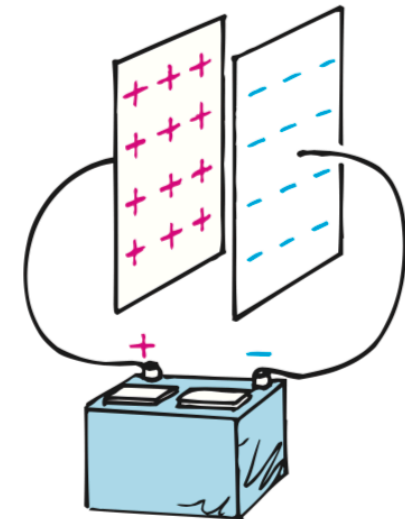
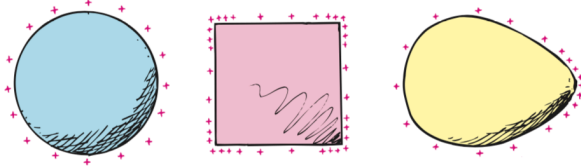


Wykład 10

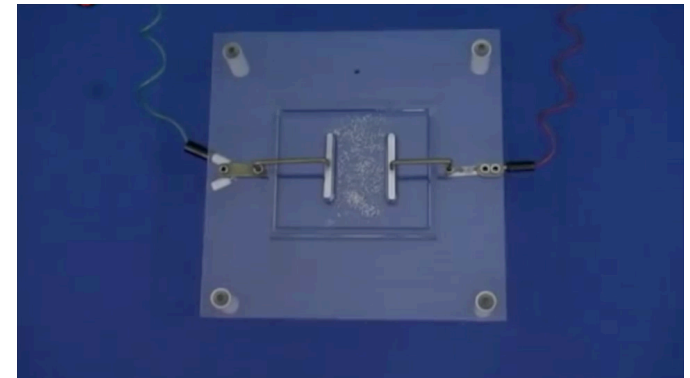
Właściwości przewodników, kondensatory



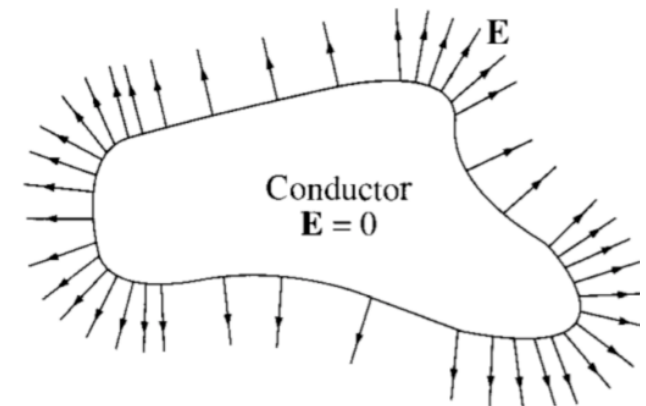
WŁAŚCIWOŚCI IDEALNEGO PRZEWODNIKA

Idealny przewodnik to materiał zawierająca nieskończony zapas zupełnie swobodnych ładunków. Z tej definicji wynikają podstawowe własności elektrostatyczne idealnych przewodników:

- Wewnątrz izolowanego przewodnika $\mathbf{E} = 0$.
- W pobliżu powierzchni izolowanego przewodnika pole $\mathbf{E}$ jest prostopadłe do powierzchni.
- Nieskompensowany ładunek może występować jedynie na powierzchni izolowanego przewodnika.
- Potencjał w izolowanym od otoczenia przewodniku jest stały, $V = \text{const}$. Przewodnik jest ciałem ekwipotencjalnym.

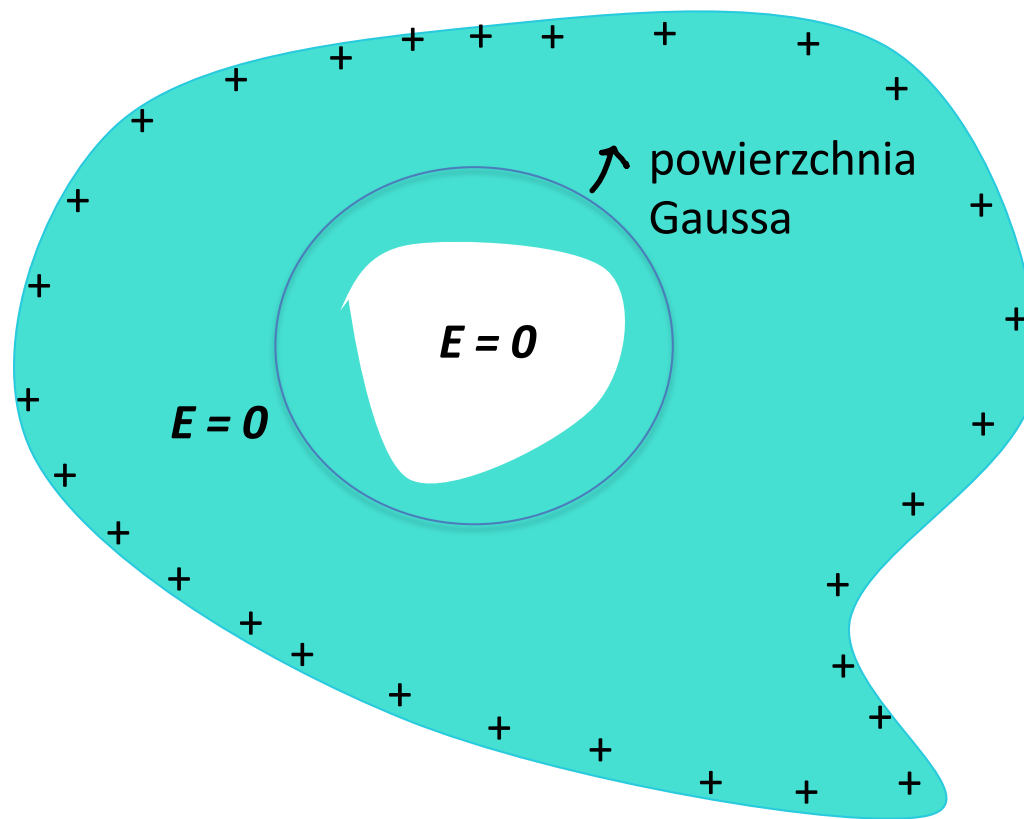


<https://www.youtube.com/watch?v=P7WhUwFeNqM>



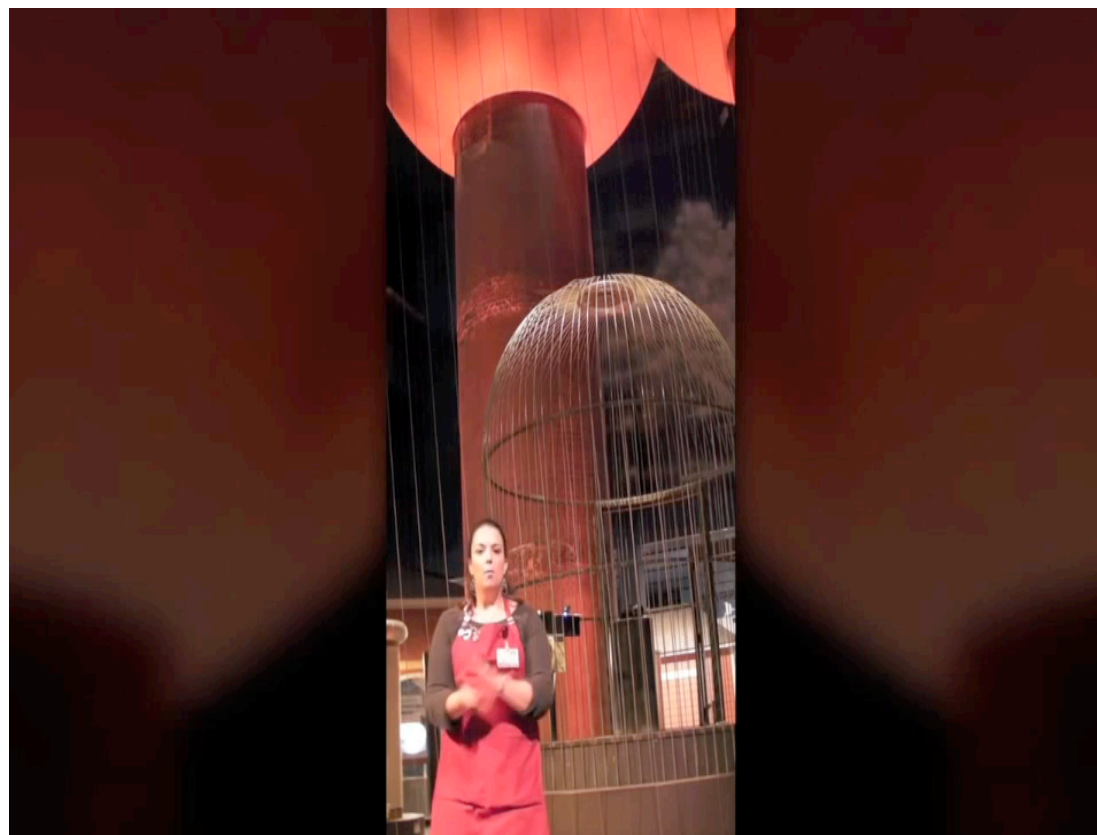
WNĘKA W PRZEWODNIKU

Jeżeli we wnętrzu przewodnika znajduje się wnęka, to pole E wewnątrz wnęki jest równe zero.



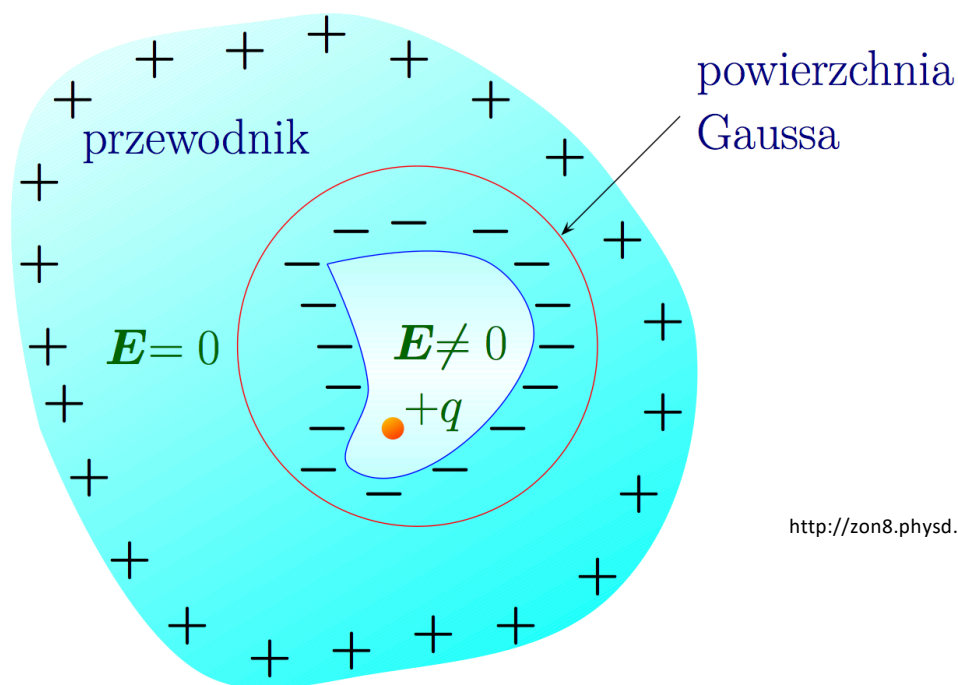
KLATKA FARADAYA

W pustej wnęce, bez ładunku, pole E jest zerowe.



