

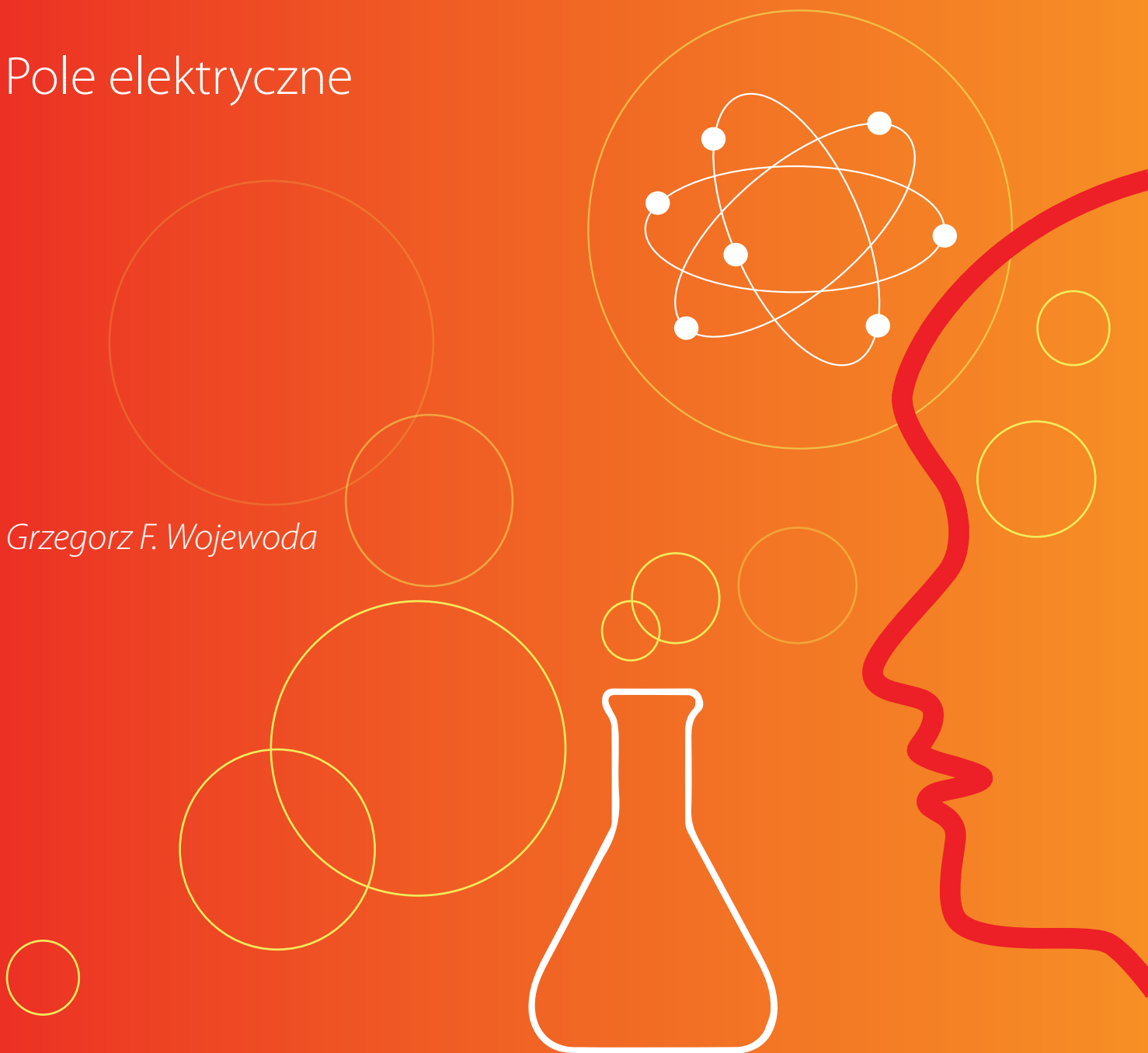
# WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA

INNOWACYJNY PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI  
W SZKOŁACH PONADGIMNAZJALNYCH

Moduł dydaktyczny: fizyka - informatyka

## Pole elektryczne

*Grzegorz F. Wojewoda*



*Człowiek - najlepsza inwestycja*



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Tytuł: *Pole elektryczne*

Autor: *mgr Grzegorz F. Wojewoda*

Redaktor merytoryczny: *dr hab. inż. prof. WWSI Zenon Gniazdowski*

Materiał dydaktyczny opracowany w ramach projektu edukacyjnego  
**WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA.**  
**PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI**  
**Z ELEMENTAMI TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH**

www.wlf.wysi.edu.pl

wlf@wysi.edu.pl

Wydawca: Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki  
ul. Lewartowskiego 17, 00-169 Warszawa  
www.wysi.edu.pl  
rektorat@wysi.edu.pl

Projekt graficzny: *Maciej Koczanowicz*

Warszawa 2013

Copyright © Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki 2013  
Publikacja nie jest przeznaczona do sprzedaży

Człowiek - najlepsza inwestycja



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

MODUŁ 9

## POLE ELEKTRYCZNE

→ FIZYKA – ZAKRES ROZSZERZONY

OPRACOWANE W RAMACH PROJEKTU:  
**WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA.**  
**PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI**  
**Z ELEMENTAMI TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH**

### Temat 1

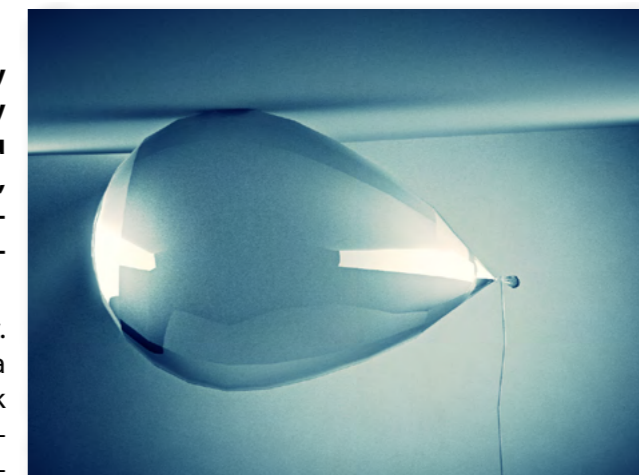
Prawo Coulomba ←

#### Wstęp

Na rysunku 9.1. przedstawiono balon, który znajduje się pod sufitem. Nie jest napełniony helem, nie jest przylepiony za pomocą kleju do sufitu. Powinien więc spaść na podłogę, a jednak ciągle znajduje się pod sufitem. Dlaczego tak się dzieje? Pod koniec bieżącego tematu wszystko powinno się wyjaśnić.

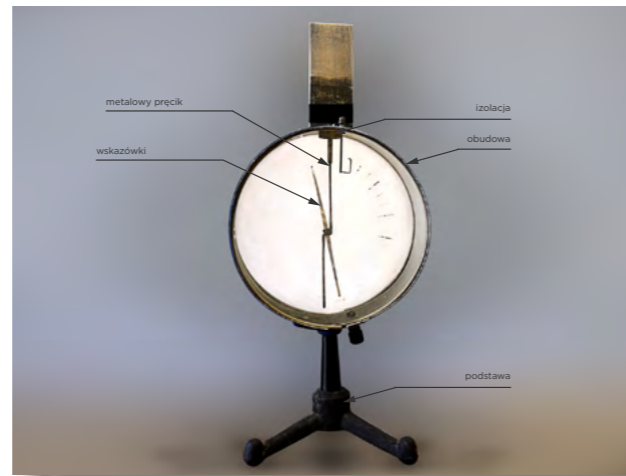
Materia wokół nas zbudowana jest z atomów. Atomy zbudowane są z jąder – w nich skupiona jest zdecydowana większość masy oraz ładunek dodatni oraz elektronów – cząstek mających ładunek ujemny oraz masę około 2000 razy mniejszą od masy protonu. Jądra atomowe zbudowane są z neutronów oraz protonów – cząstek obdarzonych ładunkiem dodatnim. W przyrodzie występują dwa rodzaje ładunków elektrycznych: ładunek dodatni oraz ładunek ujemny. Ładunek dodatni jest przenoszony przez protony, ładunek ujemny przez elektrony. Podczas omawiania zjawisk elektryzowania ciał będziemy skupiać się przede wszystkim na elektryzowaniu ciał stałych. W ciałach stałych przemieszczanie się atomów można zaniedbać. Skoro protony znajdują się w jądrach atomowych, to również protony w ciałach stałych nie będą się przemieszczać. Jedynie elektrony, które są związane z atomami siłami elektrycznymi, mogą się wewnątrz ciał stałych przemieszczać. Ale nie wewnątrz wszystkich ciał stałych elektrony mogą się przemieszczać. Ze względu na własności elektryczne ciała stałe można podzielić na trzy grupy:

- przewodniki – wewnątrz tej grupy ciał elektrony mogą się przemieszczać. W przewodnikach istnieją elektrony swobodne sieci krystalicznej, pod wpływem przyłożonego napięcia elektrony te mogą się przemieszczać.



Rys. 9.01. Balon „przylepiony” do sufitu.

