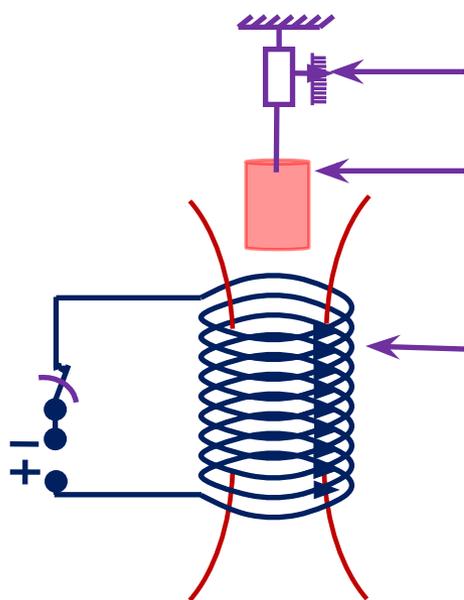


# **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ**

# Классификация магнетиков. Магнитные свойства атомов.

$\nabla B$



Динамометр

Магнетик

Соленоид

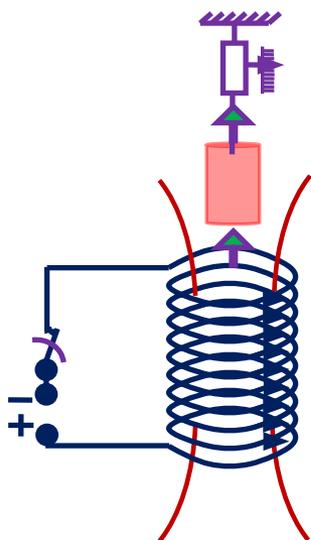
Край соленоида

Неоднородное поле

1. Относительно слабое  
втягивание

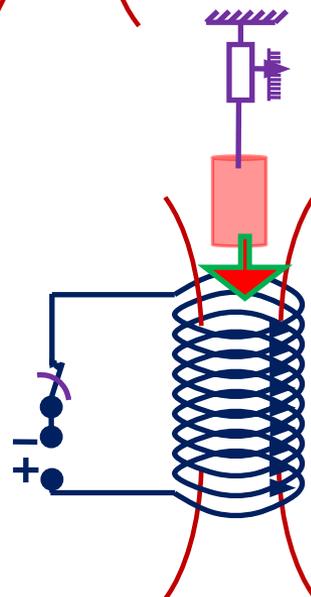
**ПАРАМАГНЕТИКИ**

*Al, Pt, Na, CuCl<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>....*



2. Относительно слабое  
выталкивание...

**ДИАМАГНЕТИКИ**  
*Cu, Ag, Bi, C, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>....*



3. Сильное втягивание...

**ФЕРРОМАГНЕТИКИ**  
*Fe, Co, Ni....*

*Магнитные свойства вещества связаны с магнитными свойствами атомов:*

Магнитный  
момент атома

$$\vec{p}_m = \left[ \sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si}) \right] + \vec{p}$$

*Магнитный момент,  
связанный с орбитальным  
движением электрона*

Собственный магнитный  
момент электрона имеет  
квантовую природу и  
является таким же  
неотъемлемым его  
свойством, как масса и  
заряд.

*Магнитный  
момент ядра*

Магнитный момент атома

$$\vec{P}_m = \left[ \sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si}) \right] + \vec{p}$$

$$\vec{p}_я \ll \sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si}) \Rightarrow \vec{P}_m \approx \sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si})$$

$$\vec{P}_m \neq 0$$



для атома (молекулы)  
парамагнетика

$$\vec{P}_m = 0$$



для атома (молекулы)  
диамагнетиков

В ферромагнетиках

существуют области спонтанного намагничивания: «домены», магнитный момент которых отличен от нуля.



$$\vec{P}_{\text{домена}} \neq 0$$

# Собственный магнитный момент атома. Гиромагнитное отношение

Электрон имеет собственный момент импульса  $\vec{L}_S$  – «спин».



