

ELEKTROSTATYKA



Definicje i założenia wstępne

Definicja postulatywna

1. Ładunek elektryczny jest cechą własną niektórych cząstek elementarnych (elektron, pozyton)
2. Ładunek elektryczny tych cząstek elementarnych ma stałą wartość,
3. obecność ładunku przejawia się oddziaływaniem między naładowanymi cząstkami (ciałami),
4. istnieją dwa rodzaje ładunku elektrycznego,

Definicja 1

Ładunek cząstki elementarnej jest ładunkiem elementarnym oznaczanym $(+e)$ lub $(-e)$;

taką – a także i inne naładowane cząstki nazywamy nośnikami ładunku

Reguły i problemy

- **Dualność ładunku** \implies przejaw symetrii przyrody;
Symetria materia - antymateria
Symetria tej samej własności jak np. symetria prawy - lewy ?
(Prawo E. Noether – operacja odbicia lustrzanego)
Najmniejsze ilości przeciwnych ładunków są dokładnie równe,
pozyton \neq elektron
Ładunek protonu jest dokładnie równy ładunkowi elektronu !?
- **Ziarnistość ładunku** (kwantyzacja)
Dlaczego nie mogą istnieć ładunki $\frac{1}{2} e$ lub $0,99 e$?
- **Niezmienniczość ładunku:** jak zmieniają się własności ładunku, który się porusza?
 1. Dokładnie obojętne elektrycznie - atom wodoru i atom helu
 2. Widma optyczne izotopów

Wniosek 1

Każdy makroskopowy ładunek jest zbiorem ładunków elementarnych, więc jest całkowitą wielokrotnością (e), jest więc skwantowany:

$$q = N e, \quad N - \text{liczba całkowita}$$

(liczba elementarnych cząstek naładowanych)

Uwaga 1

Wielkość ładunku jest niezmiennikiem relatywistycznym
(przekształceń Lorentza)

Twierdzenie o stałości ładunku

Sumaryczny ładunek (z uwzględnieniem znaku)
układu elektrycznie izolowanego jest stały

(Prawo E. Noether – operacja zmiany znaku fazy kwant.-mech.)

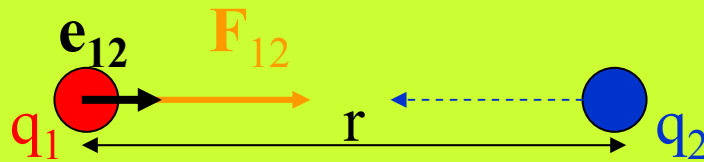
Uwaga 2

Ładunki elektryczne mogą powstawać i znikać parami
($+e$ i $-e \Rightarrow$ proces kreacji i anihilacji)

Oddziaływania elektryczne - opis bezpośredni

Prawo Coulomba (1875):

oddziaływania dwóch ładunków punktowych q_1, q_2



$$\mathbf{F}_{12} = -k (q_1 q_2)/r^2 \mathbf{e}_{12},$$

(SI) $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$, $\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$ - stała dielektryczna,

\mathbf{e}_{12} - wersor $q_1 \rightarrow q_2$,

Uwaga 3

Kierunek oddziaływania \mathbf{e}_{12} wynika z wymogów symetrii i założenia izotropowości przestrzeni

Jednostki ładunku (SI) 1 C , $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$,
 $F(1\text{C}, 1\text{C}) = 10^9 \text{ kG}$

Uwaga 4

Oddziaływania elektryczne wielu ładunków są niezależne

Oddziaływania elektryczne - opis pośredni

Pole elektryczne E

Natężenie pola elektrycznego: $\mathbf{E} = \mathbf{F}_q/q$, q - *nieruchomy ładunek*,
jednostki: $[E] = \text{V/m}$

$$\Rightarrow \mathbf{F}_q = q \mathbf{E}$$

*Natężenie pola elektrycznego ładunku punktowego Q
umieszczonego w środku układu odniesienia*

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

np. $E_{1C}(1m) = 9 \cdot 10^9 \text{ V/m},$

Uwaga 5

Pole elektryczne jest wielkością addytywną ,
natężenie pola elektrycznego jest wektorem

$$\mathbf{E} = \sum_i \mathbf{E}_i \quad (\text{zasada superpozycji})$$

Definicja 2

Linie pola E są to umowne linie, do których wektor E jest w każdym punkcie styczny, a ich przestrzenna gęstość w danym punkcie równa jest natężeniu pola elektrycznego

Twierdzenie

Siła F_q w polu elektrostatycznym wytworzonym przez ładunek punktowy Q jest siłą centralną

Dowód

$$\mathbf{F} = 1/(4\pi\epsilon_0) Q/r^2 \mathbf{e}_r = F(r) \mathbf{e}_r$$

Wniosek 2

Pole elektryczne (od dowolnego ładunku) jest polem potencjalnym
(*suma pól potencjalnych jest polem potencjalnym*)

Potencjał pola elektrycznego

Definicja 3

Różnicą **potencjałów** ΔV_{AB} w punktach A i B pola elektrycznego nazywa się pracę przesunięcia jednostkowego ładunku elektrycznego między tymi punktami:

$$\Delta V_{AB} = V_B - V_A = W_q(A \rightarrow B)/q$$



$$W_q(A \rightarrow B) = q (V_B - V_A)$$

$$V_B = W_q(A \rightarrow B)/q + V_A$$

Założenie

$$V_\infty = 0 \text{ (A}=\infty) \Rightarrow V_B = W_q(\infty \rightarrow B)/q + 0$$

lub
$$V(r) = W_q(\infty \rightarrow r)/q = W_q(r)/q$$

Uwaga 6

Potencjał jest wielkością skalarną

Wniosek 2

Zgodnie z *Uwagą 4* potencjał jest wielkością **addytywną**

Zgodnie z *Wnioskiem 2* potencjał jest wielkością **zachowawczą**
(*zależy tylko od miejsca – t.zn. jest funkcją pola*)

(Oddziaływania elektryczne wielu ładunków są niezależne,
pole elektryczne jest polem potencjalnym)

Jednostki potencjału

$$\text{Volt [1V]} = [1\text{J}/1\text{C}] = [1\text{eV}/1\text{e}]$$

Wniosek 3

Potencjał ładunku punktowego Q jest:

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

Związek między natężeniem pola E i potencjałem V

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

$$[\mathbf{F} = -\nabla(U)]$$

$$[q \mathbf{E} = -\nabla(qV)]$$



$$(E_x, E_y, E_z) = [(\delta V/\delta x), (\delta V/\delta y), (\delta V/\delta z)],$$

dla dowolnej osi l :

$$E_l = (\delta V/\delta l),$$

oraz

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

$$V(\mathbf{r}) = \int_{\mathbf{r}}^{\infty} \vec{E} d\vec{l}$$

Wniosek 4

(ze względu na wniosek 2)

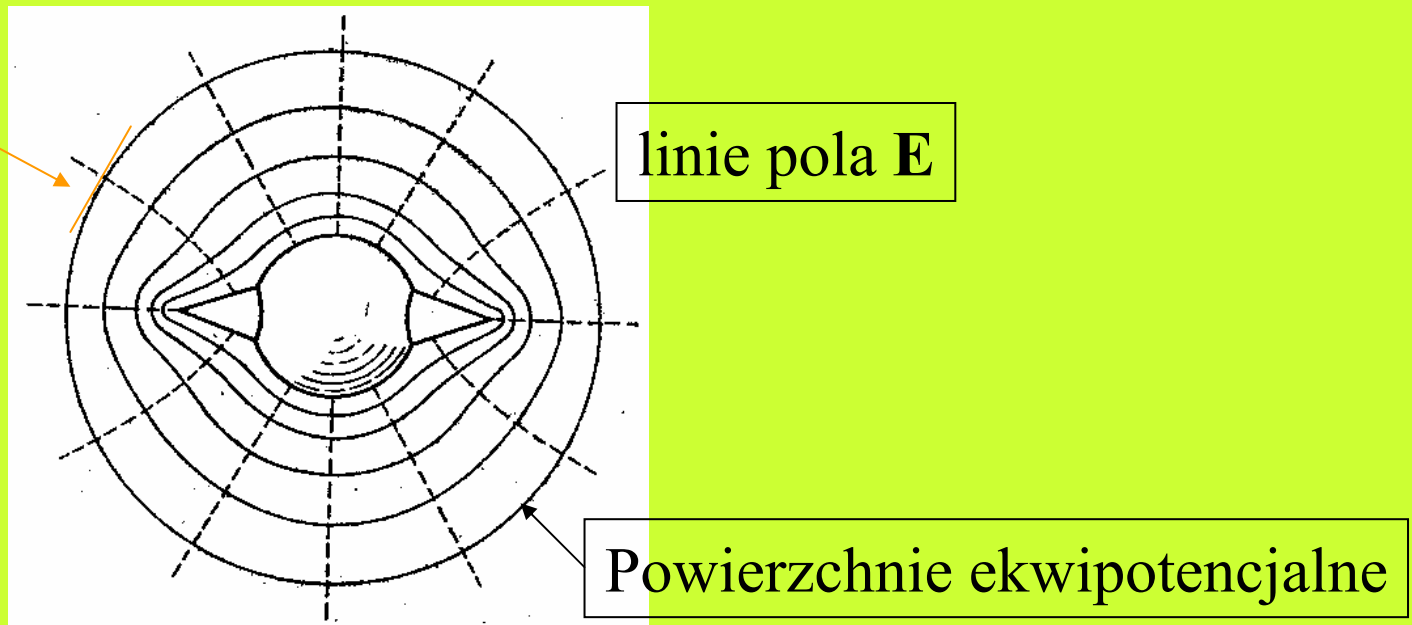
$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Definicja 4

Powierzchnia, której wszystkie punkty mają jednakowy potencjał nazywa się **powierzchnią ekwipotencjalną**

Uwaga 7

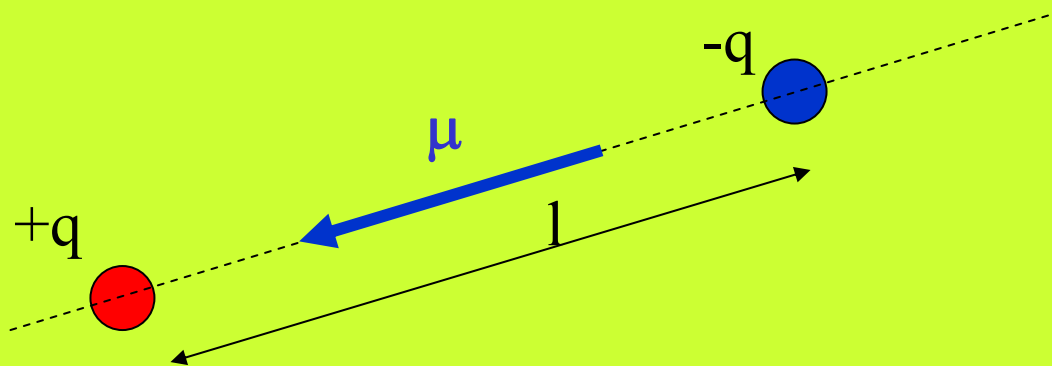
Wektor natężenia pola E (także linie pola) są prostopadłe do powierzchni ekwipotencjalnej ($V_1 = \text{const}, \Rightarrow (\delta V / \delta l) = E_l = 0$, *(l -styczna do pow. ekwipotencjalnej)*)



Dipol elektryczny

Definicja 5

Dipolem elektrycznym nazywa się układ dwóch punktowych ładunków elektrycznych, równych co do wartości, ale przeciwnego znaku, umieszczonych w odległości l . Prosta na której leżą nazywa się osią dipola.



Definicja 6

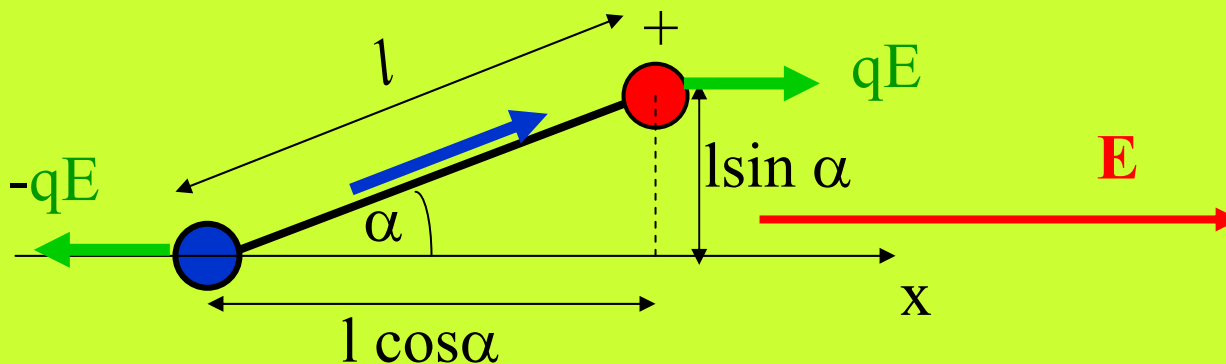
Wektor μ dla dipola elektrycznego $(+q, -q, l)$ o wartości $\mu = ql$ oraz kierunku i zwrocie od ładunku ujemnego do dodatniego nazywa się **momentem dipola**.

Oddziaływanie dipola o momencie μ z zewnętrznym polem elektrycznym \mathbf{E}

Moment siły $\mathbf{N} = \mu E \sin \alpha$, $(qE r_{FF} = qE l \sin \alpha)$
 $\mathbf{N} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{E}$

Energia W_μ dipola w polu elektrycznym

$$W_\mu = q(V_+ - V_-) = \mu E \cos \alpha$$
$$[(V_+ - V_-) \approx dV; \quad dV = -E dx, \quad dx \approx l \cos \alpha]$$
$$W_\mu = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{E}$$



Twierdzenie

Cyrkulacja wektora (więc i rotacja)
natężenia pola elektrostatycznego \mathbf{E}
po dowolnym konturze zamkniętym jest zerowa,

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = 0, \Rightarrow \operatorname{rot} \mathbf{E} = 0$$

(mówimy, że pole elektrostatyczne jest bezwirowe)

Dowód

Pole elektrostatyczne jest polem zachowawczym:

$$\oint_{\Gamma} q\mathbf{E} \, d\mathbf{l} = 0 \Rightarrow \oint_{\Gamma} \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = 0$$

\Rightarrow na podstawie tw. O-G $\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0$

Twierdzenie Gaussa

(dla pola elektrycznego)

Strumień wektora natężenia pola elektrycznego
przez dowolną powierzchnię zamkniętą
jest równy - z dokładnością do stałej dielektrycznej -
ładunkowi elektrycznemu zamkniętemu przez tę powierzchnię

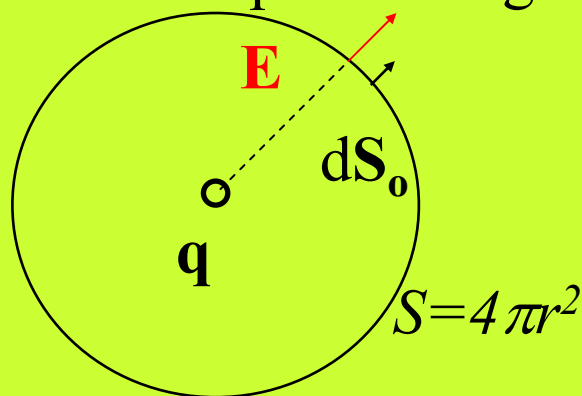
$$\oiint_S \mathbf{E} \, d\mathbf{S} = q/\epsilon_0$$

Dowód

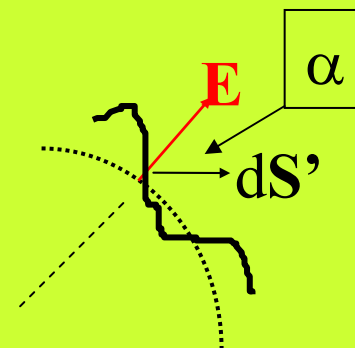
1. Dla ładunku punktowego q :

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

$$E(r=\text{const}) = \text{const}$$



$$\phi_e = \mathbf{E} \int d\mathbf{S} = E S = q/\epsilon_0 \neq f(r)$$



$$\begin{aligned} \mathbf{E} \, d\mathbf{S}' &= (E \cos \alpha) \, d\mathbf{S}' = \\ &= E (d\mathbf{S}' \cos \alpha) = E \, d\mathbf{S}_0 \end{aligned}$$

2. dla ładunku rozłożonego

Z zasady superpozycji dla ładunku rozłożonego $\oiint_S \mathbf{E} \, d\mathbf{S} = q_{\text{sum}}/\epsilon_0$

Dywergencja wektora natężenia pola elektrycznego jest równa
- z dokładnością do stałej dielektrycznej –
gęstości ładunku elektrycznego w danym punkcie

$$\nabla \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$$

dla ładunku rozłożonego

$$q_{\text{sum}}/\epsilon_0 = \iiint_V \rho/\epsilon_0 \, dV$$

(na podst. tw. O-G)

$$\iiint_V \nabla \mathbf{E} \, dV = \oiint_S \mathbf{E} \, d\mathbf{S} = \iiint_V \rho/\epsilon_0 \, dV$$

*Przykłady stosowania tw. Gaussa: linia, płaszczyzna,
kula naładowana jednorodnie*

Pole elektryczne równomiernie naładowanej (nieskończonej) płaszczyzny

1. Metoda elementarna (z pr. Coulomba)

Definicja 8

Gęstością powierzchniową / objętościową ładunku nazywamy odpowiednio:

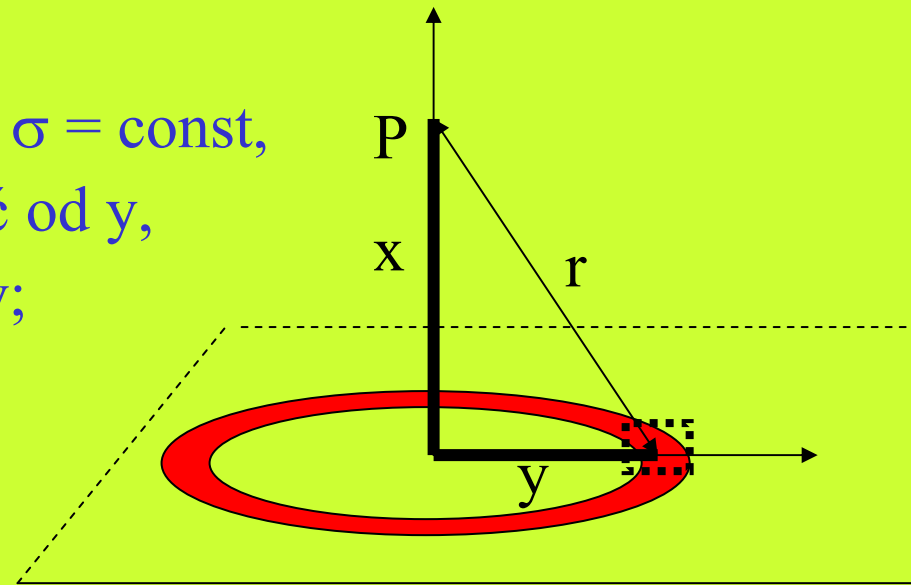
$$\sigma = \delta q / \delta S, \quad / \quad \rho = \delta q / \delta V$$

stała powierzchniowa gęstość ładunku $\sigma = \text{const}$,
symetria \longrightarrow pole E nie może zależeć od y ,
oraz E jest prostopadłe do płaszczyzny;

potencjał ładunku punktowego q :

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

$$q \longrightarrow dq = \sigma dS = \sigma 2\pi y dy$$



Potencjał obręczy w punkcie P

$$dV = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} = \frac{2\pi\sigma y dy}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Potencjał płaszczyzny ($x=\text{const}$, $r^2=x^2+y^2$)

$$V(P) = V(x) = \int_y dV = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \int_0^\infty \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} dy$$

$$t = \sqrt{x^2 + y^2}, \dots dt = \frac{y dy}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$V(x) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} [\sqrt{x^2 + y^2}]_0^\infty = (\text{const} \Rightarrow \infty) - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} x$$

$$E = -|\text{grad}V| = -\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

2. Metoda Gaussa (płaszczyzna, kula)

Pole elektryczne szybko poruszających się ładunków

Ładunek jest niezmiennikiem przekształcenia Lorentza;

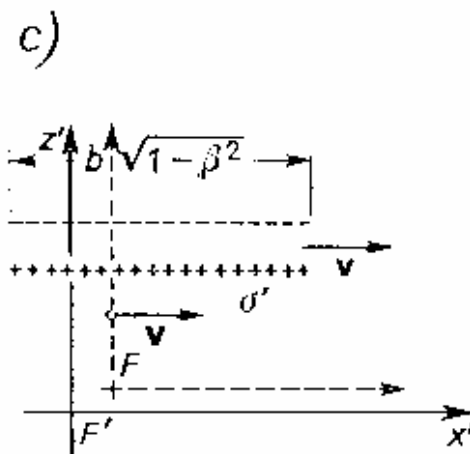
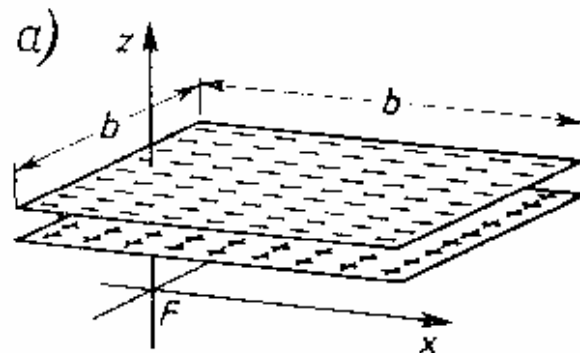
Pole elektryczne E ?

Przypadek poruszających się płaszczyzn; pole E płaszczyzny to:

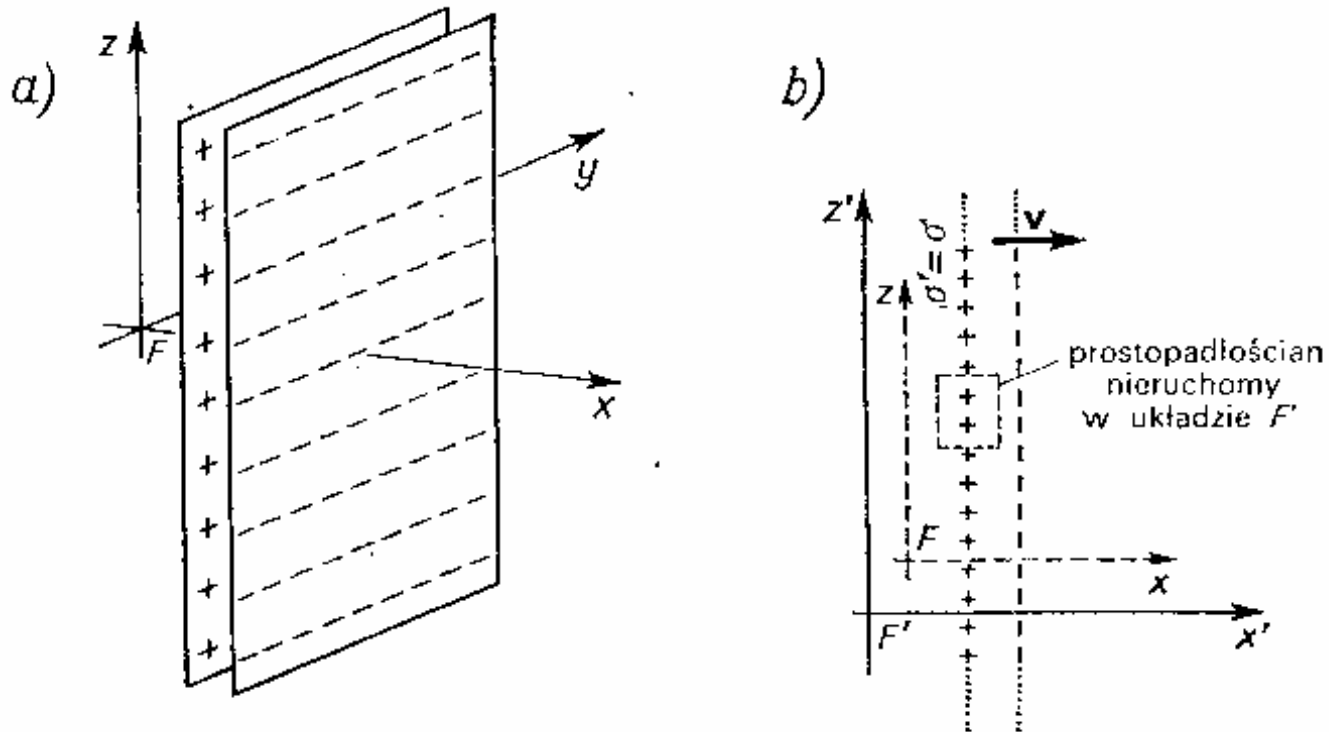
$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{dq}{dS}$$

Dla kierunków ruchu
równoległych do płaszczyzny

- skrócenie Fitzgeralda-Lorentza
- dS maleje, $dq = \text{const}$
- σ rośnie
- \Rightarrow E rośnie

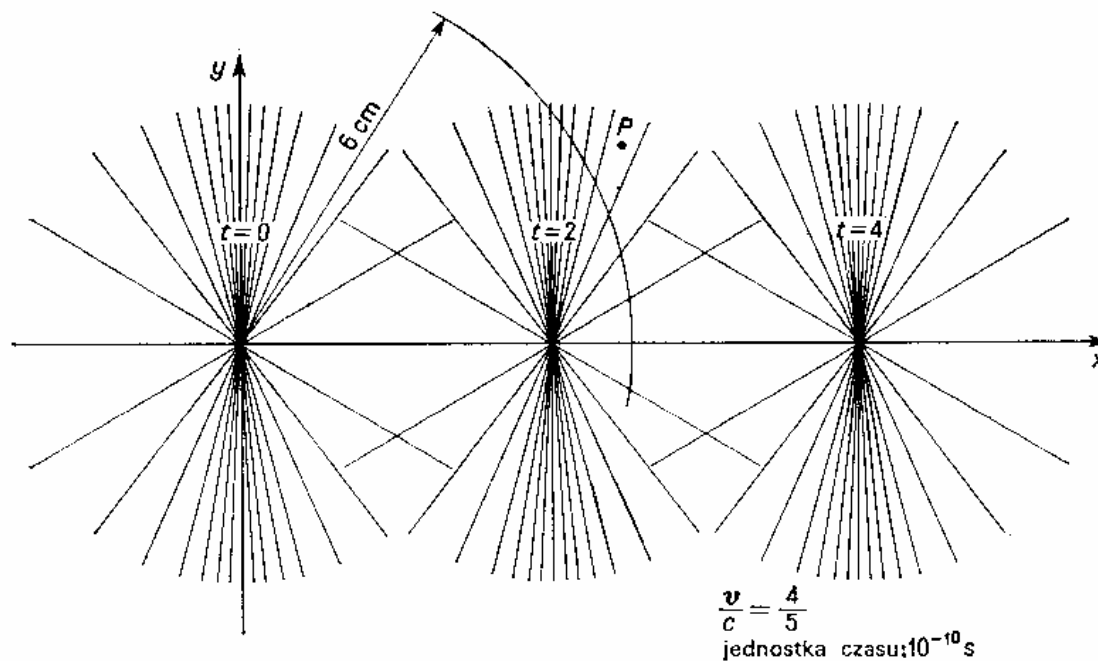
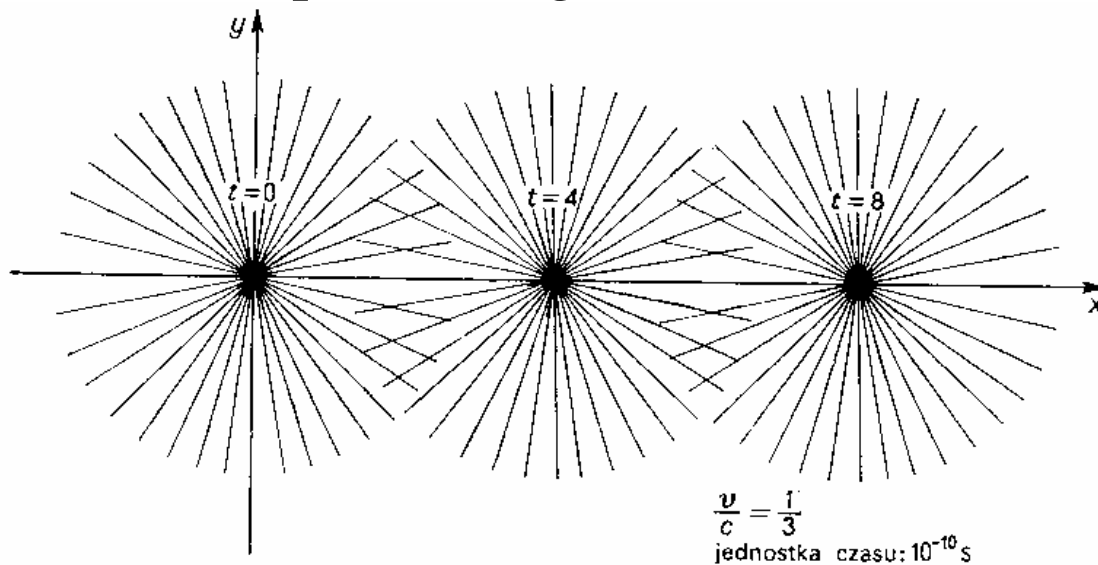


Dla ruchu prostopadłego:



Skróceniu ulega tylko wzajemna odległość płaszczyzn;
 σ oraz pole E pozostają niezmienione

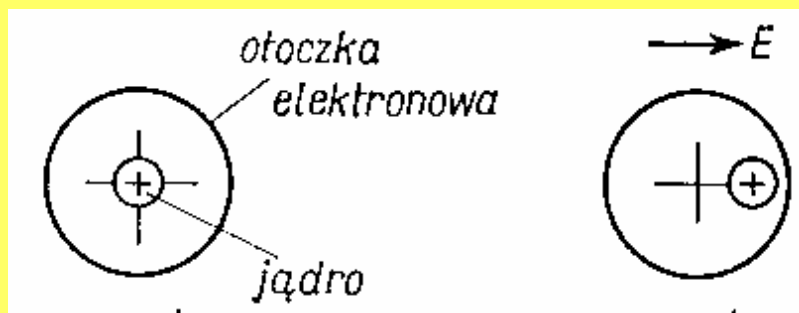
Pole elektryczne ładunku punktowego w ruchu



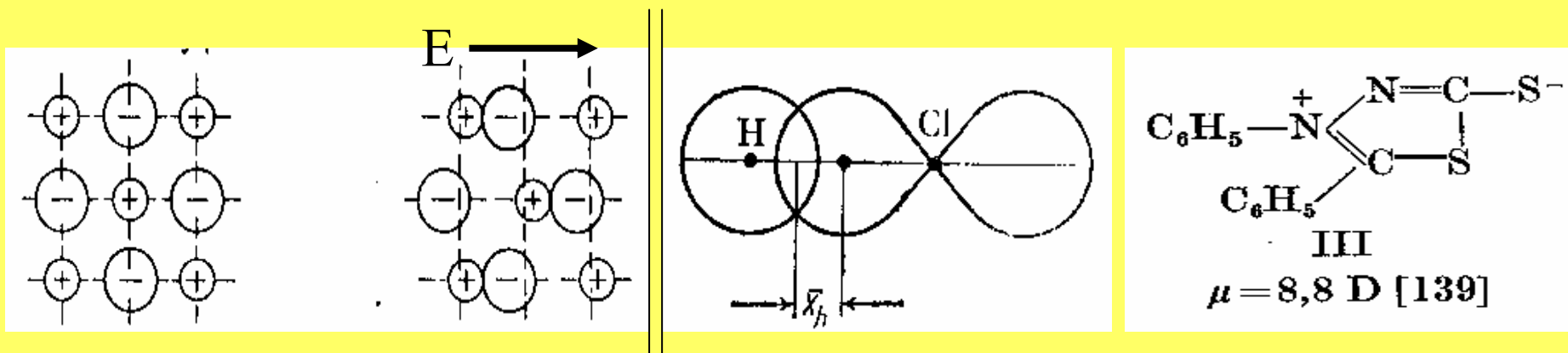
Pole elektryczne w dielektrykach

Budowa:

cząsteczki niepolarne (H_2 , O_2 , N_2)



i polarne (CO , NH , HCl);



sumaryczny ładunek = 0

Polaryzacja (*izotropowych*) dielektryków polarnych i niepolarnych

Definicja 7

Momentem dipolowym cząsteczki jest wypadkowy średni moment wszystkich jej ładunków

$$\mathbf{p} = \sum q_i \langle \mathbf{r}_i \rangle$$

Momenty trwałe i indukowane;

Obserwacja 1

Moment **indukowany** cząsteczki niepolarnej

$$\mathbf{p} = \alpha \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad [\alpha] = \text{m}^3$$

Definicja 8

Wektor polaryzacji
(spolaryzowanie) :

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum \mathbf{p} \quad [\mathbf{P}] = \text{C/m}^2$$

$$\mathbf{p}(\mathbf{E}) \Rightarrow \mathbf{P}(\mathbf{E});$$

$$\mathbf{P} = \kappa \epsilon_0 \mathbf{E},$$

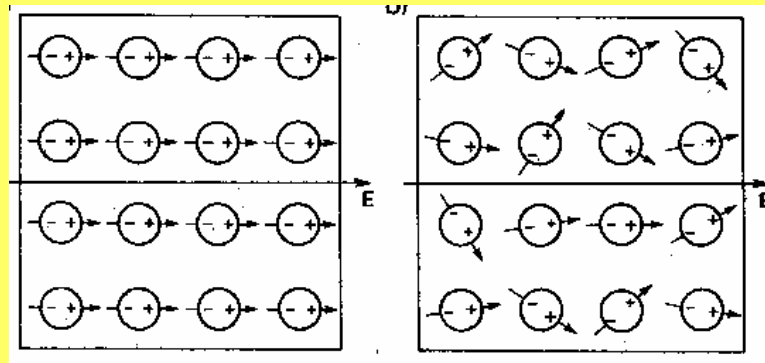
κ - podatność dielektryczna

Na podstawie *Obs. 1* i *Def.7*

$$\mathbf{P} = n \alpha \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad n - \text{koncentracja cząsteczek w dielektryku}$$

Uwaga 1

Zależność $\mathbf{P} = n \alpha \epsilon_0 \mathbf{E}$ zachowuje słuszność również dla **polaryzacji orientacyjnej** (dipolowe **momenty trwałe**) w dielektrykach polarnych (konkurencyjne oddziaływanie temperatury i pola \mathbf{E})



Ładunki obce $q \Leftrightarrow$ ładunki związane q' ;

Tak q jak i q' generują \mathbf{E} , zatem: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'$

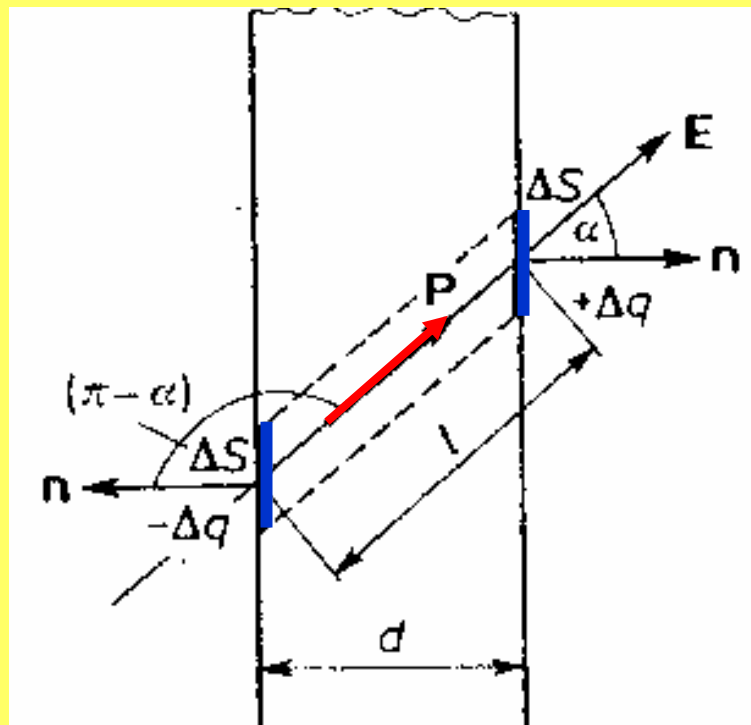
Gęstością powierzchniową ładunku nazywamy: $\sigma = \delta q / \delta S$,

\Rightarrow dielektryk niespolaryzowany: $\sigma' = 0$ (ładunki związane),

Jeśli $P \neq 0 \Rightarrow \sigma' \neq 0 \Rightarrow$ moment dipolowy obszaru $(l, \Delta S)$ dielektryka wynosi:

$$P \Delta V = P l \Delta S \cos \alpha = (\sigma' \Delta S) l,$$

$$\Rightarrow \sigma' = P \cos \alpha = P_n \quad \text{lub} \quad \sigma' = \epsilon_0 \kappa E_n$$

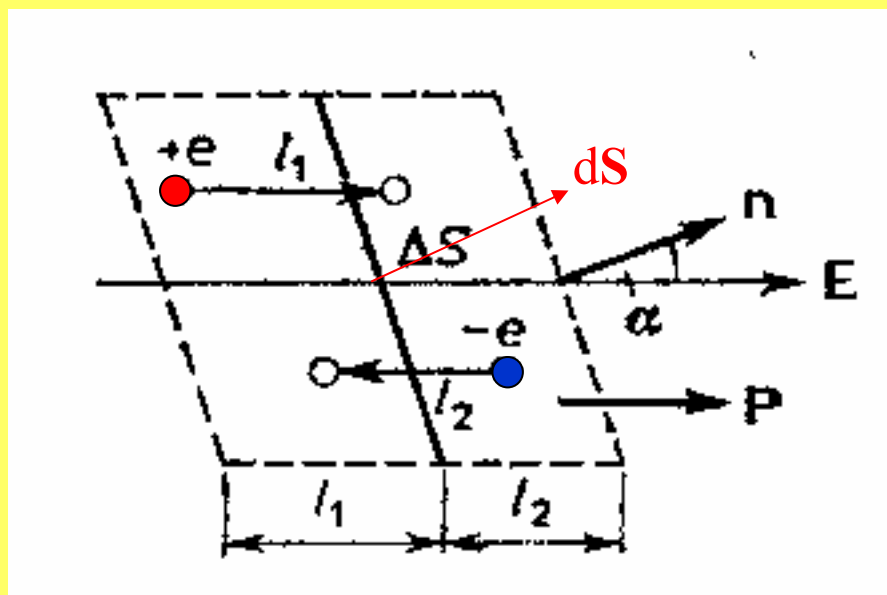


\Rightarrow ładunek przepływający przez powierzchnię ΔS w kierunku $d\mathbf{S}$ podczas polaryzacji \mathbf{P}

$$\Delta q' = \sigma' \Delta S = P \cos \alpha \Delta S,$$

lub

$$dq' = \mathbf{P} d\mathbf{S}$$



Przez dowolną powierzchnię zamkniętą przepływa na zewnątrz:

$$q'_{wy} = \oiint_S dq' = \oiint_S \mathbf{P} d\mathbf{S}.$$

pozostaje wewnątrz S

$$q'_{\text{nad}} = - q'_{\text{wy}} = \oint_S -\mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} = -\Phi_P$$

lub

$$\iiint_V \rho' \, dV = q'_{\text{nad}} = \oint_S -\mathbf{P} \cdot d\mathbf{S}.$$

Na podstawie Tw. O-G:

$$\iiint_V \rho' \, dV = \iiint_V -\nabla \cdot \mathbf{P} \, dV,$$

lub

$$\rho' = -\nabla \cdot \mathbf{P},$$

Na podstawie **twierdzenia Gaussa**

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 1/\epsilon_0 (\rho + \rho'),$$

stąd

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 1/\epsilon_0 (\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}),$$

lub

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho$$

Definicja 9

Wielkość $(\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \mathbf{D}$ nazywa się przesunięciem elektrycznym

lub wektorem indukcji elektrycznej

Wniosek 4

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \kappa \mathbf{E} = \varepsilon_0 (1 + \kappa) \mathbf{E}$$

Definicja 10

Bezwymiarową wielkość $(1 + \kappa) = \varepsilon$

nazywa się (względną) przenikalnością elektryczną dielektryka

Zatem

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

oraz

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho,$$

lub

$$\iiint_V \nabla \cdot \mathbf{D} \, dV = \iiint_V \rho \, dV$$

Na podstawie Tw. O-G:

$$\iiint_V \rho \, dV = \iint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q_S$$

Uwaga: w zwykłych dielektrykach \mathbf{D} jest niemal liniową funkcją pola \mathbf{E}

Twierdzenie Gaussa dla wektora \mathbf{D}

Strumień przesunięcia elektrycznego \mathbf{D} przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy (obcemu) ładunkowi elektrycznemu q zamkniętemu wewnątrz tej powierzchni

$$\oiint_S \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = q_s$$

Wniosek 5

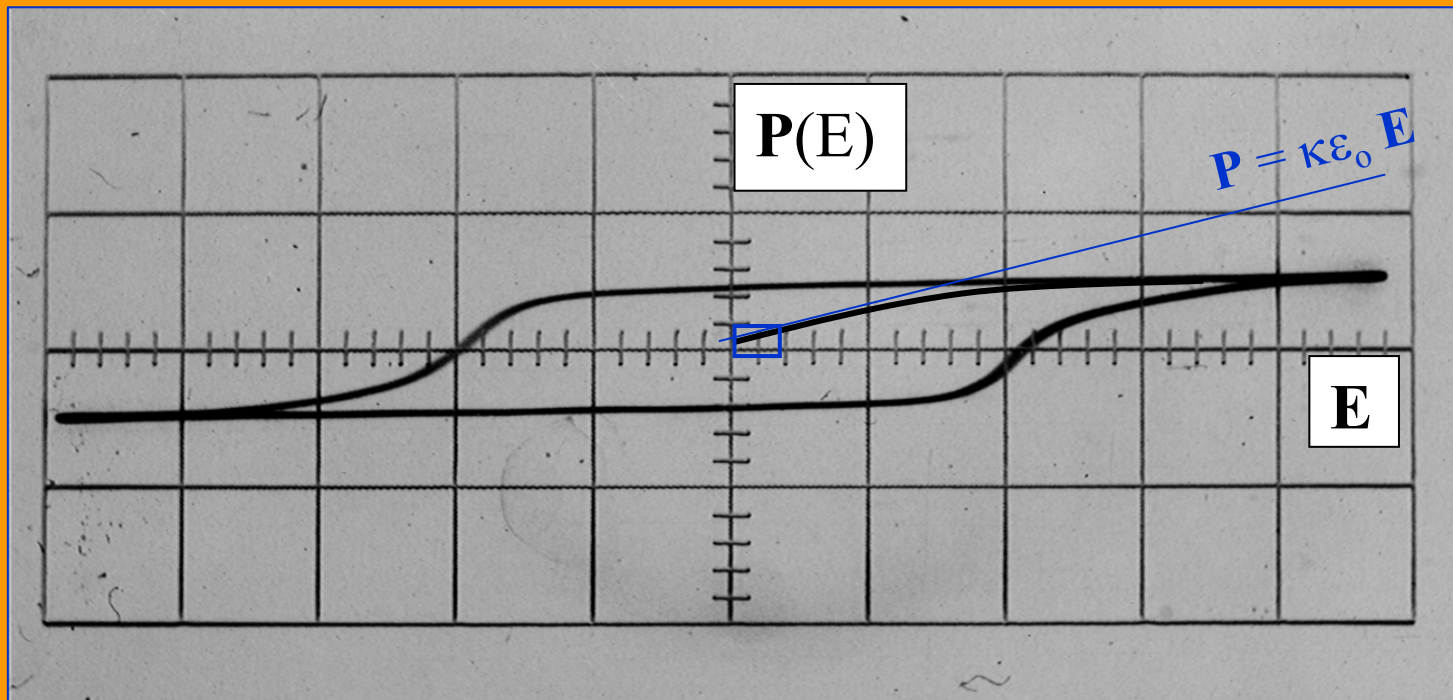
Źródłem wektora pola \mathbf{E} mogą być zarówno ładunki obce q , jak i związane q' , natomiast źródłem wektora indukcji \mathbf{D} są tylko ładunki obce q

Ferroelektryki

- temperatura Curie T_c (punkt Curie)

klasa dielektryków

1. wysoka przenikalność ϵ (kilka tysięcy),
2. $\epsilon(E)$, t.zn. $P(E)$, $D(E)$ jest funkcją nieliniową,
3. histereza $P(E)$, $D(E)$.



Przewodniki w polu elektrycznym

Wolne (ruchome) ładunki elektryczne,



1. wewnątrz przewodnika $E=0$ i $V=\text{const}$,
2. przewodnik naładowany ładunkiem obcym gromadzi go tylko na powierzchni z gęstością σ ,
3. na powierzchni przewodnika $E = E_n \Rightarrow V_{\text{pow}} = \text{const}$
(powierzchnia ekwipotencjalna)

Wniosek 9

Każda porcja ładunku rozkłada się na przewodniku w ten sam sposób

Wniosek 10

Potencjał odosobnionego przewodnika jest liniową funkcją zgromadzonego na nim ładunku

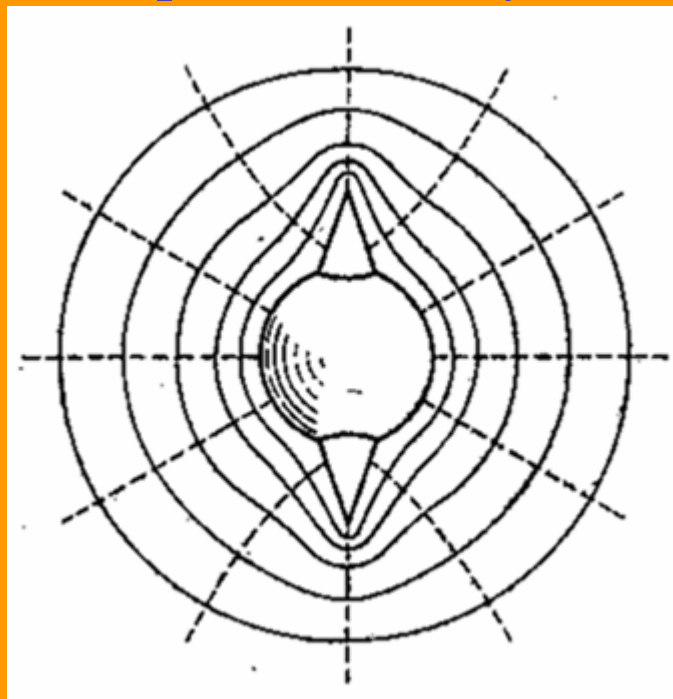
Wniosek 11

Usunięcie ze środka przewodnika dowolnej ilości materiału nie zmienia rozkładu ładunków w przewodniku → ekrany elektryczne

Uwaga 3

W pobliżu dodatnich krzywizn gęstość ładunku na przewodniku wrasta ze wzrostem krzywizny, a w pobliżu krzywizn ujemnych maleje →

piorunochrony



Pojemność elektryczna

Przewodniki odosobnione

Zgodnie z *Wnioskiem 10* $q = C V$ C - stała

Definicja 11

Stałą proporcjonalności między ładunkiem a powstałym potencjałem

$$C = q/V$$

nazywamy pojemnością elektryczną, $[C] = F$ (*farad*)

Pojemność kuli $C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$,

$$1F \Rightarrow \text{kula } R = 9 \cdot 10^9 \text{ m}$$

$$\text{Ziemia} \Rightarrow C = 0,0007 \text{ F}$$

Układy przewodników – kondensatory

Osłabienie pola E przy określonym ładunku \Rightarrow
zmniejszenie potencjału $V \Rightarrow$ wzrost pojemności

Definicja 12

Pojemnością kondensatora jest współczynnik proporcjonalności między ładunkiem a napięciem pomiędzy okładkami

$$C = q/(V_1 - V_2),$$

lub $C = q/U$

Pojemność kondensatora płaskiego

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S/d$$

Energia naładowanego przewodnika

$$W = \Sigma (V_q \Delta q) = \frac{1}{2} (V q),$$

lub

$$W = \frac{1}{2} C V^2$$

$$W = \frac{1}{2} q^2 / C$$

Energia kondensatora

$$W = \frac{1}{2} [(q^+) V_1 + (q^-) V_2] = \frac{1}{2} qU,$$

lub

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

$$W = \frac{1}{2} q^2 / C$$

Energia pola elektrycznego

dla kondensatora płaskiego

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} (\epsilon\epsilon_0 S U^2 / d) = (\epsilon\epsilon_0 / 2) (U/d)^2 (Sd)$$

$$\Rightarrow W = (\epsilon\epsilon_0 / 2) E^2 V$$

$$\Rightarrow w = W/V = (\epsilon_0 / 2) E^2 = ED/2$$

lub *(dla dielektryka izotropowego)*

$$w = \mathbf{E} \mathbf{D} / 2$$

Prąd elektryczny

Definicja 1

Prądem elektrycznym w przekroju S nazywa się proces przenoszenia ładunku elektrycznego o niezerowej wypadkowej wartości przez powierzchnię tego przekroju (*ruch cieplny i ruch uporządkowany*)

Definicja 2

Nośnikami ładunku są cząstki naładowane elektrycznie, które mogą się przemieszczać co najmniej w granicach ośrodka przewodzącego prąd elektryczny (*elektrony, jony, krople, cząstki makroskopowe*)

Definicja 3

Natężeniem prądu nazywamy strumień ładunku przenieszonego przez powierzchnię S:

$$I = dq_S / dt = dq_{S+} / dt + | dq_{S-} / dt | ; \quad [I] = A = C/s$$

*jako kierunek prądu przyjmuje się kierunek ruchu nośników dodatnich,

*jednostka natężenia prądu 1 A jest jednostką podstawową SI

Doświadczenie Rieckiego

Trzy walce o wyszlifowanych podstawach (dwa miedziane i jeden aluminiowy) złożono szeregowo Cu – Al – Cu i przepuszczono przez nie stały prąd w jednym kierunku przez okres jednego roku. W tym czasie przepłynął ładunek $3,5 \cdot 10^6 \text{C}$



Wnioski

Stwierdzono, że przepływ prądu nie miał żadnego wpływu na ciężar przewodzących go walców. Badanie mikroskopowe nie wykazało przenikania jednego metalu w drugi → przenoszenie ładunków metalach nie odbywa się za pośrednictwem atomów, lecz przez cząstki obecne i jednakowe we wszystkich metalach.

1897 : Thompson odkrywa elektrony.

Wniosek 1

Jednostka ładunku SI - **1 C** (1 kulomb) - jest ładunkiem przenoszonym przez prąd o natężeniu **1A** w czasie **1 s** przez przekrój poprzeczny przewodnika

Uwaga 1

Natężenie prądu I nie jest wektorem

Definicja 4

Gęstością prądu na powierzchni S nazywa się taki **wektor \mathbf{j}** , że :

$$I = \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$$

Wniosek 2

W ośrodku, w którym prędkości nośników ładunku są (\mathbf{u}_+) i (\mathbf{u}_-) , a ich koncentracja (n_+) i (n_-) :

$$\mathbf{j} = q_+ n_+ \mathbf{u}_+ + q_- n_- \mathbf{u}_-$$

Równanie ciągłości prądu

(= zasada zachowania ładunku)

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = - d\rho/dt, \quad (\rho = dq/dV)$$

Dowód

$$\oiint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = - dq/dt = \frac{d}{dt} \left[- \int_V \rho \, dV \right] = \int_V \left[\frac{d}{dt} (-\rho) \right] dV$$

Na podstawie Tw.O-G: $\int_V \nabla \mathbf{j} \, dV = \oiint_S \mathbf{j} \, d\mathbf{S} = \int_V \left[- \frac{d}{dt} \rho \right] dV$

Wniosek 3

W warunkach stacjonarnych ($d\rho/dt=0$, dla prądu stałego)

$$\nabla \mathbf{j} = 0$$

t.j. pole prądu stacjonarnego jest bezźródłowe

Uwaga 2

Przepływ prądu stacjonarnego w obwodzie zamkniętym w warunkach praktycznych wymaga istnienia pola sił obcych (nie-elektrostatycznych), ponieważ cyrkulacja pola elektrostatycznego jest zerowa ($\oint_{\Gamma} \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = 0$)

Definicja 5.

Pracę sił zewnętrznych w obwodzie nad jednostkowym ładunkiem elektrycznym nazywa się siłą elektromotoryczną SEM

$$\text{SEM} = \mathcal{E} = W_z / q$$

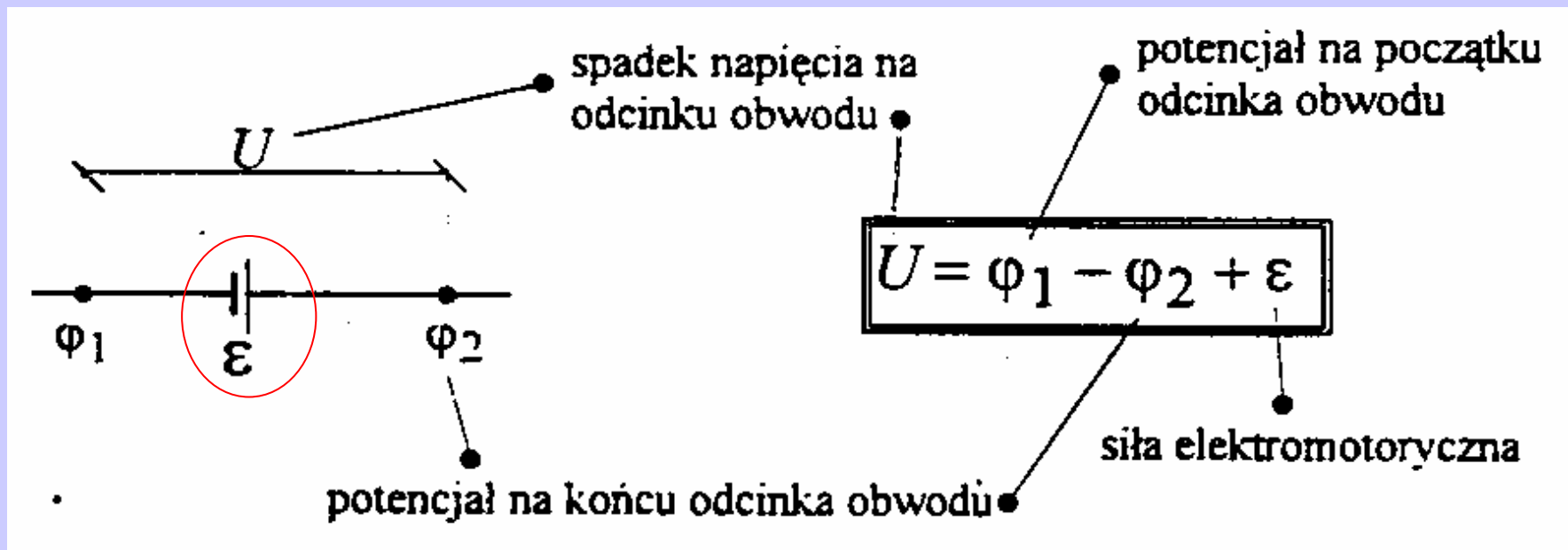
Uwaga 3

SEM ma charakter potencjału; może mieć źródło chemiczne, termiczne, magnetyczne

Definicja 6

Napięcie U na odcinku obwodu jest równe całkowitej pracy wykonywanej nad jednostkowym ładunkiem elektrycznym przez siły elektrostatyczne i zewnętrzne na tym odcinku i odniesionej do tego ładunku:

$$U_{12} = V_1 - V_2 + \mathcal{E}_{12}$$



Prawo Ohma

Natężenie prądu w odcinku obwodu jest proporcjonalne do spadku napięcia na nim

$$I = \frac{1}{R} U;$$

R (*stała*) jest oporem elektrycznym odcinka; jednostka $[R] = 1\Omega$

Dla przewodnika jednorodnego

$$R = \frac{l\rho}{S}, \quad \rho [\Omega\text{m}] - \text{oporność właściwa}$$

Prawo Ohma w postaci różniczkowej

$$\mathbf{j} = (1/\rho) \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E}; \quad [\sigma] = \text{S/m} = (1/\Omega)(1/\text{m})$$

Praca i moc prądu elektrycznego (stałego)

Praca na odcinku obwodu

$$W = qV_1 - qV_2 + W_z$$

$$W = q U$$

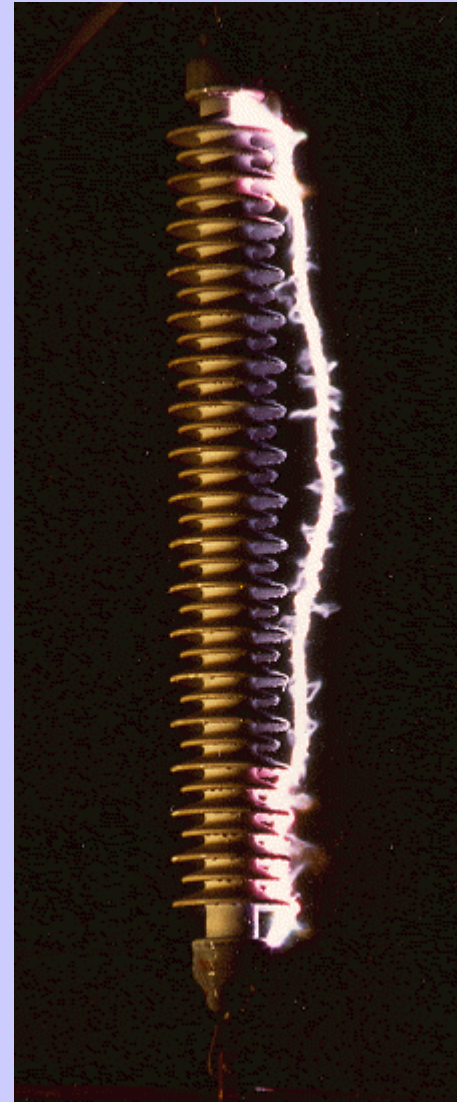
$$W = I t U$$

korzystając z prawa Ohma

$$W = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}$$

Moc

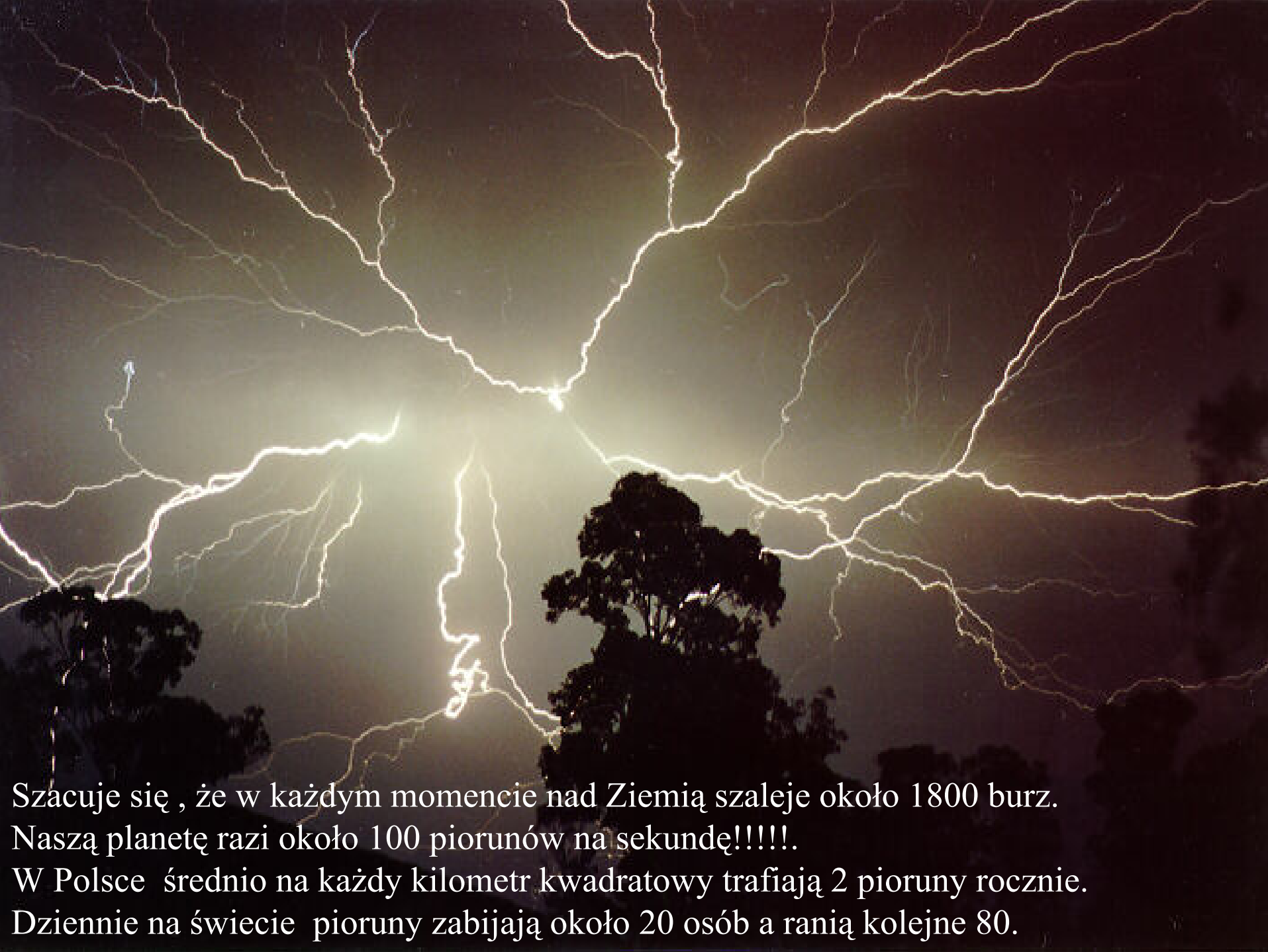
$$P = W/t = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$



Nateżenie płynącego prądu piorunu może sięgać dziesiątek tysięcy amperów, a różnica potencjałów wywołująca błyskawicę sięga kilku milionów voltów. Błyskawica przebiega z prędkością około 100 000 km/h.

Kanał piorunu (tor powietrzny po którym przebiega, nie szerszy od średnicy długopisu) rozgrzewa się do około 30 000° C w ułamku sekundy. Gwałtowne rozprężenie się powietrza w tym kanale powoduje falę uderzeniową - odgłos grzmotu





Szacuje się , że w każdym momencie nad Ziemią szaleje około 1800 burz.
Naszą planetę razi około 100 piorunów na sekundę!!!!.
W Polsce średnio na każdy kilometr kwadratowy trafiają 2 pioruny rocznie.
Dziennie na świecie pioruny zabijają około 20 osób a ranią kolejne 80.



burza w Seattle (USA)