Elektromagnetyzm

Elektrostatyka **Elektrodynamika**

Elektrostatyka – nauka o oddziaływaniach ładunków w spoczynku

- **starożytność: Tales z Miletu, własności bursztynu** $(\eta\lambda\varepsilon\kappa\tau\rho o\nu)$
- **czasy nowożytne (XVIII wiek): rozwój badań eksperymentalnych**
- **Charles du Fay - stwierdzenie 2 rodzajów elektryczności**
- **Beniamin Franklin - nazewnictwo: szkło (+), bursztyn (-)**
- **Jean Desaguliers - podział substancji: przewodniki i izolatory**
- **Charles Coulomb - ujęcie ilościowe: „siła odpychania dwóch małych kulek naelektryzowanych jednakowo zależy od odwrotności kwadratu odległości między środkami kulek”.**

  Postać współczesna: dwa ładunki punktowe jednoimienne odpychają się, a różnoimienne przyciągają się, siłą wprost proporcjonalną do ich wielkości, a odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi.

$$\boxed{F = k\frac{q_1\, q_2}{r^2}}$$

kiedyś: $k = 1 \quad \Rightarrow$ **jednostka ładunku;**

obecnie: jednostka ładunku 1 kulomb, (symbol: 1 C) $\Rightarrow\ k = 9 \cdot 10^9 \ \mathrm{N\ m^2\ C^{-2}}$**.**

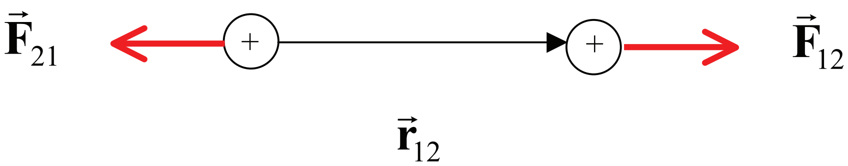
Postać w układzie SI:

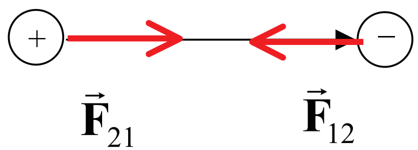
$$\boxed{F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1\, q_2}{r^2}}$$

gdzie $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot 10^{-12}\ \dfrac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N\ m}^2}$ **nazywamy przenikalnością elektryczną próżni albo stałą dielektryczną próżni.**

Postać wektorowa:

$$\boxed{\vec{\mathbf{F}}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1\, q_2}{r_{12}^{\ 2}}\frac{\vec{\mathbf{r}}_{12}}{r_{12}}}$$





Zasada superpozycji:

siła działająca na ładunek jest sumą wektorową wszystkich sił pochodzących od innych ładunków.

Ładunek elektryczny

do końca XIX wieku – substancja ciągła, „fluid elektryczny”

J. J. Thomson 1896, promienie katodowe = strumień cząstek naładowanych o jednakowym ładunku;
Thomson zaproponował nazwę dla tej cząstki: „elektron”;
nagroda Nobla 1906.

R. Millikan 1910, doświadczalne określenie wartości ładunku elementarnego

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

nagroda Nobla 1923.

Prawo zachowania ładunku:

W układzie izolowanym suma algebraiczna ładunków jest stała.

Inaczej: ładunki elementarne mogą pojawiać się i znikać tylko parami (+ -).

