

Podstawy fizyki – sezon 2

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 111

amucha@agh.edu.pl

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

- ▶ Pole elektryczne i magnetyczne:
 - ▶ Elektrostatyka.
 - ▶ Elektromagnetyzm.
- ▶ Obwody elektryczne.
- ▶ Optyka geometryczna i falowa.
- ▶ Elementy fizyki współczesnej.

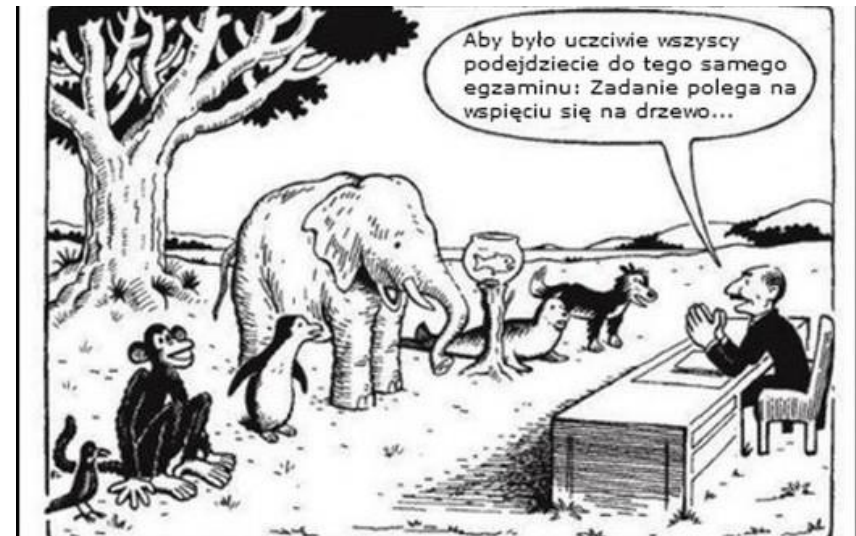
Podstawy fizyki – sezon 2

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Fizyka na IMIR MBM – rok 2016-17

EGZAMIN

- ▶ Warunkiem **dopuszczenia** do egzaminu jest **pozytywne zaliczenie 1. i 2. ćwiczeń rachunkowych**.
- ▶ W przypadku **negatywnego** zaliczenia egzaminu są dwa terminy **poprawkowe**.
- ▶ Szczegółowy harmonogram egzaminów podany jest 2 tygodnie przed letnią sesją egzaminacyjną.
- ▶ Chętnych, których średnia ocena z ćwiczeń rachunkowych **> 4.0** mogą przystąpić do egzaminu w terminie **dodatkowym, tzw „zerowym”**



Fizyka na IMIR MBM – rok 2016-17

OCENA KOŃCOWA po II semestrze

- ▶ jeżeli ocena z ćwiczeń 1 i 2 ≥ 3.0

i jeżeli ocena z egzaminu ≥ 3.0 to:

$$\text{ocena końcowa 2} = 0.6 \text{ egzamin} + 0.2 \text{ ĆW1} + 0.2 \text{ ĆW2},$$

np.

E=4.0,

ĆW1=3.5,

ĆW2=3.0,

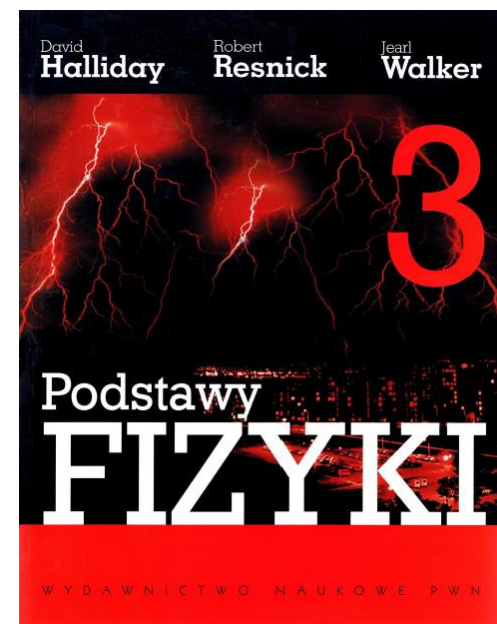
OK2=3.7 (+dst)

$$\text{OK2} = 0.6 E + 0.2 (\text{ĆW1} + \text{ĆW2})$$

OK 2	ocena
4.76 - 5.0	bdb
4.26 - 4.75	+db
3.76 - 4.25	db
3.26 - 3.75	+dst
3.0 - 3.25	dst

WSTĘP

- ▶ Wykłady rozpoczynają się o godz. **8:00**.
 - ▶ Obecność i czynne zrozumienie wykładu są **NIEZBĘDNE** do rozwiązywania zadań.
 - ▶ Proszę o zapoznanie się z informacjami na temat ćwiczeń rachunkowych.
 - ▶ Uwaga!!! Grupa 9 w tym tygodniu ma ćwiczenia rachunkowe – proszę przygotować zadania.
 - ▶ Grupa 10 – zajęcia z 8 marca odbędą się 13 marca – info na www
-
- ▶ Wykład oparty jest o znany i zalecany (i lubiany) podręcznik. Na ćwiczeniach obowiązuje **znajomość materiału na podstawie ww literatury**.
 - ▶ Treść wykładu przekazywana jest **w części** na prezentacjach (część opisowa), a w części na tablicy (część obliczeniowa).



