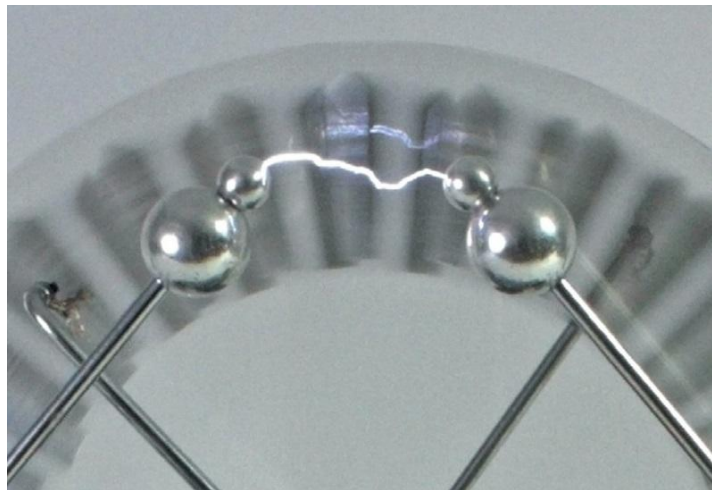
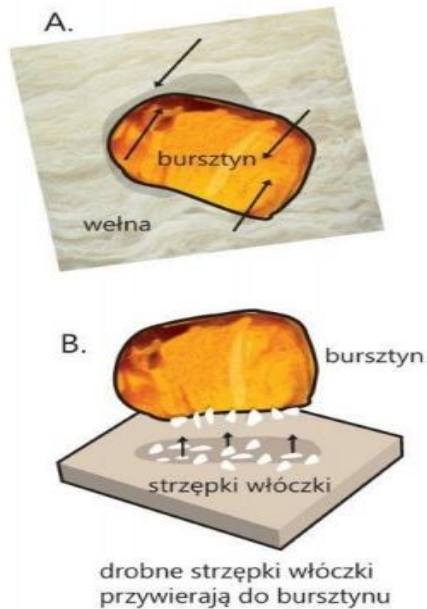




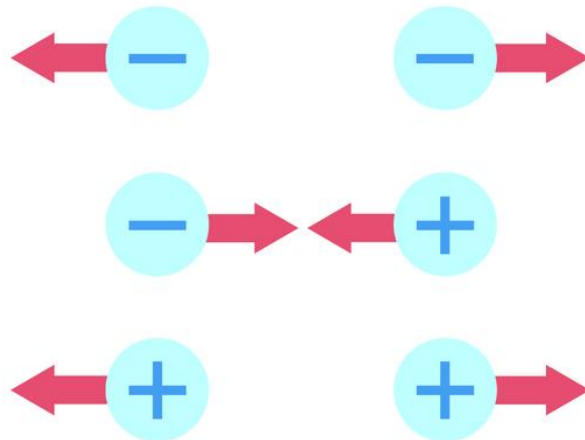
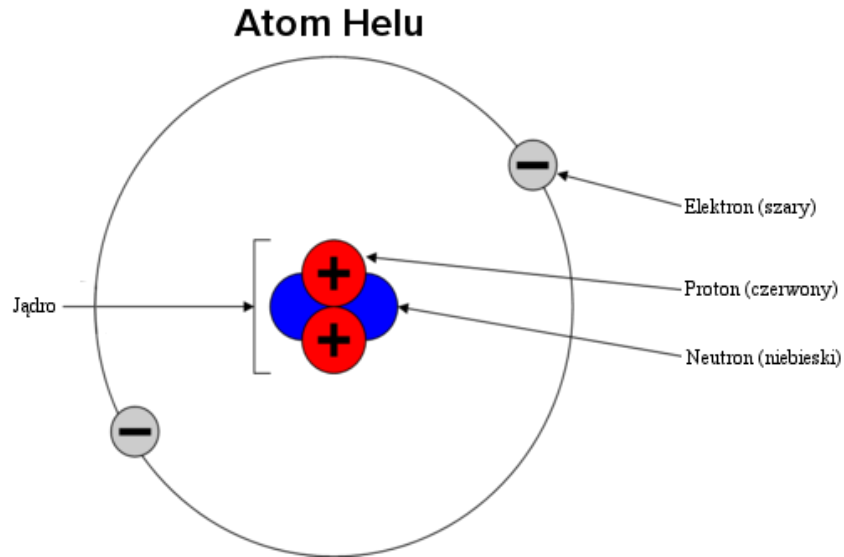
# Temat: Od iskry do pioruna.

dr Krzysztof Rochowicz, UMK Toruń 2025

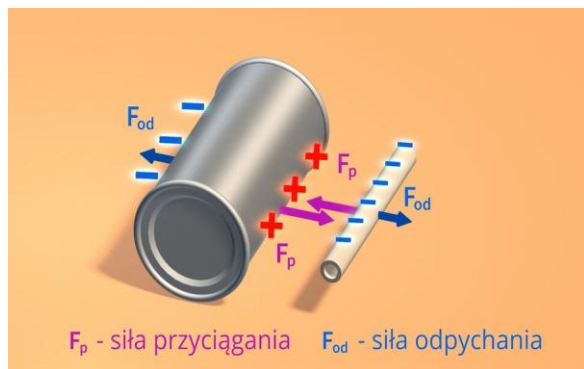
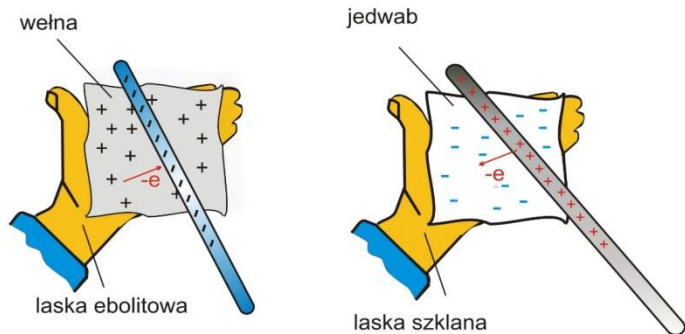
# Elektryzowanie ciał



# Dlaczego różne ciała mogą się przyciągać lub odpychać?



## ELEKTRYZOWANIE PRZEZ POTARCIE



Powietrze  
Ludzka skóra  
Szkło  
Ludzkie włosy  
Nylon  
Wełna  
Futro  
Ołów

Jedwab  
Aluminium  
Papier  
Drewno  
Bawełna  
Stal  
Lak

Twarda guma  
Szkło epoksydowe  
Nikiel, miedź  
Mosiądz, srebro  
Złoto, platyna  
Celuloza  
Polistyren  
Akryl

Poliester  
Poliuretan  
Polietylen  
Polipropylen  
Polichlorek winylu  
Krzem  
Silikon  
Teflon



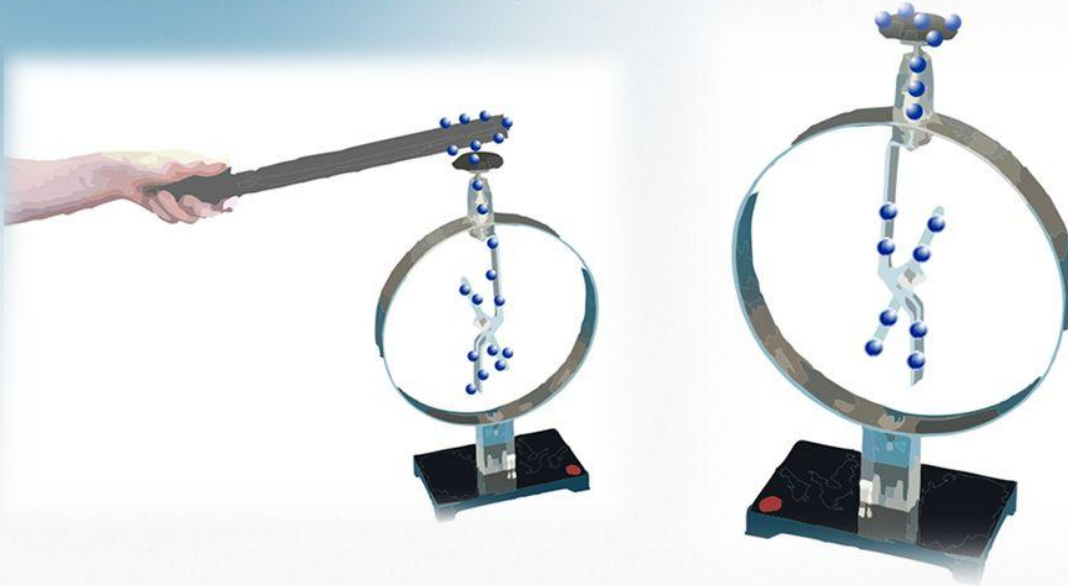
# Od plusa do minusa

więcej sztuczek (film)

# Elektroskop

3 ETAP  
FIZYKA  
EDUKACYJNY

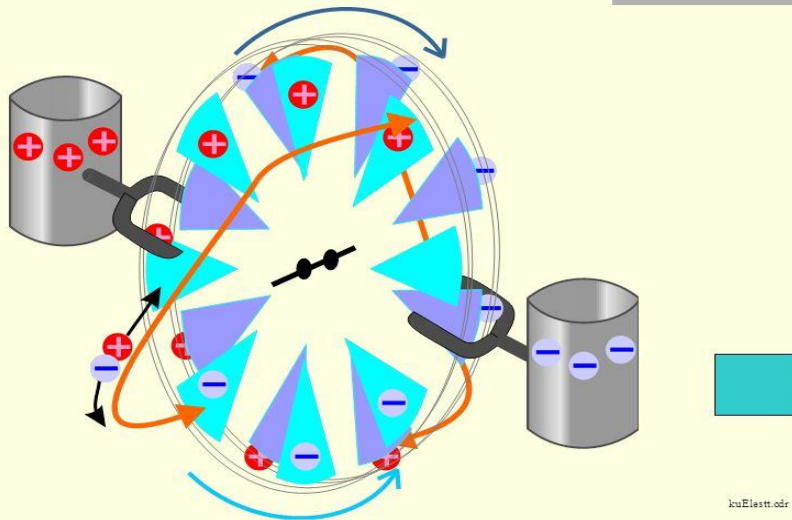
## Dotykanie elektroskopu naładowanym ujemnie prętem ebonitowym



Po dotknięciu pałeczką kulki elektroskopu część elektronów z pałeczki przechodzi na pręt i wskazówkę. Zatem pręt i wskazówka trwale naelektryzują się ujemnie. Elektroskop uzyskuje ładunek, którego znak jest taki sam jak znaku ładunku ciała, którym go dotknęliśmy.

# Maszyna elektrostatyczna

Jak działa maszyna elektrostatyczna?



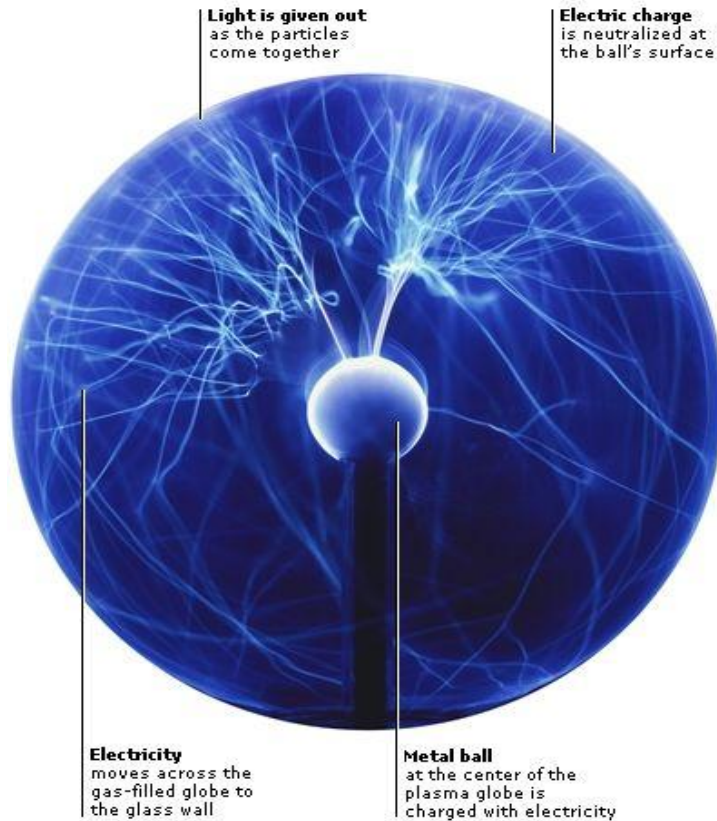
Doświadczenia z piłeczką i świecą

# Generator van der Graafa

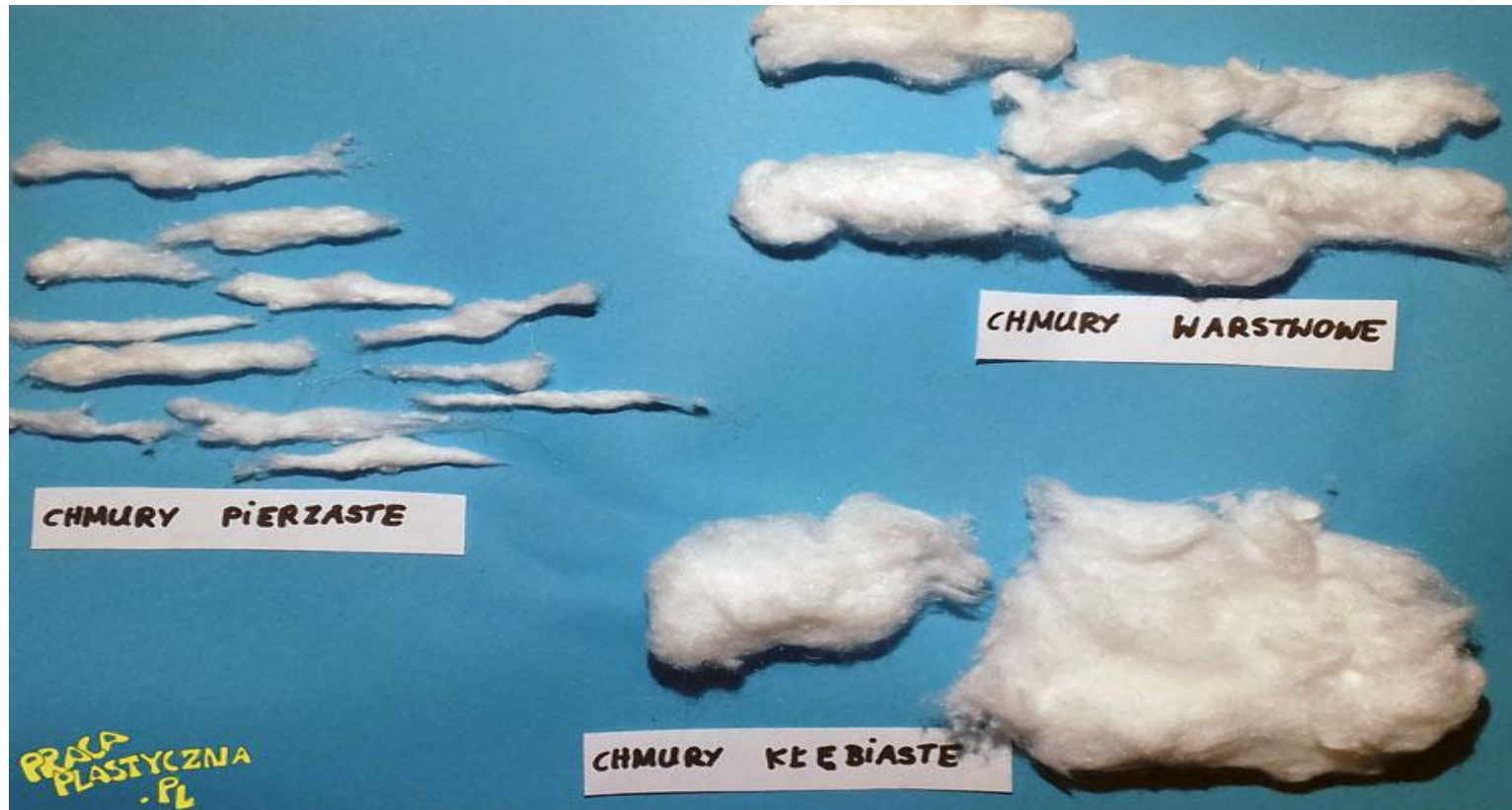
94 Aluminum  
Plates on a  
Van de Graaff!



