
Elektrostatyka.
Pola elektryczne i elektrostatyczne

Elektrostatyka.
Pola elektryczne i elektrostatyczne

E l e k t r o s t a t y k a jest nauką o ładunkach elektrycznych w spoczynku, ich polach elektrycznych oraz potencjałach.

Według *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*, McGraw-Hill Company, New York – St. Louis – San Francisco 1984.

E l e k t r o s t a t y k a jest nauką o zjawiskach elektrycznych związanych z ładunkami elektrycznymi niezmiennymi w czasie i nieruchomymi w danym układzie inercyjnym zarówno względem siebie, jak i względem obserwatora.

Według *Elektryczność i magnetyzm*, A. Bajorski, S. Dołżycki, R. Kurdziel, A. Skopec, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.

$$q_{\mathrm{v}} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V}$$

$$q_{\mathrm{v}} = \lim_{\substack{h \to 0 \\ \Delta S \to 0}} \frac{\Delta Q}{h \Delta S} \to \infty$$

$$q_{\mathrm{s}} = \lim_{h \to 0} h q_{\mathrm{v}} = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta S} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}S}$$

$$q_{\mathrm{l}} = \lim_{\Delta l \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta l} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}l}$$

$$Q = \int_V q_{\mathrm{v}} \mathrm{d}V$$

$$Q = \int_S q_{\mathrm{s}} \mathrm{d}S$$

$$Q = \int_l q_{\mathrm{l}} \mathrm{d}l$$

P o l e e l e k t r y c z n e jest to przestrzeń, w której znajdują się i oddziałują ze sobą ładunki elektryczne dodatnie i ujemne.

P o l e e l e k t r o s t a t y c z n e jest to takie pole elektryczne, które jest czasowo niezależne i w którym znajdują się i oddziałują ze sobą stacjonarne, czyli niezmienne w czasie i nieruchome względem ziemi, ładunki elektryczne dodatnie i ujemne.

Pola elektryczne i elektrostatyczne należą do **pól wektorowych**.

Prawo (siła) *Coulomba*

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}\frac{\mathbf{r}}{r}$$

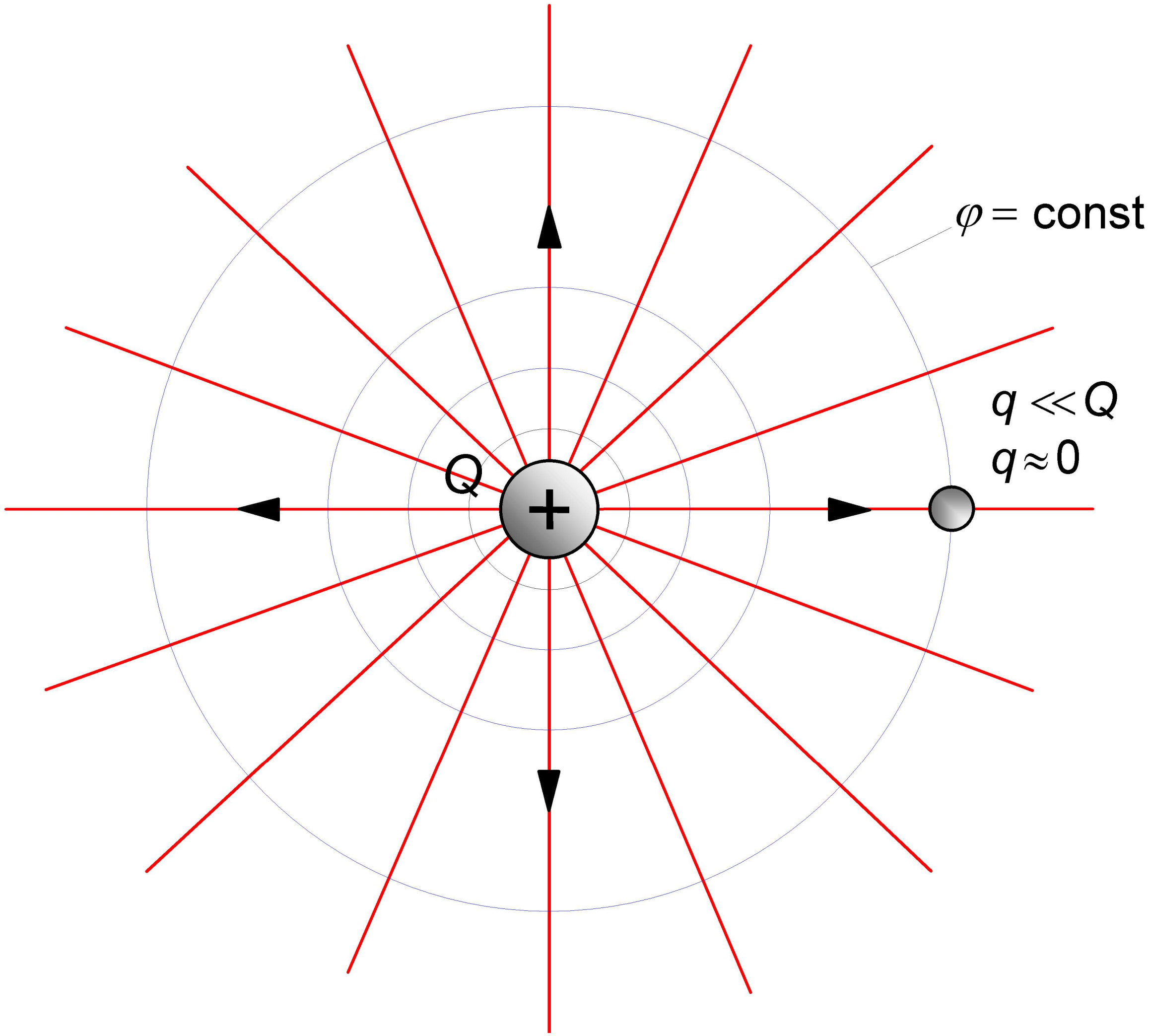
$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$$

ε_0 — przenikalność elektryczna próżni (= 8.854×10^{-12} F/m)

ε — przenikalność elektryczna względna
stała dielektryczna [–]

$\varepsilon\varepsilon_0$ — przenikalność bezwzględna [Fm^{-1}]

Natężenie pola elektrycznego

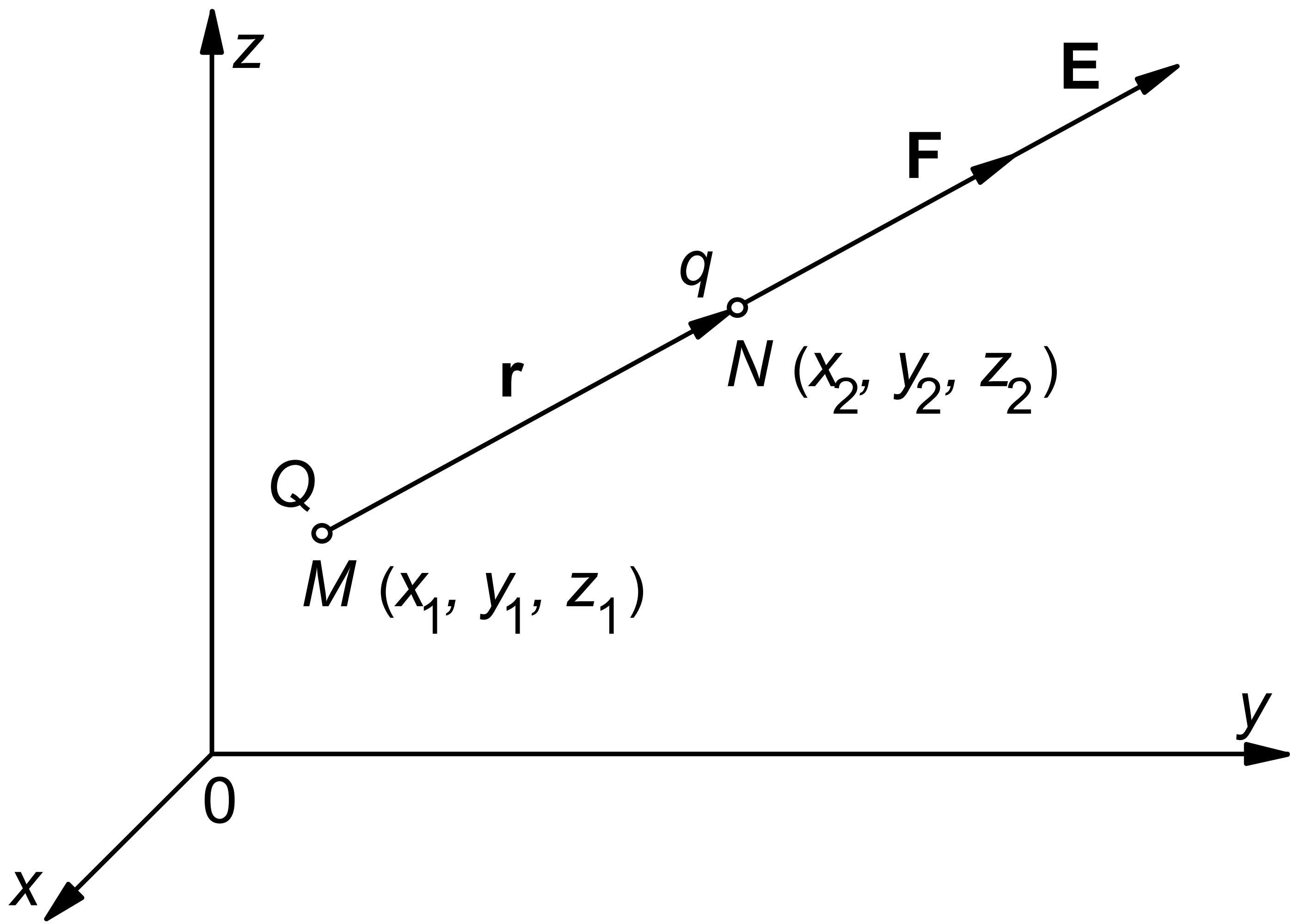


Natężenie pola elektrycznego

$$\mathbf{F} = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\mathbf{r}}{r^3}$$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\mathbf{r}}{r^3}$$

Natężenie pola elektrycznego

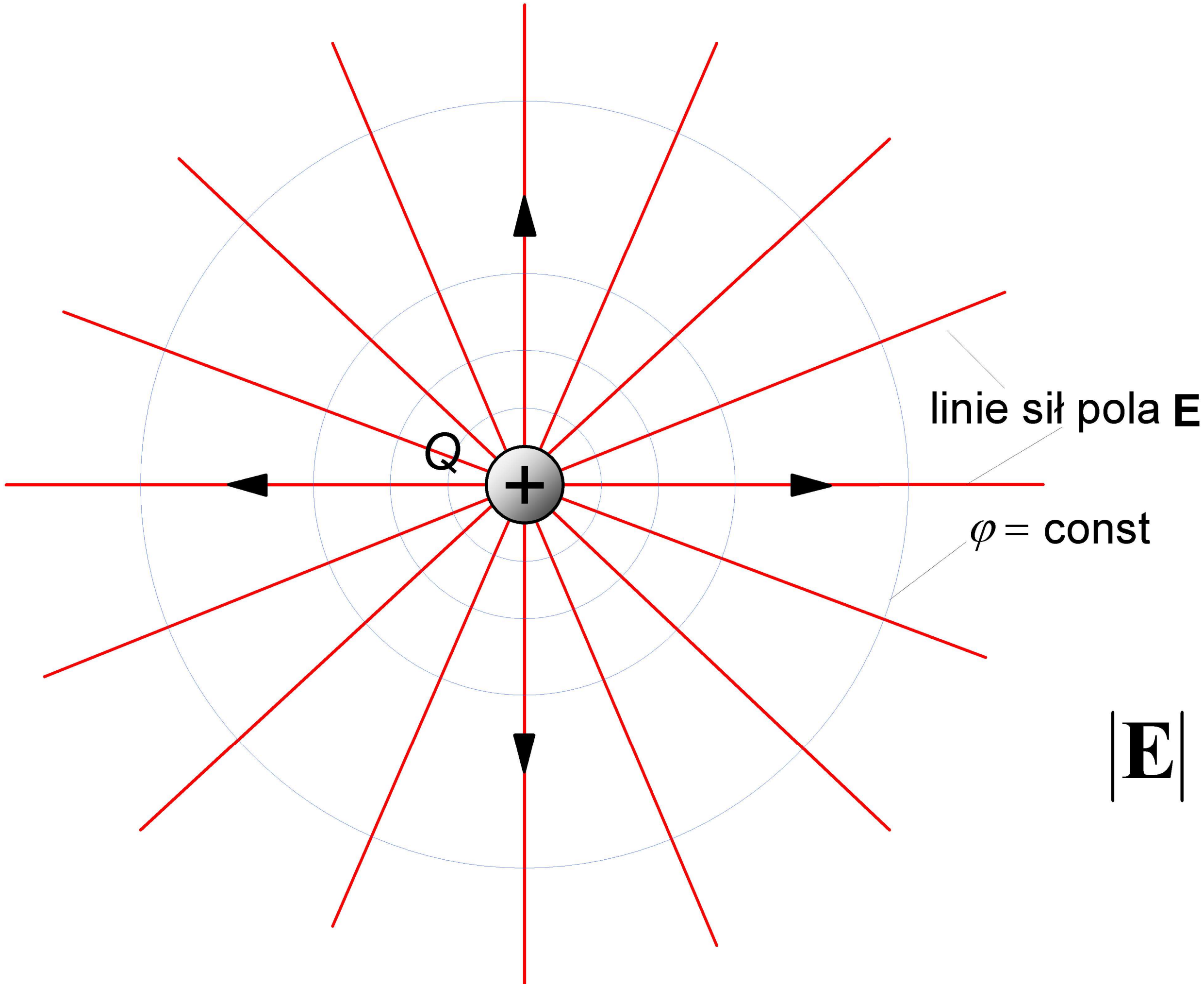


Natężenie pola elektrycznego

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^3}\left[\mathbf{i}\left(x_2 - x_1\right) + \mathbf{j}\left(y_2 - y_1\right) + \mathbf{k}\left(z_2 - z_1\right)\right]$$

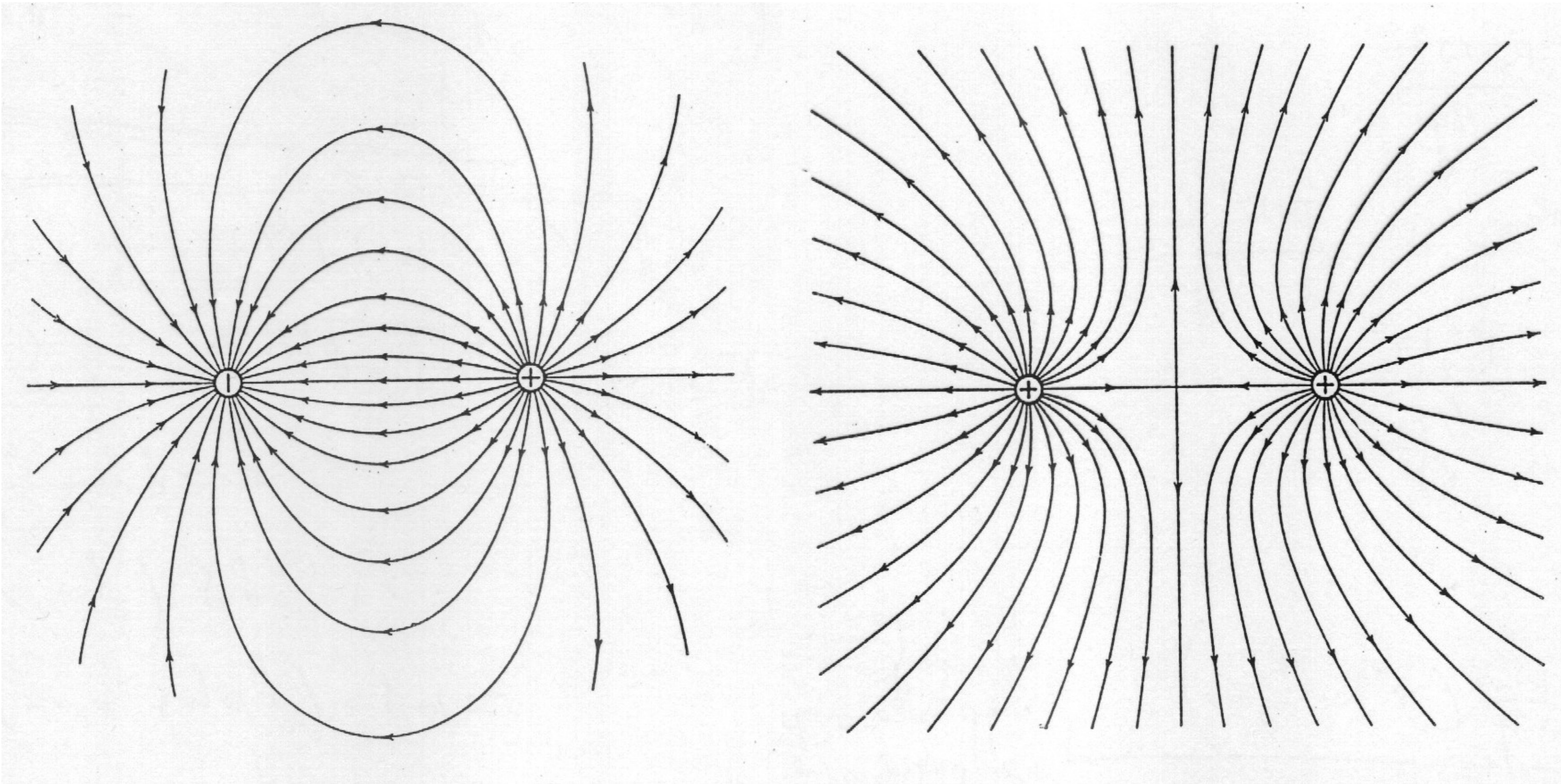
$$\left|\mathbf{r}\right| = r = \sqrt{\left(x_2 - x_1\right)^2 + \left(y_2 - y_1\right)^2 + \left(z_2 - z_1\right)^2}$$

