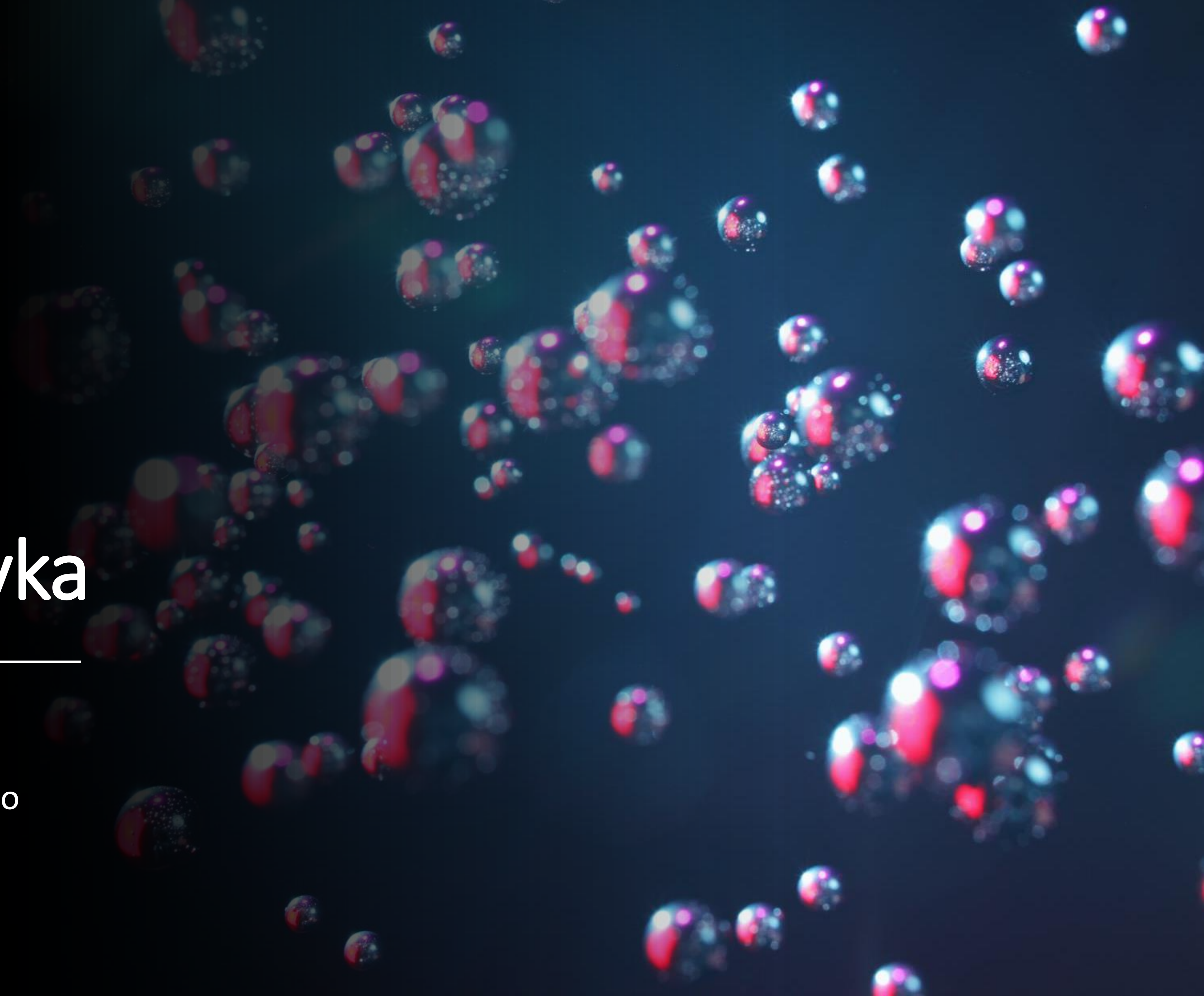
8. Elektrostatyka

8.1. Ładunki elektryczne
8.2. Prawo Coulomba
8.3. Natężenie pola elektrycznego
8.4. Potencjał elektryczny



Zjawiska elektryczne

Zjawiska elektryczne towarzyszyły człowiekowi od samego początku jego istnienia na Ziemi. Wyładowania atmosferyczne napawały grozą, zaś zjawiska bioelektryczne i elektryzacja pewnych materiałów nasuwały przypuszczenia o niewidzialnej sile, która potrafi ożywić to co martwe. Pierwsze doświadczenia (w dzisiejszym słowa tego znaczeniu) z elektryczności przeprowadzane były już w starożytności. Np. Tales z Miletu (600 lat p.n.e.) wspomina o tym, że potarty bursztyn wykazuje właściwości przyciągania drobnych przedmiotów. Ogólnie też znane były przejawy elektryczności atmosferycznej, takie jak pioruny, ale natura ich była nie wyjaśniona aż do drugiej połowy XVII wieku. Wiedziano jednak, że można się ustrzec przed uderzeniem pioruna stosując wysokie, zaostrzone maszty. Podczas prac archeologicznych w Egipcie na ścianach starożytnych świątyń znaleziono napisy wyjaśniające stosowanie masztów jako środka zabezpieczającego przed „niebieskim ogniem".

Dopiero wiek XIX i XX wprzągł szeroko elektryczność w służbę człowieka. Elektryczność znalazła wszechstronne zastosowanie we współczesnym świecie. Energia elektryczna wprawia w ruch silniki przemysłowe, służy do ogrzewania, gotowania, oświetlania, napędza pojazdy mechaniczne. Jest podstawą działania wszystkich środków łączności, radia, telewizji, systemów sterujących i komputerowych.

Zjawiska elektryczne możemy wywołać pocierając o siebie wiele materiałów. Występują w naszych mieszkaniach. Zdjęty sweter przyciąga nasze włosy, a ekran telewizora cząstki kurzu. Łatwo zauważyć, że do tego oddziaływania nie jest konieczny bezpośredni kontakt. Wyniki tych doświadczeń są następujące – „naelektryzowane ciała" działają na siebie z odpowiednimi siłami, zależnymi ogólnie rzecz biorąc od odległości, przyciągają się wzajemnie lub odpychają. Sama przyczyna oddziaływania jest jednak dla obserwatora nieuchwytna. Dla jej objaśnienia wprowadzono wielkość (abstrakcyjną), zwaną ładunkiem elektrycznym. Ładunku elektrycznego nie można zobaczyć – można o jego istnieniu wnioskować jedynie poprzez występowanie zjawisk elektrycznych.

Elektrostatyka jest to nauka o zjawiskach wzajemnego oddziaływania na siebie ładunków elektrycznych będących w stanie spoczynku.

8.1. Ładunki elektryczne

Z prostych doświadczeń wiemy, że

- pałeczka wykonana ze szkła potarta „jedwabiem” przyciąga małe skrawki papieru;
- pałeczka wykonana z ebonitu potarta „futrem” też przyciąga małe skrawki papieru;
- jeżeli zawiesimy na jedwabnych nitkach, dwie pałeczki szklane potarte jedwabiem to te pałeczki się odpychają;
- jeżeli zawiesimy na jedwabnych nitkach, dwie pałeczki z ebonitu potarte futrem to te pałeczki też się odpychają;
- jeżeli zawiesimy na jedwabnych nitkach, dwie pałeczki szklane potarte jedwabiem to te pałeczki się odpychają;
- jeżeli zawiesimy na jedwabnych nitkach, pałeczkę szklaną potartą jedwabiem i pałeczkę z ebonitu potartą futrem to te pałeczki się przyciągają.

Badając w ten sposób właściwości różnych ciał, pocieranych różnymi materiałami, możemy stwierdzić, że ciała elektryzują się tzn. w wyniku procesu pocierania gromadzą one dwa rodzaje ładunku elektrycznego:

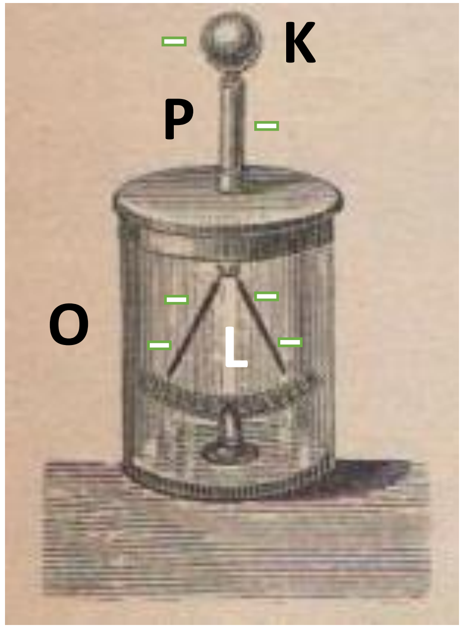
- takiego jak szkło potarte „jedwabiem”,
- takiego jak ebonit potarty „futrem”.

Podstawową własnością ładunku elektrycznego jest to, że mamy do czynienia z dwoma jego rodzajami. Ładunek doznaje odpychania od dowolnego innego z tej samej grupy, natomiast jest przyciągany przez dowolny ładunek z innej grupy.

