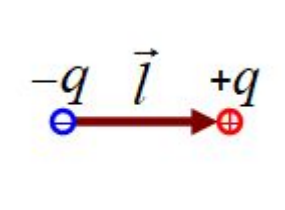
Лекция 14. ***Элементы теории электромагнетизма Максвелла***

**) § 11. Электрическое поле в веществе

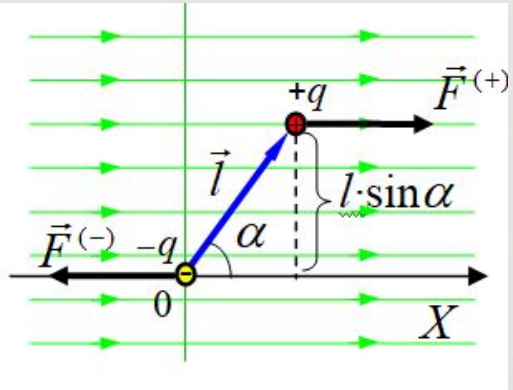
Уже было:

11.1. Электрический диполь

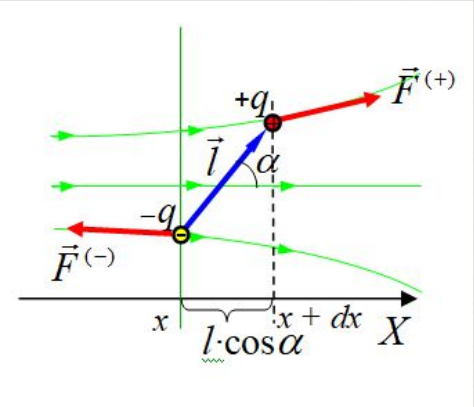
- (Опр.) ***Электрическим диполем называется система, состоящая из двух одинаковых по модулю и противоположных по знаку точечных зарядов q, находящихся на расстоянии l друг от друга***



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



Ориентируется по полю и втягивается в него



11.2. Понятие о механизмах поляризации диэлектриков

Без поля: $\sum_i \vec{p}_i^{\,м} = 0$

В поле $\vec{E}$: $\sum_i \vec{p}_i^{\,м} \neq 0$ ⇦ "Поляризация среды"

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

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

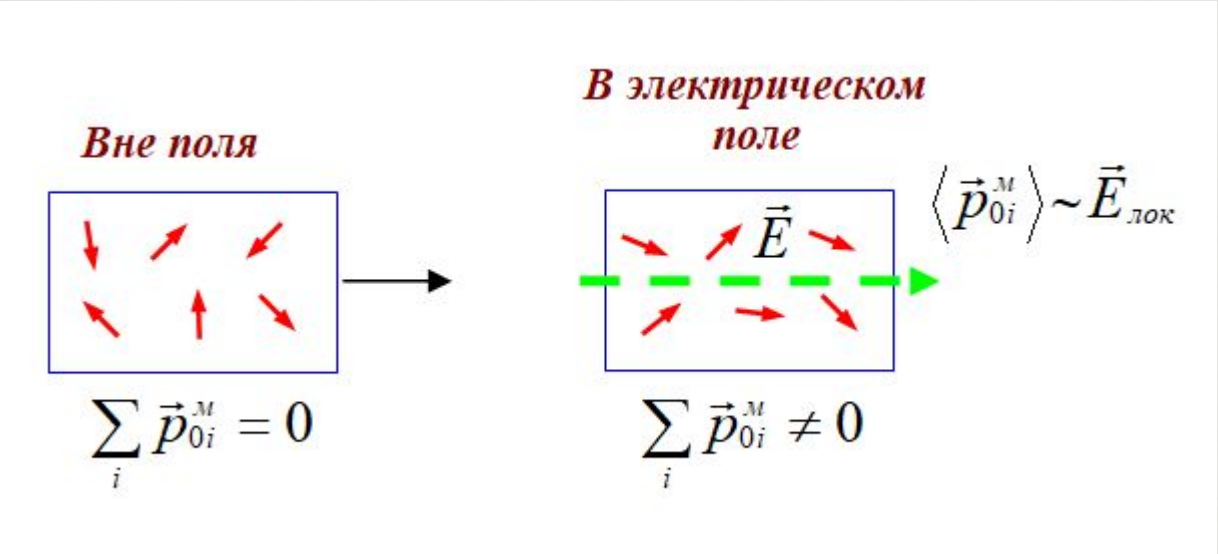


Таблица
Дипольные моменты молекул в Дебаях, (*Д*)

