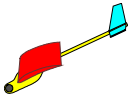
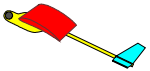
Materiały do wykładu



Fizyka w doświadczeniach



Krzysztof Korona

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

2010-25

Materiały do celów dydaktycznych przeznaczone dla studentów Uniwersytetu Warszawskiego,
Wykorzystanie ich w innych celach jest możliwe pod warunkiem uzyskania zgody autora.

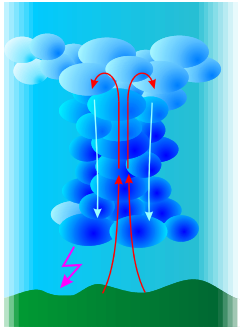
III Pola i prądy

Wyobraźmy sobie świat sprzed stu kilkudziesięciu lat. Ludzie znali wszystkie prawa mechaniki i potrafili policzyć ruch planet. Odkryli wszystkie lądy, wszystkie trwałe pierwiastki chemiczne itd. Niektórzy twierdzili, że w nauce nie ma już nic więcej do odkrycia. Jednocześnie nie dość, że nie było jeszcze telefonów ani lodówek, a domy oświetlano świeczkami lub lampami naftowymi. Nie wiedziano bowiem o możliwościach, jakie niosą ze sobą zjawiska elektromagnetyczne, choć niektóre znano od wieków i badano w laboratoriach. Dziś elektryczność jest nam niezbędna do pracy, komunikacji i w codziennym życiu. Kolejne trzy wykłady poświęcone są elektryczności, magnetyzmowi i ich zastosowaniom.

7. Elektryczność

7.1 Wstęp

Elektryczność jest nie tylko jednym z filarów naszej cywilizacji - jest też niesłychanie ważna w fizyce. To ona bowiem odpowiada za siły wiążące atomy, cząsteczki chemiczne i utworzoną z nich materię.



Rys. 7.1 Elektryczność w chmurze

Plan wykładu

1. Wstęp
2. Elektryzowanie
3. Potencjał i napięcie elektryczne
4. Prąd elektryczny
5. Przewodzenie prądu
6. Podsumowanie

7.2 Elektryzowanie

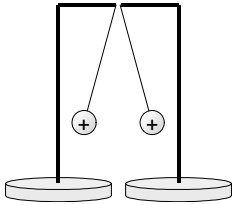
Kilka słów o historii

Najstarsze wzmianki o elektryczności pochodzą z 600 roku p.n.e. Tales z Miletu opisał właściwości bursztynu czyli elektronu. W XVI wieku odkryto elektryzowanie się innych ciał, a potem podzielono ciała na przewodniki prądu i izolatory, czyli dielektryki.

W 1663 r. Otto von Guericke skonstruował pierwszą maszynę elektrostatyczną. W 1752 r. Benjamin Franklin stwierdził, że piorun to zjawisko elektryczne. Opracował tez pierwszy piorunochron.

W połowie XIX wieku zaczęto konstruować pierwsze silniki elektryczne, a więc zaczęły się czasy już nie tylko elektrostatyki, ale wykorzystania prądu elektrycznego. W 1860 roku J. W. Swan opatentował żarówkę. W 1896 roku G. Marconi przesłał pierwsze wiadomości drogą radiową.

Ładunek elektryczny (!)



Rys. 7.2 Kule naładowane ładunkami tego samego znaku odpychają się.

Ładunki elektryczne przyciągają się lub odpychają nie dotykając się. Mogą zatem oddziaływać na odległość. Pod tym względem

elektryczność jest podobna do grawitacji. Mówimy, że siły jakie mogą działać dookoła ładunku elektrycznego tworzą pole sił. Zasięg pola elektrycznego jest nieskończony, choć słabnie ono z odległością.

Łatwo jest zaobserwować, że ciała można elektryzować, na przykład, pocierając. Ładunek nie jest przy tym wytwarzany - elektryzowanie odbywa się przez przenoszenie ładunku z jednego ciała na drugie.

Ładunek elektryczny mierzymy w kulombach, ale można go podać także w jednostkach ładunku elementarnego, e, lub w faradajach.

- kulomb 1 C = $6{,}24\cdot10^{18}$ ładunków elementarnych;
- ładunek elementarny e = $1.602176634\cdot10^{-19}$ C (dokładnie);
- 1 faradaj = ładunek 1 mola elektronów = 96,5 kC.

Jądra atomów mają ładunek dodatni równy liczbie atomowej A (czyli liczbie protonów w jądrze) q = Ae. Co wiąże się z faktem, że proton ma ładunek +e, a neutron 0. Elektrony mają ładunek ujemny, równy –e.

Wśród cząstek elementarnych są jeszcze dwa leptony podobne do elektronu mion i taon. Oba mają ładunki –e.

Nukleony składają się z trzech kwarków (proton: uud, neutron: udd). Kwarki mają ładunki będące wielokrotnością e/3. Kwarki górny (u), powabny (c) i wysoki (t) mają ładunki 2e/3, a kwarki dolny (d), dziwny (s) i niski (b) mają ładunki –e/3. Kwarki nie mogą jednak występować pojedynczo, a więc nie ma swobodnych cząstek o ładunku ułamkowym.