Собственный магнитный момент электрона  $\vec{p}_S$ .

Гиромагнитное отношение для спина

$$\vec{p}_S = \gamma_S \vec{L}_S$$

$$\gamma_S = -\frac{e}{m} = \underline{2\gamma}$$

Орбитальные моменты  $\vec{p}_O$  и  $\vec{L}_O$  могут различаться для разных электронов атома

Собственные моменты  $\vec{p}_S$  и  $\vec{L}_S$  одинаковы у всех электронов

Например, они одинаковы у свободного электрона и у связанного электрона в атоме.

В атоме (молекуле) векторная сумма орбитальных и собственных магнитных моментов электронов равна полному магнитному моменту атома (молекулы). Вследствие этого атомы (молекулы) можно рассматривать как микроскопические круговые контура с током, получившие в физике название **молекулярных токов Ампера**.

Как показывает опыт, для парамагнетиков и ферромагнетиков суммарный магнитный момент атомов (молекул) отличен от нуля. Для диамагнетиков при отсутствии магнитного поля он равен нулю.

## Характеристики магнитного поля в магнетиках.

**Вектор намагничивания**

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{j=1}^N \vec{p}_{mj}$$

← Число атомов

← Магнитный момент атома

←  $A/m$

← Малый объём  
( $\vec{B} \approx const$ )

$\vec{B}_0$  - м.индукция, создаваемая макроскопическими токами

$\vec{B}'$  - м.индукция, создаваемая «молекулярными токами» (токами Ампера)

$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$  - полная м.индукция в магнетике

$\vec{B} > \vec{B}_0$  Пара- и ферромагнетики

Введём напряжённость магнитного поля  $\vec{H}$

$\vec{B} < \vec{B}_0$  диамагнетики

Система СИ: размерность  $A/m$  (как и для  $J$ )

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$$

В вакууме:  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$

1 A/m  $\longleftrightarrow$   $4\pi \cdot 10^{-7}$  Тл

В не слишком сильных внешних полях (создаваемыми обычными токами)

$$\vec{J} = \chi \vec{H}$$

$\chi$  не зависит от  $H$      $\chi$  безразмерная величина

$\chi$  - магнитная восприимчивость (аналог диэлектрической восприимчивости)

## Характеристики магнитного поля в магнетиках.

$$\left. \begin{aligned} \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \\ \vec{J} &= \chi \vec{H} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0(1+\chi)}$$

$\mu \equiv 1 + \chi$  - **магнитная проницаемость** (аналог диэлектрической проницаемости)

$\mu$  - постоянный (при небольших полях) безразмерный коэффициент, возможно  $\mu \geq 1$  и  $\mu \leq 1$ )

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu} \longleftarrow \text{Простая связь между } \vec{H} \text{ и } \vec{B}$$

Очевидно, что  $\vec{B}'$  и  $\vec{J}$  должны быть связаны прямой пропорциональностью

Можно показать (Савельев т. 2), что  $\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}$

$$\left. \begin{aligned} \vec{B}' &= \mu_0 \vec{J} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu} \\ \vec{B} &= \vec{B}_0 + \vec{B}' \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \vec{B} &= \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{J} = \vec{B}_0 + \mu_0 \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H} \right) = \vec{B}_0 + \mu_0 \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu} \right) = \\ &= \vec{B}_0 + \vec{B} - \frac{\vec{B}}{\mu} \longrightarrow \underline{\underline{\vec{B} = \mu \vec{B}_0}} \\ \underline{\vec{H}} &= \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \underline{\vec{H}_0} \end{aligned}$$

Напряжённость магнитного поля в вакууме и магнетике одна и та же.

# Характеристики магнитного поля в магнетиках.

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0 \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu} \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \vec{H}_0 \quad B \leftrightarrow \text{Тесла (Тл)} \\ H \leftrightarrow \text{А/м}$$



Магнитная проницаемость показывает во сколько раз **магнетик** усиливает (ослабляет) магнитное поле.



