

# Podstawy fizyki – sezon 2

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,  
D11, pok. 106

[amucha@agh.edu.pl](mailto:amucha@agh.edu.pl)

<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

# Cele wykładu (pytania egzaminacyjne)

## Wiedza:

- ▶ Ładunek elektryczny i pole elektrostatyczne.
- ▶ Prawo Coulomba.
- ▶ Parametry opisujące pole elektrostatyczne: natężenie i potencjał.
- ▶ Energia potencjalna pola elektrostatycznego.

## Umiejętności:

- ▶ Wyznaczanie i opis sił działających między ładunkami elektrycznymi.
- ▶ Wyznaczenie natężenia i potencjału pola elektrostatycznego wytworzonego przez ładunek punktowy i układy ładunków punktowych.
- ▶ Obliczanie energii potencjalnej układu ładunków.

# Pierwsze zabawy z ładunkami

- Starożytni Grecy (Tales z Miletu (624–546 p.n.e.)) zauważyli:
  - potarty bursztyn (grec. elektron) przyciąga kawałki słomy

## ELEKTRYCZNOŚĆ

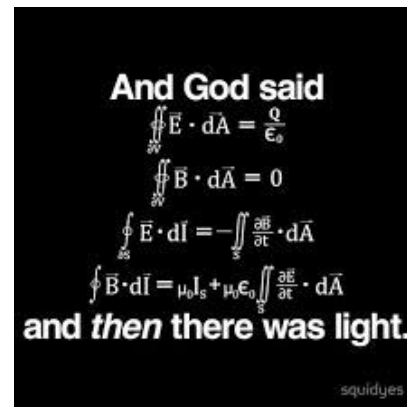
- pewne skały przyciągają i odpychają drobiny żelaza

## MAGNETYZM

- 1820r.: Hans Christian Oersted znalazł związek między elektrycznością (przepływ prądu) a magnetyzmem (odchylenie igły magnetycznej).

## ELEKTOMAGNETYZM

- 1831: Doświadczenia M. Faradaya:  
równania Maxwella (1873)

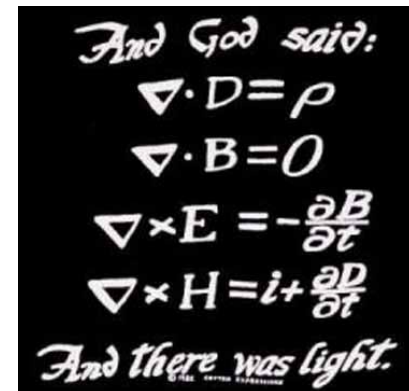


And God said

$$\oint_V \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$
$$\oint_V \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$
$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

and then there was light.

squidyes



And God said:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$
$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

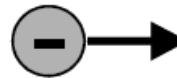
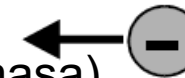
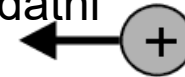
And there was light.

uwaga! Żadne zwierzę nie ucierpiało na tym eksperymencie!



# Elektrostatyka i ładunki

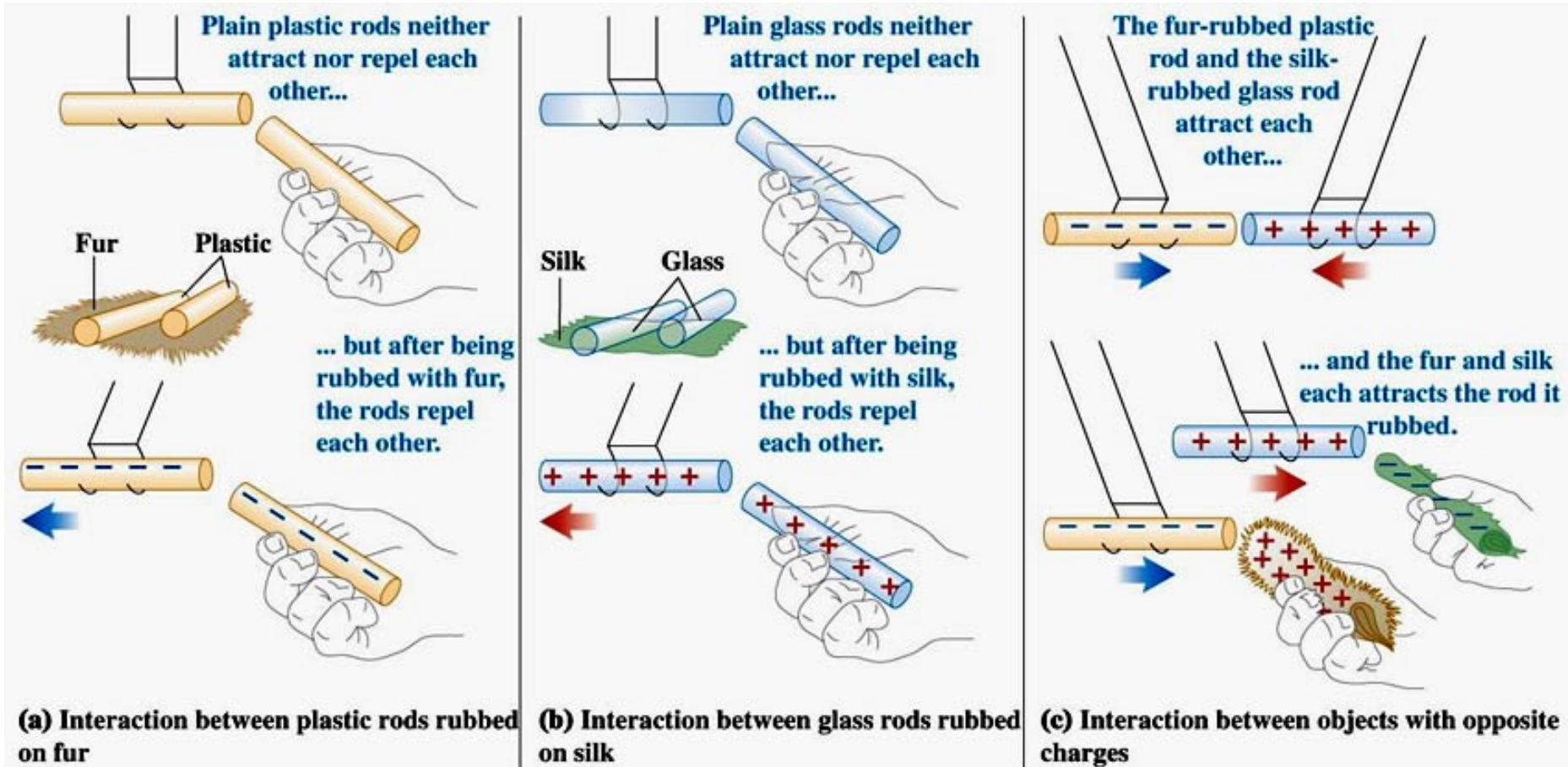
- **Elektrostatyka** – nauka o **nieruchomych ładunkach** elektrycznych
- Dwa rodzaje ładunków elektrycznych – ujemny i dodatni (umownie). Ładunki jednoimienne się odpychają, różnoimienne – przyciągają.
- Ładunek – charakteryzuje ciało (podobnie jak np. masa).
  - Ładunek elektryczny jest sumą ładunków elementarnych, z których składa się ciało.
  - Ładunek elektryczny jest skwantowany (dośw. Millikana), tzn, jest wielokrotnością ładunku elementarnego  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Coulomba –  $Q = n e$  (Charles’a Coulomb (1736–1806))
  - Całkowity ładunek elektryczny układu odosobnionego jest zachowany.
- Elektron i proton – składają się na elektrycznie obojętny atom. **Pamiętajmy, że elektron JEST cząstką elementarną (punktową, bez struktury), proton składa się z kwarków i gluonów (ma strukturę, nie jest elementarny, punktowy)**