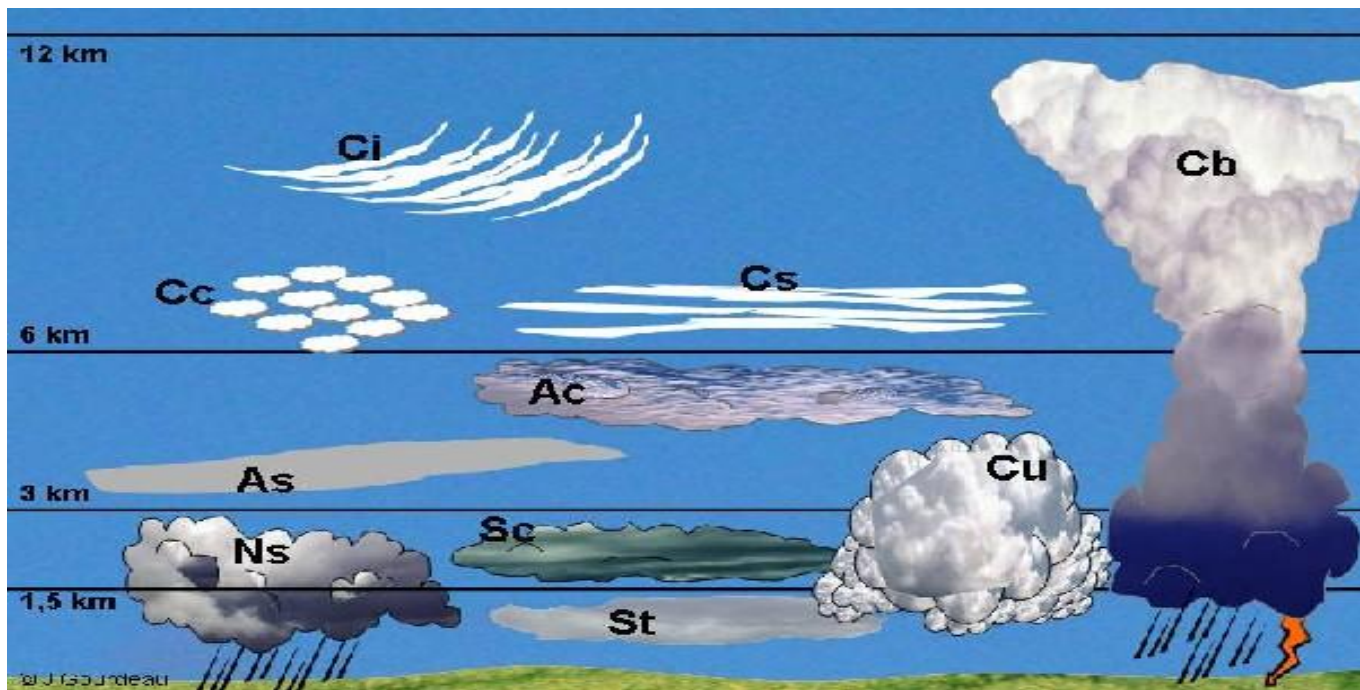
# Kula plazmowa



# Rodzaje chmur

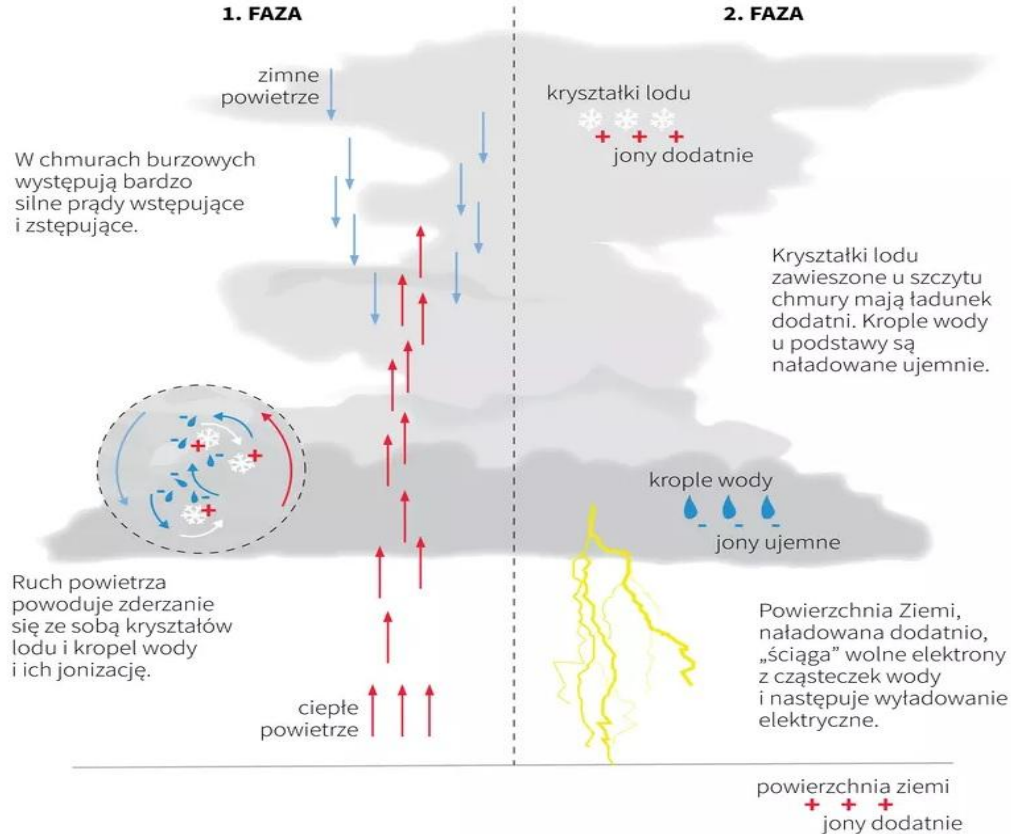


# Jak wysoko są chmury?

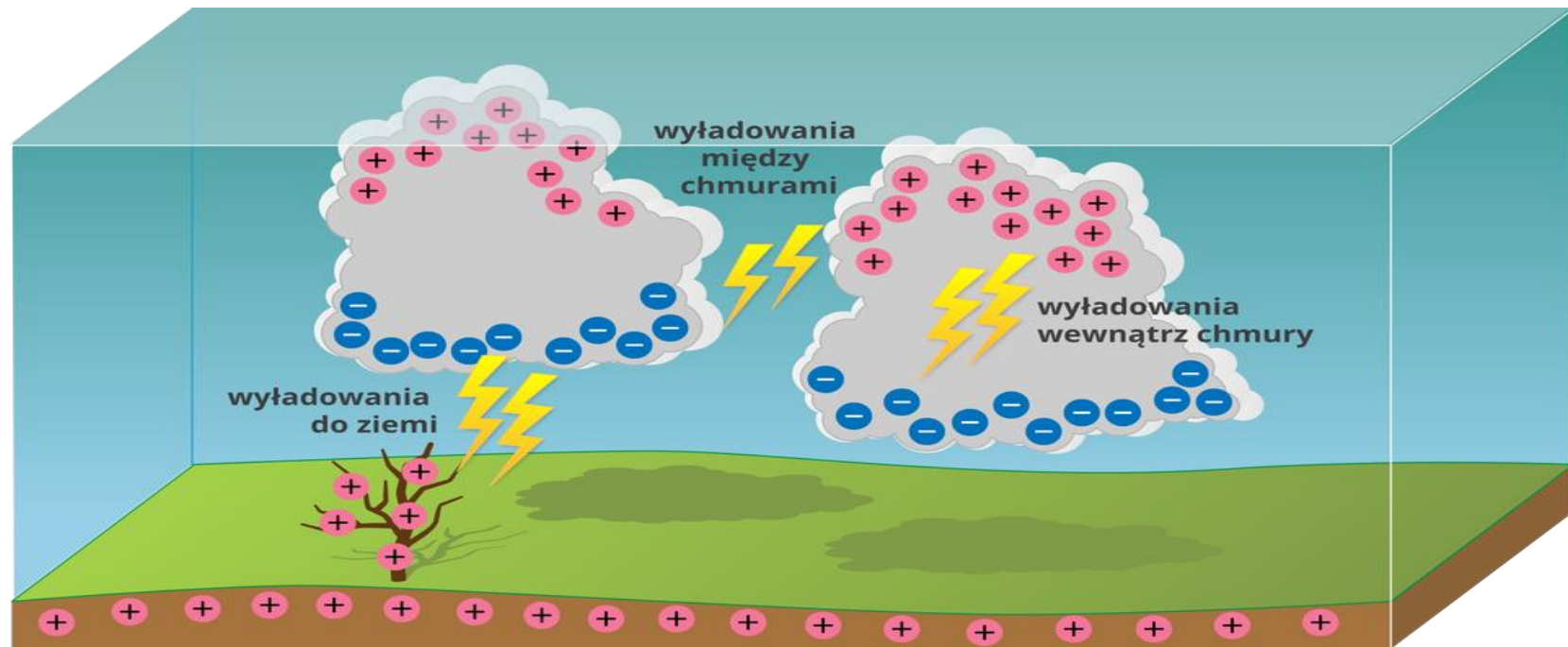


# Jak powstają pioruny

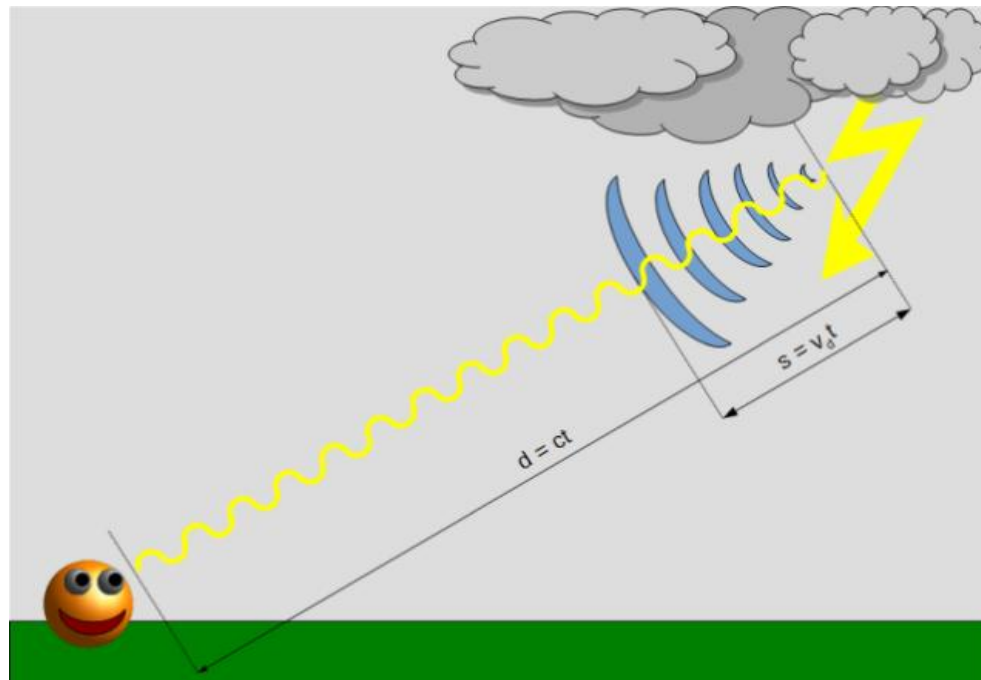
Gdy piorun uderza, iskra elektryczna ogrzewa powietrze do temperatury 30 tysięcy stopni Celsjusza. Rozgrzane jony emitują światło, a powietrze gwałtownie się rozszerza, wytwarzając drgania, które słyszymy w postaci grzmotu.



# Czy piorun zawsze uderza w ziemię?



# Jak daleko uderzył piorun?



# Burza z samolotu...



...i z kosmosu



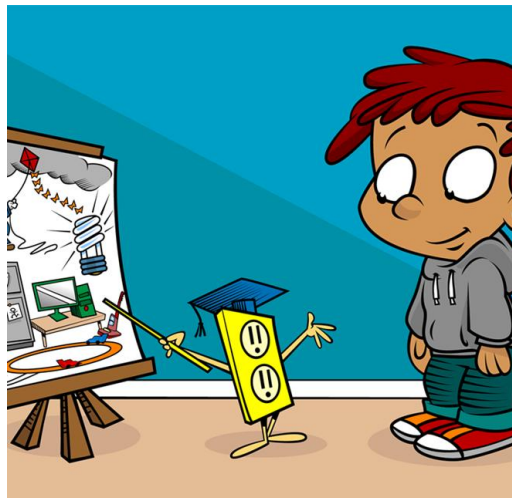
# Zadania dodatkowe:

1) Symulacja – [phet.colorado.edu](https://phet.colorado.edu)  
Prawo Coulomba

2) Polecam też piękne filmy  
na youtube:

- [Art of the Storm](#)
- [Monsoon III](#)
- [Transient 2](#)
- [The aurora](#)

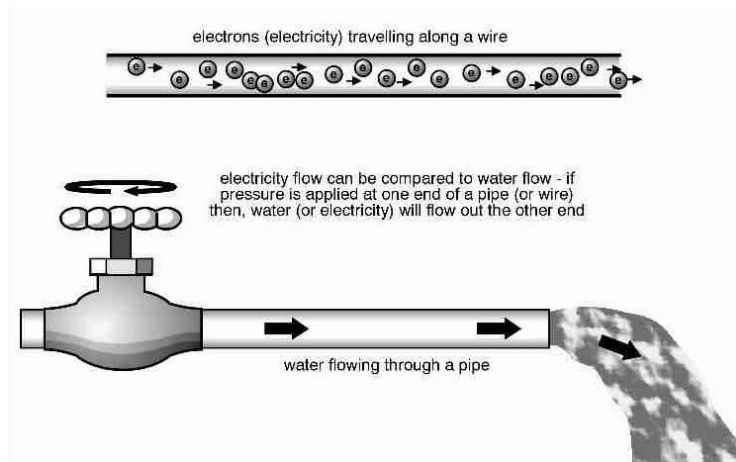




Temat: Prąd elektryczny.

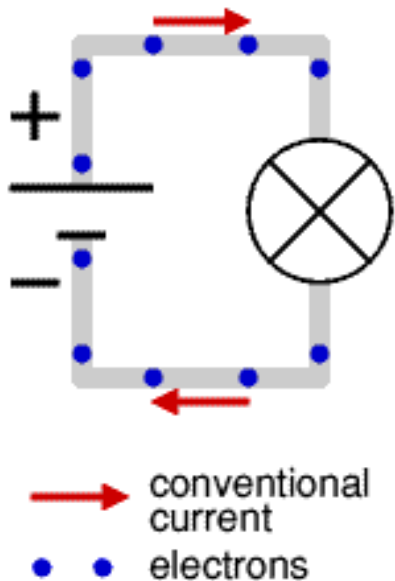
# Prąd elektryczny

## – uporządkowany ruch ładunków

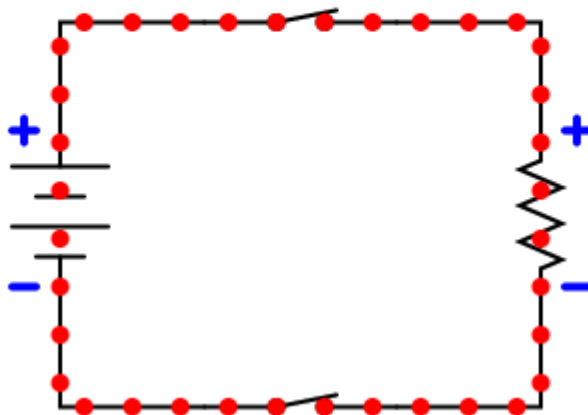


| Electrical Terms                                                                                                                                                                                          | Familiar Comparisons                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Voltage.</b> Electrical pressure, the potential to do work. Measured in volts (V) or in kilovolts (kV) (1kV = 1000 volts).</p> <p>Lamp plugged in but turned off:</p> <p>120V</p> <p>Switch off</p> | <p>Hose connected to an open faucet but with the nozzle turned off.</p> <p>Water pressure in hose.</p> <p>Nozzle closed</p> |
| <p><b>Current.</b> The movement of electric charge (e.g., electrons). Measured in amperes (A).</p> <p>Lamp plugged in and turned on:</p> <p>120V</p> <p>1A</p> <p>Switch on</p>                           | <p>Hose connected to an open faucet and with the nozzle turned on.</p> <p>Moving water in hose.</p> <p>Nozzle open</p>      |

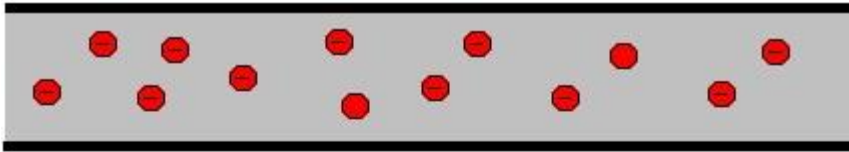
# Ważna umowa – kierunek przepływu prądu: od + do – (przeciwnie niż elektrony!)



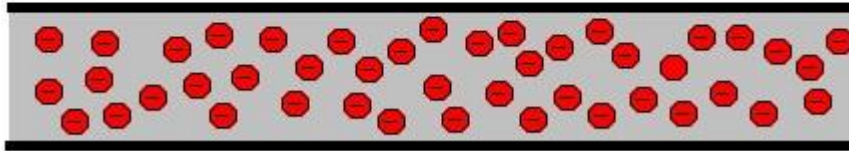
Prąd płynie tylko w obwodzie zamkniętym!



# Natężenie prądu – $I$ [A]



Few Electrons Flowing = Low Amps



Many Electrons Flowing = High Amps

- to ilość ładunku przepływającego w jednostce czasu,

$$I = \Delta Q / \Delta t$$

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C} / 1 \text{ s}$$

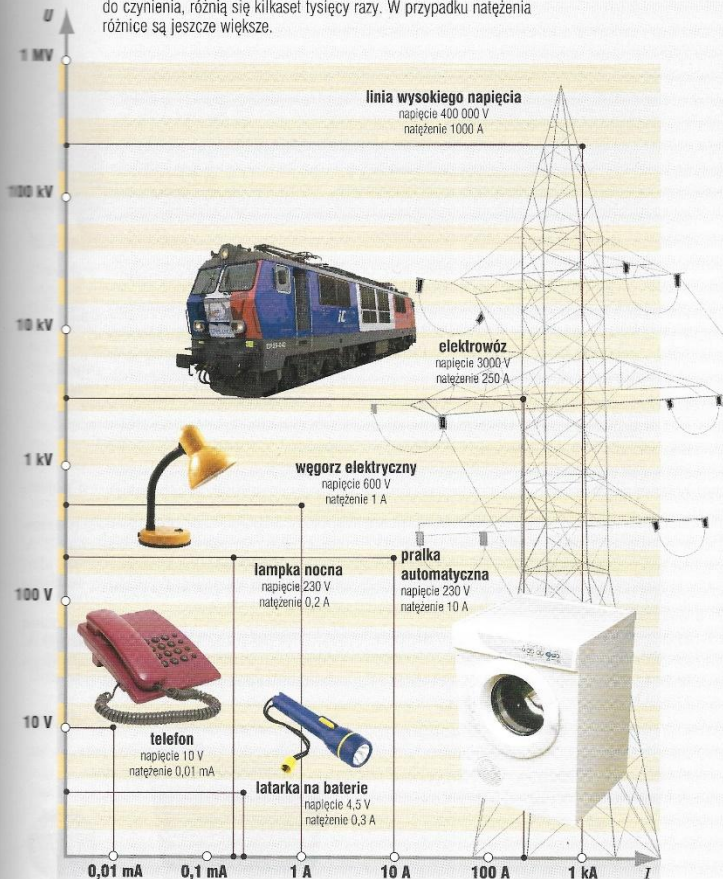
# Do wywołania przepływu prądu potrzebne jest napięcie $U$ [V]

## Natężenie prądu a stopień rażenia

- Najbardziej niebezpieczny jest prąd zmienny o częstotliwości od 20 do 100 Hz:
  - częstotliwość ta wywołuje skurcze mięśni, może zaburzyć czynność serca,
  - bezpieczna granica prądu wynosi około 10 mA – powyżej tej granicy człowiek nie jest w stanie uwolnić się spod napięcia wskutek skurczu mięśni.
- Prądy przemiennie o innych częstotliwościach oraz prądy stałe są mniej szkodliwe – granica wynosi około 25 mA.

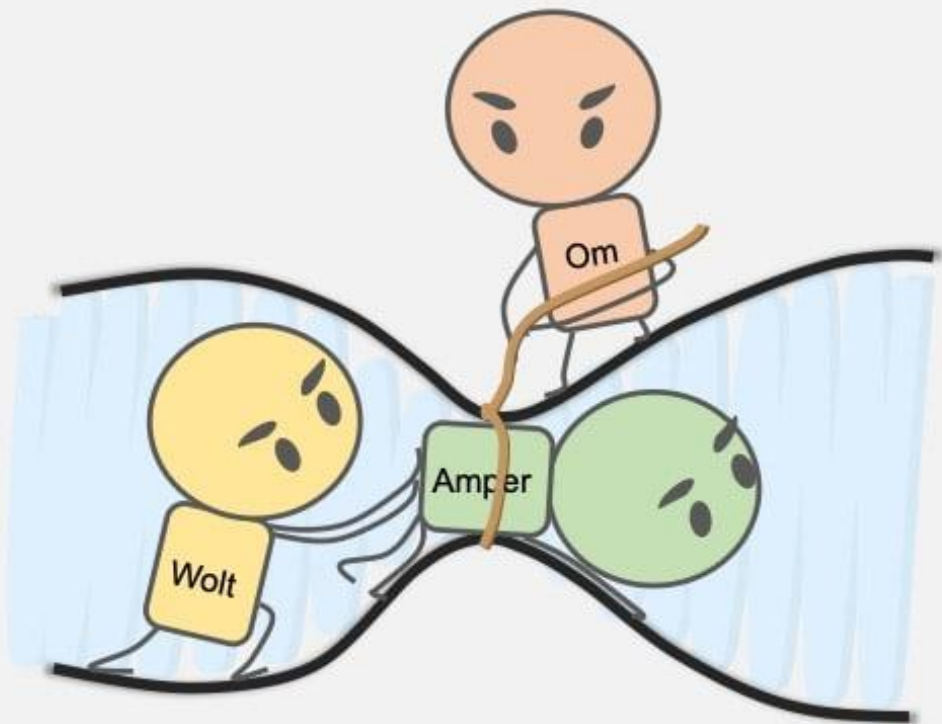
## Napięcie i natężenie wokół nas

Najwyższe i najniższe wartości napięcia, z którymi mamy na co dzień do czynienia, różnią się kilkaset tysięcy razy. W przypadku natężenia różnice są jeszcze większe.



