Treści zadań ze *szkicami* rozwiązań na Ćwiczenia z Fizyki 0+A dla I roku Chemii UW. Części na czerwono są dodatkowe i nie zawsze są robione na ćwiczeniach i nie zawsze są od razu do nich podane szkice rozwiązań.

Zadanie 1

W trzech narożach kwadratu o boku a umieszczono kolejno ładunki: $-3q$, $+q$ i $+2q$ (ładunek $+q$ znajduje się po przekątnej od naroża kwadratu, w którym nie ma żadnego ładunku). Oblicz wektor natężenia pola w ostatnim narożu.

Rozwiązanie:

Położenia ładunków w zadanym kartezjańskim układzie współrzędnych mogą wyglądać tak:

$$\mathbf{r}_{+2q} = \begin{bmatrix} 0 \\ -a \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_{-3q} = \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_{+q} = \begin{bmatrix} a \\ -a \end{bmatrix}$$

Całkowite pole jest sumą odpowiednich pół cząstkowych:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{+2q} + \mathbf{E}_{-3q} + \mathbf{E}_{+q} = k\frac{2q}{r^3_{+2q}} \begin{bmatrix} 0 \\ -a \end{bmatrix} + k\frac{-3q}{r^3_{-3q}} \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} + k\frac{q}{r^3_{+q}} \begin{bmatrix} a \\ -a \end{bmatrix} = \frac{kq}{a^2} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{4} - 3 \\ -\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + 2\right) \end{bmatrix}$$

Zadanie 2

(a) Oblicz natężenie pola elektrycznego w dowolnym punkcie w przestrzeni pochodzące od dwóch różnoimiennych ładunków o wartości q znajdujących się w odległości d od siebie. (b) Rozważ szczególne przypadki, tj. gdy punkt znajduje się na przedłużeniu osi łączącej oba ładunki, oraz gdy znajduje się w równej odległości od obu ładunków (na symetralnej odcinka d). (c) Rozważ przypadek, gdy odległość punktu od środka linii łączącej ładunki jest znacznie większa niż d. (d) Tam, gdzie to będzie możliwe, zapisz odpowiednie wyrażenia korzystając z definicji wektora momentu dipolowego.

Rozwiązanie:

(a) Układ współrzędnych umieszczamy w środku pomiędzy dwoma ładunkami (oś X jest skierowana wzdłuż linii łączącej ładunki). Położenia ładunków:

$$\mathbf{d}_\pm = \begin{bmatrix} \mp\frac{d}{2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dla danego wektora $\mathbf{r} = [x\ y]^T$ mamy:

$$\mathbf{d}_\pm + \mathbf{r}_\pm = \mathbf{r}$$

z tego mamy, że

$$\mathbf{r}_\pm = \mathbf{r} - \mathbf{d}_\pm = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mp\frac{d}{2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \pm \frac{d}{2} \\ y \end{bmatrix}$$

Całkowite pole od obu ładunków jest zatem równe:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- = k\frac{q}{r^3_+}\mathbf{r}_+ + k\frac{-q}{r^3_-}\mathbf{r}_- = kq\left(\frac{1}{r^3_+}\begin{bmatrix} x + \frac{d}{2} \\ y \end{bmatrix} - \frac{1}{r^3_-}\begin{bmatrix} x - \frac{d}{2} \\ y \end{bmatrix}\right)$$

gdzie

$$r_\pm = \sqrt{\left(x \pm \frac{d}{2}\right)^2 + y^2}$$

(b) Przypadki szczególne ($y = 0$ i $x = 0$):

$$\mathbf{E}\ (y=0) = kq\left(\frac{1}{\left(x+\frac{d}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(x-\frac{d}{2}\right)^2}\right)\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}\ (x=0) = kq\frac{d}{\left(\frac{d^2}{4}+y^2\right)^{3/2}}\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}$$

(c) Rozwijamy wyrażenia r_+^{-3} i r_-^{-3} w szereg Taylora względem małego $d/2$ i obcinamy człony rzędu wyższego niż drugi:

$$\frac{1}{r_\pm^3} = \frac{1}{\left(\sqrt{\left(x\pm\frac{d}{2}\right)^2+y^2}\right)^3} = \frac{1}{\left(\sqrt{x^2+y^2}\right)^3} - \frac{3}{2}\left(\pm\frac{d}{2}\right)\frac{2x}{\left(\sqrt{x^2+y^2}\right)^5} + \ldots \approx \frac{1}{r^3} \mp \frac{3}{2}\cdot\frac{xd}{r^5}$$

i wstawiamy to do wzoru na pole w dowolnym punkcie:

$$\mathbf{E}\ (r \gg d) = kq\left(\frac{d}{r^3}\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} - 3\frac{xd}{r^5}\begin{bmatrix}x\\y\end{bmatrix}\right)$$