# Obserwacje zjawisk elektrycznych

- Naelektryzowane ciała oddziałują na siebie – co to oznacza?

## IZOLATORY



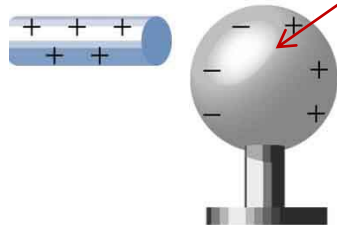


# Elektryzowanie przewodników

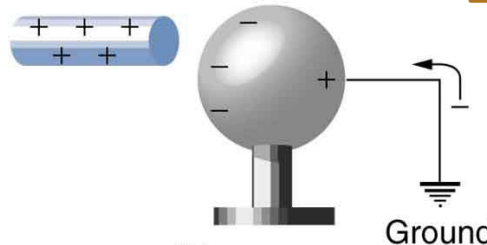
## PRZEWODNIKI

Przewodnik trudno jest naładować przez pocieranie, bo każdy kontakt z ręką powoduje odpływ ładunku. Tylko nadmiar bądź brak elektronów oznacza naładowanie! Dodatnie protony są uwięzione, nie poruszają się!

elektrony są przyciągane do łaski – kula jest cały czas elektrycznie obojętna, ale ładunki się rozsunęły (indukcja ładunku)

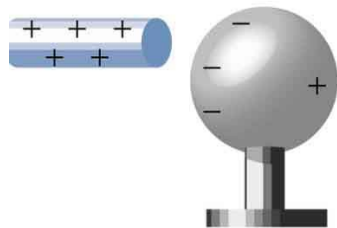


(a)

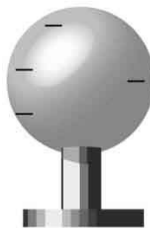


(b)

Ground



(c)



(d)

uziemiona, dodatnia strona kuli, pobiera elektrony,

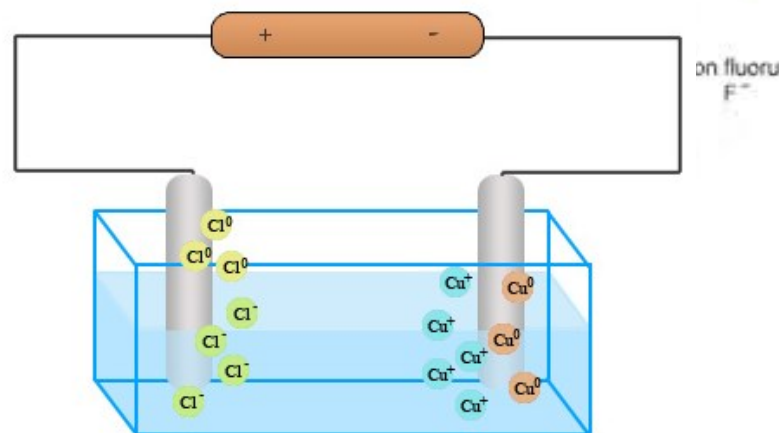
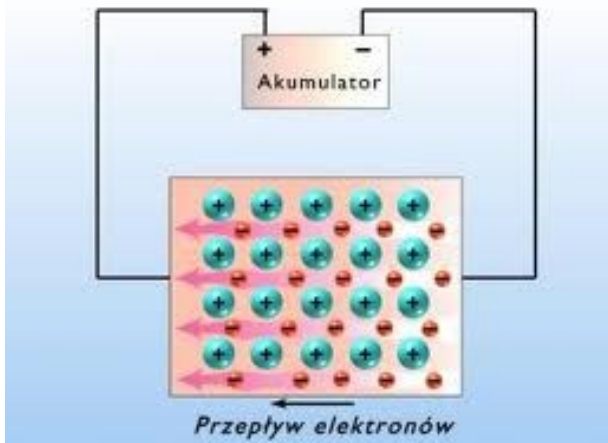
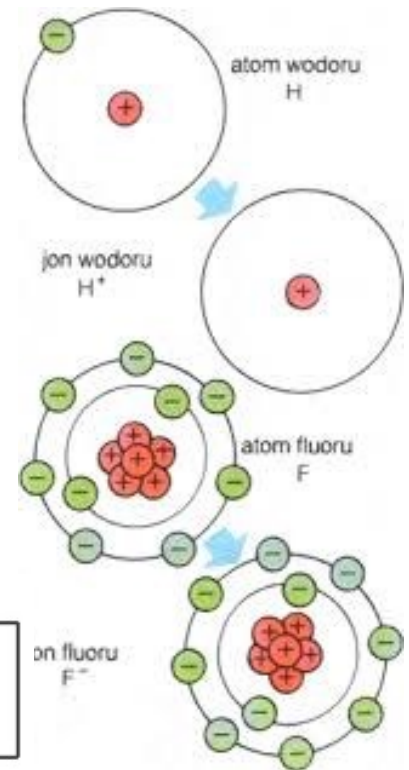
w efekcie kula ma nadmiar ładunku ujemnego



opisz, co tu się stało? (film)

