – żelazo lub miedź – aluminium (np. monety),
- przekładki z bibuły lub tkaniny, nasączone roztworem soli kuchennej,
- woltomierz,
- dwa przewody do podłączenia z miernikiem.



**Fot. 11.1.** Stos (z monet) Volty i bateria ze szklankami, Mauzoleum Volty, Como, fot. G.K.

**Wykonanie:**

1. Ułóż na stosiku, w kolejności, krążek (monetę) miedzianą (np. 5 eurocentów) i krążek z innego metalu (żelazna podkładka lub kawałek aluminiowej folii, a na tym tej samej średnicy krążek z bibuły nasączonej roztworem soli kuchennej).

2. Ułóż pięć takich „kanapek”, jedna na drugiej.

3. Ustaw zakres woltomierza na 2 V, prąd stały.

4. Przyłóż do pierwszego i ostatniego krążka elektrody woltomierza.

5. Co wskazuje woltomierz?

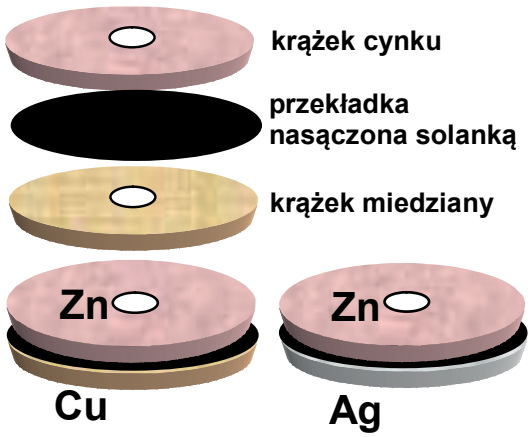
6. Dodaj jeszcze dwie „kanapki”. Jeśli woltomierz przestanie wskazywać napięcie, oznacza to, że twój stos wytwarza ponad 2 V napięcia. Przełącz woltomierz na wyższy zakres, np. 10 V (doświadczenie jest bezpieczne, zarówno dla ciebie, jak i dla woltomierza).

7. Wyciągnij wnioski: od czego zależy napięcie wytwarzane przez stos?

8. Powtórz doświadczenie bez przekładek z bibuły.

**Wyjaśnienie:**

Około 1800 roku Volta skonstruował stos złożony z warstw: srebra, wilgotnego kartonu i cynku, ułożonych w takiej kolejności, aby zaczynał się i kończył różnymi metalami. Kiedy Volta połączył srebro i cynk drutem, uzyskał efekt ciągłego przepływu elektryczności przez drut. Potwierdził też eksperymentalnie, że działanie jego stosu było w każdym przypadku równoważne działaniu wywołanemu przez elektryczność statyczną.




**Dodatkowe informacje:**

Ogniwo Volty jest bardziej urządzeniem chemicznym niż fizycznym: transport ładunku elektrycznego odbywa się za pośrednictwem reakcji chemicznych – redukcji (w terminologii fizycznej „przyłączanie elektro-

nów") lub utleniania („oddawania elektronów"). Tak zwane potencjały elektrochemiczne są cechą charakterystyczną każdego metalu (zob. szereg elektrochemiczny [1]). Znając ich wartości, można policzyć, jaki potencjał będzie miała (teoretycznie) bateria z danych metali, np. miedź – potencjał = + 0,34 V, cynk – potencjał = -0,76 V. Różnica pomiędzy nimi to 1,1 V i teoretycznie tyle powinno wynosić napięcie baterii z nich zbudowanej. W praktyce ze względu na różne czynniki, np. niedoskonałe przewodnictwo styków pomiędzy płytkami i elektrolitem, to napięcie jest nieco mniejsze.

Jak wynaleziono baterie, działające do dziś na tej samej zasadzie co ogniwo Volty, bez których nie potrafilibyśmy się obejść? Odkrycie zapoczątkował Luigi Galvani.

Uczony, z racji wykonywanego zawodu (anatom i fizjolog), interesował się występowaniem elektryczności u ryb i innych zwierząt. Pewnego dnia w 1780 roku, dokonując sekcji żaby, zauważył, że iskry elektryczne ze stojącej obok maszyny elektrostatycznej wywołują skurcz mięśni ud żaby. Badając ten efekt, odkrył, że zetknięcie kawałkiem metalu mięśnia z nerwem w udzie żaby powoduje skurcz mięśnia. Galvani sprawdził także, że pewne metale wydają się bardziej efektywne niż inne w wywoływaniu tego zjawiska. Na tej podstawie wyciągnął jednak błędny wniosek, że metal przesyła fluid, identyfikowany z „elektrycznością zwierzęcą", od nerwu do mięśnia. Swoje spostrzeżenie Galvani opublikował w 1791 roku, wzniecając w ówczesnym świecie nauki polemiki i spekulacje.




**Rys. 11.3.** Rysunek z pracy Galvaniego

Alessandro Volta odkrył w 1790 roku występowanie napięcia kontaktowego na styku dwóch różnych metali. Prace Galvaniego inspirowały Voltę do kontynuowania badań nad wpływem elektryczności na zmysł smaku, dotyku i wzroku.

Kiedy Volta położył monetę cynową na swoim języku, a monetę srebrną podłożył pod język, poczuł kwaśny smak w ustach. Podzielając początkowo poglądy Galvaniego, przyjął, że ma do czynienia z „elektrycznością zwierzęcą". Jednak w 1796 roku Volta odkrył, że może wytworzyć „elektryczność", zastępując język kartonem nasączonym solanką. Wywnioskował stąd, że przyczyną tego zjawiska jest kontakt pomiędzy metalem i wilgotnym ciałem. Tym samym poddał rewizji swoje poglądy dotyczące elektryczności zwierzęcej i stał się antagonistą Galvaniego.

Odkrycie zjawiska kontaktowego pozwoliło mu następnie na uporządkowanie wszystkich znanych metali w tzw. szereg napięciowy i przyczyniło się do zbudowania przez niego pierwszej działającej baterii elektrycznej.

Tak więc bateria Volty była pierwszym wynalezionym w czasach nowożytnych źródłem stałego (i nieprzerwanego) prądu elektrycznego. Elementarne ogniwo Volty wytwarzało wprawdzie mniejsze napięcie niż butelka lejdejska, ale było łatwiejsze do stosowania, ponieważ mogło dostarczać prąd stały i nie musiało być doładowywane, w przeciwieństwie do tej ostatniej.

Ogniwa elektrochemiczne, których działanie zostało odkryte przez Voltę w 1797 roku, do dziś są niezastąpionymi elementami telefonów komórkowych, zegarków, komputerów, samochodów.

**Uwagi metodyczne:**

1. Szereg napięciowy Volty jest ustandaryzowanym sposobem na porównanie potencjałów elektrochemicznych różnych metali – usystematyzowane są one w odniesieniu do potencjału wodoru atomowego, według reakcji $H \leftrightarrow H^+ + e$. Wodór atomowy powstaje z cząsteczki $H_2$ w procesie *dysocjacji* na elektrodzie pokrytej nano-strukturalną platyną (tzw. czernią platynową).

2. Potencjały elektrochemiczne zależą od rodzaju metalu i od wartościowości chemicznej, jaką metal w danej reakcji wykazuje. I tak reakcja $Cu \leftrightarrow Cu^+ + e$ i reakcja $Cu \leftrightarrow Cu^{+2} + 2e$ mają różne potencjały, odpowiednio: +0,52 V i +0,34 V,. Potencjał może też zależeć od odmiany *alotropowej* (czyli struktury krystalicznej) substancji. I tak fosfor czerwony i szary dają różne potencjały, $P_{(czerwony)} = -0{,}11$ V, $P_{(szary)} = -0{,}06$ V.

3. Potencjał, teoretycznie, nie zależy od rodzaju elektrolitu: i destylowana woda, i roztwór soli, i rozcieńczony kwas siarkowy jak w ogniwie Volty, działają. Oczywiście, w destylowanej wodzie jest tak mało jonów ($10^{-7}$ w stosunku do cząsteczek wody), że *opór wewnętrzny* jest bardzo duży, a przez to użyteczne napięcie lub są prąd małe.

4. Opór wewnętrzny ogniwa złożonego z uczniów (kontakt i opór elektryczny ciała człowieka, rzędu megaomów) sprawia, że napięcie użyteczne z takiego ogniwa jest znacznie mniejsze niż przewidywane.

5. Nie zmienia to faktu, że gdy odczytamy 3,7 V lub więcej, można zażartować: „Wiecie już, co zrobić, gdy wyczerpie się bateria w komórce? Zaprosić koleżanki!".

**Tab. 11.1. Szereg elektrochemiczny pierwiastków (wybrane pozycje)**

| REAKCJA | V |
|---|---|
| $Ag \leftrightarrow Ag^{+2} + 2e$ | +1,98 |
| $Ag \leftrightarrow Ag^{+} + e$ | +0,80 |
| $Cu \leftrightarrow Cu^{+} + e$ | +0,52 |
| $Cu \leftrightarrow Cu^{+2} + 2e$ | +0,34 |
| $H \leftrightarrow H^{+} + e$ | 0 |
| $PH_3 \leftrightarrow P_{(szary)} + 3\ H^{+} + 3e$ | -0,06 |
| $PH_3 \leftrightarrow P_{(czerwony)} + 3\ H^{+} + 3e$ | -0,11 |
| $Zn \leftrightarrow Zn+2 + 2e$ | -0,76 |

[1] Szereg elektrochemiczny: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/499

[2] Szereg elektrochemiczny (obszerna wersja) Robert C. Weast ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (67th ed.), Boca Raton, FL: CRC Press, 1986.

[3] Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/498

Materiał został przygotowany na podstawie:

[4] G. Karwasz, A. Karbowski, *Na końcu języka (Volty)*, Foton 96, Wiosna 2007, 34.

[5] A. Okoniewska, G. Karwasz, *Volta ... i popłynął prąd*, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Volta/

Historyczne rozważanie dotyczące ogniwa Volty zawiera praca [6]

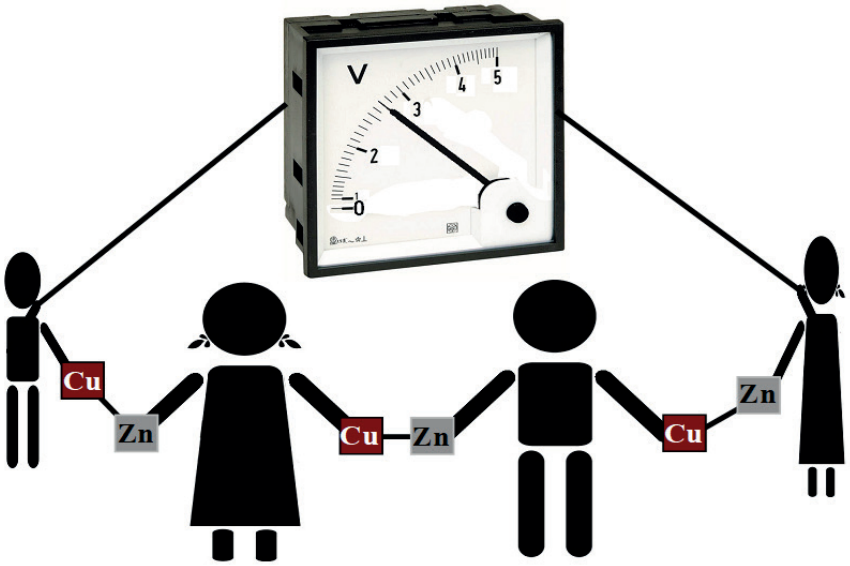
[6] M. Branca, R. G. Quidacciolu; I. Soletta, *Big Pile or Small Pile?*, The Physics Teacher, 51(7), (2013), 406–409.

## 11.2. Matrix, czyli ludzka bateria

**Cel:** Zabawa dydaktyczna w budowanie ogniwa Volty.

**Środki dydaktyczne**:

- kilka par blaszek miedź – cynk (mosiądz – żelazo, miedź – aluminium) połączonych przewodnikiem,
- woltomierz,
- dwa przewody do podłączenia z miernikiem,
- kilka osób chcących stać się „ludzkimi bateriami”.




**Fot. 11.4.** Schemat doświadczenia

**Wykonanie:**

1. Zaproś kilku kolegów, żeby pomogli Ci w doświadczeniu (liczba osób, które możesz zaprosić, może być o jedną większa niż liczba par blaszek).

2. Ustaw kolegów w rzędzie, a następnie rozdaj im pary złączonych ze sobą blaszek. Ustaw ich tak, żeby każdy z nich trzymał w prawej ręce blaszkę miedzianą, a w lewej blaszkę cynkową (lub odwrotnie) jak na schemacie powyżej. Przed uchwyceniem blaszki każda osoba może zwilżyć trochę ręce, np. przez chuchanie lub polizanie (niezbyt higieniczne, ale zabawne dla publiczności).

3. Prawie już zbudowaną baterię chwilowo rozłączamy – jedna z osób puszcza jedną z trzymanych blaszek. Wówczas ostatnia osoba z prawej bierze do prawej ręki przewodnik, który zostanie podłączony do miernika. Analogicznie ostatnia osoba z lewej strony bierze drugi przewodnik do lewej ręki.

4. Kiedy woltomierz (ustawiony na zakres 5 V lub zbliżony) zostanie włączony, zamknijcie obwód – osoba, która chwilowo puściła jedną blaszkę, ponownie ją łapie. Co zaobserwujesz?

Uwaga: Po wyjściu z klasy nie zapomnijcie umyć rąk.

**Wyjaśnienie:**

Po zamknięciu obwodu woltomierz wskazuje napięcie rzędu kilku V, zależnie od liczby osób (a właściwie par blaszek) biorących udział w doświadczeniu. Ustawiając się w obwodzie w ten sposób, tworzymy szereg ogniw Volty, który wytwarza sumaryczne napięcie. Osoby biorące udział w doświadczeniu pełnią funkcję elektrolitu w baterii. Zamiast nich można użyć kwaśnego ogórka, cytryny albo ziemniaka. Zauważ, że napięcia powstające w tego rodzaju „bateriach" zależą od rodzaju metalu, a tylko nieznacznie od rodzaju użytego *elektrolitu*.

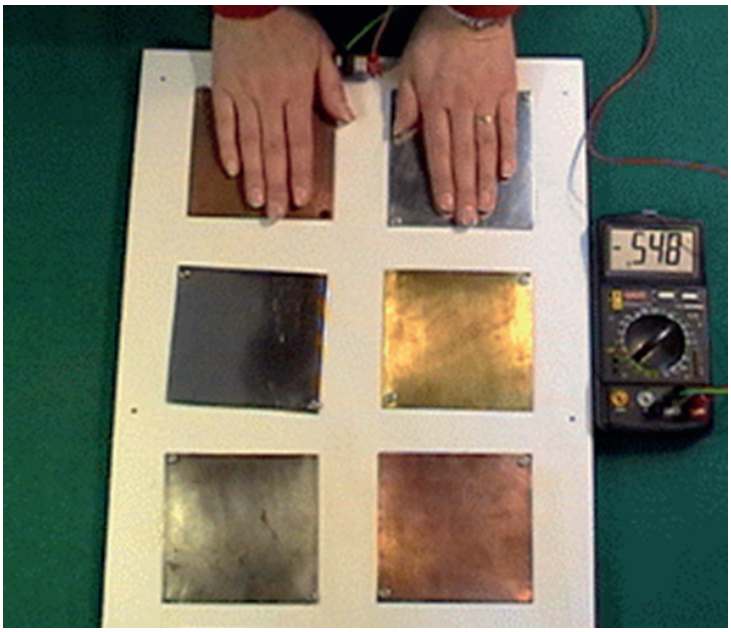
Doświadczenie w grupie młodzieży inicjujemy pytaniem, co należy zrobić, jeśli wyładuje się bateria telefonu komórkowego. Wywołując piątkę dziewcząt, ustawiamy je obok siebie i pytamy o ich imiona. Dokonujemy

połączenia jak opisane powyżej, a po tym: abrakadabra – pojawia się napięcie na mierniku. Co zrobić, kiedy wyładuje się komórka? Zaprosić te dziewczęta (i tu powtarzamy ich imiona – wymóg podmiotowości ucznia).

## 11.3. Miernik „inteligencji"

**Cel:** Zabawa dydaktyczna badania potencjałów Volty.

**Środki:** Tablica z przymocowanymi płytkami z różnych metali (miedź, mosiądz, żelazo, aluminium, jeśli to możliwe – cynk lub stal nierdzewna). Płytki, ułożone w dwóch rzędach, są pod płytą podłączone do dwóch wtyków, do których włączymy elektrody woltomierza.




**Fot. 11.5.** Pomiar „inteligencji", czyli różnicy napięć w szeregu Volty

**Wykonanie:**

Przyłóż dłonie do dwóch dowolnych płytek i sprawdź swój potencjał intelektualny.

Zabawka jest zbudowana z planszy z dwoma szeregami płytek wykonanych z różnych metali. W danym szeregu płytki połączono przewoda-

mi, których końce są wyprowadzone do woltomierza. Pomiar „potencjału intelektualnego" polega na wybraniu dwóch płytek z sąsiednich szeregów, takich aby po przyłożeniu do nich dłoni, na woltomierzu pokazało się jak najwyższe napięcie. Uwaga! Może okazać się, że Twój potencjał będzie miał wartość ujemną. Nie przejmuj się tym zbytnio i próbuj dalej.

**Wyjaśnienie:**

Układ *metal – Twoje ciało – inny metal* jest przykładem ogniwa chemicznego, którego podstawą działania jest szereg elektrochemiczny Volty. W zależności od zastosowania wymaga się od ogniwa bądź dużej różnicy potencjału (baterie litowe), bądź trwałości, łatwości ładowania itd. Według tych wymagań wybiera się dwa metale z *szeregu* Volty: Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Pt, Pd. Metale leżące w szeregu bardziej na prawo (jak Cu) oddają, przez obwód elektryczny, ładunek dodatni metalom leżącym na lewo (jak Zn).

Wartość powstałej siły elektromotorycznej w ogniwie jest tym większa, im dalej są odległe od siebie metale w szeregu Volty. Zależy ona również (w niewielkim stopniu) od rodzaju elektrolitu. W naszym przypadku elektrolitem są sole mineralne rozpuszczone w wodzie, z której w dużym procencie składa się nasze ciało. Ujemną wartością napięcia na woltomierzu w przypadku dotknięcia niektórych płytek nie trzeba się za bardzo przejmować – wystarczy zmienić biegunowość podłączenia miernika i „potencjał intelektualny" wróci do wartości większych niż zero.

Oczywiście moglibyśmy nazwać doświadczenie pomiarem potencjałów Volty, ale nie byłaby to wówczas zabawa, a jedynie tradycyjna lekcja.

**Dodatkowe uwagi:**

Dokładniejsze wyjaśnienie szeregu Volty jest związane z mikroskopowymi własnościami materii, a ściślej z wielkością noszącą nazwę „praca wyjścia". Każdą substancję charakteryzuje inna energia potrzebna do uwolnienia czy to elektronu, czy też jonu. Przykładowo, jeśli rozpatrzymy styk (złącze, kontakt) dwóch różnych metali, to okazuje się, że takie połączenie powoduje wytworzenie się pola sił elektromotorycznych: elektrony wypływają z metalu o niższej pracy wyjścia w kierunku metalu o wyższej pracy wyjścia.

Takiego złącza nie można jednak wykorzystać jako źródła prądu, ponieważ po zamknięciu obwodu tworzy się drugie złącze, w którym powstaje siła elektromotoryczna, dokładnie kompensująca tę pierwszą. Również wstawienie w obwód trzeciego przewodnika (lub większej ich liczby) nie spowoduje przepływu prądu w obwodzie zamkniętym. Aby możliwy był przepływ prądu, w takim obwodzie należy umieścić poszczególne złącza w różnych temperaturach, ponieważ praca wyjścia zależy w znacznym stopniu od temperatury. Taki układ nazywamy termoelementem.

Innym sposobem wykorzystania złącza przewodników jako źródła prądu jest zastosowanie substancji, które mają różne rodzaje nośników prądu. W tym przypadku stosuje się układy metali i elektrolitów. Dla metali nośnikami ładunku są elektrony, dla elektrolitów zaś – jony.

Ogniwo Volty, wynalezione dość przypadkowo (ale w rozmyślnym działaniu), „omija" ograniczenia wynikające z potencjałów kontaktowych metali poprzez wprowadzenie wspomnianych elektrolitów jako substancji pośredniczących. Istnieje niezliczona ilość różnych ogniw Volty, w zależności od ich przeznaczenia – od bateryjek w kalkulatorach (zazwyczaj niklowych lub tańszych Zn/Cu) do akumulatorów ołowiowych w samochodach.

Dziś, tj. ponad 200 lat po wynalazku Volty, nadal nie potrafimy wyjaśnić, dlaczego pary określonych metali dają takie, a nie inne potencjały. Istotne są również własności wody jako nośnika jonów.

Konstrukcja niezawodnych baterii Volty, o dużej pojemności i szybkich w ładowaniu, jest głównym ograniczeniem wprowadzania na rynek samochodów elektrycznych. A za konstrukcję baterii litowych (używanych we wszystkich telefonach komórkowych) przyznano w 2019 Nagrodę Nobla.

W pracy [1] nasz „miernik inteligencji" jest określany jako „ludzka bateria".

[1] Stanisław Bednarek, *Ludzka strona baterii*, Delta, 12 (2013), 16.

# 12. Elektromagnetyzm w skali makro

## 12.1. Pole magnetyczne Ziemi

### 12.1.1. Pole magnetyczne Ziemi (pomiary jakościowe)

**Cel:** Jakościowe pomiary pola magnetycznego Ziemi (deklinacja i inklinacja).

**Środki:** dwie igły do szycia i nitka, jeden magnes neodymowy (średnica 2 cm, wysokość 5 mm), kompas 3D, kompas 2D.



**Fot. 12.1.** Jakościowe pomiary pola magnetycznego Ziemi: (a) magnes neodymowy, (b) kompas 3D, (c) dwie sklejone i namagnesowane igły do szycia. Zdjęcie z okna w Sopocie, na północ – Gdynia

**Wykonanie:**

1. Postaw na talerzyku magnes, jak na fot. 12.1a. Pozwól, aby się ustawił w kierunku ziemskiego pola magnetycznego. Wyjrzyj za okno, gdzie jest geograficzna północ. Zaznacz na niebiesko tę stronę (tzn. podstawę) magnesu, która skierowała się na północ. Z tej strony jest południowy biegun magnetyczny tego magnesu.

2. Złóż główkami (tzn. otworami dwie igły do szycia, przewlecz przez nie nitkę, ułóż w linii prostej (np. na zagiętej kartce) i sklej szybkoschną-

cym klejem (np. cyjanoakrylowy, tzw. „Kropelka”). Kiedy klej stwardnieje, namagnesuj igły, przeciągając je powoli po powierzchni magnesu, zakończ również powoli, oddalając ostrze igły wzdłuż osi magnesu (dla lepszego efektu drugą igłę można spróbować namagnesować, przeciągając analogicznie z drugiej strony magnesu). Zapamiętaj, którą z dwóch igieł magnesowałeś przy biegunie północnym magnesu. Zaznacz tę igłę na czerwono.

3. Zawieś swobodnie twoją parę igieł na nitce, najlepiej przy oknie, tak abyś mógł stwierdzić, jaki kierunek geograficzny wskazuje igła. Jeśli działa prawidłowo (tzn. wskazuje mniej więcej kierunek geograficzny północ-południe), zaznacz na niebiesko igłę, która się skierowała na północ. Zbudowałeś kompas.

4. Czy igła wisi poziomo, czy się odchyla nieco w dół? Biegun północny powinien się nieco odchylać w dół, ale nie zawsze udaje się właściwie wyważyć dwie igły. Nie przejmuj się. Nam się też to nie udało.

**Wyjaśnienie:**

Igły są ze stali (stopu żelaza z małą ilością węgla), które czyni je mechanicznie twardymi, ale również podatnymi na trwałe namagnesowanie się. Magnesujemy je, zbliżając do biegunów silnego magnesu neodymowego (ponad tysiąc razy silniejszego niż pole Ziemi).

Bieguny magnetyczne Ziemi są w pobliżu biegunów geograficznych. W Polsce igła magnetyczna powinna dziś (2025 r.) odchylać się o około 5° na wschód. Nazywamy tę różnicę *deklinacją*.

Ziemia jest kulą, więc igła magnetyczna wisi poziomo tylko na równiku. Nad biegunem magnetycznym odchyla się pionowo w dół. Na szerokości geograficznej w Polsce (około 50° N) odchyla się o ten kąt w dół. Nazywamy ten kąt *inklinacją*. Do pomiaru potrzebny byłby jednak kompas, który pozwala na jego orientację nie w poziomie, lecz w pionie.

**inklinacja w Polsce to nie 66 stopni?**

## 12.1.2. Pole magnetyczne Ziemi (pomiar komputerowy)

**Cel:** Jakościowe pomiary pola magnetycznego Ziemi (deklinacja i inklinacja).

**Środki:** System komputerowy Pasco z sondą Halla 3D, cylinder z miękkiego (magnetycznie) żelaza (tzn. o małej wartości tzw. pozostałości magnetycznej) lub z materiału o wysokiej względnej przenikliwości magnetycznej, jak *mumetal* ($\mu_r$ = 20 000–100 000).




**Fot. 12.2.** (a) System Pasco do pomiarów pola magnetycznego (UMK): w lewym rogu cylinder z Fe, w środku (biały) cylinder z mumetalu oraz niezbyt silne, szkolne magnesy. (b) Bezprzewodowa sonda 3D Pasco: wzdłuż sondy zakres 50 G (=5mT), w poprzek 1300 G

**Wykonanie:**

1. Zmierz pole magnetyczne w laboratorium: połóż sondę na stole, zaznacz jej położenie i obracaj sondę co 15°. Zapisuj wartości trzech składowych pola.

2. Zmierz wartości indukcji pola magnetycznego na osi magnesu sztabkowego. Użyj aluminiowej szyny Pasco z podziałką.

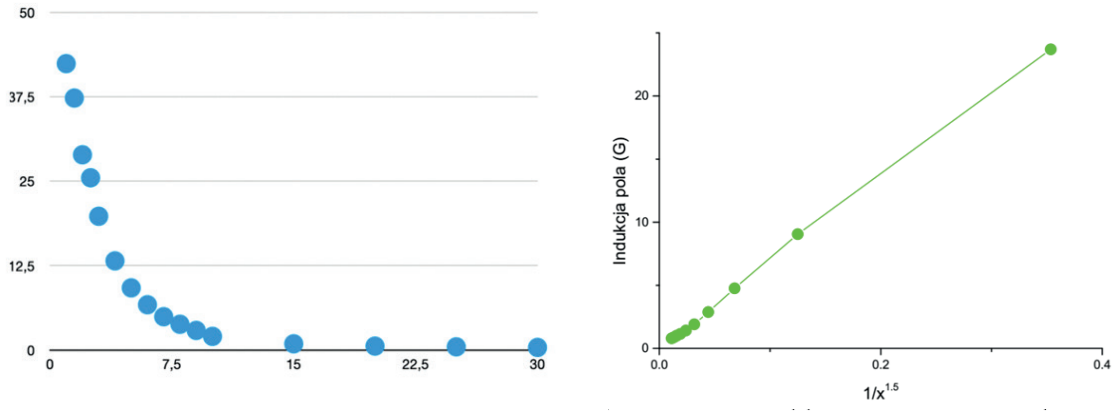
**Wyjaśnienia:**

Pokazujemy ten system, mimo że nie jest on w Polsce powszechnie stosowany (głównie ze względu na koszty). Pomiar sam z siebie byłby prosty, gdyby nie konieczność każdorazowego zerowania sondy.

1. Pierwsza metoda to ustawienie sondy dokładnie wzdłuż linii ziemskiego pola magnetycznego (mając na uwadze, że pole ma składowe zarówno w poziomie, jak i w pionie, zob. poprzednie ćwiczenie) i wyzerowanie składowych poprzecznych, a następnie ustawienie sondy w kierunku prostopadłym do poprzedniego i wyzerowanie sondy w kierunku osiowym. Procedura jest trudna i pełna możliwych błędów.

2. Druga metoda to umieszczenie sondy w ekranie magnetycznym. Niestety, o ile pola elektrostatyczne można zaekranować za pomocą pudełka z przewodnika (tzw. puszki Faradaya), o tyle ze względu na drugie prawo Maxwella (**div B** = 0), które możemy też wyrazić jako „wymóg" zamykania się linii pola – ekranowanie pola magnetycznego nie jest proste. Polega ono na skupieniu linii pola wewnątrz materiału o wysokiej przenikliwości. W ten sposób wewnątrz cylindra pole ziemskie jest znacznie zredukowane (do wartości rzędu 1 μT).

3. Na ryc. 12.3a pokazujemy pomiary pola magnetycznego na osi magnesu sztabkowego, a na ryc. 12.3b studenckie próby znalezienia zależności analitycznej. Jeszcze ciekawsze są pomiary pola wokół zwojnicy – pozwalają na ilościową weryfikację, np. ćw. 5.1 i 5.4.




**Ryc. 12.3.** Pomiary indukcji B pola wzdłuż osi magnesu sztabkowego. (a) Dane bezpośrednie: oś OY – indukcja w gaussach (1G=10-4 T), OX – odległość od magnesu w cm. (b) Podobne dane: zależność B od (1/x)1,5. Dla dużych odległości mierzone pole jest większe od przewidywanego – stała dodana wartość to pole Ziemi

## 12.1.3. Pole magnetyczne Ziemi (konfiguracja)

**Cel:** Konfiguracja i zmiany pola magnetycznego Ziemi

**Środki:** kompas 2 D




**Fot. 12.3.** Konfiguracja pola magnetycznego Ziemi (a) według Kartezjusza – Zasady filozofii, 1644; (b) według włoskiego Instytutu Geofizyki i Wulkanologii (program RAI Scuola 4/11/2025, prowadzi Davide Coero Borga, ekspert dott.ssa Paola De Michelis)

**Wykonanie:**

1. Połóż kompas na parapecie okna. Przesuń go (bez zmiany orientacji) w różnych kierunkach. Czy igła pokazuje w każdym położeniu ten sam kierunek?

2. Połóż w pobliżu kompasu jakikolwiek obiekt żelazny lub stalowy – gwóźdź, nóż, śrubokręt. Sprawdź, jak zachowuje się igła kompasu.

**Wyjaśnienie:**

Jakikolwiek obiekt ferromagnetyczny powoduje zmianę lokalnej konfiguracji ziemskiego pola magnetycznego: to jest powód odchylania się igły magnetycznej w ich pobliżu. W rzeczywistości w ścianach, sufitach, podłogach budynków znajdują się żelazne pręty i belki stalowe – trudno w mieszkaniu znaleźć miejsce wolne od deformacji pola ziemskiego. Ale

też anomalie magnetyczne na powierzchni ziemi pozwalają na odkrycia nowych złóż minerałów.

Kartezjusz, w *Zasadach filozofii* (1644) pisał, że Ziemia jest wielkim, ale słabym magnesem. Rzeczywiście magnesy neodymowe ($Nd_2Fe_{14}B$) wytwarzają na powierzchni indukcję około 1T (magnesy ferrytowe – pola około 10 razy słabsze), a pole magnetyczne Ziemi, w zależności od położenia 20–60 μT. Ziemskie pole, zgodnie z rysunkiem Kartezjusza, jest najsilniejsze w pobliżu biegunów magnetycznych najsłabsze na równiku.

Nie jest to jednak „idealne" pole dipola magnetycznego: procesy powstawania pola Ziemi są skomplikowane: wirujący, płynny rdzeń Fe-Ni wytwarza prądy elektryczne, a te przez indukcję wytarzają pole magnetyczne, to zaś magnetyzuje rdzeń, a ten... Proces nazywa się „dynamo".

Pole magnetyczne Ziemi podlega ciągłym zmianom: zmieniają się lokalne wartości, dryfują bieguny (ostatnio, tj. w 2025 roku znacznie), a co kilka lub kilkanaście milionów lat – odwracają się.