(d) Wstawiamy do wyrażeń moment dipolowy dla tego konkretnego przypadku, $\boldsymbol{\mu} = -qd\ [1\ 0]^T$, i otrzymujemy kolejno:

$$\mathbf{E}\ (x=0) = -k\frac{\boldsymbol{\mu}}{\left(\frac{d^2}{4}+y^2\right)^{3/2}}$$

$$\mathbf{E}\ (r \gg d) = -k\frac{\boldsymbol{\mu}}{r^3} + 3k\frac{\boldsymbol{\mu}\mathbf{r}}{r^5}\mathbf{r}$$

Zadanie 3 - *kontynuacja Zadania 1*

W trzech narożach kwadratu o boku a umieszczono kolejno ładunki: $-3q$, $+q$ i $+2q$ (ładunek $+q$ znajduje się po przekątnej od naroża kwadratu gdzie nie ma żadnego ładunku, punkt A). (a) Oblicz potencjał elektrostatyczny w ostatnim narożu (w punkcie A). (b) Oblicz pracę potrzebną na skonstruowanie takiego układu ładunków. (c) Oblicz ujemny gradient potencjału w ostatnim narożu kwadratu, A.

Rozwiązanie:

(a) Analogicznie, jak w Zadaniu 1. Potrzebne są tylko długości wektorów i obliczamy potencjał:

$$V = \frac{kq}{a}\left(\frac{\sqrt{2}}{2} - 1\right)$$

(b) Obliczamy kolejno prace potrzebne do umieszczenia ładunku $+2q$ w polu $+q$, a potem ładunku $-3q$ w polu dwóch pierwszych:

$$W = 2\frac{kq^2}{a} - 3\frac{kq^2}{a}\left(\frac{2\sqrt{2}}{2}+1\right) = -\frac{kq^2}{a}\left(\frac{6\sqrt{2}}{2}+1\right)$$

(c) Definicje są takie same, jak w Zadaniu 1, czyli chcemy obliczyć pole w środku układu współrzędnych. Aby obliczyć pochodne funkcji w danym punkcie, musimy znać jej zachowanie w pobliżu tego punktu. Wprowadzamy wektor $\mathbf{r} = [x\ y]^T$. Wtedy kolejno mamy wektory:

$$\mathbf{r}'_{+2q} = \begin{bmatrix} x \\ y-a \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}'_{-3q} = \begin{bmatrix} x+a \\ y \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}'_{+q} = \begin{bmatrix} x+a \\ y-a \end{bmatrix}$$

Obliczamy potencjał w tym punkcie:

$$V(x,y) = kq\left(\frac{2}{\sqrt{x^2+(y-a)^2}} - \frac{3}{\sqrt{(x+a)^2+y^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x+a)^2+(y-a)^2}}\right)$$

i dalej obliczamy pole, jako ujemny gradient:

$$\mathbf{E}(x,y) = -\nabla V(x,y) = -kq\begin{bmatrix} \frac{2x}{(\sqrt{x^2+(y-a)^2})^3} - \frac{3(x+a)}{(\sqrt{(x+a)^2+y^2})^3} + \frac{x+a}{(\sqrt{(x+a)^2+(y-a)^2})^3} \\ \frac{2(y-a)}{(\sqrt{x^2+(y-a)^2})^3} - \frac{3y}{(\sqrt{(x+a)^2+y^2})^3} + \frac{y-a}{(\sqrt{(x+a)^2+(y-a)^2})^3} \end{bmatrix}$$

Jeśli w tym wyrażeniu podstawimy $x = 0$ i $y = 0$, to otrzymujemy wynik identyczny, jak w Zadaniu 1.

Zadanie 4 - *kontynuacja Zadania 2*

(a) Oblicz potencjał elektrostatyczny w dowolnym punkcie w przestrzeni pochodzący od dwóch różnoimiennych ładunków o wartości q znajdujących się w odległości d. Oblicz jego ujemny gradient.
(b) Rozważ przypadek, gdy odległość punktu od środka linii łączącej ładunki jest znacznie większa niż d (przybliżenie multipolowe). Przedstaw wynik korzystając z definicji momentu dipolowego. Oblicz natężenie pola pochodzące od takiego potencjału.

