

Podstawy fizyki – sezon 2

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

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

amucha@agh.edu.pl

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

Cele wykładu (pytania egzaminacyjne)

Wiedza:

- ▶ Ładunek elektryczny i pole elektrostatyczne.
- ▶ Prawo Coulumba.
- ▶ 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 zauważyli:
 - potarty bursztyn (grec. elektron) przyciąga kawałki słomy

ELEKTRYCZNOŚĆ

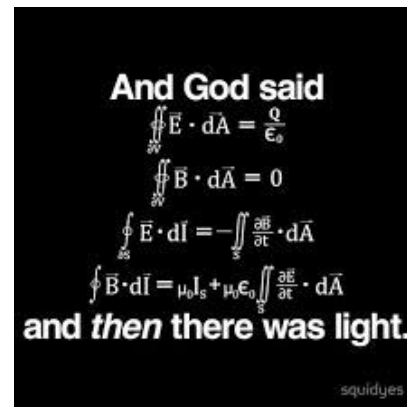
- pewne skały przyciągają i odpychają drobiny żelaza

MAGNETYZM

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

ELEKTOMAGNETYZM

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

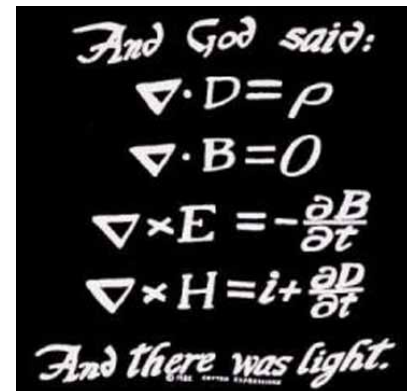


And God said

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

and then there was light.

squidyes



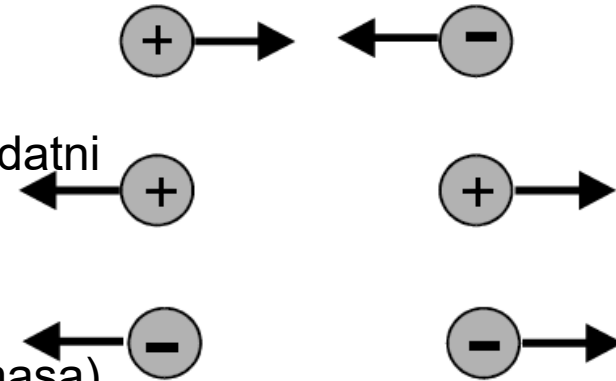
And God said:

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

And there was light.

Elektrostatyka i ładunki

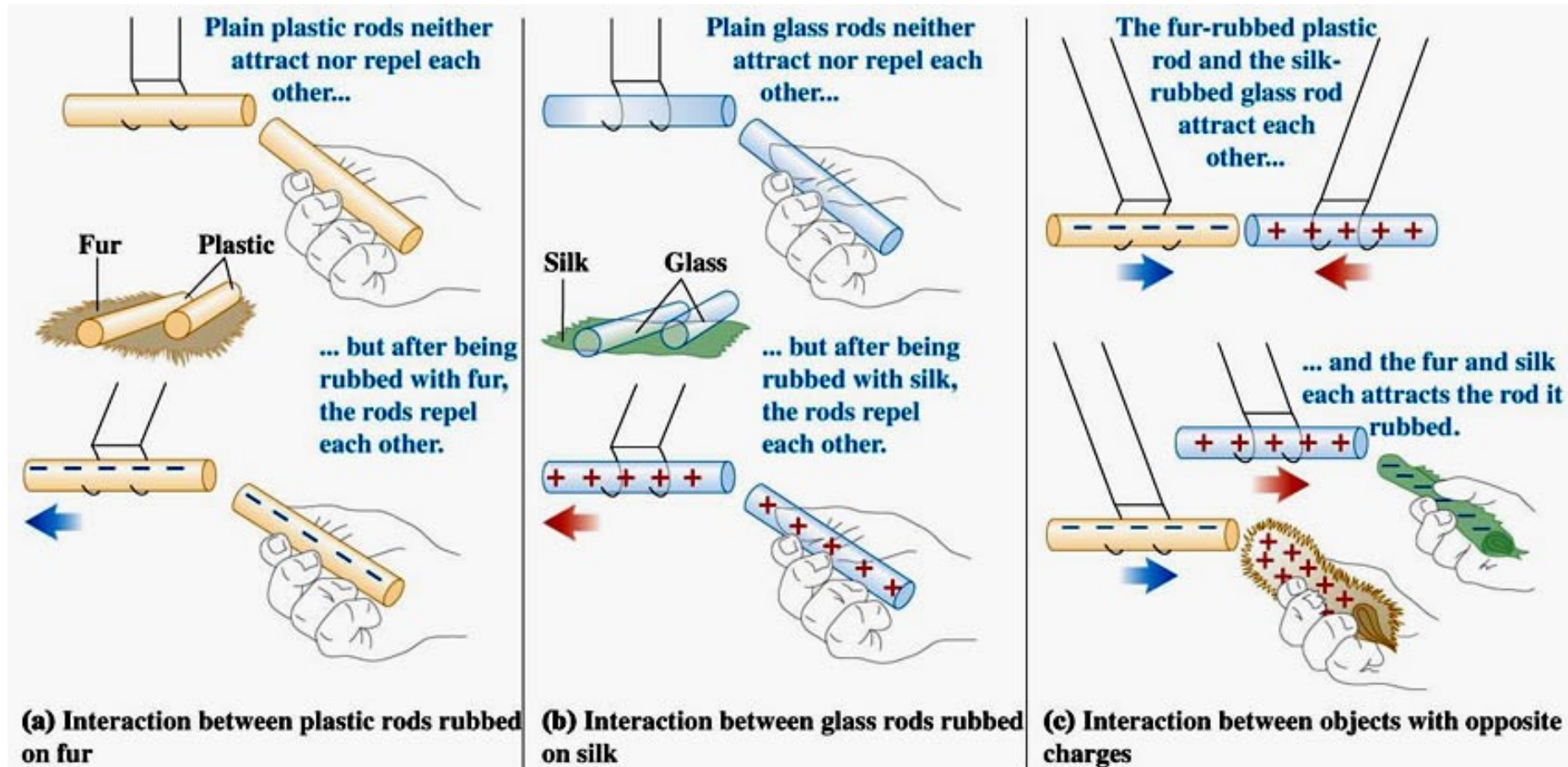
- **Elektrostatyka** – nauka o **nieruchomych ładunkach** elektrycznych
- Dwa rodzaje ładunków elektrycznych – ujemny i dodatni (umownie). Ładunki jednoimienne się odpychają, różnoimienne – przyciągają.
- Ładunek – charakteryzuje ciało (podobnie jak np. masa).
 - Ładunek elektryczny jest sumą ładunków elementarnych, z których składa się ciało.
 - Ładunek elektryczny jest skwantowany (dośw. Millikana), tzn, jest wielokrotnością ładunku elementarnego $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomba –
 $Q = n e$
 - 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