# Ładunki?

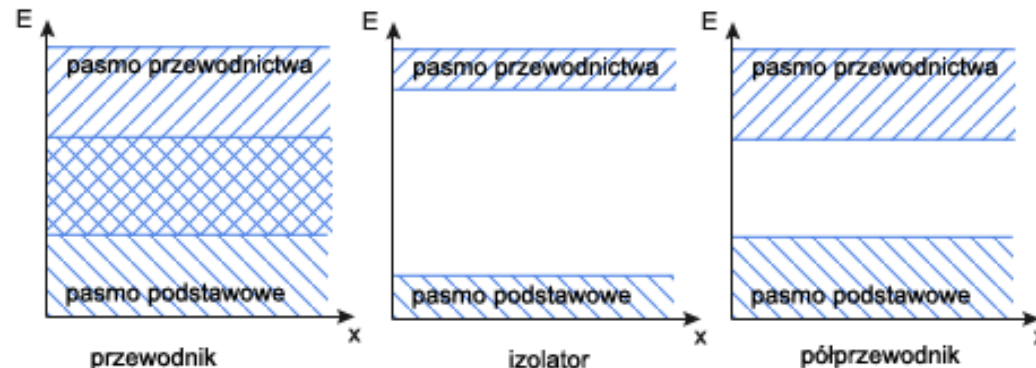
- **Atomy są elektrycznie obojętne** (taka sama liczba elektronów, co protonów).
  - Swobodne ładunki mogą powstać w procesie jonizacji – mamy elektron i dodatni jon.
  - w niektórych ciałach stałych (teoria pasmowa – wykład X) są elektrony niezwiązane z jonami – elektrony przewodnictwa,
  - w cieczach może dojść do zjawiska elektrolizy – powstają elektrony i jony (dodatnie i ujemne)





# Własności elektryczne ciał

- Ze względu na obecność (lub brak) swobodnych ładunków ciała dzielimy na:
  - **przewodniki** – elektrony mogą się swobodnie przemieszczać – elektryzacja przez indukcję (zbliżanie naładowanej laski) lub dotknięcie (przepływ ładunku),
  - **półprzewodniki** – nośniki powstają, gdy dostarczy się dodatkowej energii w postaci np. ciepła czy promieniowania,
  - **izolatory** – struktura ciężkich, nieruchomych jonów i związanych z nimi elektronów, brak swobodnych nośników, elektryzowanie przez pocieranie – np. laska ebonitowa kawałkiem futra – ładunek jest przenoszony z powierzchni jednego ciała na drugie
  - **elektrolity** – przewodzą prąd, gdy powstaną jony (ciężkie, transport masy)



# Własności elektryczne

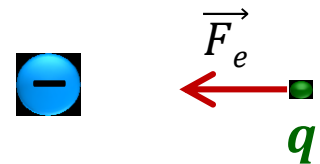
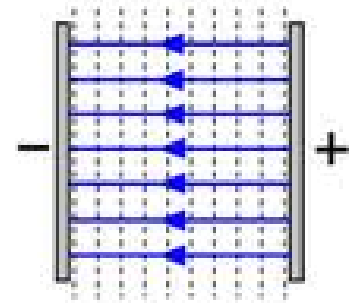
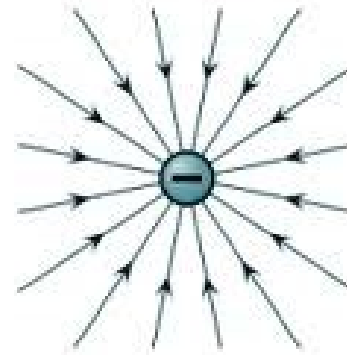
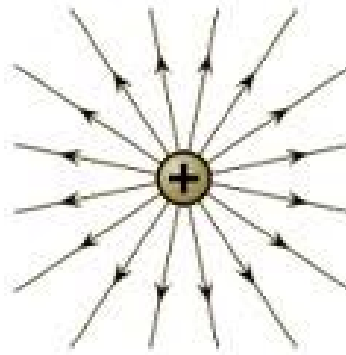
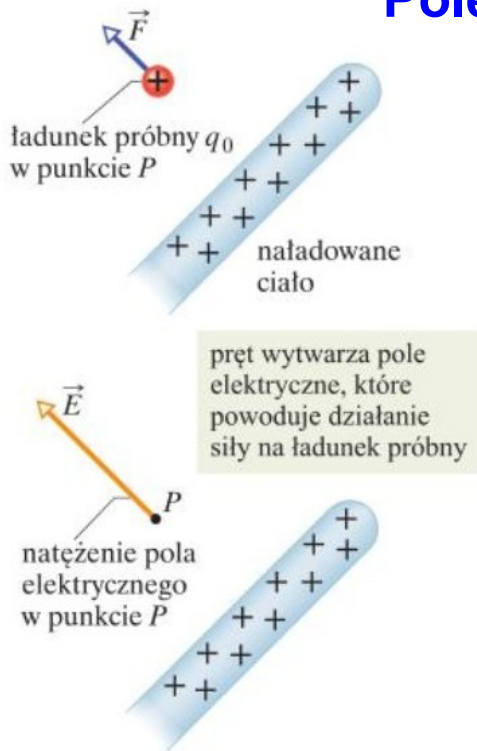
IA																		VIII A					
1 <sup>1</sup> H		IIA																VIII A					
3 <sup>3</sup> Li	4 <sup>4</sup> Be																	5 <sup>5</sup> B	6 <sup>6</sup> C	7 <sup>7</sup> N	8 <sup>8</sup> O	9 <sup>9</sup> F	10 <sup>10</sup> Ne
11 <sup>11</sup> Na	12 <sup>12</sup> Mg																	13 <sup>13</sup> Al	14 <sup>14</sup> Si	15 <sup>15</sup> P	16 <sup>16</sup> S	17 <sup>17</sup> Cl	18 <sup>18</sup> Ar
19 <sup>19</sup> K	20 <sup>20</sup> Ca	21 <sup>21</sup> Sc	22 <sup>22</sup> Ti	23 <sup>23</sup> V	24 <sup>24</sup> Cr	25 <sup>25</sup> Mn	26 <sup>26</sup> Fe	27 <sup>27</sup> Co	28 <sup>28</sup> Ni	29 <sup>29</sup> Cu	30 <sup>30</sup> Zn	31 <sup>31</sup> Ga	32 <sup>32</sup> Ge	33 <sup>33</sup> As	34 <sup>34</sup> Se	35 <sup>35</sup> Br	36 <sup>36</sup> Kr						
37 <sup>37</sup> Rb	38 <sup>38</sup> Sr	39 <sup>39</sup> Y	40 <sup>40</sup> Zr	41 <sup>41</sup> Nb	42 <sup>42</sup> Mo	43 <sup>43</sup> Tc	44 <sup>44</sup> Ru	45 <sup>45</sup> Rh	46 <sup>46</sup> Pd	47 <sup>47</sup> Ag	48 <sup>48</sup> Cd	49 <sup>49</sup> In	50 <sup>50</sup> Sn	51 <sup>51</sup> Sb	52 <sup>52</sup> Te	53 <sup>53</sup> I	54 <sup>54</sup> Xe						
55 <sup>55</sup> Cs	56 <sup>56</sup> Ba	57 <sup>57</sup> La	72 <sup>72</sup> Hf	73 <sup>73</sup> Ta	74 <sup>74</sup> W	75 <sup>75</sup> Re	76 <sup>76</sup> Os	77 <sup>77</sup> Ir	78 <sup>78</sup> Pt	79 <sup>79</sup> Au	80 <sup>80</sup> Hg	81 <sup>81</sup> Tl	82 <sup>82</sup> Pb	83 <sup>83</sup> Bi	84 <sup>84</sup> Po	85 <sup>85</sup> At	86 <sup>86</sup> Rn						
87 <sup>87</sup> Fr	88 <sup>88</sup> Ra	89 <sup>89</sup> Ac																					
				58 <sup>58</sup> Ce	59 <sup>59</sup> Pr	60 <sup>60</sup> Nd	61 <sup>61</sup> Pm	62 <sup>62</sup> Sm	63 <sup>63</sup> Eu	64 <sup>64</sup> Gd	65 <sup>65</sup> Tb	66 <sup>66</sup> Dy	67 <sup>67</sup> Ho	68 <sup>68</sup> Er	69 <sup>69</sup> Tm	70 <sup>70</sup> Yb	71 <sup>71</sup> Lu						
				90 <sup>90</sup> Th	91 <sup>91</sup> Pa	92 <sup>92</sup> U	93 <sup>93</sup> Np	94 <sup>94</sup> Pu	95 <sup>95</sup> Am	96 <sup>96</sup> Cm	97 <sup>97</sup> Bk	98 <sup>98</sup> Cf	99 <sup>99</sup> Es	100 <sup>100</sup> Fm	101 <sup>101</sup> Md	102 <sup>102</sup> No	103 <sup>103</sup> Lr						