Antycząstki mają ładunki przeciwne do ładunków cząstek. Na przykład: pozyton +e, antykwark dolny +e/3.

Oddziaływanie między ładunkami

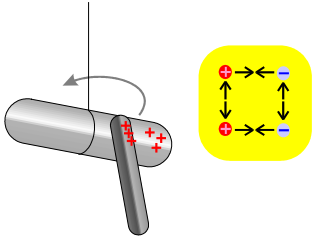
Naładowana pałeczka na karuzeli

Przyrządy i materiały

- dwie pałeczki ebonitowe lub rurki PCV,
- sznurek,
- wełna.

Przebieg doświadczenia

Jedną z pałeczek (lub rurek) zawieszamy na sznurku w taki sposób, aby wisiała w poziomie i mogła obracać się. Następnie pocieramy wełną silnie ściskając. Również druga pałeczkę (rurkę) pocieramy wełną.



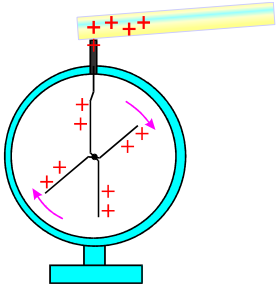
Rys. 7.3 Badanie oddziaływania ładunków

Naładowane pałeczki zbliżamy do siebie. Wisząca pałeczka ucieka od tej, którą trzymamy w ręku. Pałeczki są identyczne, a więc naładowane są takimi samymi ładunkami, stąd wniosek, że ładunki tego samego rodzaju odpychają się. Ponownie elektryzujemy przyrządy, ale tym razem do obrotowej pałeczki zbliżamy wełnę (wewnętrzną stroną). Okazuje się, że wełna przyciąga pałeczkę.

Wełna zebrała ładunki przeciwnego znaku w stosunku do tych, które znajdują się na pałeczce. Wnioskujemy, że ładunki różnoimienne przyciągają się.

Elektroskop (!)

Elektroskop jest przyrządem pokazującym stopień naładowania badanych przedmiotów.



Rys. 7.4 Budowa i działanie elektroskopu

Elektroskop składa się z obudowy i elektrody, na której, na osi zawieszone są metalowe listki. Listki są odizolowane od obudowy. Gdy do elektrody dotkniemy naładowanym przedmiotem ładunki spływają na listki. Ponieważ znak ładunku na obu listkach jest ten sam, naładowane listki odpychają się.

Sposoby elektryzowania (!)

Przez tarcie - przenoszenie ładunków między pocieranymi ciałami (izolatorami).

Przez przepływ - ładunki przepływają z jednego przewodnika na drugi.

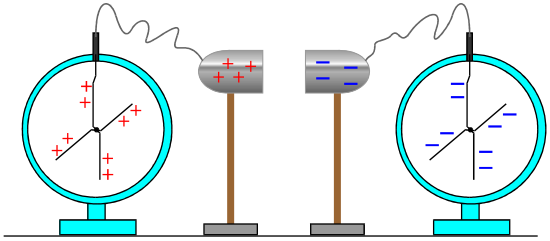
Przez indukcję - ładunki rozsuwane są wewnątrz ciała. Efekt jest na ogół nietrwały, bo ładunki wracają po wyłączeniu pola.

Elektryzowanie przez indukcje polega na wymuszeniu rozsunięcia się ładunków dodatnich i ujemnych.

Za pomocą indukcji można elektryzować nawet pojedyncze atomy, gdyż składają się one z mogących się przemieszczać dodatnich i ujemnych ładunków. Pole elektryczne indukuje w atomach moment dipolowy.

Trwałe elektryzowanie przez indukcję

Elektryzowanie przez indukcję możemy zaobserwować, gdy zbliżymy naładowaną pałeczkę do elektroskopu. Listki wychylą się zanim dotkniemy pałeczką do elektrody. Dzieje się tak dlatego, że pole elektryczne pałeczki powoduje przesunięcie ładunków wewnątrz elektroskopu. Po zabraniu pałeczki listki opadają.



Rys. 7.5 Rozdzielanie i łączenie ładunków

Jeżeli wyidukujemy ładunki w dwóch połączonych ze sobą ciałach przewodzących, a następnie rozłączymy te ciała przed zabraniem pałeczki (rys. 7.5), to wyidukowane ładunki pozostaną na stałe. W ten sposób można trwale naelektryzować przez indukcję.

Wykonując elektryzowanie przez indukcję otrzymujemy naładowane ciała, choć nie dostarczyliśmy ładunku. Czy to znaczy, że wytworzyliśmy ładunek? Nie. Dzięki indukcji jedynie rozdzieliliśmy dodatnie i ujemne ładunki. Po połączeniu rozdzielonych ciał, ładunki przepłyną i znowu będziemy mieli zerowy ładunek. Obowiązuje bowiem zasada zachowania ładunku.

Zasada zachowania ładunku (!)

Na poprzednich wykładach poznaliśmy już zasady zachowania masy, energii, pędu i momentu pędu. Kolejna tego typu zasadą jest:

Zasada zachowania ładunku

W układzie izolowanym elektrycznie całkowity ładunek jest stały.