- półprzewodniki – elektrony są związane z atomami sieci krystalicznej, ale to związanie nie jest zbyt silne. Pod wpływem czynników zewnętrznych elektrony mogą się oderwać od atomów i przemieszczać się wewnątrz półprzewodnika.
- izolatory (dielektryki) – elektrony są silnie związane ze swoimi atomami i w „normalnych” warunkach nie będą się przemieszczać wewnątrz dielektryków.



Rys. 9.02. Szkolny elektroskop.

Powyższy opis należy traktować jako bardzo uproszczony opis struktury wewnętrznej ciał stałych. Ale na potrzeby wyjaśnienia elektryzowania się ciał jest wystarczający.

Jeżeli naelektryzujemy dwa ciała ładunkami przeciwnych znaków, to ciała te będą przyciągać się. Gdy będą naelektryzowane ładunkami o takich samych znakach, to będą się odpychać. Naelektryzować ciała można na przykład przez pocieranie. Szklany pręcik potarty kawałkiem sukna naelektryzuje się ujemnie. Ale w wyniku elektryzowania nie został wytworzony ładunek ujemny. Podczas pocierania pewna ilość elektronów została zgromadzona na pręciku, natomiast kawałek sukna został pozbawiony tej samej ilości elektronów i jest teraz naładowany dodatnio. To bardzo ważne. Ładunek zgromadzony na naelektryzowanym ciele jest całkowitą wielokrotnością najmniejszej porcji ładunku, czyli ładunkowi elementarnemu. Ładunek elementarny wynosi  $1,6 \cdot 10^{-19} C$ . Ładunek elektronu wynosi  $-1,6 \cdot 10^{-19} C$ , ładunek protonu wynosi  $+1,6 \cdot 10^{-19} C$ . Ładunek zgromadzony na naelektryzowanym przedmiocie:

$$Q = n \cdot e = n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} C$$

Aby ciało zostało naelektryzowane dodatnio, należy spowodować odpływ od tego ciała pewnej liczby elektronów. Aby ciało zostało naelektryzowane ujemnie, należy spowodować dopływ do tego ciała pewnej ilości elektronów.

Podczas elektryzowania spełniona jest **zasada zachowania ładunku**:

**W układzie ciał izolowanych elektrycznie od otoczenia ładunki mogą przemieszczać się między ciałami, ale całkowity ładunek elektryczny tego układu ciał pozostaje stały.**

W warunkach szkolnych do szacowania ilości zgromadzonych ładunków służy elektroskop. Do metalowego pręta przymocowana jest metalowa wskazówka. Mocowanie zapewnia swobodę obrotu wskazówki wokół pionowej osi oraz kontakt między obiema metalowymi częściami. Pręt ze wskazówką jest zamocowany do obudowy. Połączenie jest izolatorem. Gdy pręt zostanie naelektryzowany ładunkiem dodatnim, to ładunki tego samego znaku pojawią się na wskazówkach. Ładunki tego samego znaku odpychają się, więc wskazówki będą odpychać się od pręta. Im ilość zgromadzonych na pręcie oraz wskazówkach ładunków jest większa, tym wychylenie wskazówek jest większe. Zamiast blaszki na pręcie elektroskopu można zamocować sferę.

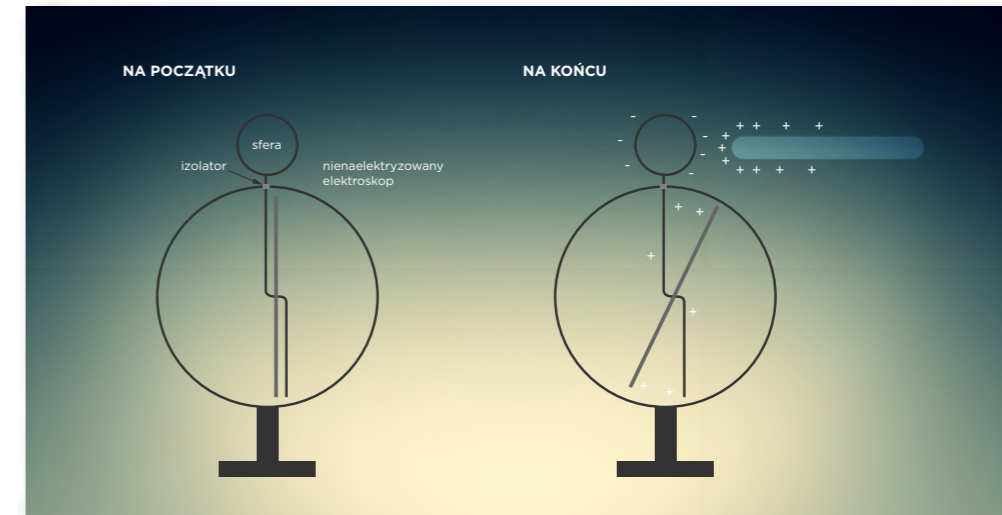
**Doświadczenie 1**

Na pręcie elektroskopu zamocowano metalową sferę (Rys. 9.3). Po zbliżeniu do sfery pałeczki naelektryzowanej dodatnio stwierdzamy wychylenie wskazówek elektroskopu.

**Wyjaśnij wynik doświadczenia.**

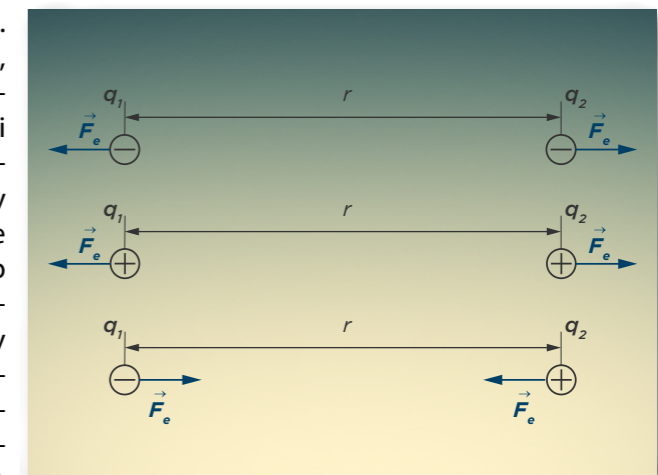
Gdy pałeczka naelektryzowana dodatnio zostanie zbliżona do elektroskopu ze sferą, to część elektronów swobodnych ze wskazówek oraz pręta przepływa do sfery. Pręt oraz wskazówki zostają w ten sposób naelektryzowane dodatnio, a sfera ujemnie. Całkowita ilość ładunków na elektroskopie pozostała stała. Jest to przykład elektryzowania przez indukcję.

Następny przykład elektryzowania przez indukcję przedstawiono w animacji.



Rys. 9.03. Przykład elektryzowania przez indukcję.

Naelektryzowane ciała oddziałują na siebie. W toku badań nad tym problemem okazało się, że oddziaływanie między dwiema naelektryzowanymi kulami umieszczonymi w odległości dużo większej niż ich rozmiary, są bardzo podobne do oddziaływania grawitacyjnego między dwiema kulami. Różnica polega na tym, że dwie naelektryzowane kule mogą się przyciągać lub odpychać, a dwie masy mogą się tylko przyciągać. Wartość przyciągania grawitacyjnego zależy od iloczynu mas, a wartość oddziaływania elektrycznego zależy od iloczynu ładunków zgromadzonych na kulach. Siłę oddziaływania elektrycznego między ładunkami opisuje prawo Coulomba (Rys. 9.4):



Rys. 9.04. Ilustracja sił działających na ładunki punktowe.

**Jeżeli dwa ładunki (o zaniedbywalnie małych rozmiarach) znajdują się w odległości  $r$  od siebie, to siła elektrostatyczna ich wzajemnego przyciągania (lub odpychania) jest wprost proporcjonalna do iloczynu wartości tych ładunków, a odwrotnie proporcjonalna od kwadratu odległości między nimi:**

$$F_e \sim \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Jeżeli wartość siły oddziaływania elektrostatycznego ma być podana w jednostkach SI, to musimy powyższy iloczyn pomnożyć przez pewną stałą. Dla próżni stała elektryczna wynosi:  $k = 8,99 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ , a wzór na prawo Coulomba przyjmuje postać:

$$F_e = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

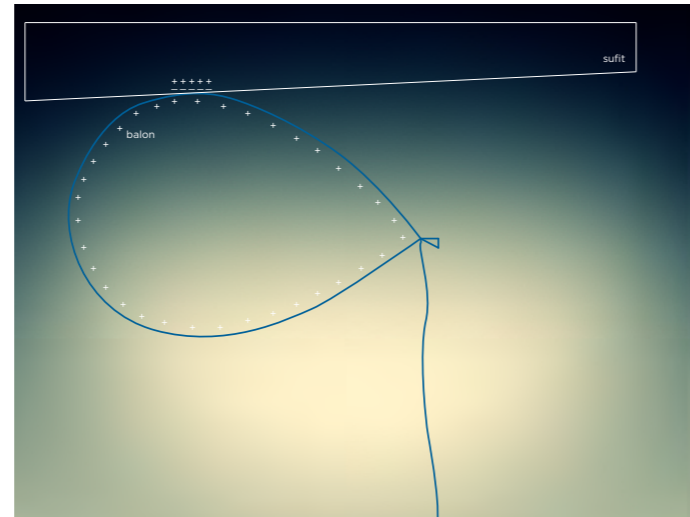
Siła oddziaływania grawitacyjnego również jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między masami:  $F_g = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$

Stałą  $k$  w prawie Coulomba bardzo często zastępuje się inną wielkością fizyczną:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

gdzie:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$  – przenikalność elektryczna próżni.

