

Лекция 14. Элементы теории электромагнетизма Максвелла

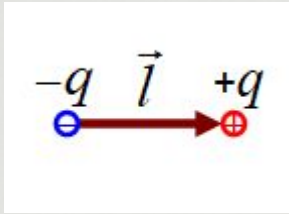


**) § 11. Электрическое поле в веществе

Уже было:

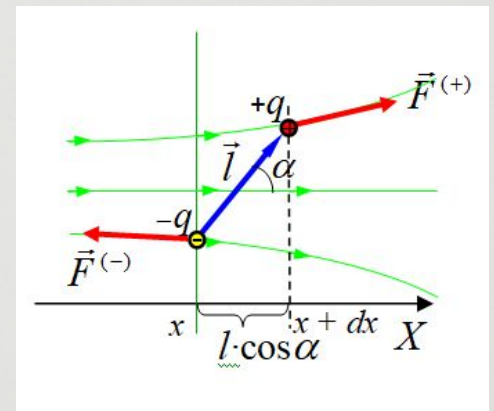
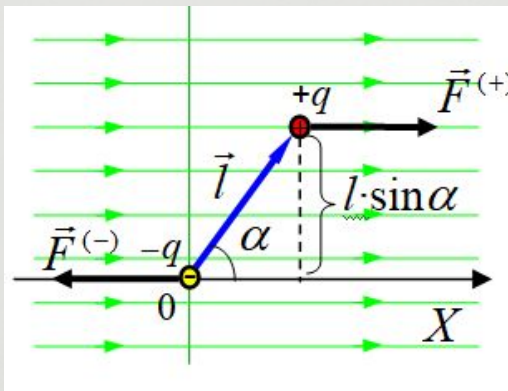
11.1. Электрический диполь

- (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}' !

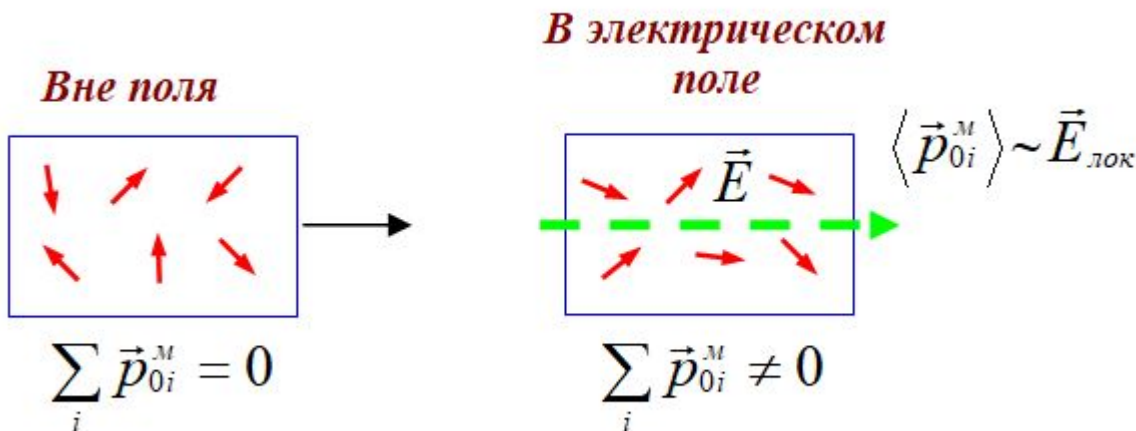
11.2.1. Полярные – ориентационный (дипольный) механизм (H_2O , HCl , NH_3 , ...)

Таблица

Дипольные моменты молекул в Дебаях, (Д)

| Молекула | p , Д | Молекула | p , Д |
|-----------------|---------|-------------------------------|---------|
| CO | 0,11 | NH ₃ | 1,46 |
| NO ₂ | 0,32 | H ₂ O | 1,86 |
| O ₃ | 0,53 | H ₂ O ₂ | 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

