

# Pole elektryczne

9/15

Andrzej Kapanowski  
*<https://ufkapano.github.io/>*

WFAIS, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

2021

# Elektromagnetyzm

- Oddziaływanie elektromagnetyczne jest jednym z czterech podstawowych oddziaływań w przyrodzie. Dominuje ono w wielu zjawiskach fizycznych, oraz w chemii i biologii.
- **Elektromagnetyzmem** nazywamy naukę o zjawiskach elektrycznych i magnetycznych. Do roku 1820 (odkrycie Oersteda) dziedziny elektryczności i magnetyzmu były rozwijane niezależnie. Podstawowymi równaniami elektromagnetyzmu są **równania Maxwella**.
- **Elektrostatyka** zajmuje się oddziaływaniami zachodzącymi za pośrednictwem pola elektrycznego, które jest wytwarzane przez ładunki niezmiennie w czasie i pozostające w spoczynku.

# Ładunek elektryczny

- Ładunek elektryczny jest właściwością cząstek elementarnych, z których składają się wszystkie ciała. Ładunek jest wielkością fizyczną, ale nie jest substancją. Ładunki zawsze związane są z ciałami fizycznymi.
- Istnieją dwa rodzaje ładunku: ładunek dodatni i ładunek ujemny (konwencja Benjamina Franklina). Ciała fizyczne zwykle są elektrycznie obojętne, czyli wypadkowy ładunek wynosi zero. Jeżeli ciało ma niezerowy ładunek wypadkowy to mówimy, że jest naładowane lub naelektryzowane.
- Ładunki elektryczne o takich samych znakach odpychają się, a ładunki elektryczne o przeciwnych znakach się przyciągają.

# Elektryzowanie ciał

**Elektryzowanie ciał** to proces przekazywania im ładunku elektrycznego (dodatniego lub ujemnego). Wyróżniamy trzy sposoby elektryzowania ciał:

- elektryzowanie przez pocieranie (tarcie),
- elektryzowanie przez dotyk,
- elektryzowanie przez indukcję elektrostatyczną.

# Skwantowanie ładunku

- Natura ładunku jest ziarnista, kwantowa. Każdy ładunek  $q$ , dodatni lub ujemny, można zapisać w postaci

$$q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1)$$

gdzie  $e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  to **ładunek elementarny**.

- Ze względów praktycznych (dokładność pomiarów) jednostką ładunku w układzie SI jest jeden **kulomb**,  $1\text{C} = 1\text{A} \cdot 1\text{s}$ .
- **Ładunek punktowy** jest to punkt geometryczny obdarzony różnym od zera ładunkiem elektrycznym. Jest to twór abstrakcyjny, wygodny model używany w fizyce.

# Zachowanie ładunku elektrycznego

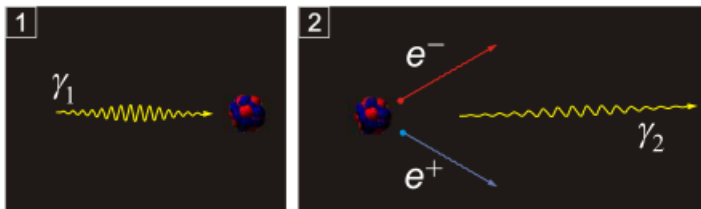
## Zasada zachowania ładunku elektrycznego

Sumaryczny ładunek układu odosobnionego jest wielkością stałą.

Jest to jedno z podstawowych praw przyrody, potwierdzonych doświadczalnie. Przykłady: anihilacja elektronu i pozytonu, kreacja pary elektronu i pozytonu.

Ładunki cząstek: elektron  $-e$ , proton  $+e$ , neutron  $0$ .

# Kreacja pary elektronu i pozytonu



Kreacja pary elektronu i pozytonu przez rzeczywisty foton w silnym polu elektrycznym jądra atomowego.

# Prawo Coulomba

## Prawo Coulomba (1785)

Jeżeli dwa ładunki punktowe  $q_1$  i  $q_2$  znajdują się w odległości  $r$  od siebie, to siła elektrostatyczna przyciągania lub odpychania między nimi ma wartość

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (2)$$

gdzie  $k$  jest stałą.

Ze względów historycznych i ze względu na prostszą postać pewnych równań stałą  $k$  zapisujemy jako

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}, \quad (3)$$

gdzie  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} C^2 / (N \cdot m^2)$  jest **przenikalnością elektryczną próżni**.