# PRAWO OHMA

na wesoło

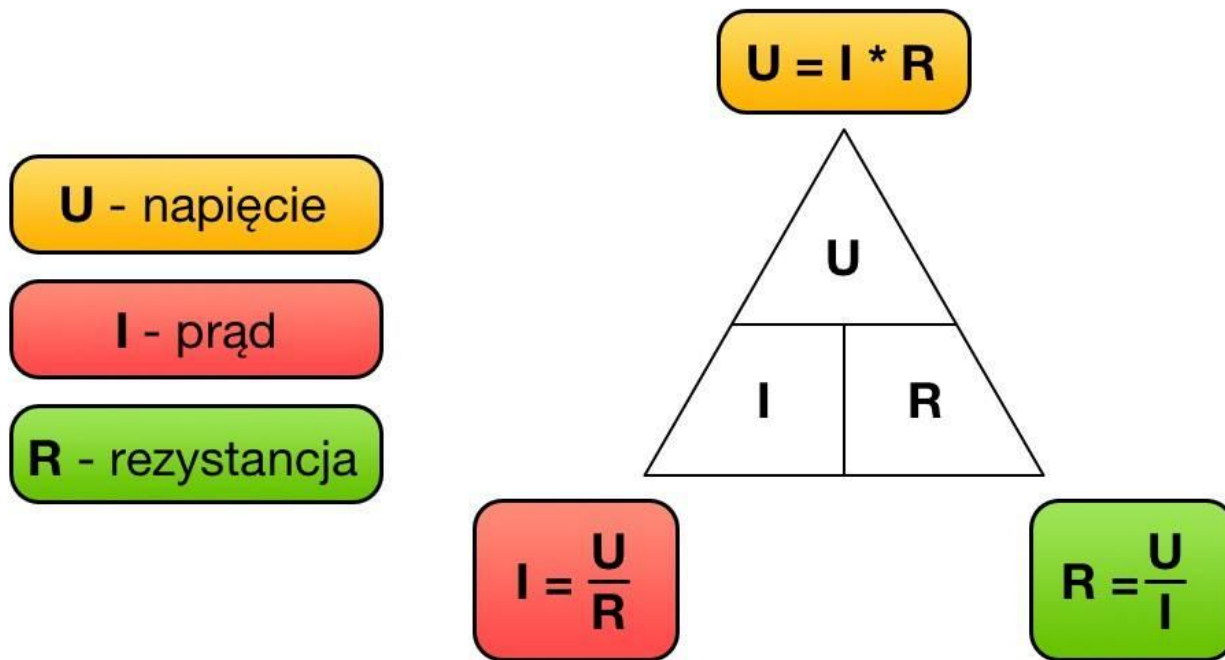


Trzeci bohater:  
opór elektryczny  $R$  [ $\Omega$ ]

- zależność

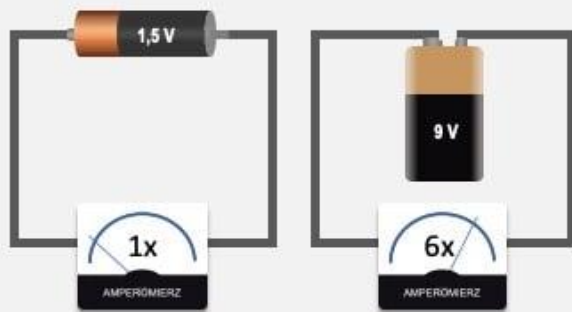
$$I = U / R$$

# Piramida (trójkąt) - praktyczna reguła



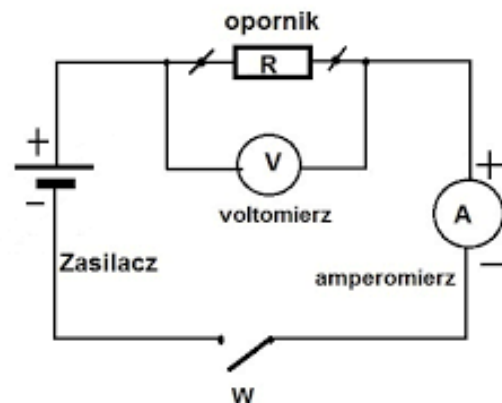
# Pomiary w obwodzie prądu

## PRAWO OHMA

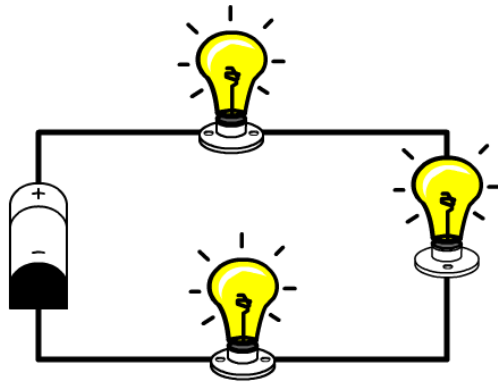


NATĘŻENIE PRĄDU STAŁEGO PŁYNĄCEGO PRZEZ PRZEWODNIK JEST PROPORCJONALNE DO NAPIĘCIA PRZYŁOŻONEGO DO JEGO KOŃCÓW

Sprawdzimy w praktyce, jak zależy natężenie prądu od oporu elektrycznego



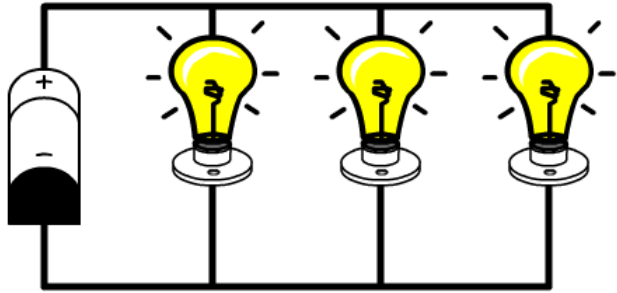
# Łączenie „odbiorników” - szereg



**Series Circuit**

- stałe natężenie prądu – tyle samo ładunku przepływa wszędzie;
- ze wzrostem ilości odbiorników spada napięcie;
- po „przepaleniu” jednego nie będzie działać żaden

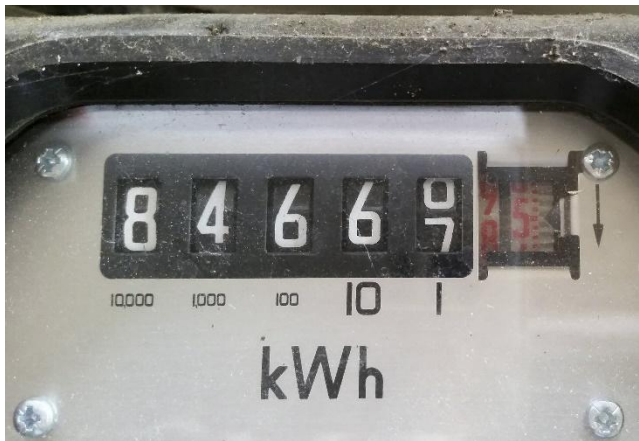
# Łączenie „odbiorników” - równolegle



**Parallel Circuit**

- stałe napięcie – wszystkie świecą tak samo;
- zmniejsza się natężenie prądu (ładunki rozdzielają się);
- „przepalenie” jednego nie wpłynie na pozostałe
- wersja korzystniejsza, realizowana w domowych obwodach prądu

# Za co płacimy? (kWh)



- Płacimy za zużycie energii – tj. wykonaną przez prąd pracę:

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h},$$

A co to za wielkość fizyczna?

$P \cdot t$  (moc  $\cdot$  czas) to  $W$  (praca),  
 $1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J}$

*40 kg na Mt. Everest!*

# Praca i moc prądu



$$W = U \cdot I \cdot t$$

$U$  - napięcie

$I$  - natężenie prądu

$t$  - czas przepływu prądu

- Moc to *praca / czas*, stąd

$$P = U \cdot I$$

Dodatkowo – z prawa Ohma

$$U = I \cdot R, \text{ więc } P = I^2 R$$

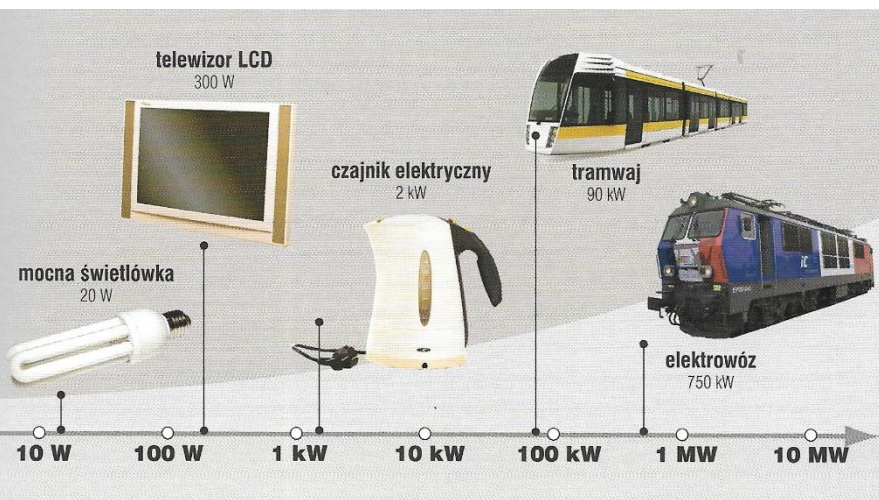
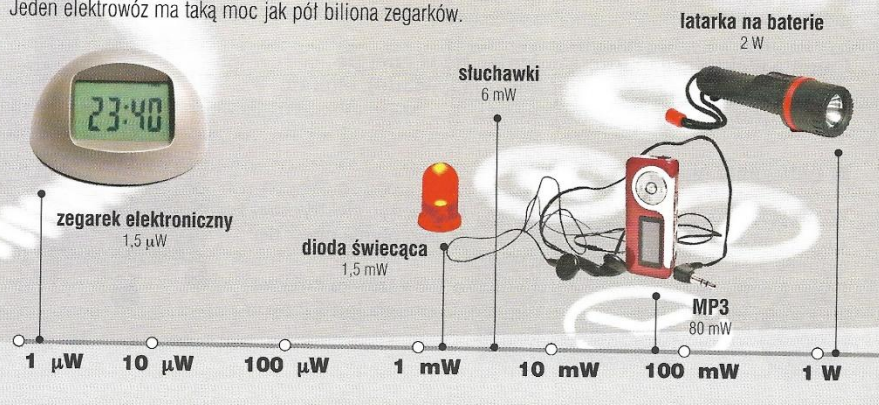
lub

$$I = U/R, \text{ więc } P = U^2/R$$

(co wyjaśnia świecenie żarówek)

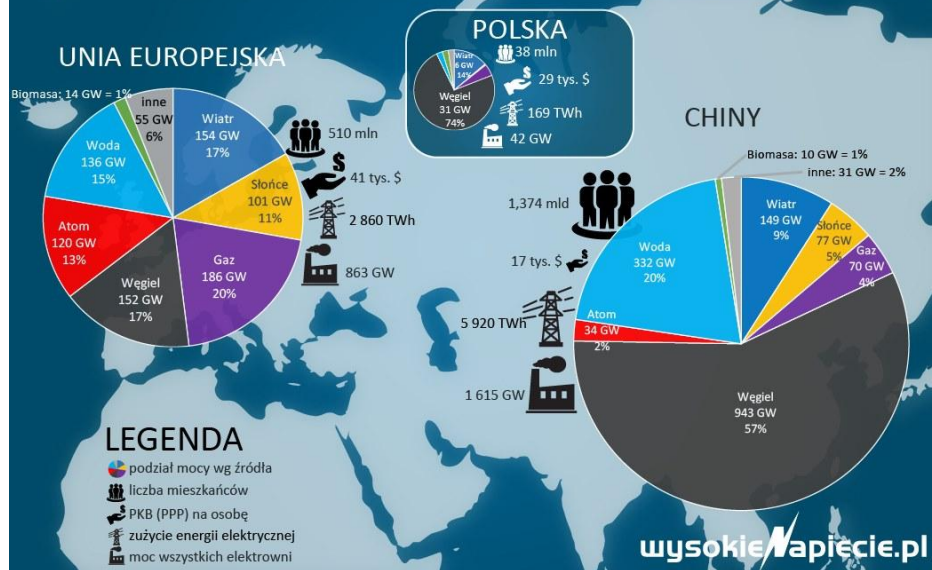
## Moce elektryczne duże i małe

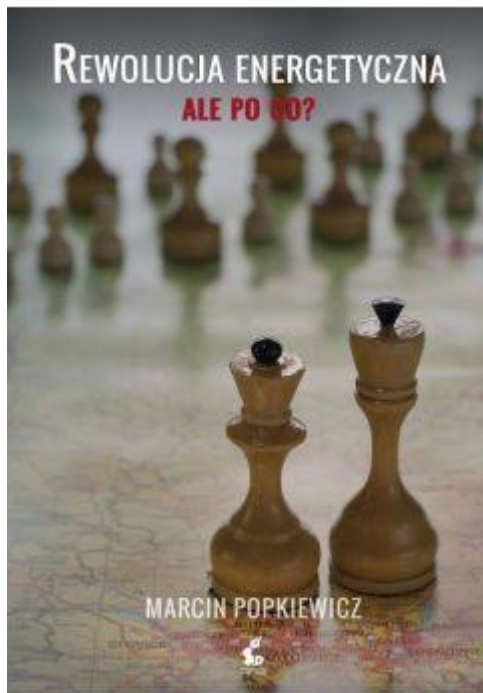
Jeden elektrowóz ma taką moc jak pół biliona zegarków.



# Moc w praktyce

## Energia elektryczna w UE, Chinach i Polsce



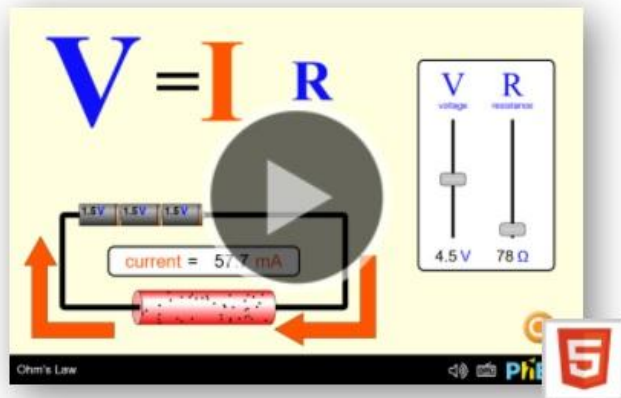


# Czy wiesz, że...

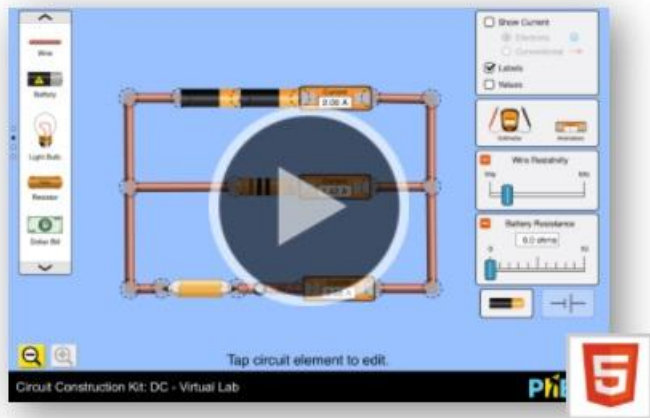
na jednego Polaka przypada 80 kWh dziennie, czyli na każdego z nas, metaforycznie, pracuje 80 niewolników (1 kWh (kilowatogodzina) to odpowiednik ciężkiej pracy fizycznej jednego człowieka od świtu do nocy). Dla porównania, w Stanach ten wskaźnik wynosi 200, średnia w Europie to sto, w Chinach kilkadziesiąt...

Przede wszystkim powinniśmy odpowiedzieć sobie na pytanie, czy potrzebujemy tych 80 niewolników, którzy na nas pracują, czy potrzebujemy aż tyle energii? Odpowiedź brzmi – nie, ponieważ potrzebujemy nie takiej czy innej ilości kilowatogodzin czy gigadżuli, ale usług energetycznych na dobrym poziomie. Krok pierwszy to racjonalizacja zużycia energii...

## Ohm's Law



## Circuit Construction Kit: DC - Virtual Lab



phet.colorado.edu

- [Prawo Ohma](#)
- [Obwody prądu stałego](#)

### FIZYKA

#### Prąd elektryczny i jego natężenie

bezpiecznik, prąd elektryczny, André-Marie Ampère, ładunek elektryczny, napięcie elektryczne, natężenie prądu elektrycznego, jednostka natężenia prądu elektrycznego, elektryczność, amper, miernik uniwersalny, amperomierz,...

### FIZYKA

#### Urządzenia elektryczne

źródła energii elektrycznej, ELEKTRYCZNOŚĆ, prąd elektryczny, rysunki schematyczne, izolatory, prąd stały, doświadczenie, schematy obwodów, obwód elektryczny, przewodnik elektryczności, prąd...

### FIZYKA

#### Praca prądu elektrycznego

dżul, prąd elektryczny, elektryczność, kilowatogodzina, skala Kelvina, kilowatogodzina (kWh), praca prądu elektrycznego, moc prądu elektrycznego



### FIZYKA

#### Moc prądu elektrycznego

energia cieplna, prąd elektryczny,



### FIZYKA

#### Napięcie elektryczne

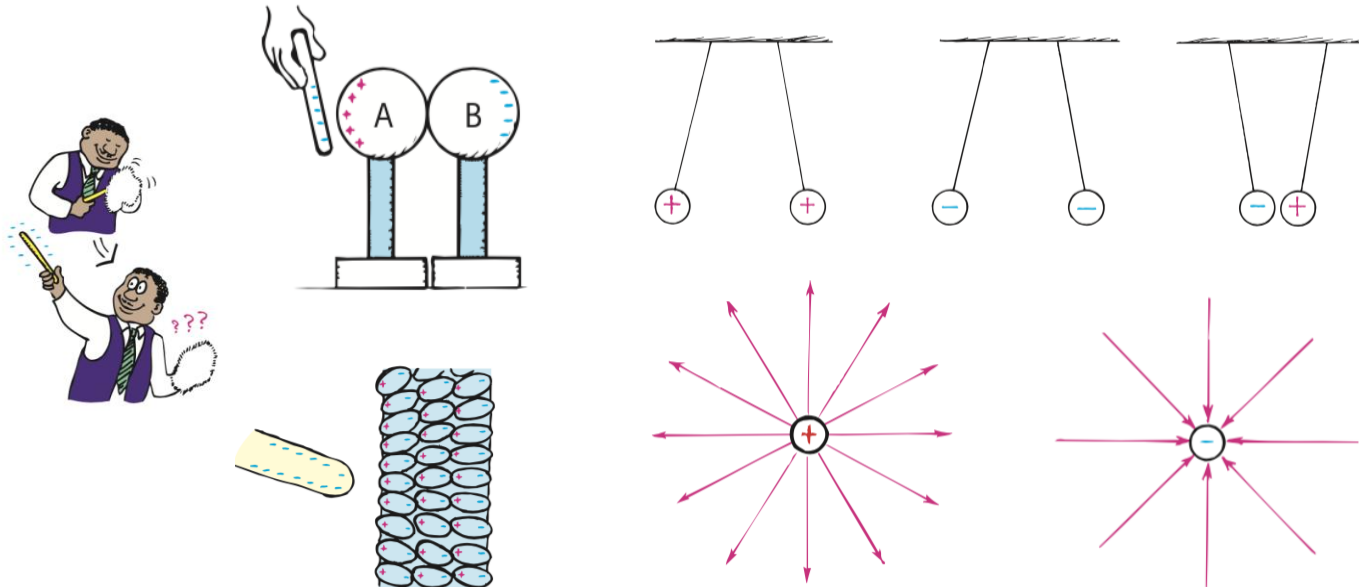
bateria elektryczna, pomiar napięcia,



### FIZYKA

#### Podsumowanie wiadomości o elektryczności

# Ładunek elektryczny, prawo Coulomba, pole elektrostatyczne

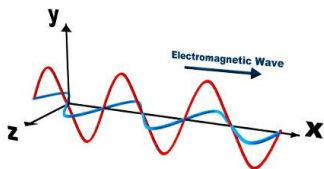


# Elektryczność (i magnetyzm)

Żyjemy w świecie elektromagnetycznym, ponieważ oprócz grawitacji niemal każda siła, jakiej doświadczamy w życiu codziennym, ma pochodzenie elektromagnetyczne.



