

Лекция 15.

- Классификация магнетиков: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.
Классическое описание диамагнетизма.
Ларморова прецессия. Парамагнетизм.
Теория Ланжевена.
- Микроскопические носители магнетизма.
Магнитомеханический опыт Эйнштейна – де-Гааза. Механомагнитный опыт Барнетта.
Гиромагнитное отношение.

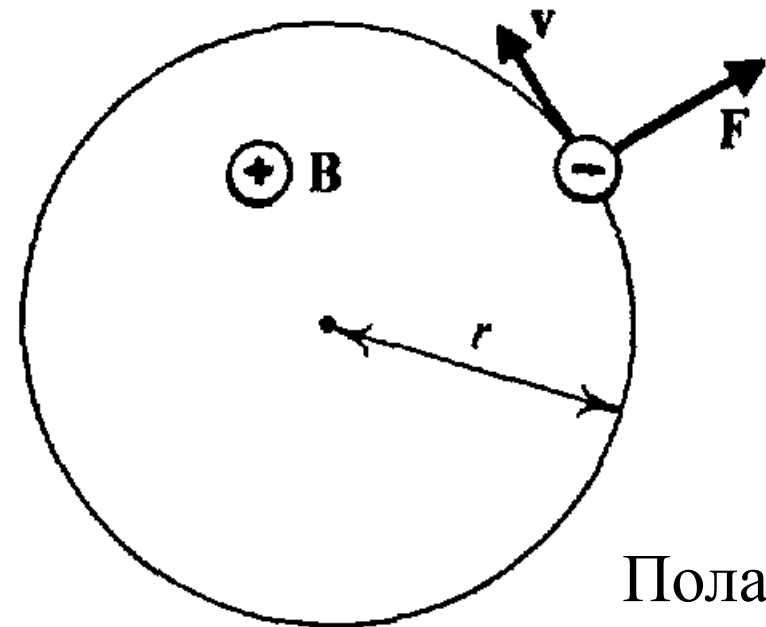
Классификация магнетиков: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

$\mu < 1$ или $\chi < 0$ - диамагнетики, $\left. \begin{array}{l} \mu > 1 \text{ или } \chi > 0 \text{ - парамагнетики,} \\ \mu \gg 1 \text{ или } \chi \gg 1 \text{ - ферромагнетики} \end{array} \right\}$ В отсутствии внешнего поля намагниченность $I = 0$.

$\left. \begin{array}{l} \mu > 1 \text{ или } \chi > 0 \text{ - парамагнетики,} \\ \mu \gg 1 \text{ или } \chi \gg 1 \text{ - ферромагнетики} \end{array} \right\}$ В отсутствии внешнего поля в домене $I \neq 0$.

В отдельные классы магнетиков относят антиферромагнетики, ферриты и суперпарамагнетики.

Классическое описание диамагнетизма. Ларморова прецессия. [1, § 40]



$$m\omega_0^2 r = F_{\text{ц}}, \quad F = |e| \omega r B,$$

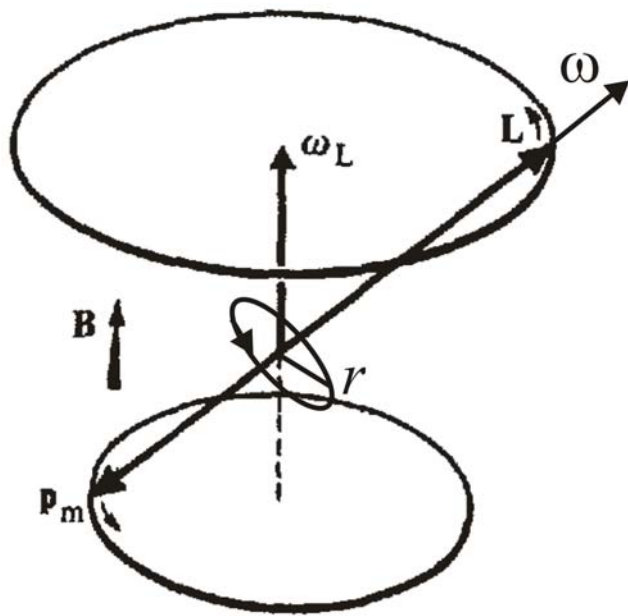
$$m\omega^2 r = F_{\text{ц}} \pm |e| \omega r B,$$