WNĘKA W PRZEWODNIKU

Jeżeli we wnętrzu przewodnika znajduje się wnęka z ładunkiem $+q$ w jej obszarze, to pole $\mathbf{E}$ wewnątrz wnęki jest różne od zera.

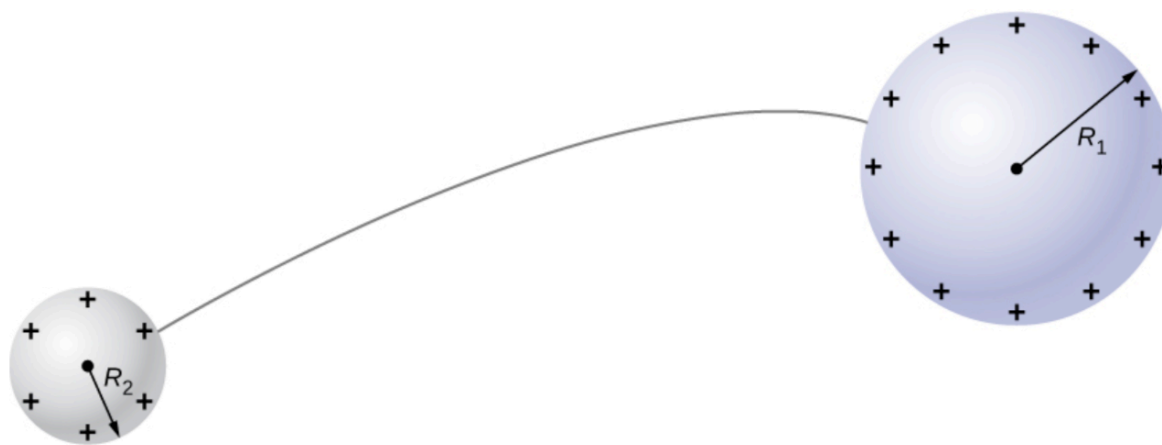


<http://zon8.physd.amu.edu.pl/~tanas/>

Ładunek $+q$ indukuje ładunek przeciwny na powierzchni wnęki. Ładunek na powierzchni wnęki modyfikuje rozkład ładunku na powierzchni przewodnika, tak by pole w jego wnętrzu (po za obszarem wnęki) pozostało zerowe.

Rozkład ładunku na powierzchni przewodników

Przewodzące kule połączone przewodzącym drutem:



$$k \frac{q_2}{R_2} = k \frac{q_1}{R_1}$$

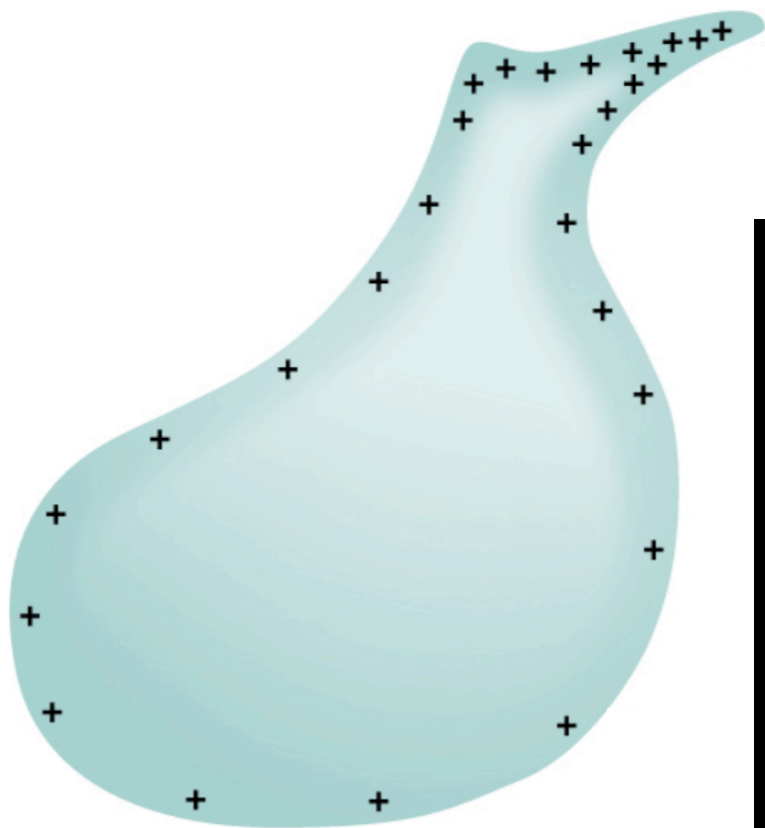
potencjał cienkiej sfery na jej powierzchni
(patrz wcześniejsze wykłady)

$$\frac{q_2}{R_2} = \frac{q_1}{R_1} \quad \longrightarrow \quad \frac{\sigma_2 4\pi R_2^2}{R_2} = \frac{\sigma_1 4\pi R_1^2}{R_1}$$

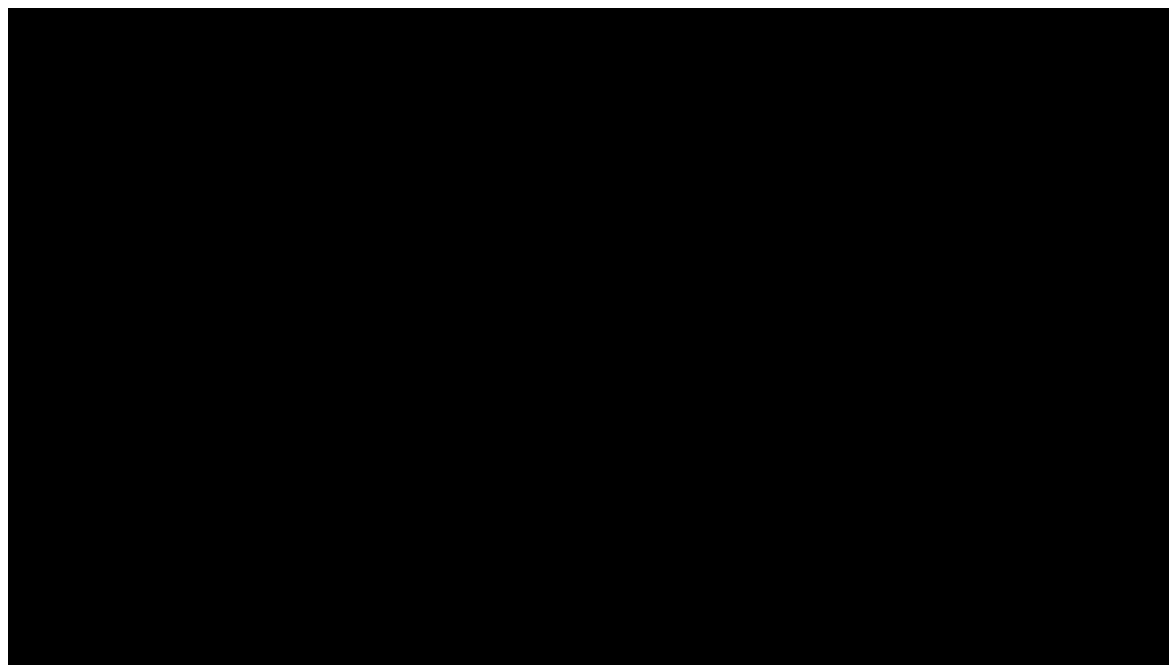
$$\longrightarrow \quad \sigma_2 R_2 = \sigma_1 R_1$$

im mniejszy promień tym większa
gęstość ładunku

Rozkład ładunku na powierzchni przewodników

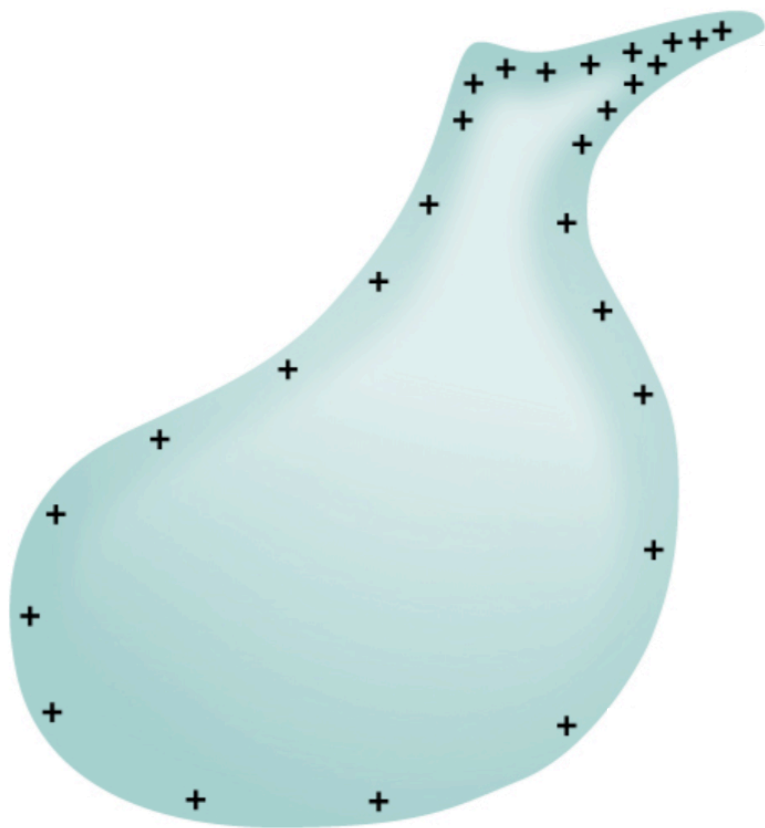


Większą gęstość ładunku obserwujemy w miejscach o małym promieniu krzywizny powierzchni.



<https://www.youtube.com/watch?v=skTCdhBE61Q>

Rozkład ładunku na powierzchni przewodników



Większą gęstość ładunku obserwujemy w miejscach o małym promieniu krzywizny powierzchni.



