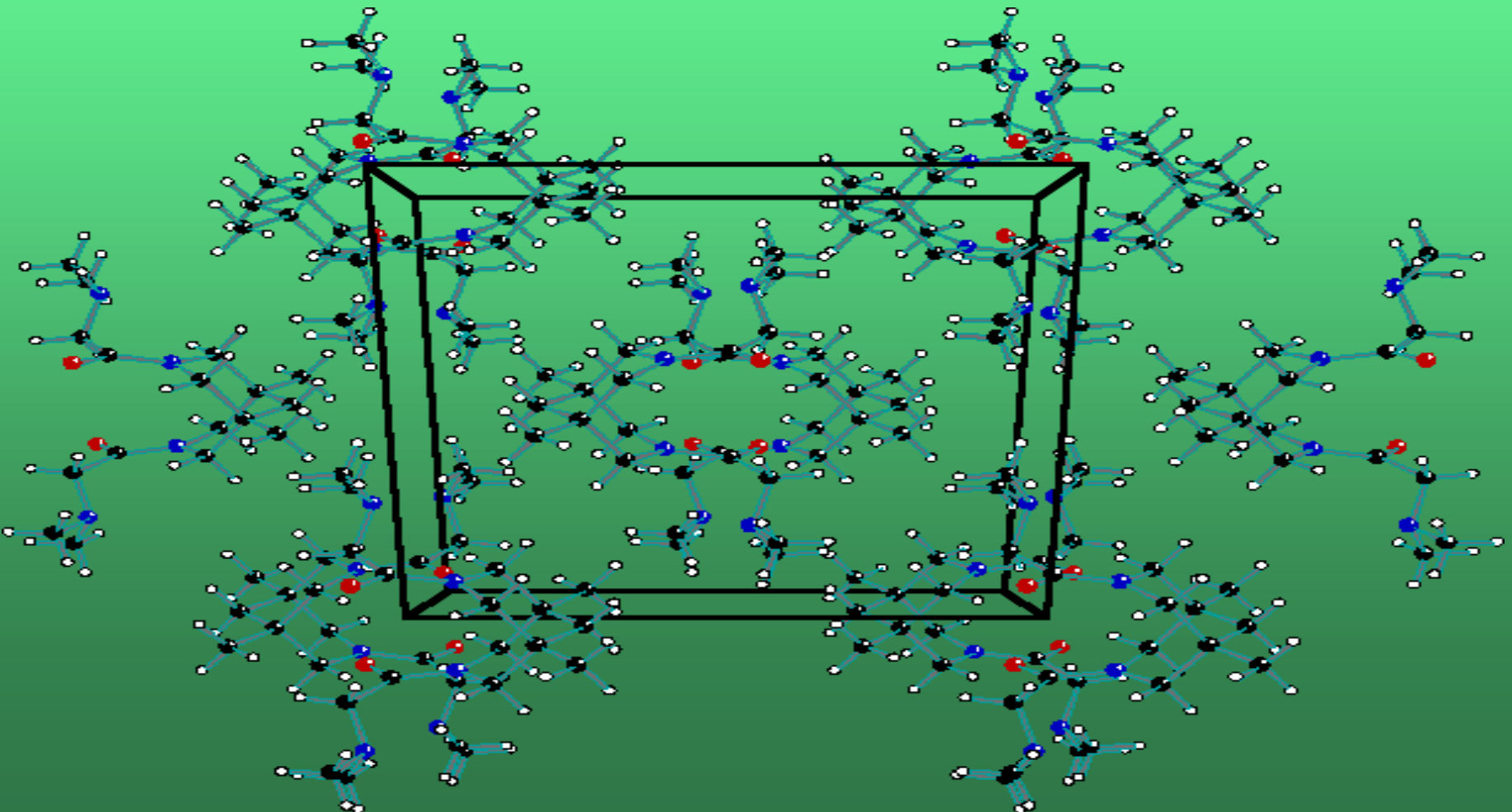
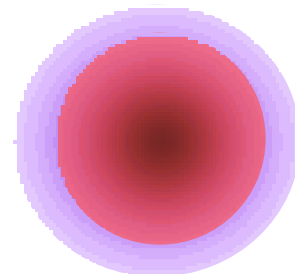
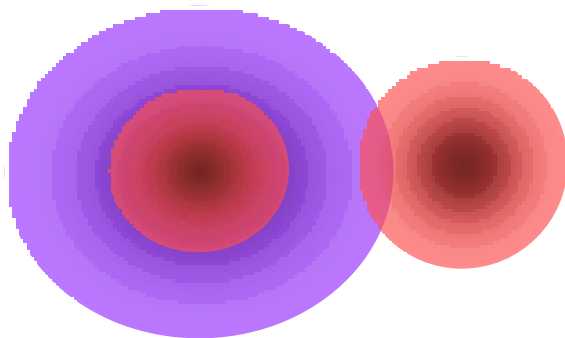
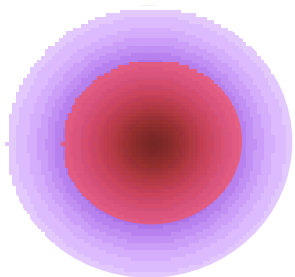


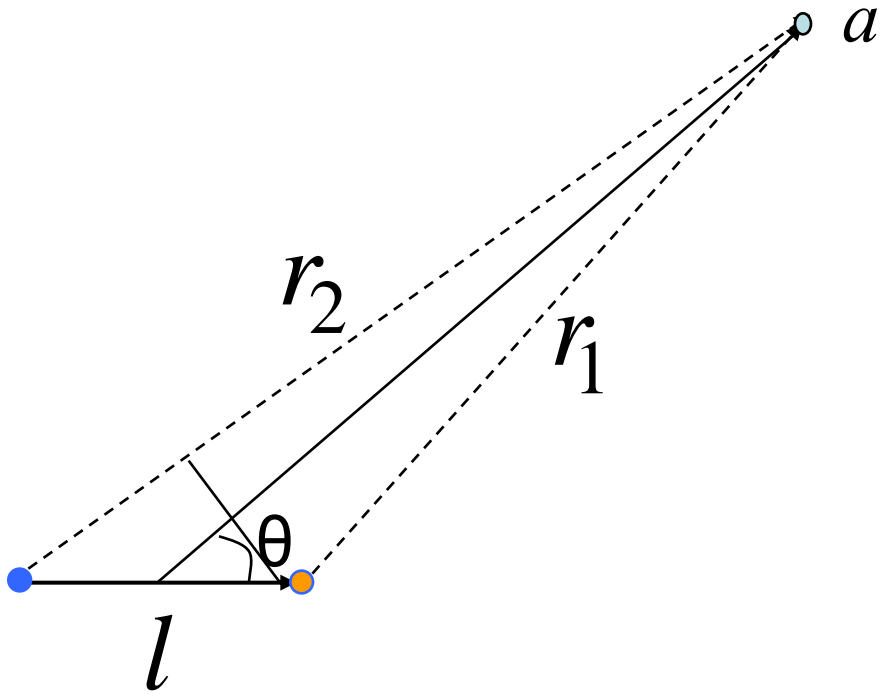
# Тема 4. Электрическое поле в диэлектриках

## ● 4.1. Электрический диполь



# Образование ионной молекулы

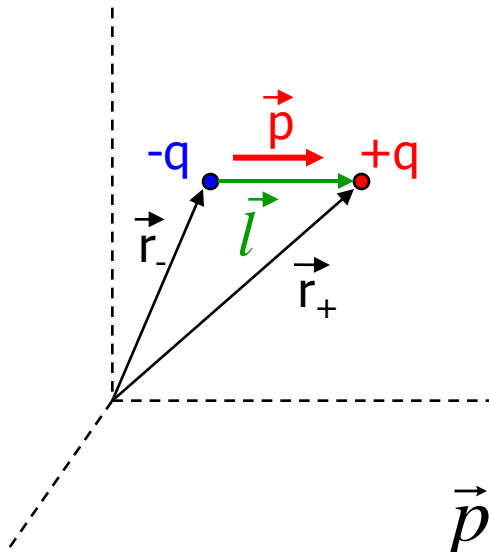




$$r \gg l$$

$$r_2 - r_1 = l \cos \theta$$

$$\varphi = k \frac{ql \cos \theta}{r^2}$$



$\vec{p}$  - электрический момент диполя:

$$\vec{p} = |q| \vec{l}$$

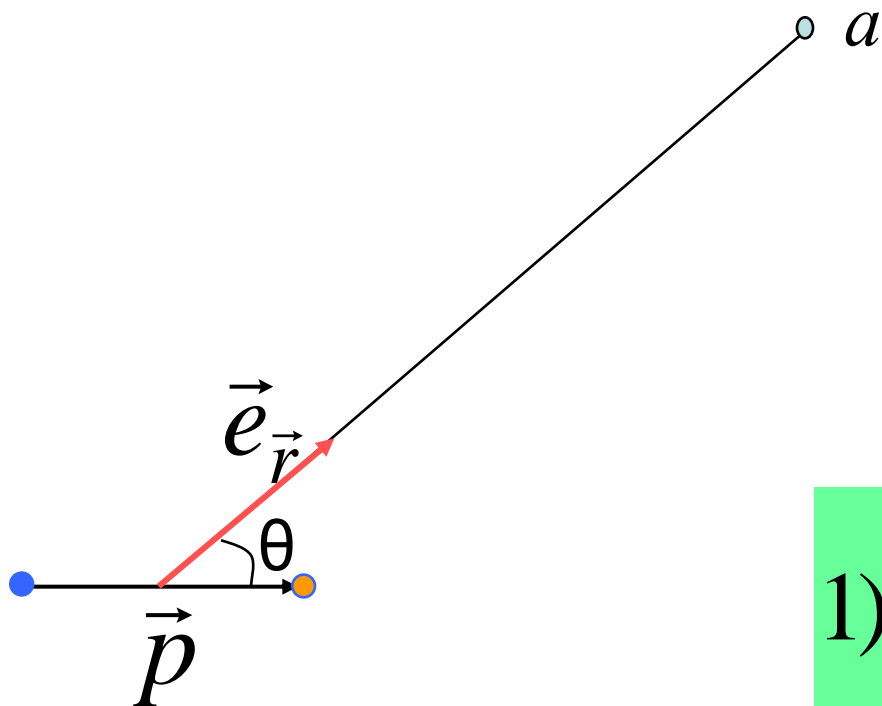
$\vec{l}$  - плечо диполя:

$$\vec{l} = \vec{r}_+ - \vec{r}_-$$

$$\vec{p} = q\vec{r}_+ - q\vec{r}_- = q_+\vec{r}_+ + q_-\vec{r}_-$$

$$\vec{p} = |q|\vec{l}$$

$$\varphi = k \frac{ql \cos \theta}{r^2}$$



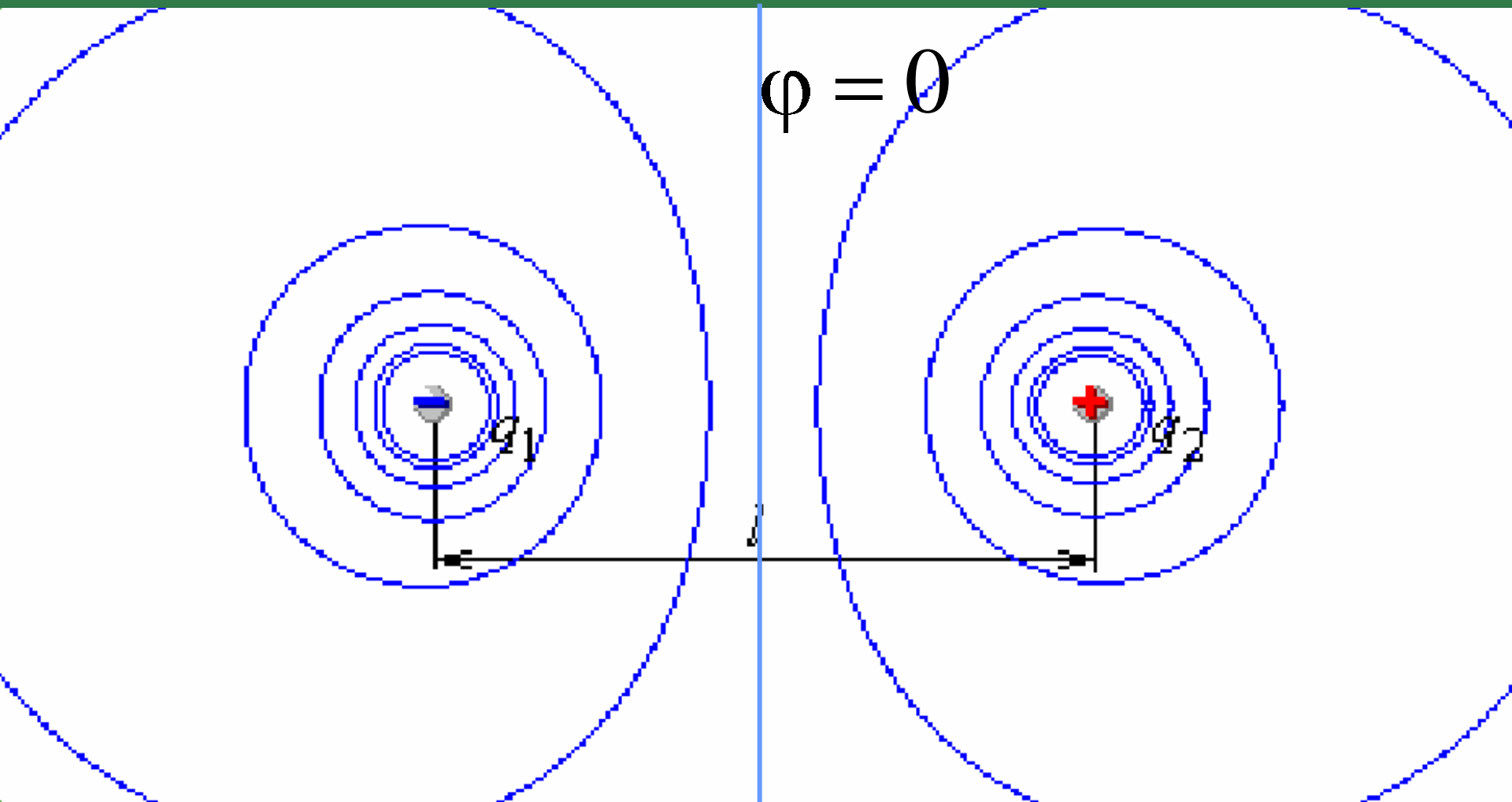
$$\varphi = k \frac{\vec{p} \vec{e}_r}{r^2}$$

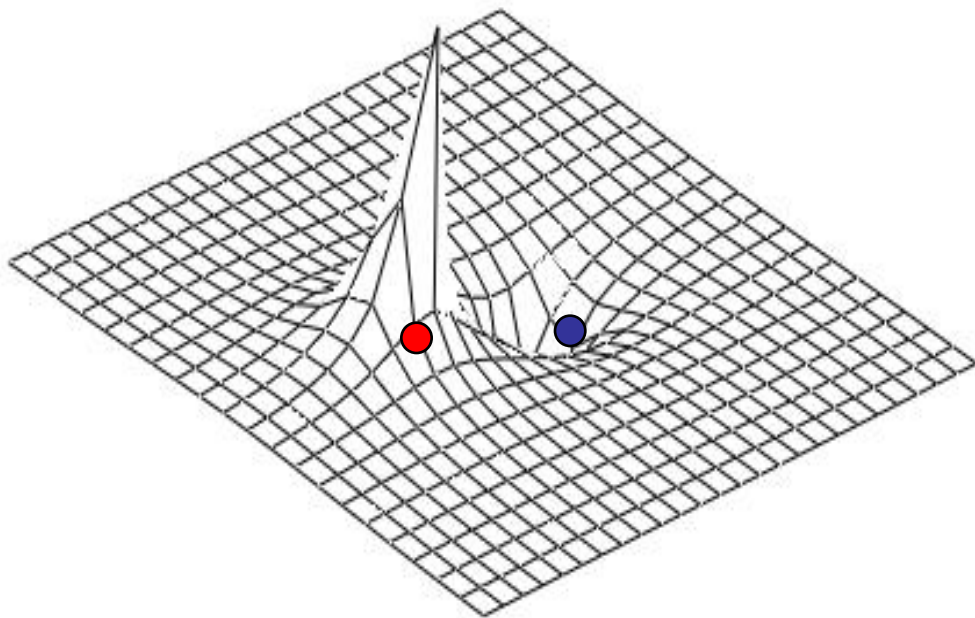
Следствия:

$$1) \quad \theta = 0 \Rightarrow \varphi = k \frac{p}{r^2}$$

$$2) \quad \theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \varphi = 0$$