Powiemy, że jeśli dwa elektrycznie naładowane ciała A i B umieszczone w pewnej odległości od siebie odpychają się oraz jeśli ciało A przyciąga trzecie naelektryzowane ciało C, to z pewnością można stwierdzić, że ciała B i C również się przyciągają.
Które z ładunków są ujemne, a które dodatnie jest rzeczą czysto umowną.
Zgodnie z umową elektrony mają ujemny ładunek.
W świetle tej umowy:

- ładunki gromadzone na szkle potartym jedwabiem nazywamy dodatnimi,
- ładunki gromadzone na ebonicie potartym futrem nazywamy ujemnymi.

Elektroskop. Przewodniki i izolatory



Do badania ładunków elektrycznych służy przyrząd zwany elektroskopem. Elektroskop wskazuje stopień elektryzacji.

Elektroskop składa się z obudowy (O) wewnątrz której umieszczony jest odizolowany od obudowy metalowy pręt (P) zakończony metalową kulką (K). W środku obudowy, do pręta przymocowane są dwa cieniutkie listki (L) lub cienka obrotowa wskazówka, wykonana z blaszki złotej, srebrnej lub aluminiowej. Po dotknięciu ciała naelektryzowanego (np. pałeczki ebonitowej potartej futrem) kulki elektroskopu jego pręt (P) i listki (L) elektryzują się jednoimiennie (-) i wskutek odpychania ładunków jednoimiennych listki się rozchylają tym więcej im większy jest dostarczony do kulki ładunek elektryczny. Wielkość odchylenia stanowi o wielkości nagromadzonego w elektroskopie ładunku. Elektroskop z podziałką nazywa się elektrometrem.

Jeżeli dwa elektroskopy, z których jeden (A) jest naładowany a drugi (B) nie, połączymy prętem metalowym (np. miedzianym) to okaże się, że część ładunku elektrycznego przepłynie z elektroskopu A do B, elektryzując go. Jeżeli połączymy elektroskopy prętem szklanym, ebonitowym czy kauczukowym to ładunek nie przepłynie.

Doświadczenia wykazują, że ciała dzielą się na dwie klasy:

- ciała przekazujące naelektryzowanie (przez które mogą swobodnie przepływać ładunki elektryczne, np. metale lub węgiel) i te ciała nazywamy przewodnikami oraz
- ciała nie przekazujące naelektryzowania (które nie maja tej właściwości, np. szkło lub ebonit) i te ciała nazywamy izolatorami (lub dielektrykami).

Ładunek elektryczny elektronu

- Pierwotnie uważano, że materia korpuskularna zbudowana jest z cząstek, które tworzą niepodzielne już atomy.
- Dzisiaj wiemy, że przestrzeń wewnątrz atomów jest pusta, a tylko w środkach atomów znajdują się jądra atomowe „naładowane” dodatnim ładunkiem elektrycznym i otoczone „chmurą” elektronów, mających ładunek ujemny.
- Ładunek jądra atomowego jak i chmury elektronowej jest różny dla różnych atomów, ale nie zmienia się w sposób ciągły, lecz zawsze jest całkowitą wielokrotnością tzw. elementarnego ładunku elektrycznego e, czyli ładunku pojedynczego elektronu

$$[e] = 1{,}602006 \cdot 10^{-19} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

- Jednostką ładunku elektrycznego w układzie SI jest kulomb [C], określony za pomocą jednostki natężenia prądu elektrycznego – ampera [A], która jest jednostką podstawową w układzie SI.
- **Kulomb jest to ładunek przenoszony przez prąd elektryczny o natężeniu 1 ampera [A] w czasie 1 sekundy [s].**

$$1\ [\mathrm{C}] = 1\ [\mathrm{A}] \cdot 1\ [\mathrm{s}]$$

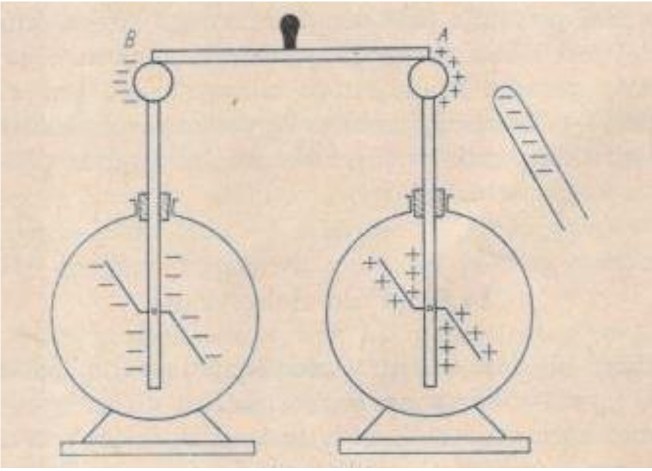
- O wielkościach fizycznych, które tak samo jak ładunek elektryczny występują „skokowo” w postaci określonych „porcji” mówimy, że wykazują naturę kwantową czyli są skwantowane.
- Ładunek elementarny e jest tak mały, że skokowa zmienność ładunku jest trudna do zaobserwowania i dlatego w naszych rozważaniach będziemy przyjmowali, że punktowe ładunki mogą przybierać dowolną wartość *q*.

Prawo zachowania ładunku

Badając proces elektryzacji pałeczki szklanej ładunkiem dodatnim, możemy stwierdzić, że „jedwab” którym pocierana była pałeczka szklana naelektryzował się ujemnie, zaś „futro”, którym pocierano pałeczkę ebonitową naelektryzowało się dodatnio.

- **Elektryzacja przez „pocieranie” polega zatem na rozdzieleniu ładunków dodatnich i ujemnych znajdujących się w atomach, na powierzchniach pocieranych ciał, a nie na ich wytworzeniu.**

Jeżeli do układu dwóch elektroskopów A i B połączonych metalowym prętem zbliżymy (nie dotkniemy) naładowaną (ujemnie) pałeczkę ebonitową „potartą futrem” - naładowaną ujemnie to listki obydwy elektroskopów odchylają się, ale po odsunięciu pałeczki znów opadają. Jeżeli jednak przed osunięciem pałeczki (kiedy listki elektroskopu są odchylone) usuniemy pręt metalowy to wtedy obydwa elektroskopy pozostaną naładowane. Na elektroskopie A (bliższym pałeczki z ładunkiem ujemnym) pozostanie ładunek dodatni, a na elektroskopie B (dalszym) ładunek ujemny. Tak więc dzięki zjawisku indukcji elektrostatycznej (czyli wpływu jednego naładowanego ciała na drugie) możemy naładować wiele ciał (elektroskopów) nie tracąc pierwotnego ładunku zgromadzonego na pałeczce.



- **Elektryzacja ciała przez „indukcji elektrostatycznej ” polega też na rozdzieleniu ładunków dodatnich i ujemnych znajdujących się w danym ciele, a nie na ich wytworzeniu.**

Powyższe doświadczenia wykazały, że suma algebraiczna ładunków elektrycznych w układzie odosobnionym (który nie wymienia tych ładunków z otoczeniem) jest zawsze stała. Jest to zasada zachowania ładunku

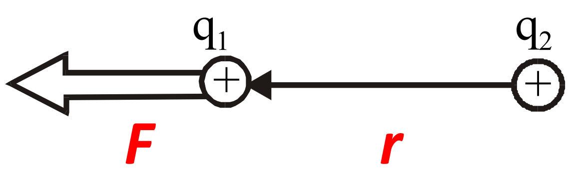
Ładunki elektryczne podlegają dwóm fundamentalnym prawom:

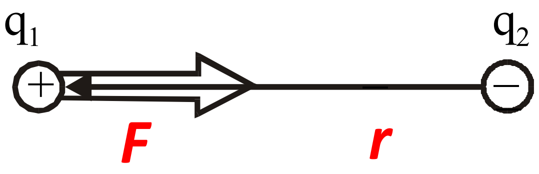
- **prawu zachowania ładunku elektrycznego** - całkowity ładunek elektryczny układu odosobnionego w dowolnej chwili nie może ulegać zmianie;
- **prawu kwantyzacji ładunku elektrycznego** - ładunek elektryczny może przybierać jedynie wartości będące (co do modułu) wielokrotnością ładunku elektronu.

8.2. Prawo Coulomba

Z doświadczeń wynika, że im większy ładunek elektryczny zostanie przeniesiony na kulkę elektroskopu, tym większe jest rozchylenie jego listków. Ładunek elektryczny jest więc wielkością fizyczną, którą można zmierzyć, oczywiście po przyjęciu odpowiedniej jednostki miary ładunku.

W roku 1785 francuski fizyk Coulomb (*czytaj Kulą*) na podstawie doświadczeń z wagą skręceń formułuje prawo dotyczące oddziaływania dwu nieruchomych, punktowych ładunków elektrycznych.





$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Dwa nieruchome punktowe ładunki elektryczne q_1 i q_2 odpychają się lub przyciągają z siłą *F* proporcjonalną do iloczynu tych ładunków, a odwrotnie proporcjonalną do kwadratu ich odległości. Siła *F* jest skierowana wzdłuż linii łączącej te ładunki.