Przykłady:

- **kreacja pary elektron-pozyton z kwantu promieniowania elektromagnetycznego**

$$\gamma \rightarrow e^{+} + e^{-}$$

- **anihilacja pary elektron-pozyton**

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow 2\gamma$$

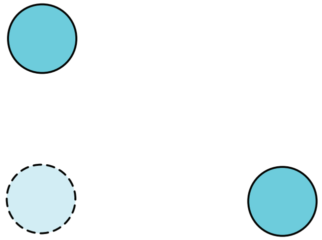
- **reakcje jądrowe**

$$\mathrm{U}_{92}^{238} \rightarrow \mathrm{Th}_{90}^{234} + \alpha_{2}^{4}$$

Pole elektryczne

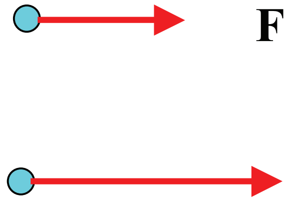
Potrzeba jego wprowadzenia wynikła z konieczności wyjścia poza elektrostatykę

q



$\vec{\mathbf{F}}$

q_0



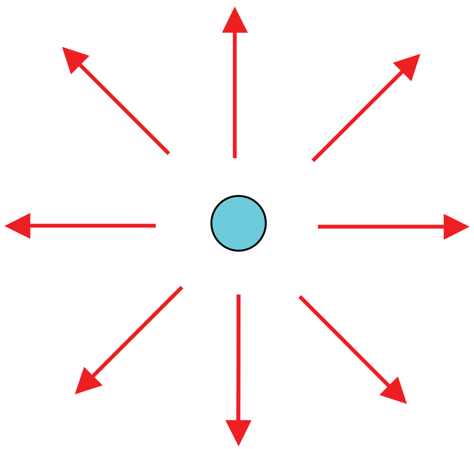
$\vec{\mathbf{F}}'$

natychmiast?

Coś pośredniczy w oddziaływaniu.
Definiujemy wektor natężenia pola elektrycznego:

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

$$\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{E}}\left(\vec{\mathbf{r}}, t\right)$$



$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}\frac{\vec{\mathbf{r}}}{r}$$

Dla wektora natężenia również obowiązuje zasada superpozycji.

Ładunek w polu $\vec{\mathbf{E}}$ (dynamika)

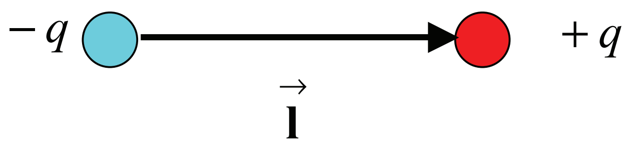
Newton:

$$\vec{\mathbf{a}} = \frac{q_0 \vec{\mathbf{E}}}{m}$$

Einstein:

$$\frac{d\vec{\mathbf{P}}}{dt} = q_0 \vec{\mathbf{E}}$$

Dipol elektryczny

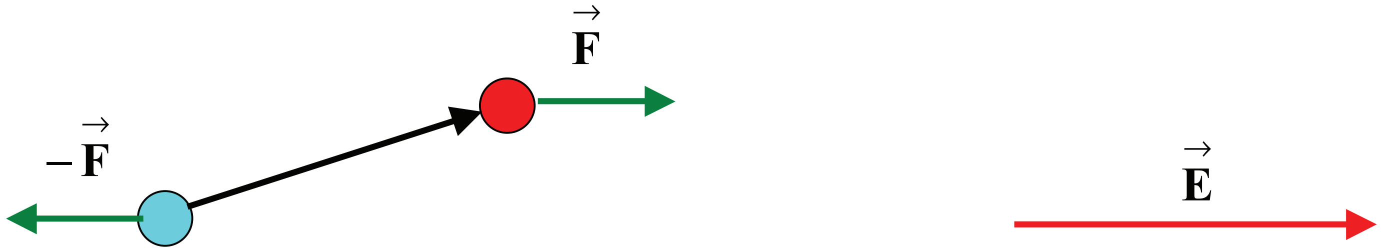


$q > 0$

moment dipolowy

$$\vec{\mathbf{p}} = q\,\vec{\mathbf{l}}$$

dipol w polu $\vec{\mathbf{E}}$:



moment siły $\vec{\mathbf{M}} = \vec{\mathbf{p}} \times \vec{\mathbf{E}}$

energia $U = -\vec{\mathbf{p}} \cdot \vec{\mathbf{E}}$

Potencjał elektryczny

Pole elektryczne jest zachowawcze – można zdefiniować potencjał.