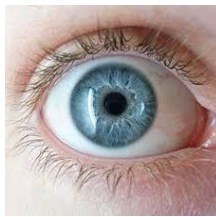
elektryczne źródła światła,  
komputery,  
TV, radio, telefony,  
pociągi, tramwaje, samochody,  
zakłady przemysłowe, ...



elektryczność odpowiada za  
światło, fale radiowe,



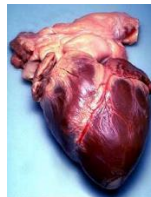
kolory tęczy, kolor nieba



widzimy dzięki  
elektryczności



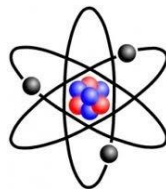
organizmy żywe poruszają się  
dzięki elektryczności (skurcze  
mięśni)



serce bije dzięki elektryczności



układ nerwowy działa dzięki  
elektryczności,  
myślimy dzięki elektryczności

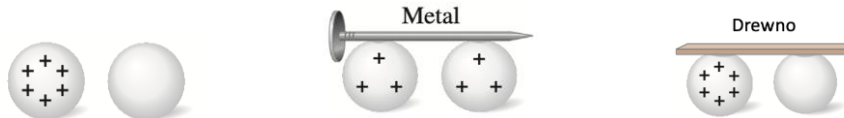


atomy, molekuły, reakcje  
chemiczne istnieją dzięki  
elektryczności

# Historia elektryczności w skrócie

<https://www.youtube.com/watch?v=Gtp51eZkwol>

- W starożytności (Tales z Miletu, 624–546 p.n.e.) zauważono, że potarty bursztyn (od jego nazwy pochodzi słowo elektron) przyciąga plewy i suche liście.
- W XVI wieku (William Gilbert 1544–1603) znane były inne materiały o podobnych właściwościach, np. szkło, kryształy, kamienie półszlachetne. Odkryto, że istnieją dwa rodzaje elektryczności – jeden jeśli potrzasz szkło, drugi jeżeli potrzasz bursztyn. Zauważono, że elektryczność tego samego typu odpycha się, natomiast elektryczność różnego typu przyciąga się. ([https://www.youtube.com/watch?v=45AAII9\\_lsc](https://www.youtube.com/watch?v=45AAII9_lsc))
- Benjamin Franklin (XVIII w) uważał, że elektryczność jest czymś na rodzaj przepływającego fluidu (ognia) między ciałami, nadmiar tego fluidu daje dodatnią elektryczność (**dodatni ładunek elektryczny**), niedobór fluidu daje ujemną elektryczność (**ujemny ładunek elektryczny**).
- Jedno ciało przekazując drugiemu fluid staje się ujemnie elektrycznie, ciało pobierające staje się dodatnie elektrycznie (zasada zachowania ładunku elektrycznego)
- Zgodnie z konwencją znaków Franklina (bardzo niefortunna) potarte szkło charakteryzuje się dodatnią elektrycznością, natomiast potarta guma charakteryzuje się ujemną elektrycznością.
- Zauważono, że niektóre ciała znacznie lepiej przewodzą elektryczność, nazwano je przewodnikami. Ciała o słabej przewodności elektryczności to izolatory (dielektryki).



Aby zrozumieć pochodzenie elektryczności trzeba poznać budowę atomu.

## Teoria atomistyczna Daltona

John Dalton (1766-1844)

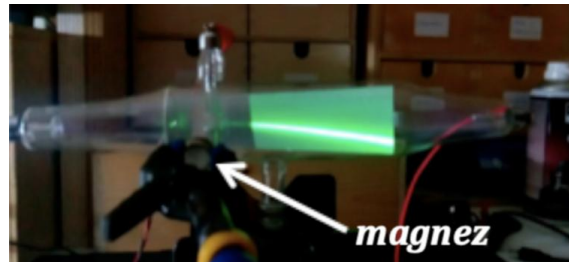


- Atom jest najmniejszym „budulcem” materii. Jest jednolity i niepodzielny.
- Wszystkie atomy danego pierwiastka chemicznego są identyczne (posiadają ten sam zespół właściwości).
- Atomy danego pierwiastka A różnią się od atomów pierwiastka B.
- Atomy są niezmiennie i niepodzielne. Atomy danego pierwiastka A nie mogą przemienić się w atomy pierwiastka B. Atomy nie zmieniają się w trakcie reakcji chemicznych.
- Związki chemiczne powstają przez łączenie się pierwiastków w stałych stosunkach.
- Atom jest elektrycznie obojętną kulką.

W drodze do atomu ze złożoną strukturą...

## Promienie katodowe - odkrycie elektronu

Joseph Thomson (1897)



<https://www.youtube.com/watch?v=O9Goyscbazk>

[https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=elplyn\\_magnet\\_elektron&l=pl](https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=elplyn_magnet_elektron&l=pl)

Model atomu Thomsona:



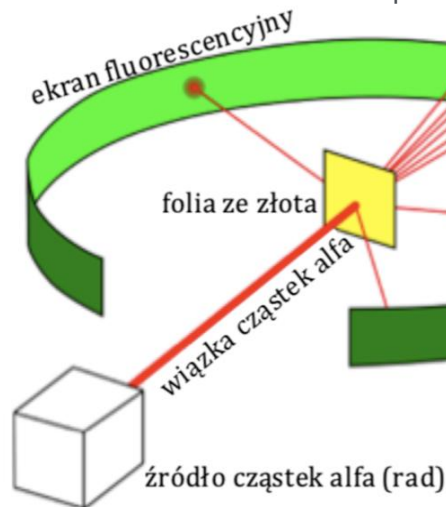
W drodze do atomu ze złożoną strukturą...

## Doświadczenie Rutherforda- odkrycie jądra atomowego

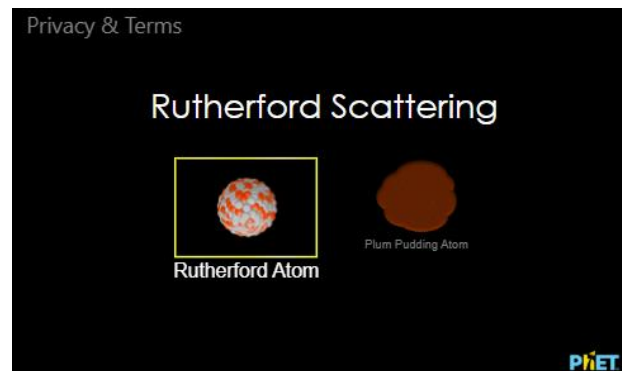
Ernest Rutheford (1911)



To było **tak**, **jakby pocisk** artyleryjski wielkiego kalibru, wystrzelony w kierunku kawałka bibułki, odbił się od niej i powrócił do strzelającego.

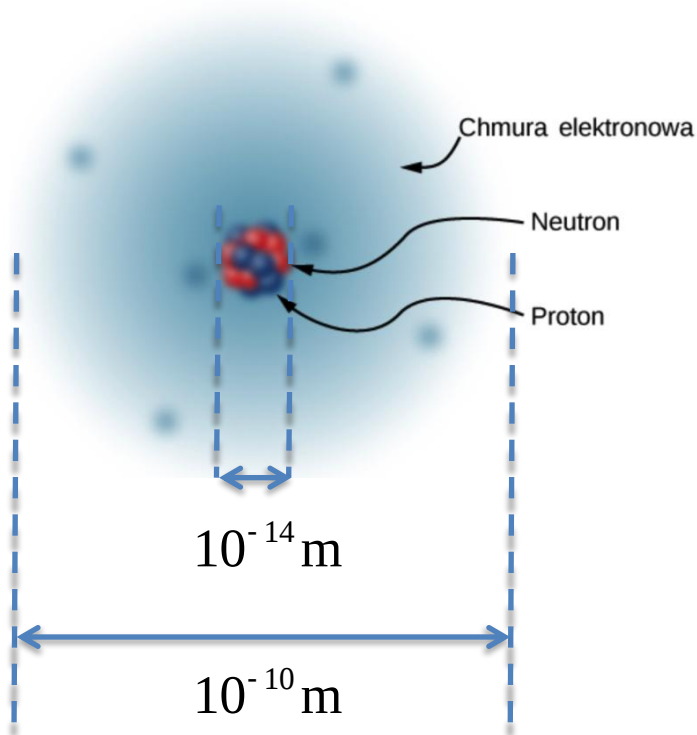


[https://www.vascak.cz/data/android/physicsa-tschool/template.php?s=atom\\_rutheford&l=pl](https://www.vascak.cz/data/android/physicsa-tschool/template.php?s=atom_rutheford&l=pl)



[https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_en.html)

# Współczesny obraz atomu



Jądro ( $\sim 10^{-14} \text{ m}$ ): protonu (+), neutrony (0)

$$m_p \approx m_n = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Promień protonu został oszacowany na 0,84 fm.

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Promień elektronu jest nieznan (traktujemy go jak punkt)

Ładunek elektronu i protonu:

$$e = +/ - 1.602 \times 10^{-19} \text{ C},$$

Jest to ładunek elementarny, każdy inny ładunek jest całkowitą wielokrotnością tego ładunku (z wyjątkiem kwarków, które tworzą protony i neutrony)

# Elektryzowanie przez ciało pocieranie (zjawisko tryboelektryczne)

[https://phet.colorado.edu/sims/html/john-travoltage/latest/john-travoltage\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/john-travoltage/latest/john-travoltage_en.html)

Privacy & Terms



# Elektryzowanie przez ciało pocieranie oraz przez indukcję elektromagnetyczną

[https://phet.colorado.edu/sims/html/balloons-and-static-electricity/latest/balloons-and-static-electricity\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/balloons-and-static-electricity/latest/balloons-and-static-electricity_en.html)

Privacy & Terms

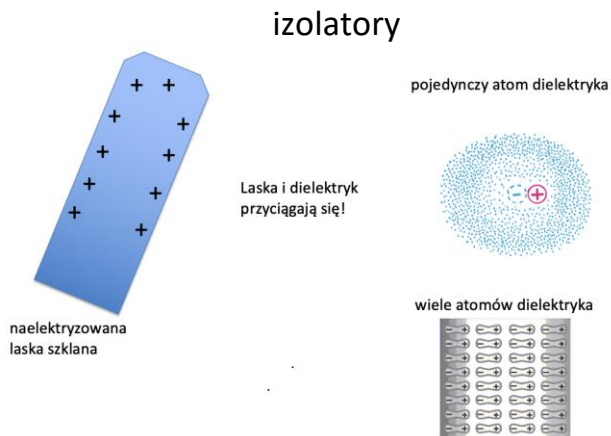


Balloons and Static Electricity

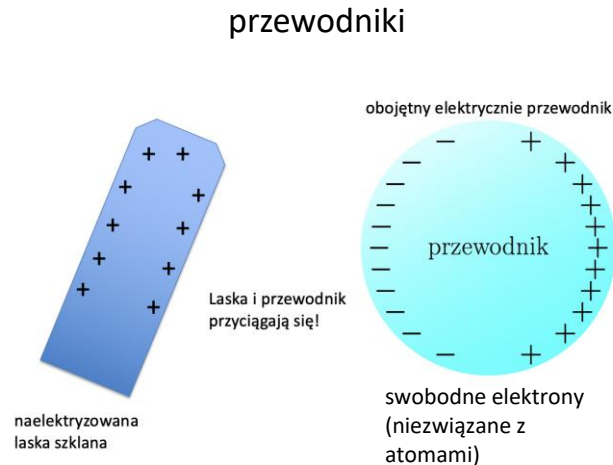
# Elektryzowanie przez indukcję elektrostatyczną

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

W wyniku zbliżenia ciała naładowanego do ciała bez ładunku w tym drugim następuje chwilowe przemieszczenie elektronów.



„Przyklejanie” balonów do ściany

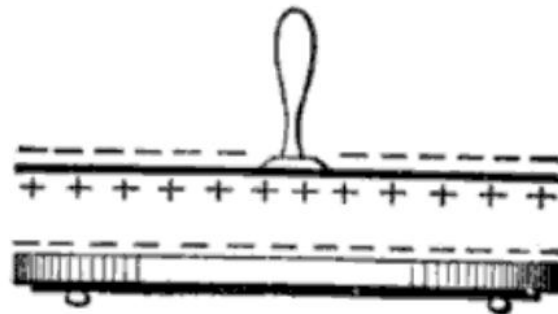


Tresowanie puszek:

[http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa\\_strona/?q=node/481](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/481)

# Elektrofor – prosty generator ładunku elektrycznego (poprzez indukcję elektryczną)

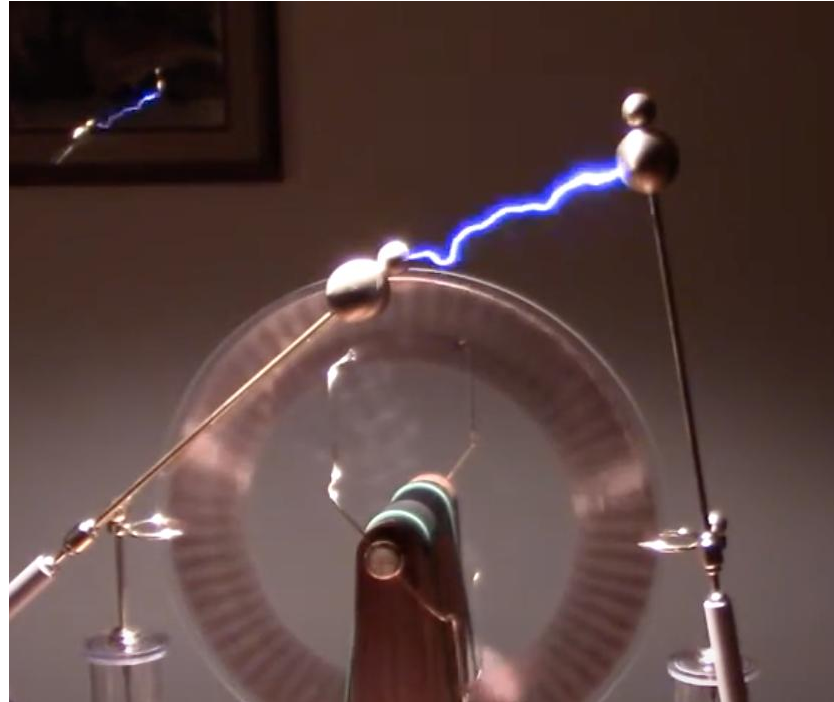
(Alessandro Volta 1775 r)



[http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa\\_strona/?q=node/506](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/506)

# Maszyna elektrostatyczna

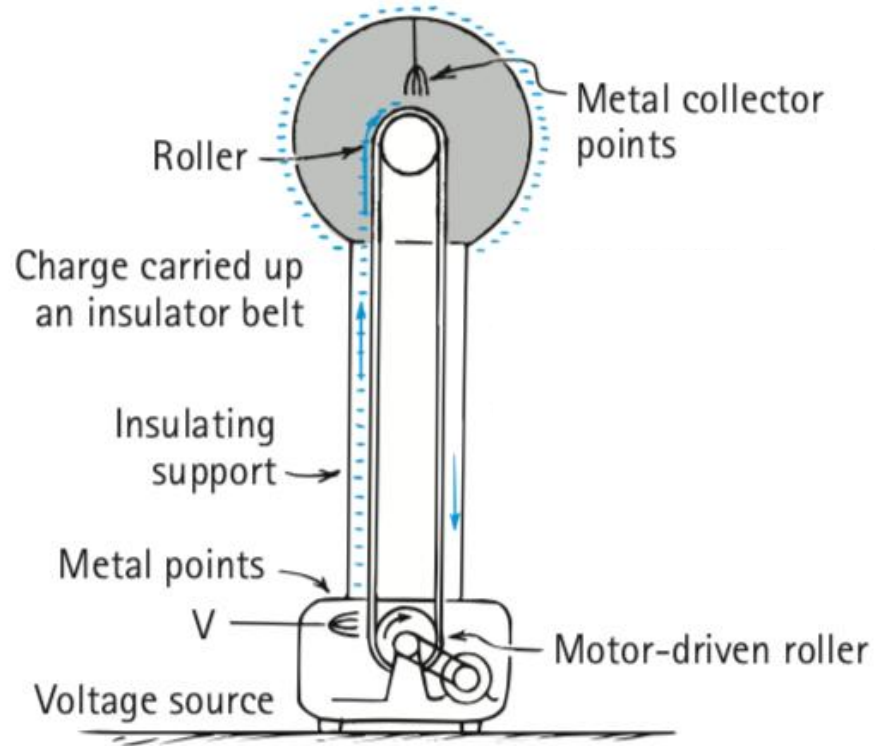
[http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje\\_2011/Maszyna\\_el\\_2011.pdf](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2011/Maszyna_el_2011.pdf)



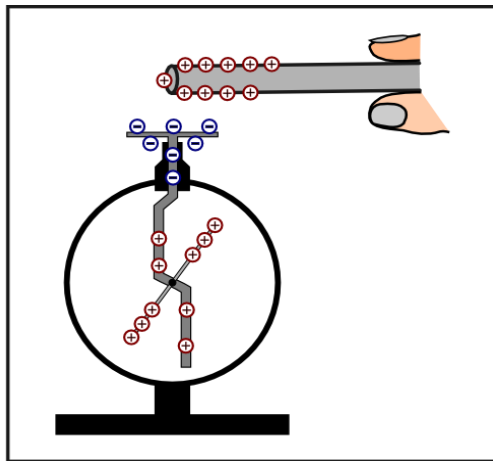
[https://www.youtube.com/watch?v=6zd\\_HwgrJjI](https://www.youtube.com/watch?v=6zd_HwgrJjI)

[https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=ele\\_wimshurst&l=pl](https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=ele_wimshurst&l=pl)

# Generator van de Graaffa



# Elektroskop – detektor ładunku elektrycznego



<https://www.youtube.com/watch?v=4UnggxPVCYw>

# Żywy elektroskop

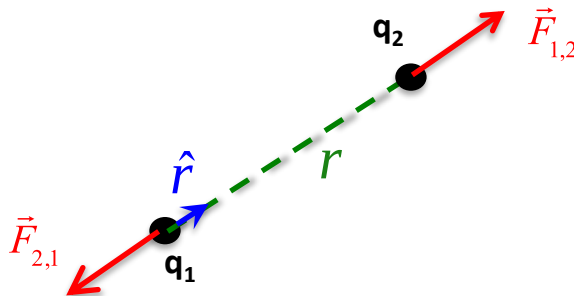


<https://www.youtube.com/watch?v=fLBHg5joXHY> – oglądaj od 1 min i 25 sek

# Prawo Coulomba

Prawo Coulomba opisuje siłę oddziaływania dwóch ładunków punktowych:

|                                                                                   |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Charles Coulomb</b><br>Charles Augustin de Coulomb                             |                              |
|  |                              |
| Charles Augustin de Coulomb                                                       |                              |
| Data i miejsce urodzenia                                                          | 14 czerwca 1736<br>Angoulême |
| Data i miejsce śmierci                                                            | 23 sierpnia 1806<br>Paryż    |
| Zawód, zajęcie                                                                    | wojskowy, inżynier,<br>fizyk |



$$\vec{F}_{1,2} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{m}^2 \text{N}}{\text{C}^2},$$

Alternatywny (historyczny) zapis stałej  $k$ :

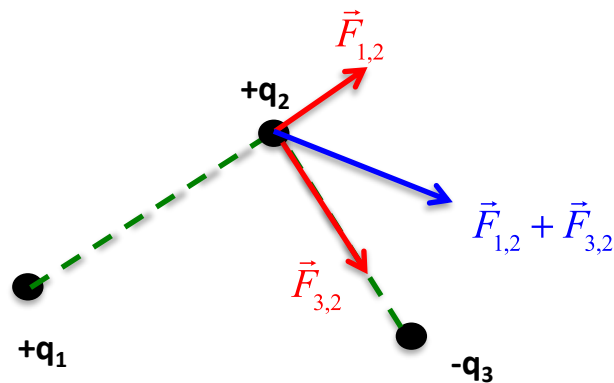
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{m}^2 \text{N}}$$

przenikalność elektryczna próżni

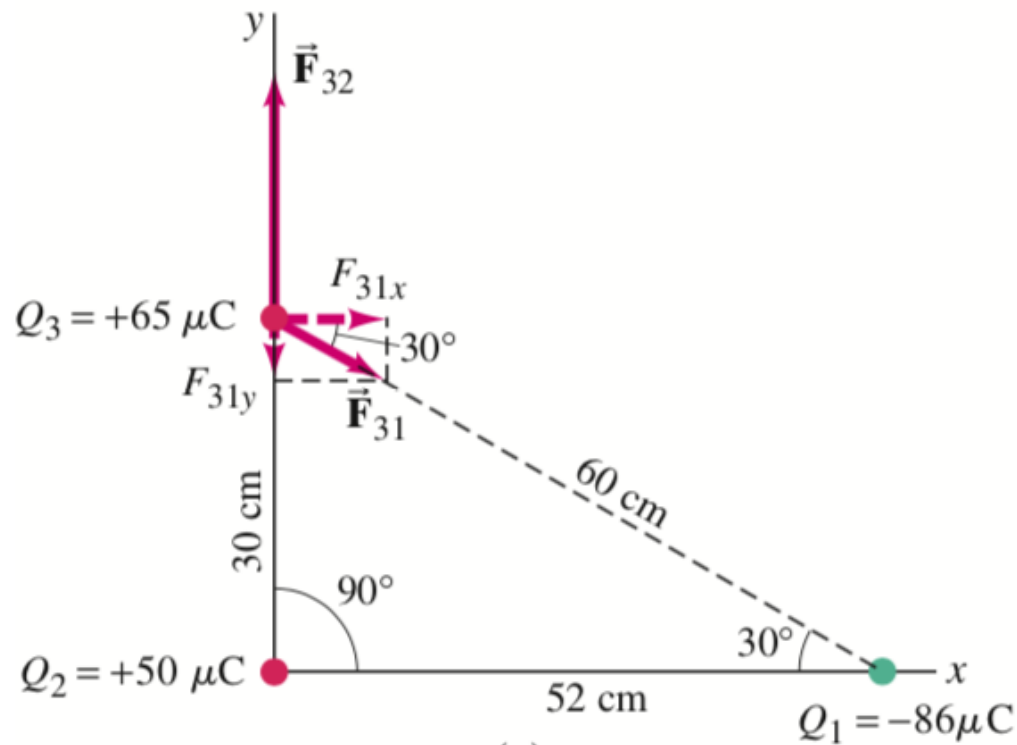
# Superpozycja sił elektrycznych

Jaka wypadkowa siła działa na ładunek  $q_2$ ?