$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{B}_0}$$

Вакуум: поле создаётся только макроскопическими токами

$$\chi = 0, \quad \mu = 1, \quad \vec{B} = \vec{B}_0, \quad \vec{H}_0 = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \quad \oint \vec{B}_l dl = \mu_0 \sum I_{\text{макро}} \quad \oint \vec{H}_l dl = \sum I_{\text{макро}}$$

Магнетик: поле создаётся макроскопическими и молекулярными (Ампера) токами

$$\chi \neq 0, \quad \mu \neq 1, \quad \vec{B} = \mu \vec{B}_0, \quad \vec{H} = \vec{H}_0 = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \quad \oint \vec{B}_l dl = \mu_0 \mu \sum I_{\text{макро}} \quad \oint \vec{H}_l dl = \sum I_{\text{макро}}$$



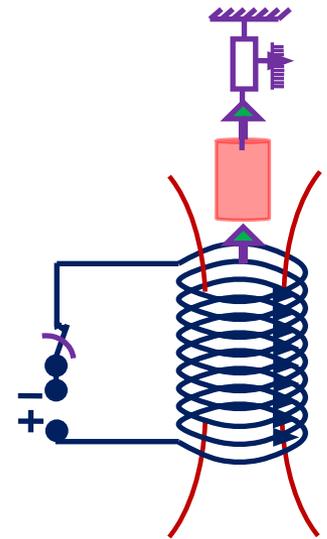
# Диамагнетики

$$\vec{B}_0 = 0 \Rightarrow \vec{p}_m = 0$$

$$\vec{B}_0 \neq 0 \Rightarrow \vec{p}'_m \neq 0$$



Индукционный  
магнитный момент  
атома



Если имеется контур, по которому может течь ток и включается магнитное поле, то, согласно закону Фарадея, в контуре индуцируется ЭДС и порождаемый ею ток, направленный так, чтобы ослабить внешнее магнитное поле (принцип Ленца).

Если считать, что электрон, движущийся по своей орбите в атоме – это контур с током, то включение магнитного поля должно изменить движение электрона так, чтобы возник дополнительный ток, уменьшающий внешнее магнитное поле.

**Следует ожидать возникновения диамагнетизма.**

Действительно, диамагнетизм возникает всегда, в том числе в пара- и ферромагнетиках.

Но в пара- и ферромагнетиках диамагнитное ослабление внешнего магнитного поля незаметно на фоне гораздо более сильных эффектов пара- и ферромагнитного усиления поля.

## Рассмотрим орбитальное движение электрона в магнитном поле:

Орбитальное движение электрона  $\rightarrow$  Контур с током

Контур с током в поле  $\vec{B}_0 \rightarrow$  вращательный момент, стремящийся установить  $\vec{p}_0$  по  $\vec{B}_0$