Ośrodek	Względna przenikalność ε_r
Próżnia	1
Powietrze	1,0006
Parafina	2,0
Nafta	2,2
Szkło	5-10
Alkohol	27
Woda	81

W układzie jednostek SI stałą ***k*** można zapisać w postaci:

$$\boldsymbol{k} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} = \frac{8{,}9875\cdot 10^9}{\varepsilon_r} \quad \frac{C^2}{N\cdot m^2}$$ gdzie

$\varepsilon_0 = 0{,}8859\cdot 10^{-11}\,\frac{C^2}{N\cdot m^2}$ jest przenikalnością elektryczną próżni, zaś stała ε_r nosi nazwę względnej przenikalności elektrycznej ośrodka i wyraża się liczbą niemianowaną.

Prawo Coulomba stosuje się tylko do ładunków punktowych, a więc do takich ciał naładowanych, których wymiary są bardzo małe w porównaniu do odległości między nimi lub też do ciał jednorodnych w kształcie kuli.

Przykład 8.1.

W modelu wodoru elektron o masie $\boldsymbol{m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}\ kg}$ i ładunku elektrycznym $\boldsymbol{e = -1,6 \cdot 10^{-19}\ C}$ krąży po torze kołowym o promieniu $\boldsymbol{r = 5,29 \cdot 10^{-11}\ m}$, wokół jadra atomowego (składającego się z jednego protonu) o masie $\boldsymbol{m = 1,67 \cdot 10^{-27}\ kg}$ i ładunku elektrycznym $\boldsymbol{e = +1,6 \cdot 10^{-19}\ C}$. Oblicz siłę przyciągania elektrycznego i grawitacyjnego z jaką jadro działa na elektron oraz porównaj te siły.

Rozwiązanie:

1. Korzystając z prawa Coulomba: $\boldsymbol{F_e = k\frac{q_1 q_2}{r^2}}$

gdzie $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} = \frac{9,0\cdot10^9}{\varepsilon_r}\ \frac{N\cdot m^2}{C^2}$ i podstawiając $\varepsilon_r = 1$(dla próżni) zaś za $q_1 = |e|$ i $q_2 = |e|$

otrzymujemy siłę przyciągania elektrycznego jadra z elektronem $\boldsymbol{F_e = \frac{9,0\cdot10^9(1,6\cdot10^{-19})^2}{(5,29\cdot10^{-11})^2}\left[\frac{N\cdot m^2\cdot C^2}{m^2\cdot C^2}\right] = 8,1 \cdot 10^{-8}\ N.}$

2. Korzystając z prawa powszechnego ciążenia: $\boldsymbol{F_g = k_g\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}}$

gdzie $k_g = 6,7 \cdot 10^{-11}\quad Nm^2/kg^2$ i podstawiając za $\boldsymbol{m_1 = m}$ i $\boldsymbol{m_2 = m_e}$ otrzymujemy siłę przyciągania

grawitacyjnego jadra z elektronem $\boldsymbol{F_g = \frac{6,7\cdot10^{-11}\cdot9,1\cdot10^{-31}\cdot1,67\cdot10^{-27}}{(5,29\cdot10^{-11})^2}\left[\frac{N\cdot m^2\cdot kg^2}{kg^2\cdot m^2}\right] = 3,7 \cdot 10^{-47}\ N.}$

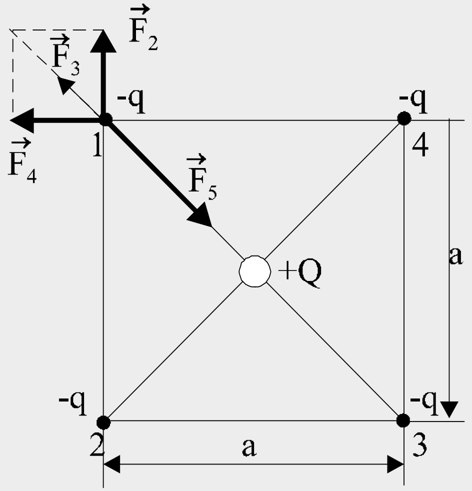
Odpowiedź:

Siła przyciągania elektrycznego $F_e = 8,1 \cdot 10^{-8}\ N$ jadra z elektronem w atomie wodoru jest około $2 \cdot 10^{39}$ razy większa od siły przyciągania grawitacyjnego $F_g = 3,7 \cdot 10^{-47}\ N$.

Przykład 8.2.

W wierzchołkach kwadratu o bokach ***a*** umieszczono jednakowe ładunku ***–q***. Jaki ładunek ***Q*** o znaku przeciwnym trzeba umieścić w środku kwadratu, aby siła wypadkowa działająca na każdy ładunek była równa zeru?

<u>Rozwiązanie:</u>



Rozpatrzmy siły działające na ładunek 1 $(-q)$. Ładunek ten pozostanie w równowadze, jeżeli suma sił nań działających będzie równa zeru.

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \vec{F}_5 = 0$$

Powyższy warunek jest równoważny

$$\left|\vec{F}'\right| + \left|\vec{F}_3\right| = \left|\vec{F}_5\right| \quad \text{gdzie} \qquad \left|\vec{F}'\right| = \sqrt{F_2^2 + F_4^2}$$

Zgodnie z prawem Coulomba

$$F_2 = F_4 = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon a^2}; \qquad F' = \frac{q^2\sqrt{2}}{4\pi\varepsilon a^2} \quad ; \quad F_3 = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon\left(a\sqrt{2}\right)^2} = \frac{q^2}{8\pi\varepsilon a^2} \;\; ; \;\; F_5 = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon\left(\frac{a\sqrt{2}}{2}\right)^2} = \frac{qQ}{2\pi\varepsilon a^2}$$

Po podstawieniu powyższych wyrażeń do równania pierwszego otrzymamy: $\dfrac{q^2\sqrt{2}}{4\pi\varepsilon a^2} + \dfrac{q^2}{8\pi\varepsilon a^2} = \dfrac{qQ}{2\pi\varepsilon a^2}$

i stąd $\quad Q = \frac{q}{4}\left(1 + 2\sqrt{2}\right).$

Taki sam tok rozumowania można zastosować dla każdego ładunku q umieszczonego w pozostałych wierzchołkach kwadratu.

<u>Odpowiedź:</u> W środku kwadratu należy umieścić ładunek $Q = \frac{q}{4}\left(1 + 2\sqrt{2}\right).$

8.3. Natężenie pola elektrycznego

Przestrzeń otaczająca ładunki elektryczne posiada taką właściwość, że na umieszczone w dowolnym jej punkcie inne ładunki działa siła. Mówimy, że wokół ładunków elektrycznych istnieje pole elektryczne.
Istnienie pola elektrycznego można wykryć wprowadzając do przestrzeni w której ono działa ładunek próbny q_0.
W polu elektrycznym na ładunek próbny działa siła $\vec{F}$. Umożliwia to wprowadzenie pojęcia natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$.

Natężenie pola elektrycznego $\vec{E}$ to wektor o kierunku i wartości siły $\vec{F}$, działającej na dodatni ładunek próbny, podzielonej przez wartości q_0 tego ładunku.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

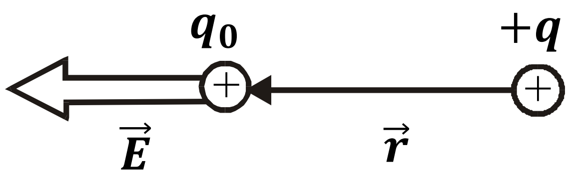
Jednostką natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ w układzie SI, wynikającą ze wzoru $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$ jest $\left[\frac{N}{C}\right]$, jednakże w praktyce przyjęło się używać jednostki równoważnej $\left[\frac{V}{m}\right]$.

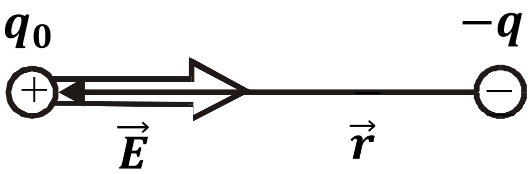
$$\frac{N}{C} = \frac{J/m}{A \cdot s} = \frac{V \cdot A \cdot s}{m \cdot A \cdot s} = \frac{V}{m}$$

Obliczenie natężenia pola elektrycznego w dowolnym punkcie przestrzeni jest możliwe zawsze, jeżeli znamy rozkład ładunków wytwarzających to pole.

