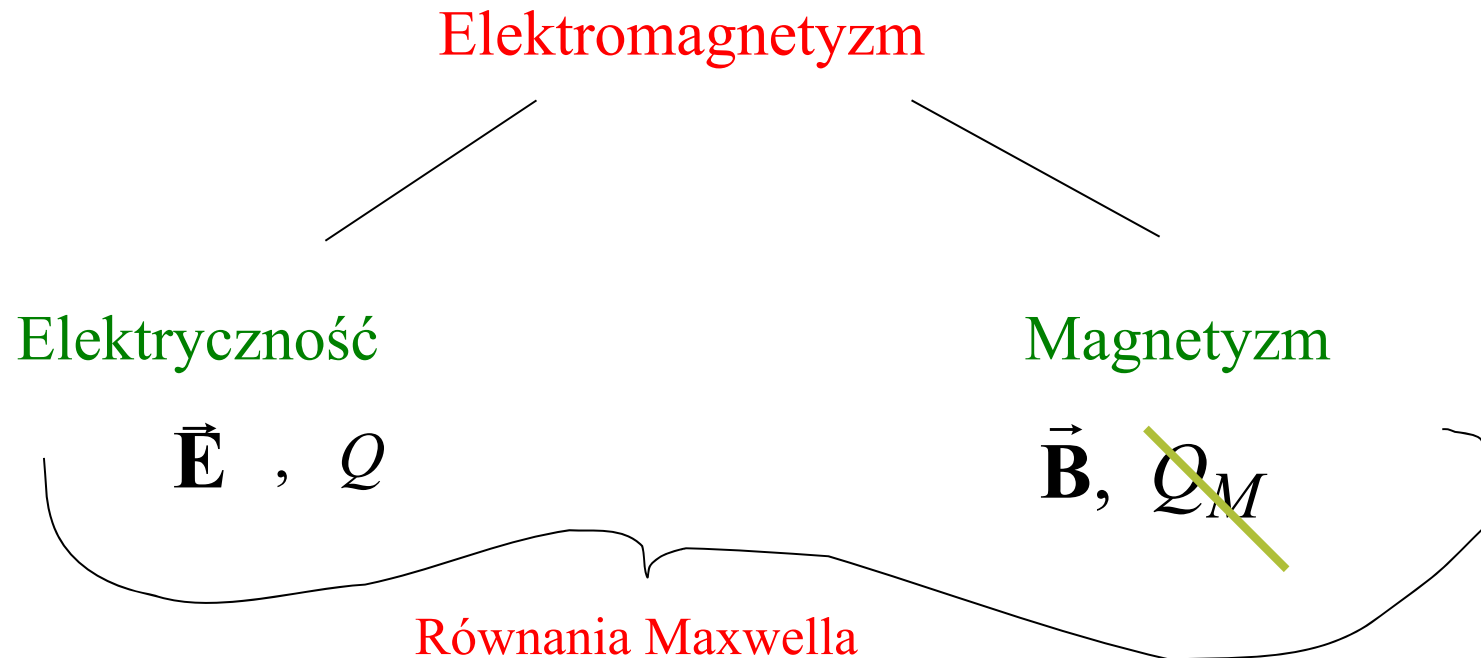
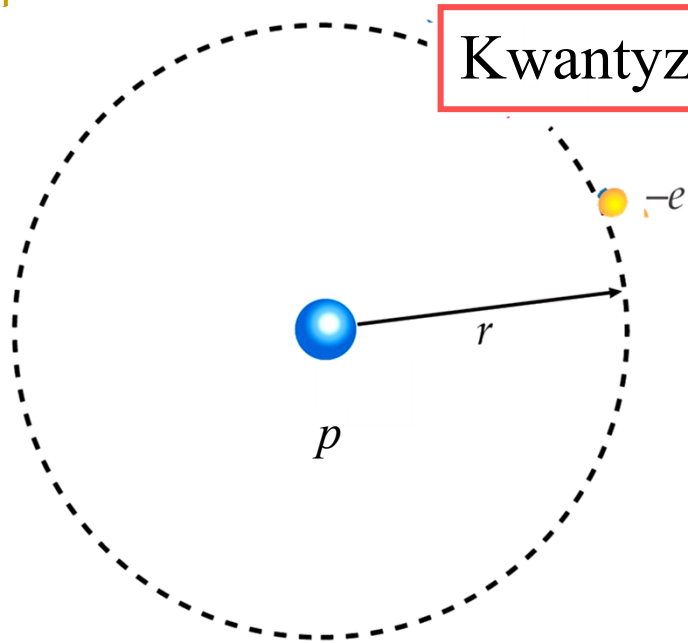


Cztery fundamentalne oddziaływania:

1. Grawitacyjne
 2. **Elektromagnetyczne**
 3. Słabe
 4. Silne
- } jądrowe



ELEKTROSTATYKA



Kwantyzacja ładunku

Każdy elektron ma masę $= m_e$ i ładunek $= -e$

Każdy proton ma masę $= m_p$ i ładunek $= e$

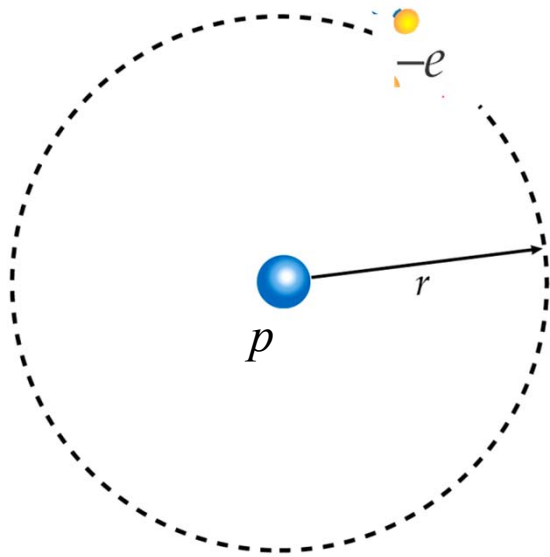
$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Ładunek elementarny

Każdy inny ładunek jest wielokrotnością ładunku elementarnego

$$|Q| = Ne$$

Zasada zachowania ładunku



Całkowity ładunek układu odosobnionego, tzn. algebraiczna suma dodatnich i ujemnych ładunków występujących w dowolnej chwili, nie może ulegać zmianie.

$$Q_{\text{całk}} = \text{const}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{całk}} &= Q_e + Q_p \\ &= -e + e \\ &= 0 \end{aligned}$$



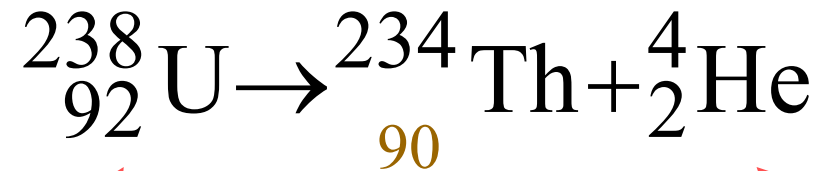
p



$-e$

Przykłady zasady zachowania ładunku

■ Rozpad promieniotwórczy jądra



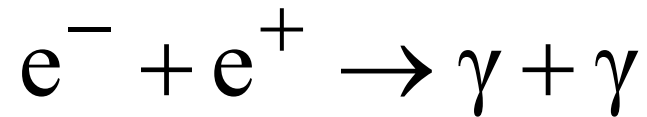
Liczba atomowa $Z=92$
oznacza 92 protony w
jądrze i ładunek $92e$

Emisja cząstki α

Z zasady zachowania ładunku $92e = 90e + 2e$

Przykłady zasady zachowania ładunku

- Proces anihilacji elektronu e^- i antycząstki pozytonu e^+



Emisja dwóch kwantów promieniowania elektromagnetycznego

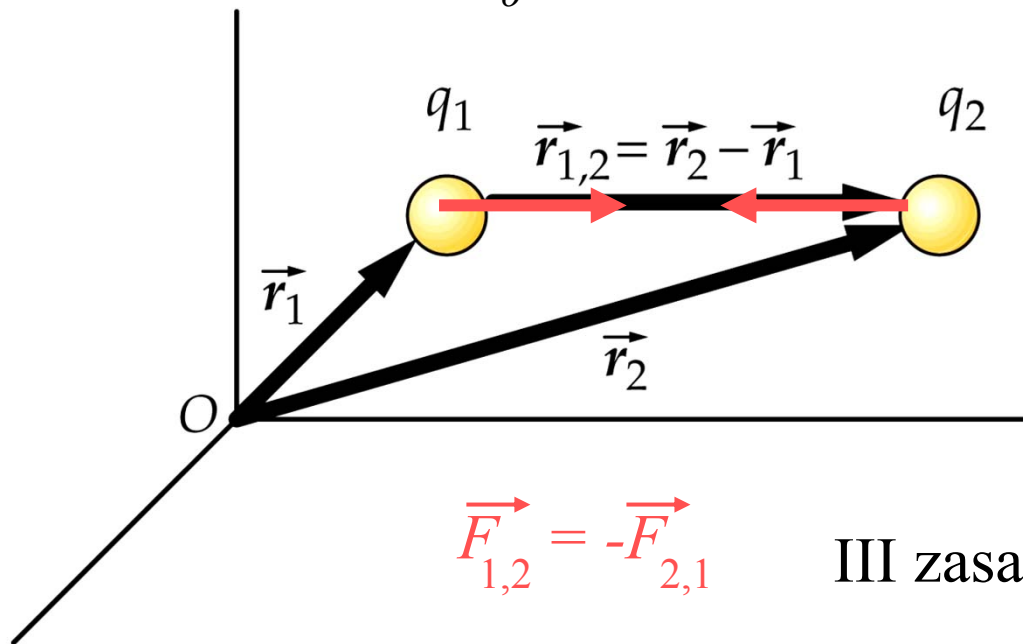
- Proces kreacji pary



Empiryczne prawo Coulomba

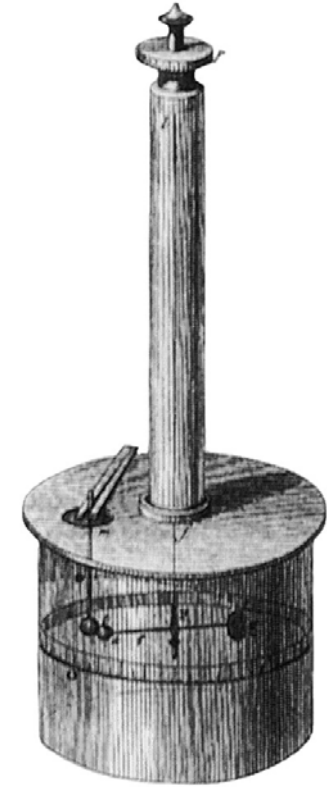
$$\vec{F}_{1,2} = \frac{k q_1 q_2}{r_{1,2}^2} \hat{r}_{1,2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{1,2}^2} \hat{r}_{1,2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \text{ gdzie } \epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$$



$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$$

III zasada dynamiki



1785 – waga skręceń

Charles Coulomb 1736-1806

POLE ELEKTROSTATYCZNE A POLE GRAWITACYJNE

PODOBIENSTWA

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

PRAWO COULOMBA

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

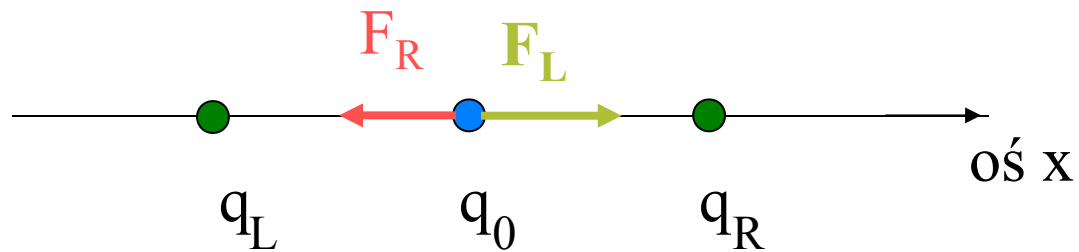
PRAWO NEWTONA

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

Oddziaływanie grawitacyjne jest dużo słabsze niż elektrostatyczne

ZASADA SUPERPOZYCJI

$$\vec{F}_{cał} = \sum_i \vec{F}_i$$

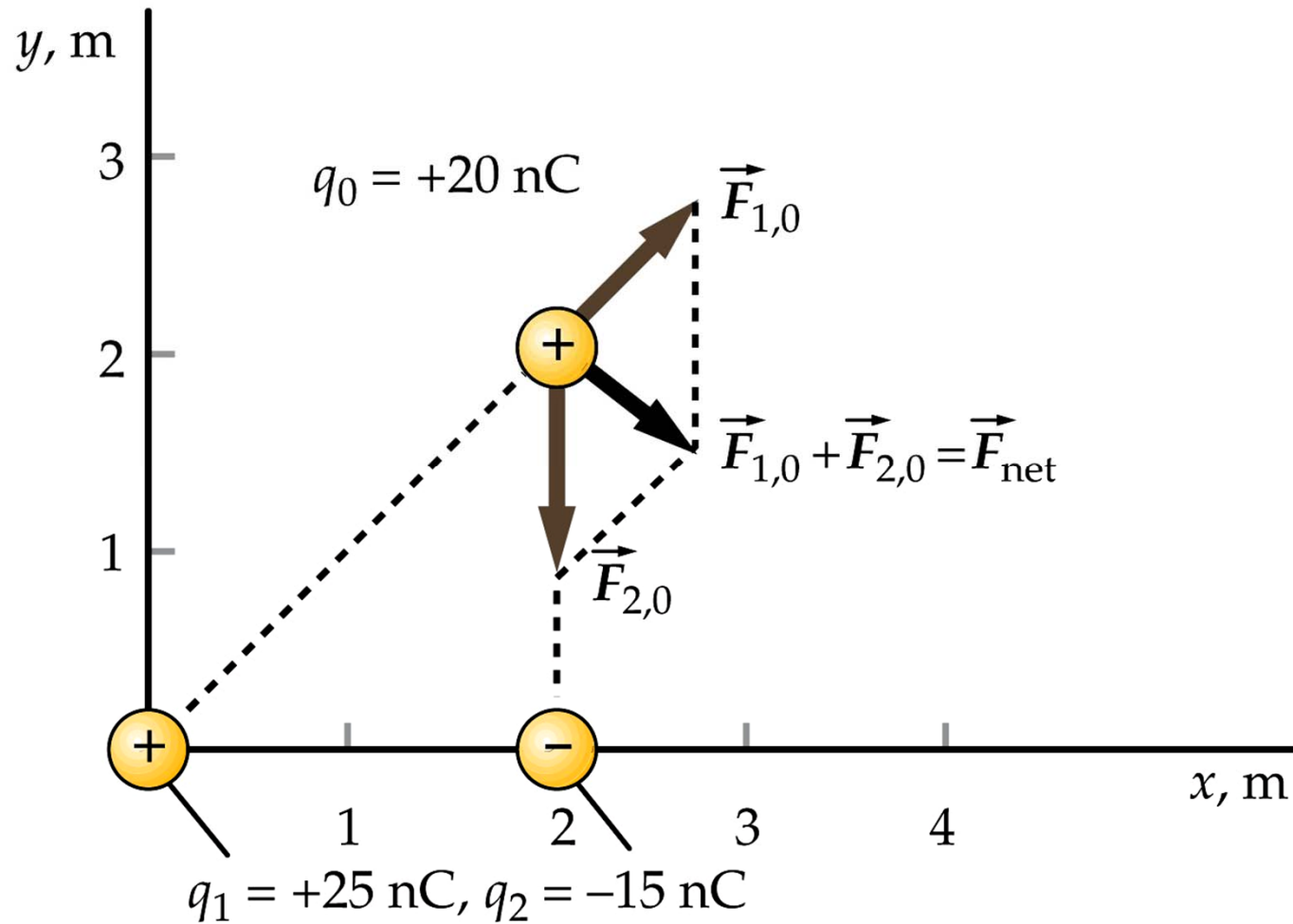


$$\vec{F}_0 = \vec{F}_R + \vec{F}_L = \frac{kq_0(q_L - q_R)}{x^2} \hat{x}$$

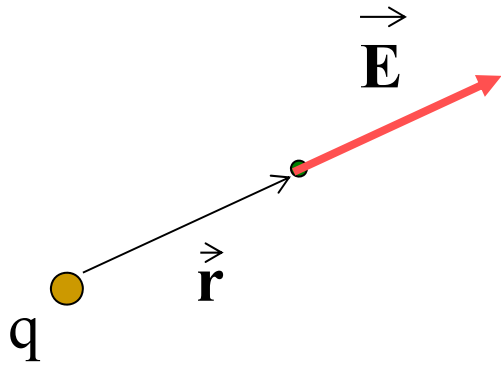
Ładunki q_L , q_0 i q_R są tego samego znaku