$$\vec{M} = [\vec{p}_0 \times \vec{B}_0]$$

Закон изменения момента импульса:  $\vec{M} = \frac{d\vec{L}_0}{dt}$

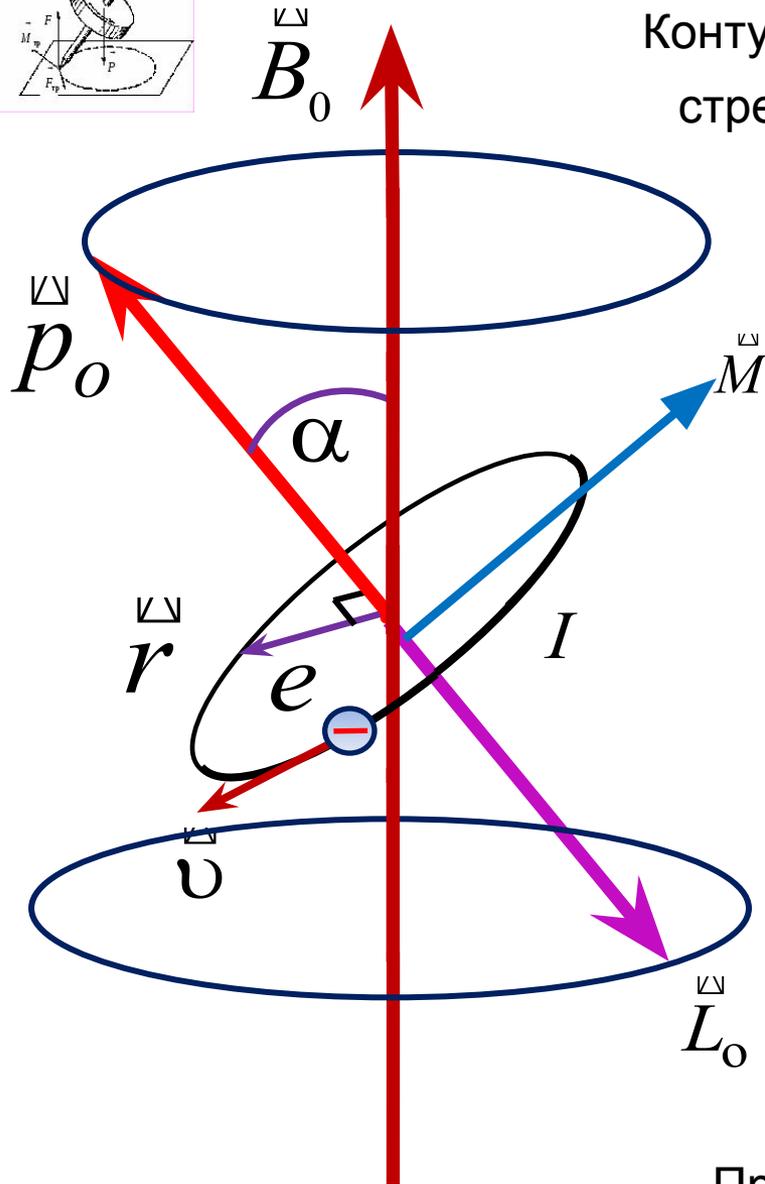
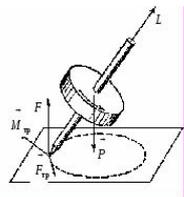
Работа силы Лоренца равна нулю

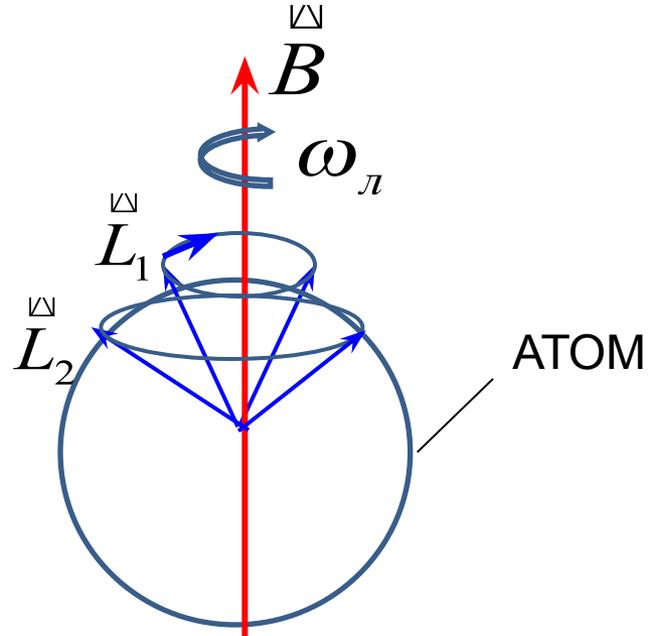
$$|\vec{L}_0| = const.$$

$\vec{L}_0$  меняется только по направлению!

