

# **Проводники и диэлектрики в электрическом поле**

# Микро- и макрополя

Заряды (+ –)

- **связанные** – входят в состав атомов (молекул), под действием эл. поля они могут смещаться из положения равновесия, но не могут покинуть молекулу (атом);
- **сторонние** или **свободные**
  - не входят в состав атомов (молекул), но находятся в пределах диэлектрика,
  - заряды вне диэлектрика

## Микро- и макрополя

**Микроскопическое** или **истинное** поле – суперпозиция (результат) поля сторонних зарядов ( $\vec{E}_{стор}$ ) и поля связанных зарядов ( $\vec{E}_{связ}$ ):

$$\vec{E}_{микро} = \vec{E}_{стор} + \vec{E}_{связ}$$

$$\vec{E}_{макро} = \langle \vec{E}_{микро} \rangle = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

# Проводники и диэлектрики

- **Проводники** – это вещества, в которых свободные заряды перемещаются под действием электрического поля.
- **Металлы** (свободные заряды: электроны) – проводники **первого рода**
- **Электролиты и ионизированный газ** (свободные заряды: положительные и отрицательные ионы) – проводники **второго рода**, в них при протекании тока есть перенос вещества.

## Проводники и диэлектрики

- **Диэлектрики (изоляторы)** – это вещества, не способные проводить электрический ток.

Удельное сопротивление диэлектриков в  $10^{15} \div 10^{20}$  раз больше, чем у проводников.

# Проводники и диэлектрики

Все положительные заряды молекул (атомов) можно заменить одним суммарным зарядом  $+q$ , помещенным в некоторую точку, называемую **центром тяжести положительных зарядов**,

её радиус-вектор:

$$\vec{r}_+ = \frac{\sum q_{i+} \vec{r}_{i+}}{q_+}$$

**Центр тяжести отрицательных зарядов**

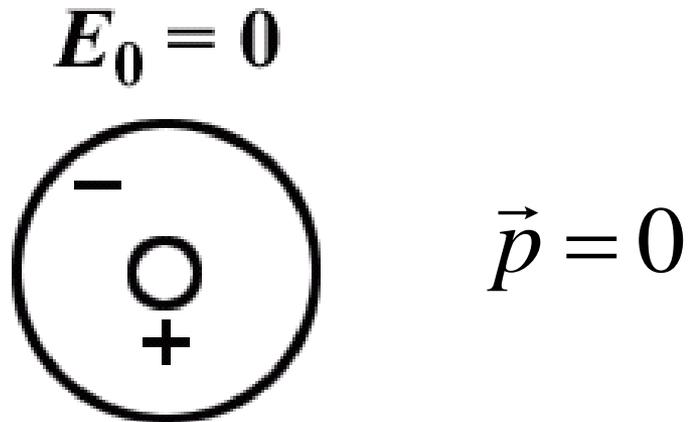
$$\vec{r}_- = \frac{\sum q_{i-} \vec{r}_{i-}}{q_-}$$

# Проводники и диэлектрики

- Молекулу в первом приближении можно рассматривать как диполь (дипольный момент  $\vec{p} = |q|\vec{l}$  )
- Диэлектрики в зависимости от строения их молекул и внутренней структуры можно разделить на
  - 1) *Неполярные диэлектрики*
  - 2) *Полярные диэлектрики*
  - 3) *Ионные диэлектрики*

# Проводники и диэлектрики

- 1) *Неполярные диэлектрики* ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ...) – молекула имеет симметричное строение



# Проводники и диэлектрики

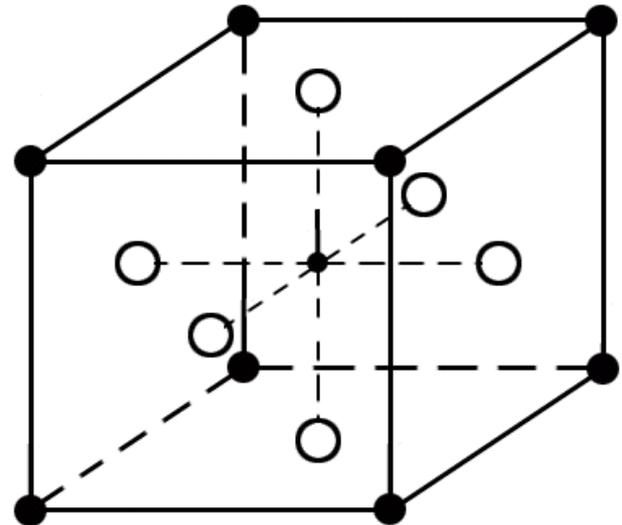
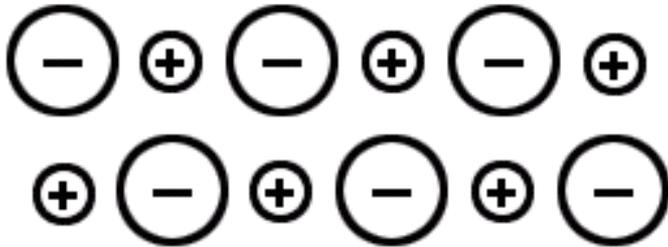
2) **Полярные диэлектрики** ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  ...) – молекула имеет не симметричное строение, то есть центры тяжести + и - зарядов в отсутствии внешнего электрического поля не совпадают, следовательно, молекула обладает дипольным моментом.

При отсутствии внешнего электрического поля  $\sum p_i = 0$



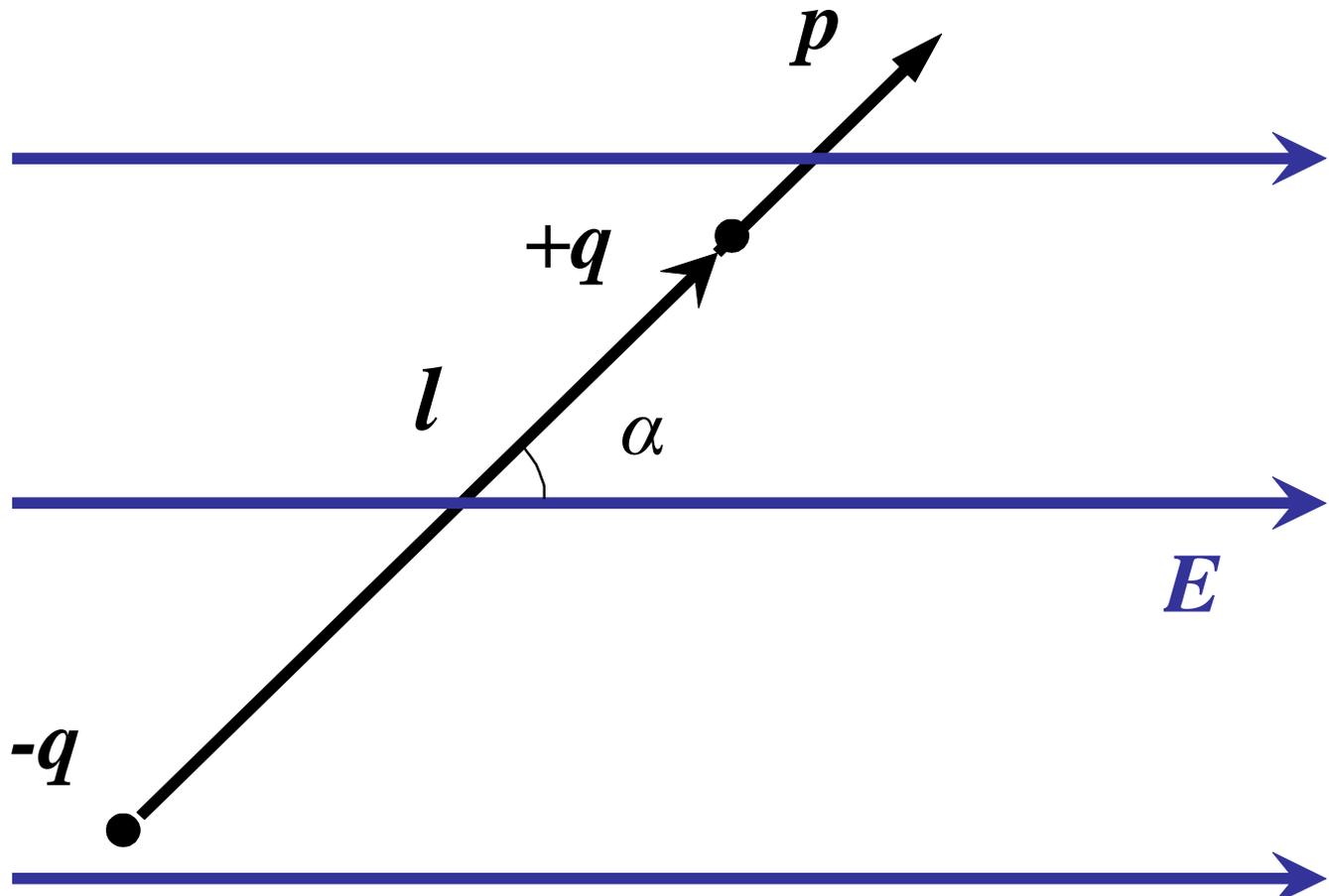
## Проводники и диэлектрики

- 3) *Ионные диэлектрики* (NaCl, KCl, KBr) – молекулы имеют ионное строение, а диэлектрик представляет собой ионную кристаллическую решетку с чередованием ионов разных знаков.



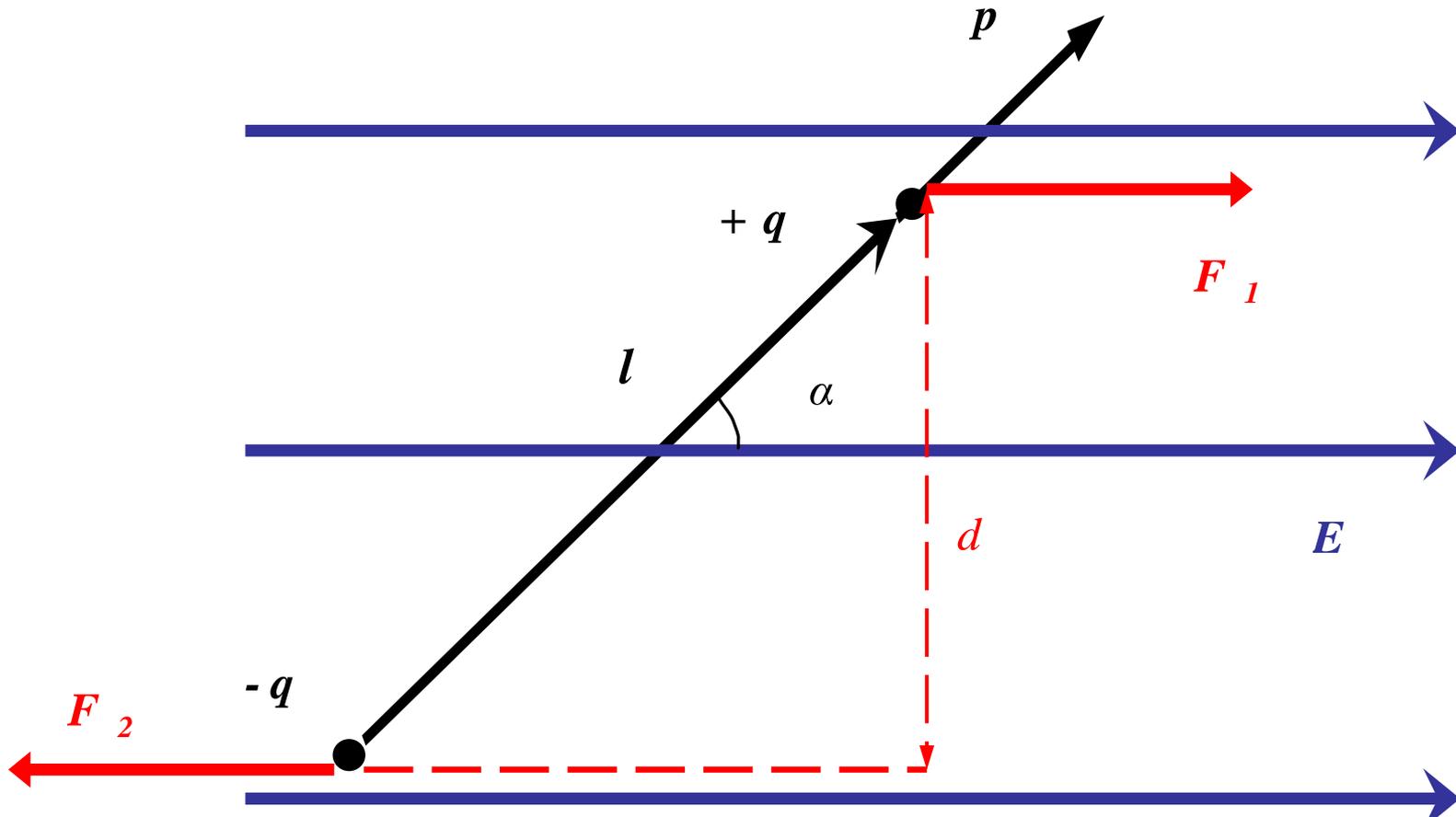
## Диполь в электрическом поле

- Диполь находится в **однородном** электрическом поле ( $E = const$ ).

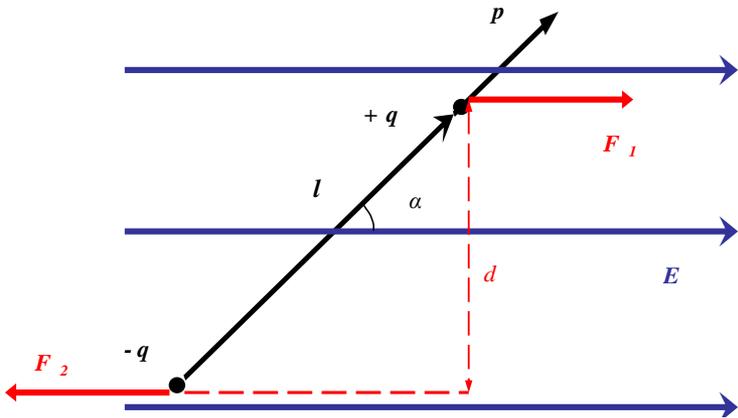


# Диполь в электрическом поле

- Диполь находится в **однородном** электрическом поле ( $E = const$ ).



# Диполь в электрическом поле



Вращающий момент

$$M = Fd$$

$$M = Fl \sin \alpha$$

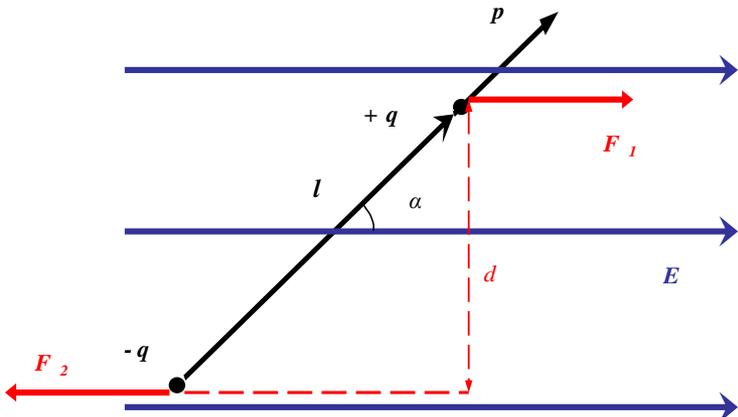
$$M = qEl \sin \alpha = qlE \sin \alpha,$$

$$\vec{p}_l = ql.$$

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

Вращающий момент  $\mathbf{M}$  стремится повернуть диполь и установить его так, чтобы  $\vec{p}_l \uparrow \uparrow \vec{E}$

## Диполь в электрическом поле



Работа против сил,  
действующих на диполь

$$dA = Md\alpha = pE \sin \alpha d\alpha$$

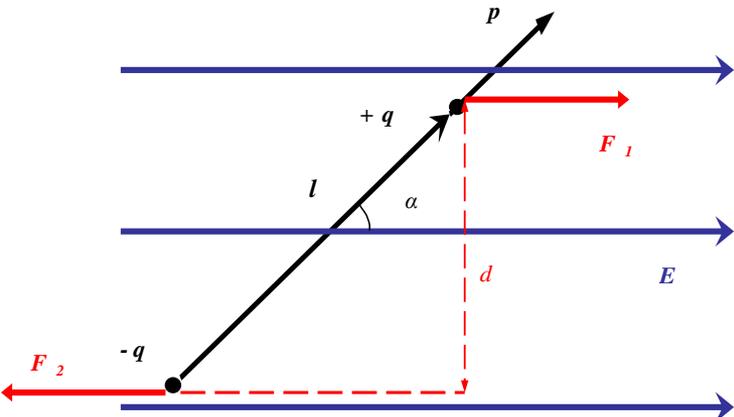
Работа идет на увеличение потенциальной энергии  $W$ ,  
которой обладает диполь в электрическом поле:

$$dW = pE \sin \alpha d\alpha$$

$$W = -pE \cos \alpha + const$$

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

## Диполь в электрическом поле



- Поле **неоднородное** ( $E \neq const$ ), то помимо вращающего момента на диполь действует сила

$$F = F_2 - F_1 = q(E_2 - E_1) = q \frac{\partial E}{\partial l} l = p_l \frac{\partial E}{\partial l}$$

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

Под действием этой силы диполь стремится переместиться в область наибольшей напряженности  $E$  электрического поля.

$$\vec{F} = \overline{grad}(\vec{p}_l \cdot \vec{E})$$

# Поляризация диэлектриков

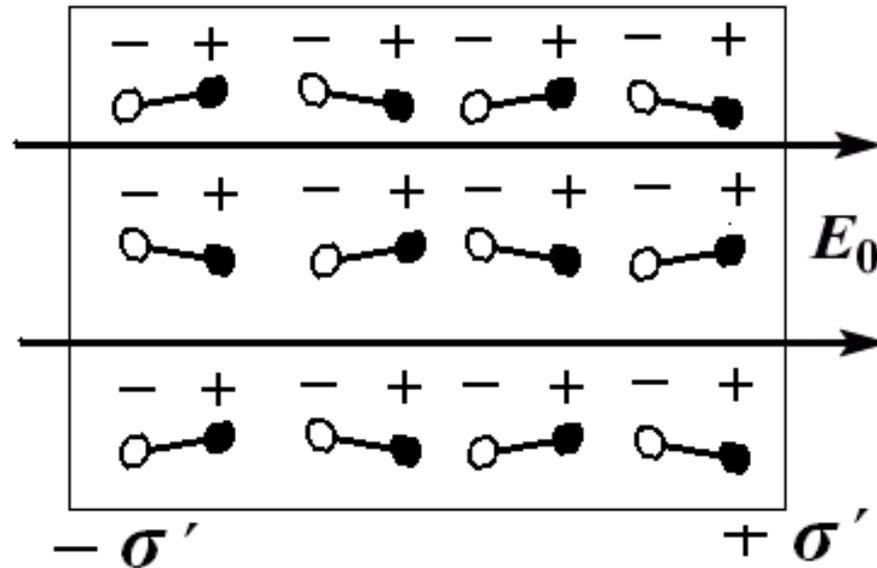
**Поляризация диэлектриков** – процесс ориентации диполей или появления под действием внешнего электрического поля  $E_0$  ориентированных по полю диполей.

В зависимости от типа диэлектриков будет различаться вид поляризации.

# Поляризация диэлектриков

полярные диэлектрики

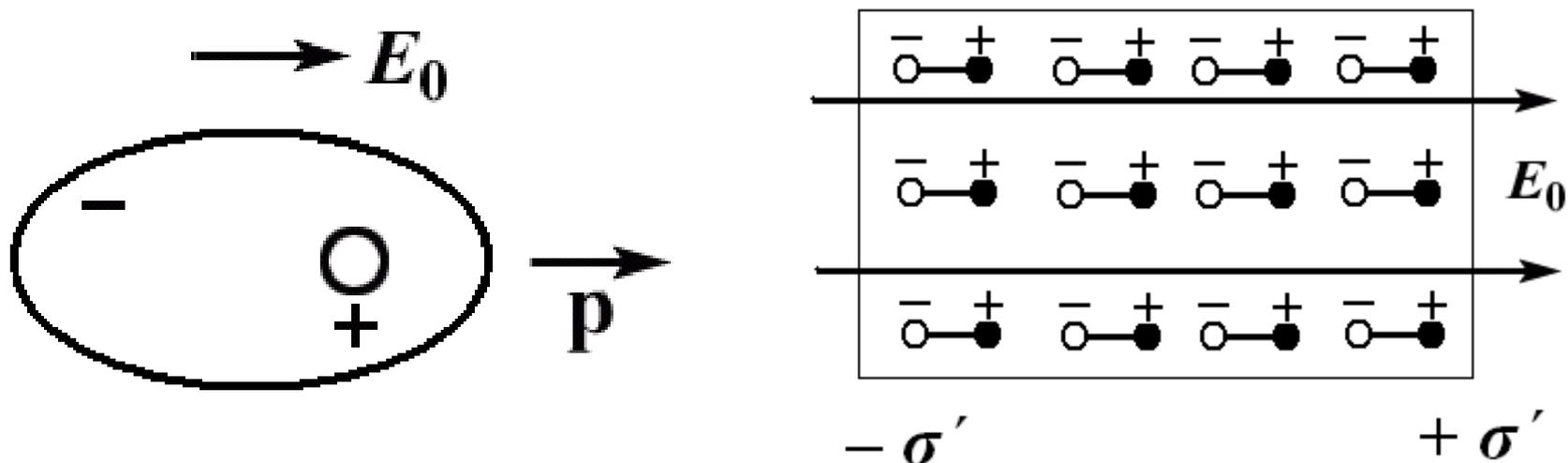
*ориентационная (дипольная)* поляризация



# Поляризация диэлектриков

## Неполярные диэлектрики

*электронная (деформационная) поляризация*



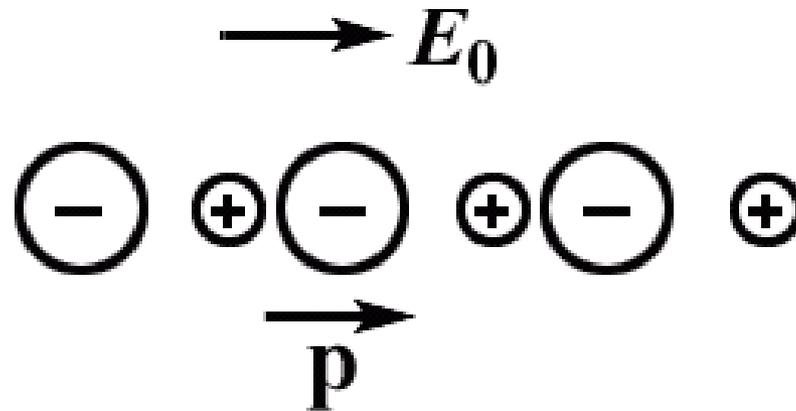
$$\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E},$$

$\alpha$  — поляризуемость молекулы

# Поляризация диэлектриков

## ионные диэлектрики

*ионная* поляризация



## Поляризованность (вектор поляризации)

- Дипольный момент диэлектрика

$$\vec{p}_V = \sum_i \vec{p}_{li}$$

$p_{li}$  — дипольный момент одной молекулы.

**Поляризованность** диэлектрика — дипольный момент единичного объема:

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_V}{V} = \frac{\sum_i \vec{p}_{li}}{V} \quad [(\text{Кл} \cdot \text{м})/\text{м}^3 = \text{Кл}/\text{м}^2].$$

## Поляризованность (вектор поляризации)

- Для изотропного диэлектрика с неполярными молекулами:

$$\vec{P} = \vec{p}_l \cdot n = \alpha \varepsilon_0 n \vec{E} = \chi \varepsilon_0 \vec{E},$$

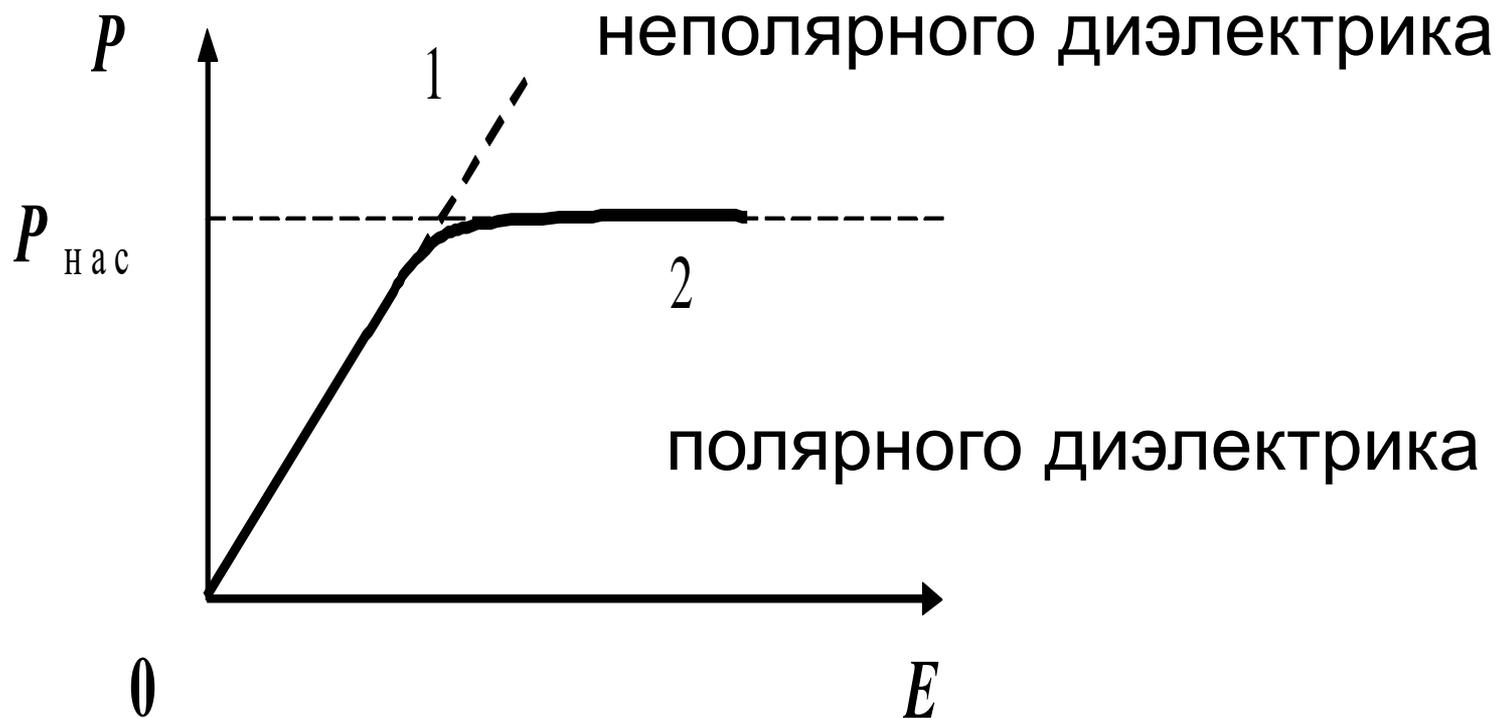
где  $n$  – концентрация молекул

$$\chi = \alpha \cdot n$$

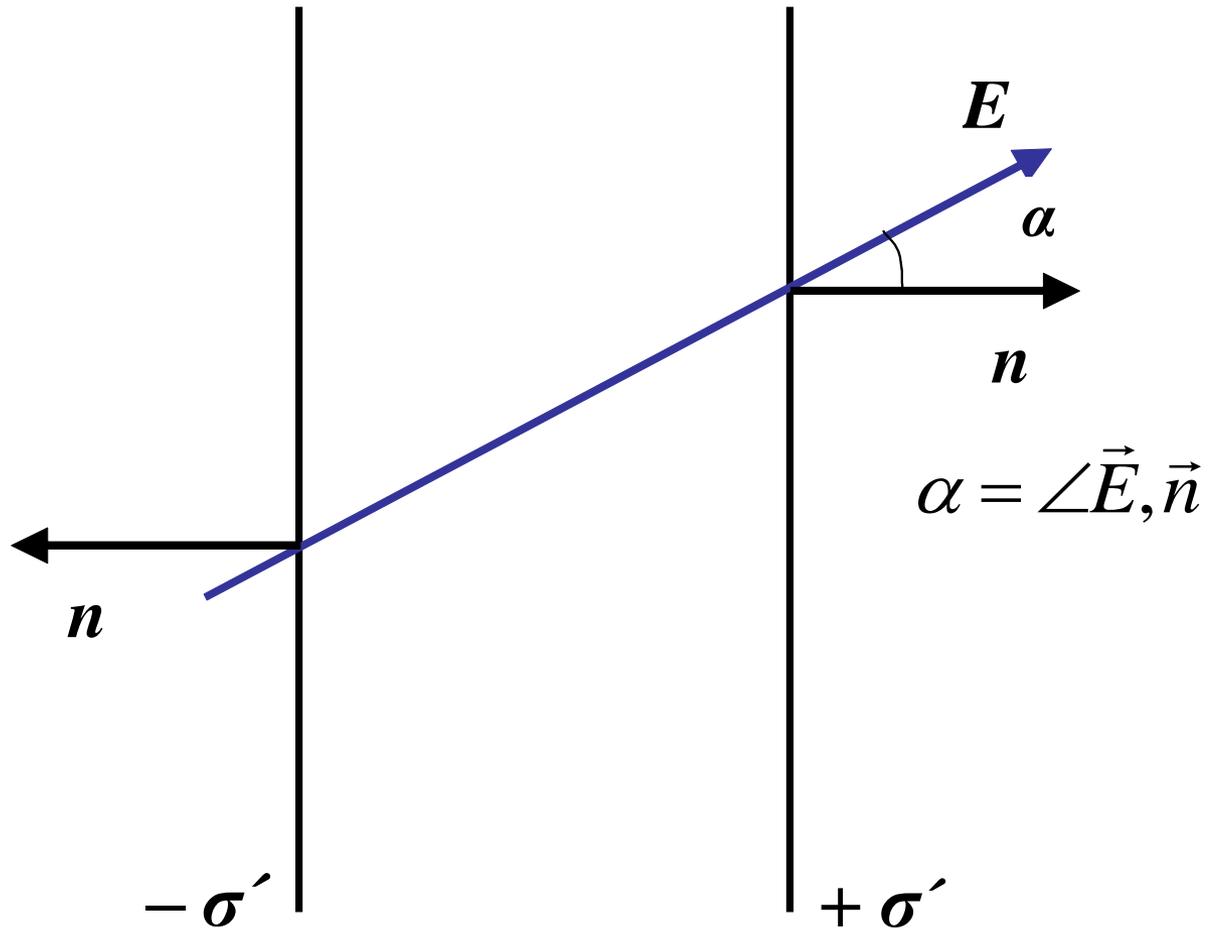
**диэлектрической  
восприимчивостью**

## Поляризованность (вектор поляризации)

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E},$$

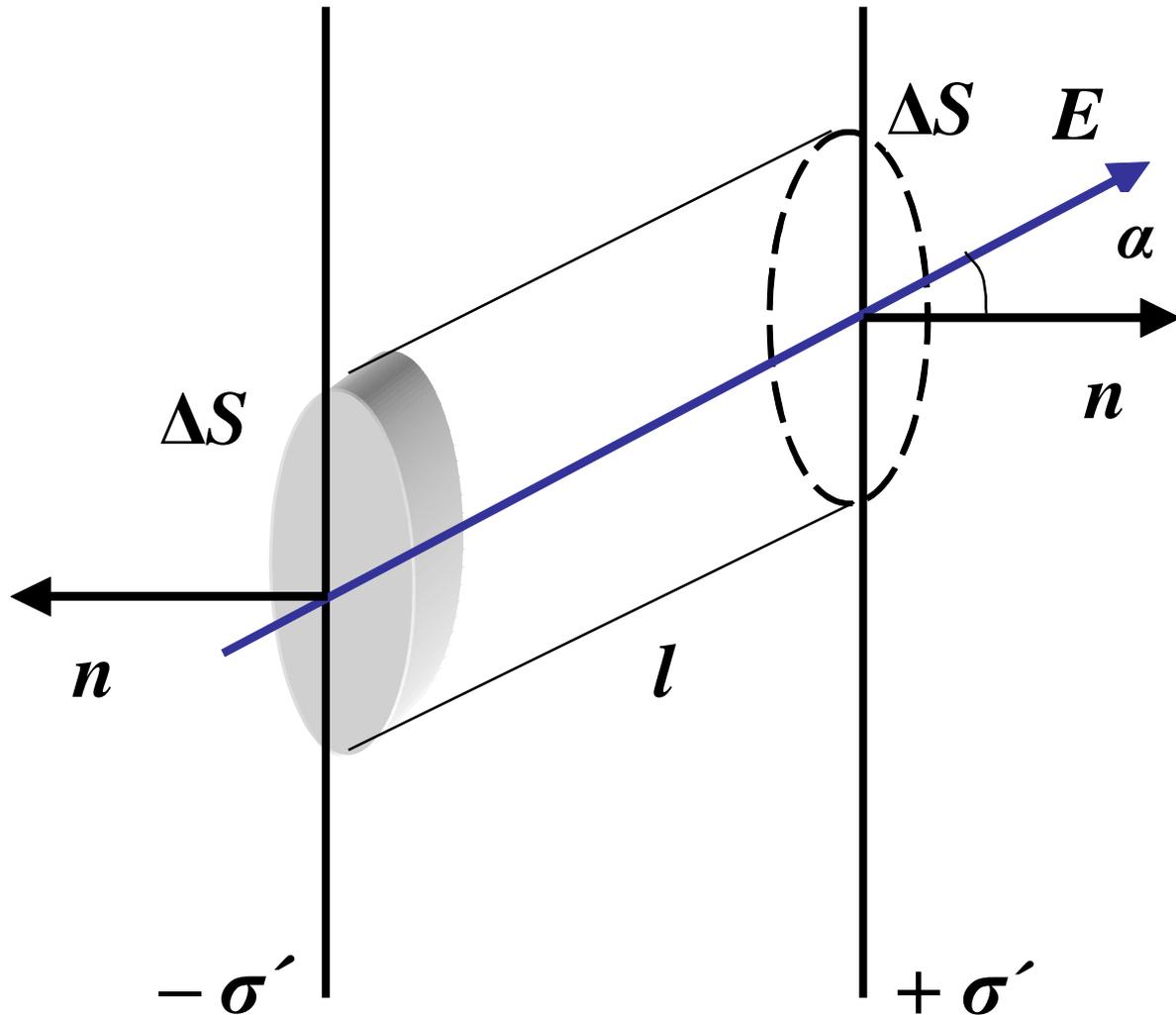


## Связь между вектором $P$ и $\sigma'$



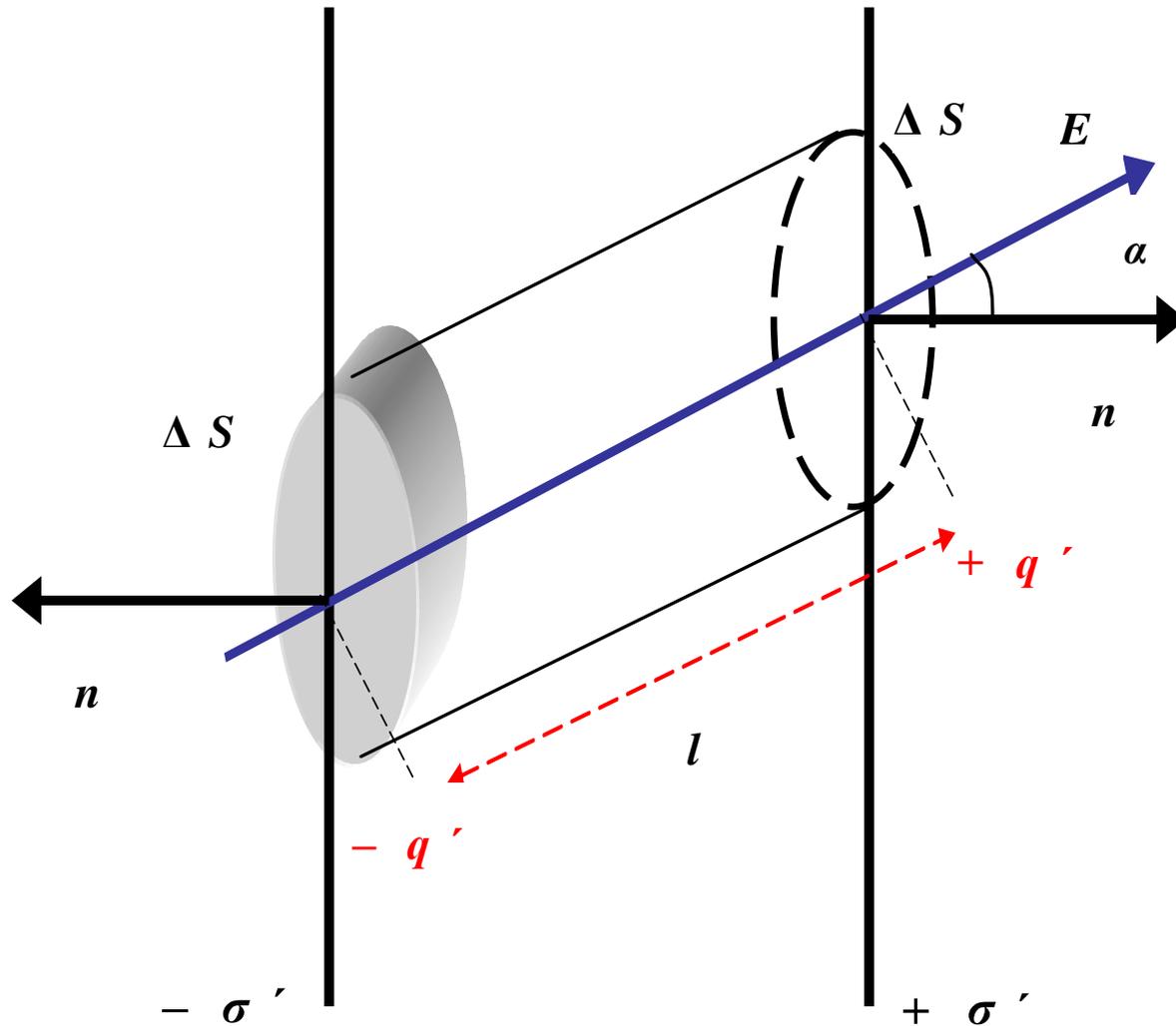
Однородная диэлектрическая пластинка

## Связь между вектором $P$ и $\sigma$



Однородная диэлектрическая пластинка

## Связь между вектором $P$ и $\sigma$



Однородная диэлектрическая пластинка

## Связь между вектором $P$ и $\sigma$

$$\Delta V = \Delta S_{\perp} \cdot l = \Delta S \cdot l \cos \alpha$$

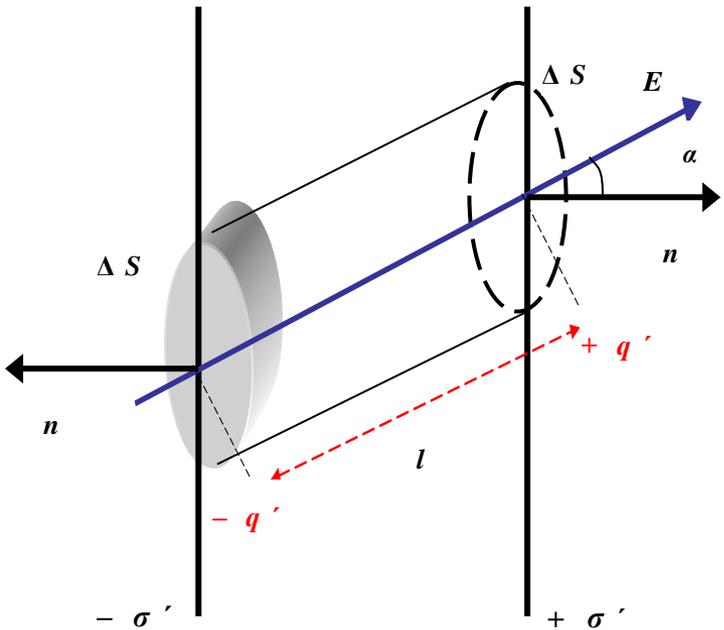
$$p_l = q \cdot l = \sigma' \cdot \Delta S \cdot l$$

$$P = \frac{p_l}{\Delta V}$$

$$p_l = P \cdot \Delta V = P \cdot \Delta S \cdot l \cos \alpha$$

$$P \cos \alpha = \sigma' \quad \Rightarrow \quad P_n = \sigma'$$

$$P_n = \sigma' = \chi \varepsilon_0 E$$



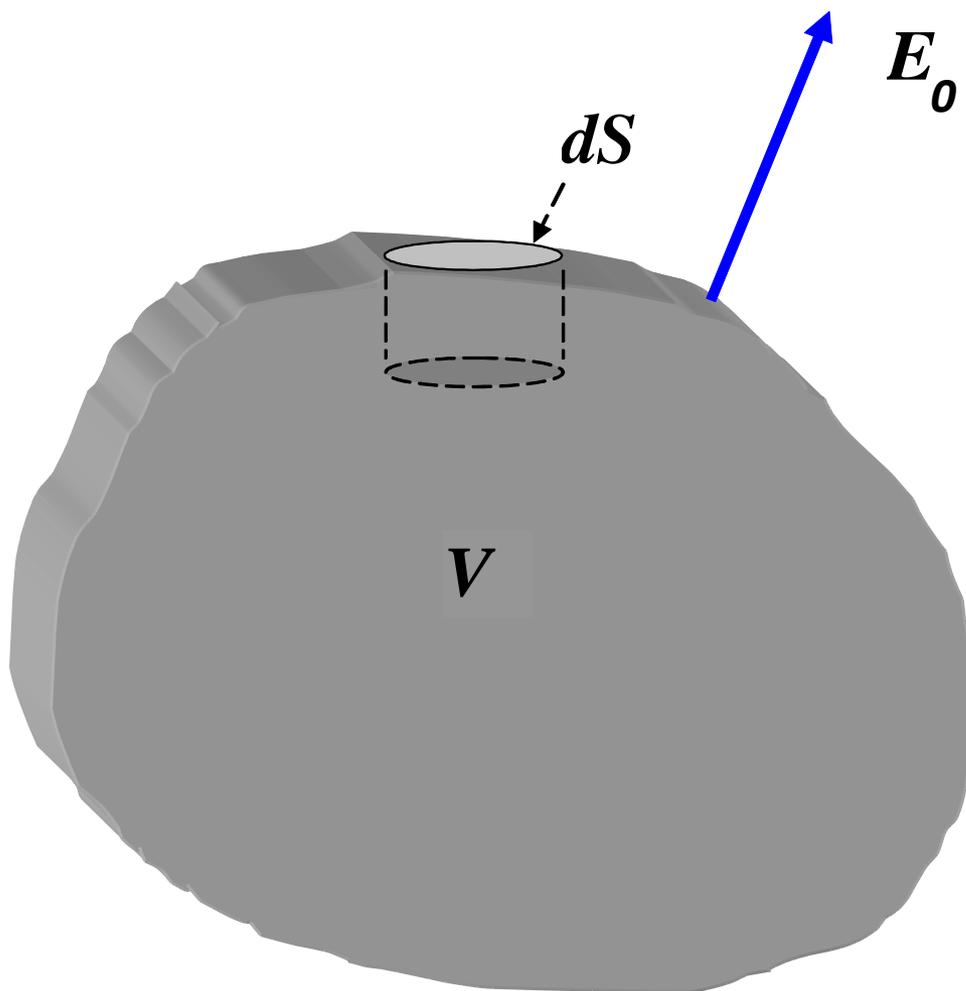
## Связь между вектором $P$ и $\sigma$

$$P_n = \sigma' = \chi \varepsilon_0 E$$

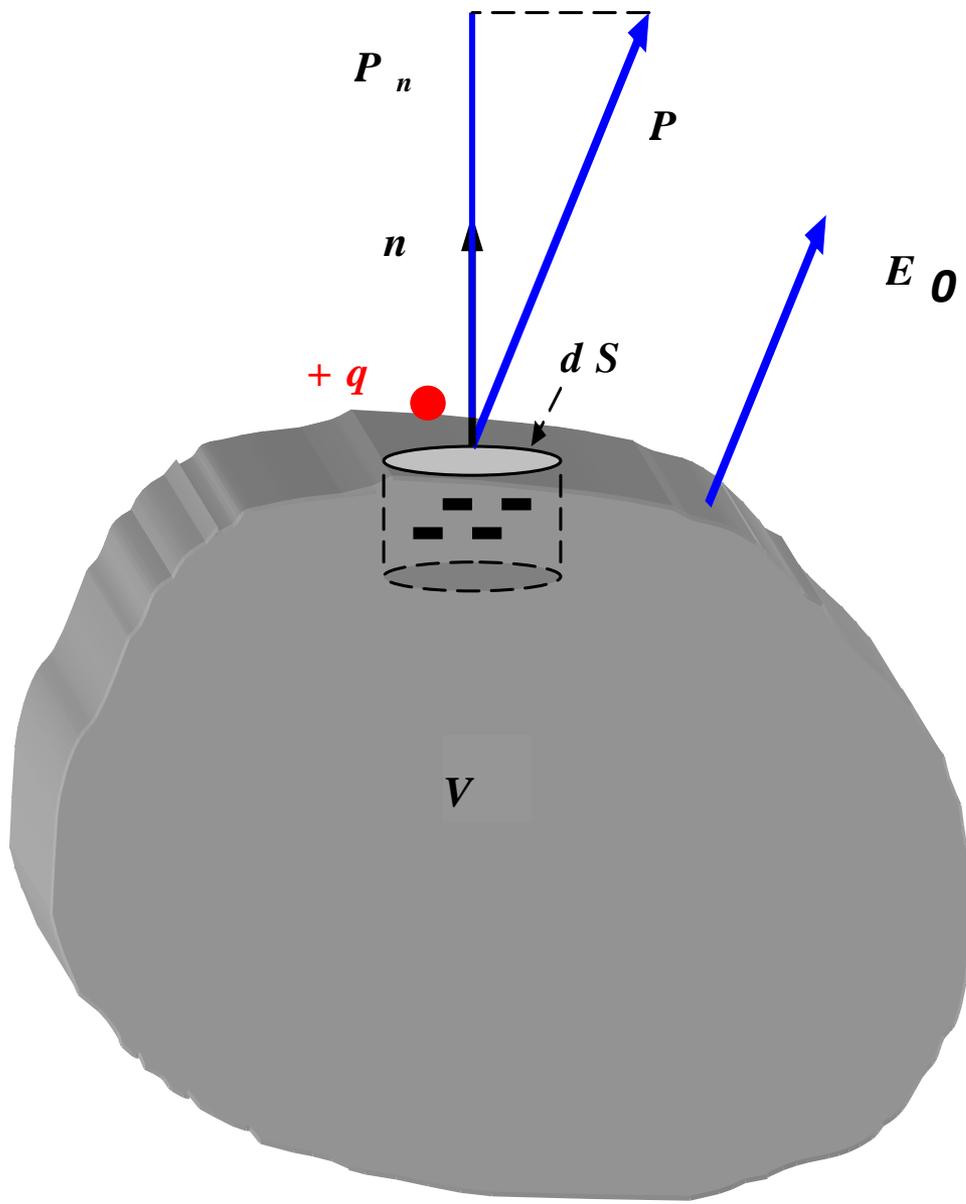
- $P_n$  – проекция вектора поляризованности на внешнюю нормаль к поверхности диэлектрика.
- $P_n$  численно равна электрическому заряду, смещаемому через единичную площадку в направлении положительной нормали к ней.

**Закон Гаусса для вектора поляризации  $P$**

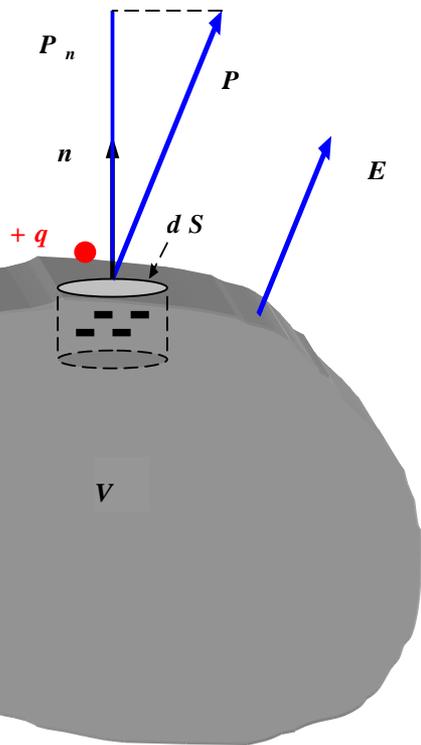
## Закон Гаусса для вектора поляризации $P$



# Закон Гаусса для вектора поляризации $P$



## Закон Гаусса для вектора поляризации $P$

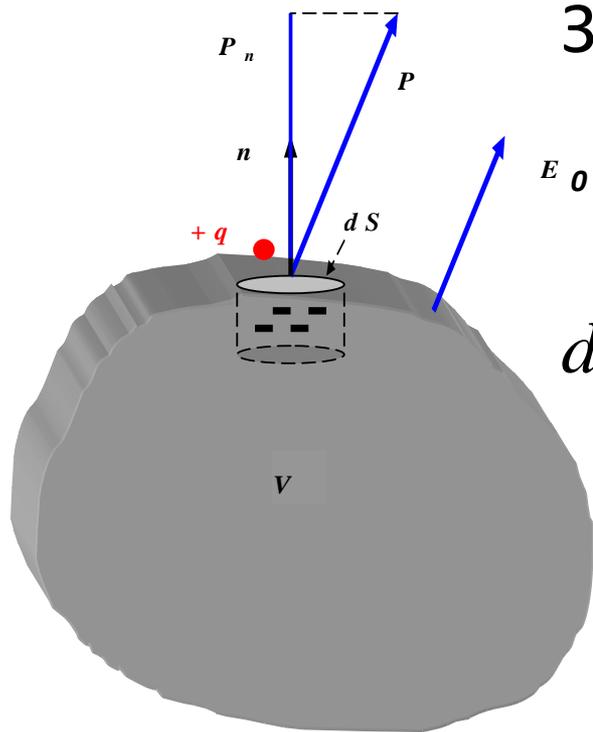


При включении поля через площадку  $dS$  в направлении вектора  $E_0$  сместятся положительные заряды, в объеме останутся отрицательные заряды.

Поверхностная плотность поляризационных зарядов

$$\sigma' = P_n$$

## Закон Гаусса для вектора поляризации $P$



Заряд, прошедший через площадку  $dS$ :

$$dq = \sigma' \cdot dS = P_n \cdot dS = \vec{P} \cdot d\vec{S}$$

$dS \rightarrow 0$ , в окрестностях площадки:

$$E_0 = \text{const}, P = \text{const}.$$

Заряд, оставшийся в объеме под площадкой  $dS$ :

$$dq = -\vec{P} \cdot d\vec{S}$$

## Закон Гаусса для вектора поляризации $\vec{P}$

$$Q_{\text{выш}} = \sum q_{\text{выш}} = \oint_S dq = \oint_S \vec{P} d\vec{S}$$

$$Q_{\text{связ}} = \sum q_{\text{связ}} = - \sum q_{\text{выш}} = - \oint_S \vec{P} d\vec{S} = - \oint_S P_n dS$$

$$-Q_{\text{поляриз}} = \oint_S \vec{P} d\vec{S}$$

## Закон Гаусса для вектора поляризации $\mathbf{P}$

$$-Q_{\text{поляриз}} = \oint_S \vec{P} d\vec{S}$$

- Поток вектора поляризации  $\mathbf{P}$  через произвольную замкнутую поверхность  $S$  равен взятому с обратным знаком поляризационному заряду диэлектрика в объеме, охватываемом этой поверхностью.