Znając prawo Coulomba i definicję pola elektrycznego $\vec{E}$ możemy wyznaczyć natężenie pola elektrycznego wytworzonego przez ładunek punktowy q.

$$E = \frac{E}{q_o} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q \cdot q_o}{r^2 \cdot q_o} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r^2}$$

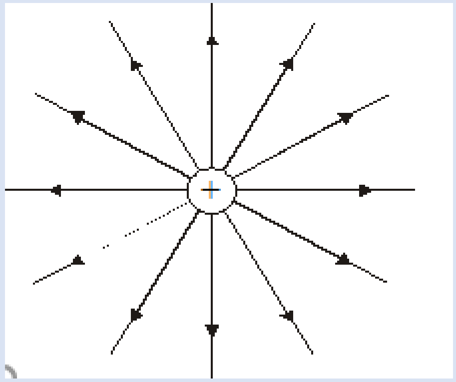




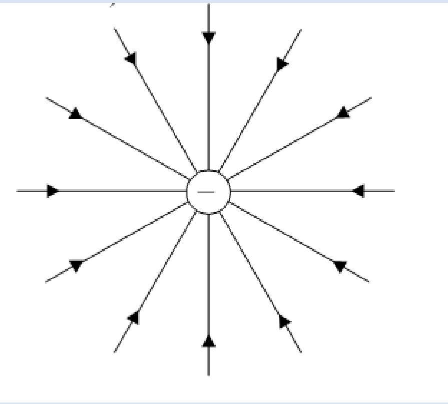
Pole elektryczne jest polem wektorowym, gdyż w każdym punkcie przestrzeni wektor $\vec{E}$ może mieć inną wartość, inny kierunek i inny zwrot.

Wygodna formą ilustracji pola elektrycznego są linie sił pola elektrycznego, czyli tory po których poruszałyby się w tym polu niewielkie ładunki dodatnie q_0 (zwane ładunkami próbnymi). Zwrot, który przypisuje się linii sił, odpowiada kierunkowi ruchu próbnego ładunku dodatniego q_0.

W przypadku, gdy pole elektryczne wytwarzane jest przez punktowy ładunek dodatni $+q$, linie sił rozchodzą się promieniście od ładunku wytwarzającego.



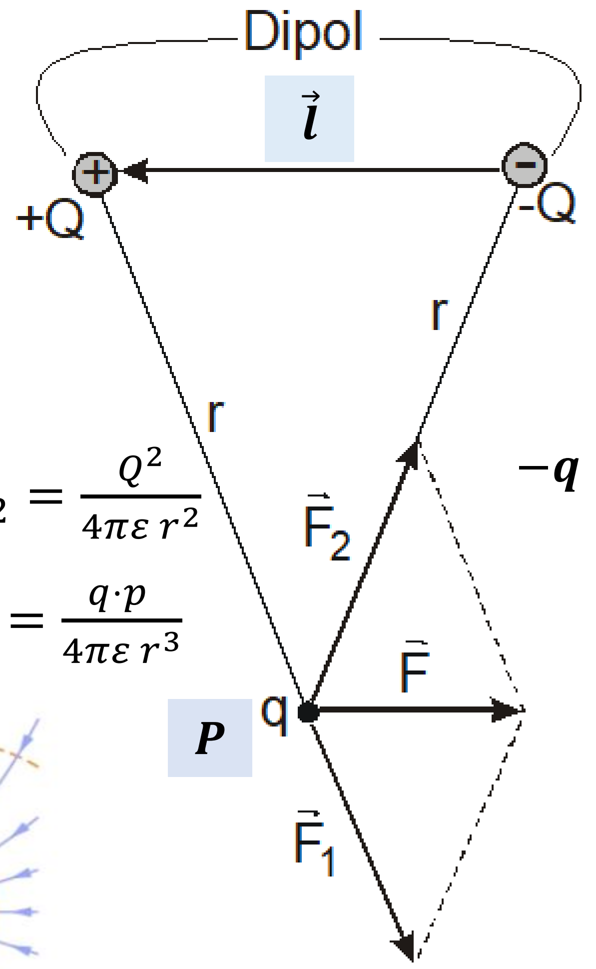
W przypadku, gdy pole elektryczne wytwarzane jest przez punktowy ładunek ujemny $-q$, linie sił skierowane są promieniście do ładunku wytwarzającego.



Jeżeli pole elektryczne jest wytwarzane przez pewną liczbę ładunków punktowych $\{q_1, q_2, \ldots, q_j \ldots, q_N\}$ to wówczas jego natężenie $\vec{E}$ w określonym punkcie przestrzeni jest sumą geometryczną natężeń $\{\vec{E}_1,\ \vec{E}_2, \ldots, \vec{E}_j \ldots, \vec{E}_N\}$ które w tym punkcie wytwarza każdy z ładunków z osobna.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 +, \quad \ldots, \vec{E}_j \quad \ldots + \vec{E}_N$$

Obliczmy natężenie pola elektrycznego $\vec{E}$, wytwarzanego przez dipol elektryczny.



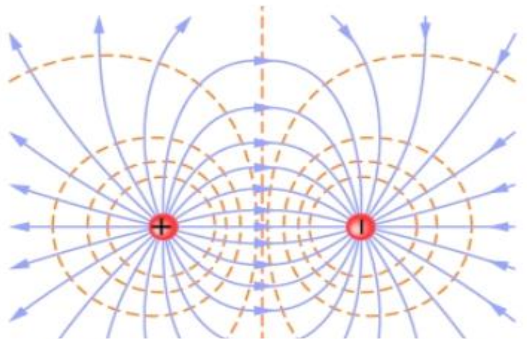
Dipolem elektrycznym nazywamy układ ładunków $+Q$ i $-Q$ położonych w odległości $\vec{l}$ od siebie.
Dipol elektryczny scharakteryzowany jest momentem dipolowym $\vec{p} = Q\vec{l}$
Moment dipolowy jest wektorem $\vec{p}$ skierowanym od ładunku ujemnego $-Q$ do ładunku $+Q$.
Rozpatrzymy pole elektryczne w punkcie P dla przypadku, kiedy punkt P leży w jednakowej odległości od ładunków $+Q$ i $-Q$. Zgodnie z prawem Coulomba

na ładunek q umieszczony w punkcie P działają siły $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ o jednakowych wartościach: $F_1 = F_2 = \dfrac{Q^2}{4\pi\varepsilon\, r^2}$

Ze względu na podobieństwo trójkątów możemy zapisać: $\dfrac{l}{r} = \dfrac{F}{F_1}$ i stąd : $F = F_1\dfrac{l}{r} = \dfrac{qQ}{4\pi\varepsilon\, r^2}\dfrac{l}{r} = \dfrac{q\cdot p}{4\pi\varepsilon\, r^3}$

Siła $F = \dfrac{q\cdot p}{4\pi\varepsilon\, r^3}$ działająca ze strony dipola o momencie dipolowym $p = Ql$ na ładunek q jest odwrotnie proporcjonalna do sześcianu odległości r między punktem P a ładunkami $+Q$ i $-Q$.

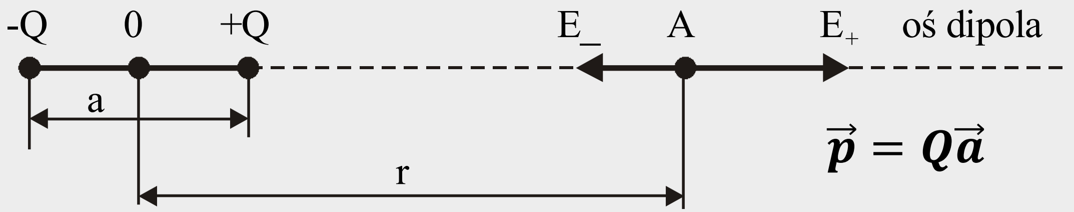
Z definicji natężenie pola elektrycznego $E = \dfrac{F}{q}$ wynika, że natężenie pola elektrycznego pochodzące od dipola o momencie dipolowym p wynosi $E = \dfrac{p}{4\pi\varepsilon\, r^3}$



Linie sił pola elektrycznego dipola elektrycznego

$$E = \frac{p}{4\pi\varepsilon\, r^3}$$

Przykład 8.3. Obliczyć natężenie pola elektrycznego w otoczeniu dipola elektrycznego, tj. układu dwóch różnoimiennych, jednakowych co do wartości ładunków elektrycznych $+\boldsymbol{Q}$ i $-\boldsymbol{Q}$, rozsuniętych na odległość $\boldsymbol{a}$, biorąc pod uwagę tylko punkty leżące na osi dipola (patrz rysunek).



Rozwiązanie:

Weźmy pod uwagę punkt $\boldsymbol{A}$ leżący na osi dipola w odległości $\boldsymbol{r}$ od jego środka $\boldsymbol{O}$. Natężenie $\vec{E}_A$ pola w punkcie $\boldsymbol{A}$ jest wypadkową natężeń pól wytwarzanych w punkcie $\boldsymbol{A}$ przez ładunek $+\boldsymbol{Q}$ i $-\boldsymbol{Q}$. Oba natężenia $\vec{E}_+$ i $\vec{E}_-$ są skierowane wzdłuż tej samej prostej, lecz mają zwroty przeciwne, a zatem ich suma geometryczna sprowadza się do różnicy arytmetycznej:

$$\vec{E}_A = \vec{E}_+ + \vec{E}_- \quad \text{gdzie} \quad E_+ = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q}{(r-a/2)^2} \quad , E_- = -\frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q}{(r+a/2)^2}$$

$$E_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q}{(r-a/2)^2} - \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q}{(r+a/2)^2}\ , \qquad E_A = \frac{Q}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{(r+a/2)^2-(r-a/2)^2}{(r+a/2)^2(r-a/2)^2}, \qquad E_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{2Qra}{\left(r^2-a^2/4\right)^2}$$

$\boldsymbol{E_A}$ określa natężenie pola elektrycznego $\vec{E}$ w punktach leżących na osi dipola.

