Лекция 14.

Элементы теории электромагнетизма Максвелла.

Магнитное поле в веществе

(*Опр.*) *Плотность энергии магнитно поля* :

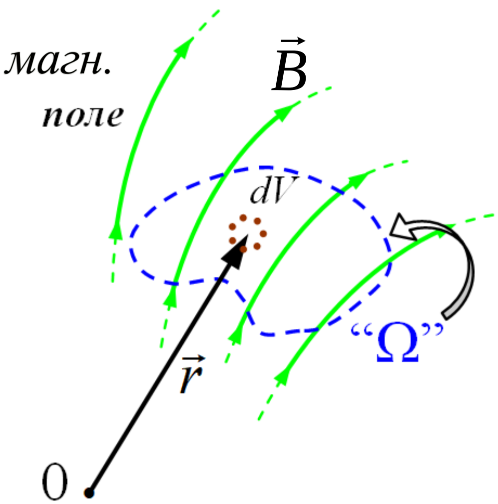
$$\boxed{w_м = \frac{\delta W_м}{dV}}$$

Внутри соленоида поле однородно $\Rightarrow$

$$w_м = \frac{W_м}{V}$$

(индуктивность соленоида: $L = \mu\mu_0 n^2 V$, магнитная индукция $B = \mu\mu_0 nI$)

$$W_м = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\mu\mu_0 n^2 V \cdot \left(\frac{B}{\mu\mu_0 n}\right)^2 = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}\cdot V$$



$$w_м = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

Rem:

$$\left(w_e = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} \right)$$

$$W_м = \frac{1}{2\mu\mu_0}\int_{"\Omega"} B^2(\vec{r})dV$$

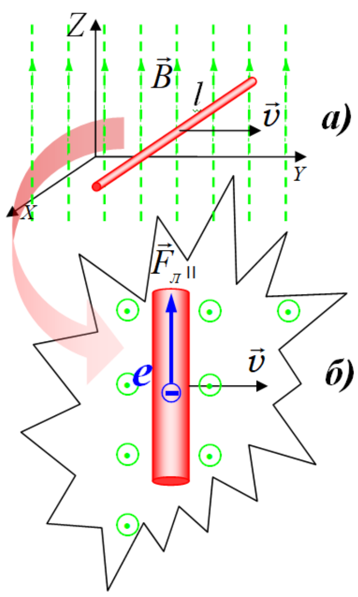
§ 19. Элементы теории электромагнетизма Максвелла

19.1. Трактовка Максвелла явления электромагнитной индукции

Фарадей для проводящих контуров: $\mathcal{E}_i = -\dfrac{d\Phi}{dt}$

НО

контура нет, ЭМИ есть:

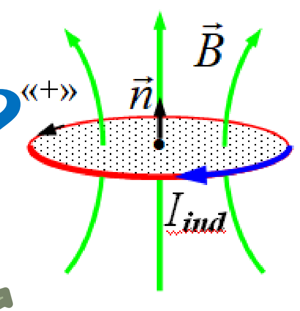


Недавно обсуждали:

Что «толкает электроны» ?

$$\mathcal{E}_i = \frac{A^{ст}}{q} = \frac{q\upsilon Bl}{q}$$

А вот в этом случае ?



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

$$\frac{d\vec{B}}{dt}$$

Но какие «сторонние силы» совершают работу ??

Максвелл: ***"Вихревое электрическое поле"*** !!

Работа электростатического поля по замкнутому контуру А равна нулю, а ВИХРЕВОГО - нет !

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

$\vec{E}^*$ – *напряжённость вихревого электрического поля*

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

И подставим в закон ЭМИ: $\mathcal{E}_i = -\dfrac{d\Phi}{dt}$

Получим:

$$\oint_C (\vec{E}, d\vec{l}\,) = -\frac{d}{dt}\int_\Sigma (\vec{B}, d\vec{S}\,)$$

(вслед за Максвеллом ☺)

А можно и вот так:

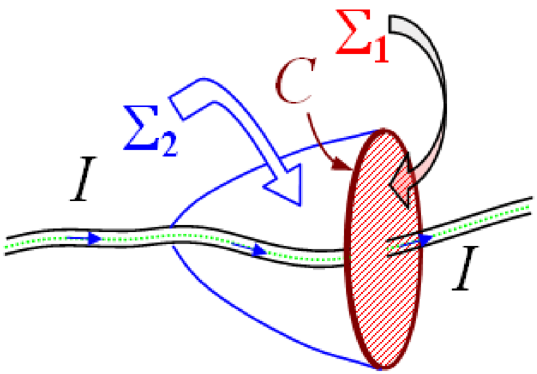
Уравнение Максвелла:

$$\oint_C (\vec{E}, d\vec{l}\,) = -\int_\Sigma \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, d\vec{S}\right)$$

Электрические поля порождают не только заряды!

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

19.2. “Ток смещения”



“Магнитостатика” – ток постоянный:

И поле тоже!

“Один контур, две поверхности”:

$$\oint\limits_C (\vec{B}, d\vec{l}\,) = \mu_0 \cdot I \qquad \left\{ \textbf{или} \quad \oint\limits_C (\vec{B}, d\vec{l}\,) = \mu_0 \cdot \int\limits_\Sigma (\vec{j}, d\vec{S}) \right\}$$

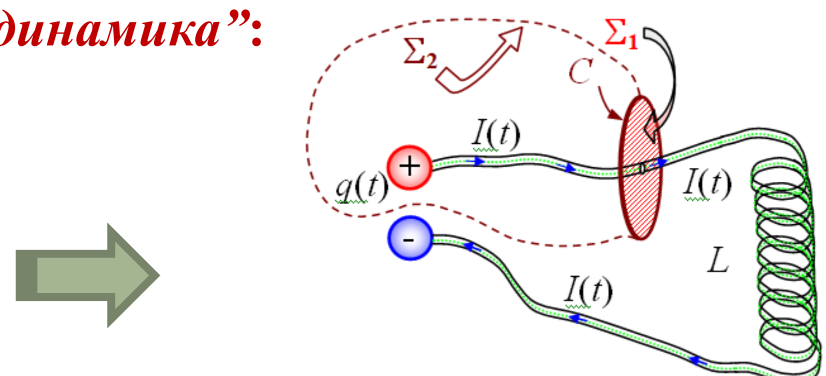
«левая часть» от выбора поверхности Σ_1 или Σ_2 не зависит !

В магнитостатике с теоремой о циркуляции всё в порядке – результат один: $\mu_0 I$

А если ток переменный – “Магнитодинамика”:

?

Например, “колебательный контур”