Молекула	*p*, Д	Молекула	*p*, Д
CO	0,11	NH_3	1,46
NO_2	0,32	H_2O	1,86
O_3	0,53	H_2O_2	2,26

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

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

"Аналог" закона Кюри для парамагнетиков

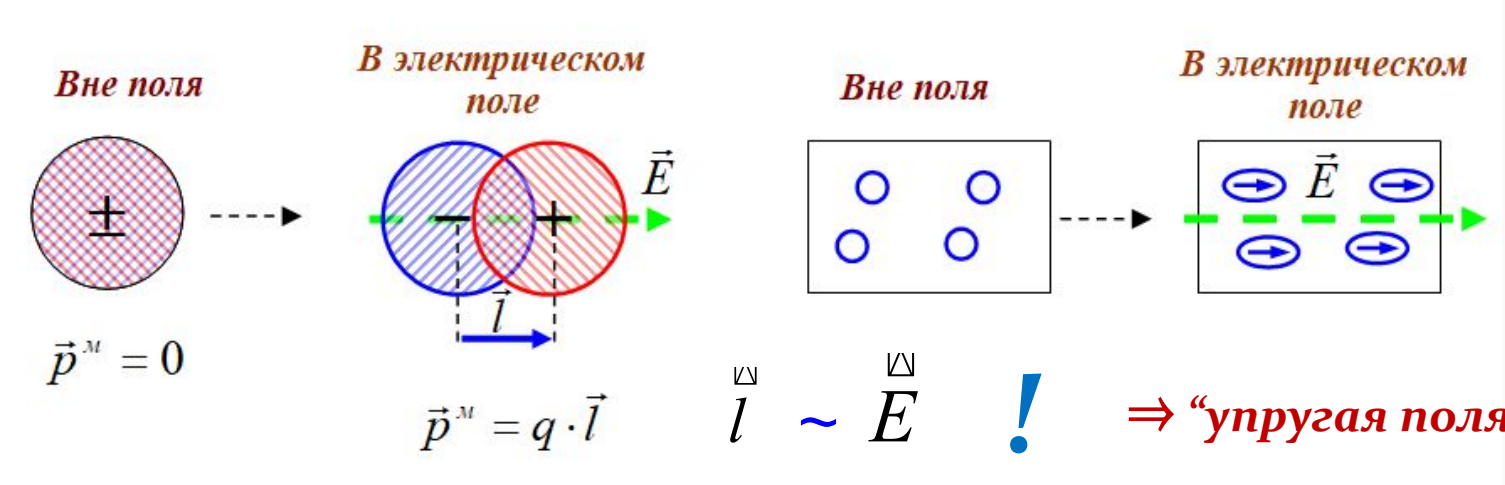
11.2.2. Неполярные – электронная поляризация (поляризация смещения) $(Ar, H_2, N_2, O_2, CO_2, CCl_4, \ldots)$

Без поля: $\vec{p}_i^{\,м} = 0$

В поле $\vec{E}$ **:** $\vec{p}_i^{\,м} = q\vec{l}$

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

α – “поляризуемость молекул”