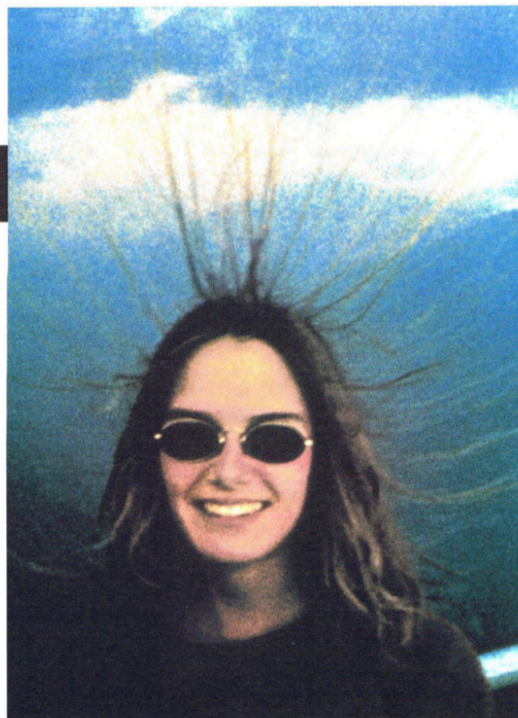
<https://www.youtube.com/watch?v=P7WhUwFeNqM>

Piorunochrony

Oglądając z platformy widokowej Park Narodowy Sekwoi, kobieta poczuła, że podnoszą się jej włosy na głowie. Jej brat, rozbawiony tym widokiem, zrobił jej zdjęcie. Pięć minut po ich odejściu w platformę uderzył piorun, zabijając jedną osobę i raniąc siedem.

Co było przyczyną podniesienia się włosów na głowie kobiety?

Odpowiedź znajdziesz w tym rozdziale.



Większą gęstość ładunku obserwujemy w miejscach o małym promieniu krzywizny powierzchni.

Zjawisko wykorzystuje się w piorunochronach.

Home Without Lightning Rod

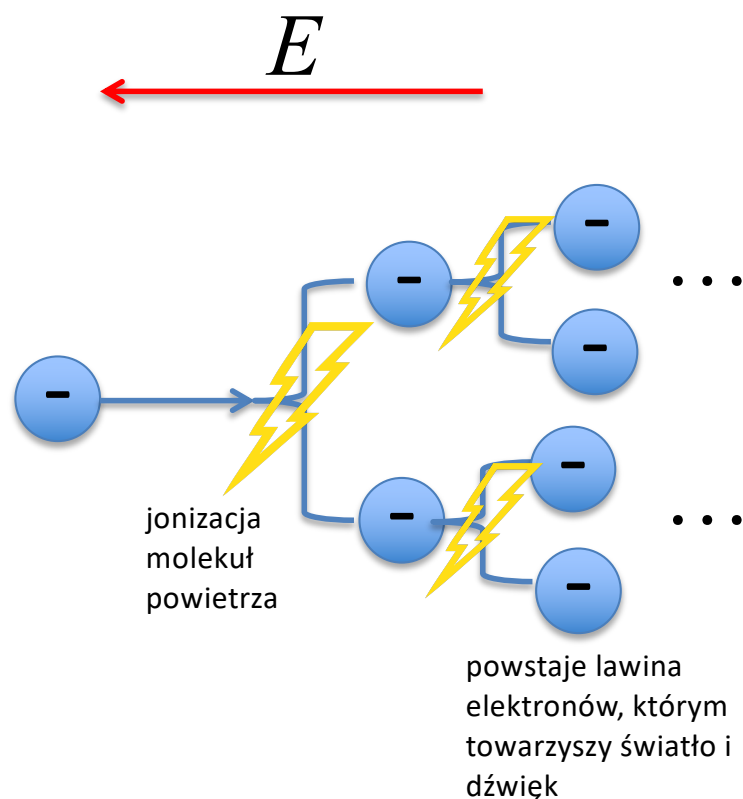


Home With Lightning Rod



The presence of a lightning rod allows for the **GRADUAL** release of static charge from a storm cloud. This prevents the sudden and explosive discharge which is characteristic of a lightning strike.

Wyładowanie elektryczne w powietrzu



Energie jonizacji molekuł powietrza:

$$U_{N_2} = 15.5 \text{ eV}$$

$$U_{O_2} = 12.5 \text{ eV}$$

Średnia droga elektronu pomiędzy zderzeniami z cząsteczkami powietrza (tzw. droga swobodna):

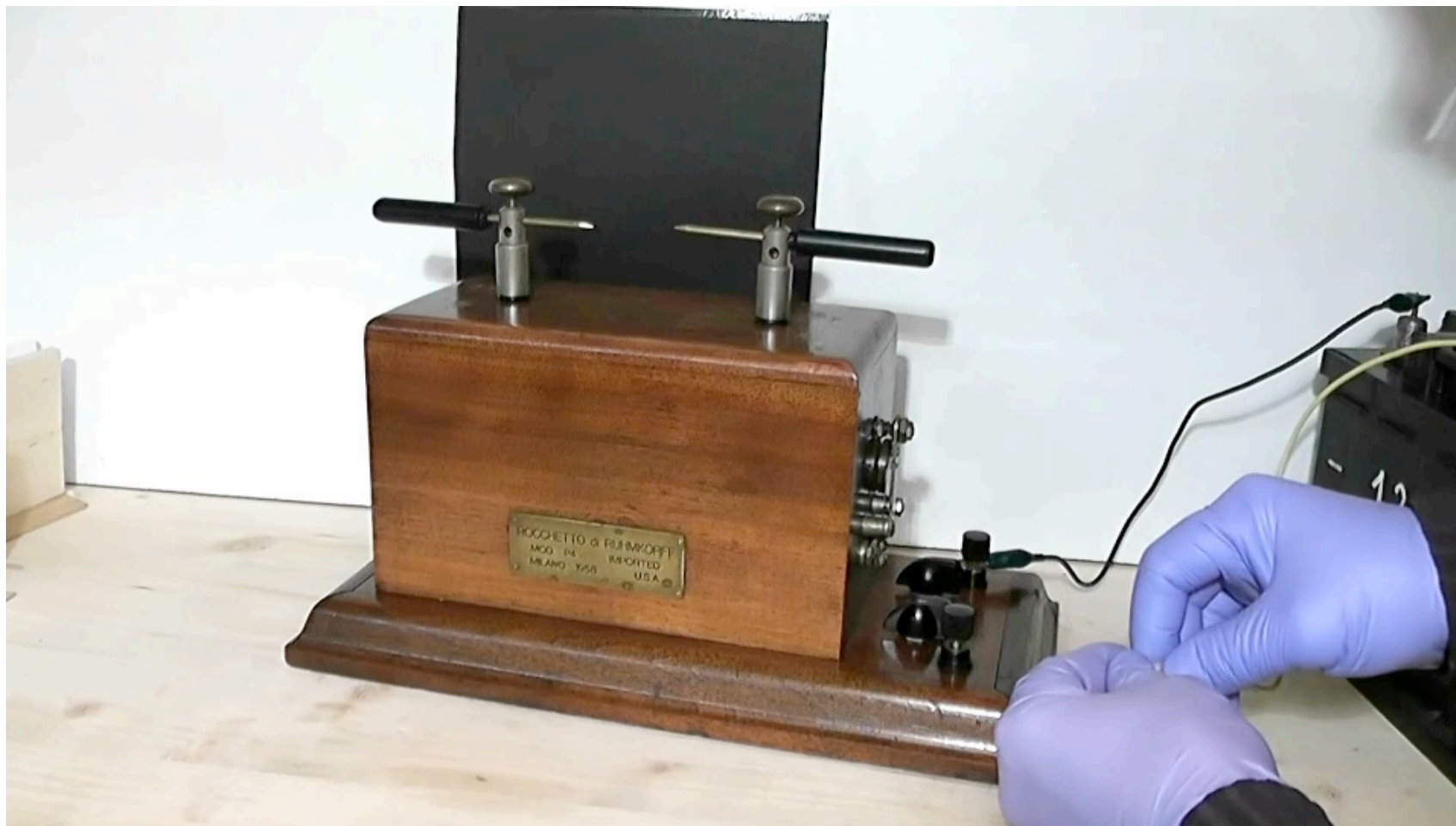
$$\Delta x = 1 \text{ } \mu\text{m}$$

Teoretyczna wartość pola, przy którym następuje przebiecie :

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{eU}{\Delta x} \sim 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

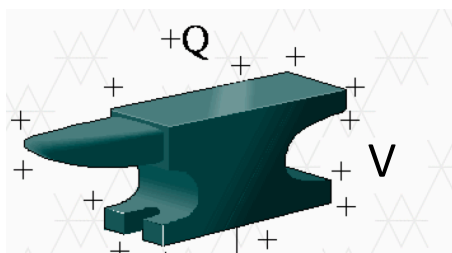
Pomiary eksperymentalne pokazują, że w rzeczywistości przebiecie w suchym powietrzu występuje przy natężeniu pola równym w przybliżeniu $3 \times 10^6 \text{ V/m} \approx 30\,000 \text{ V/cm}$.

Wyładowanie elektryczne w powietrzu



<https://www.youtube.com/watch?v=vOTmbbl3jEg>

Pojemność elektryczna izolowanego przewodnika



Izolowany przewodnik naładowany ładunkiem Q charakteryzuje się potencjałem V (potencjał odniesienia w nieskończoności).

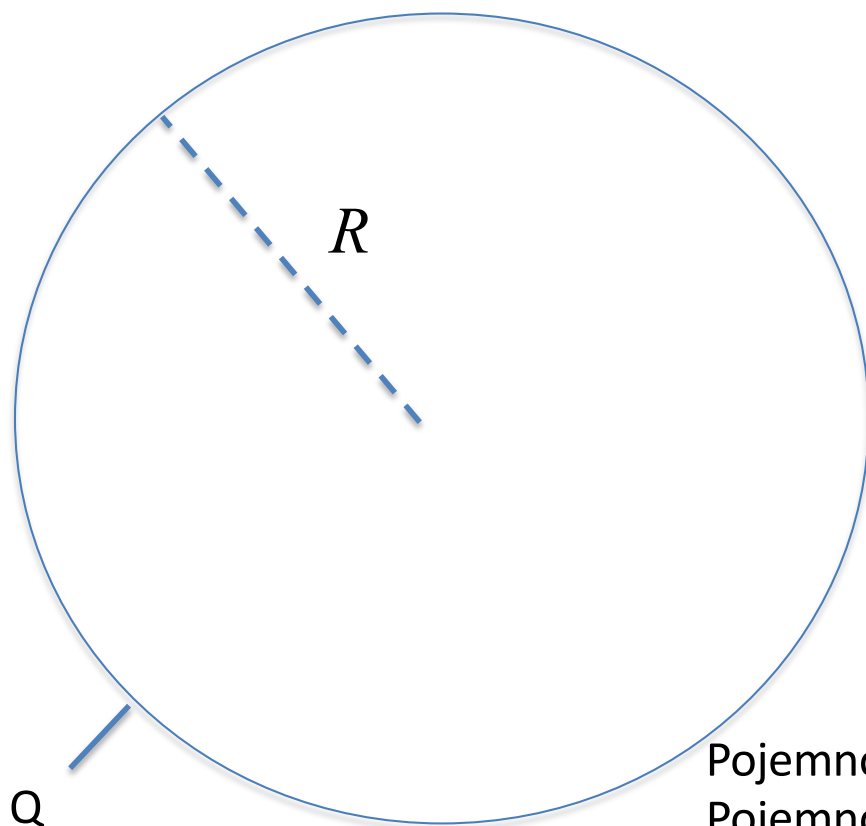
Pojemność izolowanego (odosobnionego) przewodnika określa stosunek wartości bezwzględnej ładunku zgromadzonego na przewodniku do wartości bezwzględnej jego potencjału. **Jednostką pojemności elektrycznej jest Farad, $[F = C/V]$.**

pojemność elektryczna
izolowanego przewodnika:

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

Potencjał mówi ile ładunku należy dodać aby zwiększyć potencjał przewodnika o jednostkę (1V).