Przy czym, sumując ładunki należy pamiętać o ich znaku. Ujemne ładunki musimy odejmować od dodatnich.

Tak naprawdę, wszystkie ciała składają się z bardzo dużej liczby ładunków dodatnich i ujemnych, ale ładunki te są z ogromną dokładnością takie same co do wartości bezwzględnej, tak że sumaryczny ładunek jest niewielki. Na przykład, człowiek ściągając sweter może się naelektryzować do potencjału -100 V względem otoczenia. W takim wypadku może się składać się z:
10 000 000 000 000 000 mld protonów
i 10 000 000 000 000 060 mld elektronów.
Ładunek jest zachowywany nawet w czasie kreacji i anihilacji cząstek.

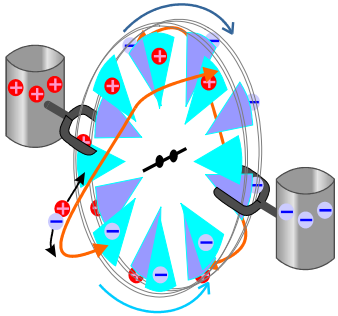
Metoda elektryzowania przez indukcję została wykorzystana do budowy maszyny elektrostatycznej.

Maszyna elektrostatyczna (!)

Przyrządy i materiały
- maszyna elektrostatyczna,
- rurka PCV.

Przebieg doświadczenia

Maszyna elektrostatyczna składa się z dwóch ruchomych tarcz pokrytych elektrodami, dwóch par zwierających szczotek i dwóch grzebieni zbierających ładunek do dwóch butelek lejdejskich, czyli do kondensatorów.
Tarcze obracają się w przeciwnych kierunkach. Gdy zbliżymy naładowaną rurkę PCV, jej pole elektryczne wyindukuje przepływ ładunku między elektrodami połączonymi przez szczotki zwierające.

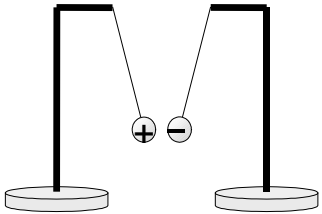


Rys. 7.6 Maszyna elektrostatyczna

Ponieważ obracająca się tarcza wyprowadzi elektrody spod szczotek zwierających, ładunki pozostaną na elektrodach. Teraz można zabrać pałeczkę, a wyindukowany ładunek pozostanie i obracając się razem z tarczą będzie działał na kolejne elektrody na przeciwległej tarczy. Na elektrodach zwieranych przez szczotki będą indukowały się ładunki. W ten sposób maszyna będzie się dalej sama ładowała. Ładunki te zbierane są do kondensatorów (butelek lejdejskich) za pomocą grzebieni otaczających tarcze.
Po krótkim czasie napięcie na maszynie elektrostatycznej wzrośnie na tyle, że nastąpią wyładowania elektryczne.

Prawo Coulomba

Jak pokazaliśmy na wstępie tego wykładu, ładunki elektryczne działają na siebie pewnymi siłami na odległość.
Siła działająca pomiędzy dwoma ładunkami opisana jest przez prawo Coulomba.



Rys. 7.7 Dwa ładunki oddziałują na odległość

Prawo Coulomba

Dwa ładunki punktowe q_1 i q_2 przyciągają się wzajemnie z siłą proporcjonalną do iloczynu ich wartości i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi.

$$F = \mathrm{k}\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (7.1)$$

Stała Coulomba wynosi:

$$\mathrm{k} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = \frac{c^2}{10^7\,\frac{\mathrm{A\cdot m}}{\mathrm{V\cdot s}}} \qquad (7.2)$$

ε_0 - przenikalność elektryczna próżni = 10^7 Am/Vs /$4\pi c^2$
$\approx 8{,}85\cdot 10^{-12}$ C^2/Nm^2. ··
Wzór ten ma podobną postać jak prawo Newtona opisujące siłę grawitacji pomiędzy dwiema masami tylko, że zamiast mas występują tu ładunki.
Siła ta zanika z odległością r, jak $1/r^2$, a więc szybko, ale dla dowolnie dużego r jest różna od zera.

7.3 Potencjał i napięcie elektryczne

Na ładunek umieszczony w pobliżu innego ładunku działa siła, która może, na przykład, rozpędzić go, a więc wykonać pracę. Zatem ładunek ten posiada energię potencjalną, E_P.

Potencjał i napięcie elektryczne (!)

Potencjał elektryczny to energia potencjalna przypadająca na jednostkę ładunku:

$$V = E_P/q. \qquad (7.3)$$

Jednostką potencjału jest volt: 1 V = 1 J/C.
Napięcie elektryczne to różnica potencjałów, czyli praca na jednostkę ładunku:

$$U = V_2 - V_1 = W/q. \qquad (7.4)$$

Jednostką napięcia również jest volt.

Przykłady napięć:
- impulsy nerwowe mają napięcie około 100 mV (= 0,1 V),
- bateria w latarce daje około 1,5 V,
- do wygenerowania pary elektron-pozyton potrzebne jest napięcie około 1 MV (milion woltów).

