

Elektryczność i Magnetyzm

Wykład: Piotr Kossacki

Pokazy: Kacper Oreszczuk, Aleksander Rodek,
Paweł Trautman

25 II 2020

Sprawy organizacyjne

Wykłady wtorki 11-13 i czwartki 14-16,

Konsultacje: w miarę zapotrzebowania

W trakcie wykładu: pytania i uwagi!

Kontakt: 55 32 726, piotr.kossacki@fuw.edu.pl

pokój na 3 piętrze 3.26 (Pasteura)

laboratorium -1.38 -1.40 -1.42

3 grupy ćwiczeniowe:

- dr Maciej Molas,
- dr Karol Nogajewski,
- prof. dr hab. Witold Bardyszewski

Sprawy organizacyjne

■ Zaliczenie

- Udział w ćwiczeniach
- 2 kolokwia: 50% punktów zalicza ćwiczenia
20 kwietnia (poniedziałek, 8:00-12:00, 0.03),
25 maja (poniedziałek, 8:00-12:00, 0.03)
- 15 czerwca (poniedziałek, 9:00-13:00, 1.40)
Egzamin pisemny (zadania), pełni także funkcję
kolokwium poprawkowego (w sesji poprawkowej)
- Egzamin ustny **obowiązkowy** (warunek dopuszczenia:
co najmniej 50% punktów z egzaminu i kolokwiów)

Co będzie wymagane ?

- Umiejętność szybkiego i **bezbłędnego** rozwiązywania zadań – weryfikowana podczas kolokwiiów i egzaminu pisemnego
i (!)
- Znajomość materiału z wykładu w tym zrozumienie zjawisk demonstrowanych podczas pokazów i omawianych metod pomiarowych – weryfikowana podczas egzaminu ustnego

Literatura

- Notatki z wykładu (własne ?) – w tym opisy pokazów (slajdy nie są wystarczające)
- Feynmana wykłady z fizyki
- Szczeniowski: Fizyka doświadczalna
- Piekara: Elektryczność i budowa materii
- Gaj: Elektryczność i magnetyzm
- Resnick, Halliday, Walker: Podstawy fizyki
- <http://lurnp.fuw.edu.pl/kossacki/elektrycznoscimagnetyzm/>

O czym będzie?

- Historia czy współczesność?
- Znaczenie znajomości faktów(doświadczenia!)
- Rzędy wielkości

Komplet praw Maxwella

$$\oint_{\partial S_2} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(I + \frac{d}{dt} \varepsilon_0 \Phi_{\varepsilon} \right)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

Postać całkowa

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_0 \mathbf{E} \right)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

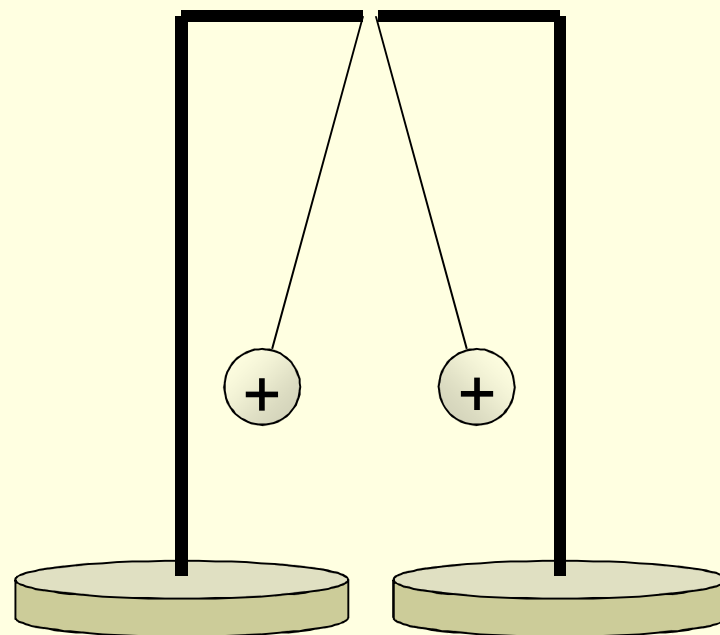
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Postać lokalna

Porządek wykładu

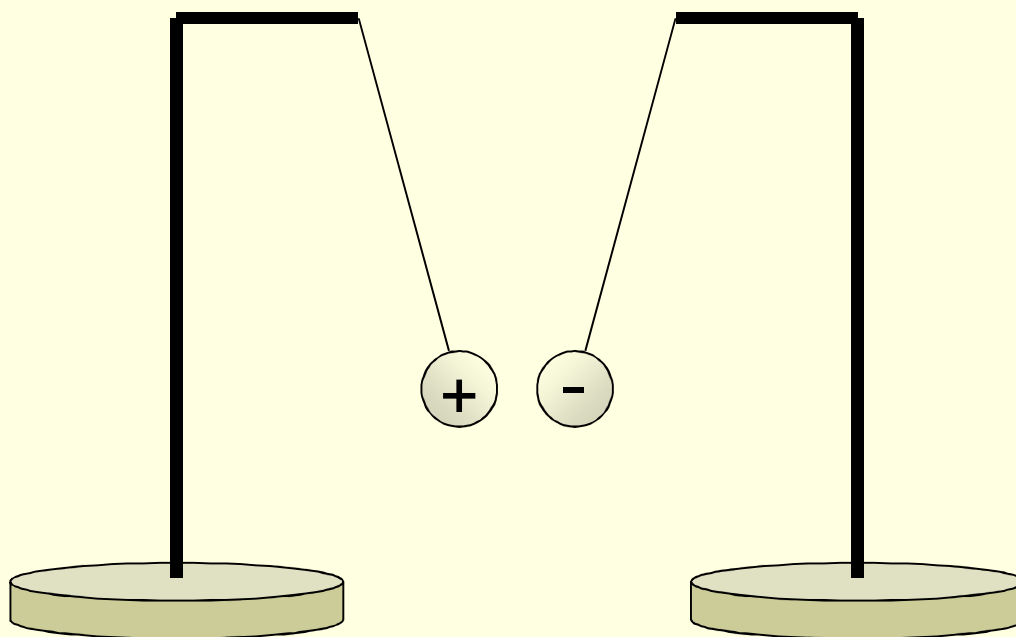
- Elektrostatyka
- Prąd elektryczny
- Magnetostatyka
- Indukcja elektromagnetyczna
- Materia w polu elektrycznym i magnetycznym
- Prąd zmienny, obwody prądu zmiennego
- Fale elektromagnetyczne w falowodzie i w otwartej przestrzeni