Концы векторов  $\vec{L}_0$  и  $\vec{p}_0$  движутся по окружностям в плоскостях, перпендикулярных линиям магнитной индукции с угловой скоростью  $\omega_L$ .

Прецессия векторов  $\vec{p}_0$  и  $\vec{L}_0$  вокруг вектор  $\vec{B}_0$





При включении магнитного поля атом (образованный электронными орбитами) приобретает вращение вокруг направления  $B$  с угловой скоростью  $\omega_l$ . При этом наклонённые электронные орбиты прецессируют. Это вроде соответствует описанию Сивухина.



*При наличии внешнего постоянного магнитного поля внутреннее движение электронов атома не изменяется, но атом в целом получает дополнительное вращение с угловой скоростью (76.1). Этот результат называется теоремой Лармора (1857—1942), а величина  $\Omega$  — ларморовской частотой.*

3. Необходимо еще выяснить, какие силы сообщают атому ларморовское вращение. Это не могут сделать магнитные силы, так как они перпендикулярны к скорости электрона и работы не производят. А с ларморовским вращением связана дополнительная кинетическая энергия атома. Магнитные силы могут только поддерживать, но не создавать ларморовское вращение. Последнее возникает во время включения магнитного поля. Переменное магнитное поле возбуждает вихревое электрическое поле. Оно-то и сообщает атому ларморовское вращение. Для пояснения допустим, что

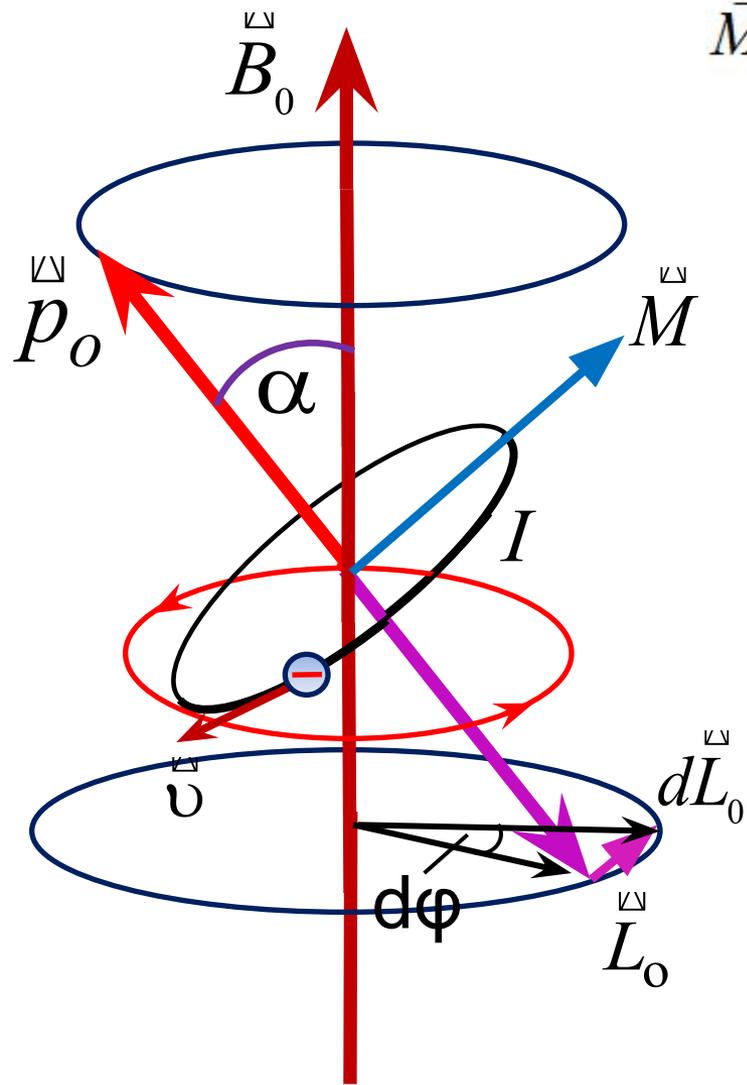
щает атому ларморовское вращение. Для пояснения допустим, что электрон вращается по окружности радиуса  $r$ , плоскость которой перпендикулярна к (однородному) магнитному полю  $B$ . Пусть магнитное поле включается *адиабатически*, т. е. настолько медленно, что за время одного оборота электрона по окружности поле почти остается постоянным. Ввиду симметрии вихревое электрическое поле  $E$  будет направлено по касательной к окружности. На основании закона электромагнитной индукции  $2\pi r E = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$ , где  $\Phi$  — магнитный поток, пронизывающий площадь, ограниченную той же окружностью. Отсюда и найдется поле  $E$ . Момент сил, действующих на электрон,  $M = -reE = \frac{e}{2\pi c} \frac{d\Phi}{dt}$ . На основании уравнения моментов

