

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 2015 -16

- ▶ 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.

OCENA KOŃCOWA po II semestrze

- ▶ Jeżeli **obecność na wykładzie** > 75% (10)

i jeżeli **ocena z ćwiczeń 1 i 2** ≥ 3.0

i jeżeli **ocena z egzaminu** ≥ 3.0 to:

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

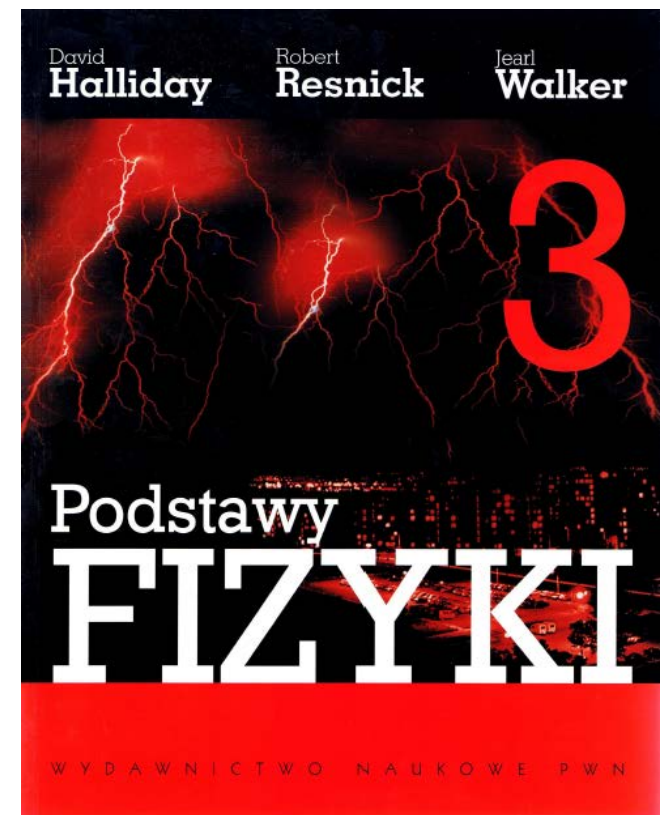
np.
E=4.0,
ĆW1=3.5,
ĆW2=3.0,
OK2=3.7 (+dst)

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

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.
- ▶ 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 zauważali:

- 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:

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

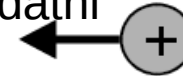
And there was light.

Elektrostatyka i ładunki

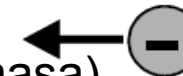
- ▶ **Elektrostatyka** – nauka o **nieruchomych ładunkach** elektrycznych