Ziemi

, a najsłabsze

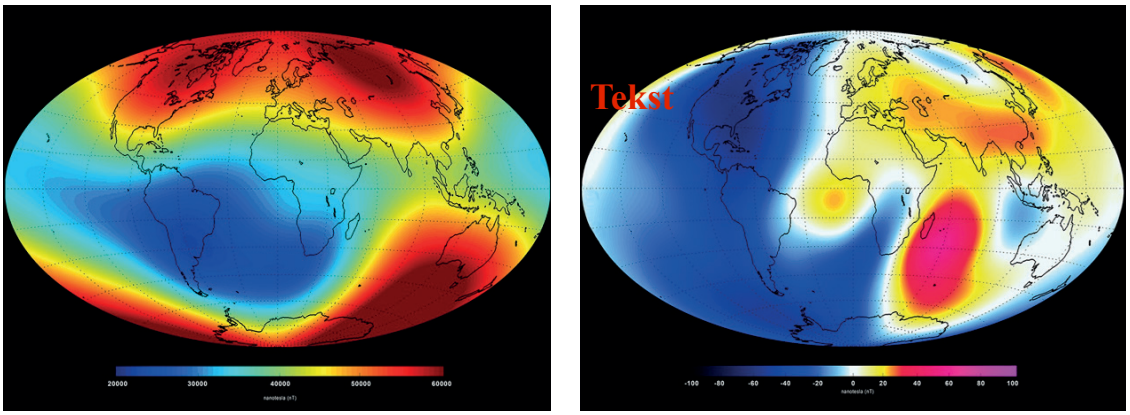
na równiku.

w zależności

od położenia

wynosi

wytwarzają




Tekst

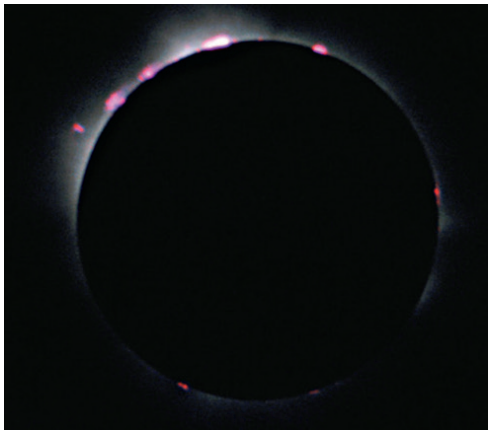
**Fot. 12.4.** Pomiary satelitarne ziemskiego pola magnetycznego w okresie 1.01–30.06.2013. (a) Wartość średnia – skala od 20 to 60 $\mu$T. Pole wykazywało dwa obszary maksimum – w rejonie Kanady i Syberii. (b) Zmiany w badanym okresie – skala ±0,1 $\mu$T. European Space Agency/Technical University of Denmark (ESA/DTU Space)

do

# 12.2. Pola magnetyczne w kosmosie

## 12.2.1. Pola magnetyczne w kosmosie: Słońce

**Cel:** Zachęta do profesjonalnych obserwacji Słońca.



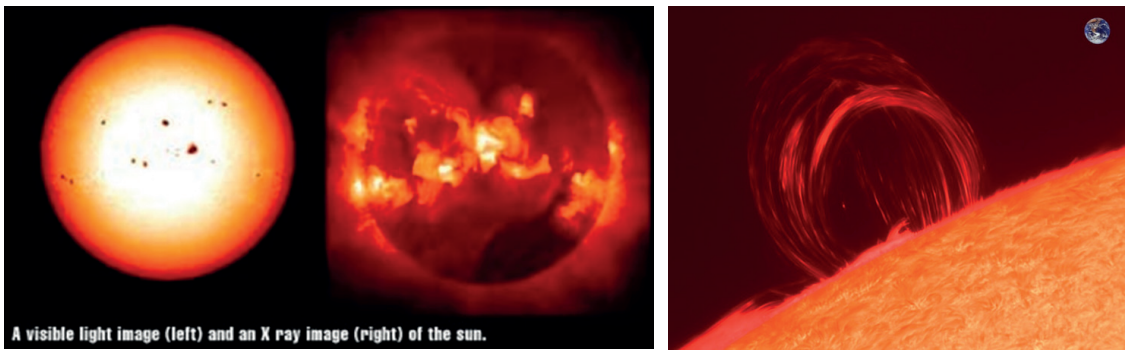
W tej części dajemy nieco szerszą perspektywę w temacie pola magnetycznego, które jest wszechobecne w kosmosie. Najbliższym nam obiektem o potężnym polu magnetycznym jest Słońce. Przejawami istnienia tego pola są plamy słoneczne (występujące stale, z większą lub mniejszą intensywnością) oraz wybuchy słoneczne, tzw. protuberancje, które możemy obserwować w czasie całkowitych zaćmień Słońca (a te, w różnych miejscach kuli ziemskiej, zdarzają się mniej więcej co rok). Plamy słoneczne, czyli obszary o nieco niższej (średniej) temperaturze, odkrył Galileusz za pomocą swojej lunety: obserwował je bez filtrów i stracił wzrok. Nigdy nie patrz bezpośrednio na Słońce, nawet w okularach „przeciwsłonecznych”!

naprawdę stracił wzrok?

Średnie pole magnetyczne na Słońcu jest nieco większe (dwa razy) niż na Ziemi, ale licząc, że średnica jest sto razy większa, strumienie pola magnetycznego (i ich zmiany) są gigantyczne. Najbardziej widocznym efektem tych zmian są plamy słoneczne, odkryte jeszcze przez Galileusza. Są to obszary o wielkości przekraczającej średnicę Ziemi, w których w miarę uporządkowany strumień pola koncentruje się lokalnie i zmienia o czynnik kilka tysięcy razy (osiągając wartości rzędu 1 T). Zmienia to przepływy gazu zjonizowanego (tzn. plamy, zob. nasz artykuł dotyczący maszyny elektrostatycznej) – plamy i protuberancje.

Intensywne wyrzuty gorącej plazmy z obszarów plam powodują burze magnetyczne na Ziemi, które mogą prowadzić do awarii sieci elektrycznych na dużych obszarach (jak w Prowincji Quebec w Kanadzie w marcu 1989 roku).

Globalne pole magnetyczne Słońca zmienia polaryzację co 11 lat. Z tym samym okresem zmienia się intensywność plam. Brak plam[8] w pierwszej połowie XVII wieku był przypuszczalnie jednym z powodów ochłodzenia klimatu w Europie[9]. Mechanizmów zmian pola magnetycznego Słońca i powstawania gigantycznych pól (rzędu 1 T) prowadzących do pojawiania się plam nadal nie potrafimy modelować.




**Fot. 12.5.** (a) Protuberancje widoczne w czasie zaćmienia Słońca10. (b) Plamy słoneczne to obszary o nieco niższej (4000 K) średniej temperaturze niż pozostałej powierzchni Słońca (5800 K), ale jednocześnie źródła intensywnego promieniowania rentgenowskiego11 (c), i obszary bardzo silnego pola magnetycznego. (d) Protuberancje to wyrzuty gorącej plazmy: ich trajektorie pokazują konfigurację pola magnetycznego w plamach i wokół nich12 (July 19, 2012. Image credit: JP Brahic)

## 12.2.2. Pola magnetyczne w kosmosie: przestrzeń międzygwiazdowa

**Cel:** Zachęta do obserwacji zórz polarnych.

Ponieważ jednym z powszechnych stanów materii we Wszechświecie jest stan zjonizowanej materii, czyli plazmy, również pola elektryczne i ma-

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Maunder_Minimum
[9] https://en.wikipedia.org/wiki/Little_Ice_Age
[10] https://www.astrofilipc.it/portfolio/protuberanze-solari-durante-leclissi-totale-di-sole/
[11] https://annex.exploratorium.edu/sunspots/activity.html
[12] https://www.space.com/17154-skywatcher-eyes-massive-solar-loop.html

gnetyczne występują w kosmosie obficie. Wiatr słoneczny – czyli płynący nieustannie w przestrzeń strumień materii, głównie elektronów i protonów – też niejako sam z siebie odpowiada za istnienie w obszarze Układu Słonecznego międzyplanetarnego pola elektrycznego i magnetycznego.

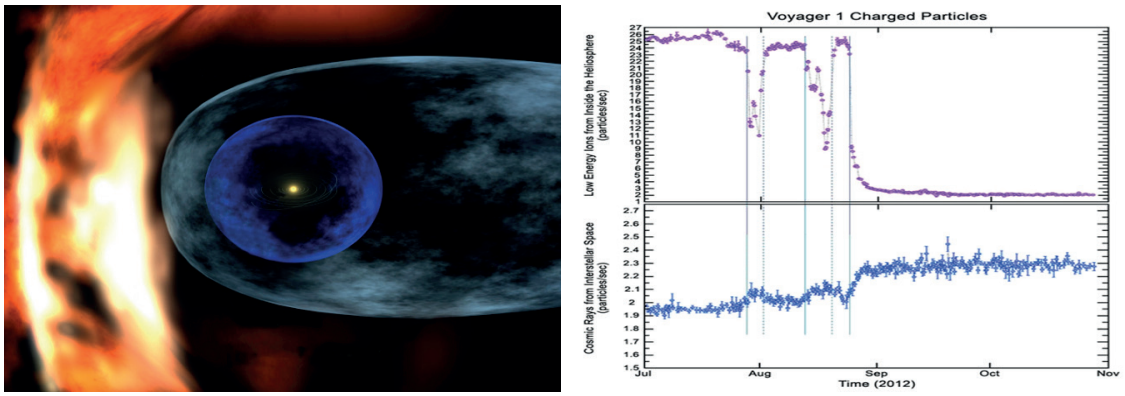
Pole magnetyczne Ziemi zabezpiecza nas przed tym „wiatrem", koncentrując napływ cząstek naładowanych elektrycznie wokół biegunów magnetycznych. Wskutek oddziaływania tych cząstek z atmosferą (drobinami i atomami azotu, tlenu[13]) powstają przepiękne zorze polarne. Zorze te mogą być widziane również z obszaru Polski: niestety, przewidywania, kiedy wystąpią zorze na podstawie obserwacji aktywności Słońca jest nadal wysoce nieprecyzyjne. Teoretycznie, strumienie plazmy ze Słońca trafiają na Ziemię po paru dniach.



**Ryc. 12.6.** (a) Pole magnetyczne Ziemi chroni nas przed wiatrem słonecznym, kierując strumienie cząstek naładowanych do biegunów (NASA). (b) Zorze polarne wykazują najróżniejsze kolory[14]: jest to spowodowane wzbudzeniami elektronów w atomach i cząsteczkach azotu i tlenu.

Z kolei wiatr słoneczny zabezpiecza nas przed napływem jeszcze bardziej energetycznych cząstek z przestrzeni międzygwiezdnej. Wiemy to od sierpnia 2012 roku, kiedy pierwsza sonda skonstruowana przez człowieka (Voyager-1, wysłana w 1977) dotarła to granicy Układu Słonecznego: nagle, w ciągu paru dni lotu sondy, pojawiły się wysokoenergetyczne cząstki z głębokiej przestrzeni, ryc. 12.7b, zob. też stronę internetową KDF UMK[15].

[13] Zob. https://www.swpc.noaa.gov/content/aurora-tutorial
[14] https://www.weather.gov/fsd/aurora
[15] https://fizyka.umk.pl/~akarb/Voyager/Voyager.htm




**Ryc. 12.7.** (a) Artystyczna wizja oddziaływania pola magnetycznego Słońca na materię międzygwiazdową (NASA): Układ Słoneczny to swoisty „kokon", chroniący nas przed napływem wysokoenergetycznych cząstek z przestrzeni międzygwiezdnej. (b) Sonda Voyager1 – pomiar energii cząstek naładowanych w sierpniu 2012 roku sonda dotarła do granic Układu Słonecznego

Rozdział III

# Scenariusze zajęć z elektromagnetyzmu z wykorzystaniem toruńskiego zestawu dydaktycznego

Autor:
dr Magdalena Grygiel

Koncepcja i redakcja:
prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz

Współpraca techniczna i dydaktyczna:
dr Andrzej Karbowski
mgr Krzysztof Służewski

# Temat: Pole magnetyczne wokół magnesu.

**Cele lekcji:**

- **ogólny (uczeń):**
  – dowiaduje się o istnieniu pola magnetycznego;
- **operacyjne (uczeń):**
  – prezentuje za pomocą kompasu pole magnetyczne wokół magnesu trwałego i pole magnetyczne Ziemi,
  – pokazuje przy użyciu np. dwóch magnesów, że istnieją dwa rodzaje biegunów magnetycznych N i S,
  – wykorzystuje igłę magnetyczną do badania pola magnetycznego, np. magnesu sztabkowego, magnesów „na lodówkę", magnesów – zabawek,
  – wykorzystuje „wykrywacz" pola magnetycznego do badania pola magnetycznego, np. magnesu sztabkowego, magnesów „na lodówkę", magnesów – zabawek,
  – na podstawie wykonanych doświadczeń dowiaduje się, jak oddziałują ze sobą bieguny magnetyczne,
  – na podstawie wykonanych doświadczeń dowiaduje się, że przedmioty wykonane z żelaza magnesują się.

**Metody:**

– poszukująca: pogadanka z uczniami (na zasadzie pytań i odpowiedzi);
– praktyczna: wykonywanie przez uczniów doświadczeń.

**Formy pracy:**

– zbiorowa,
– indywidualna.

**Środki dydaktyczne:**

– zestaw doświadczalny KDF UMK obejmujący: dwa magnesy sztabkowe, magnes podkowiasty, cztery magnesy „na lodówkę", cztery magnesy – „żuczki", dwa magnesy w kształcie kuli, zabawka – tabli-

ca, tzw. znikopis + długopis + stempelki, płytka z opiłkami żelaza, kompas, płytka – „wykrywacz" pola magnetycznego;
– spinacze, monety itp.;
– zdjęcia pierwszych kompasów wyświetlane za pomocą komputera i rzutnika.

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| **1. Powitanie i sprawdzenie obecności. Wprowadzenie** | |
| – (Jeśli klasa jest liczna, można podzielić ją na grupy 4–5-osobowe. W moim przypadku lekcja będzie przeprowadzona klasie 10-osobowej.) | |
| – Na dzisiejszej lekcji zapoznamy się z pewnym rodzajem oddziaływania (pokazuję magnesy sztabkowe). Czy domyślacie się, czym się będziemy zajmować na lekcji? | – Odpowiadają. Możliwe odpowiedzi: magnesami, oddziaływaniami magnetycznymi, magnetyzmem. |
| – Czy moglibyście powiedzieć, do czego używane są magnesy. | – Odpowiadają: magnesy na lodówkę, w szafkach, żeby drzwiczki się zamykały, w torebkach, w głośnikach itp. |
| – Czy wiecie skąd pochodzi nazwa magnes? | – Prawdopodobnie nie wiedzą. |
| – W starożytności w Azji Mniejszej w pobliżu greckiego miasta Magnesia odkryto kamień, który przyciągał kawałki żelaza. Nazwano go magnetytem. | |
| – Podaje nazwę działu i temat lekcji. | – Zapisują w zeszytach. |
| – Rozdanie kart pracy każdemu uczniowi. | |
| **2. Rozwinięcie lekcji – doświadczalne badanie pola magnetycznego** | |
| – Podanie uczniom magnesów sztabkowych oraz płytki z opiłkami żelaza, aby się im przyjrzeli i zbadali ich własności. | – „Bawią" się magnesami. |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| – Co możecie powiedzieć o tych magnesach? | – Możliwe odpowiedzi: Każdy z nich jest oznaczony dwoma kolorami: czerwonym i niebieskim, literami N i S. Jak je zbliżymy do siebie końcami zaznaczonymi tym samym kolorem to się odpychają. Jeśli zbliżymy do siebie magnesy końcami o różnych kolorach, to się przyciągają. |
| – Co można na tej podstawie stwierdzić? | – Możliwe odpowiedzi: Są dwa rodzaje magnesów; jeden koniec magnesu jest dodatni +, a drugi ujemny –. |
| – Koniec magnesu oznaczony N nazywamy biegunem północnym, natomiast koniec oznaczony S – biegunem południowym. | |
| – Co się dzieje z dwoma magnesami, gdy zbliżone są końcami oznaczonymi N i S? | – Odpowiadają: Przyciągają się. |
| – Magnesy zbliżone końcami oznaczonymi N i S, nazywamy różnoimiennymi | – Uzupełniają karty pracy. |
| – Co się dzieje z dwoma magnesami, gdy zbliżone są końcami oznaczonymi N i N? | – Odpowiadają: Odpychają się.<br>– Uzupełniają karty pracy. |
| – Magnesy zbliżone końcami oznaczonymi N i N lub S i S nazywamy jednoimiennymi. | |
| – Co się dzieje z opiłkami żelaza, gdy zbliżymy do nich magnes jednym z biegunów. | – Odpowiadają: Opiłki poruszają się „za magnesem”; magnes przyciąga opiłki. |
| – Połóżcie magnes równolegle do płytki z opiłkami. Co obserwujecie? | – Wykonują polecenie.<br>– Odpowiadają: Opiłki zbliżają się do końców magnesu. |
| – Podaje spinacze. | – Badają, co się dzieje ze spinaczami, gdy zbliżony zostaje do nich magnes. |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| – Podaje monety. | – Badają, co się dzieje z monetami, gdy zbliżony zostaje do nich magnes. |
| – Jakie wnioski można wyciągnąć z dwóch ostatnich doświadczeń? | – Odpowiadają, że magnes przyciąga przedmioty wykonane z żelaza, stali.<br>– Uzupełniają karty pracy. |
| – Pokazuje kompas. Do czego służy? | – Odpowiadają: Kompas wskazuje północ, można nim określić pozostałe kierunki geograficzne. |
| – Wielu historyków przypuszcza, że specyficzną własność magnesu do wskazywania kierunków wykorzystali po raz pierwszy Chińczycy. Składał się on z talerza wykonanego z brązu i magnetycznej chochelki. Na statkach kompas budowano w taki sposób, że do glinianego garnka nalewano wodę i kładziono na jej powierzchni żelazną blaszkę w kształcie ryby (można pokazać zdjęcia). Do Europy kompas dotarł dzięki kupcom, którzy handlowali na Jedwabnym Szlaku. | |
| – Podaje uczniom kompas, aby zbadali, co się będzie działo, gdy zostanie zbliżony do magnesu. | – Sprawdzają. |
| – Instruuje, by uczniowie poruszali magnesem, a kompas był nieruchomy (leży np. na ławce). | – Badają zachowanie się igły magnetycznej w kompasie. Obserwują. |
| – Czy zauważyliście coś charakterystycznego? | – Igła kompasu ustawia się w stronę końca magnesu, który zaznaczony jest literą S.<br>– Uzupełniają karty pracy. |
| – Na podstawie tych doświadczeń można również powiedzieć, że magnesy zmieniają właściwości przestrzeni wokół siebie. Świadczy o tym ruch igły magnetycznej w kompasie. Mówimy, że magnesy wytwarzają wokół siebie pole magnetyczne. | |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| – Pola magnetyczne umownie oznacza się liniami. Zwrot linii pola magnetycznego wskazuje zwrot igły magnetycznej z kompasu. Do którego bieguna jest ono zwrócone? | – Odpowiadają: do bieguna południowego. |
| – Rysuje na tablicy (Wraz z liniami pola magnetycznego).<br>N \| S | |
| – Zastanówmy się chwilę nad wskazaniami kompasu. Przed chwilą powiedzieliście, że magnesy zbliżone tymi samymi biegunami odpychają się. Igła kompasu oznaczona N ustawia się w stronę północy geograficznej. Jak to jest możliwe? | – Mogą zgadywać i będą padały różne odpowiedzi. Jedna z nich może być prawdziwa, a jeśli nie, to nauczyciel powinien udzielić odpowiedzi. |
| – Koniec igły oznaczony N jest przyciągany przez południe magnetyczne. W okolicach bieguna północnego geograficznego znajduje się biegun południowy magnetyczny. Natomiast w okolicach południa geograficznego znajduje się północny biegun magnetyczny. Działanie kompasu zawdzięczamy istnieniu pola magnetycznego wokół Ziemi. | |
| – Podanie uczniom magnesów – „żuczków”.<br>– Obserwacja pracy uczniów. | – Badają zachowanie się tych magnesów. |
| – Co zaobserwowaliście? | – Odpowiadają: te magnesy raz się przyciągają, a raz odpychają, zależy jak się je ustawi względem siebie. Różnią się od magnesów sztabkowych. |
| – Zgadza się.<br>– Podanie uczniom magnesów „na lodówkę”. | – Badają zachowanie się tych magnesów. |

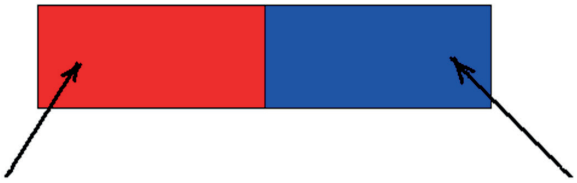
| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| – Co zaobserwowaliście? | – Odpowiedzi – jak wyżej (o „żuczkach”). |
| – Sprawdzimy teraz czy magnesy „na lodówkę” różnią się od magnesu sztabkowego.<br>– Podaje płytkę – „wykrywacz” pola magnetycznego. | – Przykładają magnesy sztabkowe do płytki. |
| – Co zaobserwowaliście? | – Na płytce widać, że magnes „na lodówkę” jest podzielony na dwie części, tak jak magnes sztabkowy. |
| – Pozdaje uczniom magnesy dołączone do tablicy – znikopisu. | – Przykładają magnesy do płytki. |
| – Czy na płytce pojawił się taki sam obraz jak dla magnesów na lodówkę? | – Odpowiadają: nie, dla tych magnesów widać, podział na więcej części. |
| – Są one zbudowane z większej liczby magnesów. | |
| – Podaje tablicę – znikopis. | – Badają pole magnetyczne magnesów sztabkowych, magnesów „ na lodówkę” i magnesów dołączonych od tablicy przy jej użyciu. |
| – Można wytłumaczyć uczniom zasadę działania tablicy – znikopisu. | |
| **3. Podsumowanie** | |
| – Czego dotyczyła dzisiejsza lekcja? | – Odpowiadają: magnesów, pola magnetycznego. |
| – Jak nazywamy bieguny magnesu? | – Odpowiadają: północny i południowy. |
| – Co się stanie, jeśli zbliżymy do siebie magnesy biegunami różnoimiennymi? | – Odpowiadają: Będą się przyciągać. |
| – Co się stanie, jeśli zbliżymy do siebie magnesy biegunami jednoimiennymi? | – Odpowiadają: Będą się odpychać. |
| – Ocenia pracę uczniów na lekcji. | |

# KARTA PRACY

Imię i nazwisko: _____ Klasa _____ Data_____

Temat zajęć _____

1. Podpisz bieguny magnesu.



2. Uzupełnij tekst.
Magnesy zbliżone do siebie biegunami północnym i południowym

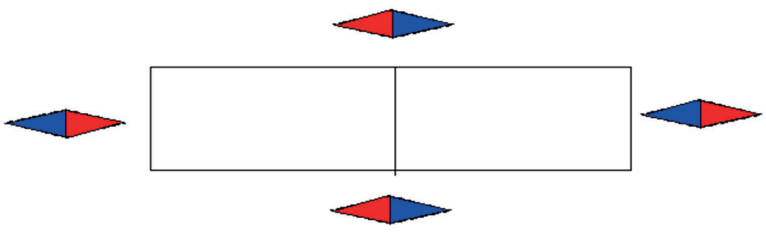
_____

Magnesy zbliżone do siebie tymi samymi biegunami, np. północnym i północnym

_____

Przedmioty wykonane z _____ są przyciągane przez magnes.
Biegun północny igły magnetycznej ustawia się zawsze w stronę geograficznego bieguna _____

3. Podpisz bieguny magnesu.



# Temat: Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem.

**Cel ogólny:** uczeń wie, że wokół przewodnika, przez który płynie prąd powstaje pole magnetyczne.

**Cele operacyjne:**

- uczeń:
  - omawia doświadczenie Oersteda – wersje pionową i poziomą,
  - opisuje różnice między kształtem pola magnetycznego powstającego wokół przewodnika i wokół zwojnicy,
  - korzysta z reguły prawej dłoni do wyznaczania kierunku i zwrotu pola magnetycznego powstającego wokół przewodnika z prądem i zwojnicy,
  - podaje przykłady zastosowania omawianego zjawiska w technice, np. w elektromagnesach.

**Metody:**

- poszukująca: pogadanka z uczniami,
- praktyczna: wykonanie doświadczenia Oersteda, uzupełnianie kart pracy.

**Formy pracy:**

- zbiorowa,
- indywidualna.

**Środki dydaktyczne:**

- wybrane elementy zestawu doświadczalnego Low-Tech kit: przewód z mosiądzu, bateria 4,5 V, dwa kompasy, cztery złącza krokodylkowe, dwa przewody, stolik plastikowy z krótkimi nogami,
- karty pracy.

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIA/UCZNIÓW |
|---|---|
| **1. Start** | |
| – Wita uczniów i sprawdza obecność. | – Zajmują miejsca. |
| – Rozdaje karty pracy. Informuje o konieczności ich uzupełniania. | |
| – Podczas ostatniej lekcji omawiany był temat dotyczący magnesów. Co możecie powiedzieć o magnesach? | – Przewidywana odpowiedź: każdy magnes ma dwa bieguny: północny i południowy. |
| – Zadaje pytanie: czy możliwe jest rozdzielenie magnesu w taki sposób, aby miał on tylko jeden rodzaj bieguna. | – Przewidywana odpowiedź: nie można w taki sposób rozdzielić magnesu. Nawet po rozcięciu każda z części magnesów będzie miała dwa bieguny. |
| – Zadaje pytanie: co to jest kompas i do czego służy. | – Przewidywana odpowiedź: to urządzenie, które służy do wyznaczania kierunków geograficznych. |
| – Zadaje pytanie: do czego służy kompas. | – Przewidywana odpowiedź: wewnątrz kompasu znajduje się igła magnetyczna, która wskazuje północ geograficzną i południe magnetyczne. Dzieje się tak, ponieważ igła ma dwa bieguny i jej biegun północny jest przyciągany przez południowy biegun magnetyczny Ziemi. |
| **2. Rozwinięcie lekcji** | |
| – Informuje, że za chwilę zostanie wykonane doświadczenie, nazywane doświadczeniem Oersteda. Zapisuje temat na tablicy. | – Zapisują temat. |
| – Prezentuje doświadczenie Oersteda – wersję poziomą. | – Obserwują. |
| – Pyta uczniów, co zaobserwowali. | – Przewidywana odpowiedź: igła kompasu zaczyna się obracać, gdy prąd płynie przez przewód. Po chwili się zatrzymała i ustawiła prostopadle do przewodu.<br>– Zapisują odpowiedzi w kartach pracy. |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIA/UCZNIÓW |
|---|---|
| – Pyta uczniów, co może powodować ruch igły. | – Przewidywana odpowiedź: powodem może być płynący prąd. Prąd elektryczny wywołuje powstanie pola magnetycznego. |
| – Prezentuje doświadczenie Oersteda – wersję poziomą z odwróconym kierunkiem przepływu prądu. | – Obserwują. |
| – Pyta uczniów, co zaobserwowali. | – Przewidywana odpowiedź: igła kompasu zaczyna się obracać, gdy prąd płynie przez przewód. Po chwili się zatrzymała i ustawiła prostopadle do przewodu.<br>– Zapisują odpowiedzi w kartach pracy. |
| – Pyta o podobieństwa i różnice występujące między dwoma doświadczeniami. | – Przewidywana odpowiedź: w obu doświadczeniach, gdy obwód elektryczny był zamykany, igła kompasu zaczynała się obracać. Po chwili zatrzymywała się w kierunku prostopadłym do przewodu, ale w każdym doświadczeniu wskazywała inny zwrot. |
| – Pyta, co jest przyczyną wskazania przeciwnego kierunku – zwrotu przez igłę. | – Przewidywana odpowiedź: jeśli został odwrócony kierunek przepływu prądu, to zmienił się tez zwrot pola magnetycznego. |
| – Prezentuje doświadczenie Oersteda – wersję poziomą. | – Obserwują. |
| – Pyta uczniów, co zaobserwowali. | – Przewidywana odpowiedź: gdy obwód elektryczny jest otwarty, igły wszystkich kompasów wskazują linię północ-południe. Igły kompasów zaczynały się obracać, gdy został zamknięty obwód elektryczny. |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIA/UCZNIÓW |
|---|---|
| – Mówi, że w 1820 roku Oersted pokazał, że prąd elektryczny może być źródłem pola magnetycznego. Pole magnetyczne powstaje nad i pod przewodem. Zwrot pola magnetycznego się zmienia, gdy zmianie ulega kierunek przepływu prądu. | – Słuchają. |
| – Omawia regułę prawej dłoni | – Słuchają. |
| – Pyta, do czego służy ta reguła. | – Przewidywana odpowiedź: do wyznaczania kierunku i zwrotu pola magnetycznego. |
| – Pyta o kształt pola magnetycznego wokół przewodu i zwojnicy. | – Przewidywana odpowiedź: wokół przewodu pole magnetyczne ma kształt okręgów, których środkiem jest przewód. Wewnątrz zwojnicy linie pola magnetycznego są równoległe, a wokół niej przypominają pole wokół magnesu.<br>– Rysują i uzupełniają karty pracy. |
| – Kontroluje pracę uczniów, poprawność odpowiedzi i rysunków. | – Sprawdzają poprawność odpowiedzi. Jeśli jest zła, poprawiają. |
| – Omawia i wyjaśnia regułę prawej dłoni. | – Słuchają. |
| – Prosi o przeczytanie polecenia do ćwiczenia piątego. | – Uzupełniają ćwiczenia. |
| – Sprawdza poprawność odpowiedzi i rysunków. | – Sprawdzają poprawność odpowiedzi. Jeśli jest zła, poprawiają. |
| – Mówi, że zjawisko powstawania pola magnetycznego wokół przewodu, w którym przepływa prąd elektryczny, znalazło zastosowanie w technice, np. w elektromagnesach. Zadaje pracę domową: wyszukaj w Internecie informacje dotyczące elektromagnesów i ich zastosowania w technice. | – Słuchają. Zapisują polecenie – pracę domową. |

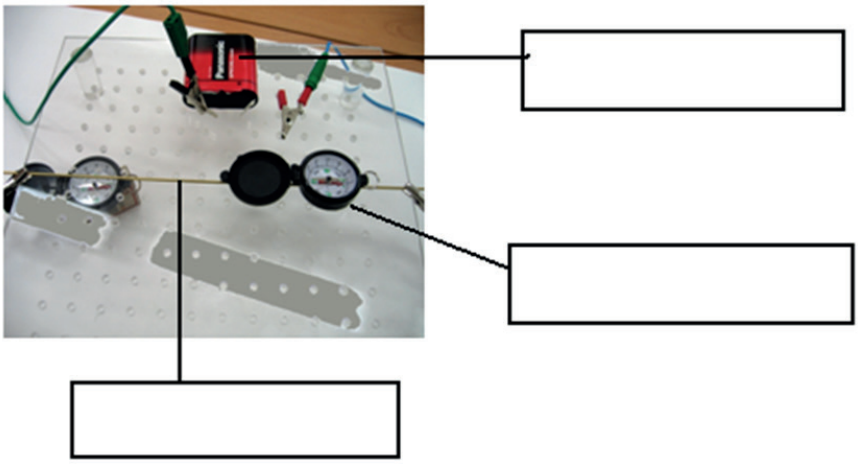
| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIA/UCZNIÓW |
|---|---|
| 3. Zakończenie | |
| – Podsumowuje pracę uczniów na lekcji, wstawia oceny. Żegna się z uczniami.<br><br>PS: Przypominamy, że według niedawno odnalezionych materiałów, odkrywcą oddziaływania prądu elektrycznego na igłę magnetyczną był, w 1802 roku, Giandomenico Romagnosi, prawnik z Trydentu (zob. rozdział 5.2). | – Żegnają się z nauczycielem. |

## KARTA PRACY

Imię i nazwisko: _____ Klasa _____ Data_____

Temat zajęć _____

1. Na zdjęciu przedstawiono zestaw potrzebny do pokazania doświadczenia Oersteda. Nazwij elementy zaznaczone na rysunku.



2. Co się dzieje, gdy obwód elektryczny zostanie zamknięty?

_____

_____

_____

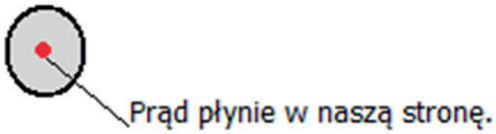
3. Co się dzieje, gdy następuje zmiana kierunku przepływu prądu?

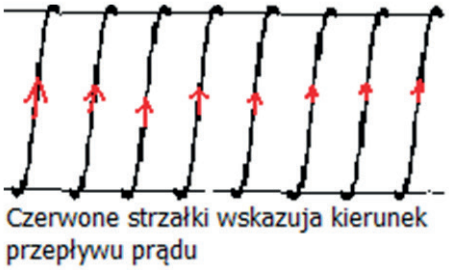
_____

_____

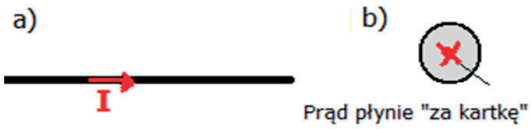
_____

4. Narysuj kształt linii pola magnetycznego wokół przewodu i zwojnicy.




5. Korzystając z reguły prawej dłoni, wyznacz kierunek i zwrot linii pola magnetycznego.







PRACA DOMOWA

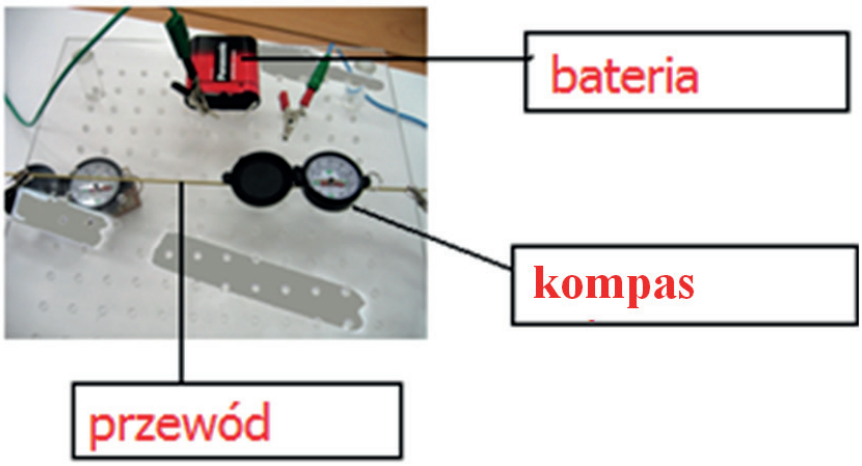
*Wyszukaj informacje w Internecie dotyczące elektromagnesów i ich zastosowania w technice.*

## KARTA PRACY z przewidywanymi odpowiedziami

Imię i nazwisko: _____ Klasa _____ Data_____

Temat: Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem.