Dla punktów leżących daleko od ładunków $+\boldsymbol{Q}$ i $-\boldsymbol{Q}$ dipola (tzn. gdy $\boldsymbol{r} \gg \boldsymbol{a}$) otrzymujemy wzór przybliżony

$$E \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{2Qa}{r^3}.$$

Iloczyn ładunku $\boldsymbol{Q}$ dipola i odległości $\boldsymbol{a}$ nazywamy momentem dipola. Moment dipolowy traktujemy jako wektor o kierunku od ładunku ujemnego do ładunku dodatniego dipola i oznaczamy symbolem $\vec{p}$, ($\vec{p} = Q\vec{a}$).

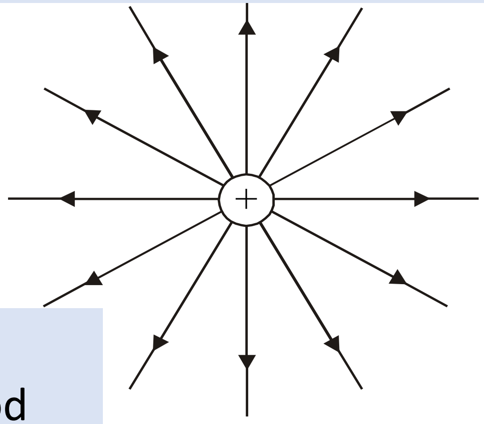
Odpowiedź:

Natężenie pola elektrycznego w punktach leżących na osi dipola o momencie dipolowym $\vec{p} = Q\vec{a}$ w odległości $\boldsymbol{r}$ znacznie większej od $\boldsymbol{a}$ wynosi

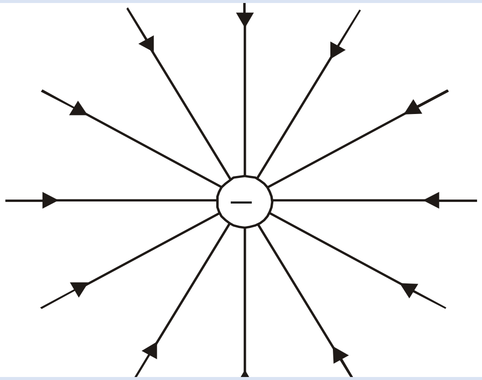
$$E \cong \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{2p}{r^3}$$

Na rysunkach pokazano „przekroje poprzeczne” przebiegu linii sił różnych rozkładów pól elektrycznych.
Linie pola zaczynają się zawsze na ładunkach dodatnich, a kończą na ładunkach ujemnych.
W niektórych przypadkach linie pola biegną do nieskończoności; uważamy wtedy, że odpowiednie ładunki, na których te linie się kończą, znajdują się nieskończenie daleko.

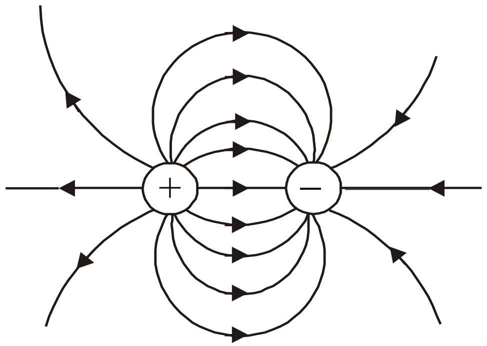
Linie sił pola elektrycznego od punktowego ładunku dodatniego $+q$



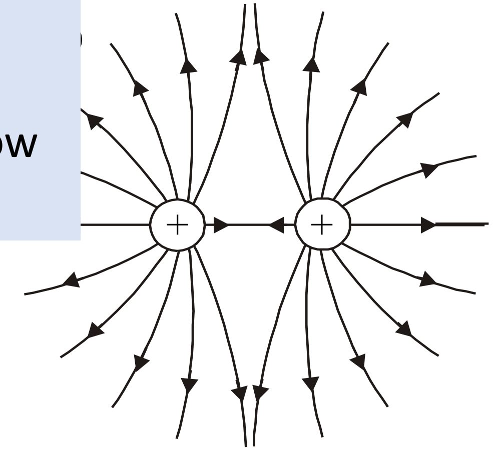
Linie sił pola elektrycznego od punktowego ładunku ujemnego $-q$



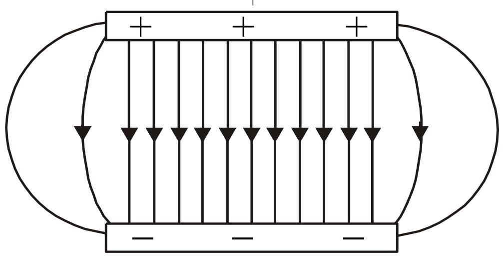
Linie sił pola elektrycznego od układu dwóch punktowych ładunków $+q$ i $-q$ (dipola)



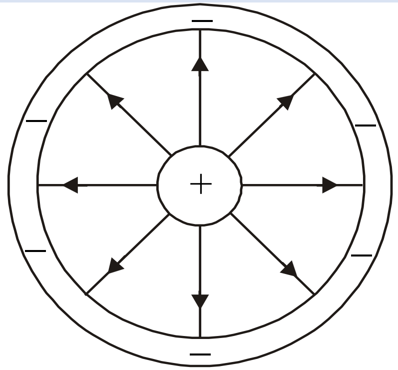
Linie sił pola elektrycznego od układu dwóch punktowych dodatnich ładunków $+q$ i $+q$



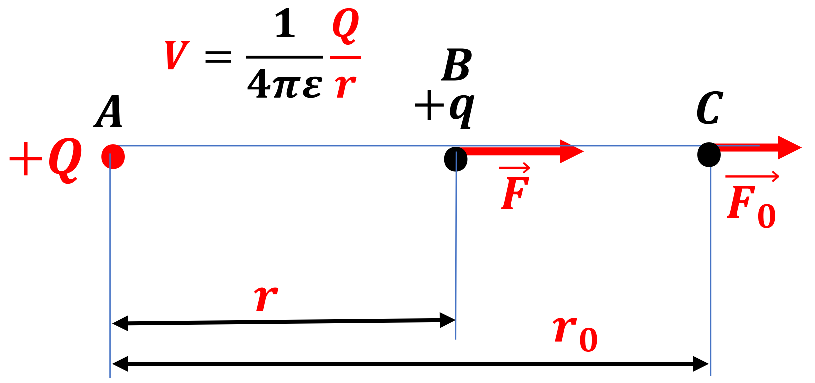
Linie sił pola elektrycznego w kondensatorze płaskim



Linie sił pola elektrycznego w kondensatorze cylindrycznym



8.4. Potencjał elektryczny



W punkcie A znajduje się ładunek elektryczny $+Q$ wytwarzajacy pole elektryczne, a bardzo mały (niezakłócający pola elektrycznego) dodatni ładunek próbny $+q$ jest przesuwany (wzdłuż linii sił pola elektrycznego) z punktu C, gdzie działa na niego siła elektrostatyczna $\vec{F_0}$, do punktu B (położonego bliżej A), gdzie działa siła $\vec{F}$.

Z prawa Coulomba wiemy, że $F_o = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon\, r_0^2}$, a $F = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon\, r^2}$.

Przeniesienie ładunku $+q$ z punktu C do B wymaga wykonania pracy W przeciwko kulombowskiej sile odpychającej $\vec{F}$ której wartość zmienia się na drodze CB. (Wartość siły F rośnie proporcjonalnie do $\frac{1}{r^2}$ przy maleniu r).

Obliczenie tej pracy W wymaga znajomości matematyki wyższej, ale można wykazać, że średnia wartość $F_{śr}$ takiej siły na odcinku CB jest równa średniej geometrycznej sił $F_o = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon\, r_0^2}$ i $F = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon\, r^2}$ działających odpowiednio w punktach B i C.

$$F_{śr} = \sqrt{F_o \cdot F} = \sqrt{\frac{(Q \cdot q)^2}{(4\pi\varepsilon)^2 \cdot {r_0}^2 \cdot r^2}} = \frac{Q \cdot q}{4\pi\varepsilon \cdot r \cdot r_0}$$

Przyjmuje się, że praca jest dodatnia, gdy $+q$ jest przesuwany przez siły elektryczne, lub ujemna gdy jest przesuwany pokonując te siły. W naszym przypadku pracy W przesunięcia ładunku $+q$ na drodze CB przeciwko sile $\vec{F}$ jest ujemna i wynosi:

$$W = -F_{śr}(r_0 - r) = -\frac{Q \cdot q}{4\pi\varepsilon \cdot r \cdot r_0}(r_0 - r) = -\frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot Q \cdot q\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right)$$

Przesuwając $+q$ z punktu C położonego w nieskończoności ($r_0 = \infty$, $\frac{1}{r_0} = 0$) do punktu B oddalonego o r od $+Q$ wykonamy pracę $W_{\infty B} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} q \cdot Q \frac{1}{r}$.