Natężenie pola elektrycznego

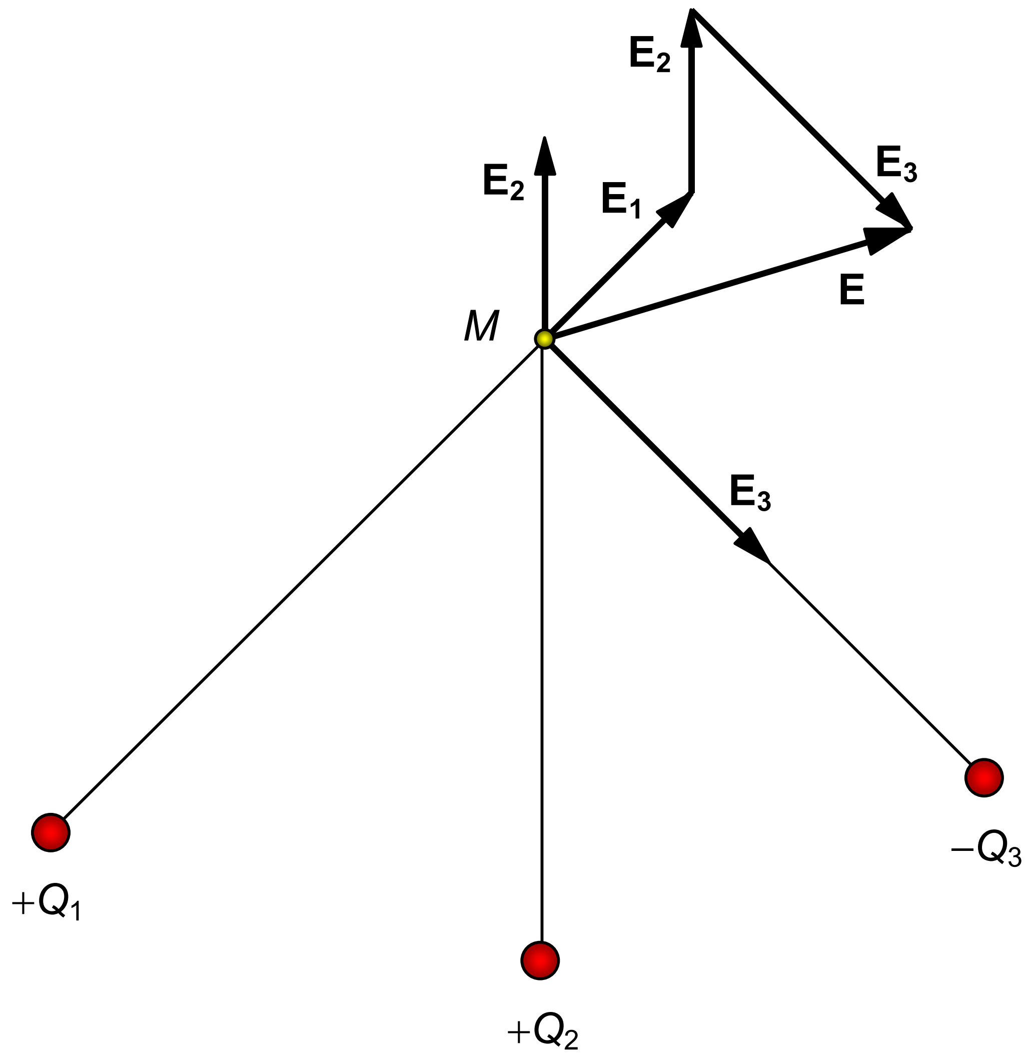


$$\left|\mathbf{E}\right| = E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$$

Natężenie pola elektrycznego



Superpozycja pól elektrycznych

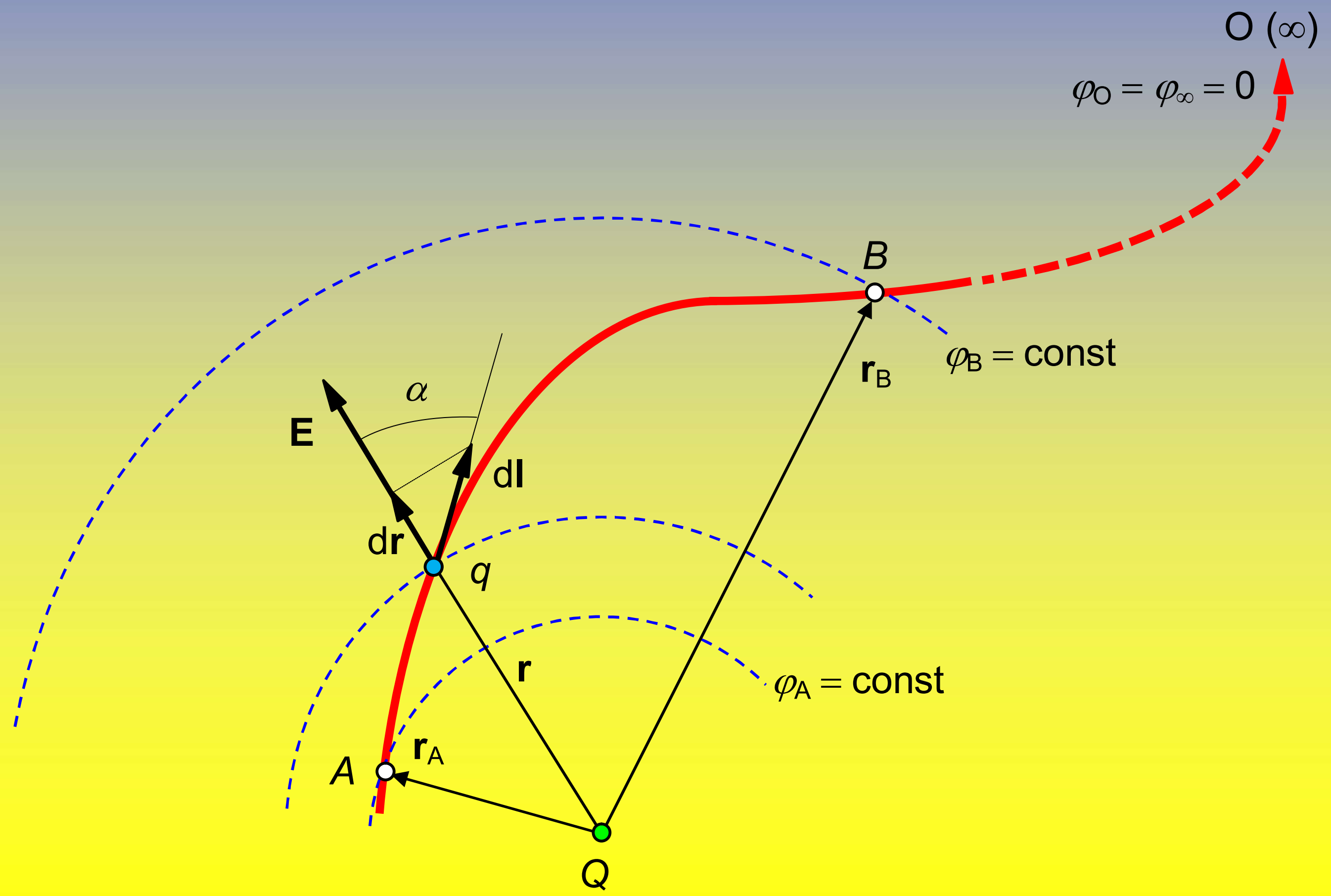


Superpozycja pól elektrycznych

Wniosek: Oddziaływania elektrostatyczne są a d d y t y w n e, co oznacza, że w środowisku liniowym ($\varepsilon\varepsilon_0$ = const) obowiązuje z a s a d a s u p e r p o z y c j i.

Elektrostatyka.
Pola elektryczne i elektrostatyczne

Praca w polu elektrycznym.
Potencjalność pola elektrostatycznego



Praca w polu elektrycznym.
Potencjalność pola elektrostatycznego

$$\mathrm{d}W = \mathbf{F}\cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = q\mathbf{E}\cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = qE\,\mathrm{d}l\cos\alpha$$

Iloczyn skalarny

$$W_{AB} = \int_A^B q\mathbf{E}\cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = q\int_A^B E\,\mathrm{d}l\cos\alpha$$

$$\frac{W_{AB}}{q} = \int_A^B \mathbf{E}\cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = \int_A^B E\,\mathrm{d}l\cos\alpha = U_{AB}$$

Napięcie elektryczne

Praca w polu elektrycznym. Potencjalność pola elektrostatycznego

Dla $E = Q/\left(4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2\right)$ **oraz** $\mathbf{d}l\mathbf{cos}\,\alpha = \mathbf{d}r$

$$U_{AB} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{r_A}^{r_B}\frac{\mathrm{d}r}{r^2} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_A} - \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_B}$$

Wniosek: Napięcie n i e z a l e ż y od drogi całkowania. Pole elektryczne jest p o t e n c j a l n e albo b e z w i r o w e.

$$U_{AO} = \int_A^O \mathbf{E}\cdot\mathrm{d}\mathbf{l} = -\int_O^A \mathbf{E}\cdot\mathrm{d}\mathbf{l} = \varphi(A)$$

Potencjał elektryczny

Praca w polu elektrycznym.
Potencjalność pola elektrostatycznego

Potencjał elektryczny w punkcie *A*

$$\varphi(A) = \int_A^{\infty} \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l}$$

$$\varphi_A = \varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_A}$$

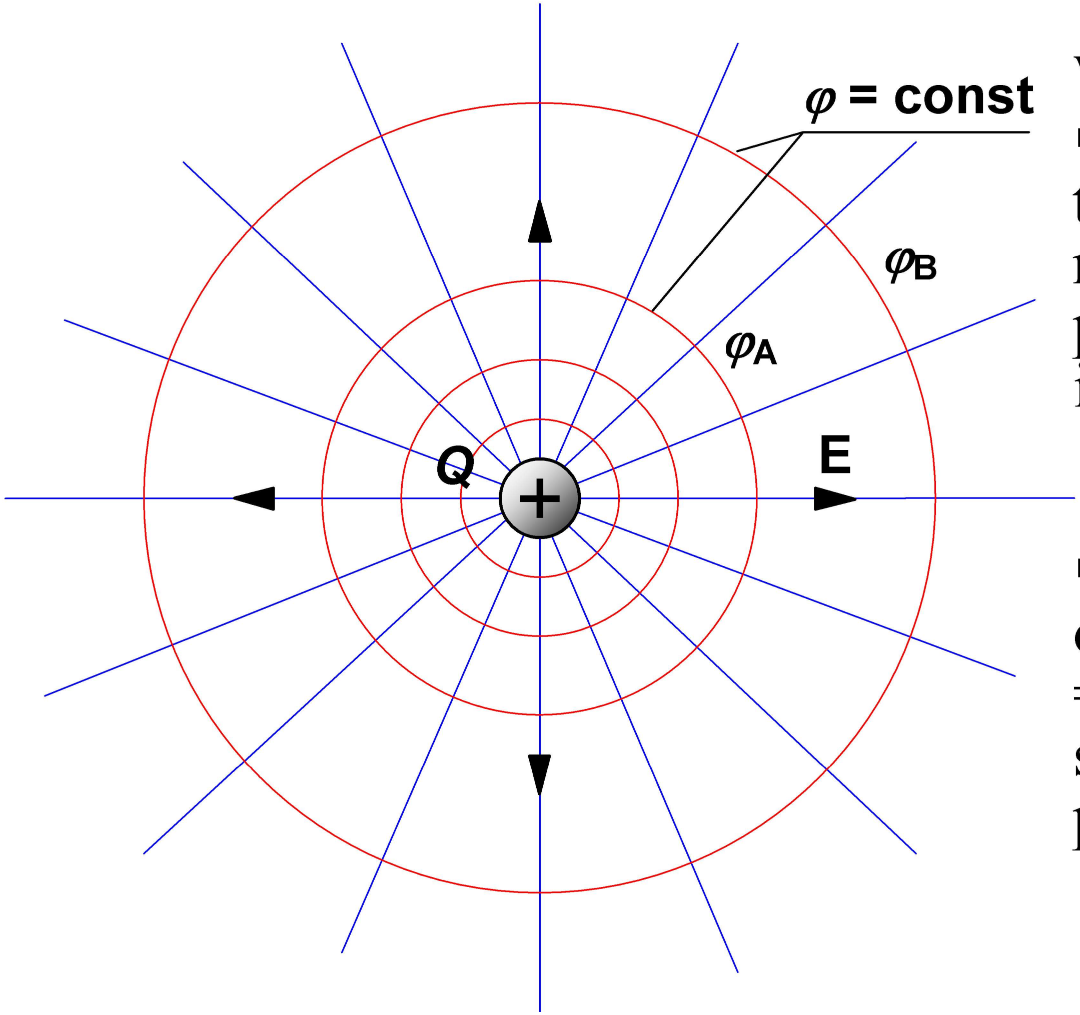
Praca w polu elektrycznym.
Potencjalność pola elektrostatycznego

$$\int_A^O \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = \int_A^B \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l} + \int_B^O \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l}$$

$$\varphi_A = U_{AB} + \varphi_B$$

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

Praca w polu elektrycznym. Potencjalność pola elektrostatycznego



Wnioski:

- W polu elektrycznym potencjalnym napięcie elektryczne między dwoma dowolnymi punktami jest równe różnicy ich potencjałów:

$$\boldsymbol{U}_{\mathbf{AB}} = \varphi_{\mathbf{A}} - \varphi_{\mathbf{B}}.$$

- Powierzchnie w przestrzeni o stałej wartości potencjału [$\varphi = \varphi(x, y, z) = \text{const}$] nazywa się powierzchniami e k w i p o t e n c j a l n y m i.