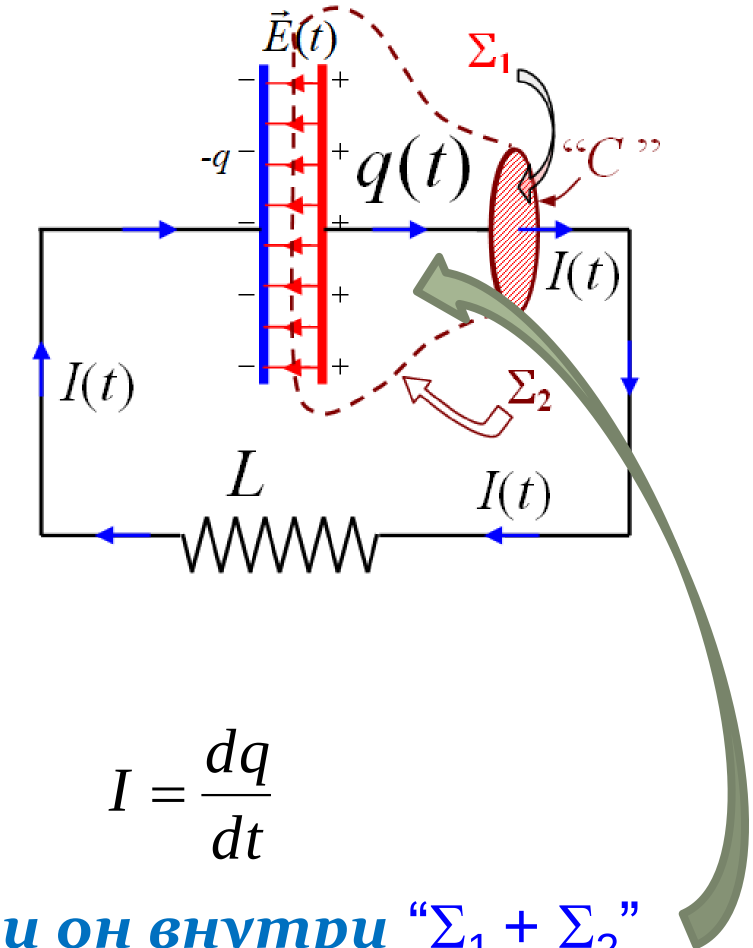


через поверхность “Σ_2” заряд не переносится !

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

Для Σ_1 : $\mu_0 \cdot \int_{\Sigma_1} (\vec{j}, d\vec{S}) = \mu_0 \cdot I \neq 0$

, а вот для Σ_2 : $\mu_0 \cdot \int_{\Sigma_2} (\vec{j}, d\vec{S}) = 0$ ***!***



⇒ Надо подправлять теорему !

***Что-нибудь придумать для** Σ_2*

***«вместо»** $\mu_0 \cdot I$*

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

***q – это заряд обкладки, и он внутри** "$\Sigma_1 + \Sigma_2$"*

$$\oint_{\Sigma_1+\Sigma_2} (\vec{E}, d\vec{S}) = \frac{1}{\varepsilon_0} q \quad \Rightarrow \quad q = \varepsilon_0 \oint_{\Sigma} (\vec{E}, d\vec{S}) \quad \Rightarrow \quad I = \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left(\oint_{\Sigma} (\vec{E}, d\vec{S}) \right)$$

И ещё раз: $$I = \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left[\oint_{\Sigma} (\vec{E}, d\vec{S})\right]$$ ***или***

$$I^{\,см.} = \varepsilon\varepsilon_0 \oint_{\Sigma} \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, d\vec{S} \right)$$

“Ток смещения”

Дж. К. Максвелл

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

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

!!

“Симметрия” восстановлена:

ЭМИ и “ток смещения”

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

19.3. Уравнения Максвелла (в интегральной форме)

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

Генрих Герц

(I) $\oint\limits_{\Sigma}(\vec{E},d\vec{S})=\dfrac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}q\,;$ (теорема Гаусса – закон Кулона + принцип суперпозиции);

(II) $\oint\limits_{\Sigma}(\vec{B},d\vec{S})=0;$ (теорема Гаусса для магнитного поля – магнитных зарядов в природе нет!);

(III) $\oint\limits_{C}(\vec{E},d\vec{l}\,)=-\int\limits_{\Sigma}\left(\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t},d\vec{S}\right);$ (Закон электромагнитной индукции в трактовке Максвелла);

(IV) $\oint\limits_{C}(\vec{B},d\vec{l}\,)=\mu\mu_0\cdot\left\{\int\limits_{\Sigma}(\vec{j},d\vec{S})+\varepsilon\varepsilon_0\int\limits_{\Sigma}\left(\dfrac{\partial\vec{E}}{\partial t},d\vec{S}\right)\right\}.$ (Теорема о циркуляции «подправленная» Максвеллом)

А что знаем в ЭМ 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 …

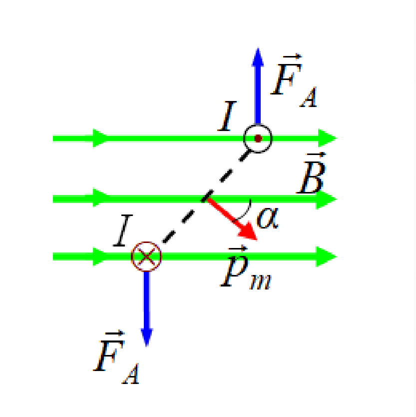
На пути вздымаются ещё более высокие вершины, и они покорятся каждому, кто поднимается на них пока ещё широкими дорогами …