1. Na zdjęciu przedstawiono zestaw potrzebny do pokazania doświadczenia Oersteda. Nazwij elementy zaznaczone na rysunku.

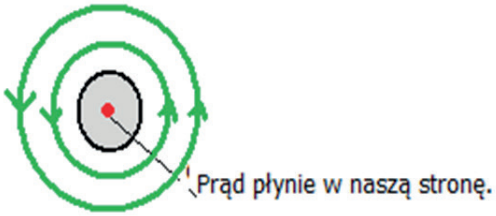


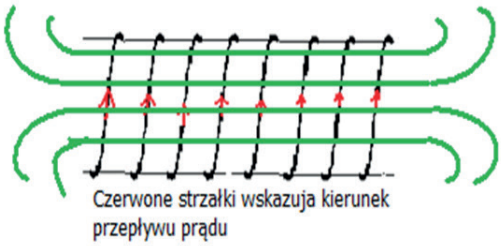

2. Co się dzieje, gdy obwód elektryczny zostanie zamknięty?
*Igła kompasu zaczyna się obracać i po pewnym czasie zatrzymuje się. Ustawia się ~~w~~ prostopadle do przewodu.*

usuń „w"

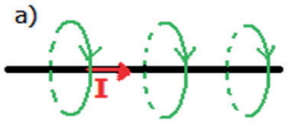
3. Co się dzieje, gdy następuje zmiana kierunku przepływu prądu?
*Zmiana kierunku przepływu prądu powoduje zmianę ustawienia igły kompasu. Wynika z tego, że zmienia się też kierunek i zwrot pola magnetycznego.*

4. Narysuj kształt linii pola magnetycznego wokół przewodu i zwojnicy.



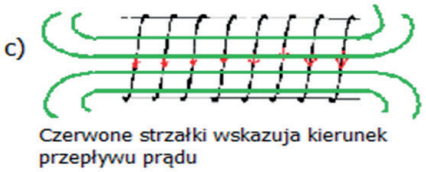




5. Korzystając z reguły prawej dłoni, wyznacz kierunek i zwrot linii pola magnetycznego.










PRACA DOMOWA

*Wyszukaj informacje w Internecie dotyczące elektromagnesów i ich zastosowania w technice.*

# Temat: Siła elektrodynamiczna.

**Cel ogólny:** uczeń dowiaduje się, że na przewodnik, przez który przepływa prąd umieszczony w polu magnetycznym, działa siła elektrodynamiczna.

**Cele ogólne:**

- uczeń:
  - wymienia wielkości fizyczne, od których zależy siła elektrodynamiczna,
  - korzysta z reguły lewej dłoni do wyznaczania zwrotu i kierunku siły elektrodynamicznej,
  - omawia zastosowanie działania siły elektrodynamicznej, np. w miernikach, silnikach elektrycznych,
  - opisuje zamianę energii elektrycznej w mechaniczną zachodzącą w silnikach elektrycznych,
  - poznaje zasady bezpiecznego korzystania z urządzeń elektrycznych.

**Metody**

- *poszukująca:* rozmowa, zadawanie pytań;
- *praktyczna*: wykonywanie doświadczeń, uzupełnianie kart pracy.

**Formy pracy**

- grupowa,
- indywidualna.

**Środki dydaktyczne:**

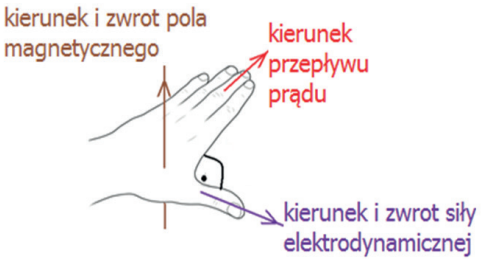
- z zestawu Low-Tech kit: silniczek z jedną pętlą, magnes neodymowy, bateria 1,5 V,
- kreda, tablica,

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| **1. Rozpoczęcie.** | |
| – Wita uczniów i sprawdza obecność. | – Zajmują miejsca. |
| – Pyta, czego dotyczyła poprzednia lekcja. | – Przewidywana odpowiedź: zjawiska powstawania pola magnetycznego wokół przewodnika, przez który przepływa prąd elektryczny. |
| – Pyta, kto odkrył to zjawisko. | – Przewidywana odpowiedź: Oersted. |
| – Pyta, jak można zaobserwować to zjawisko. | – Przewidywana odpowiedź: potrzebny jest przewód, bateria i kompas. Po podłączeniu przewodu do baterii można zauważyć, że wskazówka kompasu się ustawia się po chwili prostopadle do przewodu. |

**się ustawia się**

– karty pracy z instrukcjami, poleceniami i zadaniami.

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| **2. Rozwinięcie lekcji.** | |
| – Dzieli uczniów na grupy 3–4-osobowe. Każda grupa otrzymuje zestaw – silniczek, a wszyscy uczniowie karty pracy. Karty pracy obejmują: instrukcje, zadania i pytania. Informuje o obowiązkowym uzupełnianiu kart pracy oraz wykonaniu pierwszych pięciu poleceń. | – – Słuchają. **- Słuchają** |
| – Kontroluje pracę uczniów. | – Wykonują polecenia zawarte w karcie pracy i ją uzupełniają. |
| – Sprawdza poprawność rozwiązań pierwszych pięciu poleceń i dokładnie je omawia. Podaje temat zajęć. | – Sprawdzają poprawność odpowiedzi. Poprawiają ewentualne błędy. Zapisują temat. |
| – Pyta, co może powodować obracanie się silniczka. | – Przewidywana odpowiedź: działanie pewnej siły, przyczyną ruchu jest działanie siły. |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| – Wyjaśnia, że tą siłą jest siła elektrodynamiczna. Jest to siła, która działa na przewód z prądem znajdujący się w polu magnetycznym. | – Słuchają. Uzupełniają ćwiczenie szóste z kart pracy. |
| – Pyta, czy możliwe jest wyznaczenie kierunku działania siły. | – Przewidywana odpowiedź: jest to możliwe, niemożliwe. |
| – Pyta o regułę poznaną na poprzedniej lekcji. | – Przewidywana odpowiedź: reguła prawej dłoni. |
| – Pyta o nazwę reguły do wyznaczania kierunku i zwrotu siły elektrodynamicznej. | – Przewidywana odpowiedź: reguła lewej dłoni. |
| – Omawia regułę lewej dłoni. Rysuje schemat na tablicy.<br>  <br> | – Słuchają. Uzupełniają schemat zamieszczony w ćwiczeniu siódmym – karta pracy. |
| – Zleca uczniom wykonanie ćwiczenia ósmego z kart pracy. | – Próbują rozwiązać ćwiczenie. |
| – Sprawdza poprawność rozwiązania. Rysuje prawidłowe odpowiedzi na tablicy. | – Sprawdzają swoje rozwiązania. Poprawiają ewentualne błędy. |
| – Omawia praktyczne zastosowanie działania siły elektrodynamicznej w miernikach – amperomierzach, woltomierzach i silnikach elektrycznych. Pokazuje ich schematy. | – Słuchają. |
| – Zadaje pracę domową: znajdź w domu urządzenia, które mają silniki elektryczne i zrób ich listę. | – Zapisują pracę domową. |

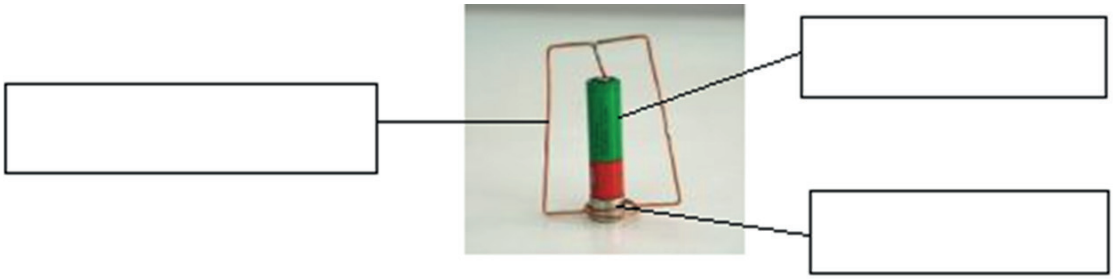
| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| **3. Zakończenie** | |
| – Podsumowuje pracę uczniów na lekcji, wstawia oceny. Żegna się z uczniami. | – Żegnają się z nauczycielem. |

## KARTA PRACY

Imię i nazwisko: _____ Klasa _____ Data_____

Temat zajęć _____

1. Na rysunku przedstawiono sposób ustawienia – połączenia silniczka. W jego skład wchodzą m.in. magnes neodymowy, bateria 1,5 V, przewód. Podpisz element zaznaczone na rysunku.



2. Na rysunku przedstawiono model_____.
To urządzenie zamienia energię _____ w energię _____.

3. Co się dzieje po ustawieniu zestawu elementów tak, jak pokazano to na zdjęciu?

_____

_____

4. Odwróć magnes. Postaw na nim baterię. Co się dzieje?

_____

_____

_____

5. Odwróć baterię i postaw na magnesie. Co się dzieje?

_____

_____

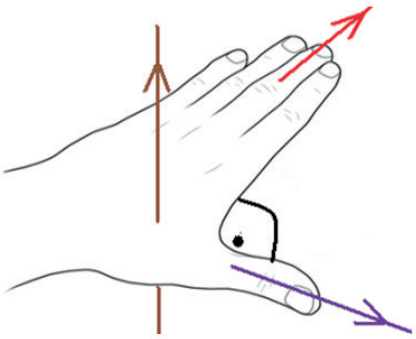
_____

6. Silniczek się obraca, ponieważ _____

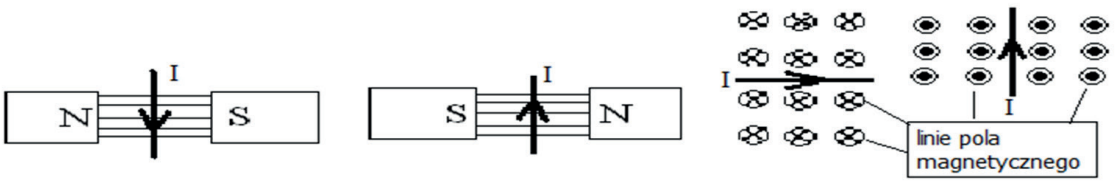
_____

_____

7. Uzupełnij rysunek ilustrujący regułę lewej dłoni.

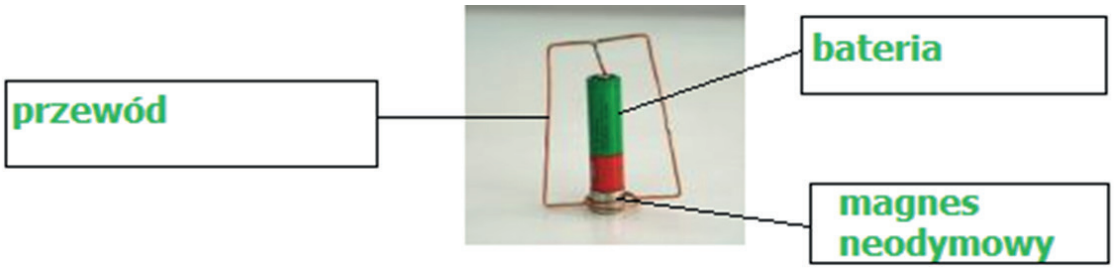


8. Korzystając z reguły lewej dłoni, wyznacz kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.



## KARTA PRACY z przewidywanymi odpowiedziami

1. Na rysunku przedstawiono sposób ustawienia – połączenia silniczka. W jego skład wchodzą m.in. magnes neodymowy, bateria 1,5V, przewód. Podpisz element zaznaczone na rysunku.




2. Na rysunku przedstawiono model *silnika elektrycznego.* To urządzenie zamienia energię *elektryczną* w energię *mechaniczną.*

3. Co się dzieje po ustawieniu zestawu elementów tak, jak pokazano to na zdjęciu?
Silniczek zaczyna się obracać i się kręci, dopóki nie spadnie z baterii.

4. Odwróć magnes. Postaw na nim baterię. Co się dzieje?
Silniczek też się obraca, ale w przeciwną stronę niż poprzednio.

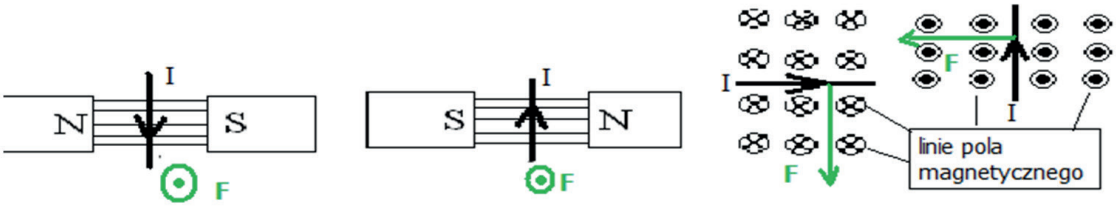
5. Odwróć baterię i postaw na magnesie. Co się dzieje?
Silniczek również się obraca, ale w tą samą stronę, co za pierwszym razem.

6. Silniczek się obraca, ponieważ *działa na niego siła elektrodynamiczna.*

7. Uzupełnij rysunek ilustrujący regułę lewej dłoni.




8. Korzystając z reguły lewej dłoni wyznacz kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.



# Temat: Zjawisko indukcji elektromagnetycznej.

**Cel ogólny:** uczeń dowiaduje się, że prąd indukcyjny powstaje pod wpływem zmiennego pola magnetycznego.

**Cele operacyjne:**

- uczeń:
  - buduje proste obwody, w których wywołuje przepływ prądu indukcyjnego przez użycie,
  - pokazuje różne sposoby wzbudzania prądu indukcyjnego,
  - nazywa i rozumie przemiany energii zachodzące w prądnicy,
  - wyjaśnia, jak działa prosty model prądnicy np. dynamo rowerowe.

**Metody:**

- *poszukująca:* rozmowa, zadawanie pytań,
- *praktyczna*: wykonywanie doświadczeń, uzupełnianie kart pracy.

**Formy pracy:**

- grupowa,
- indywidualna.

**Środki dydaktyczne:**

- z zestawu KDF UMK Low-Tech kit: rurka miedziana, rurka plastikowa, rurka miedziana z nacięciami, magnes neodymowy,
- schemat dynama rowerowego (może być zamieszczony w krótkiej prezentacji),
- tablica, kreda,

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIA |
|---|---|
| **1. Rozpoczęcie** | |
| – Wita uczniów i sprawdza obecność. | – Zajmują miejsca. |
| – Pyta, czego dotyczyła poprzednia lekcja. | – Przewidywana odpowiedź: siły elektrodynamicznej. |
| – Pyta, kiedy działa siła elektrodynamiczna. | – Przewidywana odpowiedź: siła elektrodynamiczna działa na przewód, przez który płynie prąd i znajduje się w polu magnetycznym. |

– karty pracy z instrukcją i poleceniami.

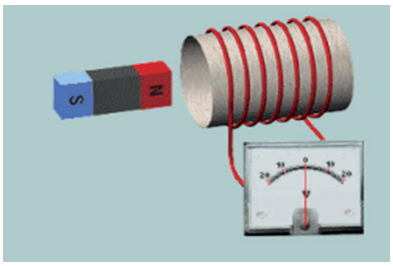
| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIA |
|---|---|
| **2. Rozwinięcie lekcji** | |
| – Dzieli uczniów na grupy 3–4-osobowe. Każda grupa otrzymuje element zestawu Low-Tech kit i karty pracy. W kartach pracy znajdują się: instrukcje, pytania i zadania. Informuje o obowiązkowym uzupełnianiu kart pracy oraz wykonaniu pierwszych pięciu zadań. | – Słuchają. |
| – Kontroluje pracę uczniów. | – Wypełniają instrukcje. Zapisują odpowiedzi w kartach pracy. |
| – Sprawdza poprawność rozwiązania pierwszych trzech poleceń. | – Sprawdzają poprawność rozwiązań. Ewentualne błędy poprawiają. |
| – Wykonuje czwarte doświadczenie. | – Samodzielnie wykonują czwarte doświadczenie. |
| – Pyta o to, co zaobserwowali uczniowie. | – Przewidywane odpowiedzi: magnes najszybciej spadał przez rurkę plastikową, a najwolniej przez miedzianą; w rurce miedzianej poruszał się w dziwny sposób – tak jakby płynął, lewitował itp. |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIA |
|---|---|
| – Wyjaśnia, że w wykonywanych doświadczeniach uczniowie obserwowali zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Zjawisko to jest spowodowane ruchem magnesu wewnątrz rurek miedzianych i aluminiowej. Poruszający się magnes wywołuje powstanie wewnątrz rurki prądu indukcyjnego, który w tych przypadkach jest nazywany prądem wirowym. Prąd wirowy wytwarza pole magnetyczne, które przeciwstawia się ruchowi magnesu wewnątrz rurki. | – Słuchają. Zapisują odpowiedzi w kartach pracy w zadaniu piątym. |
| – Wyjaśnia, że można wyznaczyć kierunek indukowanego pola magnetycznego, korzystając z reguły Lenza. Reguła ta mówi, że kierunek indukowanego pola magnetycznego jest przeciwny do przyczyny, która go wywołała. | – Słuchają i uzupełniają treść reguły Lenza w kartach pracy. |
| – Omawia zastosowania indukcji elektromagnetycznej w technice. Wyjaśnia zasady działania prądnicy, tzn. że jest to urządzenie, które zamienia energię mechaniczną w elektryczną. Pokazanie schematu rowerowego dynama i omówienie, jak ono działa. | – Słuchają i uzupełniają zadanie siódme z kart pracy – schemat dynama rowerowego. |
| – Zadaje pracę domową, która jest zapisana na kartach pracy. | – |
| **3. Zakończenie.** | |
| – Podsumowuje pracę uczniów na lekcji, wstawia oceny. | – Żegna się z uczniami. |

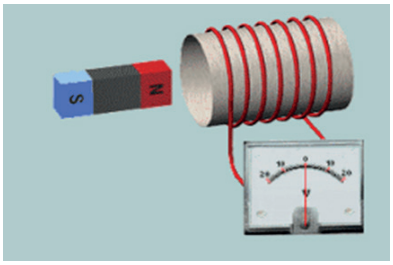
# KARTA PRACY

1. Połączono cewkę z miernikiem.

a) Szybkim ruchem zbliż do cewki magnes. Zaobserwuj i zaznacz na rysunku, w którą stronę wychyliła się wskazówka miernika.




b) Odsuń magnes szybkim ruchem od cewki. Zaobserwuj i zaznacz, jak wychyliła się wskazówka miernika.




WNIOSEK:

_____

_____

2. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na

_____

_____

_____

3. Korzystając z cewek o różnej liczbie zwojów, zbudujemy układy podobne do powyższego. Sprawdź, jak:

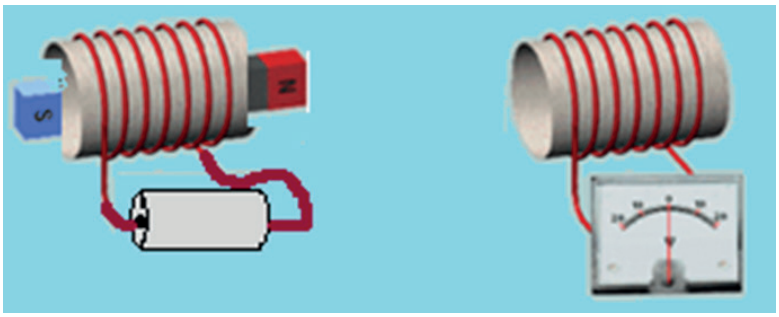
a) liczba zwojów cewki wpływa na wskazania miernika?

_____

b) szybkość, z jaką poruszamy magnesem, wpływa na wskazania miernika?

_____

4. Na rysunku przedstawiono schemat doświadczenia.



WNIOSEK:

_____

_____

_____

5. Reguła Lenza: pole magnetyczne prądu indukcyjnego zawsze

_____ przyczynie, która ten prąd _____.

6. W trzy rodzaje rurek – plastikową, aluminiową i miedzianą wrzucamy magnes neodymowy. Obserwujemy ruch magnesu w każdej rurce.

WNIOSEK:

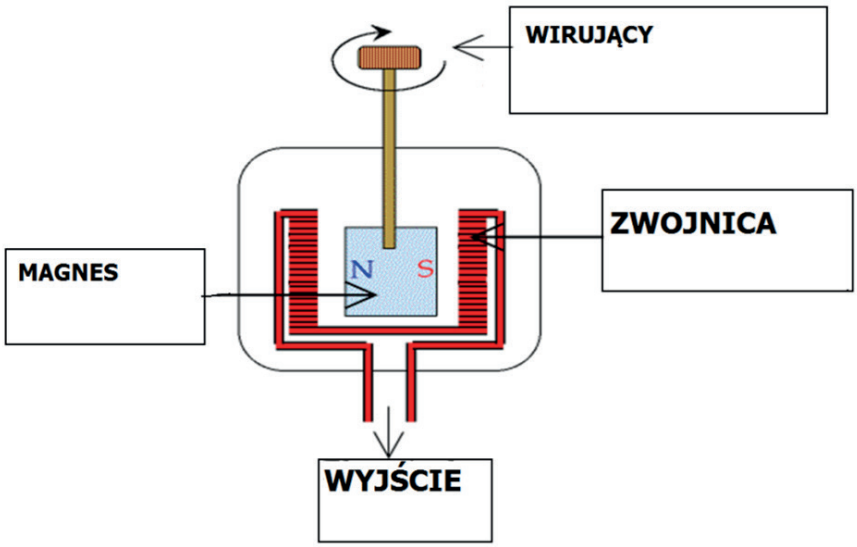
_____

_____

_____

7. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej jest wykorzystywane w urządzeniach nazywanych _____. W tego typu urządzeniach energia _____ jest zamieniana w energię _____. Przykładem takiego urządzenia jest _____.

8. Podpisz elementy urządzenia przedstawionego na rysunku




PRACA DOMOWA

1. Magnes sztabkowy, spadając, przelatuje przez środek aluminiowego pierścienia (umocowanego na statywie równolegle do podłogi).

a) Czy prąd indukcyjny w pierścieniu będzie płynął stale w tę samą stronę?

_____

_____

_____

b) Jak wpłynie na ruch magnesu prąd indukcyjny płynący w pierścieniu?

_____

_____

_____

c) Czy prąd indukcyjny będzie płynął w pierścieniu po upadku magnesu na podłogę?

_____

_____

_____

2. W której z sytuacji wymienionych poniżej zajdzie zjawisko indukcji elektromagnetycznej?

a) W pobliżu zwojnicy leży silny magnes.
b) Zbliżamy zwojnicę do elektromagnesu.
c) Elektromagnes leży obok zwojnicy. Włączamy i wyłączamy w nim prąd.
d) W pobliżu cewki znajduje się elektromagnes, przez który płynie prąd stały.

# Temat: Stos Volty i ogniwa wodorowe[1]

**Cel ogólny**: zrozumienie zjawisk konwersji energii w ogniwach elektrochemicznych.

**Cele szczegółowe (wiedza):**

- Stos Volta przekształca „energię chemiczną" bezpośrednio w elektryczność.
- Proces polega na utlenianiu i redukcji atomów/jonów na elektrodach.
- Każdy pierwiastek chemiczny, w tym tlen i wodór, ma właściwe miejsce w szeregu Volty.
- FCH opiera się na tej samej zasadzie co stos Cu/ Zn, ale wykorzystuje gazy, a nie metale.

**Cele specjalne (kompetencje społeczne):**

- Stosy elektrochemiczne, po ponad 200 latach od odkrycia pozostają głównym „źródłem energii" dla telefonów komórkowych, tabletów, a także samochodów (jako akumulator Pb).
- Wiedza na temat ich używania (i pozbywania się) jest przydatna.
- Przekształcenie stosu Volty w stos H/O nie jest koncepcyjnie trudny: eksperyment nawet dla dzieci.
- „Ogniwo paliwowe" oznacza, że pierwiastki chemiczne mogą być dostarczane w sposób ciągły, inaczej niż elektrody metalowe w stosie Volty.

**Sprzęt eksperymentalny:**

- eurocenty (monety), folia kuchenna Al, miękki papier toaletowy, sól,
- nowe i używane baterie „paluszki" (typu AA),
- woltomierz z przewodami i krokodylkami,
- prawdopodobnie – zasilacz niskiego napięcia 0–5 V (i 1 A),

UE

[1] W nomenklaturze anglojęzycznej Fuel Cell Hydrogen. Scenariusz opracowany w ramach projektu EU „FCHGo"

– ewentualnie – pary płytek Zn/Cu (do eksperymentu z „ludzką baterią").

**Metody pracy:**

1. Wykład poprowadzony przez nauczyciela i/lub personel projektu UE EU FCHGo oraz odpowiadanie na pytania (jedna lekcja).
2. Eksperymenty z elektrolizą i stosem Volty (połowa lekcji).
3. Dyskusja z uczniami i podsumowanie (połowa lekcji).

**Formy pracy:**

– lekcja panelowa (45 minut)
– ćwiczenia praktyczne i dyskusja (45 minut)

**Materiały dydaktyczne**

– prezentacja Power Point „Stos Volty" (lekcja),
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/fchgo/EPDM/FCHgo_3_Volta.ppt

– proste urządzenia eksperymentalne, patrz Tesaurus:
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/fchgo/EPDM/FCHGo_Thesaurus_Exp.pdf

– aktualne informacje z prasy i Internetu (fchgo.eu).

# Scenariusz lekcji (2 x 45 minut)

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| **Wprowadzenie** (10 minut) | |
| „Ogniwa paliwowe stanowią nową technologię, ale zostały wynalezione w 1839 r. podczas eksperymentów z elektrolizą wody. Powyższe eksperymenty były możliwe dzięki zbudowaniu elektrochemicznego stosu Volty ”. | W każdym telefonie komórkowym znajduje się ogniwo. Czy potrafisz odczytać napięcie z tyłu? |
| – Co wiesz na temat „źródeł energii” w swoich telefonach komórkowych? A baterie w zegarkach i zegarach?<br>– Jakie rodzaje „baterii” znasz?<br>– Skąd pochodzi, według Twojej opinii, energia „wyprodukowana” w akumulatorze? | – Uczniowie podają przykłady.<br>– Odpowiedzi uczniów „z wolnej ręki”. |
| **Rozwinięcie** (35 minut) | |
| – Nauczyciel pokazuje prezentację „Stos Volty” dotyczącą:<br>– historycznej ścieżki między Galvanim a Voltą w celu określenia źródła energii elektrycznej w eksperymentach z żabami Galvaniego,<br>– pierwszej próby Volty połączenia „źródeł energii elektrycznej” w szereg jako przykład innowacyjnego pomysłu,<br>– szczegółów funkcjonowania (procesów elementarnych) stosu Zn / Cu,<br>– stosu Daniella z oddzielonymi obszarami anody i katody jako prototypu FCH,<br>– elektrochemicznego szeregu pierwiastków Volty oraz miejsca w niej O i H. Definicja „elektrody odniesienia”, która bardzo przypomina anodę w FCH. | – Uczniowie robią notatki i robią zdjęcia (stos Daniella, eksperymenty Galvaniego).<br>– Uczniowie podają przykłady znanych rodzajów, kształtów i zastosowań stosu Volty. |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| **Przerwa** (10 minut) – możliwa obserwacja sprzętu | |
| | |
| **Praca laboratoryjna (25 minut)** | |
| – Prosty praktyczny eksperyment ze stosami Volty<br>– „Bateria ludzka": „Ostrożnie poliż lewą dłoń, a następnie trzymaj czerwoną płytkę (Cu), nie dotykaj drutu; teraz poliż prawą dłoń i trzymaj w niej szarą płytkę (Zn)". Obwód jest zamknięty woltomierzem (patrz plik tezaurusa).<br><br>„Jeśli zaprosisz te pięć dziewczyn na imprezę, możesz uruchomić telefon komórkowy z baterią!"<br>Przeanalizuj, jaki potencjał wytwarza jedna para płytek i co powinno zostać wyprodukowane zgodnie z szeregiem Volty. Identyczne ograniczenia dotyczą wydajności FCH. | 1) Owiń połowę monety 5 eurocentów folią Al i połóż ją na czubku języka: powtórzyłeś sposób, w jaki Volta mierzył „napięcie" bez woltomierza.<br>2) Ułóż stos płytek Fe/Cu, z każdą drugą parą oddzieloną kawałkiem papieru zwilżonym solanką (słona woda) – zmierz napięcie woltomierzem w stosunku do liczby par; zidentyfikuj biegun dodatni i ujemny; odnoszą się do szeregu Volty.<br>**odnosząc się** |
| – Praca w parach: „mierz potencjały Volty między różnymi metalowymi przedmiotami, np. temperówką Al z ostrzem itp. (10 minut).<br>**z ostrzem itp. „- zamknij cudzysłow** | – Uczniowie omawiają i porównują swoje obserwacje. |
| | |
| **Podsumowanie** (15 minut) | |
| – Pytania:<br>• Czego się dzisiaj nauczyłeś?<br>• Jaka jest zasada działania stosu Volty?<br>• Czy „energia elektryczna" jest równa zeru? | – Odpowiedź ucznia w kolejności liniowej: podać przykłady zastosowań stosów elektrochemicznych. Pamiętaj, że 200 lat temu był to drogi i bezużyteczny wynalazek. |

| CZYNNOŚCI NAUCZYCIELA | CZYNNOŚCI UCZNIÓW |
|---|---|
| Pytanie, na które należy odpowiedzieć indywidualnie: „Czy wiemy wszystko na temat elektrochemii?”, „Kto otrzymał nagrodę Nobla w dziedzinie chemii w 2019 roku?” | – Studenci wyszukują w Internecie różne rodzaje „stosów” lub „baterii”. |

## PRACA DOMOWA

kilku

– Poszukaj w domu kilka zużytych baterii: skopiuj informacje o ich budowie, sprawdź szczegóły w Internecie.
– Wykonaj próbę domowej wersji elektrolizy: napełnij szklankę wodą i wrzuć do niej baterię „paluszek” (AA). Obserwuj bąbelki. Dodaj trochę soli do wody. Sprawdź bąbelki – określ efektywny biegun ujemny i dodatni ogniwa. Porównaj nowe i używane ogniwo. Zapisz wnioski.

**Literatura: fchgo.eu** (strona projektu)

http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/857 (strona główna EDPM)

[1] Prezentacja: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/fchgo/EPDM/FCHgo_3_Volta.ppt

[2] Eksperymenty:
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/fchgo/EPDM/FCHgo_3_Volta_Exp.ppt
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/fchgo/EPDM/Activity%20FCHGo_11_12.pdf
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/fchgo/EPDM/ActivityFCHGo_13_14.pdf

[3] H. Fuchs, materiały dydaktyczne, fchgo.eu

[4] G. Karwasz et al. *Samochód na wodę*,
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/fchgo/Samochod_ENG.pdf

[5] G. Karwasz, lekcje on-line,
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/857

ROZDZIAŁ IV

# Artykuły dydaktyczne

Autorzy:

***Stara, poczciwa maszyna (elektrostatyczna)***
Magda Sadowska, Grzegorz Karwasz

***Eksperymentalne wariacje na temat prawa Lenza***
Andrzej Karbowski, Krzysztof Służewski,
Kamil Fedus, Grzegorz Karwasz

***Samochód na wodę***
G. Karwasz, K. Wyborska,
A. Karbowski, A. Kamińska, T. Bury

# Stara, poczciwa maszyna (elektrostatyczna)

Magda Sadowska, Grzegorz Karwasz
Zakład Dydaktyki Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

## Część I. Jak działa maszyna

Większość szkół posiada „z lepszych czasów" poczciwe maszyny elektrostatyczne produkcji Zakładów Pomocy Naukowych w Nysie. W wielu szkołach „już one nie działają". Okazuje się, że ich naprawa wcale nie jest trudna, a pożytek znaczny. Można za jej pomocą badać rozkłady pola elektrycznego i własności zjonizowanych gazów („plazmy"). Zacznijmy od zasady działania maszyny.