Podstawy fizyki – sezon 2

1. Elektrostatyka 1

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Pierwsze zabawy z ładunkami

► Starożytni Grecy zauważyli:

- potarty bursztyn (grec. elektron) przyciąga kawałki słomy

□ ELEKTRYCZNOŚĆ

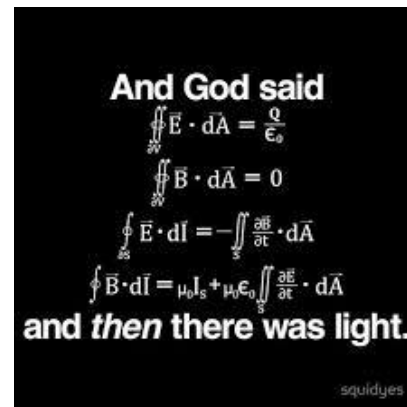
- pewne skały przyciągają i odpychają drobiny żelaza

□ MAGNETYZM

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

□ ELEKTOMAGNETYZM

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

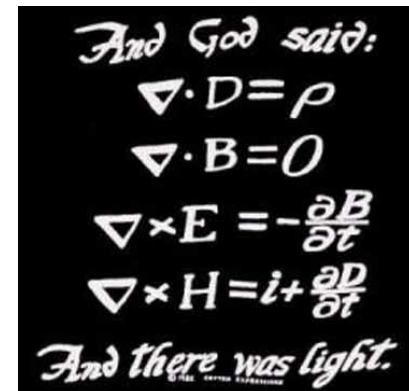


And God said

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

and then there was light.

squidyes



And God said:

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

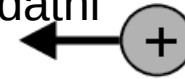
And there was light.

Elektrostatyka i ładunki

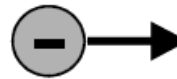
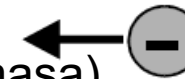
- ▶ **Elektrostatyka** – nauka o **nieruchomych ładunkach** elektrycznych



- ▶ Dwa rodzaje ładunków elektrycznych – ujemny i dodatni (umownie). Ładunki jednoimienne się odpychają, różnoimienne – przyciągają.



- ▶ Ładunek – charakteryzuje ciało (podobnie jak np. masa).

