

Stara, poczciwa maszyna elektrostatyczna

■ MAGDA SADOWSKA, GRZEGORZ KARWASZ

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”). Zaczniemy 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 opiera się o zjawisko trybo elektryczne, a prościej: elektryzację 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 (konceptyjnie) 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 wyjaśniająca, 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 od ziemi odizolowani butami na grubych koturnach, ale bosy chłopiec – nie. Tyle legendy, faktem jest, że maszyna elektrostatyczna została wynaleziona stosunkowo niedawno, w 1878 roku, przez J. Wimshursta. Pozostaje ona do dziś głównym przyrządem w szkolnej elektrostatyce (innym może być zapalacz piezoelektryczny [2]).

W 1667 pierwszą maszyną 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).

O ile w pocieraniu szmatką plastiku, następuje rozdział ładunków na dwa różne materiały (można sprawdzić obecność

dwóch różnych znaków za pomocą dwóch elektrometrów), to 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.

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

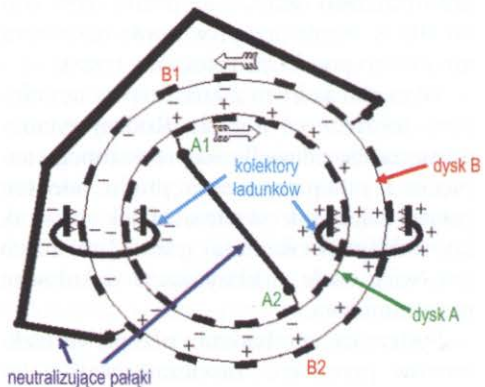
Jak zbierane są ładunki? Przez wyładowanie koronowe (zaraz o tym dalej). Pod jeden grzebień podpływają ładunki dodatnie, powstałe „dopiero co” na pinezkach dysku A, pod drugi ładunki ujemne, powstałe „dopiero co” na pinezkach dysku B. Oczywiście, gdyby nie było w pobliżu grzebieńca 1, to ładunki na dysku A podróżowałyby dalej, aż do napotkania grzebieńca 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 przewodni-



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



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

kiem prądu elektrycznego. Ale lampy jarzeniowe w klasie nad głową prąd przewodzą, a też zawierają gaz? Tak, ale aby się zapaliły najpierw „namyślają się, mruczą, bucza, błyskają”. Tak, dla 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, dla jonizacji argonu (jeden z możliwych składników gazu w rurach jarzeniowych) 15,8 eV, a dla jonizacji atomów rtęci (tak, jeden ze składników i lamp jarzeniowych i „żarówek” energooszczędnych) tylko 10,4 eV.

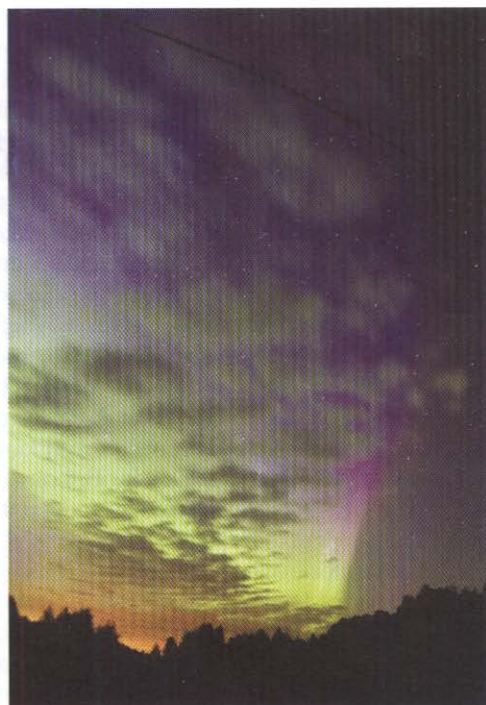
Podobnie, elektrony są emitowane z elektrod (pracującej) maszyny elektrostatycznej, jonizują powietrze, powietrze zaczyna przewodzić prąd i nagły przeskok dużego ładunku obserwujemy jako iskrę. Dość skomplikowana dynamika iskry (i pioruna) najlepiej jest opisana przez R. Feynmana [5]. Ładunek przenoszony 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 tak od napięcia, jak elektrod, jak rodzaju (i ciśnienia) gazu. Zmiennych jest, więc wiele, a klasyfikacja wyładowań nieco umowna.