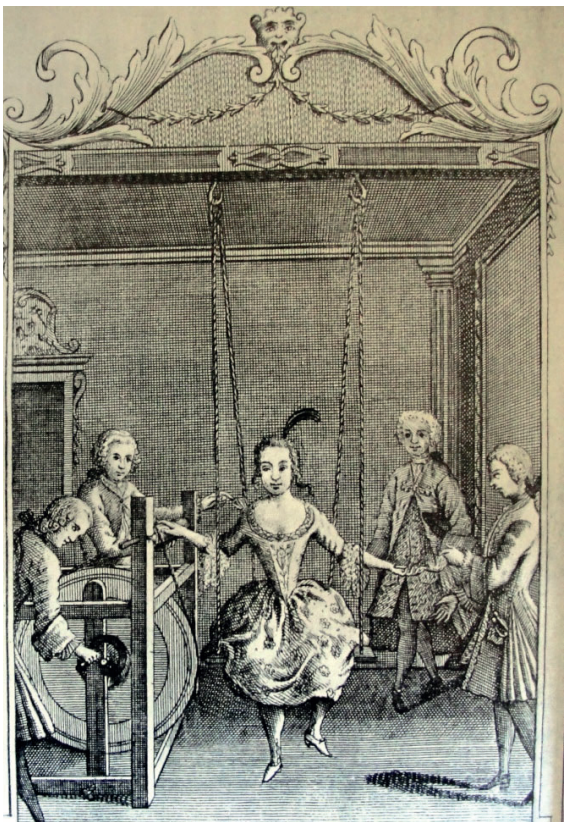
Maszyna elektrostatyczna to dwa plastikowe dyski wirujące w przeciwne strony. Z dysków są zbierane ładunki przeciwnego znaku i magazynowane w kondensatorach cylindrycznych. Kondensatory to dwie szklanki (dziś z plastiku) z wewnętrzną i zewnętrzną ścianką wyłożonymi metalową folią – coś w rodzaju butelki lejdejskiej (w oryginalnej butelce lejdejskiej zamiast wewnętrznej folii była woda). Na dyskach umieszczone są metalowe pinezki, które są pocierane przez również metalowe szczotki. Do zbierania ładunków służą dwa grzebienie, które obejmują tarcze, ale nie dotykają pinezek. Jeżeli maszyna nie działa, mimo że dyski wirują, zazwyczaj wystarcza poprawić szczotki i oczyścić (alkoholem) płyty, pinezki i grzebienie.

Działanie maszyny elektrostatycznej jest oparte na zjawisku tryboelektrycznym, a prościej: elektryzacji przez pocieranie. Elektryzacji przez pocieranie dotyczyła pierwsza praca Volty [1] – próbował on stworzyć „szereg elektrostatyczny", wyjaśniający, dlaczego niektóre ciała bardziej się elektryzują, a inne mniej. Szereg zawierał m.in. szkło, jedwab, żywicę (bakelitu Volta nie znał, a izolujące elementy do *elektroforu* produkował, gotując godzinami drewniane uchwyty w oleju), metale i siarkę. Nic z tego szeregu nie wynikało, ale przydał się (koncepcyjnie) do szeregu *elektrochemicznego*. Co więcej, do dziś nie bardzo wiemy, dlaczego szkło elektryzuje się ujemnie, a plexi dodatnio. Potrzebna byłaby zaawansowana teoria

elektronowa ciała stałego – dlaczego elektrony chętniej opuszczają jeden rodzaj izolatora, a przechodzą do drugiego. W porównaniu z potrzebną teorią „pocierania", teoria półprzewodników jest elementarnie prosta.

Pocieranie – to starożytny sposób elektryzacji. Legenda głosi, że nikczemny młodzieniec, który próbował dotknąć Arki Przymierza, został porażony piorunem. Rzeczywiście Arka zbudowana z dwóch złotych blach, przedzielonych drewnem mogła być pierwszą butelką lejdejską (kondensatorem z dielektrykiem między okładkami). Kapłani polerujący codziennie Arkę byli odizolowani od ziemi butami na grubych koturnach, ale bosy chłopiec – nie. Tyle legendy, faktem jest, że maszyna elektrostatyczna została wynaleziona stosunkowo niedawno, w 1878 roku, przez Jamesa Wimshursta. Pozostaje ona do dziś głównym przyrządem w szkolnej elektrostatyce (innym może być zapalacz piezoelektryczny [2]).

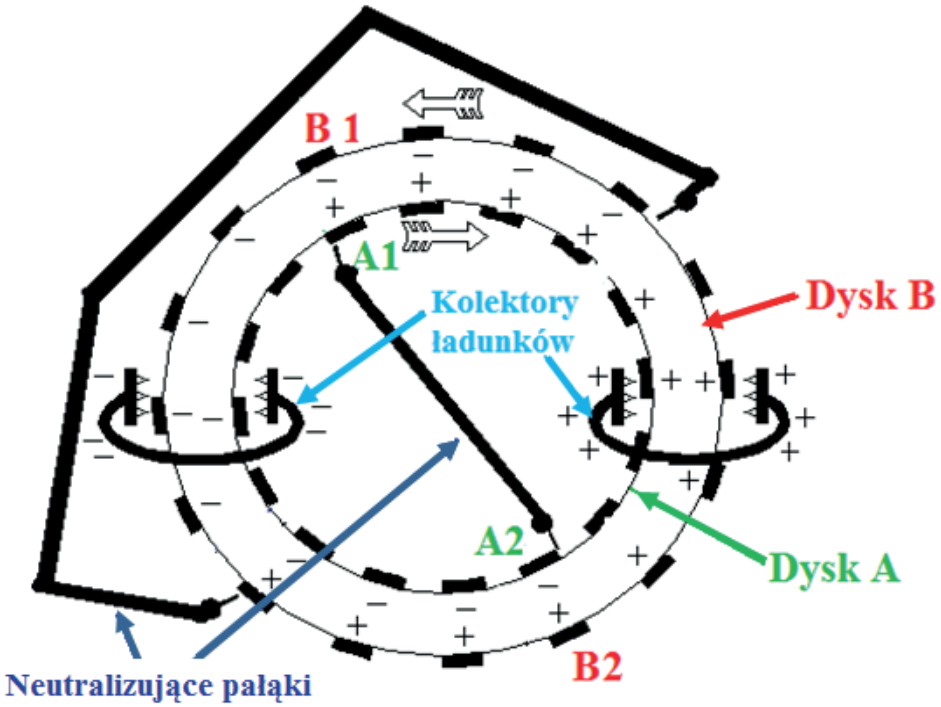
W 1667 roku pierwszą maszynę elektrostatyczną skonstruował Otto von Guericke (ten od półkul magdeburskich). Była nią obracająca się siarkowa kula, pocierana ręką. W XVII wieku cała arystokratyczna Europa bawiła się w elektryzowanie (rys. 1).



**Rys. 1.** Salonowe zabawy w XVII wieku. Pani zawieszona na izolujących linach elektryzuje się, dotykając prawą dłonią maszyny elektrostatycznej von Guericke. Pan, podając jej rękę, przeżywa mały wstrząs (elektryczny)

O ile w pocieraniu szmatką plastiku, następuje rozdział ładunków na dwa różne materiały (można sprawdzić obecność dwóch różnych znaków za pomocą dwóch elektrometrów), o tyle w maszynie elektrostatycznej dwa wirujące dyski są identyczne. Dlaczego jeden z nich miałby wytwarzać ładunek dodatni, a drugi ujemny? Zasada jest tak prosta jak jajko Kolumba (i podobnie trudna do znalezienia) – przedstawiamy ją na rys. 2.

Załóżmy, że na jednej z pinezek (nazwijmy ją nr A1), na dysku A powstanie chwilowo ładunek dodatni. Przez indukcję na pinezce naprzeciw (B1), na drugim dysku powstanie ładunek ujemny, a ładunek dodatni z tej drugiej pinezki popłynie przez pałąk (element 3 na rys. 2) na przeciwległą stronę dysku B, do pinezki (B2). Tam ten ładunek wyindukuje ładunek ujemny na dysku 1 (pinezka A2). Ale właściwie ładunek ujemny już tam był, bo przepłynął z pinezki A1 przez pałąk dysku A. Rozdział ładunków powstaje niejako samoczynnie, jeżeli wystąpiło początkowe naelektryzowanie się pinezki A.




**Rys. 2.** Schemat rozmieszczenia ładunków w maszynie elektrostatycznej Wimhurst'a [4]. Jeżeli na jednej z pinezek A1 powstanie ładunek dodatni, to przez indukcję na pinezce B1 naprzeciw (tj. na drugim dysku) powstanie ładunek ujemny

Ładunki poprzez pałąki mogłyby się szybko zneutralizować, ale pałąk w międzyczasie przesunął się na następną pinezkę. Pinezka unosi swój ładunek w kierunku grzebienia.

Jak zbierane są ładunki? Przez wyładowanie koronowe (o tym dalej). Pod jeden grzebień podpływają ładunki dodatnie, powstałe „dopiero co" na pinezkach dysku A, pod drugi ładunki ujemne, powstałe „dopiero co" na pinezkach dysku B. Oczywiście, gdyby nie było w pobliżu grzebienia 1, to ładunki na dysku A podróżowałyby dalej, aż do napotkania grzebienia 2. Ale tak nie jest. Ładunki dodatnie zbiera pierwszy napotkany grzebień, i podobnie dla dysku B, kręcącego się w drugą stronę, pierwszy napotkany grzebień (czyli grzebień nr 2).

Jakie napięcie wytwarza maszyna? Nawet kilkaset tysięcy woltów! Wystarczy obserwować długość przeskakującej iskry. W suchym powietrzu dla wytworzenia iskry o długości 1 cm potrzeba napięcia 30 kV.

Iskra jest przepływem prądu elektrycznego przez powietrze. W normalnych warunkach powietrze jest złym przewodnikiem prądu elektrycznego. Ale lampy jarzeniowe w klasie nad głową przewodzą prąd, a także zawierają gaz? Tak, jednak zanim się zapalą, najpierw „namyślają się, mruczą, buczą, błyskają". Tak, do pierwszego zapalenia potrzebne jest napięcie znacznie większe niż 220 V (wytwarzane przez obwód elektryczny z dużą cewką i przerywnikiem, tzw. starterem). Ale później wystarczy 220 V? Tak, i jest to napięcie, które pozwala elektronom emitowanym z jednej elektrody (a za 1/100 sekundy z drugiej) nawet na kilkakrotne *jonizowanie* gazu na długości rury jarzeniowej. Do jonizacji atomów wodoru wystarczą elektrony przyspieszone przez 13,6 eV, do jonizacji argonu (jeden z możliwych składników gazu w rurach jarzeniowych) 15,8 eV, a do jonizacji atomów rtęci (tak, jeden ze składników i lamp jarzeniowych, i „żarówek" energooszczędnych) tylko 10,4 eV.

Podobnie elektrony są emitowane z elektrod (pracującej) maszyny elektrostatycznej, jonizują powietrze, powietrze zaczyna przewodzić prąd i nagły przeskok dużego ładunku obserwujemy jako iskrę. Dość skomplikowana dynamika iskry (i pioruna) najlepiej jest opisana przez R. Feynmana [5]. Ładunek przenoszony przez iskrę nie jest duży – kilka tysięcznych kulomba, ale ponieważ trwa ona bardzo krótko (kilka mikrosekund), natężenie prądu jest rzędu 100 A. Nagły przepływ prądu rozgrzewa miejscowo powietrze i słyszymy trzask.

Iskra jest jednym z kilku typów *wyładowań elektrycznych* w gazie. Rodzaj wyładowania zależy od wielkości przyłożonego napięcia i przepływającego prądu, ale ten ostatni zależy zarówno od napięcia, jak i elektrod, a także rodzaju (i ciśnienia) gazu. Zmiennych jest więc wiele, a klasyfikacja wyładowań nieco umowna, zob. rys. w wersji internetowej artykułu.

Systematyczne badania przepływu elektronów przez gaz zapoczątkował w latach 20. XX wieku, pochodzący z Irlandii John Townsend. Badania te są bardzo intensywnie prowadzone przez wiele grup na świecie – nie tylko pod kątem budowania żarówek energooszczędnych, ale i np. telewizorów plazmowych (tam wyładowanie zachodzi przez warstwę dielektryka – nieprzewodzącą prądu!).

Kiedy ładunków w powietrzu jest mało, pewien prąd może płynąć, ale świecenia gazu nie widać. Inna rzecz, że do wywołania świecenia elektrony muszą mieć znowu *dostateczną* energię (energia niezbędna do *wzbudzenia* atomów lub drobin jest jednak znacznie niższa niż energia jonizacji; dla cząsteczkowego azotu najniższa energia wzbudzenia wynosi 6,2 eV). Kiedy elektrony przepływają, ale nie mają dostatecznej energii, aby wzbudzić do świecenia drobiny gazu, mówimy o wyładowaniu *ciemnym*. Skąd elektrony w takim wyładowaniu? Nieco elektronów w atmosferze powstaje z promieniowania kosmicznego, można by do jonizacji gazu użyć źródła radioaktywnego, wreszcie powietrze po burzy zawiera sporo jonów, stąd jego „świeży” zapach. Zwróćmy uwagę, że jony ujemne (jak $O_2^-$) powstają znacznie rzadziej niż jony dodatnie (jak $N_2^+$, czy $O_2^+$), zob. np. pracę [6], ale podobno dobrze wpływają na samopoczucie.



**Fot. 1.** Zorza polarna (sierpień 2006, Finlandia). Strumień elektronów docierających ze Słońca do Ziemi wzbudza drobiny gazu ($N_2$, $O_2$, NO), podobnie jak w kuli plazmowej

Nawiasem mówiąc, właściwości gazów są w wyładowaniach bardzo istotne.

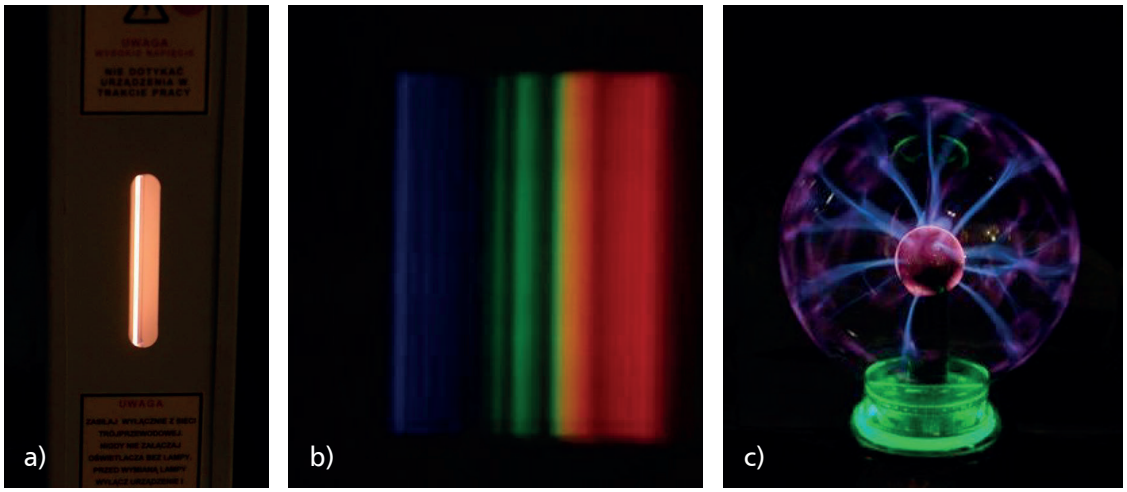
Dopiero kilka lat temu analiza [7] wyników przepływu elektronów w tlenku azotu NO w doświadczeniu typu Townsenda, kierowana przez jednego z autorów (GK), pozwoliła grupie teoretycznej w Australii wyjaśnić powstawanie kolorów w zorzy polarnej.

Zbieranie ładunków przez grzebienie maszyny elektrostatycznej korzysta dodatkowo z tzw. efektu ostrza. Przypomnijmy, że wszystkie elementy przewodnika metalicznego są zawsze naładowane do tego samego potencjału. Dlaczego więc w pobliżu ostrza powietrze jonizuje się bardziej niż w pobliżu dużej kuli? Wynika to z większego *natężenia* pola w pobliżu ostrza, a to z kolei z większej *gęstości powierzchniowej* ładunków na powierzchniach o małym promieniu krzywizny (tj. na ostrzach). Obliczenie nie jest zbyt trudne, więc odsyłamy Czytelnika do literatury [5] lub do wersji internetowej artykułu. Doświadczalnie sprawdzimy to nieco dalej.

Wyładowanie w pobliżu ostrza, przy dużym napięciu i małym przepływającym prądzie nazywamy wyładowaniem *koronowym*. Buczące w czasie mglistej pogody słupy wysokiego napięcia (220 kV i więcej) to właśnie wyładowanie koronowe z przewodów.

W rurach jarzeniowych, tych w klasie nad głową, ciśnienie gazu jest mniejsze od atmosferycznego (wynosi około 1/100 atmosferycznego), elektrony rzadziej więc napotykają atomy gazu, czyli między elektrodami mogą rozpędzić się do większych energii, łatwiej zatem jonizują gaz. Napięcie między elektrodami jest rzędu (zaledwie) setek woltów, a prąd rzędu dziesiątek miliamperów, co daje moc kilku- kilkudziesięciu watów.

Pięknie świecące rurki Plückera [8] to też przykład wyładowania *jarzeniowego*, przy odpowiednio dobranym ciśnieniu i geometrii wyładowania. W miarę wzrostu ciśnienia sznur *plazmy* w wyładowaniu jarzeniowym zawęża się i nie zajmuje całej szerokości rury. Tak właśnie wygląda wyładowanie w kuli plazmowej. Zauważmy, że kolory wyładowania w kuli plazmowej (też azot, jak w pokazanej rurce Plückera) są inne – inne mechanizmy dominują w wyładowaniu i inne poziomy energetyczne drobiny $N_2$ (lub jej jonów) są wzbudzane. I w kuli plazmowej, i w rurze jarzeniowej gaz pozostaje chłodny (tj. w temperaturze pokojowej), mimo że świeci.




**Fot. 2.** Wyładowanie elektryczne w rurce Plückera w azocie [8] (a) i jego widmo uzyskane za pomocą okularów dyfrakcyjnych. (b) Rurki Plückera można by podłączyć do maszyny elektrostatycznej, ale tego nie polecamy. Dystrybutor rurek sprzedaje również bezpieczne do nich zasilacze. W kuli plazmowej (c) kolory są inne – są to już pojedyncze linie widmowe.

A pod ciśnieniem atmosferycznym? Wyładowanie ma dwie formy – iskry, kiedy napięcie jest duże, a prąd mały, lub *łuku* elektrycznego, kiedy prąd jest duży (a gaz gorący). W wysokiej temperaturze gaz jonizuje się również przez wzajemne zderzenia atomów. Ale jak zapoczątkować takie wyładowanie? To jest właśnie umiejętność spawaczy. Odpowiednie elektrody należy właściwie przyłożyć, aby zapoczątkować łuk elektryczny. Po jego zapoczątkowaniu elektrody natychmiast oddalamy na odległość kilku milimetrów. Parujący materiał elektrody i otuliny (np. z rutylu) oraz gorące powietrze jonizują się, opór elektryczny bardzo spada – płynie duży prąd (o natężeniu kilkunastu amperów), a do potrzymania wyładowania wystarczy już niskie (12–20V) napięcie. Wyładowanie jest bardzo jasne, ale świecenie to pochodzi głównie od *rozgrzanego* gazu jak w płomieniu świecy.

W drugiej części artykułu przeprowadzimy doświadczenia z maszyną i gazem zjonizowanym.

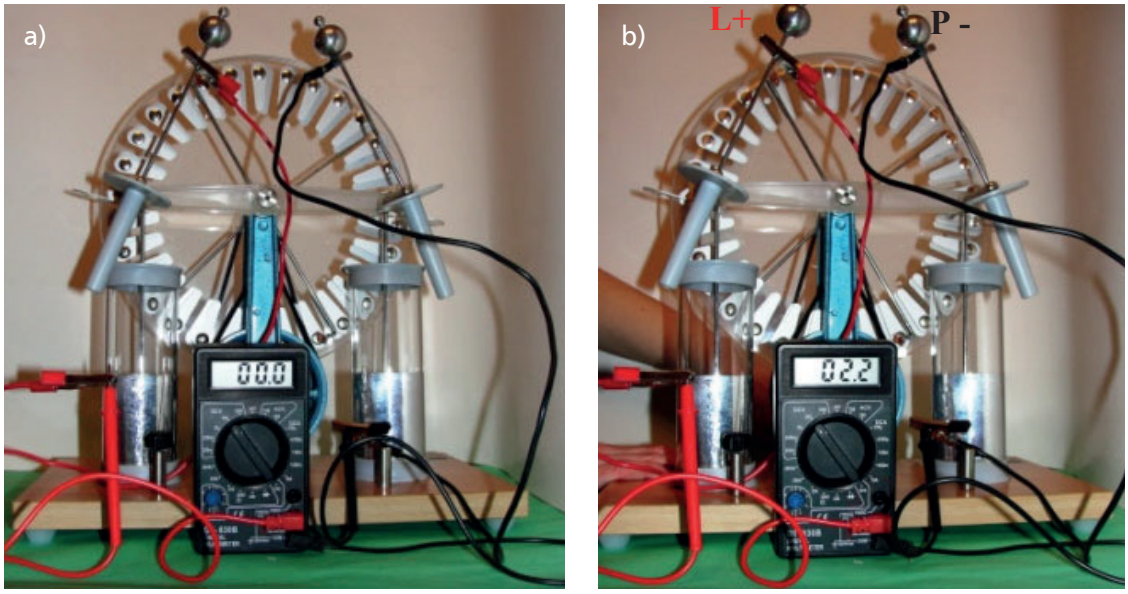
## Część II. Doświadczenia z maszyną Wimshursta

Co można zrobić z maszyną elektrostatyczną? Oczywiście piękne iskry. Najpiękniejsze iskry, przenoszące duży ładunek, uzyskujemy w mroźną, słoneczną pogodę: powietrze zawiera mało pary wodnej i słabo przewodzi prąd. Do zainicjowania wyładowania potrzebne jest duże napięcie, co oznacza (przy danej pojemności kondensatorów) duży zgromadzony ładunek. (Ostrzegamy tu i nauczyciela, i uczniów przed zbliżaniem się do maszyny, dotykaniem podstawy maszyny, a nawet stołu – wyładowania bardzo lubią „wędrować" po powierzchniach).

### *Ustalenie znaku ładunku gromadzonego na iskiernikach*

Często zdarza się, że maszyna działa tylko wtedy, gdy kręcimy korbą w jedną stronę. Wynika to z opisanego w pierwszej części „kapryśnego" nieco wytwarzania ładunków. Ale w zamian zazwyczaj kręcenie w jedną stronę zapewnia ładunki dodatnie na tej samej elektrodzie. Przed dalszymi doświadczeniami warto zidentyfikować, która z elektrod jest dodatnia. Dokonamy tego bardzo ostrożnie, z użyciem woltomierza.

Najpierw, upewniając się, że maszyna jest rozładowana, należy za pomocą krokodylków podłączyć przewody woltomierza, np. do iskiernika (ustalając na woltomierzu maksymalny zakres DC), a następnie zakręcić powoli korbą 1–2 razy (fot. 3). Znak napięcia zazwyczaj zależy od kierunku kręcenia maszyną. We wszystkich opisanych poniżej doświadczeniach korbą kręciliśmy w jedną stronę, dlatego też kulka iskiernika L zawsze miała niedobór elektronów, była więc naelektryzowana dodatnio, a kulka P – ujemnie.

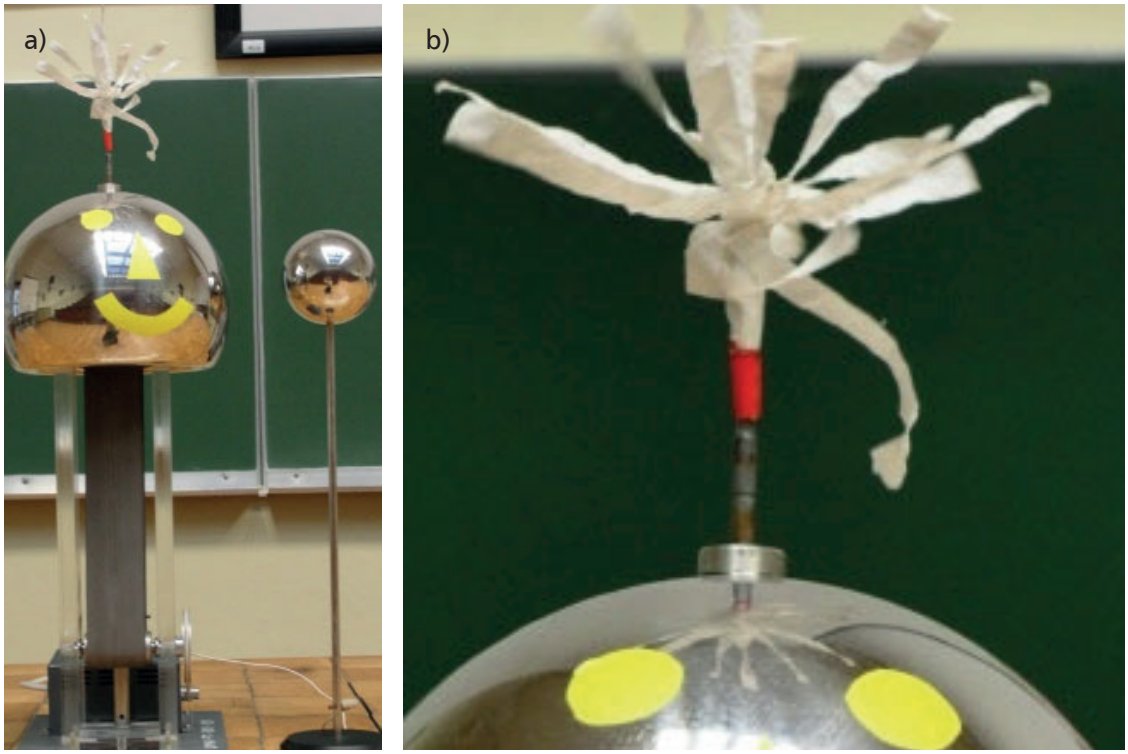



**Fot. 3.** Ustalenie znaku gromadzonego ładunku: mierzone napięcie jest dodatnie – lewy iskiernik jest elektrodą dodatnią. Mierzone napięcie jest małe, bo opór wewnętrzny woltomierza nie jest duży i płynie przez niego duży prąd – maszyna się rozładowuje

### *Pole elektryczne*

W odróżnieniu od pola magnetycznego, które łatwo pokazać za pomocą opiłków żelaza (lub innych czytników pola magnetycznego przez nas zaproponowanych [2, 9], linie pola elektrycznego trudniej pokazać. Przy napięciach rzędu milionów woltów, jak w generatorze van der Graffa (fot. 4), natężenie pola jest tak duże, że do pokazania linii pola wystarczą paski papieru (lub włosy na głowie, porównaj [10]).

Linie sił pola pochodzące od naelektryzowanej kuli można pokazać za pomocą generatora van der Graffa (fot. 4). Ale jak pokazać linie sił pola między dwoma ładunkami punktowymi?

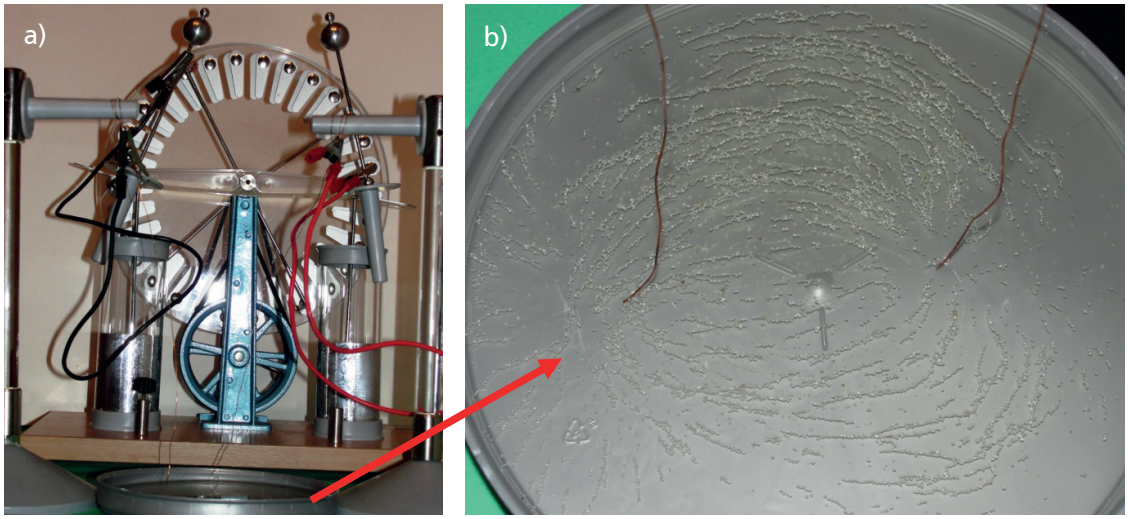



**Fot. 4.** a) Generator van der Graffa. b) Układ linii pola elektrycznego wytworzonego przez generator

Do pokazania linii pola elektrycznego skorzystamy z maszyny elektrostatycznej, kaszy manny, naczynia z olejem i elektrod.

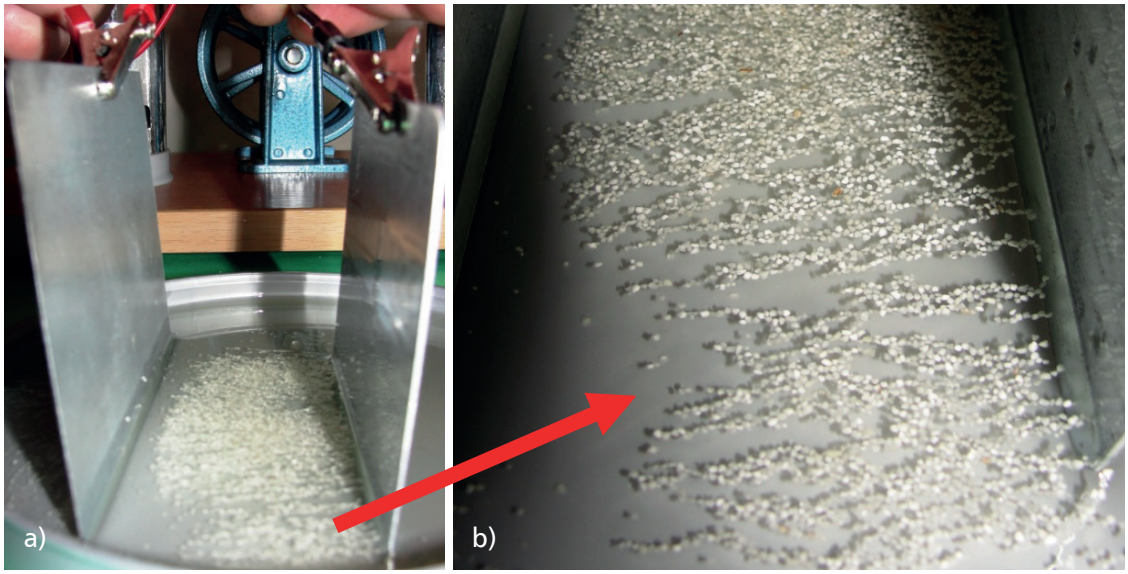
### *Doświadczenie: elektrody i kasza manna*

Do maszyny elektrostatycznej podłączamy dwie elektrody np. z miedzi lub folii aluminiowej. Do płytkiego naczynia wykonanego z izolatora wlewamy olej (np. rzepakowy) i uruchamiamy maszynę. Przerywamy pracę maszyny i olej posypujemy niezbyt dużą ilością kaszy manny (fot. 5). Jeśli będzie za dużo kaszy manny, linie sił pola będą słabo widoczne.




**Fot. 5.** a) Ustawienie zestawu doświadczalnego, b) linie pola elektrycznego między dwoma ładunkami punktowymi zobrazowane poprzez ułożenie kaszy manny

Dla elektrod punktowych linie sił pola przypominają rozkład pola między dwoma różnoimiennymi biegunami magnesu. Podobnie postępujemy w przypadku linii sił pola jednorodnego, między dwiema równoległymi płaskimi elektrodami (fot. 6).




**Fot. 6.** Obraz linii pola elektrycznego między dwiema równoległymi płytkami – elektrodami

Między dwiema płaskimi płytami (okładkami kondensatora płaskiego) linie pola elektrycznego są równoległe – pole jest *jednorodne*.

Aby wyjaśnić, na czym polega wyładowanie koronowe, zbadamy linie pola elektrycznego między ostrzem a płaską płaszczyzną. Jak widać na fot. 7, największa koncentracja linii występuje na ostrzu – natężenie pola jest tam największe.



**Fot. 7.** Kształt pola elektrostatycznego między płytką (z prawej strony) a krawędzią drugiej płytki, ustawionej prostopadle. Największą koncentrację linii obserwujemy na brzegu lewej płytki, podobnie jak na ostrzu. Polaryzacja elektrod nie ma znaczenia dla obserwowanego rozkładu pola, inaczej niż w wyładowaniu w gazach

### *Doświadczenia ze świeczką*

Typowe doświadczenia ze świeczką i maszyną elektrostatyczną polegają na obserwacji odchylania płomienia w polu elektrycznym. Ale zanim zaczniemy badać pole elektryczne za pomocą płomienia, zbadajmy sam płomień.

Jak pisaliśmy w pierwszej części artykułu, płomień świecy jest przykładem *plazmy*, to znaczy częściowo *zjonizowanego* gazu: niektóre cząsteczki w parach parafiny (i w powietrzu) rozgrzane do wysokiej temperatury (prawie tysiąca stopni Celsjusza w niektórych częściach płomienia) tracą elektrony. W płomieniu świecy znajdują się więc swobodne elektrony i cząsteczki gazu, które te elektrony straciły (czyli niosą ładunek dodatni). Takie cząsteczki nazywamy jonami. Łączny ładunek jonów oraz elektro-

nów kompensuje się, podobnie jak w roztworze wodnym soli kompensują się ładunki jonów dodatnich i ujemnych. Ale obecność tych jonów pozwala na przepływ prądu. Jeżeli płomień świecy to plazma, powinien przewodzić prąd elektryczny. Sprawdźmy to za pomocą maszyny elektrostatycznej.