różnica potencjałów:

$$V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q_0}, \qquad q_0 > 0$$

umowa: $V(\infty) = 0$

potencjał w danym punkcie pola:

$$\boxed{V_B = \frac{W_{\infty \to B}}{q_0}}$$

$$V_B \equiv V(\vec{\mathbf{r}}) \equiv V(x, y, z)$$

Definicja: powierzchnia ekwipotencjalna – powierzchnia w przestrzeni x, y, z**, dla której** $V = const$**.**

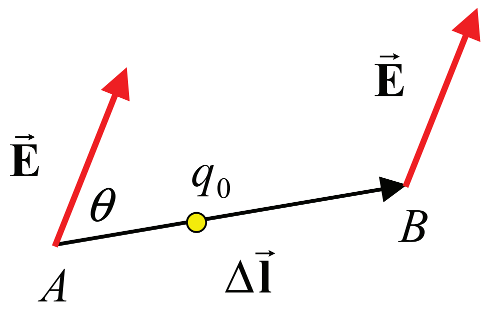
Związek między natężeniem a potencjałem

a) **obliczenie potencjału, jeśli znamy natężenia:**

$$W_{\infty \to B} = \int_{\infty}^{B} \vec{\mathbf{F}}_{\mathbf{zewn}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \int_{\infty}^{B} \left(-q_0 \vec{\mathbf{E}}\right) \cdot d\vec{\mathbf{l}} = -q_0 \int_{\infty}^{B} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}}$$

$$V_B = -\int_{\infty}^{B} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}}$$

b) **obliczenie natężenia, jeśli znamy potencjał:**



$$\Delta W_{AB} = \vec{\mathbf{F}}_{\mathbf{zewn}} \cdot \Delta\vec{\mathbf{l}} = -q_0 \vec{\mathbf{E}} \cdot \Delta\vec{\mathbf{l}} = -q_0 E \, \Delta l \cos\theta$$

$$\Delta W_{AB} = q_0 \left(V_B - V_A\right) = q_0 \, \Delta V$$

$$q_0 \, \Delta V = -q_0 E \, \Delta l \cos\theta$$

$$\Delta V = -E \cos\theta \, \Delta l$$

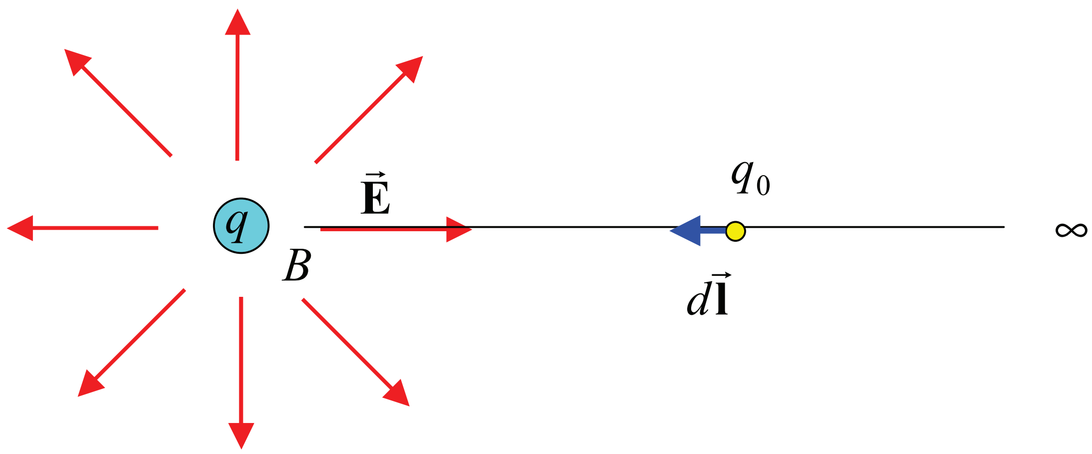
$$E \cos\theta = \vec{\mathbf{E}}_{\Delta\vec{\mathbf{l}}} \equiv E_l$$ **rzut $\vec{\mathbf{E}}$ na kierunek $\Delta\vec{\mathbf{l}}$**