Wahadełka elektrostacyjne



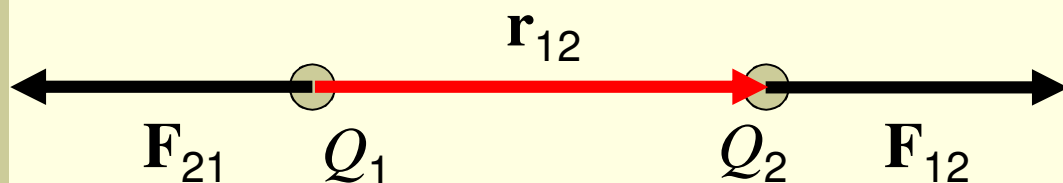
Wahadełka elektrostyczne

Jak to jest ilościowo?



Prawo Coulomba

(oddziaływanie na odległość)



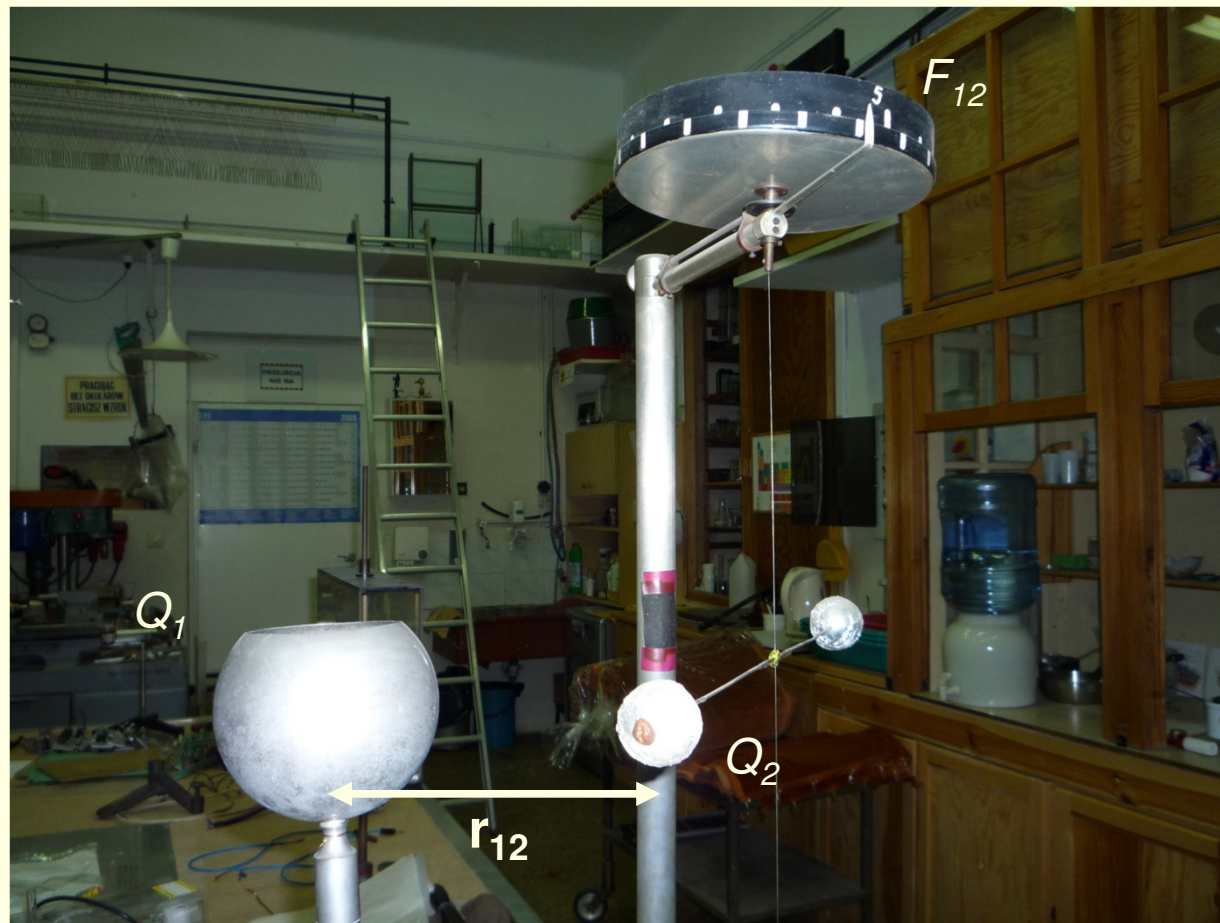
$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}$$