1. Wiadomo, że po naładowaniu maszyny nie wolno jej jeszcze przez długi czas dotykać, zanim się nie rozładują kondensatory.

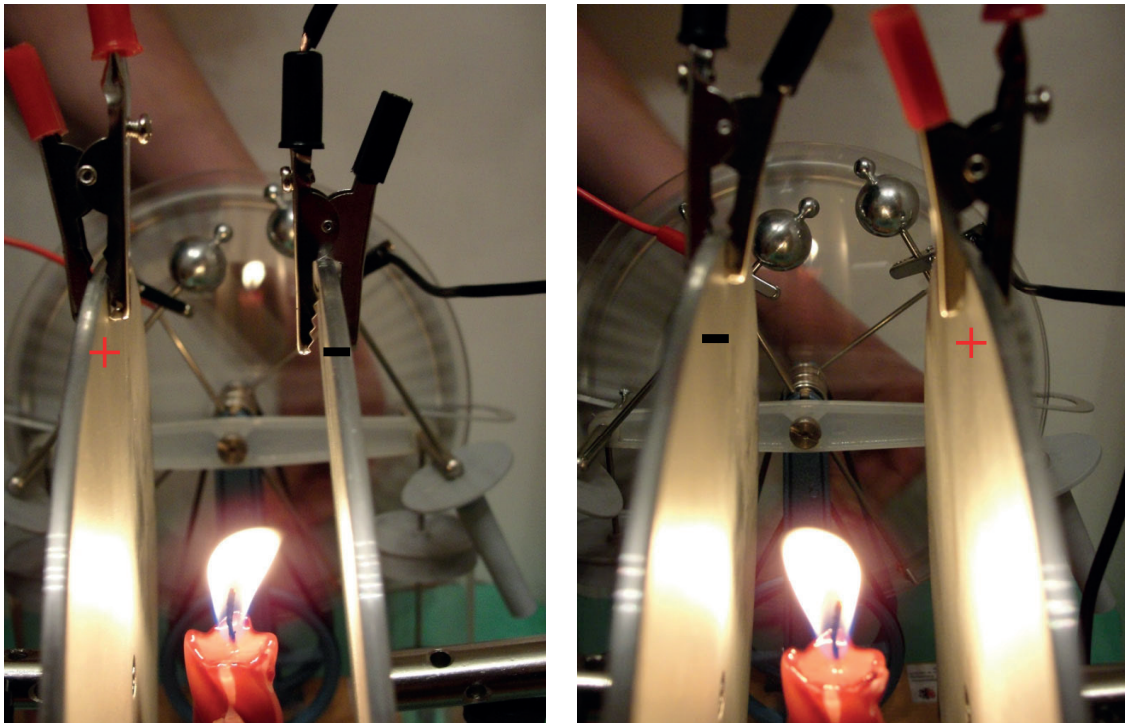
Doświadczenie polega na wstawieniu zapalonej świeczki między dwie równoległe płyty podłączone do maszyny (można wstawić świeczkę między kulki iskiernika, ale wówczas uczniowie widzą, że z płomieniem się coś dzieje, i mogą wyciągnąć niewłaściwe wnioski). Doświadczenie przeprowadzimy raz ze świeczką zgaszoną, drugi raz z zapaloną. Nie będziemy ze zrozumiałych względów dotykać iskiernika ręką, a oceny zgromadzonego ładunku dokonamy przez obserwację długości iskry.

Doświadczenie przeprowadzamy w ściśle określonej sekwencji, w sposób nie tylko *jakościowy*, lecz także *ilościowy*. Łączymy z maszyną elektrostatyczną metalowe płyty zamocowane na statywach (fot. 8). Między płyty kondensatora płaskiego wstawiamy świeczkę, ale na razie jej nie zapalamy. Zakręćmy korbką np. pięć razy i odczekajmy chwilę – np. 5 sekund, po czym zbliżamy do siebie kulki iskiernika tak, aby przeskoczyła iskra. Zapamiętujemy, jaka jest odległość kulek iskiernika, przy której przeskoczyła iskra.

Teraz, przy rozładowanej maszynie zapalamy świeczkę i powtarzamy te same czynności, w tej samej sekwencji czasowej. Tym razem, aby przeskoczyła iskra, kulki iskiernika muszą znajdować się znacznie bliżej. Gdzie podział się ładunek z maszyny? Przepłynął między płytami, korzystając z płomienia świecy jako przewodnika. W normalnym powietrzu jonów jest niewiele, nawet w plazmie wyładowania jarzeniowego nie więcej niż jeden na milion cząsteczek gazu (a w płomieniu jeszcze mniej). Ale ta ilość jonów już wystarcza do przepływu prądu.

2. Teraz spróbujmy zidentyfikować znak ładunków w płomieniu. Konfiguracja doświadczenia jest taka sama na fot. 8. Między płyty wstawiamy zapaloną świeczkę, po czym uruchomiamy maszynę. Płomień świecy rozszerza się, przyjmując kształt jakby kapelusza Napoleona. Jony zawar-

te w płomieniu poruszają się w polu elektrycznym, płomień odchyla się w kierunku elektrod. Ale kapelusz ten jest niesymetryczny – odchyla się bardziej w kierunku elektrody ujemnej!

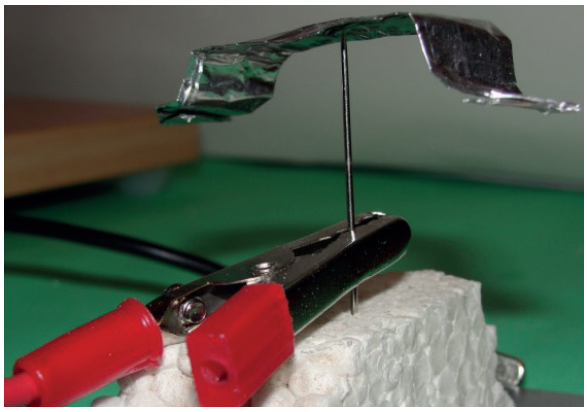



**Fot. 8.** Świeca umieszczona między metalowymi płytami w jednorodnym polu elektrycznym, w przypadku dwu różnych polaryzacji – płomień odchyla się zawsze w kierunku elektrody ujemnej

Jony dodatnie znajdujące się w płomieniu są przyciągane przez płytę naładowaną ujemnie. Tak, ale dlaczego płomień rozszerza się również w kierunku elektrody dodatniej? Wyjaśnienie pochodzi z badań naukowych nad wyładowaniami elektrycznymi w gazach. Elektrony, powstałe w płomieniu w wyniku jonizacji gazu, podążają do elektrody dodatniej, ale nie są widoczne. Jednak te poruszające się elektrony przez oddziaływanie elektrostatyczne „pociągają" za sobą również jony dodatnie. Zjawisko to nazywamy *dyfuzją bipolarną*. Jony dodatnie migrują razem z elektronami, ale wolniej niż te ostanie. Płomień odchyla się również w kierunku elektrody dodatniej, ale nie tak silnie jak w kierunku elektrody ujemnej.

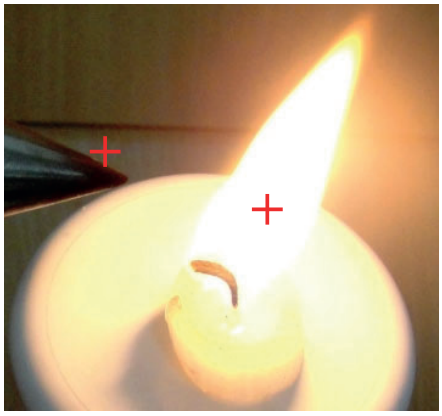
### *Młynek Franklina*

Jest to kolejne doświadczenie z maszyną elektrostatyczną. Pole elektryczne w pobliżu ostrzy jest na tyle duże, że cząsteczki powietrza otaczające ostrze jonizują się. Ostrza są przez jony odpychane i młynek się kręci. Ale dlaczego kręci się zawsze w jedną stronę, niezależnie, czy jest podłączony do dodatniego czy ujemnego bieguna maszyny? Zanim na to pytanie odpowiemy, zrobimy jeszcze jedno doświadczenie ze świeczką.



**Fot. 9.** Młynek Franklina zrobiony z igły i kawałka aluminium. Ostre zakończenia młynka są odpychane przez jony w powietrzu. Kierunek obrotu młynka nie zależy od jego polaryzacji (dodatniej czy ujemnej)

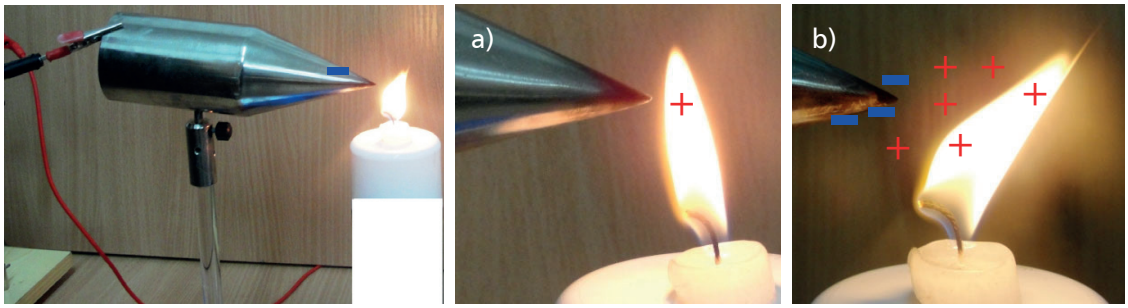
Zbadamy, jak zachowuje się płomień świecy w pobliżu ostrza podłączonego do maszyny elektrostatycznej (fot. 10).



**Fot.10.** Płomień świecy w pobliżu ostrza podłączonego do dodatniego bieguna maszyny elektrostatycznej.

Podobnie jak w poprzednim doświadczeniu płomień świecy odchyla się po podłączeniu ostrza do działającej maszyny elektrostatycznej. Zbadajmy, w którym kierunku. W przypadku ostrza podłączonego do dodatniego bieguna maszyny jest to proste: płomień będzie odpychany, fot. 10. A w przypadku podłączenia bieguna ujemnego? Zgodnie z poprzednim doświadczeniem, z płomieniem między płytami, powinien on być przyciągany. I tak jest rzeczywiście w przypadku małego napięcia na ostrzu (doświadczenie wymaga uziemienia drugiego bieguna maszyny).

Ale! W przypadku dużego napięcia na ostrzu (silnego pola) płomień jest wypychany również przez ujemnie naładowane ostrze! (A dokładniej, jak widać na fot. 11, jego mała część, najbliższa ostrzu jest nadal „wciągana" przez pole elektryczne).




**Fot. 11.** Badanie właściwości płomienia świecy w pobliżu ostrza połączonego do ujemnego bieguna maszyny elektrostatycznej a) w słabym polu, b) w silnym polu

Powód? Bardzo silne pole jest przyczyną emisji elektronów z ostrza (tzw. emisja polowa). Elektrony są przyspieszane do dużych prędkości (1 V napięcia przyspiesza elektrony do prędkości rzędu $10^5$ m/s). Z jednej strony elektrony pociągają jony dodatnie przez zjawisko dyfuzji bipolarnej. Z drugiej strony te wysokoenergetyczne elektrony, wystrzeliwane z ostrza, wielokrotnie jonizują gaz na swojej drodze. W pobliżu ostrza wytwarza się ładunek *przestrzenny* jonów dodatnich, który odpycha jony dodatnie w płomieniu[1].

[1] Wyjaśnienie należy traktować jako jakościowe. Zaniedbujemy możliwość powstawania jonów ujemnych w powietrzu w zjawisku *wychwytu dysocjacyjnego*. Przy-

### *Młynek Franklina (II)*

Niezależnie od tego, czy do młynka podłączony był biegun dodatni, czy ujemny, obracał się on w tę samą stronę. Teraz jesteśmy gotowi do wytłumaczenia tego zjawiska.

Silne pole elektryczne powoduje jonizację gazu. W przypadku ostrza ujemnie naładowanego są emitowane elektrony, które jonizują gaz w pobliżu ostrza. Dodatnie jony są przyspieszane w kierunku młynka, zderzają się z nim i przekazują swój pęd. W przypadku ostrza naładowanego dodatnio jest to jeszcze prostsze. Silne pole elektryczne jonizuje bezpośrednio cząsteczki powietrza („wyrywa" z nich elektrony). Dodatnie jony w powietrzu elektrostatycznie odpychają (dodatnio naładowany) młynek.

Wynika z tego rozumowania, że młynek kręci się z szybciej, gdy jest podłączony do bieguna dodatniego, w porównaniu z podłączeniem do bieguna ujemnego. Tak! Trudno ocenić prędkość młynka, ale można określić liczbę obrotów do jego zatrzymania się, po zatrzymaniu maszyny. Nam się wydaje, że młynek kręci się szybciej, kiedy jest podłączony do bieguna dodatniego, podobnie jak odchylenie płomienia świecy – większe przy dodatnio naładowanym ostrzu[2]. Wdzięczni bylibyśmy jednak za sprawdzenie doświadczenia przez innych nauczycieli.

### *Wahadło elektrostatyczne*

I wreszcie wahadło elektrostatyczne. Jest to bardzo efektowne doświadczenie, ale my go bardzo nie lubimy, bo jest niedydaktyczne. Brakuje podczas jego wykonywania istotnego komentarza: wahadło porusza się, ale nie powinno! Dokładniej, aby piłeczka terkotała między płytami, trzeba ją najpierw wprawić w ruch.

Umieszczamy piłeczkę pingpongową zawieszoną na nici między dwiema płytami podłączonymi do maszyny. Po uruchomieniu maszyny piłeczka

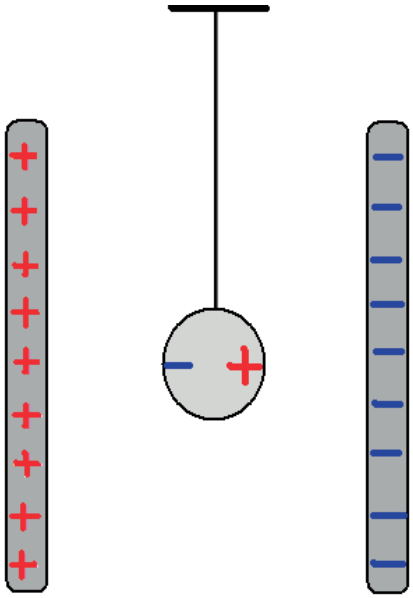
---

pominamy, że zjawiska związane z przepływem ładunków w gazach, szczególnie pod ciśnieniem atmosferycznym nadal są przedmiotem intensywnych badań doświadczalnych i modelowania teoretycznego [11].

[2] W przekazie pędu do młynka uczestniczą również elektrony. Ich masa jest znacznie mniejsza niż jonów, stąd ten przekaz jest mniejszy. Dla dokładnego opisu, ponownie potrzebne byłyby zaawansowane metody modelowania numerycznego.

nie waha się. Dlaczego? To jasne, piłeczka nie posiada ładunku elektrycznego. Co prawda w polu elektrycznym z dwóch stron piłeczki indukują się ładunki elektryczne przeciwnego znaku, ale są one dokładnie takie same.

Załóżmy, że piłeczka jest bliżej jednej z elektrod, na przykład dodatniej. Ładunek ujemny, wyidukowany od strony płyty dodatniej (zob. rys. 3) jest przyciągany przez płytę. Ale ładunek z drugiej strony piłeczki jest przyciągany przez drugą płytę. Oba ładunki są takie same, z tym że piłeczka jest bliżej płyty dodatniej, więc ta ją silniej przyciąga, prawda? Nic bardziej błędnego! Pole jest *jednorodne*, czyli siła działająca na ładunki jest *niezależna* od odległości od elektrod. Siły działające na piłeczkę, a pochodzące od płyty dodatniej i ujemnej są takie same. Jest to bardzo ważna charakterystyka tego doświadczenia.



**Rys. 3.** Elektryzowanie się piłeczki przez indukcję. Między płytami pole jest jednorodne (nie zależy od odległości od płyt), siły działające na piłeczkę się równoważą i, teoretycznie przynajmniej, bez zewnętrznej przyczyny (np. dmuchnięcia) piłeczka nie zacznie się sama poruszać

Aby piłeczka wahała się, należy ją delikatnie wprawić w ruch, tak żeby dotknęła jednej z płyt. W wyniku elektryzowania przez dotyk zyska pewien ładunek o tym samym znaku co dotknięta płyta i wskutek działania siły elektrostatycznej zostanie odepchnięta w kierunku drugiej płyty. Gdy ją dotknie, przekaże „swój” ładunek i ponownie, w wyniku elektryzowania

przez dotyk, zyska ładunek od drugiej płytki, zostanie odepchnięta itd. Ruch piłeczki związany jest ściśle z elektryzowaniem się przez dotyk i będzie trwać, dopóki piłeczka, czyli nasz transporter ładunków, nie rozładuje kondensatora.

Czasem podczas wykonywania tego doświadczenia piłeczka może się sama „rozbujać" – ale jak? Dopiero co pokazaliśmy, że jest to niemożliwe. No cóż, na tym polega piękno fizyki. Kulka obłożona jest folią aluminiową, na której powstają nierówności – malutkie ostrza. W pobliżu ostrza pole elektryczne jest silniejsze niż w przypadku gładkiej kuli. Zresztą sama obecność kulki modyfikuje rozkład pola między elektrodami (jeszcze raz polecamy *Wykłady Feynmana*). Teoria teorią, ale niejednorodności pola, wyładowanie ciemne, wyładowanie koronowe, przekaz pędu przez jony, ładunek przestrzenny itp., itd.

Reasumując, maszyna elektrostatyczna nie tylko służy do wytwarzania iskier, wydłużonego płomienia i terkotania piłeczki między płytami, lecz także pozwala na badanie plazmy w płomieniu, rozkładów pola elektrycznego, zjawisk emisji polowej, dyfuzji bipolarnej i zapewne wielu innych zagadnień równie zagadkowych.

Można przeprowadzić wiele innych doświadczeń z maszyną, ale należy uważać na bezpieczeństwo własne i uczniów. Obszerny zasób wiadomości znajdzie Czytelnik w pracy prof. H. Szydłowskiego [12].

Wersja internetowa artykułu, zawierająca dodatkowe schematy i wyjaśnienia znajduje się na stronie:

http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Magdalena_Sadowska/maszyna.html

## Bibliografia

[1] A. Okoniewska, G. Karwasz, *Źródła elektryczności*, Fizyka w Szkole, nr 5 (2003), s. 12, zob. też http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/zrodla/ogniwa.htm

[2] G. Karwasz i in., *Fizyka zabawek*, Wyd. Muzyczne „Soliton", 2005, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/zrodla/fizyczne.htm

[3] „1799: ... E la corrente fu. Duecento anni dalla dila di Volta", Wystawa plakatowa, Associazione Euresis, Katalog, Milano 1999, s. 13.

[4] http://www.coe.ufrj.br/~acmq/whyhow.html

[5] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, t. 2.1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007, s. 80–82, 116–118.

[6] L. Josić, T. Wróblewski, Z. Lj. Petrović, J. Mechlińska-Drewko, G. P. Karwasz, *Influence of resonant scattering on electron-swarm parameters in NO*, Chem. Phys. Lett. 350 (2001) 318. http://www.fizyka.umk.pl/~karwasz/publikacje/2001_Influence.pdf

[7] A. Zecca, G. P. Karwasz, R. S. Brusa, *One century of experiments on electron – atom and molecule scattering. A critical review of integral cross sections. I. Atoms and diatomic molecules*, La Rivista del Nuovo Cimento 19 No. 5 (1996) 1–146. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/ncrl.pdf

[8] G. Karwasz, „Jakiego koloru jest różowa lampka", wykład interaktywny, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/Rozowa_lampka.pdf

[9] G. Karwasz (red.), *Toruński doświadczalnik z fizyki*, Toruń 2010.

[10] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, t. 3, s. 72.

[11] L. Papageorgiou, A. C. Metaxas and G. E. Georghiou, *Three-dimensional numerical modelling of gas discharges at atmospheric pressure incorporating photoionization phenomena*, J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 045203 <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/44/4/045203>

[12] H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999, s. 282–322.

# Eksperymentalne wariacje na temat prawa Lenza

Andrzej Karbowski, Krzysztof Służewski, Kamil Fedus, Grzegorz Karwasz
Zakład Dydaktyki Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

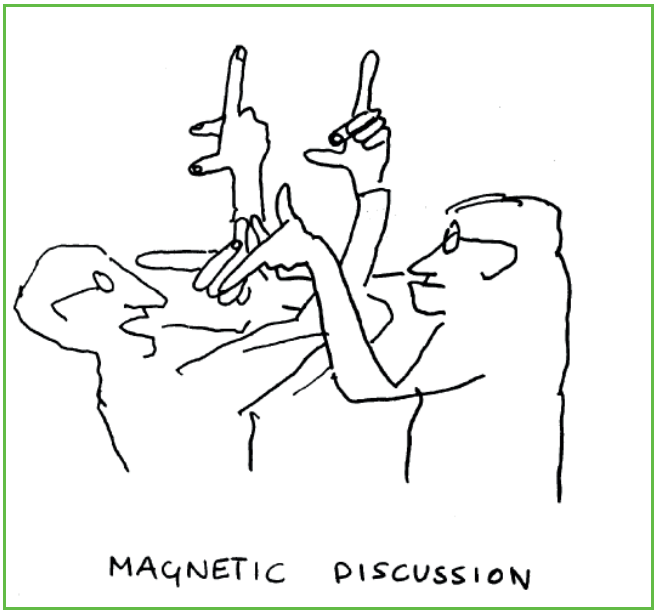
Profesor Tadeusz Wibig [1] w numerze 2/2016 „Fizyki w Szkole" przybliża postać Heinricha Friedricha Emila Lenza – urodzonego w Estonii, o niemieckim nazwisku a profesora w Rosji[pracującego w Rosji?, rozwijającego tam karierę?. W niektórych krajach jego nazwisko jest wymieniane łącznie z Faradayem i Neumannem [2].

**o niemieckim nazwisku, profesora działającego w Rosji.**

O ile Faraday (i Henry) odkryli doświadczalnie prawo indukcji elektromagnetycznej, a Franz Ernst Neumann nadał mu postać matematyczną, o tyle wkład Lenza wydaje się niewielki – określił kierunek powstającego prądu. Nie jest to jednak wkład nieważny, a wręcz zasadniczy. W żartobliwy sposób w naszej pracy na konferencji z dydaktyki fizyki GIREP nazwaliśmy to prawo „historią jednego znaku minus" [3]. Tak! w równaniu indukcji elektromagnetycznej

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}, \tag{1}$$

pojawiający się znak minus nastręcza poważne kłopoty. Strumień indukcji magnetycznej zmienia się wzdłuż, a prąd płynie po obwodzie – gdzie tu znak minus! Ale jak podkreśla prof. Wibig, ten znak minus to właśnie prawo zachowania energii. Gdyby powstający prąd generował pole magnetyczne wciągające wsuwany magnes, po początkowym zbliżeniu magnesu prąd powstawałby spontanicznie: perpetuum mobile!



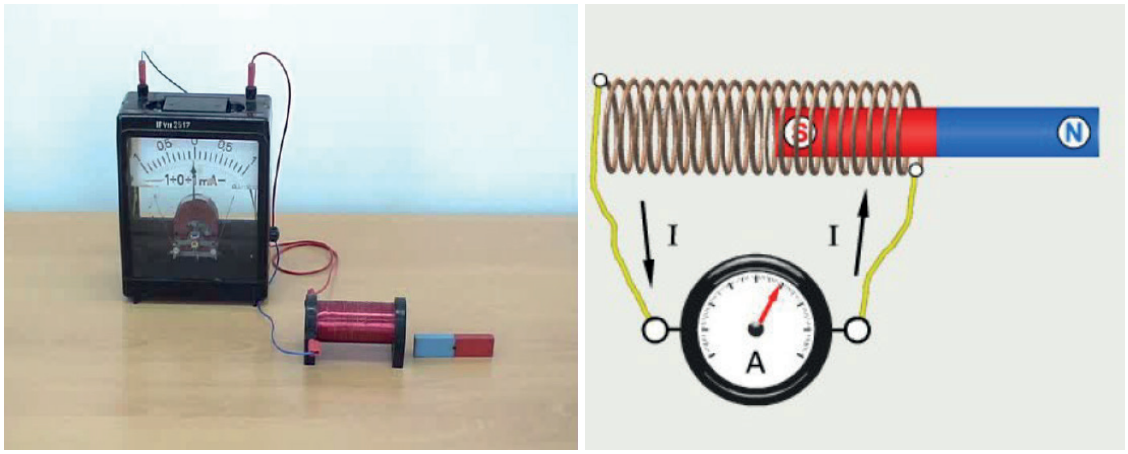

**Rys. 1.** Magnetyczna dyskusja. Rysunek satyryczny, którego autorem jest wybitny fizyk jądrowy, pochodzenia austriackiego, Bruno Touschek (1921–1978) [4]

W referacie [3] podkreślamy, że „tortura" polskiej dydaktyki nad określaniem *kierunku* prądu już dawno spotkała się z krytyką, np. we Włoszech [4]. Szansa, że w skomplikowanym rozumowaniu: jaki jest kierunek linii pola magnetycznego (od N do S czy na odwrót) → czy wsuwanie to wzrost strumienia → w którym kierunku są nawinięte zwoje w cewce → w którym kierunku powinien płynąć prąd, aby indukowane pole magnetyczne przeciwdziałało zmianie strumienia, prawdopodobieństwo że uczeń da odpowiedź poprawną jest 1/16. W zwykłym zgadywaniu – ½! A serio – trochę ten łańcuch rozumowania można uprościć, ale wiedza, w którym kierunku powstaje prąd jest:

– trudna do zrozumienia nawet dla zawodowych fizyków, zarówno naukowców, jak i dydaktyków[3],
– tym trudniejsza dla uczniów, co oznacza – odstraszająca od fizyki,
– ale przede wszystkim – *społecznie* ***bezużyteczna***.

[3] W koordynowanym w Polsce przez jednego z nas (G.K.) projekcie UE Supercomet, po trzech miesiącach międzynarodowej dyskusji, w końcowej wersji materiałów dla uczniów kierunek prądu był i tak błędny.

Czy indukowany prąd popłynie w prawo czy w lewo, mogło to mieć znaczenie w starym, ebonitowym mierniku ze wskazówką, ale nie we współczesnych, zgrabnych, kolorowych i uniwersalnych miernikach cyfrowych.



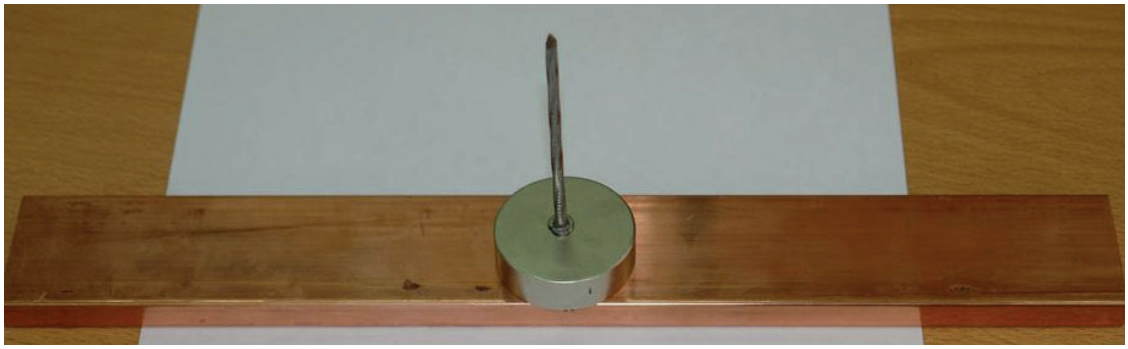

**Ryc. 2.** Doświadczenie z wsuwaniem magnesu i model z projektu EU „Supercomet". Rysunek na prawo jest kompletnie niejasny: magnes wsuwamy czy wysuwamy? Nieco sarkastycznie, wynik „do zapamiętania" dla ucznia to: gdy wsuwamy czerwony koniec, to wskazówka idzie w prawo.

UE

W międzynarodowym programie Leonardo da Vinci MOSEM [5], koordynowanym przez ZDF UMK, została opracowana seria doświadczeń ilustrujących regułę Lenza – ten „jeden znak minus w równaniu". Wszystkie one są opisane na stronach internetowych ZDF UMK [6] i w publikacji książkowej [7]. Niektóre z doświadczeń są zaskakujące. Oczywiście doświadczenia prof. Wibiga, na przykład to z patelnią, proponujemy jako pierwsze, gdyż wymagają one jedynie magnesu i „przyrządów" z kuchni.

## 1. Miękkie lądowanie

Do przeprowadzenia doświadczenia potrzebny jest duży magnes neodymowy, gwóźdź i miedziana sztabka (do zamówienia np. w ZDF UMK, całość po cenie kosztów 82 zł, w tym przesyłka).



**Ryc. 3.** Pomoce dydaktyczne potrzebne do wykonania doświadczenia nr 1

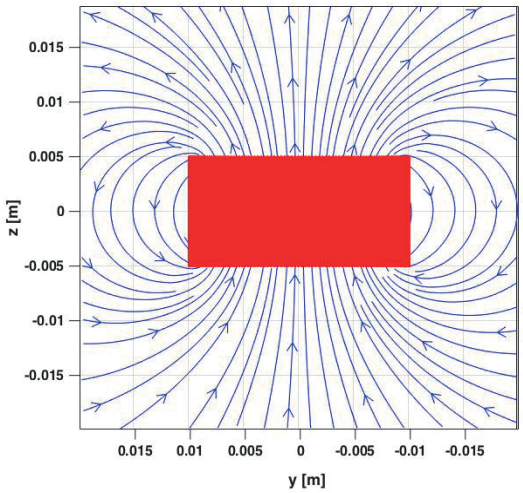
**Wykonanie:**

Umieszczamy duży gwóźdź pionowo na magnesie, tak jak jest to pokazane za zdjęciu, fot. 3. Na stole kładziemy miedzianą sztabkę. Podnosimy (powoli) gwóźdź z magnesem na wysokość 3–4 cm nad sztabkę i swobodnie puszczamy. Magnes spada z przyspieszeniem grawitacyjnym, ale w pobliżu sztabki nagle zwalnia tak, że nie słychać jego uderzenia w sztabkę. Film z doświadczeniem jest pokazany w dodatku multimedialnym do niniejszego artykułu [8].

**Wyjaśnienie:**

Magnesy neodymowe, jak na ryc. 3, są bardzo silne – indukcja magnetyczna w pobliżu ich biegunów (podstaw walców) osiąga nawet 1 T, ale pole dość szybko zanika w miarę oddalania się od tych biegunów, jak pokazuje ryc. 4. Strumień magnetyczny obejmowany przez sztabkę zmienia się szybko dopiero wtedy, gdy magnes jest blisko. Sztabka jest gruba, wykonana z miedzi – czyli sumaryczny opór „wirtualnego drutu", przez który płynie prąd, jest niewielki. Indukują się więc duże prądy, które istotnie spowalniają spadek magnesu tak, że ląduje on „miękko".

Więcej: Próba nagłego podniesienia magnesu nad sztabkę spotka się z wyraźnym „oporem" – im szybciej próbujemy podnieść magnes, tym większej (ponad jego ciężar) siły należy użyć. Dla porównania to samo doświadczenie powtarzamy nad stołem. Prawa Galileusza spadku swobodnego obowiązują! (Uwaga! magnesy są kruche, więc doświadczenia nie wykonujemy nad marmurową podłogą).




**Ryc. 4.** Linie sił pola magnetycznego w pobliżu magnesu neodymowego, jak z doświadczenia nr 1. Model numeryczny MatLab według [9] zwraca uwagę, że linie „zawracają" już w pobliżu podstaw magnesu (czyli jego biegunów)

Obliczenie (zadanie 1):

Do doświadczenia używamy magnesu o promieniu $R$ = 2 cm i masie $m$ = 40 g. Zmierzona (punktową sondą Halla) indukcja przy jego podstawie wynosi średnio $B$ = 0,5 T. Obliczymy, ile wynosi czas spadku $t$ z wysokości 2 mm (w tej odległości pole magnesu jest stosunkowo jednorodne). Założymy, że w trakcie tego spadku zmiana strumienia magnetycznego $\Delta\Phi$ przechodzącego przez miedzianą płytkę wynosi połowę $\Phi$, czyli

$$\Delta\Phi = \tfrac{1}{2}\pi R^2 B \tag{2}$$

Dla obliczenia siły działającej na magnes dokonamy kolejnego uproszczenia, korzystając ze wzoru na siłę $\boldsymbol{F}$ działającą na przewodnik z prądem w polu magnetycznym (siłę Lorenza):

$$\boldsymbol{F} = I\,\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}, \tag{3}$$

gdzie $I$ jest natężeniem prądu w przewodniku, $\boldsymbol{B}$ – wektorem indukcji pola, $\boldsymbol{l}$ – długością przewodnika. Dla prądów prostopadłych do pola iloczyn wektorowy przyjmuje wartość:

$$F = I\,l\,B \tag{4}$$

W jednostajnym spadku, jakim jest „miękkie lądowanie", siła ta równoważy ciężar magnesu *mg*.