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



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

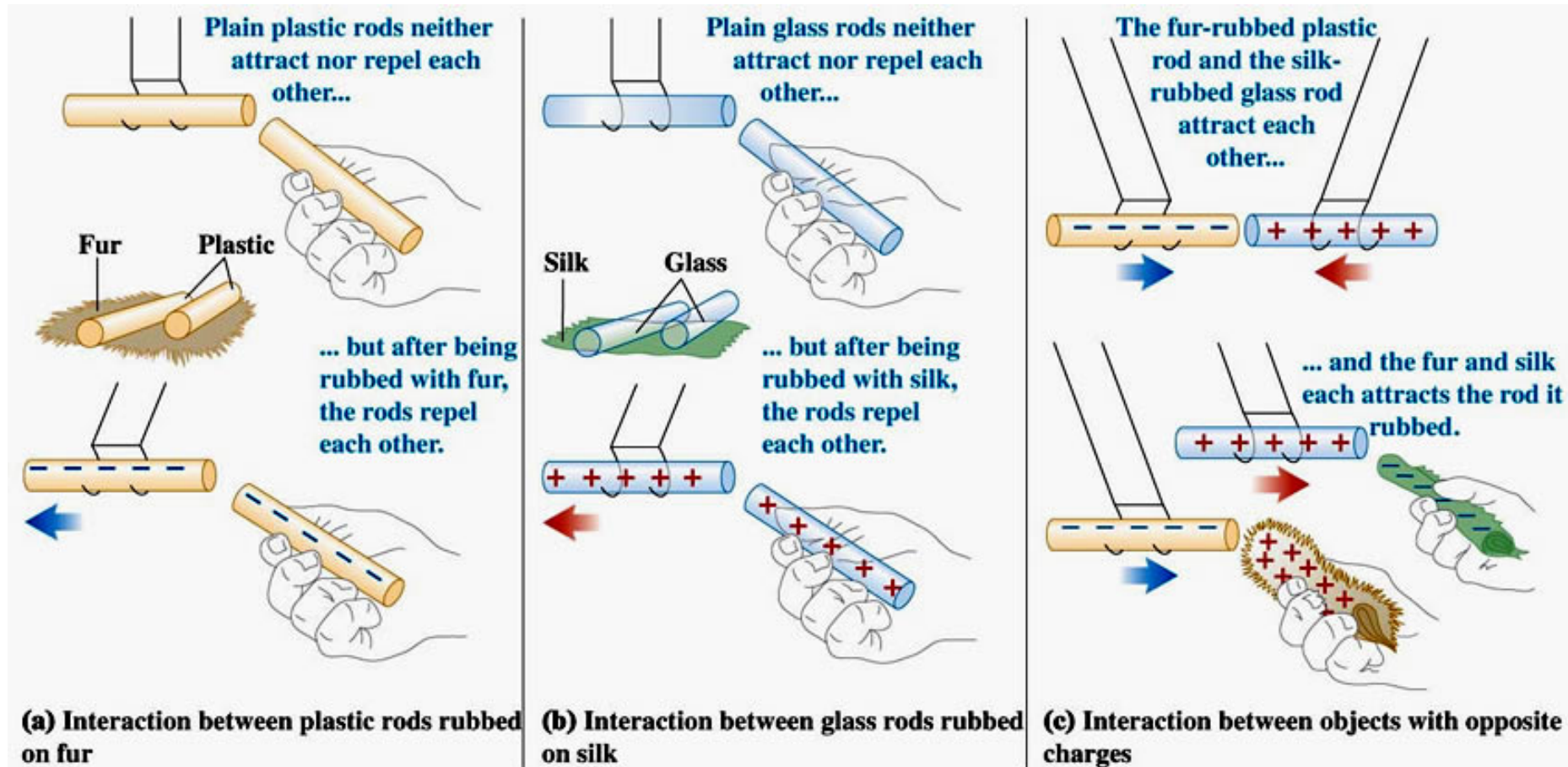


- Ładunek elektryczny jest sumą ładunków elementarnych, z których składa się ciało.
 - Ładunek elektryczny jest skwantowany (dośw. Millikana), tzn, jest wielokrotnością ładunku elementarnego $e = 1.6 \cdot 10^{19}$ Coulomba –
 $Q = n e$
 - Całkowity ładunek elektryczny układu odosobnionego jest zachowany.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

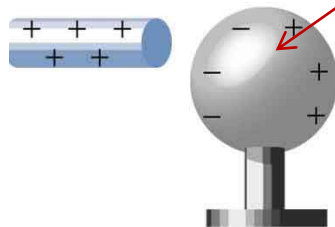


Elektryzowanie przewodników

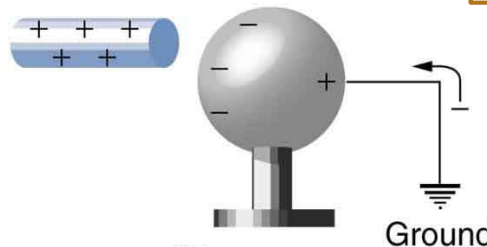
PRZEWODNIKI

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)

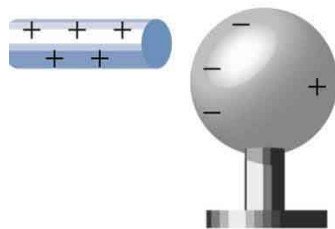


(a)



(b)

uziemiona, dodatnia strona kuli, pobiera elektrony,



(c)



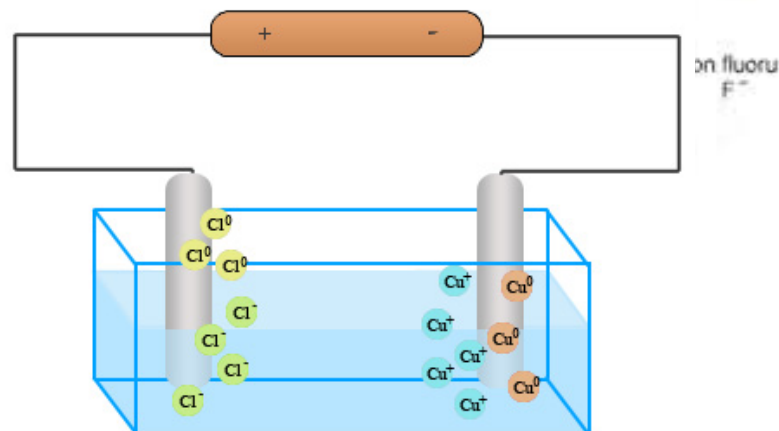
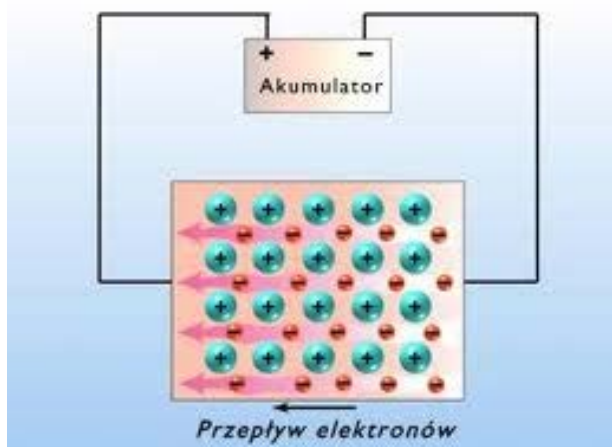
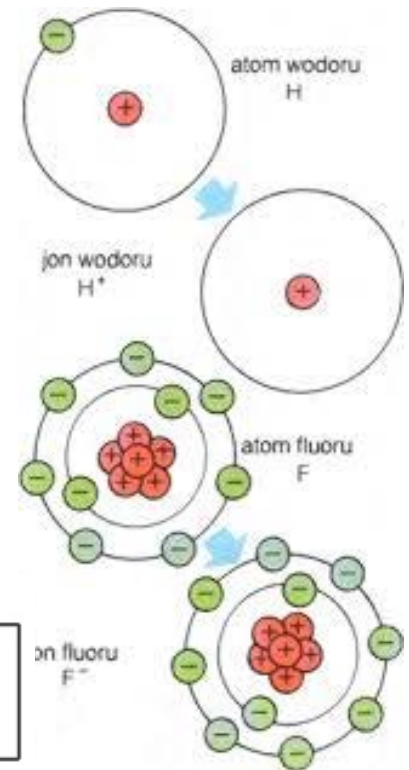
(d)