# Siły elektrostatyczne

- Warto zauważyć podobieństwo prawa Coulomba do wzoru Newtona na siłę grawitacyjną.
- Jeżeli oddziałujących ładunków jest więcej niż dwa, to siłę wypadkową działającą na dany ładunek znajdujemy korzystając z **zasady superpozycji**.
- Jednorodnie naładowana powłoka kulista przyciąga lub odpycha ładunek punktowy tak, jakby cały ładunek powłoki był skupiony w jej środku.
- Jeżeli ładunek punktowy znajduje się wewnątrz jednorodnie naładowanej powłoki kulistej, to wypadkowa siła elektrostatyczna działająca na ten ładunek jest równa zeru.

# Właściwości elektryczne materii

- Ze względu na właściwości elektryczne substancje dzielą się na przewodniki, półprzewodniki i izolatory (dielektryki).
- W **przewodnikach** (np. metalach) elektrony mogą poruszać się swobodnie.
- W **izolatorach** (np. szkło, plastik) nie ma ładunków, które mogą poruszać się swobodnie.
- **Półprzewodniki** (np. german, krzem) to materiały pośrednie pomiędzy przewodnikami i izolatorami. Mają ogromne zastosowanie w układach elektronicznych.
- **Nadprzewodniki** to materiały, które w niskich temperaturach wykazują brak oporu przy przepływie w nich ładunku elektrycznego.

# Pole elektryczne

- Podobnie jak w przypadku grawitacji, lepszy opis oddziaływania ładunków elektrycznych uzyskujemy korzystając z opisu polowego. Jest to jedyny poprawny opis w przypadku ładunków poruszających się.
- Pole elektryczne (elektrostatyczne) jest to przestrzeń, w której na ładunki elektryczne działają siły elektrostatyczne.
- Natężenie pola elektrycznego jest to wektor

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_0}, \quad (4)$$

gdzie  $\vec{F}_e$  to siła elektrostatyczna działająca na dodatni ładunek próbny umieszczony w przestrzeni.

# Pole elektryczne

- Jednostką natężenia pola elektrycznego w układzie SI jest niuton na kulomb,  $1N/C$ .
- Pole elektryczne istnieje niezależnie od ładunku próbnego  $q_0$ , który występuje w definicji. Zakładamy jedynie, że obecność ładunku próbnego nie wpływa na rozkład ładunku w przestrzeni i stąd nie zmienia się natężenie definiowanego pola elektrycznego.
- Pole elektryczne przedstawia się graficznie za pomocą **linii pola elektrycznego** lub **powierzchni ekwipotencjalnych**. Linie pola wychodzą od ładunku dodatniego (gdzie się zaczynają) i są skierowane ku ładunkowi ujemnemu (gdzie się kończą).

# Pole elektryczne ładunku punkowego

- Jeżeli pole elektryczne wytwarza ładunek punktowy  $q$ , to z prawa Coulomba siła działająca na dodatni ładunek próbny  $q_0$ , umieszczony w odległości  $r$  od  $q$ , wynosi

$$F_e = k \frac{qq_0}{r^2}, \quad (5)$$

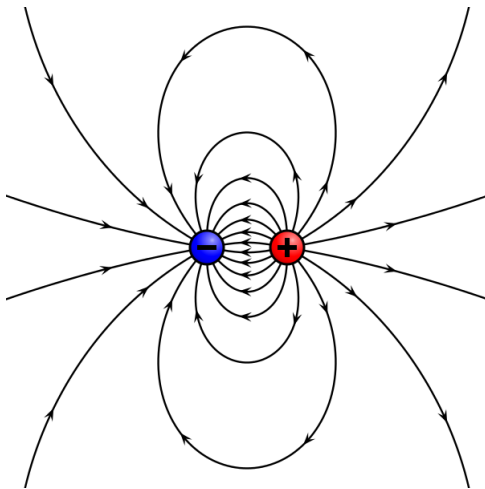
- Natężenie pola elektrycznego wynosi

$$E = \frac{F_e}{q_0} = k \frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (6)$$

- Jeżeli ładunek próbny  $q_0$  umieścimy w polu dwóch ładunków punktowych  $q_1$  i  $q_2$ , to wypadkowe natężenie pola elektrycznego obliczamy następująco

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \frac{\vec{F}_{01}}{q_0} + \frac{\vec{F}_{02}}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (7)$$

# Dipol elektryczny



# Pole elektryczne dipola elektrycznego

- **Dipolem elektrycznym** nazywamy układ dwóch ładunków punktowych  $+q$  i  $-q$ , umieszczonych w odległości  $d$  od siebie. **Oś dipola** nazywamy prostą przechodzącą przez oba ładunki.
- Natężenie pola elektrycznego na osi dipola (oś  $z$ )

$$E = E_{(+)} - E_{(-)} = \frac{kq}{(z - d/2)^2} - \frac{kq}{(z + d/2)^2}. \quad (8)$$

- W dużej odległości od dipola ( $d \ll z$ )

$$E = \frac{2kqd}{z^3} = \frac{2kp}{z^3}, \quad (9)$$

gdzie  $\vec{p} = q\vec{d}$  jest **momentem dipolowym elektrycznym** dipola. Wektory  $\vec{d}$  i  $\vec{p}$  są skierowane od ładunku ujemnego do dodatniego.