$$mr^2 \frac{d\Omega}{dt} = M = \frac{e}{2\pi c} \frac{d\Phi}{dt}.$$

В начальный момент  $B = \Omega = 0$ . Поэтому, интегрируя предыдущее уравнение, получим

$$mr^2 \dot{\Omega} = \frac{e}{2\pi c} \dot{\Phi},$$

Из изложенного видно, что ларморовское вращение есть одно из проявлений электромагнитной индукции. То обстоятельство, что электромагнитная индукция должна приводить именно к диамагнетизму, а не к парамагнетизму, проще всего понять, руководствуясь принципом Ленца. Действительно, в соответствии с этим принципом магнитное поле  $B_{\text{инд}}$ , возбуждаемое ларморовским вращением электронов, должно иметь такое направление, чтобы препятствовать всяким изменениям внешнего приложенного поля  $B$ . Поэтому поле  $B_{\text{инд}}$ , а с ним и вектор намагничивания среды  $I$  должны иметь направление, противоположное направлению внешнего поля  $B$ . Явление электромагнитной индукции имеет место во всех средах. Поэтому и обусловленный им диамагнетизм есть универсальное явление, которое должно проявляться во всех средах. Однако в тех случаях, когда атомы обладают собственными магнитными моментами, диамагнитный эффект перекрывается значительно более сильным парамагнитным эффектом.



$$\vec{M} = [\vec{p}_0 \times \vec{B}_0] = \gamma[\vec{L}_0 \times \vec{B}_0] = \frac{d\vec{L}_0}{dt}$$

$dL \perp L$  и  $B$  → Траектория конца вектора  $\vec{L}$  - окружность в плоскости  $\perp L$  и  $B$

За время  $dt$  поворот на  $d\varphi$

$$d\varphi = \frac{dL_0}{L_0 \sin \alpha} = \frac{|\gamma| L_0 B_0 \sin \alpha dt}{L_0 \sin \alpha} = |\gamma| B_0 dt$$

$$\omega_L = \frac{d\varphi}{dt} = |\gamma| B_0 \quad \gamma = \frac{e}{2m}$$

Частота ларморовской прецессии →

$$\omega_L = \frac{e}{2m} B_0$$

$\omega_L$  одна и та же для всех орбит электронов в атомах



# Диамagnetики - резюме

$$p' = \frac{1}{2} e \omega_L (r')^2 = \frac{e^2}{4m} r'^2 B_0$$

Индукцированный магнитный момент для одного электрона в атоме.

$$\vec{p}'_m = \sum_{i=1}^Z \vec{p}'_i$$

Полный **индуцированный** магнитный момент для атома с числом электронов  $Z$

$$\vec{p}_m = \sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si}) + \vec{p}'_m$$

Полный магнитный момент для атома с числом электронов  $Z$

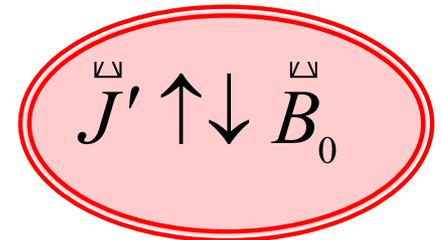
**В диамagnetике**  
0

$$\sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si}) = \longrightarrow \vec{p}_m = \sum_{i=1}^Z \vec{p}'_m$$

Магнитный момент атома определяется **только** величиной индуцированного магнитного момента, имеющего **направление противоположное направлению вектора магнитной индукции**.