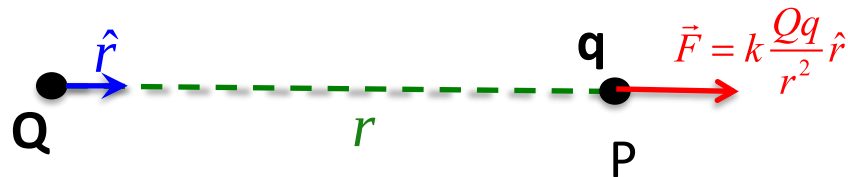
$$\vec{F} = \vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{3,2}$$

Wyznaczyć wartość siły wypadkowej działającej na ładunek  $Q_3$  w poniższej konfiguracji.



# Pole elektrostatyczne

(próba wytłumaczenia oddziaływania na odległość)



Natężenie pola elektrycznego = siła / jednostkę ładunku

$$\vec{E}_P = \frac{\vec{F}}{q}$$

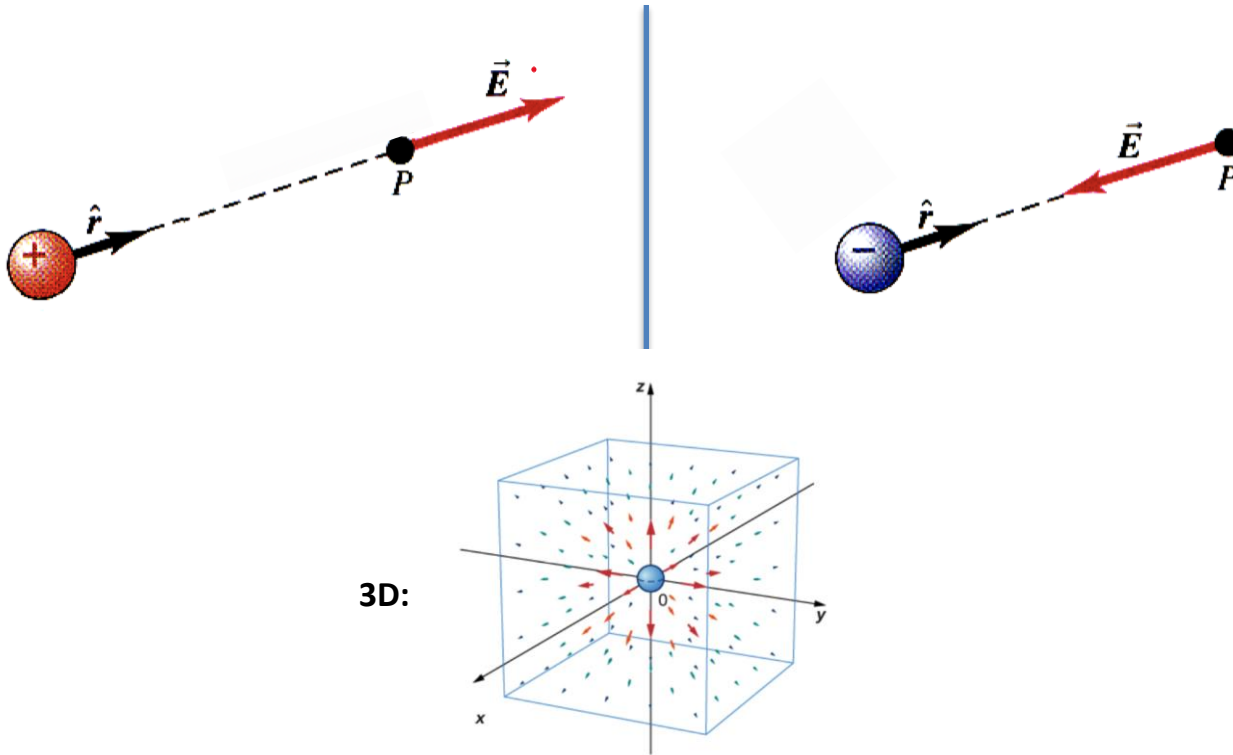
Natężenie pola elektrycznego ładunku punktowego w punkcie P (w odległości r od źródła):

$$\vec{E}_P = k \frac{Q}{r^2} \hat{r}$$

$$\left[ \frac{\text{N}}{\text{C}} \right]$$

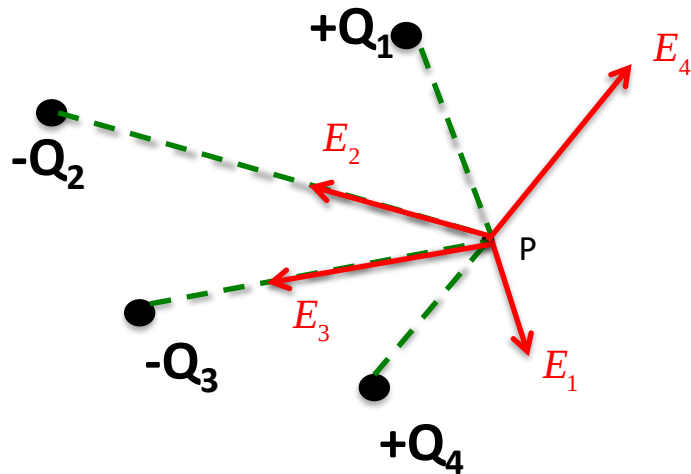
# Pole elektryczne ładunków punktowych

kierunek  $\vec{E}$ :  
od plusa, do minusa



# Superpozycja pola elektrycznego

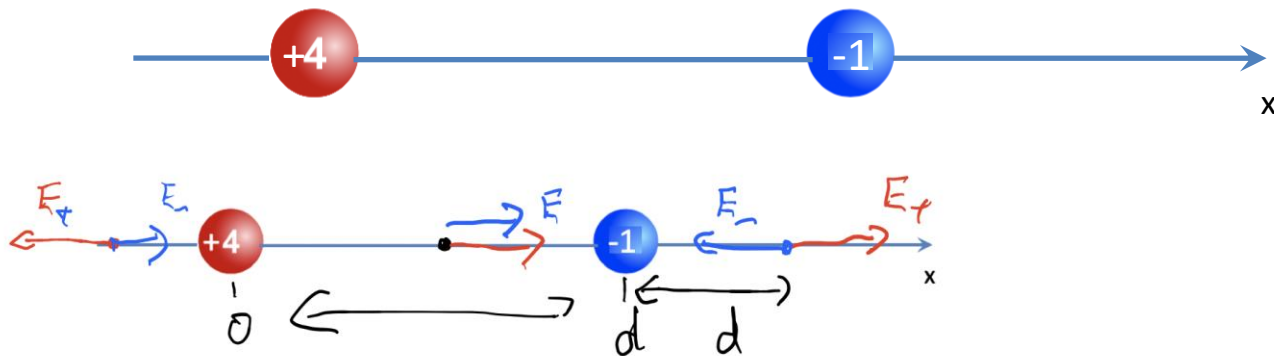
Efektywne pole elektryczne w punkcie P?



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 = \sum_{i=1}^4 \vec{E}_i$$

# Pole elektryczne układu ładunków

Gdzie natężenie pola elektrycznego może wynosić zero?



$$E_+ = k \frac{4}{x^2}$$

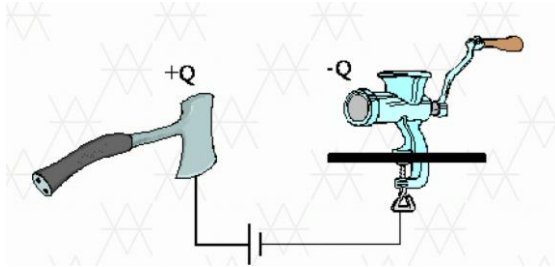
$$E_- = k \frac{1}{(x-d)^2}$$

$$k \frac{4}{x^2} - k \frac{1}{(x-d)^2} = 0$$

$$x_1 = +\frac{2}{3}d \leftarrow \text{ODRZUCAMY}$$

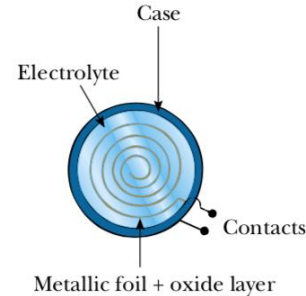
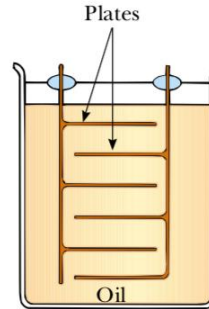
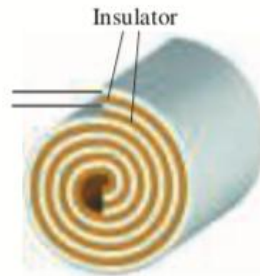
$$x_2 = 2d$$

# Kondensator



[http://www.if.pw.edu.pl/~anadam/WykladyFO/FoWWW\\_32.html](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.

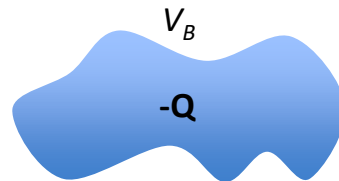
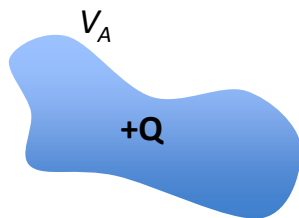


Kondensatory wykorzystywane są do magazynowania ładunku i energii elektrycznej!

# Pojemność kondensatora

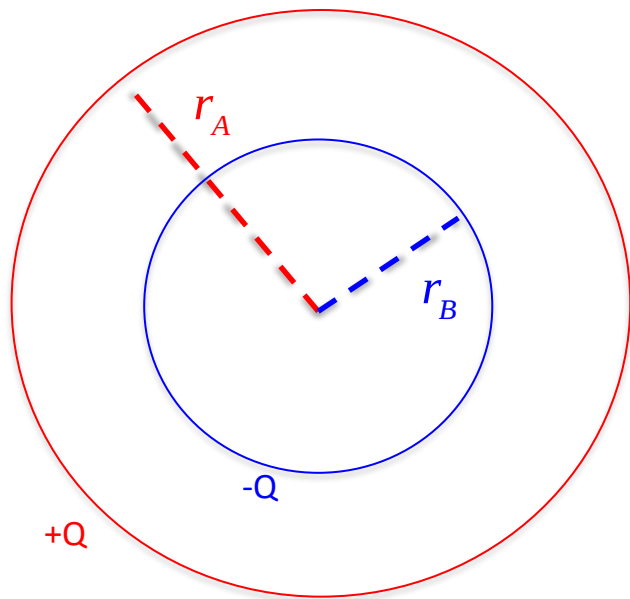
Kondensator charakteryzuje pojemność określająca zdolność kondensatora do gromadzenia ładunku i energii:

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



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

# Pojemność kondensatora kulistego



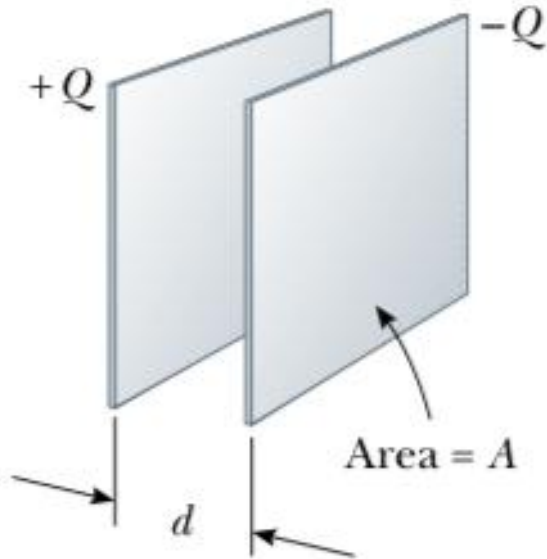
$$V_A = k \frac{+Q}{r_A}$$

$$V_B = k \frac{-Q}{r_B}$$

$$\Delta V_{AB} = |V_A - V_B| = k \frac{+Q(r_A - r_B)}{r_A r_B}$$

$$C = \frac{Q}{\Delta V_{AB}} = \frac{1}{k} \frac{r_A r_B}{r_A - r_B}$$

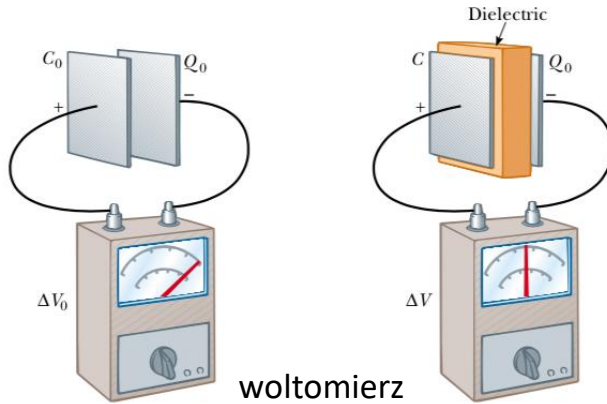
# Pojemność kondensatora płaskiego



$$\mathcal{V}_{+/-} = Ed, \quad E = \frac{s}{e_0} = \frac{Q}{Ae_0}$$

$$C = \frac{Q}{\mathcal{V}_{+/-}} = e_0 \frac{A}{d}$$

# Dielektryk w kondensatorze



$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad \square \quad \frac{E_0}{k} = \frac{\Delta V_0}{kd}$$

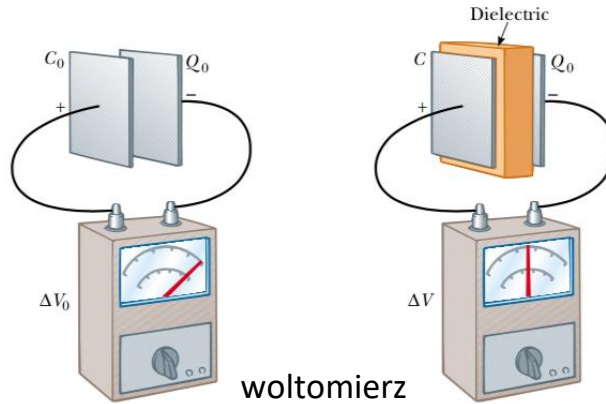
Wstawienie dielektryka pomiędzy okładki kondensatora powoduje spadek napięcia na kondensatorze:

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

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

$$C = kC_0$$

# Dielektryk w kondensatorze



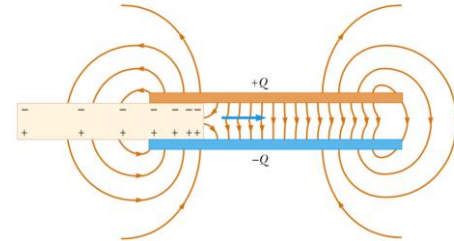
$$E = \frac{D}{d} \quad \square \quad \frac{E_0}{k} = \frac{D_0}{kd}$$

Energia zgromadzona w kondensatorze bez dielektryka:

$$U_0 = \frac{1}{2} C_0 D_0^2$$

Energia zgromadzona w kondensatorze z dielektrykiem:

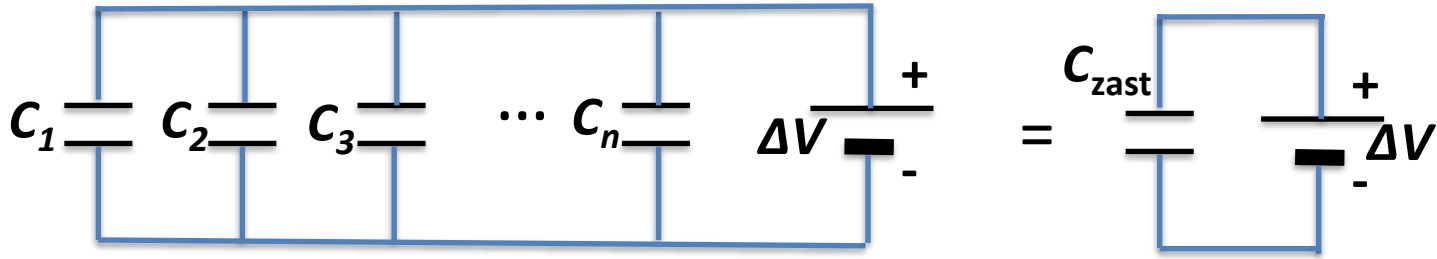
$$U = \frac{1}{2} k C_0 \frac{D_0^2}{k^2} = \frac{1}{k} U_0$$



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

# POJEMNOŚĆ ZASTĘPCZA UKŁADU KONDENSATORÓW POŁĄCZONYCH RÓWNOLEGLE

Łączenie równoległe kondensatorów:



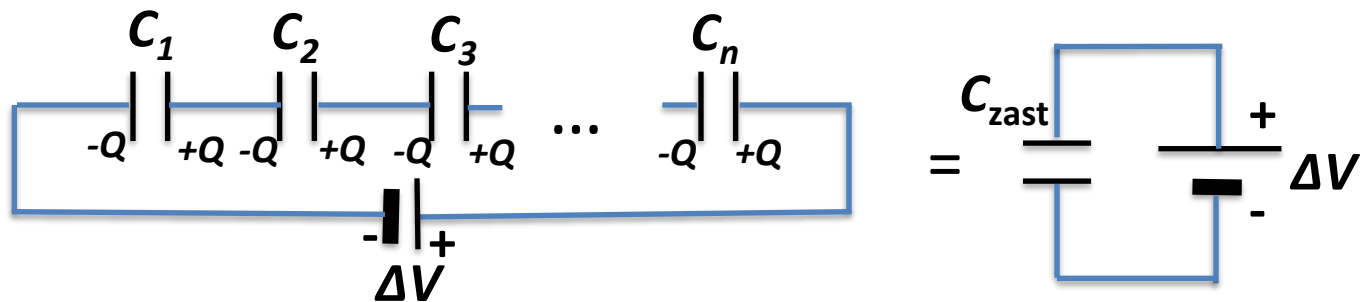
Pojemność zastępcza układu:

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

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

# POJEMNOŚĆ ZASTĘPCZA UKŁADU KONDENSATORÓW POŁĄCZONYCH SZEREGOWO

Łączenie szeregowe kondensatorów:



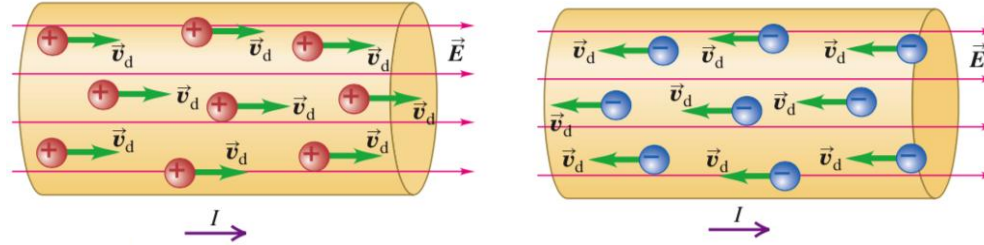
Pojemność zastępcza układu:

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

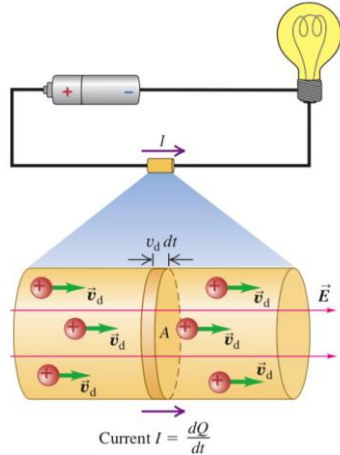
$$\Delta V = \frac{Q}{C_{\text{zast}}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{1}{C_{\text{zast}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

# Natężenie prądu elektrycznego

Wymuszenie w przewodniku różnicy potencjałów powoduje przepływ ładunków elektrycznych. Powszechnie przyjmuje się, że przepływający prąd ma taki sam kierunek jak przepływ ładunków dodatnich – chociaż w metalach za przepływ ładunku odpowiedzialne są ujemnie naładowane elektrony swobodne.