Praca w polu elektrycznym.
Potencjalność pola elektrostatycznego

$$W_{AA} = \int_A^A q\mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = q\oint_L \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = 0$$

$$\mathbf{E} = 0$$

Praca w polu elektrycznym.
Potencjalność pola elektrostatycznego

Z twierdzenia *Stokesa* wynika, że

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathrm{rot}\mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\Downarrow$$

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{E} = 0$$

Pole elektryczne bezwirowe

Praca w polu elektrycznym.
Potencjalność pola elektrostatycznego

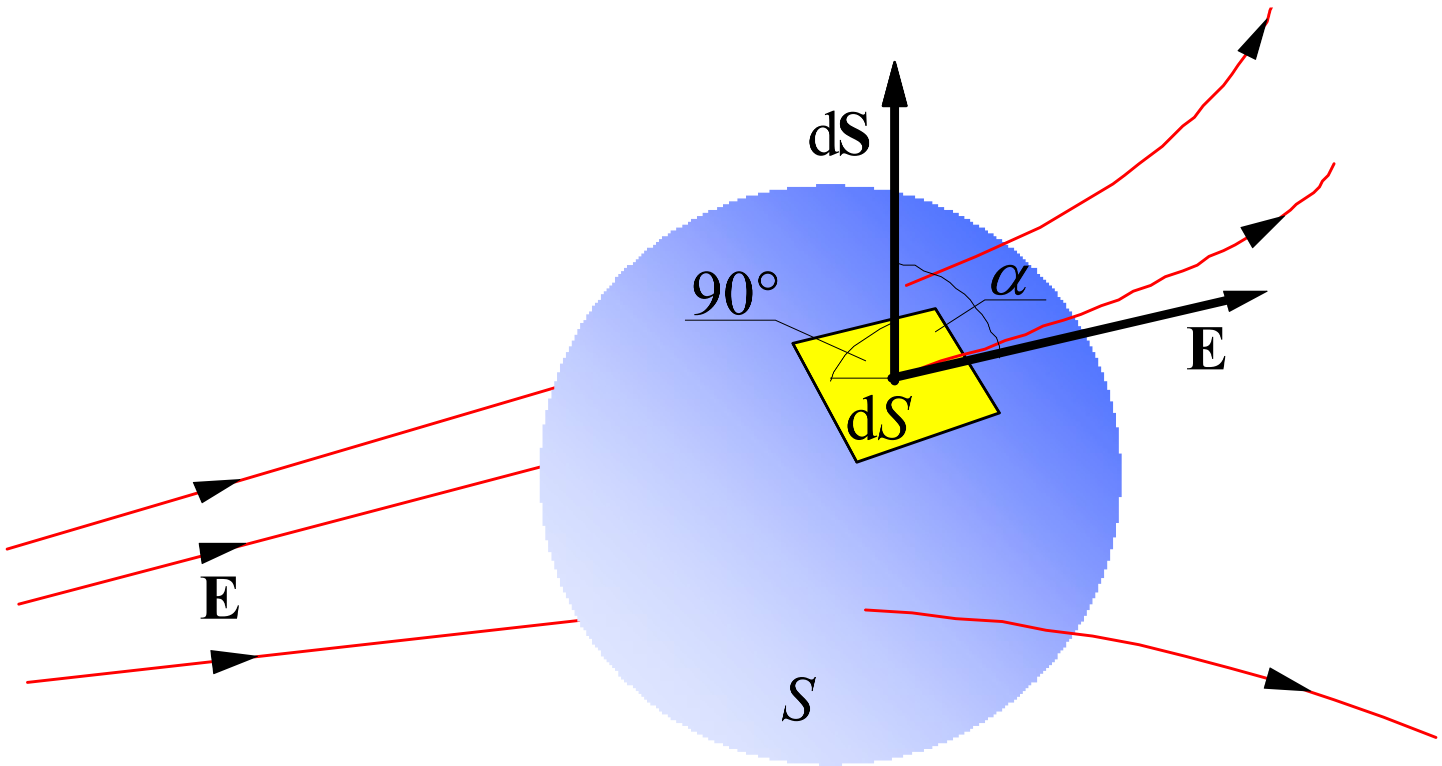
Z potencjalności i bezwirowości pola elektrycznego wynika, że

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\mathrm{grad}\,\varphi(\mathbf{r})$$

ponieważ zawsze

$$\mathrm{rot}\left[-\,\mathrm{grad}\,\varphi(\mathbf{r}) + \mathrm{const}\right] = \mathrm{rot}\left[-\,\mathrm{grad}\,\varphi(\mathbf{r})\right] = 0$$

Prawo *Gaussa*



$$d\Phi = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$$

Prawo *Gaussa*

$$\Phi = \int_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \int_S E \mathrm{d}S \cos\alpha$$

Dla $E = Q/\left(4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2\right)$ **oraz** $\mathbf{d}\boldsymbol{S}\mathbf{cos}\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{d}\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{r}^{\mathbf{2}}$

$$\Phi = \int_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \int_\omega \mathrm{d}\omega = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{\omega}{4\pi}$$

Prawo *Gaussa*

Dla $\omega = 4\pi$

$$\Phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$\oint_S \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \oint_S \mathbf{D} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = Q$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E}$$

Indukcja elektryczna

Prawo *Gaussa*
Źródłowość pola elektrycznego

Z prawa *Gaussa-Ostrogradskiego* wynika, że

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \int_V \mathrm{div}\mathbf{D}\,\mathrm{d}V$$

Jeśli istnieje $Q = \int_V q_{\mathrm{v}}\,\mathrm{d}V$**, to**

$$\int_V \mathrm{div}\mathbf{D}\,\mathrm{d}V = \int_V q_{\mathrm{v}}\,\mathrm{d}V \quad \Rightarrow \quad \mathrm{div}\mathbf{D} = q_{\mathrm{v}}$$

Źródło pola elektrycznego

Pole elektryczne źródłowe

Prawo *Gaussa*
Równania *Poissona i Laplace'a*

$$\mathrm{div}\mathbf{E} = \frac{q_\mathrm{V}}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

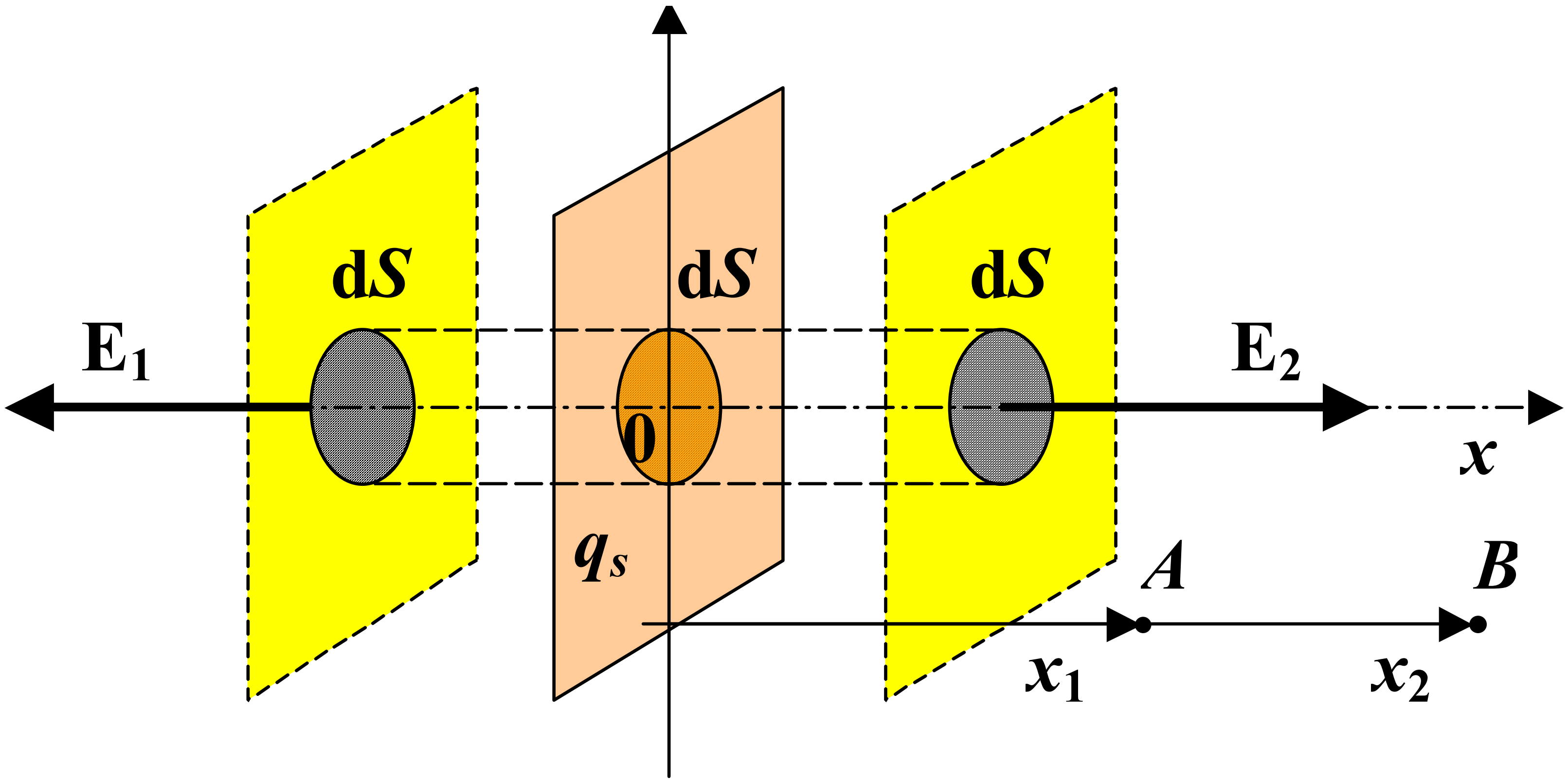
$$\mathbf{E} = -\mathrm{grad}\varphi$$

$$\Downarrow$$

$$\mathrm{div}\,\mathrm{grad}\varphi = \nabla^2\varphi = -\frac{q_\mathrm{V}}{\varepsilon\varepsilon_0} \longrightarrow \text{równanie } \textbf{\textit{Poissona}}$$

$$\nabla^2\varphi = 0 \longrightarrow \text{równanie } \textbf{\textit{Laplace'a}}$$

Pole elektryczne nieskończenie wielkiej płaszczyzny z równomiernie rozłożonym na niej ładunkiem powierzchniowym



Pole elektryczne nieskończenie wielkiej…

$$\mathbf{E}_1 = -\mathbf{E}_2 \quad \text{oraz} \quad E_1 = E_2 = E$$

Strumień indukcji elektrycznej Φ, gdzie indukcja elektryczna $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$, przez powierzchnię zamkniętą walca jest równy ładunkowi $q_s \mathrm{d}S$ obejmowanemu przez tę powierzchnię. Strumień przez pobocznicę walca jest równy zeru, ponieważ $E = E_n = 0$. Zatem istnieją **tylko** dwa strumienie przez obie podstawy walca.

Pole elektryczne nieskończenie wielkiej…

$$\mathrm{d}\Phi = \mathrm{d}\Phi_1 + \mathrm{d}\Phi_2 = E_1\mathrm{d}S + E_2\mathrm{d}S = 2E\mathrm{d}S = \frac{\mathrm{d}Q}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

lub

$$2\varepsilon\varepsilon_0 E\mathrm{d}S = 2D\mathrm{d}S \quad \text{i} \quad \mathrm{d}Q = q_s\mathrm{d}S \quad \Rightarrow \quad 2\varepsilon\varepsilon_0 E\mathrm{d}S = 2D\mathrm{d}S = q_s\mathrm{d}S$$

$$E = \frac{q_s}{2\varepsilon\varepsilon_0} \quad \text{oraz} \quad D = \frac{q_s}{2}$$

Potencjał w polu naładowanej nieskończenie wielkiej płaszczyzny

$$E = -\mathrm{grad}\,\varphi = -\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x} \quad \Rightarrow \quad \varphi = -\int E\,\mathrm{d}x$$

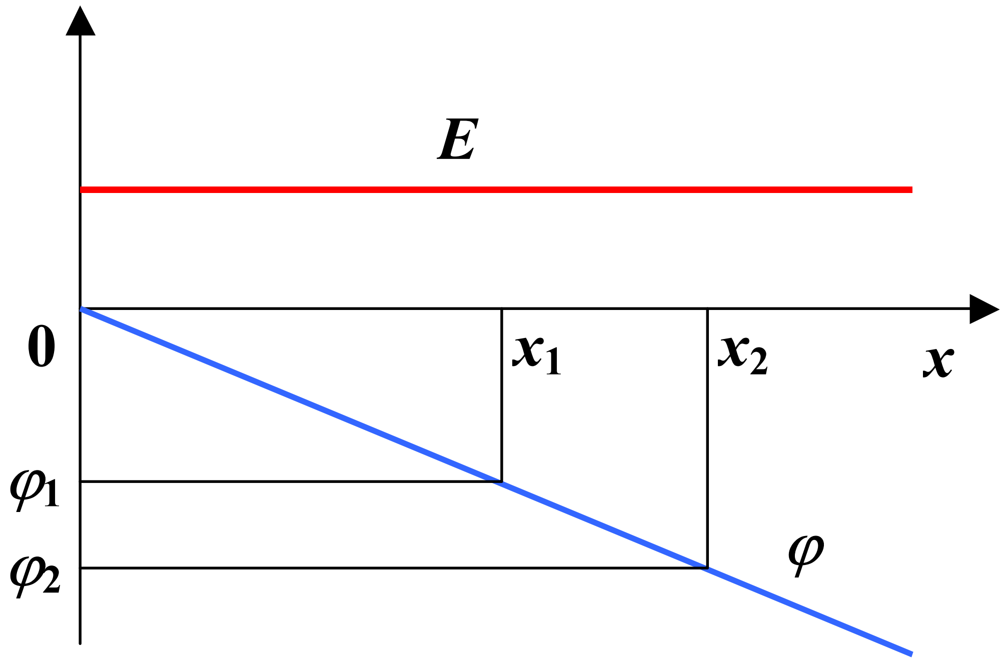
$$\varphi = -\int \frac{q_s}{2\varepsilon\varepsilon_0}\,\mathrm{d}x$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\int_{x_2}^{x_1} E\,\mathrm{d}r = \int_{x_1}^{x_2} \frac{q_s}{2\varepsilon\varepsilon_0}\,\mathrm{d}x = \frac{q_s}{2\varepsilon\varepsilon_0}\,x\Big|_{x_1}^{x_2} =$$

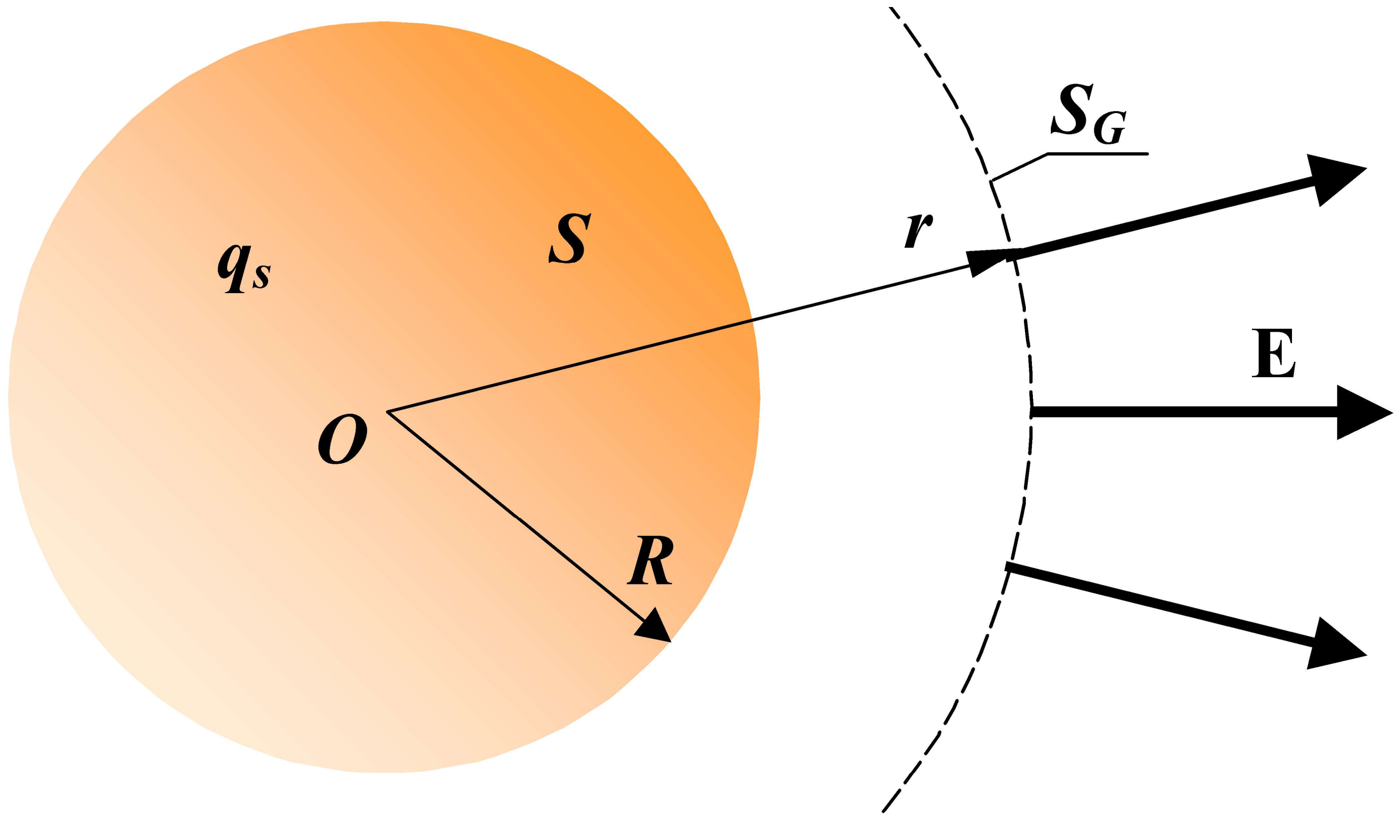
$$= \frac{q_s}{2\varepsilon\varepsilon_0}\left(x_2 - x_1\right)$$

Rozkłady natężenia pola i potencjału w polu naładowanej nieskończenie wielkiej…

Wobec warunku: $x_2 > x_1$ jest $\varphi_1 > \varphi_2$, czyli potencjał maleje wraz z odległością od naładowanej nieskończenie wielkiej płaszczyzny.