Siła elektromotoryczna (= napięcie powodujące przepływ prądu w płytce) wyraża się wzorem $U = \Delta\Phi/t$ (zaniedbujemy znak minus jako nieistotny w obliczeniach). Natężenie przepływającego prądu wynosi $I = U/R$. Wartość tego prądu zależy od oporu $R$ przewodnika.

Zakładamy, że prąd płynie w płytce po okręgu równym obwodowi magnesu, w obszarze o przekroju kwadratowym $S$ = 1x1 cm$^2$ (grubość płytki to 1 cm). Opór naszego zastępczego „drutu" wynosi

$$R = \rho l/S, \tag{5}$$

Opór właściwy miedzi to $\rho = 1{,}7\text{x}10^{-8}\Omega\text{m}$.

Uporządkujmy rozważania: 1) równość sił daje $IBl = mg$, stąd

$$I = mg/Bl \tag{6}$$

2) indukowany prąd

$$I = US/\rho l = \Delta\Phi S/\rho lt = \tfrac{1}{2}\pi R^2 BS/\rho lt \tag{7}$$

Z porównania tych dwóch ostatnich wzorów $\tfrac{1}{2}\pi R^2 BS/\rho lt = mg/Bl$ otrzymujemy wyrażenie na czas spadku

$$t = \tfrac{1}{2}\pi R^2 B^2 S/mg\rho \tag{8}$$

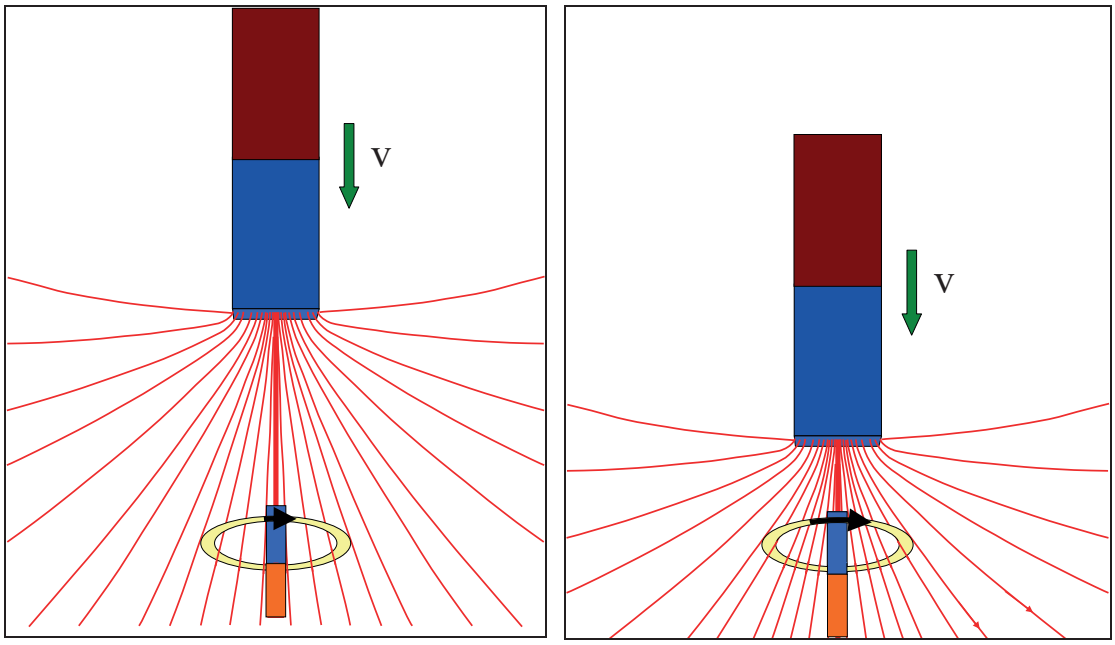
(długość „drutu" $l$ okazuje się nieistotna).

Podstawiając wartości liczbowe, otrzymujemy $t$ = 2,4 s. Rzeczywiście miękkie lądowanie!

Najbardziej „grubym" założeniem była przyjęta zmiana strumienia jako $\Delta\Phi = \tfrac{1}{2}\Phi$. W rzeczywistości strumień zmienia się nieco mniej, a czas spadku z wysokości 2 mm to około jedna sekunda.

Oczywiście dokładne modelowanie numeryczne pozwoliłoby na lepsze przybliżenie. Jako pierwszy krok niezbędny jest model magnesu, co wcale

nie jest łatwe. Na ryc. 5 przedstawiamy model magnesu sztabkowego (obliczony z prawa Biota-Savarta [7]), w momencie wsuwania do pętli z przewodnika.

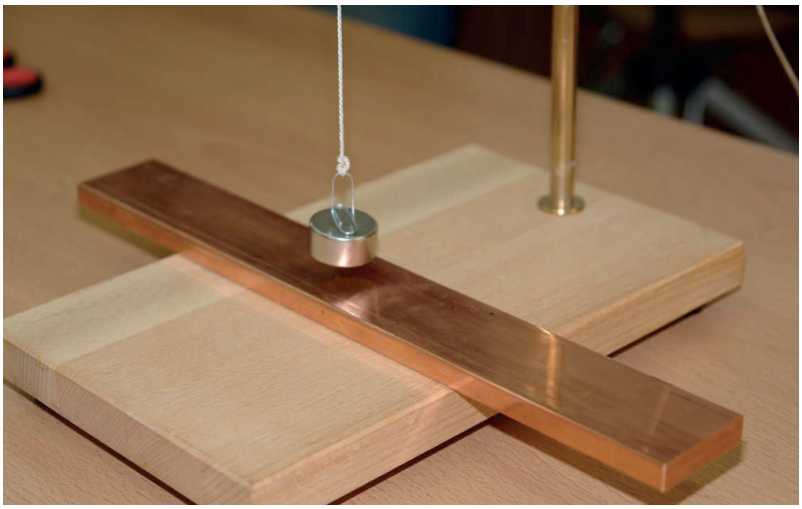



**Ryc. 5.** Dlaczego indukowany prąd jest największy, gdy magnes jest blisko? Próba modelu matematycznego dla magnesu sztabkowego. Gdy magnes jest daleko, przesunięcie o tę samą odległość powoduje mniejszą zmianę strumienia, niż gdy magnes jest bliżej. Mały magnes „wirtualny", narysowany tu wewnątrz pętli, przeciwdziała wsuwaniu magnesu rzeczywistego. Kierunek prądu pokazuje czarna strzałka, a przyjmowane zwyczajowo kierunki linii sił pola magnetycznego („tak jak poruszałyby się północne monopole magnetyczne") – strzałki czerwone

Zbliżanie magnesu z liniami indukcji „zacieśniającymi się" przy biegunach powoduje wzrost strumienia, który przenika przez pętlę. Zgodnie z prawem Lenza indukuje się taki kierunek prądu, że wytworzone przez ten prąd pole magnetyczne wypycha wsuwany magnes. Na ryc. 5 ilustrujemy to za pomocą małego magnesu (wirtualnego) wewnątrz pętli. Model pokazuje też, że im bliżej magnes jest pętli (ale jedynie w sytuacji jak na rysunku), tym większy indukowany prąd – większa zmiana strumienia objętego przez pętlę przy takim samym przesunięciu magnesu.

## 2. Leniwe wahadło

Odmianą „miękkiego lądowania", wykonaną z tym samym zestawem pomocy, jest „leniwe wahadło". Za pomocą zgiętego spinacza zawieszamy magnes na nitce nad miedzianą płytą, odchylamy i swobodnie puszczamy, zob. ryc. 6. Wahadło, w zależności od odległości od płyty, wykona nieco ponad ćwierć pełnego wahnięcia albo zatrzyma się nad punktem równowagi. Jest to znakomity przykład oscylatora harmonicznego (jakim jest wahadło matematyczne) w warunkach bardzo silnego tłumienia.



**Ryc. 6.** Leniwe wahadło – przykład silnie tłumionego oscylatora harmonicznego

Pozostaje wyjaśnić, że tłumienie (siła „oporu") jest proporcjonalne do prędkości liniowej magnesu, tak jak się to zakłada dla metalowej kulki w oleju. Pokazujemy to poprzez kolejne zadanie.

Zadanie 2

Po równi zbudowanej z dwóch miedzianych szyn (połączonych u góry poprzez opornik $R$, zob. ryc. 7) i umieszczonej w jednorodnym, pionowym polu magnetycznym zsuwa się miedziana poprzeczka o masie $m$. Znaleźć prędkość, z jaką się zsuwa. Kąt nachylenia równi do poziomu wynosi $\alpha$, a odległość między szynami $L$. Pomijamy opór elektryczny szyn i poprzeczki oraz siły tarcia.

Rozwiązanie:

Zgodnie z definicją strumień indukcji magnetycznej w pętli przewodnika zamkniętej przez szynę i poprzeczkę wynosi (zob. rys. 7)

$$\Phi = Blx \cos\alpha \tag{9}$$

(gdyż kąt α jest też kątem między wektorem $B$ a wektorem prostopadłym do powierzchni wyznaczonej przez szyny).

Poprzeczka zsuwa się z prędkością v, a więc w czasie $\Delta t$ strumień rośnie o

$$\Delta\Phi = Bl(\mathrm{v}\Delta t) \cos\alpha \tag{10}$$

Zgodnie z prawem Faradaya-Lenza siła elektromotoryczna wynosi

$$U = Bl\mathrm{v} \cos\alpha \tag{11}$$

W czasie $\Delta t$ energia potencjalna poprzeczki zmniejsza się o

$$\Delta E = mg\mathrm{v}\Delta t \sin\alpha \tag{12}$$

Utracona energia potencjalna zamienia się w pracę (Joule'a) prądu elektrycznego

$$W = U^2 \Delta t / R \tag{13}$$

Pomijając $\Delta t$, otrzymujemy równość

$$mg\mathrm{v}\sin\alpha = U^2/R = (Bl\mathrm{v} \cos\alpha)^2/ R\ , \tag{14}$$

a stąd wartość na prędkość stacjonarną poprzeczki

$$\mathrm{v} = mgR \sin\alpha/B^2 l^2\cos^2\alpha \tag{15}$$

Kontrolujemy logiczną poprawność wyniku: im większa masa, tym większa prędkość; im większa indukcja $B$, tym mniejsza prędkość (za-

leżność kwadratowa); im większy opornik $R$, tym większa prędkość (bo mniejszy płynący w obwodzie prąd).

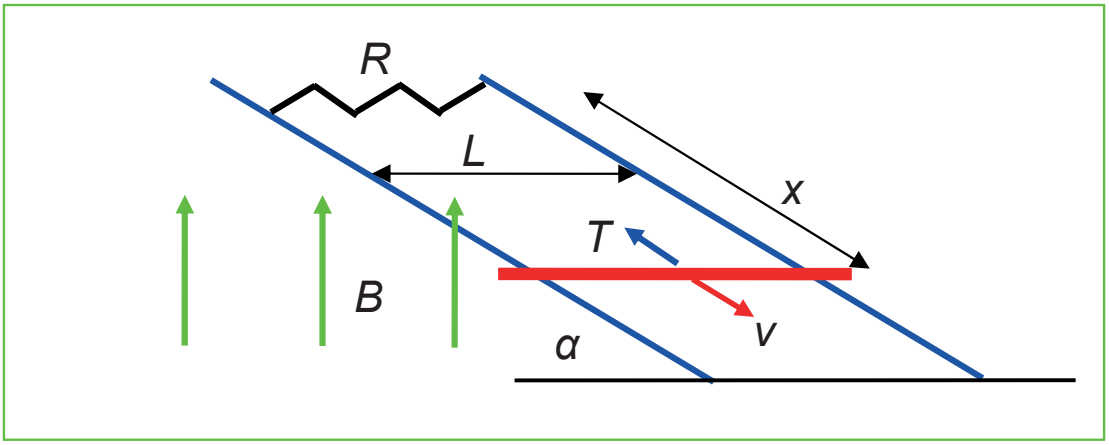
Wynik można też uzyskać, rozważając siłę Lorentza działającą na poprzeczkę, przez którą płynie prąd $I$. Siła ta wynosi $F = IBl$, ale działa w kierunku poziomym (jest prostopadła, zgodnie z równaniem (3) z poprzedniego przykładu, zarówno do $B$, jak i do $l$). Siła powodująca zsuwanie się poprzeczki to składowa wzdłuż równi siły ciężkości $mg\sin\alpha$. Ta siła jest równoważona przez składową wzdłuż równi siły Lorentza, czyli $F\cos\alpha$. Wyrażenie na siłę $T$ „oporu Lenza" w zsuwaniu się poprzeczki w polu magnetycznym jest następujące:

$$T = IBl\cos\alpha = (Bl\mathrm{v}\cos\alpha/R)\, Bl\cos\alpha \tag{16}$$

Siła „oporu Lenza" jest więc proporcjonalna do prędkości, jak w ruchu metalowej kulki w oleju, zob. [10]. Z równości sił otrzymujemy zależność

$$mg\sin\alpha = (B^2 l^2 \mathrm{v}\cos^2\alpha)/R \tag{17}$$

identyczną z równaniem (15).




**Ryc. 7.** Zsuwająca się poprzeczka w polu magnetycznym (zadanie nr 2). Siła „oporu Lenza" $T$, wynikająca z indukowanego w obwodzie prądu, zaznaczona jest niebieską strzałką. Kierunek indukowanego prądu, niezależnie od kierunku pola $B$ jest taki, że ruch poprzeczki jest spowolniony

Zauważmy, że do uzyskania tego ciekawego wyniku nie są potrzebne rozważania o kierunku indukowanego prądu – jak działają siły, można wywnioskować poprzez ogólne zasady rozumowania logicznego. Zadanie wielokrotnie było zadawane na sprawdzianach na I roku „macierzystej" uczelni (Uniwersytetu w Trento) jednego z nas (G.K.). Wprowadza nas ono w kolejny problem, nie tak prosty do modelowania – zsuwający się po miedzianej równi neodymowy magnes.

## 3. Magnes zsuwający się po miedzianej równi

Do wykonania doświadczenia potrzebny jest magnes neodymowy (mniejszy niż poprzednio) i ta sama miedziana sztabka.



**Ryc. 8.** Neodymowy magnes zsuwający się po miedzianej równi

**Wykonanie:**

Trzymamy w dłoni miedzianą sztabkę nachyloną pod dużym kątem do poziomu i na szczycie równi kładziemy magnes neodymowy płasko, tak jak to pokazano na zdjęciu 8. Obserwujemy, w jaki sposób magnes porusza się w dół.

**Wyjaśnienie:**

Jest to kolejne doświadczenie potwierdzające istnienie prądów indukowanych w przewodniku (w tym przypadku w miedzianej sztabce) pod wpływem zmian zewnętrznego strumienia magnetycznego. Magnes przesuwa się po równi tak, że strumień magnetyczny przenika coraz to nowe obszary przewodnika. Magnes nie „odkleja się" od równi, nawet dla dużych kątów nachylenia, rzędu 80º.

Ruch, szczególnie dla większych kątów nachylenia jest z bardzo dużą dokładnością jednostajny. Można go wykorzystać do ilustracji tego rodzaju ruchu przy wprowadzaniu pojęcia „jednostajny", na początku kursu gimnazjalnego fizyki. Większe pochylenie równi daje większą prędkość ruchu jednostajnego. Magnesy niższe (ale również neodymowe), czyli lżejsze przy podobnym natężeniu pola $B$ przy podstawach i szersze (czyli dające większy strumień $\Phi$) poruszają się wolniej.

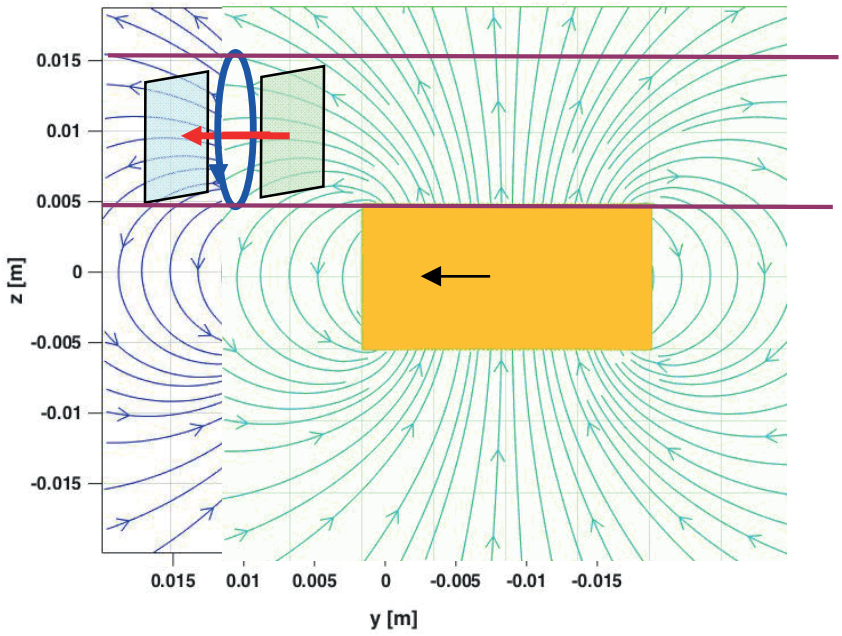
To doświadczenie nasuwa (dość daleką) analogię z zadaniem nr 2. Różni się ono kierunkiem pola magnetycznego – w tym doświadczeniu oś łącząca bieguny magnesu jest prostopadła do równi – wyraz cos$\alpha$ jest równy 1. W takim przypadku, pola prostopadłego do szyn, wzór na prędkość poprzeczki byłby następujący:

$$v = mgR \sin\alpha / B^2 l^2 \qquad (18)$$

Innymi słowy, oczekujemy, że prędkość zsuwania się magnesu rośnie wraz z kątem nachylenia równi. Rzeczywiście, doświadczenie to potwierdza, choć w przypadku zsuwania się należy uwzględnić również siłę tarcia dynamicznego, która w odróżnieniu od siły „oporu Lenza", nie zależy od prędkości. Siła tarcia, proporcjonalna do nacisku, maleje ze wzrostem kąta nachylenia, aby więc sprawdzić zależność (11), należy badać duże kąty (>45º).

Ale wbrew pozorom doświadczenie może rodzić pewne trudności w interpretacji. Po pierwsze, jak ostrzega Richard Feynman [11], niektóre przypadki przesuwania się pola przez przewodnik nie generują prądów indukowanych. Drugie pytanie to, dlaczego przy prostopadłym polu do przewodnika działa siła wzdłuż przewodnika. Strumień pola nie jest przecież wektorem. Tu jeszcze raz pomocna okazuje się zasada Lenza. Wróćmy do

rysunku 3, ale tym razem narysujmy dwie pozycje magnesu, przesuwającego się wzdłuż miedzianej płytki. Sytuacja jest przedstawiona na rys. 9.




**Rys. 9.** W jakim kierunku płyną prądy w sztabce, gdy zsuwa się po niej magnes? Magnes przesuwa się w lewo: rysunek pokazuje linie sił pola przed (zielone) i po (niebieskie) po interwale $\Delta t$. Strumienie przechodzące przez przekrój poprzeczny miedzianej sztabki (lnie brązowe) przed i po $\Delta t$ są zaznaczone tymi samymi kolorami co odpowiednie linie pola. Zmianę strumienia $\Delta\Phi$ w danym przekroju płytki ilustrujemy czerwoną strzałką. Indukowane prądy płyną *w poprzek* sztabki, co wyjaśnia, dlaczego musi ona być gruba. Podobnie działa patelnia z grubym dnem z doświadczenia prof. Wibiga [1]

Jak widać na rys. 9, zmiana strumienia magnetycznego zachodzi w *poziomie* – wzdłuż kierunku przesuwania się magnesu. Mimo że równanie Faradaya-Lenza (1) nie podaje kierunku prądu – płynie on dookoła zmiany strumienia $\Phi$ (zaznaczonego na rys. 9 czerwoną strzałką). Prąd płynie w sztabce *w poprzek* niej – wyobrażamy go sobie jako układ pętli, jedna za drugą, jak niebieska z rys. 9. Wyjaśnia się w ten sposób, dlaczego sztabka musi być gruba (albo patelnia indukcyjna ze stali niemagnetycznej, ale z grubym dnem, jak w doświadczeniu prof. Wibiga [1]).

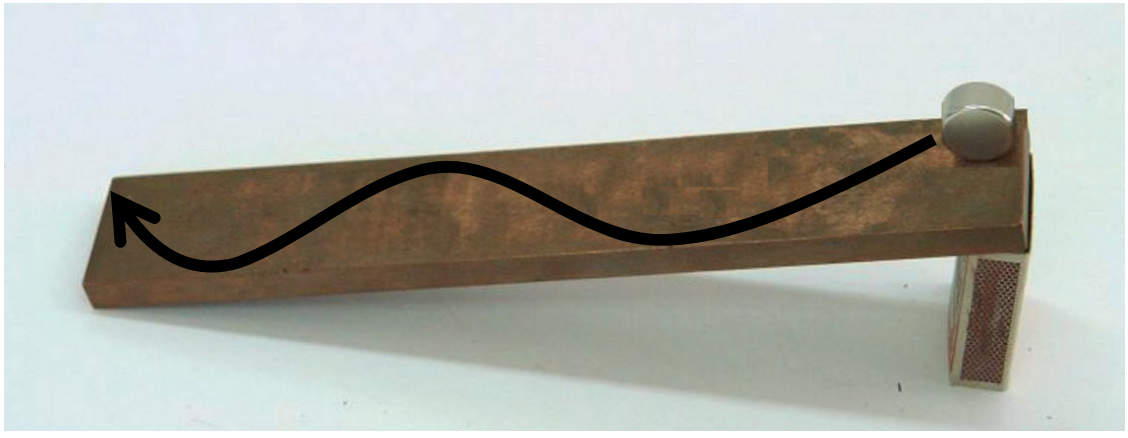
Do kierunku powstających prądów, tradycyjnie zbywanych słowem „wirowe" („Foucaulta" u Francuzów, a „eddy", czyli turbinowe u Anglików) wrócimy w dalszym doświadczeniu, specjalnie w tym celu zaprojektowanym [12].

Reasumując w sposób opisowy doświadczenie nr 3: gdy strumień pola magnetycznego zmienia się w czasie, indukowane przed magnesem prądy mają taki kierunek, że *wytworzone* przez te prądy *nowe* pole magnetyczne *odpycha* zbliżający się magnes. Gdy magnes się oddala, powstające prądy mają ten sam kierunek, bieguny „wirtualnych" magnesów za i przed zsuwającym się magnesem mają takie samo ułożenie, ale wirtualny magnes za tym realnym przyciąga go, przez co też spowalnia ruch.

W rezultacie, ruch magnesu zostaje spowolniony, a początkowa energia potencjalna magnesu na górze równi zamienia się głównie w ciepło wytworzone przez indukowane prądy.

## 4. „Pijany" magnes

Kiedy potoczymy magnes neodymowy na miedzianej równi pochyłej, to zobaczymy, że tor jego ruchu nie jest linią prostą. W celu zbadania przyczyny krzywoliniowego ruchu magnesu potrzebny jest magnes neodymowy w kształcie walca, miedziana sztabka i pudełko zapałek jako podpórka.



**Ryc. 10.** „Pijany" magnes zatacza się, ale zawraca tak, aby nie spaść z równi

**Wykonanie:**

Budujemy równię pochyłą ze sztabki miedzianej i pudełka po zapałkach (tak jak pokazano to na zdjęciu 10). Na szczycie równi ustawiamy magnes na powierzchni bocznej walca i spuszczamy go. Obserwujemy, w jaki sposób się porusza. Zmieniamy położenie początkowe magnesu – jego odległość od krawędzi bocznej sztabki i początkowy kąt między osią magnesu a krawędzią sztabki.

**Wyjaśnienie:**

W zależności od kąta nachylenia i położenia początkowego magnesu toczy się po pewnej linii krzywej. Zadziwiające jest, że magnes zbliża się do brzegu, ale zawraca: nie spada z równi. Prawie, prawie, jak „podchmielony" jegomość wracający do domu po wąskim chodniku. Stąd nazwa doświadczenia: „pijany" magnes.

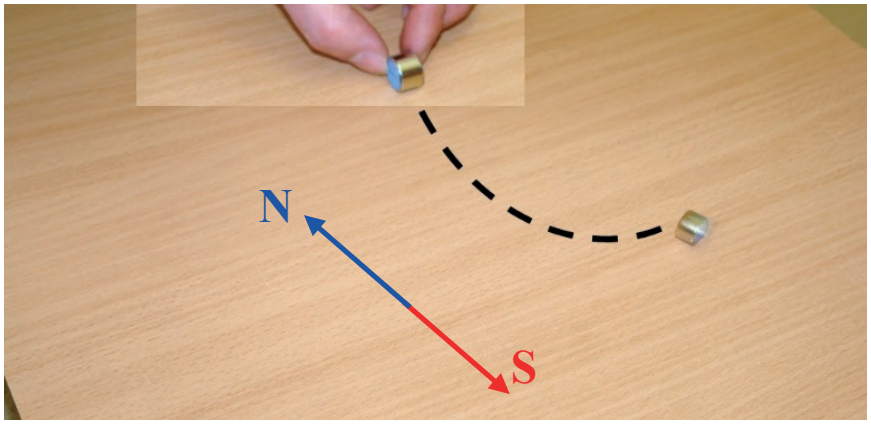
Jaka siła utrzymuje magnes na równi? Znana nam już „siła Lenza". Gdyby magnes spadł ze sztabki, strumień magnetyczny przez nią przechodzący nagle by się zmienił. W sztabce indukują się prądy (w różnych kierunkach), ale zawsze tak, aby przeciwstawiać się zmianom zewnętrznego strumienia magnetycznego. Jest to chyba najbardziej widowiskowa ilustracja zasady Lenza.

Reasumując: podobnie jak w przypadku zsuwania się, powodem spowolnienia ruchu magnesu są prądy indukowane. Obecne doświadczenie pokazuje jednak nieco więcej: magnes nie tylko spowalnia, lecz także „broni się" przed spadnięciem z równi! 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.

## 4a. Doświadczenie kontrolne 1:

Istnieje możliwość, że na ruch „pijanego" magnesu wpływa obecność ziemskiego pola magnetycznego. Warto jest więc sprawdzić jak magnes

stacza się po pochylonej drewnianej desce, ryc. 11 lub pochylonym drewnianym stoliku (ale bez ukrytych metalowych elementów).




**Ryc. 11.** Staczanie się magnesu neodymowego po pochyłej desce. Strzałkami zaznaczono kierunki magnetyczne N i S. Północny biegun magnesu znajduje się początkowo po prawej ręce spuszczającego (położenie biegunów ustalono magnetometrem). Magnes, staczając się, ustawia się jak igła magnetyczna

**Wykonanie:**

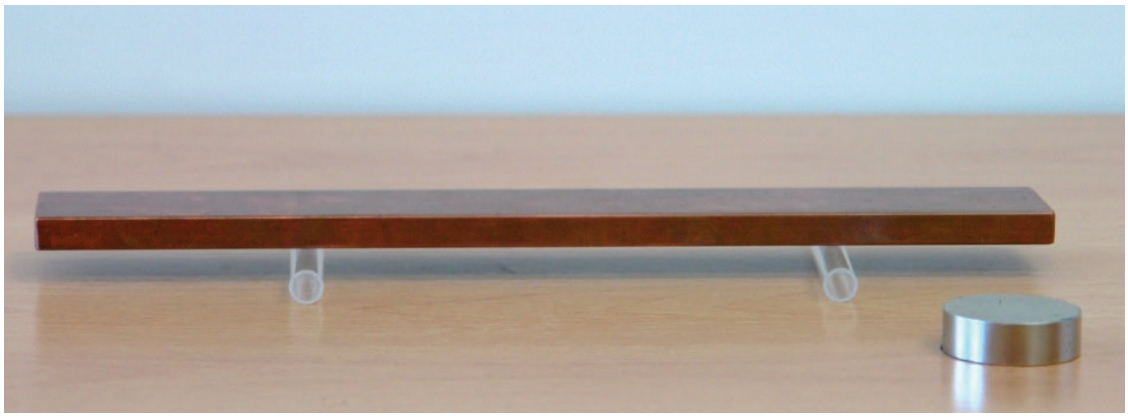
Deskę pochylamy w kierunku północ-południe, tak jak nam to wskazuje Słońce. Ustawiamy magnes na desce tak, aby jego biegun północny był po prawej stronie. Spuszczamy magnes i obserwujemy, w jaki sposób się porusza. Następnie spuszczamy magnes z tego samego miejsca, ale ustawiamy go tak, aby biegun północny był teraz po lewej stronie. Zmieniamy kąt ustawienia deski względem kierunku północnego i powtarzamy doświadczenie.

**Wyjaśnienie:**

Zależnie od kierunku pochylenia deski, magnes toczy się po linii krzywej, ale innej niż w przypadku równi miedzianej. Magnes natychmiast skręca w lewo albo w prawo, ponieważ porusza się w polu magnetycznym ziemskim. Kierunek skręcania zależy od ustawienia początkowego biegunów magnesu. Oczywiście można również znaleźć takie ustawienie deski (jej pochylenie powinno wskazywać oś W-E), że magnes będzie poruszał się po linii prostej (o ile nie pomylimy kierunku ustawienia początkowego biegunów magnesu). Warto popróbować!

## 4b. Doświadczenie kontrolne[2]

Powolne spadanie magnesu (doświadczenie 1), niespodziewany opór, jaki czujemy, gdy próbujemy nagle podnieść magnes z miedzianej płyty, „pijany" magnes – wszystko wskazuje, że zasada Lenza opisuje zarówno „przyciąganie", jak i „odpychanie" wskutek indukcji elektromagnetycznej. Spróbujmy to wyjaśnić *explicite*.



**Ryc. 12.** Magnes przyciąga czy odpycha? Miedziana równia na rurkach z pleksi i duży magnes

W doświadczeniu umieszczamy miedzianą sztabkę na dwóch rurkach z pleksi (ryc. 12) albo nawet na dwóch wykałaczkach. Duży magnes neodymowy, z doświadczenia 1 przesuwamy poziomo tuż nad sztabką. Gdy przysuwamy magnes do płytki, odsuwa się ona w przeciwnym kierunku – jest odpychana poprzez indukowane prądy. Odsuwając magnes *znad* płytki, zauważamy, że przesuwa się ona za naszą ręką: jest przyciągana przez uciekający magnes.

Przypominamy, że miedź jest diamagnetykiem, ale względny współczynnik przenikalności magnetycznej jest bliski 1, i wynosi 0,999994. Wypychanie miedzianej sztabki z pola magnetycznego nie jest więc przejawem diamagnetyzmu. Łatwo sprawdzić, że dla uzyskania efektów przesuwania się sztabki musimy poruszać magnesem dość szybko.

## 5. A prawa Maxwella?

Trudności w interpretacji równania (1) wynikają z tego, że pochodzi ono z okresu przed Maxwellem. W równaniach Maxwella nie ma żadnej „siły elektromotorycznej", a jedynie pola elektryczne i magnetyczne.

Aby zrozumieć, sens siły elektromotorycznej $\varepsilon$, warto przypomnieć metodę Kirchhoffa analizy obwodów elektrycznych: przepływające prądy są wywołane przez sumę napięć ogniw wbudowanych w obwód elektryczny. Siła elektromotoryczna indukcji, innymi słowy napięcie, jest w podobny sposób *całką* po obwodzie zamkniętym z wartości natężenia pola elektrycznego **E**. Pamiętamy, że pole elektryczne jest wektorem, tak więc całka zawiera iloczyn skalarny **E** i elementy ścieżki całkowania $d\mathbf{l}$.

$$\varepsilon = \oint_l \mathbf{E} \circ d\mathbf{l} \tag{19}$$

(Dla analogii przypominamy również, że pole elektryczne jest gradientem potencjału $\mathbf{E} = -\Delta V$). Prawo indukcji Faradaya-Lenza-Neumana, zapisane jako III prawo Maxwella nie musi więc korzystać z dodatkowego terminu „siły elektromotorycznej". Wystarczy przyrównać pola

Neumanna

$$\oint_l \mathbf{E} \circ d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \circ d\mathbf{S} \tag{20}$$

Właściwe znaki wynikają z przyjętych reguł w całkach krzywoliniowych (lewa strona równania 19) i definicji strumienia (prawa strona równania).

Czy można „pokazać", czym całka po trajektorii zamkniętej różni się od całki po krzywej otwartej? W myśl zasady dydaktycznej „neo-realizmu" [13] – dlaczegóż by nie? Cóż się stanie, gdy w rurce, w której spada magnes, natniemy podłużne szczeliny, tak aby przeciąć „kółko" w całce po lewej stronie równania (20)?

Stąd zestaw dwóch rurek – pełnej i naciętej podłużnie. (Ta ostatnia rurka jest powszechnie kopiowana, choć zapewne „kopiści" nie wiedzą, dlaczego jest nacięta).