w efekcie kula ma nadmiar ładunku ujemnego



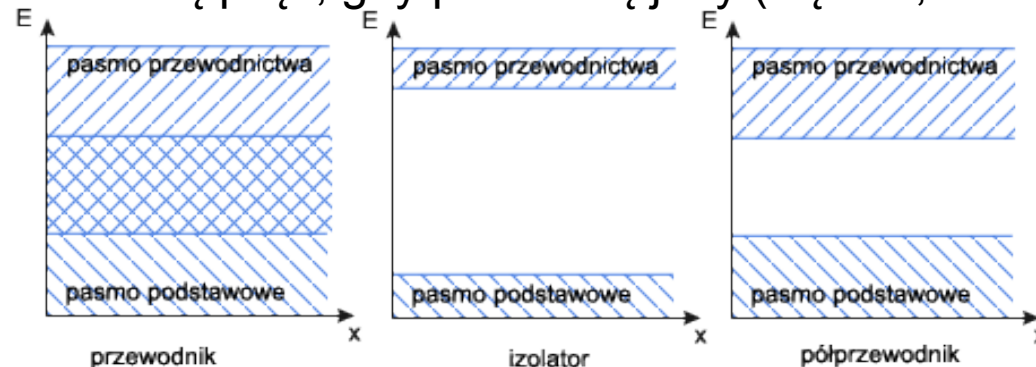
Ładunki?

- ▶ **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

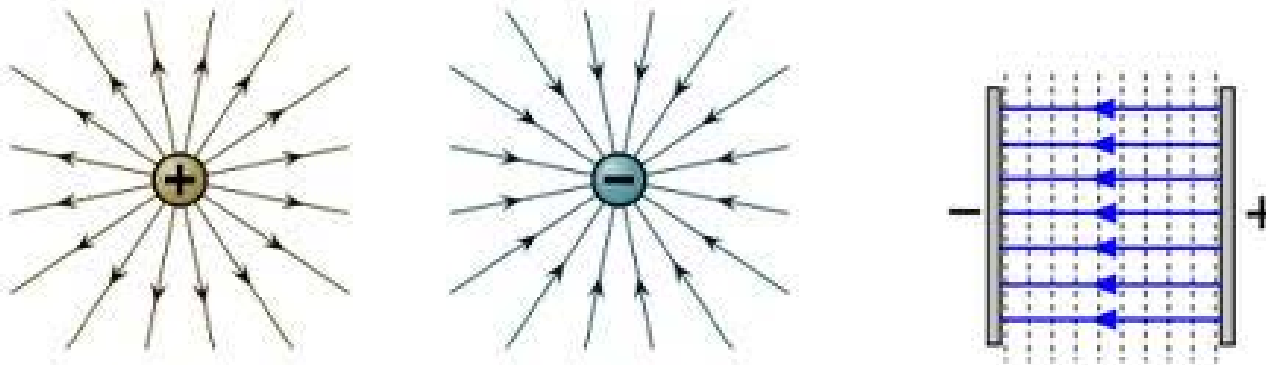
IA																		VIII A							
1 H		IIA																VIII A							
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr					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

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

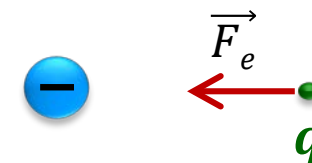
Pole elektryczne

- ▶ 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



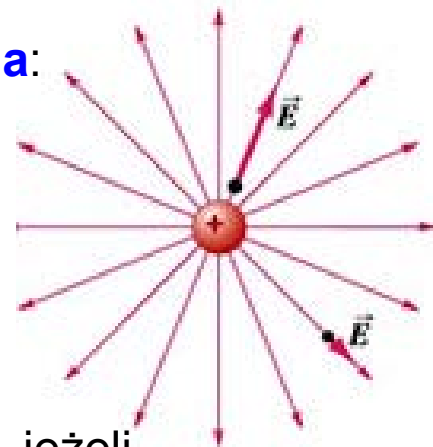
- ▶ Jeżeli w polu elektrycznym umieścimy ładunek elektryczny – działa siła elektryczna (ładunek próbny q umownie uważamy za dodatni).