Natężenie prądu definiujemy jako ładunek przepływający w jednostce czasu przez poprzeczny przekrój przewodnika:

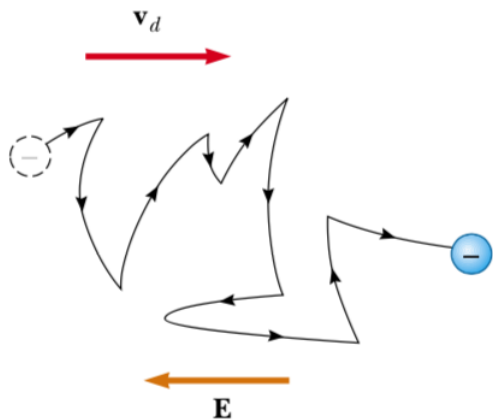


$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Amper:

$$[A] = \left[ \frac{C}{s} \right]$$

# Mikroskopowy opis przepływu prądu



Przewodnik miedziany (Cu) w temperaturze pokojowej (293 K):

- średnia prędkość chaotycznego (termicznego) ruchu elektronów swobodnych:  $\langle v_t \rangle = 10^6 \text{ m/s}$
- czas pomiędzy zderzeniami z atomami:  $t = 3 \cdot 10^{-14} \text{ s}$
- ilość elektronów swobodnych w  $\text{m}^3$ :  $n = 10^{29}$

W zewnętrznym polu elektrycznym każdy elektron doznaje przyspieszenia w kierunku pola:

$$a = \frac{F}{m_e} = \frac{eE}{m_e} \quad \text{p} \quad v_d = at = \frac{eEt}{m_e} \quad \text{prędkość unoszenia (dryfu)}$$

Dla przewodnika Cu o długości  $\Delta l = 10 \text{ m}$  oraz napięciu  $\Delta V = 10 \text{ V}$ :

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta l} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad \square \quad v_d = \frac{et\Delta V}{m_e \Delta l} \approx 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

# Oporność właściwa różnych substancji

| Substance         |                                  | $\rho \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$ | Substance              |                      | $\rho \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$ |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------------------|
| <b>Conductors</b> |                                  |                                        | <b>Semiconductors</b>  |                      |                                        |
| Metals            | Silver                           | $1.47 \times 10^{-8}$                  | Pure carbon (graphite) | $3.5 \times 10^{-5}$ |                                        |
|                   | Copper                           | $1.72 \times 10^{-8}$                  | Pure germanium         | 0.60                 |                                        |
|                   | Gold                             | $2.44 \times 10^{-8}$                  | Pure silicon           | 2300                 |                                        |
|                   | Aluminum                         | $2.75 \times 10^{-8}$                  | <b>Insulators</b>      |                      |                                        |
|                   | Tungsten                         | $5.25 \times 10^{-8}$                  | Amber                  | $5 \times 10^{14}$   |                                        |
|                   | Steel                            | $20 \times 10^{-8}$                    | Glass                  | $10^{10} - 10^{14}$  |                                        |
|                   | Lead                             | $22 \times 10^{-8}$                    | Lucite                 | $> 10^{13}$          |                                        |
|                   | Mercury                          | $95 \times 10^{-8}$                    | Mica                   | $10^{11} - 10^{15}$  |                                        |
| Alloys            | Manganin (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%) | $44 \times 10^{-8}$                    | Quartz (fused)         | $75 \times 10^{16}$  |                                        |
|                   | Constantan (Cu 60%, Ni 40%)      | $49 \times 10^{-8}$                    | Sulfur                 | $10^{15}$            |                                        |
|                   | Nichrome                         | $100 \times 10^{-8}$                   | Teflon                 | $> 10^{13}$          |                                        |
|                   |                                  |                                        | Wood                   | $10^8 - 10^{11}$     |                                        |

# Opór i prawo Ohma

$$I = s A E = s \frac{A}{l} \mathcal{V}$$

$$\mathcal{V} = \frac{l}{s A} I$$

Prawo Ohma:

$$\mathcal{V} = R I$$

Opór elektryczny:

$$R = \frac{l}{s A} = r \frac{l}{A}$$

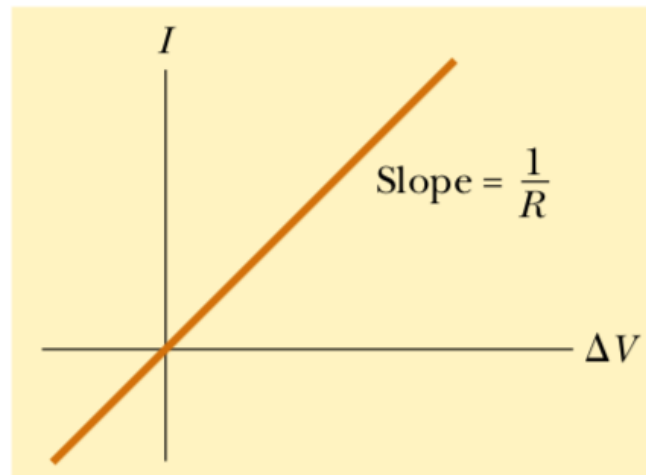
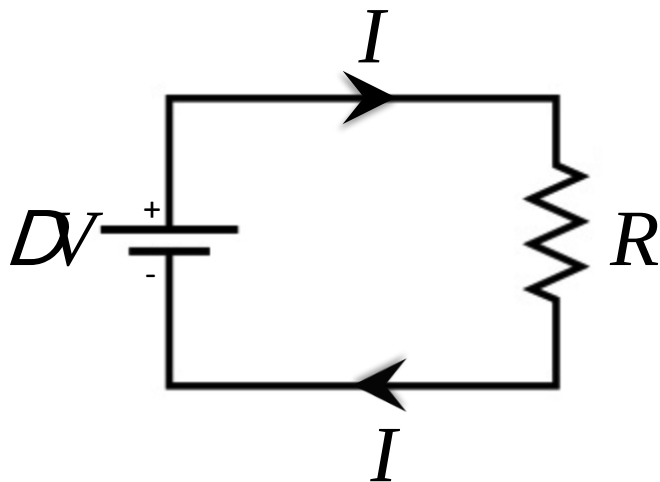
Ohm:

$$[\Omega] = \left[ \frac{V}{A} \right]$$

Opór elektryczny, podobnie jak pojemność kondensatora, jest wielkością geometryczną, tj. zależy od długości przewodnika oraz pola przekroju poprzecznego.

# Weryfikacja prawa Ohma

$$I = \frac{1}{R} \Delta V$$

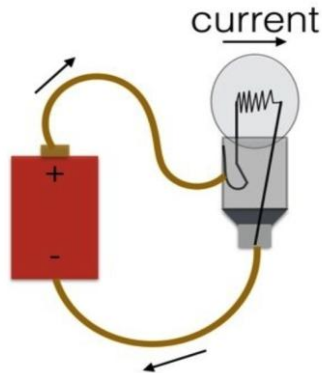


# Elementy nieliniowe, nieomowe (w zależności natężenie prądu – napięcie)

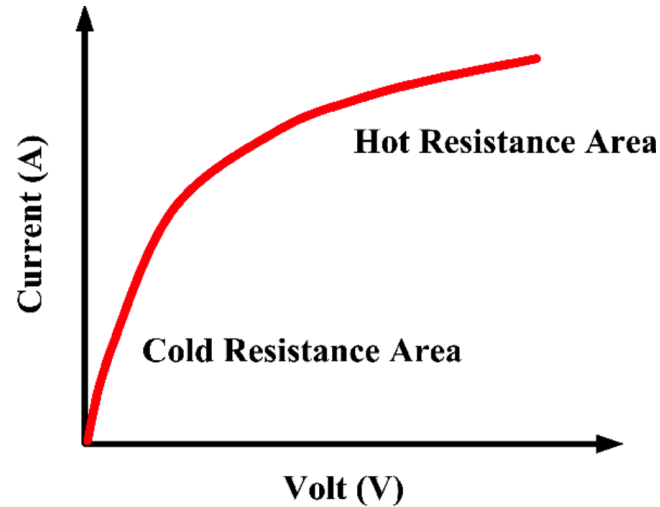
Wykres prądu od napięcia nie zawsze jest liniowy, ponieważ opór zależy również od temperatury. Dla metali opór na ogół rośnie wraz ze wzrostem temperatury, ponieważ maleje czas  $\tau$  pomiędzy zderzeniami elektronów z atomami, a tym samym rośnie oporność właściwa.

$$r = \frac{m_e}{e^2 t n}$$

$$I = \frac{1}{R(T)} \mathcal{D}V$$



żarówka rozgrzewając się zwiększa swój opór

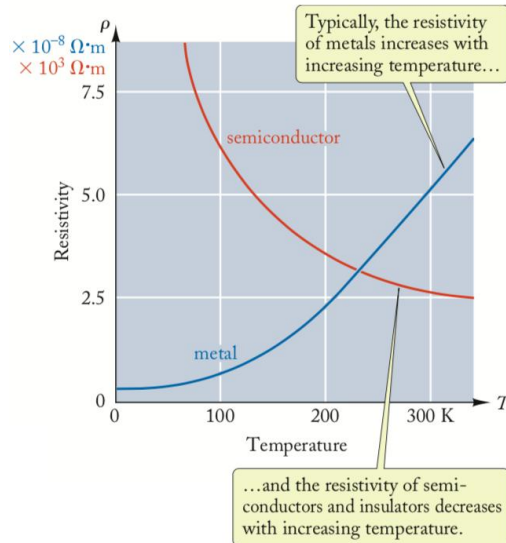


# Zależność temperaturowa oporu

W ograniczonym przedziale temperatur, opór przewodników zależy liniowo od temperatury:

$$R = R_0 \left[ 1 + a(T - T_0) \right]$$

gdzie  $\alpha$  to współczynnik temperaturowy rezystancji,  
 $R_0$  to rezystancja w temperaturze odniesienia  $T_0$

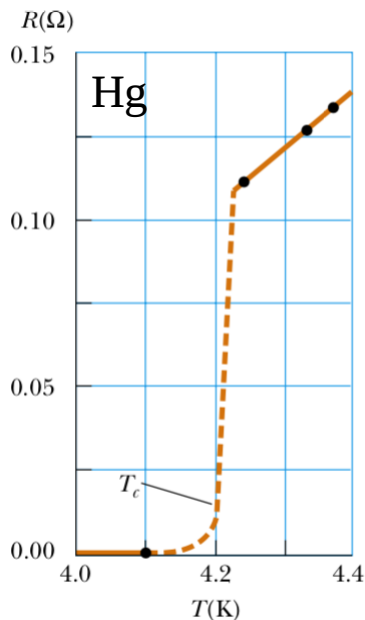


| Material              | Temperature Coefficient <sup>b</sup> $\alpha [ (^{\circ}\text{C})^{-1} ]$ |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Silver                | $3.8 \times 10^{-3}$                                                      |
| Copper                | $3.9 \times 10^{-3}$                                                      |
| Gold                  | $3.4 \times 10^{-3}$                                                      |
| Aluminum              | $3.9 \times 10^{-3}$                                                      |
| Tungsten              | $4.5 \times 10^{-3}$                                                      |
| Iron                  | $5.0 \times 10^{-3}$                                                      |
| Platinum              | $3.92 \times 10^{-3}$                                                     |
| Lead                  | $3.9 \times 10^{-3}$                                                      |
| Nichrome <sup>c</sup> | $0.4 \times 10^{-3}$                                                      |
| Carbon                | $-0.5 \times 10^{-3}$                                                     |
| Germanium             | $-48 \times 10^{-3}$                                                      |
| Silicon               | $-75 \times 10^{-3}$                                                      |

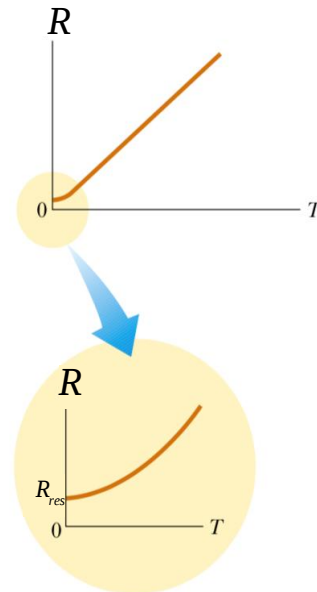
} półprzewodniki

# Nadprzewodniki

Zmniejszając temperaturę do zera absolutnego, opór większości przewodników osiągnie niezerową wartość  $R_{\text{res}}$  związaną z rozpraszaniem elektronów na defektach i nieczystościach w sieci krystalicznej materiału. Istnieją jednak substancje, których opór poniżej pewnej temperatury (zwanej temperaturą krytyczną) spada do zera – są to nadprzewodniki



| Critical Temperatures for Various Superconductors                |          |
|------------------------------------------------------------------|----------|
| Material                                                         | $T_c(K)$ |
| HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8</sub> | 134      |
| Tl-Ba-Ca-Cu-O                                                    | 125      |
| Bi-Sr-Ca-Cu-O                                                    | 105      |
| YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>                  | 92       |
| Nb <sub>3</sub> Ge                                               | 23.2     |
| Nb <sub>3</sub> Sn                                               | 18.05    |
| Nb                                                               | 9.46     |
| Pb                                                               | 7.18     |
| Hg                                                               | 4.15     |
| Sn                                                               | 3.72     |
| Al                                                               | 1.19     |
| Zn                                                               | 0.88     |

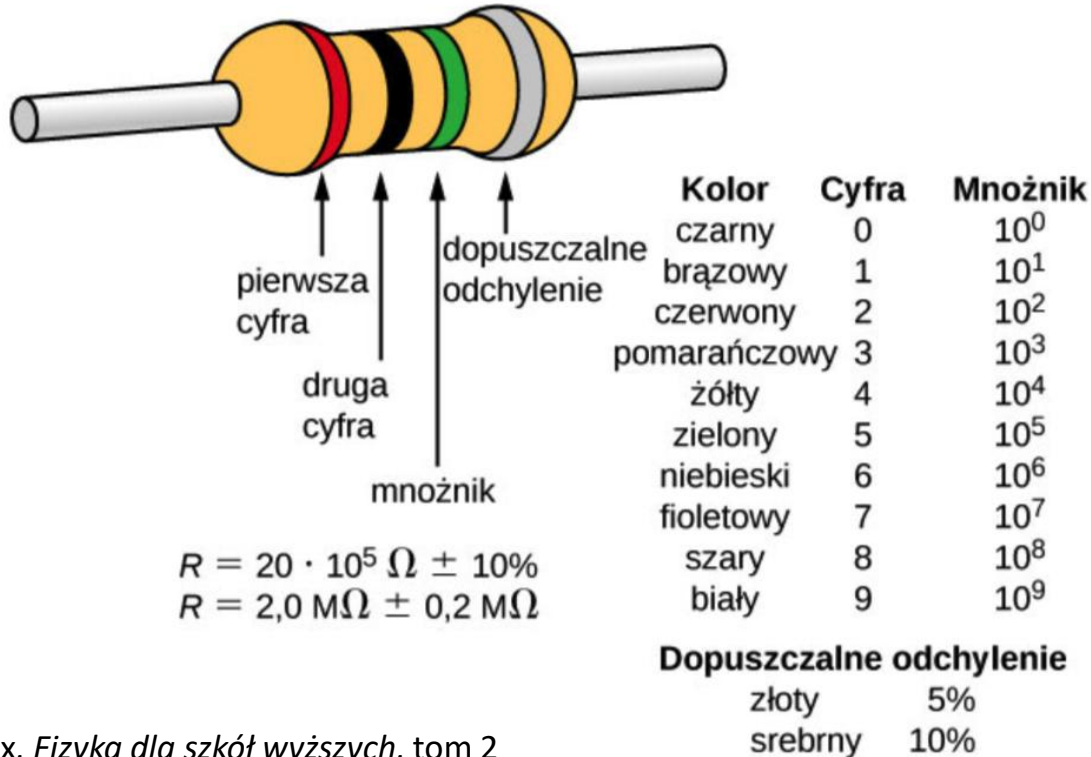


Nadprzewodniki wypychają zewnętrzne pole magnetyczne (tzw. efekt Meissnera)

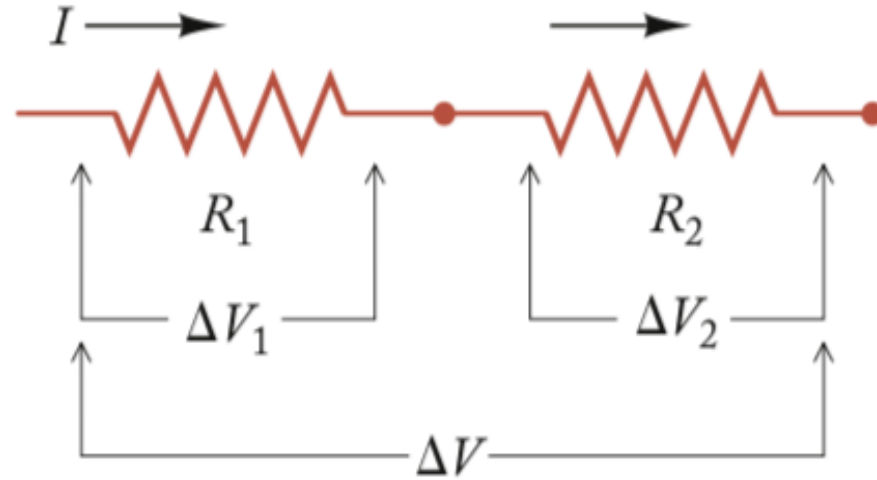


# Kody paskowe rezystorów stosowanych w układach elektronicznych

W układach elektronicznych często wymagane są rezystory o ściśle określonej rezystancji. Wartości wielu rezystorów można określić za pomocą oznakowania paskowego:



## Szeregowe łączenie oporów



$$\Delta V_1 = IR_1$$

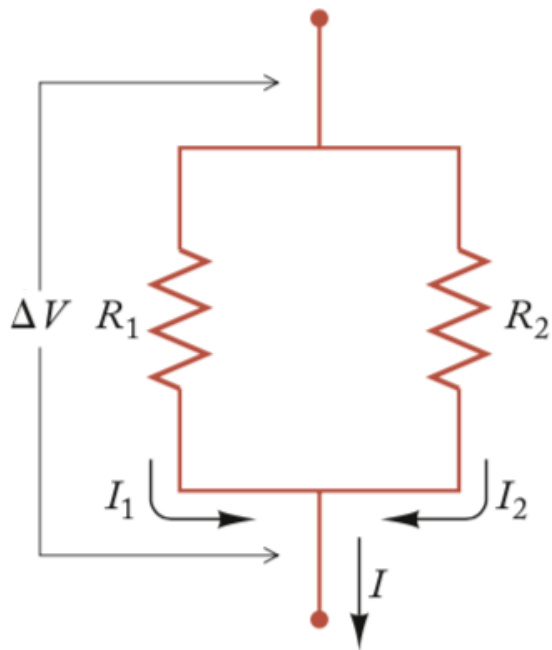
$$\Delta V_2 = IR_2$$

$$\Delta V = I(R_1 + R_2)$$

Opór zastępczy:

$$R_z = R_1 + R_2$$

## Równoległe łączenie oporów



$$\Delta V = I_1 R_1$$

$$\Delta V = I_2 R_2$$

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} = \Delta V \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]$$

Opór zastępczy:

$$\frac{1}{R_z} = \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]$$

# Przewodność powietrza

Oporność właściwa zimnego, suchego powietrza pod ciśnieniem 1 atm jest relatywnie wysoka  $\sim 10^{13} \Omega\text{m}$ . Napięcie przebicia to ok. 30 000 V / cm

Naładowany elektroskop przez długi czas może pozostać w takim stanie (odpływ ładunku jest bardzo powolny). Możemy przyspieszyć rozładowanie elektroskopu poprzez wykreowanie wolnych jonów i elektronów w okolicy elektroskopu (np. jonizując powietrze za pomocą świecy). Jonizując powietrze zwiększamy jego przewodność.