**Ryc. 13.** Zestaw dwóch rurek do ilustracji wpływu drogi całkowania pola elektrycznego w III równaniu Maxwella: jedna pełna, druga nacięta wąskimi szczelinami, częściowo na siebie zachodzącymi (C) GK

Magnes neodymowy (o średnicy 18 mm) wpuszczony do rurki o średnicy wewnętrznej 19 mm (i ściankach o grubości 1 mm) ginie tam jakby na zawsze. Tak się przynajmniej wydaje uczestnikom pokazów. Można rurkę z wpuszczonym magnesem nosić po sali, przekazywać z ręki do ręki, a magnes ciągle nie wypada. Dla metrowej rurki trwa to 25–27 sekund.

Gdy zajrzymy do środka, zobaczymy, jak magnes wewnątrz „lewituje" [14] – powoli spada, nie dotykając ścianek. W rurce z nacięciami spadek też jest powolny, ale już „gołym" uchem słychać, że zjawisko jest inne – magnes odbija się od ścianek; jeśli jest mniejszy to koziołkuje. Oj! całka w równaniu (20) powinna być policzona dookoła zmian strumienia $\mathbf{B} \circ d\mathbf{S}$. Prąd elektryczny jakoś popłynie, bo rurka jest nacięta tak, aby było to możliwe, ale płynie on po skomplikowanych „esach-floresach", a nie po kolejnych okręgach.

Można to powiedzieć obrazowo – magnes porusza się w dół, więc prądy indukowane muszą płynąć po obwodzie kołowym rurki. Tylko po co nacinać rurkę?

## 6. Skaczący pierścień

Doświadczenie wzbudzające zawsze zdziwienie na pokazach opiera się na zasadzie sugerowanego kiedyś działa elektromagnetycznego, ryc. 14. Po naciśnięciu przełącznika, aluminiowy pierścień spokojnie (i swobodnie) spoczywający, a nanizany na żelazny pręt, nagle wyskakuje na 2 metry w górę. Drugi też, dwa naraz również, aż nagle zabawa się urywa: skonfundowany uczeń podejrzewa, że zepsuł maszynę, a to prowadzący pokaz niedostrzeżenie nanizał pierścień przecięty. Indukowany prąd nie płynie w pierścieniu, dookoła żelaznego pręta, więc nie jest wyrzucany w górę.

Urządzenie zakupiliśmy w USA, wymaga adaptera napięcia, ale jego efektowność warta jest tego zachodu. Co się stanie, gdy pierścień przytrzymamy, uniemożliwiając mu „podskok”? W żelaznym pręcie (a raczej pęczku drutów, dla uniknięcia prądów Foucaulta) generowane jest, przez cewkę poniżej, zmienne pole magnetyczne o częstotliwości 50 Hz. Niezależnie, czy to pole jest skierowane w górę czy w dół, w aluminiowym (lub miedzianym) pierścieniu indukuje się taki kierunek prądu, że pierścień jest wyrzucany. Jeszcze raz Lenz miał rację! A jeśli uniemożliwimy pierścieniowi natychmiastowy wyskok, w parę sekund prądy rozgrzeją go do kilkudziesięciu stopni. Zamiast pierścienia można umieścić małą cewkę, podłączoną do żaróweczki. Indukowane prądy zapalą żarówkę.

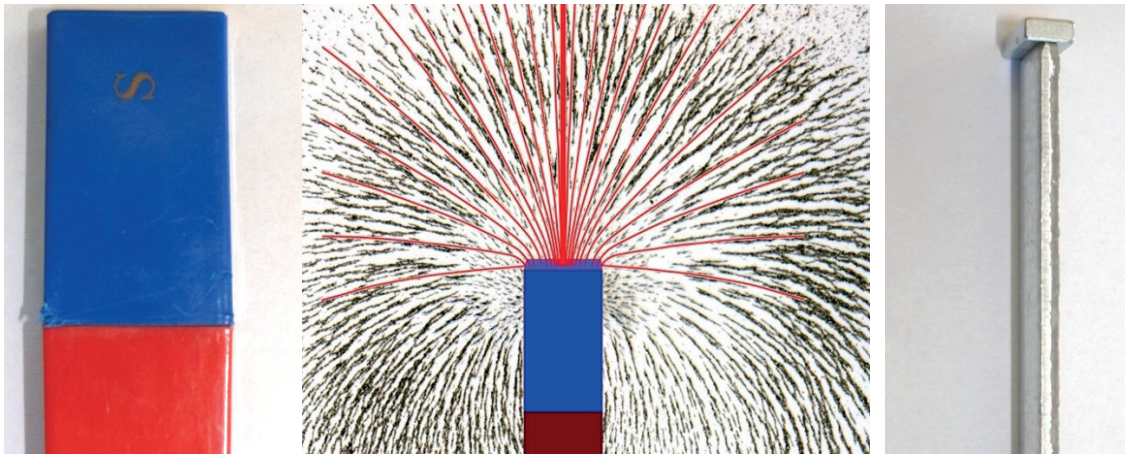



**Ryc. 14.** Działo Faradaya-Lenza: zmienne pole magnetyczne generowane przez miedzianą cewkę dookoła żelaznego rdzenia działa jak wyrzutnia – aluminiowy pierścień nanizany na ten rdzeń, po włączeniu przełącznika nagle wyskakuje w górę. Efekt nie pojawia się, jeśli pierścień jest przecięty. Mała cewka nanizana na rdzeń „wyłapuje” zmiany pola magnetycznego w rdzeniu, a podłączona do niej żaróweczka jarzy się

## 7. I jeszcze o magnesach

Układ biegunów w magnesach rzadko jest „podręcznikowy”. Można zawsze sprawdzić układ linii siła pola magnetycznego (a przez to położenie biegunów) za pomocą drobnych żelaznych opiłków. Niestety w przypadku magnesów neodymowych opiłki tak silnie „przyklejają się” do magnesów, że ich usunięcie jest bardzo trudne. Dlatego dla magnesów neodymowych korzystamy z modeli, a weryfikujemy je za pomocą miniaturowej sondy Halla. Ale jak pokazuje porównanie na ryc. 15, obliczone i zmierzone rozkłady pola mogą się nieco różnić.

W przypadku przedstawionym na ryc. 15 nasze obliczenia pozwoliły „zdemaskować” zagranicznego producenta magnesów, oficjalnie sztabkowych. Rozkład opiłków pokazywał niespodziewane zagięcie linii pola magnetycznego w pobliżu wierzchołków magnesu, czyli w pobliżu jego nominalnych biegunów. Otwarcie obudowy zdradziło „oszustwo” – to nie tradycyjny magnes sztabkowy, ale dwa małe kawałki neodymowe połączone żelaznym słupkiem, zob. ryc. 15c.



**Ryc. 15.** (a) Jak zdemaskować „podrobiony” magnes sztabkowy? (b) Należy porównać zmierzony rozkład pola magnetycznego za pomocą opiłków i rozkład wyliczony z prawa Biota-Savarta. Podejrzane zagęszczenie linii wokół wierzchołka magnesu sugeruje, że magnes nie jest dipolem, ale ma bardziej skomplikowaną konfigurację biegunów. Jego rozebranie (c) pokazuje „oszustwo”: dwa małe magnesy neodymowe umieszczono w wierzchołkach, a środek połączono żelazną sztabką. Zwraca uwagę odmienne, „angielskie” oznaczenie kolorów biegunów: jeszcze jeden powód, aby przestać wymagać od uczniów znajomości reguły ręki lewej pub prawej

lub

## Zakończenie

Wszystkie doświadczenia z użyciem miedzianej równi są znakomitą ilustracją prawa Lenza: magnes miękko ląduje na równi, powoli się z niego zsuwa, a kiedy go spuścimy, toczy się i nie spada z niej. 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-Neumana-Lenza-Foucaulta, jako że w odkryciu praw indukcji uczestniczyli uczeni różnych nacji.

**Neumanna**

## Acknowledgment

Prof. Wim Peeters (Antwerp University) has contributed significantly to the development of some of present experiments.

**PS.** Od reguły prawej dłoni (rys. 1) powinno się odstąpić, również z powodu upowszechnienia się włoskiego, aczkolwiek obraźliwego gestu wystawiania palców zza szyby samochodu (notka GK).

## Literatura

[1] T. Wibig, *Heinrich Friedrich Emil Lenz*, Fizyka w Szkole, 2/2016, 27.

[2] https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Faraday.

[3] A. Karbowski, K. Służewski, M. Sadowska, G. Karwasz, R. Viola, M. Gervasio, M. Michelini, *Discovering Electromagnetic Induction: Interactive Multimedia Path*, 14th Int. Congress on Multimedia in Physics Teaching and Learning, Udine 2009. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/DISCOVERING_ELECTROMAGNETIC_INDUCTION_OK.pdf

[4] C. Bernardini, *Bruno Touschek*, Il Nuovo Saggiatore, No. 3/1999, 29.

[5] A. Karbowski, M. Michelini, L. Santi, W. Peters, J. Trna, V. Engstrom, G. Karwasz, *MOSEM – Teaching Electromagnetism via Minds-on Experiments,* GIREP 2008 International Conference, "Physics Curriculum Design, Development and

Validation", Nicosia, Book of Abstracts s. 125. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/mosem_new/pliki/GIREP08_Workshop_GK.pdf .

[6] A. Karbowski (koordynator) i in., *Low-tech experimental kit.* Projekt UE „Mosem" No LLP-LdV-TOI-2007-NO/165.009, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Low-Tech_kit/html

[7] M. Sadowska, A. Karbowski, G. Karwasz, K. Służewski, K. Fedus, K. Rochowicz, *Toruński doświadczalnik z fizyki*, Materiały ZDF UMK, 2015.

[8] Wersja multimedialna artykułu: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Lenz.html

[9] L. Quéval, *BSmag Toolbox User Manual*, Tech. report, Dept. Elect. Eng., University of Applied Sciences Düsseldorf, Germany, April 2015. Available: http://www.lqueval.com.

[10] Z. Koupilowá, D. Mandiková, K. Rochowicz, G. Karwasz, *Sbirka zadań z fizyki. Zbiór zadań z rozwiązaniami. Mechanika*, Wydawnictwo Naukowe UMK, 2014, 113.

[11] R. P. Feynman, R. P. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, t. 2, PWN, Warszawa 1974, 293-295.

[12] G. Karwasz, A. Okoniewska*, Prawa, nie tylko dla Maxwella*, XXXVII Zjazd PTF, Gdańsk, 15–19.09.2003.

[13] G. P. Karwasz, *Między neorealizmem a hyper-konstryktywizmem – strategie dydaktyczne dla XXI wieku*, Problemy Wczesnej Edukacji, 3(15) 2011, „Awangarda w szkolnej i pozaszkolnej edukacji", 8–30.

http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/PWE_Karwasz_Miedzy_ neorealizmem.pdf

[14] G. Karwasz, *Nauczanie fizyki – trudności matematyczne czy nieumiejętność komunikacji?* Kognitywistyka i Media w Edukacji, No.1/ 2013, 107-114, ISSN 1643-6938. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2013/14_2013.pdf

# Samochód na wodę

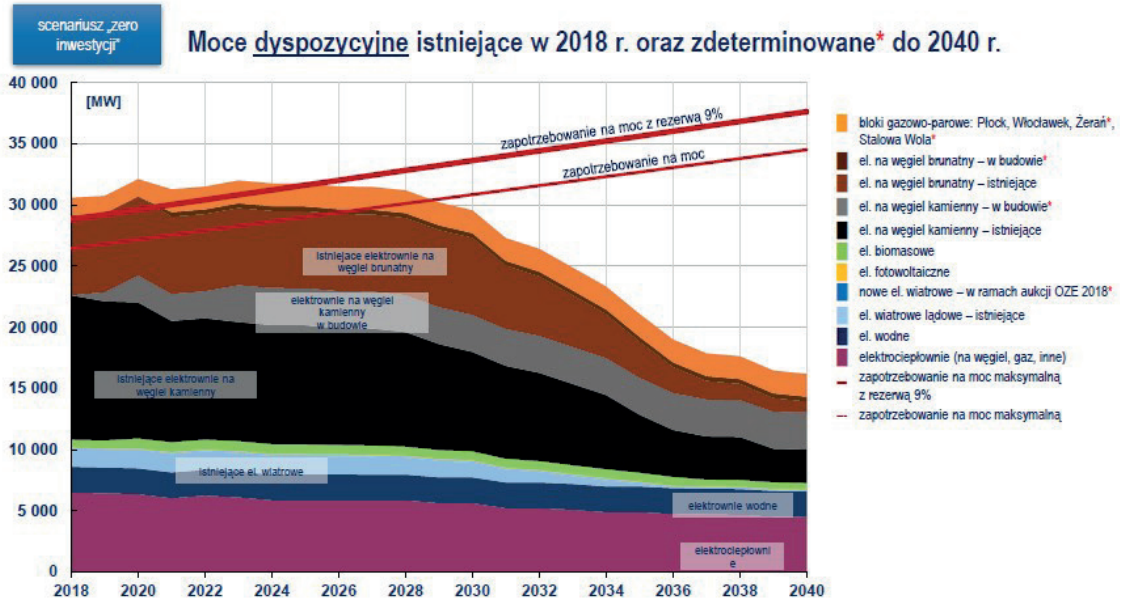
G. Karwasz, K. Wyborska,
A. Karbowski, A. Kamińska, T. Bury




Artykuł mówi zupełnie niedalekiej o przyszłości perspektyw energetycznych i technologii wodorowych. Całe mnóstwo nowych zagadnień będzie wymagało przygotowania interdyscyplinarnego uczniów: nie tylko w fizyce i chemii, lecz także w ekonomii.

## Koniec węgla

Ministerstwo Energii nawołuje do elektromobilności. Za kilka lat ma być w Polsce nawet dwa miliony samochodów elektrycznych. W Gdyni (i paru innych miastach Polski) jeżdżą trolejbusy (czyli autobusy zasilane prądem elektrycznym jak tramwaj) – kiedy zjeżdżają ze wzgórza, ich silniki działają jak prądnice i oddają prąd do sieci. Między innymi dzięki trolejbusom, Gdynia ma najczystsze powietrze w Polsce. Ale gdzie i jak powstaje prąd do zasilania trolejbusów (i przyszłych samochodów elektrycznych)? Dokładne porównanie (ryc. 1) wskazuje, że prąd ten powstaje na Śląsku, w Bełchatowie, w Koninie. I prąd ten ma kolor czarny lub brunatny.




**Ryc. 1.** Raport Ministerstwa Energii (22/1/2019): prognoza zapotrzebowania i podaży mocy elektrycznej w Polsce do 2040 roku. Główne „źródła" energii – węgiel kamienny i brunatny (paski czarny i brązowy) są na wyczerpaniu. https://www.gov.pl/web/energia/raport-mit-o-przyszlosci-energii-jadrowej

Jednakże z prognozy zapotrzebowania i podaży mocy elektrycznej w Polsce do 2040 roku (ryc. 1) wynika jeszcze kilka pesymistycznych wniosków. „Produkcja"[4] energii elektrycznej z węgla kamiennego i brunatnego ulegnie znacznej redukcji: złoża kopalin po prostu kończą się. Jeśli nie zostaną podjęte innowacyjne inwestycje, np. w energetykę jądrową, „na oko" w 2040 roku zabraknie 50% potrzebnej mocy elektrycznej (w Polsce zapotrzebowanie wynosi mniej więcej 1 GW na milion mieszkańców, a w Republice Korei jest to 1,5 GW).

Węgla i ropy zabraknie nie tylko w Polsce. Obecnie najwięcej reaktorów jądrowych powstaje w krajach arabskich. Oczywiście rządy tych krajów znają własne zasoby i na czas planują zastąpienie ropy przez inne „źródła" energii. Reaktor jądrowy nie jest tani – 1 GW mocy kosztuje tak około 4 mld euro. A Polska zaczęła właśnie płacić kary za emisję $CO_2$ – po parę miliardów euro rocznie. Dymiące kominy pod Koninem, ryc. 2, mu-

[4] Energii, oczywiście, nie „produkuje się" ale tylko przetwarza jej jedną formę na inną.

szą więc zniknąć, nie tylko ze względu na kary, ale też przez szacunek dla mieszkańców Pątnowa i okolic.



**Ryc. 2.** Polska jest, według najnowszego raportu „Nature" [6], jednym z czterech krajów (obok Mongolii, Kazachstanu i Indii) opierających swą energetykę na węglu. Tak dymią kominy elektrowni na węgiel brunatny w Pątnowie koło Konina (foto M. Karwasz)

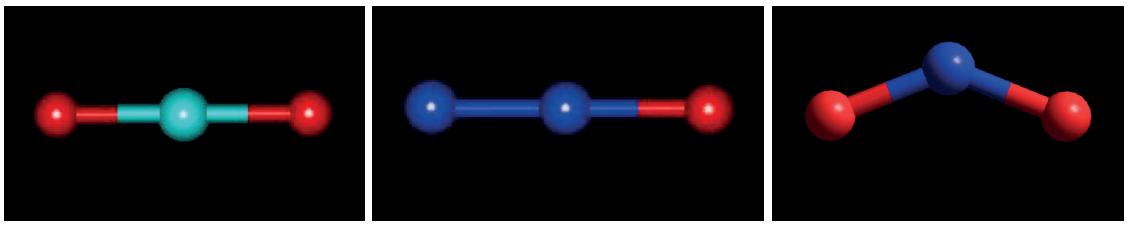
## Coraz cieplej

Globalny wzrost temperatury jest faktem coraz rzadziej negowanym. Zresztą, fizycy nie mają wątpliwości. To gazy „odsyłające" promieniowanie podczerwone z powrotem w kierunku powierzchni Ziemi są odpowiedzialne za efekt cieplarniany. Przypominamy zresztą, że naturalny (bez działań człowieka) efekt cieplarniany na Ziemi wynosi +33K: bez niego średnia temperatura wynosiłaby nie +15ºC a -18ºC. I to para woda jest głównym gazem cieplarnianym, jak to dyskutowaliśmy we wcześniejszym artykule [1].

Fizycy nie tylko rozumieją mechanizmy, ale też potrafią szybko szacować. Wzrost zawartości $CO_2$ w atmosferze z 270 ppm przed początkiem

ery przemysłowej do ponad 400 ppm to tak, znów „na oko", co najmniej 50%. Tak dużo $CO_2$, jak wykazują badania lodów Antarktydy, nie było przez ostatnie 400 tysięcy lat. Na szczęście (?) węgiel, gaz, ropa kończą się: miarodajne czasopismo, jakim jest „Nature", w 2002 roku oceniło światowe zasoby węgla na 200 lat, a gazu ziemnego na 55 lat[5].

Niestety wzrost temperatury nie ustanie wraz z emisją $CO_2$: inne gazy, jak $N_2O$ (pochodzący z upraw rolnych) i $CH_4$ (wydobywający się z rozmarzającej tundry i emitowany przez bakterie w procesach trawiennych) są jeszcze bardziej „cieplarniane". Wszystkie te gazy są cząsteczkami wieloatomowymi: istnieje wiele różnych sposobów (modów), na które mogą w nich drgać atomy. Energia tych drgań odpowiada energii kwantów światła podczerwonego, tak więc gazy te nie „wypuszczają" ciepła promieniowania z Ziemi. Cząsteczka $CO_2$ ma geometrię liniową, symetryczną: dopóki nie zacznie drgać, słabo pochłania promieniowanie elektromagnetyczne. Cząsteczka $N_2O$ (N = N = O), ryc. 3. mimo że liniowa, posiada stały *moment dipolowy* – ładunek dodatni i ujemny są w niej przesunięte. W rezultacie jej wpływ na efekt cieplarniany jest 300 razy większy niż $CO_2$ (a czas „życia" w atmosferze 144 lata [2]).

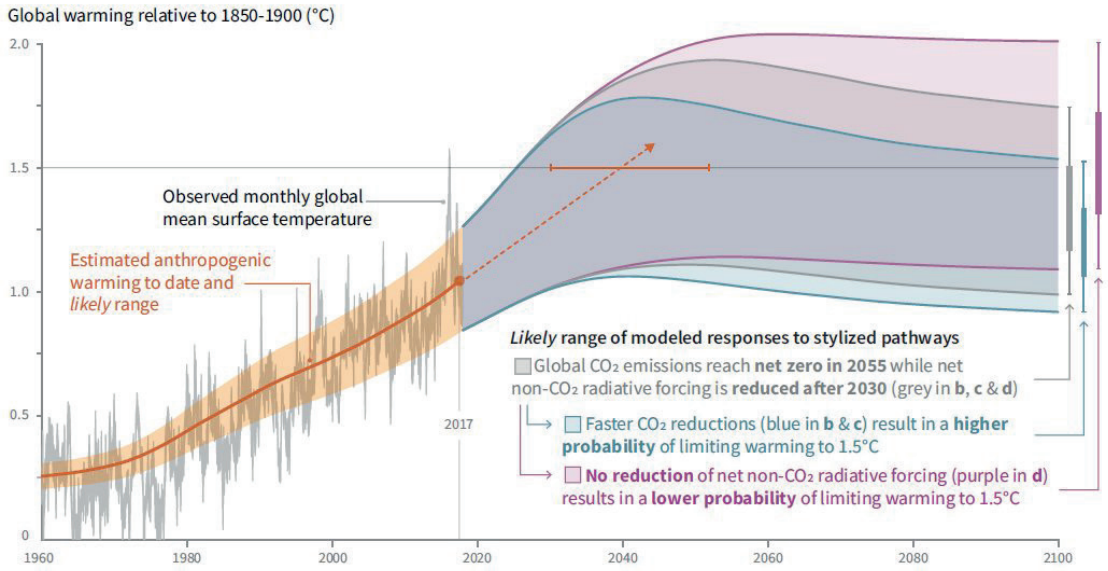


**Ryc. 3.** Cząsteczka $CO_2$ jest liniowa i symetryczna; dopiero wzbudzona do drgań zginających (010) uzyskuje moment dipolowy. Cząsteczka $N_2O$ jest liniowa, ale ma moment dipolowy. Cząsteczka $NO_2$ jest zgięta, więc ma moment dipolowy, choć 5-krotnie mniejszy niż $H_2O$; di-tlenek azotu powstaje w miejskim smogu i jest trujący. Model w skali – obliczenia HyperChem

Ostatni raport Międzyrządowego Panelu nt. Zmian Klimatycznych (IPCC) mówi o wzroście temperatury o 1,5° C do roku 2050 (w porównaniu z ro-

[5] Było to przed rozpoczęciem przemysłowego wydobycia gazu łupkowego w USA. Polska, w opinii geologów, ma po USA największe złoża gazu łupkowego. Niestety jego wydobycie powoduje znaczne spustoszenie środowiska przyrodniczego.

kiem 1850). Już nie tylko „ekolodzy” biją na alarm. Kolejne prestiżowe czasopismo, „Science” poświęciło w 2013 roku cały sierpniowy numer (No. 341) zmianom klimatycznym. Najgorzej dzieje się polarnym misiom: letni zasięg lodu na Arktyce zmniejszył się od 1980 roku o połowę [3] – nie mają jak polować na foki.




**Ryc. 4.** Najistotniejszy wynik ostatniego raportu IPCC nt. zmian klimatycznych: przewidywany wzrost temperatury (w stosunku do epoki przedprzemysłowej) wyniesie około 1–2°C (w zależności id scenariuszy emisji $CO_2$) i osiągnie maksimum około roku 2050. W modelu zakłada się zredukowanie emisji $CO_2$ do zera w roku 2055. Źródło: [4]

## Nowe energie

Nie ma jednej recepty na nowe źródła energii. Panele fotowoltaiczne do niedawna miały czas zwrotu inwestycji 20 lat; nowy raport „Nature” [4] mówi o zwrocie w ciągu jednego roku. Dla zapewnienia energii na potrzeby jednego gospodarstwa domowego (moc używana 3 kW maksimum), przy efektywności paneli 10%, potrzebne jest pokrycie nimi części dachu domku jednorodzinnego (przypominamy wartość stałej słonecznej 1340 W, ale jest to wartość energii przypadającej na $1m^2$ w kierunku prostopadłym i poza atmosferą).

Problemem paneli (i wiatraków) jest magazynowanie energii w okresie, kiedy słońce nie świeci i nie wieje wiatr. W Niemczech ten problem jest już rozumiany jako ogólnopaństwowy. Rozważa się najróżniejsze możliwości – od gigantycznych baterii akumulatorów litowych, przez zbiornik na wodór, do pompowania sztucznie wytworzonego metanu do podziemnych pieczar. (W Polsce zbiorniki rezerwowe gazu są, podobno, w żupach solnych w Inowrocławiu, ale gazu w nich starczy dla kraju jedynie na 48 godzin).

Wspomniany raport „Nature" wymienia kilkanaście opcji „źródeł" energii, od elektrowni jądrowych, poprzez elektrownie wiatrowe na morzu, wodne na rzekach, do spalania śmieci i wytwarzania metanu z biomasy. Autorzy zakładają, że w różnych częściach świata będą się niejako prawem „doboru naturalnego" rozwijały różne technologie, przy czym w 2050 większość energii elektrycznej będzie wytwarzana z ogniw fotowoltaicznych. A główny koszt rachunku za prąd będzie stanowiło jego magazynowanie. Jednym z rozwiązań są technologie wodorowe: wytwarzanie i magazynowanie wodoru.

## Ekonomia wodorowa

Wodór, mimo że jest głównym składnikiem Wszechświata (czytaj: gwiazd), na Ziemi nie występuje w stanie wolnym: zbyt lekki, aby pozostać w atmosferze. Na Ziemi jest związany w postaci wody (a także węglowodanów i wielu różnych minerałów). Istnieje kilka sposobów wytwarzania wodoru, np. przez pirolizę (tj. rozkład w wysokiej temperaturze) metanu $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ (odpadem jest węgiel w postaci sadzy) lub poprzez reakcję reformingu $H_2O + CH_4 \rightarrow CO + 3H_2$ (też w wysokiej temperaturze).

Najczystszym ekologicznie (choć nie najtańszym) sposobem wytwarzania wodoru jest elektroliza wody. Ale ważną zaletą elektrolizy jest, że nie wymaga wielkich instalacji przemysłowych. Jak to opisał w 2002 roku noblista Jeremy Rifkin, pojawia się nowa ekonomia, wodorowa („Hydrogen Economy"): każde gospodarstwo domowe wytwarza wodór na własne potrzeby (z własnych paneli słonecznych lub wiatraków) i zużywa go w miarę potrzeb, np. do tankowania zbiornika w samochodzie.

I znów problemem nie będzie wytwarzanie, ale magazynowanie. Naukowcy pracują nad różnymi rozwiązaniami: wtłaczaniem do butli (mówi się o ciśnieniu 800 atm.), skraplaniem lub chemicznym wiązaniem w porowatych metalach, w postaci wodorków, np. $MgH_2$. Wadą tego ostatniego pomysłu są trudności z szybkim (i regulowanym) odzyskiwaniem wodoru, co jest potrzebne np. w samochodzie. Potrzebny też jest nowy „silnik".

Spalanie wodoru w silniku termicznym nie miałoby sensu: wydajność takiego procesu jest ograniczona prawem Carnota – różnicą temperatur między silnikiem a chłodnicą. W praktyce wydajność silników spalinowych sięga jakiś 35%. Sposobem na uzyskanie wydajności, teoretycznie nawet do 80%, są tzw. ogniwa paliwowe, choć powinny się nazywać raczej „wodorowe". Ogniwo wodorowe to nic innego jak odwrócenie elektrolizy. A działa jak każda „bateria" Volty (lub Galvaniego – sami Włosi się o to spierają).

## Ogniwo Volty

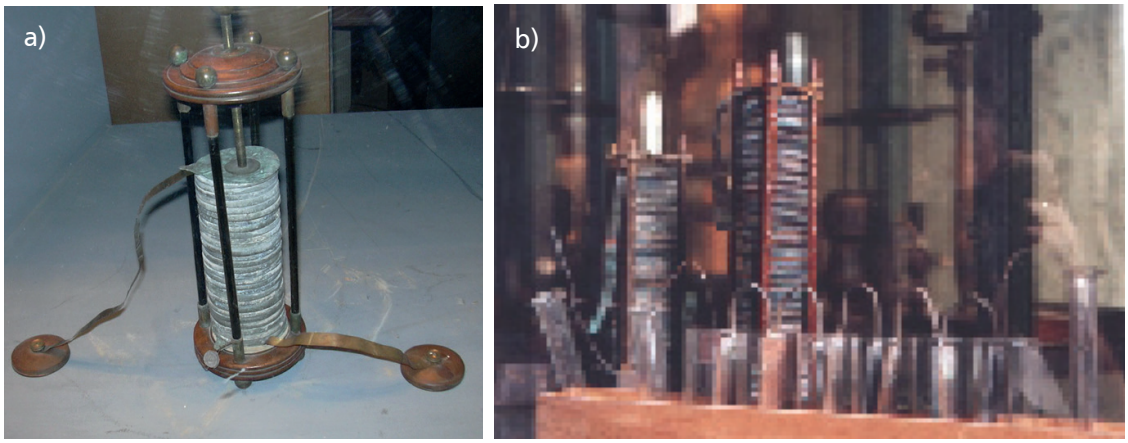
Pierwowzorem ogniwa paliwowego jest ogniwo Volty – dwa różne metale zanurzone w wodzie (z dodatkiem soli, kwasu, zasady[6]). Pierwsze ogniwo Volty (1799 r.) to był stosik monet – cynowych i srebrnych, ułożonych na przemian, a pomiędzy nimi (tj. między każdą parą) – filc nasączony rozcieńczonym kwasem. Volta próbował działania ogniwa, kładąc pary monet na języku [6]. Zauważył, że jeśli na czubku języka kładł monetę cynową, czuł smak kwaśny[7].

Volta słusznie stwierdził, że przyczyną powstawania prądu jest obecność dwóch różnych metali. A kierunek prądu określił od srebra (droższego) do cyny. Dziś wiemy, że jest to odwrotnie niż kierunek przepływu elektronów. Ale elektron został odkryty dopiero sto lat później.

---

[6] Ten dodatek wynika z niskiej przewodności elektrycznej czystej wody. Aby się o tym przekonać, wystarczy wrzucić bateryjkę „paluszek" do szklanki z wodą: bez dodatku soli nie obserwujemy bąbelków wodoru i tlenu. A sama bateria musi być nowa, bo do elektrolizy potrzeba napięcia 1,23 V.

[7] Dziś to doświadczenie można powtórzyć z eurocentami. Są one, co prawda, żelazne, ale pokryte miedzią. Zawijamy je do połowy aluminiową folią (jak pół-księżyc) i dotykamy końca języka: kwaśny smak (od jonów $Al^{+3}$ przechodzących do śliny) czujemy jeszcze po zdjęciu monety z języka.




**Ryc. 4a)** Oryginalne ogniwo Volty z Muzeum w Como: stosik par krążków cynkowych i miedzianych, przełożonych filcem zwilżonym kwasem. b) To samo muzeum – dwa ogniwa „stosy" i bateria szklanek, połączonych elektrycznie (płytki cynkowe i miedziane). Foto: GK; Tempio Voltiano, Como

To z różnic chemicznych między metalami, np. srebra i cyny wynika, że jeden z nich (cyna) łatwiej traci elektrony, a inny trudniej. W fazie gazowej mówilibyśmy o energii jonizacji. Dla srebra wynosi ona 7,58 eV, a dla cyny 7,34 eV. W fazie stałej wartości energii niezbędnej do wybicia elektronu (np. poprzez efekt fotoelektryczny) są niższe: 4,7 eV dla Ag i 4,3 eV dla Sn. (Wartości energii fotonów niezbędne do wybicia elektronów z metalu nazywamy, za Einsteinem, „pracą wyjścia").

„Praca wyjścia" w ogniwie Volty – metalach zanurzonych w wodzie – jest jeszcze inna. Fizycy nie potrafią wyliczyć, jakie napięcie powstanie między srebrem a cyną czy miedzią a cynkiem (to była druga wersja ogniwa Volty – w postaci blaszek zanurzonych w szklankach z kwasem, foto 4b).

Procesy zachodzące w ogniwie Volty (a właściwie Daniella, o tym za chwilę) to oddawanie elektronu przez atom cynku (i przechodzenie powstałego jonu $Zn^+$ do roztworu), przepływ elektronów zewnętrznym przewodem do miedzi oraz na elektrodzie miedzianej – przyłączanie elektronu do jonu miedzi (osadza się metaliczna miedź, a w roztworze ubywa $Cu^+$).

$Zn \rightarrow Zn^+ + e$ (chemicy nazywają to utlenianiem)
$Cu^+ + e \rightarrow Cu$ (chemicy nazywają to redukcją)

Elektrodą ujemną w ogniwie Daniella jest cynk (fizycy nazywają taką elektrodę anodą), a dodatnią (katodą) jest miedź.

## Szereg elektrochemiczny

Fizycy (ani chemicy) nie potrafią jeszcze wyliczyć, jakie napięcie powstanie między dwoma różnymi metalami. To nie tylko metal, ale również granica faz woda-metal decydują o tym napięciu. Dopiero kilka miesięcy temu pojawiła się publikacja, w której przedstawiono próby wyliczenia pracy wyjścia elektronów z platyny zanurzonej w wodzie [7]. Nie jest to jeszcze wynik w pełni poprawny, ale zaczynamy rozumieć, że *interface* (warstwa graniczna) między wodą a metalem zasadniczo zmienia fizykę procesu.

