

**Сегодня: вторник,  
19 сентября 2023**

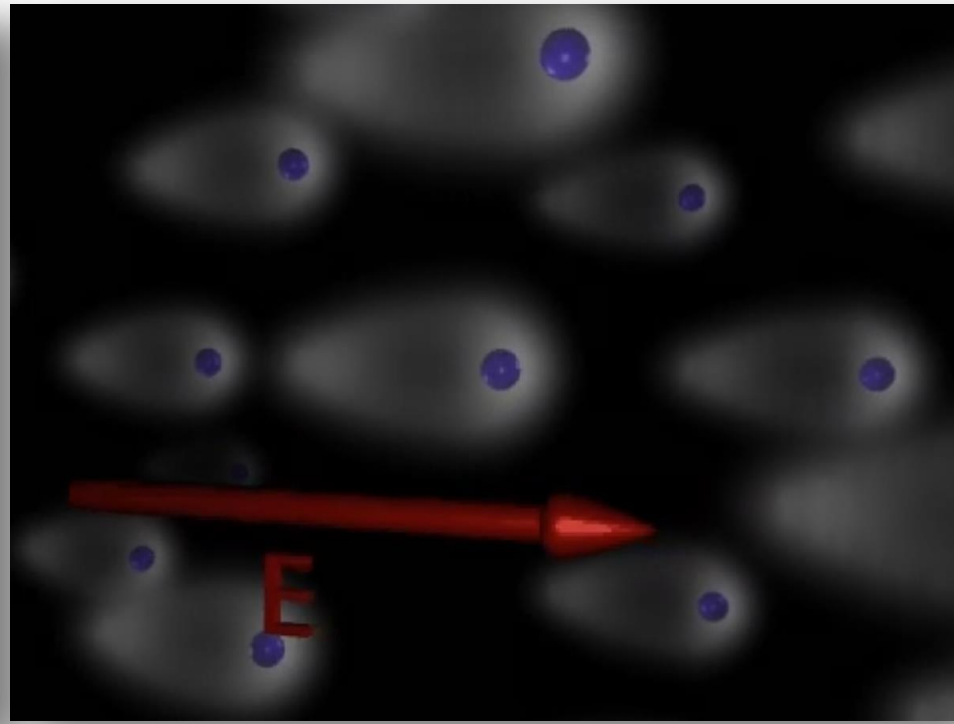
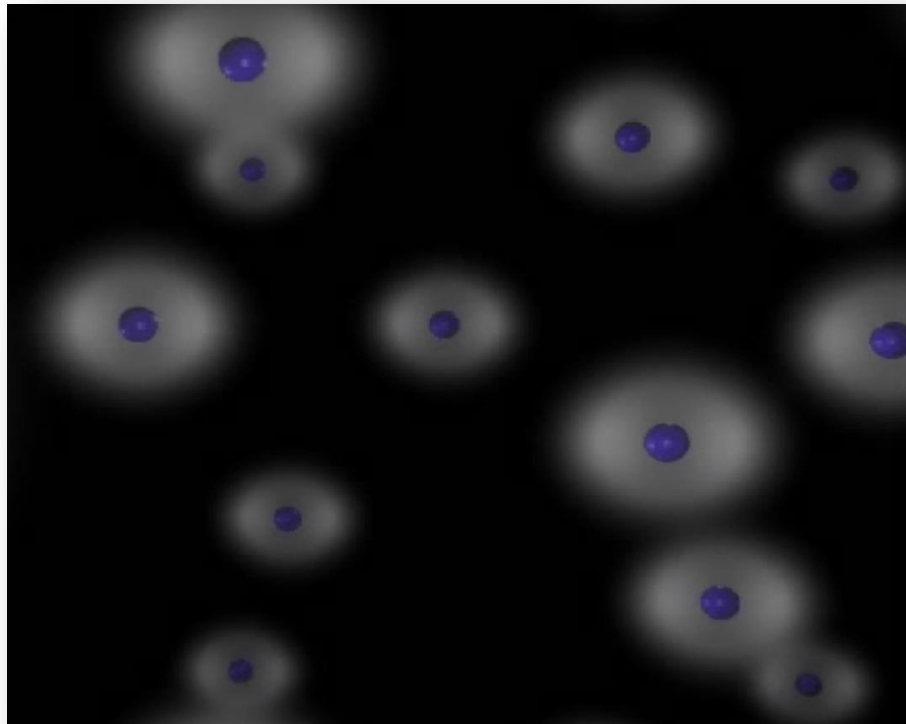
**г.**

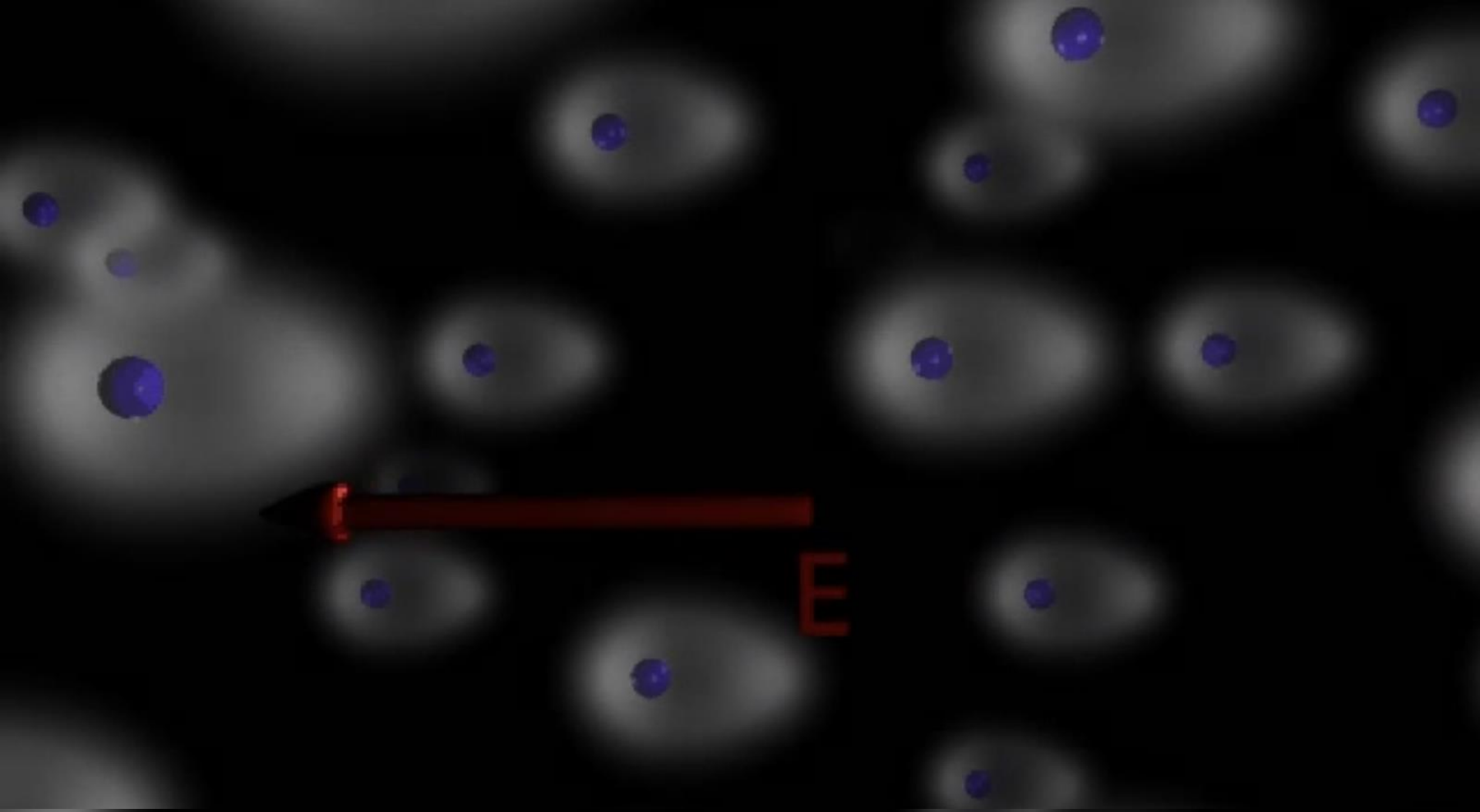
## **Лекция 5**

# **Металлы и диэлектрики в электростатическом поле**

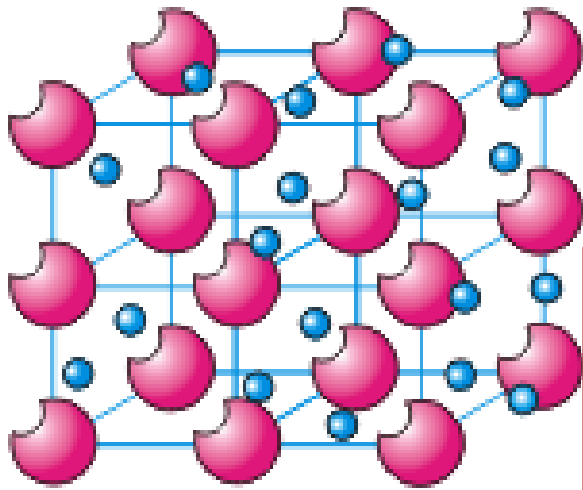
- 1. Электростатическая индукция в  
металлах**
- 2. Диэлектрик в электрическом поле**