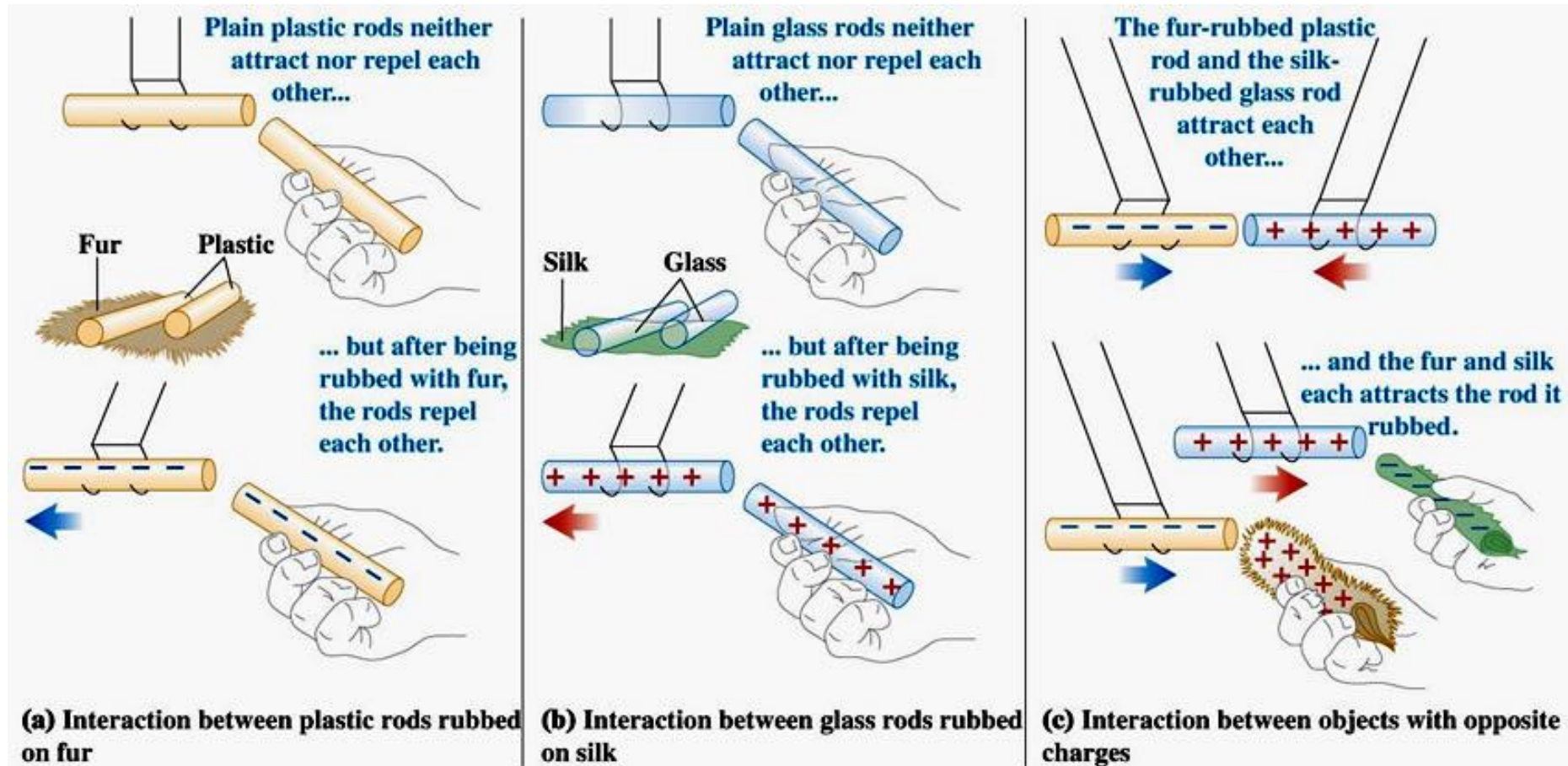


- Ładunek elektryczny jest sumą ładunków elementarnych, z których składa się ciało.
 - Ładunek elektryczny jest skwantowany (dośw. Millikana), tzn, jest wielokrotnością ładunku elementarnego $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomba –
 $Q = n e$
 - Całkowity ładunek elektryczny układu odosobnionego jest zachowany.
- ▶ 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

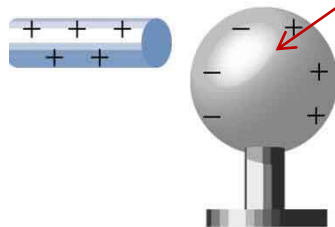


Elektryzowanie przewodników

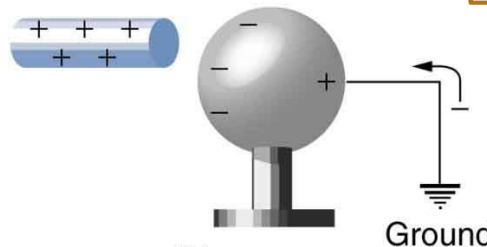
PRZEWODNIKI

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)

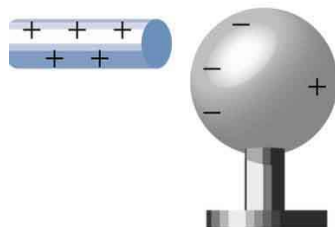


(a)



(b)

uziemiona, dodatnia strona kuli, pobiera elektrony,

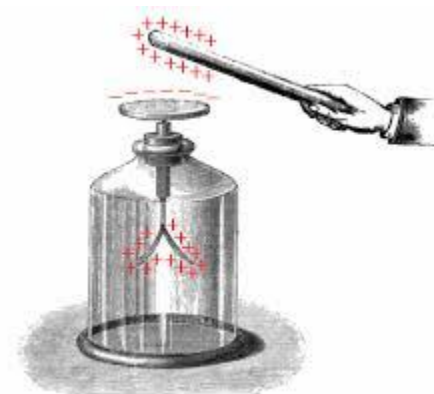


(c)



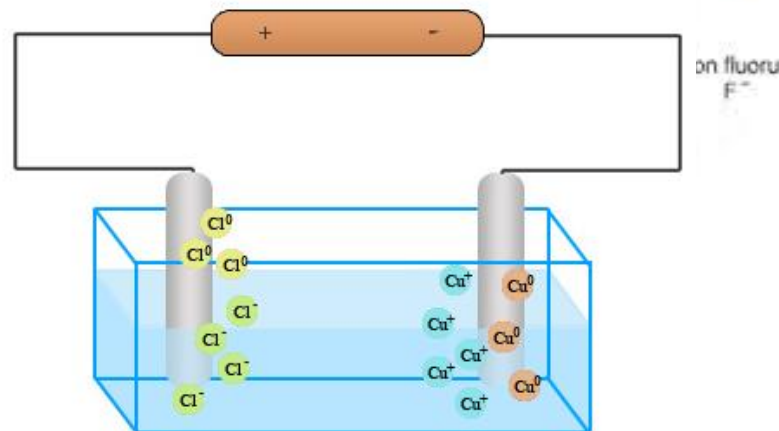
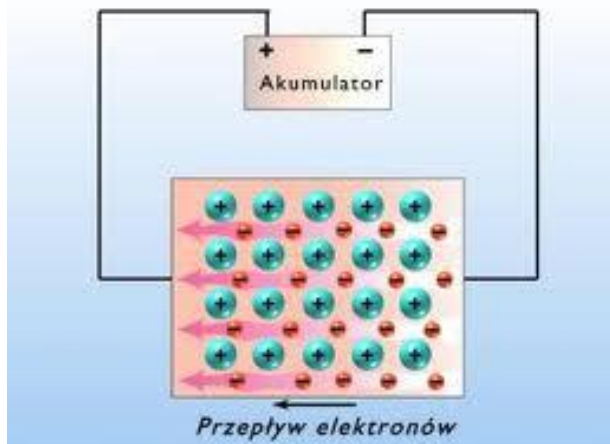
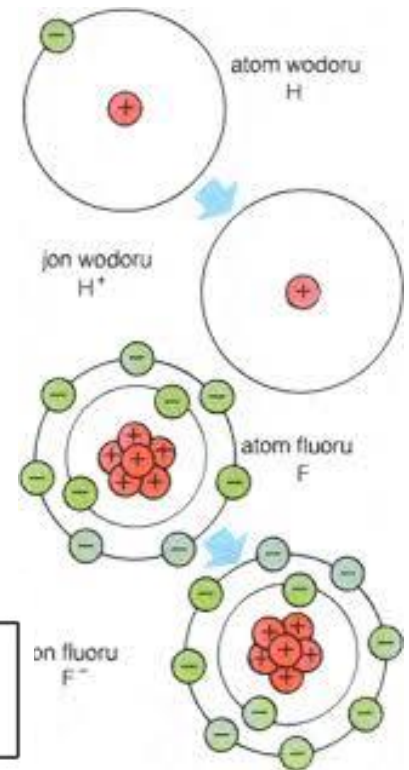
(d)