# Ładunek punktowy w polu elektrycznym

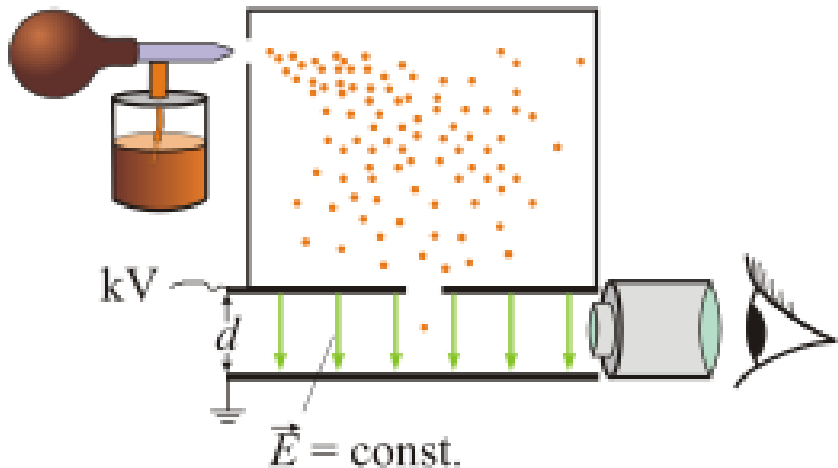
- Rozważmy ładunek punktowy  $q$  o masie  $m$  w jednorodnym polu elektrycznym **zewnętrznym**  $\vec{E}$  (pole to nie uwzględnia pola wytworzonego przez sam ładunek punktowy).
- Siła elektrostatyczna  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ .
- Z II zasady dynamiki Newtona  $\vec{F}_e = m\vec{a}$ .
- Otrzymujemy ruch ze stałym przyspieszeniem

$$\vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E}. \quad (10)$$

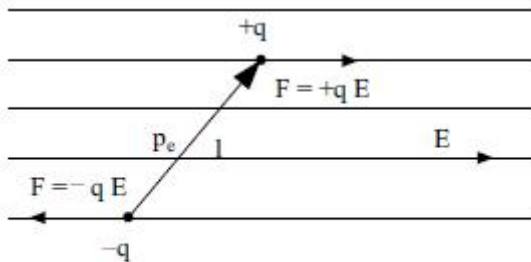
- Pomiar ładunku elementarnego przez R. A. Millikana (Nobel 1923).



# Doświadczenie Millikana



# Dipol w polu elektrycznym



Dipol w polu elektrycznym o natężeniu  $\vec{E}$

# Dipol w polu elektrycznym

- Rozważmy dipol elektryczny o momencie dipolowym  $p = qd$  w jednorodnym polu elektrycznym  $\vec{E}$ .
- Siła elektrostatyczna działająca na każdy z końców dipola wynosi  $F_e = qE$ . Wypadkowa siła równa się zeru, ale powstaje niezerowy moment siły  $M$  względem środka masy dipola

$$M = F_e x \sin \theta + F_e (d - x) \sin \theta = F_e d \sin \theta = pE \sin \theta, \quad (11)$$

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}. \quad (12)$$

- Energia potencjalna dipola względem położenia, w którym dipol jest prostopadły do pola  $\vec{E}$

$$E_p(\theta) = -\vec{p} \cdot \vec{E} = -pE \cos \theta. \quad (13)$$

# Dipol w polu elektrycznym

- Rozważmy dipol tworzony przez ładunki  $+e$  i  $-e$ , znajdujące się w odległości  $d = 0.1\text{nm} = 10^{-10}\text{m}$ .
- Moment dipolowy  $p = ed = 1.6 \cdot 10^{-29}\text{Cm}$ .
- Obliczamy pracę jaką trzeba wykonać, aby obrócić dipol o  $180^\circ$  w polu elektrycznym  $E = 1.5 \cdot 10^4\text{N/C}$

$$W = E_p(180^\circ) - E_p(0) = 2pE = 4.8 \cdot 10^{-25}\text{J}, \quad (14)$$

$$W = 3 \cdot 10^{-6}\text{eV}, \quad 1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{J}. \quad (15)$$

Energia termiczna dla  $T = 300\text{K}$  wynosi  $k_B T = 2.6 \cdot 10^{-2}\text{eV}$ .