[http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c\\_teorja\\_pasmowa/5.php](http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c_teorja_pasmowa/5.php)

# Pole elektryczne

- Ładunek elektryczny wytwarza **pole elektryczne**.
  - Graficzną ilustracją są linie pola elektrycznego, które zaczynają się w ładunku, zwrot linii określony jest przez ruch ładunku dodatniego.

## Pole elektryczne jest polem źródłowym

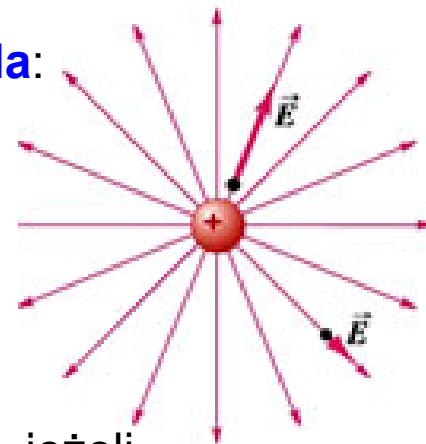


- Jeżeli w polu elektrycznym umieścimy ładunek elektryczny – działa siła elektryczna (ładunek próbny  $q$  umownie uważamy za dodatni).

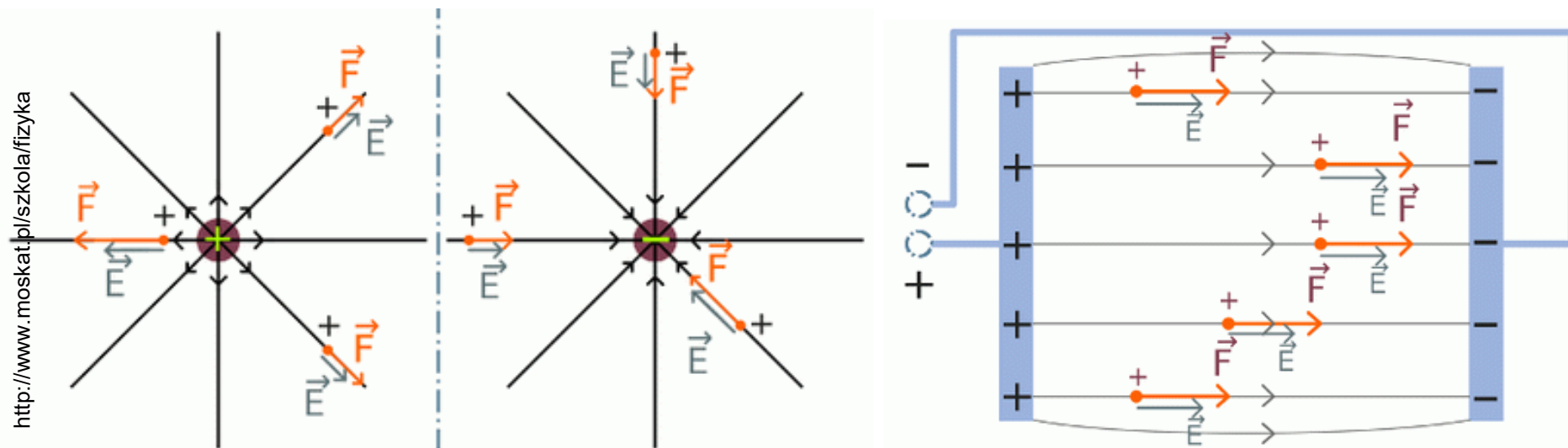
# Natężenie pola

- Pole elektryczne opisywane jest poprzez **wektor natężenia pola**:

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

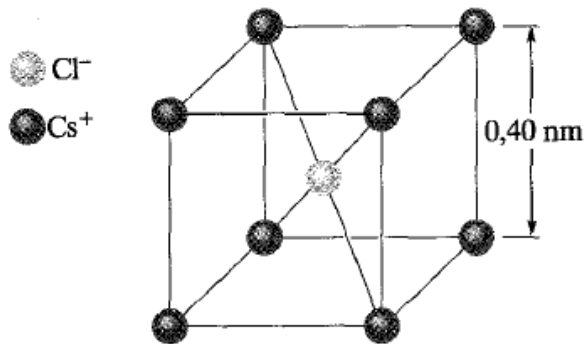
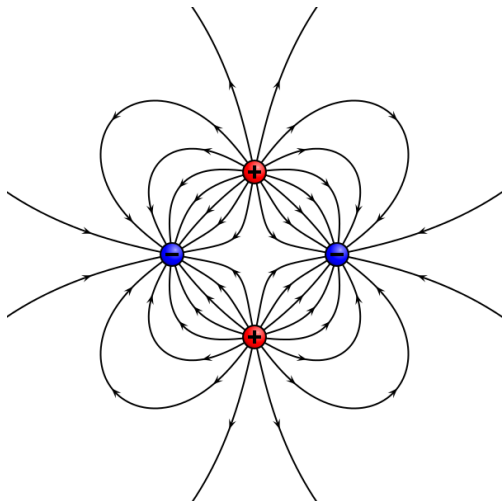
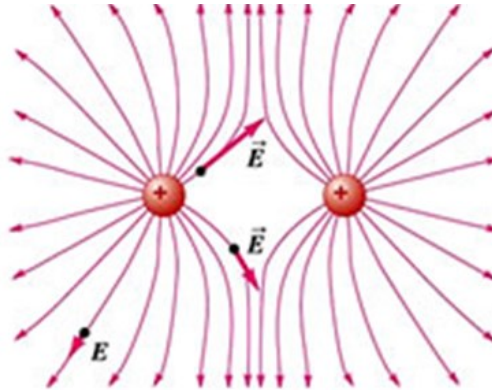
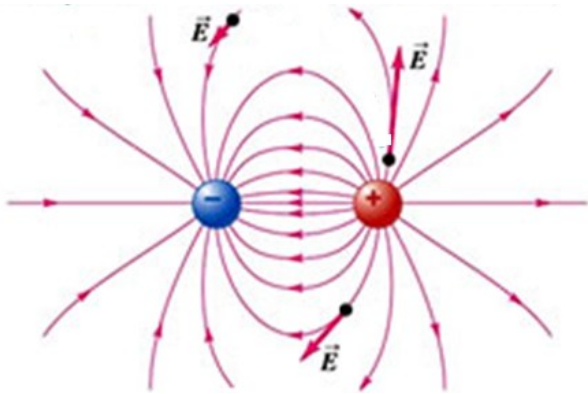


- jest zgodny z liniami pola.
  - pole jest najsilniejsze, tam, gdzie linie są najbardziej gęste.
- Jeśli chcemy opisać pole – należy wyznaczyć wektor natężenia, jeżeli interesuje nas zachowanie ładunku w polu – siłę elektryczną, np.:



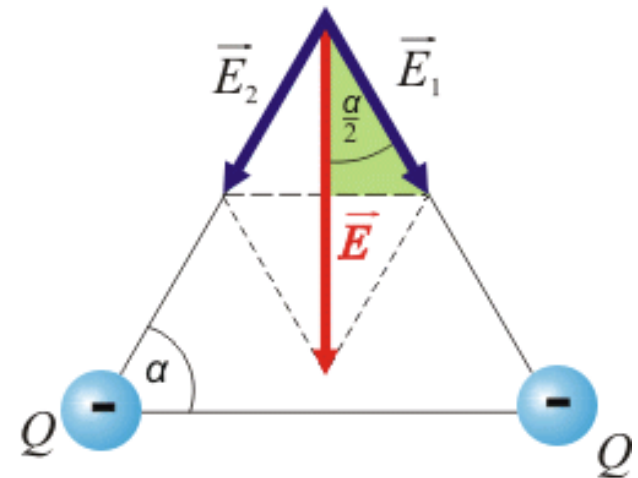
# Układy ładunków- linie pola

- Pole wytworzone przez układy ładunków:



zasada superpozycji:

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$



<http://physicstasks.eu>

<http://physicstasks.eu>

# Natężenie pola

- Pole wytworzone przez ładunek punktowy:

- na ładunek próbny działa **siła (Coulomba)**:

$$\vec{F}_e(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

- natężenie pola wytworzonego przez ładunek punktowy:

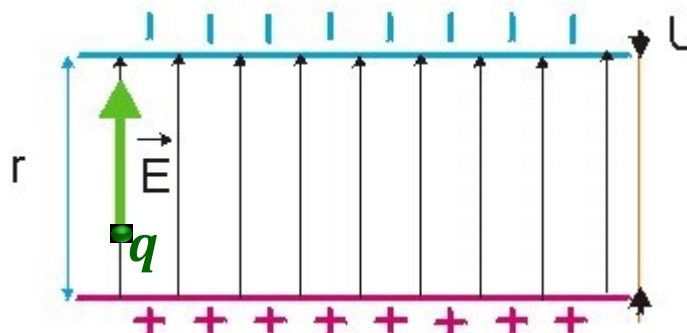
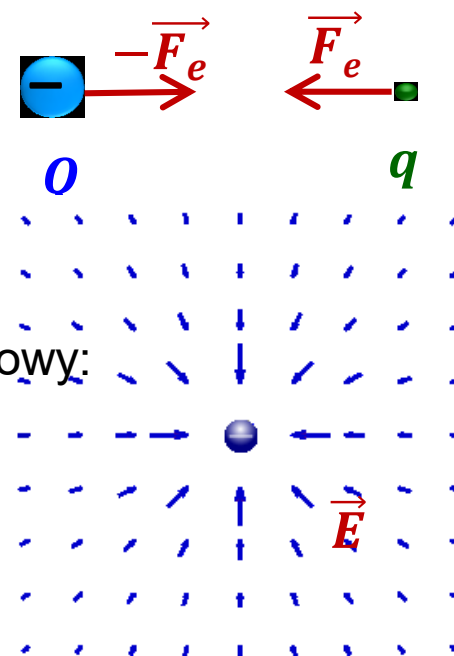
$$\vec{E}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

- Jednorodne pole wytworzone przez dwie naładowane płaszczyzny:

- na ładunek próbny działa siła:

$$\vec{F}_e = q \vec{E}$$

- natężenie pola ?