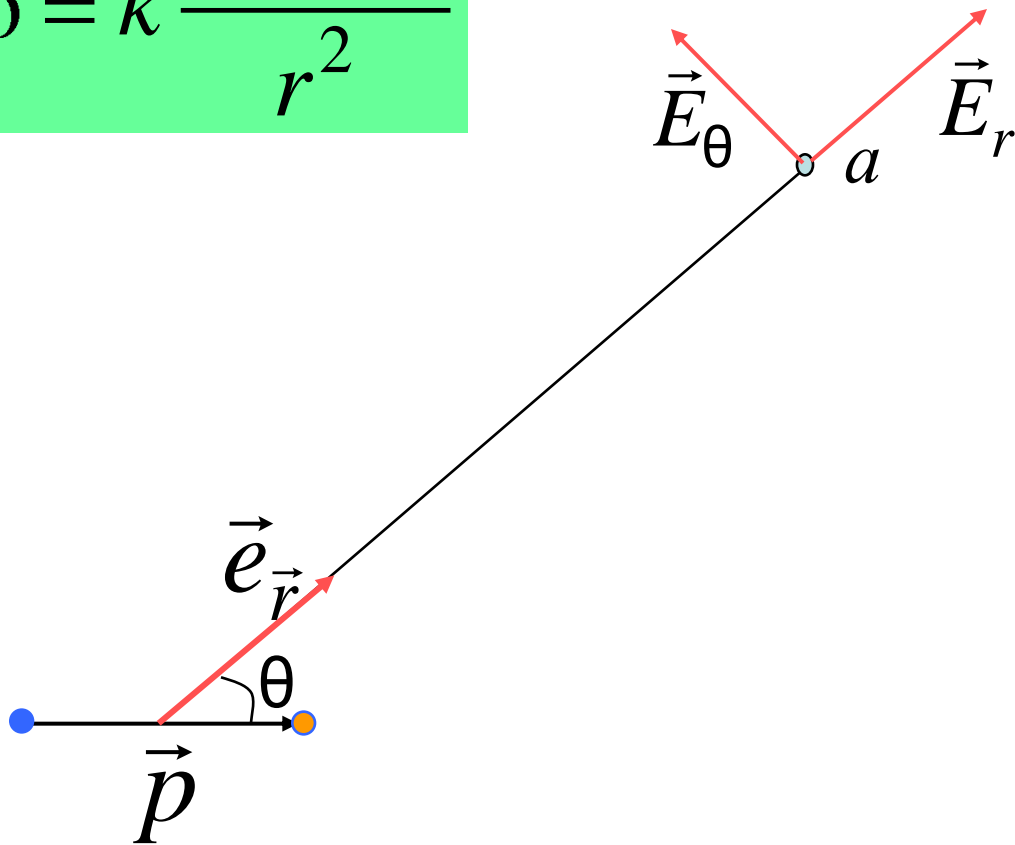
# Эквипотенциали диполя





M

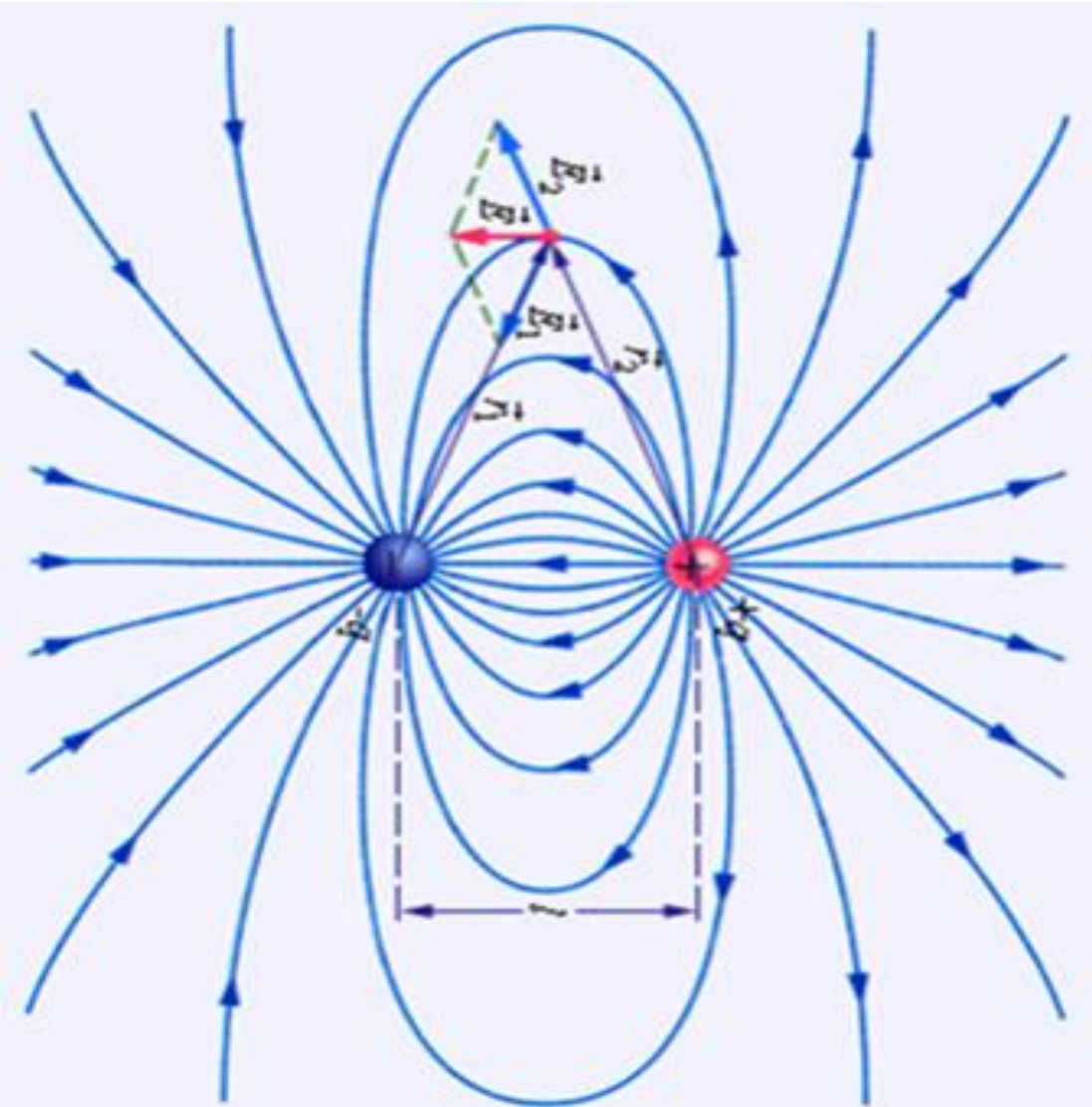
$$\varphi = k \frac{p \cos \theta}{r^2}$$



$$E = k \frac{p}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}$$



# Силовые линии поля электрического диполя



Следствия:

$$1) \quad \theta = 0 \Rightarrow \begin{cases} E_\theta = 0 \\ E_r \sim \frac{1}{r^3} \end{cases}$$

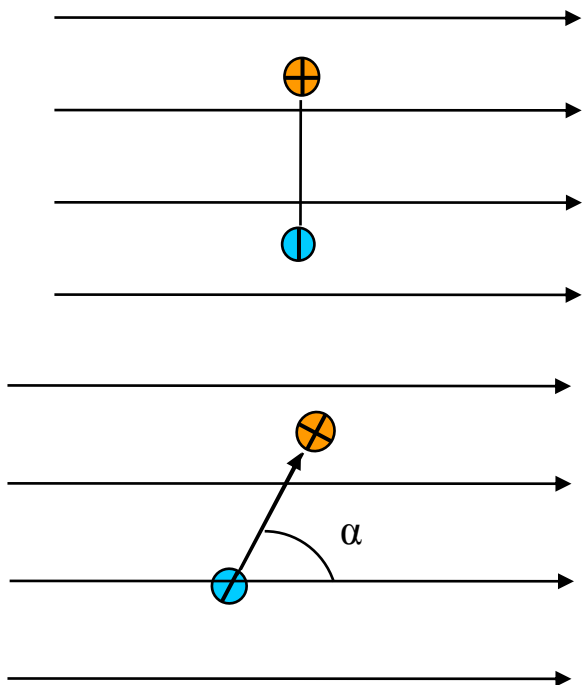
$$2) \quad \theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \begin{cases} E_r = 0 \\ E_\theta \sim \frac{1}{r^3} \end{cases}$$

# Диполь во внешнем поле

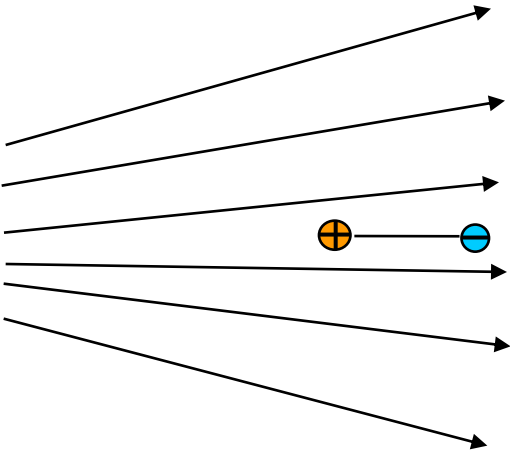
$$M = Fl = qEl = pE$$

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

$$W = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$



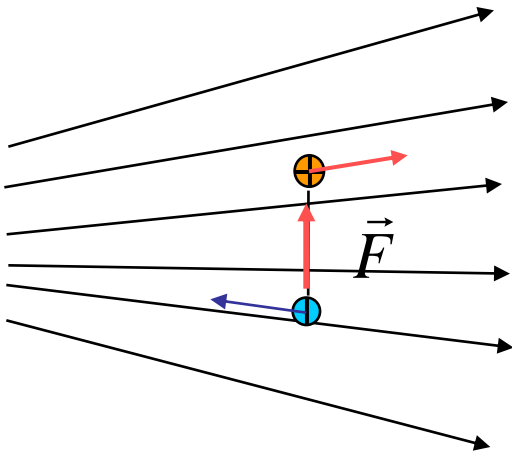
# Диполь в неоднородном электрическом поле



1. Поворачивается

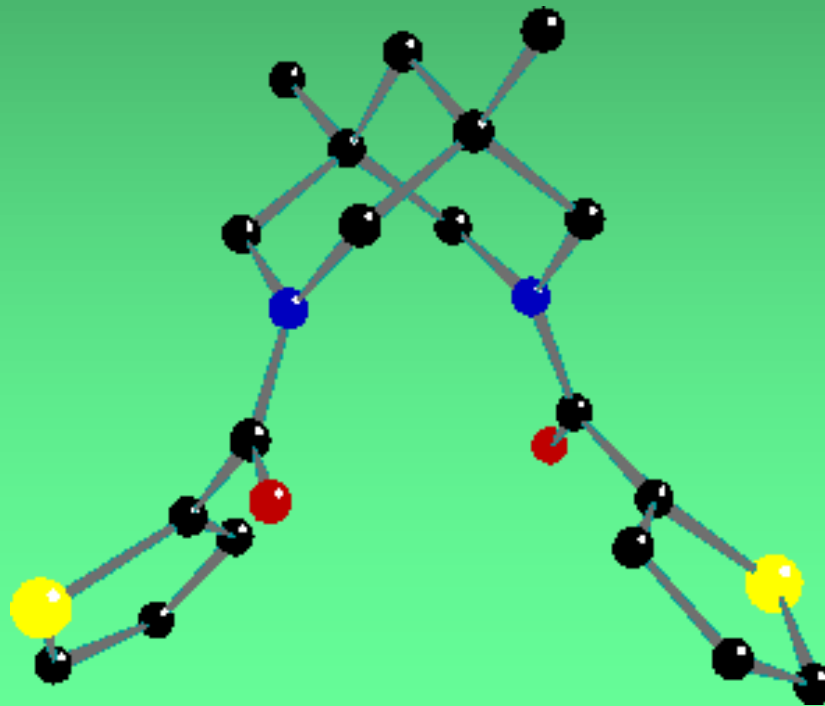
2. Втягивается в область  
большой неоднородности