Pole elektryczne na zewnątrz kuli z równomiernie rozłożonym na jej powierzchni ładunkiem powierzchniowym



Pole elektryczne na zewnątrz kuli z równomiernie rozłożonym…

$$q_s = \frac{Q}{S}; \quad S = 4\pi R^2; \quad S_G = 4\pi r^2 - \text{powierzchnia } Gaussa$$

Wobec *E* = const jest

$$\Phi = \oint_{S_G} \mathbf{E}\mathrm{d}\mathbf{S} = \oint_{S_G} E\mathrm{d}S = E\int_0^{S_G} \mathrm{d}S = ES_G = E \cdot 4\pi r^2$$

$$\Phi = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad \text{ponieważ} \quad E \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

Pole elektryczne na zewnątrz kuli z równomiernie rozłożonym…

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{r^2} = \frac{q_s S}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{r^2} = \frac{q_s 4\pi R^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{r^2} = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{r^2}$$

Dla *r* = *R*

$$E = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

Pole elektryczne na zewnątrz kuli z równomiernie rozłożonym…

Dla $E = 0$ oraz $\varphi(r) = \text{const}$ dla $r \le R$

$$E = -\text{grad}\,\varphi = -\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}r} = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{R} = \text{const}$$

Zewnętrze kuli: $r \ge R$, $S \ne S_G(r)$ i $S = 4\pi R^2$ oraz powierzchnia *Gaussa* $S_G(r) > S = 4\pi R^2$ obejmuje całą kulę z ładunkiem

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{r^2} = \frac{q_s S}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{r^2} = \frac{q_s 4\pi R^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{r^2} = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{r^2}$$

Potencjał na zewnątrz kuli z równomiernie rozłożonym na jej powierzchni…

$$\varphi = -\int E\mathrm{d}r = -\int \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{r^2}\mathrm{d}r = -\frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}R^2\int \frac{1}{r^2}\mathrm{d}r = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{r} + C$$

Ponieważ dla $r = \infty$ $\varphi = 0$, zatem $C = 0$, bo $0 = 0 + C$

$$\varphi = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{r} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{r}$$

Potencjał na zewnątrz kuli z równomiernie rozłożonym na jej powierzchni…

To samo, ale inaczej

$$\varphi_r - \varphi_\infty = -\int_\infty^r E\mathrm{d}r = -\int_\infty^r \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{r^2}\mathrm{d}r = -\frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}R^2\int_\infty^r \frac{1}{r^2}\mathrm{d}r =$$

$$= -\frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}R^2\left(-\frac{1}{r}\right)\Bigg|_\infty^r = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}R^2\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\infty}\right) = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{r} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{r}$$

Ponieważ potencjał w nieskończoności: $\varphi_\infty = 0$ oraz $\varphi_r = \varphi$, zatem

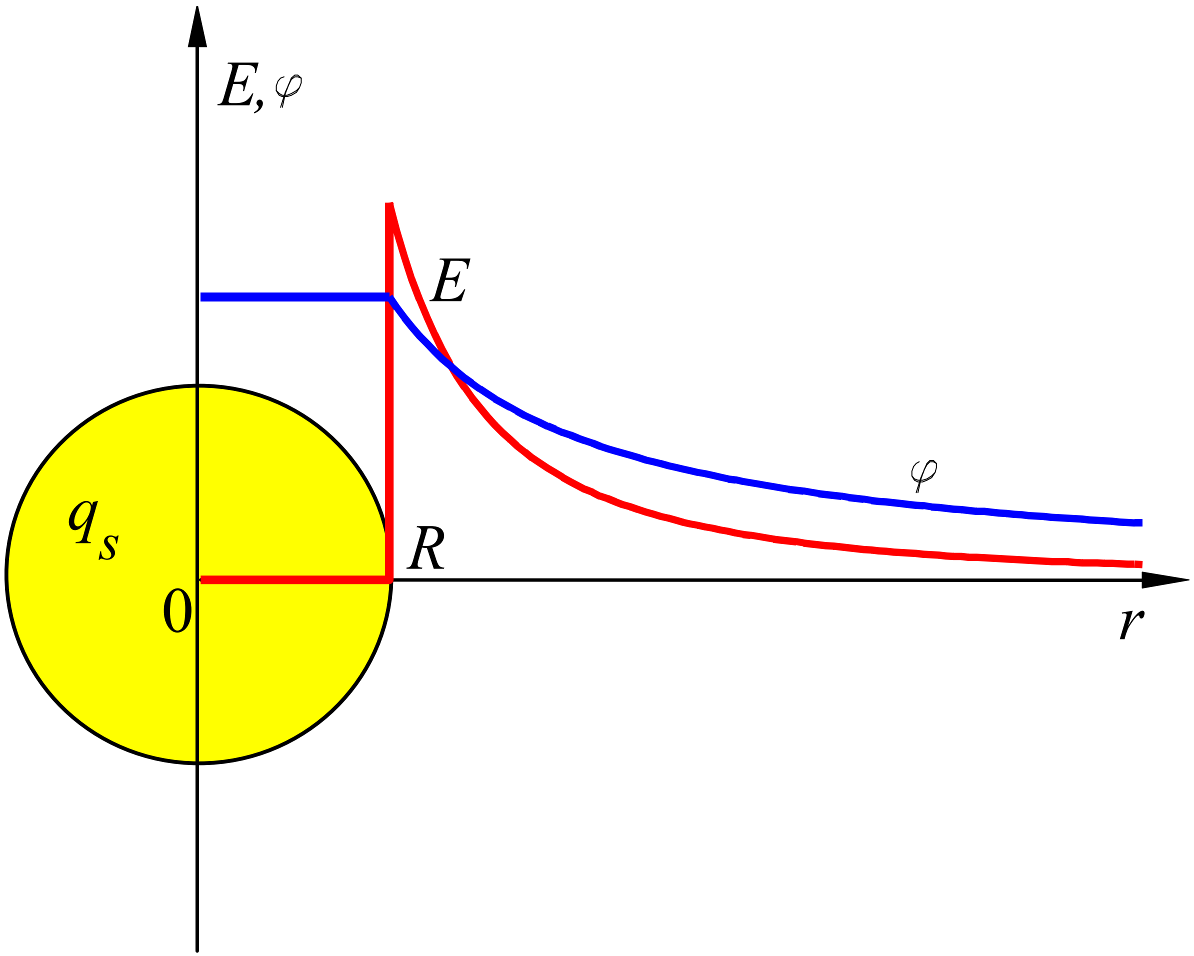
$$\varphi = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{r}$$

Potencjał na zewnątrz kuli z równomiernie rozłożonym na jej powierzchni…

Dla $r = R$

$$\varphi = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{R^2}{R} = \frac{q_s}{\varepsilon\varepsilon_0}R = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{1}{R}$$

Rozkłady natężenia pola i potencjału w polu naładowanej kuli…



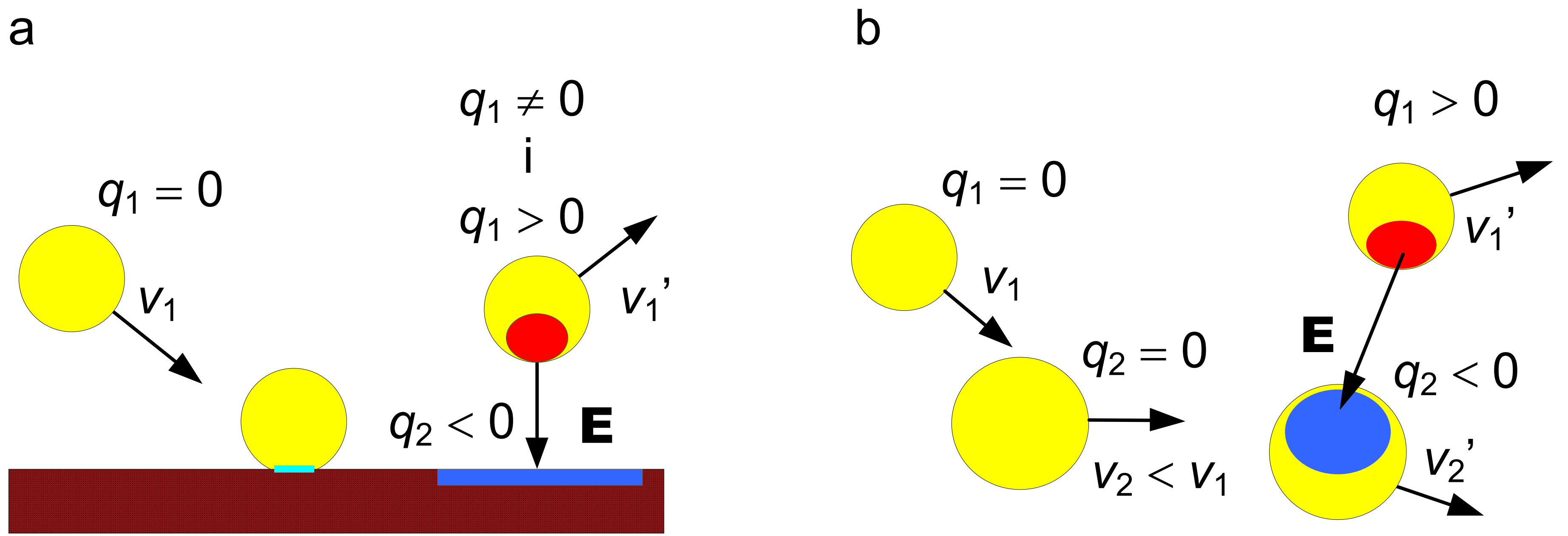
Elektryzacja albo elektryzowanie

Procesy r o z d z i e l a n i a (p r z e g r u p o w a n i a) ładunków w przewodniku przy wnoszeniu przewodnika w zewnętrzne pole elektr(ostat)yczne występują na skutek istnienia zjawiska i n d u k c j i e l e k t r o s t a t y c z n e j. Jest to jedna z form *elektryzowania* ciał, czyli powodowania, że posiadają one nadmiarowy ładunek d o d a t n i albo u j e m n y.

E l e k t r y z a c j a albo e l e k t r y z o w a n i e (się) jest to ogólnie nabywanie przez ciała elektrycznie obojętne nadmiarowego ładunku elektrycznego dodatniego lub ujemnego.