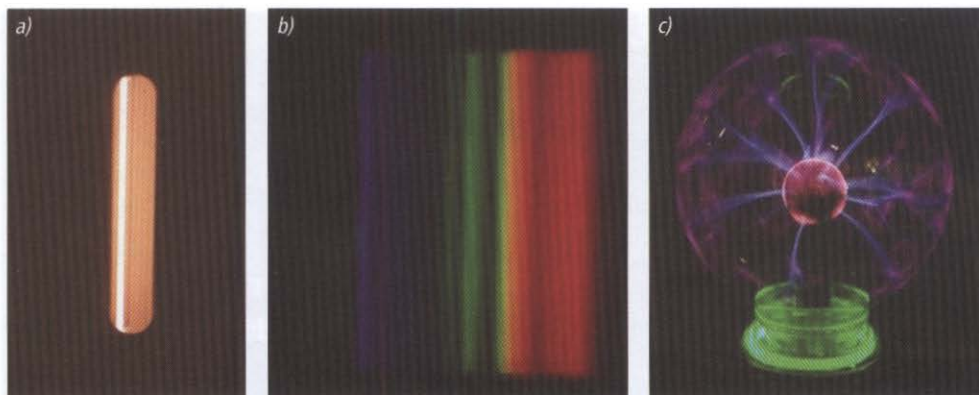
Systematyczne badania przepływu elektronów przez gaz zapoczątkował w latach 20. XX wieku, pochodzący z Irlandii John Townsend. Badania te bardzo intensywnie prowadzone przez wiele grup na świecie – nie tylko dla budowania żarówek energooszczędnych, ale i np. telewizo-

rów 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 posiadać, 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 drobinę 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



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



Fot. 2. Wyładowanie elektryczne w rurce Plückera w azocie [8] (a) i jego widmo uzyskane za pomocą okularów dyfrakcyjnych (b). Rurki Plückera możnaby 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

znacznie rzadziej niż jony dodatnie (jak N_2^+ , czy O_2^+), zob. np. pracę [6], ale podobno dobrze wpływają na samopoczucie.

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 grzebień 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 wy-

sokiego 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 napotyka atomy gazu, czyli między elektrodami mogą rozpędzić się do większych energii, łatwiej, więc 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 też, 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 wzbudzone. I w kuli plazmowej i w rurce jarzeniowej gaz pozostaje chłodny (tj. w temperaturze pokojowej), mimo że świeci.

A pod ciśnieniem atmosferycznym? Wyładowanie ma dwie formy – iskry, kiedy napięcie jest duże a prąd mały lub *łuku* elek-

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

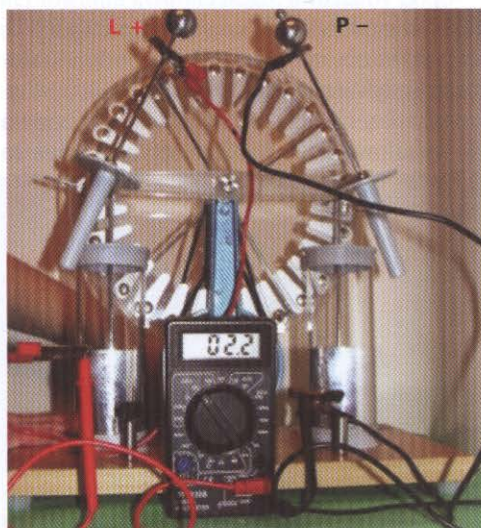
W drugiej części artykułu przeprowadzimy doświadczenia z maszyną i gazem zjonizowanym.

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 elek-



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

trod 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 na-

pięcia zazwyczaj zależy od kierunku kręcenia maszyny. We wszystkich opisanych poniżej doświadczeniach korba kręciliśmy w jedną stronę, dlatego też kulka iskiernika L zawsze miała niedobór elektronów, więc była naelektryzowana dodatnio, a kulka P – ujemnie.