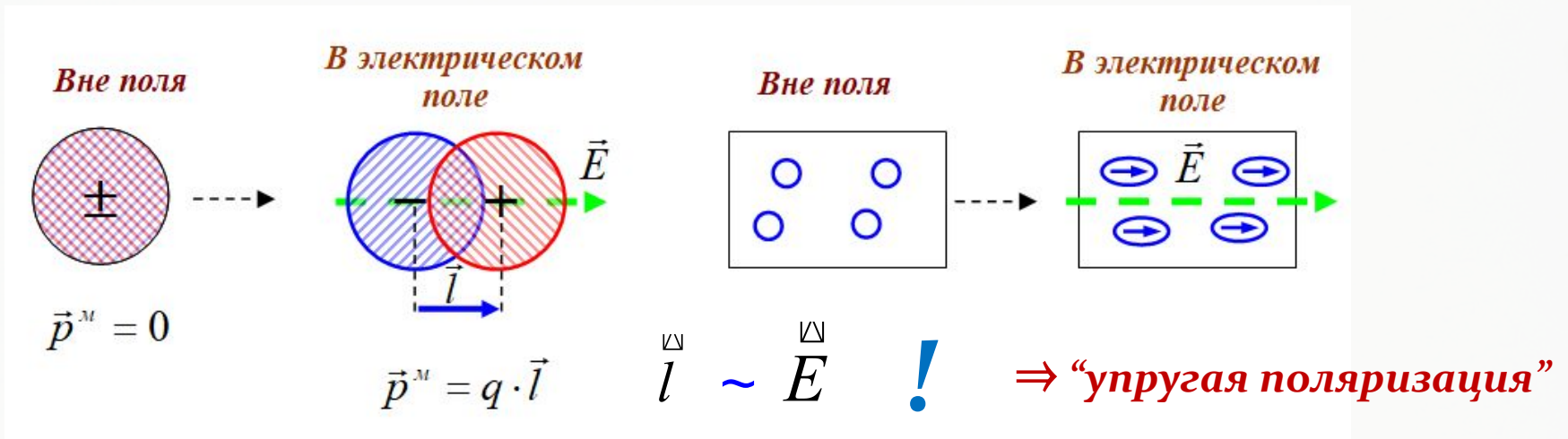
11.2.2. неполярные – электронная поляризация (поляризация смещения) (Ar, H₂, N₂, O₂, CO₂, CCl₄, ...)

Без поля: $\vec{p}_i^M = 0$

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

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

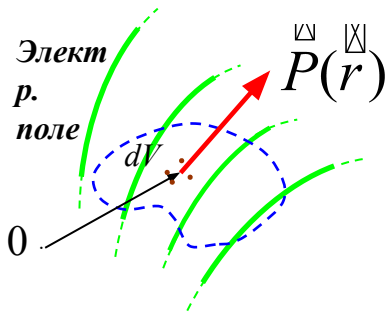
α – “поляризуемость молекул”



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

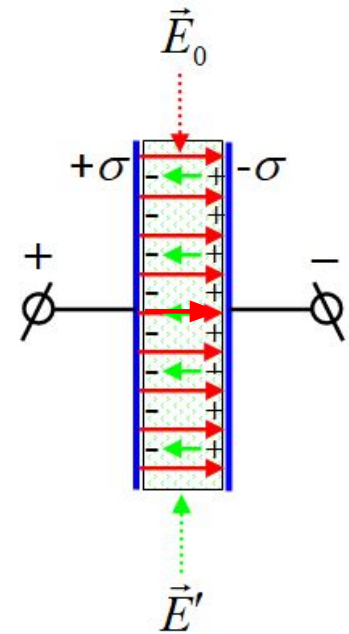
Эксперимент: $\vec{P} = \kappa \cdot \epsilon_0 \vec{E}$ $\vec{E}' = \kappa \cdot \vec{E}$
 κ — диэлектрическая восприимчивость среды

****)** *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: $\vec{E}' \uparrow \downarrow \vec{E}_0$!

Поэтому: $E = E_0 - E'$

↓



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

... 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 ϕ) в ε раз. Соответственно уменьшаются и силы взаимодействия заряженных тел

***) Таблица.** Диэлектрическая проницаемость веществ

| <i>Твёрдые тела</i> | ϵ | <i>Жидкости / Газы (атм. давл.)</i> | ϵ |
|------------------------|------------|---|------------|
| 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 |

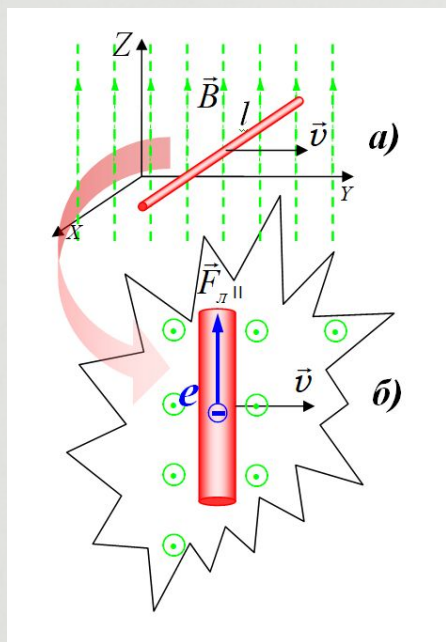
§ 18. Элементы теории электромагнетизма Максвелла

“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:

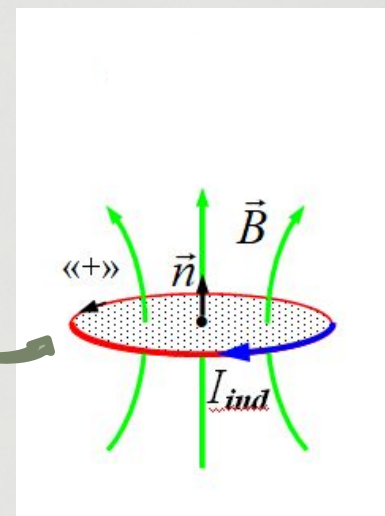


Что «толкает электроны»? ?

А вот в этом случае ?

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

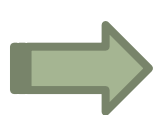
$$\frac{A^{cm}}{q} = \mathcal{E}_i$$



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:



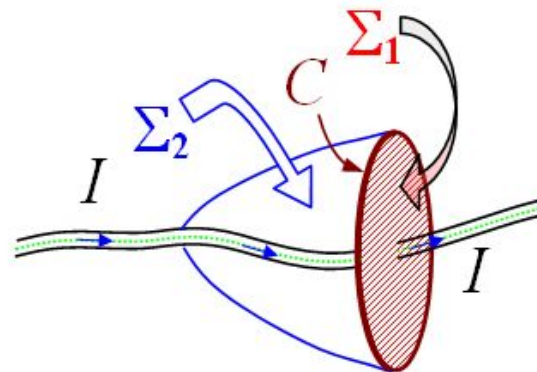
$$\oint_C E_t dl = -\int_{\Sigma} \frac{\partial B_n}{\partial t} dS$$

19.2. “Ток смещения”

“Магнитостатика” – ток постоянный:

И поле тоже!

Один контур, две поверхности:



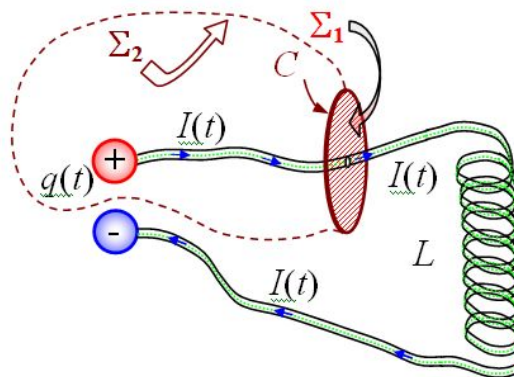
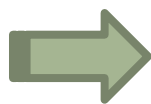
$$\oint_C B_l dl = \mu_0 \cdot \int_{\Sigma} j_n dS \quad \text{или} \quad \oint_C B_l dl = \mu_0 \cdot \sum_i I_i$$

С теоремой о циркуляции всё в порядке – результат один !

А если “Магнетодинамика” – ток переменный:



Например, “колебательный контур”



... две поверхности, и результат
РАЗНЫЙ:

Для Σ_1 : $\mu_0 \cdot \int_{\Sigma_1} j_n dS = \mu_0 \cdot I \neq 0$

, а вот для Σ_2 : $\mu_0 \cdot \int_{\Sigma_2} j_n dS = 0$!

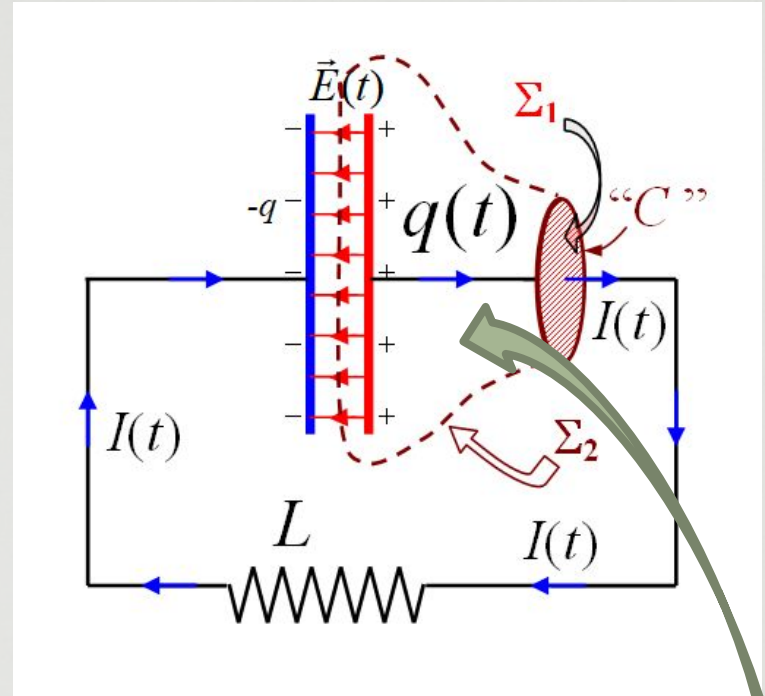
⇒ **Надо подправлять теорему !**

Что-нибудь придумать для Σ_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**

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

“Ток смещения”

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

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

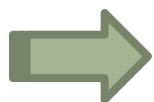
$$(II) \quad \oint_{\Sigma} B_n dS = 0; \quad (\text{теорема Гаусса для магнитного поля – магнитных зарядов в природе нет!});$$

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

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

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