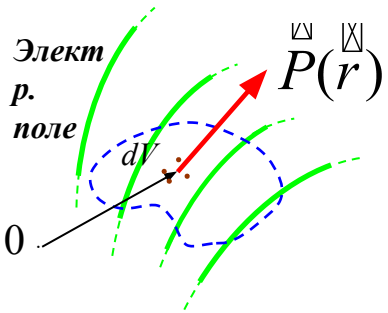


$\vec{l} \sim \vec{E}$ **!** ⇒ **“упругая поляризация”**

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

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

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



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

Локальная характеристика **!**

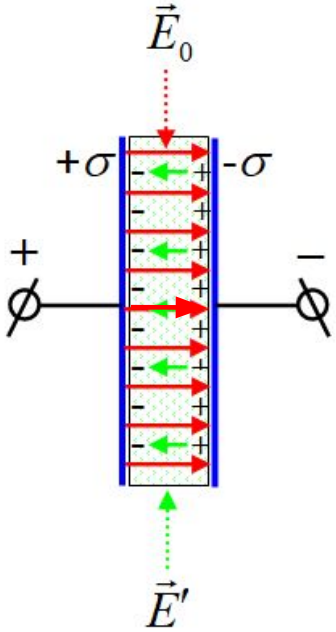
именно $\vec{P}$ **определяет** $\vec{E}'$**:** $\vec{E}' = \frac{1}{\varepsilon_0}\vec{P}$

Эксперимент: $\vec{P} = \varkappa \cdot \varepsilon_0 \vec{E}$ $\qquad \vec{E}' = \varkappa \cdot \vec{E}$

$\varkappa$ – диэлектрическая восприимчивость среды

*****) Совсем необязательная "формула":*** $\varkappa = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(\frac{p_0^2}{3kT} \cdot n_{пол} + \alpha\varepsilon_0 \cdot n_{н.п.}\right)$

$$\varepsilon = \varepsilon(T)$$



В веществе: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

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

Поэтому: $E = E_0 - E'$

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

***… и окончательно*:**

- (***Опр.***) диэлектрическая проницаемость среды: $\varepsilon = \dfrac{E_0}{E}$

***) 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

Твёрдые тела	*ε*	*Жидкости / Газы (атм. давл.)*	*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

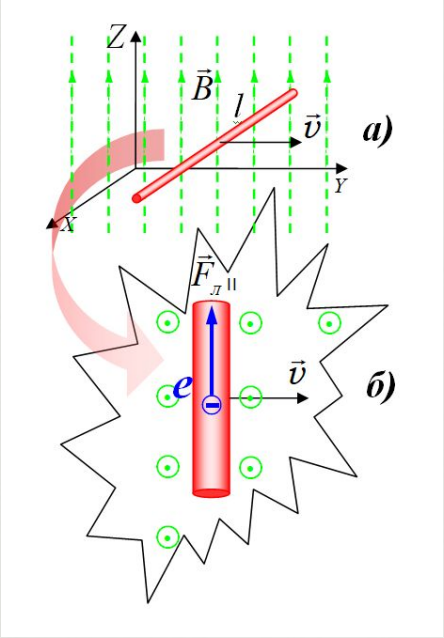
§ 18. Элементы теории электромагнетизма Максвелла

“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:

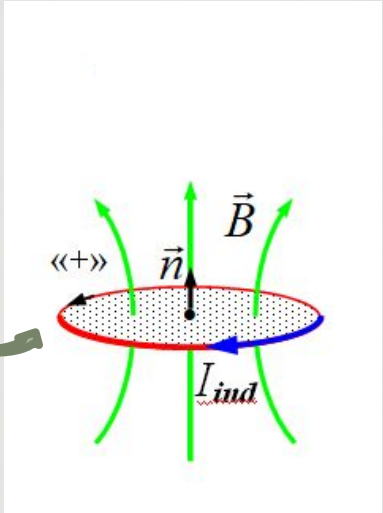


Что «толкает электроны» ?

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: $A_{\circlearrowleft}$, 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: $\mathcal{E}_{si} = -\dfrac{d\Phi_s}{dt}$

Получим:

$$\oint_C E_l dl = -\frac{d}{dt}\int_\Sigma B_n dS$$

(вслед за Максвеллом ☺)

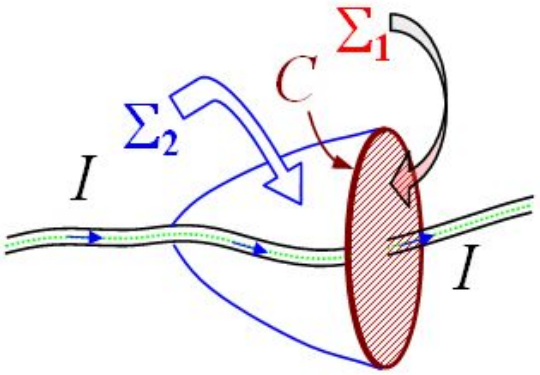
А можно и вот так:

Уравнение Максвелла: !!