Zadanie domowe 1-1

Znajdź wartość i kierunek siły wypadkowej działającej na ładunek q_0



Definicja wektora natężenia pola elektrycznego



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

ładunek próbny $q_0 > 0$

Natężenie pola ładunku punktowego

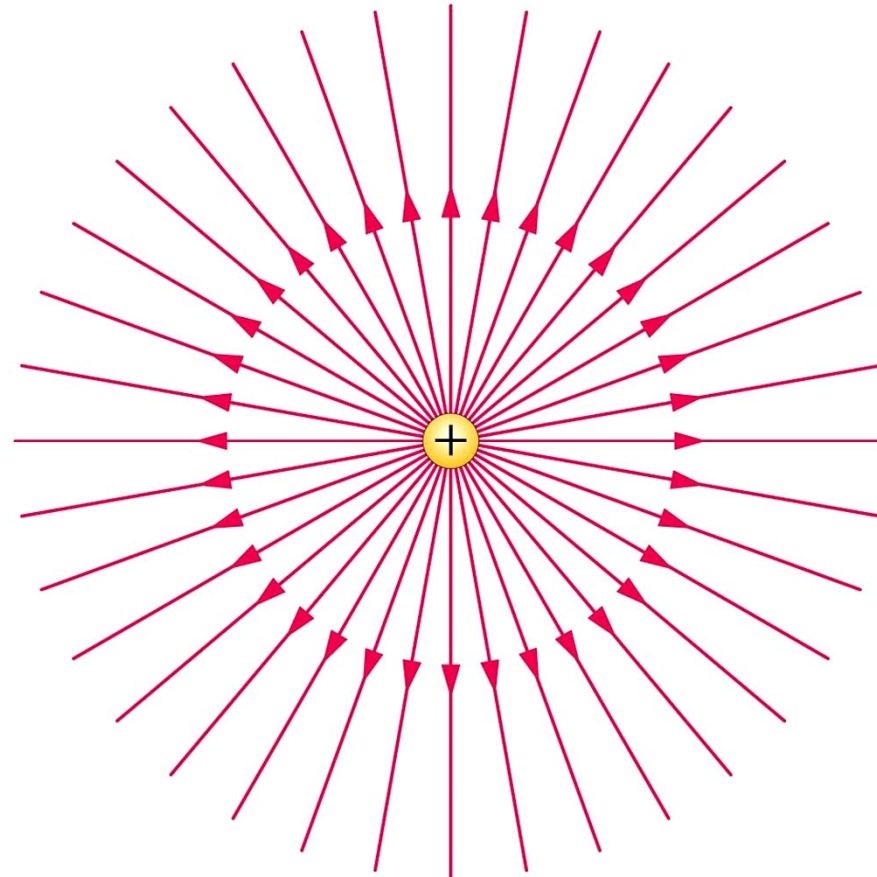
$$\vec{E} = \frac{kq}{r^2} \hat{r}$$

Natężenie pola pochodzące od wielu ładunków punktowych
(rozkład dyskretny)

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i = \sum_i \frac{kq_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Linie pola – linie równoległe do wektora natężenia pola

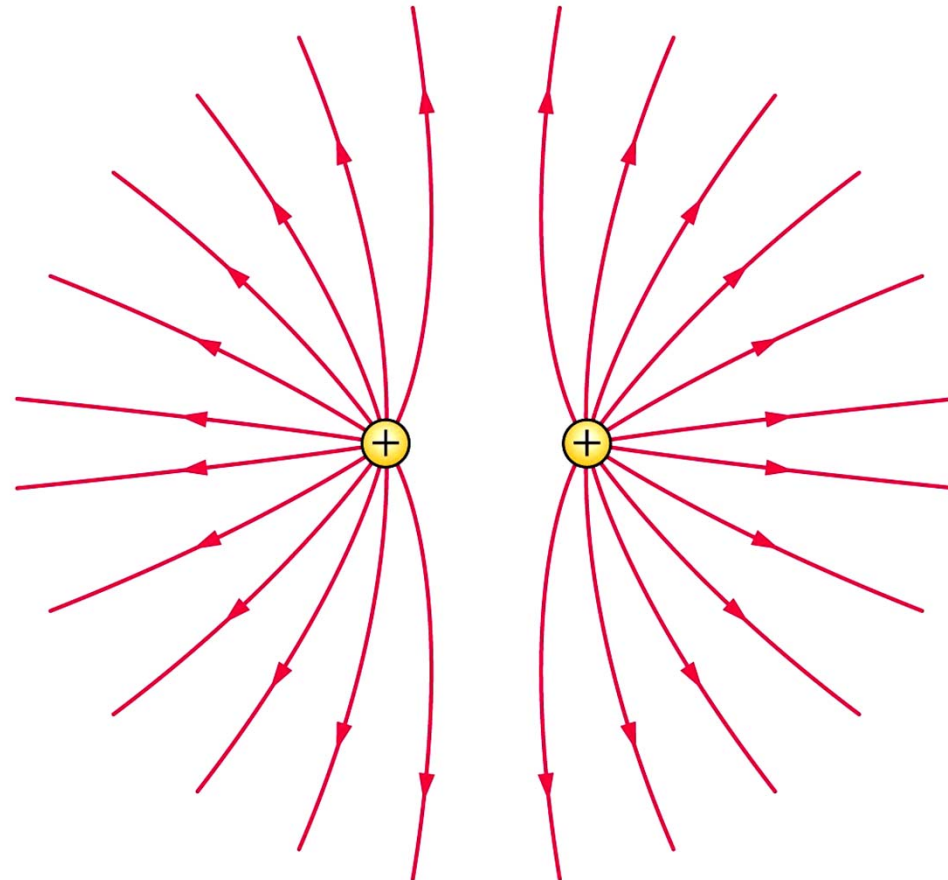
Pole ładunku punktowego



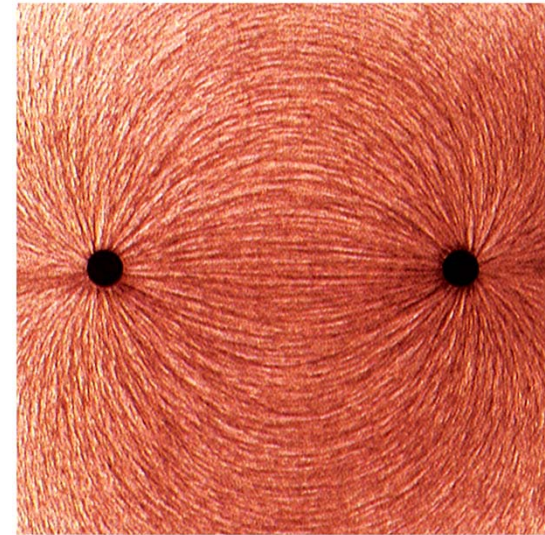
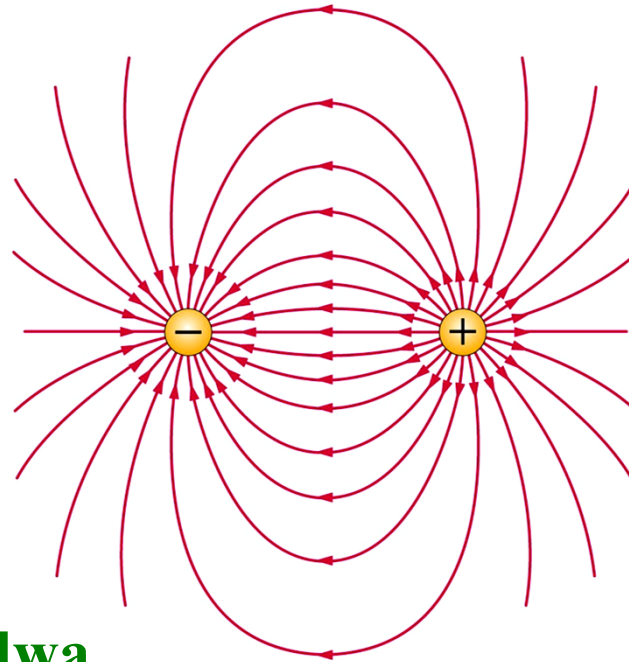
Symetria sferyczna

Linie pola

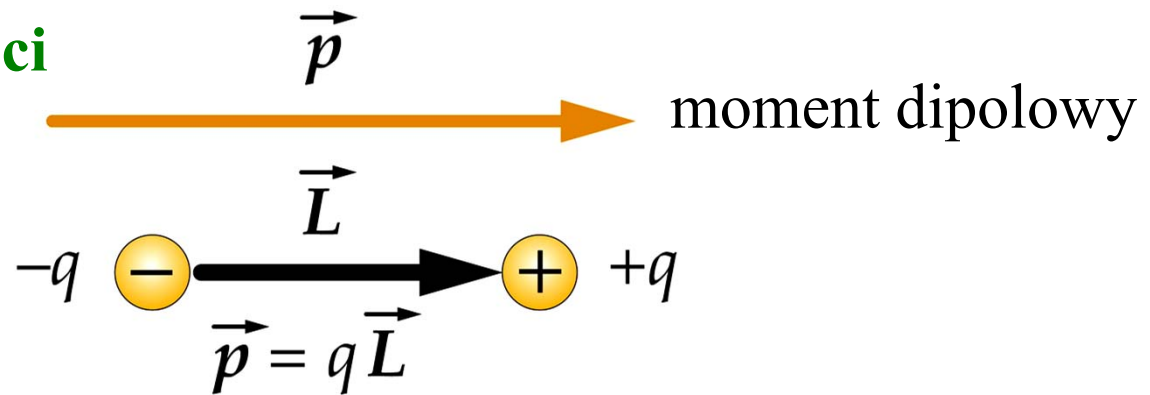
**Dwa jednoimienne
ładunki punktowe**



Linie pola

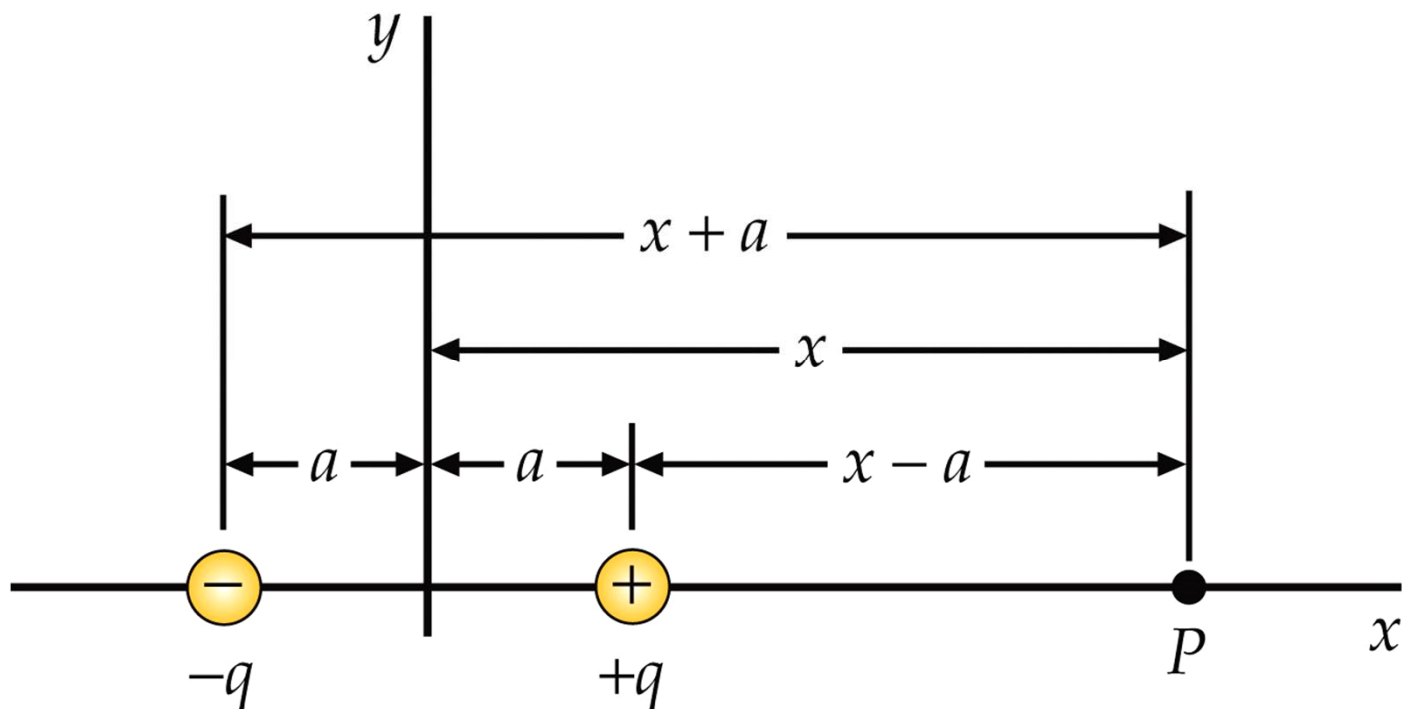


Dipol elektryczny-dwa
różnoimienne ładunki w
bardzo małej odległości



Zadanie domowe 1-2

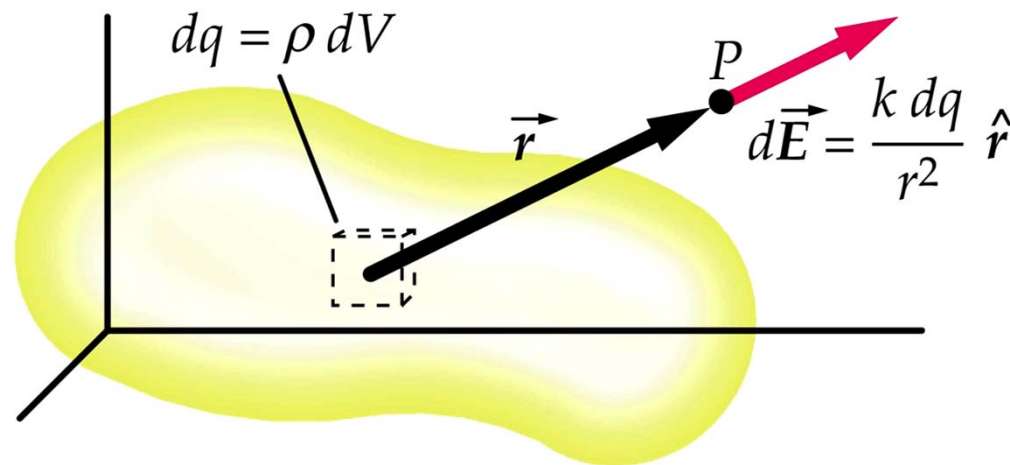
- (a) Znajdź natężenie pola w punkcie P gdy $x > a$
(b) Rozważ przypadek graniczny $x \gg a$