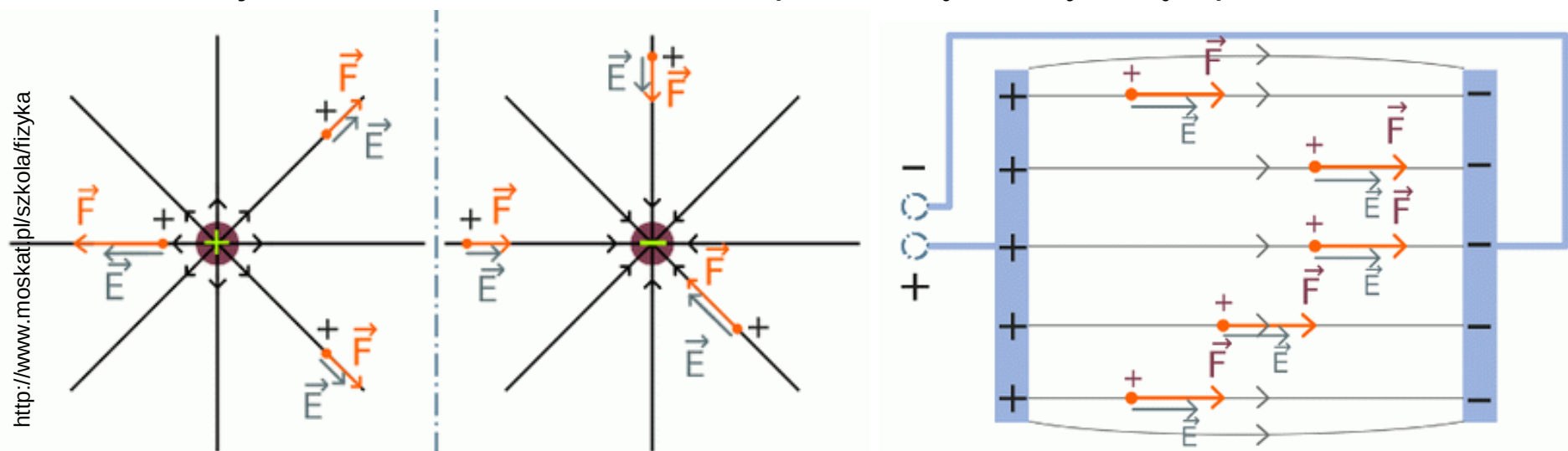
Natężenie pola

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

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



- jest prostopadły do linii 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.:



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:

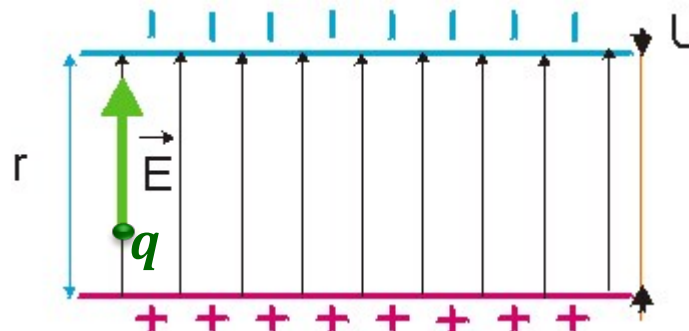
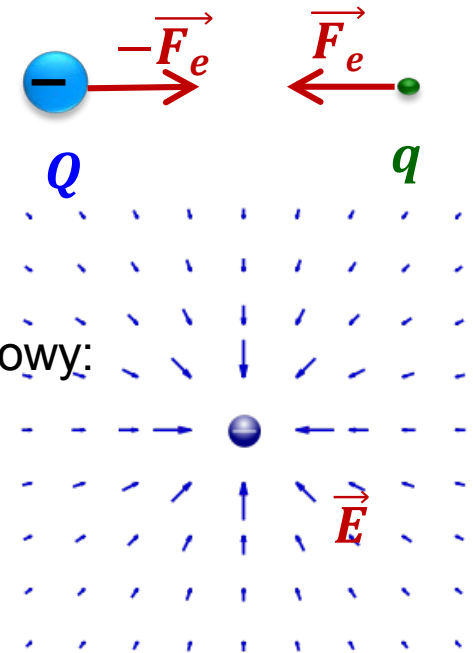
$$\vec{E}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

► Jednorodne pole wytworzone przez dwie naładowane płaszczyzny:

- na ładunek próbny działa siła:

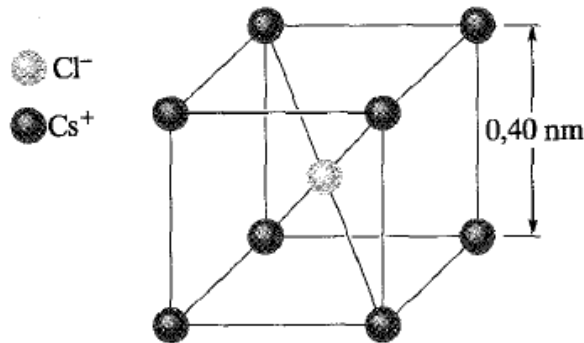
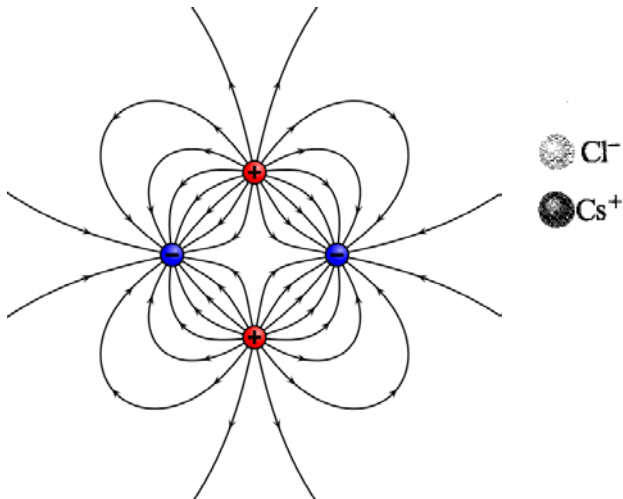
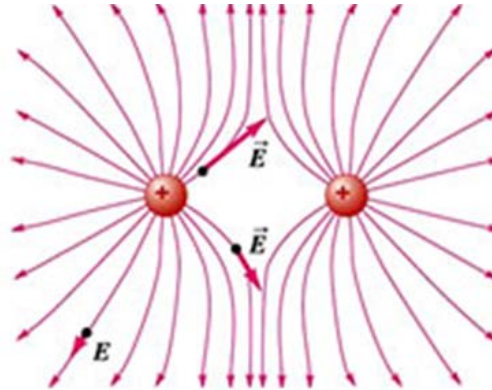
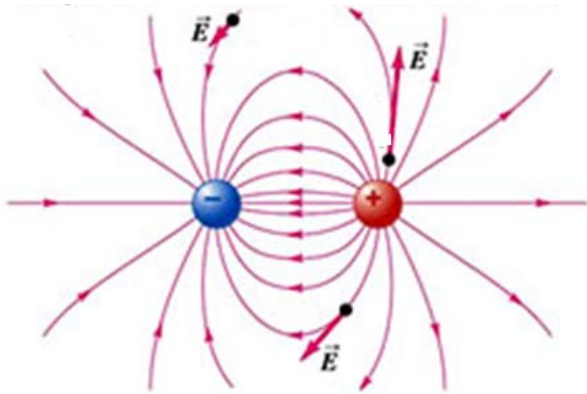
$$\vec{F}_e = q \vec{E}$$