Pole elektryczne

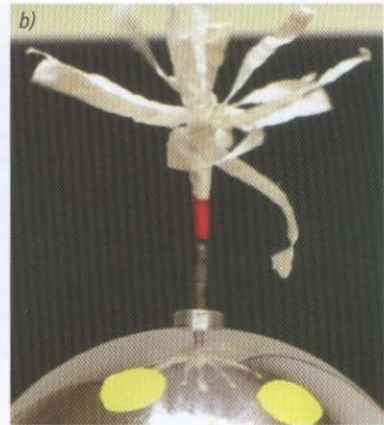
W odróżnieniu od pola magnetycznego, które łatwo pokazać za pomocą opilków żelaza (lub innych czytników pola magnetycznego przez nas zaproponowanych [2, 9]) linie pola elektrycznego trudniej pokazać. Przy napięciach rzędu milionów voltów, jak w generatorze van der Graffa (fot. 4), natężenie pola jest 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?

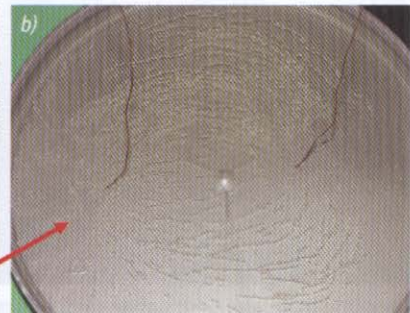
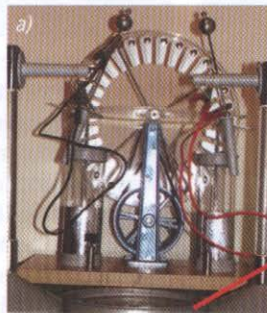
Do pokazania linii pola elektrycznego skorzystamy z maszyny elektrostatycznej, kaszy manny, naczynia z olejem i elektrod.

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. Przerzujemy pracę maszyny i olej posypujemy niezbyt dużą ilością kaszy manny (fot. 5).



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



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

Jeśli będzie za dużo kaszy manny linie sił pola będą słabo widoczne.

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

Między dwoma 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 z fot. 7, największa



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



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

koncentracja linii występuje na ostrzu – natężenie pola jest tam największe.

Doświadczenia ze świeczką

Typowe doświadczenia ze świeczką i maszyną elektrostatyczną polegają na obserwacji odchylenia 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:

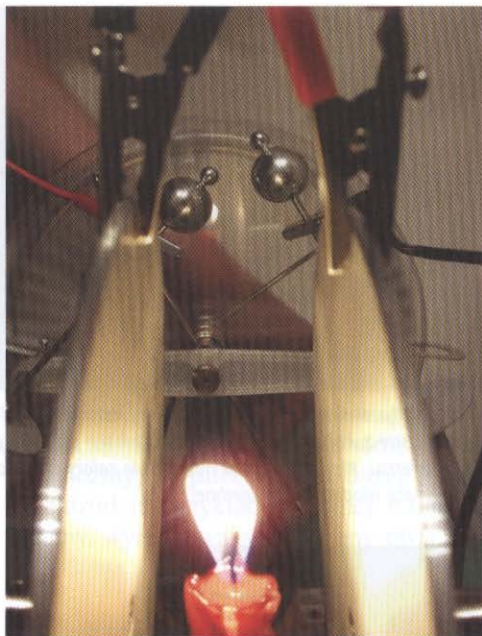
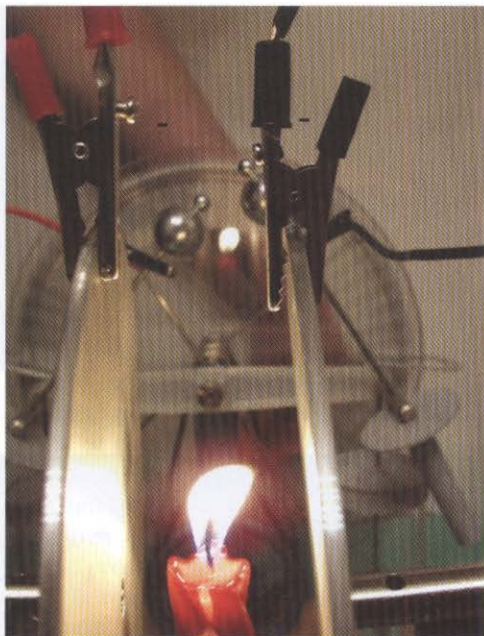
niektóre cząsteczki w parach parafiny (i w powietrzu) rozgrzane do wysokiej temperatury (prawie tysiąc stopni Celsjusza w niektórych częściach płomienia) tracą elektrony. W płomieniu świecy znajdują się więc swobodne elektrony i cząsteczki gazu, które te elektrony straciły (czyli niosą ładunek dodatni). Takie cząsteczki nazywamy jonami. Łączny ładunek jonów oraz elektronów 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 zapalanej 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 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*, ale i *ilościowy*. Łączymy z maszyną elektrostatyczną metalowe płyty zamocowane na statywach (fot. 8). Między płyty kondensatora płaskiego wstawiamy świeczkę, ale na razie jej nie zapalamy. Zakręcimy korbką np. 5 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 to przeskoczyła iskra.