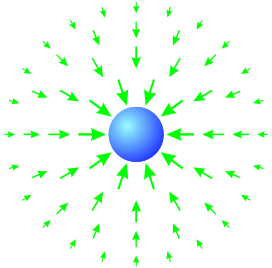
Potencjał elektryczny to energia potencjalna przypadająca na jednostkę ładunku. Zatem ładunek, q, w potencjale, V, posiada energię potencjalną:

$$E_P = qV. \qquad (7.5)$$

Na przykład:
- ładunek 1 C w potencjale 1 V ma energię 1 J,
- elektron w potencjale 1 V ma energię $1{,}6\cdot10^{-19}$ J, czyli 1 eV.

Pole elektryczne

Gdy naelektryzujemy się (np. zdejmując sweter) czujemy, jak nam unoszą się włosy. Intuicyjnie wyobrażamy sobie wtedy, że dokoła nas działa jakieś pole sił.
Z punktu widzenia matematyki, pole jest pewna funkcją opisaną na całej przestrzeni. Pole sił jest funkcją wektorową określoną na całej przestrzeni, to znaczy - w każdym miejscu przestrzeni określony jest wektor siły.



Rys. 7.8 Pole sił dookoła naładowanej kuli

Natężenie pola sił, E, to siła działająca na jednostkowy ładunek.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \qquad (7.6)$$

Analogicznie definiujemy natężenie pola grawitacyjnego, jako stosunek siły grawitacyjnej do masy ciała.
Natężenie pola elektrycznego ma nie tylko wartość, ale też określony kierunek, zatem jest polem wektorowym.
Niektórym polom sił (w szczególności polom centralnym, takim jak pole elektryczne i pole grawitacyjne) towarzyszy pole potencjału. Jego

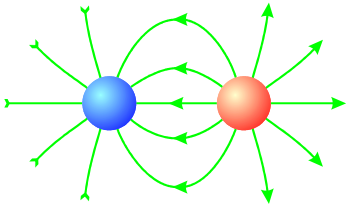
wartość jest równa energii potencjalnej jednostkowego ładunku V(r) = $E_p(r)/q$. Potencjał jest polem skalarnym.

Linie pola sił

Pole możemy opisać przy pomocy linii sił czyli linii, po których poruszałyby się ładunki próbne.
Ładunek próbny ma znak dodatni, a wiec linie sił biegną od ładunków dodatnich do ujemnych.
Natężenie pola można odczytać jako wielkość proporcjonalna do gęstości linii sił.

Pole od dwóch kul

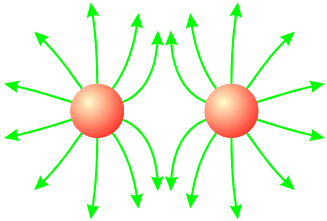
Jeżeli do maszyny elektrostatycznej podłączymy dwie metalowe kule, do których przyklejone zostały nitki, to będziemy mogli obserwować coś podobnego do linii sił pola elektrycznego. Nitki naładują się ładunkami kul, do których są przyklejone. Pole elektryczne będzie odpychało je od kul, rozciągając je wzdłuż linii sił.



Rys. 7.9A Linie sił pola elektrycznego wokół ładunków o przeciwnych znakach

Jeżeli kule będą miały przeciwne znaki ładunków, to nitki z dwóch kul będą się ze sobą łączyły. Odpowiada to liniom sił wybiegającym z kuli

dodatnio naładowanej, a kończących się na powierzchni ujemnie naładowanej kuli.



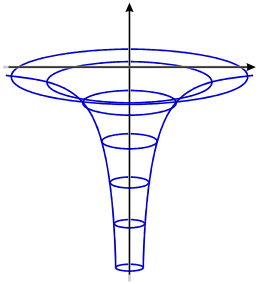
Rys. 7.9B Linie sił pola elektrycznego wokół ładunków o tych samych znakach

W przypadku kul naładowanych jedno-imiennie nitki odpychają się. Linie sił wychodzą z kul i dążą do nieskończoności.

Pole potencjału elektrycznego

Jeżeli dla danego pola sił możemy jednoznacznie określić energię potencjalną ładunku w danym punkcie, to takim polom sił towarzyszy pole potencjału. Jego wartość (zgodnie ze wzorem 7.5) jest równa energii potencjalnej jednostkowego ładunku w danym punkcie. Zarówno pole elektryczne jak i grawitacyjne spełniają ten warunek.
Potencjał pola elektrycznego dany jest wzorem:

$$V = k\frac{q}{r}. \qquad (7.7)$$



Rys. 7.10 Kształt pola potencjału elektrycznego

Aby otrzymać wzór na potencjał pola grawitacyjnego należy zamienić ładunek q na masę m, a stałą k na stałą G.

Cząstki posiadające ładunek elektryczny są rozpędzane w polu elektrycznym. Zyskują przy tym energię E proporcjonalna do swojego ładunku q i do różnicy potencjału między początkiem i końcem swojej drogi ΔV (patrz równanie 7.5). Na tej zasadzie opiera się działanie akceleratorów. W najprostszych akceleratorach liniowych cząsteczka tylko raz przechodzi przez różnice potencjałów. Aby uzyskać większe energie, cząsteczki wielokrotnie przepuszcza się pomiędzy elektrodami. Na przykład, w cyklotronach zakrzywia się tor cząstek przy pomocy pola magnetycznego. W czasie, gdy cząstki zawracają, zmienia się potencjał na przeciwny, tak że cząstki przelatując pomiędzy elektrodami zyskują kolejną porcję energii.