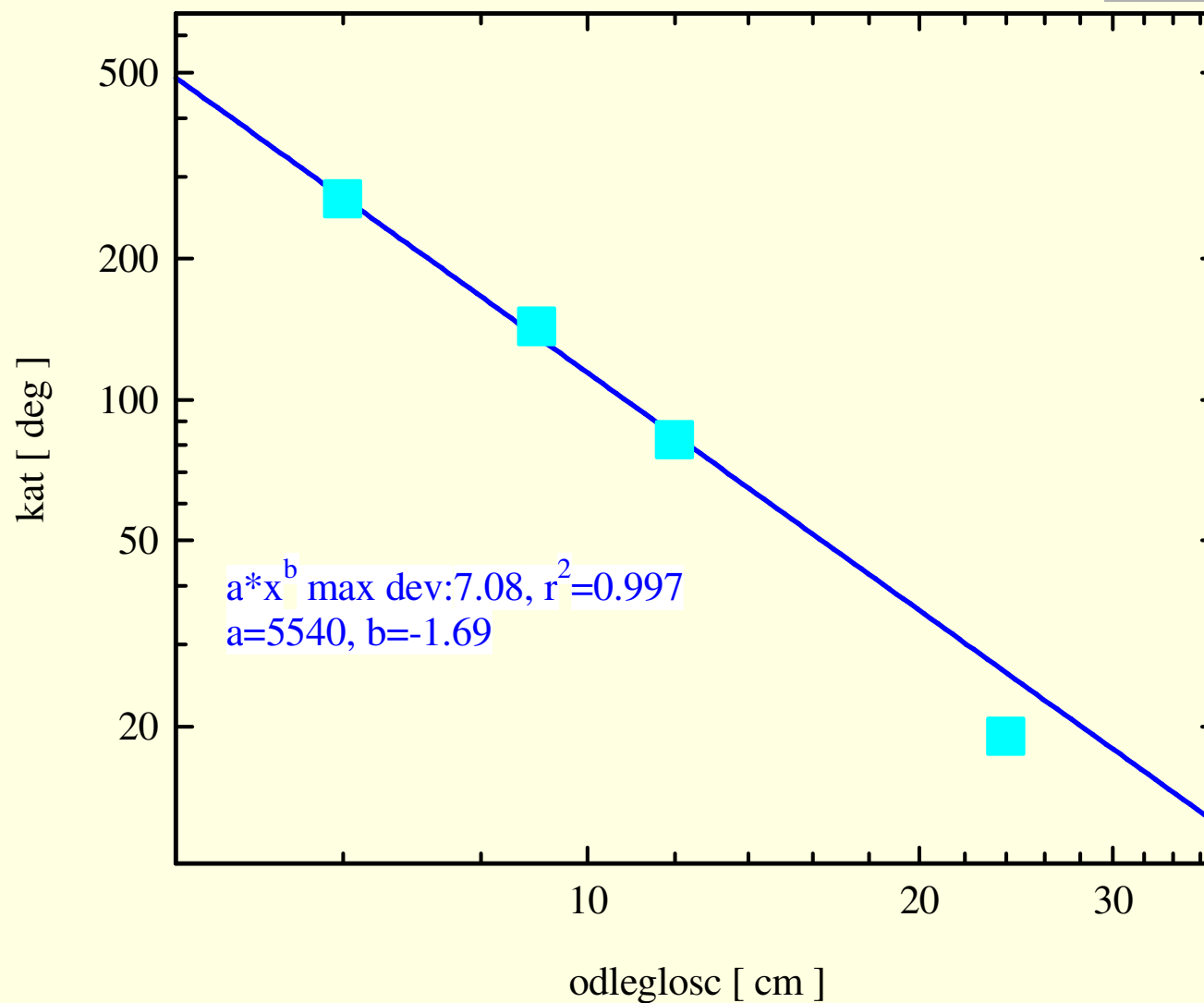
Charles Augustin de Coulomb
(1736 – 1806)

- Q (C) - ładunek elektryczny
 - Ładunek elektronu $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C
- $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ C²/(N·m²)
- Konwencje: $\mathbf{r}_{12}$ do ładunku, na który działa siła
- $\mathbf{F}_{12}$ siła, jaką działa ładunek 1 na ładunek 2

Waga skręceń



Oddziaływanie elektrostatyczne: jak zależy od odległości?



Rzędy wielkości

- $F = 0.001 \text{ N}$
- $r = 0.1 \text{ m}$
- $Q = 10^{-7} \text{ C}, 10^{-8} \text{ C}$

- Sprawdzenie:

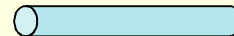
$$F = Q^2/(4\pi\epsilon_0 r^2) \approx 10^{-15}/(10^{-10} \times 0.01) = 10^{-3} \text{ N}$$

Szereg tryboelektryczny

- Energia elektronów w różnych substancjach jest różna. Różnice te są rzędu elektronowolta (1.6×10^{-19} J).
- Przy kontakcie różnych ciał może zajść przejście elektronów – ciała ładują się z przeciwnymi znakami.
- Można uszeregować różne substancje według względnego znaku ładunku, jakiego nabywają w kontakcie ze sobą.

Szereg tryboelektryczny

+



-

Most positively charged

+

Polyurethane foam

Hair, oily skin

Nylon, dry skin

Glass

Acrylic, Lucite

Leather

Rabbit's fur

Quartz

Mica

Lead

Cat's fur

Silk

Aluminium

Paper

Cotton

Wool

0

Wood

Amber

Sealing wax

Polystyrene

Rubber balloon

Resins

Hard rubber

Nickel, Copper

Sulfur

Brass, Silver

Gold, Platinum

Acetate, Rayon

Synthetic rubber

Polyester

Styrene ()

Orlon

Plastic wrap

Polyethylene (like Scotch tape)

PolypropyleneVinyl (PVC)

Silicon

Teflon

Silicone rubber

Ebonite

-

Most negatively charged

Table 1. The Triboelectric Series

Most Positive (+)	
Air	+++
Human Hands, Skin	
Asbestos	
Rabbit Fur	
Glass	
Human Hair	
Mica	
Nylon	
Wool	
Lead	
Cat Fur	+
Silk	
Aluminum	
Paper	
Cotton	
Steel	-
Wood	
Lucite	
Sealing Wax	
Amber	
Rubber Balloon	
Hard Rubber	
Mylar	
Nickel	
Copper	
Silver	
uv Resist	
Brass	
Synthetic Rubber	
Gold, Platinum	
Sulfur	
Acetate, Rayon	
Polyester	
Celluloid	
Polystyrene	
Orlon, Acrylic	
Cellophane Tape	
Polyvinylidene chloride (Saran)	
Polyurethane	
Polyethylene	
Polypropylene	
Polyvinylchloride (Vinyl)	
Kel-F (PCTFE)	
Silicon	
Teflon	
Silicone Rubber	
Most Negative (-)	