- Obojętna cząsteczka wody ( $\text{H}_2\text{O}$ ) w stanie gazowym ma elektryczny moment dipolowy  $p = 6.2 \cdot 10^{-30}\text{Cm}$ .

# Strumień (natężenia) pola elektrycznego

- Rozważmy mały płaski element powierzchni  $\Delta S$  w polu elektrycznym  $\vec{E}$ . Elementowi powierzchni przyporządkowujemy wektor  $\Delta\vec{S}$  prostopadły do powierzchni, o wartości równej polu powierzchni elementu (rozdzielamy górną i dolną stronę elementu powierzchni).
- Strumień natężenia pola elektrycznego przenikającego przez element powierzchni  $\Delta\vec{S}$  określamy jako

$$\Delta\Phi_E = \vec{E} \cdot \Delta\vec{S}. \quad (16)$$

- Dla dużej powierzchni, strumień natężenia pola elektrycznego obliczamy jako całkę po elementach powierzchni

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{S}. \quad (17)$$

# Prawo Gaussa

## Prawo Gaussa

Strumień natężenia pola elektrycznego przez dowolną powierzchnię zamkniętą równy jest ładunkowi zawartemu wewnątrz tej powierzchni podzielonemu przez przenikalność elektryczną ośrodka otaczającego ładunki.

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (\text{dla ładunków w próżni}). \quad (18)$$

W praktyce korzystamy z prawa Gaussa, jeżeli potrafimy uwzględnić szczególną symetrię rozważanego zagadnienia.

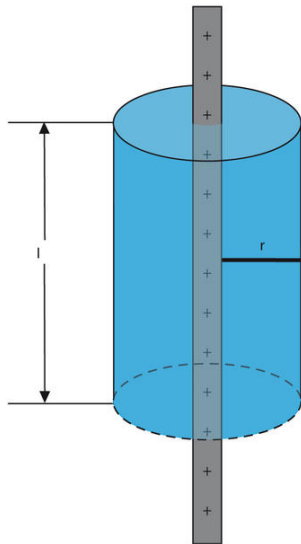
# Prawo Gaussa a prawo Coulomba

- Prawo Gaussa jest podstawowym prawem elektrostatyki. Prawo Coulomba jest jego szczególnym przypadkiem.
- Rozważmy ładunek punktowy w pustej przestrzeni. Jako powierzchnię Gaussa wybieramy sferę o promieniu  $r$ , w której środku znajduje się ładunek punktowy.
- Ze względu na symetrię problemu natężenie pola elektrycznego będzie w każdym punkcie sfery prostopadłe do niej i równe co do wartości.

$$\Phi_E = \int E dS = E \int dS = E 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}. \quad (19)$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (20)$$

# Pole elektryczne naładowanego pręta





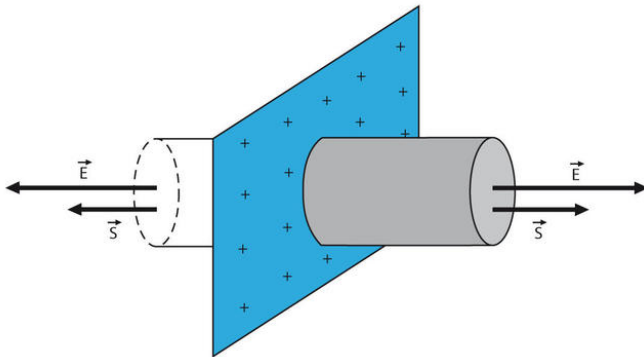
# Pole elektryczne naładowanego pręta

- Rozważmy nieskończenie długi walcowy pręt **nieprzewodzący**, naładowany jednorodnie dodatnio z gęstością liniową  $\lambda$ .
- Zagadnienie ma symetrię walcową, więc za powierzchnię Gaussa wybieramy powierzchnię walca o promieniu  $r$  i wysokości  $h$ . Walec jest współosiowy z prętem.
- Ze względu na symetrię problemu natężenie pola elektrycznego będzie miało kierunek radialny, będzie skierowane na zewnątrz i będzie równe co do wartości w punktach równo oddalonych od pręta. Strumień elektryczny przenikający przez denka jest równy zeru.