Pojemność elektryczna przewodzącej kuli



$$V = k \frac{Q}{R} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$



$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon_0 R$$

Pojemność zależy tylko od geometrii przewodnika.
Pojemność jest wielkością geometryczną! – nie zależy od ładunku na okładkach oraz potencjału przewodnika.

R	C
6400 km (promień Ziemi)	~ 700 μF
0.3 m (czasza van de Graaff)	~ 20 pF
1 cm	~ 1 pF

Butelka lejdejska – pierwszy kondensator

<https://www.youtube.com/watch?v=NUUeGianTKM>



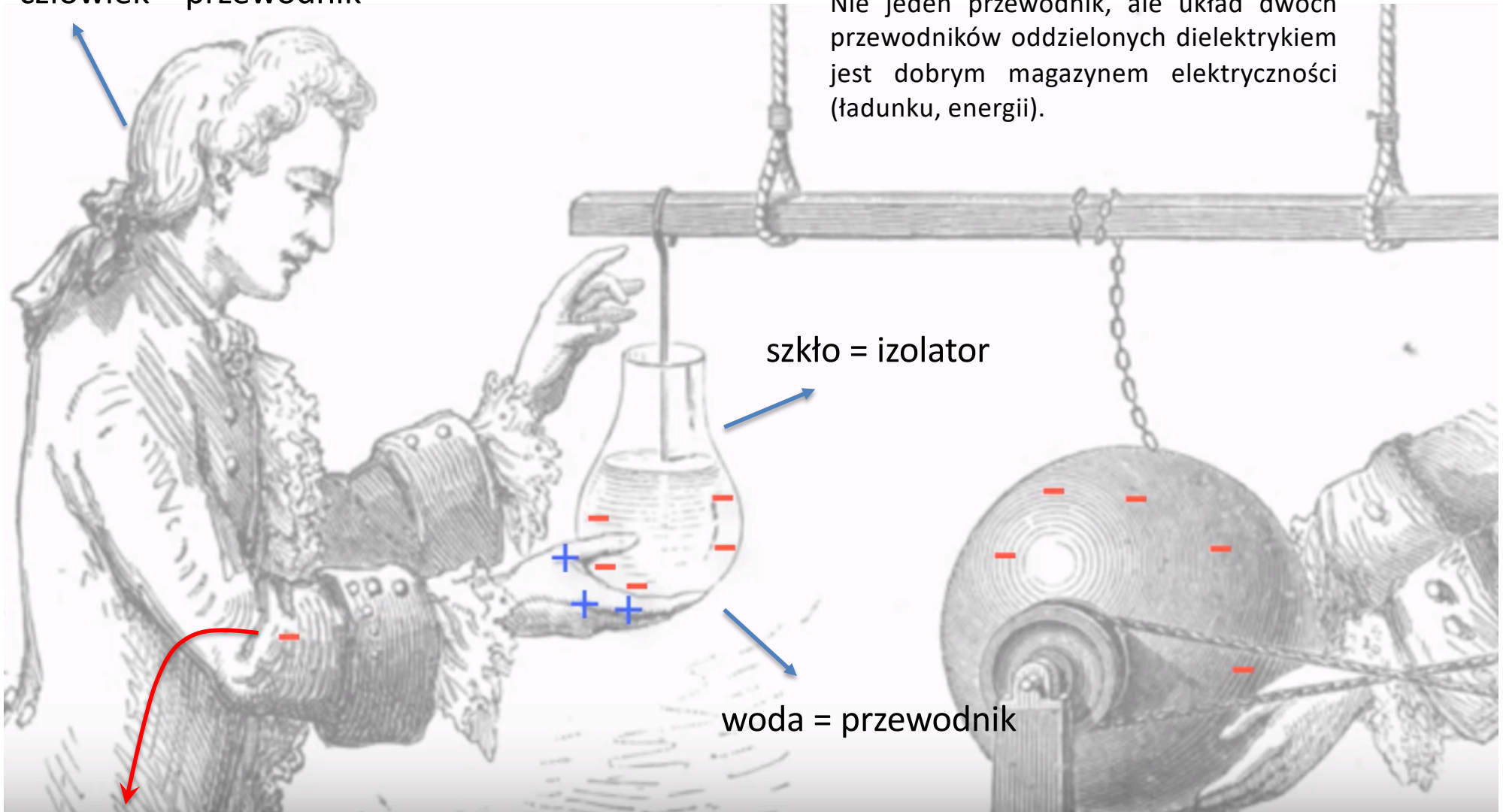
Dlaczego szok elektryczny był tak duży?

człowiek = przewodnik

Nie jeden przewodnik, ale układ dwóch przewodników oddzielonych dielektrykiem jest dobrym magazynem elektryczności (ładunku, energii).

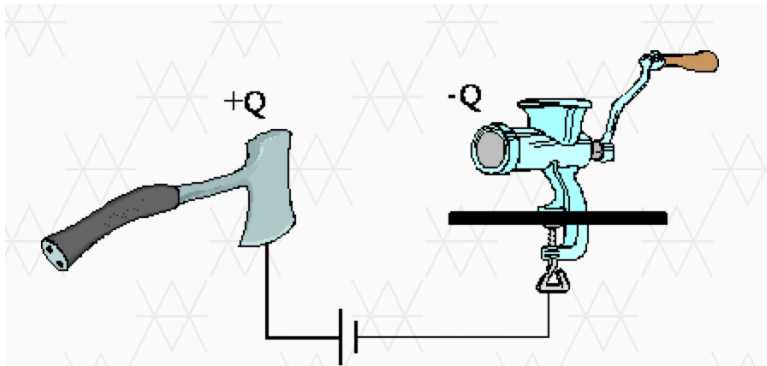
szkło = izolator

woda = przewodnik



Elektrony gromadzące się w butelce wymuszały ruch elektronów z dłoni w kierunku Ziemi. Im dłoń była bardziej pozytywna tym więcej elektronów gromadziło się w butelce. Proces ten napędzał się aż osiągnięto maksymalną pojemność ładunku (zależną od różnicy potencjałów pomiędzy ziemią i kulą).

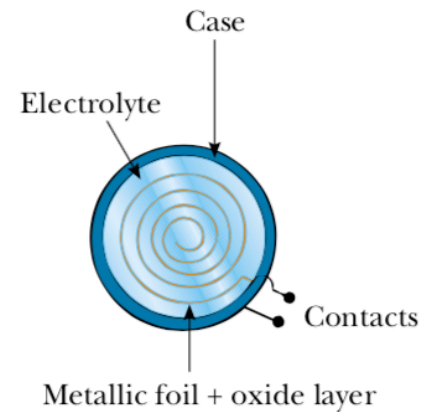
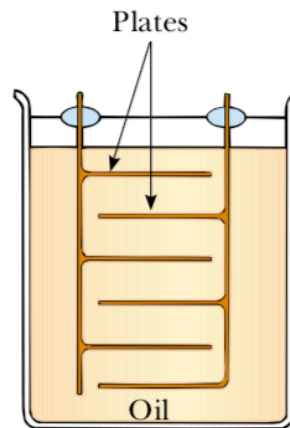
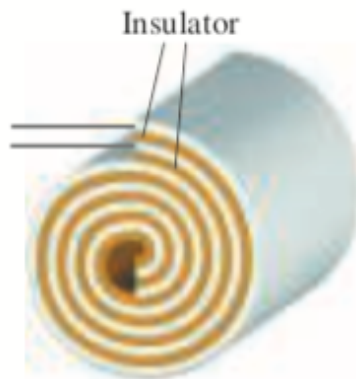
Kondensator



http://www.if.pw.edu.pl/~anadam/WykladyFO/FoWWW_32.html

Kondensator to układ dwóch przewodników (okładek) rozdzielonych dielektrykiem (czyli izolowanych od siebie), na których znajdują się jednakowe (co do wartości bezwzględnej) ładunki o przeciwnych znakach.

Różne geometrie:



Kondensatory wykorzystywane są do magazynowania ładunku i energii elektrycznej!

Pojemność kondensatora

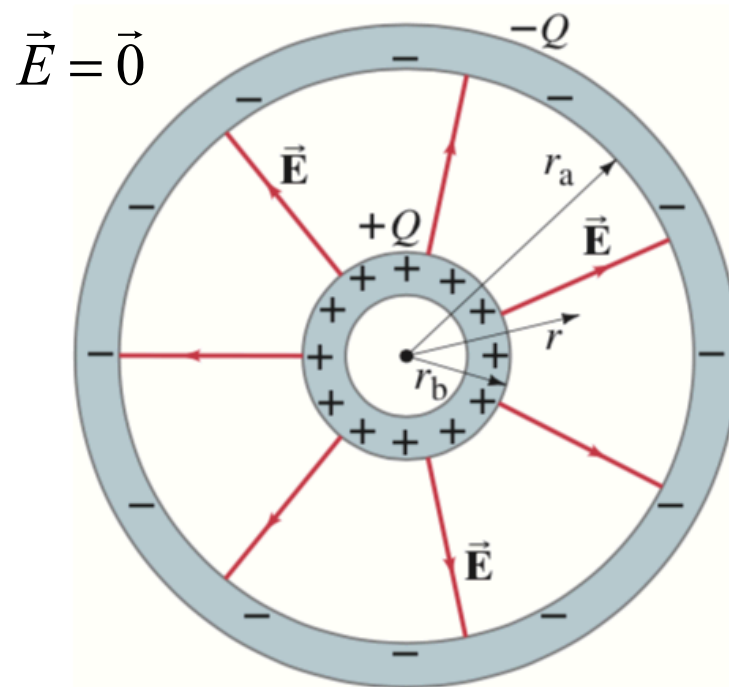
Kondensator charakteryzuje pojemność określająca zdolność kondensatora do gromadzenia ładunku i energii:

$$C = \frac{Q}{\Delta V_{AB}}$$



Q – wartość bezwzględna ładunku zgromadzonego na jednej okładce
 ΔV_{AB} – wartość bezwzględna napięcia (różnica potencjałów) między okładkami kondensatora