w efekcie kula ma nadmiar ładunku ujemnego



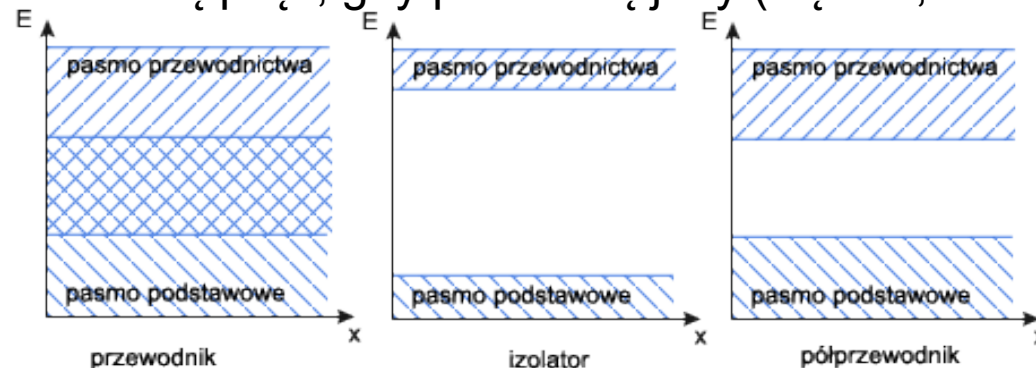
Ładunki?

- ▶ **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																	5 ⁵ B	6 ⁶ C	7 ⁷ N	8 ⁸ O	9 ⁹ F	10 ¹⁰ Ne
11 ¹¹ Na	12 ¹² Mg																	13 ¹³ Al	14 ¹⁴ Si	15 ¹⁵ P	16 ¹⁶ S	17 ¹⁷ Cl	18 ¹⁸ Ar
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						

metale proste

metale przejściowe

magnetyczne

metale przejściowe

półprzewodniki

półmetale

izolatory

ziemie rzadkie

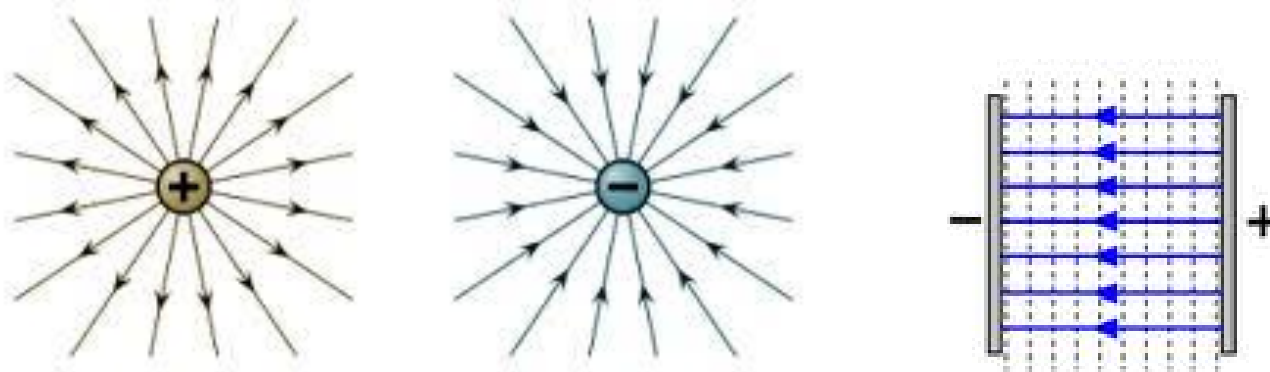
i lantanowce

http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c_teorja_pasmowa/5.php

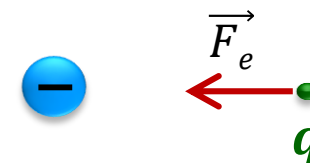
Pole elektryczne

- ▶ 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



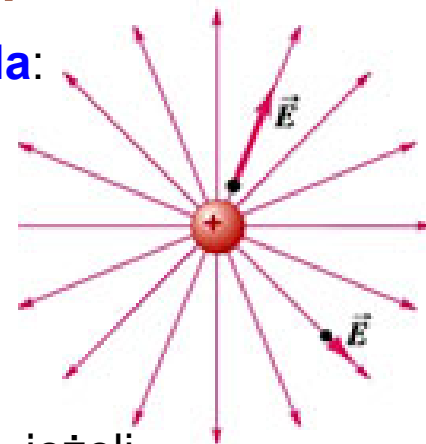
- ▶ Jeżeli w polu elektrycznym umieścimy ładunek elektryczny – działa siła elektryczna (ładunek próbny q umownie uważamy za dodatni).