- natężenie pola ?



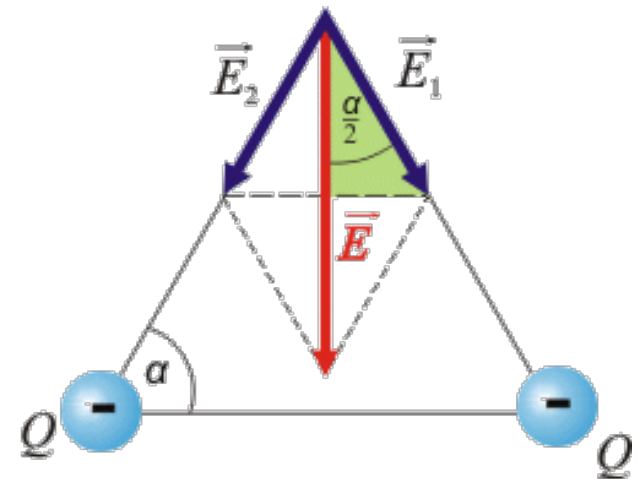
Układy ładunków

- Pole wytworzone przez układy ładunków:



zasada superpozycji:

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



<http://physicstasks.eu>

<http://physicstasks.eu>

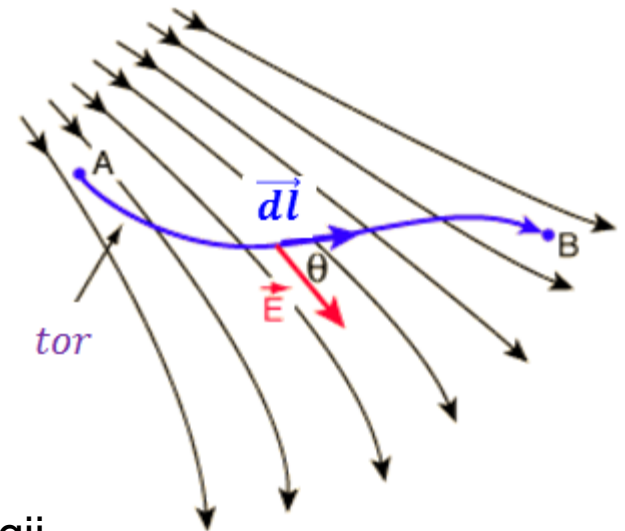
Praca siły elektrostatycznej

- ▶ 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).

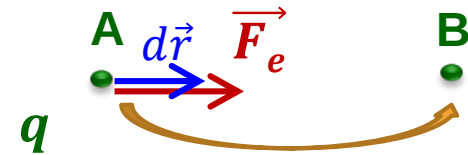
Energia potencjalna pola elektrycznego (!!)

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

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

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

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



- 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 przesuwać 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:

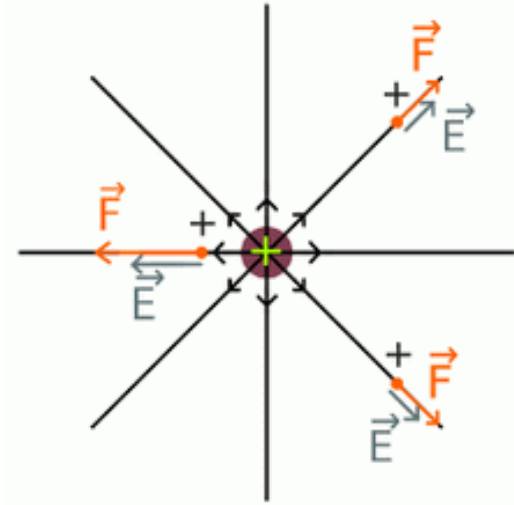
$$E_p = -W_\infty = W(A \rightarrow \infty)$$

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

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

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

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



- 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.