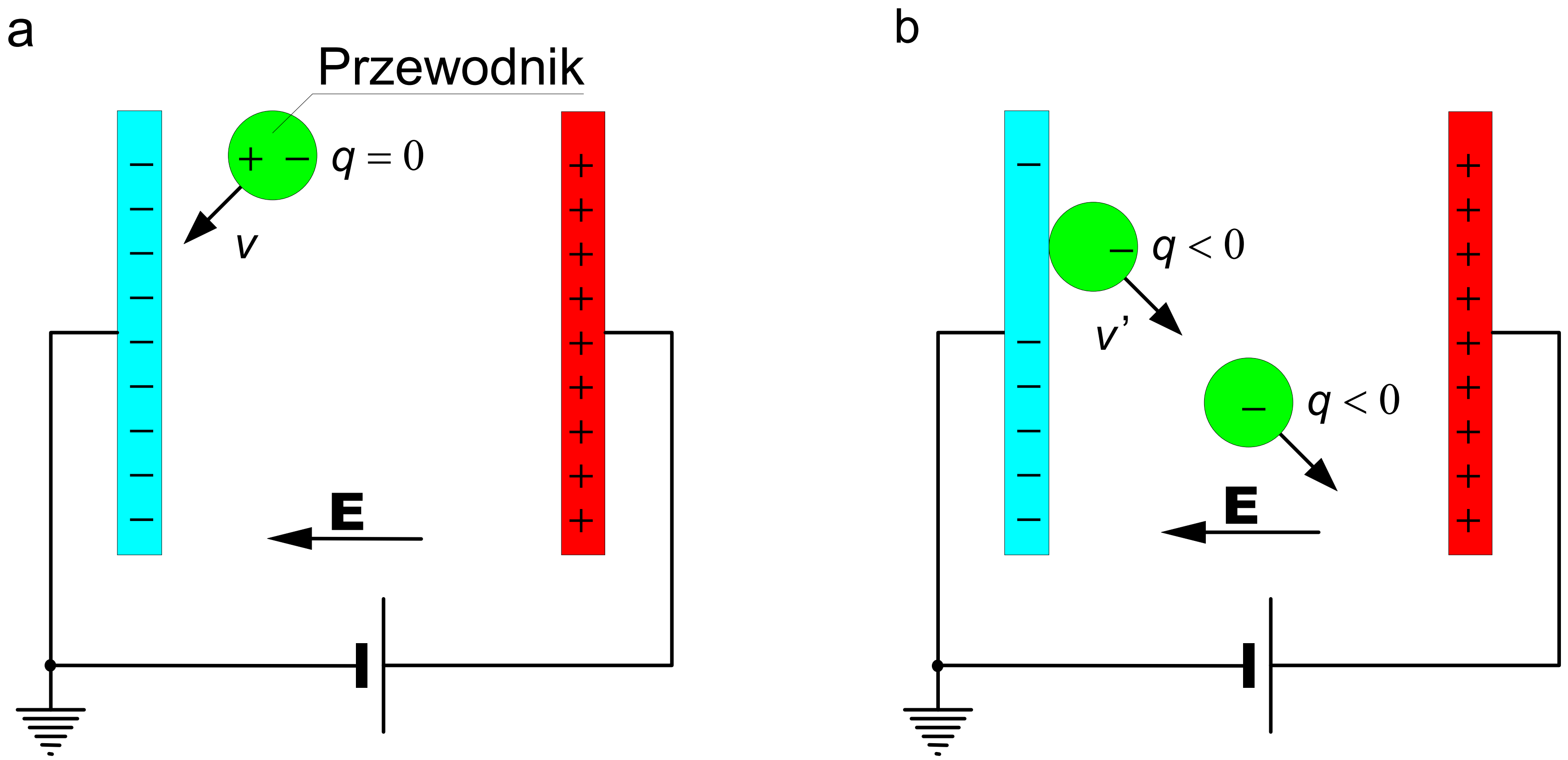
Elektryzacja albo elektryzowanie

Kontakt i separacja dynamiczna
tarcie — tryboelektryzacja



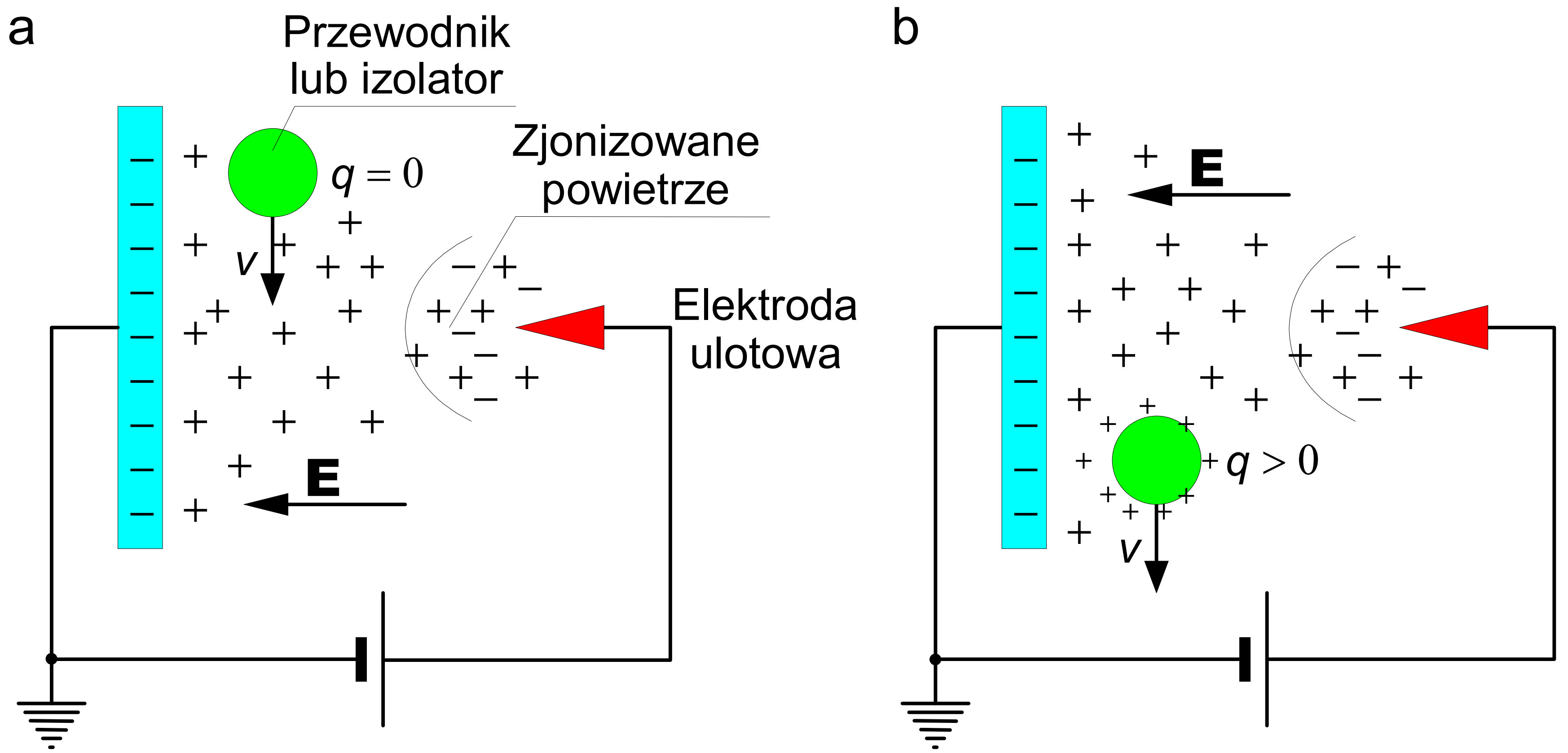
Elektryzacja albo elektryzowanie

Elektryzacja przez indukcję



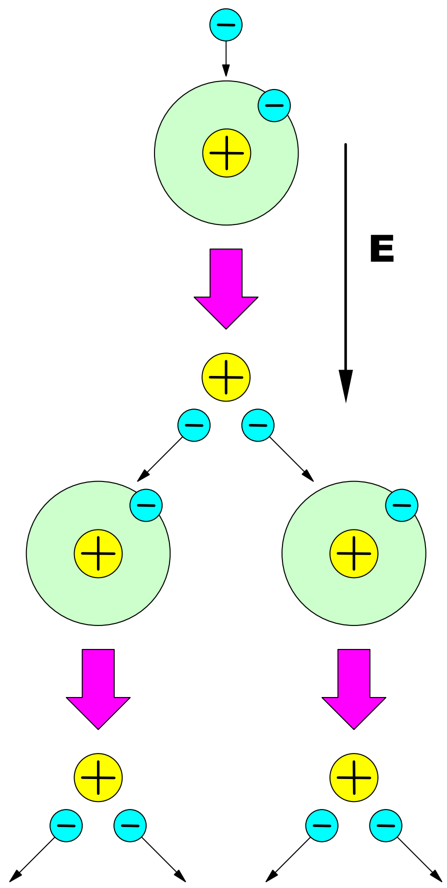
Elektryzacja albo elektryzowanie

Elektryzacja w polu wyładowania ulotowego



Elektryzacja albo elektryzowanie

Mechanizm lawin elektronowych

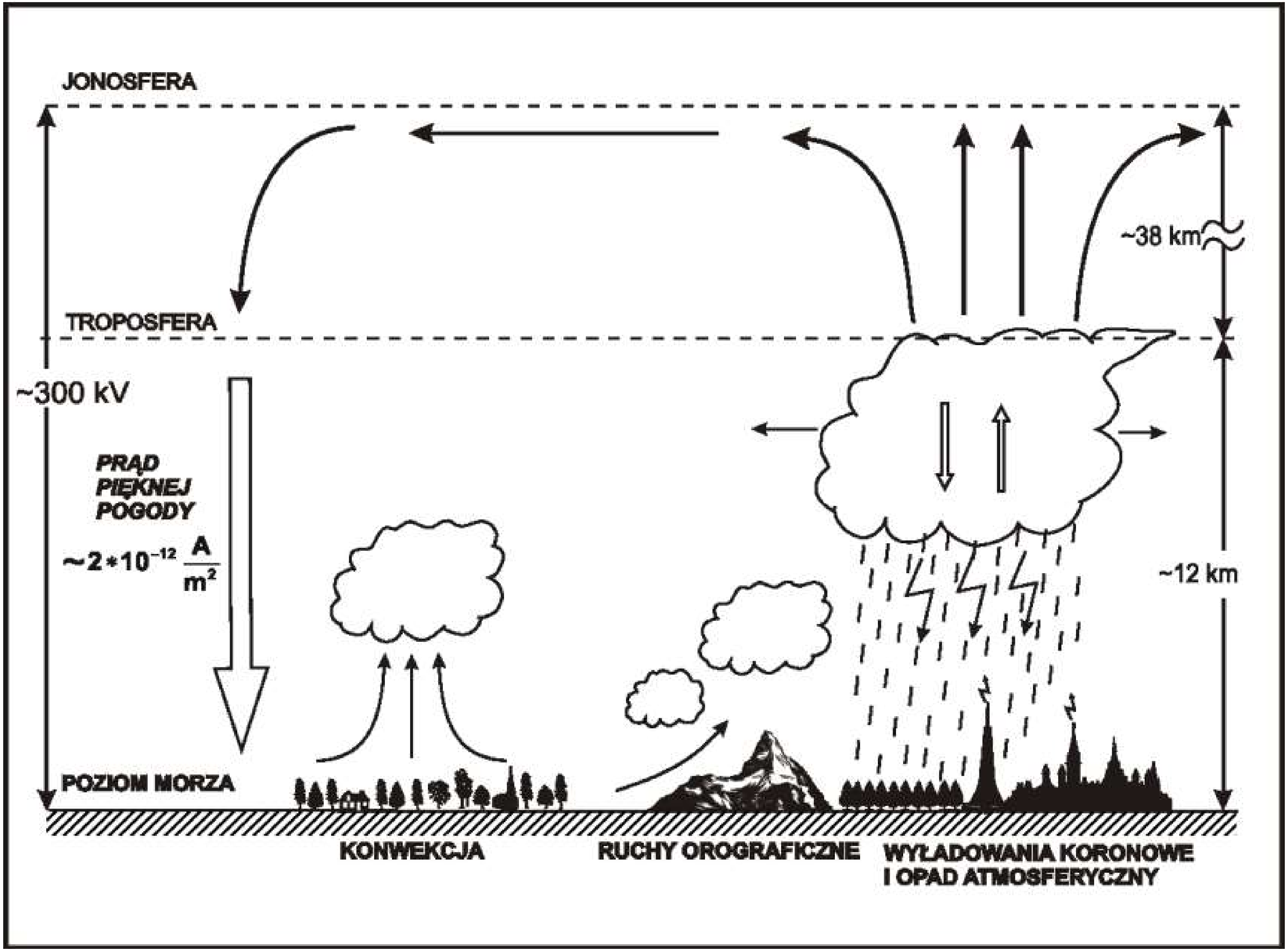


Praktyczne aspekty elektryzacji

Warunki powstawania wyładowań piorunowych:

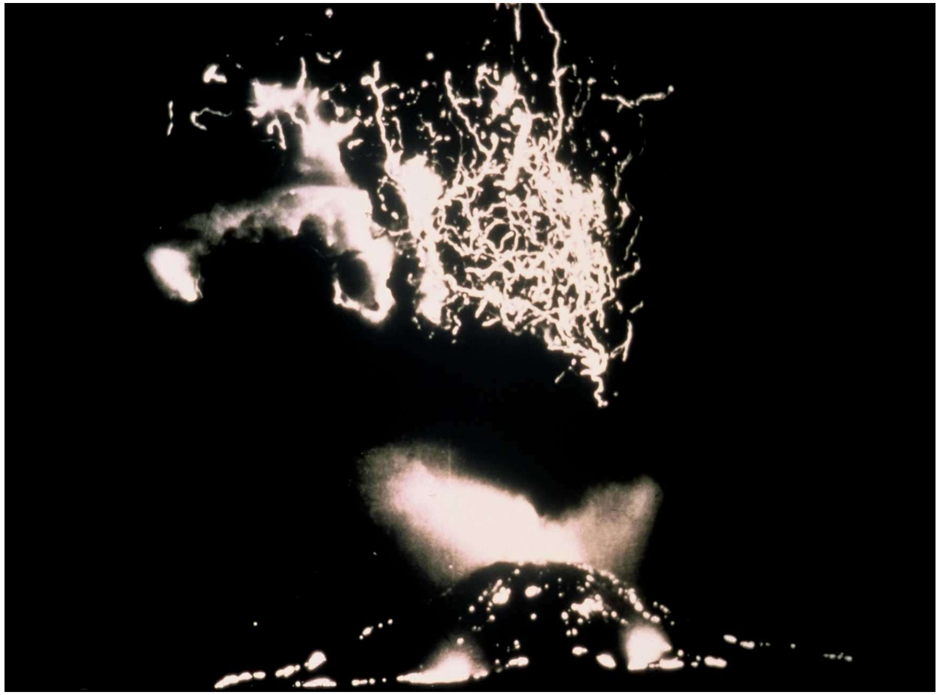
- Silnie naelektryzowana chmura burzowa.
- Erupcja wulkanu.
- Wybuch jądrowy na powierzchni ziemi (do 2 km) lub w atmosferze (od 2 km do 20 km).
- Burza śnieżna.
- Burza piaskowa.
- Deszcz i lód, ale nie podczas burzy z piorunami.
- „Grom z jasnego nieba” — przy czystym błękitnym niebie.

Praktyczne aspekty elektryzacji



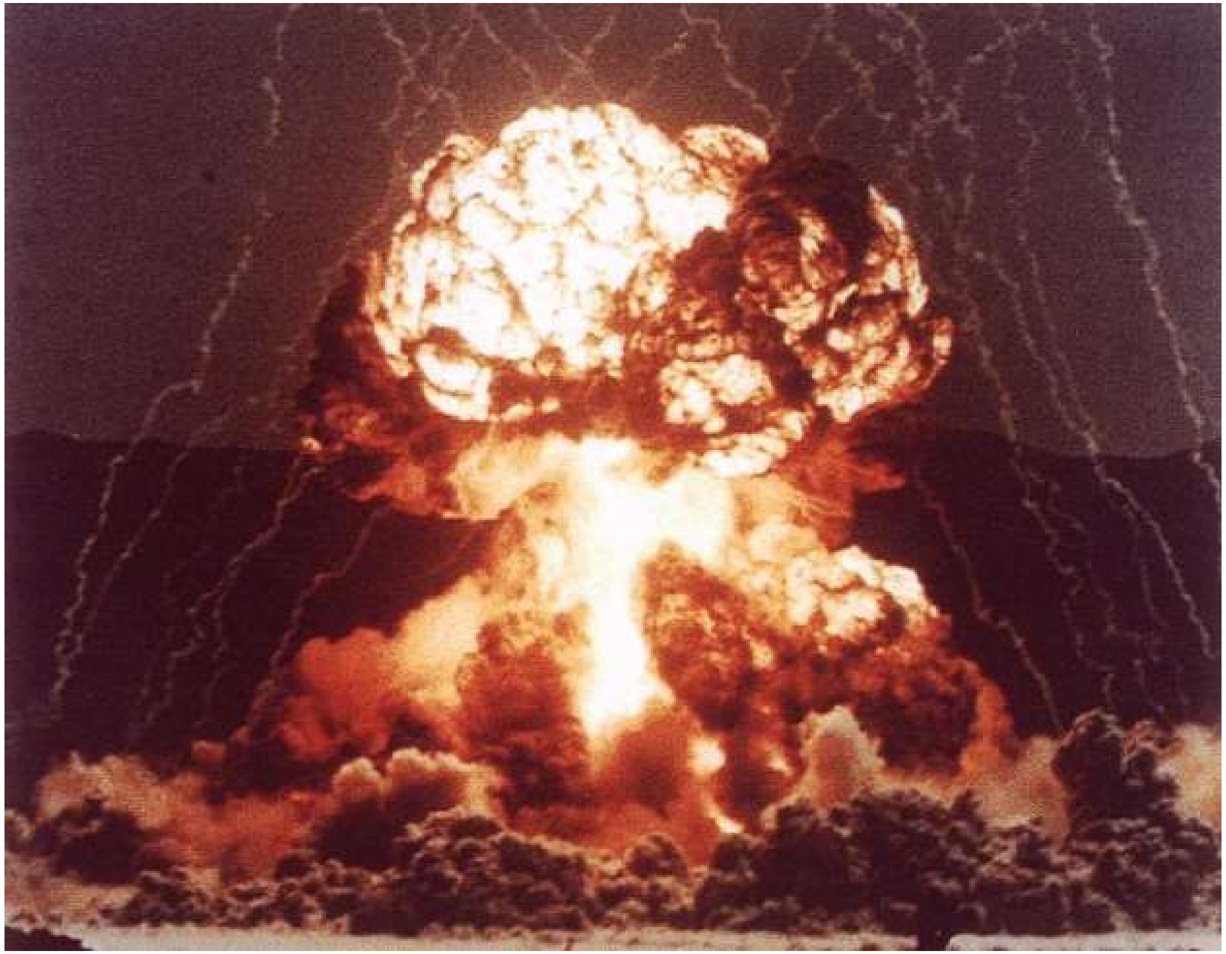
JONOSFERA
~38 km
TROPOSFERA
~300 kV
PRĄD
PIĘKNEJ
POGODY
$\sim 2 * 10^{-12}\ \frac{A}{m^2}$
~12 km
POZIOM MORZA
KONWEKCJA
RUCHY OROGRAFICZNE
WYŁADOWANIA KORONOWE
I OPAD ATMOSFERYCZNY