+

szkło
papier
włosy
styropian
balonik
rura z PCV
teflon

-

Szereg tryboelektryczny

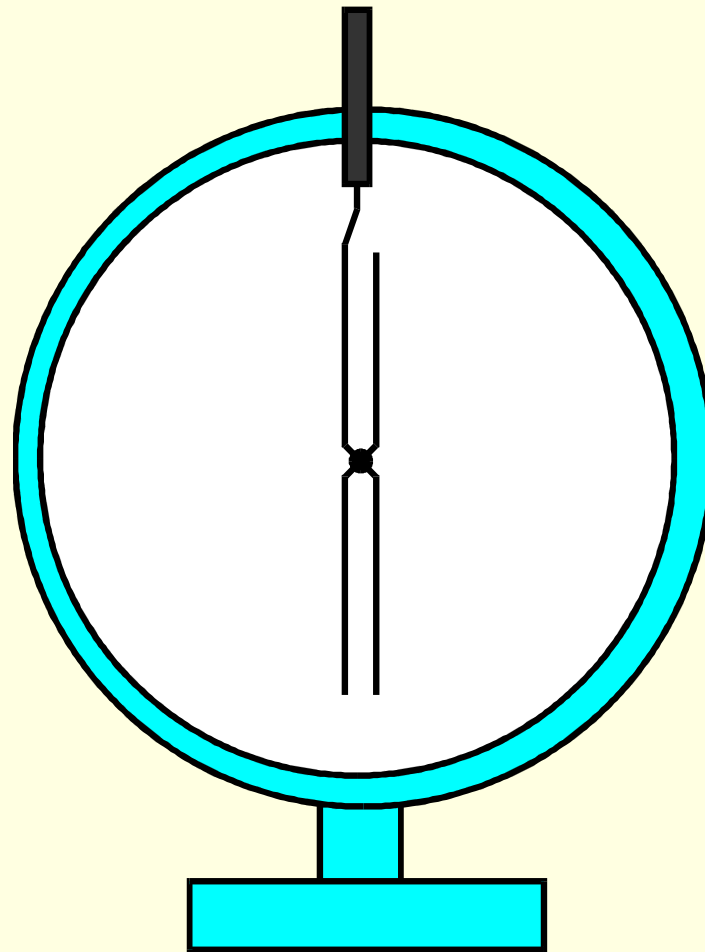
przykłady list szeregu tryboelektrycznego

tego typu listy należy traktować z pewną ostrożnością, bo pozycja na liście może zależeć od stanu powierzchni (utlenienia, zanieczyszczeń itp.)

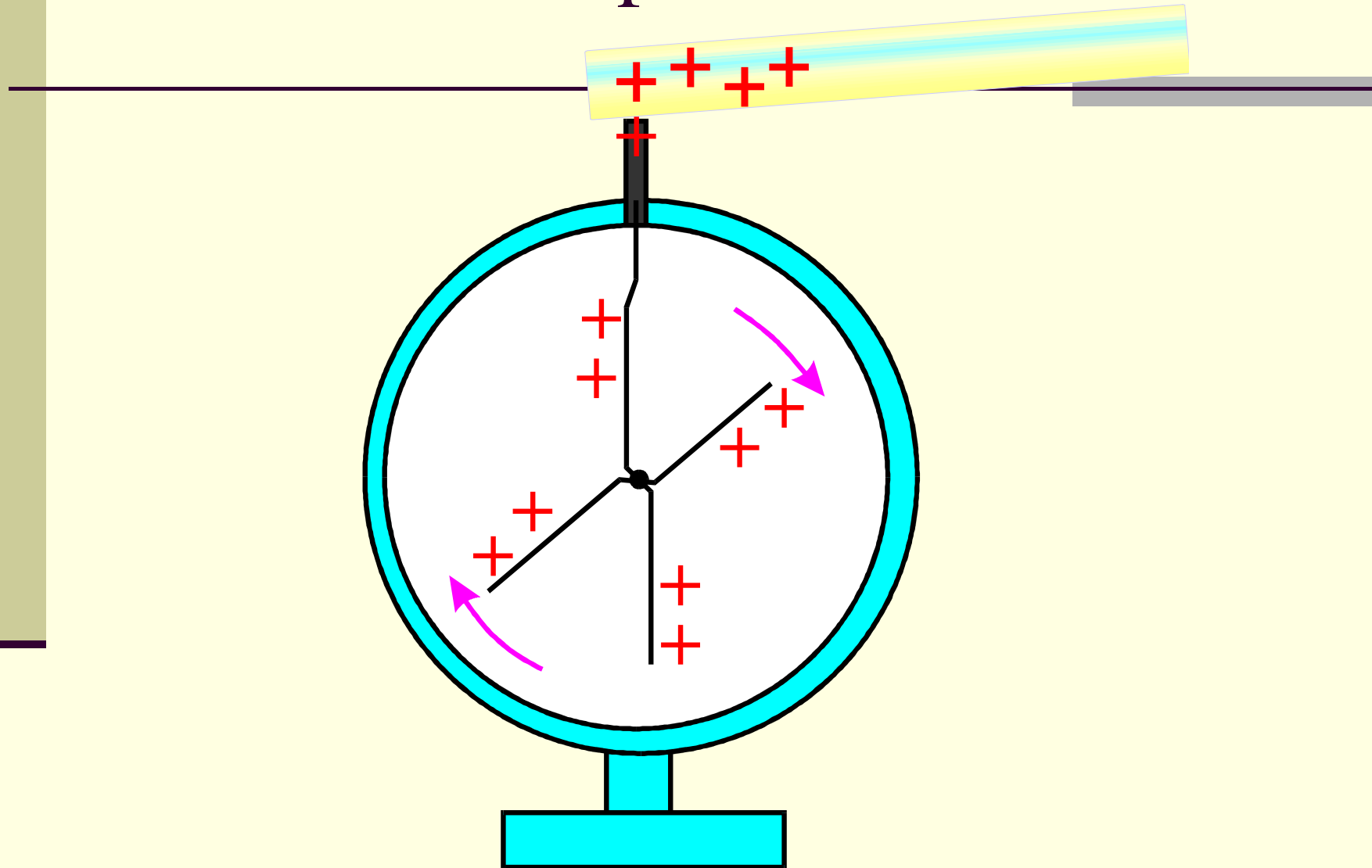
Przewodniki i izolatory

- Przewodniki: zawierają swobodne ładunki elektryczne
- Klasyczne przewodniki: metale, zawierające swobodne elektrony
- Izolatory (dielektryki) zawierają ładunki zlokalizowane.
- Przykłady izolatorów: szkło, papier, ebonit, teflon
- Podział na przewodniki i izolatory jest nieostry