$$\Phi_E = \int E dS = E \int dS = E 2\pi r h = \frac{\lambda h}{\epsilon_0}. \quad (21)$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}. \quad (22)$$

# Pole elektryczne naładowanej płyty



# Pole elektryczne naładowanej płyty

- Rozważmy nieskończoną płaską i cienką **nieprzewodzącą** płytę, naładowaną jednorodnie dodatnio z gęstością powierzchniową  $\sigma$ .
- Zagadnienie ma symetrię płaszczyznową, więc za powierzchnię Gaussa wybieramy powierzchnię walca przecinającego płytę prostopadle.
- Z symetrii zagadnienia wynika, że natężenie pola elektrycznego będzie prostopadłe do płyty i skierowane od płyty na zewnątrz.

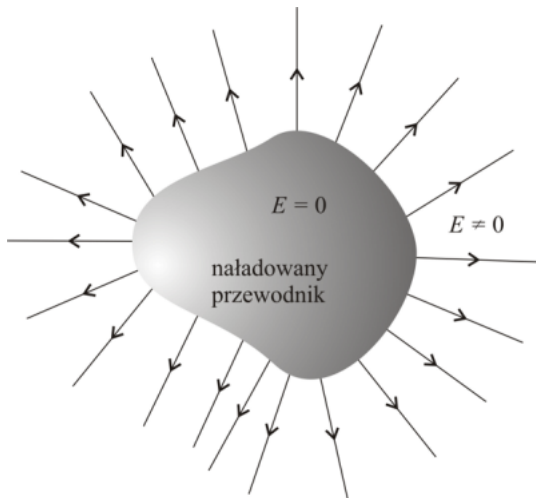
$$\Phi_E = \int E dS = 2ES = \frac{\sigma S}{\epsilon_0}. \quad (23)$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (24)$$

# Izolowany przewodnik naładowany

- Jeżeli nadmiarowy ładunek zostaje umieszczony na izolowanym przewodniku, to ten ładunek przesuwa się całkowicie **na powierzchnię przewodnika**. We wnętrzu przewodnika nie ma żadnego nadmiarowego ładunku.
- Natężenie pola elektrycznego wewnątrz przewodnika musi być równe zero. Jeżeli pojawi się niezerowe pole, to swobodne elektrony przewodnictwa zaczynają się poruszać w tym polu i rozmieszczają się w taki sposób, aby wypadkowe pole było równe zero [klatka Faradaya].
- Korzystając z prawa Gaussa można określić natężenie pola elektrycznego **tuż przy powierzchni przewodnika**. Jest ono prostopadłe do powierzchni przewodnika i ma wartość  $E = \sigma/\epsilon_0$ , gdzie  $\sigma$  jest lokalną gęstością powierzchniową ładunku na powierzchni przewodnika.

# Izolowany przewodnik naładowany



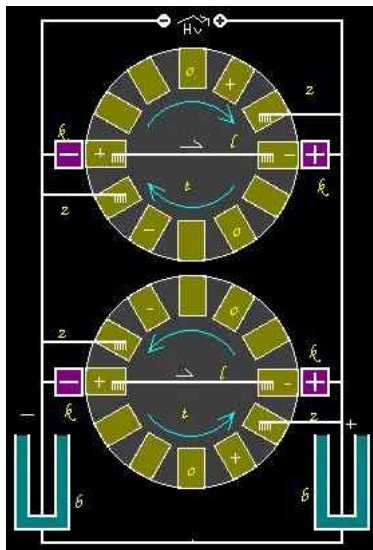
# Indukcja elektrostatyczna

- **Indukcją elektrostatyczną** nazywamy zjawisko fizyczne, polegające na elektryzowaniu ciała w wyniku zbliżenia do niego innego naelektryzowanego ciała.
- Zbliżenie ciała naelektryzowanego odpowiada wprowadzeniu ciała do pola elektrycznego.
- W przewodniku wprowadzonym do pola elektrycznego ładunki swobodne przesuwają się tak, by wewnątrz przewodnika nie było pola elektrycznego. W wyniku czego przewodnik pozostaje elektrycznie obojętny (tak jak przed zbliżeniem) jako całość, ale jego części uzyskują ładunek elektryczny zwany **ładunkiem indukowanym**.
- Jeżeli części przewodnika zostaną rozdzielone (rozłączone elektrycznie) na elementy o różnym stanie naelektryzowania, to powstaną ciała trwale naelektryzowane.

