

10.1. 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. Pocierając 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 ładunku znajdującego się na rurce. Rurka i "futerko" naładowane są 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, lecz 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. celulozy) lub nawet w atomach: mówimy 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 one odpychane przez rurkę. W trakcie doświadczenia obserwuje się po pewnym czasie "odskakiwanie" papierków od rurki; szczególnie efektowne jest to, gdy są jakby "podrzucane" do góry, ponieważ są one odpychane 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).

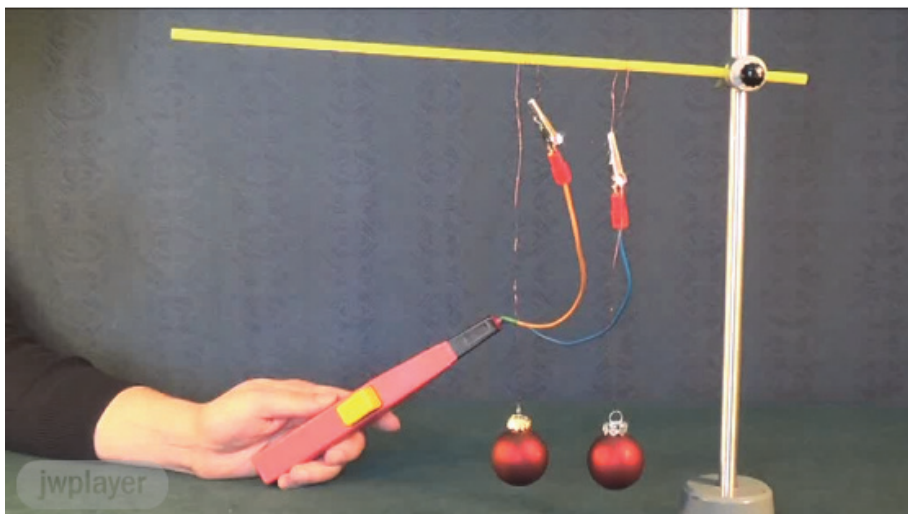
Doświadczenie można zobaczyć pod adresem: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/443

10.2. Doświadczenie choinkowe¹

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 długości 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 (zdjęcie 1). Zdejmij (zeskrob) izolację z drutów 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 siłą Coulomba możemy obliczyć następująco:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (1)$$

gdzie: q_1 i q_2 to ładunki zgromadzone na bombkach, r odległość między środkami bombek, ϵ_0 przenikalność elektryczna próżni ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$), ϵ_r względna przenikalność elektryczna powietrza (1,00054).

¹ Doświadczenie (Coulomba) pod choinkę, A. Okoniewska, G. Karwasz, Foton 83 (Zima 2003), 55.



Fot. 10.5. Bombki zderzają się ze sobą na skutek naładowania ich różnoimiennie.

Prawo Coulomba dotyczy ładunków punktowych, ale ładunek rozłożony na sferycznej powierzchni bombek można przybliżyć za pomocą ładunków punktowych, umieszczonych w środku bombek². 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 $k=1/4\pi\epsilon_0$ i wynosi $9\cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$. Dla bombek o średnicy 4 cm pojemność elektryczna jest bardzo mała i wynosi około $4\cdot 10^{-12} \text{ F}$.

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 $2\cdot 10^{-8} \text{ C}$. Siła Coulomba (1), z jaką przyciągają się bombki odległe od siebie o 5 cm jest bardzo mała (1,4 mN), podczas gdy wychylenie o $1,5^\circ$ od pionu (tj. o 0,5 cm bombki zawieszona na 20 cm drucie) bombki o masie 5 g wymaga siły 1,2 mN. Dlatego, dla zaobserwowania zderzenia, bombki muszą być naprawdę blisko siebie. Z drugiej strony, 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 tylko liniowo ($F_G \sim r$).