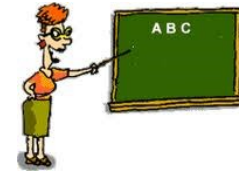
# Dipol elektryczny

- Pole elektryczne dipola elektrycznego

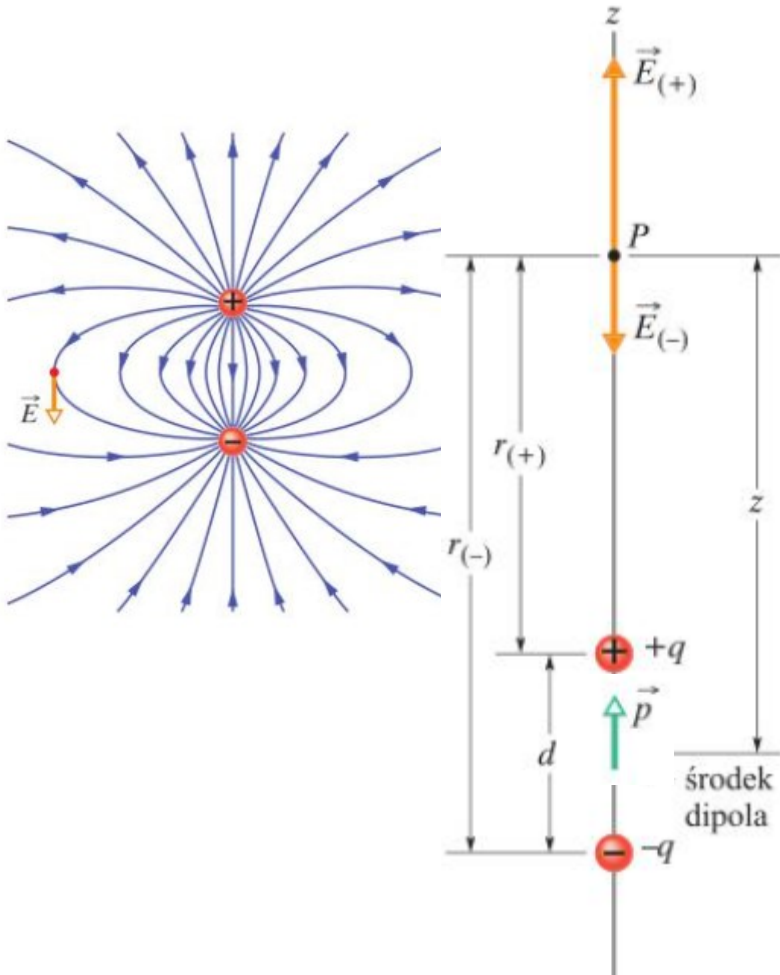
$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}$$

$p$ - moment dipolowy,  
skierowany od „-” do „+”



Pole elektryczne - symulacja



# Praca siły elektrostatycznej

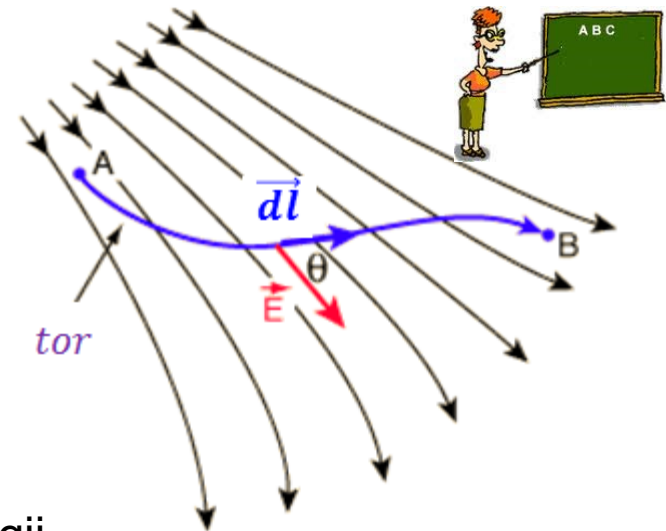
- Praca siły elektrostatycznej przy przesunięciu ładunku  $q$  (dodatniego) z punktu  $A$  do  $B$  w polu o natężeniu  $\vec{E}$ :

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \int_A^B E dl \cos \theta$$

- Siła elektrostatyczna jest **siłą zachowawczą**.
- Pole siły elektrostatycznej jest potencjalne, a ładunki w tym polu mają **energię potencjalną**.
- Jeśli układ ładunków zmienia położenie – siła elektrostatyczna wykonuje pracę, a zmiana energii potencjalnej wynosi:

$$(E_{pB} - E_{pA}) = -W_{AB}$$

$$E_{pB} = E_{pA} - W_{AB}$$



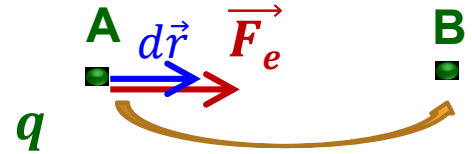
przykł – policzyć zmianę energii w przypadku ładunku ujemnego, zmieniając kierunek ruchu

Energia potencjalna dodatniego ładunku poruszającego **się zgodnie z kierunkiem pola uległa zmniejszeniu** (analogia do spadku w polu grawitacyjnym).

# Energia potencjalna pola elektrycznego (!!)

- Praca ( $A \rightarrow B$ ) wykonana przez siłę elektrostatyczną **w polu ładunku punktowego:**

$$E_{pB} = E_{pA} - W_{AB}$$



$$W(A \rightarrow B) = \int_A^B \vec{F}_e \cdot d\vec{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_A^B \frac{Qq}{r^2} dr = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} Qq \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} Qq \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) > 0$$

$$\int \frac{1}{r^2} dr = -\frac{1}{r}$$

- Jeśli chcemy policzyć energię w punkcie  $A$ , to przyjmujemy  $B \rightarrow \infty$ ,  $E_{p\infty} = 0$ , a zmianę energii wyznaczmy przez:

$$\Delta E_p = E_{p\infty} - E_{pA} = -W_{A \rightarrow \infty}$$

a w nieskończoności:  $E_{p\infty} = 0$

co daje:  $E_{pA} = W_{A \rightarrow \infty} = -W_{\infty \rightarrow A}$

# Energia potencjalna pola elektrycznego

$$E_{pB} = E_{pA} - W_{AB}$$

- Jeśli przyjmiemy, że w nieskończoności  $E_{p\infty} = 0$ , to praca wykonana przez siłę elektrostatyczną nad cząstką wynosi  $W_{\infty}$ , a energia potencjalna ładunku:

$$E_p = -W_{\infty}$$



- jest równa pracy (ze znakiem „-”), jaką musi wykonać siła elektrostatyczna, aby przenieść ładunek z nieskończoności do tego miejsca. Praca może być zarówno dodatnia, jak i ujemna (w zależności od znaku ładunku źródła i ładunku przenoszonego).