Potencjał V pola elektrycznego w punkcie B odległym o r od ładunku $+Q$ wytwarzającego pole elektryczne jest to stosunek pracy $W_{\infty B}$ wykonanej przeciwko siłom elektrycznym do wielkości przesuwanego ładunku q.

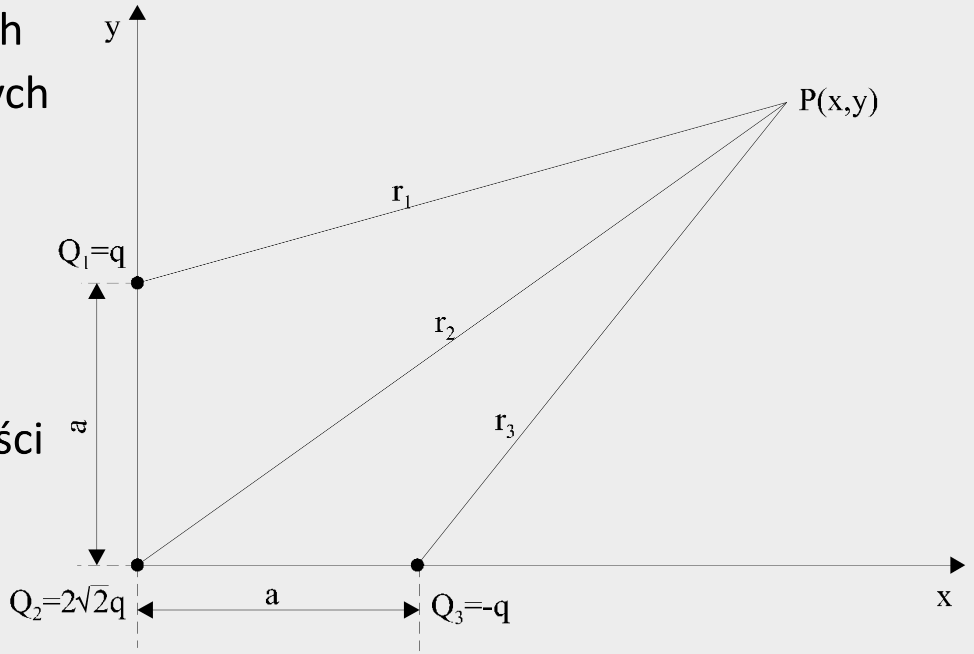
$$\boldsymbol{V = \frac{W_{\infty B}}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q}{r}}$$

Potencjał V jest wielkością skalarną charakteryzującą dany punkt pola elektrycznego i wyraża wartość pracy wykonanej przeciwko siłom pola przy przeniesieniu dodatniego ładunku jednostkowego z nieskończoności do tego punktu.

Jednostką potencjału w układzie SI jest wolt $[V]$. Zgodnie z wzorem definicyjnym potencjału, $V = \frac{W_{\infty B}}{q}$, potencjał jest ilorazem jednostki energii $[J]$ i jednostki ładunku $[C]$.

$$\boldsymbol{V = \left[\frac{J}{C}\right] = \left[\frac{V \cdot A \cdot s}{A \cdot s}\right] = [V]}$$

Przykład 8.4. Obliczyć potencjał pola elektrycznego w punkcie $\boldsymbol{P}$ o współrzędnych $(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$**,** dla układu trzech ładunków: $\boldsymbol{Q_1} = \boldsymbol{q}, \boldsymbol{Q_2} = \boldsymbol{2\sqrt{2}q}, \boldsymbol{Q_3} = -\boldsymbol{q}$ umieszczonych w punktach o współrzędnych: $\boldsymbol{Q_1(0, a)}$, $\boldsymbol{Q_2(0, 0)}$, $\boldsymbol{Q_3(a, 0)}$.
Wyznaczyć potencjał $\boldsymbol{V}$ w punkcie $\boldsymbol{P(a, a)}$.



Rozwiązanie:

Potencjał V pola elektrycznego w punkcie P odległym o r od ładunku $+Q$ jest to stosunek pracy $W_{\infty B}$ wykonanej przeciwko siłom elektrycznym do wielkości przesuwanego ładunku q możemy zapisać $$\boldsymbol{V = \frac{W_{\infty B}}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q}{r}}$$

Całkowity potencjał pola elektrycznego $V(x, y)$ w dowolnym punkcie $P(x, y)$ można przedstawić jako sumę potencjałów $\boldsymbol{V(r_1)}, \boldsymbol{V(r_2)}$ i $\boldsymbol{V(r_3)}$ wytworzonych w tym punkcie przez każdy z ładunków z osobna

$$\boldsymbol{V(x, y) = V(r_1) + V(r_2) + V(r_3)}$$

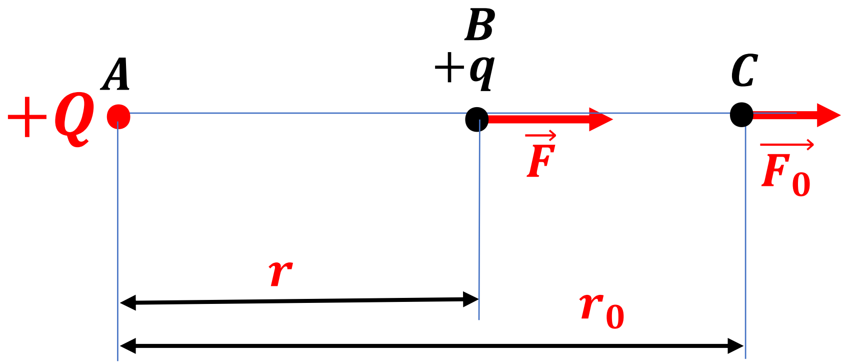
$$\boldsymbol{V(r_1) = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q_1}{r_1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r_1}}, \quad \boldsymbol{V(r_2) = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q_2}{r_2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{2\sqrt{2}q}{r_2}}, \quad \boldsymbol{V(r_3) = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q_3}{r_3} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r_3}}$$

Ale $\mathbf{r_1 = \sqrt{x^2 + (y - a)^2}}$, $\mathbf{r_2 = \sqrt{x^2 + y^2}}$, $\mathbf{r_3 = \sqrt{(x - a)^2 + y^2}}$

Zatem potencjał w w punkcie $\boldsymbol{P(x, y)}$ wynosi: $$\boldsymbol{V(x, y) = \frac{q}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+(y-a)^2}} + \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{x^2+y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-a)^2+y^2}}\right)}$$

Odpowiedź: Potencjał $\boldsymbol{V}$ w punkcie $\boldsymbol{P(a, a)}$ wynosi $\boldsymbol{V(a, a) = \frac{q}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{a} + \frac{2\sqrt{2}}{a\sqrt{2}} - \frac{1}{a}\right)}$, $\boldsymbol{V(a, a) = \frac{q}{2\pi\varepsilon a}}$.

Napięcie elektryczne



Potencjał $\boldsymbol{V}$ pola elektrycznego w punkcie $\boldsymbol{B}$ odległym o $\boldsymbol{r}$ od ładunku $+\boldsymbol{Q}$ wytwarzającego pole elektryczne jest to stosunek pracy $\boldsymbol{W_{\infty B}}$ wykonanej przeciwko siłom elektrycznym do wielkości przesuwanego ładunku $\boldsymbol{q}$.

$$\boldsymbol{V = \frac{W_{\infty B}}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q}{r} = \frac{E_p}{q}}$$

Przeniesienie ładunku $+\boldsymbol{q}$ z nieskończoności do punktu $\boldsymbol{B}$ tzn. przesunięcie ładunku $+\boldsymbol{q}$ w polu elektrycznym od $\boldsymbol{r_0} = \infty$ do $\boldsymbol{r}$ wymagło wykonania pracy $\boldsymbol{W_{\infty B}}$ która jest równa energii potencjalnej E_p ładunku $+\boldsymbol{q}$ w punkcie $\boldsymbol{B}$ pola elektrycznego.

Widzimy zatem, że $\boldsymbol{E_p = V \cdot q}$

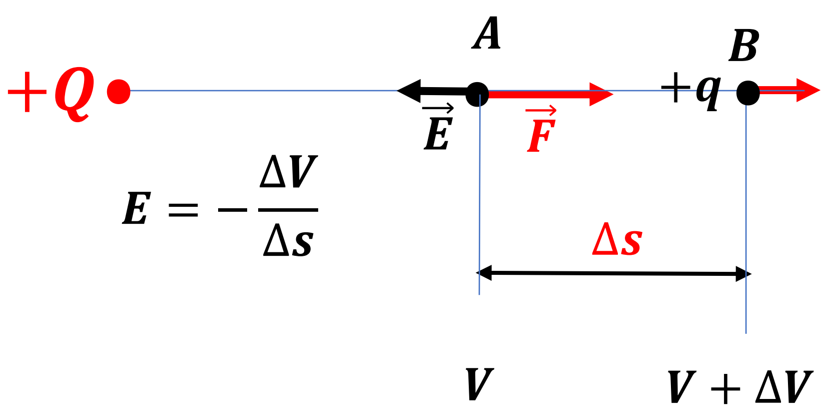
Przy przenoszeniu ładunku z punktu $\boldsymbol{B}$ o potencjale $\boldsymbol{V = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q}{r}}$ do punktu $\boldsymbol{C}$ o mniejszym potencjale $\boldsymbol{V_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q}{r_0}}$ siły pola elektrycznego wykonają pracę W równą różnicy energii potencjalnych przenoszonego ładunku $+\boldsymbol{q}$ w punktach $\boldsymbol{B}$ i $\boldsymbol{C}$.

$$\boldsymbol{W = V \cdot q - V_0 \cdot q = q(V - V_0)}$$

Różnicę potencjałów $\boldsymbol{V - V_0}$ nazywamy napięciem elektrycznym i oznaczamy literą $\boldsymbol{U}$. $\boldsymbol{U = V - V_0}$
Napięciem elektrycznym $\boldsymbol{U}$ jest wielkością skalarną. Jednostką napięcia elektrycznego $\boldsymbol{U}$ w układzie jednostek SI jest wolt $[V]$.