# Поле в веществе





**В новой конфигурации зарядов появляется дополнительное электрическое поле**

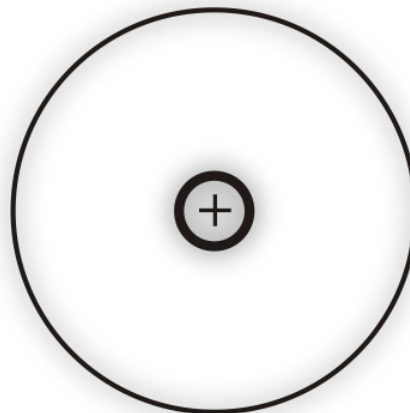


Металлы: Перемещение свободных электронов

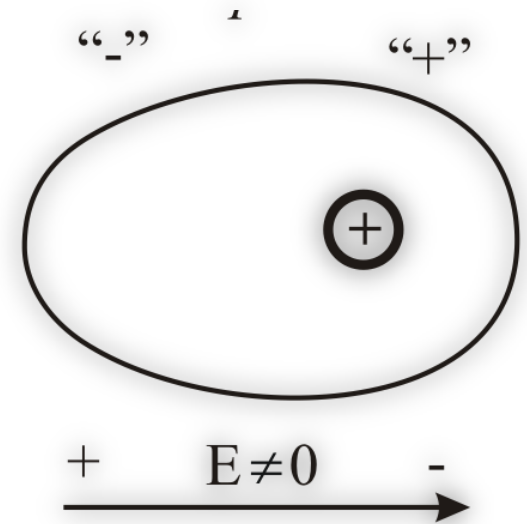
Разделение зарядов, приводящее к появлению наведенного поля, называется **электростатической индукцией**, а нескомпенсированные в малом объеме заряды – **ИНДУКЦИОННЫМИ**.

Диэлектрики:

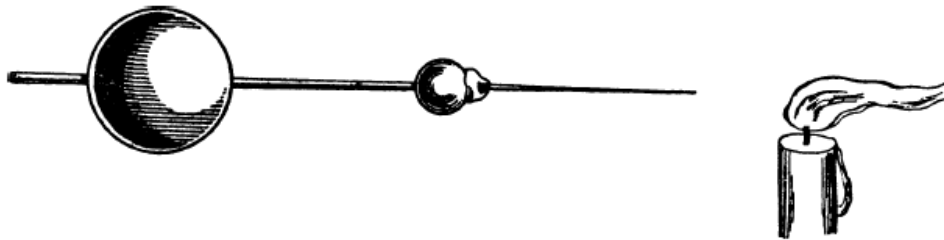
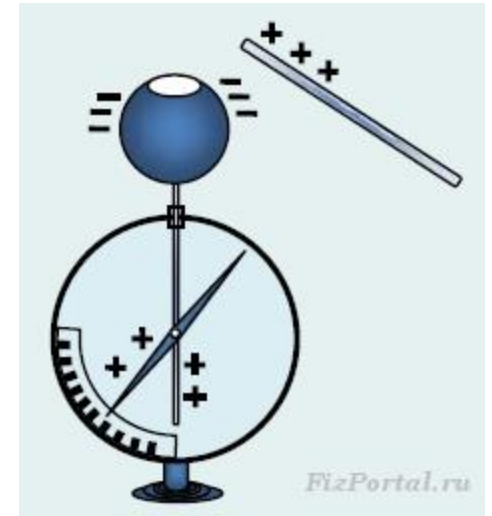
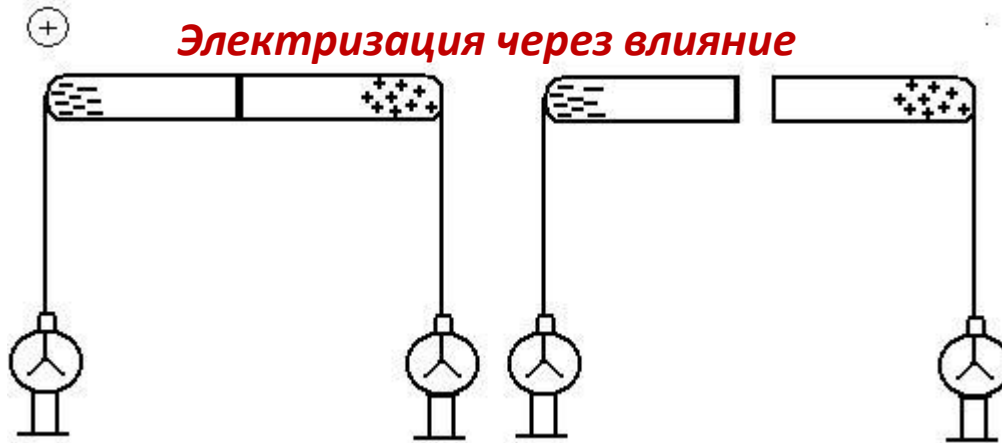
Небольшие смещения ионов и электронов



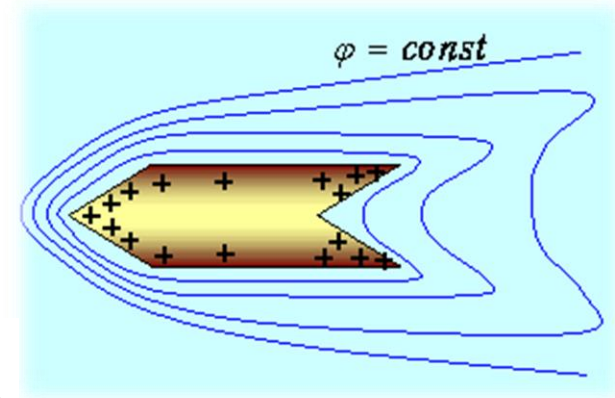
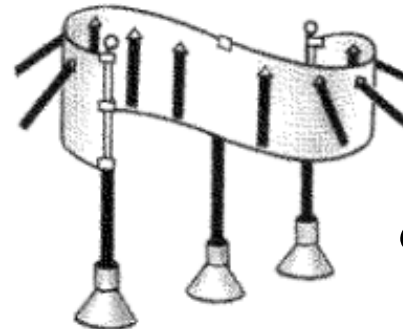
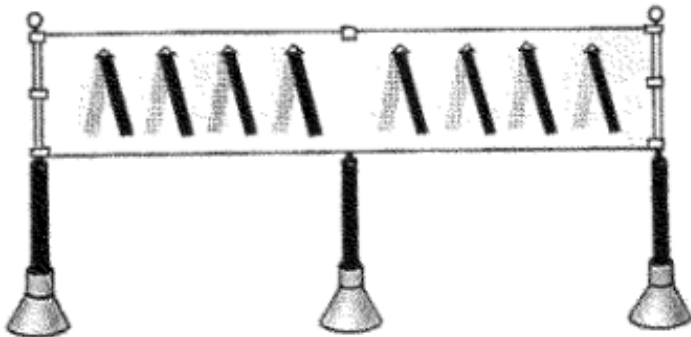
$E=0$



# Электростатическая индукция в металлах

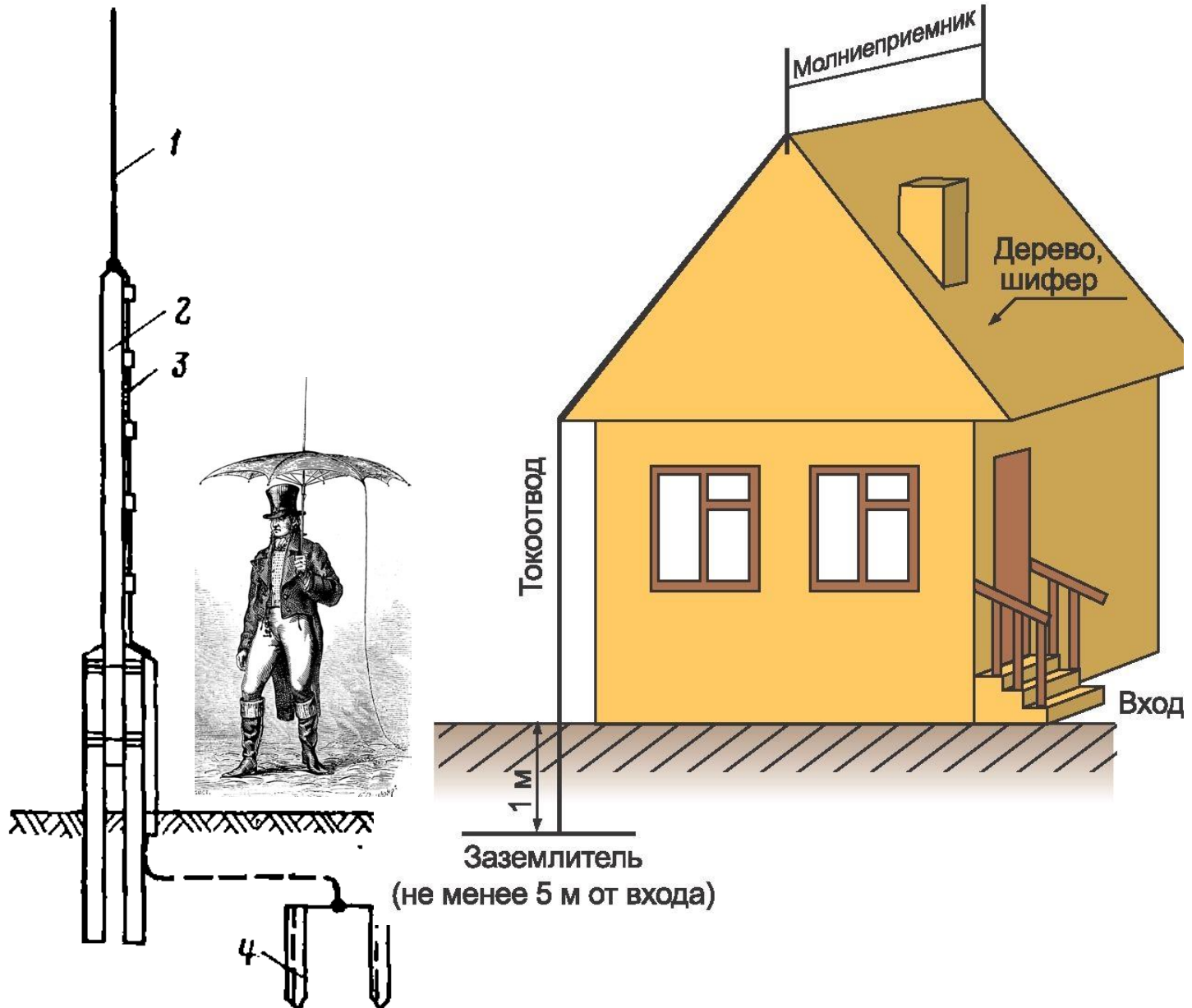


**Сетка Кольбе**



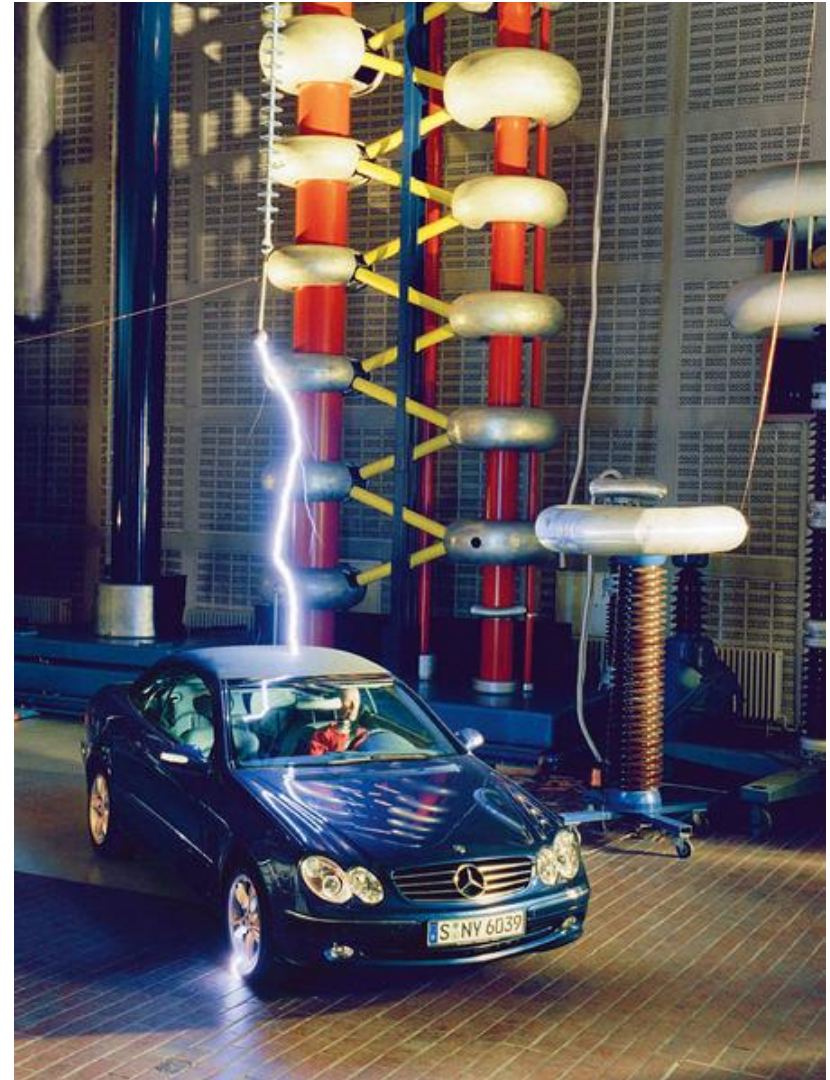
$$\Phi = \iint (E, dS) = \frac{\sigma}{\epsilon_0} S$$

# Применение ЭСИ

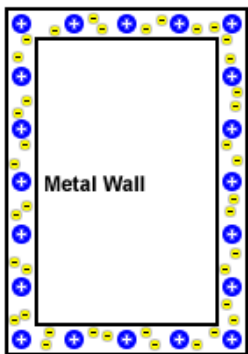




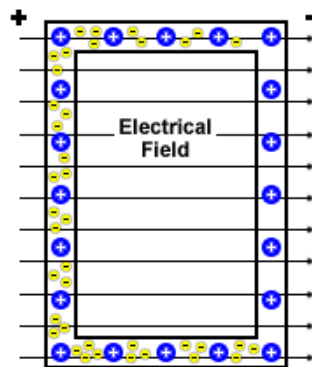
# Клетка М.Фарадея



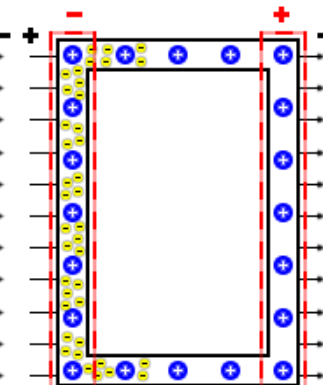
Faraday Cage



Faraday Cage in the absence of an electrical field.



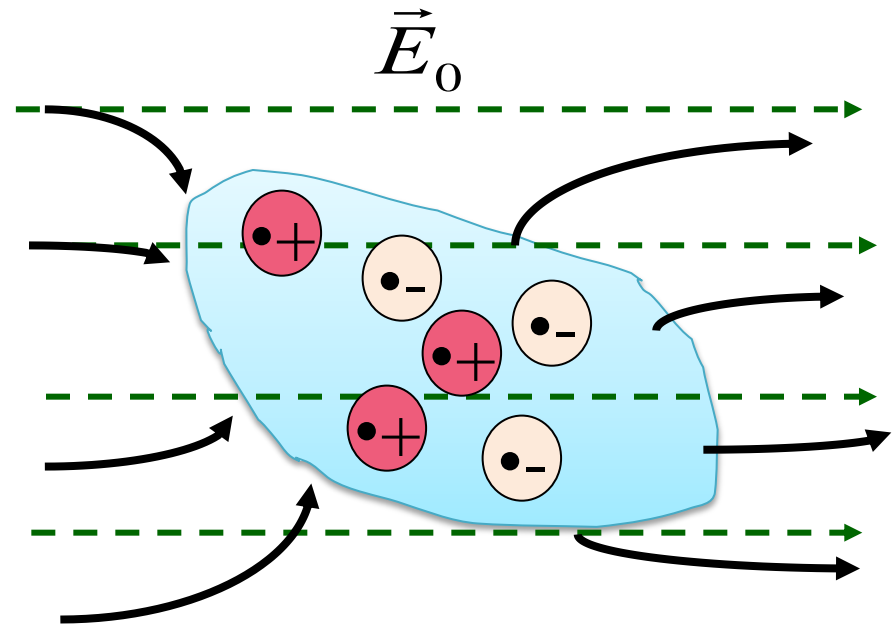
The charged particles in the wall of the Faraday cage respond to an applied electrical field.



Electrical fields generated inside the wall cancel out the applied field, neutralizing the interior of the cage.

# Электрическое поле в металлах

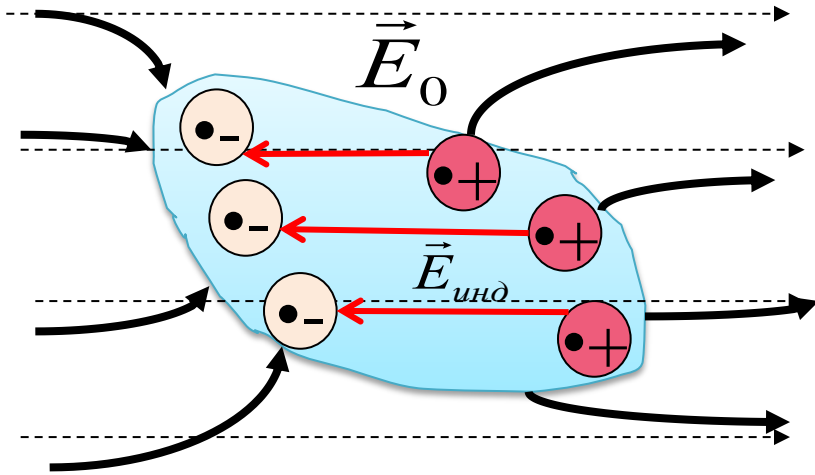
При внесении незаряженного проводника во внешнее электрическое поле свободные заряды начинают двигаться и за короткое время приходят в равновесие:



на одной стороне проводника - избыток отрицательных,  
на другой – положительных зарядов



# Электростатическая индукция



$$E = E_0 + E_{\text{инд}} = 0$$

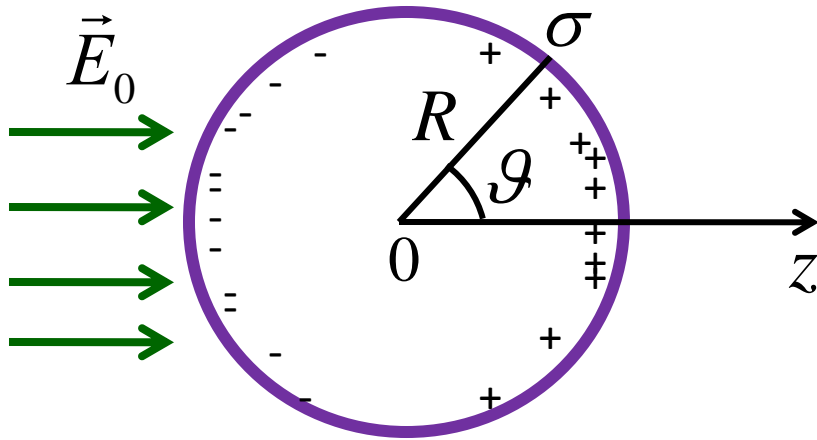
$$\varphi = \text{const}$$

Поле **индуцированных зарядов компенсирует внешнее поле** внутри проводника: иначе внутри происходило бы движение зарядов и распределение **не было бы стационарным**

В равновесном состоянии **суммарное поле внутри проводника равно нулю**

# Дипольный момент проводящего шара

Сферическая система:  $(r = z, \varphi, \vartheta)$



ДИПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ

$$dp(\vartheta) = \underbrace{\sigma(\vartheta)}_{dq} \cdot dS \cdot 2R$$

$$dS = R^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$$

$$\sigma(\vartheta) = \sigma_0 \cdot \cos \vartheta = \left\{ E_{\text{инд}} = \frac{\sigma_0}{3\varepsilon_0} = E_0 \right\} = 3\varepsilon_0 E_0 \cos \vartheta$$

$$p = \int dp(\vartheta) \cos \vartheta = 2\sigma_0 R^3 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos^2 \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = \frac{4}{3} \pi R^3 \sigma_0$$

Учтем, что для шара

$$\sigma_0 = 3\varepsilon_0 E_0$$

$$\Rightarrow p = \varepsilon_0 4\pi R^3 E_0$$

# Время установления ЭС равновесия

$E = 0$  свободные электроны не движутся, либо движутся с  $v = const$

$E \neq 0$  - включаем внешнее поле  $\Rightarrow$  свободные электроны приобретают ускорение, пока не столкнутся с решеткой

$$t = 0: \quad m^* a = |e| E_0 \\ \Rightarrow a = \frac{|e| E_0}{m^*}$$

К этому времени электрон набирает скорость

$$t \neq 0: \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{|e| E_0}{m^*}$$

При столкновении с решеткой электроны передают свой импульс решетке и вновь начинают двигаться с ускорением (дрейф).

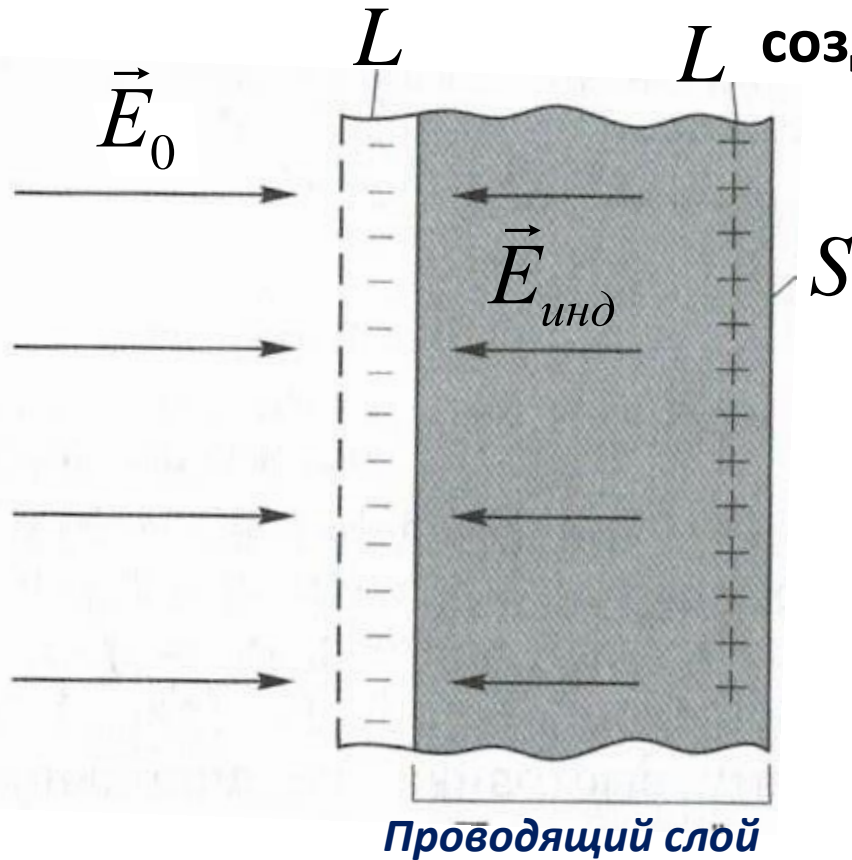
$$\Rightarrow v_{\max} = \frac{|e| E_0}{m^*} \tau$$

Скорость дрейфа

$$v_{cp} = \frac{1}{2} v_{\max}$$

Два разноименно заряженных слоя

создают встречное индукционное поле



$$E_{\text{инд}} = \frac{q}{S \varepsilon_0} = \frac{|e| n L}{\varepsilon_0}$$

$$= \frac{|e|^2 n E_0 \tau}{2 m^* \varepsilon_0} t = \frac{\gamma}{2 \varepsilon_0} E_0 t$$

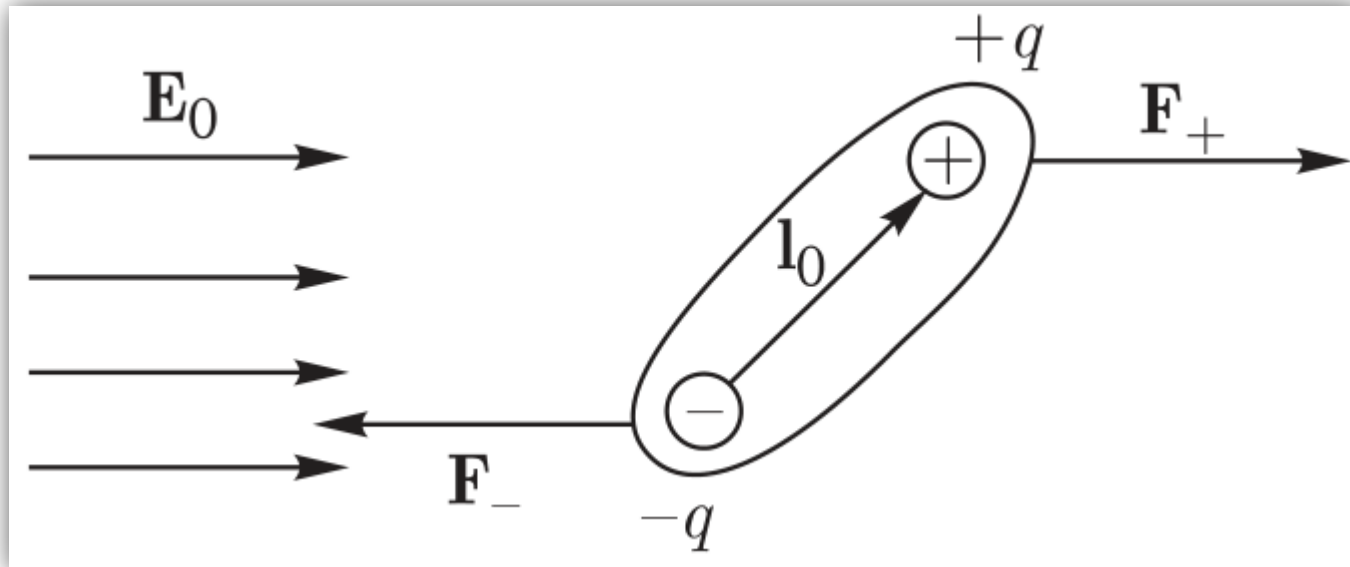
$$\gamma = \frac{|e|^2 n \tau}{m^*}$$

Удельная  
электропроводность  
металла

Индукционное поле компенсирует внешнее поле за

$$t_0 = \frac{2 \varepsilon_0}{\gamma} = \left\{ \gamma \approx 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} \right\} \approx \frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{10^7} \cong 10^{-18} \text{ с}$$

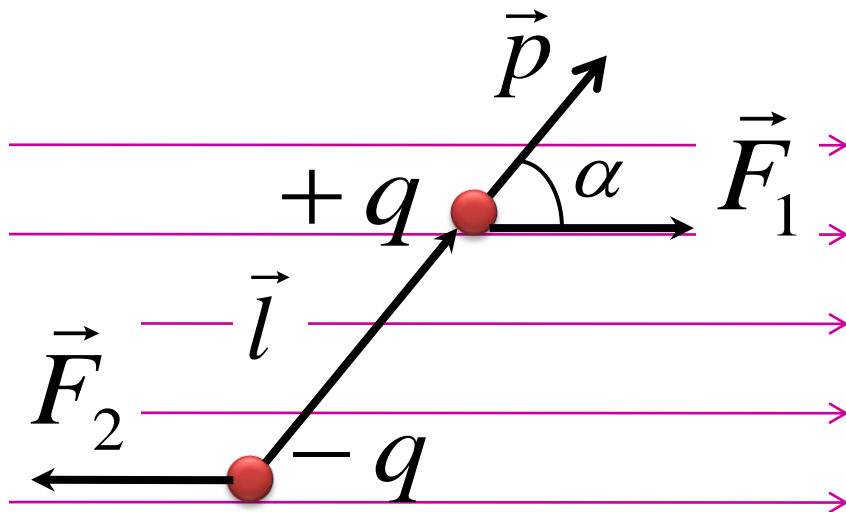
# Диэлектрики



Основная характеристика диполя –  
*дипольный момент:*

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

# Диполь во внешнем поле



Вращающий момент пары сил

$$M = Fl \sin \alpha = qEl \sin \alpha$$

$$\vec{M} = [\vec{p} \vec{E}]$$

$$dA = M \cdot d\alpha = pE \sin \alpha \cdot d\alpha$$

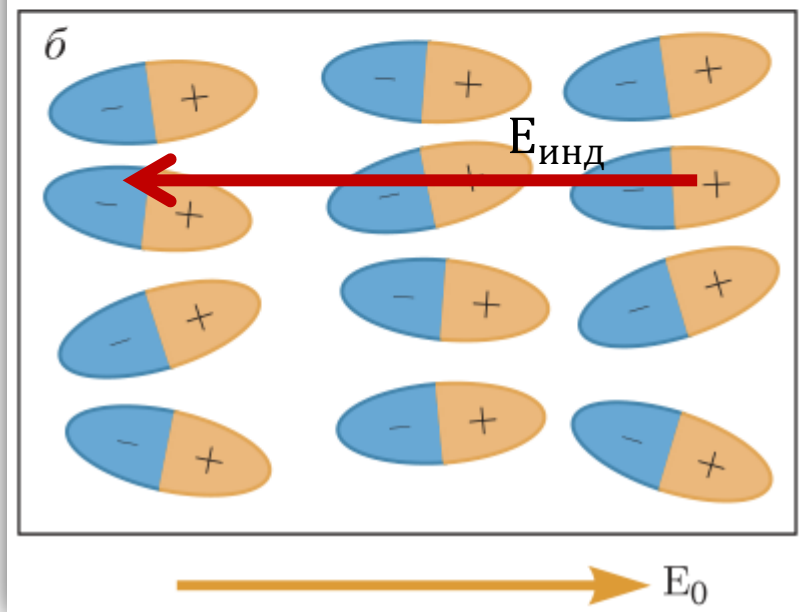
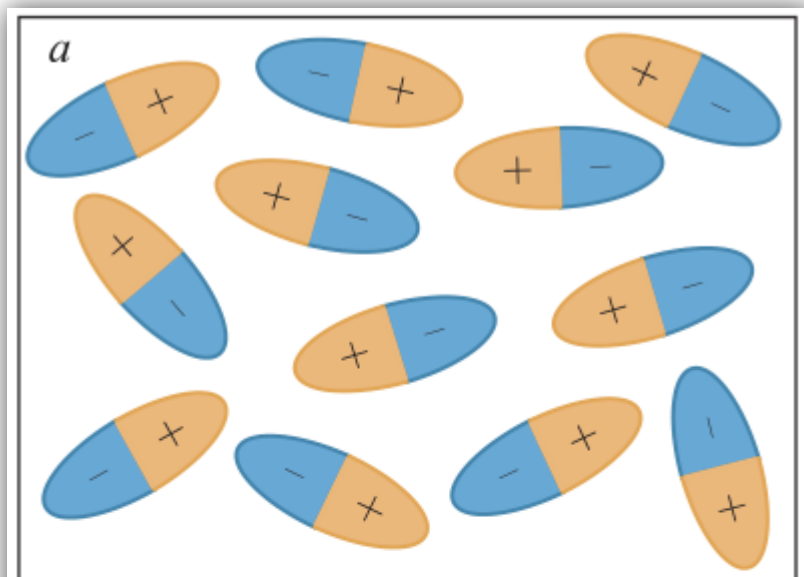
$$dU = pE \sin \alpha \cdot d\alpha$$

$$U = -pE \cos \alpha = -(\vec{p} \vec{E})$$

Внешнее электрическое поле стремится повернуть диполь, чтобы  $p$  совпал по направлению с  $E$

Потенциальная энергия диполя





### Устойчивое равновесие:

дипольный момент параллелен вектору напряженности внешнего электрического поля

$\alpha = 0, M = 0, U = -pE$

$\alpha = 0, M = 0, U = -pE$

### Неустойчивое равновесие:

дипольный момент направлен против вектора напряженности внешнего электрического поля

$\alpha = \pi, M = 0, U = pE$

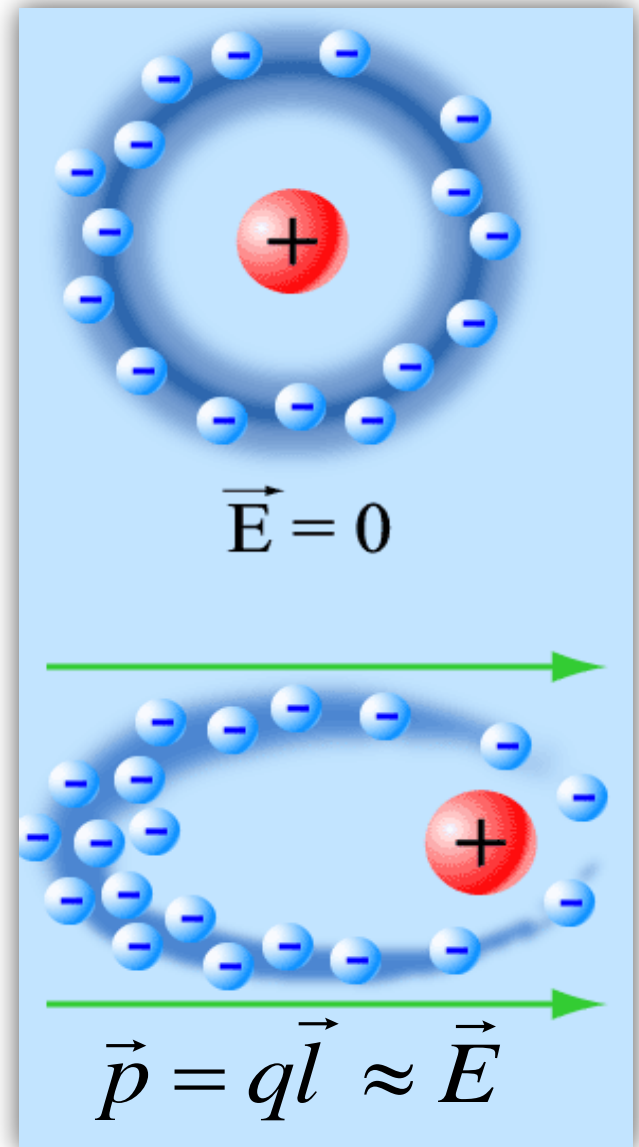
$\alpha = \pi, M = 0, U = pE$

В обоих случаях диэлектрик поляризуется. Для удержания его в поляризованном состоянии внутри должно существовать электрическое поле = является суперпозицией внешнего и индукционного полей

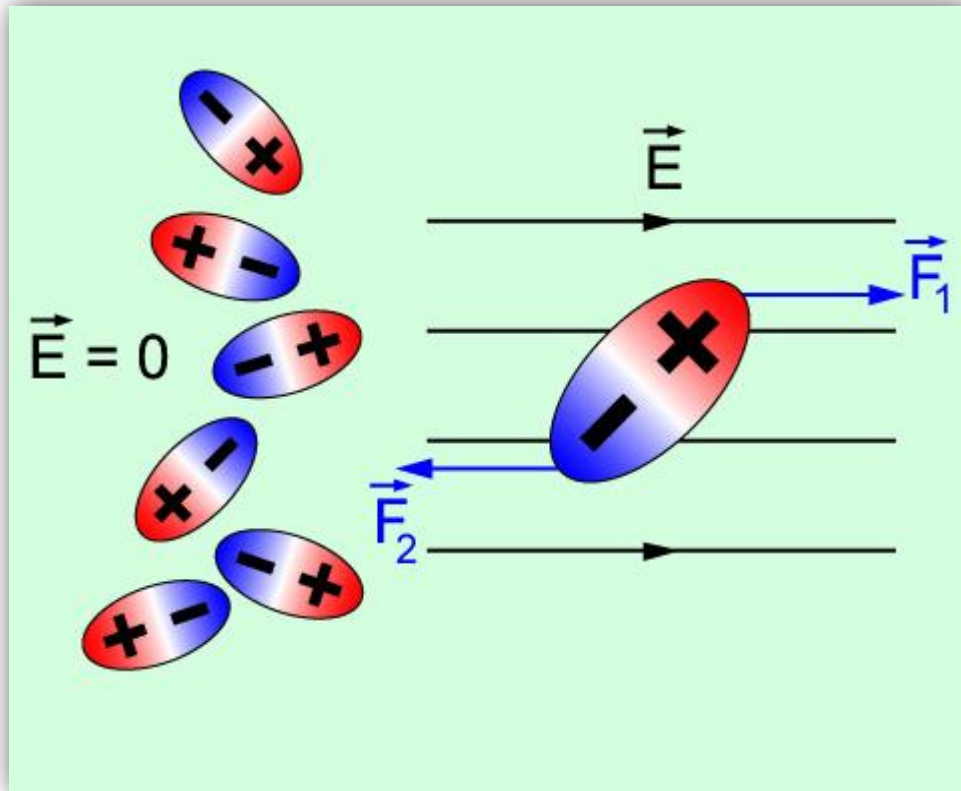
# Типы диэлектриков

## 1. неполярные

Диэлектрики с неполярными молекулами, симметричные молекулы в отсутствие внешнего поля имеют нулевой дипольный момент ( $N_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ).



# Типы диэлектриков

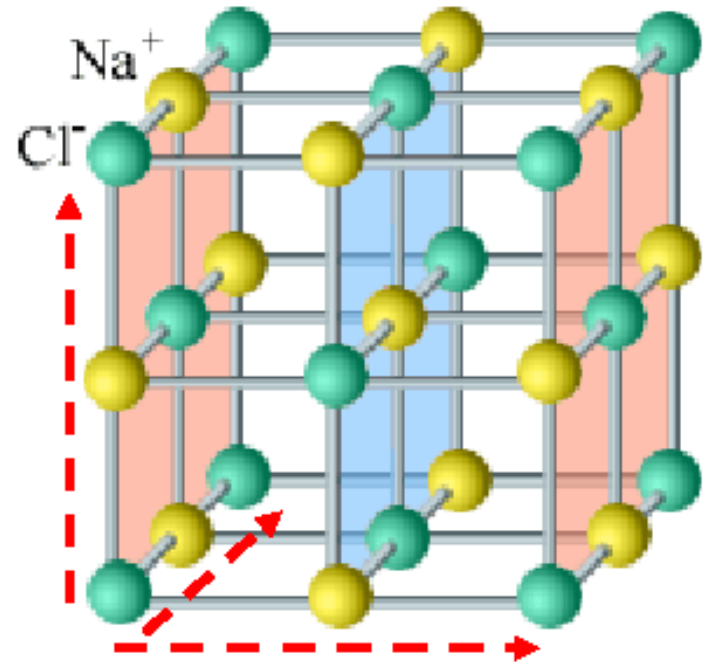


## 2. Полярные

Диэлектрики, молекулы которых имеют ненулевой дипольный момент ( $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ).

# Типы диэлектриков

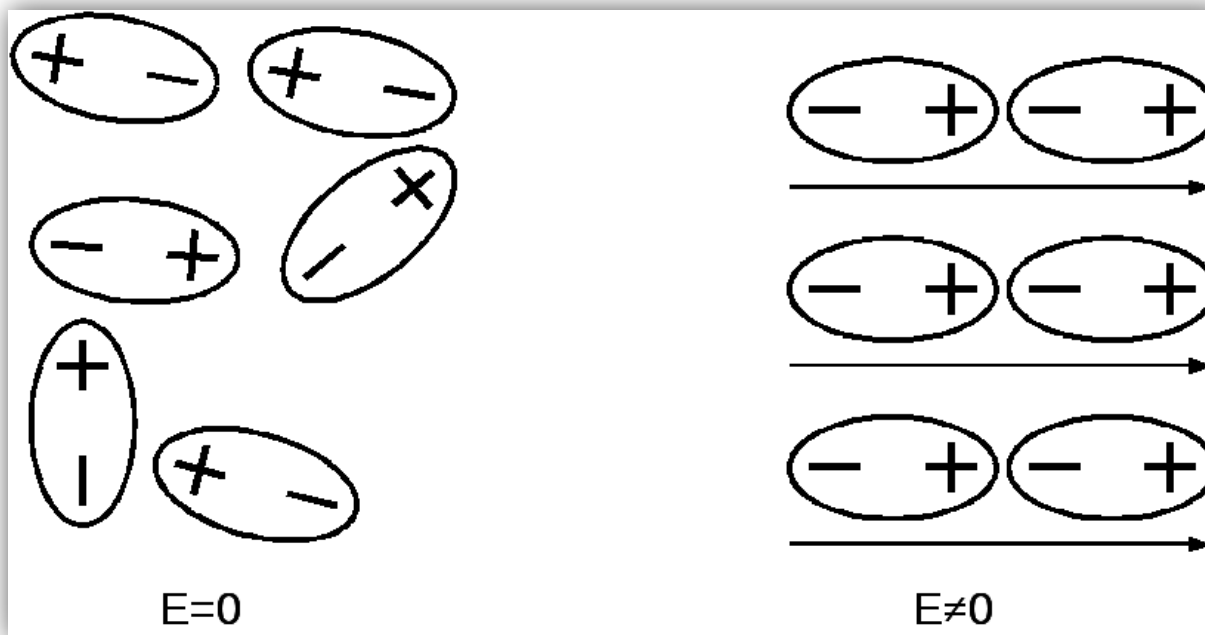
**3. Ионные** (*NaCl, KCl*)-  
пространственные решётки  
с правильным  
чередованием ионов  
разных знаков.



# Поляризация

Внесение диэлектриков во внешнее электрическое поле приводит к возникновению отличного от нуля результирующего дипольного момента диэлектрика

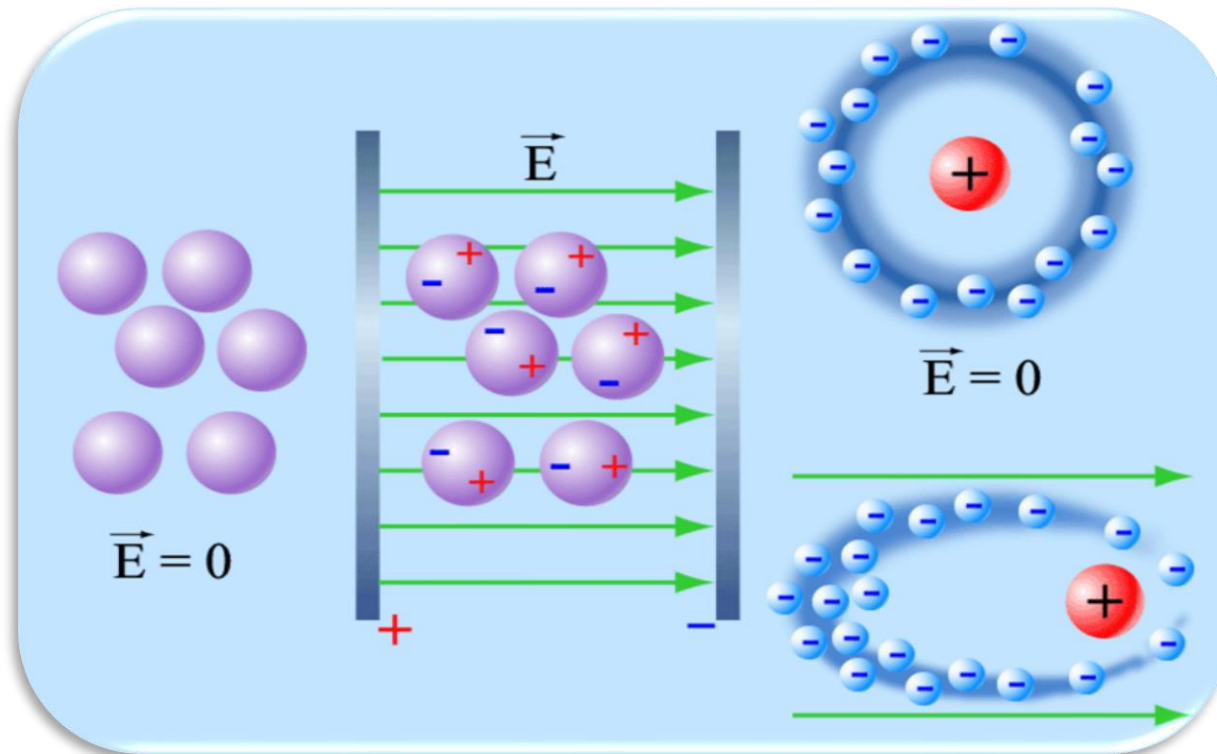
**Поляризация** – процесс ориентации диполей или появления под воздействием внешнего электрического поля ориентированных по полю диполей



# Типы поляризации

## 1. Электронная

возникновение у атомов индуцированного дипольного момента за счёт деформации электронных орбит

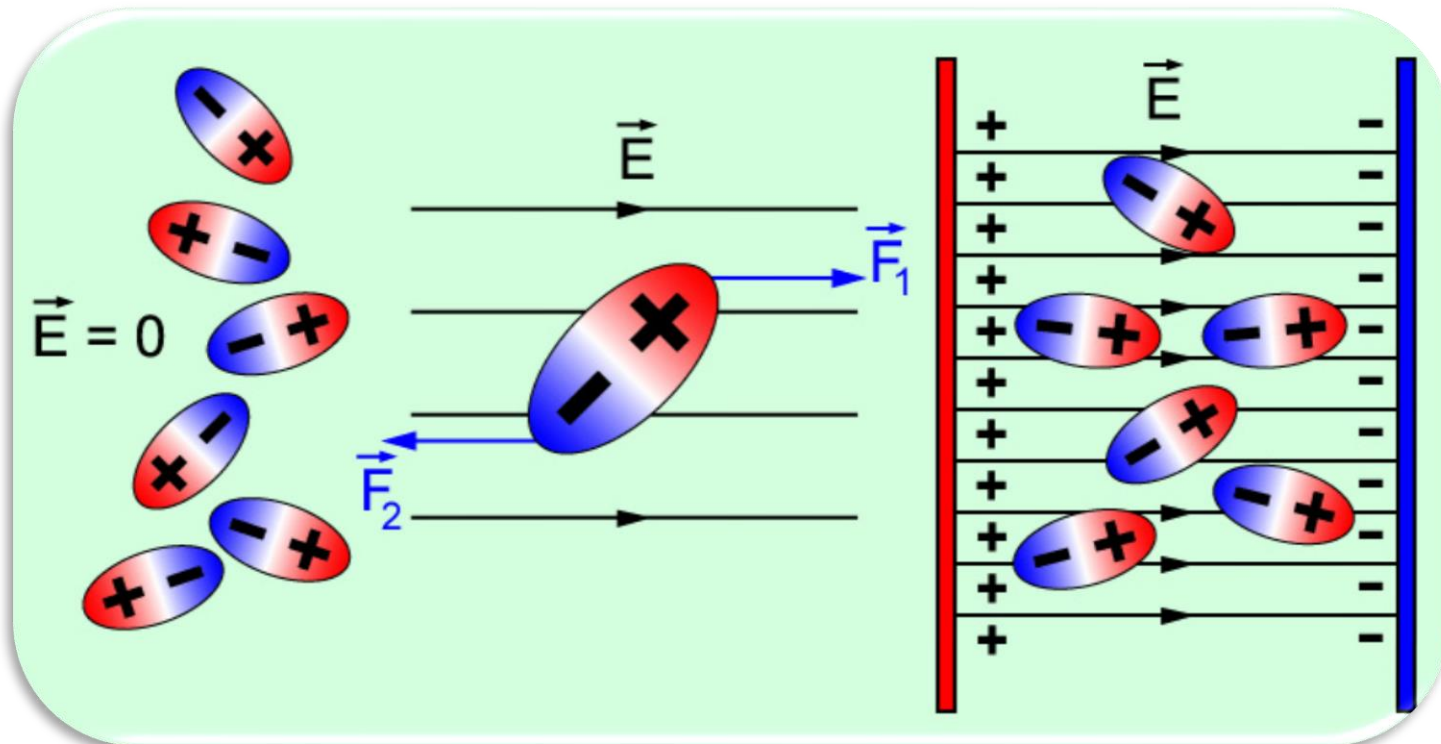




# Типы поляризации

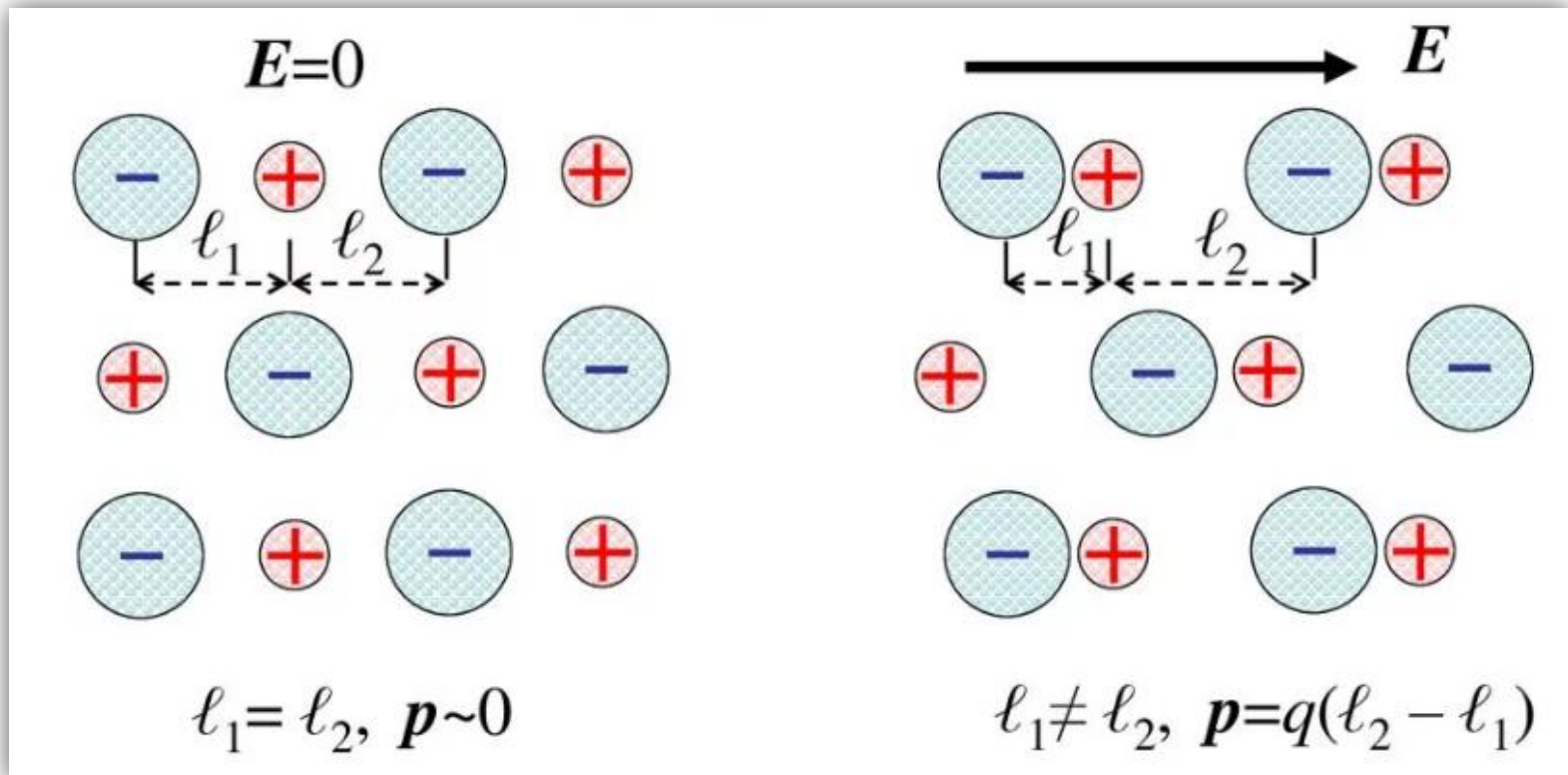
## 2. Ориентационная (дипольная) – ориентация имеющих дипольных моментов по полю

Тепловое движение препятствует полной ориентации молекул, но в результате совместного действия (ЭП + ТП) возникает преимущественная ориентация дипольных моментов молекул по полю (усиливается с  $\uparrow E$  и  $\downarrow T$ ).



# Типы поляризации

3. **Ионная** – смещение подрешётки положительных ионов вдоль поля, а отрицательных – против поля, приводящее к возникновению дипольных моментов



# Вектор поляризации

**Результат:** на поверхностях нескомпенсированные связанные заряды противоположного знака с  $\sigma' = \text{const}$ , т.е. внутри проводника индуцируется поле

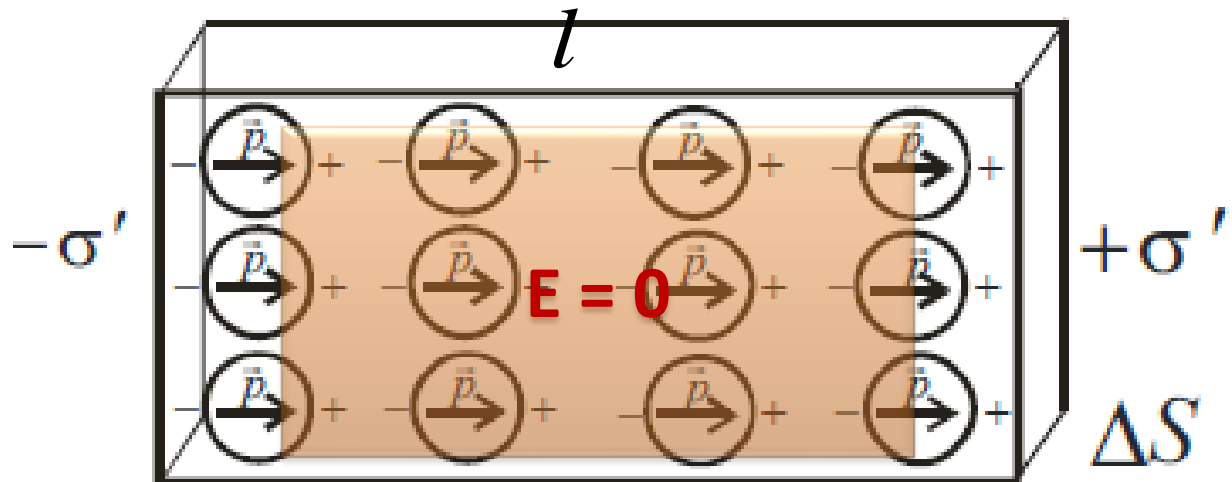
$$E_{\text{инд}} = \frac{\sigma'}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{\text{инд}}$$

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V}$$

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

$\chi$  - диэлектрическая восприимчивость



$\sigma'$  - связанные заряды

**Дипольный момент**

$$P_{\text{пл}} = \sigma' \Delta S \cdot l$$

$$P_n \Delta V = q^{\text{связ}} L = \sigma' \Delta S L$$

$$P_n = \sigma'$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} = \varepsilon_0 \chi (\vec{E}_0 + \vec{E}_{\text{инд}})$$

$$E_{\text{инд}} = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$$

$$P_n = \sigma'$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{\text{инд}} = \vec{E}_0 - \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0} = \vec{E}_0 - \frac{\varepsilon_0 \chi \vec{E}}{\varepsilon_0}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{1 + \chi} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon}, \quad \varepsilon = 1 + \chi$$

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