Pozostało nam jeszcze wyjaśnić problem balonika zawieszono pod sufitem. Balon został naelektryzowany dodatnio przez potarcie o polarowy szalik. Sufit (w miejscu styku z balonem) w wyniku zbliżenia balonika elektryzuje się przez indukcję w taki sposób, że powstaje warstwa ładunków ujemnych oraz warstwa ładunków dodatnich (Rys.9.5). Ładunki ujemne na suficie przyciągają się z ładunkami dodatnimi na balonie. Siła ta ma większą wartość niż siła odpychania między ładunkami dodatnimi balonu i sufitu. Jest to spowodowane różnicą w odległościach między ładunkami.



Rys. 9.05. Balon zawieszony pod sufitem.

**Podsumowanie**

W przyrodzie istnieją dwa rodzaje ładunków elektrycznych: dodatnie (protony) oraz ujemne (elektrony).

Zasada zachowania ładunku:

W układzie ciał izolowanych elektrycznie od otoczenia ładunki mogą przemieszczać się między ciałami, ale całkowity ładunek elektryczny tego układu ciał pozostaje stały.

Siłę oddziaływania elektrycznego między ładunkami opisuje prawo Coulomba (Rys. 9.4):

Jeżeli dwa ładunki (o zaniedbywalnie małych rozmiarach) znajdują się w odległości  $r$  od siebie, to siła elektrostatyczna ich wzajemnego przyciągania (lub odpychania) jest wprost proporcjonalna do iloczynu wartości tych ładunków, a odwrotnie proporcjonalna od kwadratu odległości między nimi:

$$F_e = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

**Temat 2**

**Pole elektryczne**

**Wstęp**

**Pewien lokal gastronomiczny miał przy wejściu napis: „U nas telefony komórkowe nie działają – możesz spokojnie spędzić wieczór”. I rzeczywiście wewnątrz telefony wszystkich sieci wskazywały brak zasięgu. Jak to jest możliwe, że na ulicy obok tego lokalu wszystkie sieci komórkowe mają pełny zasięg, a wewnątrz lokalu telefony komórkowe nie mogą się połączyć z siecią? Mamy nadzieję, że po przeanalizowaniu treści tego tematu odpowiedź na to pytanie nie będzie dla was trudna.**

Podobnie jak było to w przypadku sił grawitacji, siły oddziaływania elektrostatycznego między dwoma ładunkami działają na pewne odległości, nie wymagają bezpośredniego kontaktu między ciałami. Można powiedzieć, że oddziaływanie elektrostatyczne przenoszone jest za pomocą pola elektrycznego. Możemy sformułować następującą definicję pola elektrostatycznego:

**Jeżeli na ładunek  $q$  o bardzo małych rozmiarach działa siła oddziaływania elektrostatycznego o wartości wprost proporcjonalnej do wielkości tego ładunku, to mówimy, że ładunek ten znajduje się w polu elektrostatycznym.**

Pole elektrostatyczne, to pole elektryczne wytworzone przez stały i nieruchomy ładunek elektryczny. Do opisu pola elektrycznego używać będziemy wielkości fizycznej o nazwie natężenie pola elektrycznego.

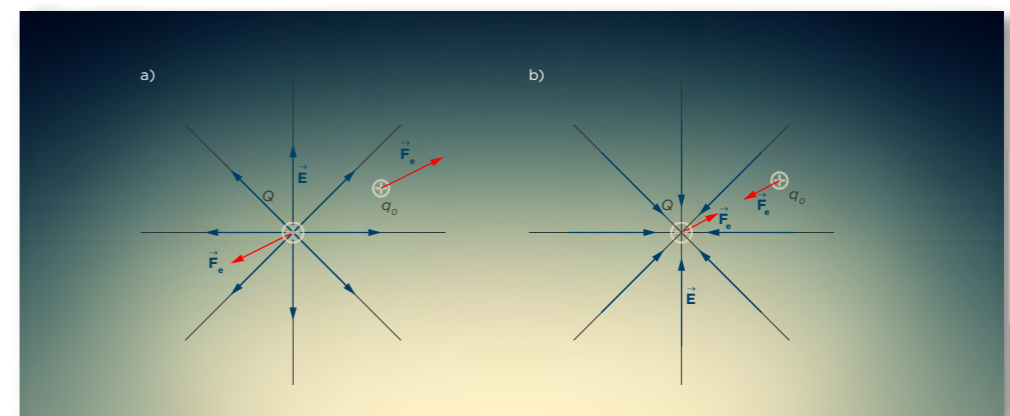
**Natężenie pola elektrycznego to wektor równy ilorazowi wektora siły oddziaływania elektrostatycznego działającej na pewne ciało o ładunku  $q_0$  oraz ładunku tego ciała.**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_0}$$

**Wektor natężenia pola ma kierunek i zwrot zgodny z kierunkiem i zwrotem siły oddziaływania elektrostatycznego.**

**Wartość natężenia pola elektrycznego obliczymy ze wzoru:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_0}$ . Jednostką natężenia jest:  $E = \frac{N}{C}$ .**

Prosta na której leży wektor natężenia pola elektrycznego (Rys. 9.6.) ma swój początek w źródle pola elektrycznego. Prosta tę będziemy nazywać linią pola elektrycznego. Linie pola elektrycznego będą graficzną reprezentacją pola elektrycznego. Aby ustalić zwrot wektora natężenia pola elektrycznego, w polu elektrycznym umieszcza się dodatni ładunek próbny  $q_0$ . Gdy ładunek źródła  $Q$  jest dodatni, to zwrot wektora natężenia pola elektrycznego jest od źródła. Gdy ładunek źródła  $Q$  jest ujemny, to zwrot wektora



Rys. 9.06. Pola elektryczne wokół pojedynczych ładunków: a) źródłem jest ładunek dodatni, b) źródłem jest ładunek ujemny.

tora natężenia pola elektrycznego jest do źródła. Gdy źródło można traktować jako ładunek punktowy, to wartość natężenia pola elektrycznego obliczymy ze wzoru:

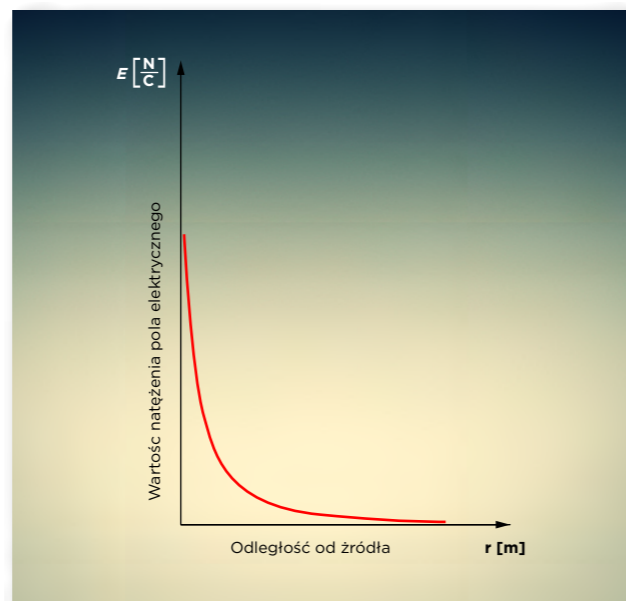
$$E = \frac{F_c}{q_0} = \frac{k \frac{Q \cdot q_0}{r^2}}{q_0}$$

$$E = k \frac{Q}{r^2} \text{ lub } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

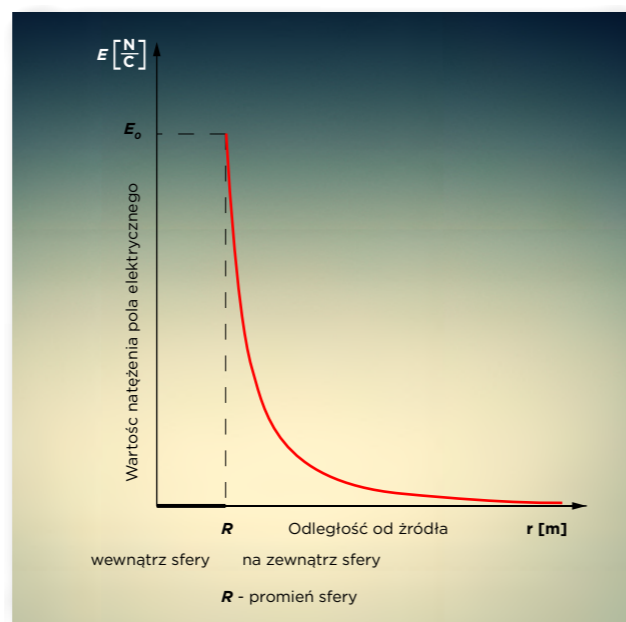
Na rysunku 9.7. przedstawiono wykres zależności wartości natężenia pola elektrycznego w zależności od odległości od punkowego ładunku Q. Wartość natężenia w tym przypadku maleje z kwadratem odległości.