# Ciekawe przyrządy elektrostatyczne

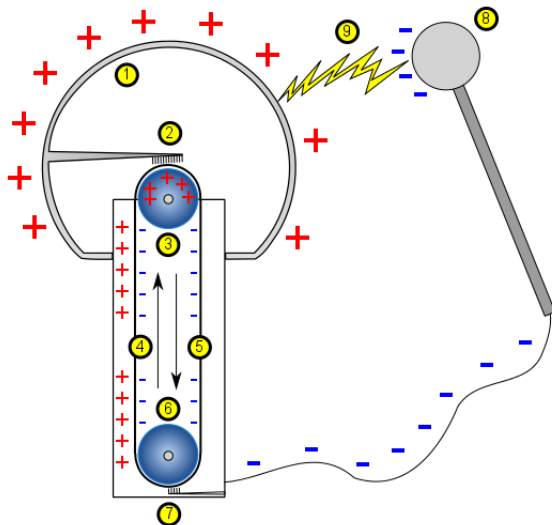
- Elektroskop (Gilbert, ok. 1600).
- Elektrofor (Wilcke, 1762).
- Butelka lejdejska (Musschenbroek, Kleist, 1746).
- Maszyna elektrostatyczna (Guericke, 1663).
- Generator Van de Graaffa (1929).
- Generator kropłowy Kelvina (1867).

# Maszyna elektrostatyczna





# Generator Van de Graaffa



# Elektryczna energia potencjalna

- Siła elektrostatyczna jest **siłą zachowawczą**.
- Przez analogię z polem grawitacyjnym możemy określić elektryczną energię potencjalną związaną z pracą wykonaną przeciwko siłom elektrostatycznym

$$W_{12} = E_{p2} - E_{p1}. \quad (25)$$

- Zwykle stosujemy konwencję, że elektryczna energia potencjalna wynosi zero tam, gdzie znikają siły elektrostatyczne.
- W polu ładunku punktowego  $E_p(r) = kqq_0/r$ .
- Zachodzi również  $F_e(r) = -\frac{dE_p(r)}{dr}$ .

# Potencjał pola elektrycznego

- Potencjał pola elektrycznego jest równy stosunkowi elektrycznej energii potencjalnej ładunku w polu elektrycznym do wartości tego ładunku.

$$V_e = \frac{E_p}{q_0}. \quad (26)$$

- W polu ładunku punktowego  $q$

$$V_e(r) = \frac{kq}{r}. \quad (27)$$

- Jednostką potencjału elektrycznego jest **wolt**,  $1V = 1J/C$ . Stąd  $[E] = N/C = (Nm)/(Cm) = V/m$ .
- Różnicę potencjałów między dwoma punktami nazywamy **napięciem elektrycznym**

$$U_{12} = V_{e2} - V_{e1} = \frac{E_{p2} - E_{p1}}{q_0} = \frac{W_{12}}{q_0}. \quad (28)$$

# Potencjał pola elektrycznego

- Jeżeli pole elektrostatyczne jest wytwarzane przez zbiór ładunków  $q_i$ , to potencjał elektryczny w punkcie  $\vec{r}$  wynosi

$$V_e(\vec{r}) = \sum_i \frac{kq_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}, \quad (29)$$

gdzie  $\vec{r}_i$  oznaczają położenia ładunków  $q_i$  względem początku układu współrzędnych.

- Potencjał pola dipola elektrycznego w dużej odległości  $\vec{r}$  od dipola wynosi

$$V_e(\vec{r}) = \frac{k\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3} = \frac{kp \cos \theta}{r^2}. \quad (30)$$

# Pojemność elektryczna

- Energię możemy magazynować w postaci energii potencjalnej w polu siły sprężystej, w polu grawitacyjnym, a także w polu elektrycznym za pomocą kondensatora.
- **Kondensator** to układ na ogół dwóch przewodników (okładek) odizolowanych od siebie próżnią lub izolatorem, posiadający własność gromadzenia ładunków elektrycznych pod wpływem przyłożonego doń napięcia elektrycznego. Na jednej okładce gromadzi się ładunek  $+q$ , a na drugiej  $-q$ .
- **Pojemnością elektryczną**  $C$  kondensatora nazywamy iloraz

$$C = \frac{q}{U}. \quad (31)$$

- Jednostką pojemności w układzie SI jest **farad**,  $1F = 1C/V$ .