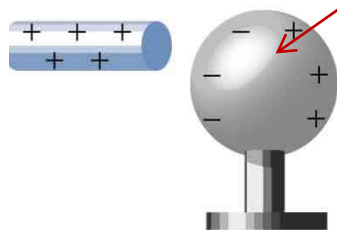


Elektryzowanie przewodników

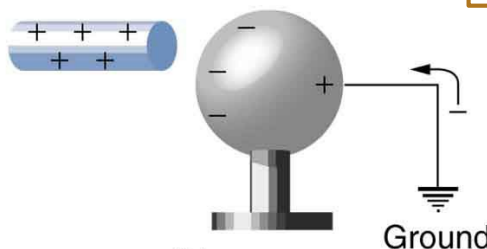
PRZEWODNIKI

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)

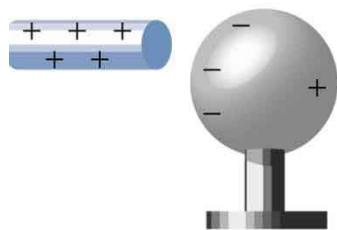


(a)

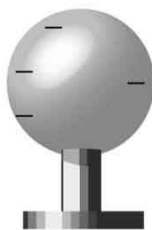


(b)

uziemiona, dodatnia strona kuli, pobiera elektrony,



(c)



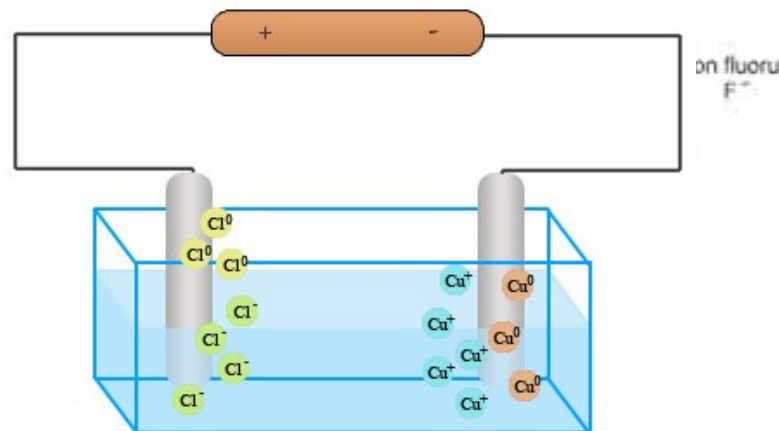
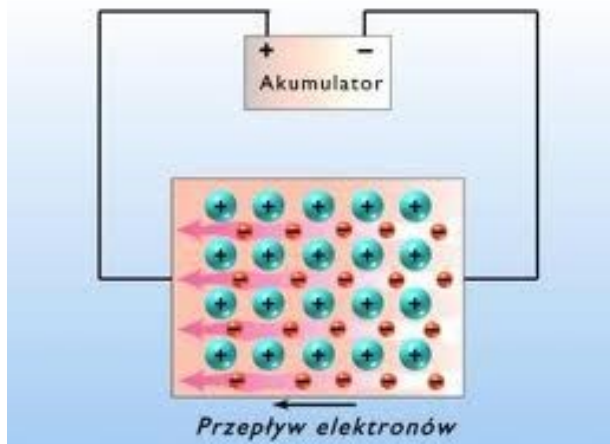
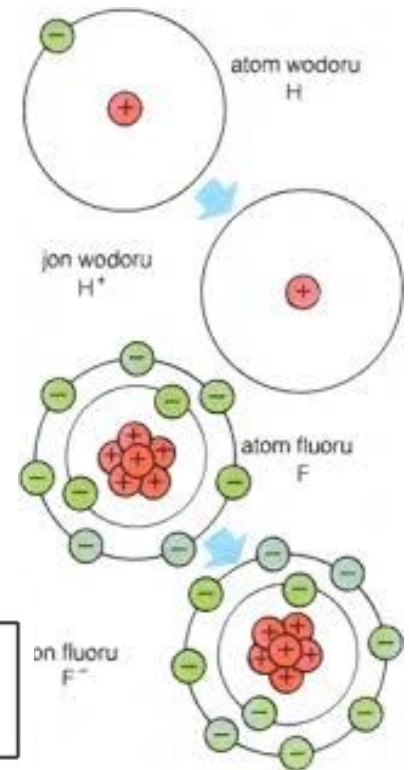
(d)