Gdy źródłem pola elektrycznego jest naelektryzowana sfera, to wykres zależności natężenia pola elektrycznego w zależności od odległości od środka sfery przedstawia wykres przedstawiony na rysunku 9.8. Warto zwrócić uwagę na to, że wartość natężenia pola elektrycznego wewnątrz sfery jest równa zero. Jednym z pierwszych fizyków, którzy opisali to zjawisko był angielski fizyk Michael Faraday. W latach 30-tych XIX wieku donosił, że będąc wewnątrz metalowej skrzyni nie mógł stwierdzić istnienia pola elektrycznego pomimo silnego naelektryzowania skrzyni z zewnątrz. Klatka (puszka) Faradaya to metalowe pudełko lub metalowa siatka wewnątrz której natężenie pola elektrycznego jest równe zero. W zasadzie każdy metalowy, zamknięty pojemnik jest klatką Faradaya. Spróbujcie przeprowadzić następujące doświadczenie: działający telefon komórkowy owińcie czystą kartką papieru, a następnie pakunek umieście wewnątrz metalowej, szczelnie zamkniętej puszk. A teraz spróbujcie dodzwonić się do zamkniętego w puszkę telefonu. Nieudana próba jest wyjaśnieniem zagadki opisanej we wstępie.

Przewodnik nie musi być pusty w środku, aby pole elektryczne wewnątrz niego było równe zero. Gdy elektryzujemy przewodnik, to nadmiarowe ładunki gromadzą się na ich powierzchni. We wnętrzu przewodników nie ma nadmiarowych ładunków. Gdy na przykład przewodnik jest naładowany ujemnie, to wszystkie nadmiarowe elektrony zgromadzone są na jego powierzchni. A pole elektryczne we wnętrzu takiego przewodnika jest równe zero. W przypadku metalowej kuli ładunki nadmiarowe rozmieszczone są równomiernie na jej powierzchni. W przypadku innych kształtów przewodnika ładunki groma-



Rys. 9.07. Wykres zależności wartości natężenia pola elektrycznego w zależności od odległości od punkowego źródła.



Rys. 9.08. Wykres wartości natężenia pola elektrycznego w zależności od odległości od środka sfery.

dzą się w taki sposób na ich powierzchniach, że największa ilość ładunków przypadająca na jednostkę powierzchni jest w miejscach o najmniejszym promieniu krzywizny (Rys. 9.9.). W stanie równowagi, w którym ładunki nie przemieszczają się, najwięcej ładunków na jednostkę powierzchni jest w miejscu największego zakrzywienia. Odkrycie tego zjawiska posłużyło do budowy piorunochronów. Wynalazcą piorunochronu był amerykański uczoney Benjamin Franklin. Idea działania piorunochronu jest przedstawiona na rysunku 9.10. Metalowy maszt jest głęboko osadzony w powierzchnię podłoża. W czasie pogody burzowej następuje elektryzowanie powietrza z wyniku czego chmura będzie obdarzona ładunkiem ujemnym, a podłoże będzie obdarzone ładunkiem dodatnim. Ładunek dodatni gromadzi się na ostrzu, jakim jest metalowy słup. Podczas wyładowań atmosferycznych większe jest prawdopodobieństwo, że prąd przepłynie przez piorunochron do ziemi, niż że nastąpi przepływ prądu przez budynek. W praktyce piorunochrony częściej instaluje się na dachach budynków niż stawia oddzielne maszty z piorunochronami.



Rys. 9.09. Rozkład ładunku na powierzchni przewodnika.



Rys. 9.10. Schemat działania piorunochronu.

**Patrz: Symulacja pól elektrycznych powstających wokół różnych ładunków**

Jednorodne pole elektryczne to pole, którego linie pola są do siebie równoległe, a wartości natężeń są w każdym punkcie jednakowe. Przykładem źródła takiego pola jest układ dwóch metalowych płyt umieszczonych równoległe do siebie (rys. 9.11). W pewnej odległości od krawędzi tych płyt pole elektryczne między płytami można uznać za jednorodne. Na ładunek  $q_0$  umieszczony w tym polu działa siła oddziaływania elektrycznego o wartości:

$$F_c = q_0 \cdot E$$

Gdy płyty są naelektryzowane, to pomiędzy nimi panuje napięcie  $U$ . Wówczas wartość natężenia pola elektrycznego między płytami obliczymy ze wzoru:

$$E = \frac{U}{d}$$

gdzie:  $d$  – odległość między płytami.

**Podsumowanie**

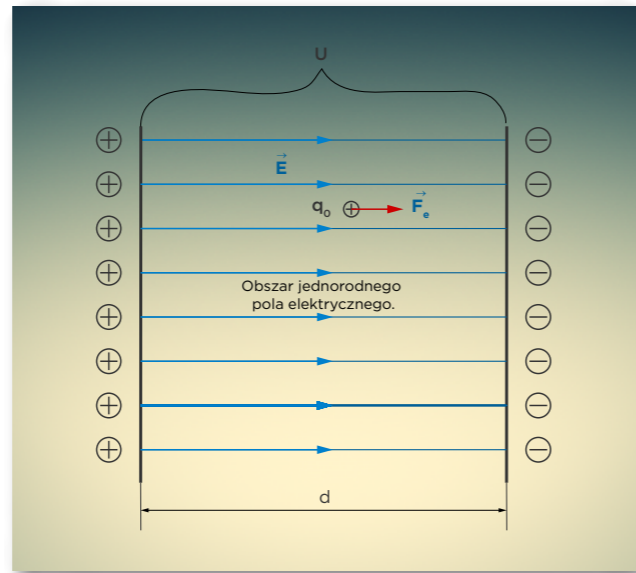
Jeżeli na ładunek  $q$  o bardzo małych rozmiarach działa siła oddziaływania elektrostatycznego o wartości wprost proporcjonalnej do wielkości tego ładunku, to mówimy, że ładunek ten znajduje się w polu elektrostatycznym.

Natężenie pola elektrycznego to wektor równy ilorazowi wektora siły oddziaływania elektrostatycznego działającej na pewne ciało o ładunku  $q_0$  oraz ładunku tego ciała.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_0}$$

Wartość natężenia jednorodnego pola elektrycznego:

$$E = \frac{U}{d}$$



Rys. 9.11. Model jednorodnego pola elektrycznego.

**Temat 3**

**Energia potencjalna pola elektrycznego**

**Wstęp**

Treści poniższego tematu wykraczają nieco poza podstawę programową, ale dzięki omawianym poniżej problemom lepiej poznacie pojęcie napięcia elektrycznego. Poza tym przekonacie się, że pod wieloma względami pole elektryczne jest podobne do pola grawitacyjnego.

Na początku zajmiemy się pracą wykonaną podczas przemieszczania ruchem jednostajnym ciała o ładunku  $q$  w jednorodnym polu elektrycznym. Zakładamy, przy tym, że masa ciała obdarzonego ładunkiem jest do pominięcia. Będziemy przemieszczać ładunek dodatni  $q$  od punktu A do B dwiema drogami: po linii prostej od A do B oraz po liniach prostych od punktu A do C i od punktu C do B (rys. 9.12). Aby ruch ładunku był jednostajny, siła elektryczna  $\vec{F}_e$  musi być równoważona przez pewną siłę zewnętrzną  $\vec{F}_z$ . Skoro wartość siły elektrycznej wynosi  $F_e = q \cdot E$ , to wartość siły zewnętrznej również wynosi  $F_z = q \cdot E$ . Zgodnie z definicją, praca wykonana przez siłę zewnętrzną  $\vec{F}_z$  przy przesuwaniu ładunku  $q$  od punktu A do punktu B obliczymy ze wzoru:

$$W_{A \rightarrow B} = F_z \cdot AB \cdot \cos \alpha,$$

gdzie:  $\cos \alpha = \frac{BC}{AB}$

Więc praca siły zewnętrznej  $\vec{F}_z$  wynosi:

$$W_{A \rightarrow B} = F_z \cdot AB \cdot \frac{BC}{AB}$$

Ale odcinek AB jest równy odległości  $d$ . Natomiast wartość siły zewnętrznej wynosi  $F_z = q \cdot E$ . Więc ostatecznie wartość pracy wykonanej na odcinku AB opisywana jest wzorem:

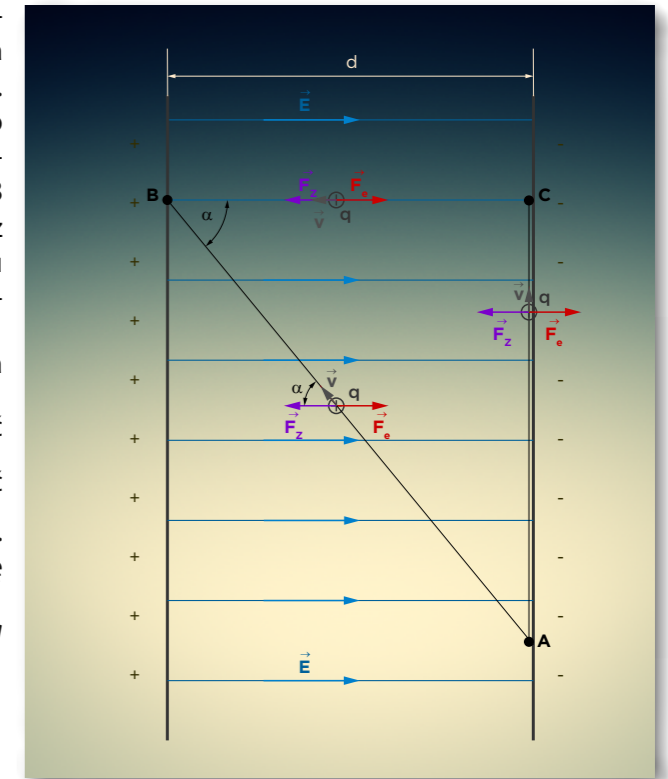
$$W_{A \rightarrow B} = q \cdot E \cdot d$$

Praca wykonana nad ciałem podczas przemieszczania od punktu A poprzez punkt C do punktu B jest równa sumie pracy wykonanej przy przesuwaniu od punktu A do C oraz pracy wykonanej od punktu C do B:

$$W_{A \rightarrow C \rightarrow B} = W_{A \rightarrow C} + W_{C \rightarrow B}$$

Wartość pracy wykonanej przez siłę zewnętrzną  $\vec{F}_z$  na odcinku AC:

$$W_{A \rightarrow C} = F_z \cdot AC \cdot \cos 90^\circ$$



Rys. 9.12. Przesunięcie ładunku w jednorodnym polu elektrycznym.