$$m\omega^2 r - m\omega_0^2 r = \pm |e| \omega r B.$$

Полагая $|\Delta\omega| = |\omega - \omega_0| \ll \omega$ и преобразуя $\omega^2 - \omega_0^2 = (\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0) \approx 2\Delta\omega \cdot \omega$, находим

$\Delta\omega = \pm |e| B / 2m; \Rightarrow \omega_L = |e| B / 2m$. Направление $\vec{\omega}_L$ совпадает с $\vec{B}$,

то есть $\vec{\omega}_L = -\frac{e\vec{B}}{2m}$, где учтено, что заряд электрона $e < 0$.



Для произвольной ориентации орбиты вращения электрона относительно индукции внешнего магнитного поля $\vec{B}$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}, \quad \text{где } \vec{L} = mr^2 \vec{\omega}, \quad \vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

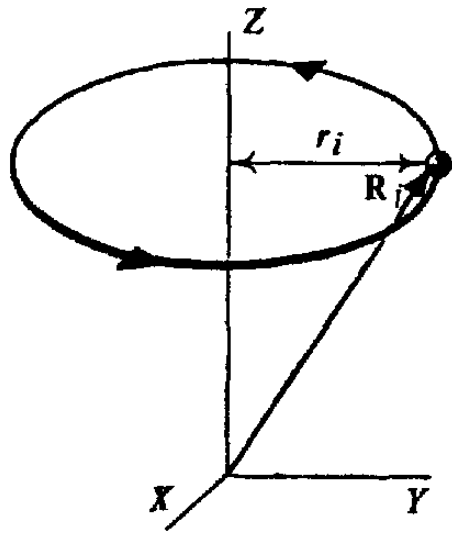
$$\vec{p}_m = I\vec{S} = e \frac{\vec{\omega}}{2\pi} \pi r^2 = \frac{e}{2m} \vec{L}. \quad \text{Получим}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{e}{2m} [\vec{L}, \vec{B}] = -\frac{e}{2m} [\vec{B}, \vec{L}].$$

Известно, что для произвольного вектора с $|\vec{A}| = \text{const}$, $d\vec{A}/dt = [\vec{\Omega}, \vec{A}]$.

$$-\frac{e}{2m} \vec{B} = \vec{\Omega} = \vec{\omega}_L.$$

Диамагнитная восприимчивость



$$\vec{p}_{m,i} = \vec{S}_i I_i = e r_i^2 \vec{\omega}_L / 2,$$

$$\vec{I} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_{m,i} = -\frac{e^2}{4m} \vec{B} \cdot Z \underbrace{\frac{N}{\Delta V}}_n \underbrace{\frac{\sum_i r_i^2}{Z \cdot N}}_{\langle r_i^2 \rangle},$$

где N - число атомов в ΔV , Z - число электронов в атоме.

$$R_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2; \Rightarrow \langle x_i^2 \rangle = \langle y_i^2 \rangle = \langle z_i^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle R_i^2 \rangle,$$

$$\langle r_i^2 \rangle = \langle x_i^2 + y_i^2 \rangle = 2 \langle R_i^2 \rangle / 3 = 2 \langle R^2 \rangle / 3. \text{ Имеем}$$

$$\vec{I} = -\frac{e^2}{6m} \underbrace{\vec{B}}_{\mu_0 \mu \vec{H}} Z n \langle R^2 \rangle = -\frac{e^2}{6m} Z n \langle R^2 \rangle \underbrace{\mu_0 \mu \vec{H}}_{\chi}.$$

$$\chi = -\frac{e^2}{6m} Z n < R^2 > \mu_0.$$

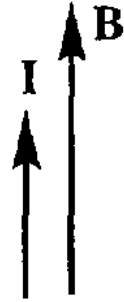
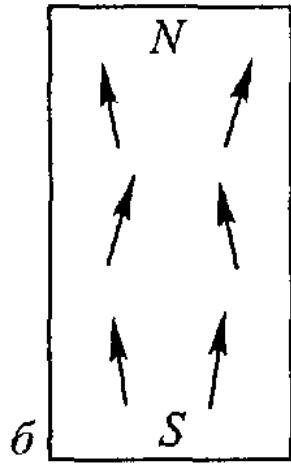
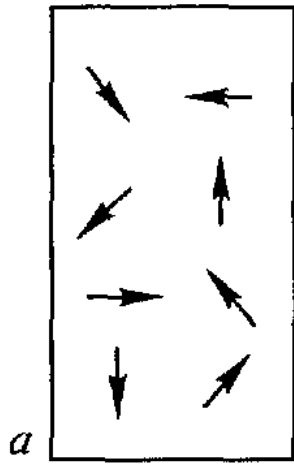
Вещество (диамагнетики)	$\chi = (\mu - 1), 10^{-6}$
вода	-9,0
Медь	-10,3
Стекло	-12,6
Висмут	-176

Ларморово вращение атомов не могут создать магнитные силы, оно создается при включении магнитного поля индукционным электрическим полем

$$2\pi r E = -\frac{d\Phi}{dt}; \Rightarrow M = reE = -\frac{e}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt}; \quad mr^2 \frac{d\omega}{dt} = M = -\frac{e}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt}$$

$$mr^2 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} d\omega = M = -\frac{e}{2\pi} \int_0^{\Phi} d\Phi; \Rightarrow \Delta\omega = \omega_L = -\frac{e}{2m} \frac{\Phi}{\pi r^2} = -\frac{e}{2m} B.$$

Парамагнетизм. Теория Ланжевена.



$$W = -\vec{p}_m \vec{B}; \Rightarrow dn = A \cdot e^{-\frac{W}{K_B T}} d\Omega,$$

где $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ – элемент телесного угла.

$$\langle p_{m,z} \rangle = \int p_{m,z} dn / \int dn.$$

Воспользуемся теорией полярных диэлектриков

$$\vec{p} \rightarrow \vec{p}_m; \quad \vec{E} \rightarrow \vec{B}; \Rightarrow \langle p_{m,z} \rangle = p_m L(\beta), \quad \text{где}$$

$$\beta = \frac{p_m B}{K_B T}, \quad L(\beta) = \coth \beta - \frac{1}{\beta}. \quad \text{Если } \beta \ll 1, \quad L(\beta) \approx \frac{\beta}{3},$$

$$\langle p_{m,z} \rangle = p_m \frac{p_m B}{3K_B T} = \frac{p_m^2 \mu_0 \mu H}{3K_B T}. \quad \text{Если } \mu \approx 1, \quad \text{то}$$

$$I_z = n \langle p_{m,z} \rangle = \underbrace{\frac{n \mu_0 p_m^2}{3 K_B T}}_{\chi} H, \quad \vec{I} = \chi \vec{H}.$$

$$\chi = \mu - 1 = \frac{n \mu_0 p_m^2}{3 K_B T} = \frac{C}{T} - \text{закон Кюри.}$$

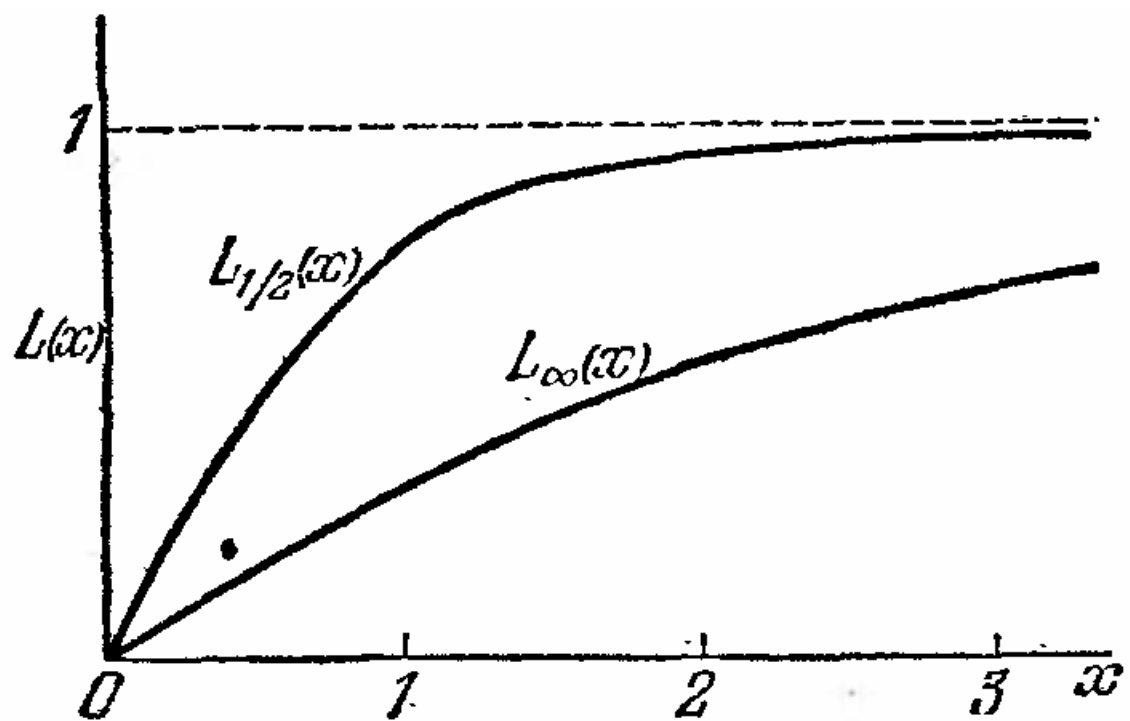
Температурная зависимость $\chi \sim 1/T$ экспериментально обнаружил П. Кюри в 1896 году, в 1905 году Ланжевен разработал теорию парамагнетизма и диамагнетизма.

Теория Ланжевена хорошо описывает лишь газы.

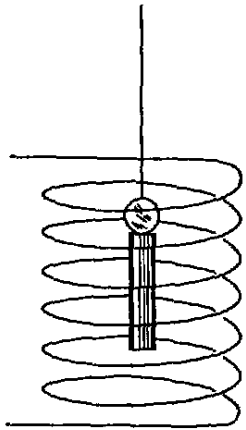
Характерные значения парамагнитной восприимчивости $\chi \sim 10^{-3}$, что приблизительно в 100 раз больше характерного значения $\sim 10^{-5}$ восприимчивости диамагнетиков..

Magnetic Susceptibilities of Some Paramagnetic and Diamagnetic Substances at 300 K

Paramagnetic Substance	χ	Diamagnetic Substance	χ
Aluminum	2.3×10^{-5}	Bismuth	-1.66×10^{-5}
Calcium	1.9×10^{-5}	Copper	-9.8×10^{-6}
Chromium	2.7×10^{-4}	Diamond	-2.2×10^{-5}
Lithium	2.1×10^{-5}	Gold	-3.6×10^{-5}
Magnesium	1.2×10^{-5}	Lead	-1.7×10^{-5}
Niobium	2.6×10^{-4}	Mercury	-2.9×10^{-5}
Oxygen	2.1×10^{-6}	Nitrogen	-5.0×10^{-9}
Platinum	2.9×10^{-4}	Silver	-2.6×10^{-5}
Tungsten	6.8×10^{-5}	Silicon	-4.2×10^{-6}



Магнитомеханический опыт Эйнштейна – де-Гааза.



Магнитомеханическое явление - это возникновение вращения тел при их намагничивании. В 1915 году экспериментально обнаружено в опытах Эйнштейна и Гааза.

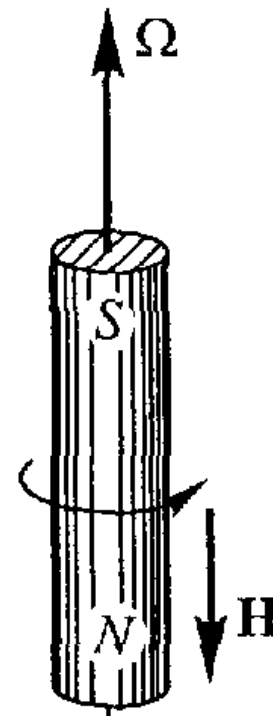
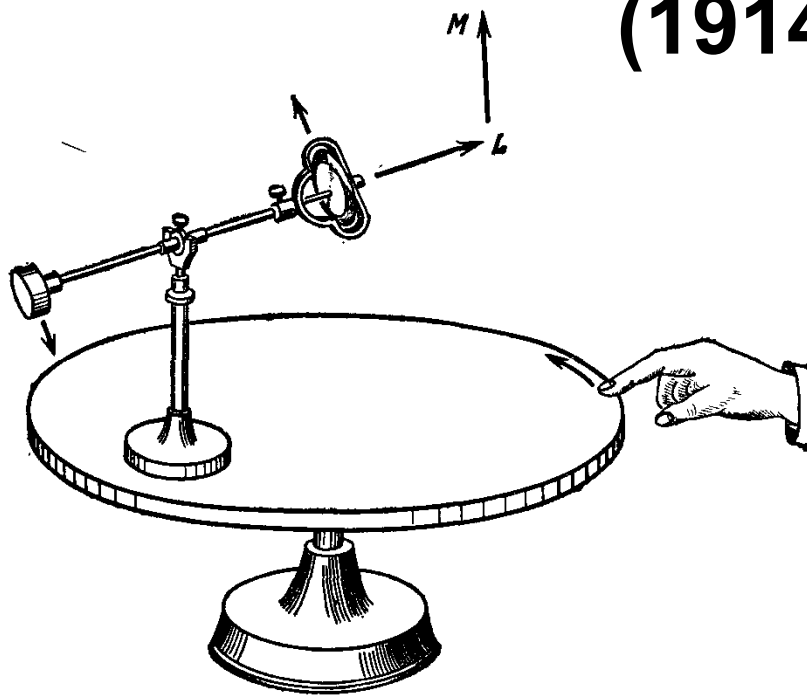
$$\sum_V \vec{p}_{m,i} = \vec{I} \cdot V, \text{ но } \vec{p}_{m,i} = \Gamma \vec{L}_i, \Rightarrow \vec{L} = \sum_V \vec{L}_i = \frac{1}{\Gamma} \vec{I} \cdot V.$$

$$L_z = J_z \omega_z = \frac{1}{\Gamma} I_z \cdot V. \quad \text{Так для железного цилиндра}$$

с диаметром 1 мм в магнитном поле $H = 10^4 \text{ A / м}$

$$\omega_z = 10^{-3} \text{ рад/с.}$$

Механомагнитный опыт Барнетта (1914год).



Механомагнитное явление-это намагничивание магнетика при его вращение.

В опытах Барнетта при вращении железного цилиндра 6000 об/мин наблюдалось намагничивание эквивалентное наличию внешнего поля 10^{-2} A / м .

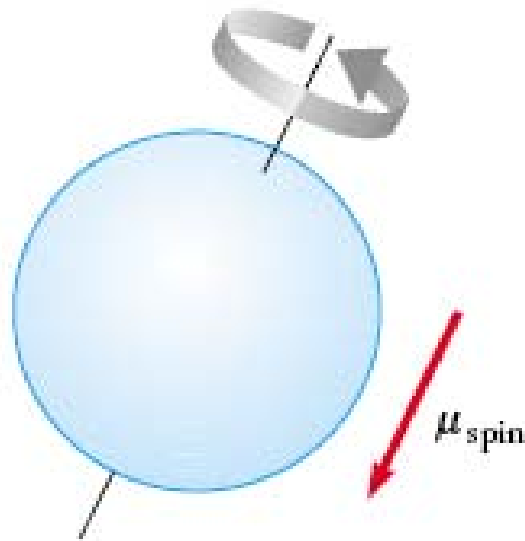
Микроскопические носители магнетизма.

Гиромагнитное отношение.

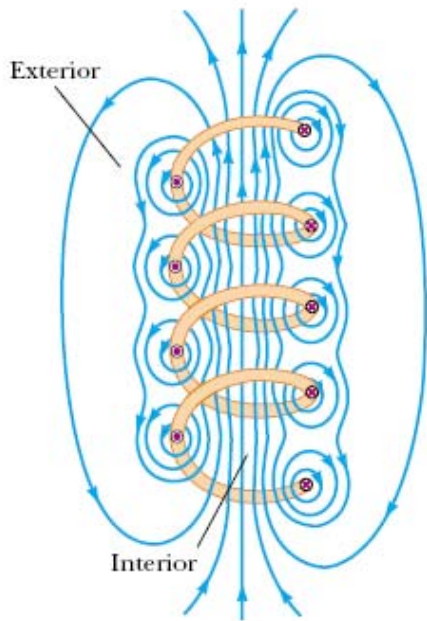
Исследование магнитомеханического и механомагнитного явлений показало $\Gamma < 0$, следовательно, магнетизм обусловлен движением электронов. Для магнетиков $-\frac{e}{m} < \Gamma < -\frac{e}{2m}$. Для ферромагнетиков (железо, никель, кобальт и др.) $\Gamma = -\frac{e}{m}$, что указывает на то, что магнетизм магнетиков нельзя объяснить только орбитальным движением электронов.

Совокупность имеющихся данных указывает на то, что электрон обладает собственным механическим (спином) и магнитным моментом $\vec{p}_{m,s} = -\frac{e}{m}\vec{S}$. Спин квантуется, его проекция $S_z = \pm \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Квантуется и проекция собственного магнитного момента $p_{m,s} = \pm \mu_B = \pm \frac{eh}{4\pi m}$ — магнетон Бора $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ А·м².

Классическая модель спина электрона.



Энергия магнитного поля (тока) в бесконечной изотропной магнитной среде.



В магнитной среде $\vec{B} = \mu \vec{B}_0$. Следовательно,

$$\Phi = \mu \Phi_0 = \underbrace{\mu L_0}_L I = LI; \Rightarrow W = \frac{LI^2}{2} = \mu \frac{L_0 I^2}{2} =$$

$$= \mu \frac{1}{2} \int_{\infty} \frac{B_0^2}{\mu_0} dV = \frac{1}{2} \int_{\infty} \frac{\overbrace{\mu \vec{B}_0}^{\vec{B}} \overbrace{\mu \vec{B}_0}^{\vec{B}}}{\mu_0 \mu} dV = \int_{\infty} \frac{\overbrace{\vec{H} \vec{B}}^w}{2} dV.$$

$$w = \frac{\vec{H} \vec{B}}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{\vec{H} \mu_0 (\vec{H} + \vec{I})}{2} =$$

$$= \frac{\overbrace{\mu_0 \vec{H}}^{\vec{B}_0} \overbrace{\mu_0 \vec{H}}^{\vec{B}_0}}{2\mu_0} + \frac{\mu_0 \vec{H} \vec{I}}{2}, \text{ где } \frac{\mu_0 \vec{H} \vec{I}}{2} - \begin{cases} \text{плотность энергии намаг-} \\ \text{ничивания магнетика.} \end{cases}$$