Ciągły rozkład ładunku

Dla ładunku, dq ,
natężenie pola elektrycznego
w punkcie P dane jest
zgodnie z **prawem Coulomba**
jak dla ładunku punktowego

$$d\vec{E} = \frac{k dq}{r^2} \hat{r}$$



Dla ładunków dyskretnych pole wypadkowe \vec{E} jest sumą
wektorów natężenia \vec{E}_i czyli

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

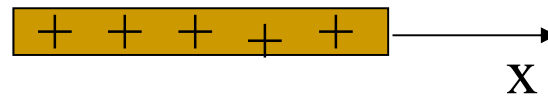
Dla ciągłego rozkładu ładunku
pole wypadkowe jest całką:

$$\vec{E} = \int_Q d\vec{E} = \int_Q \frac{k dq}{r^2} \hat{r}$$

Ciągły rozkład ładunku

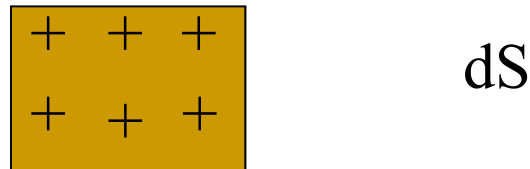
W zależności od rozkładu ładunku rozróżniamy:

- gęstość liniową ładunku λ ,



$$\lambda = \frac{dq}{dx}$$

- gęstość powierzchniową ładunku σ ,



$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

- gęstość objętościową ładunku ρ

$$\rho = \frac{dq}{dV}$$

Dla ciągłego rozkładu ładunku, w zależności od rodzaju gęstości ładunku, pole wypadkowe może być całką liniową, powierzchniową lub objętościową:

$$\vec{E} = \int d\vec{E} = \int_V \frac{k \rho dV}{r^2} \hat{r}$$

Przykład 1-1 Liniowy rozkład ładunku

Znaleźć wektor natężenia pola elektrycznego w punkcie P na osi liniowego rozkładu ładunku

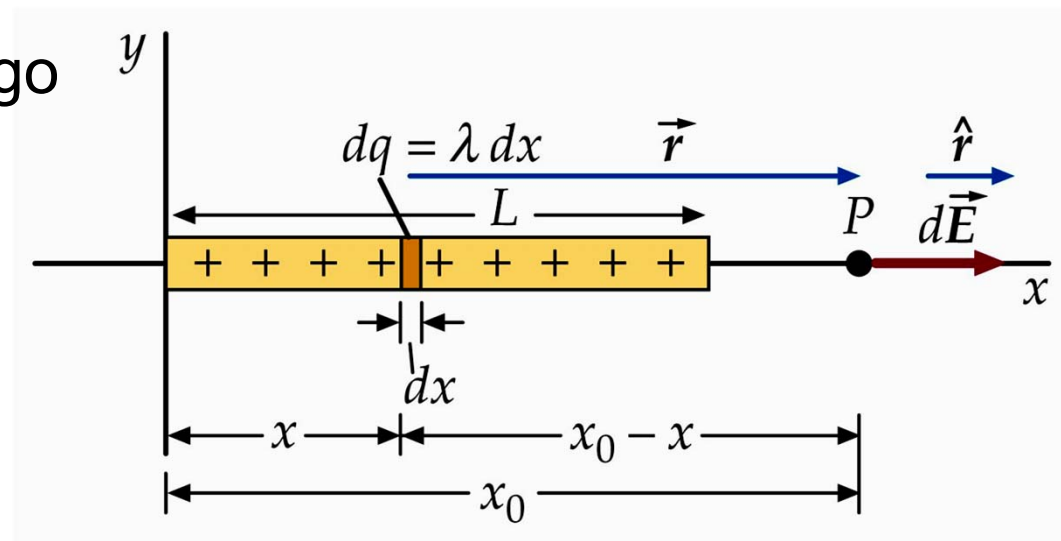
Z prawa Coulomba

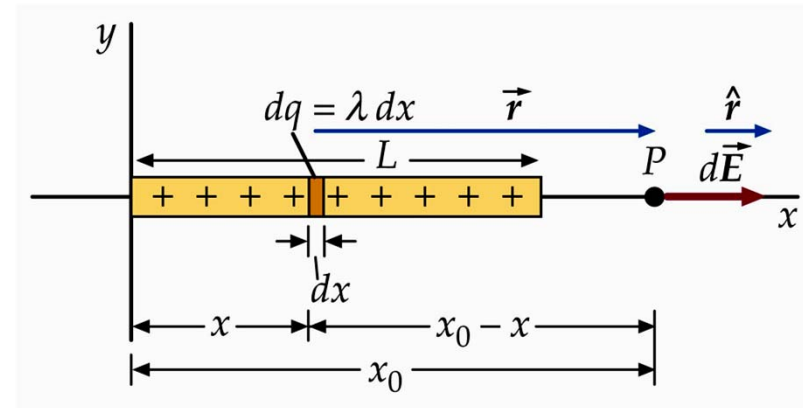
$$d\vec{E}_x = \frac{k dq}{(x - x_0)^2} \hat{x}$$

Z definicji gęstości liniowej ładunku

$$dq = \lambda dx$$

$$d\vec{E}_x = \frac{k \lambda dx}{(x - x_0)^2} \hat{x}$$





Wypadkowe natężenie pola jest sumą pól pochodzących od ładunków elementarnych dq :

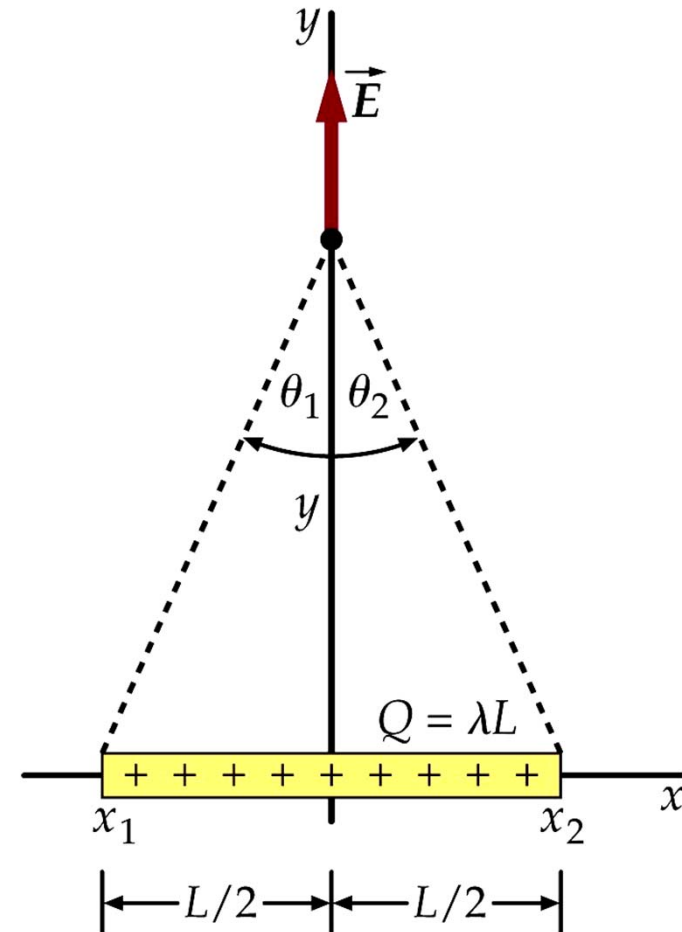
$$E = \int dE_x = \int_0^L \frac{k \lambda dx}{(x_0 - x)^2} = \frac{k \lambda L}{x_0 (x_0 - L)}$$

Zadanie domowe 1-3

Wykazać, że (a) wartość wypadkowego wektora natężenia pola elektrycznego na symetrycznej pręcie od długości L , naładowanego jednorodnie o całkowitym ładunku Q wynosi

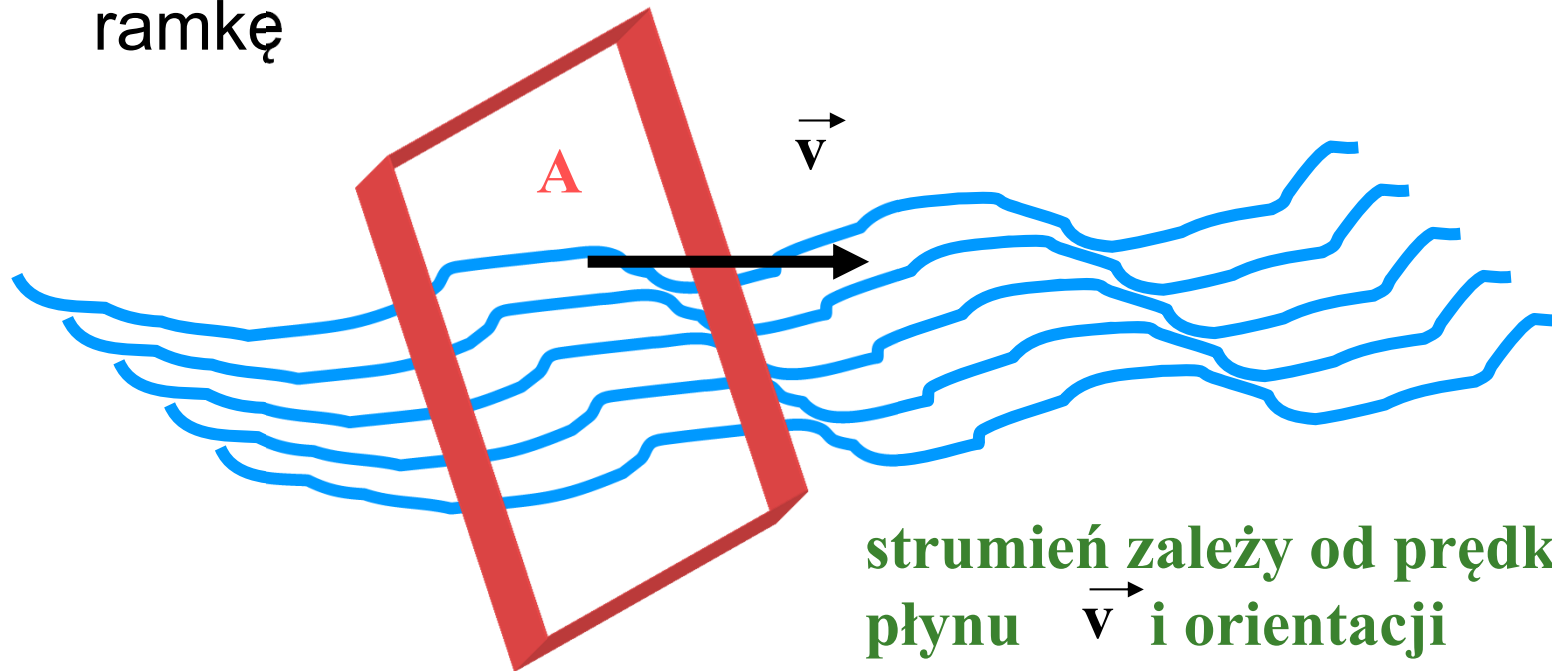
$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 y} \frac{Q}{\sqrt{4y^2 + L^2}}$$

(b) Przeprowadzić analizę otrzymanego wzoru dla $L \rightarrow \infty$



STRUMIEŃ

Φ - szybkość przepływu (powietrza, cieczy) przez powierzchnię A czyli objętość płynu przepływającego w jednostce czasu przez ramkę