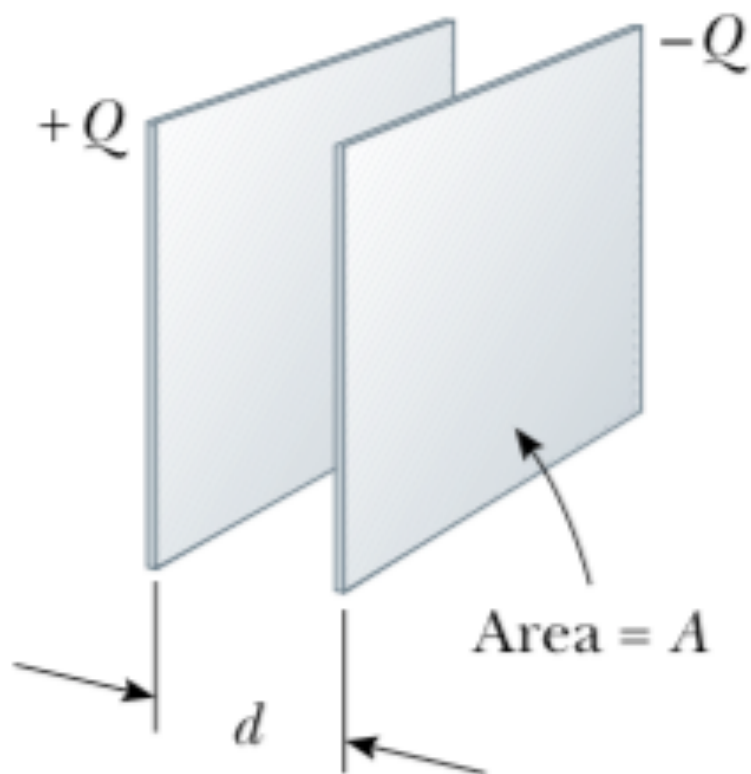
Pojemność kondensatora kulistego



$$\Delta V_{ba} = V_b - V_a = - \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = -kQ \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{r^2} dr = kQ \left(\frac{r_a - r_b}{r_a r_b} \right)$$

$$C = \frac{Q}{\Delta V_{ba}} = \frac{1}{k} \frac{r_a r_b}{r_a - r_b} = 4\pi\epsilon_0 \left(\frac{r_a r_b}{r_a - r_b} \right)$$

Pojemność kondensatora płaskiego

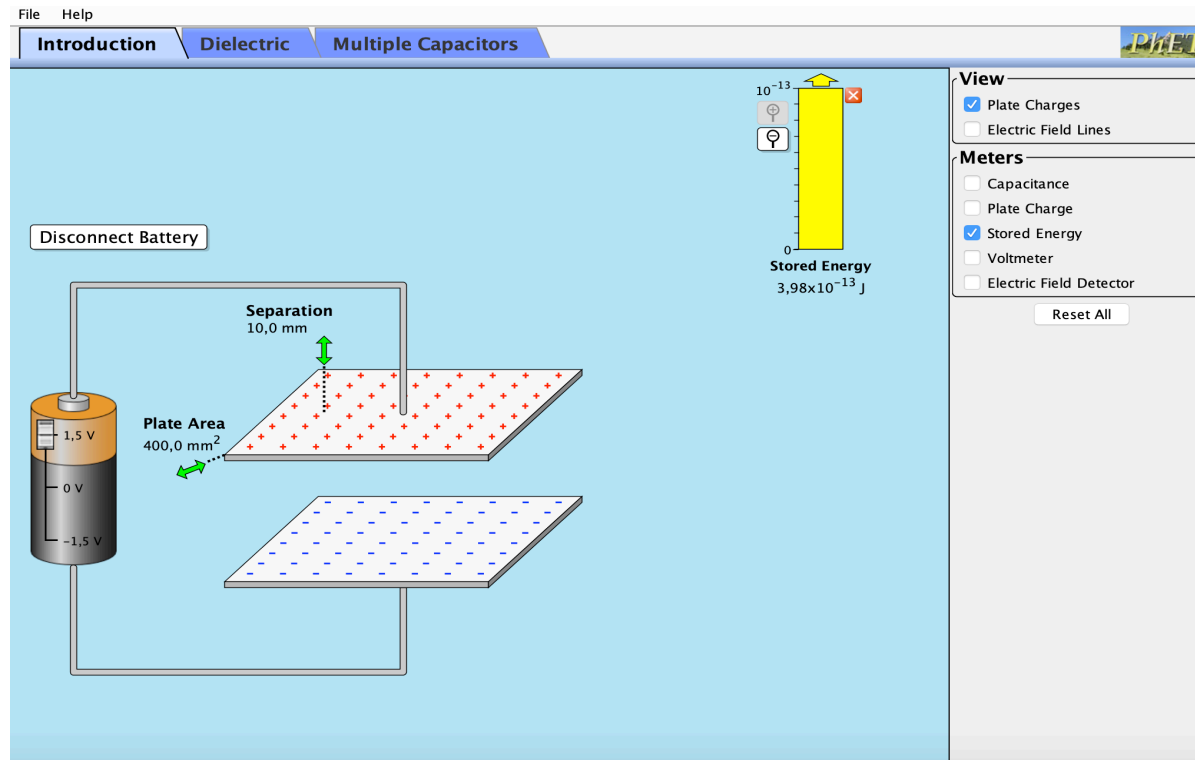


$$\Delta V_{+/-} = Ed, \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{A\epsilon_0}$$

$$C = \frac{Q}{\Delta V_{+/-}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Symulacja kondensatora płaskiego

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/capacitor-lab>



Pokazać:

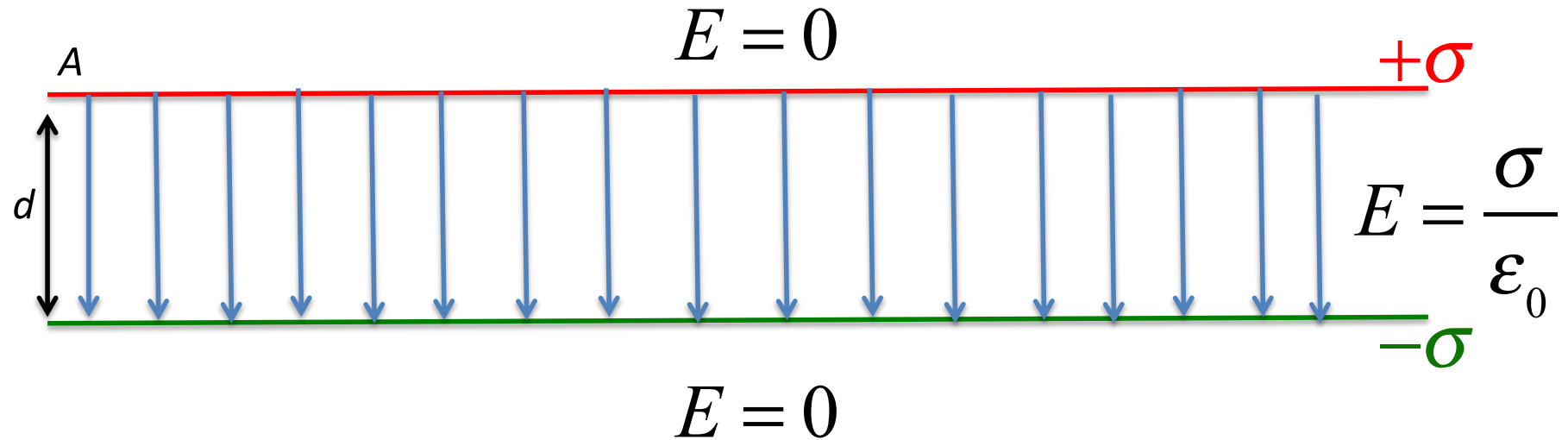
- Pojemność nie zależy od ładunku na okładkach
- Pojemność nie zależy od napięcia między okładkami
- Pojemność zależy tylko od geometrii kondensatora

Podstawowe właściwości kondensatora płaskiego

Pojemność kondensatora płaskiego

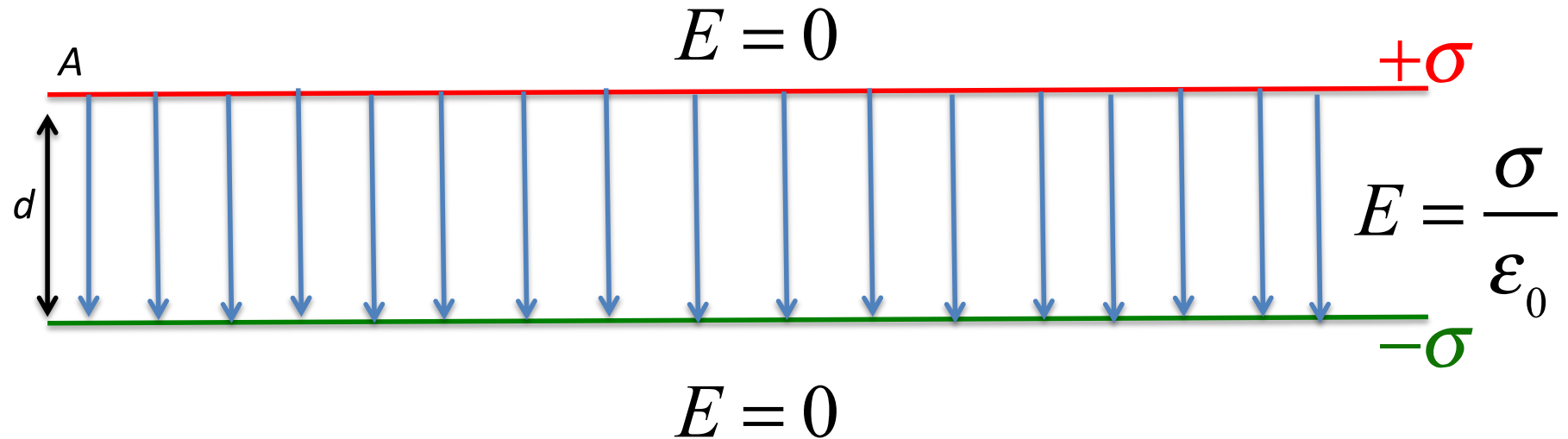
<https://www.youtube.com/watch?v=P7WhUwFeNqM>

Energia zgromadzona w kondensatorze



Elektrostatyczna energia potencjalna zgromadzona w kondensatorze płaskim:

Energia zgromadzona w kondensatorze



Elektrostatyczna energia potencjalna zgromadzona w kondensatorze płaskim: C ($E \cdot d / \epsilon_0$)

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int_{\text{cała przestrzeń}} E^2 d\tau = \frac{\epsilon_0}{2} \frac{\sigma^2}{\epsilon_0^2} \int d\tau = \frac{\epsilon_0}{2} \frac{\sigma^2}{\epsilon_0^2} A d = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 \frac{A}{d} \right) \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0} d \right)^2$$