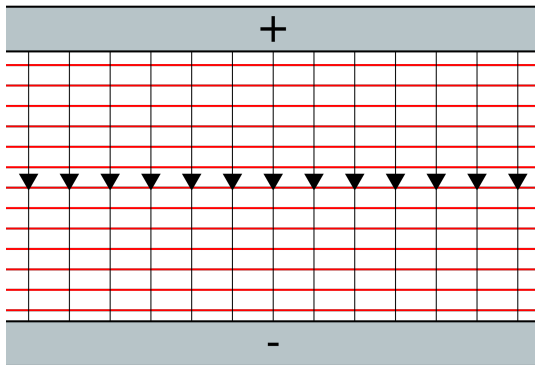
# Obliczanie pojemność kondensatora

- Rozważmy kondensator płaski zbudowany z dwóch okładek o powierzchni  $S$  każda, oddalonych od siebie o  $d$ .
- Z prawa Gaussa  $E = q/(\epsilon_0 S)$ .
- Zachodzi związek  $U = Ed$ .
- Obliczamy pojemność kondensatora płaskiego

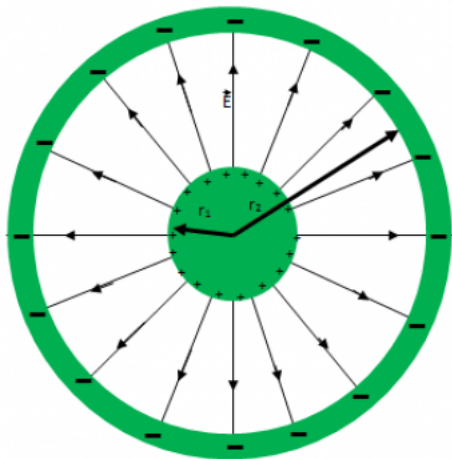
$$C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 SE}{Ed} = \frac{\epsilon_0 S}{d}. \quad (32)$$

- Pojemność kondensatora walcowego  $C = 2\pi\epsilon_0 L / \ln(b/a)$ .
- Pojemność kondensatora kulistego  $C = 4\pi\epsilon_0 ab / (b - a)$ .

# Kondensator płaski

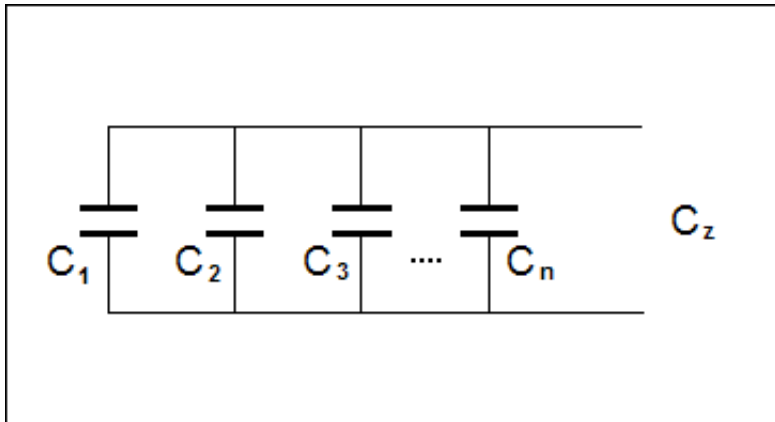


# Kondensator walcowy





# Kondensatory połączone równolegle



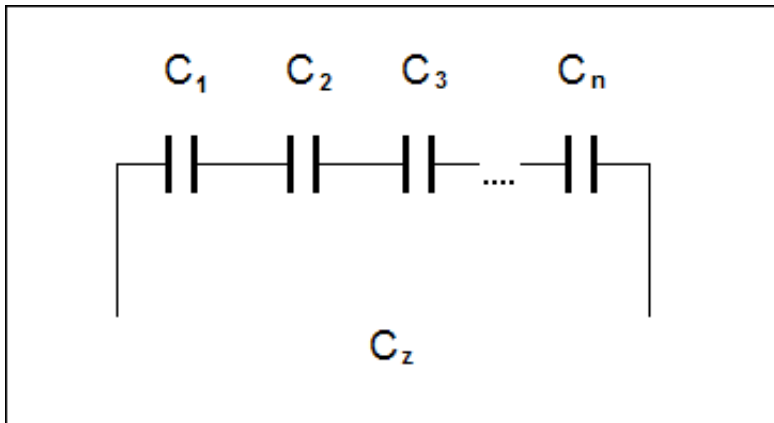
# Kondensatory połączone równolegle

- Jeżeli w obwodzie elektrycznym występuje układ kondensatorów, to nieraz możemy zastąpić ten układ **kondensatorem równoważnym**, czyli pojedynczym kondensatorem o takiej samej pojemności, jak cały układ.
- Rozważmy dwa kondensatory o pojemnościach  $C_1$  i  $C_2$  **połączone równolegle**. Napięcie  $U$  przyłożone do obu kondensatorów jest takie samo,  $q_1 = C_1 U$ ,  $q_2 = C_2 U$ ,
- Całkowity ładunek w układzie wynosi  $q = q_1 + q_2 = (C_1 + C_2)U = C_r U$ .
- Pojemność równoważna wynosi

$$C_r = C_1 + C_2. \quad (33)$$

Wzór można łatwo rozszerzyć na dowolną liczbę kondensatorów połączonych równolegle.