Największy obecnie akcelerator Large Hadron Collider (LHC) ma uzyskiwać cząstki o energii 14 TeV = $14 \cdot 10^{12}$ eV.

Elektronowolt jest jednostką odpowiadającą energii jaką ładunek elementarny e posiada w polu o potencjale 1 V. Jednostka ta jest bardzo wygodna i często używana w teoriach mikroskopowych. Przykładowo:

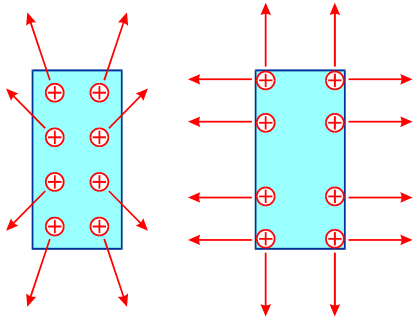
- energia termiczna w temperaturze pokojowej = 25 meV,
- energia żółtego fotonu = 2,2 eV,
- energia wiązania elektronu w wodorze = 13,6 eV,
- masa elektronu = 511 keV/c^2.

Masę cząstek elementarnych wyrażamy w eV/c^2, pamiętając o zależności $E = mc^2$.

Energię uzyskaną w akceleratorach wykorzystuje się bardzo często do wytworzenia nowych cząstek. Na przykład, otrzymane ostatnio (w 2012 r.) w LHC cząstki Higgsa mają masę 126 GeV/c^2 ($126 \cdot 10^{12}$ eV). Aby je uzyskać w znaczących ilościach, trzeba było rozpędzić protony do energii 8 TeV.

Rozkład pola wokół izolatorów i przewodników (!)

W izolatorze ładunki pozostają tam, gdzie zostały wstrzyknięte, a więc mogą być rozmieszczone dowolnie.



Rys. 7.11 Rozkład ładunków i pól w izolatorze i przewodniku.

W przewodniku ładunki są przemieszczane przez pole, aż do osiągnięcia takiego rozkładu, że ładunki są jak najdalej od siebie (a więc tuż przy powierzchni), a pole jest prostopadłe do powierzchni przewodnika.

1. Najwięcej ładunków zgromadzi się w rogach lub miejscach o największej krzywiźnie i tam pole jest najsilniejsze.
2. W miejscach o małej krzywiźnie - ładunku jest niewiele i pole jest słabe.
3. Wewnątrz przewodnika nie ma ładunków ani pola.

Ta ostatnią właściwość wykorzystana została do konstrukcji generatora Van de Graaffa.

Generator Van de Graaffa (!)

W generatorze tego typu, ładunki nakładane są na izolującą taśmę u podstawy, przy użyciu niewielkiego napięcia,. Razem z taśmą ładunki wędrują do wnętrza metalowej kopuły, gdzie nie ma pola, więc ładunki mimo, że są obdarzone tylko niewielkim potencjałem, przechodzą na metalową kopułę. Na skutek wzajemnego odpychania gromadzą się na zewnątrz kopuły, podnosząc jej potencjał i generując wokół niej pole. Jednak wewnątrz kopuły, jak stwierdziliśmy powyżej, pola nie ma.

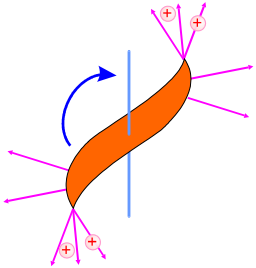
Możemy zatem ciągle dostarczać taśmą nowe ładunki do wnętrza kopuły.

Nawet niewielki, szkolny generator Van de Graaffa może w suchym powietrzu osiągnąć napięcie około 100 000 V.

Największe generatory osiągają napięcie powyżej 10 MV. Wykorzystywane są w akceleratorach liniowych do przyspieszania jonów (w celu implantacji) i do badania cząstek elementarnych.
Pierwszy tego typu generator został skonstruowany przez Roberta J. Van de Graaffa (1901 - 1967) w 1929 r. w Princetone, USA.

Rys. 7.12 Generator Van de Graaffa

Fakt, że pole elektryczne wokół przewodników jest najsilniejsze w rogach lub miejscach o największej krzywiźnie wykorzystany został przez Benjamina Franklina (1706 - 1790) do konstrukcji piorunochronu. Efekt ten znalazł też zastosowanie w urządzeniu zwanym wiatraczkiem Franklina.



Rys. 7.13 Wiatraczek Franklina

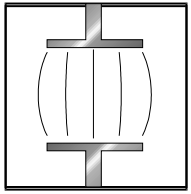
Wiatraczek Franklina podłączony do maszyny elektrostatycznej wytwarza na końcach łopatek silne pole elektryczne, które jonizuje powietrze i wyrzuca jony. Strumień jonów wytwarza siłę odrzutu. Jest to prosty model silnika jonowego.

Ze względu na dużą prędkość wyrzucanego materiału, silniki jonowe mają znacznie większą sprawność niż chemiczne silniki rakietowe i są wykorzystywane w sondach kosmicznych np. w sondzie Deep Space 1, która w 2001 roku dotarła do komety Borrelly.