Ale  $\cos 90^\circ = 0$ , więc:

$$W_{A \rightarrow C} = 0$$

Wartość pracy wykonanej przez siłę zewnętrzną  $\vec{F}_Z$  na odcinku CB:

$$W_{C \rightarrow B} = F_Z \cdot CB \cdot \cos 0^\circ$$

Ale  $\cos 0^\circ = 1$  oraz  $F_Z = q \cdot E$ , a odcinek AB jest równy odległości  $d$ , więc:

$$W_{C \rightarrow B} = q \cdot E \cdot d$$

Ostatecznie praca wykonana na odcinku  $A \rightarrow C \rightarrow B$  jest równa:

$$W_{A \rightarrow C \rightarrow B} = q \cdot E \cdot d$$

Okazuje się, że wartość pracy wykonanej przez siłę zewnętrzną nad przesunięciem ciała o ładunku  $q$  ruchem jednostajnym w jednorodnym polu elektrycznym nie zależy od toru, po którym wykonano przesunięcie. Zależy ona od zmiany odległości liczonej wzdłuż linii pola elektrycznego. Pole elektryczne jest **polem zachowawczym**, bo praca wykonana nad przesunięciem ciała nie zależy od toru, po którym zostało ono wykonane. Bardzo podobne rozważania prowadziliśmy dla pola grawitacyjnego. Praca podczas przesuwania ciała o masie  $m$  w jednorodnym polu grawitacyjnym opisywana jest równaniem:

$$W = m \cdot g \cdot h$$

W polu grawitacyjnym jest masa, a w polu elektrycznym ładunek elektryczny. W polu grawitacyjnym

jest natężenie pola grawitacyjnego  $\vec{g}$  (którego wartość jest równa wartości przyspieszenia grawita-

cyjnego  $g$ ), a w polu elektrycznym natężenie pola elektrycznego  $\vec{E}$ . W obu przypadkach przesunięcie jest liczone wzdłuż linii pola.

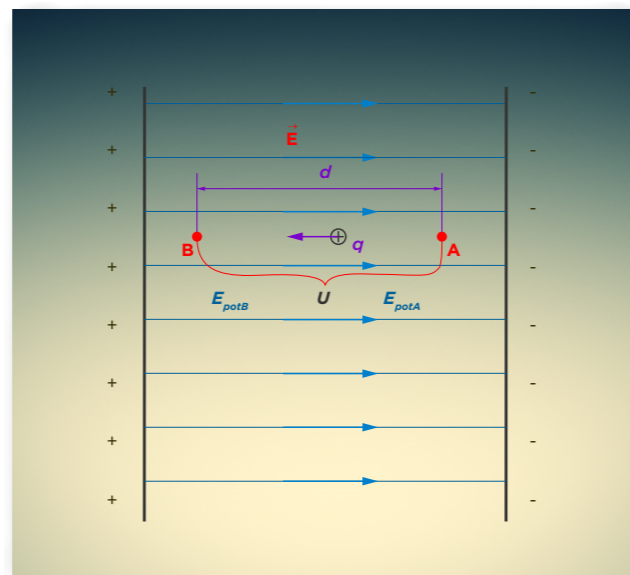
Jak już wiecie ciało wyniesione na pewną wysokość w polu grawitacyjnym posiada energię potencjalną grawitacji. Ściśle rzecz biorąc jest to energia potencjalna układu Ziemia – ciało, oddziałującego ze sobą grawitacyjnie. Zmiana energii potencjalnej grawitacji jest równa pracy wykonanej nad zmianą położenia ciała. Podobnie jest w przypadku pola elektrycznego. Ładunek przemieszczony na pewną odległość od ładunku przeciwnego znaku ma pewną energię potencjalną. Zmiana energii potencjalnej ładunku jest równa pracy wykonanej nad przesunięciem tego ładunku przez siłę zewnętrzną równoważącą siłę pola elektrycznego. W przypadku przesunięcia ładunku  $q$  w polu elektrycznym (Rys.9.13.) zmiana energii potencjalnej jest równa:

$$E_{pot} = W_{A \rightarrow B} = q \cdot E \cdot d$$

Ale iloczyn wartości natężenia pola elektrycznego oraz odległości liczonej wzdłuż linii tego pola możemy zdefiniować jako **napięcie elektryczne  $U$** . Wówczas zmianę energii potencjalnej ładunku w polu jednorodnym obliczymy ze wzoru:

$$E_{pot} = q \cdot U$$

Pole elektryczne wokół ładunków punktowych, układu ładunków jest również polem zachowawczym. W każdym polu elektrycznym praca wykonana przez siłę zewnętrzną powoduje zmianę energii poten-



Rys. 9.13. Zmiana energii potencjalnej ładunku w jednorodnym polu elektrycznym.

cjalnej ładunku w tym polu. W przypadku pola centralnego elektrycznego zmianę energii potencjalnej wyznaczmy w analogiczny sposób do opisanego dla centralnego pola grawitacyjnego (sposób ten został opisany w module 6 – Pole grawitacyjne).

### Podsumowanie

Pole elektryczne jest **polem zachowawczym**, bo praca wykonana nad przesunięciem ciała nie zależy od toru po którym zostało ono wykonane. W polu elektrycznym można zdefiniować energię potencjalną ładunku.

Zmianę energii potencjalnej ładunku w jednorodnym polu elektrycznym można obliczyć ze wzoru:

$$E_{pot} = W_{A \rightarrow B} = q \cdot E \cdot d$$

**Napięcie elektryczne  $U$**  możemy zdefiniować jako iloczyn wartości natężenia pola elektrycznego oraz odległości liczonej wzdłuż linii tego pola:

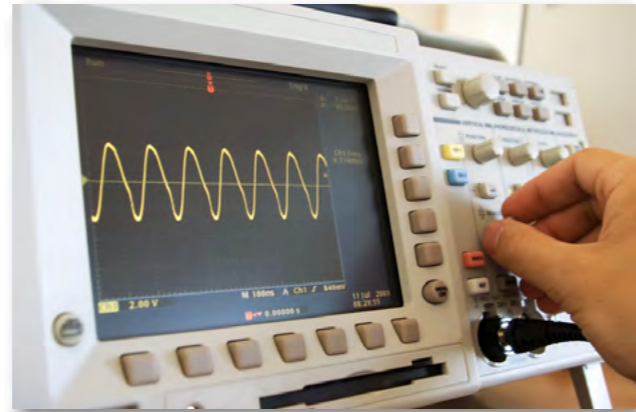
$$U = E \cdot d$$

Temat 4

Ruch cząstki naładowanej w polu elektrycznym

Wstęp

Lampy obrazowe, to urządzenia, których wspólną cechą jest ekran pokryty specjalną substancją, która świeci pod wpływem bombardowania elektronami. Do takich lamp zaliczamy lampy kineskopowe oraz lampy oscyloskopowe. Wspólną cechą obu lamp jest działło elektronowe, które rozpędza elektrony. Różnią się sposobem odchylenia wiązki elektronów. W lampach kineskopowych służy do tego pole magnetyczne, w oscyloskopowych pole elektryczne. Na fotografii (Rys. 9.14.) przedstawiono oscyloskop. W trakcie tego tematu zajmiemy się wyjaśnieniem, w jaki sposób powstaje obraz na ekranie oscyloskopu. Omawiając zasadę działania lampy oscyloskopowej opiszemy ruch naładowanej cząstki w polu elektrycznym.