Jeśli nie można policzyć, to trzeba zmierzyć, przyjmując jakiś punkt odniesienia. Punktem tym jest najlżejszy metal-niemetal, czyli wodór. Nie dysponujemy jednak wodorem w postaci elektrody; używa się więc elektrody z platyny (ale koniecznie pokrytej platyną koloidalną, tzw. czernią platynową). Platyna działa jak katalizator (o tym za chwilę), „zachęcając" wodór do oddawania elektronów (a przed tym, ułatwiając rozpad drobiny wodoru $H_2$ na atomy, czyli *dysocjację*).

Potencjały elektrochemiczne wynoszą[8]:

| Li | Al | Zn | Fe | Sn | $H_2$ | Cu | Ag | Au | $O_2$* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -3,04 | -1,66 | -0,76 | - 0,44 | -0,13 | 0 | +0,34 | +0,80 | +1,23 | |

* Reakcja ma przebieg $O_2 + 4H^+ + 4e^- \leftrightarrow 2H_2O$

Na początku szeregu Volty leży lit, z napięciem w stosunku do wodoru -3,05 V (dlatego bateria litowe dają największe napięcia). Cynk daje na-

[8] Jest to wersja uproszczona: w rzeczywistości należy zdefiniować, jaka reakcja zachodzi. Inny jest np. potencjał elektrochemiczny, jeśli w roztworze są jony miedzi $Cu^+$, czyli reakcja ma przebieg $Cu^+ + e \rightarrow Cu$ (potencjał +0,52 V) a inny, gdy jony $Cu^{2+}$ (reakcja $Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu$, potencjał +0,34 V).

pięcie -0,76 V, a miedź +0,34 V. Nie oznacza to jednak, że wkładając do roztworu soli lub kwasu elektrodę miedzianą i cynkową, otrzymamy różnicę potencjałów 0,76+0,34 = 1,1 V. Byłoby tak, gdyby w ogniwie zachodziły reakcje jak w równaniu (1). Ogniwo powinno mieć dwa zbiorniki na elektrolit – jeden z jonami cynku, drugi z jonami miedzi. To jest właśnie „poprawka" wprowadzona do ogniwa Volty przez Johna Daniella (1836 r.): unika się bąbelkowania wodoru na katodzie.

Bez przegrody (i dwóch różnych elektrolitów) na elektrodzie dodatniej nie wydzieli się miedź, bo nie ma jonów $Cu^{+}$ w roztworze – wydzieli się wodór z wody. Użyteczne napięcie wyniesie więc jedynie 0,76 V, nawet jeśli jako katody użyjemy elektrody ze złota. Dla zamknięcia obwodu jest jednak potrzebna albo porowata przegroda (aby umożliwić przepływ jonów $SO_4^{-2}$), albo wręcz zewnętrzny „klucz jonowy", wypełniony żelem z $KNO_3$. Elektrochemia jest skomplikowaną dziedziną badań.

## Ogniwo wodorowe Williama

Ogniwo wodorowe (zwane też „paliwowym") zostało zaproponowane w 1838 roku przez Wiliama Grove'a [8]. Dopiero przy okazji lotów Apollo znalazło prawdziwą realizację: i tlen, i wodór były w zbiornikach rakiety, ogniwo wytwarzało prąd elektryczny, a powstała woda służyła do picia.

Ogniwo „paliwowe" jest odwróceniem elektrolizy wody. W elektrolizie, aby z wody wytworzyć $H_2$ i $O_2$, należy do elektrod przyłożyć napięcie elektryczne (minimum 1,23 V). W ogniwie, dostarczając do dwóch elektrod gazowy tlen i wodór, uzyskujemy na elektrodach użyteczne napięcie. Jest to niejako oczywiste, bo reakcja syntezy wody jest reakcją egzotermiczną.

To „oczywiste" nie jest jednak takie proste w realizacji: i wodór, i tlen są gazami, więc najpierw należy je rozpuścić w wodzie (ale są dość dobrze rozpuszczalne), później należy „zmusić" oba gazy, $H_2$ i $O_2$ do przejścia do postaci atomowej, H i O, czyli do *dysocjacji*. Potrzebne są ku temu odpowiednie katalizatory. W przypadku wodoru używa się platyny, w jej koloidalnej (nano-strukturalnej) postaci, zwanej przez chemików czernią platynową. W przypadku $O_2$ próbuje się różnych katalizatorów, zarówno metalicznych (Ni), jak i tlenkowych (np. tlenków wolframu odpowiednio

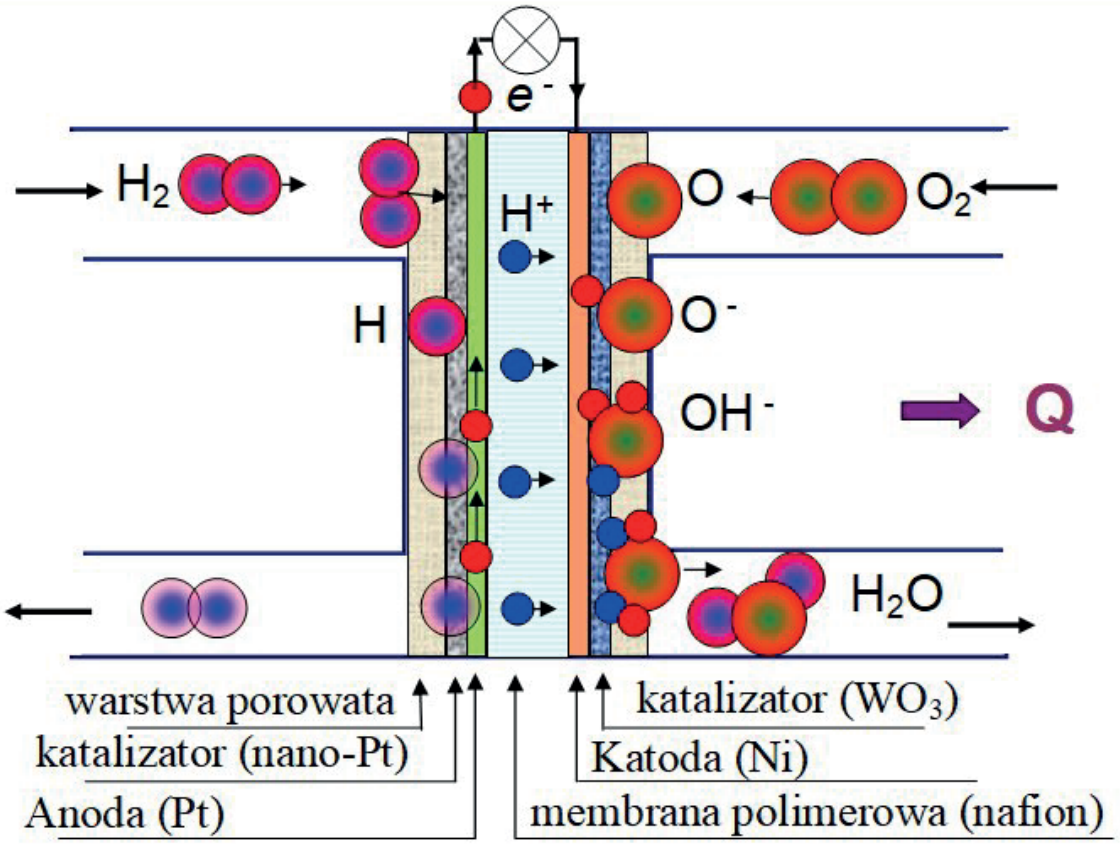
aktywowanych). Ogniwo ma jednak sporo ograniczeń – mocy, konstrukcji, materiałów (i ceny[9]).

Kluczem ogniwa paliwowego jest membrana oddzielająca dwa obszary. Jak w ogniwie Daniella obwód elektryczny jest zamknięty przez jony $SO_4^{2-}$ dyfundujące przez przegrodę (lub inne jony w zewnętrznym kluczu jonowym) tak w ogniwie wodorowym obwód elektryczny jest zamknięty przez przepływ jonów $H^+$ z obszaru anody do katody: to tam zachodzi reakcja powstawania $H_2O$ z $H^+$ i tlenu, zob. ryc. 5.

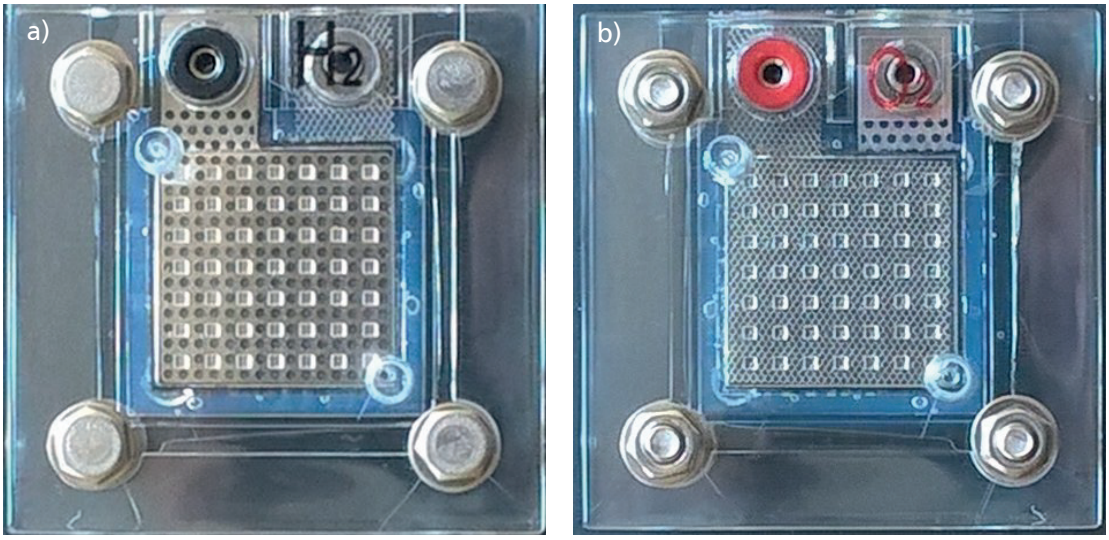
Przepływ jonów $H^+$ (czyli „gołych" protonów, o średnicy ostatnio zmierzonej $0{,}86 \times 10^{-15}$m) nie jest jednak procesem fizycznym, a raczej chemicznym. W specjalnym fluoryzowanym polimerze, z grupami kwasu sulfonowego, protony „skaczą" od cząsteczki do cząsteczki polimeru. Membrana ma więc izolować dwa katalizatory, nie przepuszczać wody ani gazów, a transportować protony. Mimo wielu wysiłków powszechnie używany pozostaje fluorowany polimer z grupą kwasu sulfonowego, tzw. nafion, o grubości 20 μm, zob. foto z mikroskopu elektronowego w Internecie [8].

Nie do końca rozumiemy zarówno chemię, jak i fizykę ogniwa wodorowego. Nie wiadomo, czy to grupa sulfonowa czy fluoryzowanie polimeru zapewnia transport $H^+$. Platyna jest droga. Nie wiadomo, gdzie traci się część napięcia elektrycznego. Do elektrolizy potrzeba 1,23 V, a najwyższe napięcie pozyskane z ogniwa wodorowego to 1,0 V. Na razie technologowie nazywają tę stratę „potencjałem aktywacji". Raczej jednak przypomina ona tzw. napięcie polaryzacji (0,6–0,8 V) w krzemowym ogniwie fotowoltaicznym [9].

[9] Analiza kosztów wskazuje, że dla zasilania samochodu osobowego koszt samego ogniwa jest porównywalny z obecnym kosztem wytworzenia całej „reszty" samochodu (karoserii, wnętrza itd.).




**Ryc. 5.** Schemat (GK) ogniwa paliwowego. Z dwóch stron dopływa gazowy wodór i tlen. Przegroda rozdzielająca dwa obszary ma wielowarstwową strukturę: zewnętrzne porowate warstwy mają na celu „uwięzienie" gazu, tak aby wszedł on w kontakt z katalizatorem. Membrana z nafionu ma 20 $\mu$m Od strony wodorowej używa się platyny (warstwa rzędu 1 $\mu$m), od strony tlenowej próbuje się różnych technologii, jak Ni, nanostrukturalny $WO_3$, Se itd. Procesy od strony tlenowej są słabiej zrozumiane niż od strony wodorowej. Od strony wodorowej $H_2$ ulega dysocjacji na H, w kontakcie z katalizatorem traci elektron (ten płynie na drugą stronę ogniwa poprzez obwód zewnętrzny), proton $H^+$ dyfunduje w kierunku anody. Po stronie anody $H^+$ łączy się z O (lub OH i $OH^-$, dokładnie nie wiadomo), tworząc wodę. W postaci wyblakłych krążków pokazujemy, że wodór był, ale rozpadł się na $e^-$ i na $H^+$.

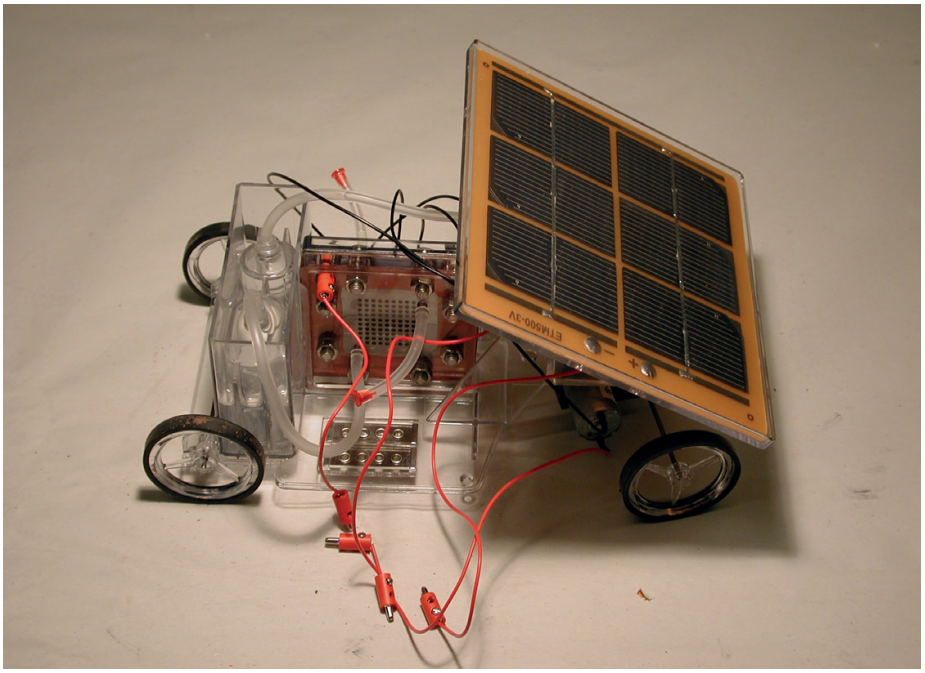



**Rys. 6a)** Strona $H_2$ ogniwa paliwowego z zabawkowego modelu samochodu „na wodę". Widoczny platynowy katalizator i perforacje prowadzące do membrany, b) strona $O_2$ – widoczna jest nieco inna konstrukcja. Fot. AK

## Samochód na wodę

W pełni użyteczne samochody „na wodę" zostały skonstruowane już kilkanaście lat temu. Nadal brakuje jednak właściwej motywacji ekonomicznej (ropa naftowa jest wciąż tania), a technologie nie są do końca opracowane. Nafion jest drogi i niezbyt odporny na temperaturę (w procesie powstawania $H_2O$ wydziela się ciepło), nie mówiąc o odporności całego ogniwa na mróz. Ale nafion to nie jedyna technologia możliwa.

Zbiorniki na wodór zajmują cały bagażnik, podobnie jak baterie ołowiowe w samochodach dziś, w 2019 roku, deklarowanych na targach w Szwajcarii jako elektryczne. Nie mówiąc już o tym, że brakuje stacji do tankowania wodoru. Najbardziej zaawansowane prace nad konstrukcją samochodu z ogniwami paliwowymi są prowadzone w Korei, Chinach i Japonii.



**Ryc. 5.** Zabawkowy samochód „na wodę" (firmy „Kosmos & Thames"). Najpierw wlewa się wodę (koniecznie destylowaną) do zbiornika z lewej strony, podłączając do ogniwa paliwowego (w środku) panel słoneczny (z prawej). Prąd powstający w panelu słonecznym dokonuje elektrolizy wody (ogniwo pracuje jako elektrolizer), a $H_2$ i $O_2$ trafiają do zbiorników (z lewej strony): zbiornik na $H_2$ jest dwukrotnie szerszy). Po wytworzeniu (gazowego) paliwa przełącza się przewody, tak aby silnik samochodu (pod panelem) był zasilany prądem powstającym w ogniwie paliwowym. Oczywiście w pełnym słońcu silnik może być zasilany bezpośrednio z panelu fotowoltaicznego (foto GK).

## Potrzebni eksperci

Wspomniana prognoza światowej „produkcji" energii w 2050 roku zakłada, że węgla i ropy już nie ma: 80% zapotrzebowania światowego jest pokrywane z ogniw fotowoltaicznych. To z kolei rodzi problem magazynowania energii w czasie, kiedy słońce nie świeci, a energia elektryczna jest potrzebna. Rozważa się najróżniejsze pomysły, jak wytwarzanie (z $CO_2$ i $H_2$)

sztucznego metanu, nowe zbiorniki do przepompowywania wody, a przede wszystkim technologie oparte na wodorze. Pracujemy również [10] nad reaktorem termojądrowym, syntetyzującym hel z ciężkiego wodoru.

Bez wątpienia, potrzebne są nowe pomysły. I nowi specjaliści. Jacy? Nie wiadomo. Ale znajomość fizyki będzie kluczowa.



**Ryc. 7a)** Płytka aluminiowa i miedziana włożone do jabłka „dają" różnicę potencjałów (warsztaty Uniwersytetu Dziecięcego w Głogowie, 2011, fot. Maria Karwasz); b) miłe zaskoczenie, gdy z wodoru i tlenu można zasilić ogniwo paliwowe, a z powstałego prądu mały wiatraczek (fot. KW).

UE

Artykuł powstał w ramach projektu EU H2020 „Fuel Cells HydroGen educational model for schools" (FCHgo). Celem projektu jest przybliżenie w edukacji szkolnej problemów energii, środowiska i technologii wodorowych [11].

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246.
The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland

[1] G. Karwasz, K. Służewski, Ziemia pod pierzynką, czyli o naturalnym efekcie cieplarnianym, Foton, 121 (Lato 2013) 37–42. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2013/Cieplo1_2013.pdf

[2] https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases

[3] „Global Warming of 1.5ºC. Sumary fo Policymakers", IPCC, 2018 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf

[4] E. Post et al. , Ecological Consequences of Sea-Ice Decline, Science 341 (2013), 519.

[5] D. Bogdanov et al., Radical transformation […], Nature Communications, 10 (2019) 1077.

[6] G. Karwasz and A. Karbowski, Na końcu języka (Volty), Foton 96 (2007) 34.

[7] S. Sarong and A. Groß, The electric double layer […], J. Chem. Phys. 114 (2018) 084705

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell

[9] G. Karwasz, Zjawisko fotoelektryczne (wewnętrzne), Na ścieżkach Fizyki Współczesnej, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/statki2.html

[10] G. Karwasz, Słońce w (magnetycznym) koszyku, "Głos Uczelni, UMK, 3/2017, 24.
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2017/GK_Slonce_w_koszyku_2017.pdf

[11] FCHGo Project, https://fchgo.eu/
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/837

Prof. Grzegorz Karwasz jest kierownikiem Zakładu Dydaktyki Fizyki UMK i ekspertem IAEA ONZ w tematykach energii termojądrowej

Dr Anna Kamińska jest adiunktem w Akademii Pomorskiej w Słupsku, współtwórcą interaktywnych wystaw „Fizyka zabawek" (1997), współwykonawcą projektu UE „Physics is Fun" (2004)

Dr Andrzej Karbowski jest adiunktem w ZDF UMK, koordynatorem pakietu doświadczeń z elektromagnetyzmu w projekcie UE LdV MOSEM (2009)

Mgr Tadeusz Bury jest nauczycielem informatyki i techniki w IX LO w Gdyni i w ZS Szkół Energetycznych w Gdańsku oraz doradcą metodycznym w zakresie informatyki, zdobywcą wielu nagród (jako nauczyciel laureatów) w konkursach krajowych z informatyki

Mgr Katarzyna Wyborska, absolwentka UMK, jest nauczycielem fizyki w Dąbrowie Biskupiej i Ośniszczewku, zdobywczynią II nagrody w ogólnopolskim konkursie „Postaw na Słońce" (2016)

# Zakończenie

Przedstawiliśmy Państwu *Toruński doświadczalnik* jako czwartą pozycję z naszej serii *Toruńskich po-ręczników* do fizyki: po-ręcznik do gimnazjum [1], liceum [2] i dydaktyki fizyki współczesnej [3]. Pozycja ta – jako tezaurus możliwych doświadczeń na poziomie szkoły podstawowej i średniej – ma charakter bardziej techniczny. Ograniczyliśmy do minimum aparat matematyczny, tak aby opisy były dostępne również dla uczniów i pasjonatów fizyki. Innowacyjne, a jednocześnie interaktywne doświadczenia wpisują się w koncepcję dydaktyki kognitywistycznej (tu odsyłamy Państwa do naszego niedawnego opracowania [4]).

Lista doświadczeń powstała w wyniku wieloletnich działań i współpracy międzynarodowej, ale jest ona tylko przykładowa. Celem właściwym *Doświadczalnika* jest pokazanie, że nie trzeba korzystać z (często zardzewiałych i rozmagnesowanych) sztabkowych i podkowiastych magnesów, ale można pociąć na trociny kuchenny zmywak ze stalowych wiórków, umieścić go w plastikowej obudowie CD i używać do pokazywania linii pola magnetycznego. Miedziana rurka i magnes neodymowy, wszystko w cenie nieprzekraczającej kilku euro, mogą być zaczątkiem klasowej zabawy. Odżegnujemy się od stwierdzenia: „ale to oni mają tego dużo!”

Po pierwsze, dajemy dydaktyczną „gwarancję" w postaci porad technicznych i dydaktycznych. Po drugie, oferujemy, jako możliwy dodatek do książki, eksponaty proste do wytworzenia dla Uczelni, a trudne dla szkoły (jak drut na silniczki). Pozostajemy do Państwa dyspozycji.

Andrzej Karbowski (akarb@fizyka.umk.pl)
Grzegorz Karwasz (karwasz@fizyka.umk.pl)

[1] G. Karwasz, M. Sadowska, K. Rochowicz, *Toruński po-ręcznik do fizyki. Gimnazjum I klasa: Mechanika*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2010.

[2] G. Karwasz, *Toruński po-ręcznik do fizyki. IV. Fizyka współczesna i astrofizyka*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2020.

[3] G. Karwasz, A. Karbowski, K. Fedus, *Dydaktyka fizyki współczesnej*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2022.

[4] *Dydaktyka i pedagogika kognitywistyczna. Zasady ogólne i implementacje w fizyce*, Praca zbiorowa pod redakcją Doroty Siemienieckiej i Grzegorza Karwasza (autorzy: Piero Crispiani, Bronisław Siemieniecki, Grzegorz Karwasz, Anna Kamińska, Andrzej Karbowski, Krzysztof Rochowicz, Zhuldyzay Ye. Akhimhanova), Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2023.

# Spis cytowanych pozycji literaturowych w poszczególnych rozdziałach

**1.1.**

[1] Mark Olson, *Common Magnets, Unexpected Polarities*, The Physics Teacher 51, 454 (2013).

**1.2.**

[1] David Featonby, *Experiments with neodymium magnets*, Phys. Educ. 40, 505 (2005).

**1.3.**

[1] Kerry Browne and David P. Jackson, *Simple Experiments to Help Students Understand Magnetic Phenomena*, The Physics Teacher 45, 425 (2007).

[2] Stanisław Bednarek, Jacek Ćwik, *Dia- czy paramagnetyk? Oto jest pytanie!*, Fizyka w Szkole, 1/2023, 36.

**1.4.**

[1] Rene Descartes, *Zasady filozofii*, PWN, 1960

**2.1.**

[1] Szymon Pustelny, *Niezwykła kariera pola magnetycznego*, Foton 93, Lato 2006, s. 17.

[2] Silvia Defrancesco, Fabrizio Logiurato, Grzegorz Karwasz, Geomag paradoxes", Physics Education, 41(1), 2006. https://doi.org/10.1119/1.2809146

**2.2.**

[1] Mark Olson, *Common Magnets, Unexpected Polarities*, The Physics Teacher 51, 454 (2013).

**2.3.**

[1] Rene Descartes, *Zasady filozofii*, PWN, Warszawa 1960.

[2] Silvia Defrancesco, Fabrizio Logiurato, Grzegorz Karwasz, *Geomag paradoxes*", Physics Education, 41(1), 2006.

**3.3.**

[1] J. Yunus, H. İ. Fındık, „Simple experiments to help students understand magnetic phenomena", The Physics Teacher 45(7):425–429, https://doi.org/10.1119/1.2783151

**4.2.**

[1] David Featonby, *Experiments with neodymium magnets*, Phys. Educ. 40, 505 (2005).

**5.2.**

[1] Sandro Stringari i RobertWilson, *Romagnosi and discovery of electromagnetism*, Atti dell'Accademia dei Lincei, Rzym 1998. https://link.springer.com/article/10.1007/BF02904378

[2] Szymon Pustelny, *Niezwykła kariera pola magnetycznego*, Foton, 93, Lato 2006, s. 17.

[3] Kipnis, N. Chance in Science: The Discovery of Electromagnetism by H.C. Oersted. Science Education 14, 1–28 (2005). https://doi.org/10.1007/s11191-004-3286-0

**5.3.**

[1] Andrzej Zięba, *O definicji i realizacji ampera w fizyce klasycznej*, Foton 125, Lato 2014, 31.

**5.4a.**

[1] Marian Braun, Weronika Śliwa, Odkryć fizykę 2, Podręcznik dla liceum ogólnokształcącego i technikum, Nowa Era, Warszawa 2020, s. 150.

[2] J. J. Genova, *Magnetic Fields of Current Carrying Wires An Undergraduate Laboratory Experiment*, American Journal of Physics 40(5), 694–697 (1972). https://doi.org/10.1119/1.1986620

[3] Y. Ogawara, S. Bhari, S. Mahrley, "Observation of the magnetic field using a smartphone", The Physics Teacher 55(3), 184–187 (2017), https://doi.org/10.1119/1.4976667

**5.4b.**

[1] Roberto Hessel, *More on Faraday's and Lenz's laws – Qualitative demonstrations.* Phys. Teach. 1 March 2011; 49 (3): 184–188.

**6.3b.**

[1] 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

[2] Stanisław Bednarek, *Najprostszy silnik elektryczny*, Delta, 1/2012, s.18.

**6.3c.**

[1] 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

[2] Stanisław Bednarek, *Silnik unipolarny z wirującą puszką*, Delta, 4/2012 s. 20.

**7.2.**

[1] Carlos Saraiva, *A simple demonstration of Lenz's law*, Physics Education 41, 288 (2006) , https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/41/4/F02

**7.3a.**

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

**7.3b.**

[1] Carlos Saraiva, *A simple demonstration of Lenz's law*, Physics Education 41, 288 (2006).

[2] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/157

[3] J. A. Molina-Bolívar, A. J. Abella-Palacios, *A laboratory activity on the eddy current brake*, European Journal of Physics, 33 (2012), 697–707.

**7.3c.**

[1] Fernando G. Tomasel, Mario C. Marconi, *Rolling magnets down a conductive hill: Revisiting a classic demonstration of the effects of eddy currents*, Am. J. Phys. 80, 800–803 (2012), https://doi.org/10.1119/1.4730939

[2] Vladimir Saranin, Denis Keldyshev and Yuriy Ivanov, *Investigation of the motion of a magnet along conductive inclined plane by means of a robotic set*, Physics Education 54 025003 (2019), https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aaf42f

**7.3e.**

[1] Fred Behroozi, *Weighinga Magnet as it Falls with Terminal Velocity Through an Aluminum Pipe*, The Physics Teacher, 56, 474 (2018).

[2] Sahil Jain et al., *Investigation of a Magnet falling through a copper tube*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 810 012042 (2020).

[3] G. Donoso, C. L. Ladera and P. Martín, *Magnet fall inside a conductive pipe: motion and the role of the pipe wall thickness*, European Journal of Physics, 30 (4), (2009).

[4] James Walker, *Physics*, Pearson Education, Inc. 2017.

[5] Wyd. włoskie: James Walker, *Dialogo con la Fisica*, 3. *Elettromagnetismo. Fisica moderna*. Pearson Italia, Milano–Torino 2018.

[6] Antonio Caforio, Aldo Ferilli, *Nuova Physica per i licei scientifici*, Vol. 3. Le Monnier, 2001.

**10.2.**

[1] A. Okoniewska, G. Karwasz, *Doświadczenie (Coulomba) pod choinkę*, Foton 83 (Zima 2003), 55.

[2] P. F. Hinrichsen, *Comments on "Letting students discover the power, and the limits, of simple models: Coulomb's law"*, The Physics Teacher, 57, 132–133 (2019).

Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/443

**10.3.**

[1] Jerry Touger, *Bigger gap...bigger spark*, The Physics Teacher, 30, 454 (1992).

Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/506

[2] Robert C. Weast ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (67th ed.), Boca Raton, FL: CRC Press, 1986. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Volta/

[3] S. Kowalski, *Doświadczenia z elektroforu Volty*, Wydawnictwo Szkolne PWN, Warszawa 2005, Fizyka w Szkole, nr 6, s. 30–33.

**10.4.**

http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/507

**11.1.**

[1] Szereg elektrochemiczny: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/499

[2] Szereg elektrochemiczny (obszerna wersja) Robert C. Weast ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (67th ed.), Boca Raton, FL: CRC Press, 1986.

[3] Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/498

[4] G. Karwasz, A. Karbowski, *Na końcu języka (Volty).*, Foton 96, Wiosna 2007, 34.

[5] A. Okoniewska, G. Karwasz, *Volta... i popłynął prąd*,

http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Volta/

[6] M. Branca, R. G. Quidacciolu, I. Soletta, *Big Pile or Small Pile?*, The Physics Teacher 51(7), 406–409 (2013).

[7] J. Mertens, „Shocks and sparks: The Voltaic pile as a demonstration device" https://www.jstor.org/stable/237757

[8] M. Branca, R. G. Quidacciolu, I. Soletta, *Big Pile or Small Pile?*, The Physics Teacher 51(7), 406–409 (2013), https://pubs.aip.org/aapt/pte/article/51/7/406/276697/Big-Pile-or-Small-Pile

**11.3.**

[1] Stanisław Bednarek, *Ludzka strona baterii*, Delta 12/2013, s. 16.

**12.2.**

[1] M. Lewandowski, *Pole magnetyczne Ziemi*, Urania – Postępy Astronomii 2/2021, s. 48.

[2] F. Govoni, L. Feretti, *Magnetic fields in clusters of galaxies*, International Journal of Modern Physics D, 13, 1549–1594 (2004).

[3] J. L. Han, *Observing interstellar and intergalactic magnetic fields*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 57, 375–415 (2019).

## Literatura dodatkowa

[1] A. Eff-Darwich, *The Electric Monochord: A Musical Demonstration About Electromagnetic Induction*, American Association of Physics Teachers, 2021, New York, The Physics Teacher, 59(9), s. 694–695.

[2] E. Dumont, H. U. Fuchs, F. Corni, A. Contini, T. Altiero, M. Romagnoli & G. P. Karwasz, *FCHgo: Fuel Cells HydroGen educational model for schools, an imaginative approach to hydrogen and fuel cell technology for young students and their teachers*. GIREP-ICPE-EPEC-MPTL 2019, Journal of Physics: Conference Series, 1929 (2021) 012019.

[3] Fuchs, H. U., Corni, F., Pahl, A. Embodied Simulations of Forces of Nature and the Role of Energy in Physical Systems. Educ. Sci. 2021, 11, 759. https://doi.org/10.3390/ educsci11120759.

[4] M. Górski, Włosy, balon i plastikowy pręt – elektrostatyka na wesoło, Wydawnictwo Szkolne PWN, 2013, Warszawa, Fizyka w Szkole, nr 2, s. 45–49

[5] K. Jeličić, M. Planić, G. Planišič, Analyzing High School Students' Reasoning About Electromagnetic Induction, APS, 2017, College Park, Physical Review Physics Education Research, 13, 010112.

[6] A. Karbowski, Doświadczenia z magnetyzmu – projekt „Teaching Physics in Secondary School", Postępy Fizyki, 60 (6), 2009, 257–259.

[7] Osborne, Jonathan & Dillon, Justin. (2008). Science Education in Europe: Critical Reflections.

[8] P. Mazzoldi, M. Nnigro, C. Voci, *Fisica – Elettromagnetismo*, EdiSES, Napoli 2005, s. 246.

[9] N. C. Seng, The Effect of Classroom Demonstrations Based on Conceptual Change Instruction on Electromagnetism, Taylor & Francis, 2009, London, Int. J. of Science Education, 31(10), 1349–1373.

[10] Shulman L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. Educational Researcher, 15(2), 4–14.

[11] P. J. Smith, L. M. Jones, *Simple Experiments for Maxwell's Equations*, AAPT, 2010, New York, The Physics Teacher, 48(3), 174-177.

[12] Á. Suarez et al., Electromagnetic Field in Introductory Physics, APS, 2023, College Park, Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 19, 020113.