w efekcie kula ma nadmiar ładunku ujemnego



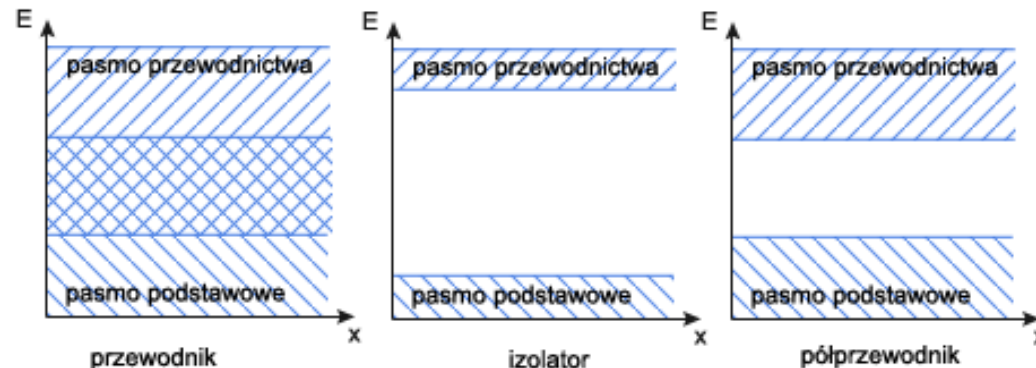
Ładunki?

- **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

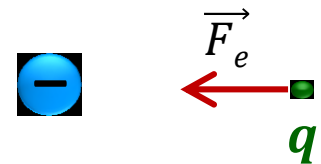
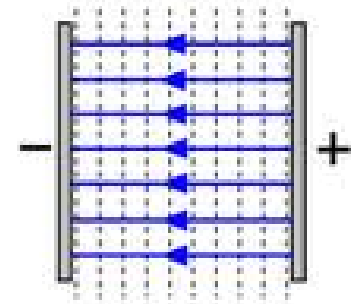
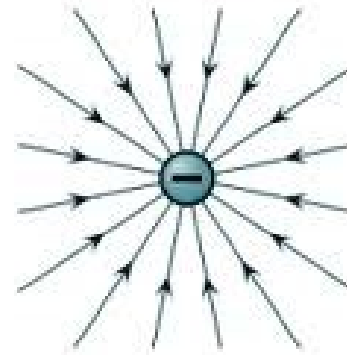
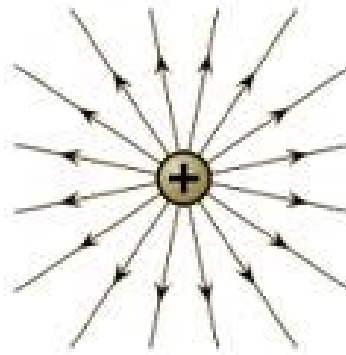
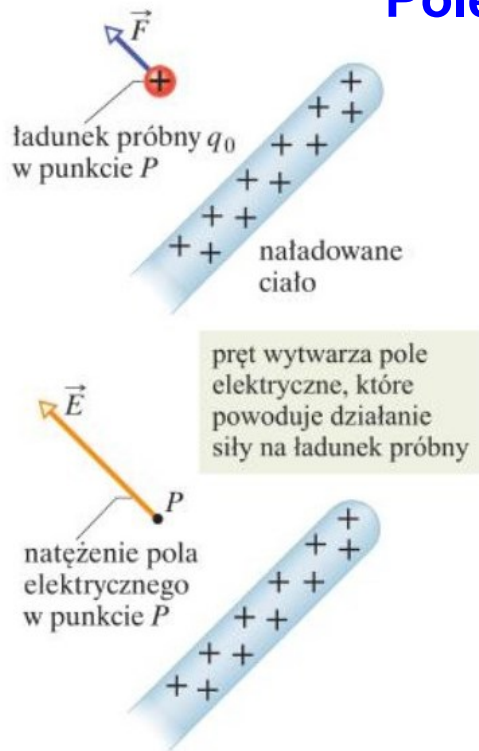
IA																		VIII A	
1 ¹ H		IIA																VIII A	
3 ³ Li	4 ⁴ Be																	VIII A	
11 ¹¹ Na	12 ¹² Mg																	VIII A	
19 ¹⁹ K	20 ²⁰ Ca	21 ²¹ Sc	22 ²² Ti	23 ²³ V	24 ²⁴ Cr	25 ²⁵ Mn	26 ²⁶ Fe	27 ²⁷ Co	28 ²⁸ Ni	29 ²⁹ Cu	30 ³⁰ Zn	31 ³¹ Ga	32 ³² Ge	33 ³³ As	34 ³⁴ Se	35 ³⁵ Br	36 ³⁶ Kr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