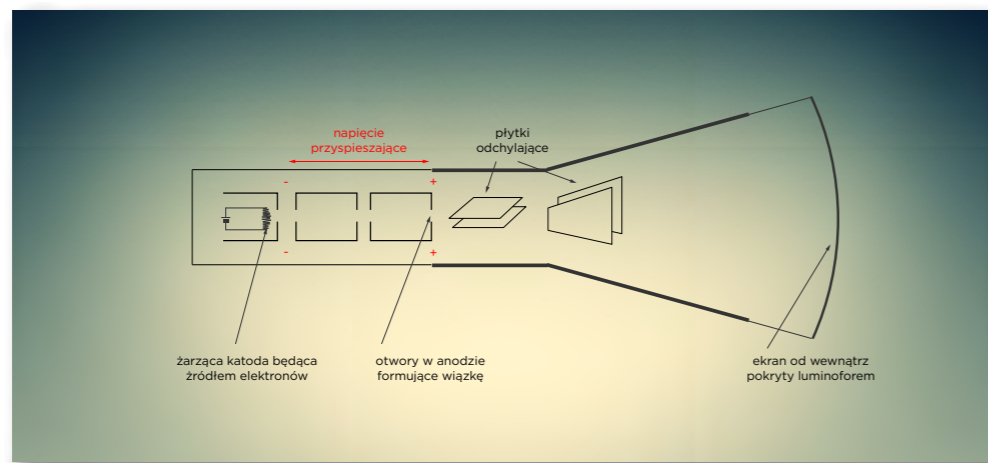
Rys. 9.14. Oscyloskop.

Na rysunku 9.15 przedstawiono uproszczony schemat budowy lampy oscyloskopowej. Źródłem elektronów jest żarząca się katoda. Pomiędzy katodą a anodą panuje wysokie napięcie. Ten fragment lampy nazywany jest działem elektronowym. W uproszczeniu przyjmijmy, że elektrony są tam rozpędzane wzdłuż linii stałego pola elektrycznego oraz, że elektrony na początku nie poruszały się. Ruch cząstki naładowanej w polu elektrycznym bez prędkości początkowej jest bardzo podobny do swobodnego spadku ciała w jednorodnym polu grawitacyjnym. Na rysunku 9.16. przedstawiono schemat rozpędzania elektronu w jednorodnym polu elektrycznym. Opiszemy ruch elektronu korzystając z zasady zachowania energii. W chwili początkowej jego energia kinetyczna była równa zero, natomiast potencjalna w polu elektrycznym wynosiła:

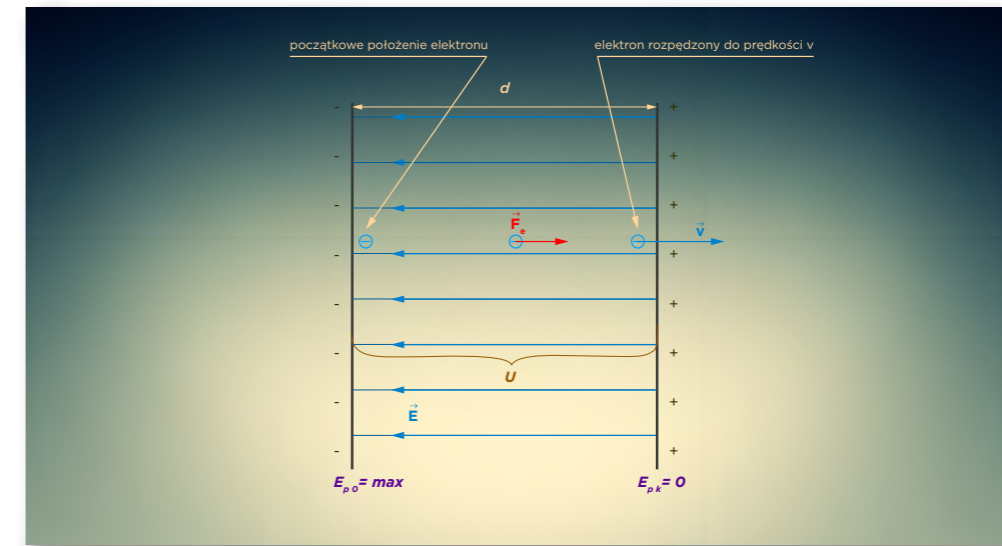
$$E_{p0} = q \cdot U = q \cdot E \cdot d$$

Po przebyciu przez elektron drogi równej  $d$ , jego energia potencjalna jest równa zero, natomiast energia kinetyczna wzrosła do:

$$E_k = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$$



Rys. 9.15. Uproszczony schemat budowy wewnętrznej lampy oscyloskopowej.



Rys. 9.16. Rozpędzanie elektronu w jednorodnym polu elektrycznym.

Z zasady zachowania energii wynika, że energia kinetyczna rozpędzonego elektronu jest równa jego początkowej energii potencjalnej:

$$E_{p0} = E_k$$

$$q \cdot U = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$$

Z ostatniego równania można wyznaczyć wartość prędkości rozpędzonego w polu elektrycznym elektronu:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m_e}}$$

gdzie:  $q = e = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ C}$  – ładunek elektronu,

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  – masa elektronu,

$U$  – napięcie przyspieszające

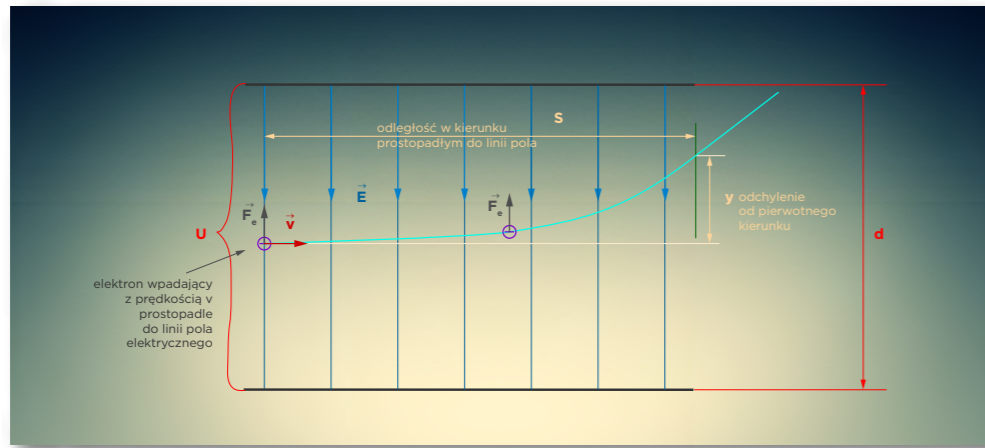
Napięcie w lampie oscyloskopowej jest rzędu od kilku do kilkunastu tysięcy wolt. Powyższy wzór jest prawdziwy dla prędkości elektronów mniejszych niż 0,1 wartości prędkości światła w próżni. Dla

napięcia przyspieszającego  $U = 1000 \text{ V}$ , wartość prędkości elektronu wynosi  $v = 1,9 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , a dla napięcia  $U = 5000 \text{ V}$ ,  $v = 4,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Wyniki te oznaczają, że dla napięcia przyspieszającego 5000 V należałoby już korzystać z opisu relatywistycznego ruchu elektronu.

Wracamy do omawiania budowy lampy oscyloskopowej. Rozpędzona w działle elektronowym wiązka elektronów pada teraz na płytki odchyłające. Przyjmijmy w uproszczeniu, że elektrony padają prostopadle do linii pola elektrycznego. Ich dalszy ruch będzie podobny do rzutu poziomego w jednorodnym polu grawitacyjnym (Rys. 9.17). Elektron wpada do obszaru jednorodnego pola elektrycznego prostopadle do linii tego pola. Podczas lotu na elektron działa siła pola elektrycznego. Zakładamy, że możemy pominąć wpływ pola grawitacyjnego na ruch elektronu. W kierunku początkowej prędkości elektronu nie działa na niego żadna siła. Zgodnie z I zasadą dynamiki Newtona, jego ruch jest w tym kierunku jednostajny. W kierunku wyznaczonym przez linie pola elektrycznego ruch elektronu jest jednostajnie przyspieszony. Wartość przyspieszenia elektronu obliczymy ze wzoru:

$$a = \frac{F_e}{m_e}$$





Rys. 9.17. Schemat ruchu elektronu wpadającego prostopadle do linii pola do obszaru jednorodnego pola elektrycznego.

Ale wartość siły, z jaką pole elektryczne działa na elektron obliczymy ze wzoru:

$$F_e = q \cdot E = q \frac{U}{d},$$

więc wartość przyspieszenia elektronu wzdłuż linii pola elektrycznego:

$$a = \frac{q \cdot U}{m_e \cdot d}$$

gdzie:  $q = e = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ C}$  – ładunek elektronu,

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  – masa elektronu,

$U$  – napięcie między płytami odchylającymi,

$d$  – odległość między płytami.

Znając przyspieszenie można, korzystając z równań poznanych podczas nauki kinematyki, obliczyć odchylenia od pierwotnego kierunku lotu  $y$  oraz wartość prędkości elektronu po opuszczeniu obszaru pola elektrycznego.

Podobnego odchylenia elektron doznaje w kierunku prostopadłym. Odpowiednie dobranie napięć odchylających pozwala na dotarcie do każdego punktu na ekranie. Pod wpływem uderzających w luminofor zaczyna on świecić. Świecenie luminoforu odbieramy jako jasny punkt na ekranie lampy oscyloskopowej. W bardzo podobny sposób działają lampy kineskopowe używane w telewizorach. Różnica polegała na wykorzystaniu pola magnetycznego do zmian kierunku lotu elektronów.

Prześledźmy wykorzystanie powyższych rozważań w symulacji ruchu cząstki naładowanej polu elektrycznym.