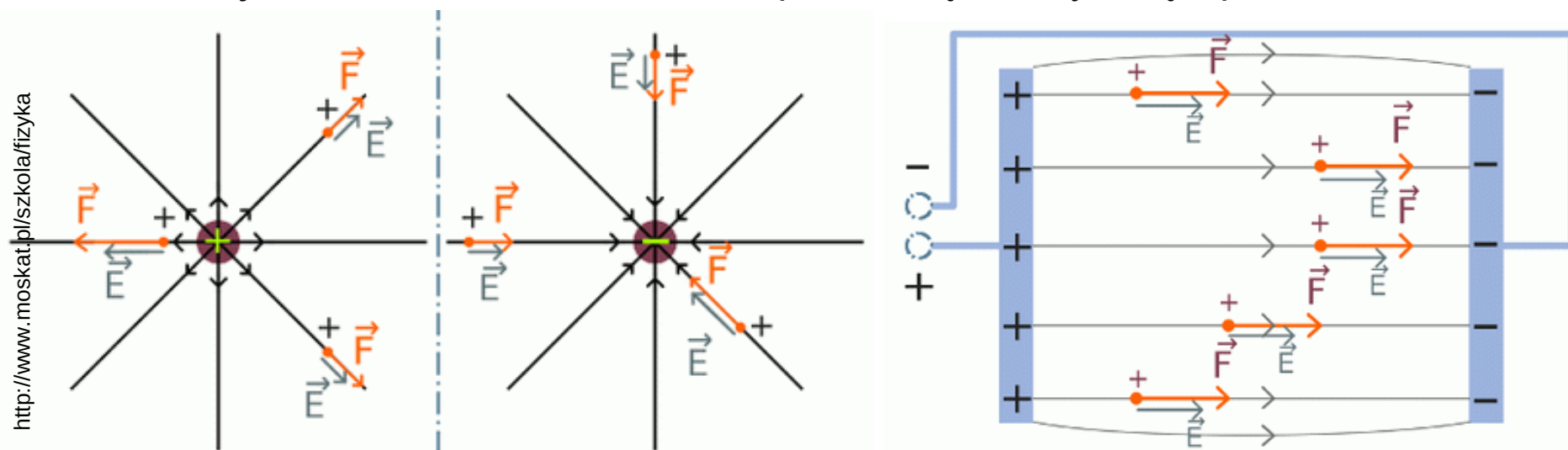
Natężenie pola

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

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

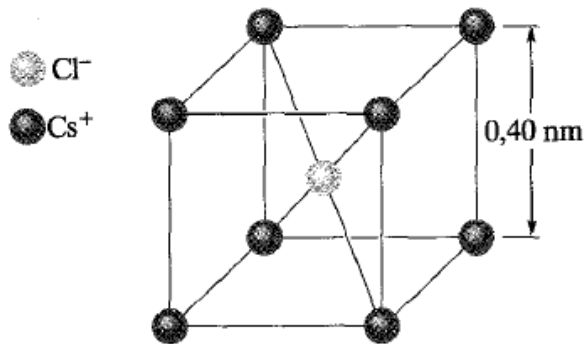
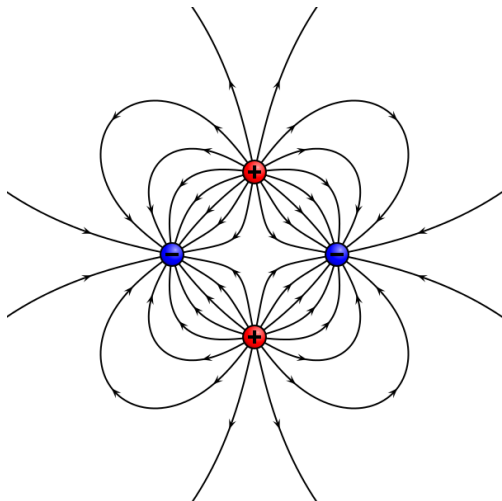
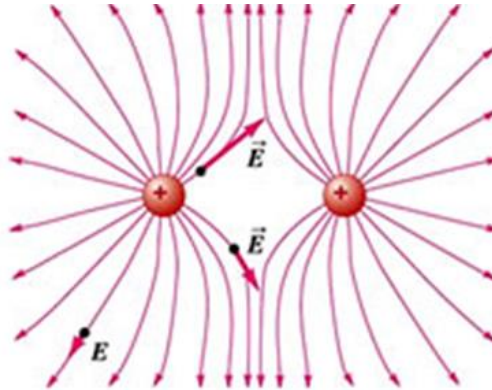
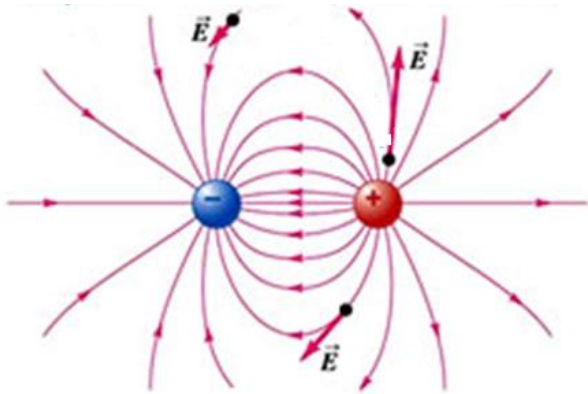


- jest zgodny z liniami pola.
 - pole jest najsilniejsze, tam, gdzie linie są najbardziej gęste.
- ▶ Jeśli chcemy opisać pole – należy wyznaczyć wektor natężenia, jeżeli interesuje nas zachowanie ładunku w polu – siłę elektryczną, np.:



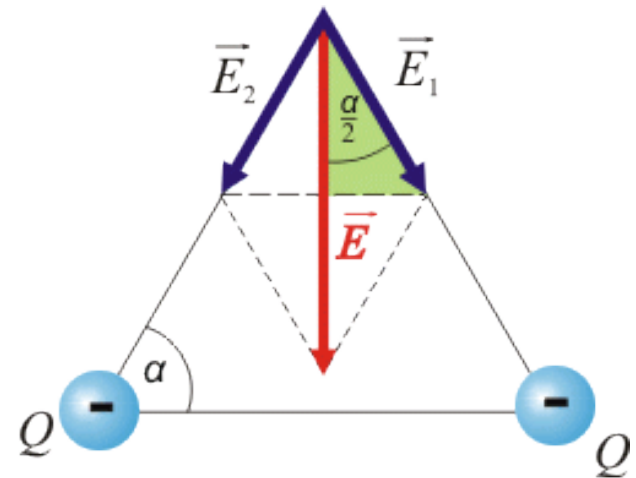
Układy ładunków

- 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:

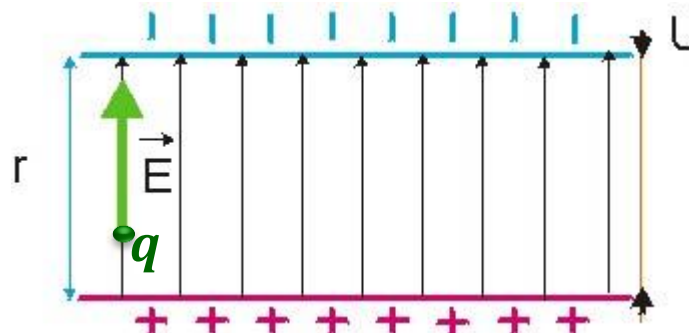
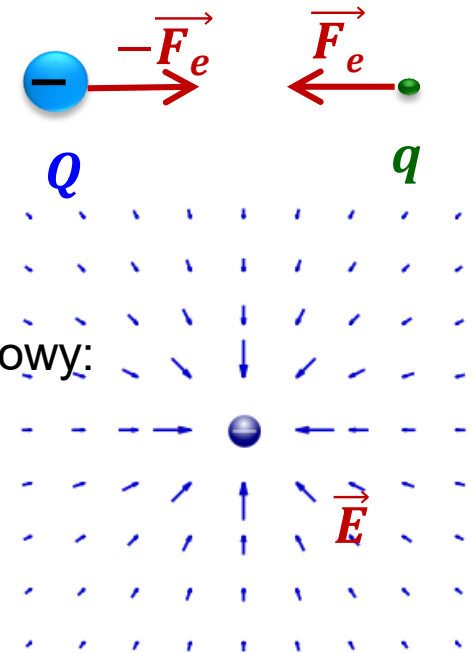
$$\vec{E}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

► Jednorodne pole wytworzone przez dwie naładowane płaszczyzny:

- na ładunek próbny działa siła:

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

- natężenie pola ?



Praca siły elektrostatycznej

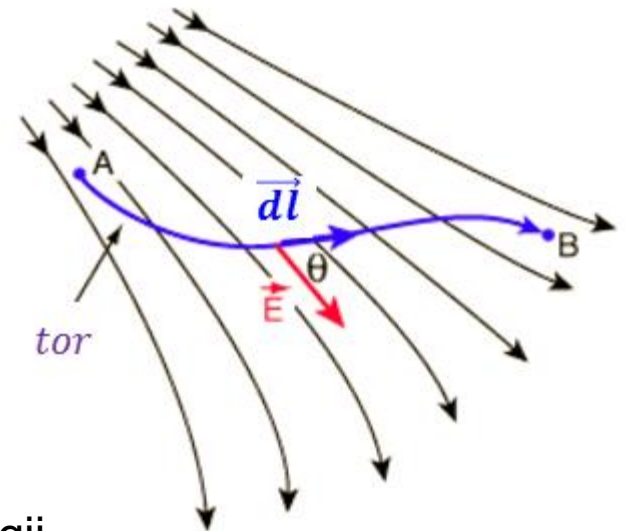
- Praca siły elektrostatycznej przy przesunięciu ładunku q (dodatniego) z punktu A do B w polu o natężeniu $\vec{E}$:

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

- 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:

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

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



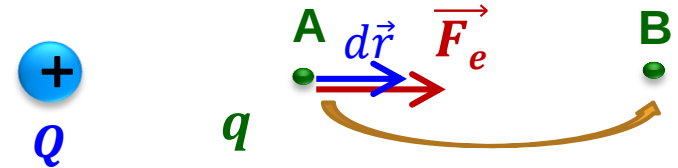
przykł – policzyć zmianę energii w przypadku ładunku ujemnego, zmieniając kierunek ruchu

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

- **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:

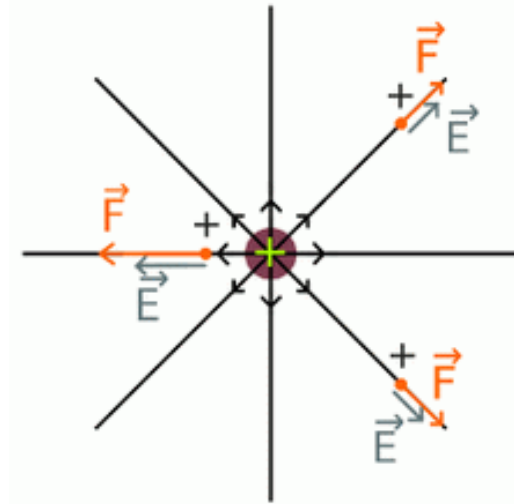
$$E_p = -W_\infty = W(A \rightarrow \infty)$$

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

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

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

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



- 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:

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

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 a natężenie pola

► Przypadek ogólny:

- mamy poruszający się po torze **AB** dodatni ładunek próbny q .
- w każdym punkcie działa siła elektrostatyczna $\vec{F} = q \vec{E}$, która wykonuje pracę:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