Teraz, przy rozładowanej maszynie zapalamy świeczkę i powtarzamy te same czynności, w tej samej sekwencji czasowej. Tym ra-



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

zem, 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 wyladowania jarzeniowego nie więcej niż jeden na milion cząsteczek gazu (a w płomieniu jeszcze mniej). Ale ta ilość jonów już wystarczy 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 uruchamiamy maszynę. Płomień świecy rozszerza się, przyjmując kształt jakby kapelusza Napoleona. Jony zawarte w płomieniu poruszają się w polu elektrycznym, płomień odchyła się w kierunku elektrod. Ale kapelusz ten jest niesymetryczny – odchyła się bardziej 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 wyladowaniami elektrycznymi w gazach. Elektronny, powstałe w płomieniu w wyniku jonizacji gazu, podążają do elektrody dodatniej, ale nie są widoczne. Ale 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 ostatnie. Płomień odchyła się również w kierunku elektrody dodatniej, ale nie tak silnie jak w kierunku elektrody ujemnej.

Młynek Franklina

Młynek Franklina 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



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)

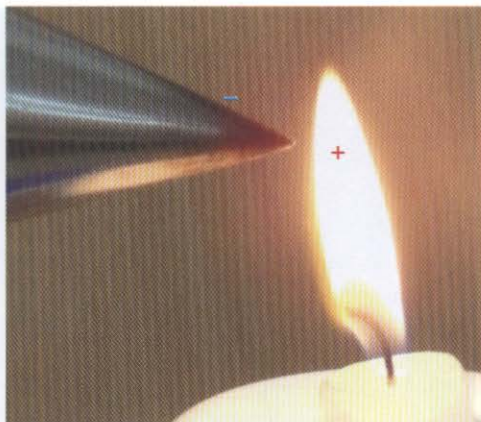


Fot. 10. Płomień świecy w pobliżu ostrza podłączonego do dodatniego bieguna maszyny elektrostatycznej

czy jest podłączony do dodatniego czy ujemnego bieguna maszyny? Zanim na to pytanie odpowiemy, zrobimy jeszcze jedno doświadczenie ze świeczką.

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

Podobnie jak w poprzednim doświadczeniu płomień świecy odchyła 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. Ale 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



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

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).

Powód? Bardzo silne pole jest powodem 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 płomieniu¹.

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 a te jonizują gaz w pobliżu ostrza. Dodatnie jony są przyspieszane w kierunku młynka, zderzają się z nim i przekazują swój pęd. W przypadku ostrza dodatnio naładowanego, jest to jeszcze prostsze. Silne pole elektryczne jonizuje bezpośrednio cząsteczki powietrza („wrywa” z nich elektrony). Dodatnie jony w powietrzu elektrostatycznie odpychają (dodatnio naładowane) młyneczek.