Praktyczne aspekty elektryzacji

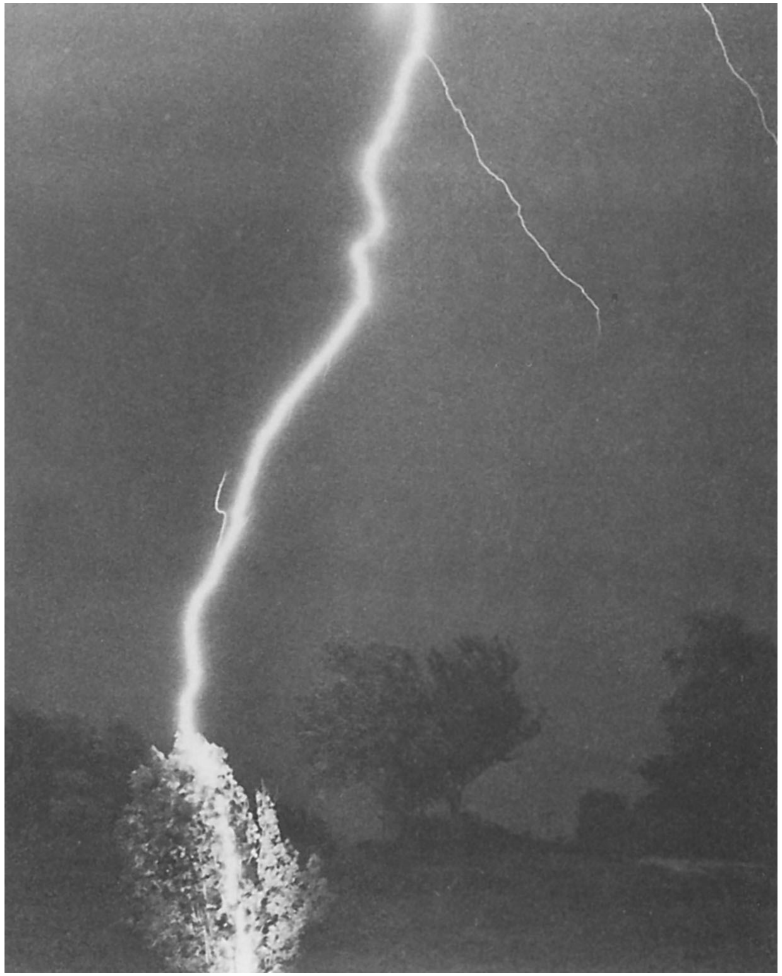


Praktyczne aspekty elektryzacji

Praktyczne aspekty elektryzacji

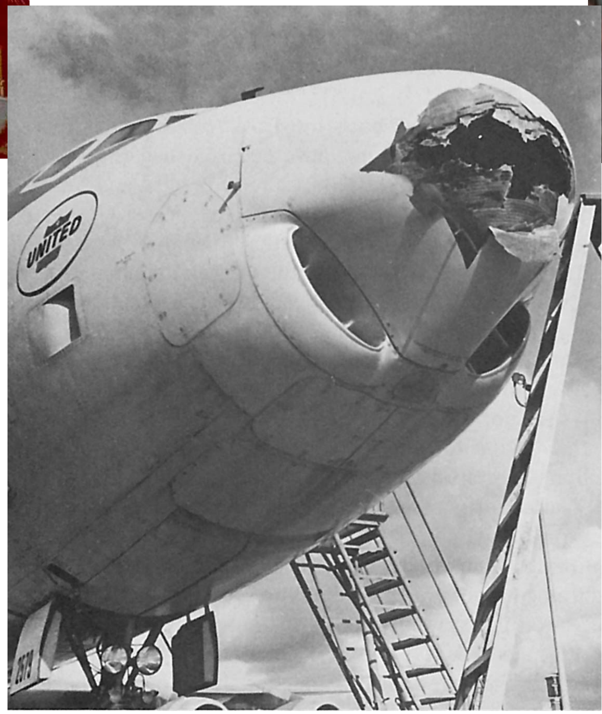


Praktyczne aspekty elektryzacji



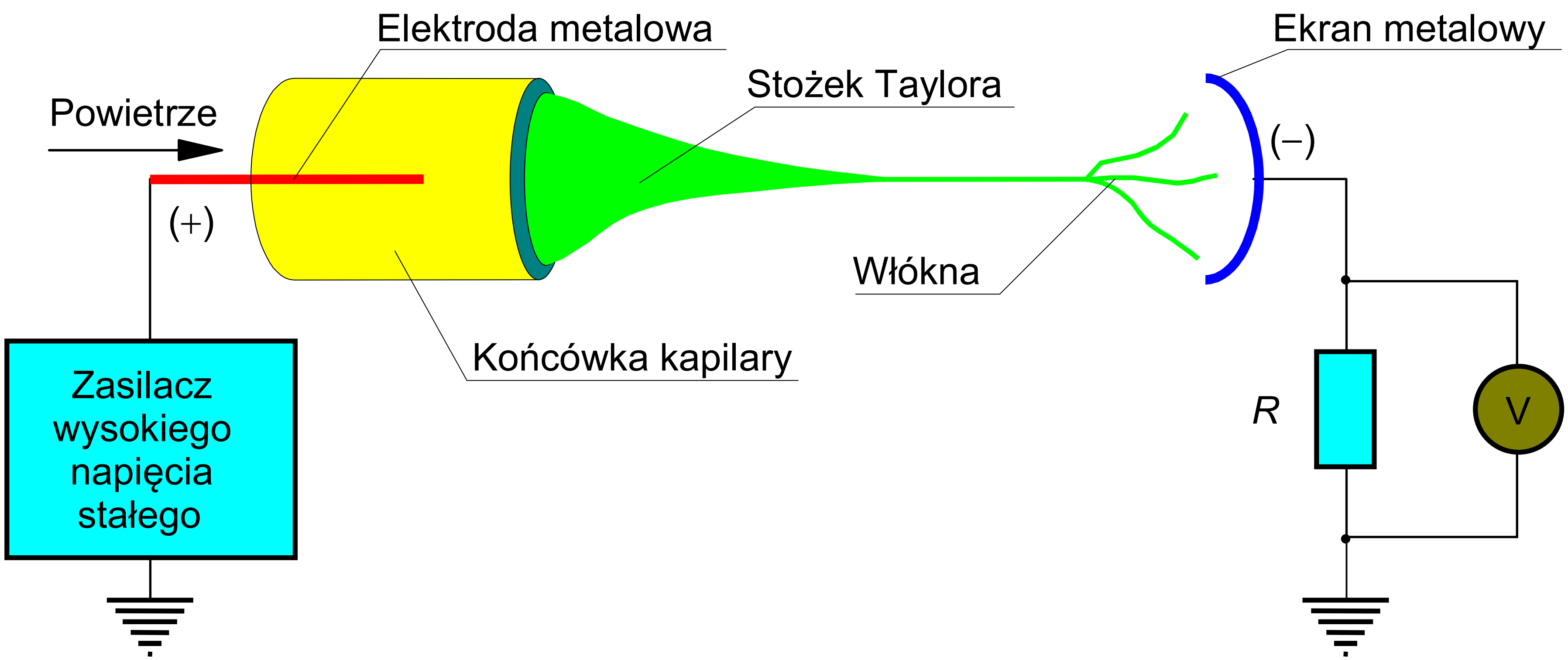
Praktyczne aspekty elektryzacji

Praktyczne aspekty elektryzacji



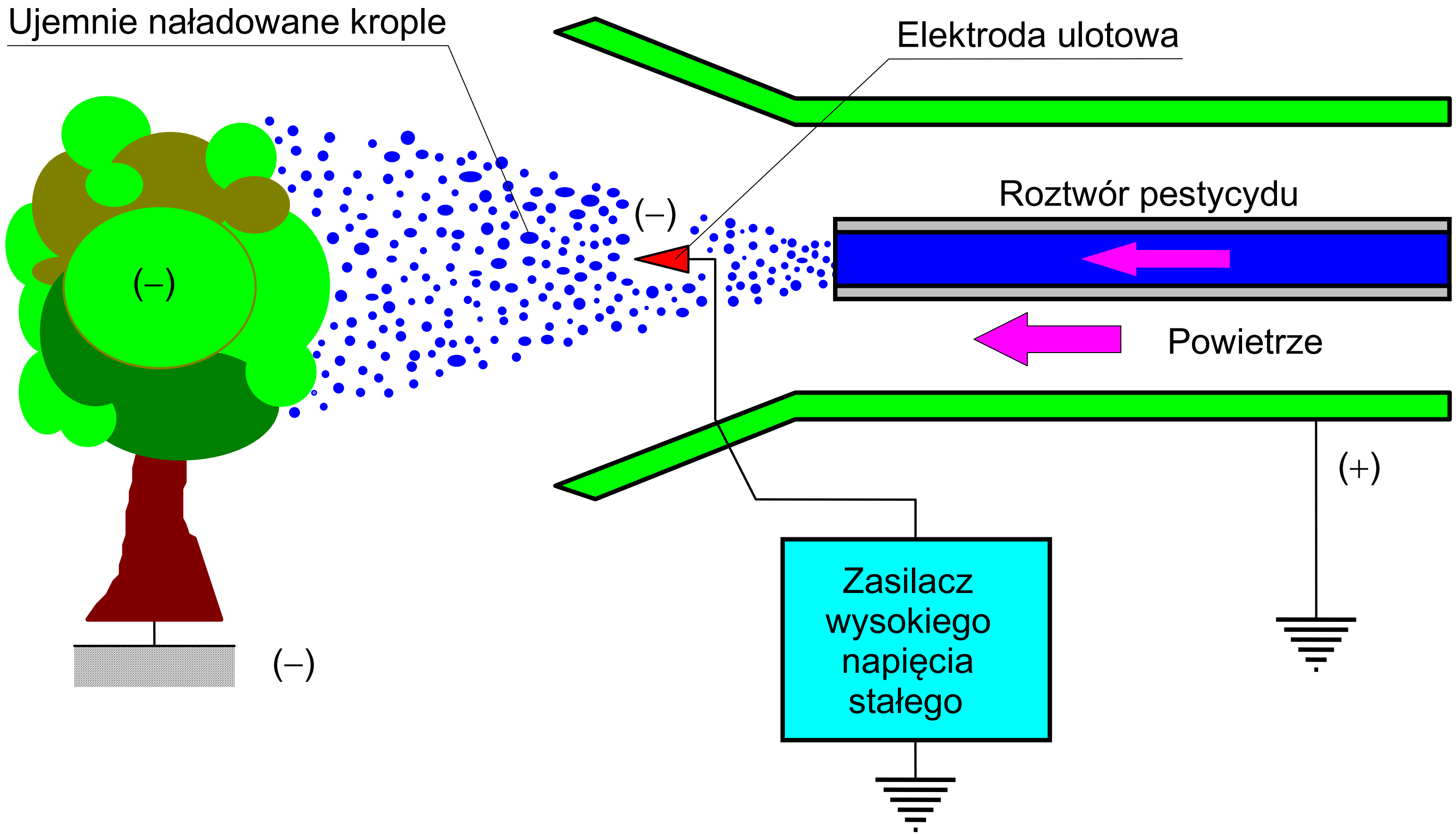
Praktyczne aspekty elektryzacji

Elektrospinning — wytwarzanie włókien



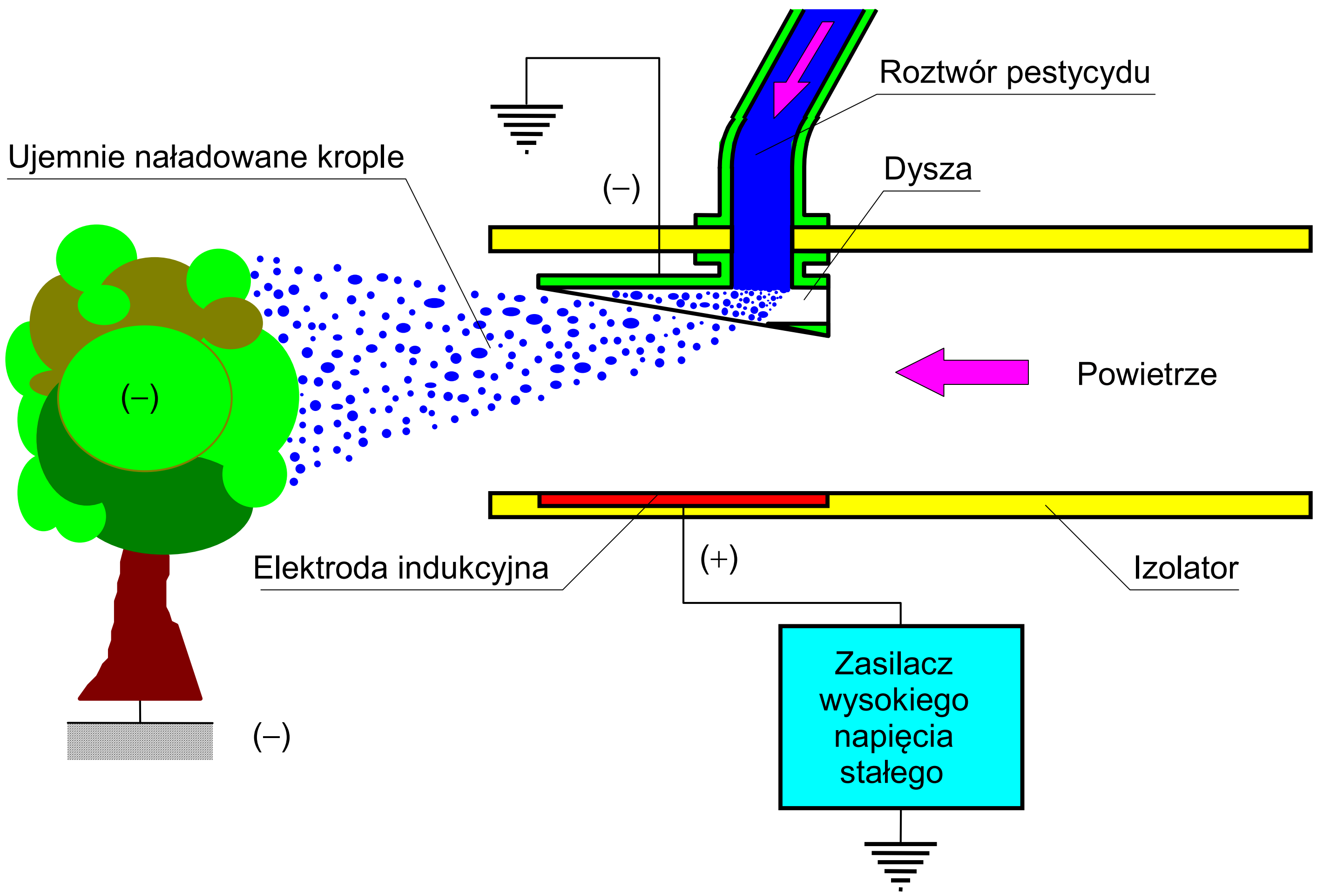
Praktyczne aspekty elektryzacji

Opryskiwanie roślin



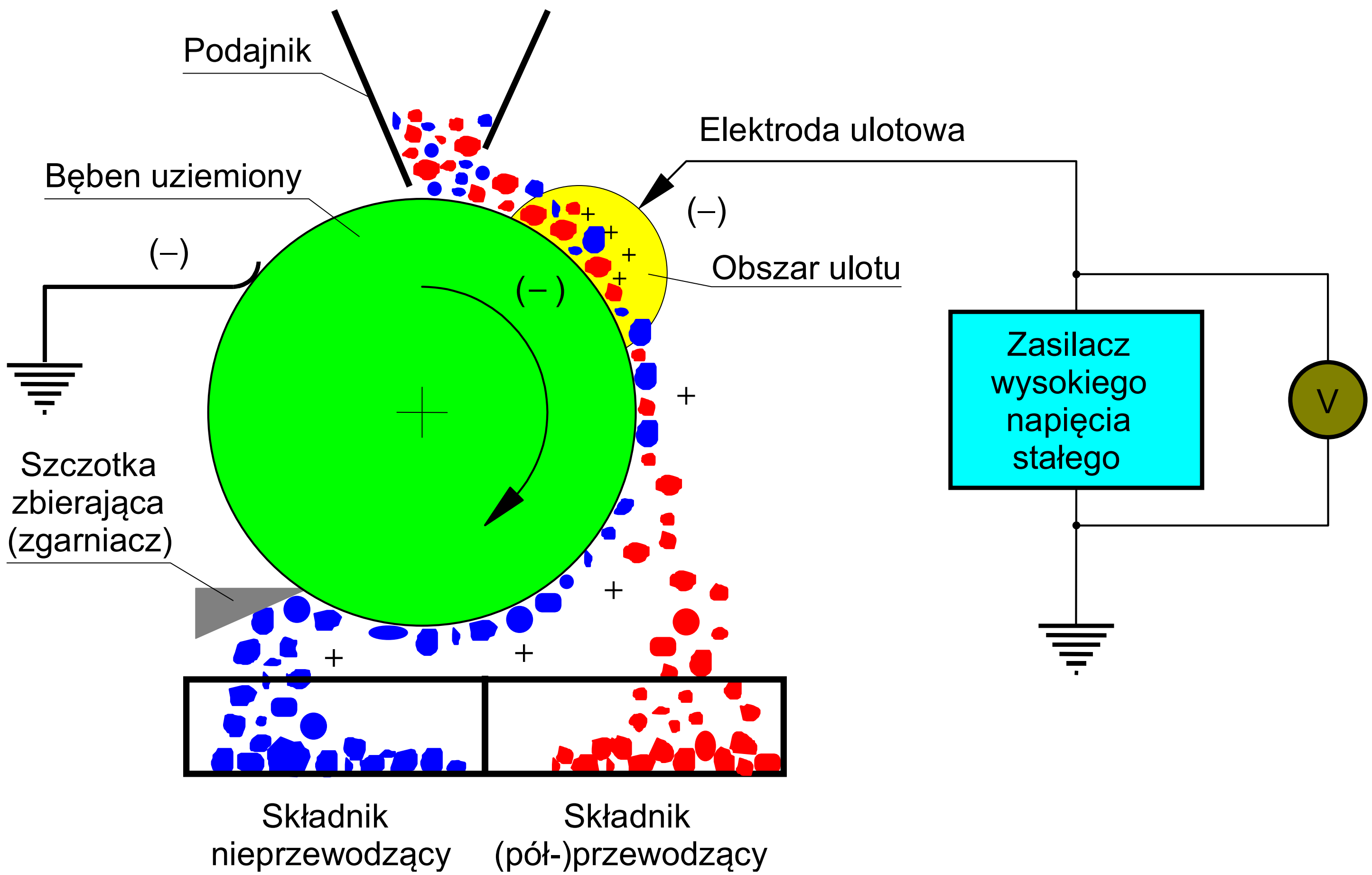
Praktyczne aspekty elektryzacji

Opryskiwanie roślin



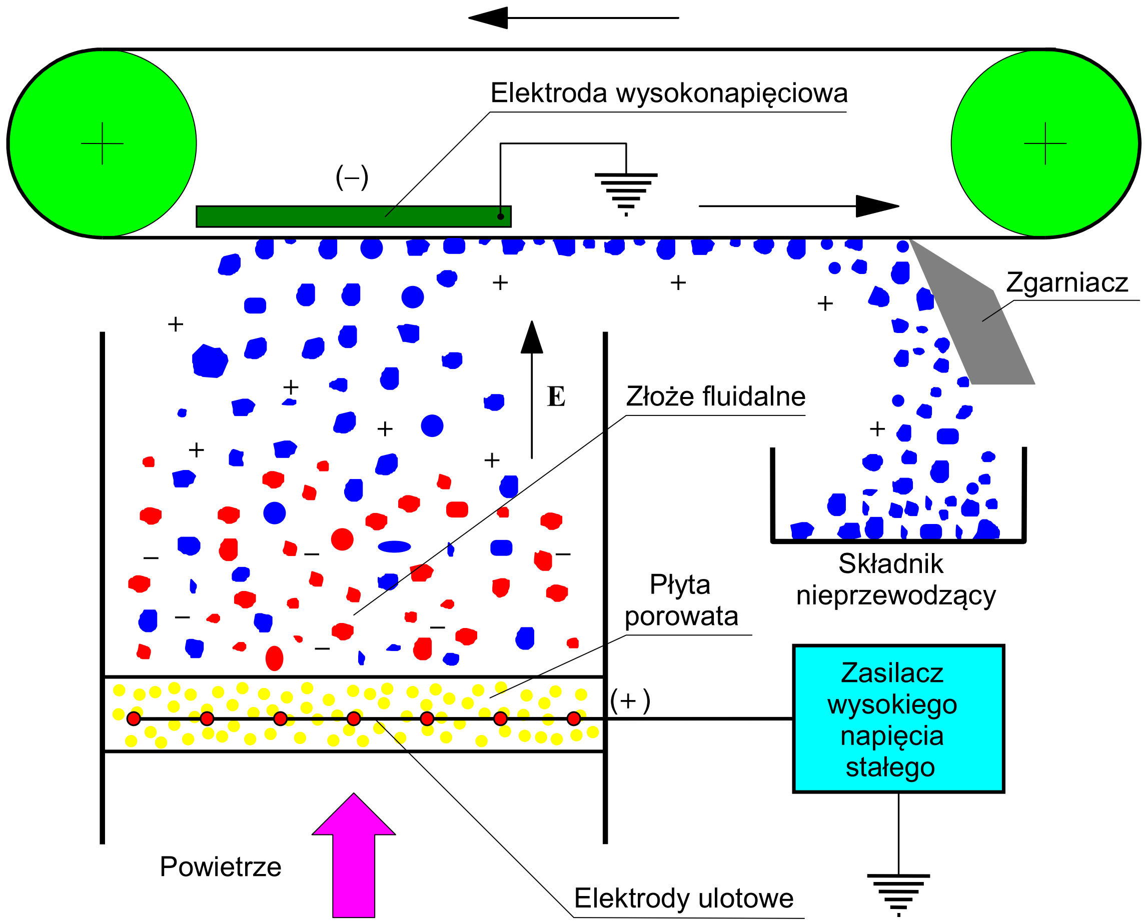
Praktyczne aspekty elektryzacji

Elektroseparacja — wzbogacanie



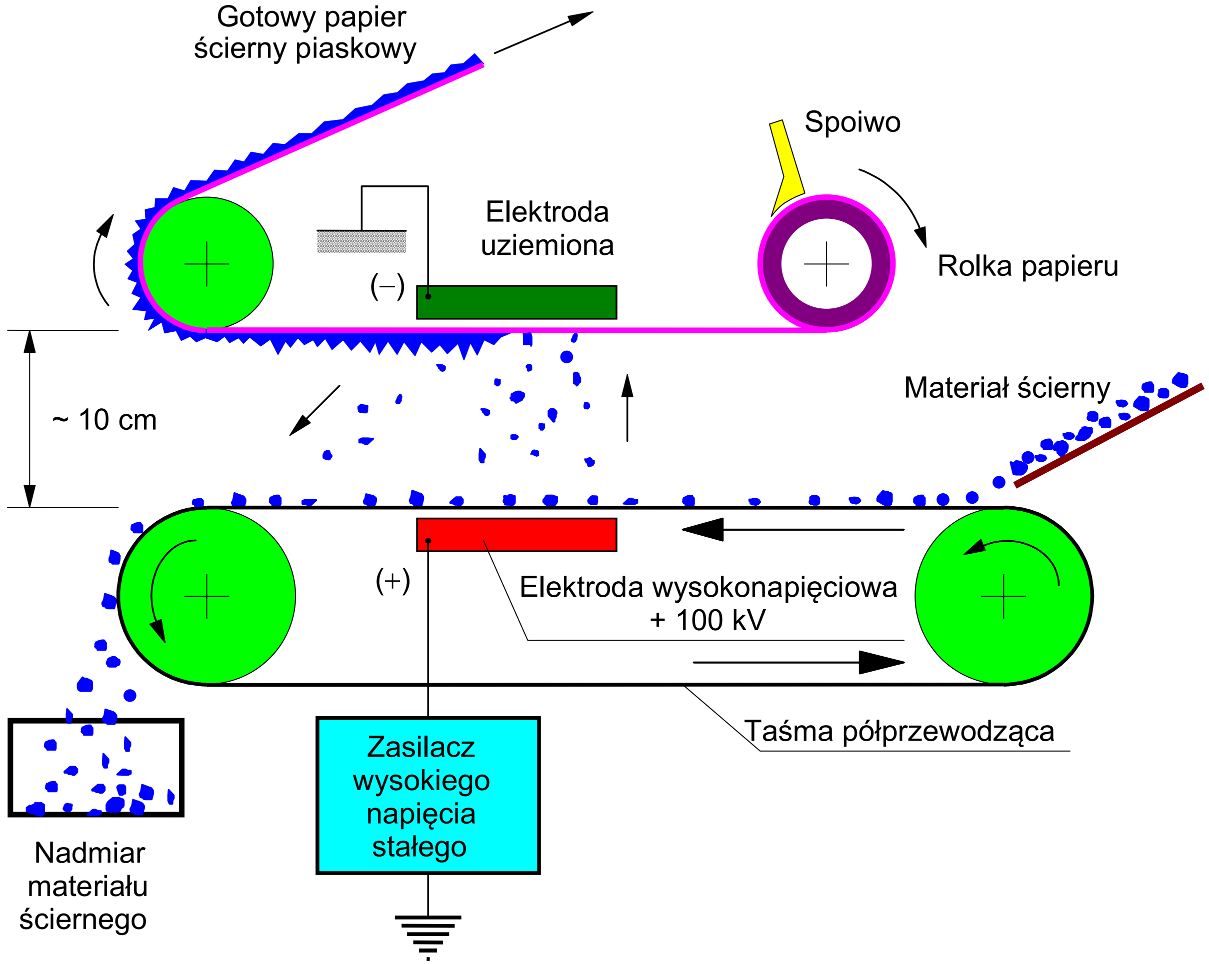
Praktyczne aspekty elektryzacji

Elektroseparacja — wzbogacanie



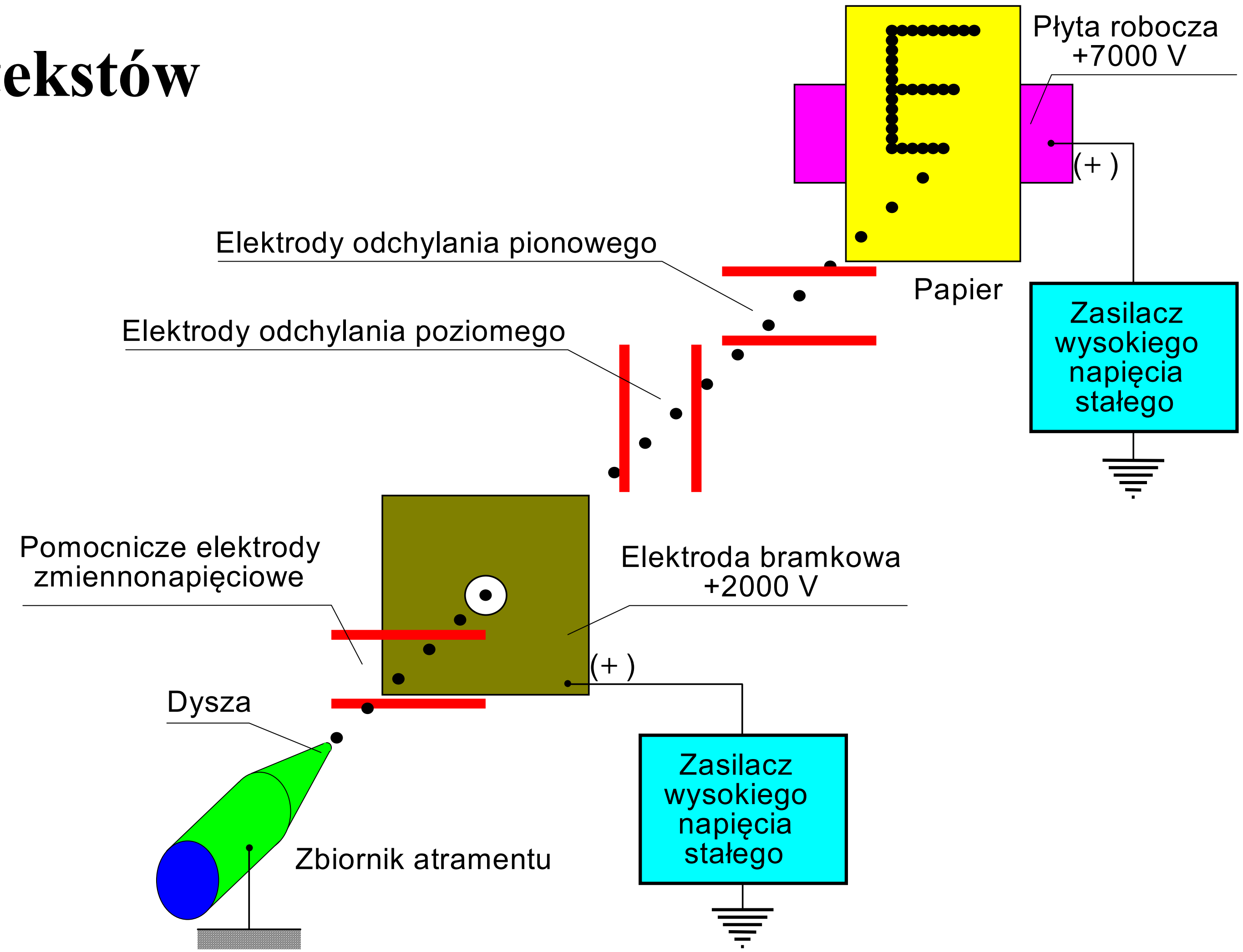
Praktyczne aspekty elektryzacji

Wytwarzanie papieru ściernego



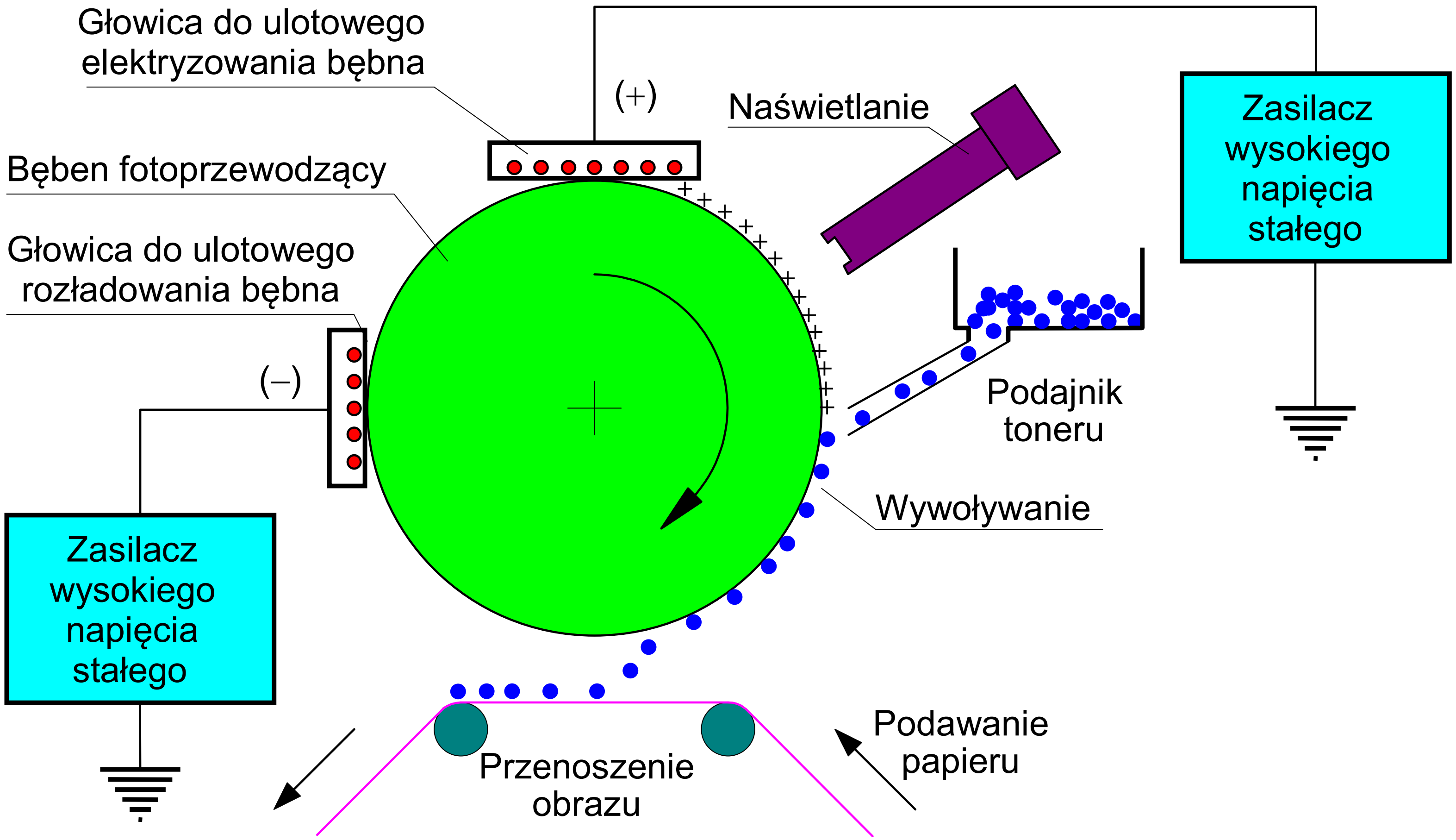
Praktyczne aspekty elektryzacji

Drukowanie tekstów

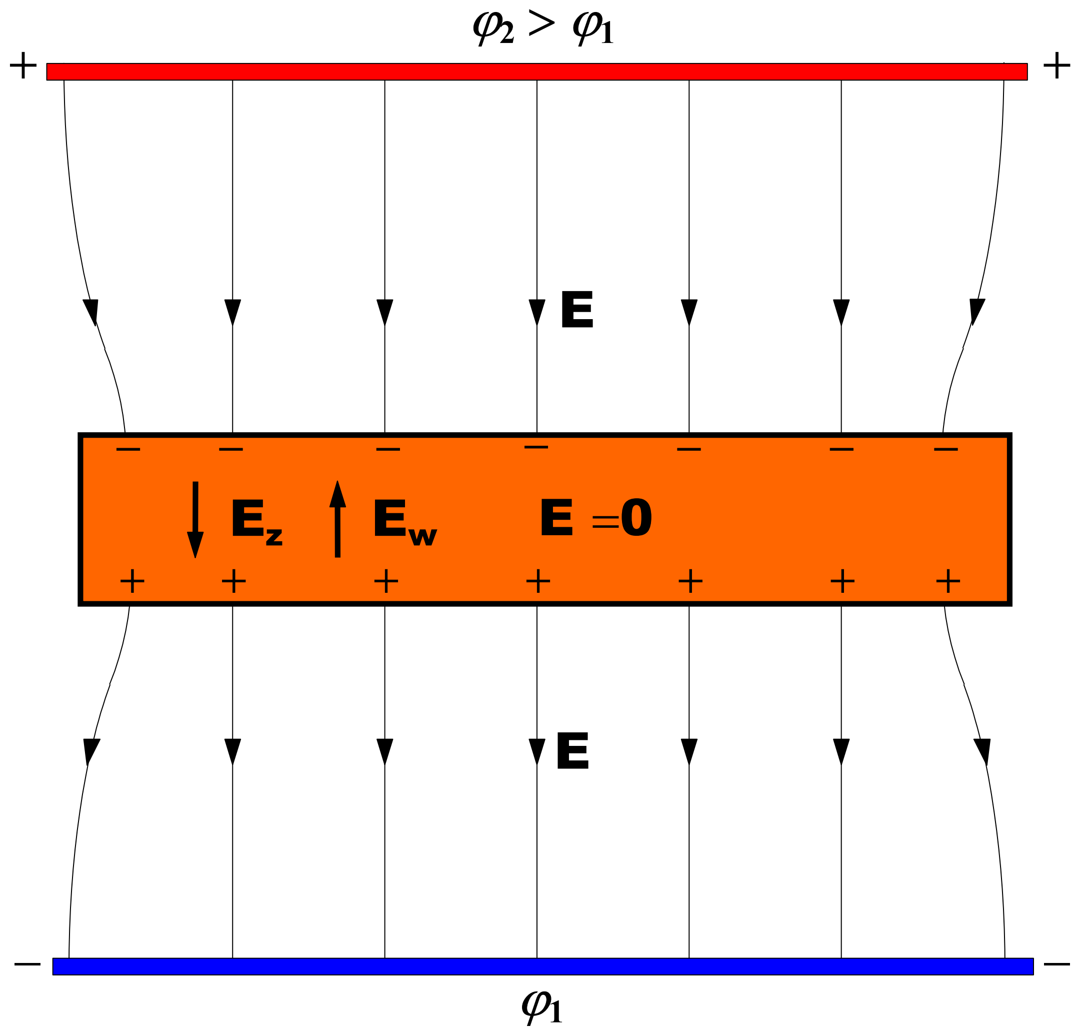


Praktyczne aspekty elektryzacji

Kopiowanie tekstów

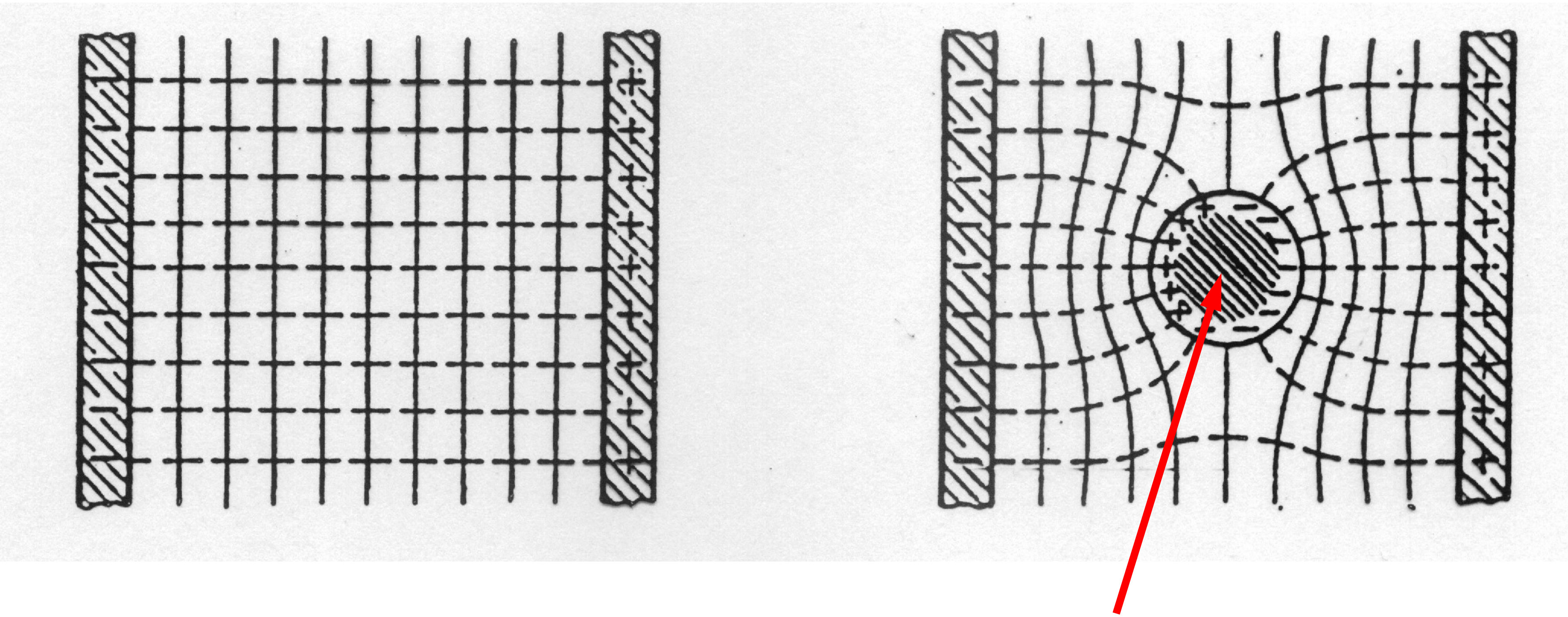


Przewodniki w polu elektrycznym



$$\mathbf{E}_z + \mathbf{E}_w = \mathbf{E} = 0$$

Przewodniki w polu elektrycznym



Indukcja elektrostatyczna — separacja ładunku elektrycznego w przewodniku w zewnętrznym polu elektrycznym (elektryzowanie, elektryzacja przewodnika)

