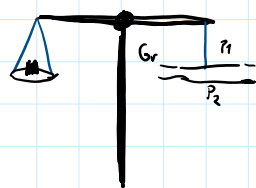


SILA DZIAŁAJĄCA NA OKŁADKI KONDENSATORA

- całkowite pole : $E = \frac{Q_s}{\epsilon_0}$
- pole jednej z okładek : $E = \frac{Q_s}{2\epsilon_0}$
- $E = \frac{U}{d} = \frac{Q_s}{\epsilon_0} = \frac{Q}{S \cdot \epsilon_0}$
- $E_A = \frac{Q}{2S\epsilon_0}$
- siła działająca na okładkę : $|F| = Q \cdot E_A$
- $|F| = \frac{Q^2}{2S\epsilon_0}$
- inne wyrażenia , przekształcenia $Q = S \cdot \epsilon_0 \cdot E$
- $|F| = \frac{S\epsilon_0 U^2}{d^2} = \frac{1}{2} \frac{CU^2}{d}$
- dla stałych wartości S, d można zapisać : $|F| = \text{const} \cdot U^2$
i można ten fakt wykorzystać do pomiaru napięcia

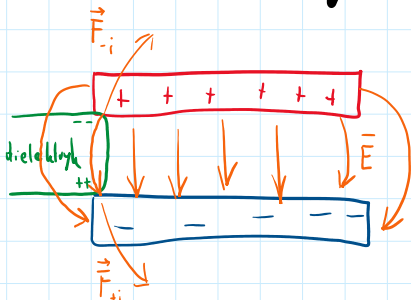
WOLTOMIERZ ELEKTROSTATYCZNY



waga, z jednej strony
ciężar, z drugiej siła

absolute electrometer

SILY DZIAŁAJĄCE NA DIELEKTRYK



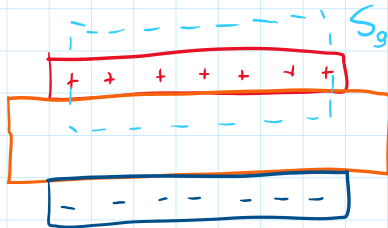
można dla demonstracji zrobić
„pompek elektrostatycznych”

PRAWO COULOMBA

- siła w ośrodku dielektrycznym \vec{F}_D

- siła w ośrodku dielektrycznym \vec{F}_D
- $\vec{F}_{AB} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_A q_B}{r_{AB}^2} \hat{r}_{AB} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_A q_B}{r_{AB}^2} \hat{r}_{AB}$
- $\vec{F}_D = \frac{\vec{F}_0}{\epsilon}$

PRAWO GAUSSA DLA DIELEKTRYKÓW



- $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{Q_V}{\epsilon_0} = \frac{Q_{V,free} + Q_{V,bound}}{\epsilon_0}$
- $\epsilon_0 \nabla \cdot \vec{E} = Q_{V,free} + Q_{V,bound}$
- $\nabla \cdot \vec{D} = Q_{V,free}$
- $\nabla \cdot (-\vec{P}) = Q_{V,bound}$
- $\nabla (\epsilon_0 \vec{E}) = Q_V$

uwaga: pole \vec{D} może istnieć także przy braku ładunków swobodnych

POTENCJAŁ I ENERGIA POTENCJALNA

- potencjał - energia potencjalna odniesiona do ładunku
- $V = \frac{E_p}{q}$ $E_p = qV$

ENERGIA UKŁADU ŁADUNKÓW

- energia w układzie ładunków = energia potrzebna do zbudowania tego układu
- energia oddana przez układ, gdy ten się „rozwali”

POTENCJAŁ OD ŁADUNKU PUNKTOWEGO

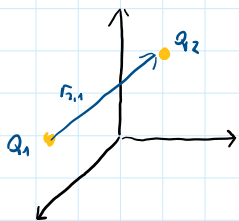
- $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$ $V_{i,k}$ - potencjał w punkcie i pochodzący od ładunku w punkcie k

UKŁAD DWÓCH ŁADUNKÓW



$$W_{2,1} = q_2 \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{1,2}} = q_2 V_{1,2}$$

zbliżenie 2 → 1 na odległość r



$$W_{2,1} = q_2 \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{1,1}} = q_2 V_{1,2}$$

zblizenie 2 → 1 na odlegosci r

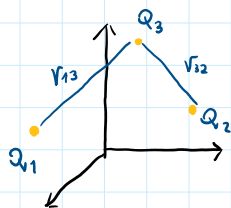
$$W_{1,2} = q_1 \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{1,2}} = q_1 V_{2,1}$$

zblizenie 1 → 2 na odl. r

$$W_e = q_1 V_{2,1} \quad \text{lub} \quad W_e = q_2 V_{1,2}$$

$$W_e = q_1 V_1 + q_2 V_2$$

UKŁAD 3 ŁADUNKÓW



$$W_{3,12} = q_3 \left(\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{3,1}} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{3,2}} \right) = q_3 (V_{3,1} + V_{3,2}) = W_{3,1} + W_{3,2}$$

zblizenie ładunku q3 do układu ładunków q1, q2

$$W_{e3} = \frac{1}{2} (q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3)$$