Praca $\boldsymbol{W}$ wykonana przy przesunięciu ładunku $\boldsymbol{q}$ między dwoma punktami pola elektrycznego jest równa iloczynowi wielkości ładunku $\boldsymbol{q}$ i napięcia $\boldsymbol{U}$. $\boldsymbol{W = q \cdot U}$

Zależność między natężeniem E i potencjałem V pola elektrycznego



Ponieważ wektor natężenia $\vec{E}$ jak i skalar potencjał V są wielkościami opisującymi pole elektryczne, występuje między nimi określona zależność. Załóżmy, że ładunek znajduje się w punkcie A pola elektrycznego o natężeniu $\vec{E}$ i potencjale V, przesunięty zostanie pod działanie siły $\vec{F}$, której wartość (zgodnie ze wzorem definicyjnym natężenia $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$) wynosi $F = qE$, do leżącego w bardzo niewielkiej od niego odległości Δs - punktu B o potencjale $(V + \Delta V)$, gdzie ΔV jest przyrostem potencjału na drodze Δs.

Praca która wykona siła F przy przesuwaniu ładunku $+q$ z punktu A do punktu B wynosi: $W = F \cdot \Delta s = qE\Delta s.$

Praca ta może być także zapisana jako różnica energii potencjalnych $\Delta \boldsymbol{E_p}$ jaką miał przenoszony ładunek $+q$ w punktach A i B.

$$\Delta \boldsymbol{E_p} = q[V - (V + \Delta V)] = q(-\Delta V)$$

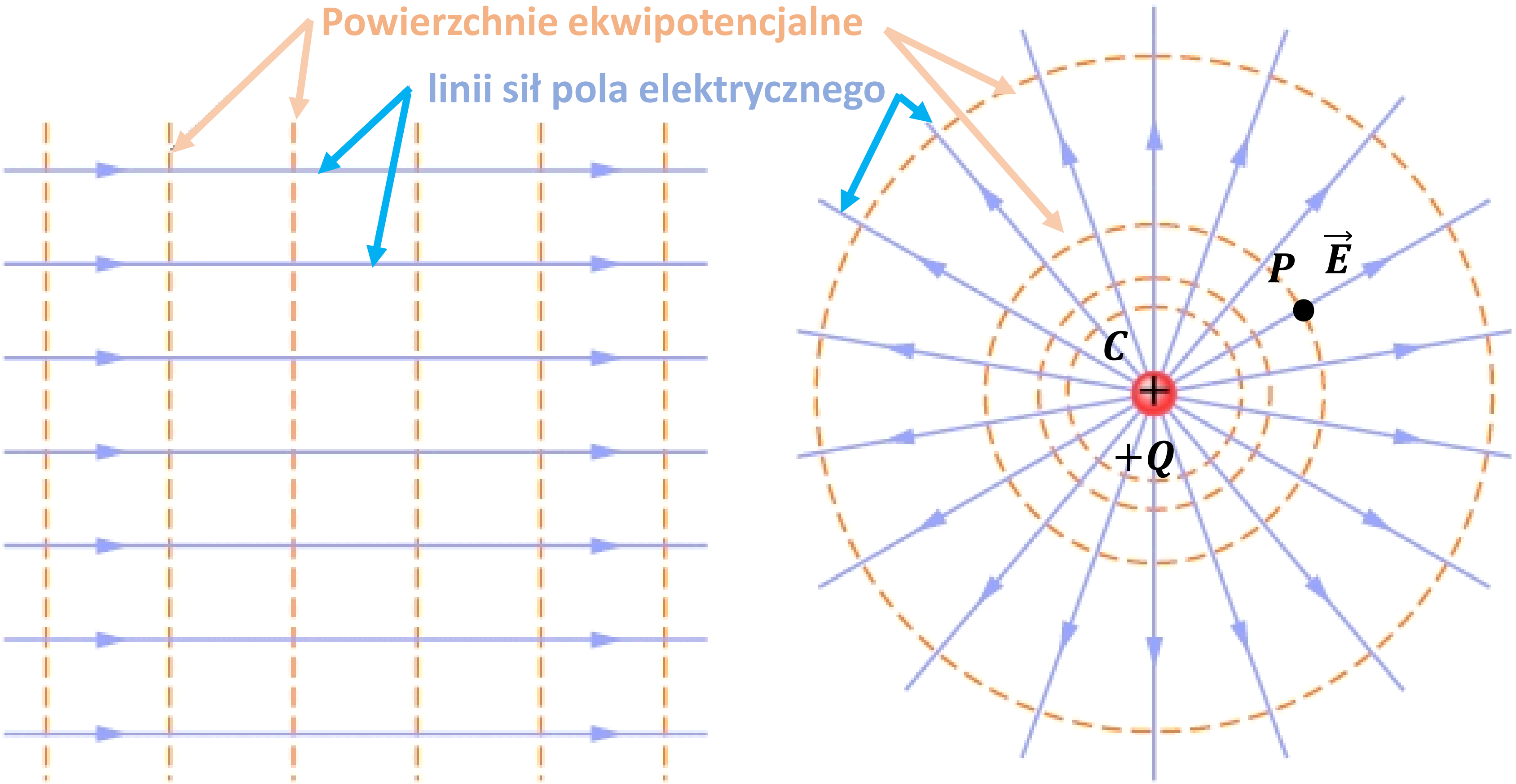
Porównując obydwie prace $W = \Delta \boldsymbol{E_p}$ otrzymujemy: $qE\Delta s = q(-\Delta V)$ i stąd $E = -\frac{\Delta V}{\Delta s}$

Stosunek $\frac{\Delta V}{\Delta s}$ stanowi różnicę potencjałów ΔV przypadającą na jednostkę długości Δs linii sił pola elektrycznego, a zatem:

Natężenie w danym punkcie pola elektrycznego $\vec{E}$ jest równe różnicy potencjałów ΔV przypadającej na na jednostkę długości Δs linii sił pola elektrycznego i skierowane w stronę mniejszego potencjału (co wyraża znak minus we wzorze $E = -\frac{\Delta V}{\Delta s}$).

Zbiór punktów pola elektrycznego, w którym potencjał jest jednakowe, nazywamy powierzchnią równego potencjału albo **powierzchnią ekwipotencjalną**

Mówimy, że pole elektryczne $\vec{E}$ jest jednorodne (stałe), gdy każdemu punktowi pola podporządkowany jest ten sam wektor $\vec{E}$.



Mówimy, że pole elektryczne $\vec{E}$ jest centralne (o środku C) gdy w każdym punkcie pola (różnym od punktu C) wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ leży na osi CB i ma na niej moduł $E(r)$ zależny wyłącznie od odległości $r = CP$.

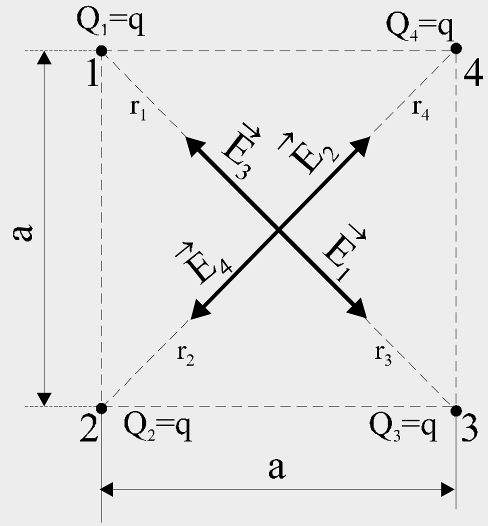
Powierzchnie ekwipotencjalne dla pola jednorodnego (np. w przestrzeni międzyelektrodowej kondensatora płaskiego) są płaszczyznami prostopadłymi do linii sił pola elektrycznego.

Powierzchnie ekwipotencjalne dla pola centralnego (np. pochodzącego od ładunku punktowego $+Q$) są powierzchniami kulistymi.

Przykład 8.5.

Cztery jednakowe ładunki q umieszczono w narożach kwadratu o bokach a. Znaleźć natężenie $\vec{E}$ i potencjał V pola elektrycznego w środku kwadratu?