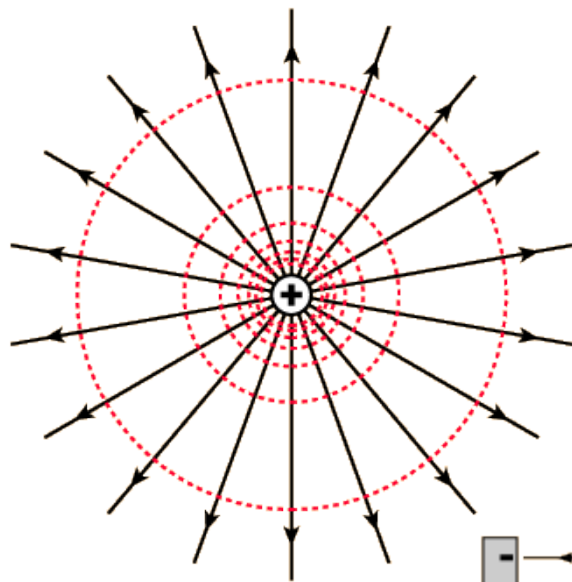
- ▶ Jeśli w nieskończoności $E_p \rightarrow 0$, to:

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

potencjał może być >0 ,
 <0 , $=0$

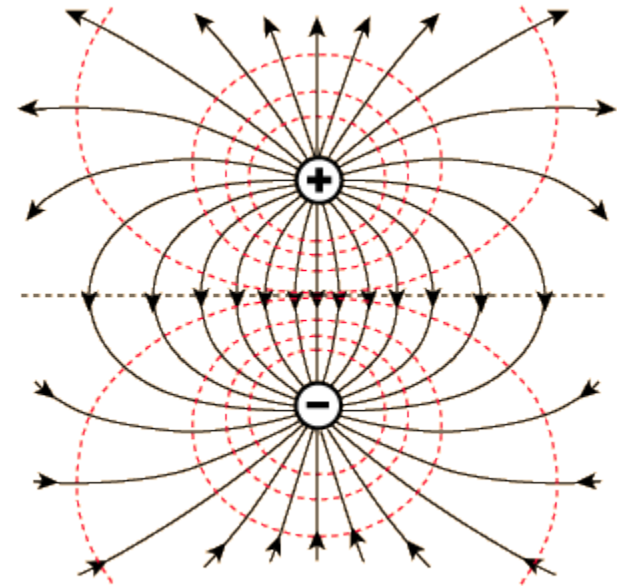
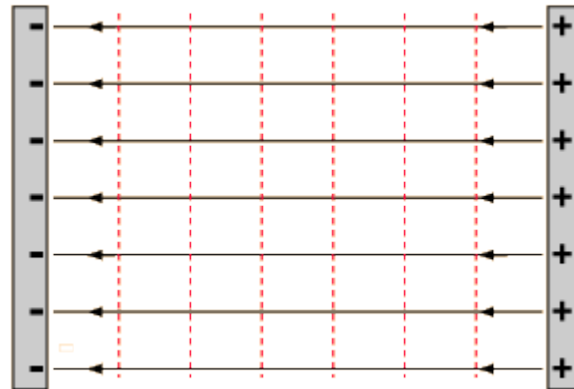
Powierzchnie ekwipotencjalne

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



Ładunek poruszający się po powierzchni ekwipotencjalnej:

- nie wykonuje pracy
- nie zmienia energii



Potencjał a natężenie pola

► Przypadek ogólny:

- mamy poruszający się po torze **AB** dodatni ładunek próbny q .
- w każdym punkcie działała 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 $A \rightarrow B$:

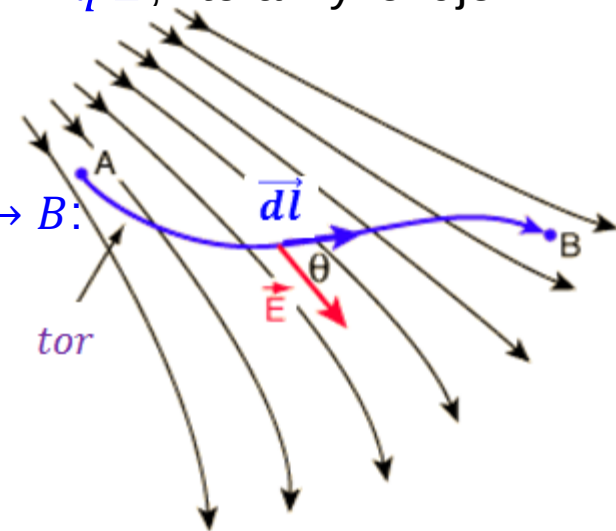
$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

► 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:

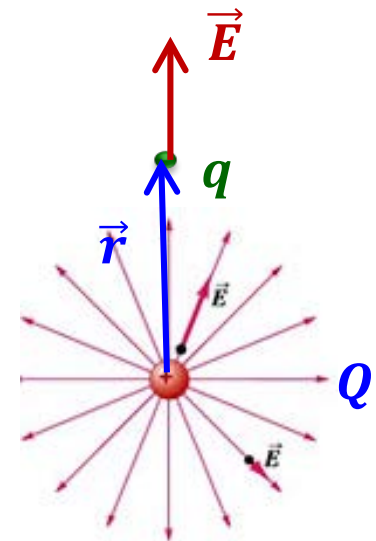
$$V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$



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):