Дж.Дж. Томсон
лауреат Нобелевской премии, открывший электрон

*) § 17. Магнитное поле в веществе

17.1. Магнитный диполь

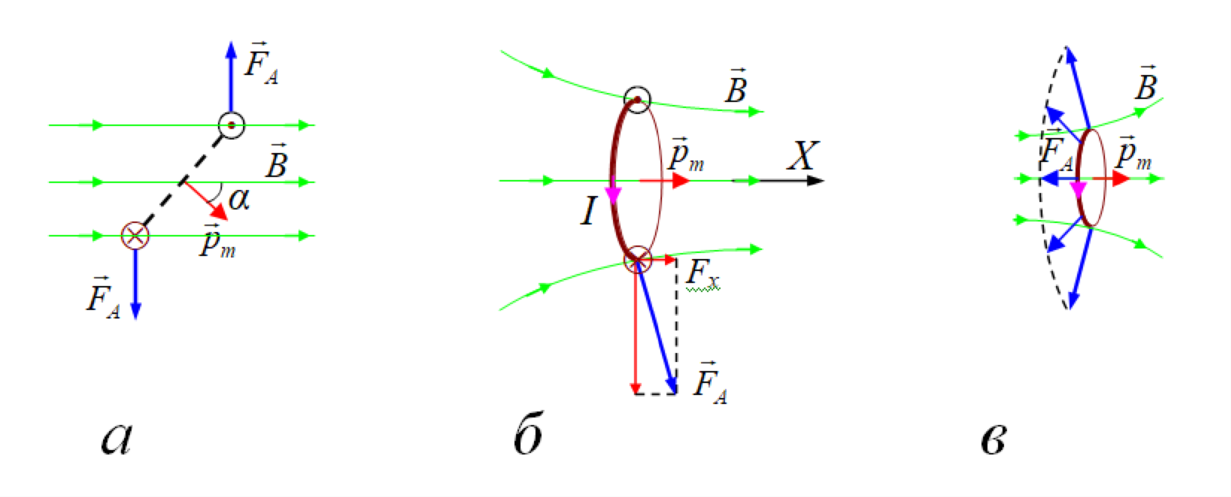
Rem: $\vec{p}_m = IS\vec{n}$



$$\vec{N} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$

"пробный виток" ориентируется $\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{B}$

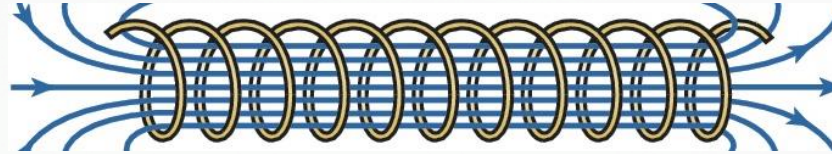
- (Опр.) ***Элементарным магнитным диполем называется виток с током малых размеров (аналог электрического диполя)***



Ориентируется по полю и втягивается в него

17.2. Намагничивание вещества

Среды нет: $\vec{B} = \vec{B}_0$



($\mu_0 nI$) – определяется “сторонними токами”

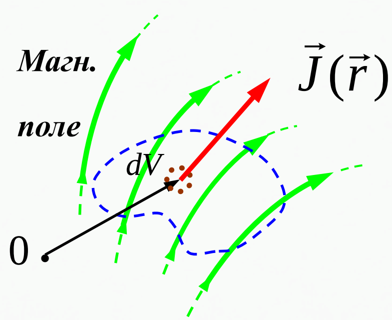
В веществе: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

$\vec{B}'$ – ***результирующее поле молекулярных токов вещества***

(элементарных магнитных диполей p_m)

- (Опр.) Состояние намагниченности среды характеризует ***вектор намагничивания среды*** $\vec{J}$

$$\vec{J} = \frac{\sum\limits_i \vec{p}_{mi}}{\Delta V}$$



Локальная характеристика !