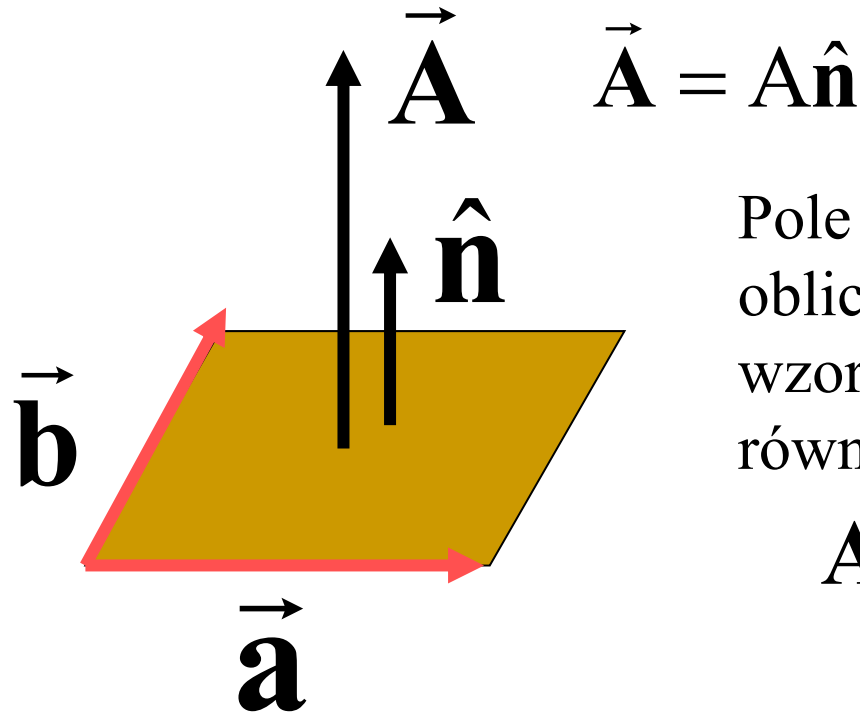


strumień zależy od prędkości płynu \vec{v} i orientacji płaszczyzny ramki

WEKTOR POWIERZCHNI

$\vec{\mathbf{A}}$ - wektor powierzchni

$\hat{\mathbf{n}}$ - wektor jednostkowy prostopadły do powierzchni



Pole powierzchni A
oblicza się zgodnie ze
wzorem na pole
równoległoboku

$$A = |\vec{\mathbf{a}} \times \vec{\mathbf{b}}|$$

STRUMIEŃ WIELKOŚCI WEKTOROWEJ

- Strumień wielkości \vec{v} przez powierzchnię A

$$\Phi_{\vec{v}} = \vec{v} \circ \vec{A} = vA \cos \theta$$

- Strumień pola elektrycznego

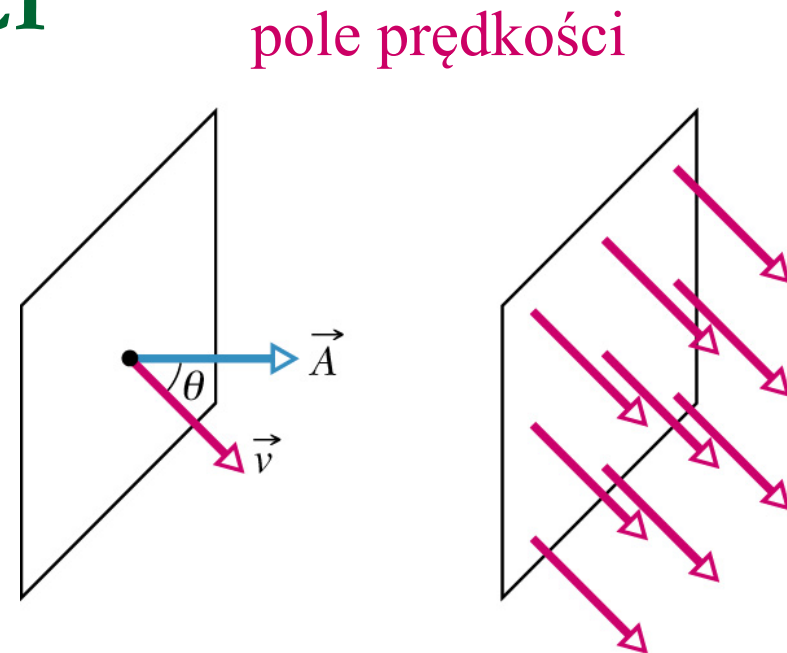
$$\Phi_E = \vec{E} \circ \vec{A}$$

Jednostka $1 \text{ Nm}^2/\text{C}$

- Strumień pola magnetycznego

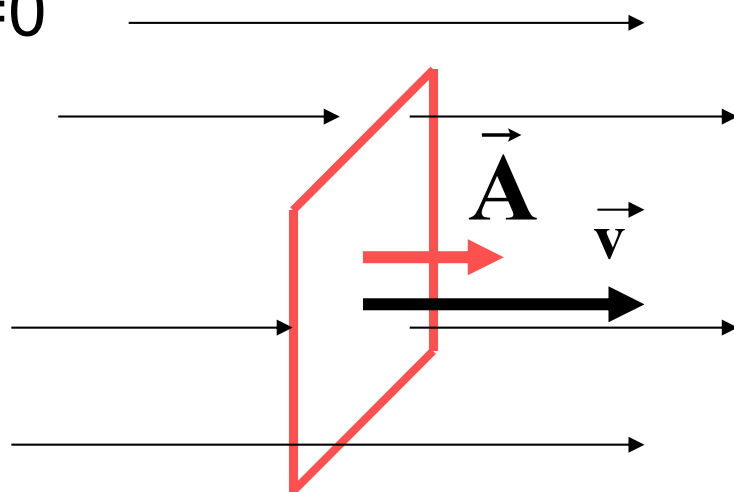
$$\Phi_B = \vec{B} \circ \vec{A}$$

Jednostka $1 \text{ Wb (weber)} = 1 \text{ T (tesla)} \text{ m}^2$



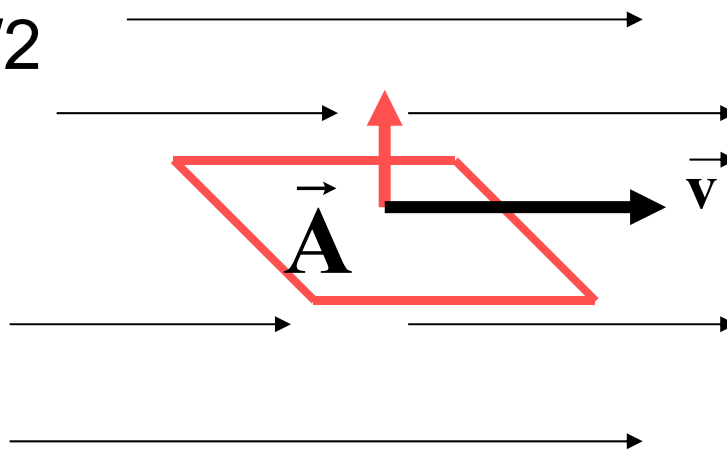
Przypadki szczególne:

- gdy $\theta=0$



$$\Phi_{\vec{v}} \max = vA$$

- gdy $\theta=\pi/2$



$$\vec{A} \perp \vec{v}$$
$$\Phi_{\vec{v}} = 0$$

STRUMIEŃ POLA ELEKTRYCZNEGO

– definicja

dla dowolnej powierzchni

$$\Delta\Phi_{\vec{E}} = \vec{E} \circ \Delta\vec{A}$$

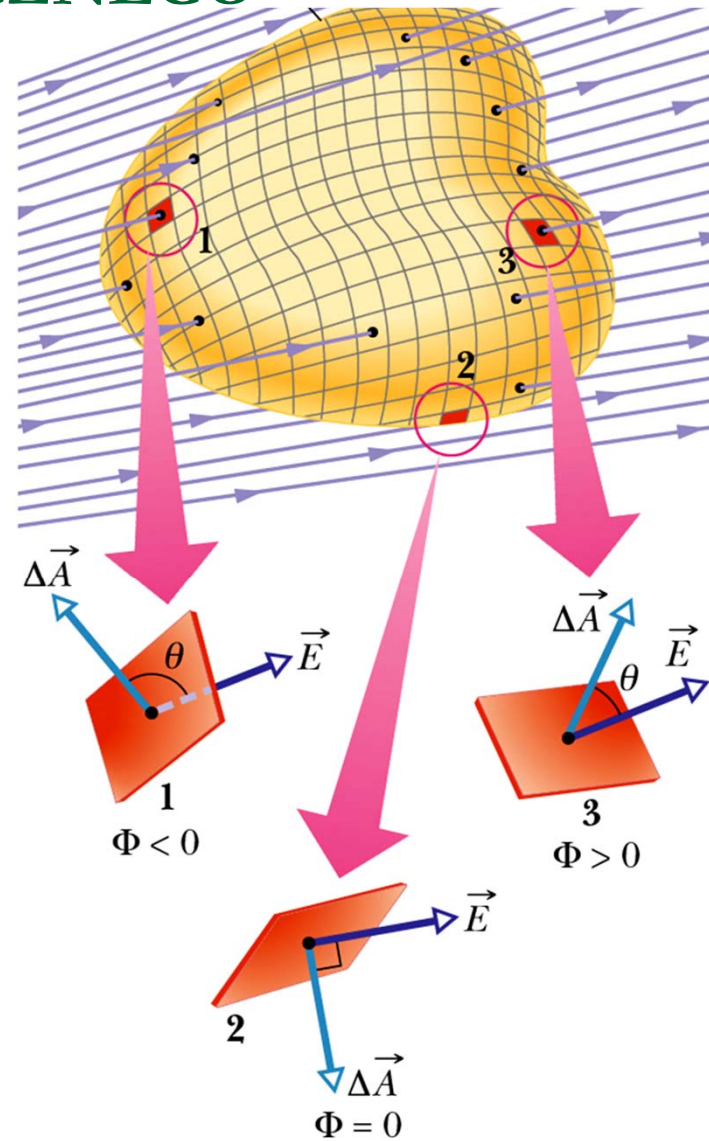
$$\Phi_{\vec{E}} = \sum \vec{E} \circ \Delta\vec{A}$$

$$\Phi_{\vec{E}} = \int \vec{E} \circ d\vec{A}$$

definicja

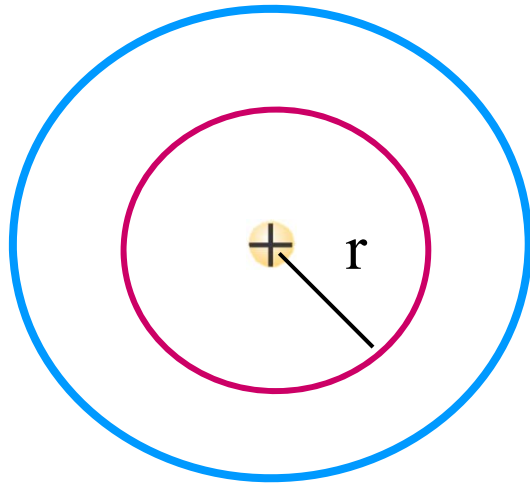
$$\oint \vec{E} \circ d\vec{A}$$

W prawie Gaussa występuje strumień przez powierzchnię zamkniętą



PRAWO GAUSSA

Dla ładunku punktowego, $E \sim 1/r^2$



Szacujemy strumień
pola przez
powierzchnię kuli Φ_E

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

Pole powierzchni kuli $A \sim r^2$

W miarę oddalania się od źródła pola, zwiększa się powierzchnia A ale maleje E , tak, że strumień pola (EA) pozostaje stały

PRAWO GAUSSA

Całkowity strumień pola elektrycznego przez powierzchnię zamkniętą zależy wyłącznie od ładunku elektrycznego zawartego wewnątrz tej powierzchni. Powierzchnię tę nazywamy powierzchnią Gaussa

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{wew}}}{\epsilon_0}$$

Prawo Gaussa dla pola elektrycznego w postaci całkowej
Jedno z równań Maxwella

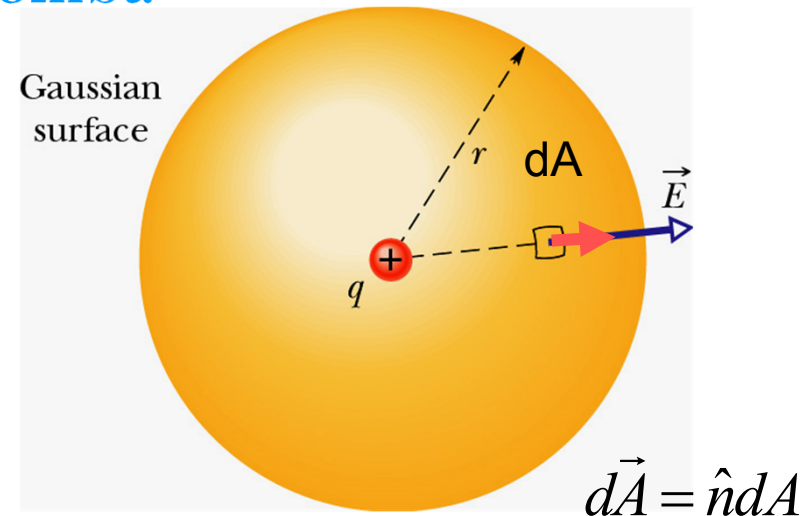
$$\oint_S \vec{E} \circ d\vec{A} = \frac{Q_{\text{wew}}}{\epsilon_0}$$

Właściwości powierzchni Gaussa:

- Powierzchnia Gaussa jest tworem hipotetycznym, matematyczną konstrukcją myślową,
- Jest dowolną powierzchnią zamkniętą, lecz w praktyce powinna mieć kształt związany w symetrią pola,
- Powierzchnię Gaussa należy tak poprowadzić aby punkt, w którym obliczamy natężenie pola elektrycznego leżał na tej powierzchni.

- **Prawo Gaussa** stosujemy do obliczania natężenia pola elektrycznego gdy znamy rozkład ładunku lub do znajdowania rozkładu ładunku gdy znamy pole.
- **Prawo Gaussa** możemy stosować **zawsze** ale sens ma to tylko w tym przypadku gdy pole elektryczne wykazuje symetrię (sferyczną, cylindryczną).
- Aby skutecznie skorzystać z **prawa Gaussa** trzeba **coś wiedzieć** o polu elektrycznym na wybranej powierzchni Gaussa.
- Korzystając z prawa Gaussa można wykazać równoważność prawa Gaussa z empirycznym prawem Coulomba

Od prawa Gaussa do prawa Coulomba



1. Ładunek punktowy q otaczamy powierzchnią Gaussa – sferą o promieniu r (dlaczego?).

Bo wiemy, że pole ładunku punktowego ma symetrię sferyczną (A co to znaczy?)

$$\begin{aligned} \vec{E} &\parallel \hat{n} \\ \cos 0 &= 1 \end{aligned}$$

$E = \text{const.}$ na pow. sfery

2. Obliczamy całkowity strumień przez powierzchnię Gaussa

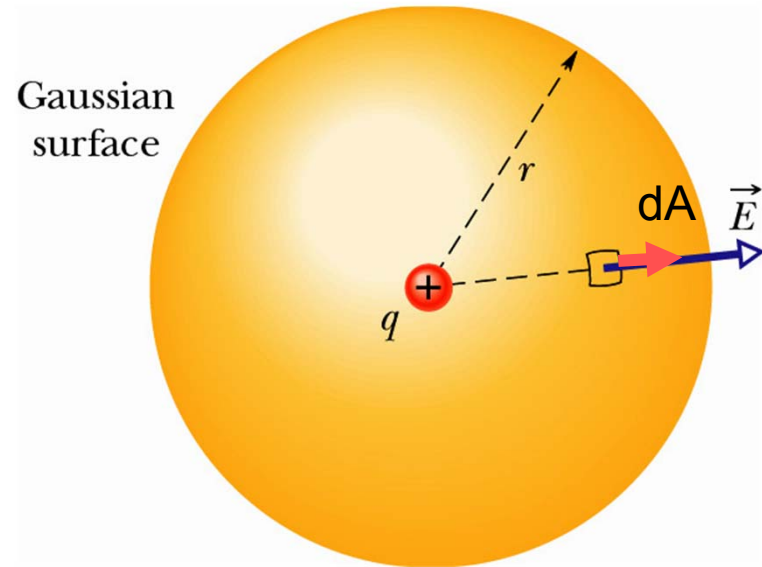
$$\Phi_E = \oint \vec{E} \circ d\vec{A} = \oint E \cos\theta dA = \oint E dA$$

Od prawa Gaussa do prawa Coulomba

$$d\vec{A} = \hat{n}dA$$

3. Korzystamy z faktu, że E jest stałe co do wartości na powierzchni Gaussa

$$\Phi_E = E \oint dA = E(4\pi r^2)$$



4. Korzystamy z prawa Gaussa

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}$$

5. Porównujemy stronami:

$$E(4\pi r^2) = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\longrightarrow E(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Prawo Coulomba

ZASTOSOWANIA PRAWA GAUSSA

W praktyce zastosowanie prawa Gaussa jest ograniczone do konkretnych przypadków - symetrii:

- a) pole (**jednorodne**) od naładowanej nieskończonej płaszczyzny (powierzchniowy rozkład ładunku)
- b) pole (**o symetrii cylindrycznej**) od nieskończenie długiego pręta (liniowy rozkład ładunku) lub walca (powierzchniowy rozkład ładunku – walec przewodzący, objętościowy rozkład ładunku - walec nie przewodzący)
- c) pole (**o symetrii sferycznej**) od naładowanej kuli lub powierzchni sferycznej

JAK KORZYSTAĆ Z PRAWA GAUSSA?

1. Wybrać właściwą powierzchnię Gaussa – dopasowaną do symetrii rozkładu ładunku. Uzasadnić ten wybór. Wykonać odpowiedni rysunek
2. Obliczyć strumień pola elektrycznego przez powierzchnię Gaussa (*lewa strona prawa Gaussa*).
3. Znaleźć ładunek zawarty wewnątrz powierzchni Gaussa (*prawa strona prawa Gaussa*).
4. Porównać obie strony prawa Gaussa wyznaczając wartość wektora natężenia pola elektrycznego E .