► Całkowita praca wykonana przez siłę na drodze $A \rightarrow B$:

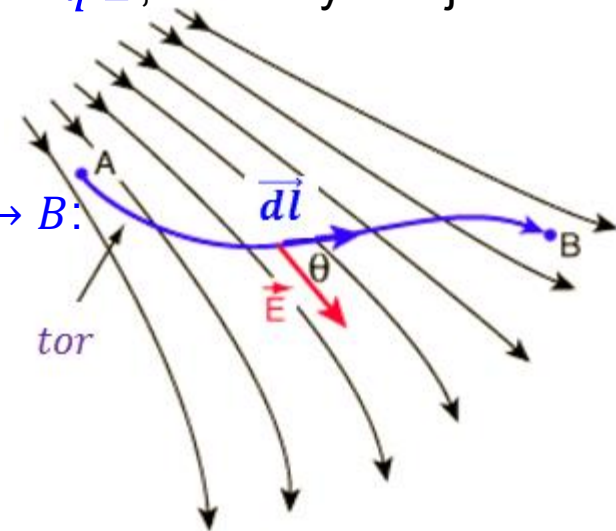
$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

► Praca wyrażona poprzez zmianę potencjału pola:

$$V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Jeśli przyjmiemy: $V_A = 0$, to:

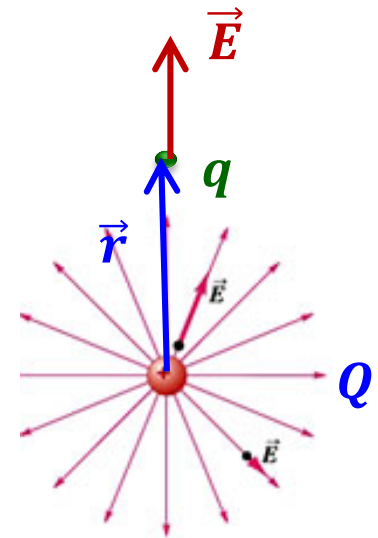
$$V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$



Potencjał ładunku punktowego

- ▶ Znak „-” oznacza, że $V_B < V_A$, a ładunek **TRACI energię** potencjalną, gdy przemieszcza się **zgodnie z liniami pola** (czyli ze spadkiem natężenia)
- ▶ Znając natężenie pola $\vec{E}(r)$ można wyznaczyć potencjał $V(r)$, np. dla pola ładunku punktowego:
 - przesuwamy ładunek próbny z punktu $\vec{r}$ do nieskończoności (tor nieistotny):

$$V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$



$$V_\infty - V(r) = - \int_r^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\left. \begin{aligned} V_\infty &= 0, \\ \vec{E} \cdot d\vec{r} &= E dr \cos 0 = E dr \end{aligned} \right\}$$

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

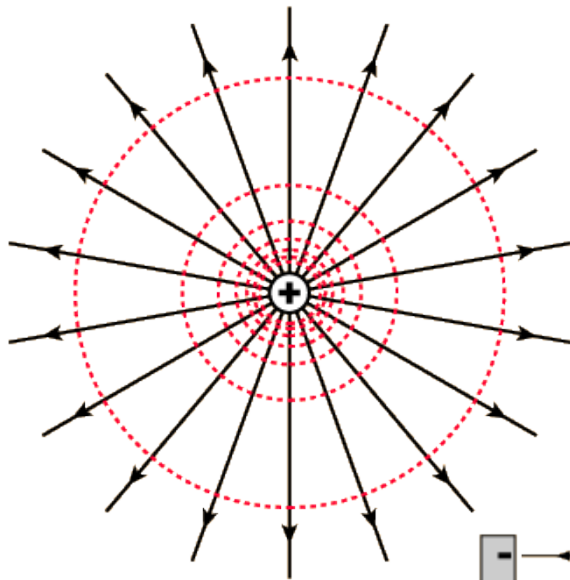
$$V(r) = \int_r^\infty E dr = \int_r^\infty \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr =$$

$$= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{Q}{r} \right]_r^\infty = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

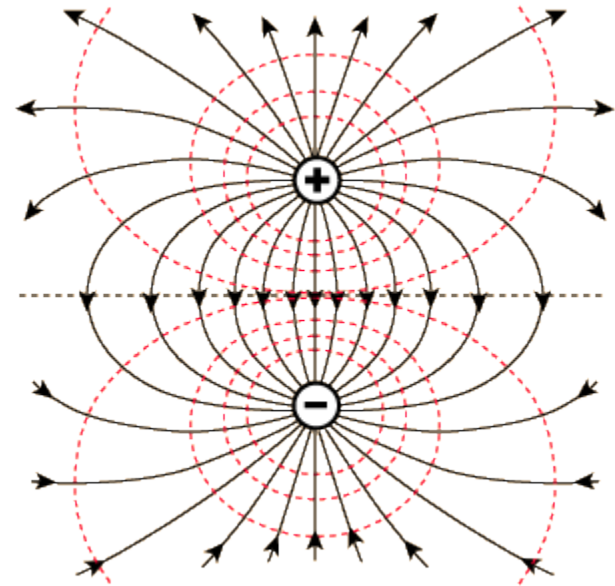
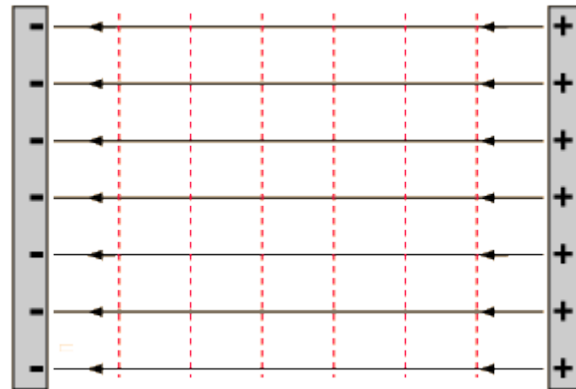
Powierzchnie ekwipotencjalne