7.4 Prąd elektryczny

Prąd elektryczny jest najczęściej strumieniem elektronów i w tej postaci jest zupełnie niewidoczny. Czy prąd elektryczny można zobaczyć?

Kulki w kondensatorze



Rys. 7.14 Pole w kondensatorze płaskim

Jeżeli pomiędzy dwie poziome elektrody umieszczone w izolującym pudełku (rys. 7.14) przyłożymy napięcie, to wytworzymy jednorodne pole elektryczne w kierunku pionowym. Gdy do pudełka wrzucimy bardzo lekkie, przewodzące kulki (np. z folii aluminiowej), to będą się one ładowały od dolnej elektrody, a następnie będą unoszone przez pole elektryczne do górnej elektrody. Tam będą rozładowywane i będą opadać z powrotem. Krążące kulki przenoszą ładunek, a więc płynie prąd. Zatem prąd elektryczny można zobaczyć!

Prąd elektryczny możemy również zaobserwować, gdy jest przenoszony przez jony nadmanganianowe. Wystarczy przyłożyć napięcie do bibuły z nadmanganianem potasu ($KMnO_4$).

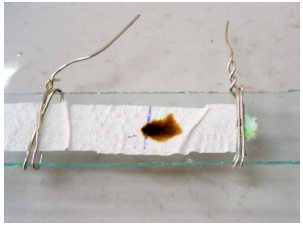
Prąd elektryczny na bibule

Przyrządy i materiały

- szklana płytka lub rurka,
- bibuła,
- druty i zasilacz,
- posolona woda oraz kryształek nadmanganianu potasu.

Przebieg doświadczenia

Bibułę przywiązujemy do szkła odizolowanym drutem (który będzie pełnił też funkcje elektrody) i moczymy słoną wodą. Na bibule kładziemy kryształek $KMnO_4$ i podłączamy napięcie kilka woltów do elektrod z drutu.



Rys. 7.15 Dyfuzja i unoszenie nadmanganianu potasu ($KMnO_4$)

W wodzie nadmanganian dysocjuje na jony:

$$KMnO_4 \leftrightarrow K^+ + MnO_4^-, \qquad (7.8)$$

Nadmanganian ma silny brązowy kolor. Dzięki temu możemy zaobserwować jak płynie. Początkowo widać głównie, że jony poruszają się we wszystkich kierunkach dzięki ruchom termicznym, czyli dyfundują. Po jakimś czasie widoczny staje się regularny ruch w stronę dodatniej elektrody. Ruch ten odbywa się dzięki unoszeniu anionów MnO_4^- przez pole elektryczne.

Pojęcia związane z przepływem prądu

Prąd elektryczny to ruch ładunku elektrycznego.
Natężenie prądu to wielkość fizyczna odpowiadająca ładunkowi przepływającemu w jednostce czasu. Obliczamy go jako stosunek ładunku, q, do czasu, t, $I = q/t$.
Natężenie mierzymy w **amperach**. Prąd o natężeniu 1 A przenosi ładunek 1 kulomba (1 C) w czasie 1 sekundy: 1 A = 1 C/s.

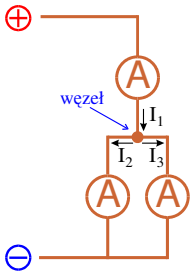
Zasada zachowania ładunku a przepływ prądu

Prąd elektryczny na ogół przepuszczamy przez przewody, które łączymy w obwody elektryczne. Miejsce gdzie łączymy przewody elektryczne nazywamy węzłami. Do węzłów prąd może dopływać kilkoma przewodami i kilkoma innymi z nich wypływać. Z zasady zachowania ładunku wiemy, że ładunek nie znika, ani nie powstaje, zatem ładunek, który dopłynął do węzła, musi z niego wypłynąć.

Obwód z trzema amperomierzami (!)

Przyrządy i materiały
- zasilacz, potencjometr,
- 3 amperomierze,
- przewody elektryczne.

Przebieg doświadczenia
Prąd mierzymy przy pomocy amperomierzy. Sumę prądów dopływających i wypływających z węzła możemy sprawdzić łącząc ze sobą, na przykład, trzy amperomierza, tak jak na schemacie 7.16.
W wyniku obserwacji tego doświadczenia wyciągamy wniosek, że suma wskazań lewego i prawego amperomierza jest równa natężeniu prądu pokazywanemu przez górny amperomierz.



Rys. 7.16 Obwód sprawdzający sumowanie prądów.

Obwód z trzema amperomierzami pokazuje zasadę zachowania prądu (i ładunku). Zasada ta jest treścią I prawa Kirchhoffa.

I prawo Kirchhoffa:

Suma natężeń prądów dopływających i wypływających z węzła wynosi zero.

$$\Sigma_j I_j = 0 \qquad (7.9)$$

W równaniu tym, prądy dopływające i wypływające bierzemy z przeciwnymi znakami.