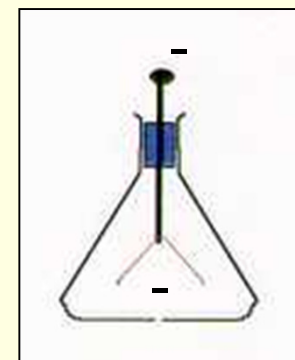
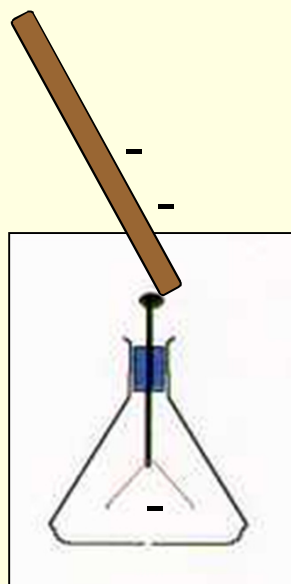
Elektroskop



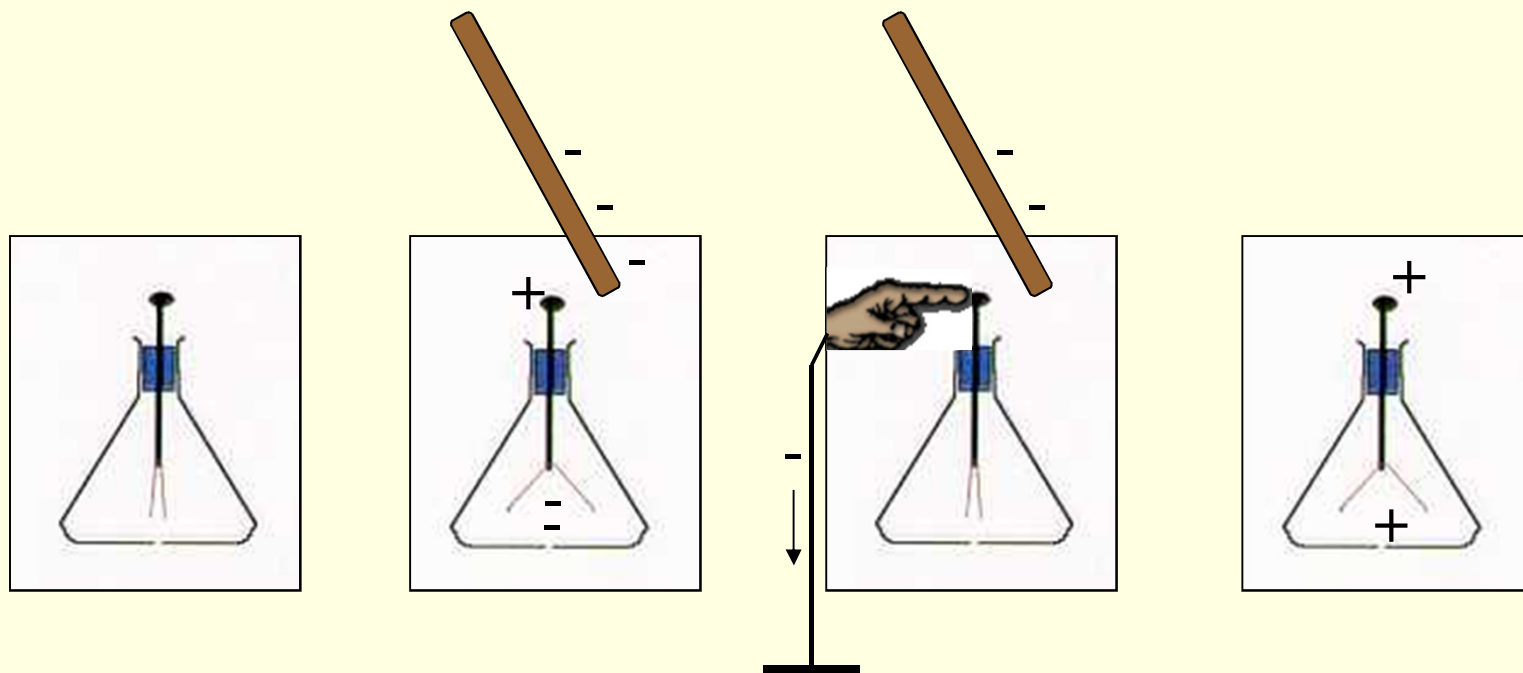
Elektroskop



Ładowanie elektroskopu



Ładowanie elektroskopu przez indukcję: przeciwnym znakiem



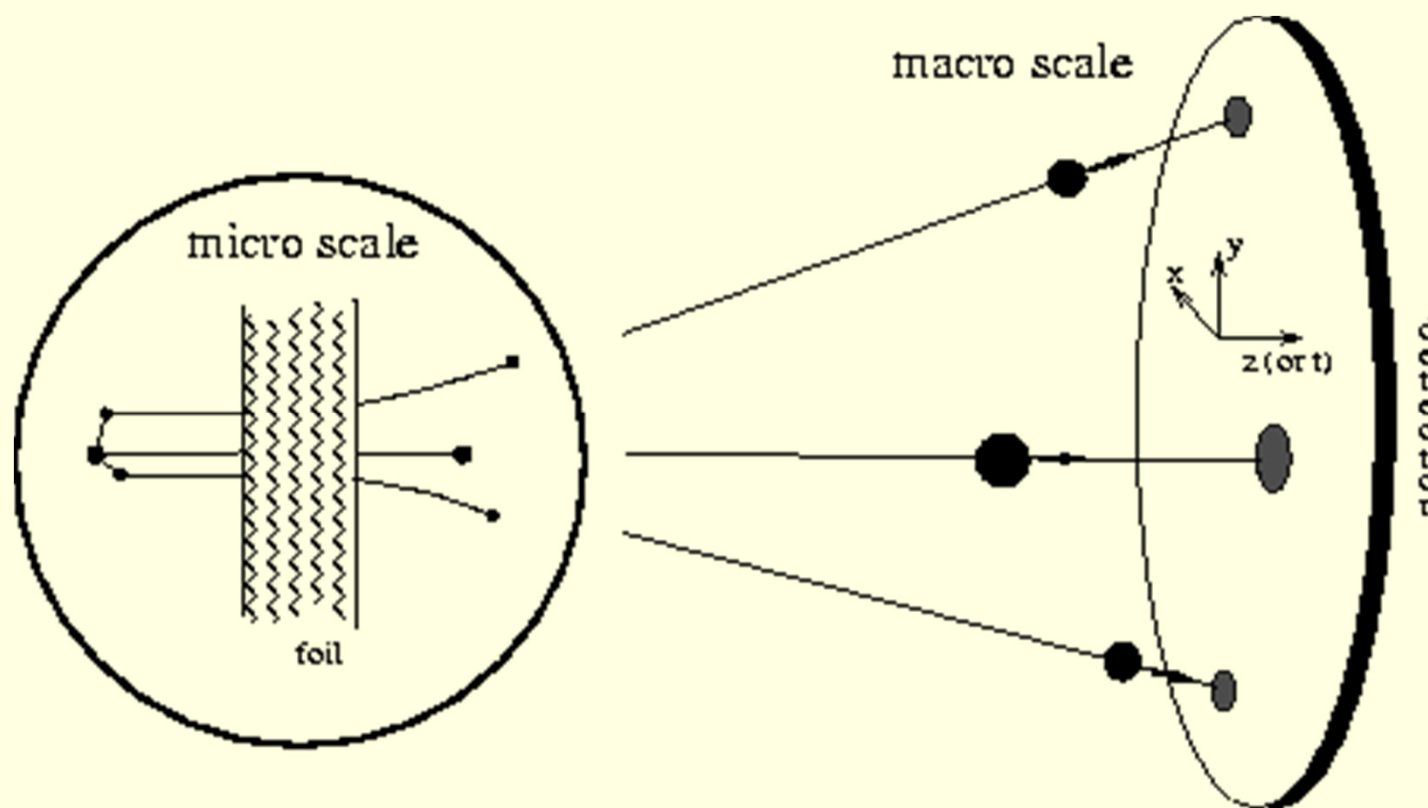
Równowaga ładunkowa w przyrodzie

- Ładunki w doświadczeniach elektrostatycznych rzędu 10^{-7} C
- Liczba elektronów rzędu liczby Avogadry
 $N_A = 6 \times 10^{23}$
- Ładunek całkowity mola elektronów
 $N_A e = 6 \times 10^{23} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \approx 10^5 \text{ C}$
- **Neutralność z dokładnością do 12 rzędów!**

A gdyby ją silnie zaburzyć?