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



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

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

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

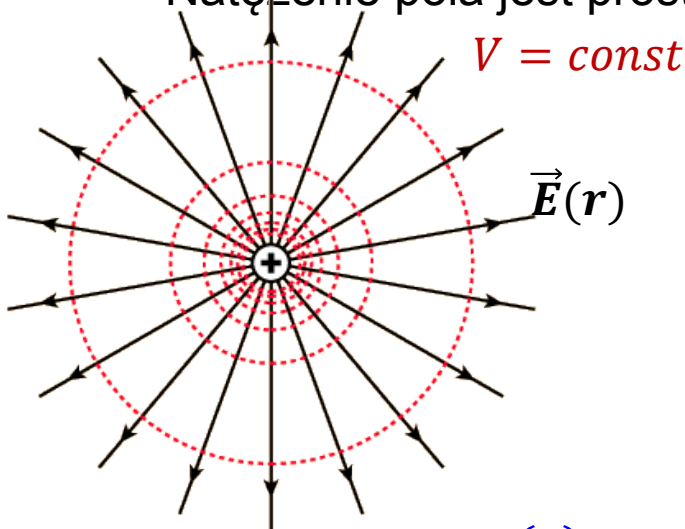
$$V(r) = \int_r^\infty E dr = \int_r^\infty \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr =$$

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

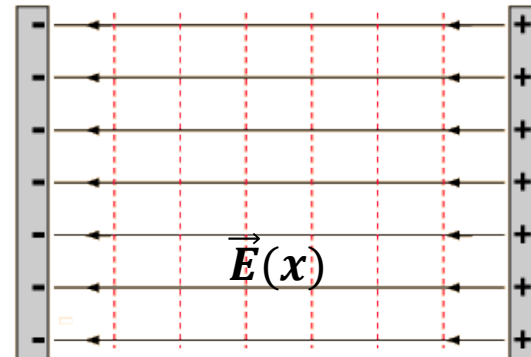
$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

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:

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

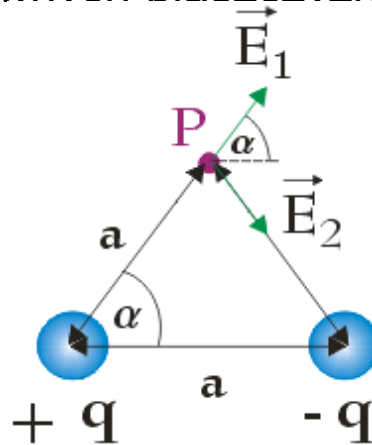
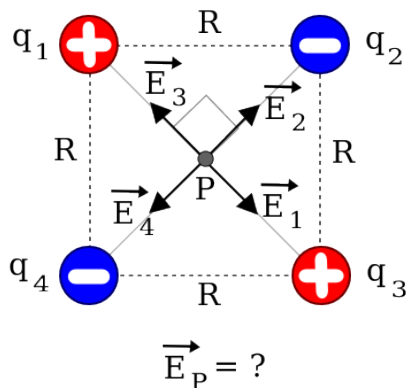
Podsumowanie

- ▶ 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.



Wskazówki do rozwiązywania zadań

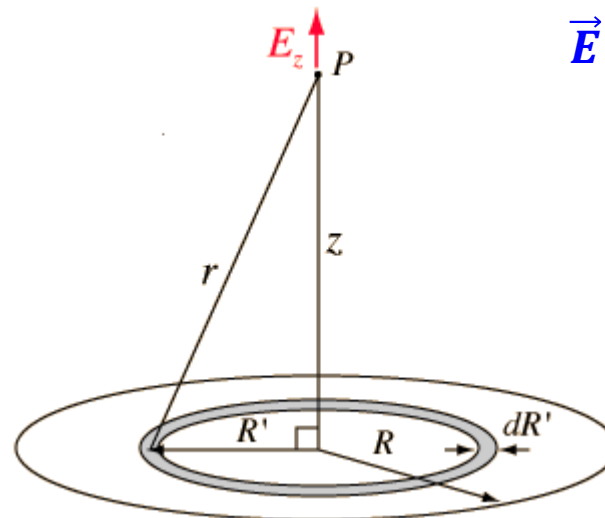
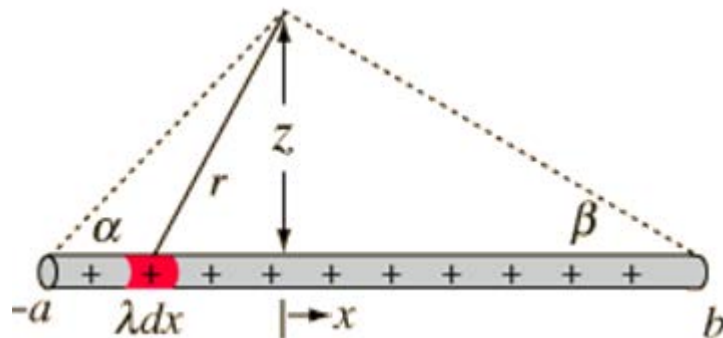
- Przykłady obliczania natężenia pola i potencjału dla układu ładunków punktowych (**rozkład dyskretny**) i dla ładunków rozmieszczonych równomiernie na pewnych płaszczyznach (**rozkład ciągły**) .