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}$$

Эксперимент: $\vec{J} = \chi \dfrac{\vec{B}_0}{\mu_0}$

χ – магнитная восприимчивость среды

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

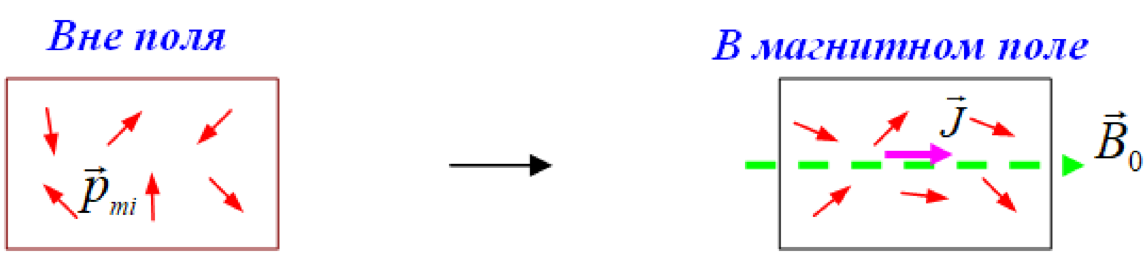
$$\Rightarrow \qquad \vec{B} = \vec{B}_0 + \chi\vec{B}_0 = (1+\chi)\vec{B}_0 = \mu\vec{B}_0$$

- (<u>Опр</u>.) магнитная проницаемость среды: $\boxed{\mu = \dfrac{\vec{B}}{\vec{B}_0}}$

17.3. Виды магнетиков

Закон Кюри

17.3.1. *Парамагнетики* (*Al*, *Pt*, *FeCl*$_3$, …) $\vec{p}_{mi} \neq 0$ $\quad J \sim \dfrac{p_m^2}{T}$



$\sum_i \vec{p}_{mi} = 0 \qquad \sum_i \vec{p}_{mi} \neq 0$

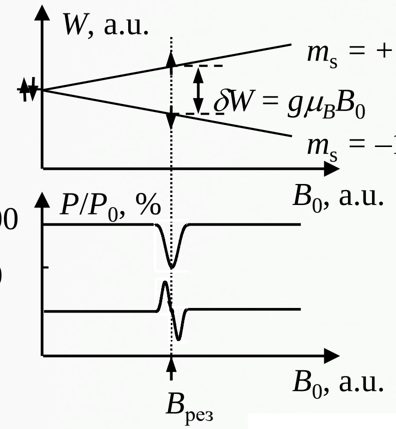
$$\vec{J} \uparrow\uparrow \vec{B}_0$$

$$\vec{B}' \uparrow\uparrow \vec{B}_0$$

$$\chi > 0, \quad \mu > 1$$

**) ЭПР – “Электронный парамагнитный резонанс”

В основе “эффект Зеемана” – расщепление энергетических уровней атомов во внешнем магнитном поле: $\delta W = g \cdot \mu_B \cdot B_0$



$+1/2 g\mu_B B_0$

$-1/2 g\mu_B B_0$

Завойский , 1944 г.

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

“Магнетон Бора”

Условие резонанса:

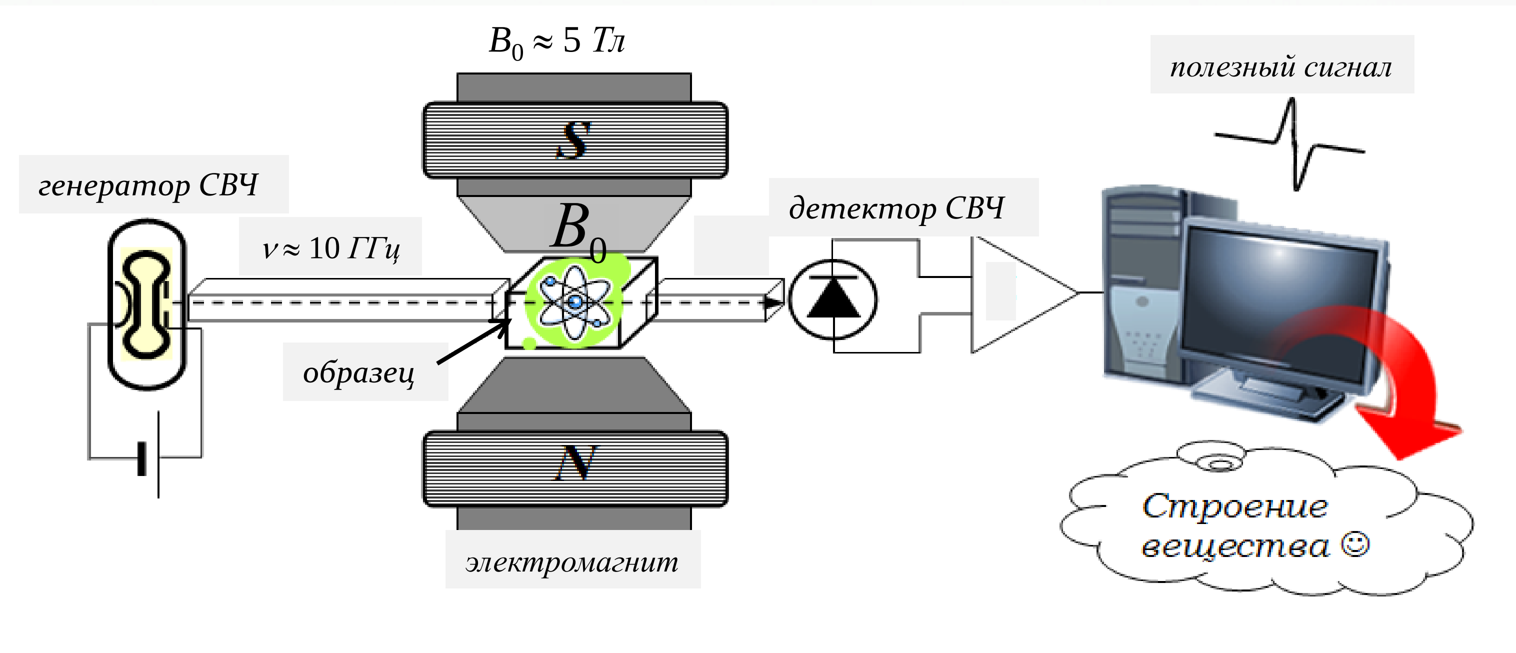
$$\hbar\omega = g\mu_B B_0^{рез}$$

положение и форма линий; тонкое и сверхтонкое расщепление

$\Rightarrow$

g-фактор, ...

$$\Gamma = -g\left(\frac{e}{2m_e}\right)$$

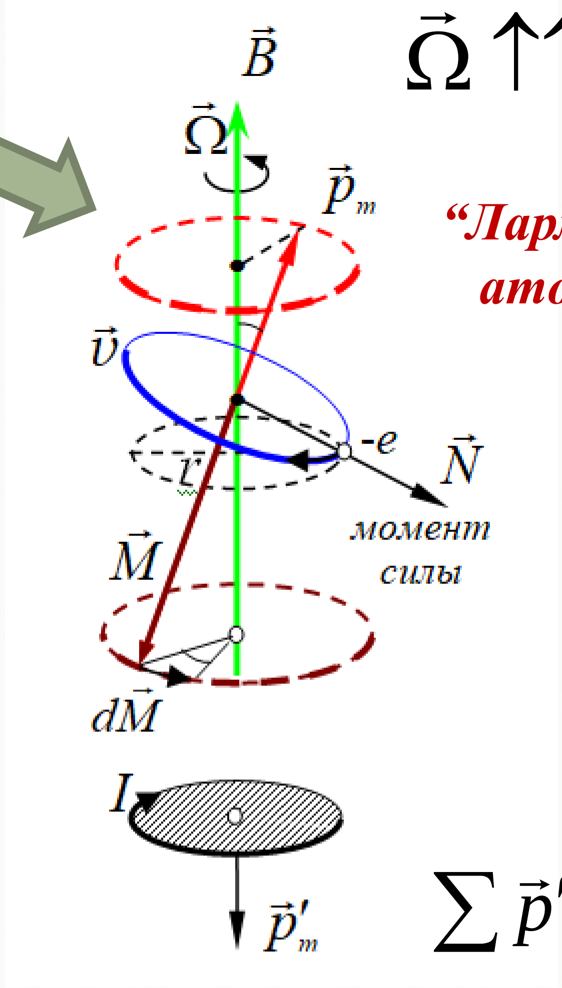


“Гиромагнитное отношение”

17.3.1. Диамагнетики (Au, Cu, Pb, …) ⇐ $\vec{p}_{mi} = 0$

"Наведённый" магнетизм:

$\vec{\Omega} \uparrow\uparrow \vec{B}$



"Ларморова прецессия" атомных орбиталей

$\vec{J} \downarrow\uparrow \vec{B}_0$

$\vec{B}' \downarrow\uparrow \vec{B}_0$

$\chi < 0, \quad \mu < 1$

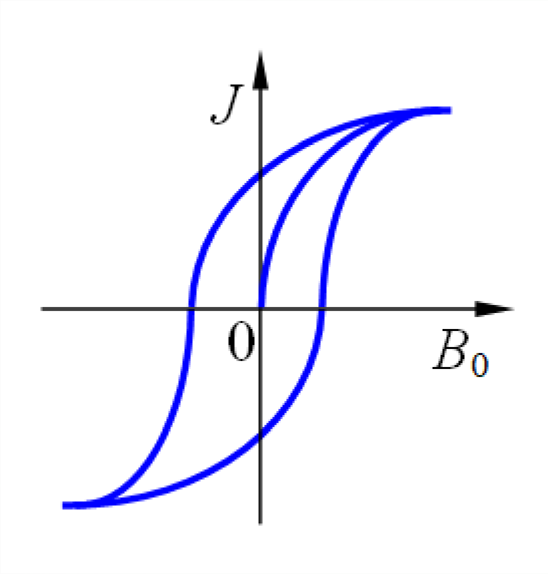
$\sum \vec{p}'_m \downarrow\uparrow \vec{B}_0$

Индуцированный (наведённый) магнитный момент

$$\vec{p}_m^{\,ind} = \vec{p}'_m$$

17.3.3. Ферромагнетики (*Fe, Ni, Co, …*)

$\mu >> 1$



"Домены" ~ $10^{-6} - 10^{-5}$ *м*

Объясняет только квантовая механика

!

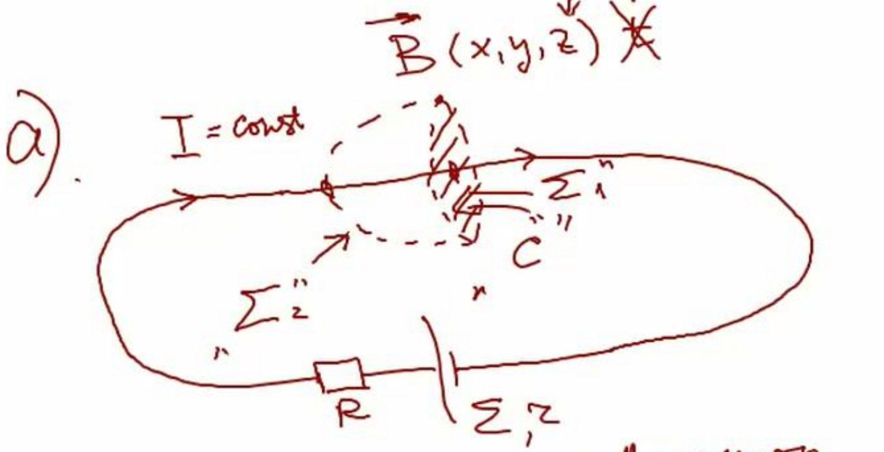
Магнитный "гистерезис"

("шумы Баркгаузена")

доска

“Ток смещения”

а).



$$\oint_{„C"} (\vec B, d\vec l) = \mu_0 I$$

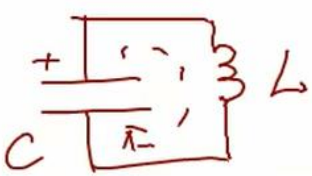
$$= \mu_0 \int_{„\Sigma"} (\vec j, d\vec s)$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

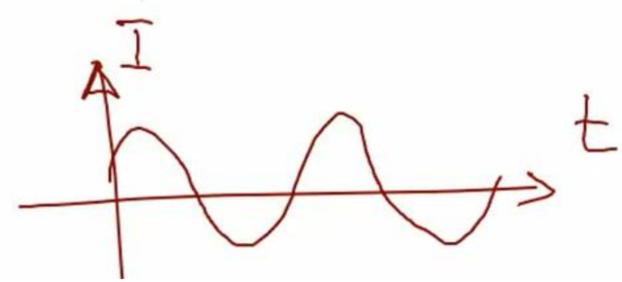
„Магнито
статика"

$B(t)$

б).