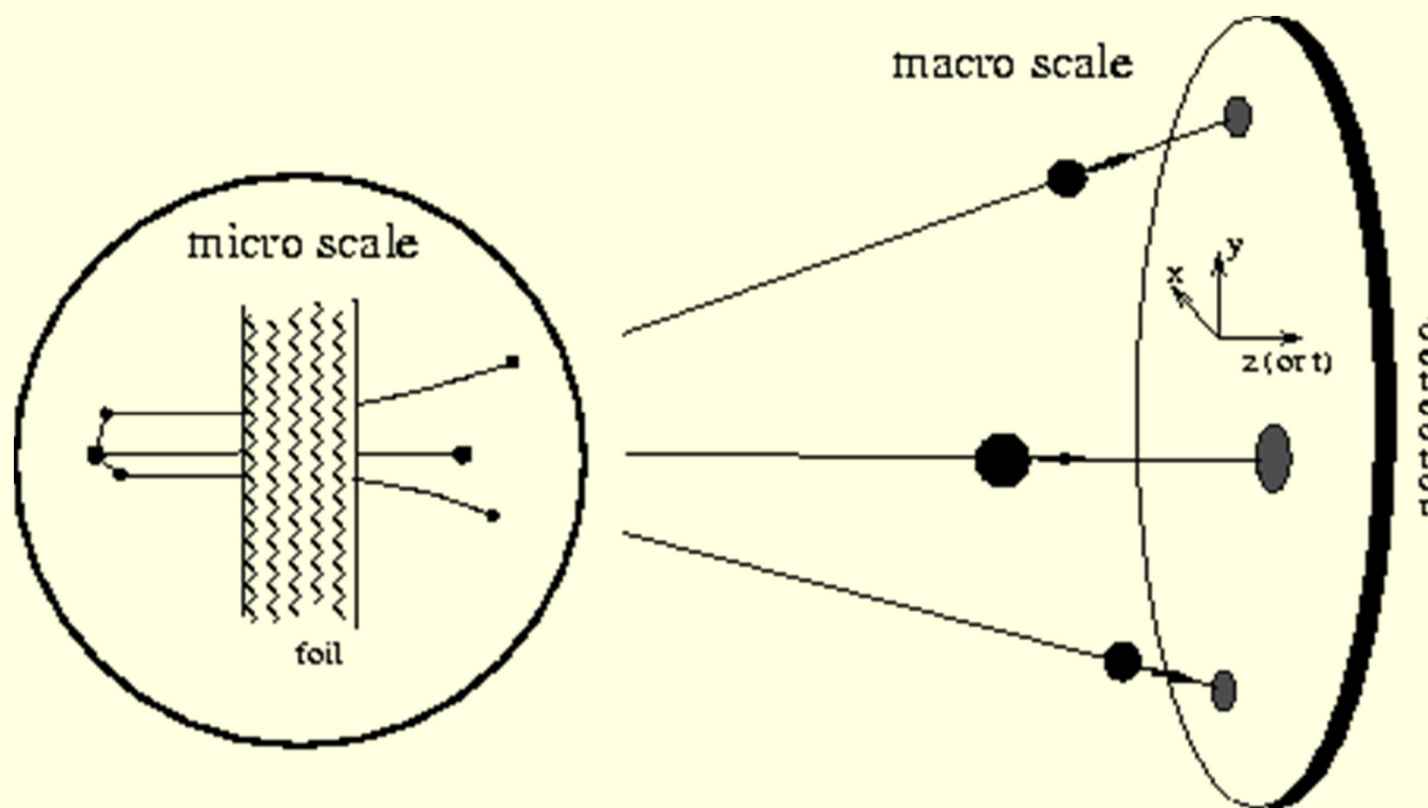
Eksplzja kulombowska

Coulomb explosion



Eksplzja kulombowska

Coulomb explosion

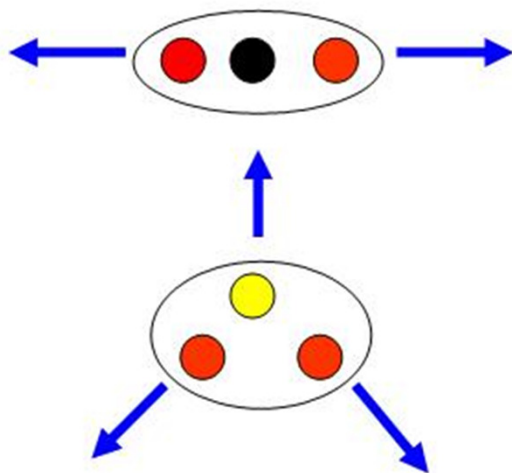


Ultraszybkie impulsy lasera $\sim 100 \text{ TJ/cm}^2$

Eksploracja kulombowska

Time of flight technique

Momenta of fragments P_i

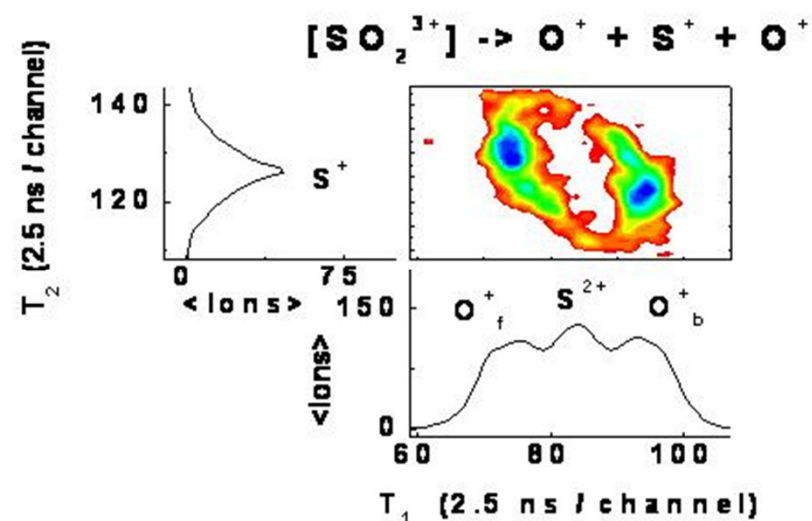
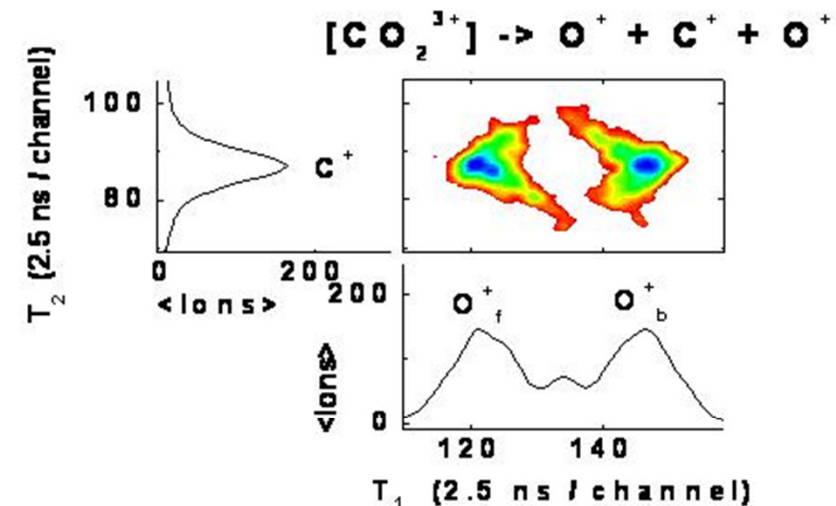