$C = \frac{Q}{\Delta V}$

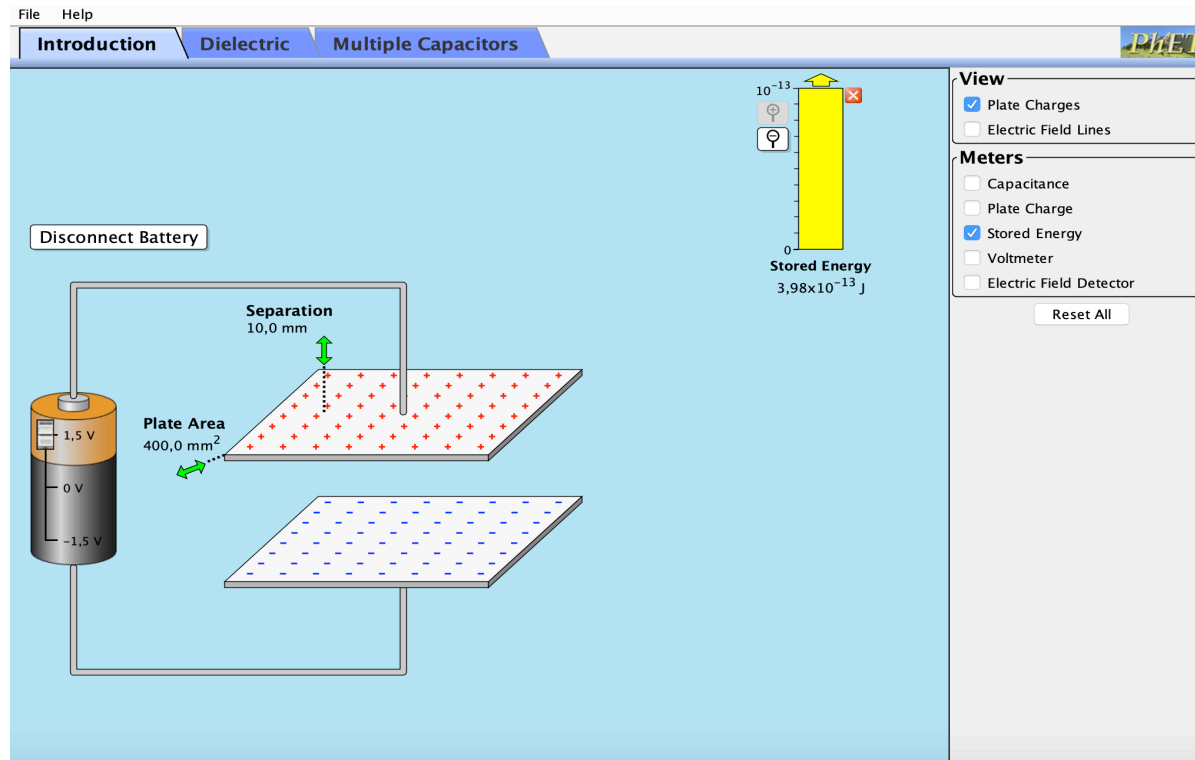
$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\Delta V}$$

$$U = \frac{1}{2} C \Delta V^2$$

słuszne dla każdego kondensatora!

Symulacja kondensatora płaskiego

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/capacitor-lab>



Pokazać:

- Energia zależy od ładunku na okładkach oraz napięcia między okładkami
- Energia zależy od pojemności

Zastosowania energii zgromadzonej w kondensatorze

Defibrylator- aż do 360 J może być zmagazynowanych w polu elektrycznym kondensatora w tym urządzeniu. Energia ta w całości dostarczana jest pacjentowi w przeciągu 2 ms, odpowiada to mocy ok. 180 kW!



Błyski lampy w aparacie fotograficznym powstają przez rozładowanie energii zgromadzonej w kondensatorze (energia elektryczna zamieniana jest na energię świetlną).



<http://camerarepair.blogspot.com/2007/11/important-warning-camera-flash.html>

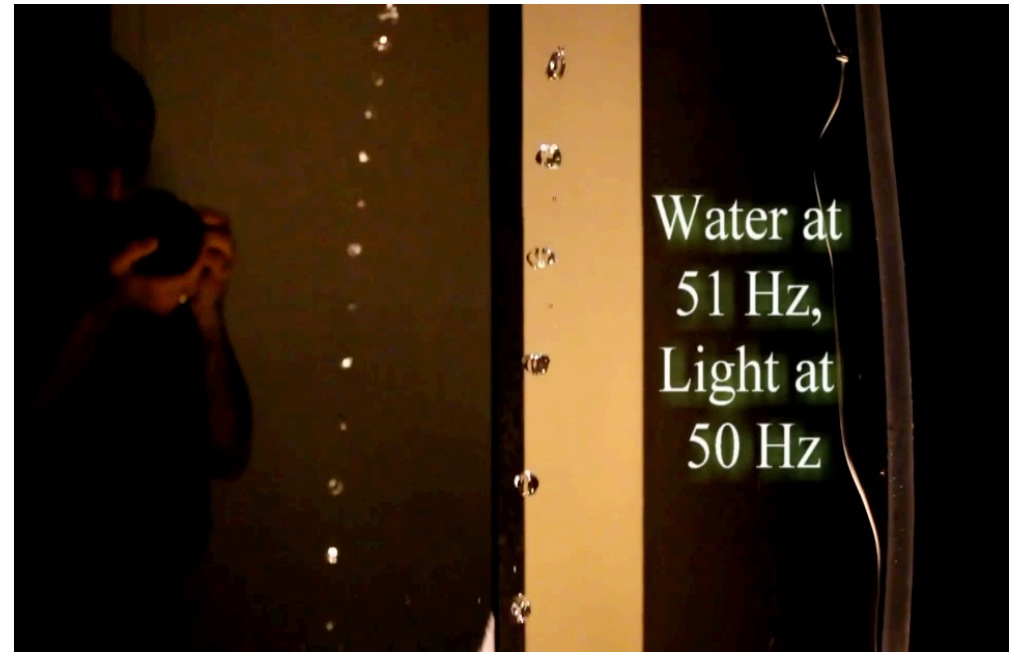
Błyski lampy stroboskopowej powstają przez ciągłe ładowanie i rozładowywanie kondensatora.



Efekty związane z lampą stroboskopową

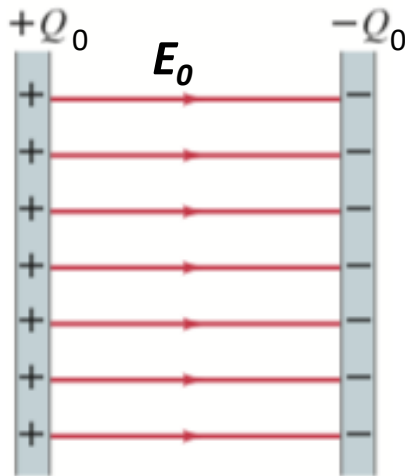
Strobe of a Falling Ball

MIT Department of Physics
Technical Services Group

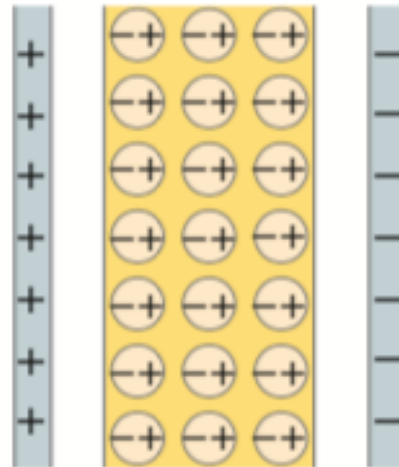


<https://www.youtube.com/watch?v=xQ4znShIK5A>

Dielektryk w kondensatorze

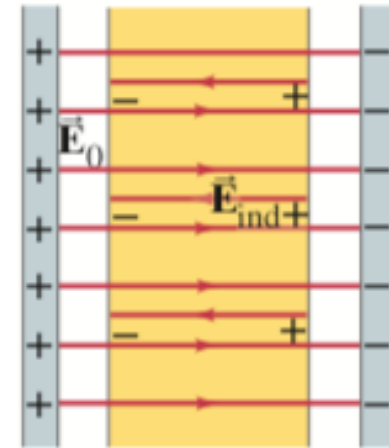


$$E_0 = \frac{\Delta V_0}{d}$$



polaryzacja dielektryka,
na jego powierzchni powstają
ładunki związane, wewnątrz
dielektryka indukuje się pole
o wartości

$$E_{\text{ind}} = bE_0, \quad b < 1$$



$$\begin{aligned} E &= E_0 - E_{\text{ind}} = \\ &= E_0 (1 - b) = \\ &= \frac{E_0}{\epsilon_r}, \quad \frac{1}{\epsilon_r} = (1 - b) \end{aligned}$$

W wyniku polaryzacji dielektryka natężenie pola
elektrycznego w obszarze kondensatora maleje!

$\epsilon_r \geq 1$ - stała dielektryczna
(względna przenikalność dielektryczna)

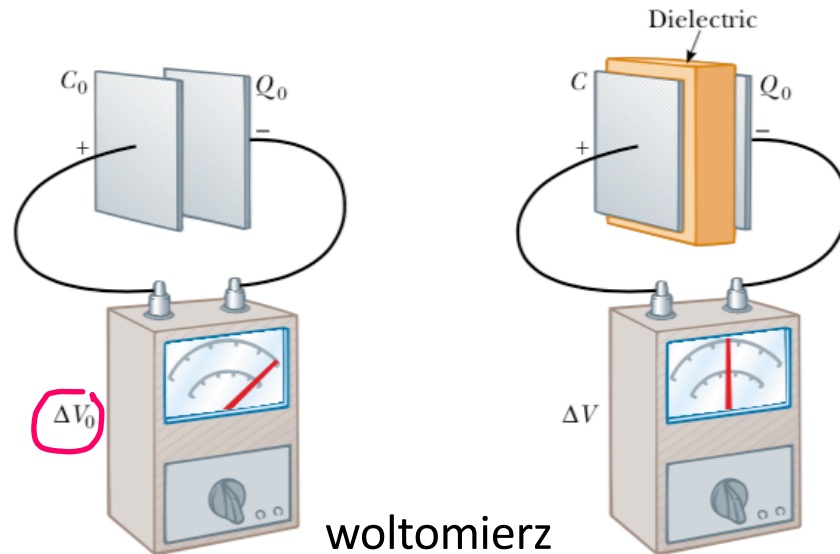
Stała dielektryczna różnych materiałów

TABLE 26.1 Dielectric Constants and Dielectric Strengths of Various Materials at Room Temperature

Material	Dielectric Constant κ	Dielectric Strength ^a (V/m)
Air (dry)	1.000 59	3×10^6
Bakelite	4.9	24×10^6
Fused quartz	3.78	8×10^6
Neoprene rubber	6.7	12×10^6
Nylon	3.4	14×10^6
Paper	3.7	16×10^6
Polystyrene	2.56	24×10^6
Polyvinyl chloride	3.4	40×10^6
Porcelain	6	12×10^6
Pyrex glass	5.6	14×10^6
Silicone oil	2.5	15×10^6
Strontium titanate	233	8×10^6
Teflon	2.1	60×10^6
Vacuum	1.000 00	—
Water	80	—

^a The dielectric strength equals the maximum electric field that can exist in a dielectric without electrical breakdown. Note that these values depend strongly on the presence of impurities and flaws in the materials.

Dielektryk w kondensatorze



$$E = \frac{\Delta V}{d} \Rightarrow \frac{E_0}{\epsilon_r} = \frac{\Delta V_0}{\epsilon_r d}$$

Wstawienie dielektryka pomiędzy okładki kondensatora powoduje spadek napięcia na kondensatorze:

$$\Delta V = \frac{\Delta V_0}{\epsilon_r}, \quad \epsilon_r > 1$$

Ponieważ ładunek Q_0 na okładkach kondensatora nie zmienia się, oznacza to, że pojemność kondensatora wzrosła!

