

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.

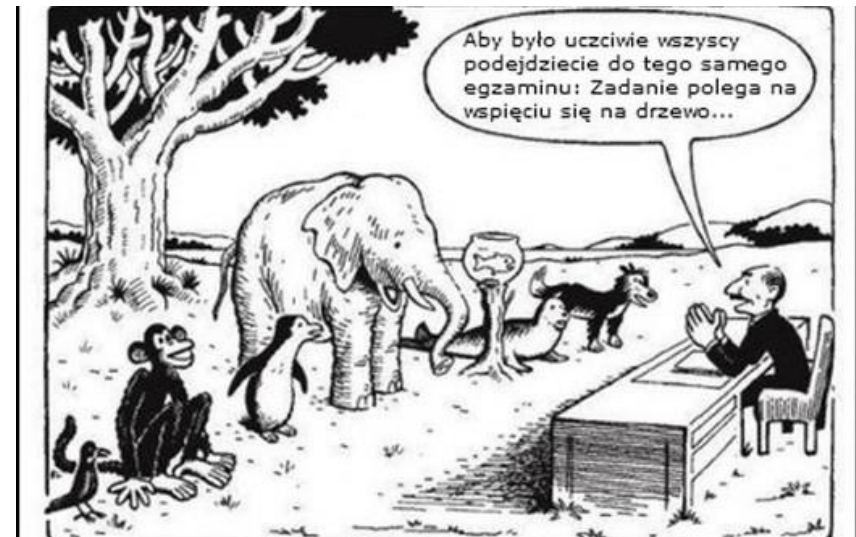
Podstawy fizyki – sezon 2

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Fizyka na GiG ZiIP – rok 2018-19

EGZAMIN

- ▶ Warunkiem dopuszczenia do egzaminu jest **pozytywne zaliczenie 1. i 2. ćwiczeń rachunkowych oraz laboratorium.**
- ▶ W przypadku **negatywnego** zaliczenia egzaminu są dwa terminy **poprawkowe.**
- ▶ Szczegółowy harmonogram egzaminów podany jest 2 tygodnie przed zimową sesją egzaminacyjną.
- ▶ Chętni, których średnia ocena z ćwiczeń rachunkowych **> 4.0** mogą przystąpić do egzaminu w terminie **dodatkowym, tzw „zerowym”**
- ▶ Na ostatnim wykładzie podam wymagania do egzaminu z materiału **I semestru**



Fizyka na GiG ZiLP – rok 2018-19

OCENA KOŃCOWA po II semestrze

- ▶ jeżeli ocena z ćwiczeń 1 , 2, lab ≥ 3.0

i jeżeli ocena z egzaminu ≥ 3.0 to:

ocena końcowa 2 = $0.6 \text{ egzamin} + 0.15 \text{ ĆW1} + 0.15 \text{ ĆW2} + 0.1 \text{ lab}$,

np.
E=4.0,
ĆW1=3.5,
ĆW2=3.0,
lab = 4.0
OK2=3.775 (db)

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

$$\text{OK2} = 0.6 E + 0.15 (\text{ĆW1} + \text{ĆW2}) + 0.1 \text{ Lab}$$

- Przepisywanie ocen?

Fizyka na GiG ZiIP – rok 2018-19

Moduł składa się z **wykładu, ćwiczeń rachunkowych i laboratorium**.

Realizowany jest w dwóch semestrach po 15 tygodni, w wymiarze 30 godz. wykładu i 14 godz. ćwiczeń na semestr.

Na **wykładzie** omawiane są podstawowe **prawa fizyki**, prezentowane są ich **wyprowadzenia, przykłady** zastosowań w zadaniach oraz **pokazy** doświadczalne.

Bardzo istotną częścią wykładu jest **dyskusja** – proszę o zadawanie pytań (na które nie zawsze będę znać odpowiedź).

Podczas wykładu nie ma ocen, zachęcam do **aktywności**.

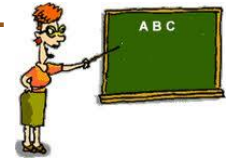
Na **ćwiczeniach** rachunkowych rozwiązywane są **zadania**, które obrazują omawiane na wykładzie prawa.

Rozwiązywanie zadań rachunkowych **jest samodzielną pracą studenta** i podlega bieżącemu **oceniu**.

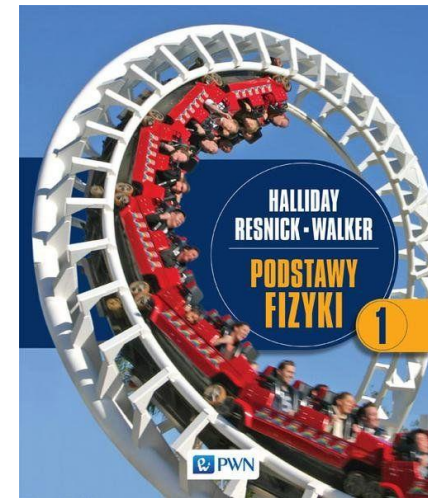
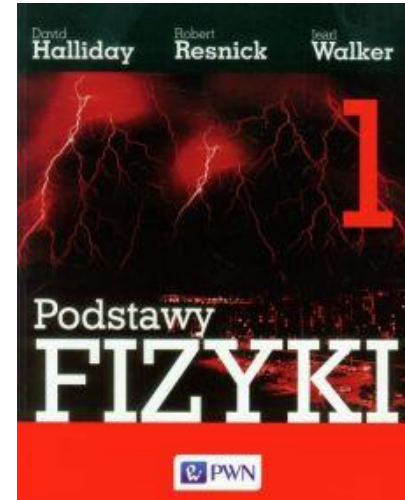
Wykładowca dba o korelację pomiędzy ćwiczeniami a treścią wykładu.