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

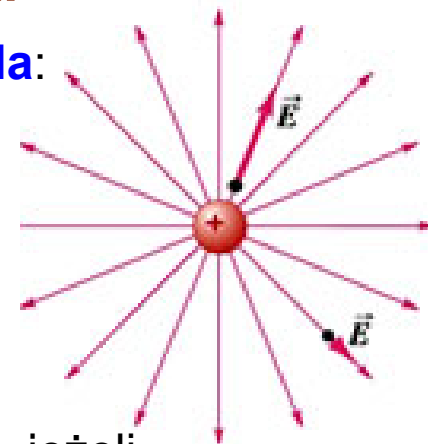


- Jeżeli w polu elektrycznym umieścimy ładunek elektryczny – działa siła elektryczna (ładunek próbny q umownie uważamy za dodatni).

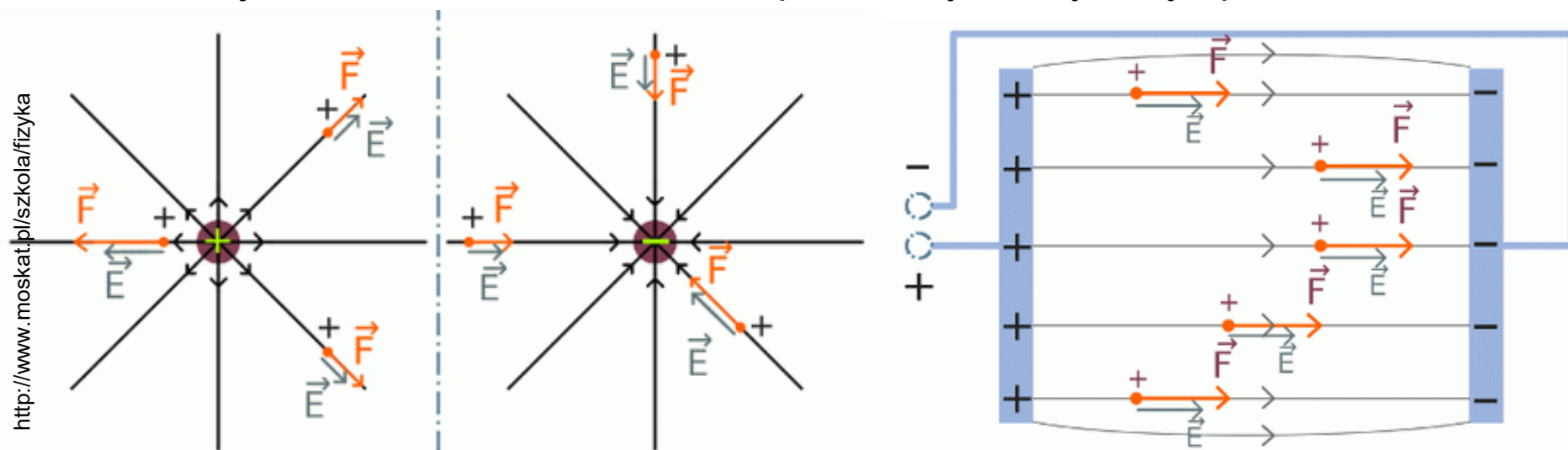
Natężenie pola

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

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

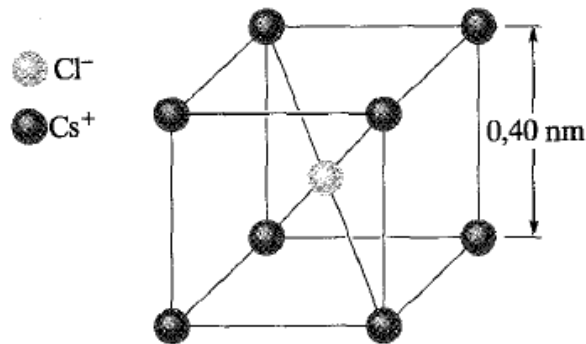
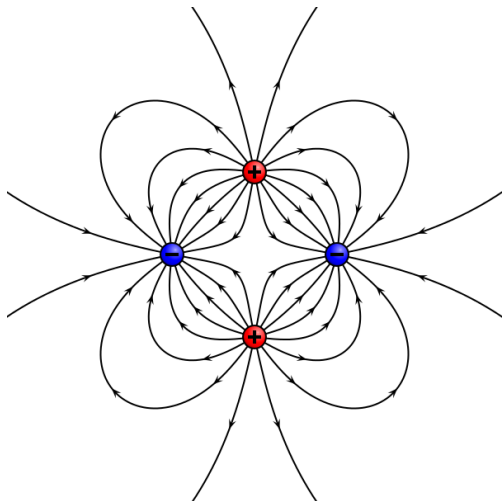
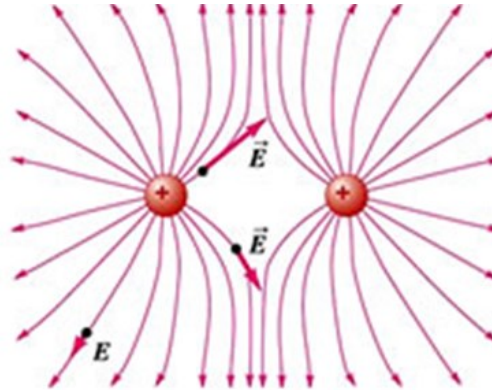
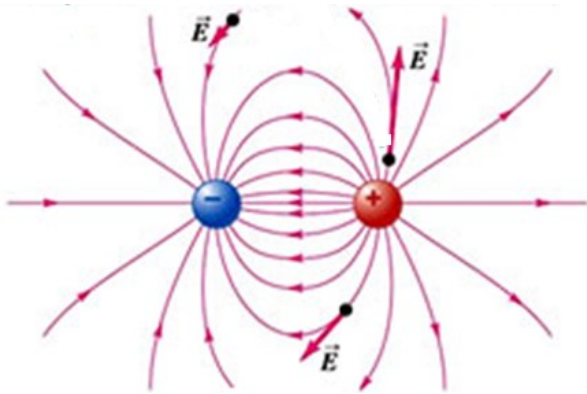


- jest zgodny z liniami pola.