# Przewodność wody

Przewodność czystej (destylowanej) wody jest niewielka. Wartość  $\text{pH} = 7$ , co oznacza, że zaledwie  $1/10^7$  cząstek ulega rozpadowi na dodatni jon wodorowy ( $\text{H}^+$ ) i ujemny jon  $\text{OH}^-$ . Czysta woda jest słabym przewodnikiem prądu. Woda jest jednak dobrym rozpuszczalnikiem i to jony obcych substancji są odpowiedzialne za przepływ prądu.

Dodając niewielką ilość soli kuchennej ( $\text{NaCl}$ ) do wody możemy znacząco zwiększyć jej przewodność. Zaledwie 3% (wagowo) masy soli względem masy wody wystarczy aby konduktywność roztworu wzrosła milion ( $10^6$ ) razy.



# Źródła siły elektromotorycznej = „pompy” prądu



ogniwo  
Volty

komórki elektrochemiczne



akumulator



baterie

generatory elektryczne



Prądnicą (dynamo)

urządzenia termoelektryczne

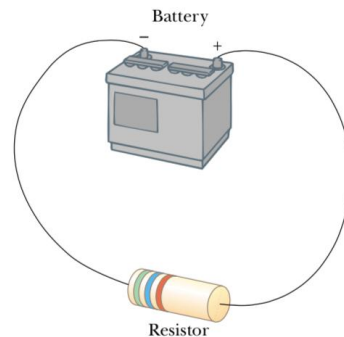
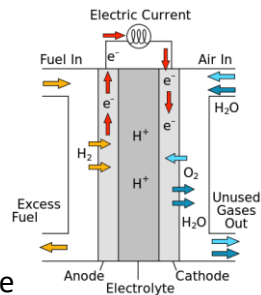


termopara

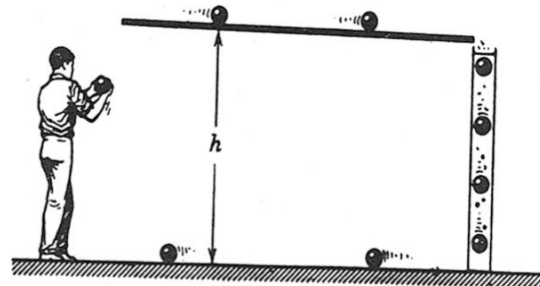
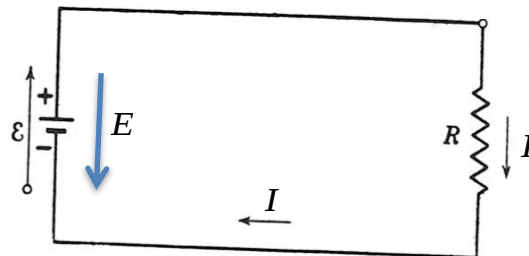


fotookiwa

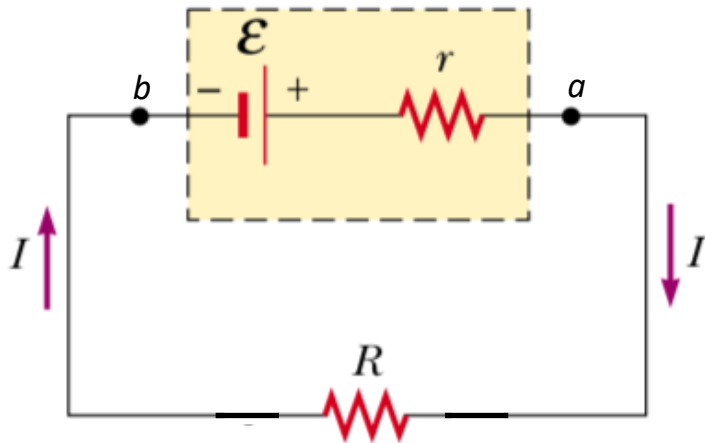
ogniwa paliwowe



$I$



# Opór wewnętrzny źródła siły elektromotorycznej



Wewnętrzna rezystancja źródła powoduje spadek napięcia pomiędzy punktami *a* i *b* podczas przepływu prądu:

$$e - Ir = \Delta V_{ab}$$

$$e - Ir = IR$$

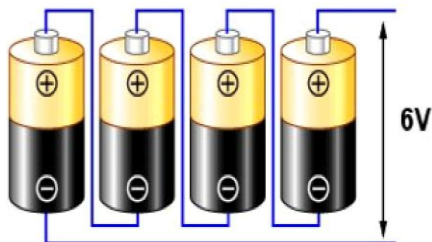
$$I = \frac{e}{R + r}$$

Dla źródeł rzeczywistych napięcie wyjściowe  $\Delta V_{ab}$  źródła równe jest sile elektromotorycznej tylko w sytuacji, gdy żaden prąd nie płynie przez źródło (obwód jest otwarty).

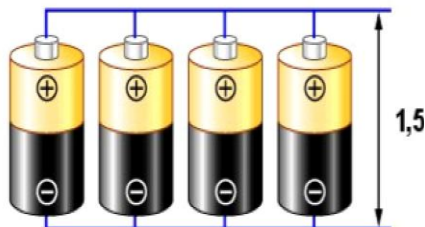
Źródło siły elektromotorycznej (np. bateria) ulega wyczerpaniu w wyniku wzrostu z czasem jego wewnętrznej rezystancji, a nie w wyniku spadku siły elektromotorycznej, który jest na ogół mały! Przykład – w zimne poranki akumulator dostarcza zbyt mało prądu aby wykonać rozruch silnika z powodu wzrostu oporu wewnętrznego (zależnego od temperatury), a nie z powodu spadku siły elektromotorycznej.

# Łączenie źródeł siły elektromotorycznej

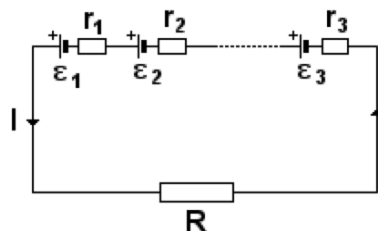
## Szeregowe:



## Równoległe:



### szeregowe



Zastępcza siła elektromotoryczna i rezystancja wewnętrzna:

$$\mathcal{E}_Z = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n$$

$$r_Z = r_1 + r_2 + \dots + r_n$$

Jeżeli ogniwa są identyczne:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \dots = \mathcal{E}_n$$

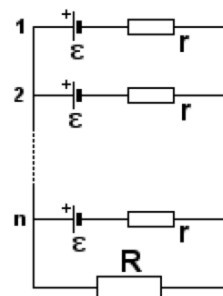
$$r_1 = r_2 = \dots = r_n$$

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}$$

Całkowity opór wewnętrzny ogniw:

$$r_W = nr$$

### równoległe



Zastępcza siła elektromotoryczna i rezystancja wewnętrzna:

$$\mathcal{E}_Z = \mathcal{E}$$

$$\frac{1}{r_Z} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}$$

Dla identycznych ogniw:

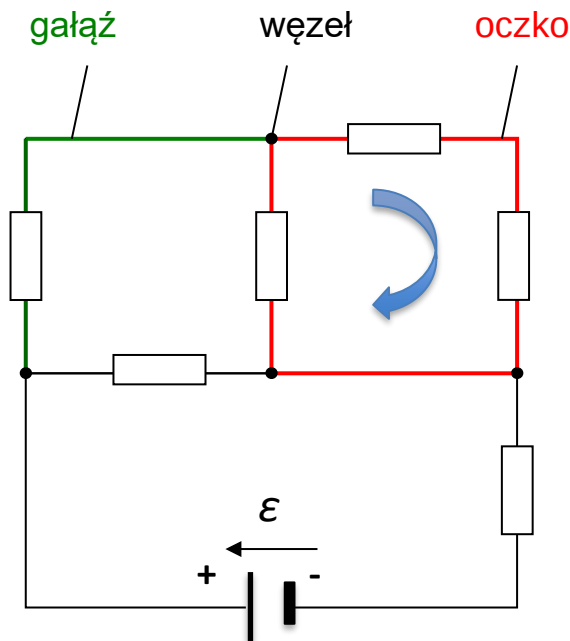
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}$$

Całkowity opór wewnętrzny ogniw:

$$r_W = \frac{r}{n}$$

# OBWODY ELEKTRYCZNE

## węzły, oczka i gałęzie

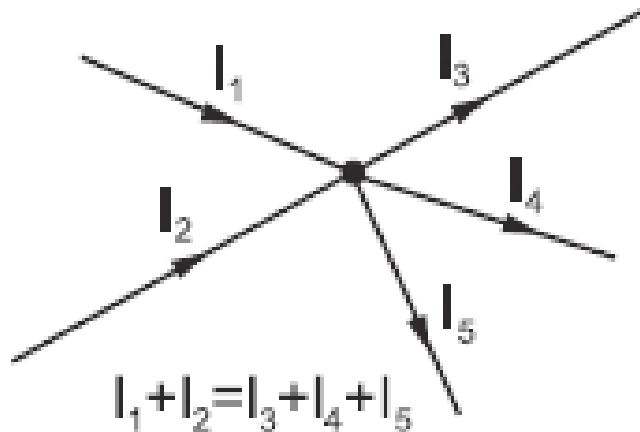


- **Węzłem** obwodu nazywamy punkt, w którym schodzą się co najmniej trzy prądy.
- **Gałęzią** obwodu nazywamy taki odcinek łączący dwa węzły, w którym prąd ma taką samą wartość.
- **Oczkiem** obwodu nazywamy połączenie gałęzi tworzące kontur zamknięty mający tę własność, że po usunięciu któregośkolwiek elementu kontur przestaje być zamknięty.

# Analiza obwodów elektrycznych prądu stałego – prawa Kirchhoffa

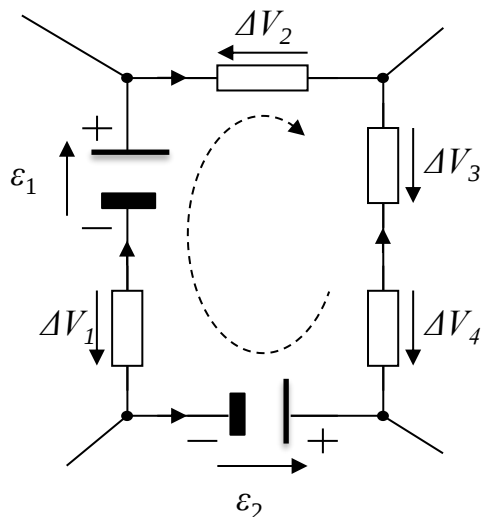
## I prawo Kirchhoffa

Dla węzła obwodu elektrycznego suma algebraiczna natężeń prądów wpływających(+) i wypływających(–) jest równa zero (zasada zachowania ładunku).



## II prawo Kirchhoffa

**Dla oczka obwodu elektrycznego algebraiczna suma napięć źródłowych ( $\varepsilon$ ) i odbiornikowych ( $\Delta V$ ) jest równa 0 (zasada zachowania energii).**



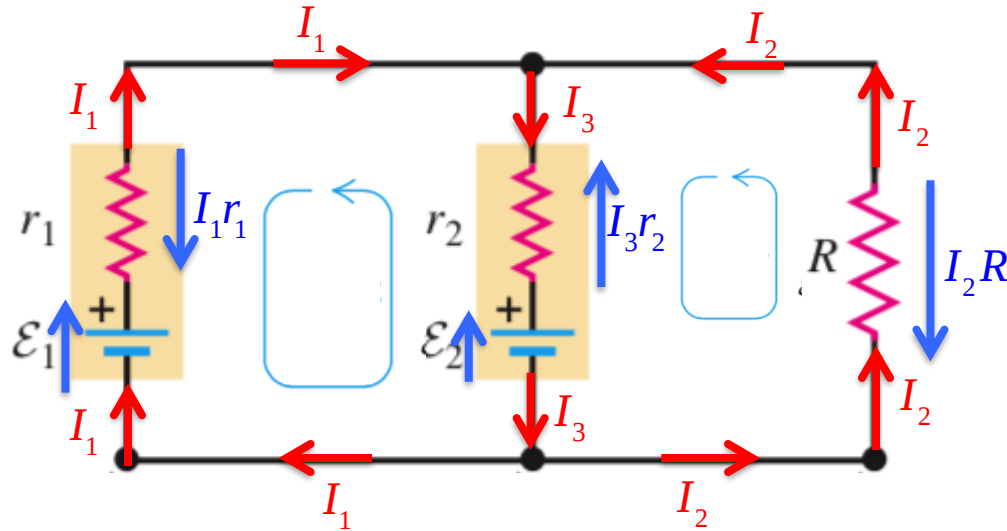
### ZASTOSOWANIE PRAWA:

- Zaznaczyć kierunki prądu w każdym oczku obwodu (wybór kierunków dowolny)
- Zaznaczyć wszystkie wzrosty potencjału jakie napotyka się „obchodząc” pętlę; pamiętaj, że prąd płynie zawsze w kierunku niższego potencjału.
- Ostatnim etapem jest „obejść” (zgonie lub przeciwnie do ruchu wskazówek zegara) każdą pętlę i napisać sumę wzrostów (lub spadków) potencjałów, przyrównując ją do zera.

Dla oczka na rysunku uzyskujemy:

$$\varepsilon_1 - \Delta V_2 + \Delta V_3 + \Delta V_4 - \varepsilon_2 - \Delta V_1 = 0$$

# Analiza obwodów elektrycznych prądu stałego – przykład



$$I_1 + I_2 = I_3$$

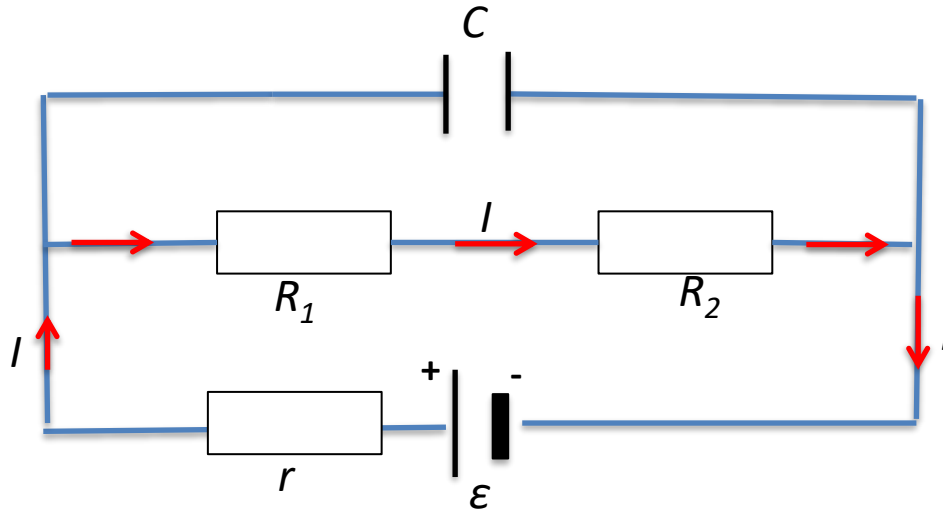
$$I_1 r_1 - \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + I_3 r_2 = 0$$

$$- I_3 r_2 - \mathcal{E}_2 - I_2 R = 0$$

Trzy równania i trzy niewiadome ( $I_1$ ,  $I_2$  i  $I_3$ ) pozwalają znaleźć wartości prądów oraz ich kierunki (plus/minus).

# Analiza obwodów elektrycznych prądu stałego z kondensatorem

W obwodach prądu stałego prąd nie płynie przez gałąź zawierającą kondensator.



# Moc oddawana na rezystorze

$$P = \mathcal{V}_{ab} I = I^2 R = \frac{\mathcal{V}_{ab}^2}{R}$$



Ciepło Joule'a



1/8 Watt Resistors



1/4 Watt Resistors



1/2 Watt Resistors



1 Watt Resistors

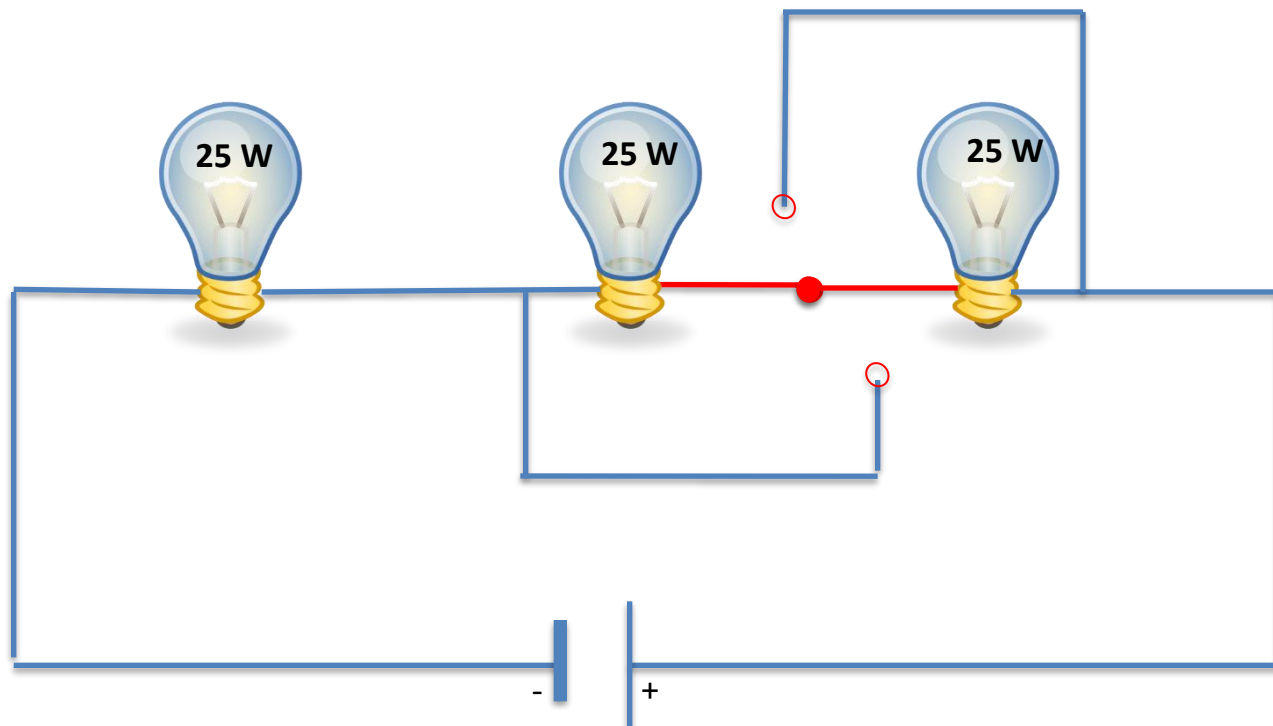


2 Watt Resistors

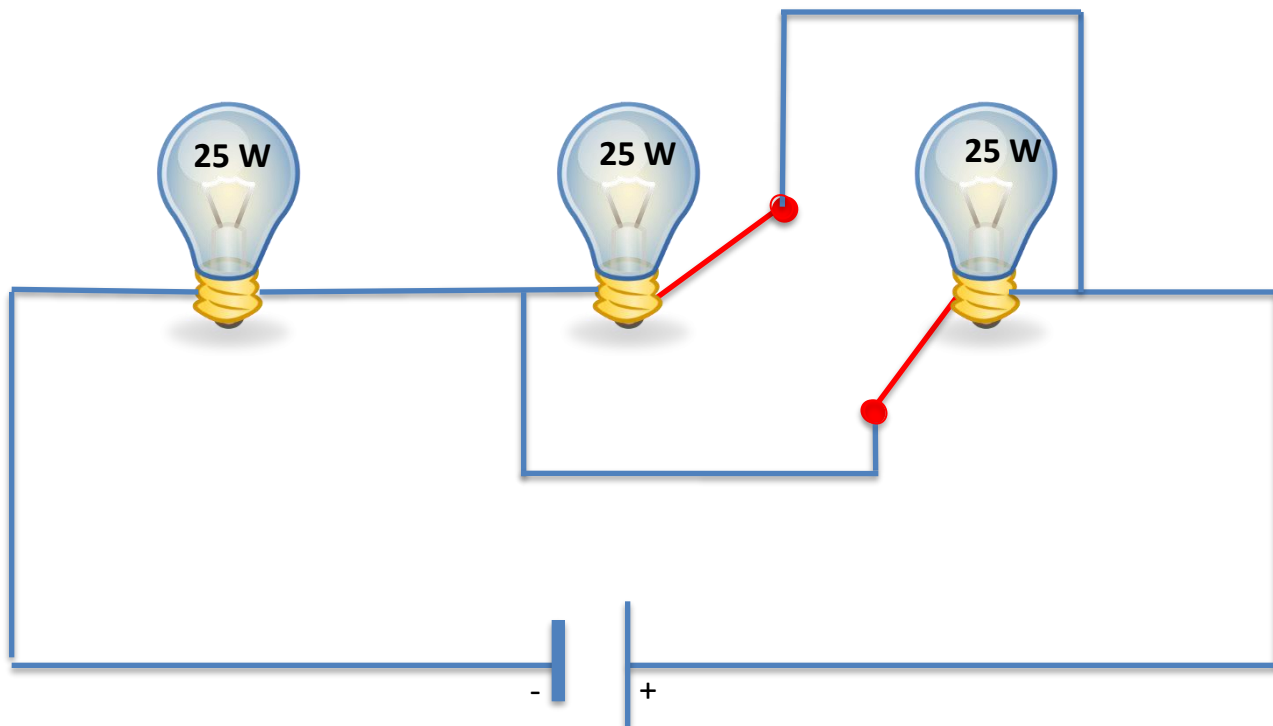


5 Watt Resistor

Trzy żarówki o mocy nominalnej 25 W przy napięciu 230 V.