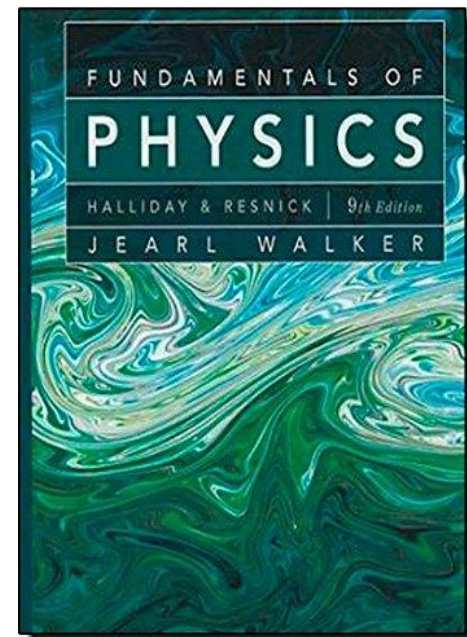
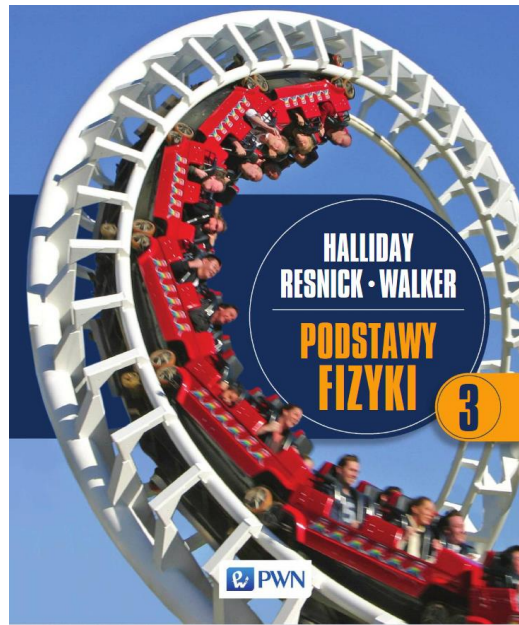
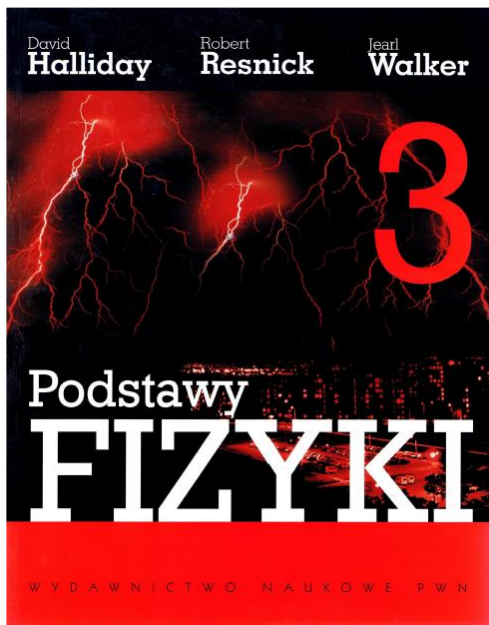
Materiały pomocnicze

- ▶ Treść wykładu jest prezentowana w **formie elektronicznej** lub jedynie tablicowej.
- ▶ Będą **pokazy** doświadczeń.
- ▶ Będą **symulacje komputerowe**.
- ▶ Wynika stąd, że **obecność na wykładzie** jest bardzo ważnym składnikiem procesu nauczania.
- ▶ **Obecność i czynne zrozumienie wykładu są NIEZBĘDNE do rozwiązywania zadań.**
- ▶ Bibliografia:



- **Resnick, Halliday, Walker, „Podstawy fizyki” t 1-5**
- J. Orear, Fizyka, WNT, Warszawa, 1990;
- Z. Kąkol: „Fizyka” – Wykłady z fizyki
- Z. Kąkol, J. Żukrowski: „e-fizyka” – internetowy kurs fizyki,
- Z. Kąkol, J. Żukrowski – symulacje komputerowe ilustrujące wybrane zagadnienia z fizyk:
<http://home.agh.edu.pl/~kakol/>;
<http://open.agh.edu.pl>





Biblioteka AGH

Podstawy fizyki – sezon 2

1. Elektrostatyka 1

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFIiS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 111
amucha@agh.edu.pl
<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

Pierwsze zabawy z ładunkami

- Starożytni Grecy zauważali:
 - potarty bursztyn (grec. elektron) przyciąga kawałki słomy

ELEKTRYCZNOŚĆ

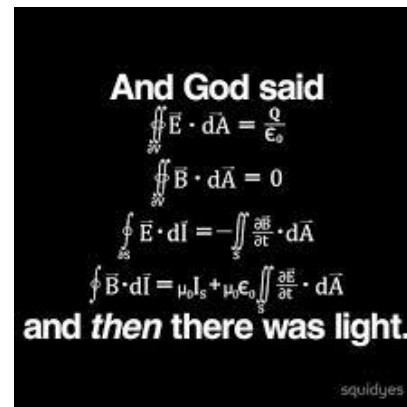
- pewne skały przyciągają i odpychają drobiny żelaza

MAGNETYZM

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

ELEKTOMAGNETYZM

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

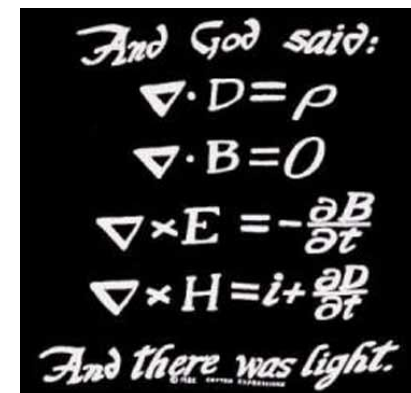


And God said

$$\oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$
$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$
$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

and then there was light.

squidy.es



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).