### Podsumowanie

Ruch cząstek naładowanych w jednorodnym polu elektrycznym jest bardzo podobny do rzutów w jednorodnym polu grawitacyjnym. Pole elektryczne może zmieniać wartość oraz kierunek lotu cząstek naładowanych. Przyspieszanie cząstek naładowanych w polu elektrycznym jest podstawą działania akceleratorów cząstek.

## Temat 5

### Pojemność elektryczna

#### Wstęp

Wszyscy z pewnością rozumiemy pojęcie pojemności butelki. Wiemy, że do butelki o pojemności dwóch litrów nie można wtłoczyć czterech litrów wody. Okaże się, że w zjawiskach elektryzowania ciał istnieje podobny efekt. Każdy przewodnik, który elektryzujemy ma określoną pojemność elektryczną.

Podczas szkolnych doświadczeń z maszyną elektrostatyczną z pewnością zauważyliście (rys. 9.18.), że podczas jej pracy między kulkami co chwilę przeskakują iskry. Wyjaśnijmy dlaczego tak się dzieje. Gdy wprawimy w ruch tarczę maszyny, to ładunki są stopniowo gromadzone na kulkach oraz metalowych cylindrach. Jedna z kulek gromadzi ładunek dodatni, a druga ładunek ujemny. Im większy będzie zgromadzony ładunek, tym większe będzie napięcie między kulkami. W pewnym momencie ładunków jest tak dużo, że napięcie panujące między kulkami jest wystarczająco duże do wymuszenia przepływu prądu przez powietrze. Można więc powiedzieć, że na kulkach (oraz cylindrach) nie można zgromadzić dowolnej ilości ładunków. Kule mają ograniczoną pojemność elektryczną.



Rys. 9.18. Przeskok iskry między kulkami maszyny elektrostatycznej.

Zdefiniujmy tę wielkość fizyczną:

Pojemność elektryczna  $C$  jest to stały stosunek ładunku  $Q$  zgromadzonego na powierzchni przewodnika do uzyskanego napięcia  $U$ :

$$C = \frac{Q}{U}$$

Jednostką pojemności elektrycznej jest farad [F].

Jeden farad jest to pojemność elektryczna uzyskana, gdy zgromadzony ładunek 1 C (kulomb) powoduje powstanie napięcia 1 V (wolt):

$$1 \text{ [ F ] farad} = \frac{1 \text{ kulomb}}{1 \text{ wolt}} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}}$$

Zgodnie z powyższą definicją pojemność elektryczna nie zależy od ładunku zgromadzonego na danym przewodniku. Podobnie jak pojemność butelki nie zależy od ilości wody zgromadzonej w butelce. Gdy zwiększa się ilość ładunków  $Q$  zgromadzonych na przewodniku to rośnie napięcie  $U$ . Wyznamy pojemność elektryczną metalowej kuli. Zakładamy, że mamy kulę naładowaną pewnym ładunkiem  $Q$ . Pomiędzy tą kulą a nieskończonością nie ma żadnych ładunków elektrycznych. Wówczas napięcie elektryczne pomiędzy powierzchnią kuli a nieskończonością wynosi:

$$U = k \frac{Q}{R}$$

Wstawiając to wyrażenie do definicji pojemności elektrycznej otrzymujemy:

$$C = \frac{Q}{k \frac{Q}{R}} = \frac{R}{k}$$

Pamiętając, że  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  otrzymujemy:

$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$

Oznacza to, że pojemność elektryczna kuli jest wprost proporcjonalna do jej promienia.

Oszacujmy pojemność elektryczną naszej planety. Promień Ziemi wynosi około 6400 km, przenikalność elektryczna próżni wynosi  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$ . Podstawiając liczby do wzoru na pojemność elektryczną kuli otrzymujemy:  $C = 0,71 \text{ mF}$ .

Z powyższych rachunków wynika, że pojemność elektryczna 1 F (farad) to bardzo duża jednostka. Pojemność elektryczna całej Ziemi jest ponad tysiąc razy mniejsza niż 1 F. Jednocześnie Ziemię możemy traktować jako obiekt o tak dużej pojemności, że ładunek, który przepłynie do niej podczas doświadczeń z elektryzowaniem ciał nie spowoduje zmiany jej potencjału elektrycznego.

### Podsumowanie

Pojemność elektryczna  $C$  jest to stały stosunek ładunku  $Q$  zgromadzonego na powierzchni przewodnika do uzyskanego napięcia  $U$ :

$$C = \frac{Q}{U}$$

Jednostką pojemności elektrycznej jest farad [F].

$$1 [F] \text{ farad} = \frac{1 \text{ kulomb}}{1 \text{ wolt}} = \frac{1C}{1V}$$

## Temat 6

### Kondensatory

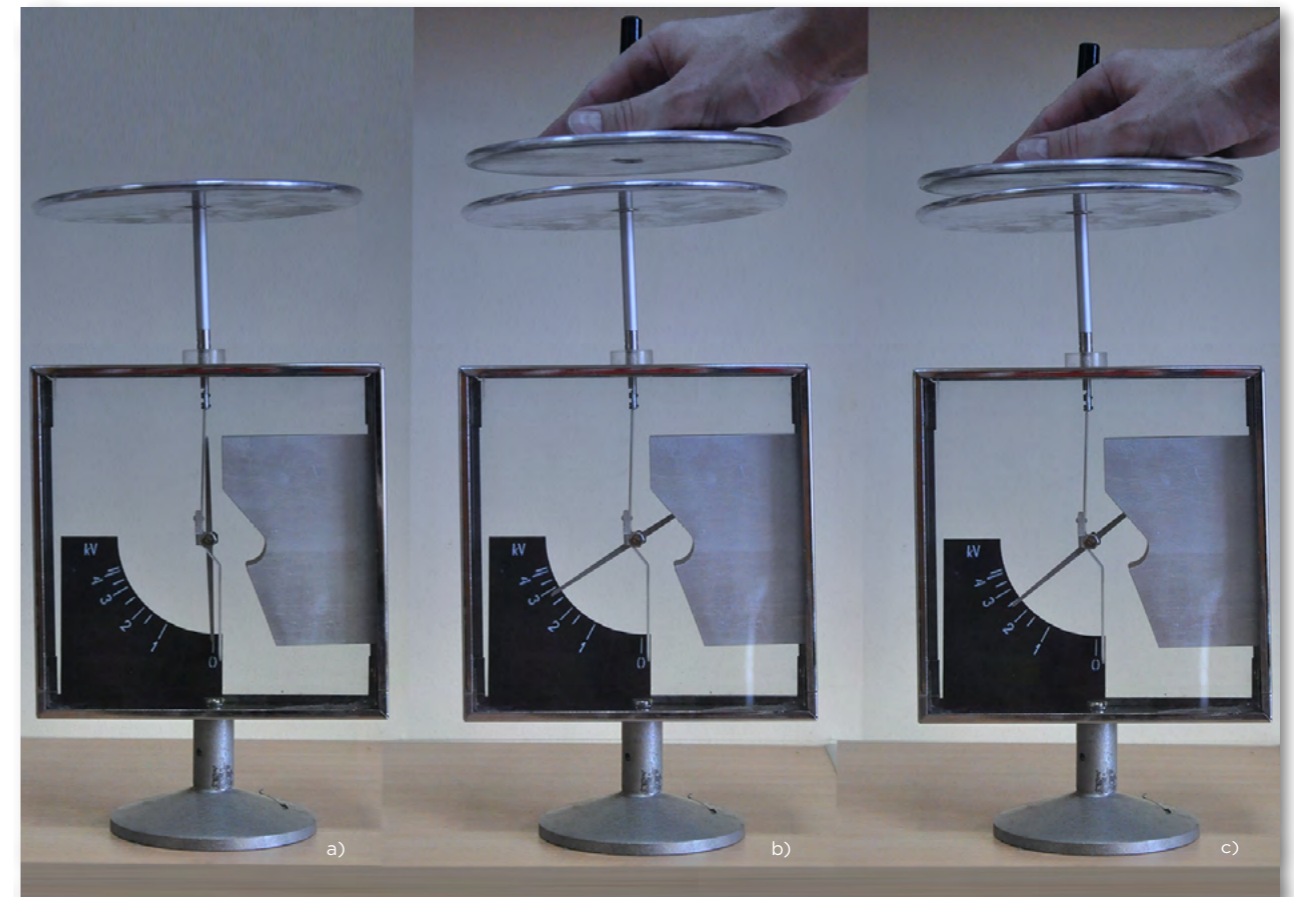
#### Wstęp

**Czy zastanawialiście się skąd bierze się energia wyzwana podczas świecenia lampy błyskowej. Odpowiedź „z baterii” jest prawdziwa, ale nie wyjaśnia w jaki sposób możliwe jest szybkie wyzwolenie energii pozwalające na intensywne, choć krótkie oświetlenie nawet dużych pomieszczeń.**

Omawiając pojęcie pojemności elektrycznej kuli zakładaliśmy, że kula jest jedynym obiektem gromadzącym ładunki, że pomiędzy kulą a nieskończonością nic nie ma. Teraz będziemy się zastanawiali nad tym, w jaki sposób na pojemność elektryczną przewodnika wpływa obecność innych przewodników. W warunkach szkolnych można przeprowadzić następujące doświadczenie.