7.5 Przewodzenie prądu

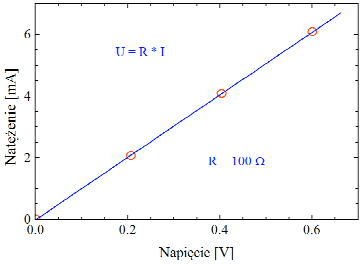
Intuicyjnie spodziewamy się, że gdy napięcie rośnie, to rośnie także prąd. Najprostszym przypadkiem jest proporcjonalna zależność natężenia od napięcia.

Sprawdzanie zależności I-V dla opornika (!)

Przyrządy i materiały
- zasilacz, woltomierz, amperomierz,
- opornik,
- przewody elektryczne.

Przebieg doświadczenia

Opornik łączymy szeregowo z amperomierzem i zasilaczem. Woltomierz podłączamy równolegle do opornika. Mierzymy kolejne wartości napięcia i natężenia notując i rysując na wykresie.



Rys. 7.17 Wykres I-V dla opornika

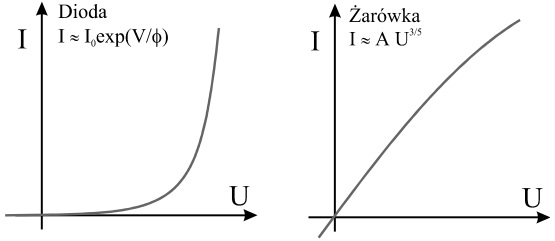
W przypadku gdy napięcie jest proporcjonalne do natężenia, Współczynnik proporcjonalności nazywamy oporem. Mówi o tym prawo Ohma.

Prawo Ohma (!)

Napięcie jest proporcjonalne do oporu i do natężenia.

$$U = R \cdot I \qquad (7.10)$$

Prawo Ohma spełnione jest w przypadku wielu materiałów i przyrządów elektrycznych. Proste elementy elektryczne spełniające prawo Ohma to oporniki. Należy jednak pamiętać, że zależność napięcia od natężenia nie zawsze jest proporcjonalna.



Rys. 7.18 Zależności natężenia od napięcia dla diody i żarówki

Przykładem nieliniowej zależności I-V może być żarówka. Co prawda metal w stałej temperaturze spełnia prawo Ohma, jednak włókno żarówki już przy niewielkim prądzie rozgrzewa się i jego opór zmienia się znacząco. Wraz ze wzrostem temperatury opór rośnie, tak więc w efekcie prąd płynący przez żarówkę nie jest proporcjonalny do napięcia. Przy dwukrotnym wzroście napięcia na żarówce prąd rośnie, ale nie 2 razy, a na przykład tylko półtora razy.

Z kolei w przypadku diody, dla małych napięć obserwujemy, że prąd praktycznie w ogóle nie płynie. Dopiero po przekroczeniu pewnego napięcia przewodzenia widzimy niezerowe odczyty na amperomierzu. Jeśli badamy diodę LED, to widzimy, że dopiero przy wyższych napięciach zaczyna świecić.

Zależność natężenia od napięcia dla diody dana jest funkcją wykładniczą $I \approx I_0 \exp(U/\varphi)$, gdzie $\varphi = k_B T/e \approx 0{,}03$ V. W takim przypadku nawet niewielka zmiana napięcia (np. o 0,03 V) wiąże się z silną zmianą prądu (2,72 razy). Wzór ten jest podobny do wzoru na ciśnienie gazu w funkcji wysokości, równanie (5.6).

Zasada zachowania energii a rozkład napięć

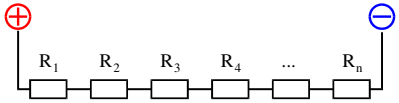
Energia ładunku w polu zależy od potencjału w danym miejscu, a nie od drogi jaką przebył. Zasada zachowania energii wymusza zatem odpowiednie sumowanie się potencjałów. Opisane jest to przez II prawo Kirchhoffa.

II prawo Kirchhoffa:

Suma napięć w prostym obwodzie zamkniętym jest równa sumie sił elektromotorycznych.

$$\Sigma_j U_j = \Sigma_k \varepsilon_k \qquad (7.11)$$

Z drugiego prawa Kirchhoffa wynika, że w przypadku szeregowego połączenia oporników, suma napięć na opornikach musi być równa napięciu przyłożonemu do obwodu: $U_S = \Sigma_k U_k$.



Rys. 7.19 Szeregowo połączone oporniki

Ponieważ przez wszystkie oporniki płynie ten sam prąd, I, możemy podzielić wszystkie napięcia przez I, otrzymując z jednej strony równania opór sumaryczny, $R_S = U_S/I$ a z prawej strony równania otrzymamy opory poszczególnych oporników: $R_k = U_k/I$. Wtedy zapisana powyżej suma napięć zamieni się na sumę oporów.

$$R_S = \sum_{k=1}^{n} R_k \qquad (7.12)$$

Widać, że w przypadku szeregowego łączenia oporników, całkowity opór układu jest równy sumie oporów poszczególnych elementów.

Przewodzenie prądu przez różne materiały

Podział substancji ze względu na przewodzenie:

przewodniki (metale, roztwory wodne, grafit)
oraz izolatory (większość tworzyw sztucznych, bursztyn, szkło, powietrze).

Podział ten nie jest jednoznaczny. Na wykładzie pokazujemy np. że szkło też potrafi przewodzić prąd.