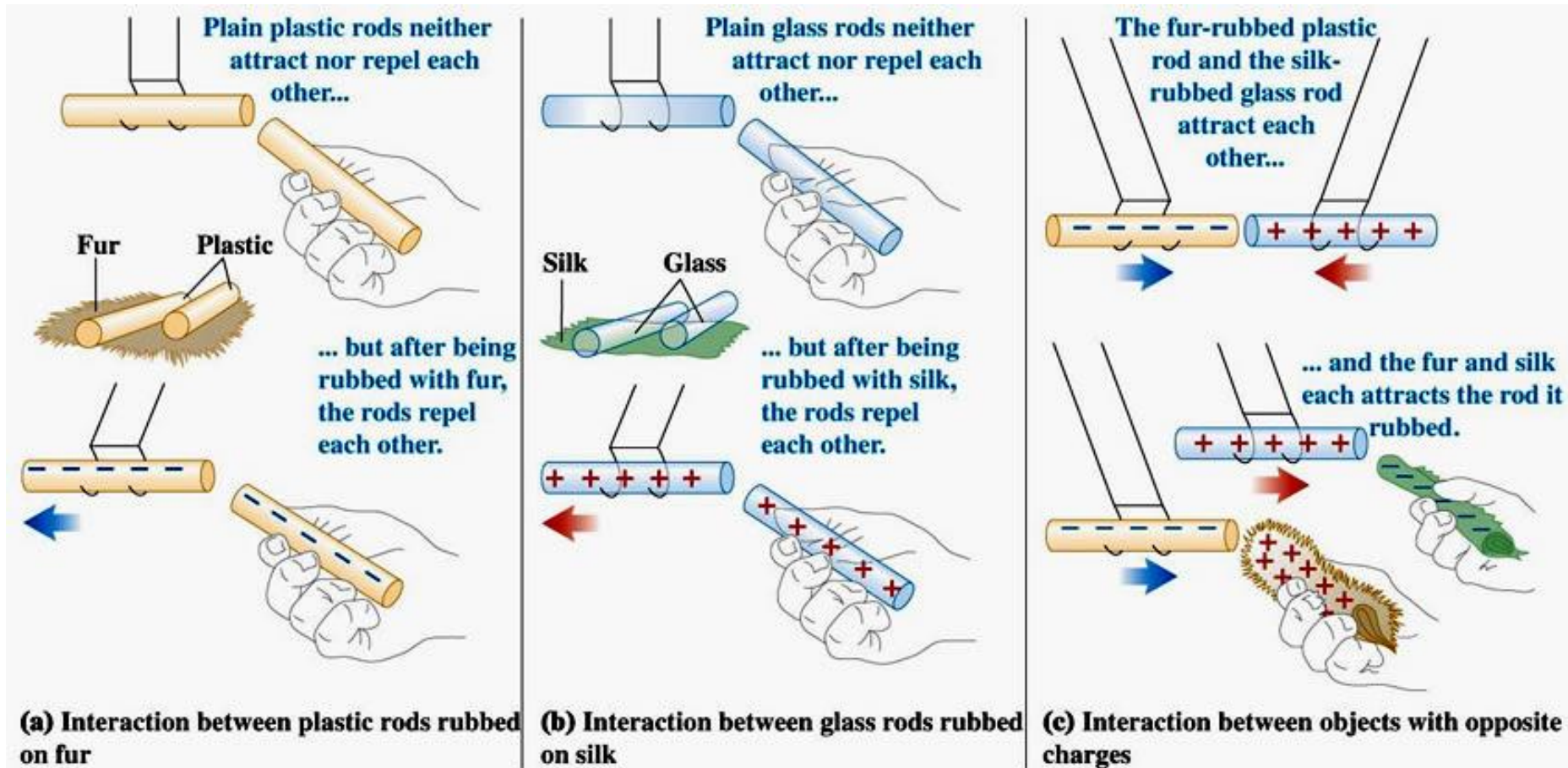


- Ładunek elektryczny jest sumą ładunków elementarnych, z których składa się ciało.
 - Ładunek elektryczny jest skwantowany (dośw. Millikana), tzn, jest wielokrotnością ładunku elementarnego $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomba –
 $Q = n e$
 - Całkowity ładunek elektryczny układu odosobnionego jest zachowany.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



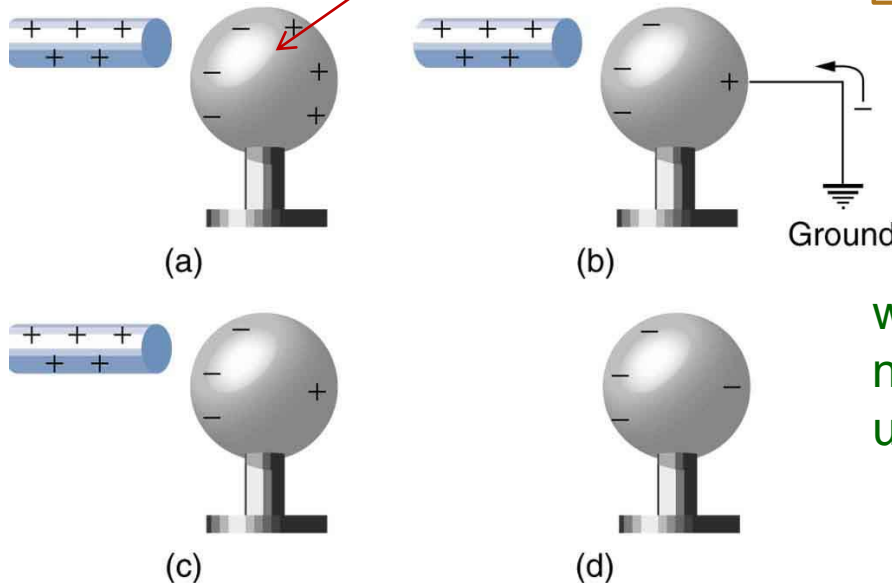
Copyright © 2007 Pearson Education, Inc. publishing as Addison Wesley

Elektryzowanie przewodników

PRZEWODNIKI

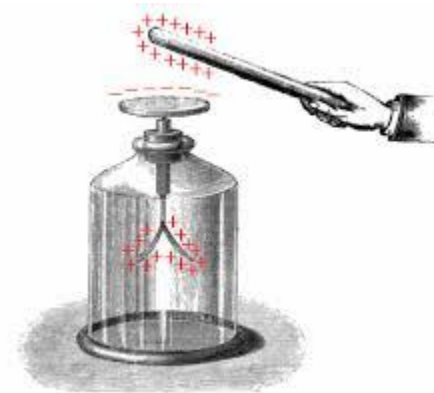
Przewodnik trudno jest naładować przez pocieranie, bo każdy kontakt z ręką powoduje odpływ ładunku. Tylko nadmiar bądź brak elektronów oznacza naładowanie! Dodatnie protony są uwięzione, nie poruszają się!

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



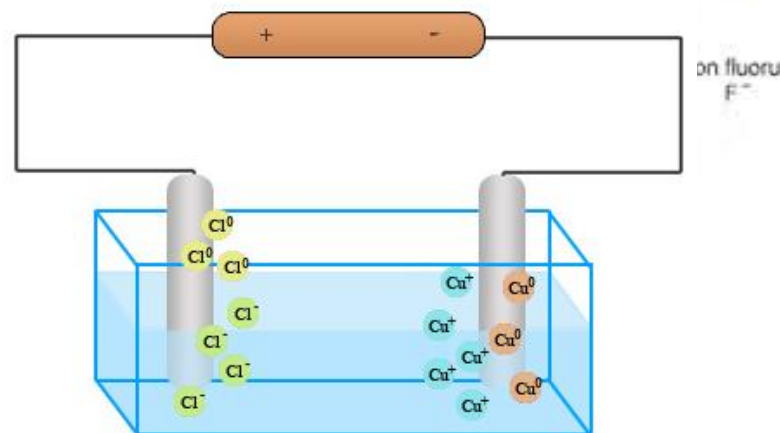
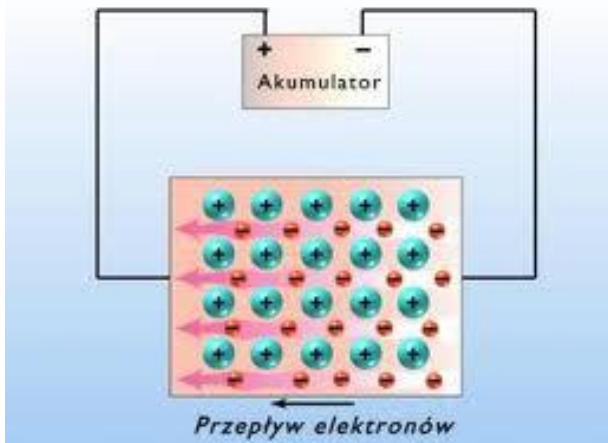
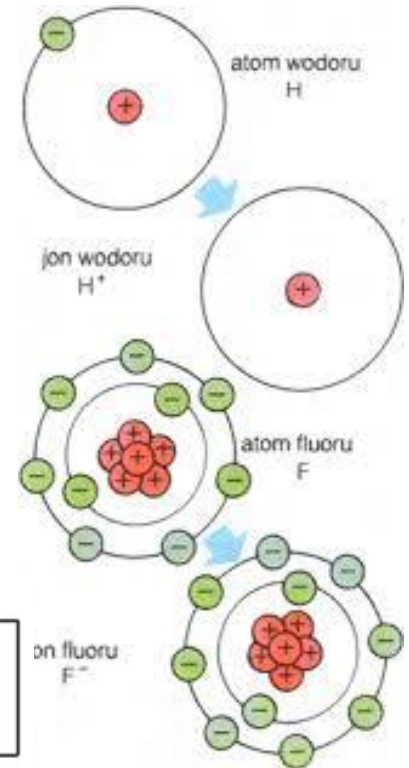
uziemia, dodatnia strona kuli, pobiera elektrony,