- pole jest najsilniejsze, tam, gdzie linie są najbardziej gęste.
- Jeśli chcemy opisać pole – należy wyznaczyć wektor natężenia, jeżeli interesuje nas zachowanie ładunku w polu – siłę elektryczną, np.:



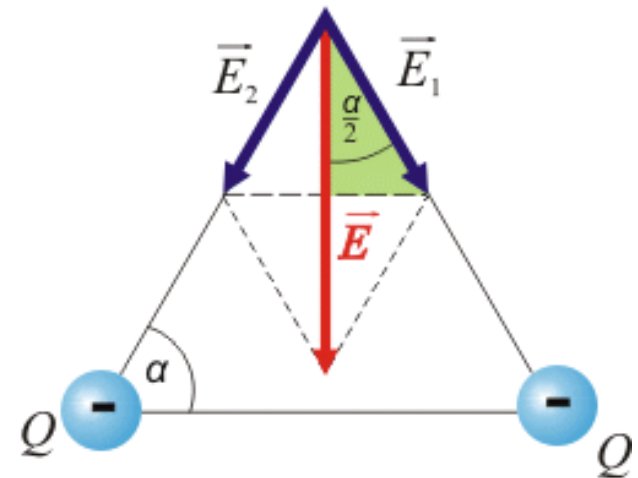
Układy ładunków- linie pola

- 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:

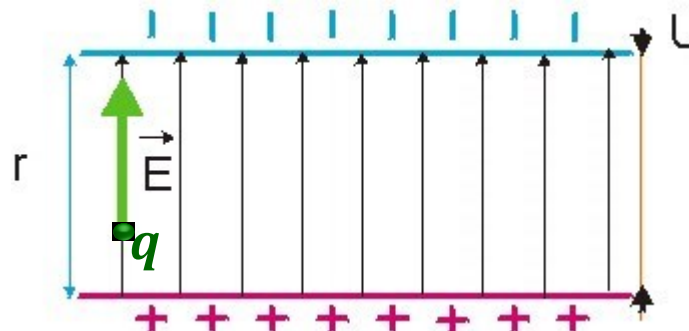
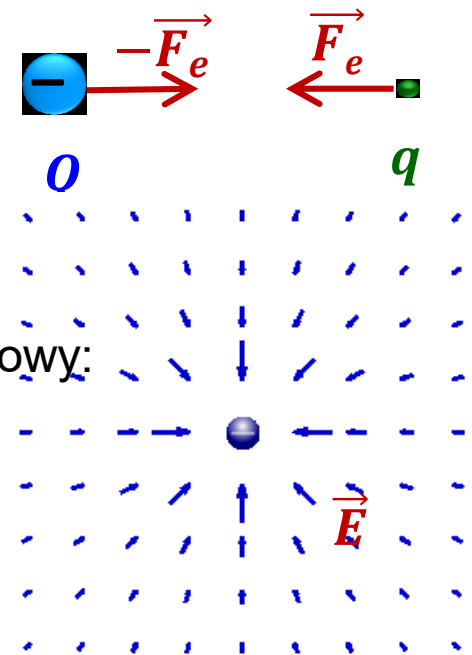
$$\vec{E}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

- Jednorodne pole wytworzone przez dwie naładowane płaszczyzny:

- na ładunek próbny działa siła:

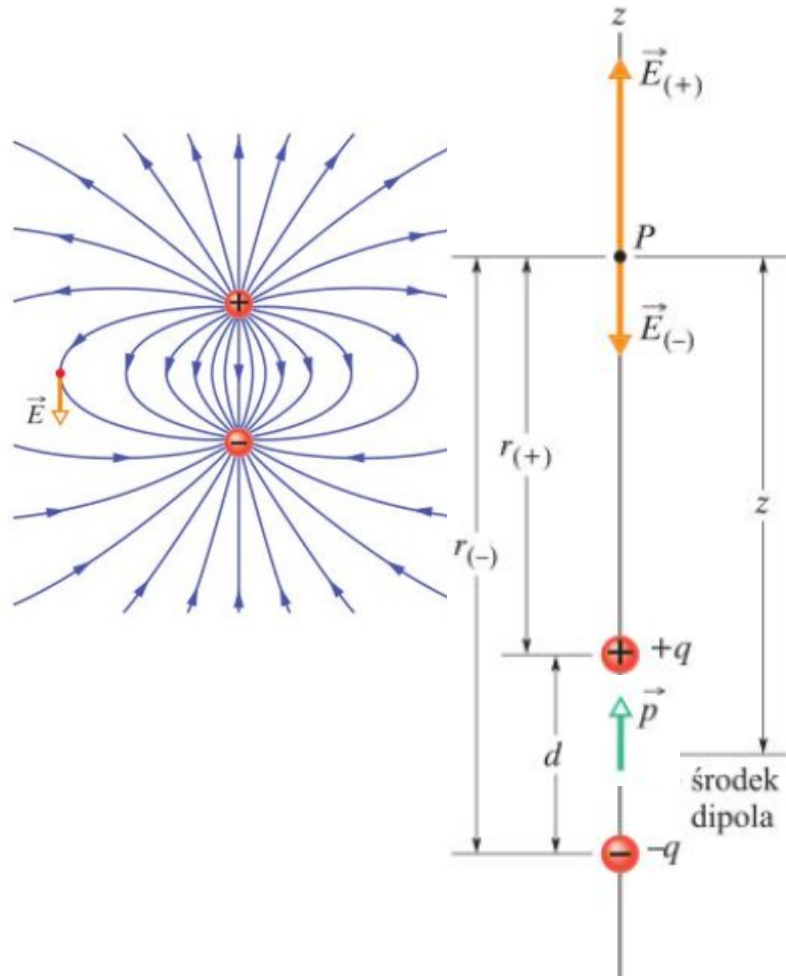
$$\vec{F}_e = q \vec{E}$$

- natężenie pola ?



Dipol elektryczny

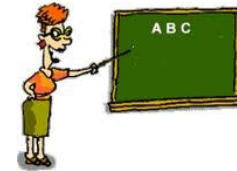
- Pole elektryczne dipola elektrycznego



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

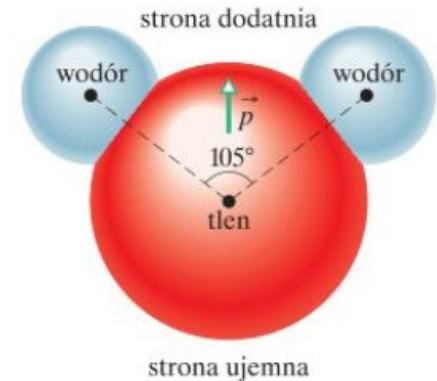
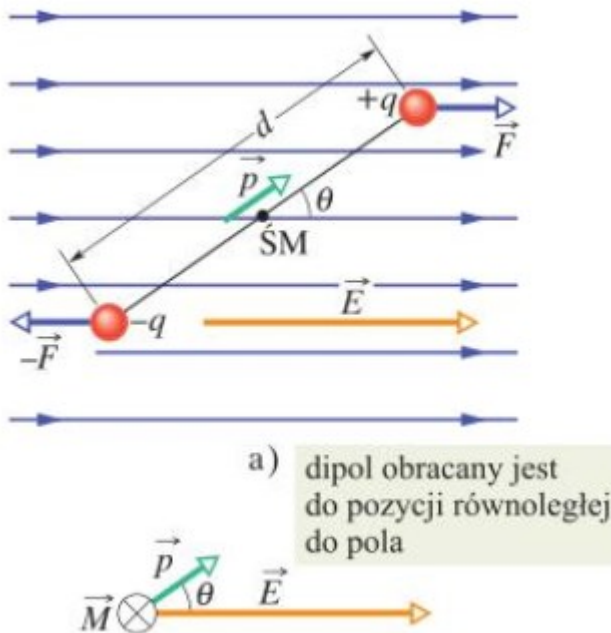
$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}$$

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



Dipol w polu elektrycznym

1. Cząsteczka wody jest dipolem elektrycznym:
2. Ustawiona w zewnętrznym polu elektrycznym ustawia swój moment dipolowy zgodnie z liniami pola:



Siły elektrostatyczne działają w przeciwnych kierunkach na końce dipola i wytwarzają wypadkowy moment siły względem $\dot{S}M$:

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$$

który dąży do odwrócenia \vec{p} w kierunku \vec{E} .