Rozwiązanie:

(a) Robimy analogicznie, jak w Zadaniu 2. Potrzebne są tylko długości wektorów i mamy obliczony potencjał:

$$V = kq\left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-}\right)$$

Aby obliczyć pole, wpierw obliczamy pochodne cząstkowe z r_+^{-1} i r_-^{-1} (łącznie 4 pochodne cząstkowe):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{r_\pm}\right) = -\frac{1}{r_\pm^3}\left(x \pm \frac{d}{2}\right) \quad \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{r_\pm}\right) = -\frac{1}{r_\pm^3}y$$

Ostatecznie, po podstawieniu do wzoru na ujemny gradient, otrzymujemy wynik identyczny, jak w Zadaniu 2.

(b) Wyrażenia na r_+^{-1} i r_-^{-1} rozwijamy w szereg Taylora względem małego $d/2$ i obcinamy człony rzędu wyższego niż drugi:

$$\frac{1}{r_\pm} \approx \frac{1}{r} \mp \frac{1}{2} \cdot \frac{xd}{r^3}$$

Podstawiamy to wyrażenie do wzoru na potencjał i otrzymujemy wyrażenia:

$$V(r \gg d) = -kq\frac{xd}{r^3} = k\frac{\boldsymbol{\mu}\mathbf{r}}{r^3}$$

Pole elektryczne liczymy jako ujemny gradient potencjału. Pamiętamy, że $\mathbf{r} = [x\ y]^T$ i $\mu = [\mu_x\ \mu_x]^T$. Z tego mamy, że $r = \sqrt{x^2+y^2}$, także wzór na potencjał (dla $r \gg d$) wygląda tak:

$$V(x,y) = k\frac{\mu_x x + \mu_y y}{(x^2+y^2)^{3/2}}$$

Liczymy pochodne i otrzymujemy (np. dla $\frac{\partial}{\partial x}V$):

$$\frac{\partial V}{\partial x} = k\frac{\mu_x}{r^3} - 3k\frac{\mu_x x + \mu_y y}{r^5}x$$

Mamy ostatecznie:

$$\mathbf{E} = -k\begin{bmatrix} \frac{\mu_x}{r^3} - 3\frac{\mu_x x+\mu_y y}{r^5}x \\ \frac{\mu_y}{r^3} - 3\frac{\mu_x x+\mu_y y}{r^5}y \end{bmatrix} = -k\frac{1}{r^3}\begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{bmatrix} + 3k\frac{\mu_x x + \mu_y y}{r^5}\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = -k\frac{\boldsymbol{\mu}}{r^3} + 3k\frac{\boldsymbol{\mu}\mathbf{r}}{r^5}\mathbf{r}$$

To się oczywiście zgadza ze wzorem z Zadania 2.

Zadanie 5

(a) Oblicz pracę, jaką trzeba wykonać, aby umieścić ładunek Q w polu dipola określonego momentem dipolowym $\boldsymbol{\mu}$. (b) Oblicz pracę, jaką należy wykonać, aby umieścić taki ładunek na symetralnej dipola. (c) Punkt A jest położony tak, że linia łącząca go i środek dipola tworzy kąt α z osią dipola. Jaką pracę należy wykonać, aby przesunąć ten ładunek z punktu A do punktu A', położonego symetrycznie do A względem symetralnej dipola?

Zadanie 6

Dany jest kwadrat o boku o długości a. W dwóch narożach wzdłuż przekątnej umieszczono ładunki $3q$ i $-q$. W jednym narożu umieszczono dipol (zdefiniowany za pomocą wektora momentu dipolowego $\boldsymbol{\mu}$) pod kątem $90°$ w stosunku do przekątnej przechodzącej przez to naroże i w taki sposób, że koniec wektora momentu dipolowego jest "bliżej" ładunku $-q$. (a) Oblicz natężenie pola w ostatnim narożu (punkt A). (b) Oblicz potencjał elektrostatyczny w ostatnim narożu i wykaż, że ujemny gradient potencjału będzie równy natężeniu pola w tym punkcie. (c) Policz, jaką pracę należy wykonać, aby skonstruować taki układ dwóch ładunków i dipola.