w efekcie kula ma nadmiar ładunku ujemnego



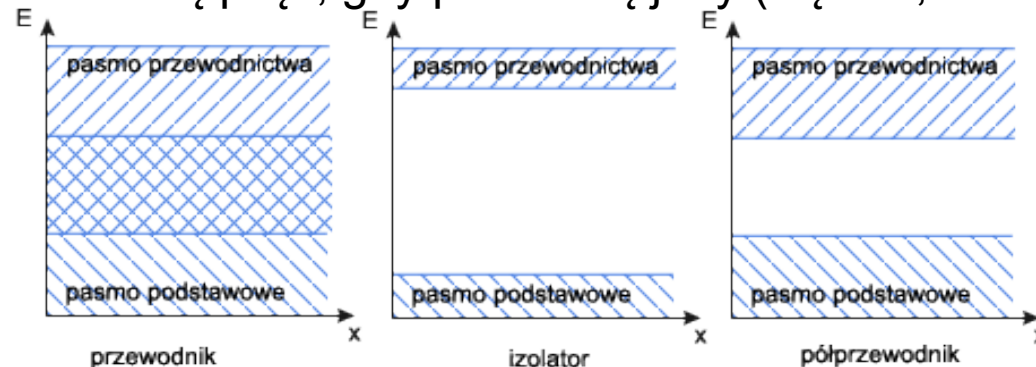
Ładunki?

- **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

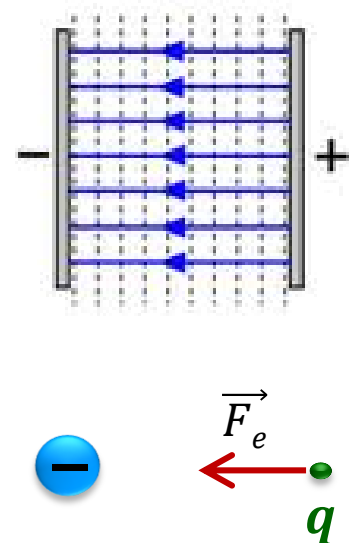
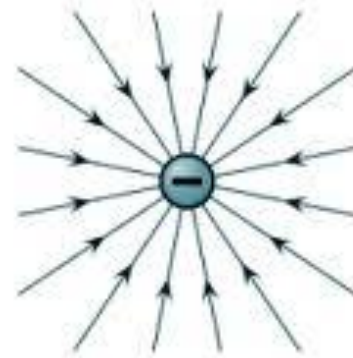
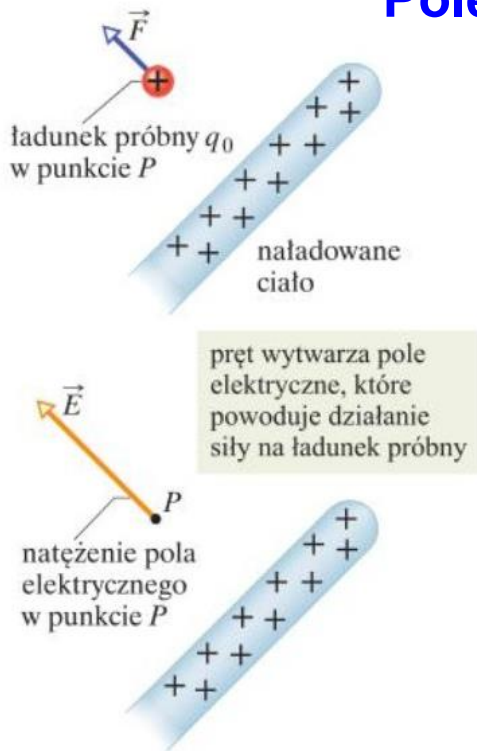
IA												VIII					VIII					VIII
1 H																						2 He
IIA																						VIIIA
3 Li	4 Be																					10 Ne
III																						
11 Na	12 Mg																					
IIIB		IVB	VB	VIB	VIIB	VIII				IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA						
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	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 teoria_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

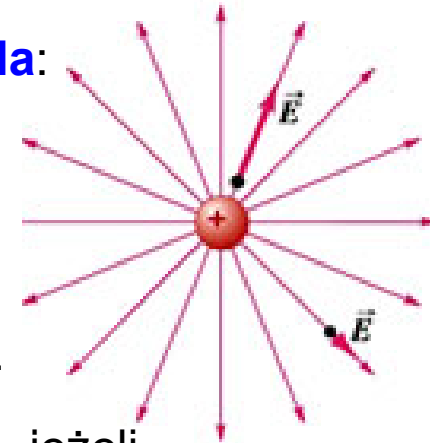


- Jeżeli w polu elektrycznym umieścimy ładunek elektryczny – działa siła elektryczna (ładunek próbny q umownie uważamy za dodatni).