Przewodniki w polu elektrycznym

$$\mathbf{E} = 0$$

1. $q_{\mathrm{v}} = \varepsilon\varepsilon_0 \mathrm{div}\mathbf{E} = 0$

2. $\mathbf{E} = -\mathrm{grad}\varphi = 0 \Leftrightarrow \varphi = \mathrm{const}$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_n \quad i \quad \mathbf{E}_t = 0$$

$$\mathbf{E} = \frac{q_{\mathrm{s}}}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

Rozkład gęstości ładunku na powierzchni przewodnika

Ostrze

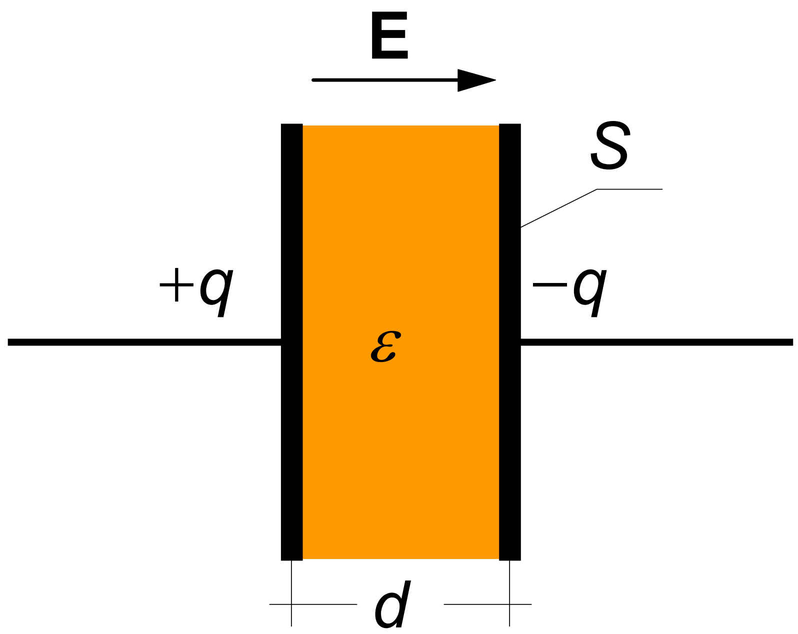
$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r} = \frac{q_\mathrm{s} 4\pi r^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r} = \frac{q_\mathrm{s}}{\varepsilon\varepsilon_0} r$$

$$q_\mathrm{s} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\varphi}{r}$$

$$E = \frac{q_\mathrm{s}}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{\varphi}{r}$$

Kondensator

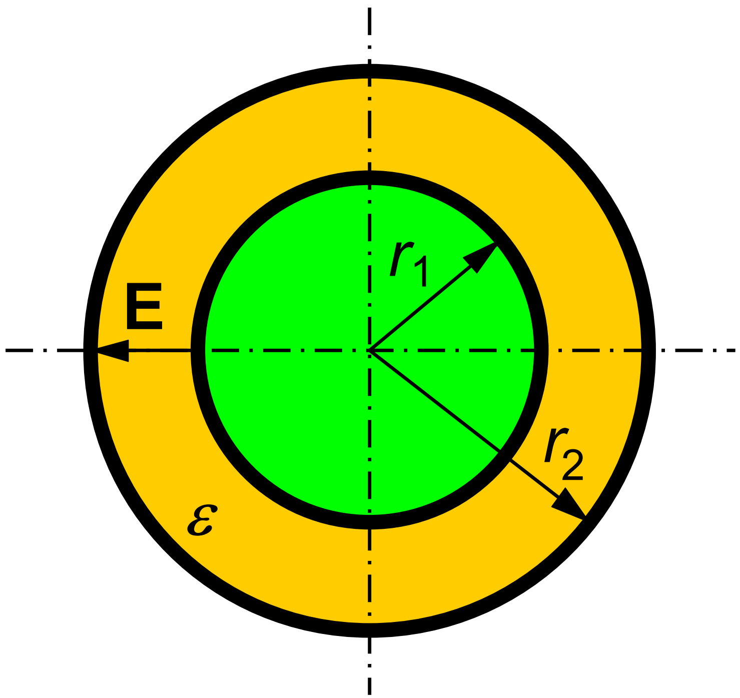
Kondensator płaski



$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

Kondensator

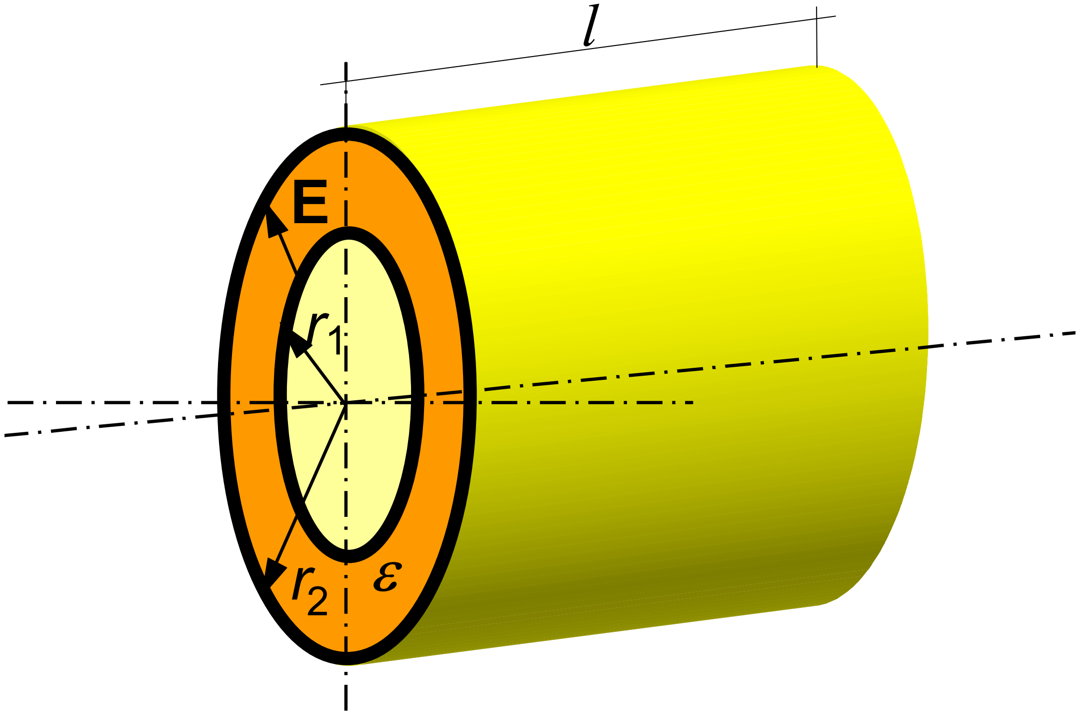
Kondensator kulisty



$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

Kondensator

Kondensator walcowy (cylindryczny)

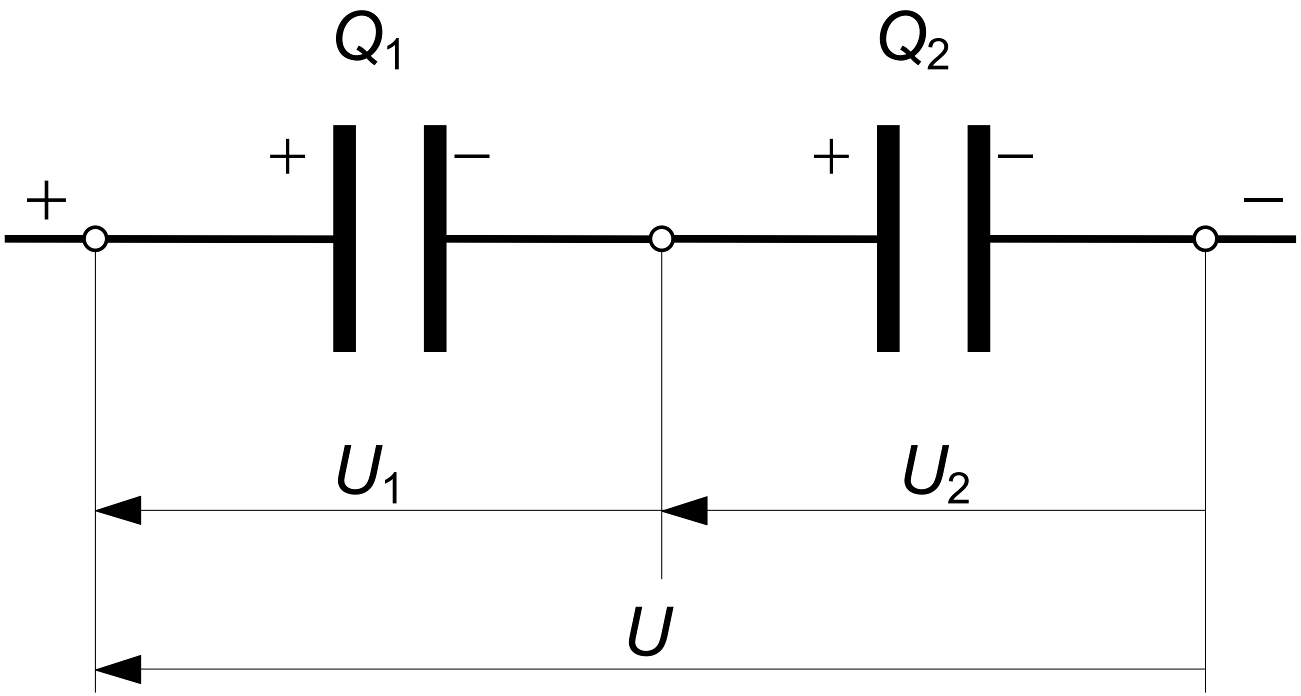


$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln\frac{r_2}{r_1}}$$

Kondensator

Połączenia kondensatorów

Szeregowe



Kondensator

Połączenia kondensatorów

Szeregowe