$$E_l = -\frac{\Delta V}{\Delta l} \to -\frac{dV}{dl}$$ **pochodna kierunkowa**

Obliczając rzuty $\vec{\mathbf{E}}$ na poszczególne osie mamy: $\left(E_x, E_y, E_z\right) = \left(-\frac{\partial V}{\partial x}, -\frac{\partial V}{\partial y}, -\frac{\partial V}{\partial z}\right)$

$$\boxed{\vec{\mathbf{E}} = -\,\mathrm{grad}\, V}$$

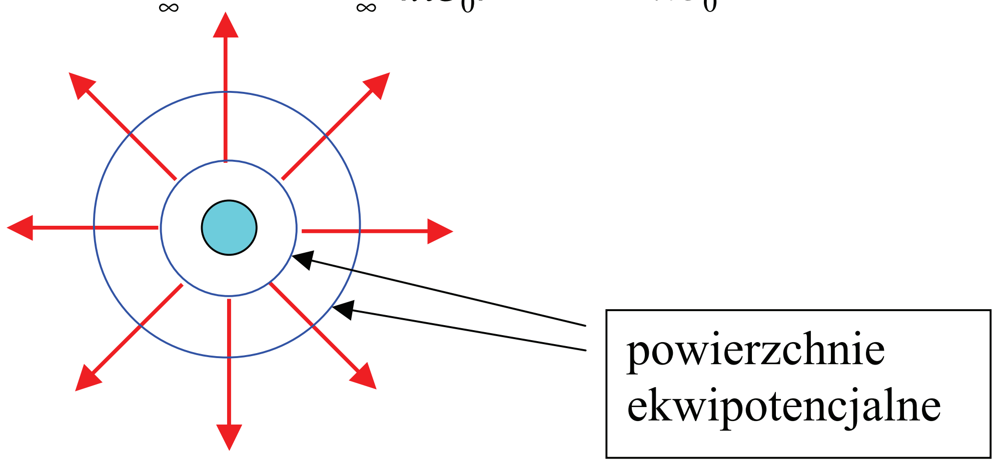
Przykład: potencjał ładunku punktowego:



$$V_B = -\int_{\infty}^{B} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}}$$

$$\vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = E\,dl\cos\pi = -E\,dl = E\,dr$$

$$V_B = -\int_{\infty}^{B} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = -\int_{\infty}^{B} E\,dr = -\int_{\infty}^{B} \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\,dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

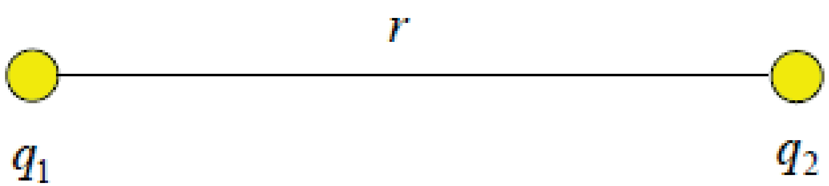


Zasada superpozycji dla potencjału

Potencjał w danym punkcie pola jest sumą algebraiczną potencjałów od wszystkich ładunków:

$V = \sum_n V_n$ **lub** $V = \iiint_\Omega dV$ **gdzie Ω - obszar przestrzeni zawierający ładunki.**

Energia potencjalna układu ładunków



Potencjał wytworzony przez ładunek q_1 w miejscu gdzie jest ładunek q_2:

$$V = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

Praca potrzebna na przesunięcie ładunku q_2 z ∞ do tego miejsca

$$W = Vq_2$$

$$U = W$$

$$\boxed{U = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}}$$