Zadanie 7

Dwie kulki o masie $m = 1$ g zawieszone są na dwóch nitkach o długości $l = 1$ m, zaczepionych w tym samym punkcie na suficie. Jaki (równoimienny) ładunek Q trzeba zgromadzić na każdej z kulek, aby odsunęły się od siebie o odległość $x = 1$ cm

Rozwiązanie:

Kulki się odpychają i wychylają o kąt równy α. Pomiędzy nimi działa siła Coulomba równa

$$F = k\frac{Q^2}{x^2}$$

Poza tym na każdą kulkę działają siły naciągu nici, F_n, i siła grawitacji, $F_\mathrm{g} = mg$. Siły się wektorowo sumują do zera, także mamy dwa równania:

$$F_\mathrm{n}\sin\alpha = k\frac{Q^2}{x^2}$$

$$F_\mathrm{n}\cos\alpha = mg$$

Z tego mamy kolejno:

$$\frac{F_\mathrm{n}\sin\alpha}{F_\mathrm{n}\cos\alpha} = \tan\alpha = \frac{kQ^2}{mgx^2} = \frac{x}{\sqrt{l^2 - \frac{1}{4}x^2}}$$

Ostateczny wynik:

$$Q = \left(\frac{mgx^3}{k\sqrt{l^2 - \frac{1}{4}x^2}} \right)^{1/2}$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy $Q \approx 1.04 \cdot 10^{-9}$ C $\approx 6.25 \cdot 10^9$ e.

Zadanie 8

Zadany jest prototyp cząsteczki w kształcie trójkąta równobocznego o boku długości a. W narożach trójkąta umieszczone są ładunki punktowe $+q$, $+2q$ i $-3q$. Oblicz moment dipolowy takiego układu ładunków w dwóch różnych układach współrzędnych: (a) o środku w miejscu ładunku $+2q$ i (b) o środku w punkcie równoodległym od wszystkich ładunków.

Rozwiązanie:

(a) Mamy trzy wektory położenia ładunków:

$$\mathbf{r}_{+q} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_{+2q} = \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_{-3q} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}a \\ a\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Moment dipolowy obliczamy z definicji i otrzymujemy:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{qa}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -3\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

(a) Wektory położenia ładunków w układzie o środku zaczepionym w środku geometrycznym trójkąta:

$$\mathbf{r}_{+q} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}a \\ -a\frac{\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_{+2q} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}a \\ -a\frac{\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_{-3q} = \begin{bmatrix} 0 \\ a\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix}$$

Po obliczeniu moment dipolowy wychodzi tyle ile w punkcie (a).

Zadanie 9

Dane są dwa ładunki punktowe $+q$ położone w odległości a względem siebie. Na linii łączącej te ładunki znajdują się dwa dodatkowe ładunki $-q$ w odległości d od ładunków $+q$. (a) Oblicz momenty dipolowy i kwadrupolowy takiego układu ładunków. (b) Oblicz potencjał w dowolnym punkcie w przestrzeni pochodzący od takiego układu ładunków. Oblicz natężenie pola elektrycznego opisanego takim potencjałem.

Zadanie 10

Korzystając z prawa Gaussa (dla elektrostatyki) oblicz pole elektryczne i potencjał w dowolnym miejscu w przestrzeni wytwarzane przez: (a) ładunek punktowy $+q$, (b) równomiernie i ujemnie naładowana kulę o promieniu b, w której wydrążono środek o promieniu a i która jest otoczona równomiernie dodatnio naładowaną (nieskończenie) cienką sferą o promieniu c (ϱ_- i σ_+ to odpowiednio objętościowa i powierzchniowa gęstość ładunku w przypadku wydrążonej kuli i sfery; $a < b < c$), (c) nieskończenie długą nić o liniowej gęstości ładunku równej λ otoczoną przez nieskończenie długą i cienką powłokę walcową o promieniu a i powierzchniowej gęstości ładunku równej σ.

Rozwiązanie:

(a) Ładunek otaczamy sferą S o promieniu r. Dla każdego elementu sfery mamy, że $\mathbf{E} \uparrow\uparrow \mathrm{d}\mathbf{S}$, z czego mamy, że $\mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = E\,\mathrm{d}S$. Z tego oczywiście:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = E \oint_S \mathrm{d}S = 4\pi r^2 E = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Ostatecznie mamy, że

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

(b) Całkowity ładunek wydrążonej kuli i cienkiej sfery są odpowiednio równe:

$$Q_- = \frac{4}{3}\pi(b^3 - a^3)\varrho_- \qquad Q_+ = 4\pi c^2\sigma_+$$

Otaczamy ładunki sferami o różnych promieniach r. Rozpatrujemy kolejne przypadki. Wpierw $r \leq a$:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = 0 \quad \Rightarrow \quad E_{\mathrm{I}} = 0$$

Następnie kolejno dla $a \leq r \leq b$, $b \leq r < c$ i $r > c$ mamy (dla $r = c$ występuje nieciągłość):