Uwagi metodologiczne:

1. Do powyższego doświadczenia można użyć także maszyny elektrostatycznej i styropianowych kulek zawiniętych w aluminiową folię lub pokrytych grafitem koloidalnym, ale nie będzie to już doświadczenie pod choinkę.
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 krokodyłków) ręką! Kilka keV nie jest napięciem „przyjemnym”. Rozładuj bombki i zapalacz jakimś drutem lub metalowym narzędziem.

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

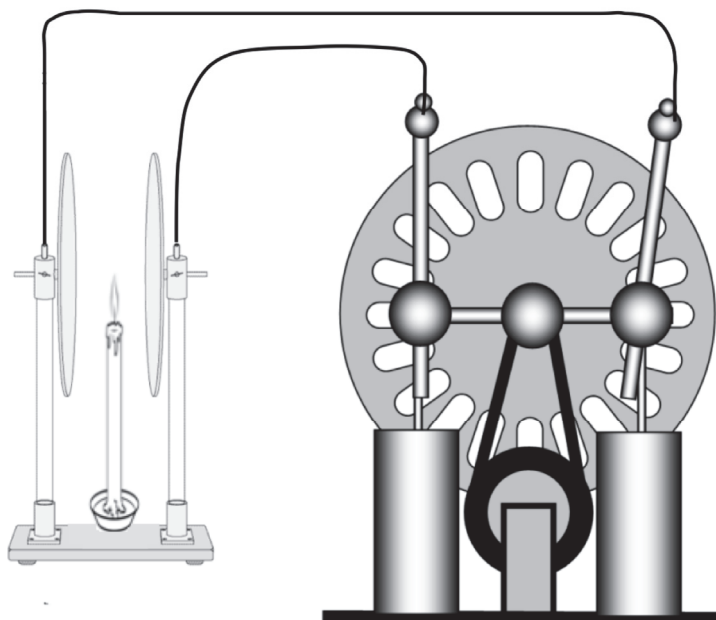
² Pokazał to Newton, przy okazji rozważań o sile grawitacji między planetami a Słońcem.

10.4. Świczka 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:

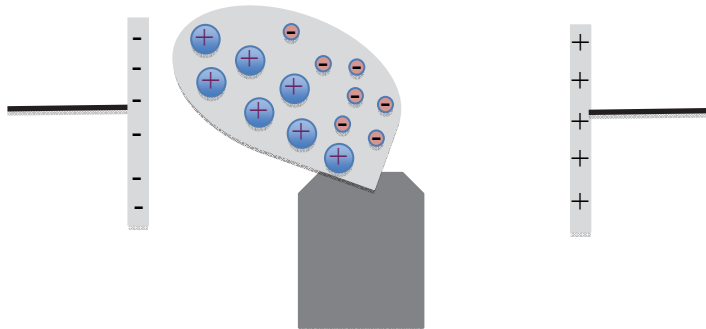
1. Ustaw dwie metalowe płyty zamocowane na sztywnych statywach w odległości kilkunastu centymetrów naprzeciw siebie (w taki sposób, aby utworzyły konfigurację kondensatora płaskiego).
2. Ustaw świeczkę pośrodku pomiędzy równoległymi płytami tak, aby jej knot znajdował się mniej więcej na wysokości ich 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: 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*, 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 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 obserwowany jest 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 odchyła się w kierunku jednej z elektrod. Deformacja ta ma charakter niesymetryczny, ponieważ płomień odchyła się znacznie bardziej w kierunku elektrody ujemnej - w stronę której wędrują jony dodatnie. Te ostatnie zderzając się z neutralnymi cząsteczkami gazów z poza obszaru płomienia przekazują im znacznie więcej pędu w akcie odrzutu niż znacznie mniejsze i lżejsze od nich elektrony. Ponieważ ciężkie i duże jony mają większą zdolność „rozpychania się” niż elektrony, płomień znacznie swobodniej przemieszcza się w kierunku anody (tj. elektrody ujemnej). Niemniej jednak elektrony poruszające się w kierunku katody pociągają za sobą, dzięki oddziaływaniu elektrostatycznemu, niewielką część zjonizowanych cząsteczek powodując również niewielkie, ale czasami 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