Przykład 1-2. Pole elektryczne nieskończonej powierzchni

- Całkowity strumień przez powierzchnię Gaussa

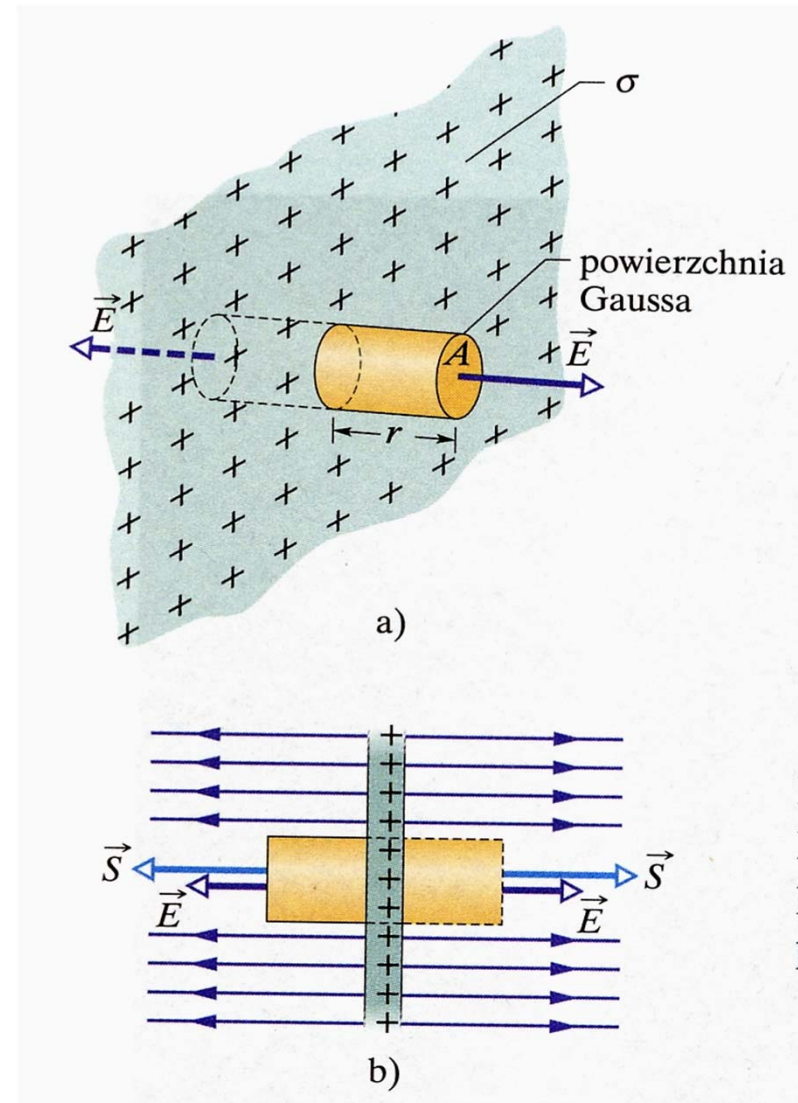
$$\Phi_E = 2ES$$

- Z prawa Gaussa

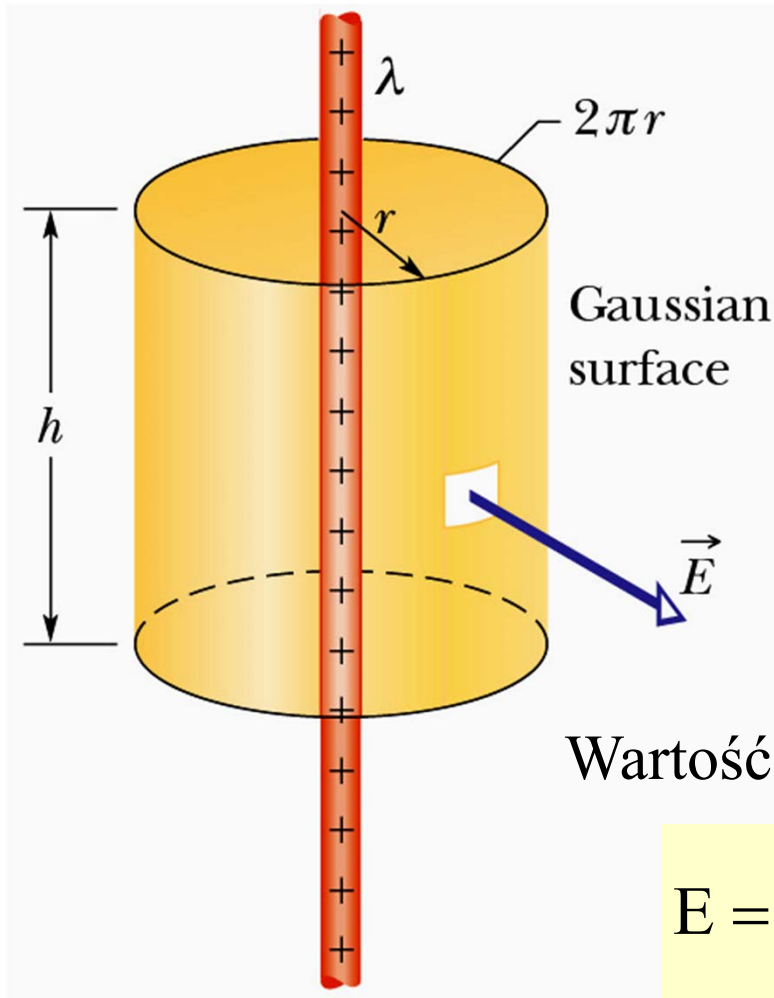
$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma S}{\epsilon_0}$$

- Wartość wektora natężenia pola

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$



Przykład 1-3. Pole elektryczne liniowego rozkładu ładunku



Całkowity strumień przez powierzchnię Gaussa

$$\Phi_E = 2\pi rhE$$

Całkowity ładunek zawarty wewnątrz powierzchni Gaussa

$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\lambda h}{\epsilon_0}$$

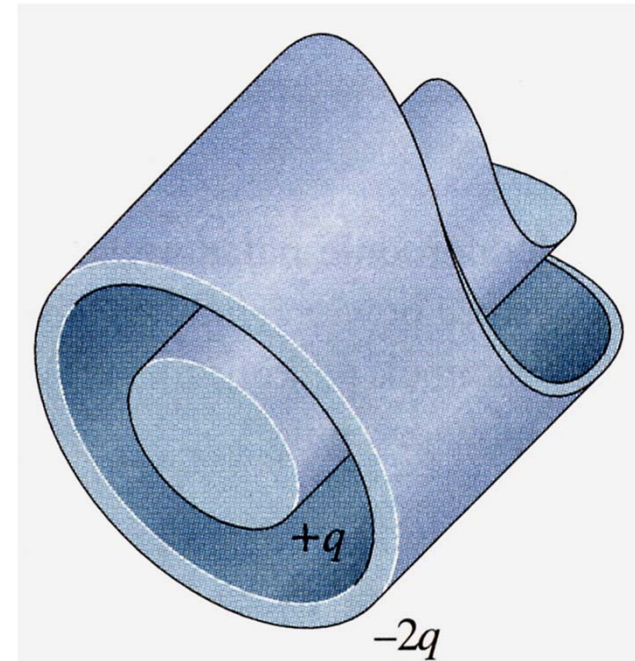
Wartość wektora natężenia pola elektrycznego

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

symetria cylindryczna

Zadanie domowe 1-4.

Bardzo długi walcowy pręt przewodzący o długości L całkowitym ładunku $+q$ jest otoczony przewodzącą walcową powłoką (także o długości L) i całkowitym ładunku $-2q$ (jak na rysunku). Korzystając z prawa Gaussa, znajdź: (a) natężenie pola elektrycznego w punktach na zewnątrz przewodzącej powłoki, (b) rozkład ładunku na powłoce, (c) natężenie pola elektrycznego w obszarze między powłoką i prętem



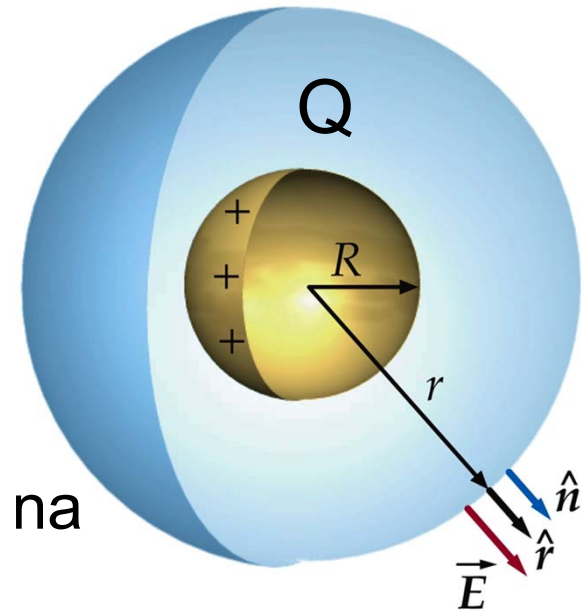
Przykład 1-4. Pole elektryczne sferycznego rozkładu ładunku – powłoka sferyczna

Całkowity strumień przez powierzchnię Gaussa będącą sferą o promieniu r wynosi:

$$\Phi_E = 4\pi r^2 E$$

Z prawa Gaussa:
$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Ładunek całkowity Q jest rozłożony tylko na powierzchni sfery o promieniu R



Ze względu na rozkład ładunku rozważmy dwa przypadki:

■ $r > R$

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

Pole na zewnątrz pustej powłoki sferycznej jest takie jakby cały ładunek był skupiony w środku kuli

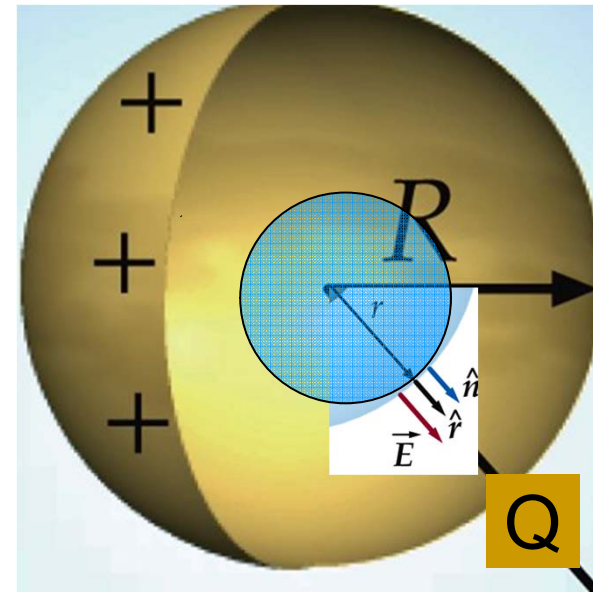
Przykład 1-4 cd

- $r < R$

wewnątrz powierzchni

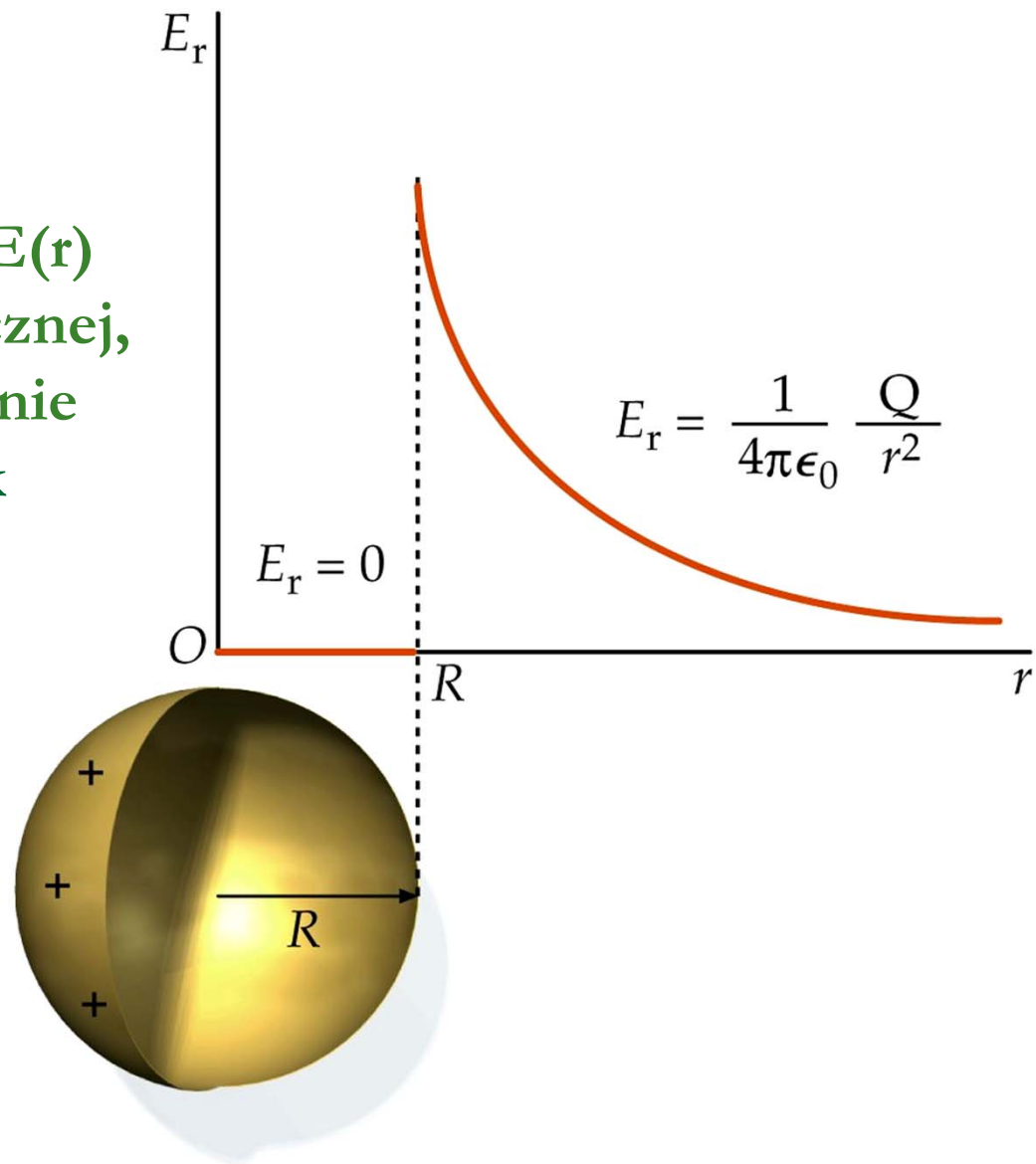
Gausa tj. sfery o promieniu r
nie ma ładunku

czyli $Q=0$, $\Phi_E=0$ a zatem $E=0$



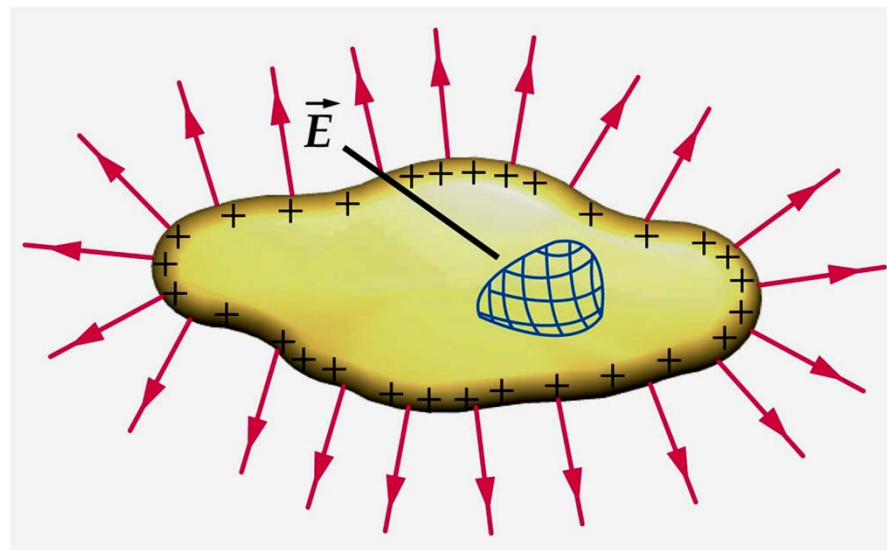
Pole wewnątrz naładowanej powłoki sferycznej wynosi zero

Rozkład natężenia pola $E(r)$
dla pustej powłoki sferycznej,
o promieniu R , jednorodnie
naładowanej (Q -ładunek
całkowity)



Pole elektryczne przewodnika

- Ładunek znajduje się tylko na powierzchni przewodnika
- Wewnątrz przewodnika $Q=0$, a zatem $E=0$
- Na powierzchni przewodnika wektor natężenia pola \vec{E} jest prostopadły do tej powierzchni



Pole elektryczne na powierzchni przewodnika

- Całkowity strumień przez powierzchnię Gaussa

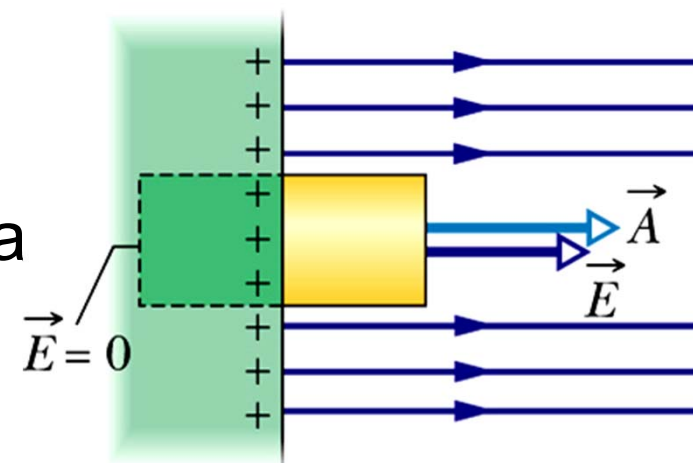
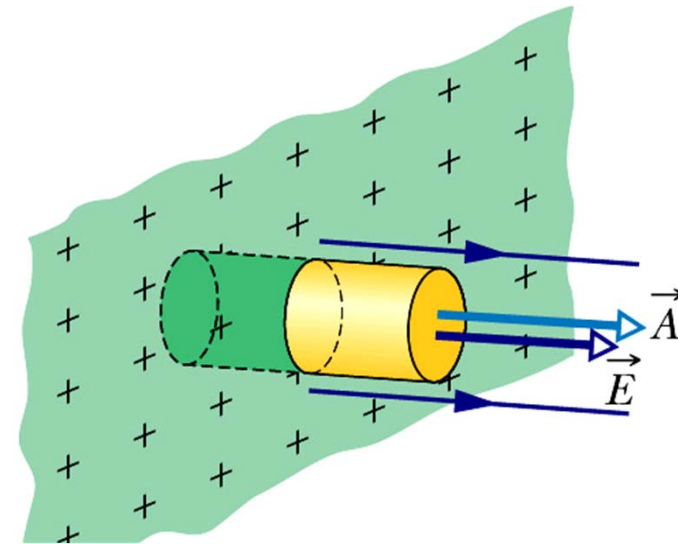
$$\Phi_E = EA$$

- Z prawa Gaussa

$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

- Wartość wektora natężenia pola

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$



Związek strumienia z operatorem dywergencji

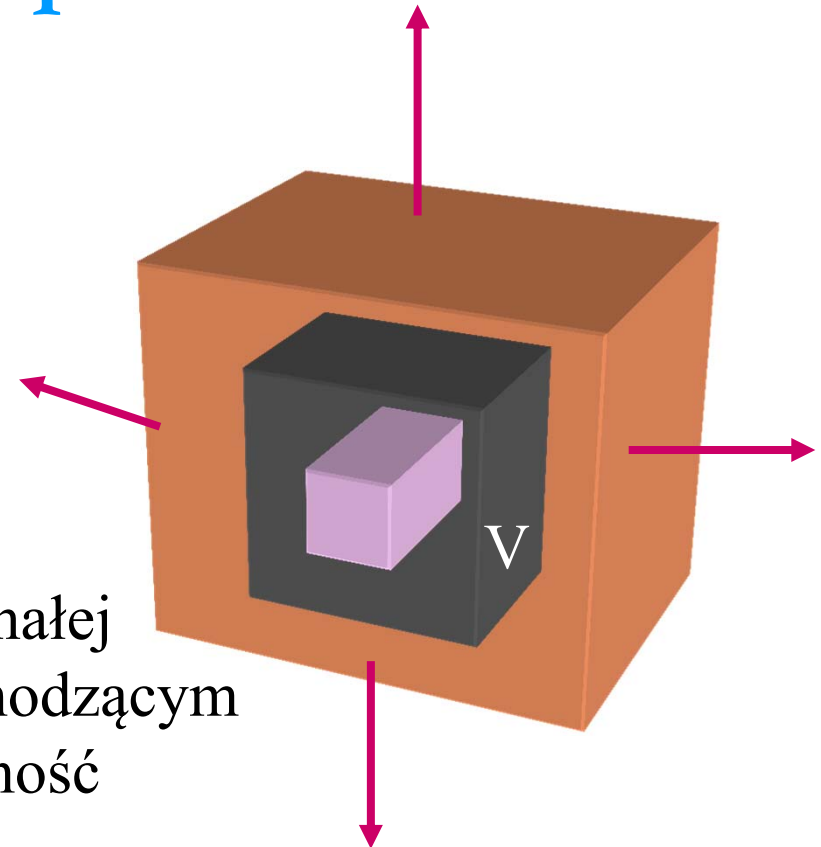
Definicja operatora dywergencji

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{E}} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oint \vec{\mathbf{E}} \circ d\vec{\mathbf{A}}}{V}$$

$\operatorname{div} \vec{\mathbf{E}}$ jest w granicy nieskończenie małej objętości V , strumieniem wychodzącym ze źródła i określa jego wydajność

Twierdzenie Gaussa-Ostrogradskiego

$$\oint_S \vec{\mathbf{E}} \circ d\vec{\mathbf{A}} = \iiint_V \operatorname{div} \vec{\mathbf{E}} dV$$



PRAWO GAUSSA w postaci RÓŻNICZKOWEJ

Korzystamy z twierdzenia Gaussa-Ostrogradskiego:

$$\oint_S \vec{\mathbf{E}} \circ d\vec{\mathbf{A}} = \iiint_V \operatorname{div} \vec{\mathbf{E}} dV$$

Z prawa Gaussa w postaci całkowej:

$$\oint_S \vec{\mathbf{E}} \circ d\vec{\mathbf{A}} = \frac{Q_{wew}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_V \rho dV$$

Porównując wyrażenia podcałkowe:

$$\operatorname{div} \vec{\mathbf{E}} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

POTENCJAŁ

- Wektor natężenia pola – istnieje zawsze

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

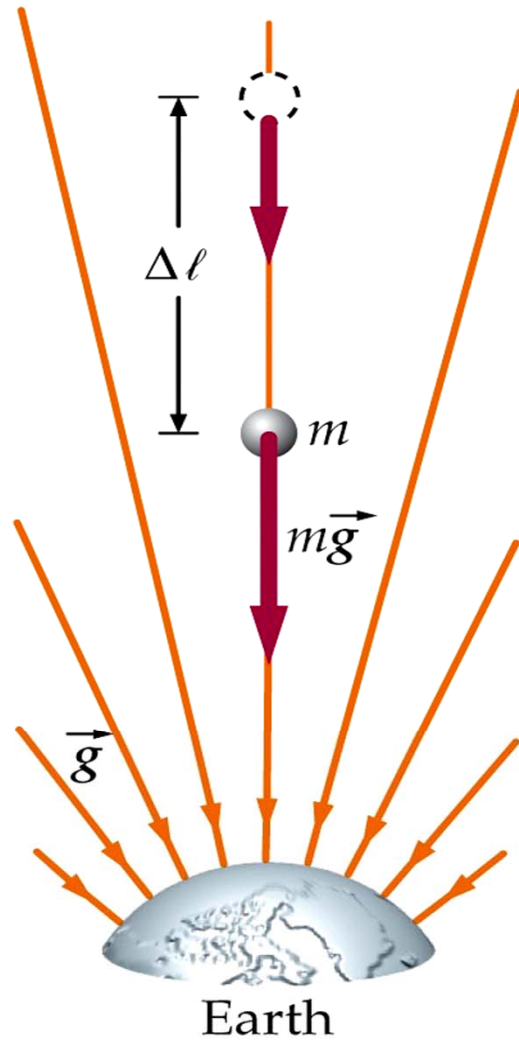
definicja

- Potencjał (skalar) – istnieje tylko dla pól zachowawczych (potencjalnych)

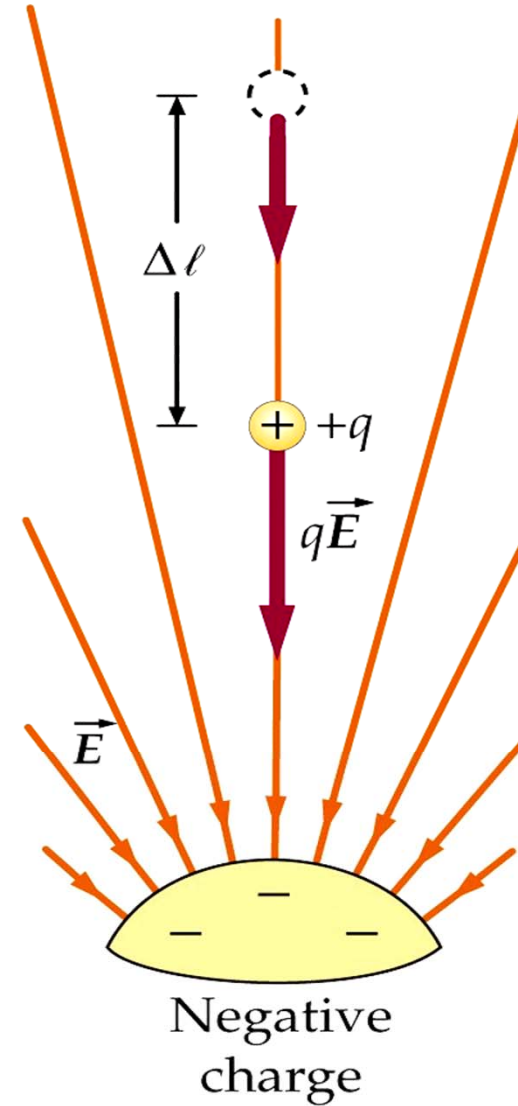
$$V = \frac{E_p}{q_0}$$

definicja

Wielkości charakteryzujące:	oddziaływanie pomiędzy ładunkami punktowymi	pole elektrostatyczne
siła \vec{F}	$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$	
energia potencjalna E_p	$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$	
natężenie \vec{E}		$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$
potencjał V		$V = \frac{E_p}{q_0}$




pole grawitacyjne



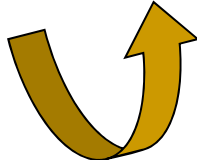
pole elektrostatyczne ładunku ujemnego

Związek potencjału z natężeniem pola


Dla dowolnej siły zachowawczej, zmiana energii potencjalnej dE_p dana jest:

$$dE_p = \underbrace{-\vec{F} \circ d\vec{l}}_{\text{praca } dW} = -q_0 \vec{E} \circ d\vec{l}$$


Z definicji potencjału:

$$dV = \frac{dE_p}{q_0}$$


$$dV = -\vec{E} \circ d\vec{l}$$

$$\vec{E} = -\text{grad } V$$


$$V_b - V_a = -\int_a^b \vec{E} \circ d\vec{l}$$

$$V_b - V_a = - \int_a^b \vec{E} \circ d\vec{l} \quad \Rightarrow \quad \Delta V = V_b - V_a = - \frac{W}{q_0}$$

Różnica potencjałów ΔV między dwoma punktami jest równa wziętej z przeciwnym znakiem pracy W wykonanej przez siłę elektrostatyczną, przy przesunięciu jednostkowego ładunku z jednego punktu do drugiego.

Różnicę potencjałów nazywamy napięciem $U = \Delta V$

Jednostki

Na podstawie wzoru $V = \frac{E_p}{q_0}$

- jednostką potencjału jest volt $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$
- elektronowolt 1 eV jako jednostka energii w skali atomowej

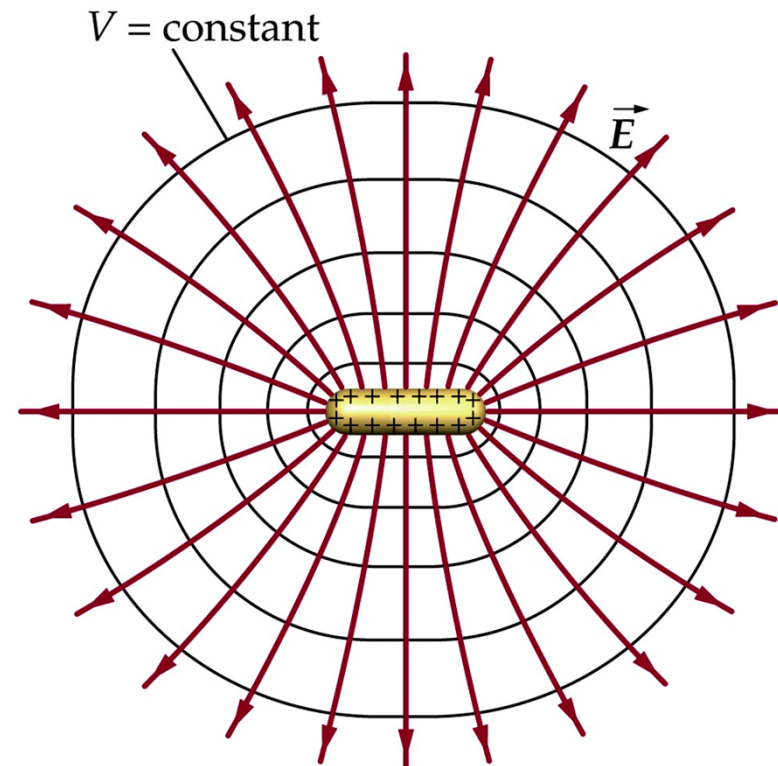
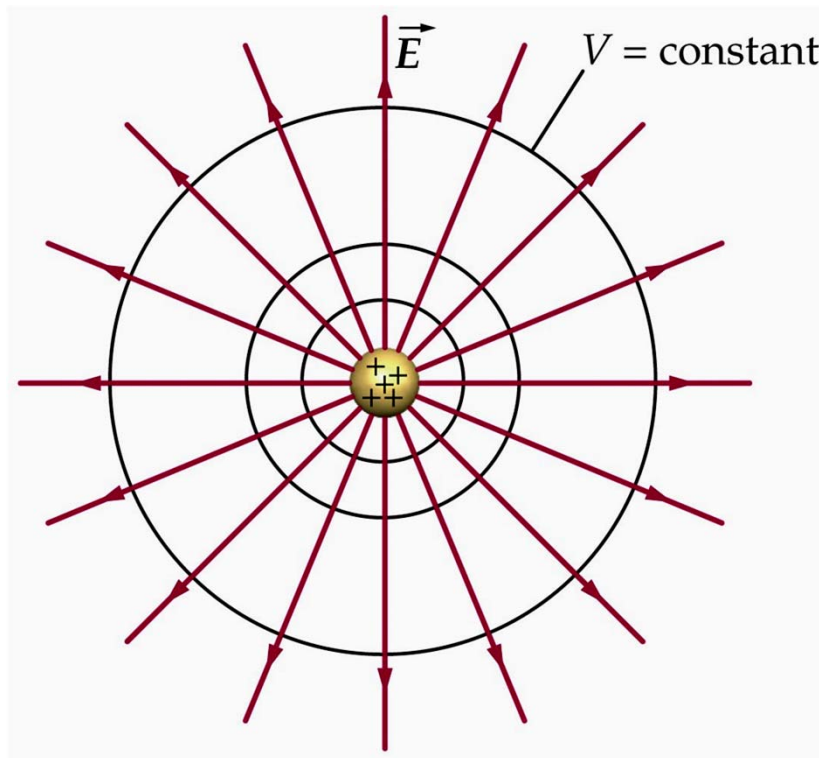
Jest to energia równa pracy, potrzebnej do przesunięcia pojedynczego ładunku elementarnego e , na przykład elektronu lub protonu, między punktami o różnicy potencjałów równej jednemu voltowi

$$1 \text{ eV} = e (1\text{V}) = (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) (1 \text{ J/C}) = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

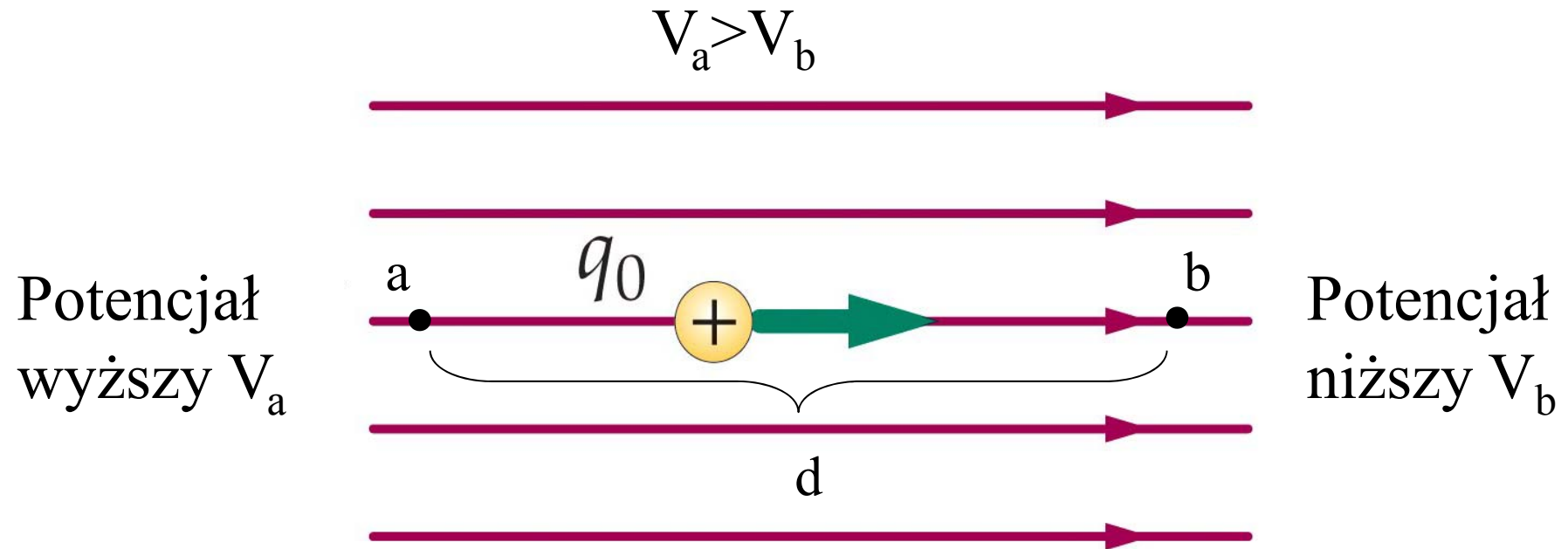
Na podstawie wzoru $V_b - V_a = -\int_a^b \vec{E} \circ d\vec{l}$

- nowa jednostka natężenia pola elektrycznego 1 V/m

Powierzchnie ekwipotencjalne- powierzchnie stałego potencjału



Potencjał pola jednorodnego



$$V_b - V_a = -\int_a^b \vec{\mathbf{E}} \circ d\vec{\mathbf{l}} = -\int_a^b E dl = -E \int_a^b dl = -E(b - a) = -Ed$$

Potencjał pola ładunku punktowego

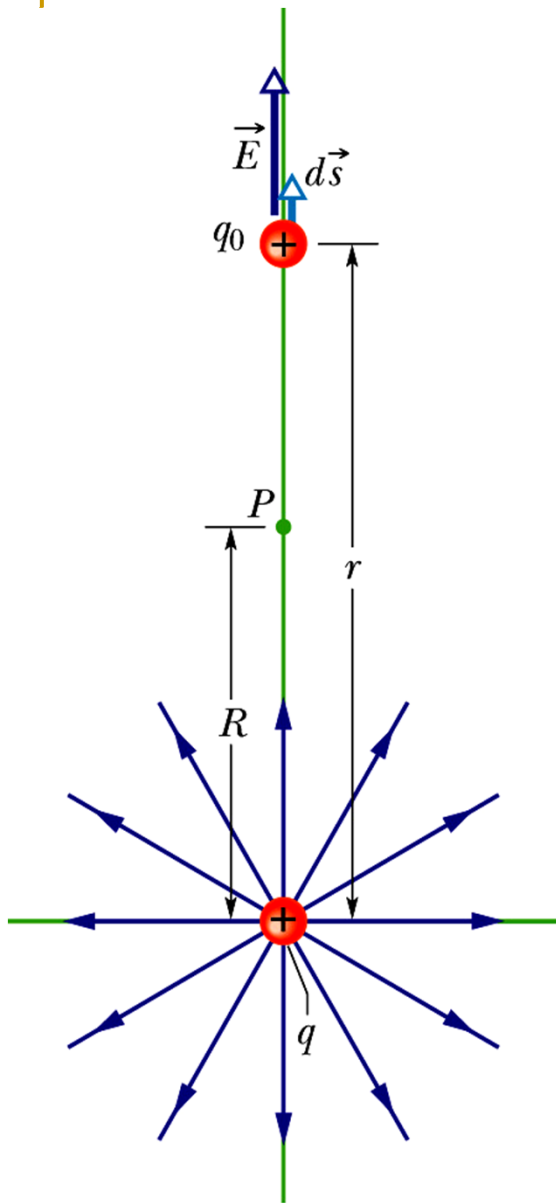
Przesuwamy ładunek próbny q_0 z punktu P do nieskończoności

$$\vec{E} \circ d\vec{s} = E ds \cos\theta$$

$$V_\infty - V_P = -\int_R^\infty \vec{E} \circ d\vec{s} = -\int_R^\infty E dr \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

Przyjmujemy $V_\infty=0$

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

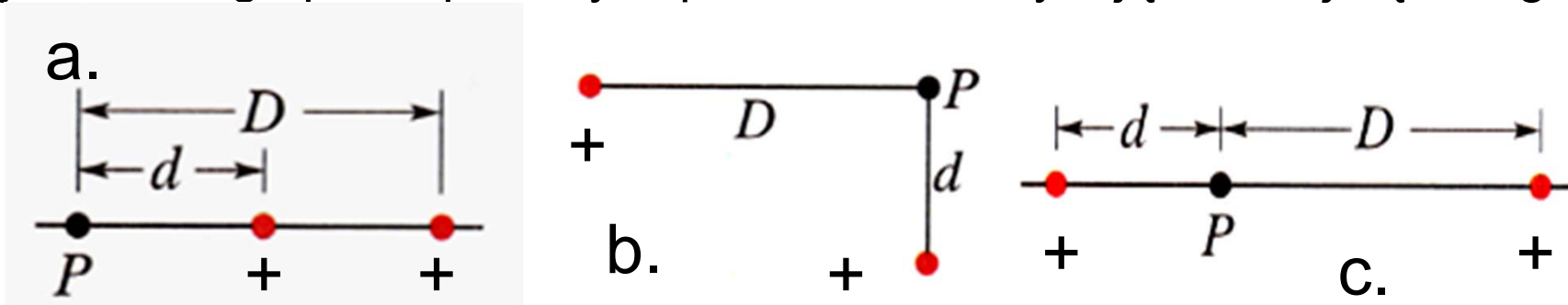


Potencjał dla dyskretnego rozkładu ładunku

Wypadkowy potencjał V układu n ładunków punktowych q_i obliczamy korzystając z zasady superpozycji

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}$$

Zadanie domowe 1-5 Na rysunku przedstawiono trzy układy, zawierające po dwa protony. Uszereguj te układy według wypadkowego potencjału pola, wytworzonego przez protony w punkcie P , zaczynając od największego.

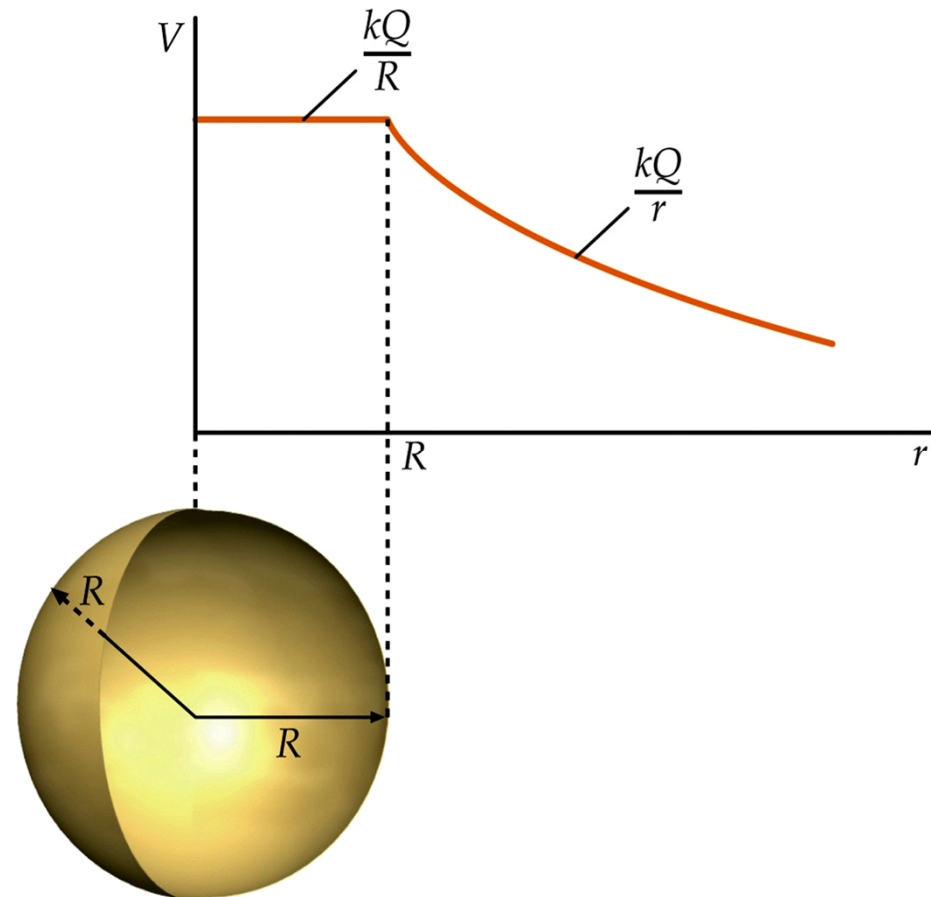


Potencjał ciągłego rozkładu ładunku

Dla naładowanej ładunkiem powierzchniowym Q powłoki sferycznej gdy $r < R$, $E = 0$, czyli potencjał V jest wielkością stałą, niezależną od r .

Dla $r > R$, V zanika z odległością r jak $1/r$

Zadanie domowe 1-6 Pokazać (obliczając), że potencjał dla powłoki sferycznej wykazuje taką zależność $V(r)$ jak na powyższym wykresie



POJEMNOŚĆ

- Definicja

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

Jednostką pojemności jest 1F (farad). W praktyce używamy μF , pF , nF

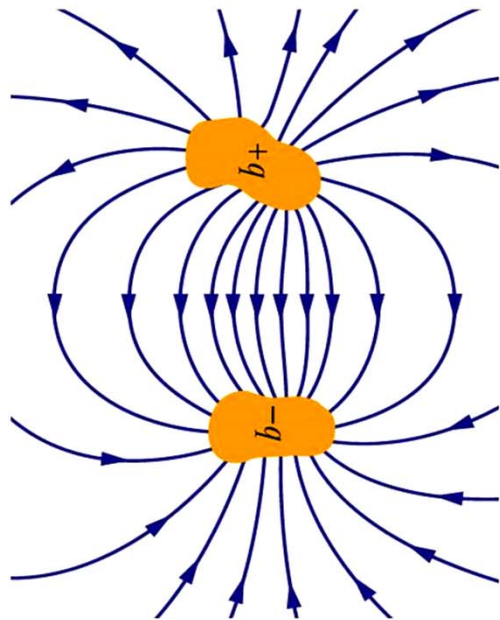
Analogia między kondensatorem mającym ładunek q i sztywnym zbiornikiem o objętości ϑ , zawierającym n moli gazu doskonałego:

$$n = \frac{\vartheta}{RT} p \qquad q = C\Delta V$$

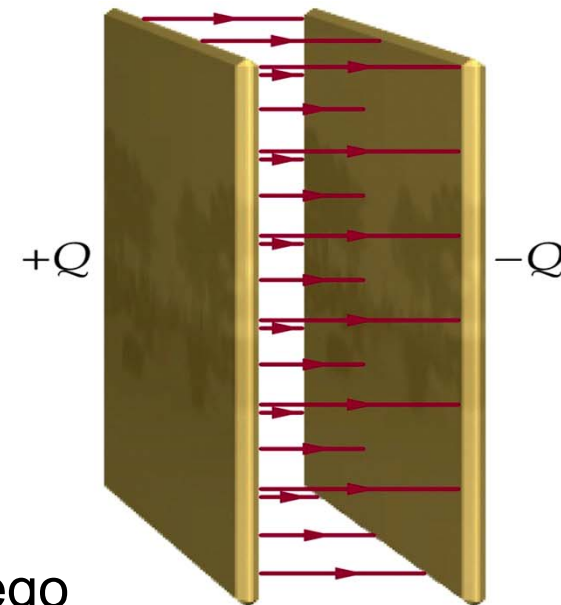
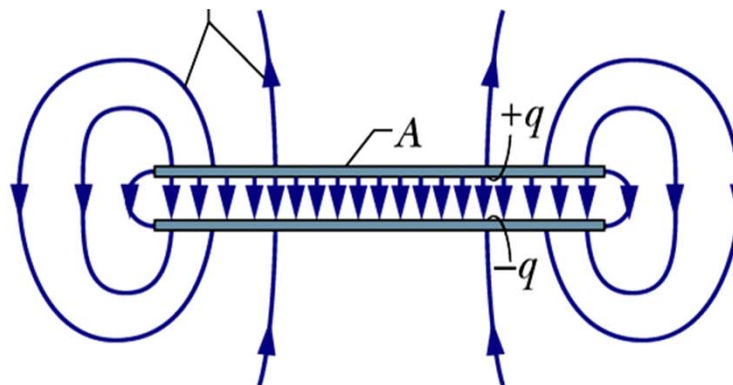
Przy ustalonej temperaturze T , pojemność kondensatora C pełni podobną funkcję jak objętość zbiornika

Kondensator

- Służy do magazynowania energii
- Stanowi istotny element obwodu



Linie pola elektrycznego



POJEMNOŚĆ KONDENSATORA PŁASKIEGO

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 A}$$



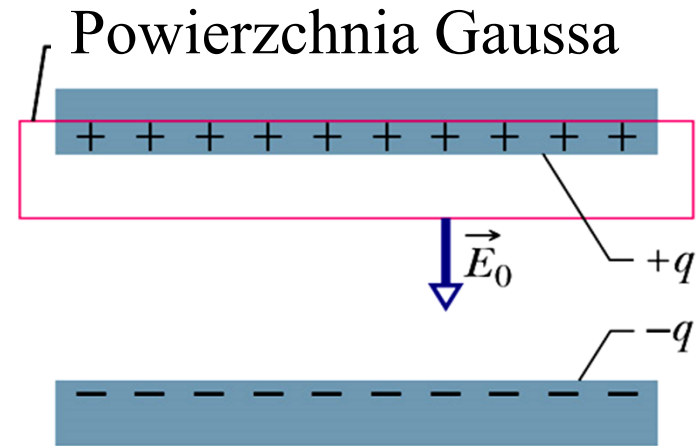
$$q = E_0 \epsilon_0 A$$

Dla pola jednorodnego pokazaliśmy, że

$$V = E_0 d$$

z definicji pojemności

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$



Pojemność zależy tylko od parametrów geometrycznych: A-powierzchni okładki, d-odległości okładek

Przykład 1-5: Jaka musiałaby być powierzchnia okładki kondensatora płaskiego, aby, przy odległości okładek $d=1$ mm, uzyskać pojemność $C=1$ F?

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad \longrightarrow \quad A = \frac{Cd}{\epsilon_0}$$

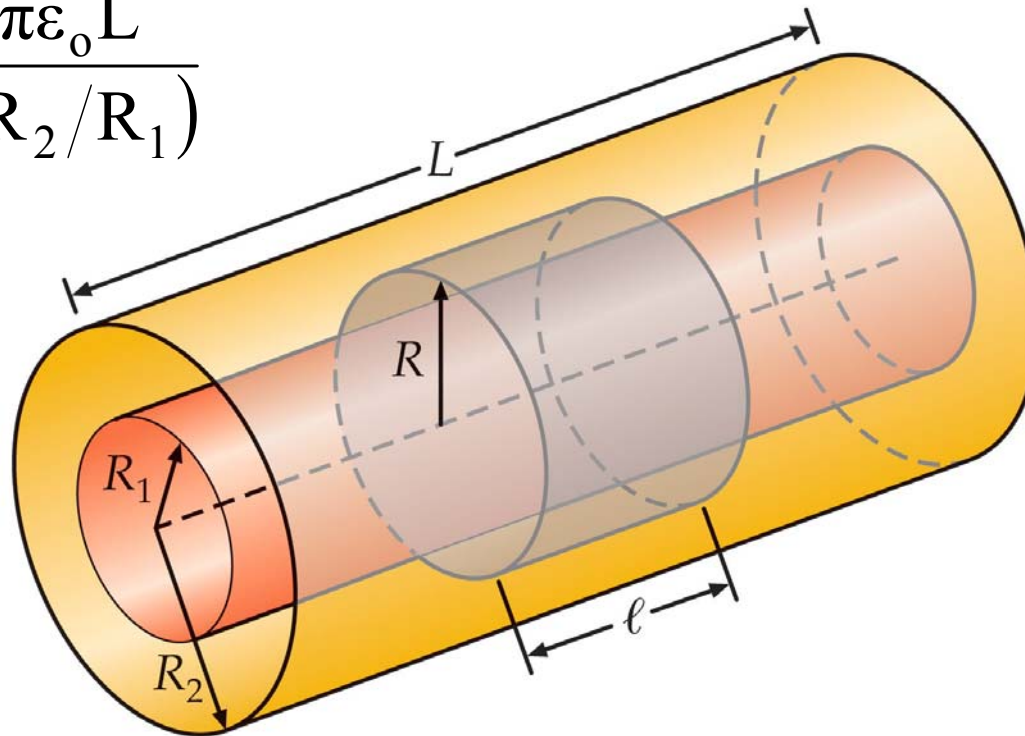
$$A = \frac{1 \text{ F} \cdot 10^{-3} \text{ m}}{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2} = 1,13 \cdot 10^8 \text{ m}^2$$

mało praktyczne rozwiązanie!!!

Zadanie domowe 1-7

Udowodnić, że pojemność kondensatora cylindrycznego wyraża się wzorem

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(R_2/R_1)}$$



Energia zmagazynowana w polu elektrycznym

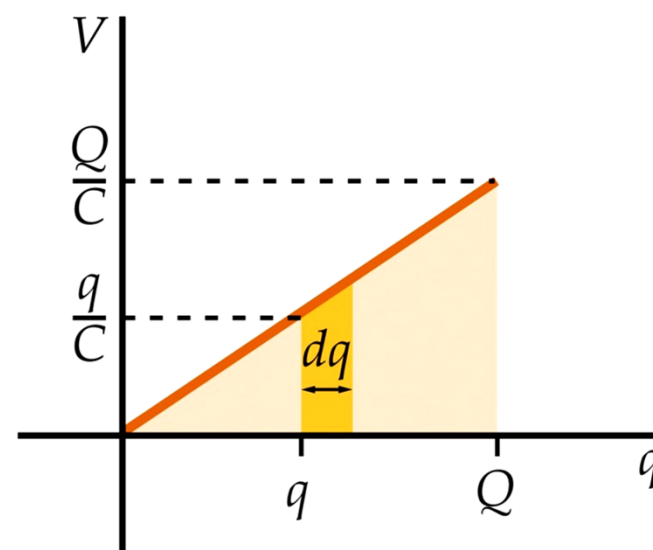
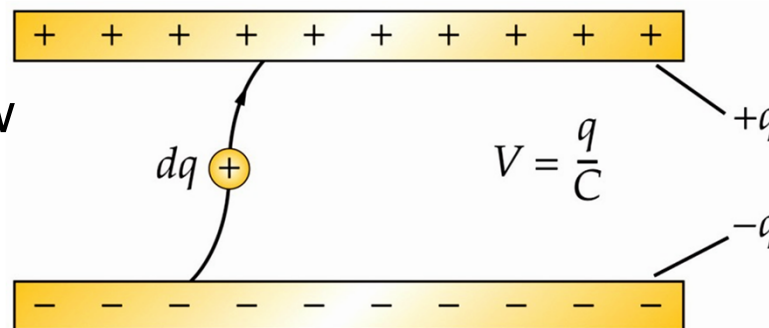
Praca W wykonana przy ładowaniu kondensatora zostaje zmagazynowana w postaci elektrycznej energii potencjalnej E_E , w polu elektrycznym między okładkami.

Praca elementarna dW wykonana gdy zostaje przeniesiony dodatkowy ładunek dq wynosi

$$dW = Vdq = \frac{q}{C} dq$$

$$W = \int dW = \int \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

$$W = E_E = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2$$



Gęstość energii

Gęstość energii u_E jest to energia potencjalna przypadająca na jednostkę objętości

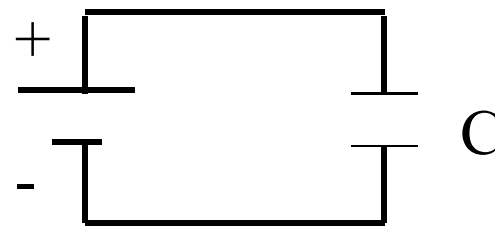
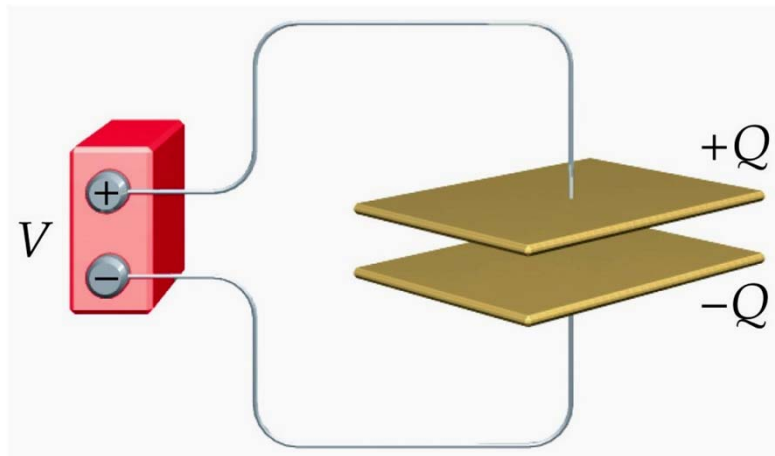
$$u_E = \frac{E_E}{Ad} = \frac{CV^2}{2Ad} \quad C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{V}{d} \right)^2$$

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

Kondensator w obwodzie

Przykład 1-6: Kondensator o pojemności $C=6 \mu\text{F}$ jest podłączony do zacisków 9 V baterii. Jaki ładunek zgromadzi się na okładkach kondensatora?



$$Q=CV=54 \mu\text{C}$$

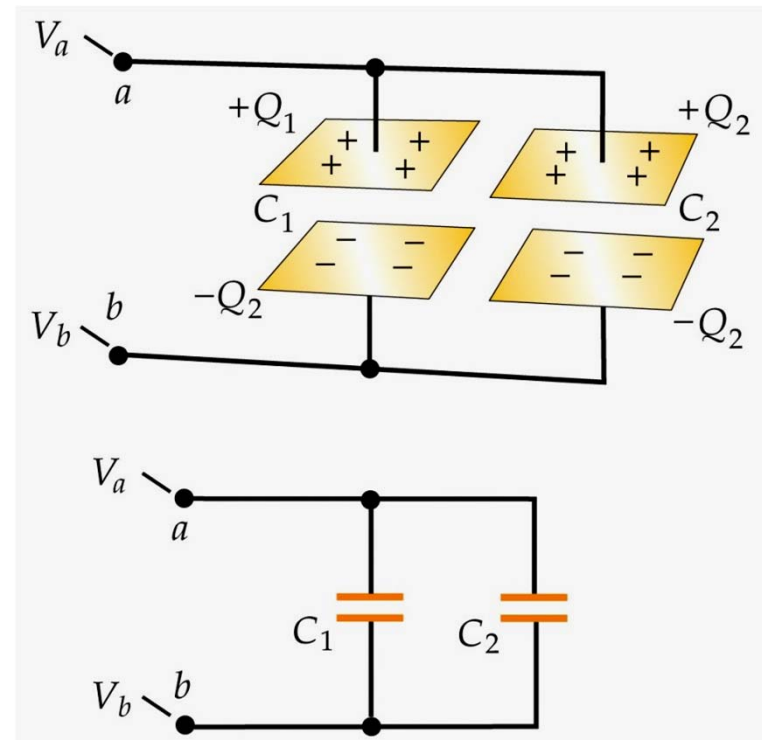
Połączenie równoległe kondensatorów

$$V_a - V_b = U_1 = U_2 = U \quad \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q}{C} = U$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 U + C_2 U = (C_1 + C_2) U$$

$$C = C_1 + C_2$$

Pojemność kondensatora zastępczego

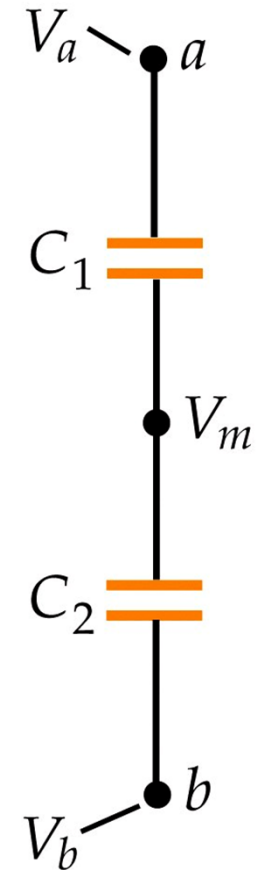
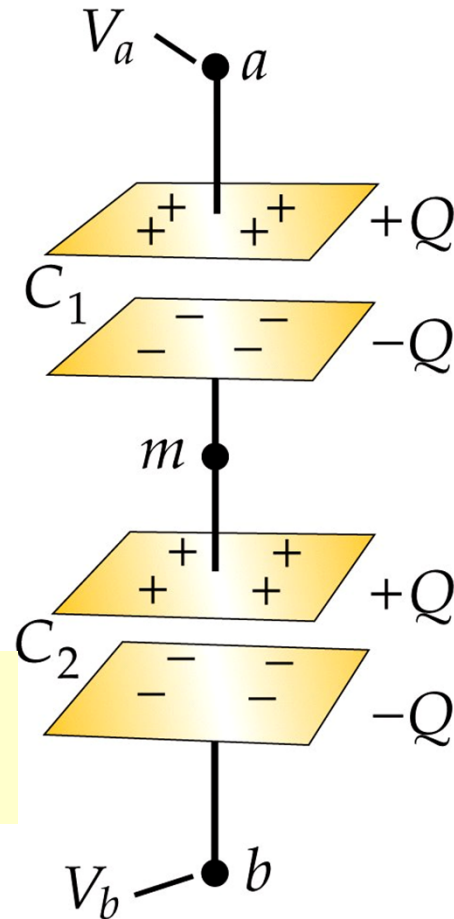


Połączenie szeregowe kondensatorów

$$U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

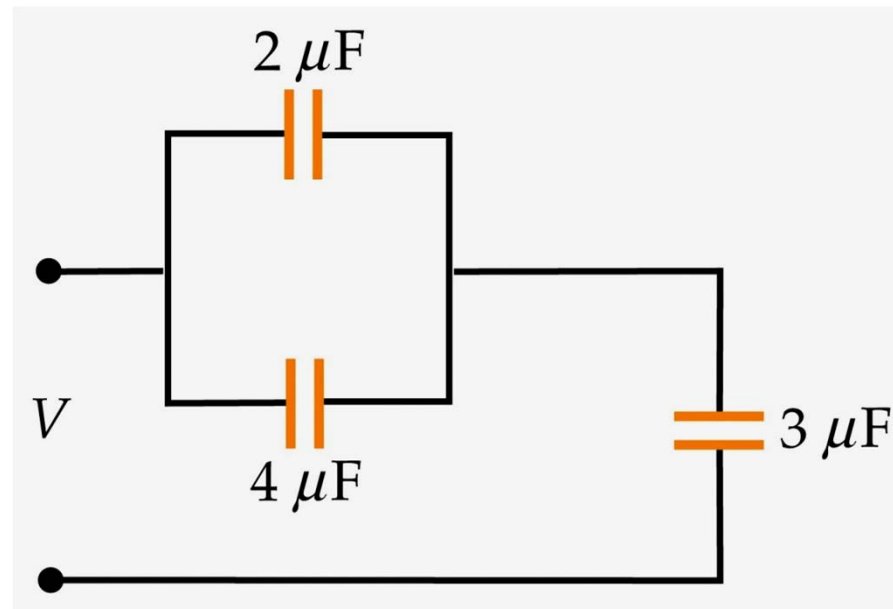
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Pojemność kondensatora zastępczego



Zadanie domowe 1-8

- (a) Znajdź pojemność zastępczą układu kondensatorów przedstawionych na rysunku
- (b) Znajdź ładunek i spadek potencjału na każdym kondensatorze jeżeli układ podłączono do baterii 6V.



PODSUMOWANIE

- Elektrostatyka opisuje pola statyczne utworzone przez ładunki elektryczne w spoczynku.
- Pole elektrostatyczne jest zachowawcze (potencjalne). Pole to jest charakteryzowane przez wektor natężenia pola i potencjał.
- Wartość natężenia pola pochodzącego od konkretnych rozkładów ładunku obliczamy bądź z zasady superpozycji i prawa Coulomba bądź z prawa Gaussa.
- Kondensator jest urządzeniem, w którym magazynowana jest potencjalna energia elektrostatyczna. Gęstość energii zmagazynowanej jest proporcjonalna do kwadratu pola E .
- Prawo Gaussa w postaci całkowej lub różniczkowej stanowi jedno z równań Maxwella