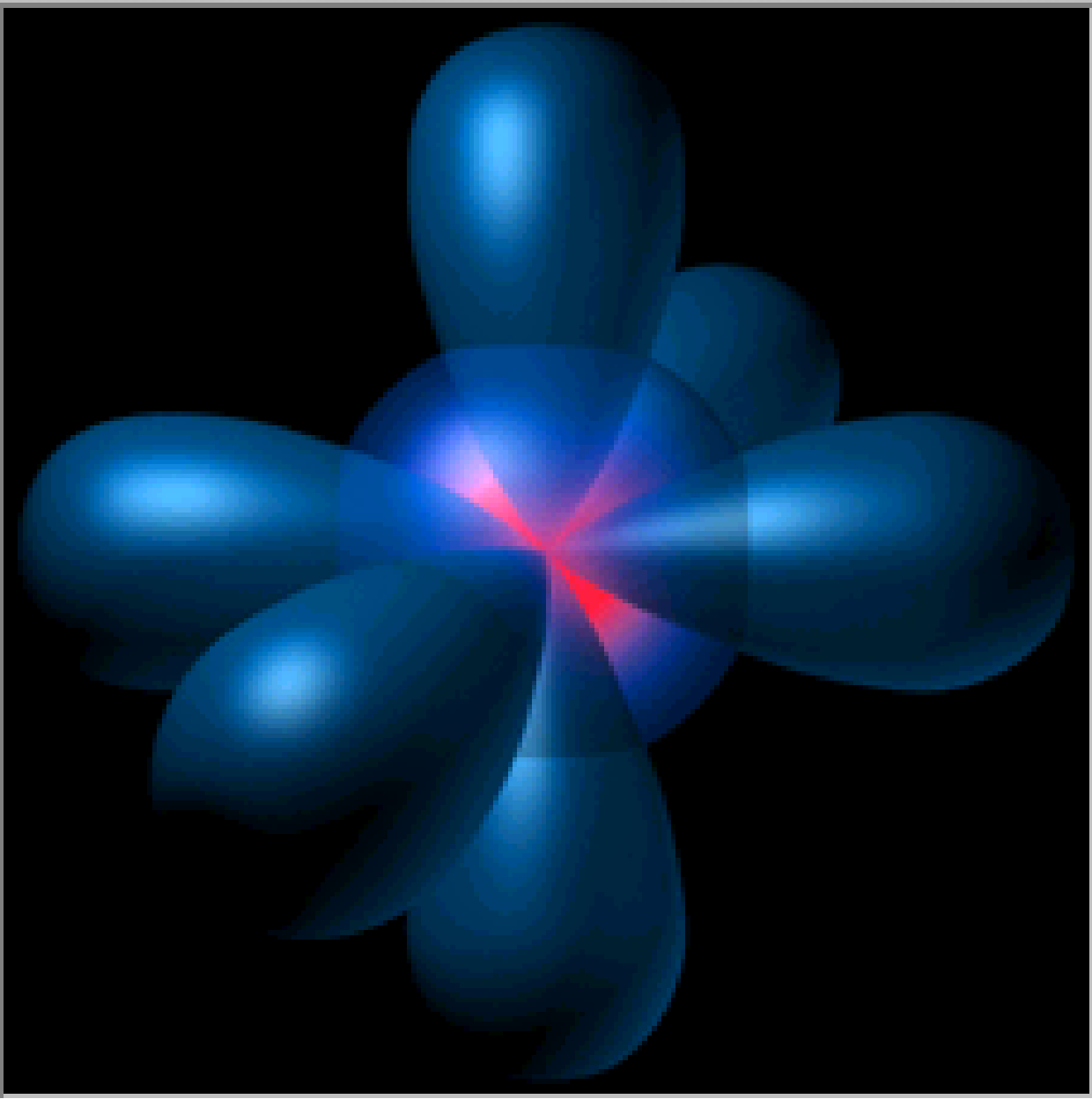
3. Появляется боковая сила



# Тема 4. Электрическое поле в диэлектриках

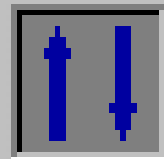
- 4.1. Электрический диполь
- 4.2. Электрическое поле вне молекулы



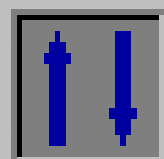


$^{14}_7\text{N}$   
 $2s^2 2p^3$  14.007

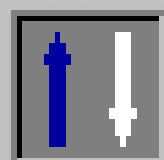
1S



2S

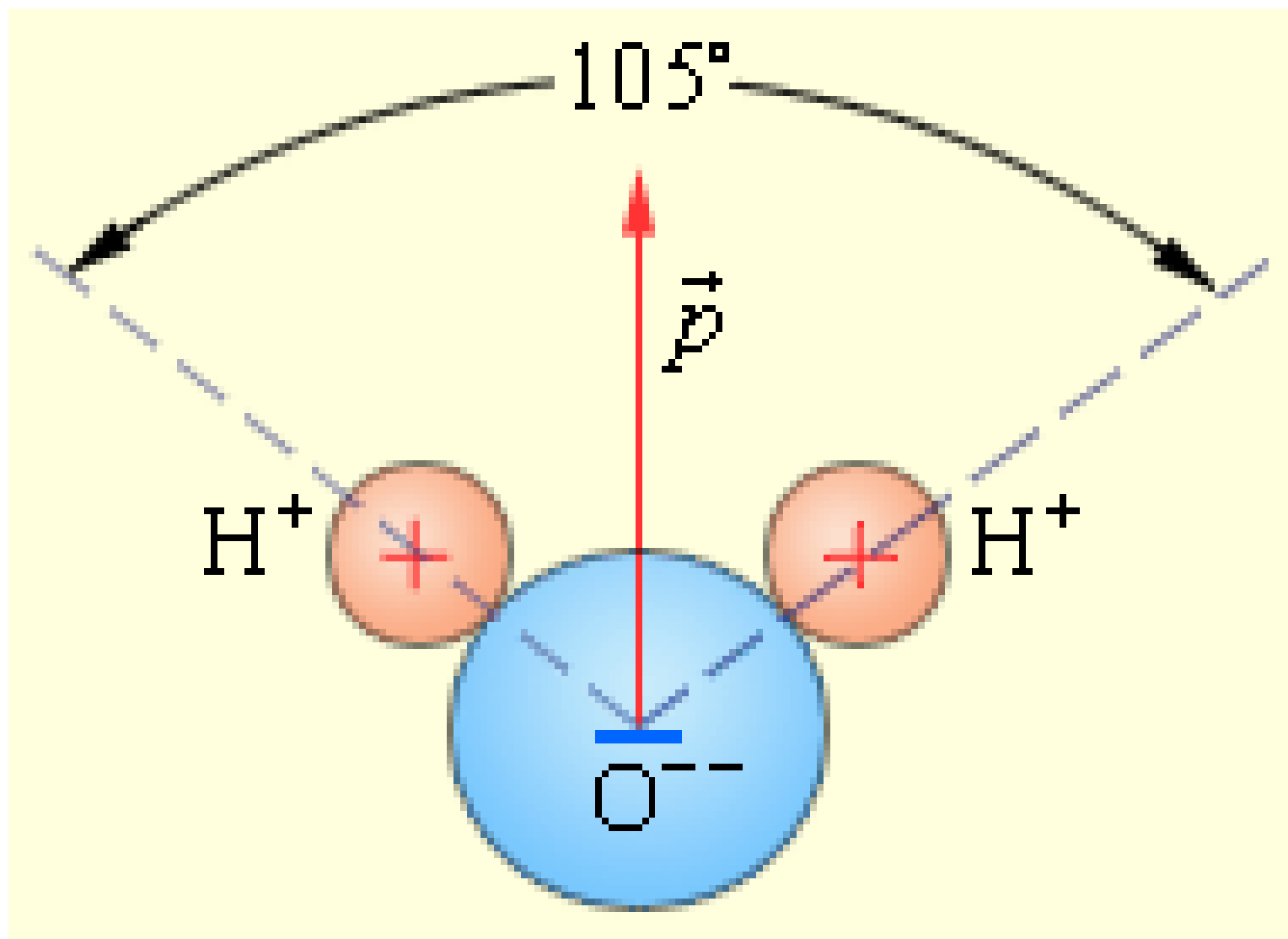


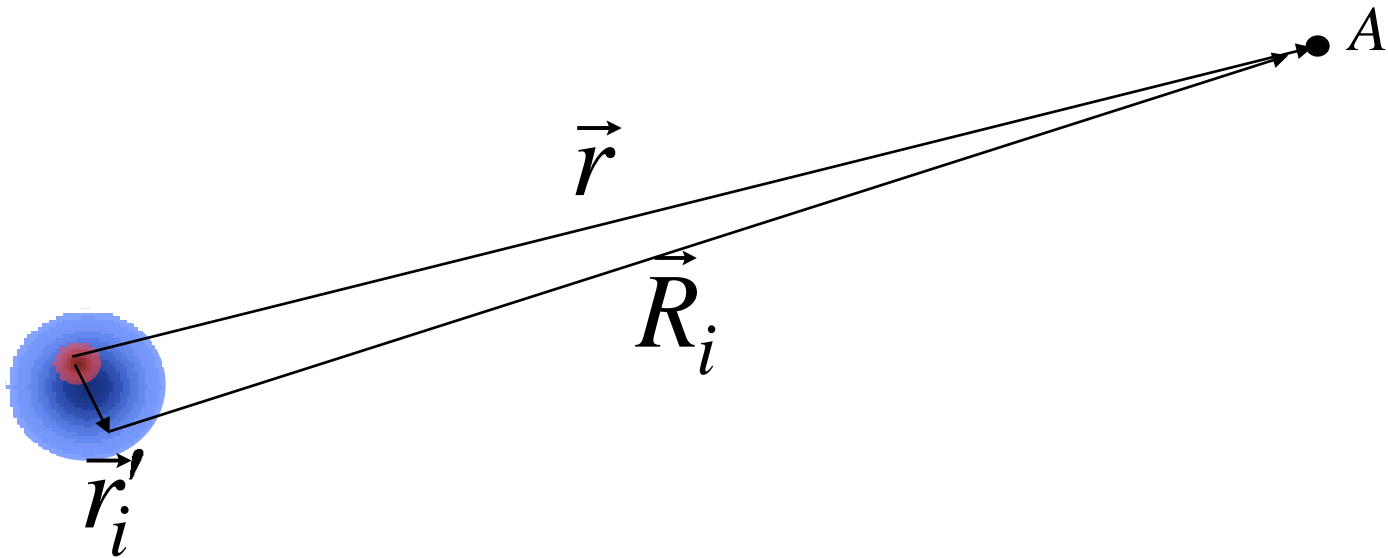
2P



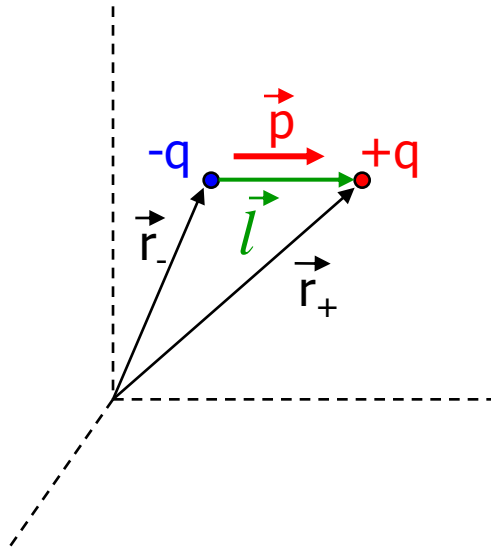
- 1  $^1_1\text{H}$
- 2  $^4_2\text{He}$
- 3  $^6_3\text{Li}$
- 4  $^9_4\text{Be}$
- 5  $^{10}_5\text{B}$
- 6  $^{12}_6\text{C}$
- 7  $^{14}_7\text{N}$
- 8  $^{15}_8\text{O}$
- 9  $^{18}_9\text{F}$
- 10  $^{20}_{10}\text{Ne}$

# молекула воды





$$\varphi_A = \sum k \frac{q_i}{r} + \sum k \frac{q_i r'_i \cos \theta_i}{r^2} + \dots$$

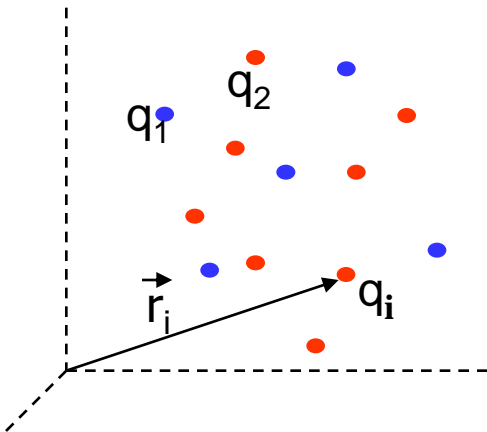


$\vec{p}$  - электрический момент диполя:

$$\vec{l} = \vec{r}_+ - \vec{r}_-$$

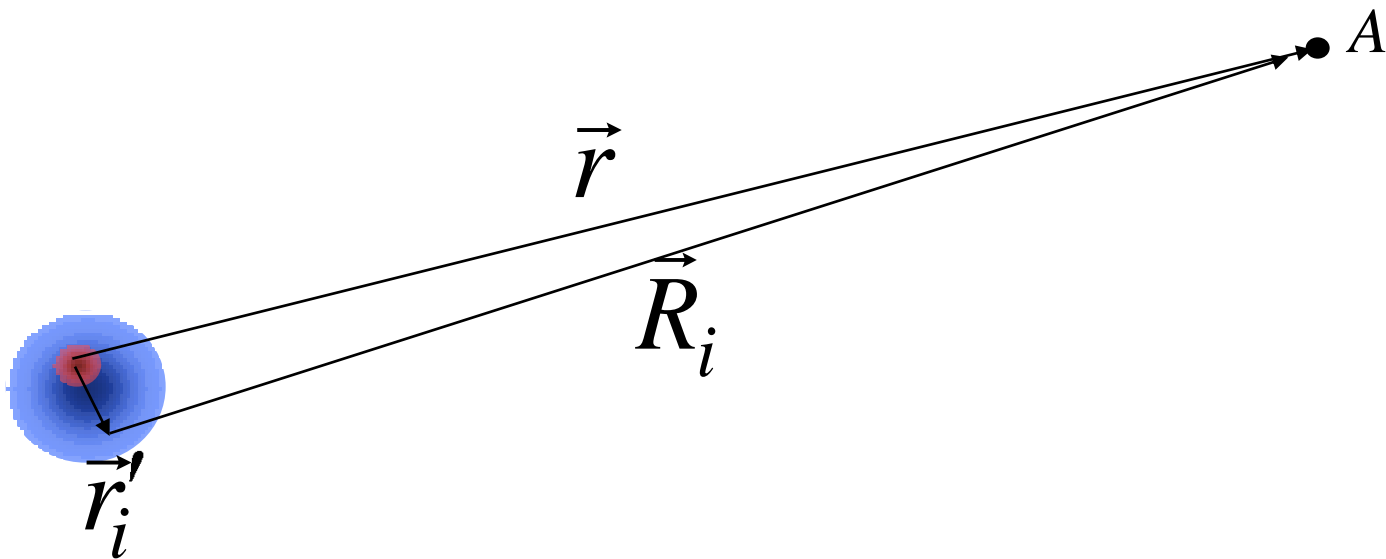
$$\vec{p} = q\vec{r}_+ - q\vec{r}_- = q_+\vec{r}_+ + q_-\vec{r}_-$$

Электрический момент системы из N зарядов:



$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N q_i \vec{r}_i$$

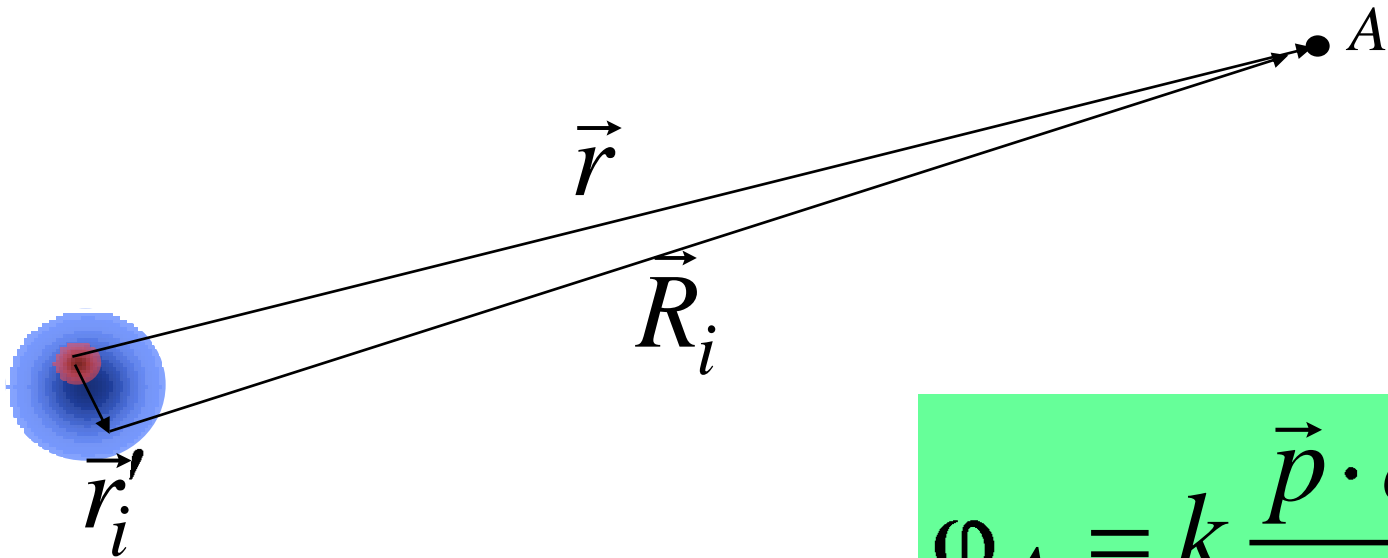




$$\varphi_A = \sum k \frac{q_i}{r} + \sum k \frac{q_i r_i' \cos \theta_i}{r^2} + \dots$$

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N q_i \vec{r}_i$$

$$\varphi_A = \sum k \frac{q_i r_i' \cos \theta_i}{r^2} = \sum k \frac{q_i \vec{r}_i' \cdot \vec{e}_{\vec{r}}}{r^2} = k \frac{\vec{p} \cdot \vec{e}_{\vec{r}}}{r^2}$$



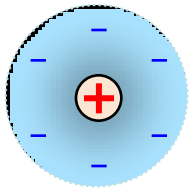
$$\varphi_A = k \frac{\vec{p} \cdot \vec{e}_{\vec{r}}}{r^2}$$

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N q_i \vec{r}_i$$

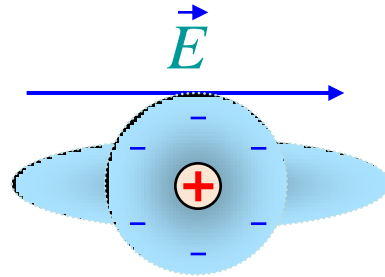
## Замечание:

- Если  $\sum_{i=1}^N q_i = 0$ , то  $\vec{p}$  не зависит от выбора начала отсчета.

$$E = 0$$



$$l = 0; p_{am} = 0$$



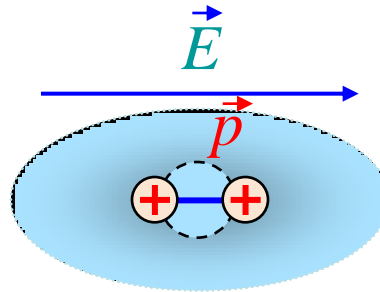
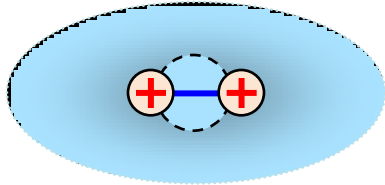
$$\vec{p} \uparrow \uparrow \vec{E}$$

$$\vec{p} = \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

$\beta$  – поляризуемость атома

1. неполярные молекулы ( $\text{H}_2, \text{N}_2, \text{O}_2\dots$ )

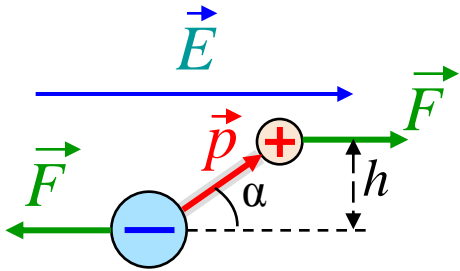
$$E = 0, p = 0$$



$$\vec{p} = \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

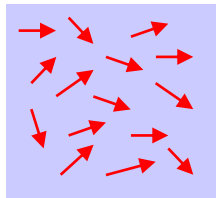
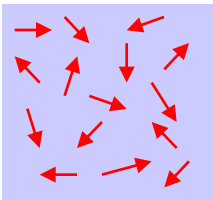
$\beta$  – поляризуемость молекулы

2. Полярные молекулы ( $\text{HCl}, \text{NaCl}, \text{CO}\dots$ )



$$\langle \vec{p} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i$$

$$E = 0, \langle \vec{p}_{0i} \rangle = 0$$



$$M = F h = q E l \sin \alpha = p E \sin \alpha$$

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

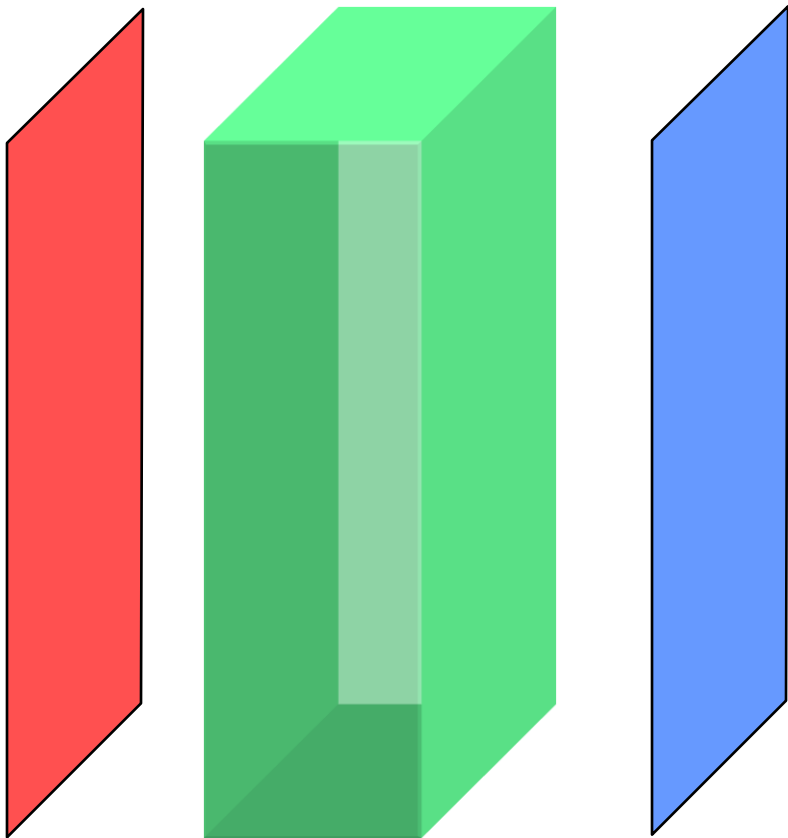
$$E \neq 0, \langle \vec{p} \rangle = \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{T}$$

# Тема 4. Электрическое поле в диэлектриках

- 4.2. Электрическое поле вне молекулы
- 4.3. Электрическое поле диэлектрика

# Поле внутри плоского конденсатора с диэлектриком



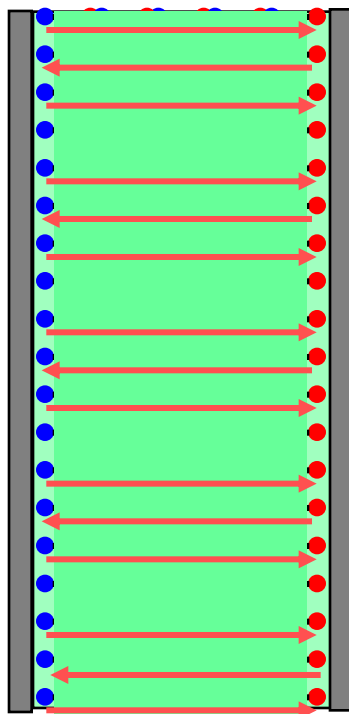
Вне конденсатора:  $E = 0$

Внутри конденсатора:

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

$$E = ?$$

# Поле внутри плоского конденсатора с диэлектриком

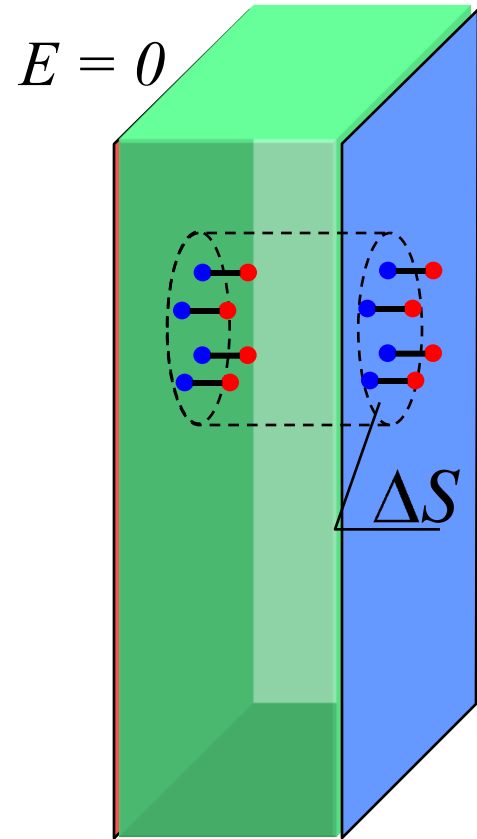


$\sigma_{\text{фискт}}$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$



# Поле внутри плоского конденсатора с диэлектриком



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

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

$$E' = \frac{\sigma_{\text{фикт}}}{\epsilon_0}$$

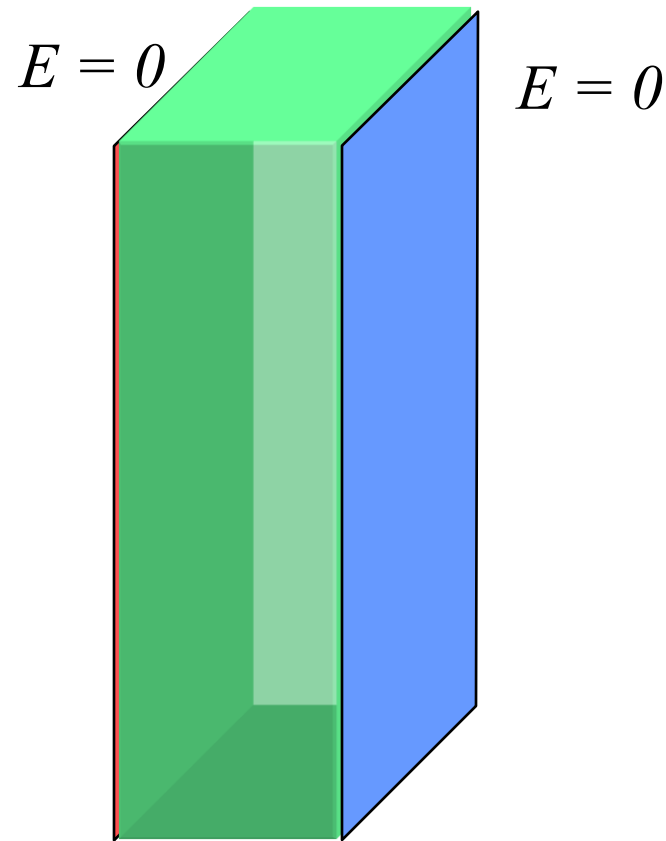
$$Q' = -qnl\Delta S$$

$$ql = p; \quad pn = P; \quad Q' = -P\Delta S$$

Вывод:

$$\sigma_{\text{фикт}} \equiv P$$

# Поле внутри плоского конденсатора с диэлектриком



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

$$E' = -\frac{P}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

С учетом направлений:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \frac{1}{\epsilon_0} \vec{P}$$

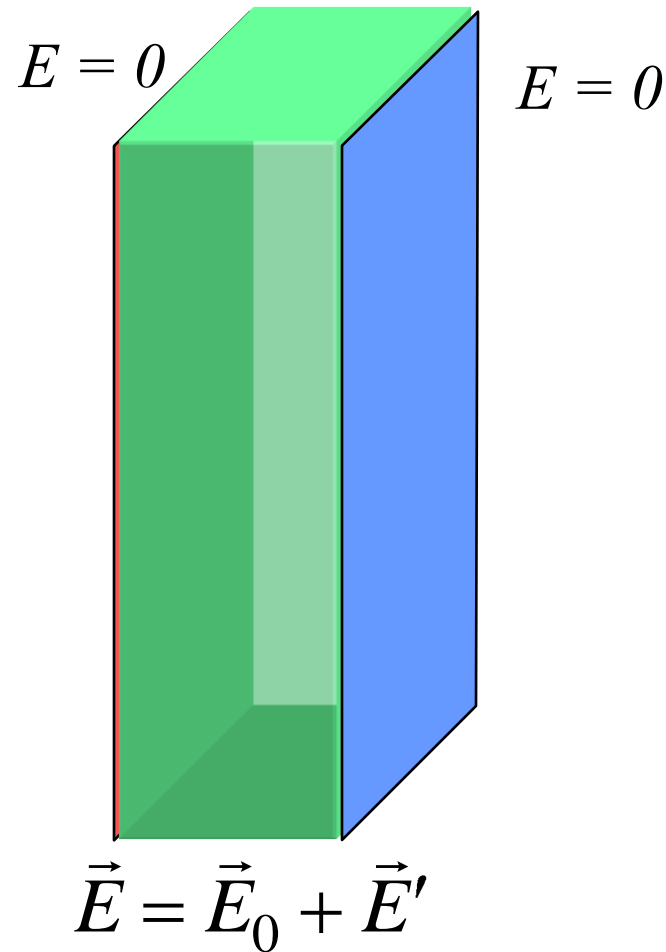
Для однородных и изотропных диэлектриков

$$\vec{P} = \kappa \epsilon_0 \vec{E}$$

$\kappa$ -диэлектрическая  
восприимчивость

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \kappa \vec{E}$$

## Поле внутри плоского конденсатора с диэлектриком



$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \kappa \vec{E}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{1 + \kappa} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon}$$

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость

# Вывод:

Диэлектрик уменьшает напряженность  
электрического поля!

# Тема 4. Электрическое поле в диэлектриках

- 4.3. Электрическое поле диэлектрика
- 4.4. Вектор электрического смещения

В общем случае

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q + \sum q_{\mu}$$

алгебраическая(!) сумма ВСЕХ внутренних зарядов

Но  $\oint_S \vec{E}_0 d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q$  т.к.  $\vec{E} = \vec{E}_0 - \frac{1}{\epsilon_0} \vec{P}$ , то  $\vec{E}_0 = \vec{E} + \frac{1}{\epsilon_0} \vec{P}$

Введем  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$  Электрическое смещение (электрическая индукция):

Тогда  $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum q$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho_q dV$$

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

Для однородных и изотропных диэлектриков

$$\vec{P} = \kappa \epsilon_0 \vec{E} \quad \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} (1 + \kappa)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$$

# Выводы:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon} \quad \text{Поле в диэлектрике}$$

ослабляется !

$$\vec{E}_0 = \varepsilon \vec{E}$$

Электрическое смещение  
(электрическая индукция):

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

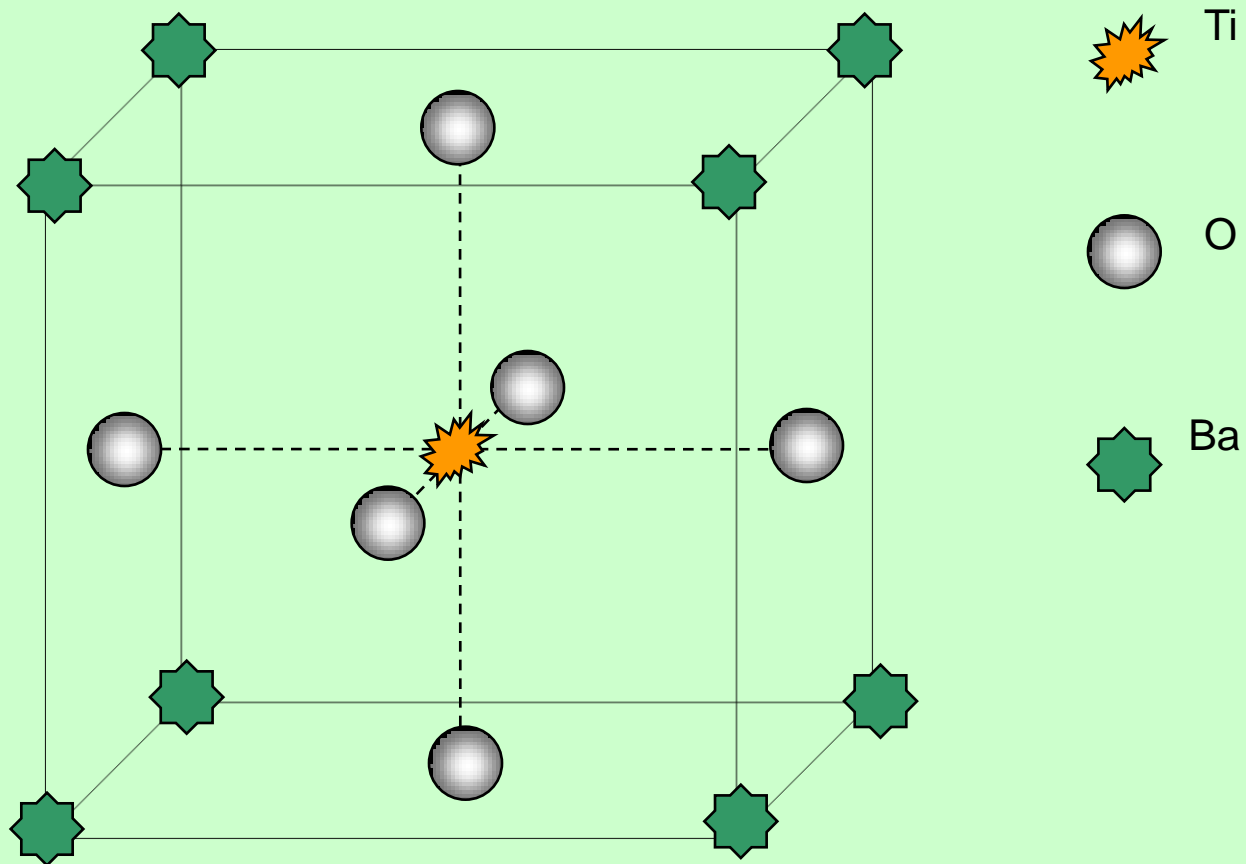
Теорема Гаусса

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_i q_i$$

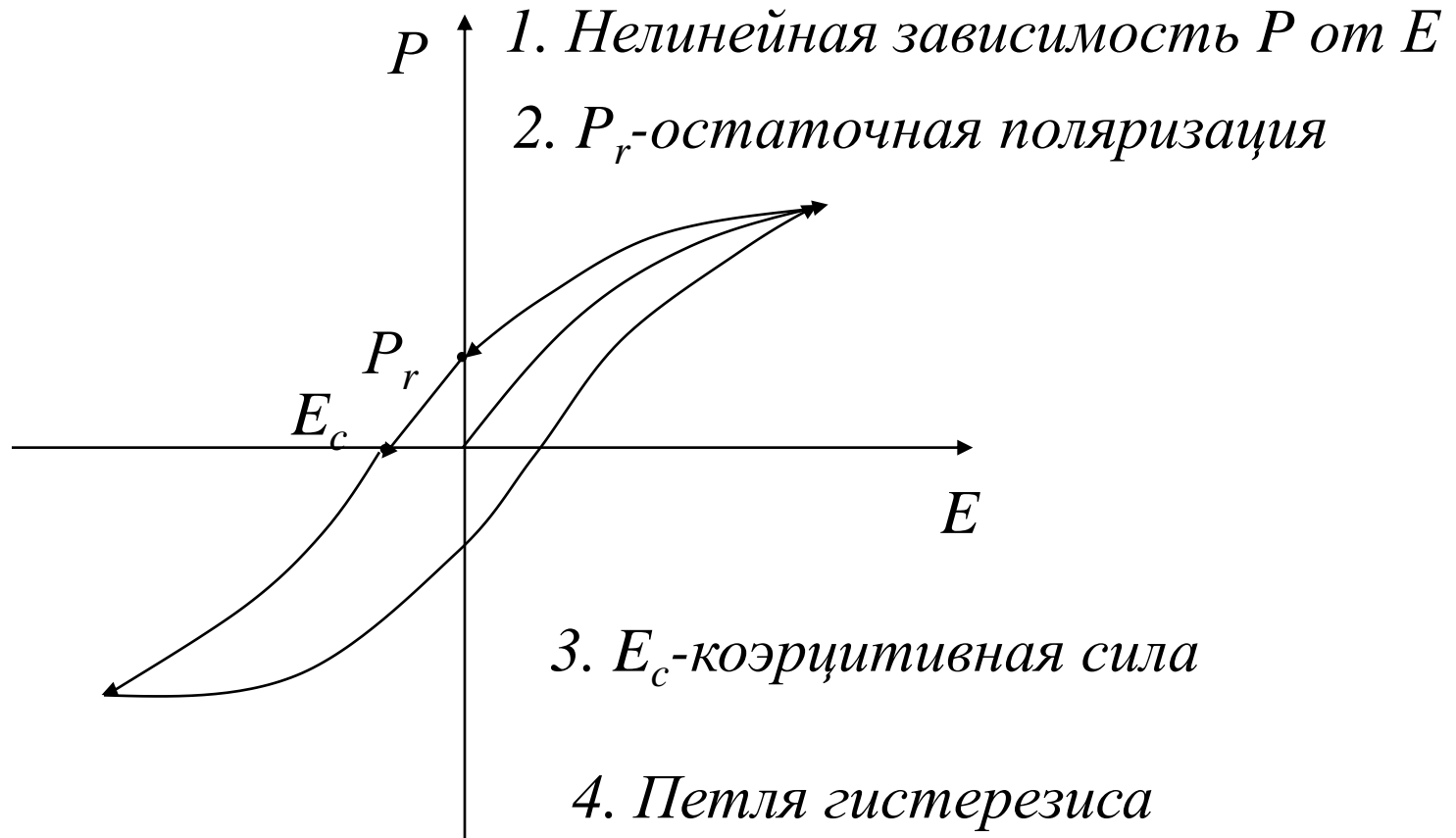
# Сегнетоэлектричество и пьезоэлектричество



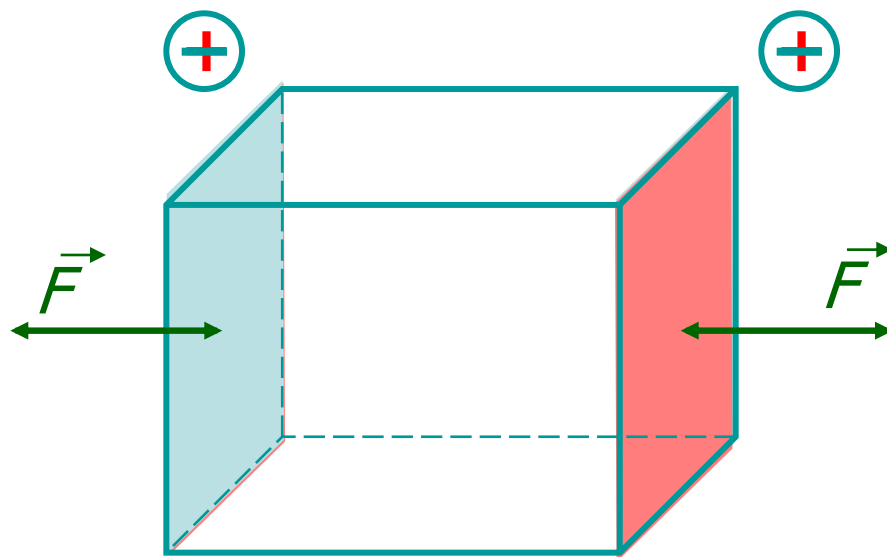
# Титанат бария $BaTiO_3$



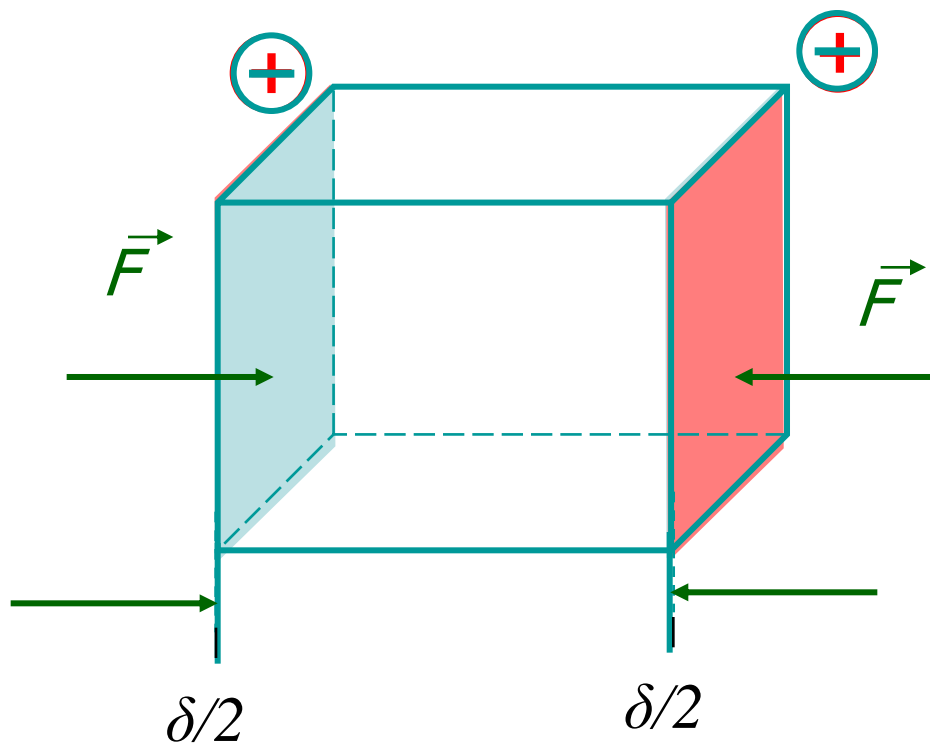
# Гистерезис



# Прямой пьезоэлектрический эффект



# Прямой пьезоэлектрический эффект



$$P \sim \delta$$

$$P \sim F$$

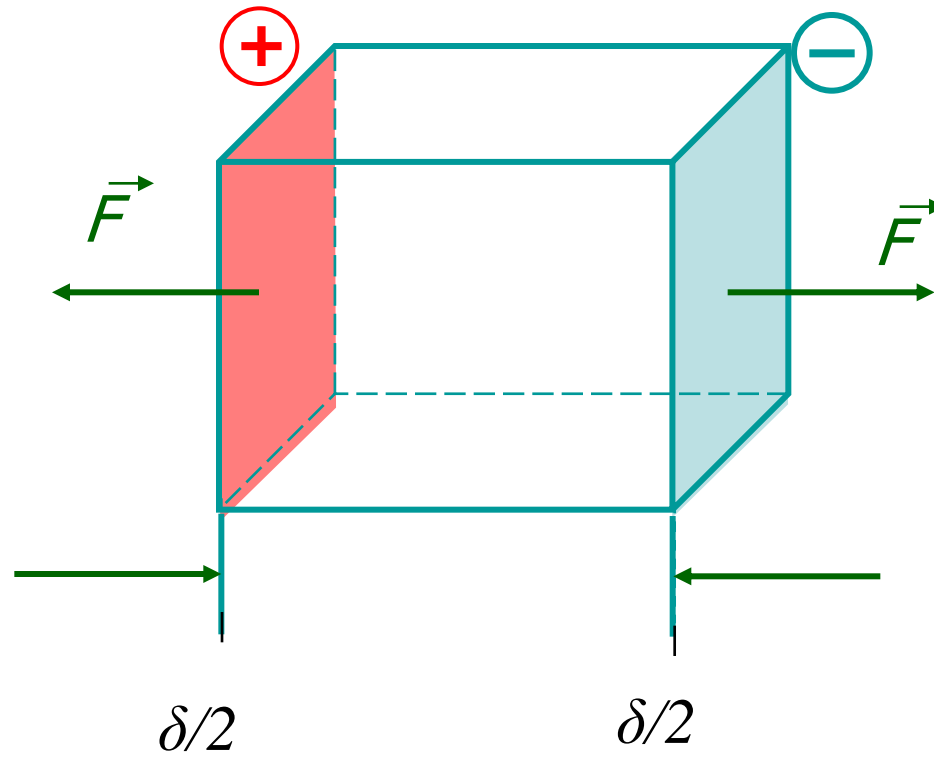
$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \frac{1}{\epsilon_0} \vec{P}$$

*0*

$$E \sim F$$

$$U \sim F$$

## Обратный пьезоэлектрический эффект:



$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \frac{1}{\epsilon_0} \vec{P}$$

$$P \sim E$$

$$\delta \sim P \sim E$$

$$F \sim \delta$$

$$F \sim E$$