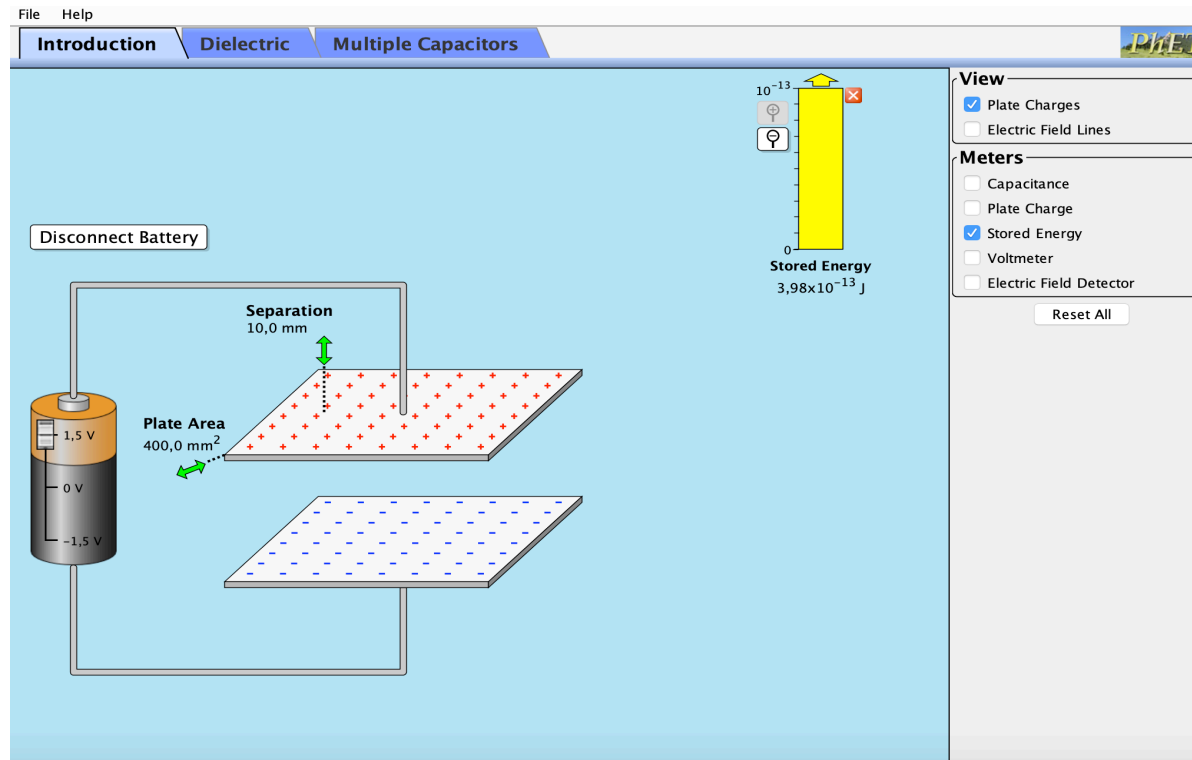
$$C = \frac{Q_0}{\Delta V} = \epsilon_r \frac{Q_0}{\Delta V_0} = \epsilon_r C_0$$

Pojemność kondensatora płaskiego z dielektrykiem:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Symulacja kondensatora płaskiego

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/capacitor-lab>



Pokazać:

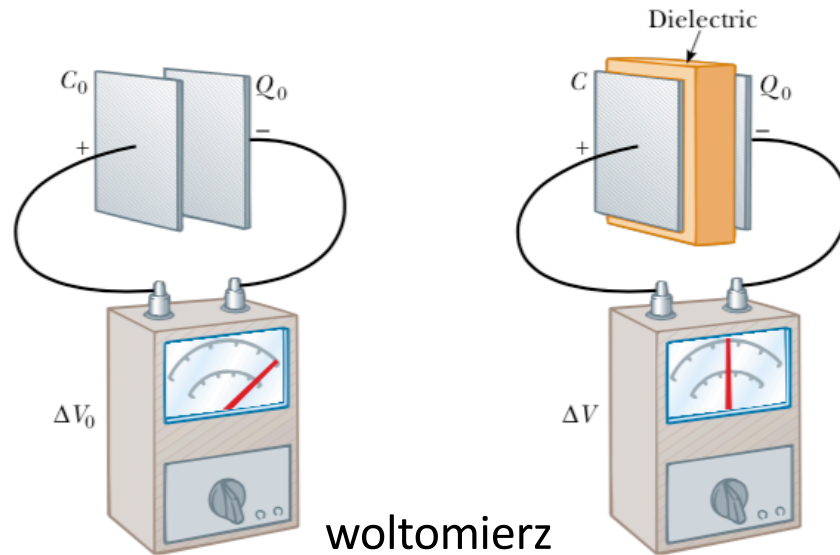
- Zmianę pojemności, napięcia i pola elektrycznego po umieszczeniu dielektryka przy odłączonej baterii

Podstawowe właściwości kondensatora płaskiego

Im większa powierzchnia
okładek tym większa
pojemność kondensatora.

<https://www.youtube.com/watch?v=P7WhUwFeNqM>

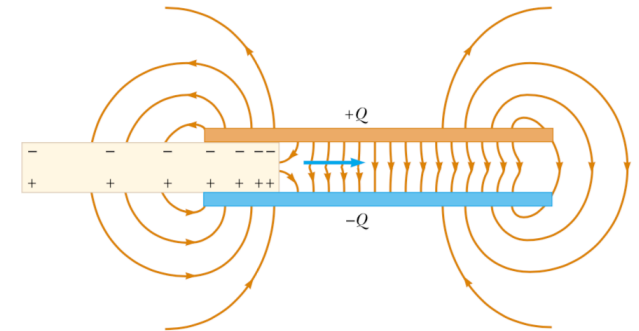
Dielektryk w kondensatorze - energia



$$E = \frac{\Delta V}{d} \Rightarrow \frac{E_0}{\epsilon_r} = \frac{\Delta V_0}{\epsilon_r d}$$

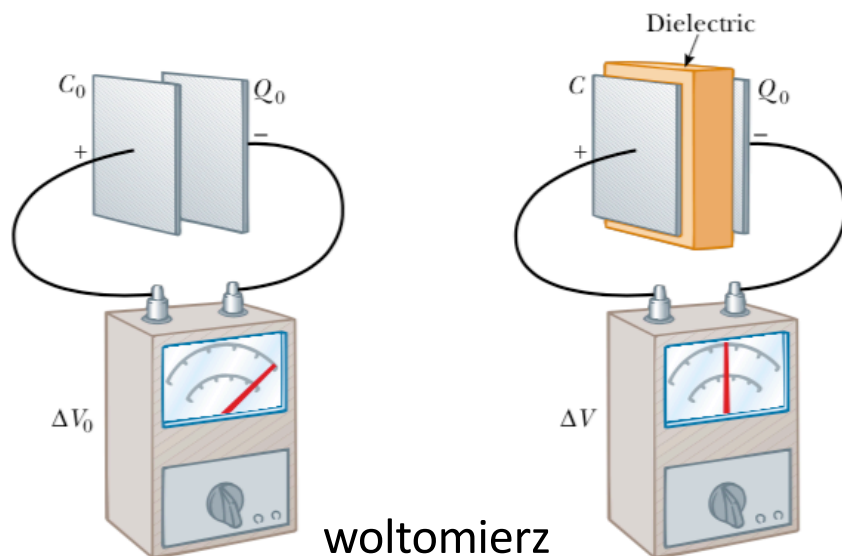
Energia zgromadzona w kondensatorze bez dielektryka:

Energia zgromadzona w kondensatorze z dielektrykiem:



Energia zmniejszyła się ponieważ kondensator wykonał pracę wciągając dielektryk w obszar między płytkami. Wyjmując kondensator energia rośnie ponieważ ty my wykonujemy pracę nad układem.

Dielektryk w kondensatorze - energia



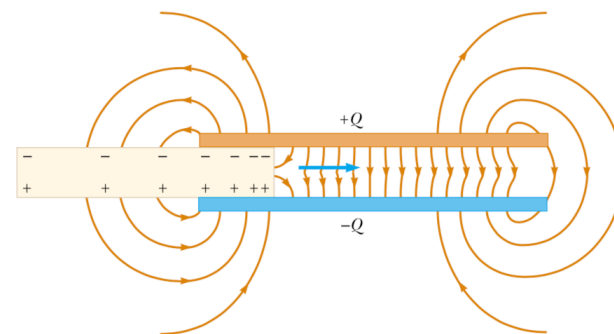
$$E = \frac{\Delta V}{d} \Rightarrow \frac{E_0}{\epsilon_r} = \frac{\Delta V_0}{\epsilon_r d}$$

Energia zgromadzona w kondensatorze bez dielektryka:

$$U_0 = \frac{1}{2} C_0 \Delta V_0^2$$

Energia zgromadzona w kondensatorze z dielektrykiem:

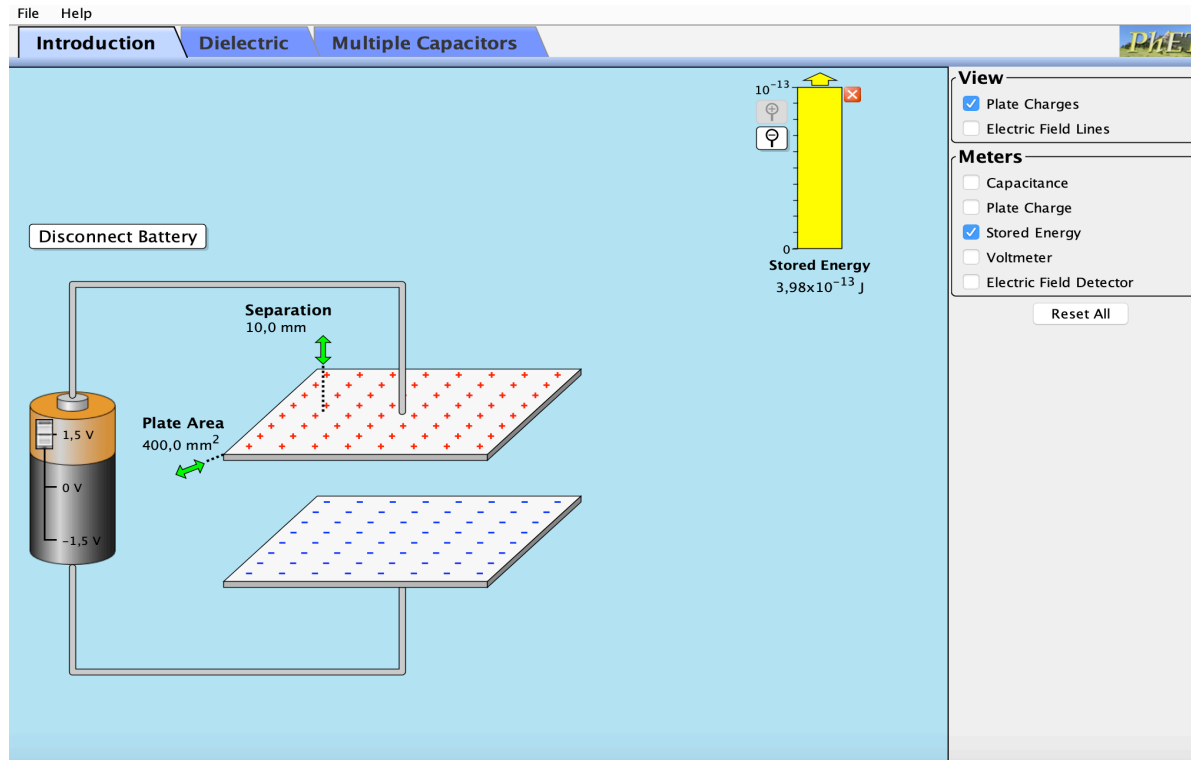
$$U = \frac{1}{2} C \Delta V^2 = \frac{1}{2} \epsilon_r C_0 \left(\frac{\Delta V_0}{\epsilon_r} \right)^2 = U = \frac{1}{2} \epsilon_r C_0 \frac{\Delta V_0^2}{\epsilon_r^2} = \frac{1}{\epsilon_r} U_0$$



Energia zmniejszyła się ponieważ kondensator wykonał pracę wciągając dielektryk w obszar między płytkami. Wyjmując kondensator energia rośnie ponieważ ty my wykonujemy pracę nad układem.