Rozwiązanie:



Natężenie pola elektrycznego $\vec{E}$ w środku kwadratu wynosi: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4$, gdzie

$$E_1 = \left|\vec{E}_1\right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q_1}{r_1^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{q\cdot 4}{a^2\cdot 2} = \frac{q}{2\pi\varepsilon a^2} \qquad E_2 = \left|\vec{E}_2\right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q_2}{r_2^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{q\cdot 4}{a^2\cdot 2} = \frac{q}{2\pi\varepsilon a^2}$$

$$E_3 = \left|\vec{E}_3\right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q_3}{r_3^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{q\cdot 4}{a^2\cdot 2} = \frac{q}{2\pi\varepsilon a^2} \qquad E_4 = \left|\vec{E}_4\right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q_4}{r_4^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{q\cdot 4}{a^2\cdot 2} = \frac{q}{2\pi\varepsilon a^2}$$

gdzie $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = \frac{a\sqrt{2}}{2}$; Widzimy, że $E_1 = E_2 = E_3 = E_4$.

Z geometrii układu ładunków wynika, że $\vec{E}_1 = -\vec{E}_3$ i $\vec{E}_4 = -\vec{E}_2$, stąd

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 = 0$$

Potencjał V pola elektrycznego w środku kwadratu wynosi: $V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$, gdzie:

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q_1}{r_1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q\cdot 2}{a\sqrt{2}} = \frac{q\sqrt{2}}{4\pi\varepsilon a};\ V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q_2}{r_2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q\cdot 2}{a\sqrt{2}} = \frac{q\sqrt{2}}{4\pi\varepsilon a};\ V_3 = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q_3}{r_3} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q\cdot 2}{a\sqrt{2}} = \frac{q\sqrt{2}}{4\pi\varepsilon a};\quad V_4 = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q_4}{r_4} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q\cdot 2}{a\sqrt{2}} = \frac{q\sqrt{2}}{4\pi\varepsilon a}$$

Widzimy, że $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$, więc $V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 4\frac{q\sqrt{2}}{4\pi\varepsilon a} = \frac{q\sqrt{2}}{\pi\varepsilon a}$

Odpowiedź: Natężenie pola $\vec{E}$ w środku kwadratu wynosi zero, a potencjał V jest równy $\frac{q\sqrt{2}}{\pi\varepsilon a}$.

8.5. Pojemność elektryczna

Jeżeli do przewodnika (np. metalowej kuli) będziemy „doprowadzali” (np. za pomocą naelektryzowanej kulki) coraz to nowe ładunki elektryczne i każdorazowo mierzyli (np. za pomocą elektrometru) potencjał $\boldsymbol{V}$ to okaże się, że wartość potencjału $\boldsymbol{V}$ przewodnika wzrasta wprost proporcjonalnie do gromadzonego na przewodniku ładunku $\boldsymbol{Q}$, zatem

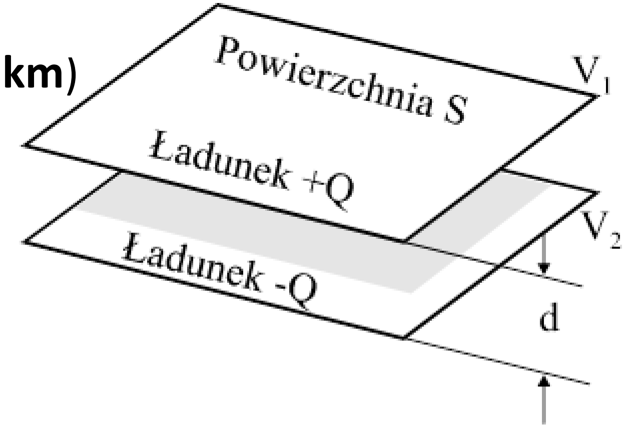
Stosunek ładunku Q zgromadzonym na przewodniku, do wywołanego przez ten ładunek potencjału V jest dla danego przewodnika (układu przewodników) wielkością stałą, zwaną pojemnością elektryczną C

$$\boldsymbol{C = \frac{Q}{V}}$$

Jednostką pojemności elektrycznej w układzie SI jest Farad $[\boldsymbol{F}]$, określa on pojemność takiego przewodnika, w którym ładunek jednego kulomba $[\boldsymbol{C}]$, wytwarza potencjał jednego wolta $[\boldsymbol{V}]$.

$$[\mathbf{F}] = \frac{[\mathbf{C}]}{[\mathbf{V}]}$$

Farad jest bardzo dużą jednostką pojemności elektrycznej.
Pojemność elektryczna kuli ziemskiej (czyli „przewodnika” w kształcie kuli o promieniu $\mathbf{r = 6370\ km}$) wynosi $\mathbf{C = 0,000708\ F}$,
Dlatego też zazwyczaj w praktyce stosuje się jednostki mniejsze:
np. mikrofarady $(\mu\mathrm{F} = 10^{-6}\mathrm{F})$ czy pikofarady $(\mathrm{pF} = 10^{-12}\mathrm{F})$.



Rozpatrzymy dwa przewodniki (np. dwie przewodzące płytki o jednakowych powierzchniach $\boldsymbol{S}$ ustawione równoległe w odległości $\boldsymbol{d}$) na których na jednym przewodniku (jednej płytce znajduje się ładunek $+\boldsymbol{Q}$, a na drugim (drugiej płytce) $-\boldsymbol{Q}$. Potencjały obu przewodników wynoszą odpowiednio $\boldsymbol{V_1}$ i $\boldsymbol{V_2}$.

Układ dwóch przewodników naładowanych równymi, lecz różnoimiennymi ładunkami elektrycznymi nazywamy kondensatorem. Pojemność elektryczna kondensatora zależy od kształtu okładek, ich wzajemnej odległości i rodzaju ośrodka wypełniającego przestrzeń między nimi.

Pojemność elektryczna, przedstawionego na rysunku kondensatora płaskiego wynosi $$\boldsymbol{C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d}}$$

gdzie $\boldsymbol{\varepsilon_r}$ jest względną przenikalnością elektryczną ośrodka, a $\boldsymbol{\varepsilon_0}$ jest przenikalnością elektryczną próżni.

Przykład 8.6. Obliczy pojemność elektryczną $\boldsymbol{C}$ i ładunek $\boldsymbol{Q}$ zgromadzony w kondensatorze płaskim zbudowanym z dwóch, równoległych względem siebie, miedzianych płytek o wymiarach $\mathbf{12\ cm}$ x $\mathbf{15\ cm}$ **i** oddzielonych od siebie płytką mikową (dielektrykiem) o względnej przenikalności elektrycznej $\boldsymbol{\varepsilon_r = 7}$ i grubości $\boldsymbol{d = 0,2\ \mathbf{mm}}$ po naładowaniu tego kondensatora do potencjału $\boldsymbol{V = 200\ \mathbf{V}}$.

<u>Rozwiązanie:</u>

Pojemność elektryczna $\boldsymbol{C}$ kondensatora płaskiego o powierzchni elektrod $\boldsymbol{S}$ odseparowanych od siebie dielektrykiem o grubości $\boldsymbol{d}$ i względnej przenikalności elektrycznej $\boldsymbol{\varepsilon_r}$ i wynosi:

$$\boldsymbol{C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d}}\ , \qquad \text{gdzie } \varepsilon_0 = 0{,}8859 \cdot 10^{-11}\ \frac{C^2}{m^2 \cdot N} \text{ jest przenikalnością elektryczną próżni.}$$

Pole powierzchni okładzin kondensatora wynosi: $\boldsymbol{S = \mathbf{12\ cm} \times \mathbf{15\ cm} = \mathbf{180\ cm^2} = 1,8 \cdot 10^{-2}\ \mathbf{m^2}}$

Odległość pomiędzy okładzinami kondensatora wynosi : $\boldsymbol{d = 0,2\ \mathbf{mm} = 2 \cdot 10^{-4}\ \mathbf{m}}$

Obliczamy pojemność $\boldsymbol{C}$ kondensatora:

$$\boldsymbol{C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d} = \frac{7 \cdot 0{,}8859 \cdot 10^{-11} \frac{\mathbf{C^2}}{\mathbf{m^2 \cdot N}} \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-2} \mathbf{m^2}}{2 \cdot 10^{-4}\ \mathbf{m}} = 5,5 \cdot 10^{-9}\ \frac{\mathbf{C^2}}{\mathbf{m \cdot N}} = 5,5 \cdot 10^{-9}\ \mathbf{F}}.$$

Obliczmy ładunek $\boldsymbol{Q}$ zgromadzony w kondensatorze:

$$\boldsymbol{Q = C \cdot V = 5,5 \cdot 10^{-9}\ \mathbf{F} \cdot \mathbf{200\ V} = 1,1 \cdot 10^{-6} \mathbf{C}}$$

Sprawdzenie jednostek:

$$\left[\frac{\mathbf{C^2}}{\mathbf{m \cdot N}}\right] = \left[\frac{\mathbf{C^2}}{\mathbf{J}}\right] = \left[\frac{\mathbf{C^2}}{\mathbf{AVs}}\right] = \left[\frac{\mathbf{C}}{\mathbf{V}}\right] = [\mathbf{F}]$$

<u>Odpowiedź:</u> Pojemność kondensatora wynosi 5,5 nF a zgromadzono na nim ładunek jest równy 1,1 μC.