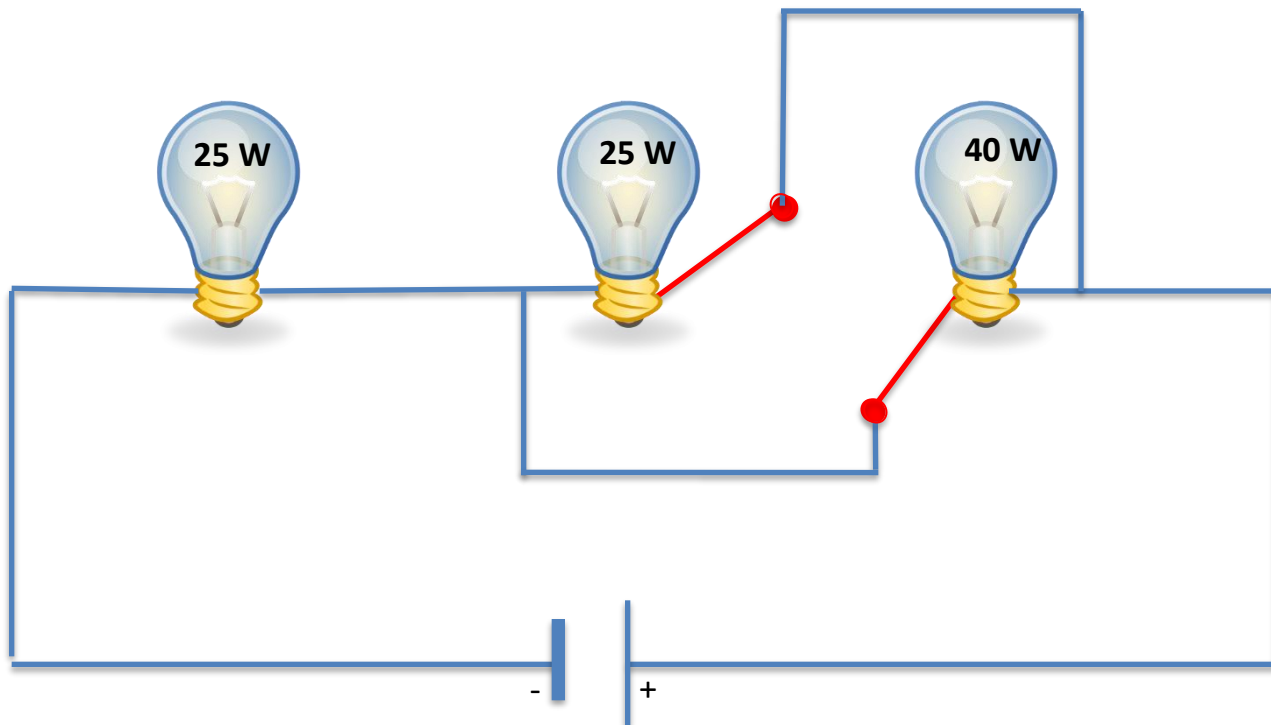


Wszystkie żarówki wydzielają jednakowa moc.

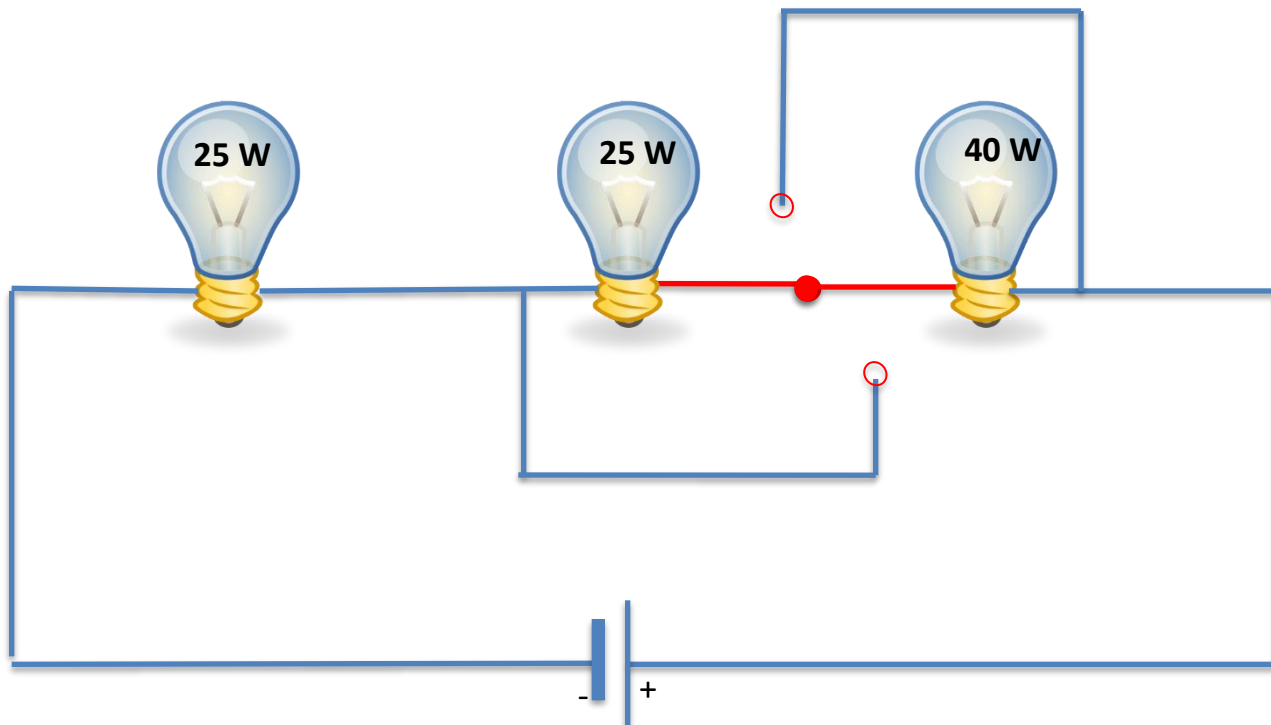


Żarówki połączone równolegle wydzielają mniejszą moc niż przy połączeniu szeregowym, ponieważ prąd przez nie płynący jest mniejszy.

Trzy żarówki: dwie o mocy nominalnej 25 W przy napięciu 230 V oraz jedna o mocy nominalnej 40 W przy napięciu 230 V. Żarówka o większej mocy charakteryzuje się mniejszą rezystancją.

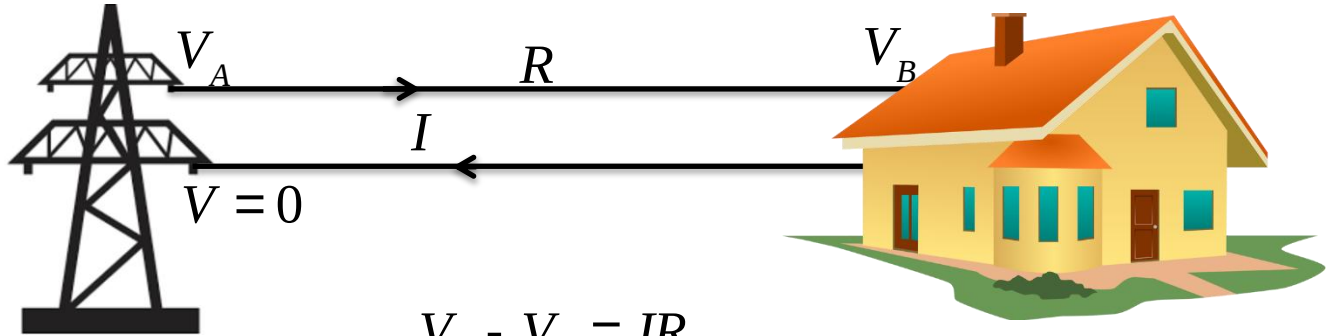


W połączeniu równoległym żarówka o większej mocy nominalnej świeci jaśniej, ponieważ jej opór jest mniejszy i płynie przez nią większy prąd.



W połączeniu szeregowym żarówka o większej mocy nominalnej świeci słabiej, ponieważ przy tym samym prądzie jej opór jest mniejszy.

# Straty mocy w liniach transmisyjnych



$$V_A - V_B = IR$$

$$V_B = V_A - IR$$

moc zużywana w gospodarstwie:  $V_B I = V_A I - I^2 R$  :moc wysyłana przez elektrownie minus straty na liniach

Jak zminimalizować straty na liniach by jak najwięcej mocy produkowanej w elektrowni dostarczyć do gospodarstw domowych?

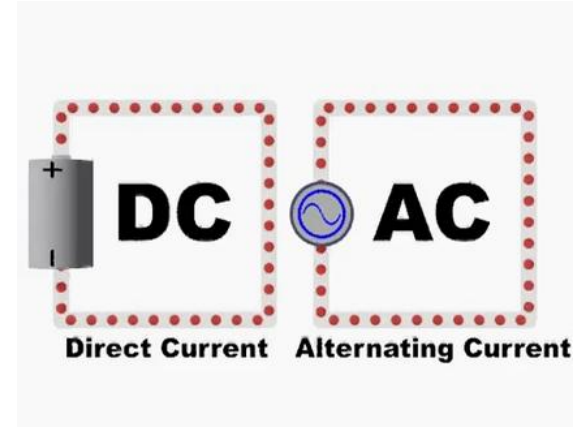
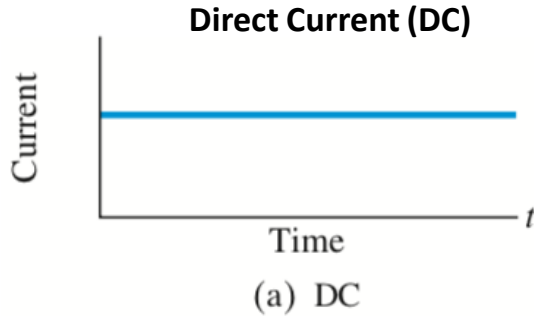
- Zmniejszyć opór linii, co może być kosztowne  $R = r \frac{l}{A}$
- Zmniejszyć prąd, poprzez wzrost potencjału na liniach (dlatego potencjał jest wysoki!)

# Transport mocy w liniach transmisyjnych

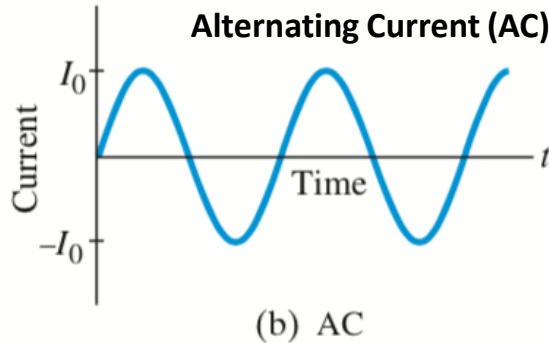


<https://www.youtube.com/watch?v=S7C5sSde9e4>

# Prąd przemienny – podstawowe informacje



<https://gfyat.com/flawedpinkappaloosa>



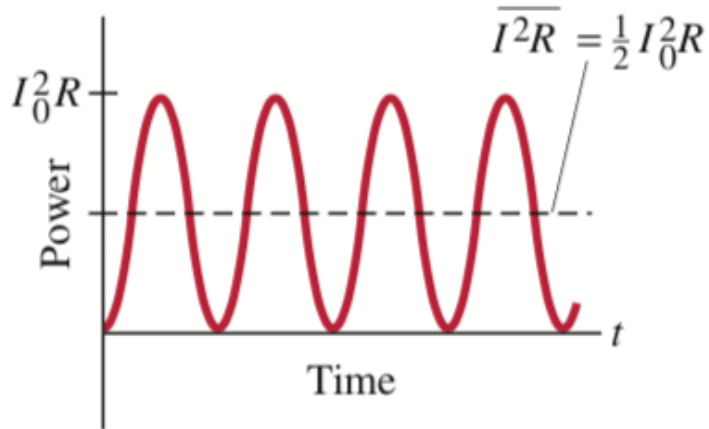
$$I = I_0 \sin(2\pi ft) = I_0 \sin(\omega t)$$
$$\mathcal{V} = RI = RI_0 \sin(\omega t) = \mathcal{V}_0 \sin(\omega t)$$

$$\mathcal{V}_0 = RI_0$$

# Moc chwilowa

Moc chwilowa wydzielana na oporze  $R$ :

$$P = I^2 R = I_0^2 R \sin^2(\omega t)$$



Wartość średnia mocy:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_0^2 R = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{R}$$

# Napięcie skuteczne

Wartość skuteczna zmiennego napięcia okresowego równa jest stałemu napięciu przyłożonemu do danego oporu  $R$ , powodująca wydzielanie się na tym oporze takiej samej energii jak przy napięciu zmiennym:

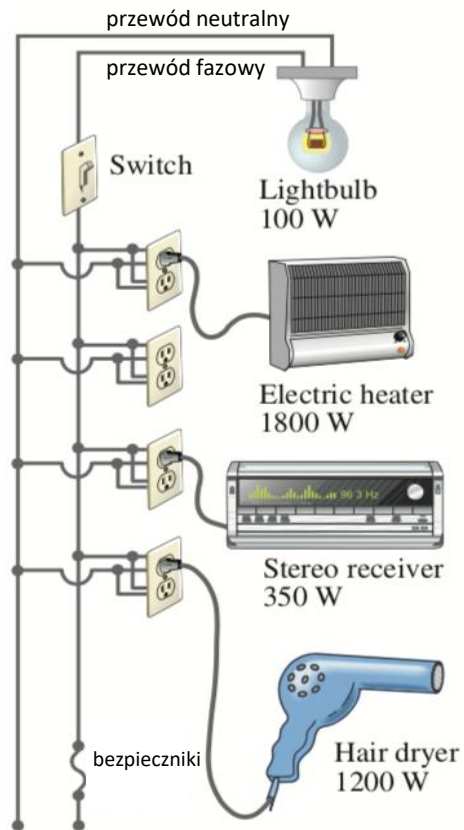
$$V_{\text{sk}} = \sqrt{\bar{V}^2} = \sqrt{V_0^2 \langle \sin^2(\omega t) \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_0$$

Moc średnia:

$$\bar{P} = \frac{V_{\text{sk}}^2}{R}$$

W Polsce napięcie skuteczne sieci energetycznej wynosi 230 V. Oznacza to, że szczytowa wartość sinusoidy napięcia chwilowego wynosi  $230 \cdot \sqrt{2} = 325$  V. Częstotliwość zmian napięcia chwilowego wynosi  $f = 50$  Hz.

Napięcie skuteczne pozwala wykorzystać do opisu mocy w obwodach prądu zmiennego takie same relacje jak dla prądu stałego.



230 V z na wyjściu transformatora



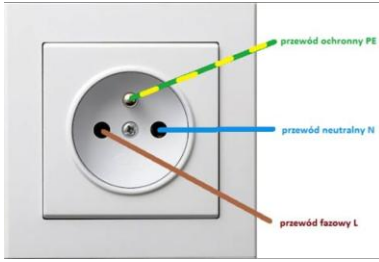
# Domowa sieć energetyczna

Rachunek „za prąd” to tak naprawdę rachunek za pobraną energię elektryczną (wyrażoną w J):  
 $1\text{kWh} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$

Moc urządzenia decyduje o tempie pobierania energii.

Bezpiecznik topikowy (typowe kable w instalacji - 2mm średnica - wytrzymują ok.16 - 20 A i na tyle zwykle skalibrowane są bezpieczniki)

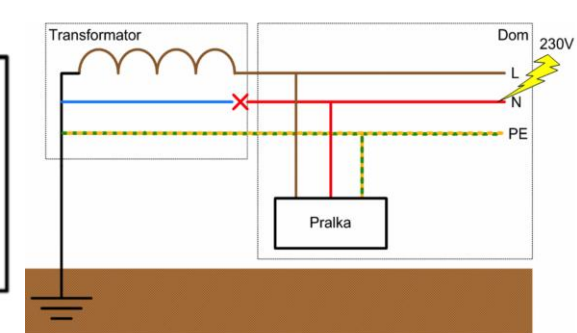
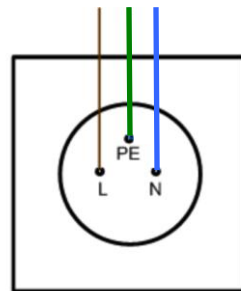
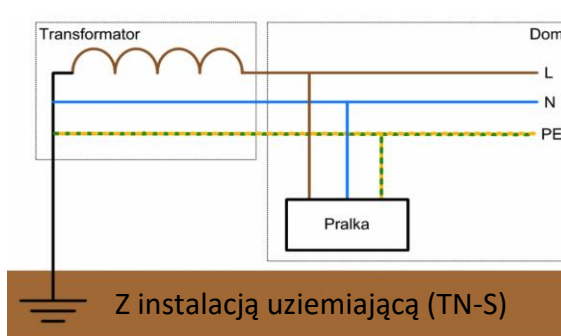
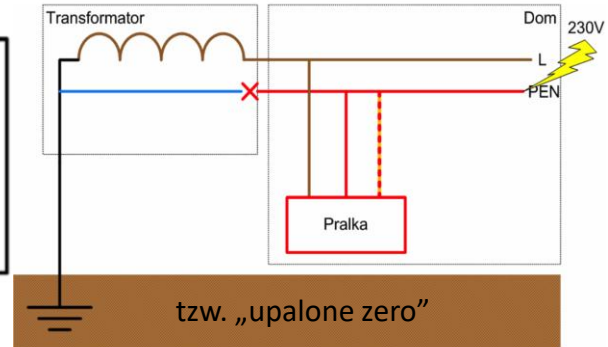
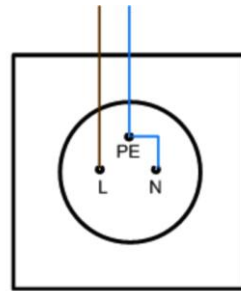
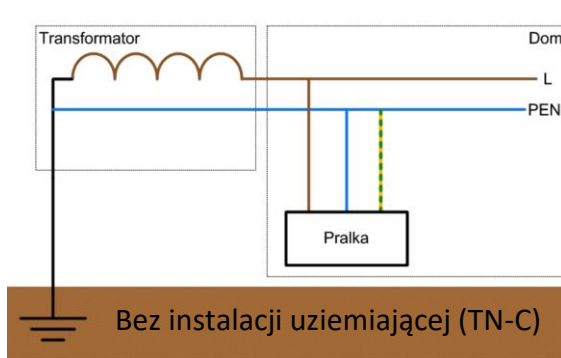




Przewód ochronny (uziemienie – PE) – podpięty do obudowy urządzenia

Przewód neutralny (N, PEN - gdy uziemiony)

Przewód fazowy (L)



# Ćwiczenia na platformie ZPE

- [Prawo Coulomba \(1-5\)](#)
- [Jak wykorzystać prawo Coulomba? \(1-4\)](#)
- [Jak definiuje się prąd elektryczny? \(1-3\)](#)
- [Jaką zależność opisuje prawo Ohma? \(1-5\)](#)
- [Wyznaczanie oporu zastępczego dla układu oporników połączonych szeregowo \(1-2, 4\)](#)
- [Wyznaczanie oporu zastępczego dla układu oporników połączonych równolegle \(1-3\)](#)

Dziękuję za uwagę! ☺