Zasada superpozycji:

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

$$\vec{E} = \int \overrightarrow{dE}$$



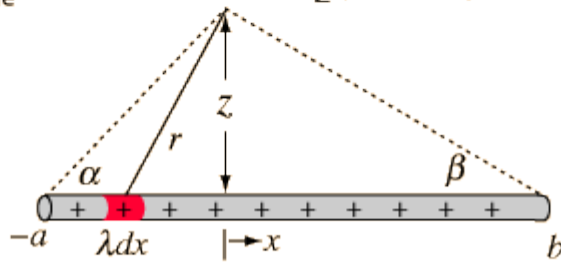
Pokazy doświadczeń

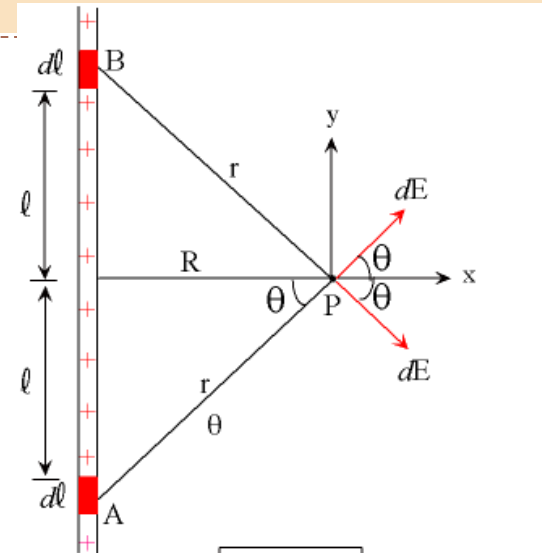
► Kinematyka -

$$E_z = k\lambda z \int_{-a}^b \frac{dx}{(z^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{k\lambda}{z} \left[\frac{x}{(z^2 + x^2)^{1/2}} \right]_{-a}^b$$

Note that as the limit is taken as a and b approach infinity, this approaches the infinite line charge expression:

$$E_z = \frac{k\lambda}{z} \left[\frac{b}{(z^2 + b^2)^{1/2}} + \frac{a}{(z^2 + a^2)^{1/2}} \right]$$

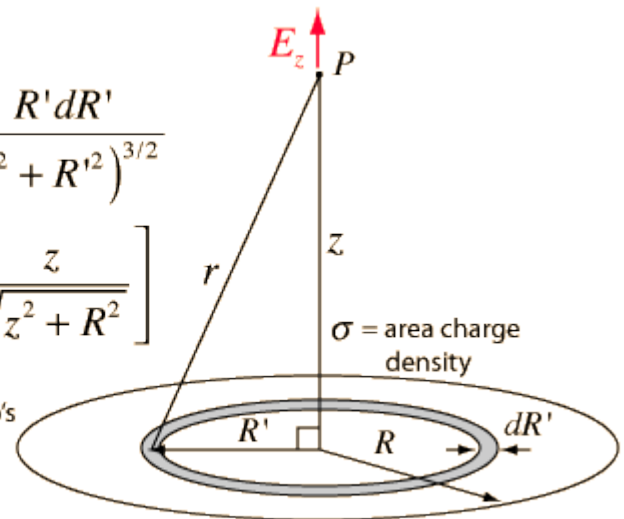
$$E_z = \frac{2k\lambda}{z} = \frac{\lambda}{\epsilon_0 z}$$




$$E_z = k\sigma 2\pi z \int_0^R \frac{R' dR'}{(z^2 + R'^2)^{3/2}}$$

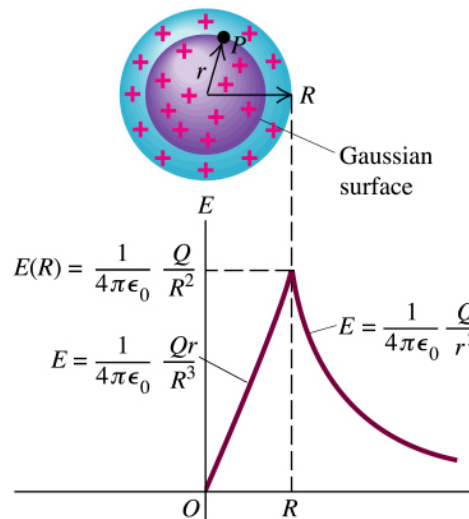
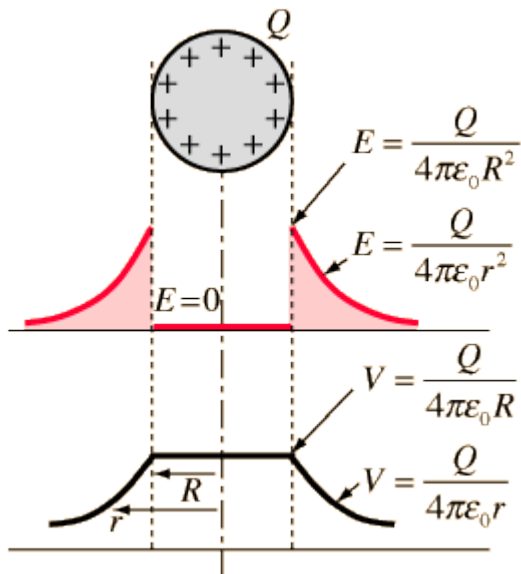
$$E_z = k\sigma 2\pi \left[1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right]$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \text{Coulomb's constant}$$



Pokazy doświadczeń

► Ćwiczenia



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