- budowanie układu: tworzymy układ 2 ładunków, dodajemy 3. ładunek

UKŁAD N ŁADUNKÓW

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i V_i \quad V_i = \sum_{k=1}^N V_{i,k}$$

DLA ROZKŁADU ŁADUNKÓW:

$$W_e = \frac{1}{2} \int q_v V dv$$

q_v - ładunki swobodne, V - potencjal od wszystkich ładunków

ENERGIA W DIELEKTRYKU

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V q_v V dv$$

$$q_v = q_{v, \text{free}} = \nabla \cdot \vec{D}$$

$$W_e = \frac{1}{2} \int (\nabla \cdot \vec{D}) V dv$$

$$(\nabla \cdot \vec{D}) \cdot V = \nabla \cdot (V \vec{D}) - (\nabla V) \cdot \vec{D}$$

- dalsze wyprowadzenia: przekształcenia

- ponieważ pole elektryczne wypełnia całą przestrzeń:

$$V \rightarrow \infty : \quad \vec{D} \sim \frac{1}{r^2} \quad V \sim \frac{1}{r} \quad dS \sim r^2$$

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V (\vec{E} \cdot \vec{D}) dv = \frac{1}{2} \int_V \epsilon \cdot |\vec{E}|^2 dv$$

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \cdot \vec{E}$$

ENERGIA A GĘSTOŚĆ ENERGII

ENERGIA A GĘSTOŚĆ ENERGII

- energia - wielkość skalarna charakteryzująca zdolność układu fizycznego (jego stanu) do wykonania pracy.

$$W [J]$$

- gęstość energii - ilość energii w jednostce objętości

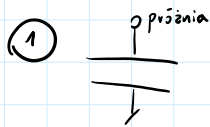
$$w = \frac{W}{V} = \left[\frac{J}{m^3} \right]$$

$$W_c = \int_V w dv$$

- gęstość energii w dielektryku: $w = \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D} = \frac{1}{2} \epsilon \cdot |\vec{E}|^2$

$$w_e = \int_0^{D_{max}} E dD = \int_0^{E_{max}} \epsilon E dE$$

PRZYKŁADY



$$U = 1V$$

$$d = 20mm$$

$$W = 2,8pJ$$

②



$$R = 50mm$$

$$R_d = 25mm$$

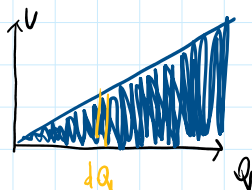
$$W = 4,6pJ$$

ENERGIA KONDENSATORA

$$dW = U dq \quad U = \frac{Q}{C} \quad dW = \frac{Q}{C} dq$$

$$W = \int dW = \int_0^Q \frac{Q}{C} dq \quad W = \frac{1}{C} \left[\frac{Q^2}{2} \right]_0^Q = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

$$W = \frac{1}{2} Q U = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$



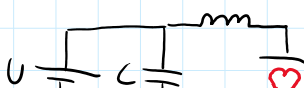
$$\text{gęstość energii: } \frac{W}{V} = \frac{\frac{1}{2} C U^2}{V} \quad v = s \cdot d \quad C = \frac{\epsilon \cdot s}{d} \quad U = E d$$

$$w = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

- dodanie dielektryka \rightarrow wzrost energii (stałe napięcie)

- stały ładunek: dodanie dielektryka \rightarrow spadek energii

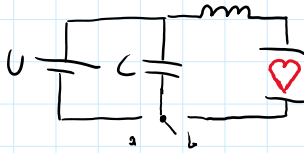
DEFIBRYLATOR



$$C = 32 \mu F$$

$$U = 5 kV$$

zalecane energii:
150-360J



- $C = 32 \mu F$
- $V = 5 kV$
- $W = 400 J$

zalecane energie:
150-360 J

KOLOŚ : $|F| = \text{const} \cdot V^2$ / prawo Gaussa / układ N ładunków / dla rozkładu ładunków /
energia w dielektryku / energia kondensatora

next week: podsumowanie elektrostatyki