$$\text{TOF}(P) = \text{TOF}(P=0) - P \cos(\theta) / qFc$$

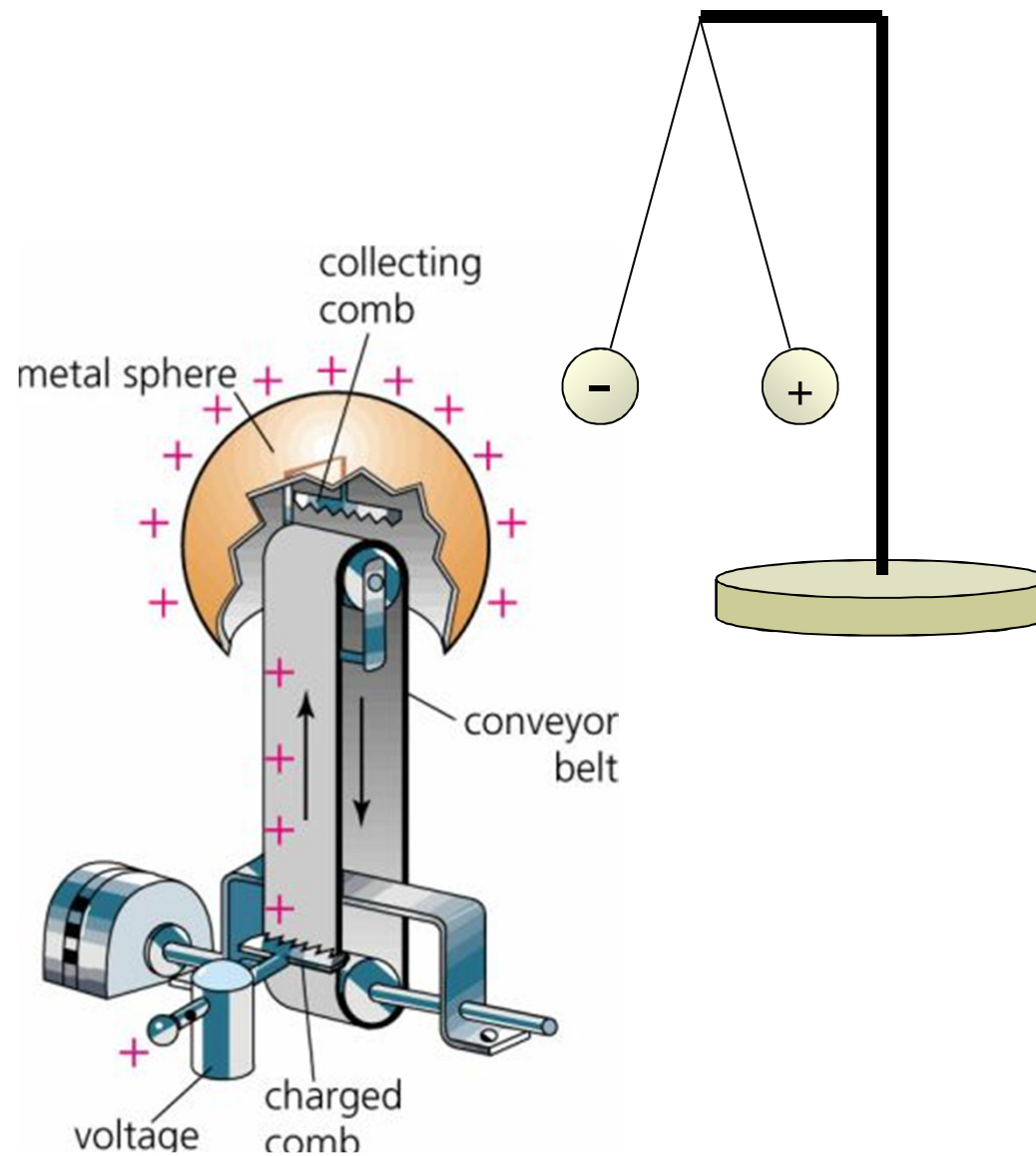
CO₂ is linear

SO₂ is bent

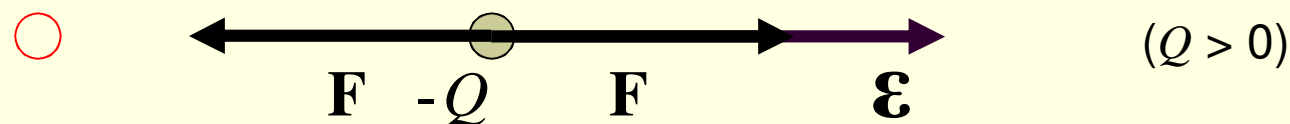
Herzberg : X^1A_1 : 119.5°



Pole elektryczne



Pole elektryczne (oddziaływanie kontaktowe)

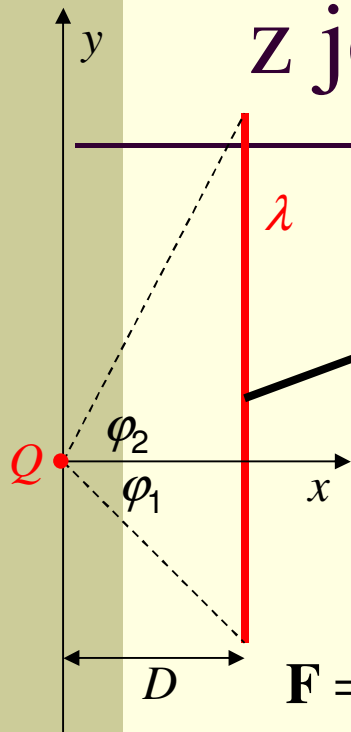


$$\mathbf{F} = Q \boldsymbol{\varepsilon}$$

Natężenie pola elektrycznego $\boldsymbol{\varepsilon}$ [N/C]

- Pole elektryczne pośredniczy między oddziałującymi ładunkami
- Ładunek jako źródło i jako detektor pola

Oddziaływanie ładunku punkowego z jednorodnym rozkładem liniowym



$$\mathbf{F} = \int_a^b \frac{Q\lambda \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} dy = \int_a^b \frac{Q\lambda(D, D \tan \varphi, 0)}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{D}{\cos \varphi}\right)^3} d(D \tan \varphi)$$

$$\mathbf{F} = \frac{Q\lambda}{4\pi\epsilon_0 D} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (\cos \varphi, \sin \varphi, 0) \cos^2 \varphi \frac{d\varphi}{\cos^2 \varphi} = \frac{Q\lambda}{4\pi\epsilon_0 D} [\sin \varphi, -\cos \varphi, 0]_{\varphi_1}^{\varphi_2}$$

W granicy bardzo długiego drutu ($\varphi_1 = -\pi/2$, $\varphi_2 = \pi/2$)