# Kondensatory połączone szeregowo



# Kondensatory połączone szeregowo

- Rozważmy dwa kondensatory o pojemnościach  $C_1$  i  $C_2$  połączone szeregowo.
- Kondensatory mają identyczne ładunki  $q$  na okładkach,  
 $U_1 = q/C_1$ ,  $U_2 = q/C_2$ .
- Suma różnic potencjałów na wszystkich kondensatorach wynosi  
 $U = U_1 + U_2 = q/C_1 + q/C_2 = q/C_s$ .
- Pojemność równoważna wynosi

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \quad (34)$$

Wzór można łatwo rozszerzyć na dowolną liczbę kondensatorów połączonych szeregowo.

# Energia zmagazynowana w polu kondensatora

- Rozważmy kondensator o pojemności  $C$  naładowany ładunkiem  $q'$ . Różnica potencjałów między okładkami wynosi  $U' = q'/C$ .
- Szukamy pracy potrzebnej na przeniesienie dodatkowego ładunku  $\Delta q'$  pomiędzy okładkami

$$\Delta W = U' \Delta q' = \frac{q'}{C} \Delta q'. \quad (35)$$

- Praca potrzebna do przeniesienia całkowitego ładunku  $q$

$$W = \int_0^q \frac{q'}{C} dq' = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \quad (36)$$

# Energia zmagazynowana w polu kondensatora

- Skorzystamy ze związków dla kondensatora płaskiego

$$W = \frac{\epsilon_0 S}{d} \frac{(Ed)^2}{2} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} Sd. \quad (37)$$

- Wyrażenie  $Sd$  jest objętością przestrzeni w kondensatorze płaskim, w której panuje jednorodne pole elektryczne  $E$ . Wyrażenie  $\epsilon_0 E^2/2$  jest **gęstością energii elektrycznej**.
- Energia potencjalna naładowanego kondensatora jest zmagazynowana w polu elektrycznym między okładkami kondensatora.
- Zastosowania: defibrylator, lampa błyskowa.

# Energia potencjalna układu ładunków

- Energia potencjalna układu ładunków punktowych

$$E_e = \sum_{i < j} \frac{kq_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{kq_i q_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}, \quad (38)$$

$$E_e = \frac{1}{2} \sum_i q_i \sum_{j \neq i} \frac{kq_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} = \frac{1}{2} \sum_i q_i V_e(\vec{r}_i). \quad (39)$$

- Gęstość energii pola elektrycznego

$$\rho_e(\vec{r}) = \frac{\epsilon_0 E^2(\vec{r})}{2}. \quad (40)$$

# Dielektryki

- W dielektrykach ładunki nie mają możliwości swobodnego poruszania się, ale są możliwe ograniczone przesunięcia ładunków w skali mikroskopowej. Zjawisko to nazywa się **polaryzacją dielektryka**.
- W **dielektrykach polarnych** cząsteczki mają trwały moment dipolowy. Bez pola elektrycznego dipole są ułożone chaotycznie na skutek ruchów termicznych. Pod wpływem pola elektrycznego dipole częściowo porządkują się, a pole elektryczne wypadkowe zmniejsza się.
- W **dielektrykach niepolarnych** (jak i polarnych) cząsteczki umieszczone w polu elektrycznym zewnętrznym zyskują indukowane momenty dipolowe. Dzieje się tak, ponieważ w polu przesuwiają się środki ładunku dodatniego i ujemnego.



# Kondensator z dielektrykiem

- Jeżeli przestrzeń między okładkami kondensatora wypełnimy dielektrykiem, to pojemność kondensatora **wzrośnie** o czynnik liczbowy  $\epsilon_r$ , który nazywamy **przenikalnością elektryczną względną**.
- Dielektryk między okładkami zwiększa też **wytrzymałość na przebicie**, czyli na powstanie ścieżki przewodzącej pod wpływem przyłożonego napięcia.
- Generalnie dla ustalonego układu ładunków wpływ dielektryka polega na osłabieniu natężenia pola elektrycznego w stosunku do sytuacji bez dielektryka.