Opór właściwy (oporność) ρ pozwala na obliczenie oporu ciała o długości *l* i powierzchni przekroju *S*:

$$\rho = R \cdot S / l, \qquad (7.13)$$

Jednostki:

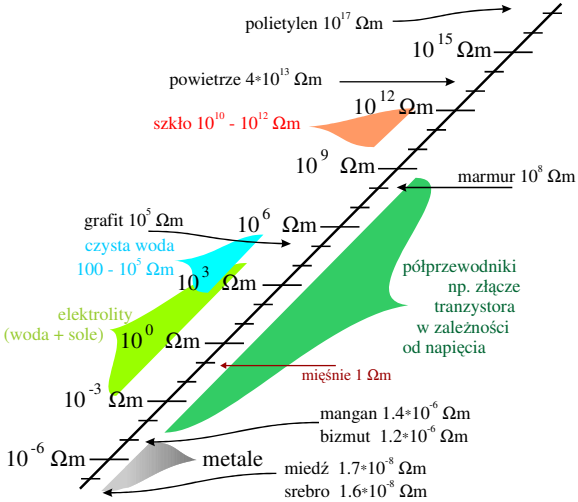
opór R mierzymy w omach [Ω], 1 Ω = 1 V/A.
ρ oporność w omometrach [Ωm] lub omocentymetrach [Ωcm].

Odwrotnością oporności jest przewodnictwo właściwe:

$$\sigma = 1/\rho. \qquad (7.14)$$

Przewodnictwo właściwe podajemy w jednostkach 1/Ωm lub 1/Ωcm.

Oporność i przewodnictwo elektryczne rozmaitych substancji mogą przyjmować bardzo różne wartości. Na przykład, oporność metali ($\rho \approx 10^{-7}$ Ωm) jest milion razy mniejsza od oporności słonej wody. Natomiast oporność czystej wody jest setki tysięcy razy większa niż słonej. Oporności materiałów używanych jako izolatory są miliony razy większe od oporności wody, osiągając wartości $\rho \approx 10^{17}$ Ωm.

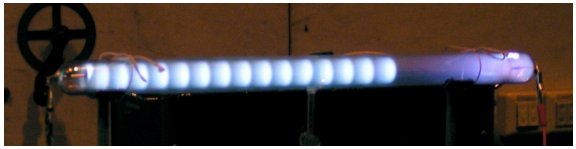


Rys. 7.20 Porównanie oporności różnych materiałów

Skala ta obejmuje 24 rzędy wielkości, co odpowiada mniej więcej stosunkowi średnicy Układu Słonecznego do średnicy atomu.

W zestawieniu tym ciekawe miejsce zajmują półprzewodniki. Otóż są to materiały, których przewodnictwo łatwo można zmieniać w szerokim zakresie np. poprzez oświetlenie lub przyłożenie napięcia. Przewodnictwo kanału w tranzystorze, po przyłożeniu napięcia w jednej chwili może zmienić się miliony razy.

Przy odpowiednio wysokim napięciu, prąd można przepuścić nawet przez zjonizowany gaz. Pojawia się przy tym świecenie.



Rys. 7.21 Przepływ prądu przez gaz

Elektrony uwalniane są z ujemnie naładowanej katody (prawa strona rys. 7.20). Pod wpływem pola elektrycznego elektrony rozpędzają się, ale póki mają niewielką prędkość nie są wstanie pobudzić gazu do świecenia. Z tej przyczyny, koło katody możemy obserwować ciemniejszy obszar, zwany ciemnia Faradaya. Gdy elektrony rozpędzą się, jonizują gaz powodując jego świecenie. Pojawia się jasny obszar zjonizowanego gazu. W zjonizowanym gazie elektrony zwalniają, świecenia przygasa i obserwujemy ciemniejszy prążek neutralnego gazu. W neutralnym gazie elektrony znowu mogą przyspieszyć i doprowadzają do powstania kolejnego jasnego prążka zjonizowanego gazu i tak na zmianę, aż do anody.

7.6 Podsumowanie

Zjawiska elektryczne opisujemy przy pomocy następujących wielkości fizycznych:

Ładunek elektryczny mierzymy w kulombach.

$1\ C = 6{,}24 \cdot 10^{18}$ elektronów; $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ C$;

Potencjał elektryczny liczymy jako energię potencjalną przypadającą na jednostkę ładunku. $V = E_P/q$.

Napięcie elektryczne jest to różnica potencjałów, czyli praca na jednostkę ładunku.

Jednostką potencjału i napięcia jest wolt: 1 V = 1 J/C.

Natężenie prądu to ładunek przepływający w jednostce czasu.

Natężenie mierzymy w amperach: 1 A = 1 C/s.

W przypadku zjawisk elektrycznych obowiązują zasady zachowania ładunku i energii prądu elektrycznego. Dla obwodów elektrycznych mają one skutek w postaci **praw Kirchhoffa:**

1. Suma natężeń prądów dopływających i wypływających z węzła wynosi zero.
2. Suma napięć w prostym obwodzie zamkniętym jest równa sumie sił elektromotorycznych.

Prawo Ohma:

Napięcie jest proporcjonalne do oporu i do natężenia: $U = R \cdot I$.