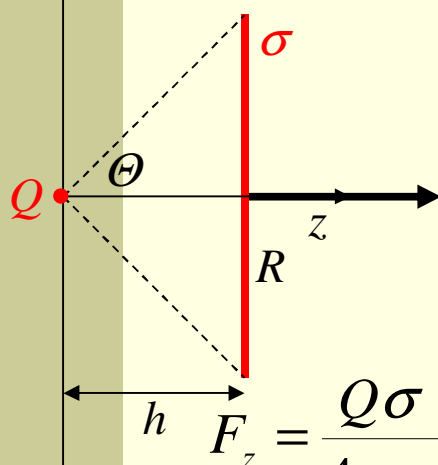
$$\mathbf{F} = \frac{Q\lambda}{2\pi\epsilon_0 D} (1, 0, 0)$$

W granicy bardzo krótkiego drutu ($\Delta\varphi \ll 1$)

$$\mathbf{F} = \frac{Q\lambda\Delta y}{4\pi\epsilon_0 R^2} (\cos \varphi, \sin \varphi, 0)$$

Prawo Coulomba!

Oddziaływanie ładunku punkowego z jednorodnym rozkładem dwuwymiarowym (krążek)



$$\mathbf{F} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{Q\sigma \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} ds = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{Q\sigma(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, h)}{4\pi\epsilon_0 r^3} \rho d\rho d\varphi$$

$$F_z = \frac{Q\sigma}{4\pi\epsilon_0} 2\pi \int_0^\Theta \frac{h}{(h/\cos \vartheta)^3} h \tan \vartheta \frac{h}{\cos^2 \vartheta} d\vartheta = \frac{Q\sigma}{2\epsilon_0} [-\cos \vartheta]_0^\Theta = \frac{Q\sigma}{\epsilon_0} \sin^2 \Theta / 2$$

W granicy bardzo dużego promienia $R \gg h$ ($\Theta = \pi/2$)

$$F_z = \frac{Q\sigma}{2\epsilon_0}$$

Nie zależy od odległości!

W granicy bardzo małego promienia $R \ll h$ ($\Theta = R/h$)

$$F_z = \frac{Q(\pi R^2 \sigma)}{4\pi\epsilon_0 h^2}$$

Prawo Coulomba!