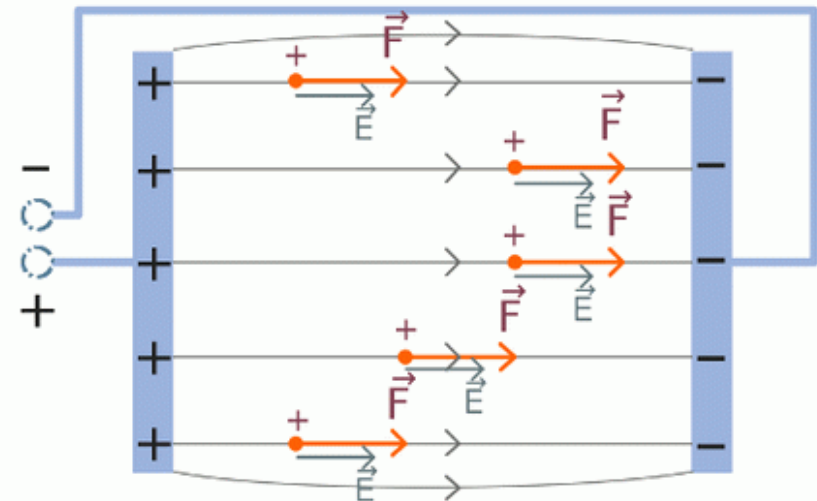
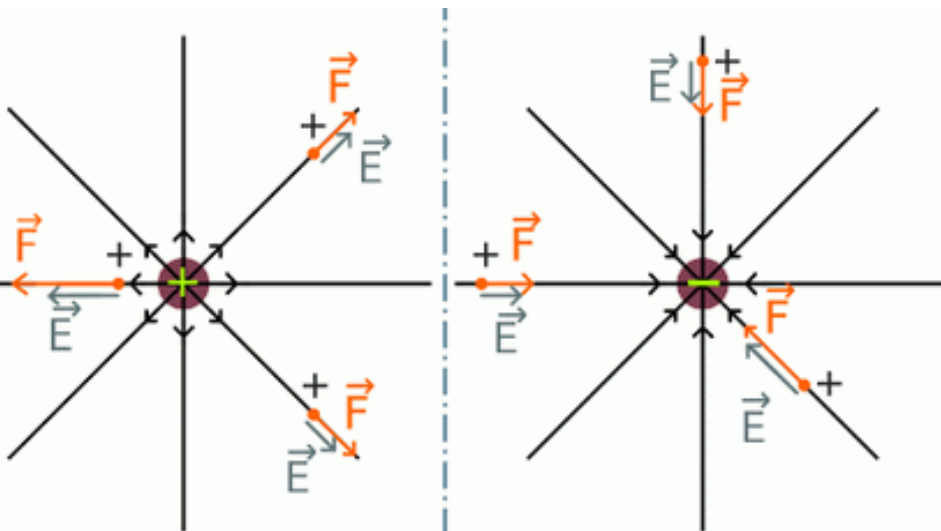
Natężenie pola

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

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

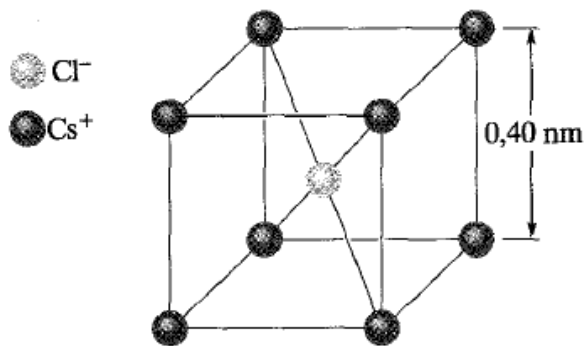
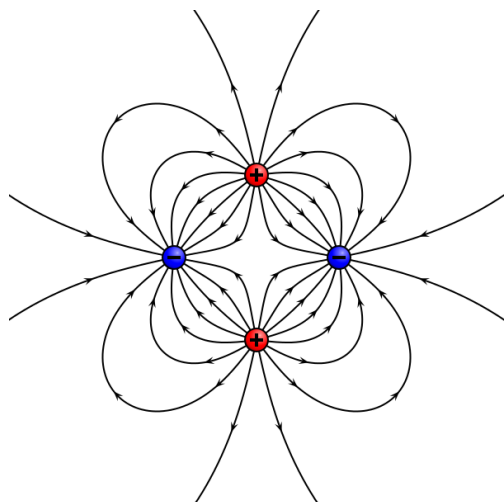
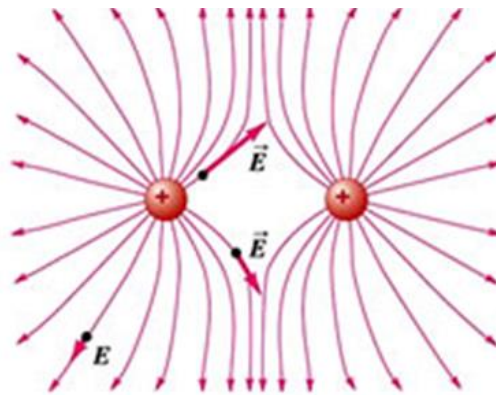
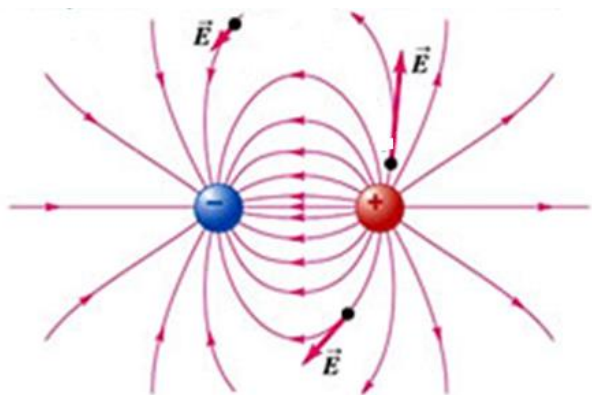


- jest zgodny z liniami pola.
 - pole jest najsilniejsze, tam, gdzie linie są najbardziej gęste.
- Jeśli chcemy opisać pole – należy wyznaczyć wektor natężenia, jeżeli interesuje nas zachowanie ładunku w polu – siłę elektryczną, np.:



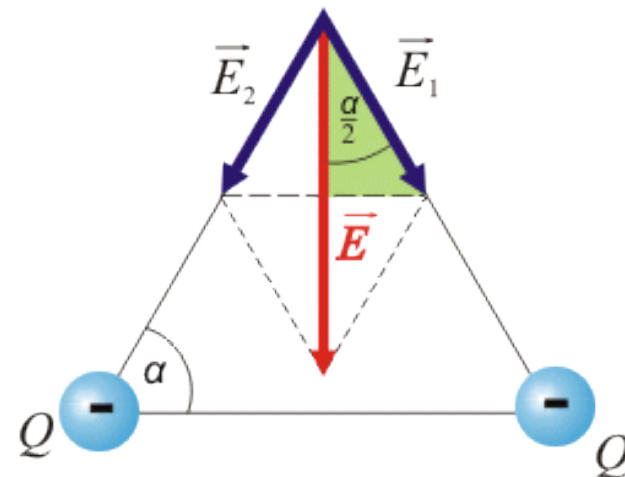
Układy ładunków- linie pola

- Pole wytworzone przez układy ładunków:



zasada superpozycji:

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



<http://physicstasks.eu>
<http://physicstasks.eu>

Natężenie pola

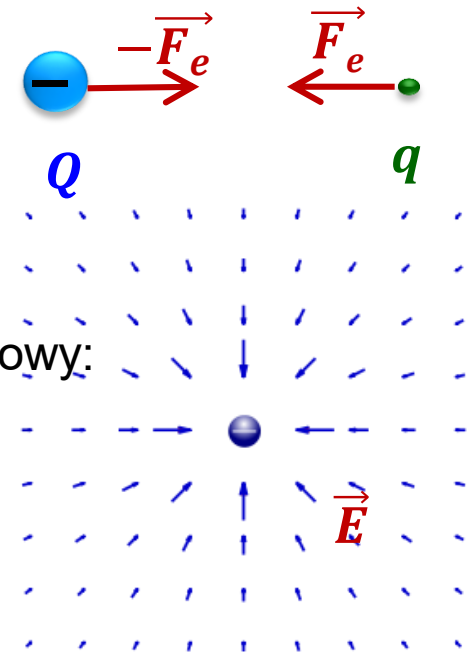
- Pole wytworzone przez ładunek punktowy:

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

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

- natężenie pola wytworzonego przez ładunek punktowy:

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

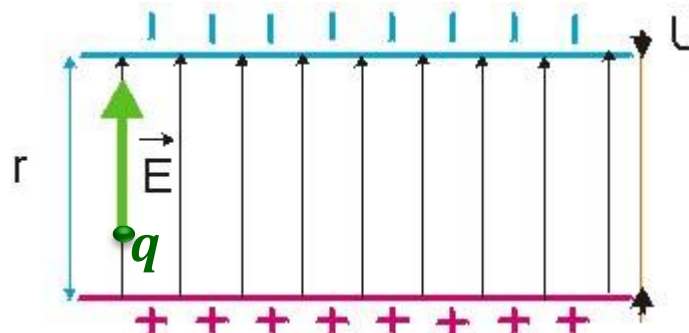


- Jednorodne pole wytworzone przez dwie naładowane płaszczyzny:

- na ładunek próbny działa siła:

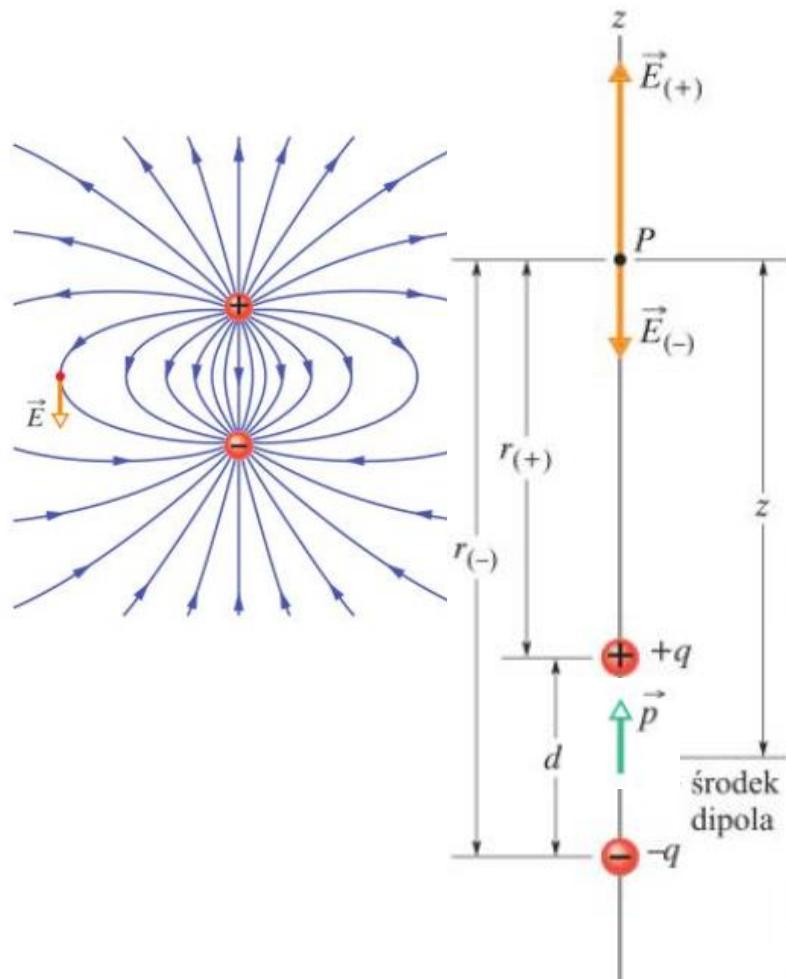
$$\vec{F}_e = q \vec{E}$$

- natężenie pola ?



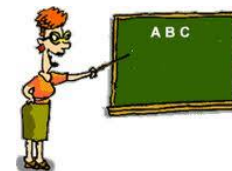
Dipol elektryczny

- Pole elektryczne dipola elektrycznego



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

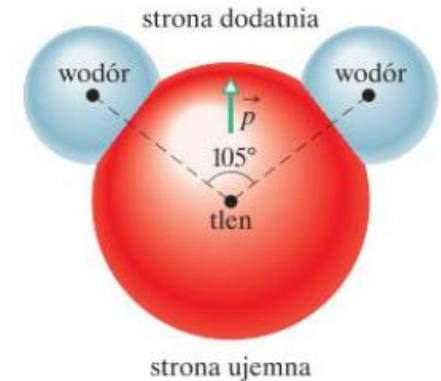
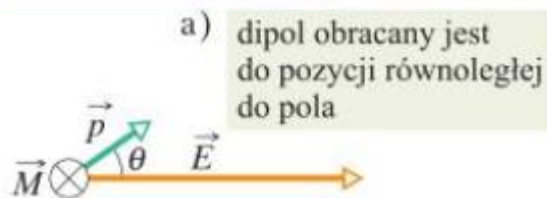
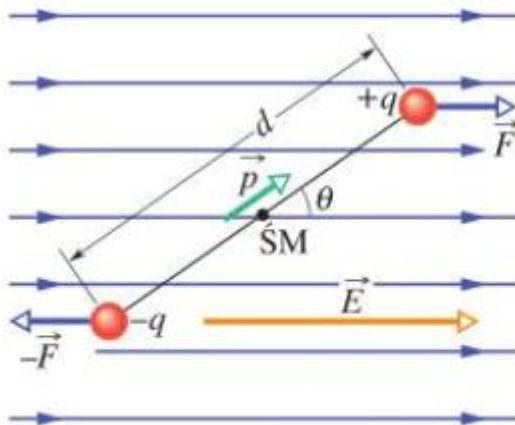
$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}$$



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 ŚM:

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

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

Energia potencjalna dipola:

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

zależy od jego ustawienia:

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

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

Praca siły elektrostatycznej

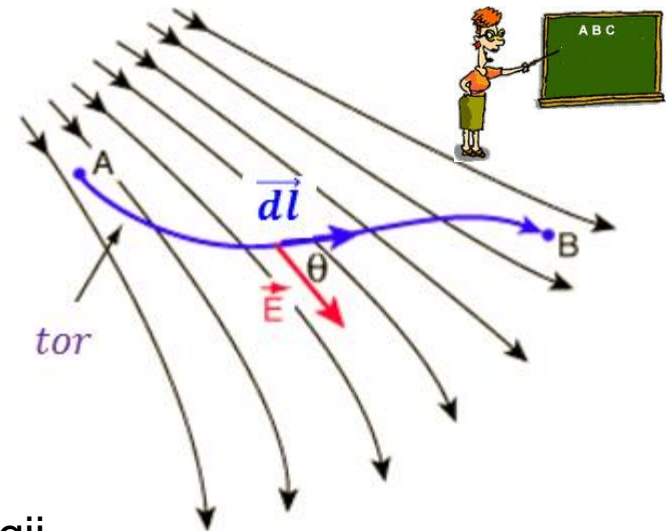
- Praca siły elektrostatycznej przy przesunięciu ładunku q (dodatniego) z punktu A do B w polu o natężeniu \vec{E} :

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

- 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 punktowego

- Energia potencjalna w polu ładunku punktowego:

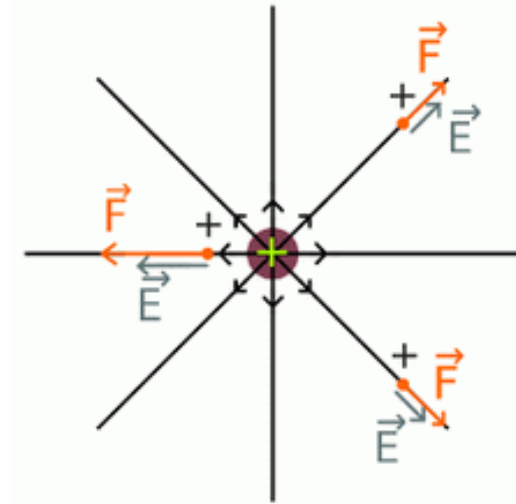
$$E_p = -W_\infty = W(A \rightarrow \infty)$$

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

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

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

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



- Energia potencjalna elektronu w polu protonu:

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

jakieś skojarzenia?

$$E_p = -13.6 \, eV?$$

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.

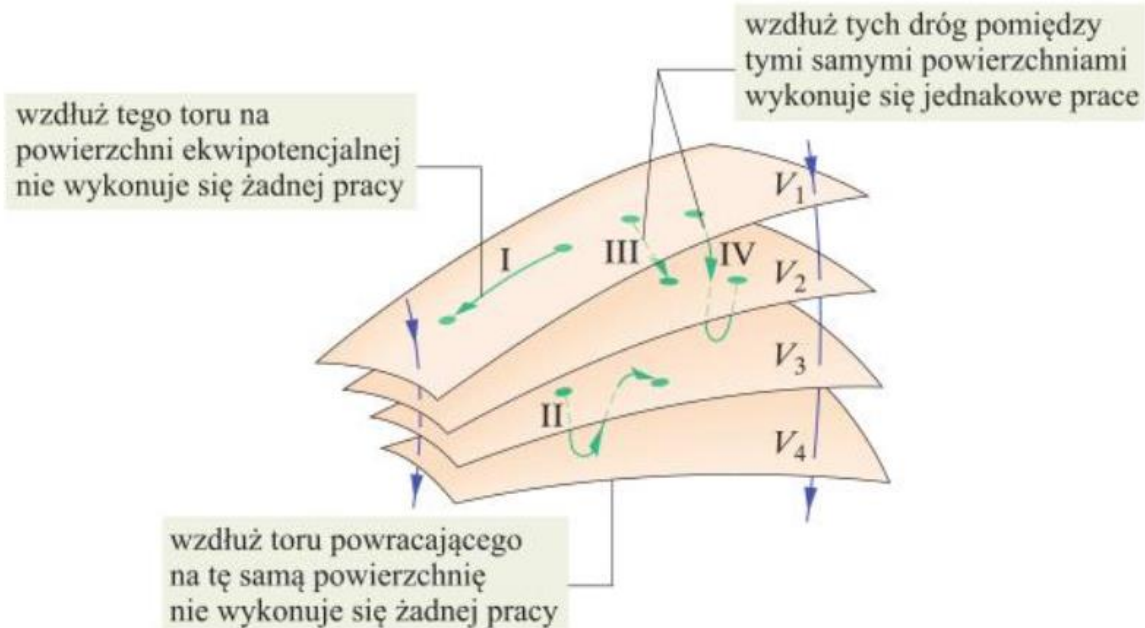
- Jeśli w nieskończoności $E_p \rightarrow 0$, to:

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

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:

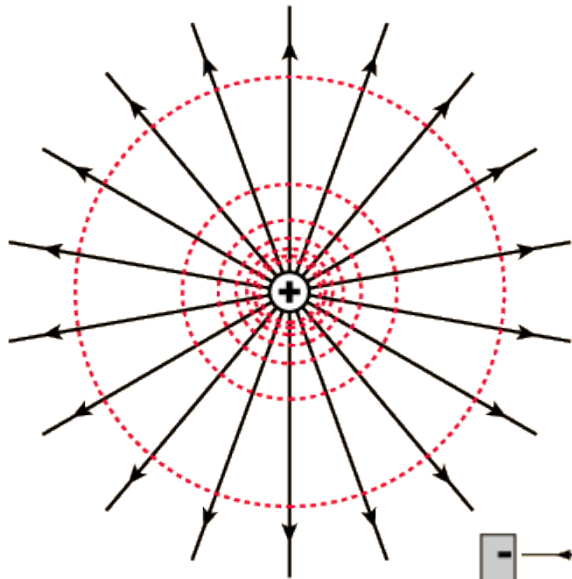


gdy $V_k = V_p$, to $W = 0$

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

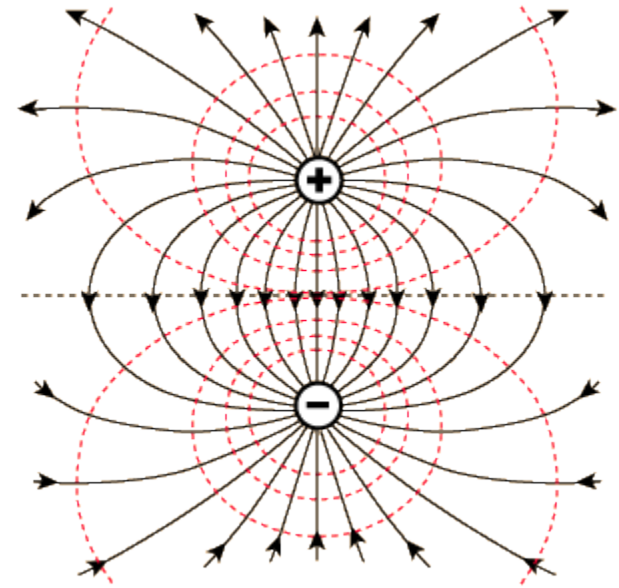
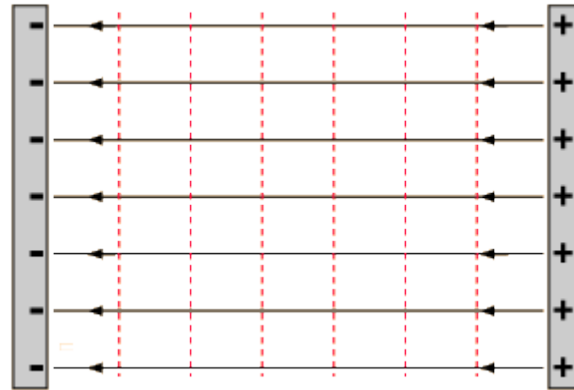
Powierzchnie ekwipotencjalne

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



Ładunek poruszający się po powierzchni ekwipotencjalnej:

- nie wykonuje pracy
- nie zmienia energii



Potencjał a natężenie pola

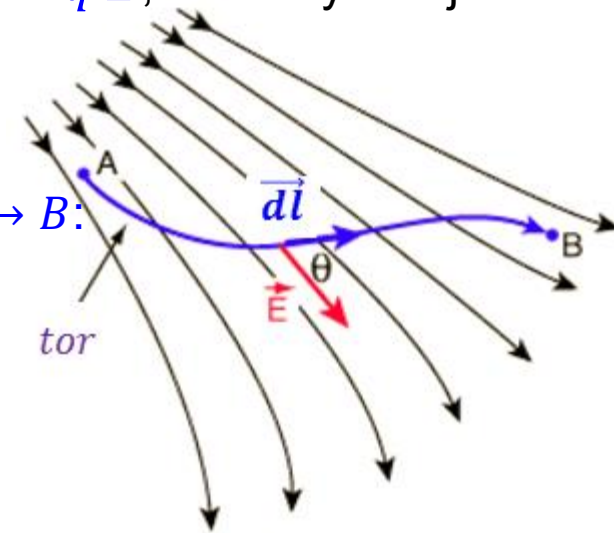
Przypadek ogólny:

- 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:

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

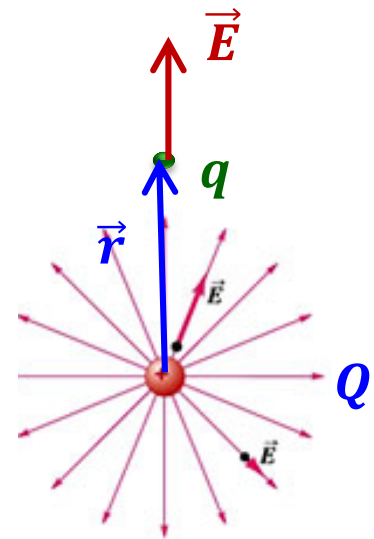
Jeśli przyjmiemy: $V_A = 0$, to:

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

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:
 - przesuujemy ładunek próbny z punktu \vec{r} do nieskończoności (tor nieistotny):

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



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

$$\vec{E} \cdot d\vec{r} = E dr \cos 0 = E dr$$

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

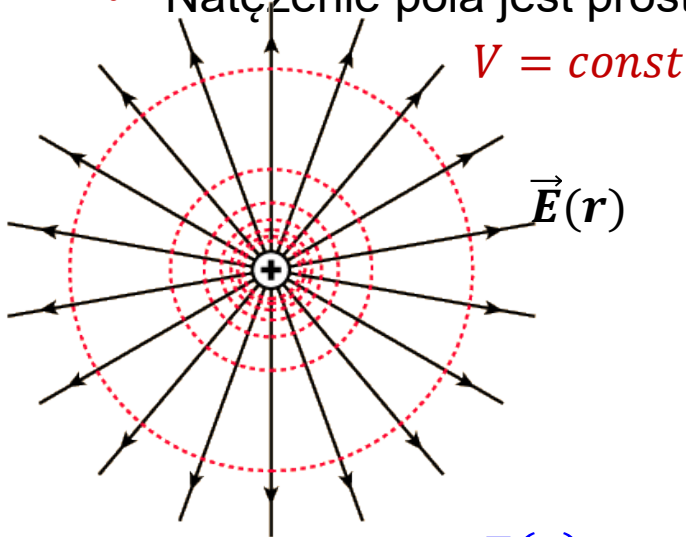
$$V(r) = \int_r^\infty E dr = \int_r^\infty \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr =$$

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

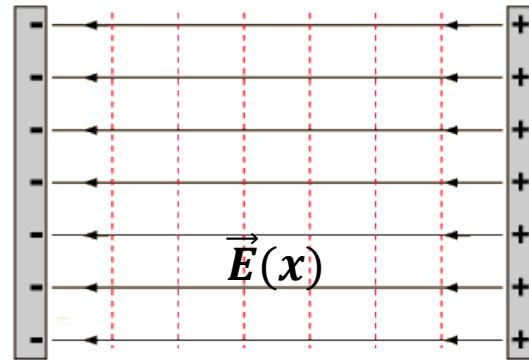
$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

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 powierżchnie 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 ($V = const$) 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

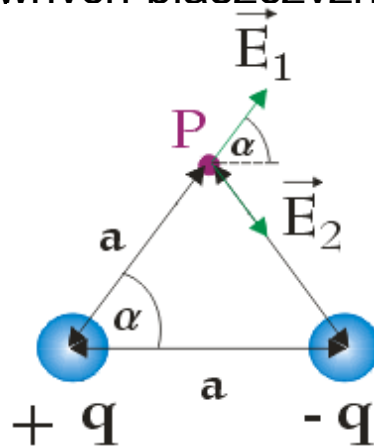
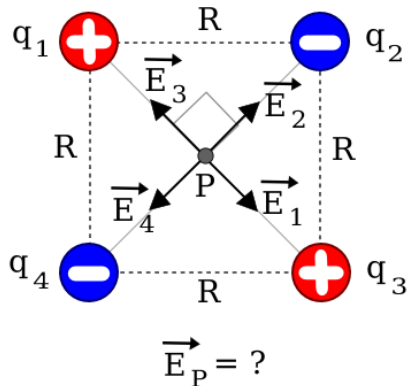
- Ładunki i pole elektrostatyczne
- Natężenie i potencjał pola (charakteryzują pole).
- Siła Coulomba i energia potencjalna w polu (opisują pola na ładunek umieszczony w tym polu)
- Przykłady obliczania natężenia pola i potencjału dla układu ładunków punktowych.



- 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:

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

lub:

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