Wynika z tego rozumowania, że młyneczek kręci się z szybciej, gdy jest podłączony do bieguna dodatniego w porównaniu z podłączeniem do bieguna ujemnego? Tak! Trudno ocenić prędkość młynka, ale można liczyć ilość obrotów do jego zatrzymania się, po zatrzymaniu maszyny. Nam się wydaje, że młyneczek kręci się szybciej, kiedy jest podłączony do bieguna dodatniego, podobnie jak odchylenie płomienia świecy – większe przy dodatnio naładowanym ostrzu². Ale wdzięczni byłibyśmy za sprawdzenie doświadczenia przez innych nauczycieli.

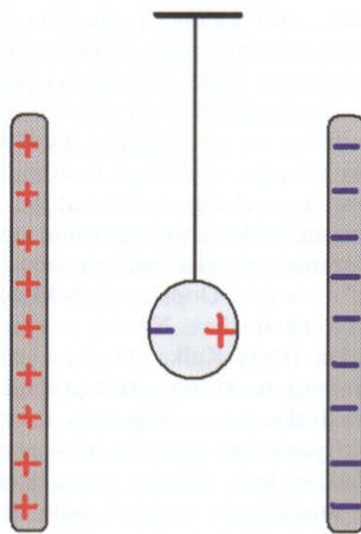
Wahadło elektrostatyczne

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 wprowadzić w ruch.

Umieszczamy piłeczkę ping-pongową zawieszoną na nici między dwoma płytami podłączonymi do maszyny. Po uruchomieniu maszyny piłeczka 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, wydudukowany od strony płyty do-



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

¹ Wyjaśnienie należy traktować jako jakościowe. Zaniedbujemy możliwość powstawania jonów ujemnych w powietrzu w zjawisku wychwytu dysocjacyjnego. Przypominamy, 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.

datniej (zob. rys. 3) jest przyciągany przez płytę. Ale ładunek z drugiej strony pileczki jest przyciągany przez drugą płytę. Oba ładunki są takie same z tym, że pileczka 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 pileczkę a pochodzące od płyty dodatniej i ujemnej są takie same. Jest to bardzo ważna charakterystyka tego doświadczenia.

Abym pileczka wahała się, należy ją delikatnie wprowadzić w ruch tak, aby dotknęła jednej z płyt. W wyniku elektryzowania przez dotyk zyska pewien ładunek o tym samym znaku, co dotknięta płyta i w skutek działania siły elektrostatycznej zostanie odepchnięta w kierunku drugiej płyty. Gdy ją dotknie przekaże „swoją” ładunek i ponownie w wyniku elektryzowania przez dotyk zyska ładunek od drugiej płytki, zostanie odepchnięta itd. Ruch pileczki związany jest ściśle z elektryzowaniem się przez dotyk i trwać będzie dopóki pileczka, czyli nasz transporter ładunków, nie rozładuje kondensatora.

Czasem, podczas wykonywania tego doświadczenia, pileczka 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 – małe 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, wylądowanie ciemne, wylądowanie koronowe, przekaz pędu przez jony, ładunek przestrzenny itp.

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

Wiele innych doświadczeń można przeprowadzić 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

MAGDA SADOWSKA, GRZEGORZ KARWASZ

Zakład Dydaktyki Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika
w Toruniu

LITERATURA

- [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 inni, *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, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2007, s. 80–82, 116–118.
- [6] L. Josić, T. Wróblewski, Z. L. Petrović, J. Mechlinska-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) s. 1–146; <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/ncr1.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, r. 72.
- [11] L. Papageorgiou, A.C. Metaxas i 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*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1999, s. 282–322.



Nauka o elektryczności
- maszyna elektrostatyczna
i zorza polarna

Fizyka w Szkole

Nr 5 WRZESIEŃ/PAŹDZIERNIK 2011 316 (LVII) indeks 35810X CENA 16,90 ZŁ (w tym 5% VAT)

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

Fizyka jądrowa

- bezpieczeństwo energetyczne a Fukushima



82370301110005

ISSN 0426-3383



Interferencja par elektronowych
- 100 lat nadprzewodnictwa