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

19.2. “Ток смещения”

“Магнитостатика” – ток постоянный:



И поле тоже!

Один контур, две поверхности:

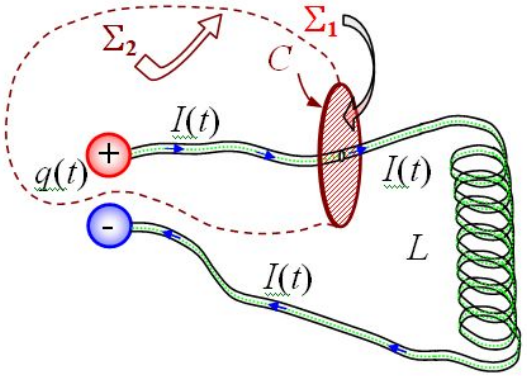
$$\oint_C B_l dl = \mu_0 \cdot \int_\Sigma j_n dS \qquad \textbf{или} \qquad \oint_C B_l dl = \mu_0 \cdot \sum_i I_i$$

С теоремой о циркуляции всё в порядке – результат один !

А если “Магнитодинамика” – ток переменный:

?

Например, “колебательный контур”

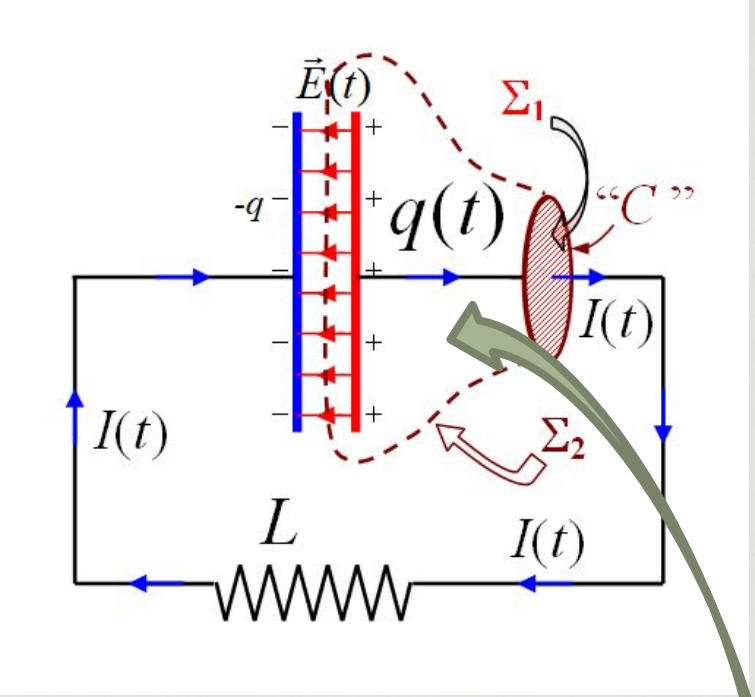


… две поверхности, и результат РАЗНЫЙ:

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

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

⇒ *Надо подправлять теорему !*



Что-нибудь придумать для Σ_2 «вместо» $\mu_0 \cdot I$

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

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

$$\oint\limits_{\Sigma} E_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0} q \quad \Rightarrow \quad q = \varepsilon_0 \oint\limits_{\Sigma} E_n dS \quad \Rightarrow \quad I = \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left(\oint\limits_{\Sigma} E_n dS\right)$$

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”

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Rightarrow \vec{E}$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \Rightarrow \vec{B}$$

19.3. Уравнения Максвелла (в интегральной форме)

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

Генрих Герц

(I) $\oint\limits_{\Sigma} E_n dS = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} q$; (теорема Гаусса – закон Кулона + принцип суперпозиции);

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

(III) $\oint\limits_{C} E_l dl = -\int\limits_{\Sigma} \frac{\partial B_n}{\partial t} dS$; (Закон электромагнитной индукции в трактовке Максвелла);

(IV) $\oint\limits_{C} B_l dl = \mu\mu_0 \cdot \left(\int\limits_{\Sigma} j_n dS + \varepsilon\varepsilon_0 \int\limits_{\Sigma} \frac{\partial E_n}{\partial t} dS \right)$. (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