Symulacja kondensatora płaskiego

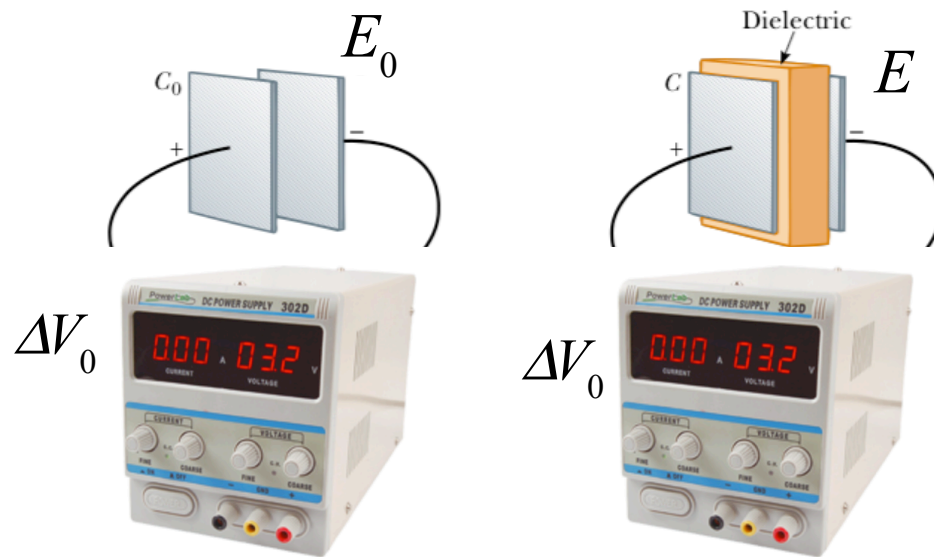
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/capacitor-lab>



Pokazać:

- Zmiany zmagazynowanej energii podczas wkładania i wyjmowania dielektryka
- Brak zmiany ładunku podczas wsuwania / wysuwania dielektryka przy odłączonej baterii

Dielektryk w kondensatorze podłączonym do zasilacza (baterii)



Zasilacz wymusza stałe napięcie na kondensatorze!

$$C = \epsilon_r C_0 = \epsilon_r \frac{Q_0}{\Delta V_0} = \frac{Q}{\Delta V_0} = \epsilon_r C_0$$

Wstawienie dielektryka pomiędzy okładki kondensatora podłączonego do zasilacza powoduje wzrost ładunku na okładkach kondensatora (dopływa on z baterii):

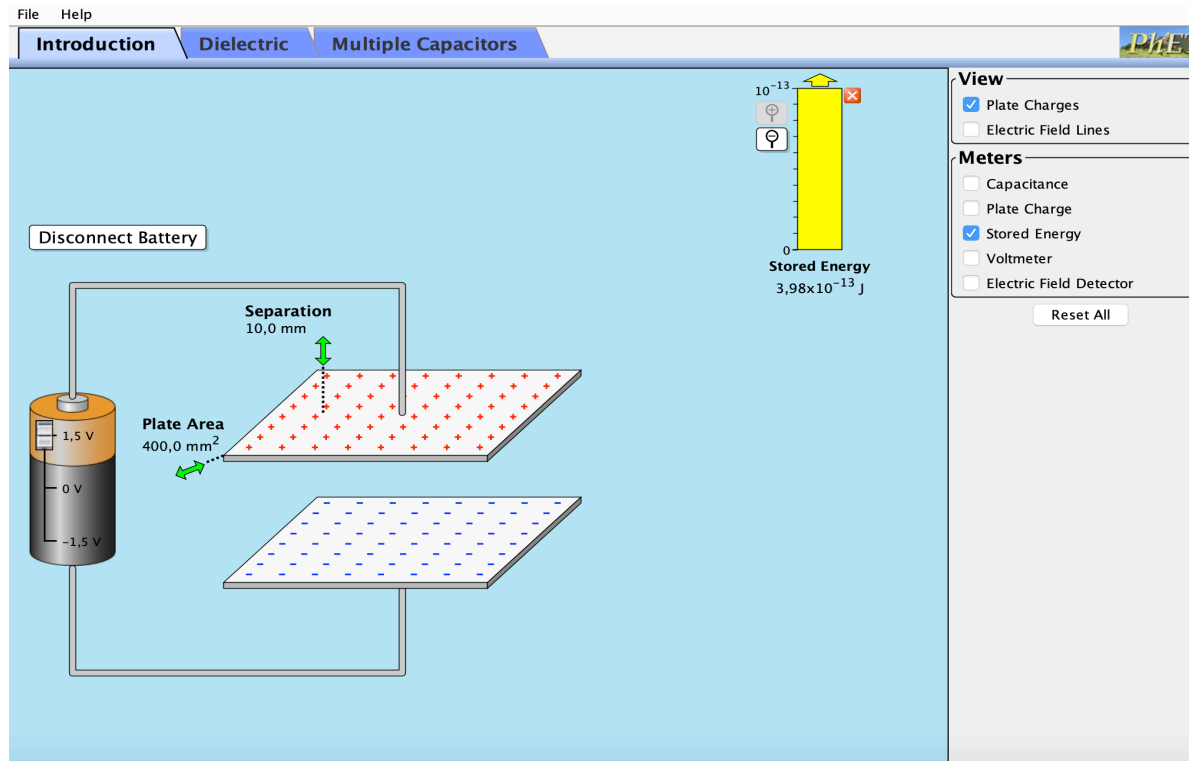
$$Q = \epsilon_r Q_0, \quad \epsilon_r > 1$$

Ponieważ zasilacz wymusza stałe napięcie na kondensatorze, oznacza to, że pojemność kondensatora wzrasta, ale pole elektryczne nie zmienia się!

$$C = \epsilon_r C_0, \quad E_0 = \frac{\Delta V_0}{d} = E \quad E = E_0.$$

Symulacja kondensatora płaskiego

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/capacitor-lab>

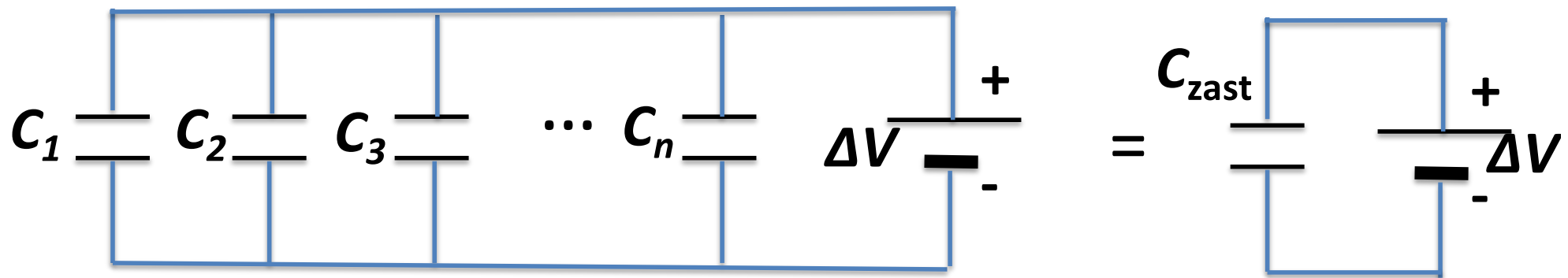


Pokazać:

- Zmiany ładunku podczas wsuwania / wysuwania dielektryka
- Brak zmiany potencjału i pola elektrycznego podczas wsuwania / wysuwania dielektryka

POJEMNOŚĆ ZASTĘPCZA UKŁADU KONDENSATORÓW POŁĄCZONYCH RÓWNOLEGLE

Łączenie równoległe kondensatorów:



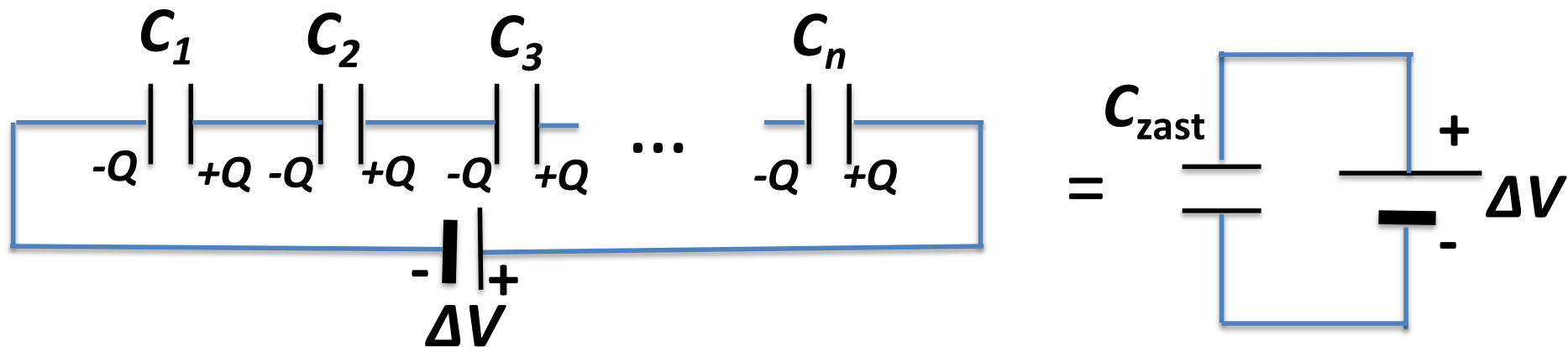
Pojemność zastępcza układu:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = \Delta V \underbrace{(C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n)}_{C_{\text{zast}}}$$

$$Q = \Delta V C_{\text{zast}} \quad \longrightarrow \quad \boxed{C_{\text{zast}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n}$$

POJEMNOŚĆ ZASTĘPCZA UKŁADU KONDENSATORÓW POŁĄCZONYCH SZEREGOWO

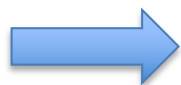
Łączenie szeregowe kondensatorów:



Pojemność zastępcza układu:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 + \dots + \Delta V_n = Q \underbrace{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \right)}_{\frac{1}{C_{\text{zast}}}}$$

$$\Delta V = \frac{Q}{C_{\text{zast}}}$$



$$\frac{1}{C_{\text{zast}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Znaleźć pojemność zastępczą układu przedstawionego na rysunku:

