

# Лекция 3-2020. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

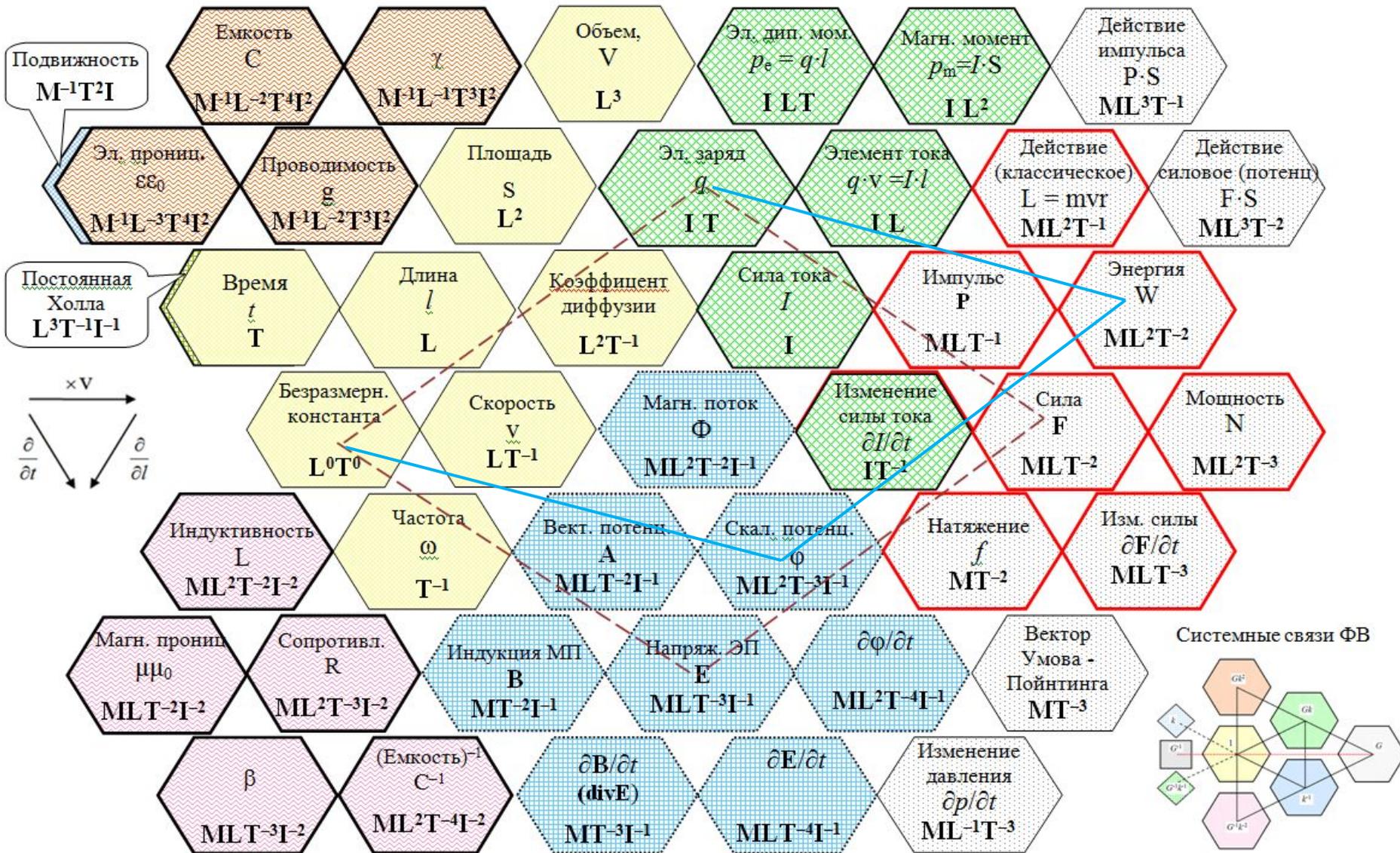
1. Электрический диполь в электростатическом поле.
2. Поляризация диэлектриков.
3. Электростатическое поле в диэлектрике.
4. Поляризованность.
5. Свободные и связанные заряды.
6. Связь поляризованности с плотностью связанных зарядов.
7. Вектор электрического смещения.
8. Обобщение теоремы Гаусса.
9. Поле на границе раздела диэлектриков.

Реальность, отражённая в нашем сознании, -  
лишь очень приближённое подобие  
происходящего на самом деле.

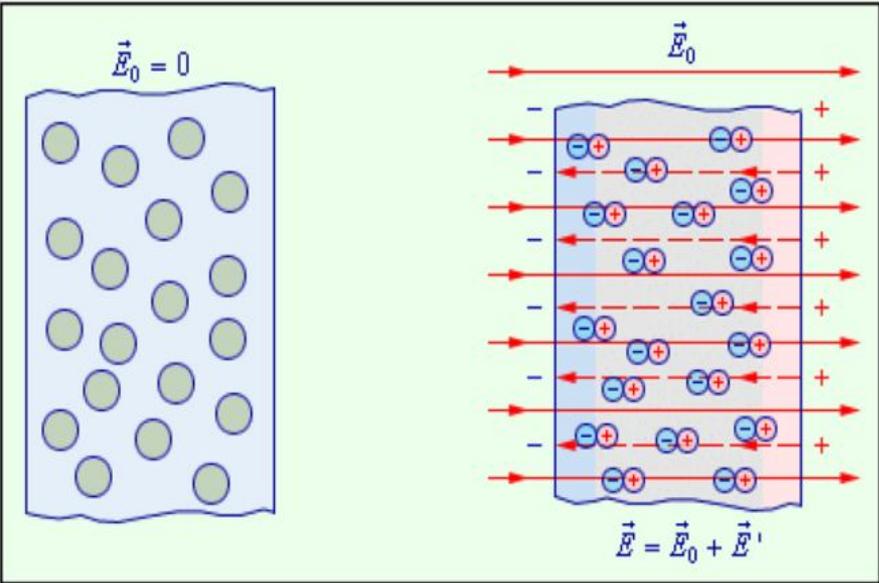
«С тех пор прошло 80 лет и я по-прежнему  
задаю себе этот же вопрос (прим. — Что же  
такое электричество?), но не в состоянии  
ответить на него »

[Никола Тесла](#)

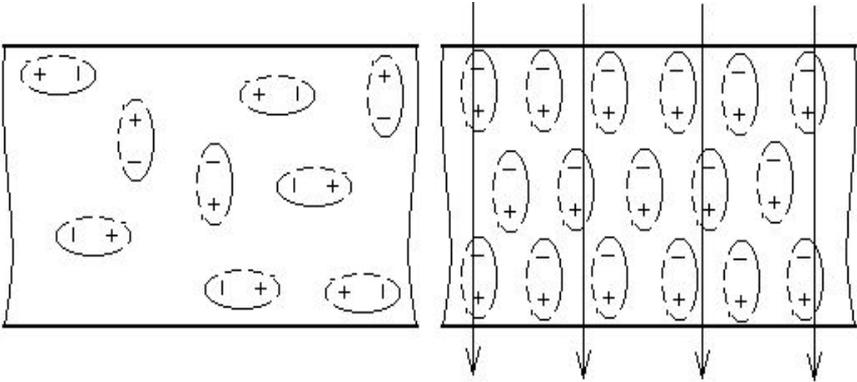
# СИСТЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ



Не срисовывать

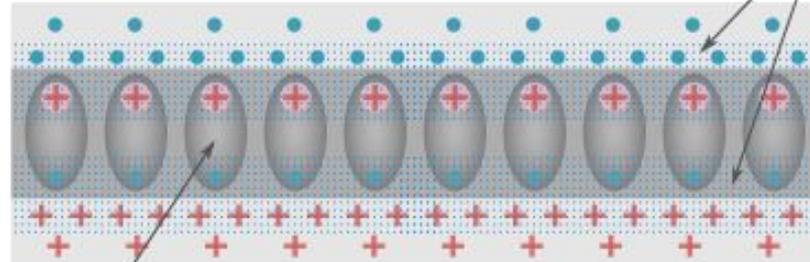


Поляризация  
неполярного  
диэлектрика



Поляризация  
полярного диэлектрика

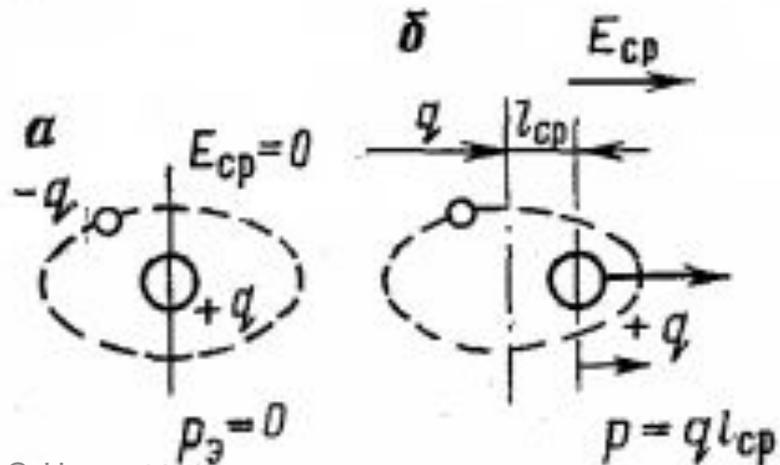
Внутреннее электрическое поле между диэлектриком и обкладками



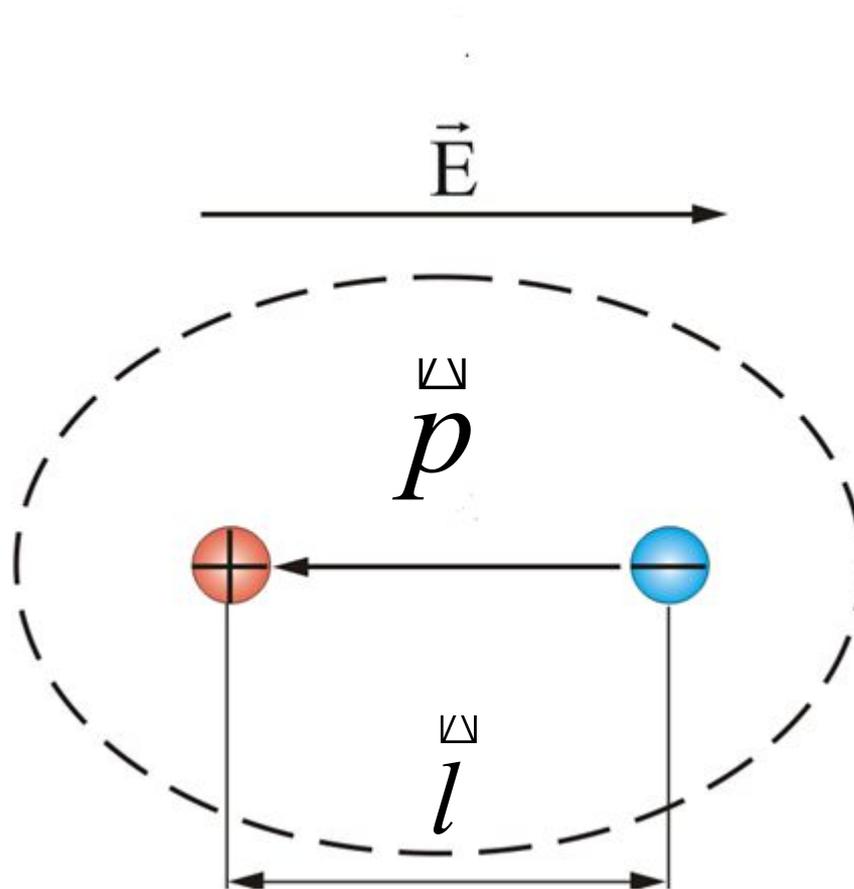
Поляризованные атомы диэлектрика

Поляризация диэлектрика конденсатора

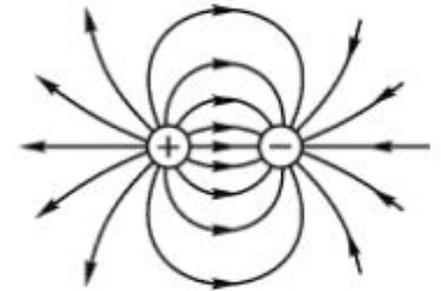
### Поляризация отдельного атома



# Электрический диполь

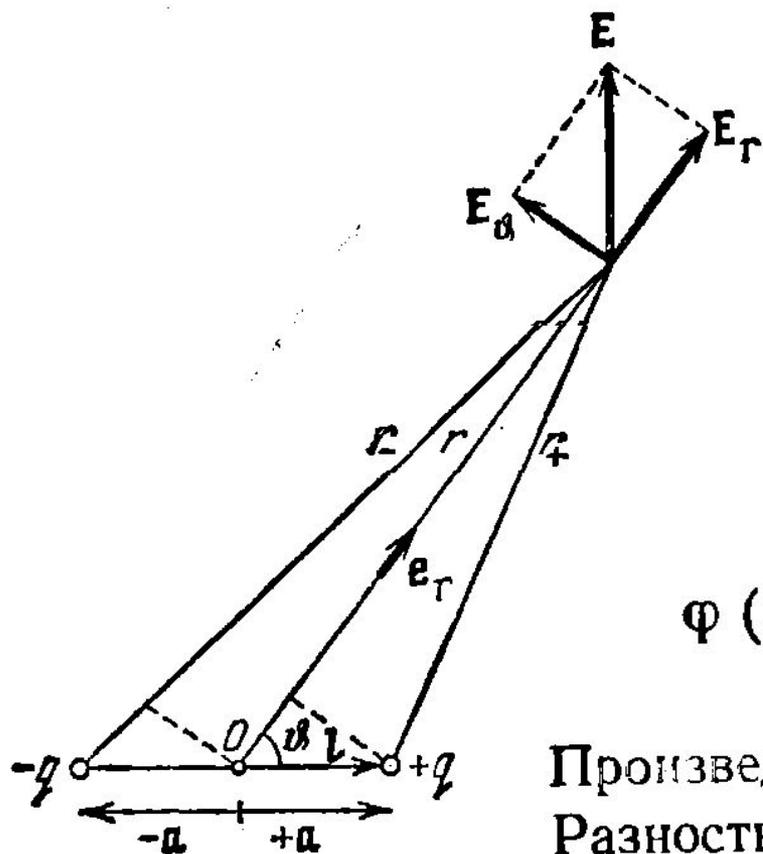


$$\vec{p} = ql$$



Направление вектора  $\vec{P}$  принято от минуса к плюсу !!!

## Потенциальное поле диполя (по Савельеву)



$$r_+ = r - a \cos \vartheta = r - a e_r,$$

$$r_- = r + a \cos \vartheta = r + a e_r.$$

$$2a e_r = l e_r$$

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q}{r_+} - \frac{q}{r_-} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q(r_- - r_+)}{r_+ r_-}$$

Произведение  $r_+ r_-$  можно заменить через  $r^2$ .  
Разность  $r_- - r_+$  равна  $2a e_r = l e_r$ . Следовательно,

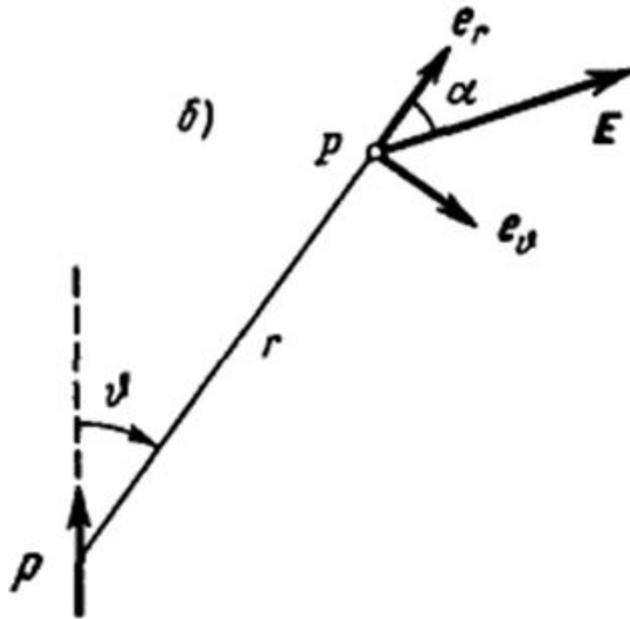
Потенциал поля диполя:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q l e_r}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p e_r}{r^2}$$

# Вывод напряженности поля диполя

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{e}_r}{r^2}$$

$$E_r = -\frac{\partial\varphi}{\partial r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p \cos\theta}{r^3},$$



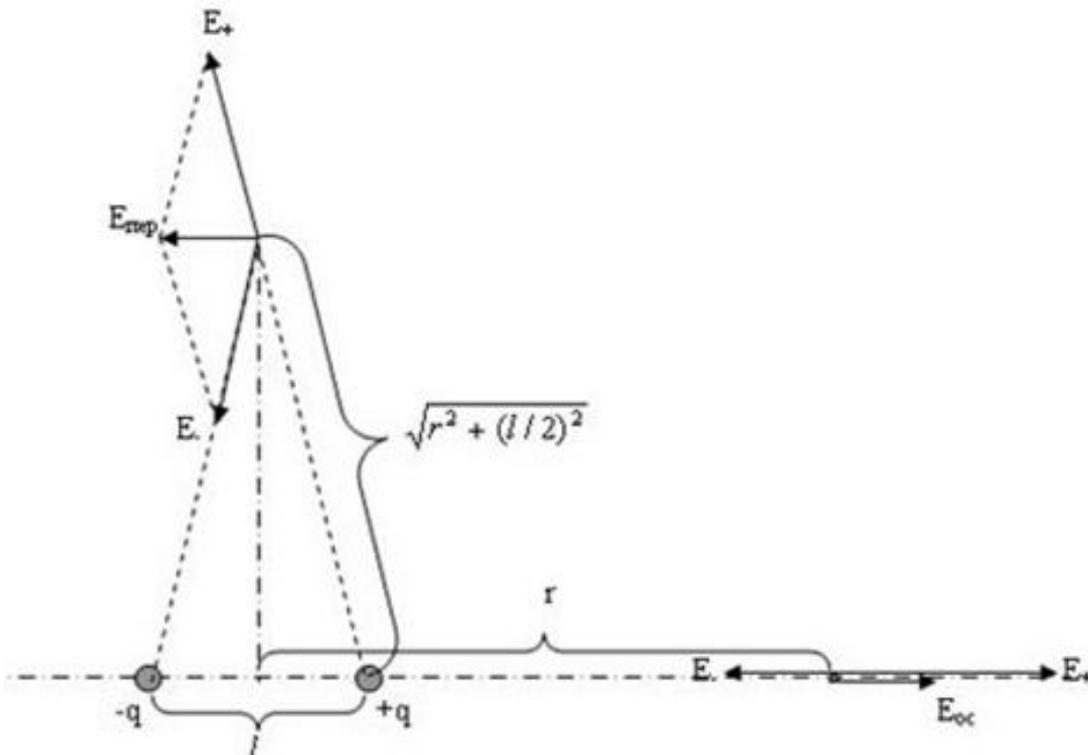
$$E_\theta = -\frac{\partial\varphi}{r\partial\theta} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \sin\theta}{r^3}.$$

$$(4\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1 + 3\cos^2\theta)$$

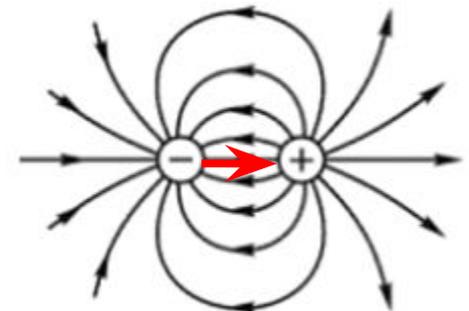
$$E = \sqrt{E_r^2 + E_\theta^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2\theta}.$$

# Поле электрической напряженности диполя

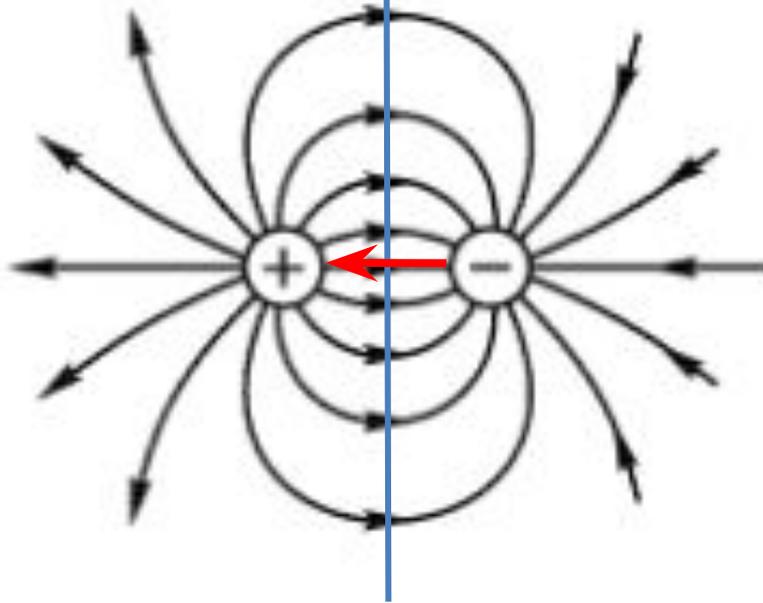
$$E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \frac{p_e}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2\theta}$$



$$p_e = ql$$



ПНП



$$\vec{p}_e = ql$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{e}_r}{r^2}$$

Повтор формул с другим обозначением угла и с учетом среды

$$E_r = \frac{\partial\varphi}{\partial r} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{2p_e \cdot \cos\theta}{r^3}$$

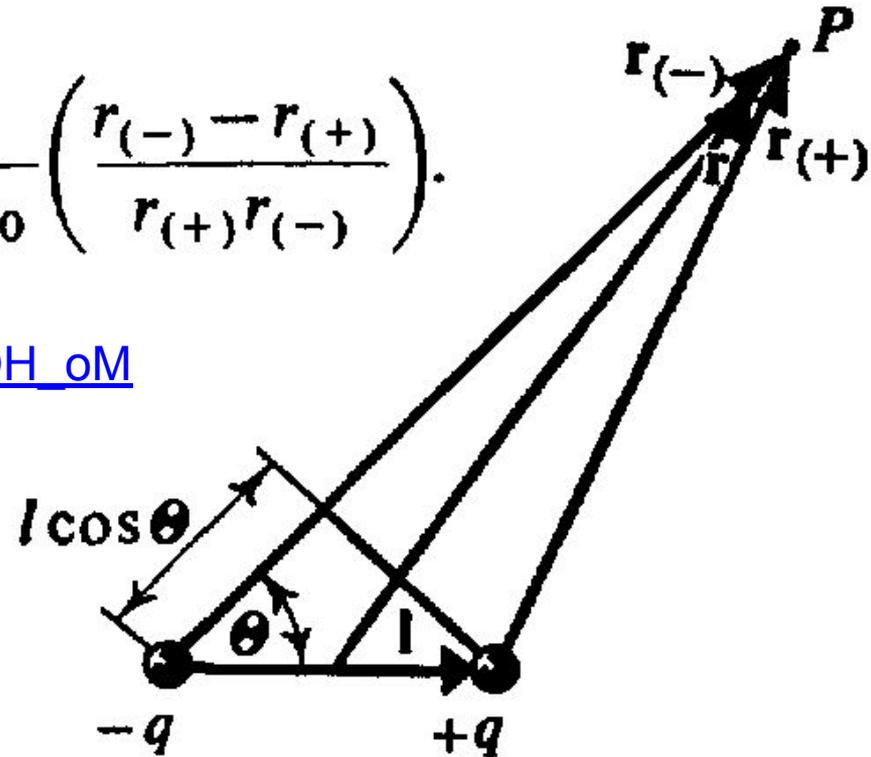
$$E_\theta = \frac{\partial\varphi}{r\partial\theta} = -\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{p_e \cdot \sin\theta}{r^3}$$

$$E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \frac{p_e}{4\pi\kappa^3} \sqrt{1 + 3\cos^2\theta}$$

$$\varphi(P) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_{(+)}} - \frac{1}{r_{(-)}} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{r_{(-)} - r_{(+)}}{r_{(+)}r_{(-)}} \right).$$

[https://www.youtube.com/watch?v=veg7yUOH\\_oM](https://www.youtube.com/watch?v=veg7yUOH_oM)

Объяснение из МФТИ.



Так как  $l \ll r$ , то можно считать  $r_{(-)} - r_{(+)} \approx l \cos \theta$ ,  $r_{(-)}r_{(+)} \approx r^2$  и характеризовать местоположение точки  $P$  радиус-векто-

ром  $\mathbf{r}$  с началом в любой точке диполя, поскольку диполь имеет сколь угодно малые геометрические размеры.

Тогда

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^3},$$

где  $ql \cos \theta = (\mathbf{p} \cdot \mathbf{r})/r$ , откуда

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{3(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{p}}{r^3} \right].$$

$$\mathbf{E} = \frac{3(\mathbf{p}\mathbf{R})\mathbf{R}}{R^5} - \frac{\mathbf{p}}{R^3} \quad (10.4)$$

в сферической системе координат  $R, \vartheta, \alpha$  с центром в диполе и полярной осью, параллельной  $\mathbf{p}$ , составляющие вектора  $\mathbf{E}$  равны

$$\begin{aligned} E_R &= \frac{2p \cos \vartheta}{R^3}, \\ E_\vartheta &= \frac{p \sin \vartheta}{R^3}, \quad E_\alpha = 0. \end{aligned} \quad (10.5)$$

Таким образом, угол  $\beta$  между силовой линией и радиусом-вектором  $\mathbf{R}$  определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{E_\vartheta}{E_R} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \vartheta.$$

На одинаковых расстояниях  $R$  от диполя поле вдоль его оси ( $\vartheta = 0$  или  $\vartheta = \pi$ ) вдвое сильнее, чем в экваториальной плоскости ( $\vartheta = \pi/2$ ).

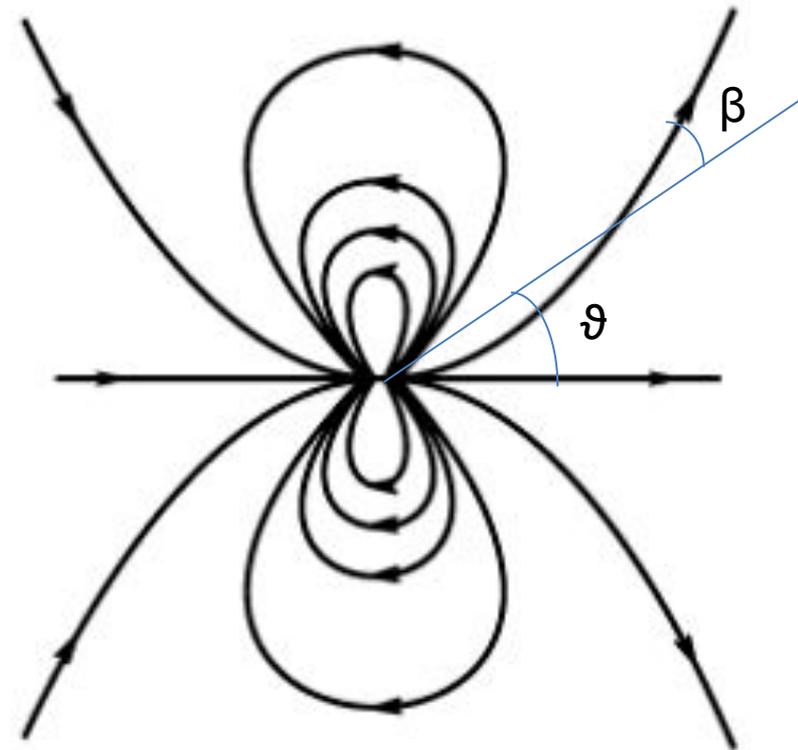
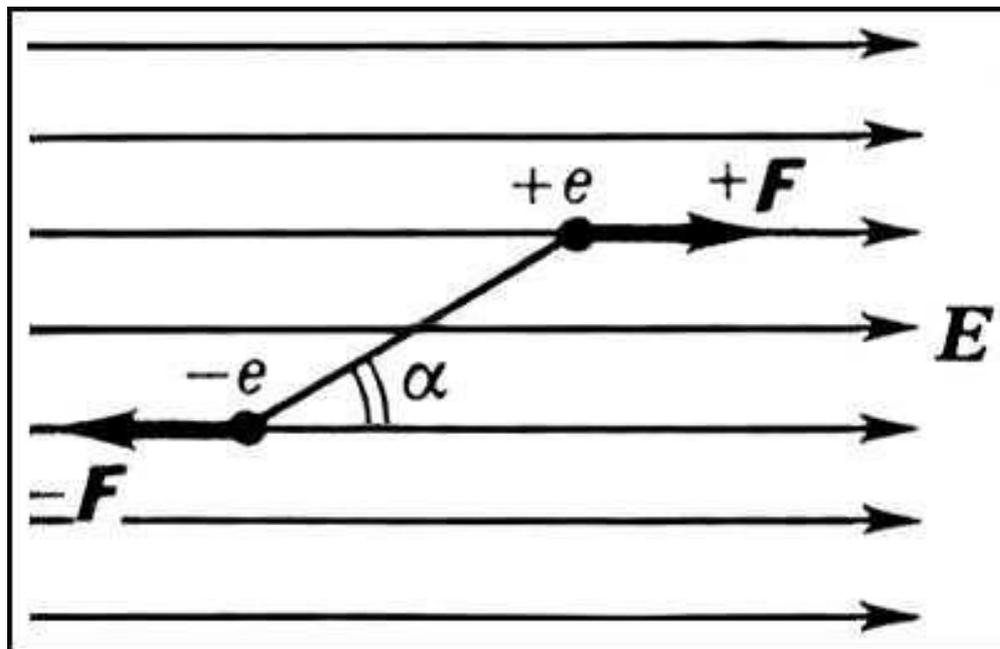


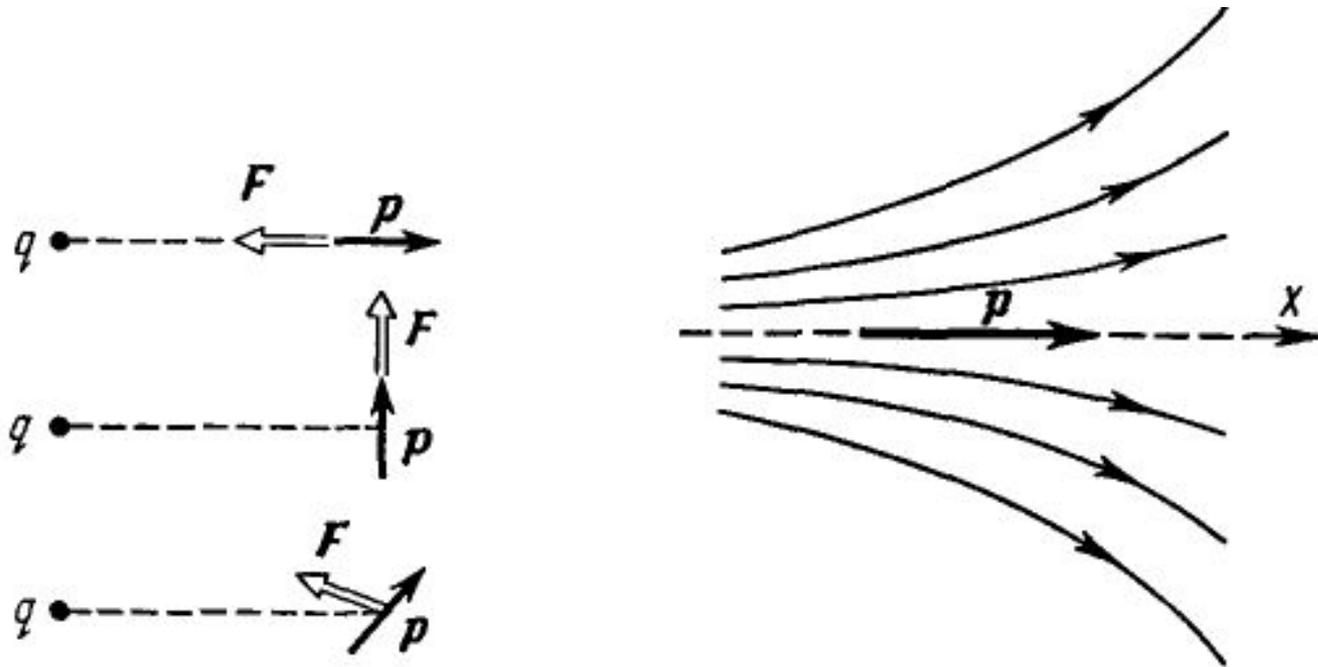
Рис. 15

Крутящий момент, действующий на  
электрический диполь  
в электростатическом поле.

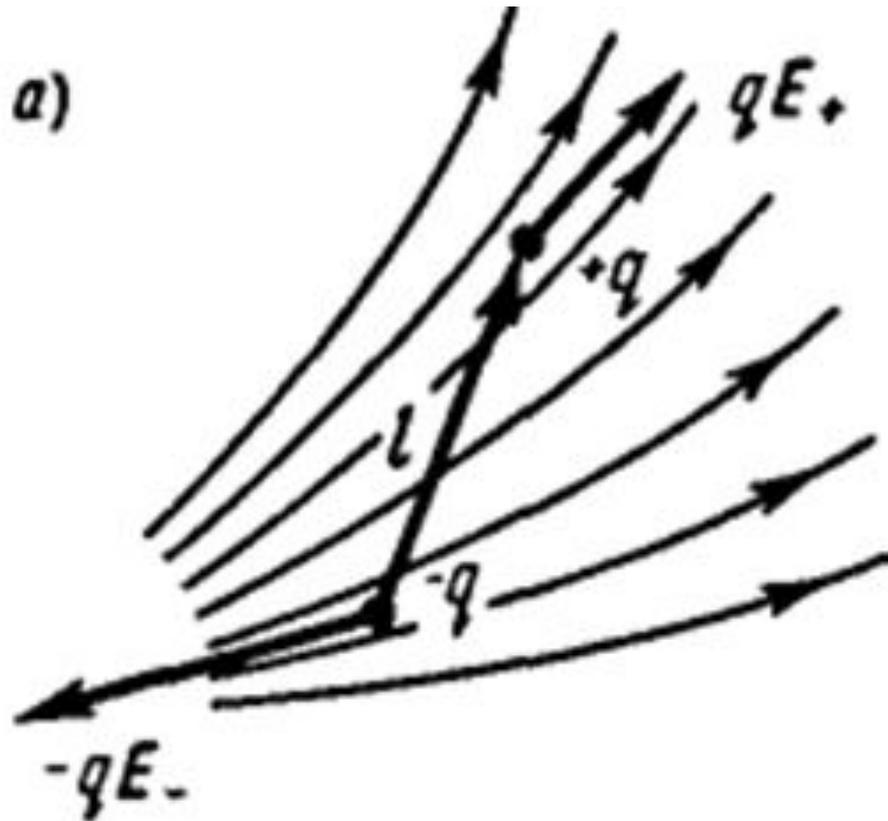


$$\vec{M}_{\text{кр}} = [\vec{p}, \vec{E}]$$

# Сила, действующая на диполь в неоднородном электрическом поле



$$F_x = p \frac{\partial E_x}{\partial l},$$



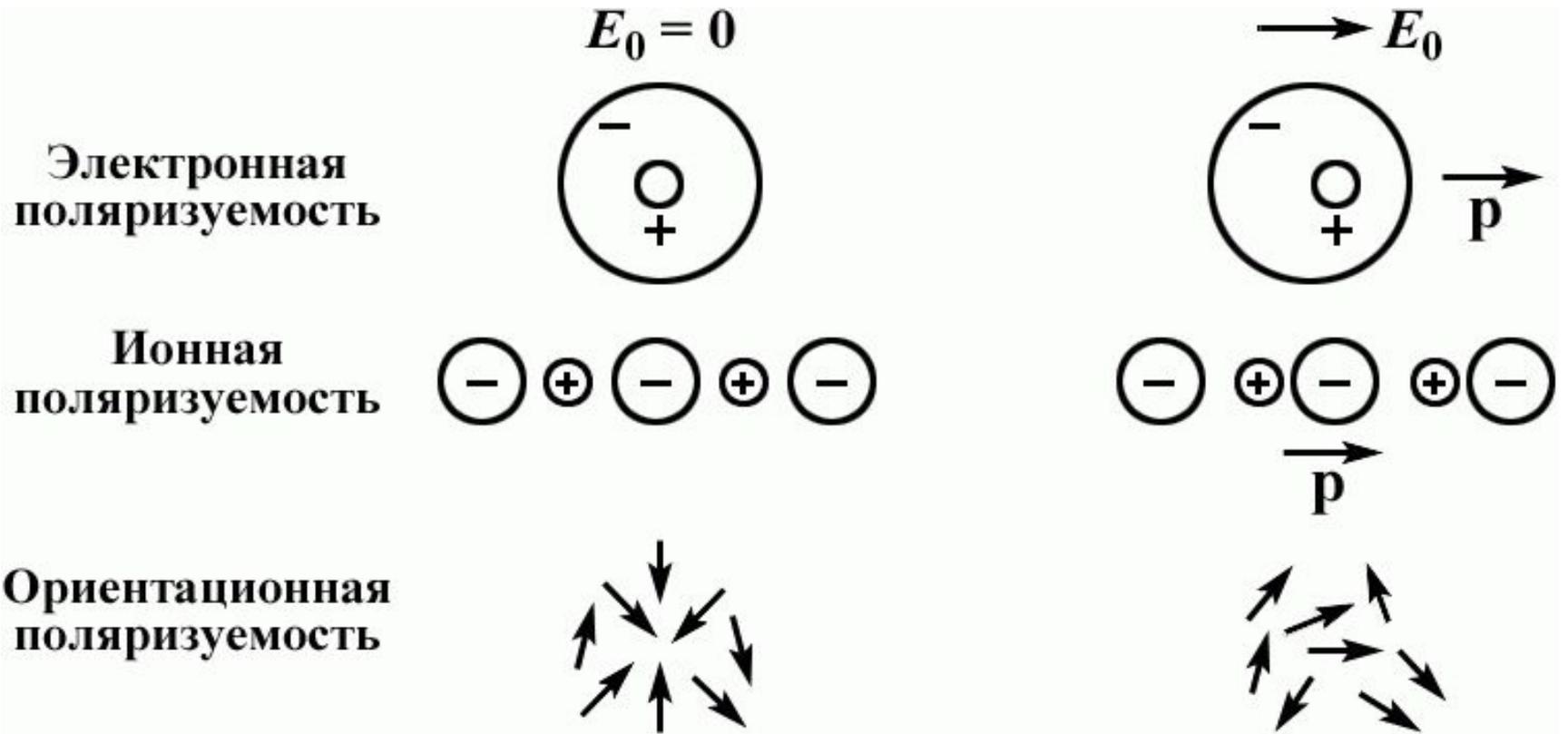
$$\vec{M}_{\text{кр}} = [\vec{p}, \vec{E}]$$

$$\vec{F} = p \frac{\partial E}{\partial l}$$

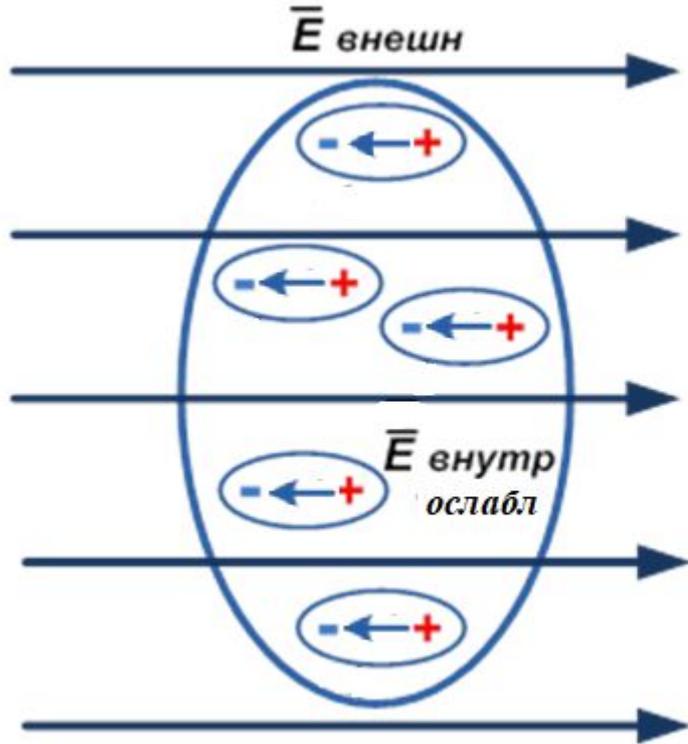
*Смещение электрических зарядов  
вещества под действием  
электрического поля называется  
**поляризацией.***

*Способность к поляризации  
является основным свойством  
диэлектриков.*

**Поляризуемость диэлектрика включает составляющие – электронную, ионную и ориентационную (дипольную).**

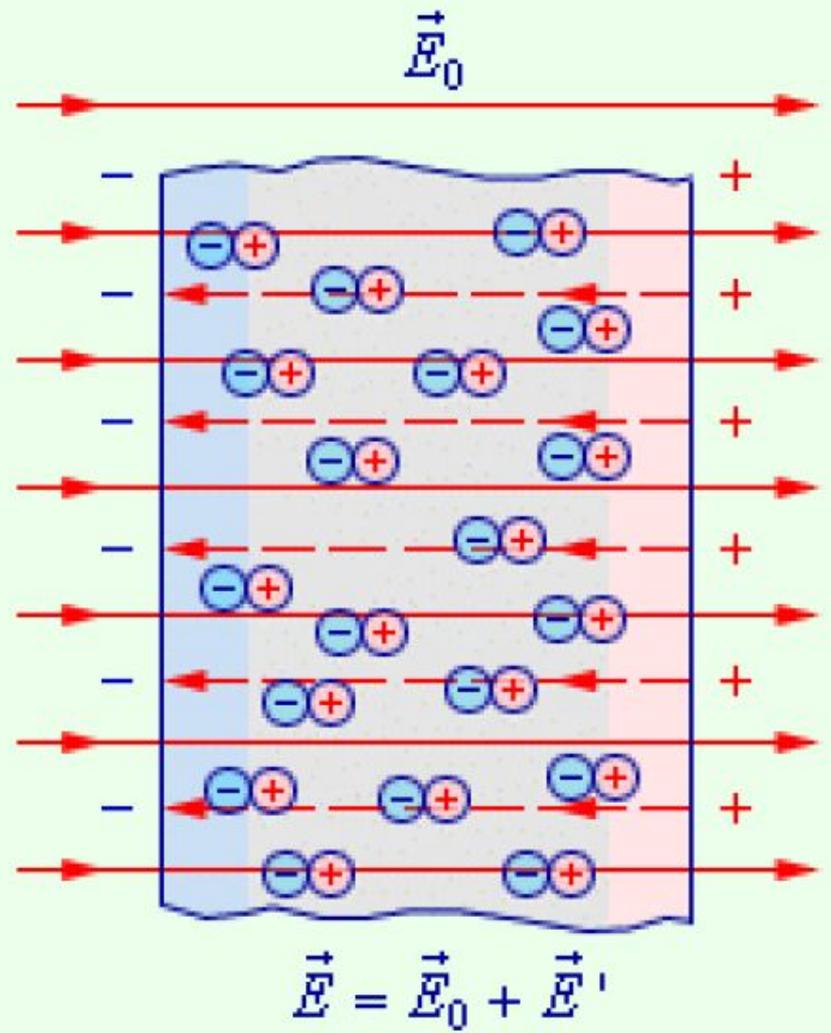
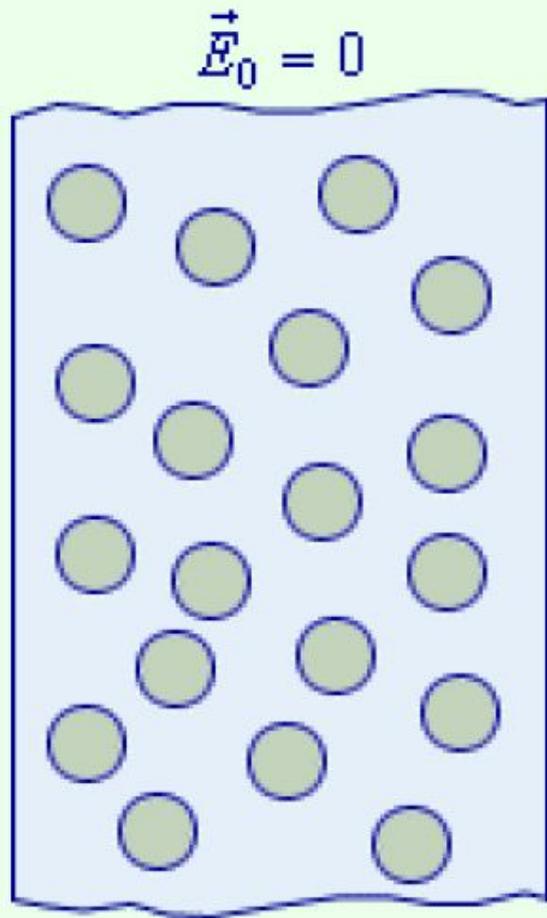


## Поляризация диэлектрика



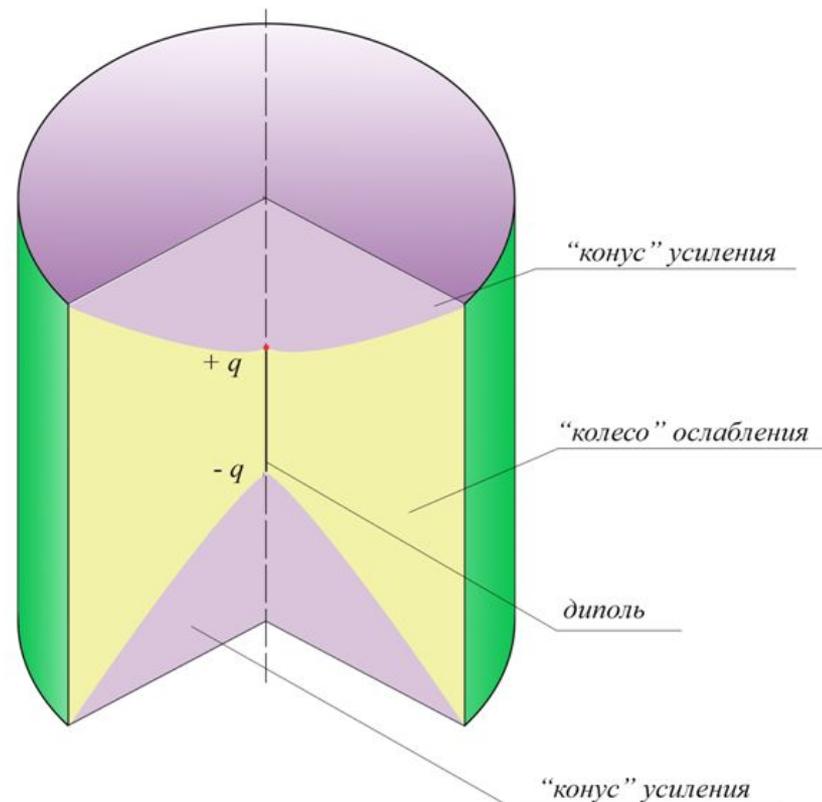
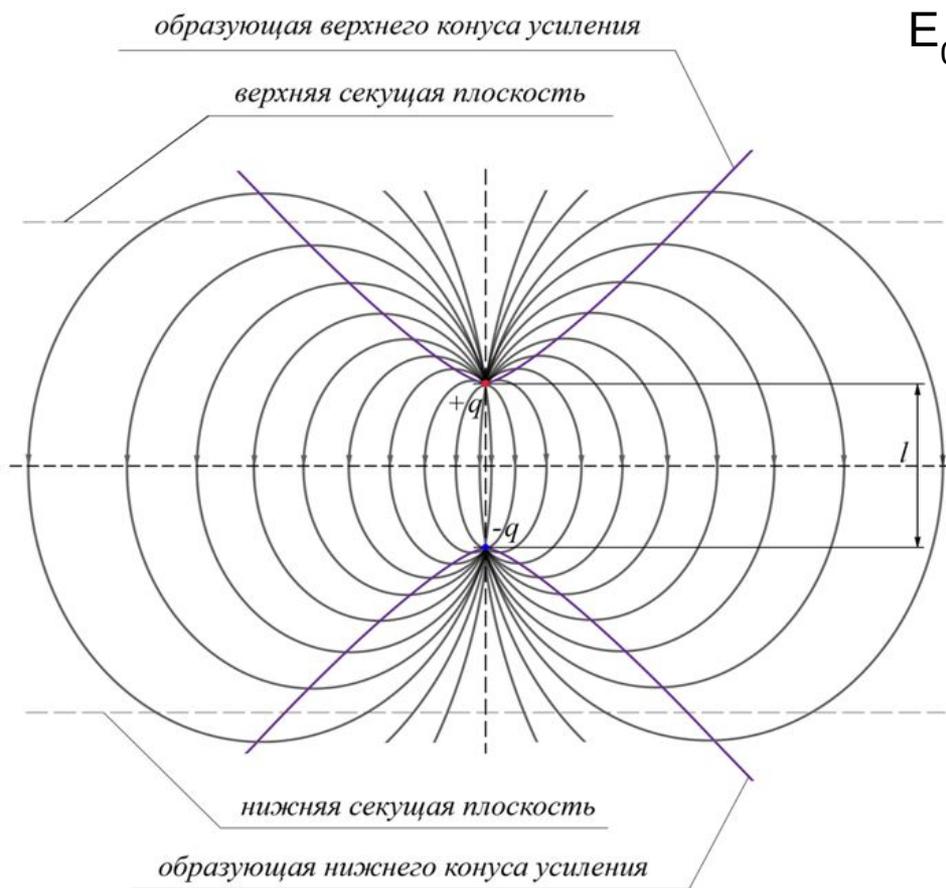
## Поляризация отдельного атома





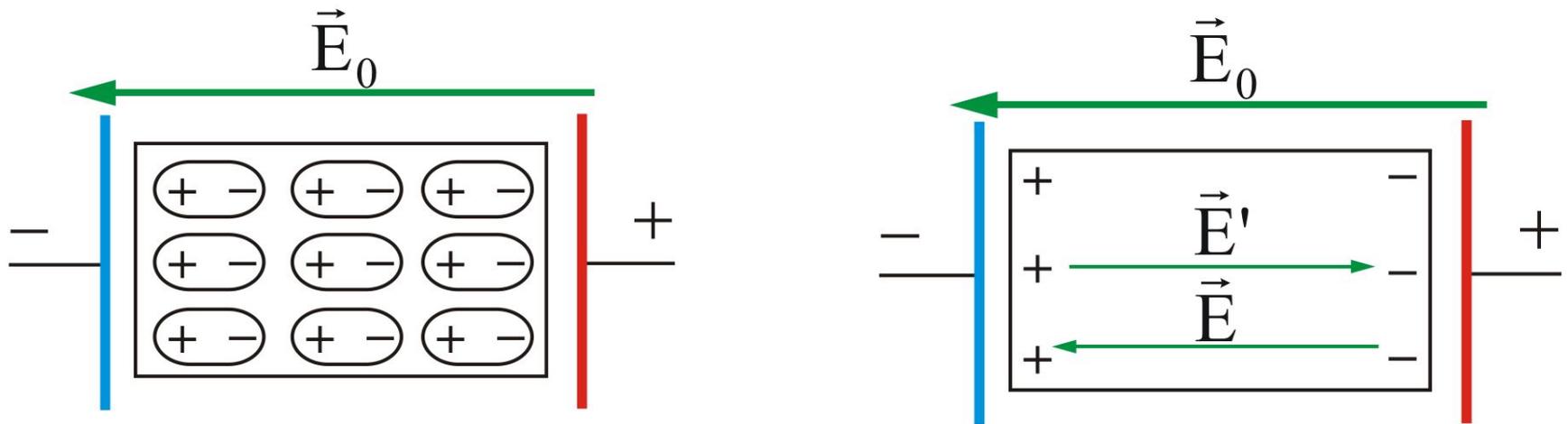
Образование связанных зарядов в диэлектрике и результирующая напряжённость.

# В.К. Скворцов. Поле диполя.



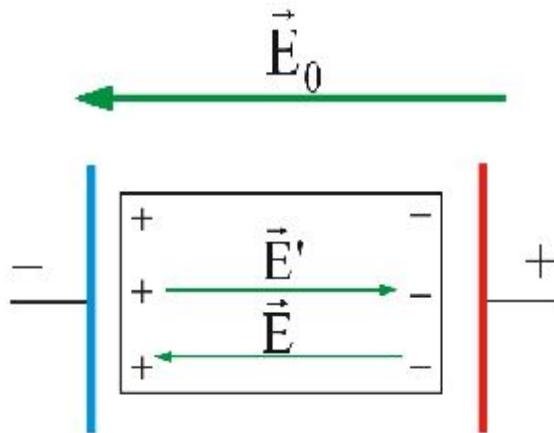
Области усиления и ослабления поля свободных зарядов.

- **Внутри диэлектрика** электрические заряды диполей суммарно компенсируют друг друга. Но на внешних поверхностях диэлектрика, прилегающих к электродам, появляются заряды противоположного знака (**поверхностные связанные заряды**).



- $E'$  – электростатическое поле связанных зарядов. Оно направлено всегда против внешнего поля  $E_0$

- результирующее электростатическое поле внутри диэлектрика  $E = E_0 - E'$ .



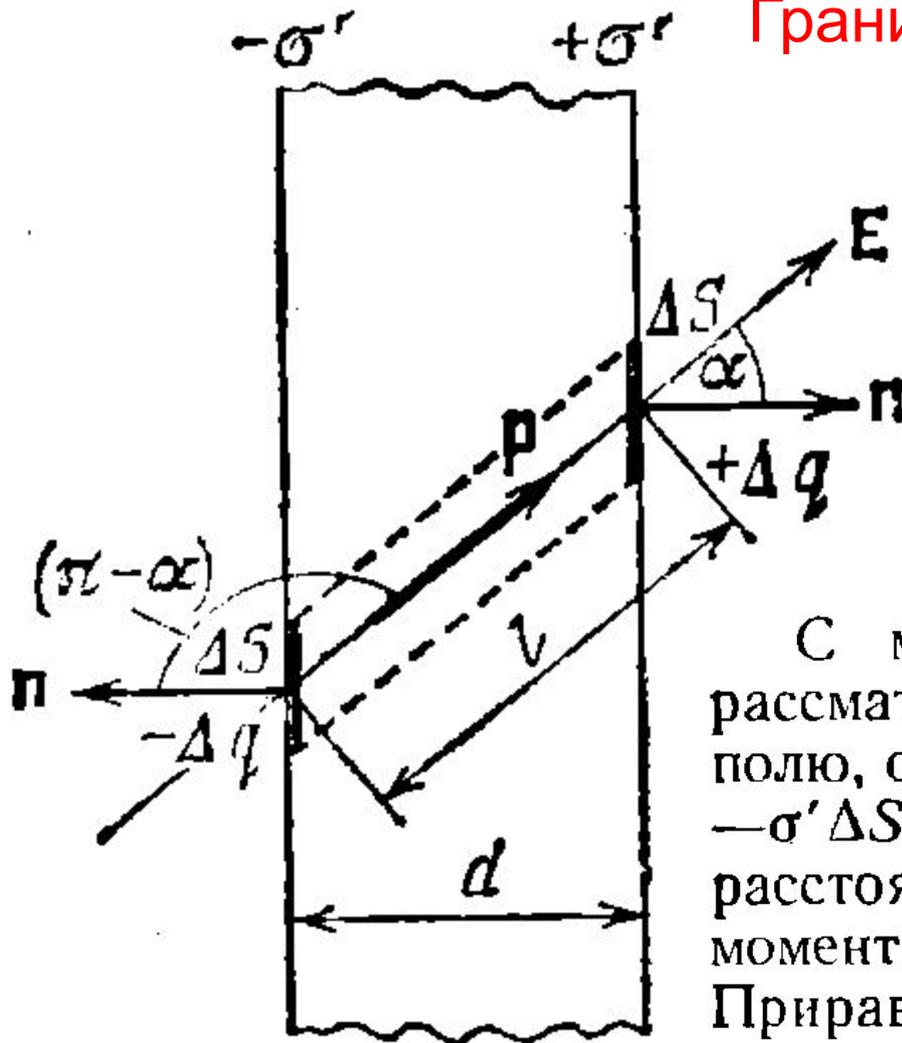
# Поляризованность

$$P = \frac{\sum p_i}{\Delta V}.$$

$$P = \kappa \epsilon_0 E,$$

$\kappa$  — не зависящая от  $E$  величина, называемая диэлектрической восприимчивостью диэлектрика

## Граничное условие для вектора P



$$\Delta V = l \Delta S \cos \alpha,$$

$$P \Delta V = Pl \Delta S \cos \alpha$$

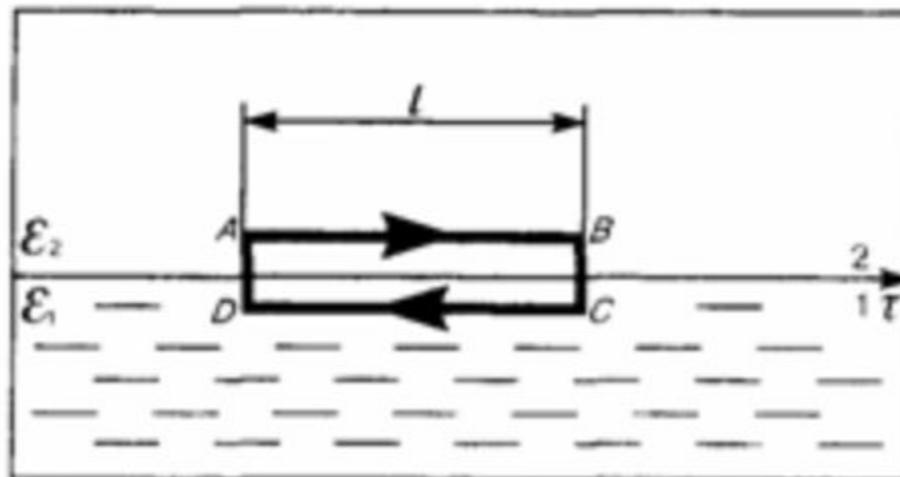
С макроскопической точки зрения рассматриваемый объем эквивалентен диполю, образованному зарядами  $+\sigma' \Delta S$  и  $-\sigma' \Delta S$ , отстоящими друг от друга на расстояние  $l$ . Поэтому его электрический момент можно представить в виде  $\sigma' \Delta S l$ . Приравняв друг другу оба выражения для электрического момента, получим

$$Pl \Delta S \cos \alpha = \sigma' \Delta S l. \quad \longrightarrow \quad \sigma' = P \cos \alpha = P_n$$

Выразив  $\mathbf{P}$  через  $\kappa$  и  $\mathbf{E}$ , приходим к формуле

$$\sigma' = \kappa \epsilon_0 E_n$$

# Циркуляция вектора $E$ на границе двух сред равна нулю



$$\oint_{ABCD} E \cdot dl = 0$$

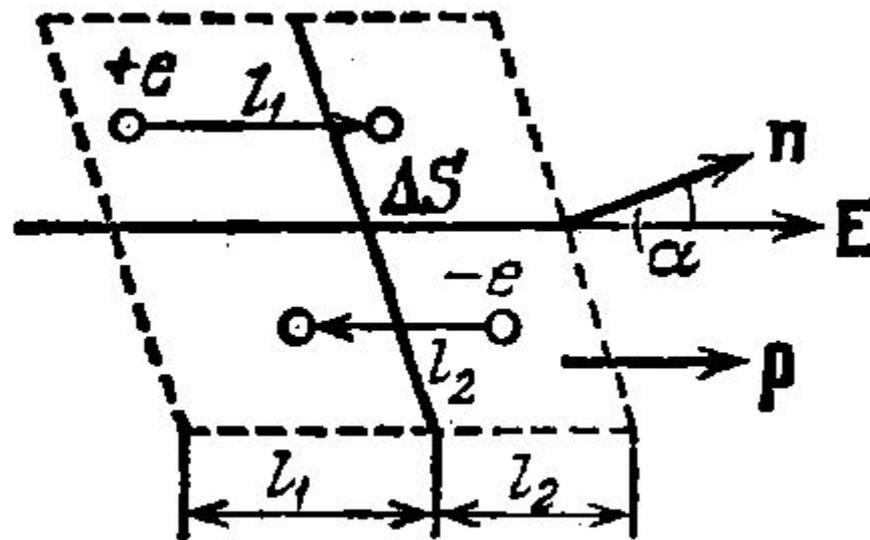
## Теорема Гаусса для поля вектора $\mathbf{P}$ .

поле вектора  $\mathbf{P}$  обладает следующим замечательным и важным свойством. Оказывается, поток вектора  $\mathbf{P}$  сквозь произвольную замкнутую поверхность  $S$  равен взятому с обратным знаком избыточному связанному заряду диэлектрика в объеме, охватываемом поверхностью  $S$ , т. е.

$$\oint \mathbf{P} \, d\mathbf{S} = - q'_{\text{внутр.}}$$

Это уравнение и выражает теорему Гаусса для вектора  $\mathbf{P}$ .

при включении поля через площадку  $\Delta S$  переносится в направлении нормали к ней заряд  $\Delta q' = enl_1\Delta S \cos \alpha + enl_2\Delta S \cos \alpha = en(l_1 + l_2)\Delta S \cos \alpha$ .



Сумма  $l_1 + l_2$  есть расстояние  $l$ , на которое смещаются друг относительно друга положительные и отрицательные связанные заряды в диэлектрике. В результате этого смещения каждая пара зарядов приобретает дипольный момент  $p = el = e(l_1 + l_2)$ . Число таких пар в единице объема равно  $n$ . Следовательно, произведение  $e(l_1 + l_2)n = e ln = pn$  дает модуль поляризованности  $P$ . Таким образом, заряд, проходящий при включении поля через площадку  $\Delta S$  в направлении

нормали к ней, равен  $\Delta q' = P \Delta S \cos \alpha$ .

можно написать  $\Delta q' = P_n \Delta S$ .

Перейдя от дельт к дифференциалам, получим

$$dq' = P_n dS = P dS.$$

Представим себе внутри диэлектрика замкнутую поверхность  $S$ . При включении поля эту поверхность пересечет и выйдет наружу связанный заряд  $q'$ , равный

$$q'_{\text{выш}} = \oint_S dq' = \oint_S P dS$$

В результате в объеме, ограниченном поверхностью  $S$ , возникнет избыточный связанный заряд

$$q'_{\text{изб}} = -q'_{\text{выш}} = - \oint_S \mathbf{P} d\mathbf{S} = -\Phi_P$$

( $\Phi_P$  — поток вектора  $\mathbf{P}$  через поверхность  $S$ ).

Это теорема Гаусса для вектора  $\mathbf{P}$  в интегральной форме

$$q'_{\text{изб}} = \int_V \rho' dV$$

(интеграл берется по объему, ограниченному поверхностью  $S$ ). Таким образом, мы приходим к формуле

$$\int_V \rho' dV = - \oint_S \mathbf{P} d\mathbf{S}.$$

Преобразуем поверхностный интеграл по теореме Остроградского — Гаусса. В результате получится соотношение

$$\int_V \rho' dV = - \int_V \nabla \mathbf{P} dV \longrightarrow \boxed{\rho' = -\nabla \mathbf{P}}$$

# Формульные соотношения для вектора $\mathbf{P}$

$$P_n = \sigma' = \frac{q'^{нов}}{S};$$

$$\sigma' = P \cos \alpha = P_n,$$

$$\sigma' = \chi \epsilon_0 E_n,$$

$$\rho' = - \left( \frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_y}{\partial y} + \frac{\partial P_z}{\partial z} \right) = - \operatorname{div} \mathbf{P}$$

# Формульные соотношения для вектора $\mathbf{E}$

$$\nabla \mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} (\rho + \rho').$$

$$\rho' = -\nabla (\kappa \varepsilon_0 \mathbf{E}) = -\varepsilon_0 \nabla (\kappa \mathbf{E}) = -\varepsilon_0 (\mathbf{E} \nabla \kappa + \kappa \nabla \mathbf{E}).$$

$$\rho' = -\varepsilon_0 \mathbf{E} \nabla \kappa - \kappa \rho - \kappa \rho'.$$

$$\rho' = -\frac{1}{1 + \kappa} (\varepsilon_0 \mathbf{E} \nabla \kappa + \kappa \rho).$$

## Интегральные соотношения для векторов **E** и **P**

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} (q - q')$$

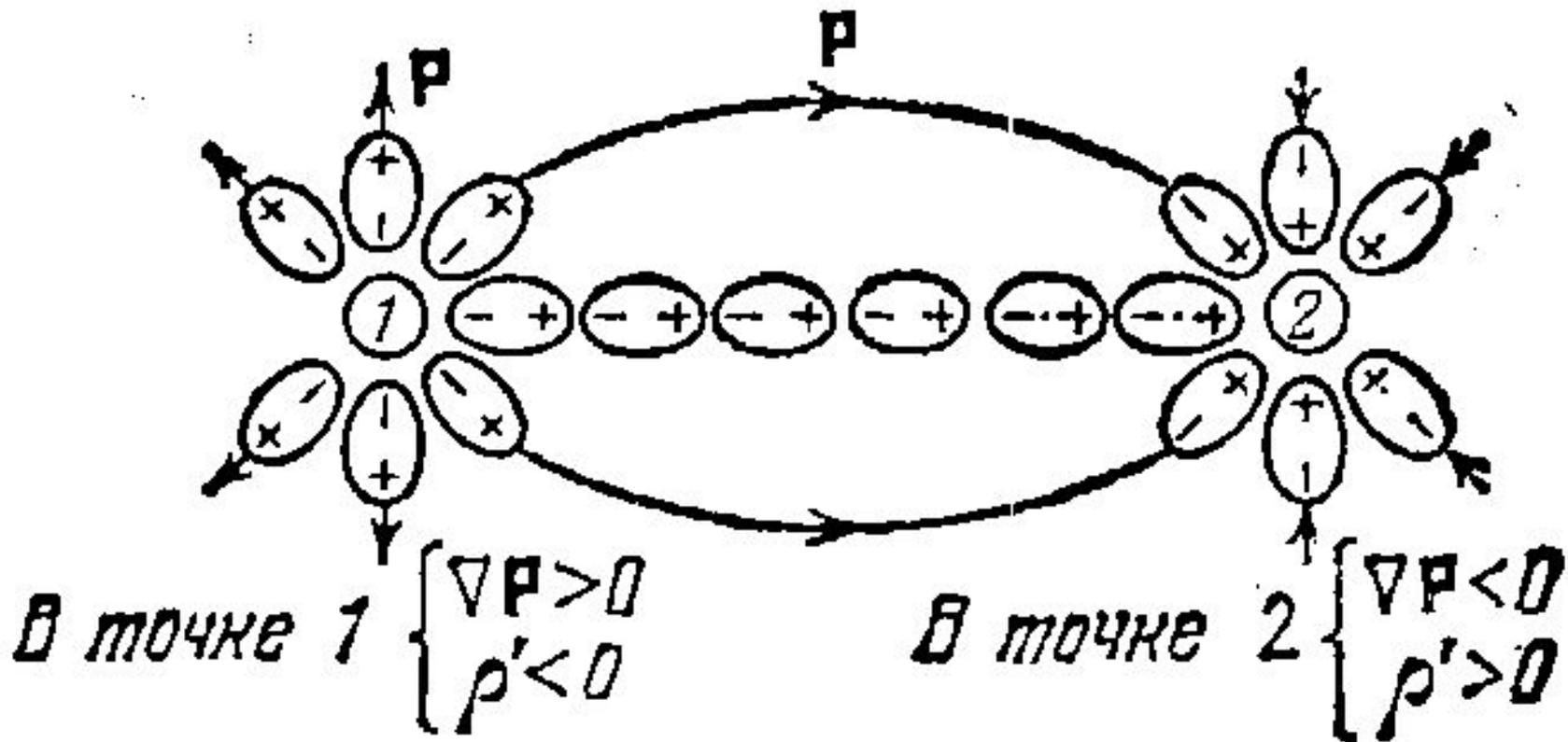
$$\oint \vec{P} d\vec{S} = -q'$$

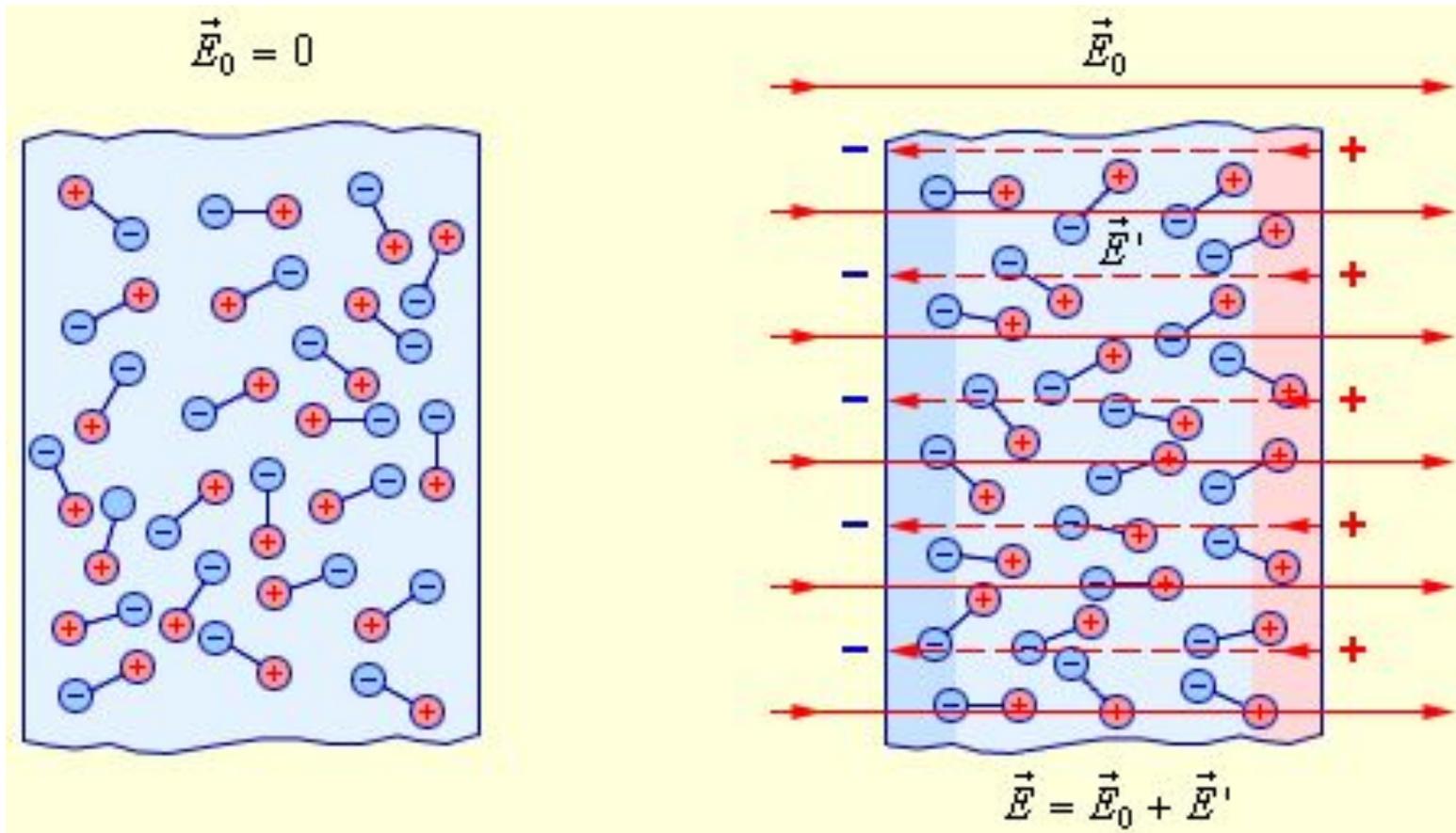
## Дифференциальные соотношения для векторов **E** и **P**

$$\operatorname{div} \vec{P} = -\rho'$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho - \rho')$$

# Истоки и стоки вектора $P$





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

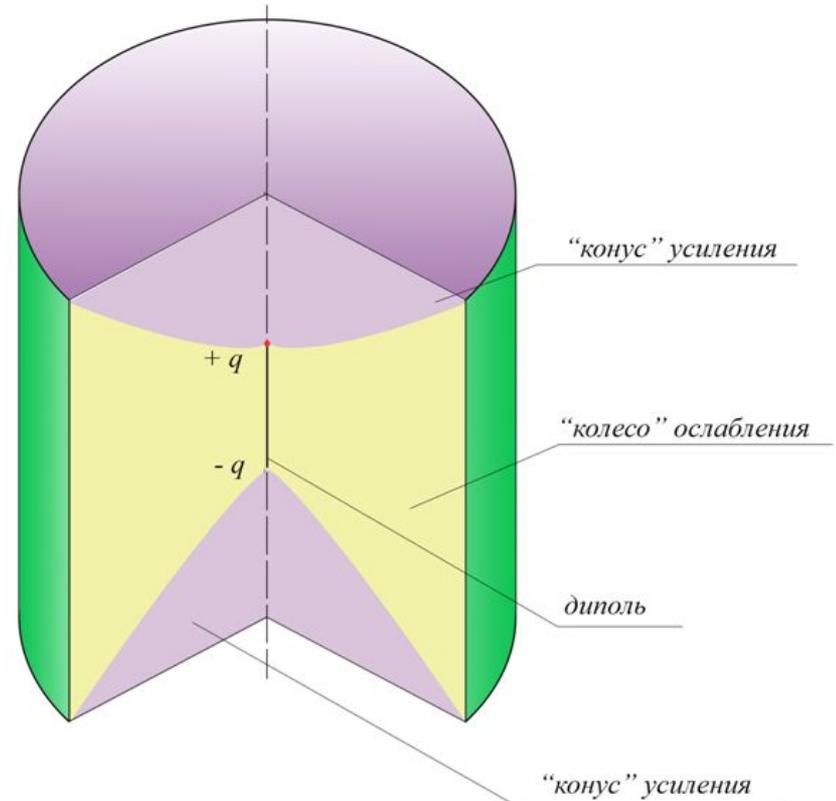
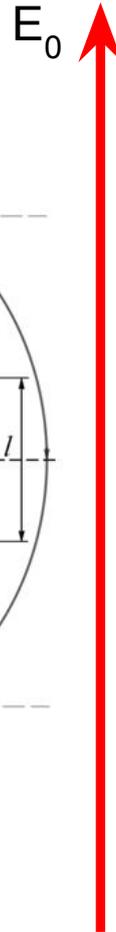
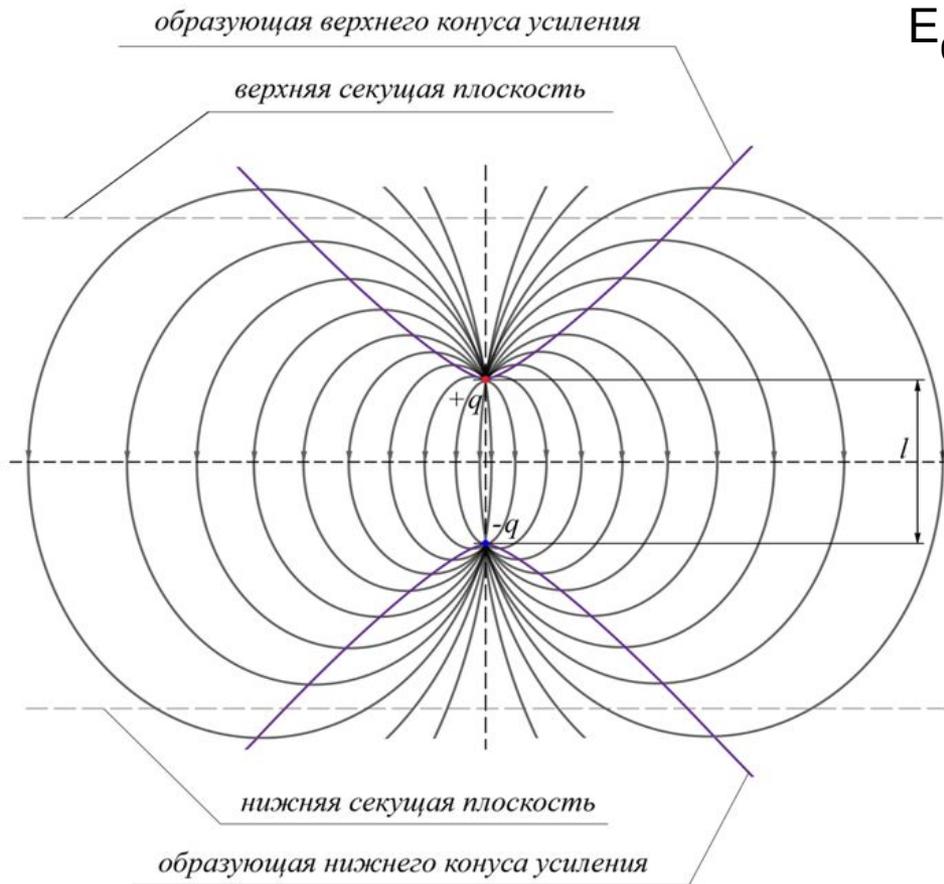
$$\epsilon_0 \vec{E}_0 = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$\vec{E}$  - среднее значение вектора напряженности электрического поля **внутри** диэлектрика

# В.К. Скворцов. Поле диполя.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_0$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$



Области усиления и ослабления поля свободных зарядов.

# Вектор $\mathbf{D}$

Индукция электрического поля  
(электрическое смещение)

$$\varepsilon_0 \vec{E}_0 = \varepsilon_0 \vec{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \mathbf{P}$$

По Иродову вектор  $\mathbf{D}$  не имеет физического смысла, поскольку является суммой двух совершенно разных векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{P}$ .

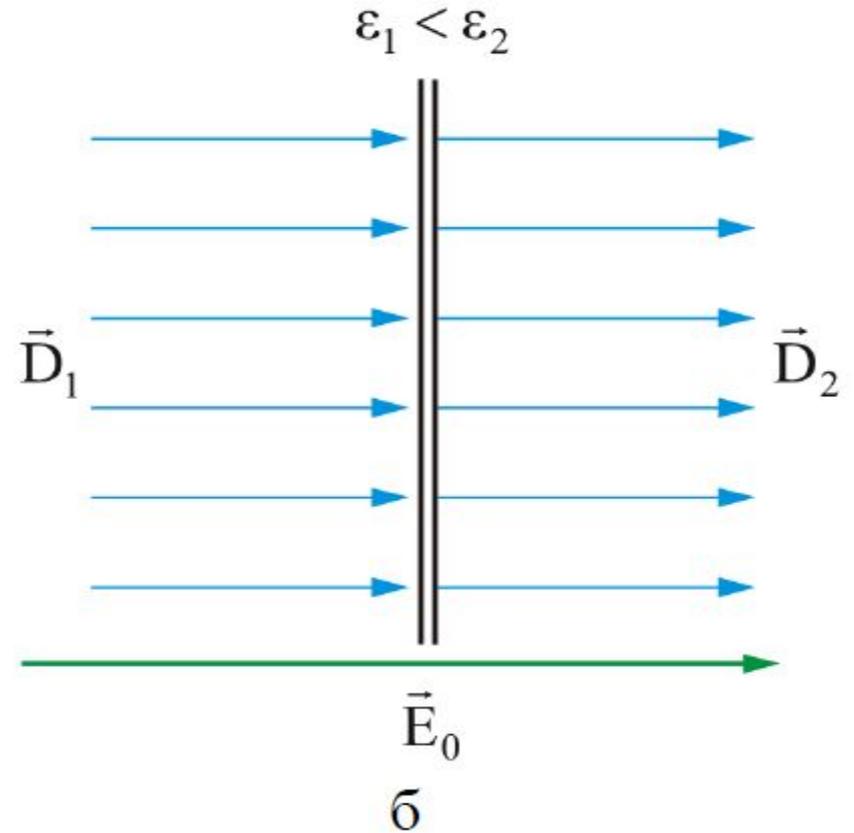
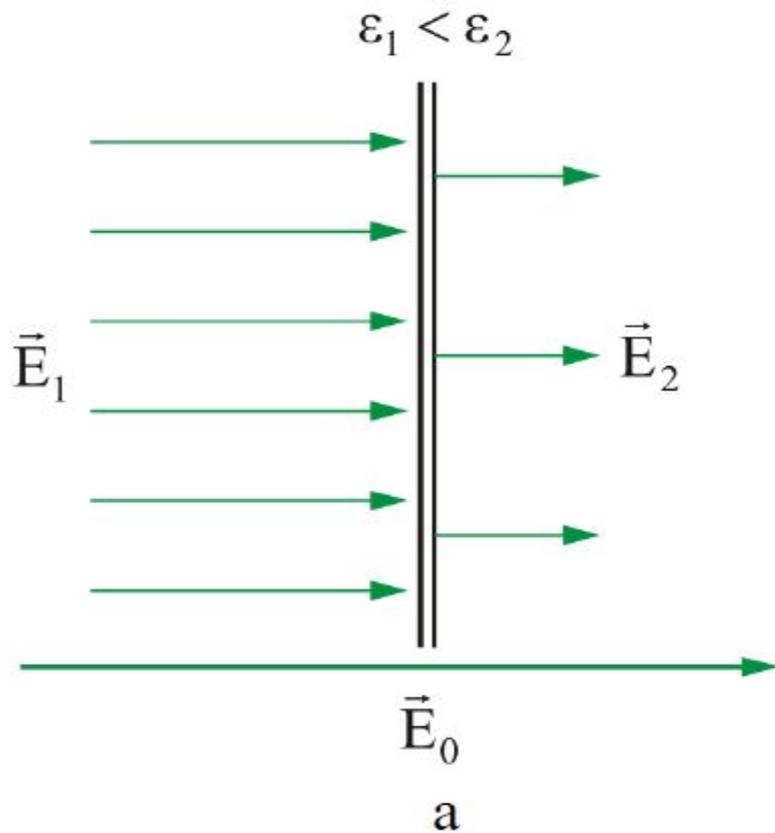
# Теорема Гаусса для вектора $\mathbf{D}$

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q$$

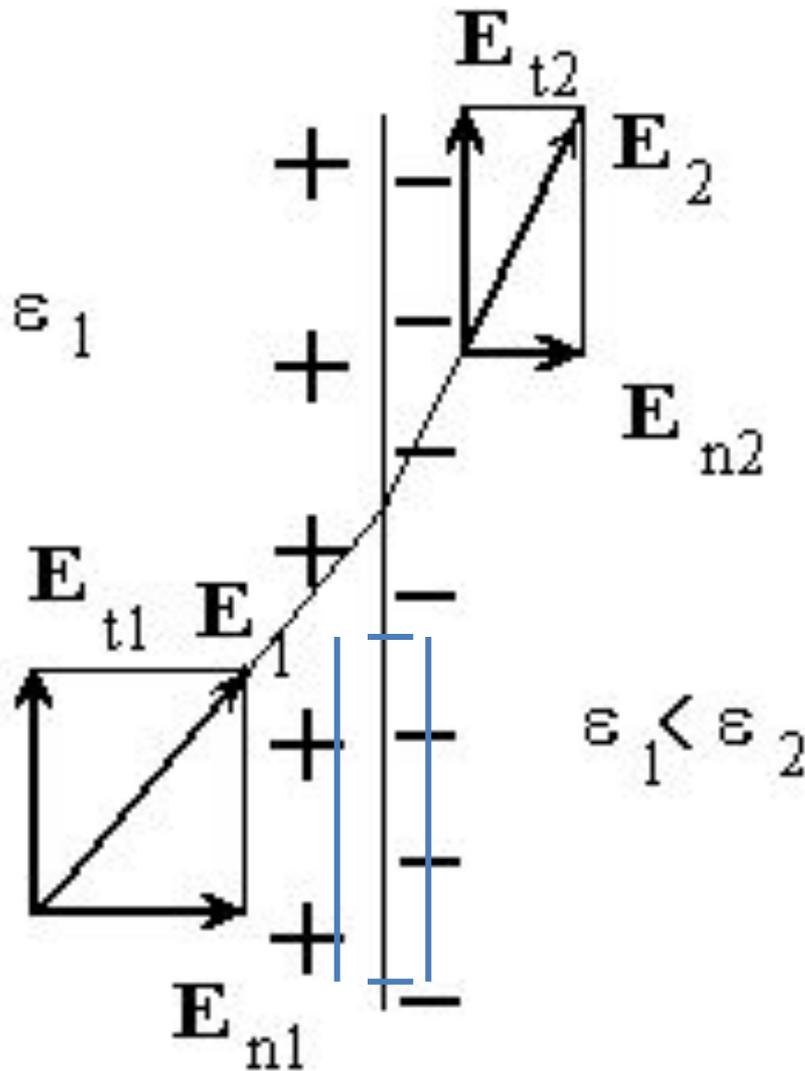
$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$$

Вектор  $\mathbf{D}$  «не замечает» связанных зарядов

# Поведение векторов $\vec{E}$ и $\vec{D}$ на границе двух сред



# Поведение вектора $\mathbf{E}$ на границе двух сред



Тангенциальные составляющие по обе стороны от границы равны

**Причина** – равенство нулю циркуляции вектора  $\mathbf{E}$  по контуру на границе двух сред

# Поведение вектора $\mathbf{D}$ на границе двух сред (традиционное представление)

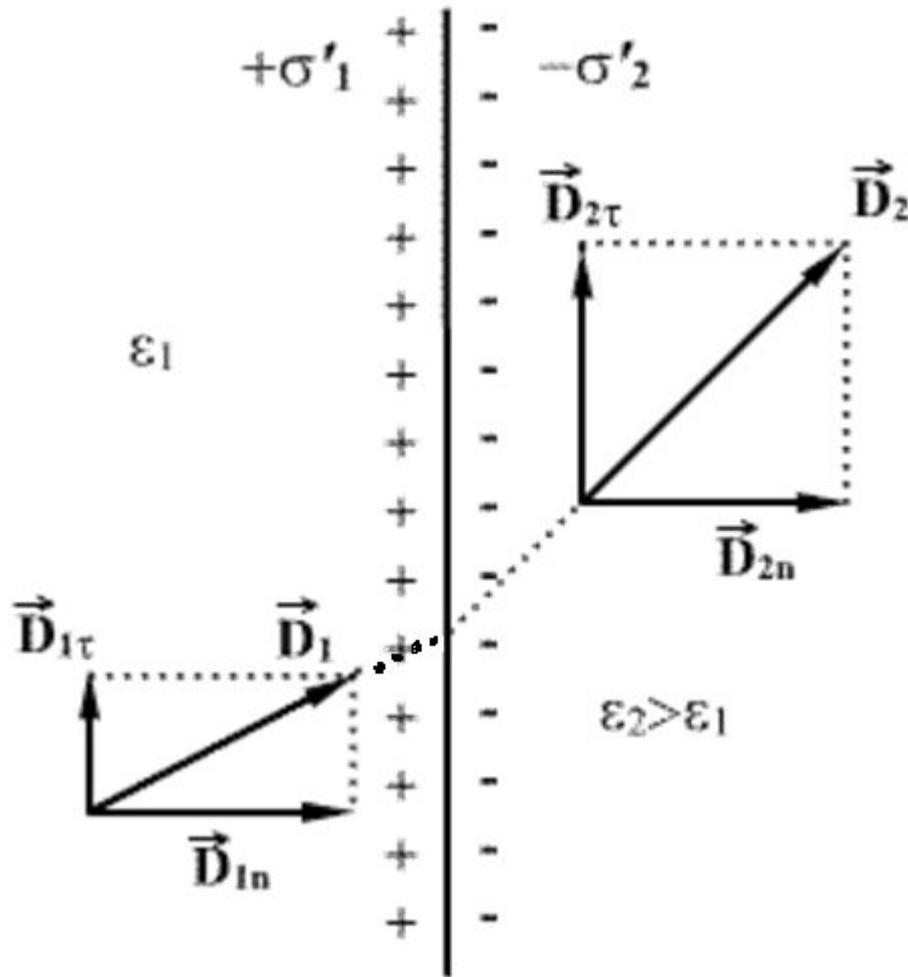


рис. 14.8

Нормальные составляющие по обе стороны от границы равны

**Причина** – непрерывность потока вектора  $\mathbf{D}$  на границе двух сред из-за отсутствия свободных зарядов

## Интегральные соотношения для векторов **D**, **P** и **E**

$$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = q$$

$$\oint \mathbf{P} d\mathbf{S} = -q'$$

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} (q - q')$$

## Дифференциальные соотношения для векторов **D**, **P** и **E**

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} \mathbf{P} = -\rho'$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho - \rho')$$

Эти соотношения показывают, что вектор **E** – суммарный вектор

# Анализируем вектор $\mathbf{D}$

Для вакуума  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}_0$ ;  $\mathbf{E}_0$  - внешнее поле

В диэлектрике  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ ;  $\mathbf{E}$  - внутреннее поле

Имеем равенство  $\varepsilon_0 \mathbf{E}_0 = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$

Преобразованием получим:

$$\varepsilon_0 \mathbf{E}_0 = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \kappa \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} (1 + \kappa) = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\varepsilon - 1 = \kappa$$

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

$$\varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 - \vec{P} = \vec{D} - \vec{P}$$

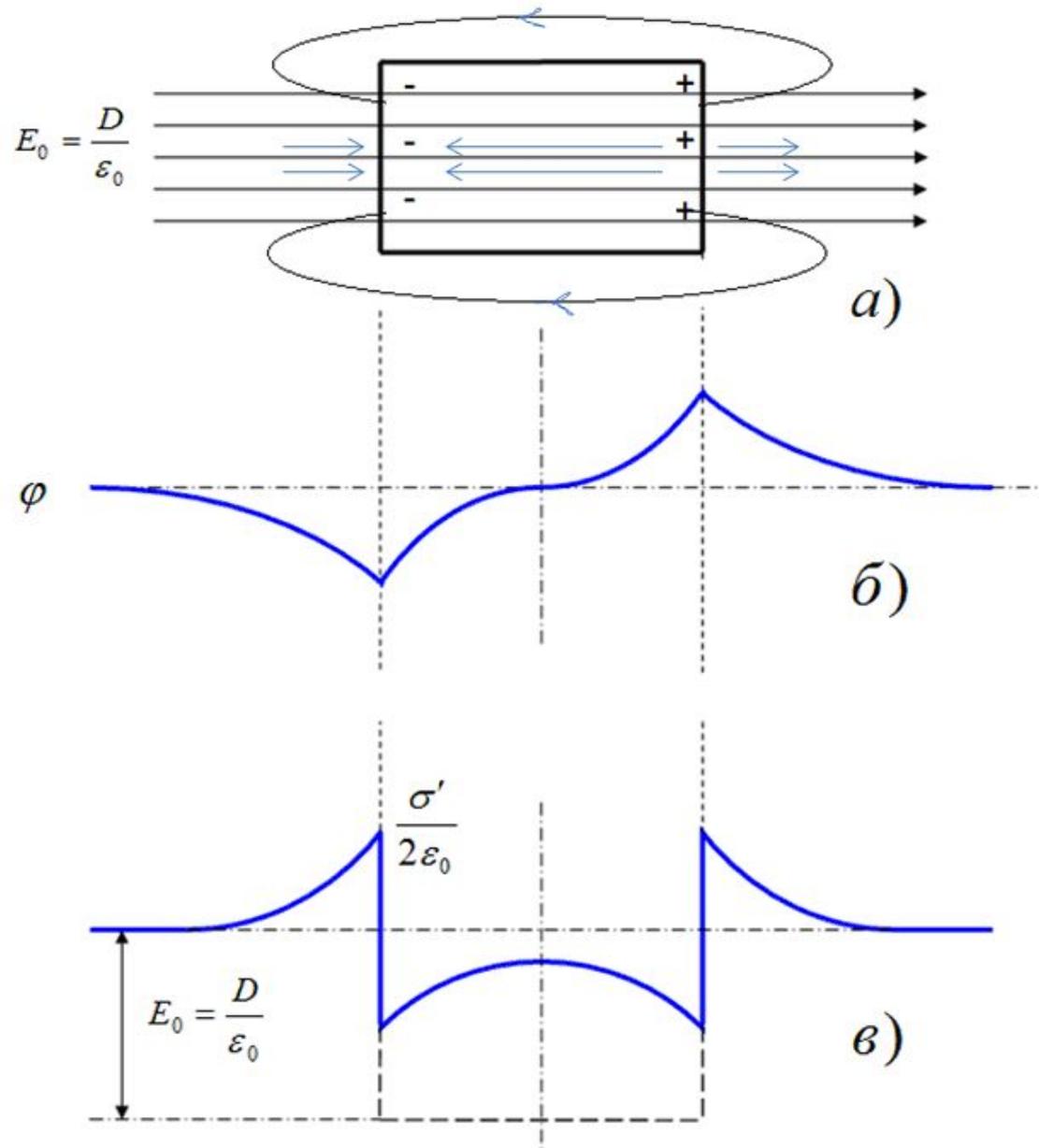
Но знак минус при суммировании векторов не применяют,  
Формулы Чуева А.С.

$$\varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 + \vec{P}^*$$

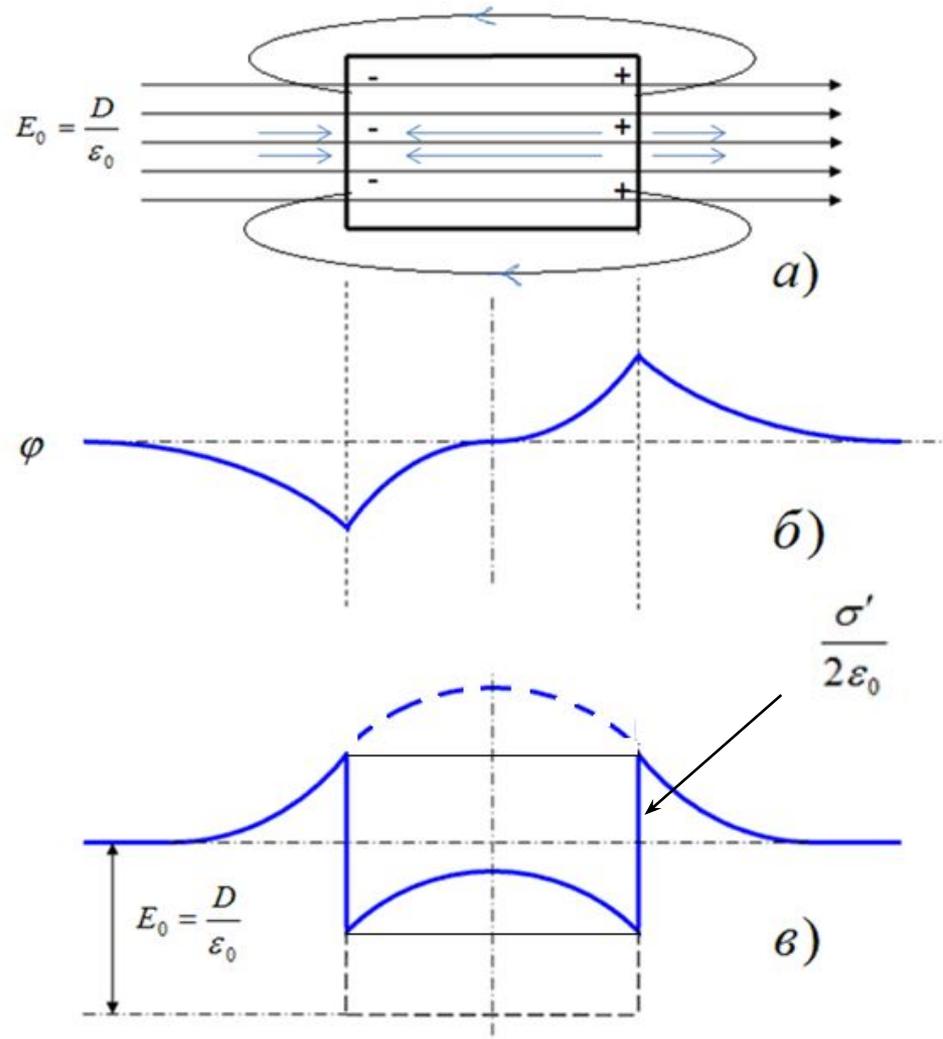
$$\vec{P}^* = -\kappa^* \vec{D}$$

$$\kappa^* = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}$$

По Чуеву: Физический смысл вектора  $\vec{D}$  – объемная плотность электрических дипольных моментов, создаваемых виртуальными парами микрочастиц.



# Поле внутри и вне диэлектрика, помещенного во внешнее поле



# Система электромагнитных величин и их взаимосвязей

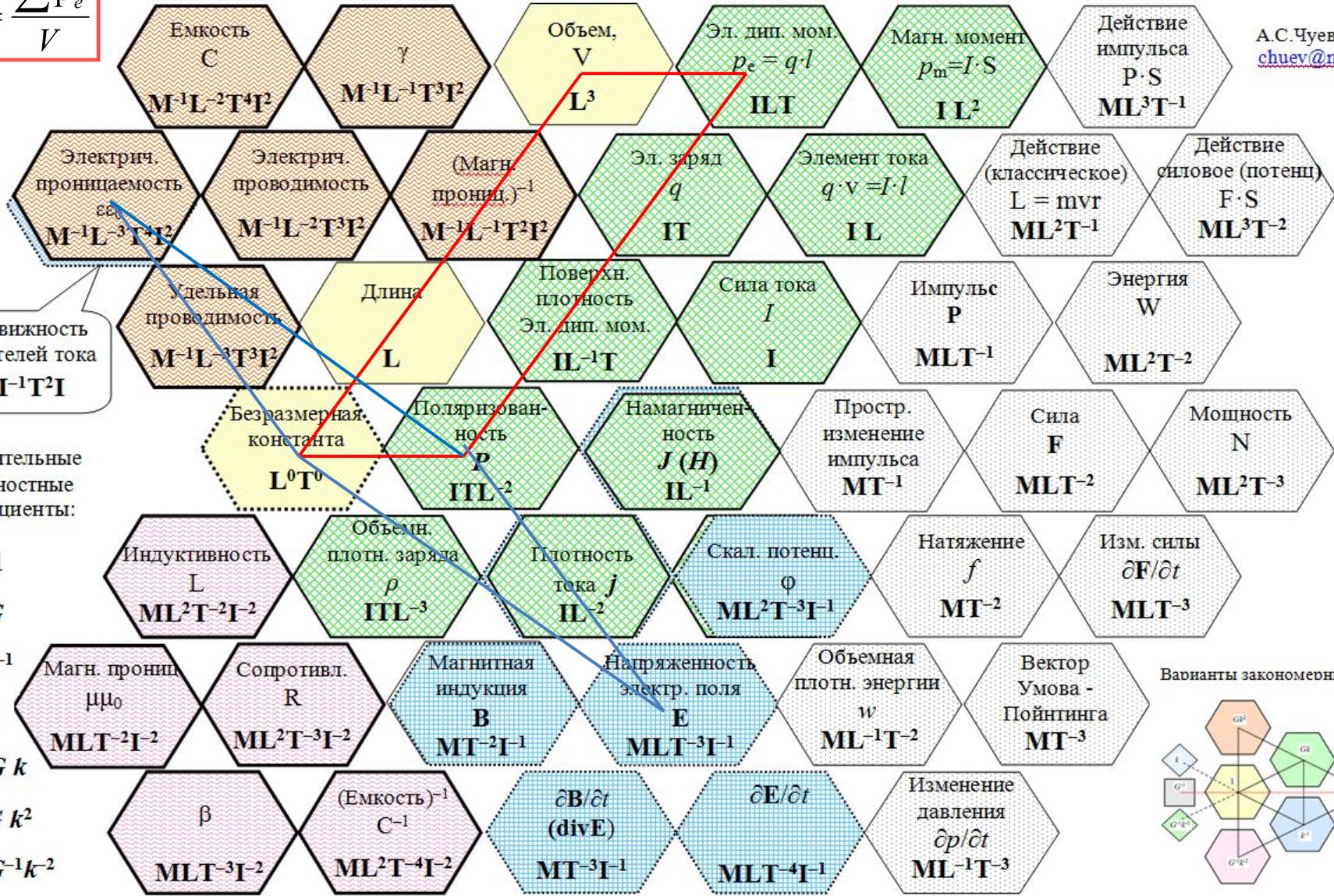
$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_e}{V}$$

А.С. Чуев. 2013  
[chuev@mail.ru](mailto:chuev@mail.ru)

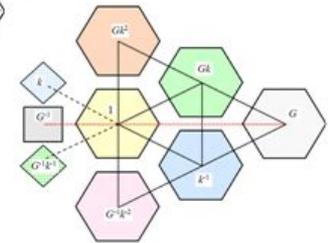
Подвижность носителей тока  
 $M^{-1}T^2I$

Дополнительные размерностные коэффициенты:

- 1
- G
- k<sup>-1</sup>
- k
- Gk
- Gk<sup>2</sup>
- G<sup>-1</sup>k<sup>-2</sup>



Варианты закономерных связей



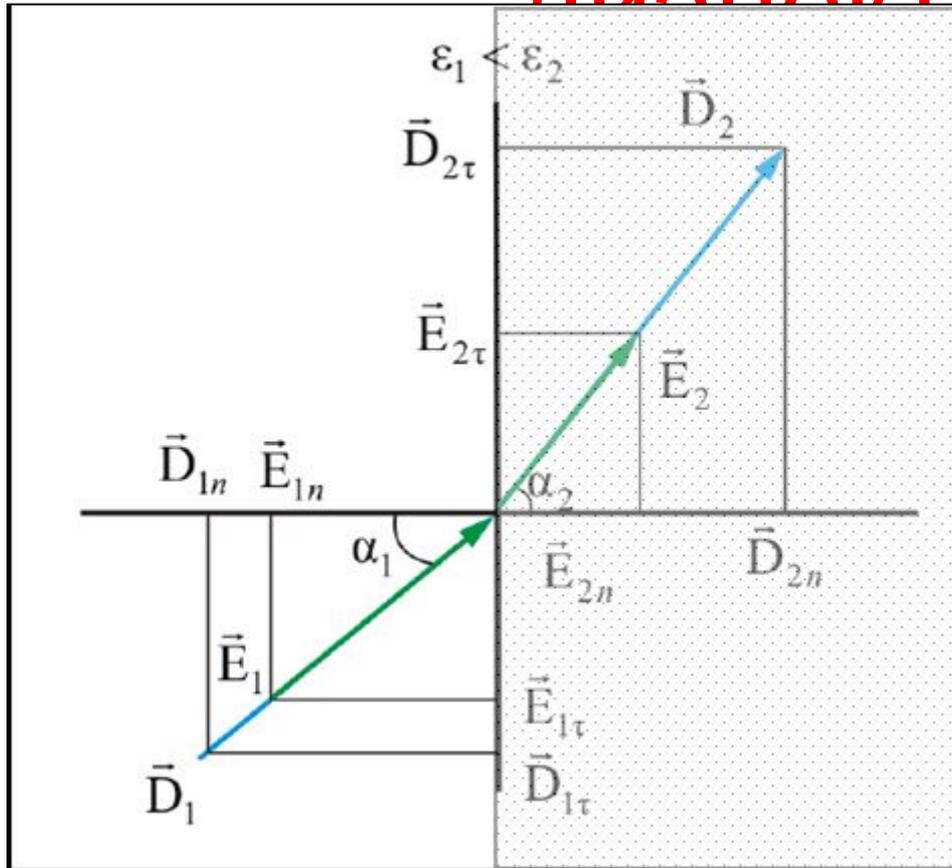
$$\vec{P} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

Информация  
последующих слайдов -  
факультативно

# Несуразности и парадоксы в учебниках физики

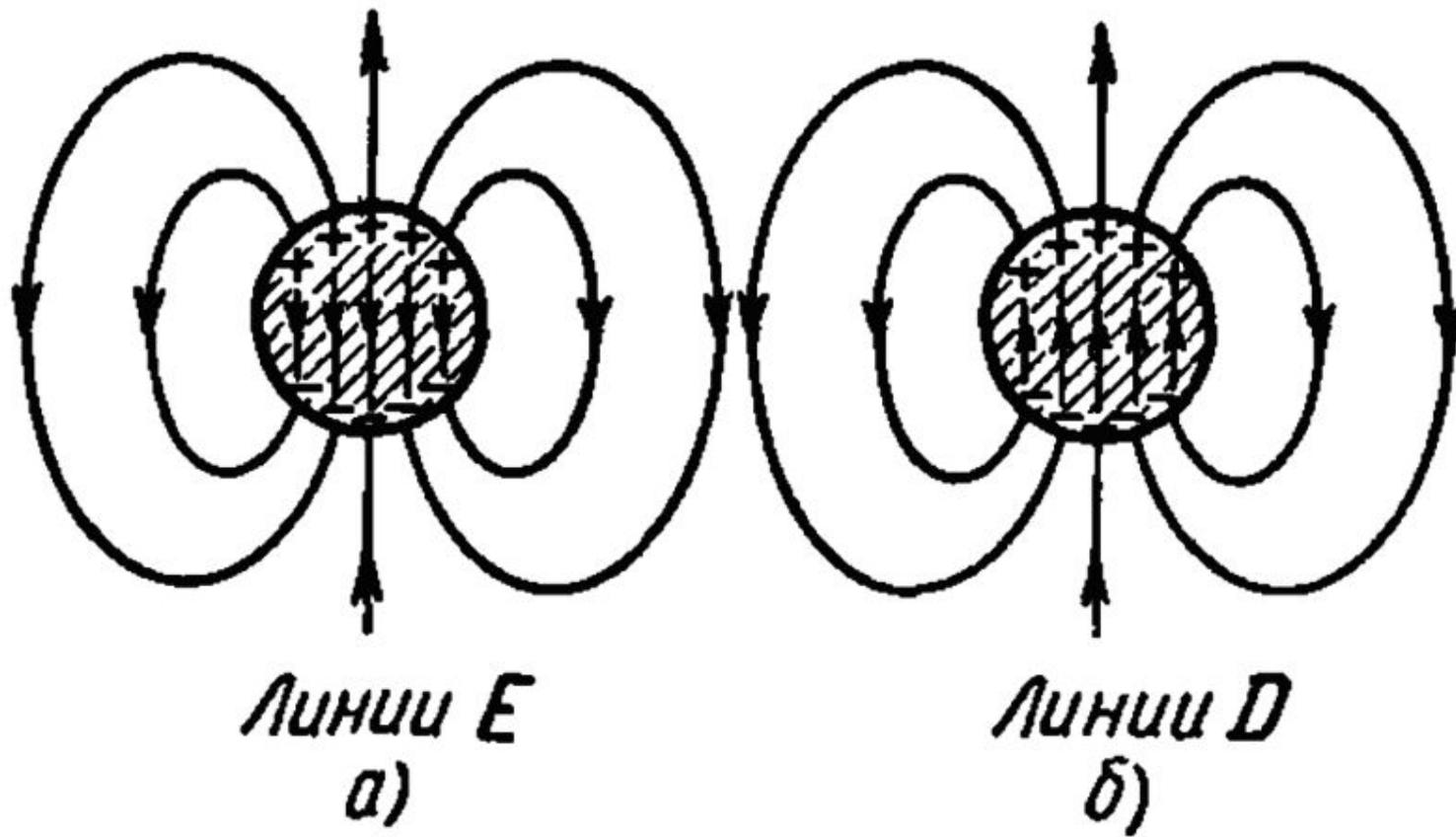
<https://www.youtube.com/watch?v=TCWkdekjYmc>

# Поле на границе ДИЭЛЕКТРИКОВ



$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

**Парадокс** – вектор  $\vec{D}$  «не чувствует» среду, но преломляется на границе двух сред. Во второй среде вектор  $\vec{D}$  увеличен по модулю.



Изображение линий векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$  внутри наэлектризованного шара.  
 (Векторы оказываются противоположно направленными ???)

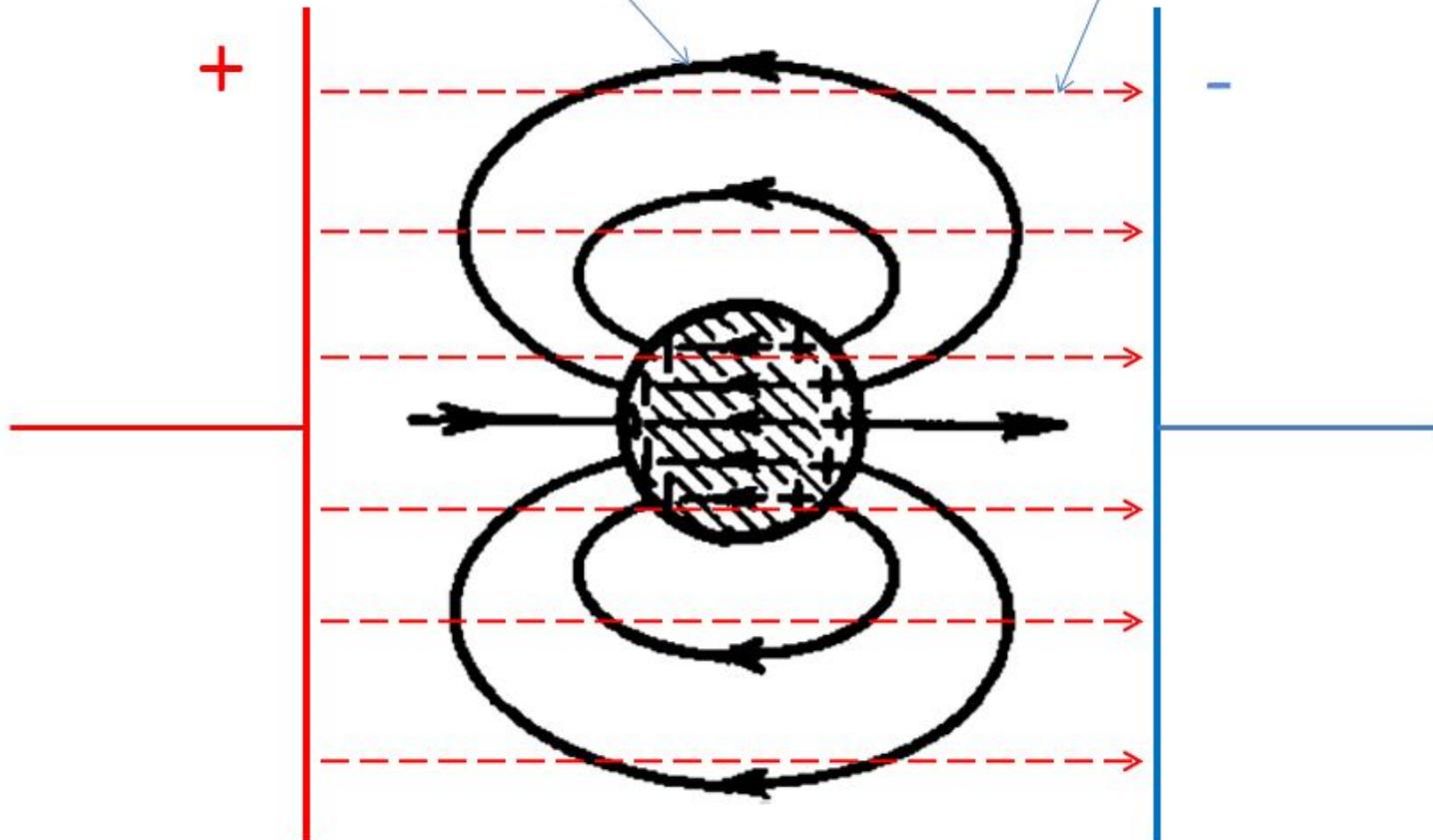
*Иродов. Электродинамика. Основные законы. Рис. 3.6.*



$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon_0} + \frac{-\vec{P}}{k\epsilon_0} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

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

$$\vec{E}_0 = \frac{\vec{D}}{\epsilon_0}$$



# Поведение вектора E на границе двух сред

$$E_{\tau 2} = E_{\tau 1} \text{ и } \varepsilon_2 E_{n2} = \varepsilon_1 E_{n1}$$

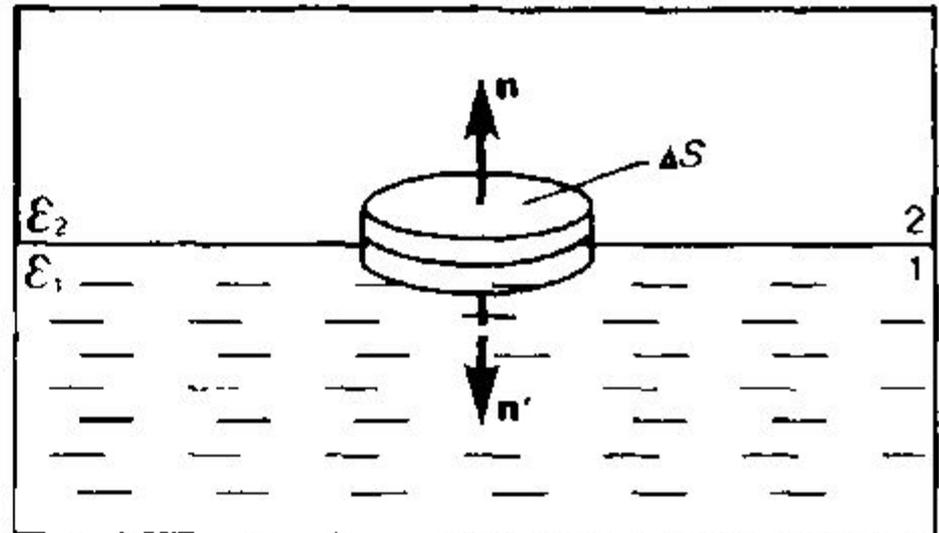
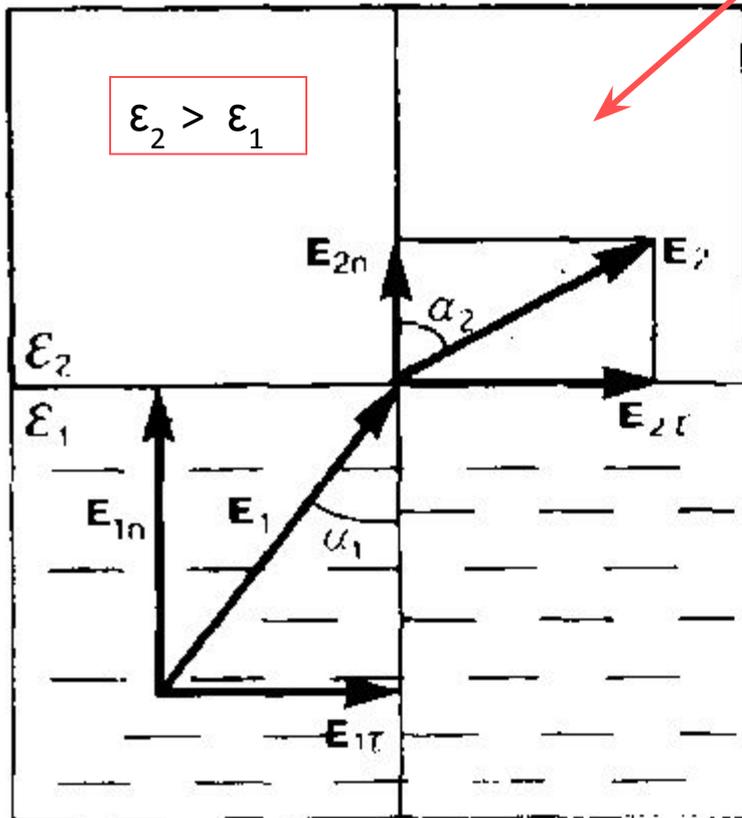
$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{E_{\tau 2} / E_{n2}}{E_{\tau 1} / E_{n1}}$$

$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Парадокс: по рисунку должно быть  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$

$$-P_{1n} S + P_{2n} S = -\sigma' S$$

$$P_{2n} - P_{1n} = -\sigma'$$



# Пример из учебника Сивухина (МФТИ)

$$E_1 \sin \beta_1 = E_2 \sin \beta_2,$$

$$\varepsilon_1 E_1 \cos \beta_1 = \varepsilon_2 E_2 \cos \beta_2.$$

Из них получаем

$$\frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

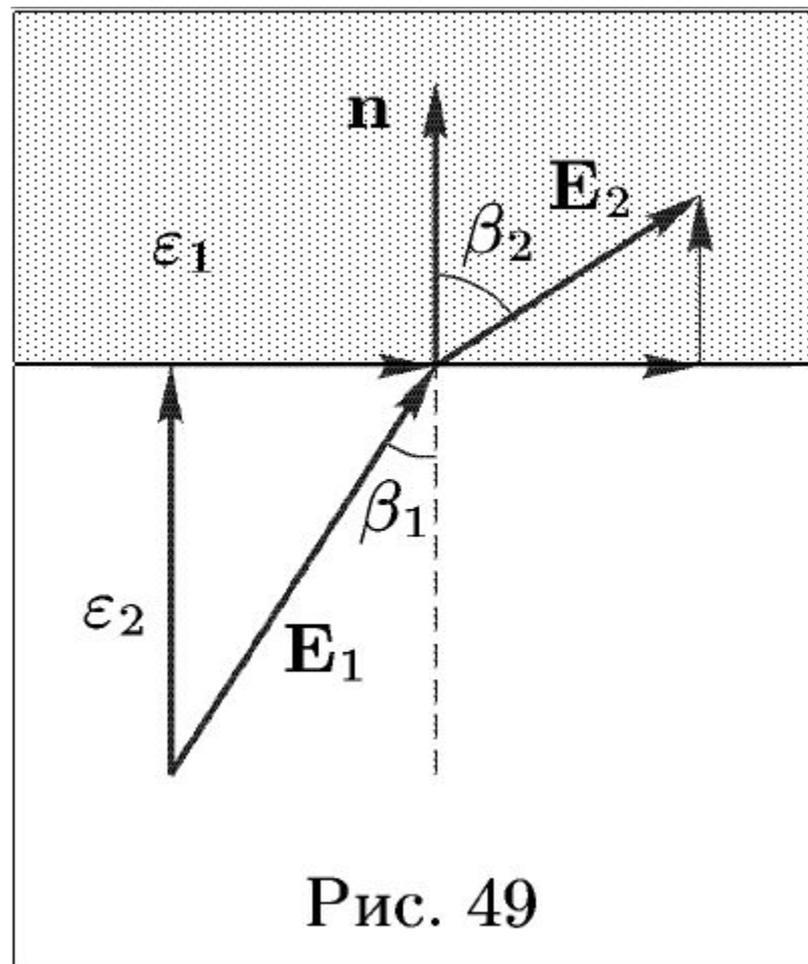


Рисунок показывает, что  $E_1 > E_2$ ,  $\beta_2 > \beta_1$ , но это возможно только при  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$

**Вывод:** не верна формула с тангенсами углов

# Текст из учебника Сивухина

Отсюда видно, что при переходе через границу раздела двух диэлектриков силовые линии испытывают *преломление*. При переходе из диэлектрика с меньшей  $\epsilon$  в диэлектрик с большей  $\epsilon$  угол  $\beta$  увеличивается, т. е. силовая линия удаляется от нормали к границе раздела. С этим связана концентрация (сгущение) силовых линий в диэлектрике с большей диэлектрической проницаемостью. Примером может служить диэлектрическая пластинка, внесенная в однородное электрическое поле (рис. 50).

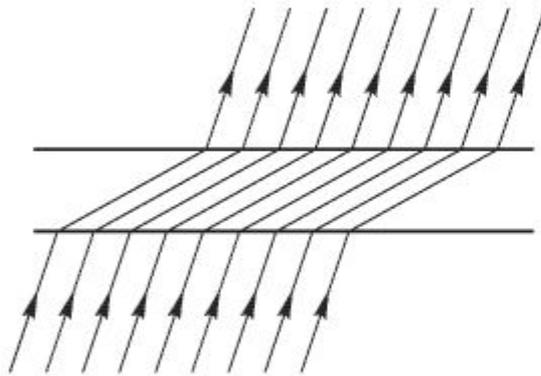


Рис. 50

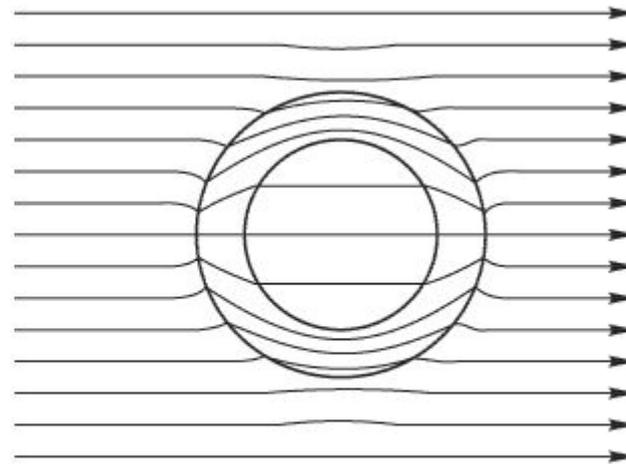
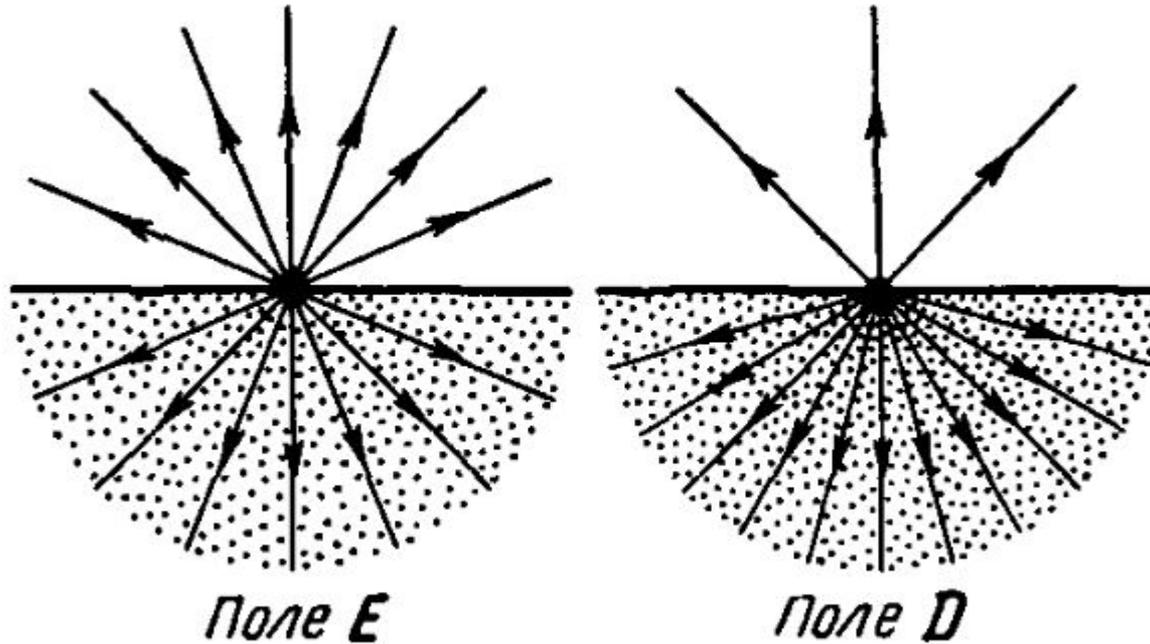
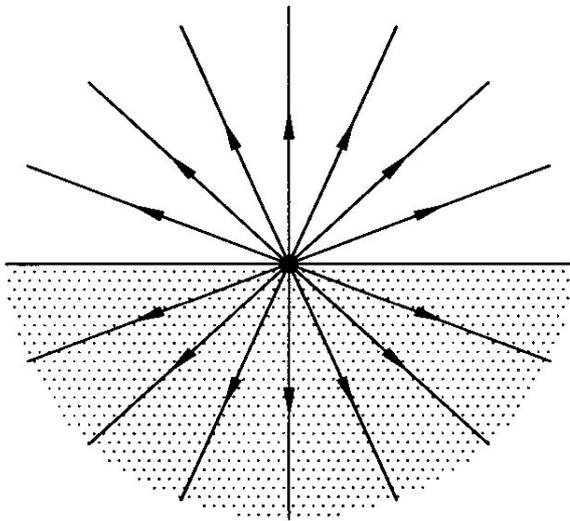


Рис. 51

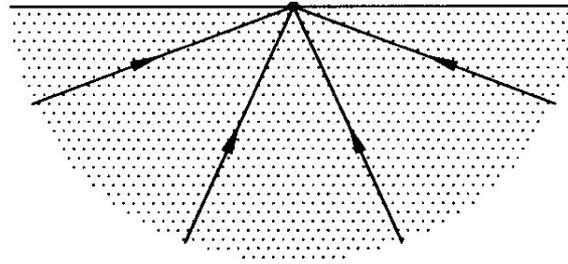
# Парадоксы электростатики



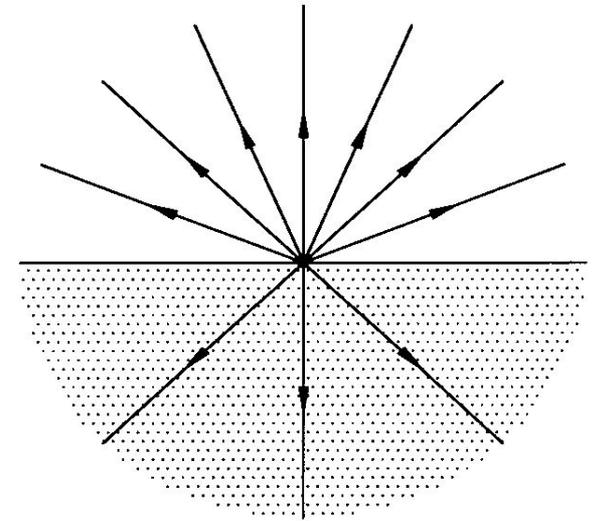
Изображение полей (по Иродову) от электрического заряда на границе перехода вакуум – диэлектрик



*Поле D*



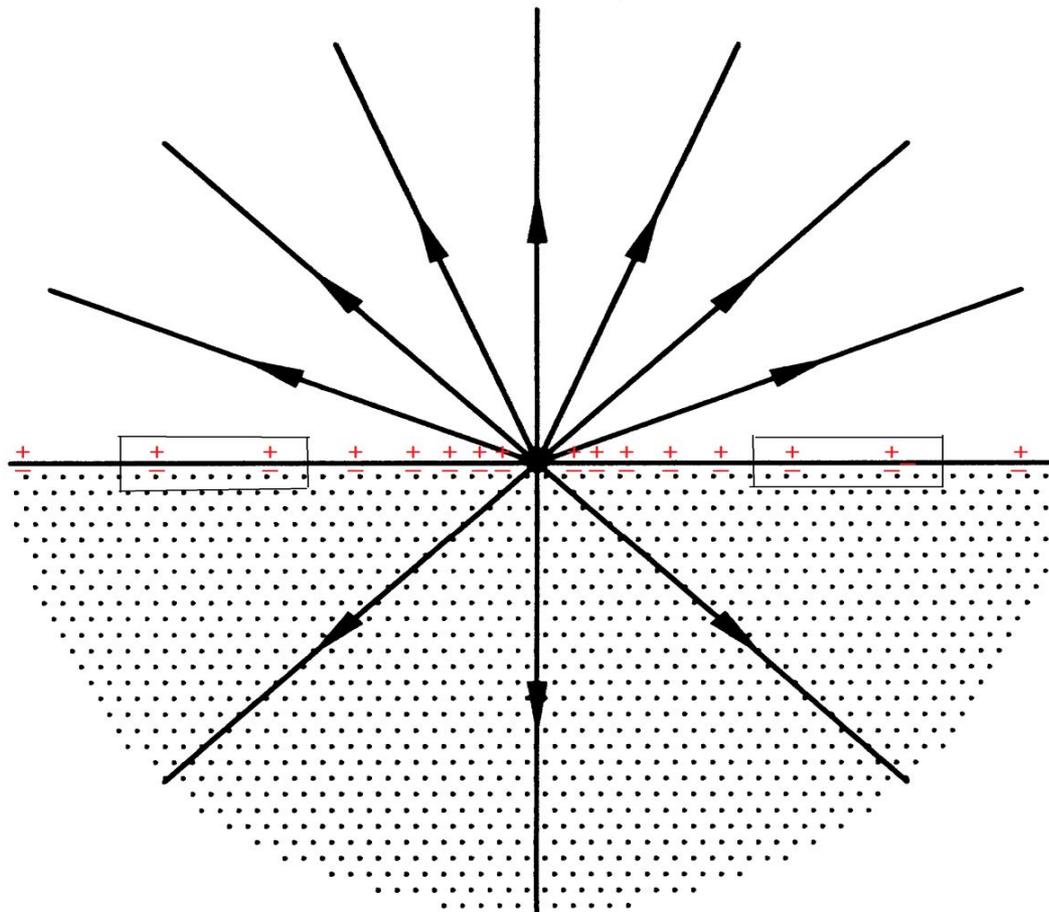
*Поле P'*



*Поле E*

Действительное изображение полей от электрического заряда на границе перехода вакуум – диэлектрик

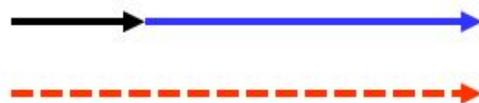
$$\varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 + \vec{P}^*$$



# Общепринятое соотношение электрических векторов $\mathbf{E}$ , $\mathbf{P}$ и $\mathbf{D}$ внутри диэлектрика.

$$\text{Вектор } \mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внешн}} = \varepsilon_0 \mathbf{E}_0 = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

Соотношение  
векторов



*Парадокс:* неестественное  
направление вектора  $\mathbf{P}$

$$\mathbf{E}_{\text{внутр}} = \mathbf{E}_0 - \mathbf{E}^*$$

$\mathbf{E}^*$  - электрическое поле диполей

Обозначения:



Вектор  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}_0$  (составной электрический вектор)



Вектор  $\mathbf{P} = \chi \varepsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}}$  (поляризованность диэлектрика)

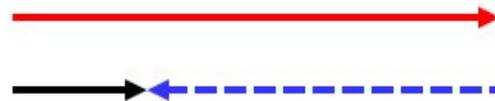


Вектор  $\varepsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}}$  (остаток от  $\varepsilon_0 \mathbf{E}_0$ )

# Действительное соотношение электрических векторов $\mathbf{E}$ , $\mathbf{P}$ и $\mathbf{D}$ внутри диэлектрика.

$$\text{Вектор } \varepsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}} = \mathbf{D} + \mathbf{P}^*$$

Предлагаемое  
соотношение



Вектор  $\mathbf{P}^* = -\mathbf{P}$ .  
Вектор  $\mathbf{D}$  первичен

$$\mathbf{E}_{\text{внутр}} = \mathbf{E}_0 - \mathbf{E}^*$$

$\mathbf{E}^* = \chi^* \mathbf{E}_0$  - электрическое поле диполей

Обозначения:



Вектор  $\varepsilon_0 \mathbf{E}_{\text{внутр}}$  (остаток от  $\varepsilon_0 \mathbf{E}_0$ )

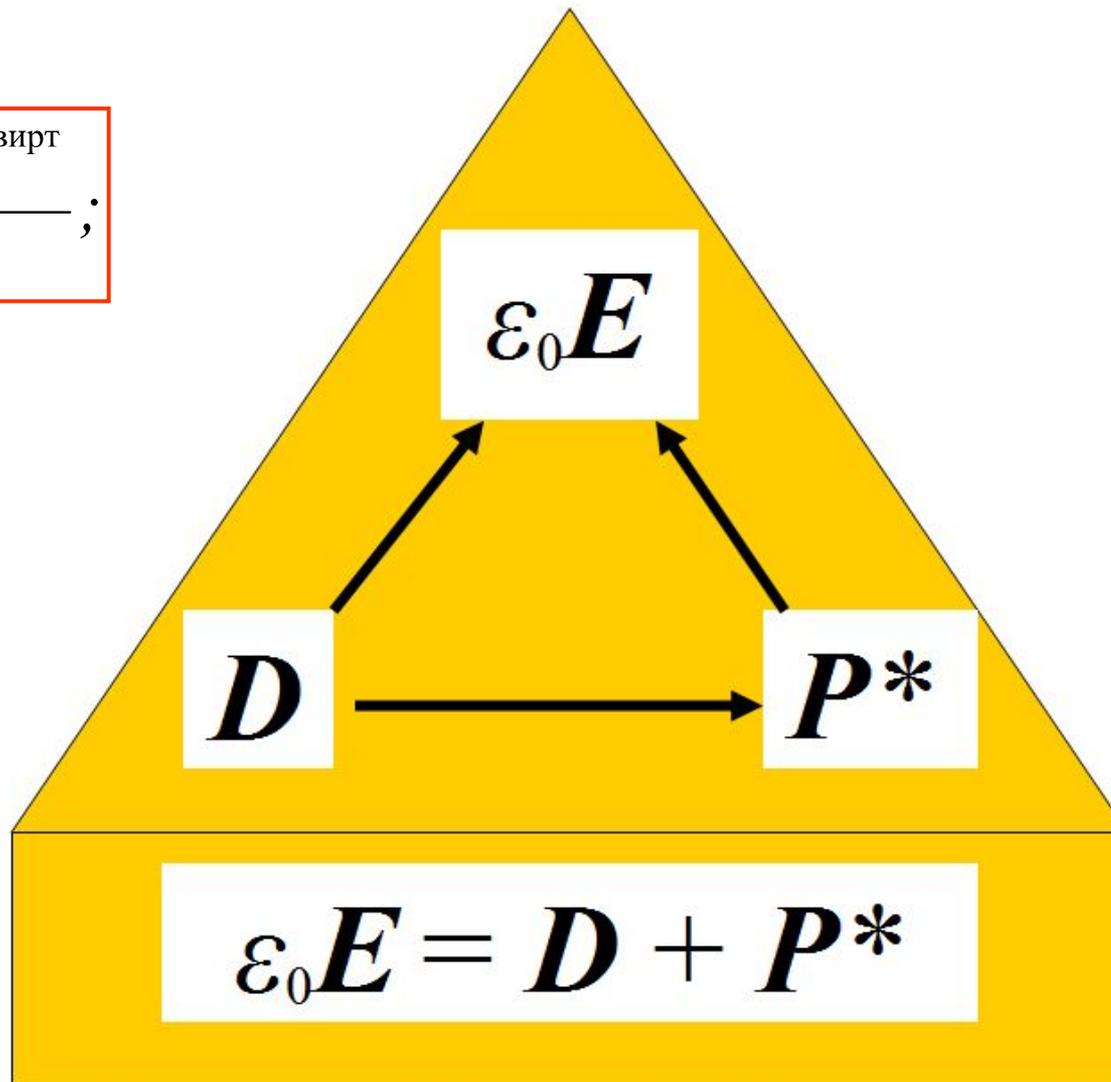


Вектор  $\mathbf{P}^* = \chi^* \varepsilon_0 \mathbf{E}_0$  (поляризованность диэлектрика)



Вектор  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}_0$  (первичный электрический вектор)

$$\vec{D} = \frac{\sum p_e^{\text{вирт}}}{V};$$

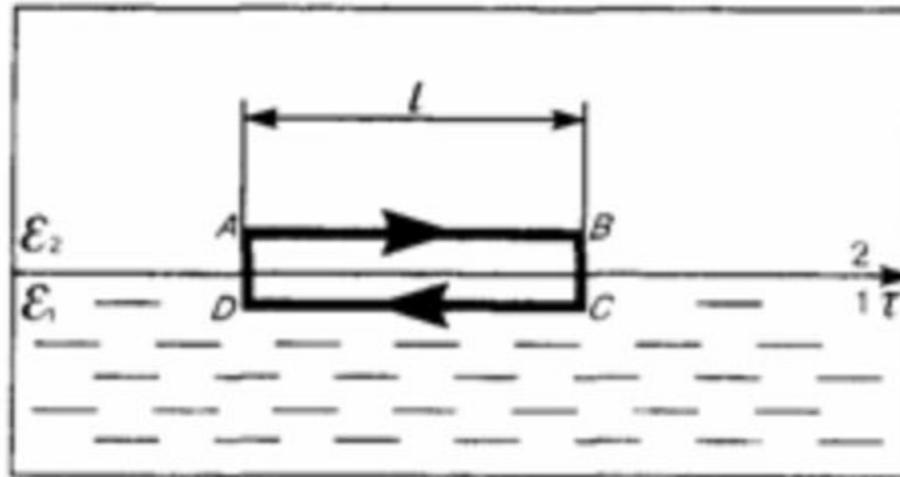


$$\vec{P}^* = -\vec{P} = \kappa' \cdot \vec{D}$$

$$\epsilon_0 \vec{E} = \vec{D} + \vec{P}^* = (1 - \kappa') \vec{D} = \vec{D} / \epsilon$$

$$\epsilon = 1 / (1 - \kappa')$$

# Циркуляция вектора $E$ на границе двух сред равна нулю



$$\oint_{ABCD} E d\mathbf{l} = 0$$

$$F_0 = qE_0 = q \frac{D}{\varepsilon_0}$$

$$F = qE = q \frac{D}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

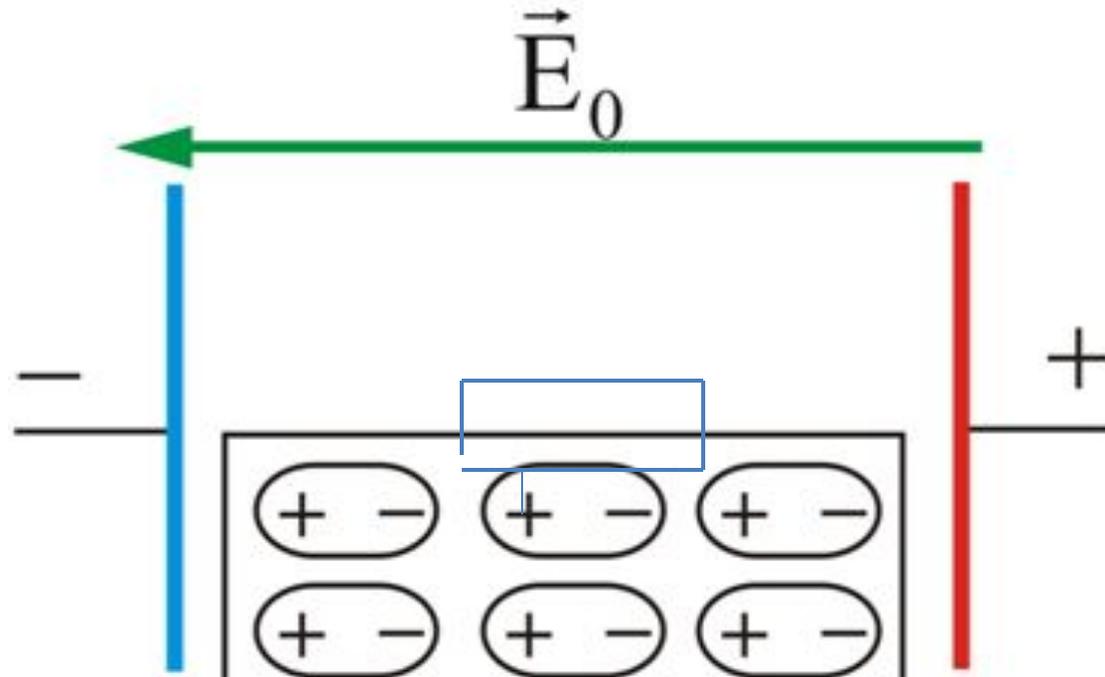
$$\varepsilon = \frac{F_0}{F}$$

Диэлектр.  
Проницаемость  
(Для воды = 81)

$$\varepsilon - 1 = \kappa$$

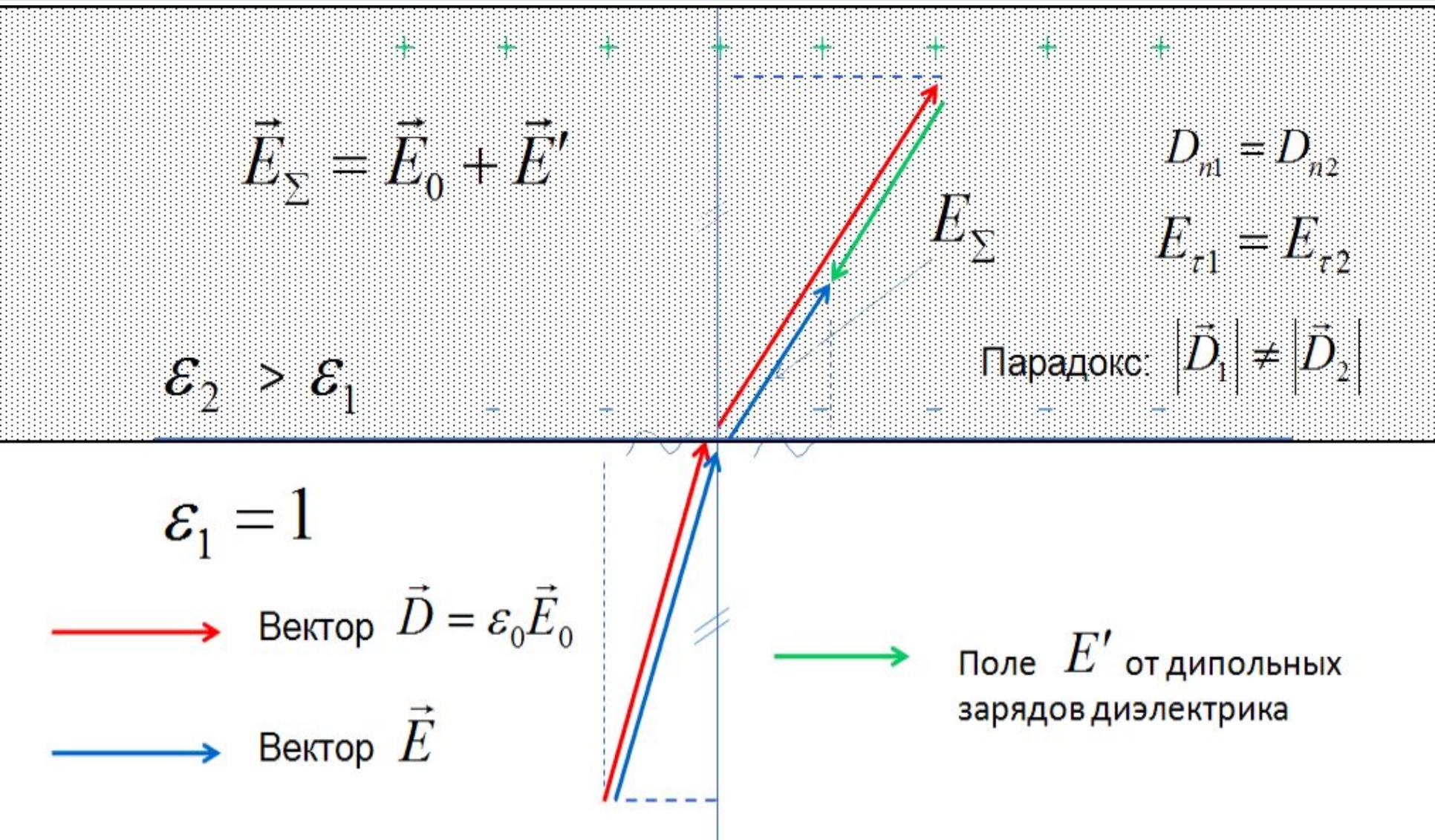
Диэлектр.  
восприимчивость

# Парадокс циркуляции вектора $\mathbf{E}$

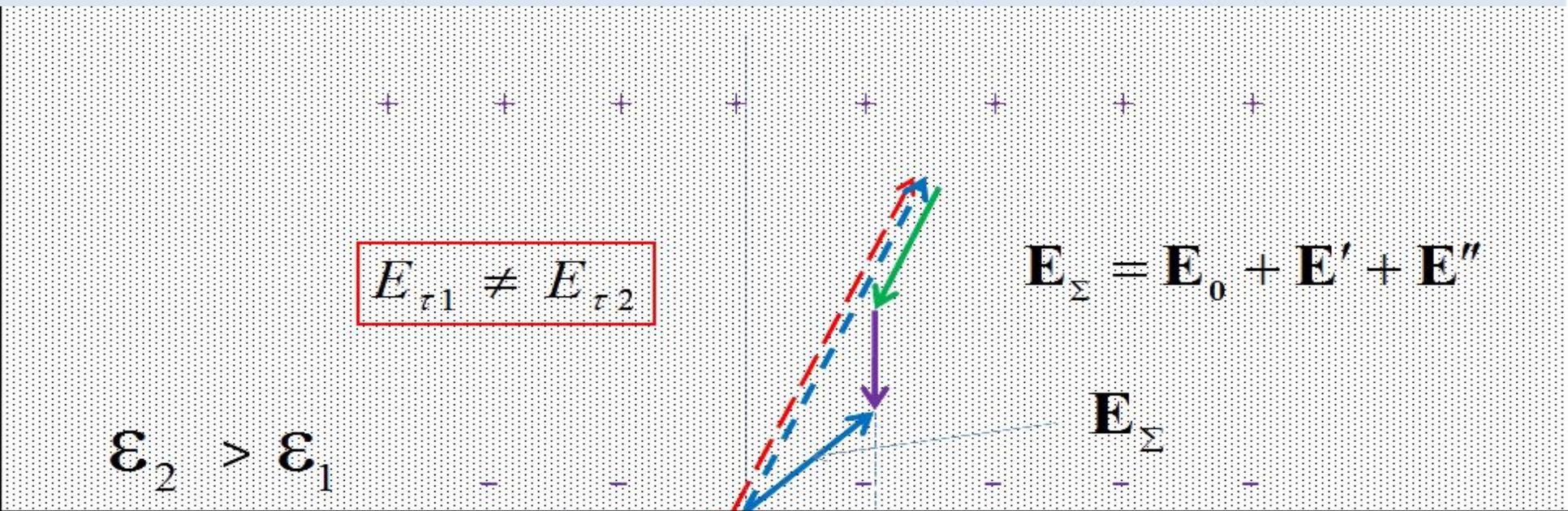


$$\oint E dl = ?$$

# Традиционное представление о поведении электрических векторов на плоской границе раздела двух сред



# Модель поведения электрических векторов $\mathbf{D}$ и $\mathbf{E}$ на границе раздела двух сред



$$\epsilon_1 = 1$$

Вектор  $\mathbf{D}$

Внешнее поле

$$\mathbf{E}_0 = \frac{\mathbf{D}}{\epsilon_0}$$

$\mathbf{E}'$  Электрическое поле диполей диэлектрика

$\mathbf{E}''$  Поле от связанных зарядов на границе двух сред

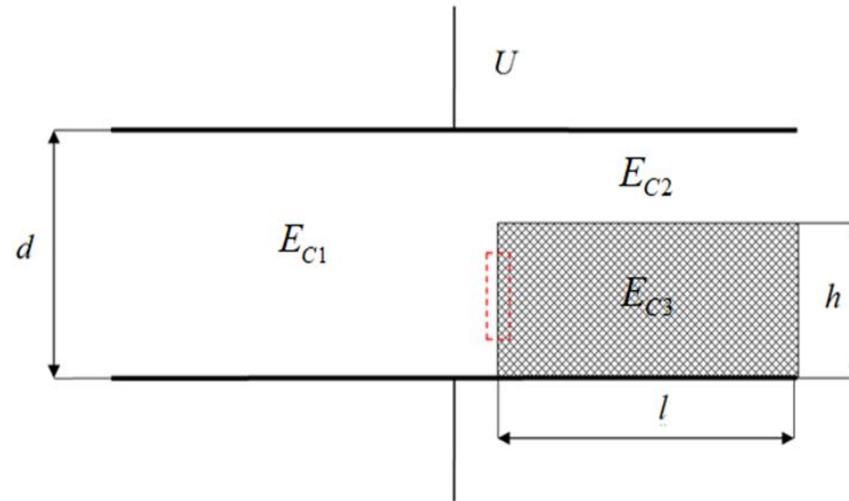
$\mathbf{E}_{\Sigma}$  Суммарное поле внутри диэлектрика

Расчетные примеры, показывающие неравенство тангенциальной составляющей вектора  $E$  на границе двух сред

$$U_{C1} = U$$

$$U_{C2} = U \frac{\varepsilon(d-h)}{\varepsilon(d-h)+h}$$

$$U_{C3} = U \frac{h}{\varepsilon(d-h)+h}$$



а)

$$E_{C1} = \frac{U}{d}$$

$$E_{C2} = \frac{\varepsilon U}{\varepsilon(d-h)+h}$$

$$E_{C3} = \frac{U}{\varepsilon(d-h)+h}$$



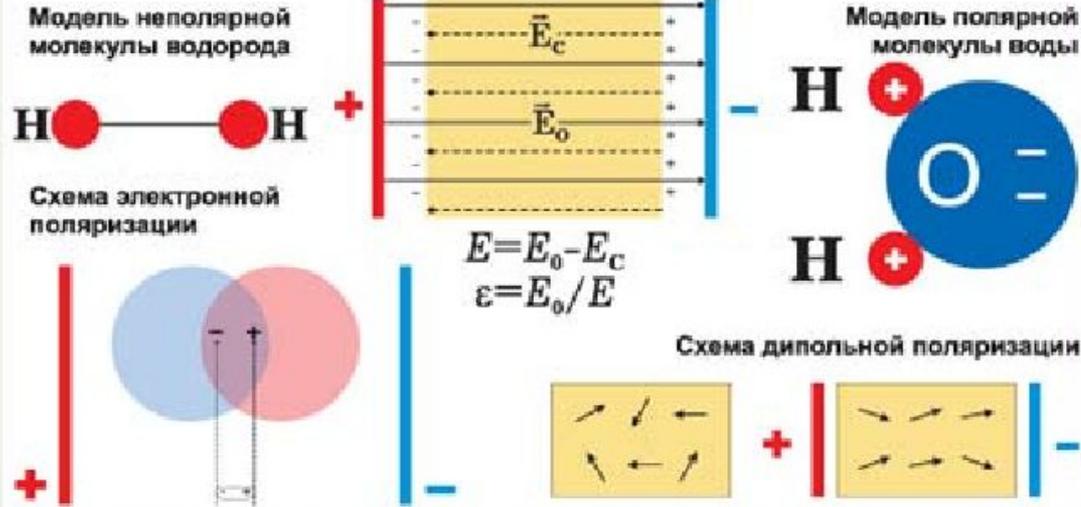
$$\frac{E_{C2}}{E_{C1}} = \frac{\varepsilon d}{\varepsilon(d-h)+h}$$

$$\frac{E_{C2}}{E_{C3}} = \varepsilon$$

$$\frac{E_{C3}}{E_{C1}} = \frac{d}{\varepsilon(d-h)+h}$$

б)

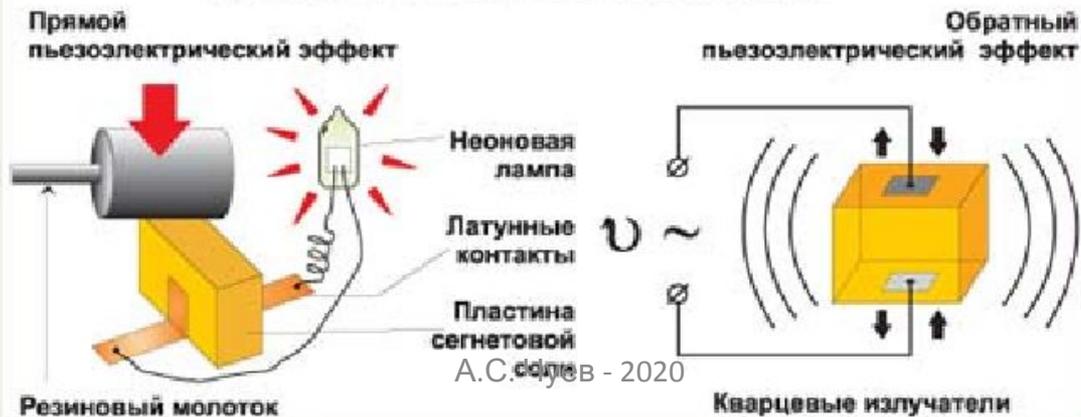
## ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ



## СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ. ЭЛЕКТРЕТЫ



## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ



Конец лекции 3-2020