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



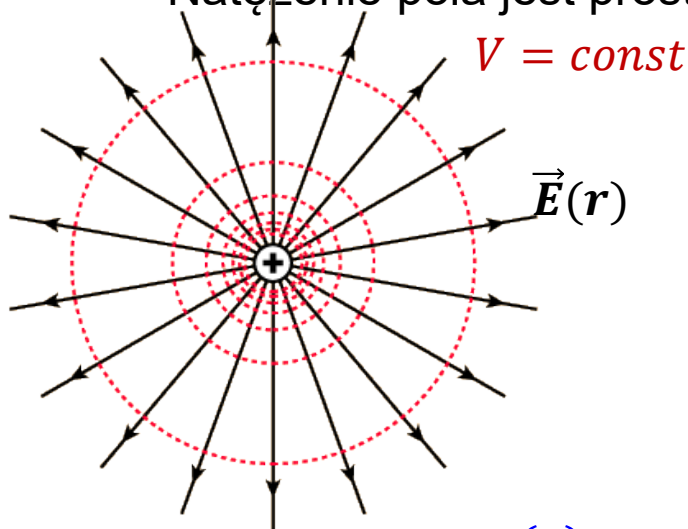
Ładunek
poruszający się po
powierzchni
ekwipotencjalnej:

- nie wykonuje pracy
- nie zmienia energii

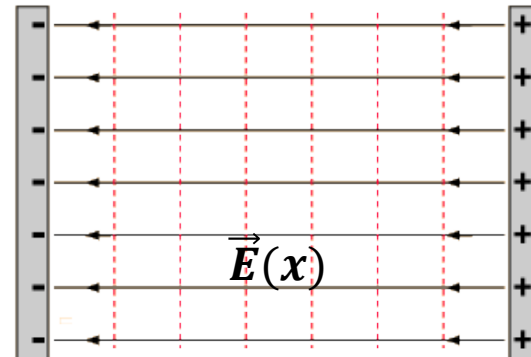


Natężenie a potencjał

- ▶ 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



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



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

Natężenie a potencjał

- W 3D - analogia do poziomic ($V = \text{const}$) linii spadku lawin $\vec{E}$

$$\vec{E}(r) = \left[-\frac{\partial V}{\partial x}, -\frac{\partial V}{\partial y}, -\frac{\partial V}{\partial z} \right]$$

$$\vec{E}(r) = -\nabla V$$

∇ - gradient

Gradient potencjału
oznacza kierunek spadku
wektora natężenia pola

a poprzednio było:

$$V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$



Zebranie faktów

- ▶ Spoczywające ładunki elektryczne wytwarzają pole elektrostatyczne.
- ▶ Na ładunki elektryczne działa siła elektrostatyczna (Coulomba).
- ▶ Pole elektrostatyczne opisane jest przez wektor natężenia pola i skalarny potencjał elektryczny
- ▶ Znając potencjał w danym punkcie, można wyznaczyć natężenie z zależności:

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

- ▶ Znając wektor natężenia w danym punkcie, można wyznaczyć potencjał z zależności:

$$V = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Podsumowanie

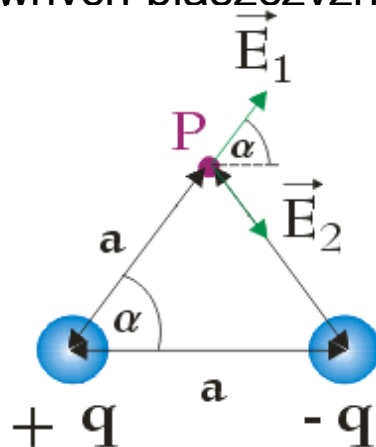
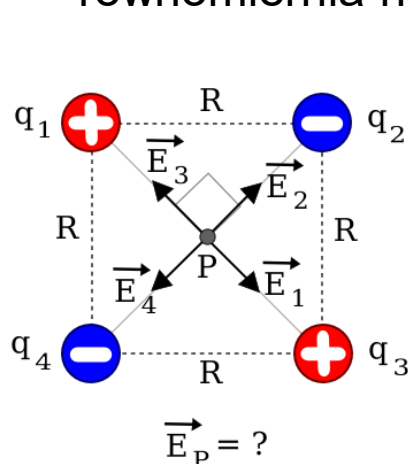
- ▶ Ładunki i pole elektrostatyczne
- ▶ Natężenie i potencjał pola (charakteryzują pole).
- ▶ Siła Coulomba i energia potencjalna w polu (opisują pola na ładunek umieszczony w tym polu)
- ▶ Przykłady obliczania natężenia pola i potencjału dla układu ładunków punktowych.



- ▶ POKAZY !!!

Wskazówki do rozwiązywania zadań

- Przykłady obliczania natężenia pola i potencjału dla układu ładunków punktowych (**rozkład dyskretny**) i dla ładunków rozmieszczonych równomiernie na pewnych płaszczyznach (**rozkład ciągły**).



Zasada superpozycji:

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i \quad \text{lub:}$$

$$\vec{E} = \int d\vec{E}$$