$$U_1 = \frac{Q_1}{C_1} \quad \text{i} \quad U_2 = \frac{Q_2}{C_2} \quad \text{oraz} \quad U = U_1 + U_2 = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2}$$

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$U = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) = \frac{Q}{C}$$

Kondensator

Połączenia kondensatorów

Szeregowe

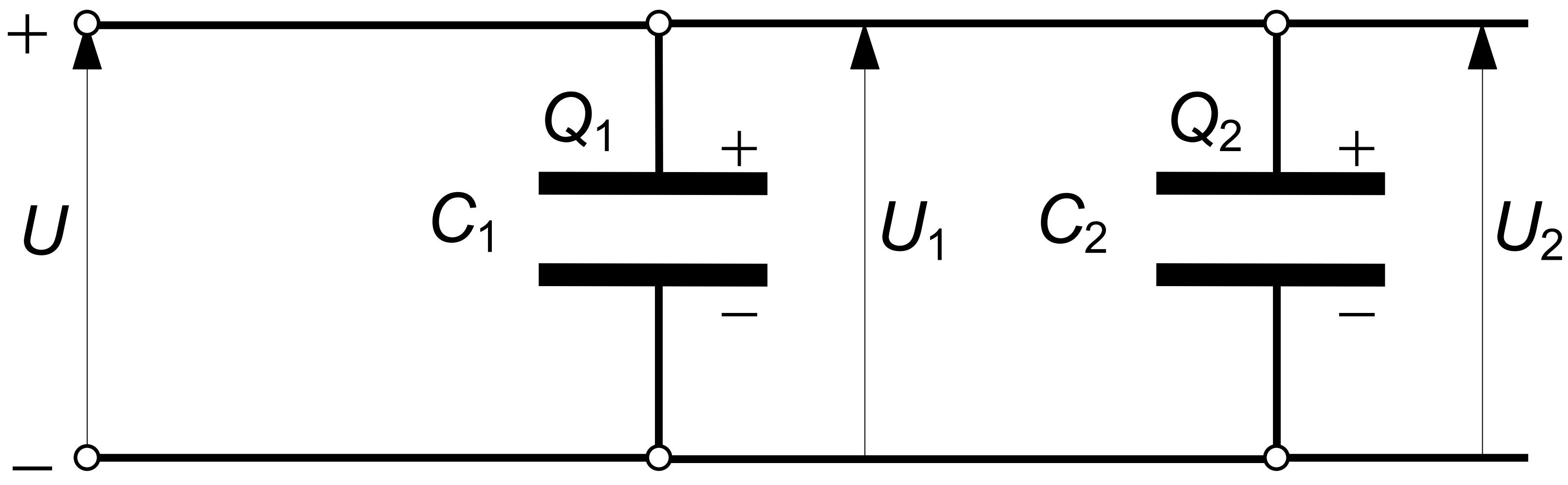
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{albo} \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}$$

Kondensator

Połączenia kondensatorów

Równoległe



Kondensator

Połączenia kondensatorów

Równoległe

$$U = U_1 = U_2 \quad \text{oraz} \quad Q = Q_1 + Q_2 = C_1 U_1 + C_2 U_2$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{U} = C_1 + C_2$$

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i$$

Energia kondensatora

$$W = \int_0^U CU\,\mathrm{d}U = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

Jeśli

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad \text{i} \quad U = Ed$$

$$\Downarrow$$

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V = \frac{DE}{2} V$$

Energia kondensatora

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2}\frac{S}{d} = \frac{Q^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}\frac{d}{S}$$

- $U = \text{const.} \wedge S = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad W \propto 1/d$
- $Q = \text{const.} \wedge S = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad W \propto d$