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = 4\pi r^2 E = \frac{4\pi(r^3 - a^3)\varrho_-}{3\epsilon_0} \quad \Rightarrow \quad E_{\mathrm{II}} = \frac{\varrho_-(r^3 - a^3)}{3\epsilon_0 r^2}$$

$$4\pi r^2 E = \frac{Q_-}{\epsilon_0} = \frac{4\pi(b^3 - a^3)\varrho_-}{3\epsilon_0} \quad \Rightarrow \quad E_{\mathrm{III}} = \frac{\varrho_-(b^3 - a^3)}{3\epsilon_0 r^2}$$

$$4\pi r^2 E = \frac{Q_- + Q_+}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0}\left[\frac{4}{3}\pi(b^3 - a^3)\varrho_- + 4\pi c^2\sigma_+\right] \quad \Rightarrow \quad E_{\mathrm{IV}} = \frac{1}{\epsilon_0 r^2}\left[\frac{1}{3}(b^3 - a^3)\varrho_- + c^2\sigma_+\right]$$

Dla każdej odległości potencjał obliczamy z definicji (punkt referencyjny jest w nieskończoności):

$$V(r) = -\int_\infty^r \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{r} = -\int_\infty^r E \ \mathrm{d}r$$

Kolejno dla odpowiednich regionów, licząc od zewnątrz, mamy:

$$V_{\mathrm{IV}}(r) = -\int_\infty^r \frac{Q_- + Q_+}{4\pi\epsilon_0 r^2}\mathrm{d}r = \frac{Q_- + Q_+}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$V_{\mathrm{III}}(r) = -\int_\infty^c \frac{Q_- + Q_+}{4\pi\epsilon_0 r^2}\mathrm{d}r - \int_c^r \frac{Q_-}{4\pi\epsilon_0 r^2}\mathrm{d}r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{Q_-}{r} + \frac{Q_+}{c}\right)$$

$$V_{\mathrm{II}}(r) = -\int_\infty^c \frac{Q_- + Q_+}{4\pi\epsilon_0 r^2}\mathrm{d}r - \int_c^b \frac{Q_-}{4\pi\epsilon_0 r^2}\mathrm{d}r - \int_b^r \frac{\varrho_-(b^3 - a^3)}{3\epsilon_0 r^2}\mathrm{d}r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{Q_-}{r} + \frac{Q_+}{c}\right) - \frac{\varrho_-}{3\epsilon_0}\left[\frac{r^2}{2} - \frac{b^2}{2} + a^3\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{b}\right)\right]$$

$$V_{\mathrm{I}}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{Q_-}{r} + \frac{Q_+}{c}\right) - \frac{\varrho_-}{3\epsilon_0}\left[\frac{a^2}{2} - \frac{b^2}{2} + a^3\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)\right]$$

(c) Dla danej długości l mamy, że $Q_1 = \lambda l$ (dla nici) i $Q_2 = 2\pi a l\sigma$ (dla walca). Otaczamy kawałek powierzchnią Gaussa w postaci walca o promieniu r. Całka po powierzchni zamkniętej (S) rozbija się na dwie całki po bocznicy walca (S_1) i po podstawach (S_2). Całki po podstawach znikają, czyli mamy ostatecznie dla regionu $r < a$:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \int_{S_1} \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} + \int_{S_2} \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = E\int_{S_1} \mathrm{d}S = 2\pi r l E = \frac{Q_1}{\epsilon_0} \quad \Rightarrow \quad E_{\mathrm{I}} = \frac{\lambda}{2\pi r\epsilon_0}$$

Analogiczne otrzymujemy wzór dla regionu $r > a$:

$$E_{\mathrm{II}} = \frac{\lambda + 2\pi a\sigma}{2\pi r\epsilon_0}$$

Zadanie 11

Układ ładunków wytwarza pole elektryczne o potencjalne $V(x, y) = y + ax^2$. Oblicz wektor natężenia pola i wykaż, że jest on prostopadły do powierzchni stałego potencjału.

Zadanie 12

Zadane jest jednorodne pole elektryczne. W polu tym umieszczono naładowane ładunkiem $+q$ ciało punktowe o masie m i o prędkości początkowej równej v_0 prostopadłej do linii pola. (a) Wyznacz tor ładunku poruszającego się w polu. (b) Jaka praca zostanie wykonana nad ładunkiem przez siłę elektrostatyczną i jaka prędkość końcowa v_{k} zostanie przez niego uzyskana jeśli ładunek przemieścił się o odległość d wzdłuż linii pola.