Energia potencjalna dipola:

$$E_p = -W = - \int_{\frac{\pi}{2}}^{\theta} M d\theta$$

zależy od jego ustawienia:

$$E_p = -pE \cos\theta$$

jest najmniejsza, gdy \vec{p} i \vec{E} mają ten sam kierunek

Praca siły elektrostatycznej

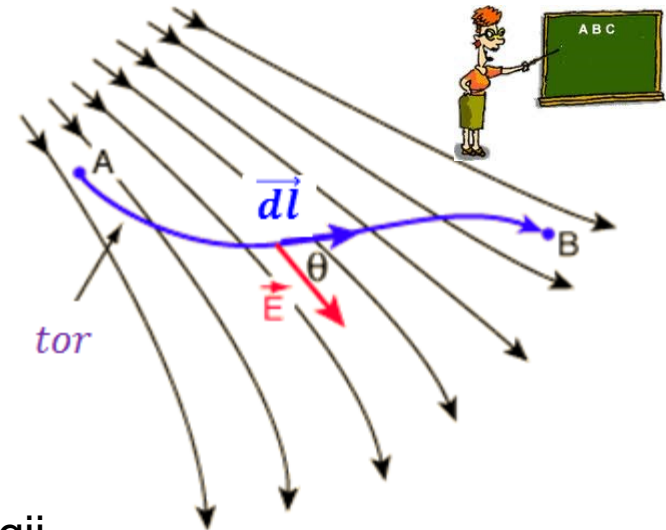
- Praca siły elektrostatycznej przy przesunięciu ładunku q (dodatniego) z punktu A do B w polu o natężeniu \vec{E} :

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

- 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

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

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

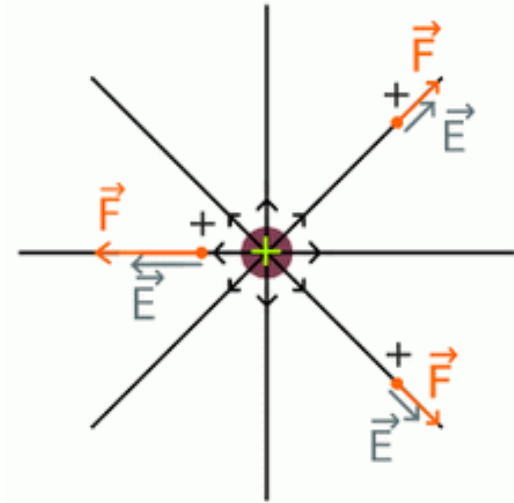
$$E_p = -W_\infty = W(A \rightarrow \infty)$$

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

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

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

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



- 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.

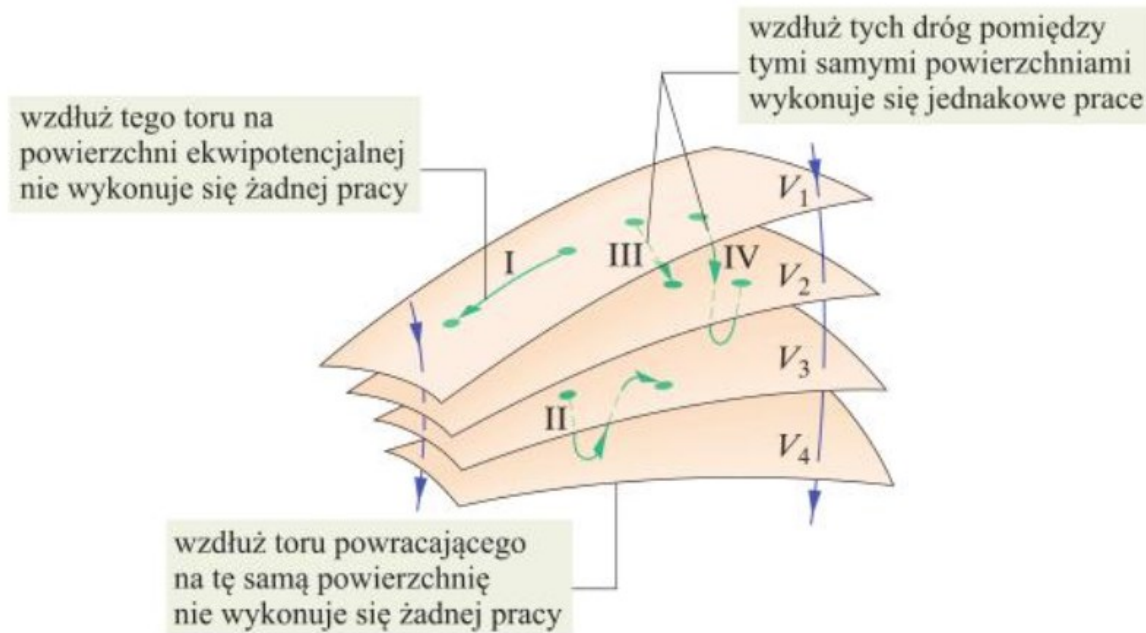
- Jeśli w nieskończoności $E_p \rightarrow 0$, to:

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

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:

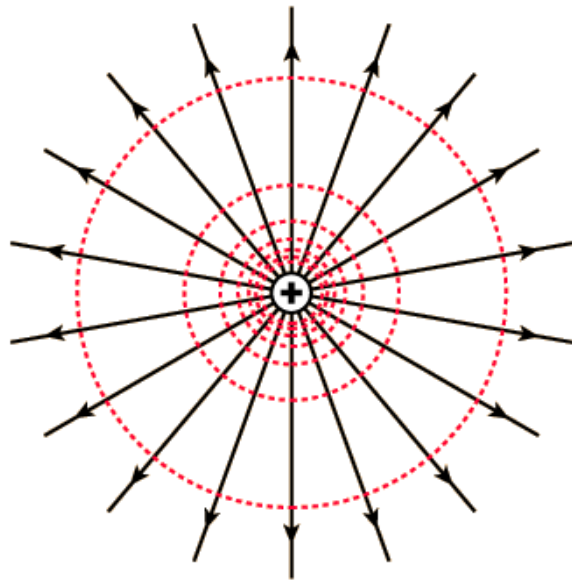


gdy $V_k = V_p$, to $W = 0$

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

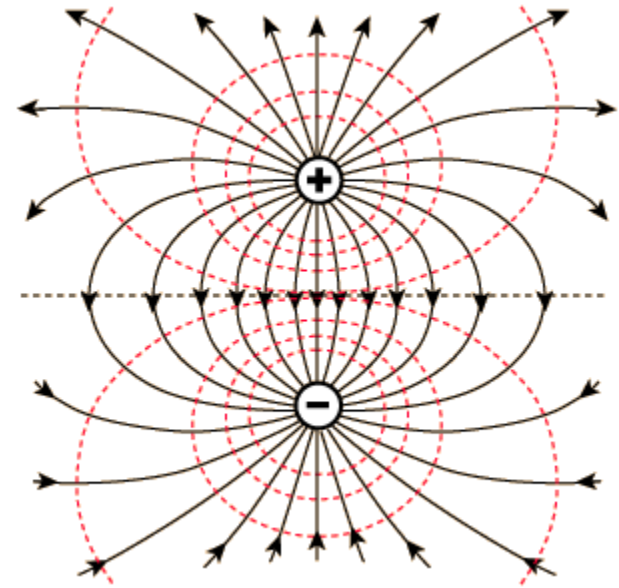
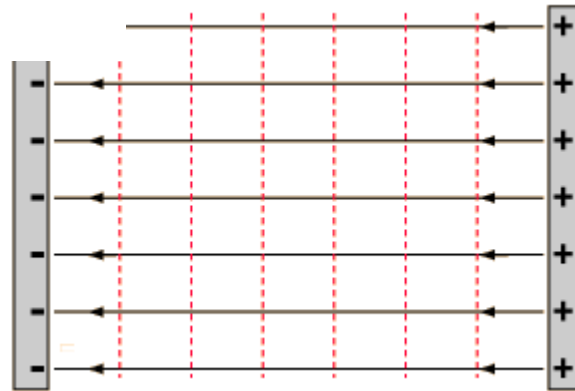
Powierzchnie ekwipotencjalne

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



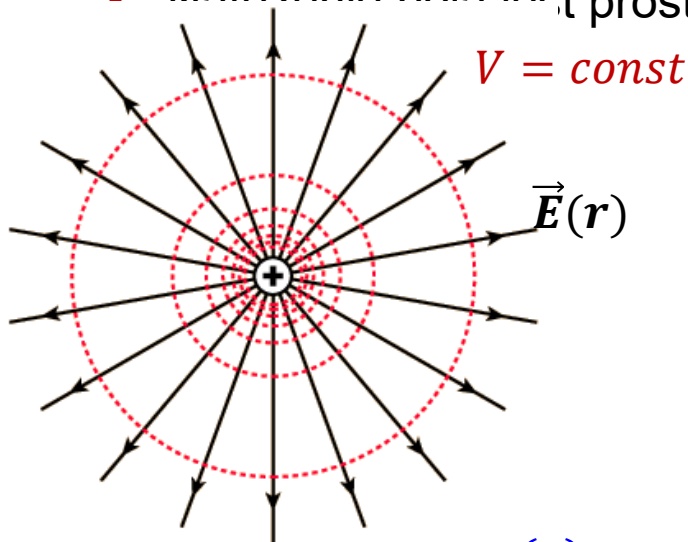
Ładunek
poruszający się po
powierzchni
ekwipotencjalnej:

- nie wykonuje
pracy
- nie zmienia
energii

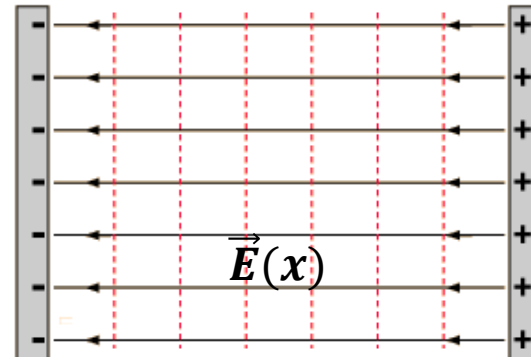


Natężenie a potencjał

- 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 !!!