# Energia potencjalna pola elektrycznego

- **Energia potencjalna** układu ładunków jest równa pracy (ze znakiem „-”), jaką musi wykonać siła elektrostatyczna, aby złożyć ten układ przesuważając ładunki z nieskończoności:

$$E_p = -W_\infty$$



Przykład: Energia potencjalna układu ładunków – umieszczamy jeden ładunek (źródło), potem drugi do pola wytworzonego przez ten pierwszy. Następnie trzeci ładunek do pola dwóch pierwszych ładunków, itd.

Efektywnie (zad):

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

Uwaga:

praca wykonana przez siłę zewnętrzną:

$W_z = -W$ , czyli energia potencjalna może być wyrażona poprzez:

$$E_p = W_z$$

# Energia pola ładunku punkowego

- Energia potencjalna w polu ładunku punkowego:

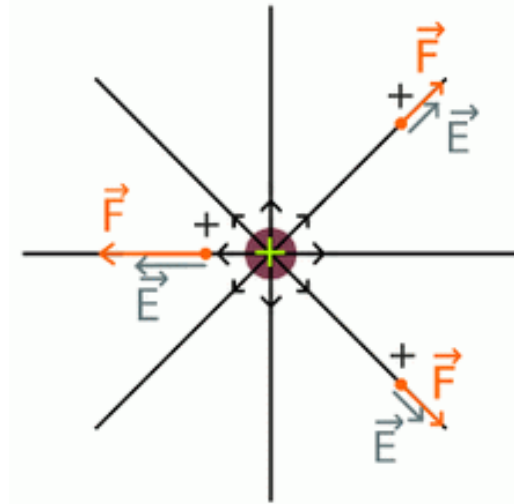
$$E_p = -W_\infty = W(A \rightarrow \infty)$$

$$W(A \rightarrow \infty) = \int_A^\infty \vec{F}_e \cdot d\vec{r} =$$

$$= q \int_A^\infty E \, dr = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \int_\infty^A \frac{1}{r^2} dr = q Q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_A}$$

$$E_p(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r}$$

$$\int \frac{1}{r^2} dr = -\frac{1}{r}$$



- Energia potencjalna elektronu w polu protonu:

$$E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ee}{r_A}$$

jakieś skojarzenia?

$$E_p = -13.6 \text{ eV?}$$

W układzie ładunku + w polu ładunku +, energia potencjalna jest dodatnia.  
Pole wykonuje pracę odsuwając ładunek od źródła



# Potencjał elektryczny

- Energię potencjalną wyznaczamy dla ładunku w polu wytworzonym przez inny ładunek (układ ładunków).
- Jeśli wyznaczymy stosunek energii do ładunku – zdefiniujemy **potencjał pola**:

$$V = \frac{E_p}{q} \quad \left[ \frac{J}{C} = V \right]$$



- Różnica potencjałów między dwoma punktami pola:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_p}{q} = - \frac{W}{q} = \frac{W_{zew}}{q}$$

jest równa pracy (ze znakiem przeciwnym) wykonanej przez siłę elektrostatyczną przy przesunięciu ładunku jednostkowego pomiędzy tymi punktami.

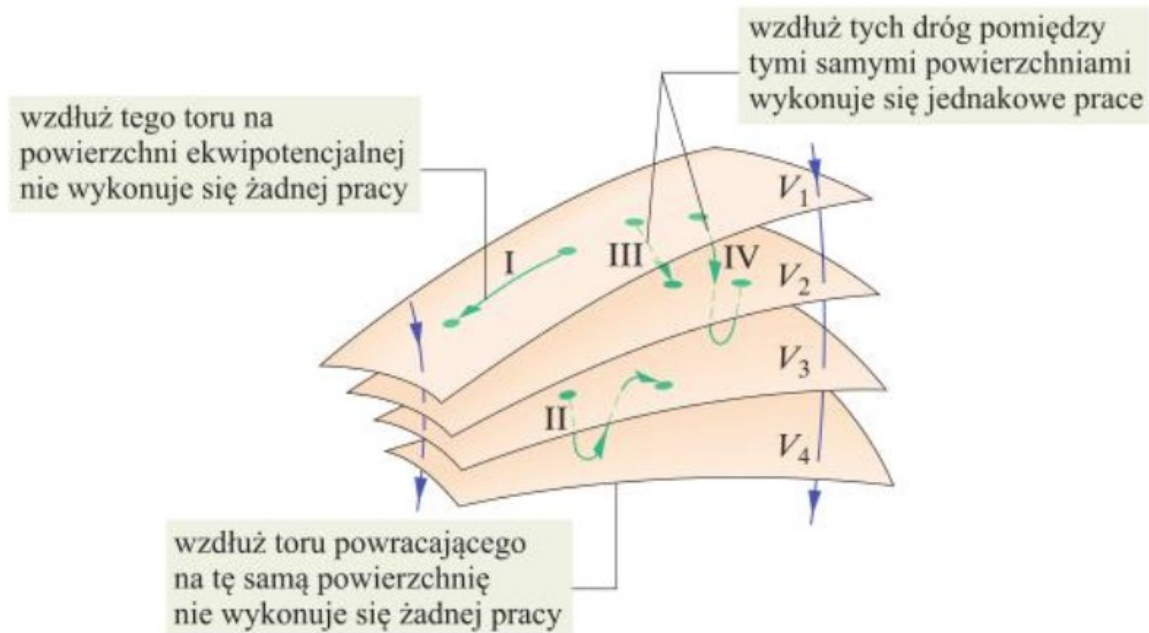
- Jeśli w nieskończoności  $E_p \rightarrow 0$ , to:

$$V = - \frac{W_{\infty}}{q}$$

potencjał może być  $>0$ ,  $<0$ ,  $=0$ ,  
potencjał wytworzony przez układ  
ładunków jest **SUMĄ algebraiczną**  
poszczególnych potencjałów (ĆW)

# Powierzchnie ekwipotencjalne

Punkty, które mają taki sam potencjał tworzą powierzchnie ekwipotencjalne:

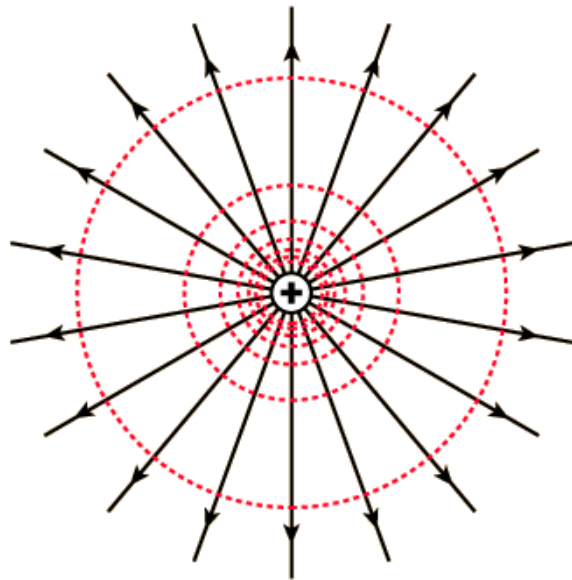


gdy  $V_k = V_p$ , to  $W = 0$

ładunek poruszający się po powierzchni ekwipotencjalnej nie wykonuje pracy (ani pole nad nim)

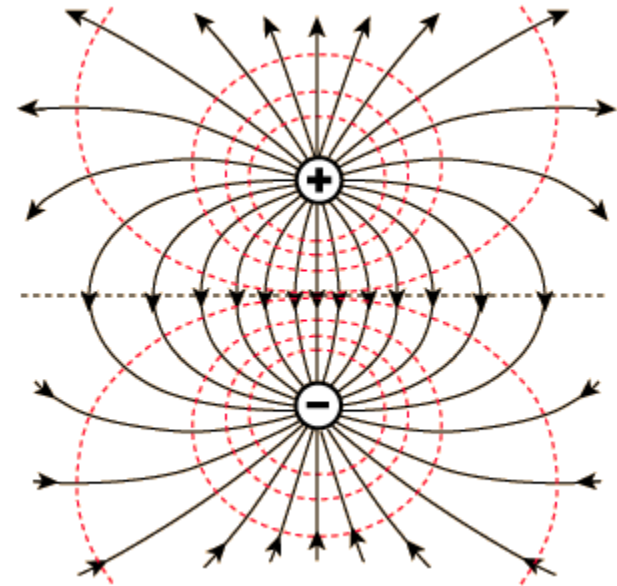
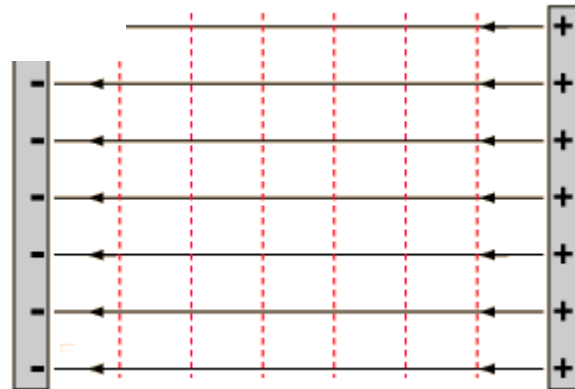
# Powierzchnie ekwipotencjalne

- Punkty o tym samym potencjale tworzą **powierzchnie ekwipotencjalne**:



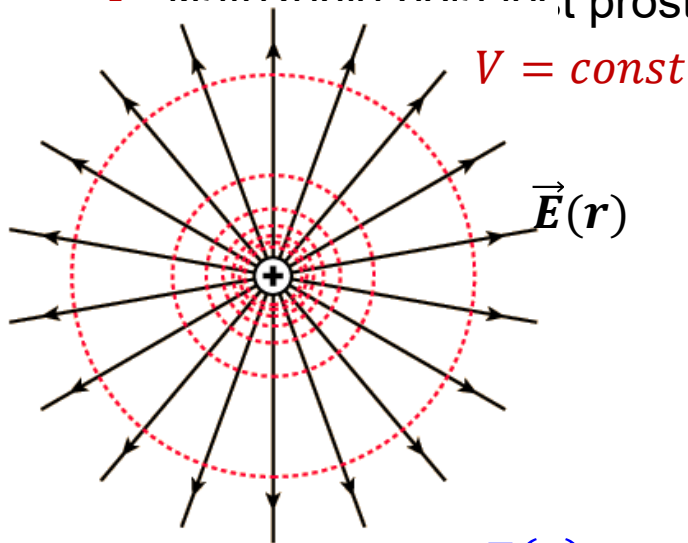
Ładunek poruszający się po powierzchni ekwipotencjalnej:

- nie wykonuje pracy
- nie zmienia energii

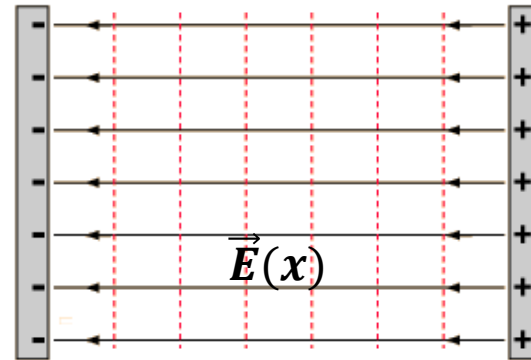


# Natężenie a potencjał

- Czy znając potencjał w pewnym miejscu można wyznaczyć natężenie pola?
  - Pamiętajmy, że potencjał  $V$  jest skalar, a natężenie  $\vec{E}$  wektorem!
  - Jeśli zmierzmy potencjał w wielu miejscach pola, to wyznaczając powierzchnie ekwipotencjalne, mamy zmiany potencjału  $dV$  na pewnej odległości  $dx$
  - Natężenie pola jest prostopadłe do powierzchni ekwipotencjalnej



$$E(r) = -\frac{dV}{dr}$$



$$E(x) = -\frac{dV}{dx}$$

# Podsumowanie

- Ładunki i pole elektrostatyczne
  - Natężenie i potencjał pola (charakteryzują pole).
  - Siła Coulomba i energia potencjalna w polu (opisują wpływ pola na ładunek umieszczony w tym polu)
  - Przykłady obliczania natężenia pola i potencjału dla układu ładunków punktowych.
- 
- POKAZY !!!