#### Doświadczenie 1

Na pręciku elektroskopu mocujemy poziomo metalową płytkę (Rys. 9.19a). Elektryzujemy elektroskop ładunkiem ujemnym. Wskazówki elektroskopu wychyliły się (Rys. 9.19b). Do płytki zbliżamy uziemioną metalową płytkę. Zauważamy, że wychylenie wskazówek elektroskopu zmniejszyło się (Rys. 9.19c).



Rys. 9.19. Elektroskop z zamocowaną metalową płytką.

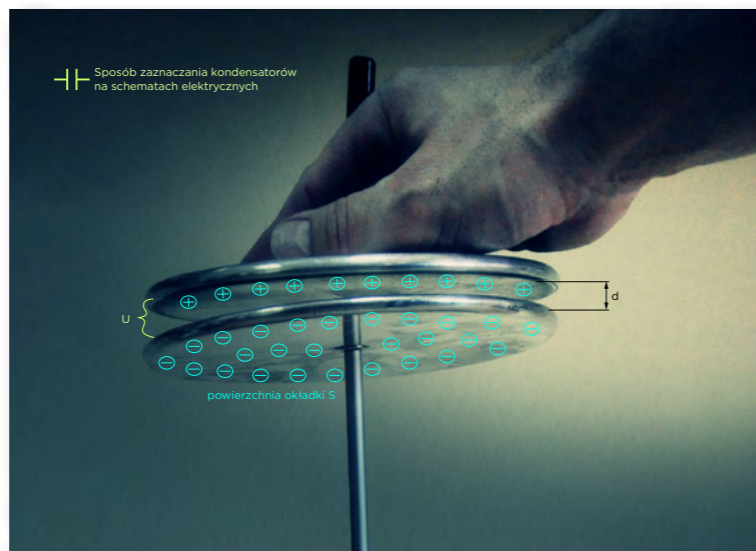
#### Wnioski z doświadczenia

Zauważmy, że ilość ładunków zgromadzonych na dolnej metalowej płytce oraz wskazówkach elektroskopu nie uległa zmianie. Zmieniło się wychylenie wskazówek. Wychylenie wskazówek jest proporcjonalnie do napięcia między obudową a wskazówkami. Zmniejszenie wychylenia wskazówek oznacza

więc zmniejszenie napięcia. Jeśli ładunek pozostał stały, to zwiększył się stosunek ładunku do napięcia, czyli zwiększyła się pojemność elektryczna, bo:

$$C = \frac{Q}{U} \text{ gdy } Q \leftrightarrow \text{ oraz } U \downarrow \text{ b } C \uparrow$$

Zmianę pojemności elektrycznej przyniosło zbliżenie drugiego przewodnika. Taki układ przewodników rozdzielony izolatorem, jaki mieliśmy w powyższym doświadczeniu nazywamy **kondensatorem**. Tworzące ten układ metalowe płytki nazywamy okładkami kondensatora. Tworzące nasz okład płytki były do siebie równoległe i odległe o odcinek o długości  $d$ . Taki kondensator nazywamy kondensatorem płaskim (Rys. 9.20.). Gdy kondensator zostanie naładowany, to na jego okładkach są zgromadzone ładunki przeciwnych znaków. Ale całkowity ładunek elektryczny takiego kondensatora jest równy zero. Kondensator elektryzuje się przez indukcję, więc ilość ładunków dodatnich na jednej z okładek jest równa ilości ładunków ujemnych na drugiej okładce. Mówiąc o ładunku kondensatora będziemy mieli na myśli wartość bezwzględną ładunku  $Q$  zgromadzonego na jednej z jego okładek. Zgromadzony na okładkach ładunek  $Q$  jest proporcjonalny do napięcia  $U$  między okładkami:



Rys. 9.20. Schemat budowy kondensatora płaskiego.

$$Q = C \cdot U$$

A współczynnikiem proporcjonalności między ładunkiem a napięciem jest pojemność kondensatora  $C$ . Im większa jest pojemność elektryczna kondensatora, tym więcej trzeba zgromadzić na jego okładkach ładunków, aby uzyskać dane napięcie. Ale liczbowa wartość pojemności elektrycznej zależy od budowy kondensatora, a nie od ilości zgromadzonego ładunku. Pojemność elektryczną kondensatora płaskiego można obliczyć ze wzoru:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

gdzie:  $S$  – pole powierzchni jednej z okładek,  
 $d$  – odległość między okładkami.

Gdy pomiędzy okładki kondensatora wprowadzimy inny izolator niż powietrze, to pojemność elektryczna takiego kondensatora wynosi:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{d}$$

gdzie:  $\epsilon_r$  – stała dielektryczna zależna od rodzaju materiału.

Stala dielektryczna jest wielkością fizyczną, która informuje ile razy wzrośnie pojemność elektryczna kondensatora płaskiego po wypełnieniu przestrzeni między jego okładkami dielektrykiem.

### Energia naładowanego kondensatora

Aby naładować kondensator należy sprawić, aby na jedną z okładek dopłynęła pewna ilość elektronów. Wówczas w wyniku elektryzowania przez indukcję z drugiej okładki odpłynie taka sama ilość elektronów. Aby wymusić przepływ elektronów kondensator podłączamy do baterii (Rys. 9.21.). Gdy zamkniemy obwód elektrony z baterii będą przepływać do okładki oznaczonej cyfrą 1. Jednocześnie

nie z okładki oznaczonej cyfrą 2 elektrony będą przepływać do dodatniego bieguna baterii. Zakładamy przy tym, że pomiędzy okładkami znajduje się izolator, który nie pozwala na przepływ ładunków poprzez przestrzeń między nimi. Proces ładowania będzie trwał tak długo, aż napięcie między kondensatora nie będzie równe wartości napięcia między biegunami źródła. Podczas procesu ładowania kondensatora między okładkami jego okładkami powstaje pole elektryczne. Im większy jest ładunek zgromadzony na okładkach, tym trudniej jest przemieszczać następne ładunki. Praca wykonana podczas ładowania kondensatora będzie równa zgromadzonej elektrycznej energii potencjalnej.

Energię potencjalną zgromadzoną w naładowanym kondensatorze można obliczyć korzystając z wyrażenia:

$$E_p = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$

gdzie:  $C$  – pojemność kondensatora,

$U$  – napięcie między okładkami naładowanego kondensatora.

Energię zgromadzoną w polu elektrycznym między okładkami kondensatora można podczas procesu rozładowania kondensatora. Kondensatorów używa się na przykład do zasilania lamp błyskowych w aparatach fotograficznych. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego układu elektronicznego na okładkach kondensatora lampy błyskowej można wytworzyć napięcie większe od napięcia panującego między biegunami baterii. Po naciśnięciu spustu lampy błyskowej zostaje ona podłączona do okładek kondensatora i może nastąpić bardzo szybkie wyzwolenie zgromadzonej na kondensatorze energii elektrycznej. Przeprowadźmy doświadczenie, w którym zbadamy jak zmienia się napięcie między okładkami kondensatora podczas rozładowania.

### Doświadczenie 2. Badanie rozładowania kondensatora

**Patrz: Doświadczenie 2.**

#### Wnioski z doświadczenia

Napięcie między okładkami kondensatora podczas rozładowania maleje zgodnie z funkcją eksponentialną. Oznacza to, że nie wszystkie urządzenia zasilane energią elektryczną mogą korzystać z energii zgromadzonej w polu elektrycznym kondensatora.

### Podsumowanie

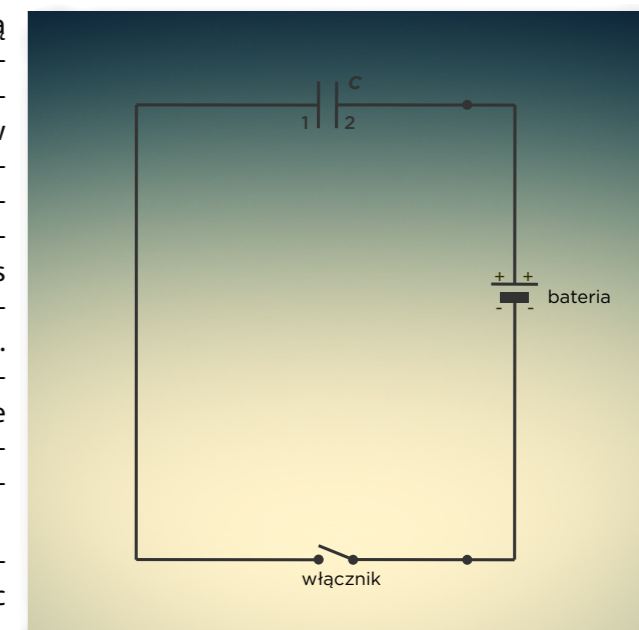
**Kondensator** jest to układ przewodników rozdzielony izolatorem. Tworzące ten układ metalowe płytki nazywamy okładkami kondensatora.

Pojemność elektryczną kondensatora płaskiego można obliczyć ze wzoru:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

Energię potencjalną zgromadzoną w naładowanym kondensatorze można obliczyć korzystając z wyrażenia:

$$E_p = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$



Rys. 9.21. Schemat obwodu do ładowania kondensatora.

*Człowiek - najlepsza inwestycja*



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego