

# *Лекция 14. Элементы теории электромагнетизма Максвелла*

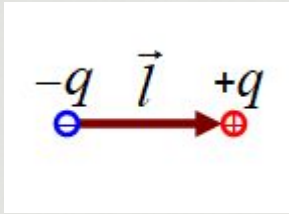


# \*\* ) § 11. Электрическое поле в веществе

Уже было:

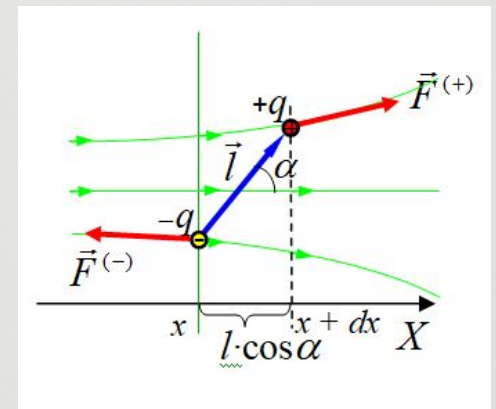
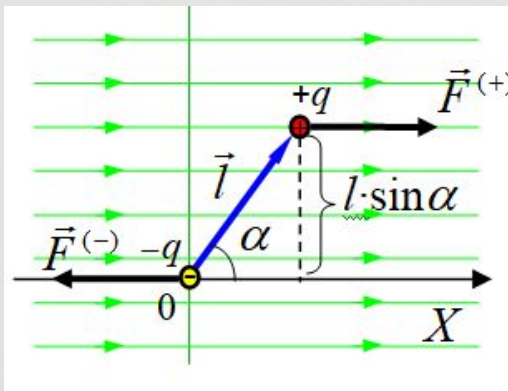
## 11.1. Электрический диполь

- (Опр.) Электрическим диполем называется система, состоящая из двух одинаковых по модулю и противоположных по знаку точечных зарядов  $q$ , находящихся на расстоянии  $l$  друг от друга



$$\vec{N} = [\vec{p}, \vec{E}]$$

Ориентируется  
по полю и  
втягивается  
в него



## 11.2. Понятие о механизмах поляризации диэлектриков

Без поля:  $\sum_i \overline{p}_i^M = 0$

В поле  $\vec{E}$ :  $\sum_i \overline{p}_i^M \neq 0$  ← “Поляризация среды”

⇒ Собственное поле диполей:  $\vec{E}'$  !

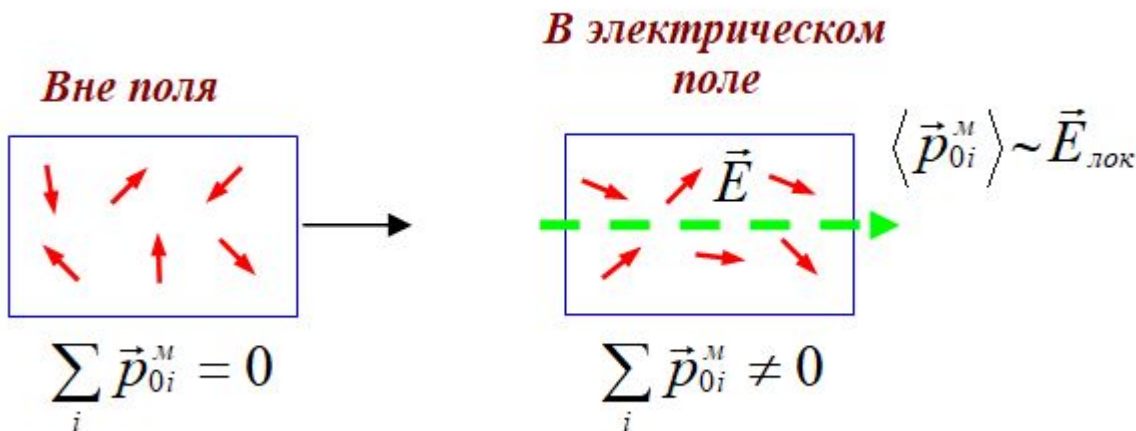
### 11.2.1. Полярные – ориентационный (дипольный) механизм ( $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{HCl}$ , $\text{NH}_3$ , ...)

Таблица

Дипольные моменты молекул в Дебаях, (Д)

Молекула	$p$ , Д	Молекула	$p$ , Д
CO	0,11	NH <sub>3</sub>	1,46
NO <sub>2</sub>	0,32	H <sub>2</sub> O	1,86
O <sub>3</sub>	0,53	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2,26

1 Дебай  $\approx 3,3 \cdot 10^{-30}$  Кл·м



$$\langle \overline{p} \rangle = \frac{p_0^2}{3kT} \cdot E_{лок}$$

“Аналог” закона Кюри для парамагнетиков

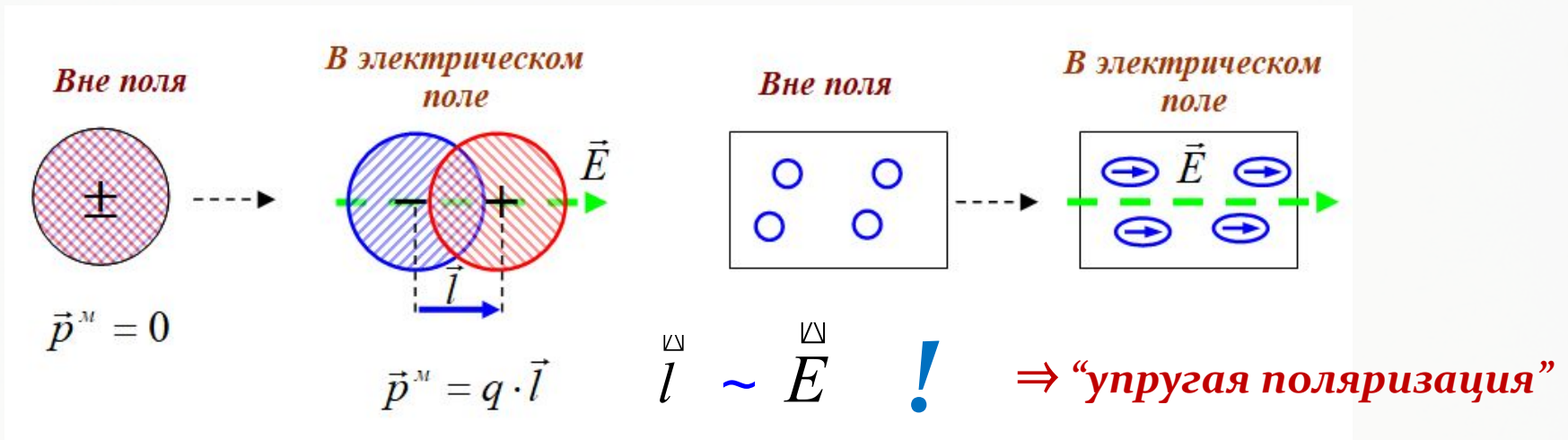
## 11.2.2. неполярные – электронная поляризация (поляризация смещения) (Ar, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CCl<sub>4</sub>, ...)

Без поля:  $\vec{p}_i^M = 0$

В поле  $\vec{E}$ :  $\vec{p}_i^M = q\vec{l}$

$$\vec{p}_i^M = \alpha \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$$

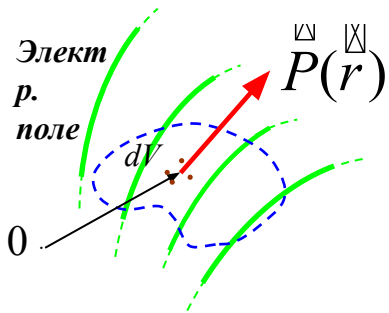
$\alpha$  – “поляризуемость молекул”



Собственное поле диполей:  $\vec{E}'$  !

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

**(Опр.)** Состояние поляризации среды характеризует **вектор поляризации**



**Локальная характеристика !**

$$\vec{P}(\vec{r}) = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{\Delta V}$$

**именно  $\vec{P}$  определяет  $\vec{E}'$  :**  $\vec{E}' = \frac{1}{\epsilon_0} \vec{P}$

**Эксперимент:**  $\vec{P} = \kappa \cdot \epsilon_0 \vec{E}$   $\vec{E}' = \kappa \cdot \vec{E}$   
 *$\kappa$  — диэлектрическая восприимчивость среды*

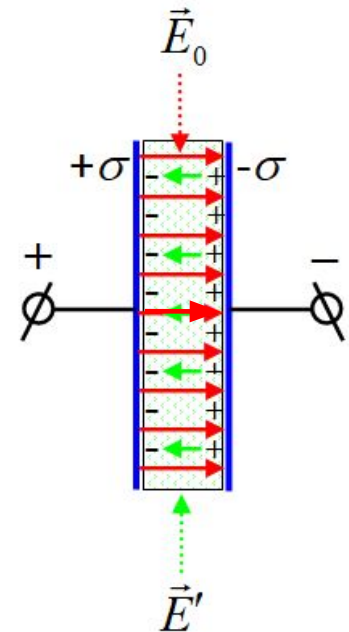
**\*\*)** *Совсем необязательная "формула":*  $\kappa = \frac{1}{\epsilon_0} \left( \frac{p_0^2}{3kT} \cdot n_{пол} + \alpha \epsilon_0 \cdot n_{н.п.} \right)$

$$\epsilon = \epsilon(T)$$

**В веществе:**  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$   
**и при этом:**  $\vec{E}' \downarrow \uparrow \vec{E}_0$  !

**Поэтому:**  $E = E_0 - E'$

↓



$$E = E_0 - \kappa \cdot E \Rightarrow E + \kappa \cdot E = E_0 \Rightarrow E = \frac{E_0}{1 + \kappa} = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

**... и окончательно:**

- **(Опр.)** диэлектрическая проницаемость среды:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

**\*) ОБЩИЙ ВЫВОД:**

В тех случаях, когда однородный изотропный диэлектрик занимает всю область пространства, где есть электрическое поле, присутствие диэлектрика сводится к уменьшению поля (т.е.  $\vec{E}$  и  $\phi$ ) в  $\varepsilon$  раз. Соответственно уменьшаются и силы взаимодействия заряженных тел

**\*) Таблица.** Диэлектрическая проницаемость веществ

<i>Твёрдые тела</i>	$\epsilon$	<i>Жидкости / Газы (атм. давл.)</i>	$\epsilon$
Бумага сухая / Каучук	2–2,5	Бензин / Масло	2–4,8
Эбонит / Янтарь	2,5–3	Вода дист.	81
Кварц	3,5–4,5	Спирт этил.	27
Плексиглас (оргстекло)	3,5	Азот	1,00054
Полистирол/Полиэтилен	2,3–2,6	Кислород	1,00055
Слюда	5,7–7	Углекислый газ	1,0009
Фарфор / Стекло	4–16	Воздух сухой	1,00025

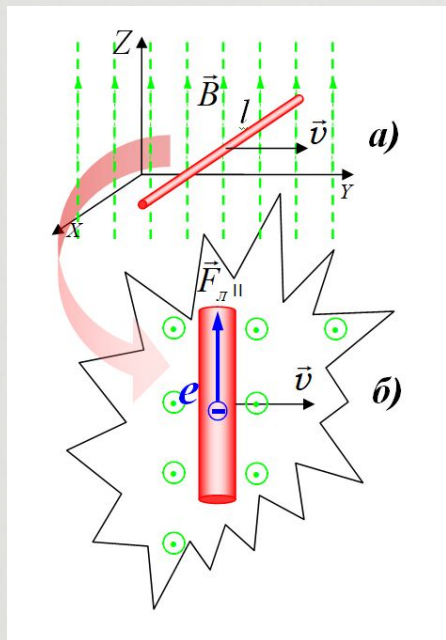
# § 18. Элементы теории электромагнетизма Максвелла

“В науке необходимо воображение. Она не исчерпывается целиком ни математикой, ни логикой, в ней есть что-то от красоты и поэзии”

М. Митчелл (американский астроном)

## 19.1. Трактовка Максвелла явления электромагнитной индукции

Недавно обсуждали:

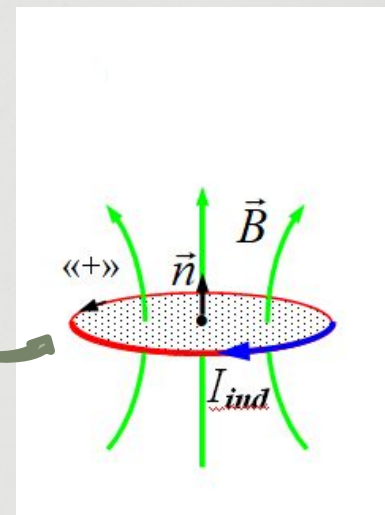


Что «толкает электроны»? ?

А вот в этом случае ?

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{A^{cm}}{q} = \mathcal{E}_i$$



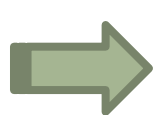
Но какие «сторонние силы» совершают работу ??

Максвелл: “Вихревое электрическое поле”

!!



Работа электростатического поля по замкнутому контуру равна нулю:  $\oint A_{\circ}$ , а ВИХРЕВОГО нет !



$$\oint_C (\vec{E}^*, d\vec{l}) \equiv \mathcal{E}_i$$

Если вспомним определение потока:  $\Phi = \int_{\Sigma} (\vec{B}, d\vec{S})$

И подставим в закон ЭМИ:  $\mathcal{E}_{si} = -\frac{d\Phi_s}{dt}$

Получим:

$$\oint_C E_t dl = -\frac{d}{dt} \int_{\Sigma} B_n dS \quad (\text{вслед за Максвеллом 😊})$$

А можно и вот так:

Уравнение Максвелла:



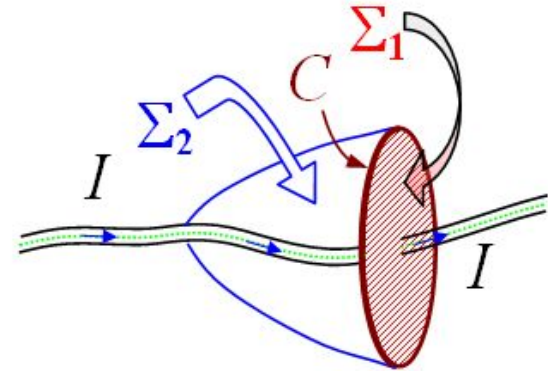
$$\oint_C E_t dl = -\int_{\Sigma} \frac{\partial B_n}{\partial t} dS$$

# 19.2. “Ток смещения”

“Магнитостатика” – ток постоянный:

И поле тоже!

Один контур, две поверхности:



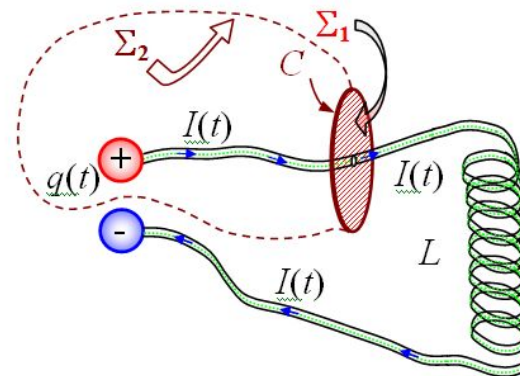
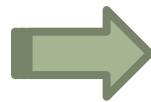
$$\oint_C B_l dl = \mu_0 \cdot \int_{\Sigma} j_n dS \quad \text{или} \quad \oint_C B_l dl = \mu_0 \cdot \sum_i I_i$$

С теоремой о циркуляции всё в порядке – результат один !

А если “Магнетодинамика” – ток переменный:

?

Например, “колебательный контур”



... две поверхности, и результат  
**РАЗНЫЙ:**

Для  $\Sigma_1$  :  $\mu_0 \cdot \int_{\Sigma_1} j_n dS = \mu_0 \cdot I \neq 0$

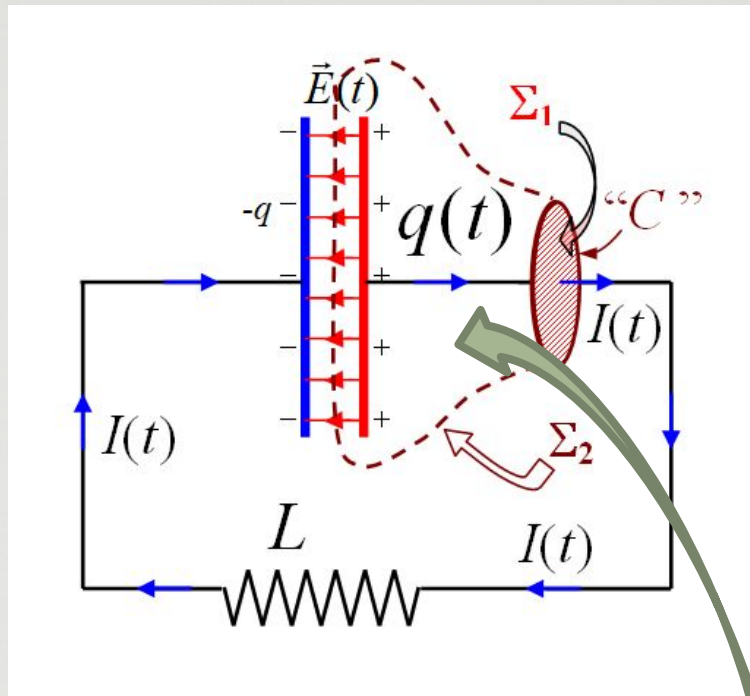
, а вот для  $\Sigma_2$  :  $\mu_0 \cdot \int_{\Sigma_2} j_n dS = 0$  !

⇒ **Надо подправлять теорему !**

Что-нибудь придумать для  $\Sigma_2$   
«вместо»  $\mu_0 \cdot I$

Что же ?? Мы знаем:  $I = \frac{dq}{dt}$

Это заряд обкладки, и он внутри " $\Sigma_1 + \Sigma_2$ "



$$\oint_{\Sigma} E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} q \Rightarrow q = \epsilon_0 \oint_{\Sigma} E_n dS \Rightarrow I = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \left( \oint_{\Sigma} E_n dS \right)$$

**И ещё раз:**  $I = \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \left( \oint_{\Sigma} E_n dS \right)$  или

**“Ток смещения”**

$$I^{см.} = \varepsilon \varepsilon_0 \left( \oint_{\Sigma} \frac{\partial E_n}{\partial t} dS \right)$$

Дж. К. Максвелл

“О физических силовых линиях”, «*Phylosophical Magazine*», 1862 г.

Замыкают токи проводимости в  
«разорванных» цепях переменного тока  
(там где нет переноса заряда)

!!

**“Симметрия” восстановлена:**

ЭМИ и “ток смещения”

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Rightarrow \vec{E} \quad \text{ЭМИ} \quad \text{и} \quad \text{“ток смещения”} \quad \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \Rightarrow \vec{B}$$

## 19.3. Уравнения Максвелла (в интегральной форме)

*“Самое главное в теории электромагнетизма Максвелла – это уравнения Максвелла”*

Генрих Герц

$$(I) \quad \oint_{\Sigma} E_n dS = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} q; \quad (\text{теорема Гаусса – закон Кулона + принцип суперпозиции});$$

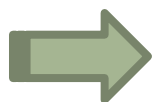
$$(II) \quad \oint_{\Sigma} B_n dS = 0; \quad (\text{теорема Гаусса для магнитного поля – магнитных зарядов в природе нет!});$$

$$(III) \quad \oint_C E_l dl = - \int_{\Sigma} \frac{\partial B_n}{\partial t} dS; \quad (\text{Закон электромагнитной индукции в трактовке Максвелла});$$

$$(IV) \quad \oint_C B_l dl = \mu\mu_0 \cdot \left( \int_{\Sigma} j_n dS + \epsilon\epsilon_0 \int_{\Sigma} \frac{\partial E_n}{\partial t} dS \right). \quad (\text{Теорема о циркуляции «подправленная» Максвеллом})$$

Что ещё

?



$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$$

*Вот и вся “классическая электродинамика” ☺ ...*

*Конец XIX века – “Природа познана. Ура !!” ☺ ...*

*“... кажется вероятным, что большинство основных принципов уже твёрдо установлено и что будущее продвижение вперёд следует искать в основном в строгом применении этих принципов ко всем явлениям, которые обращают на себя наше внимание. ...*

*... Будущие истины физики видны в шестом знаке после запятой”*

Альберт Майкельсон (Нобелевская премия 1907 г.)

*Новые открытия, сделанные в физике за последние несколько лет, ..., оказали на учёных влияние, подобное воздействию Ренессанса на литературу ...*

*На пути вздымаются ещё более высокие вершины, и они покорятся каждому, кто поднимается на них пока ещё широкими дорогами ...*

Дж.Дж. Томсон  
лауреат Нобелевской премии, открывший электрон