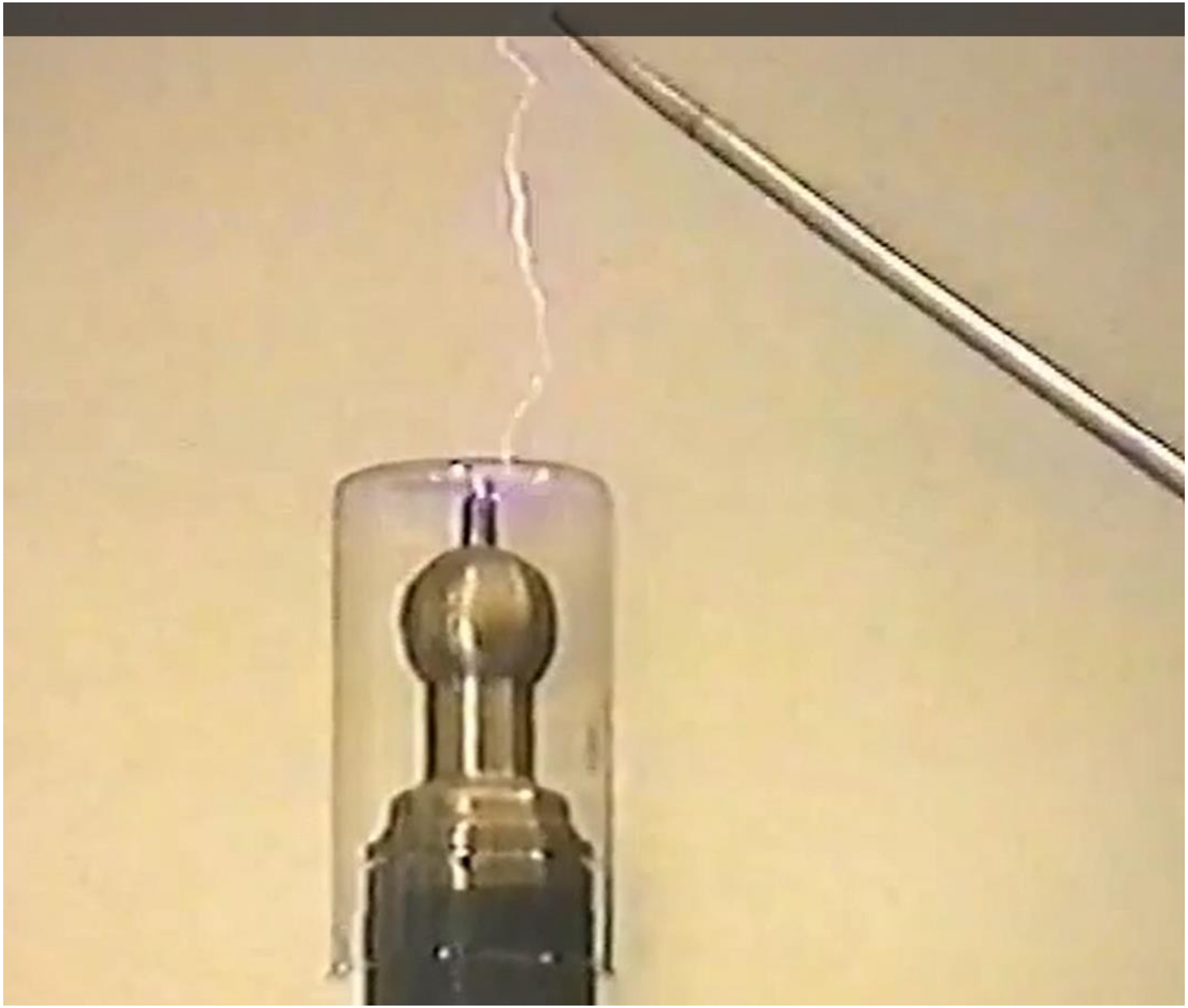


„Колеб. контур"



$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Токи смещения "замыкают" переменные токи проводимости



Резонансный трансформатор Тесла