*Магнитный момент единицы объёма диамagnetика (вектор намагничивания) в магнитном поле:*

$$\vec{J}' = \frac{1}{\Delta V} \sum_{j=1}^N \vec{p}'_{mj} \neq 0$$



# Диамagnetики - резюме

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

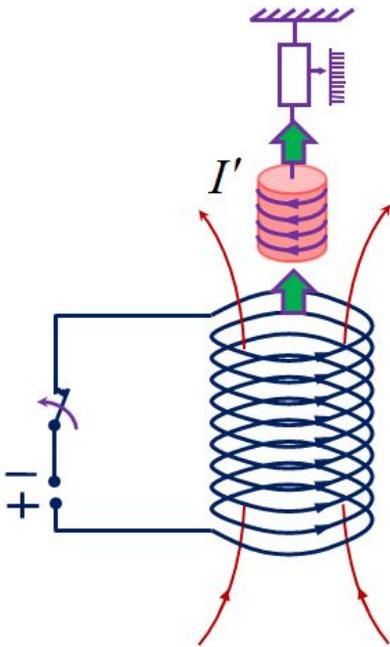
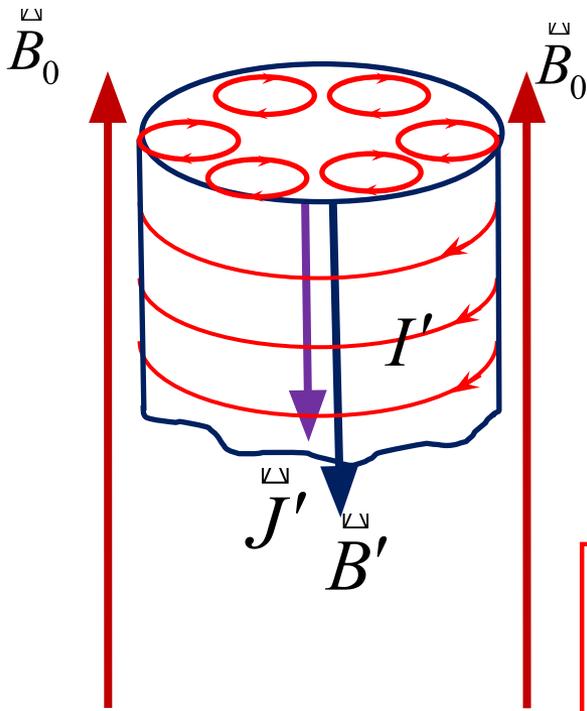


$$B = B_0 - B'$$

Диамagnetики ослабляют магнитное поле

$$B < B_0$$

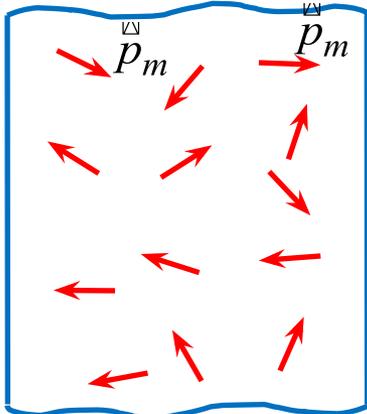
Слабый эффект:  
для твёрдых веществ  $\chi$  имеет масштаб  $10^{-6}$ ,  $\mu \approx 1$



# Парамагнетики

$$\vec{p}_m \neq 0$$

Вектор намагничивания



$A/m$

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{j=1}^N \vec{p}_{mj}$$

Число атомов

Магнитный момент атома

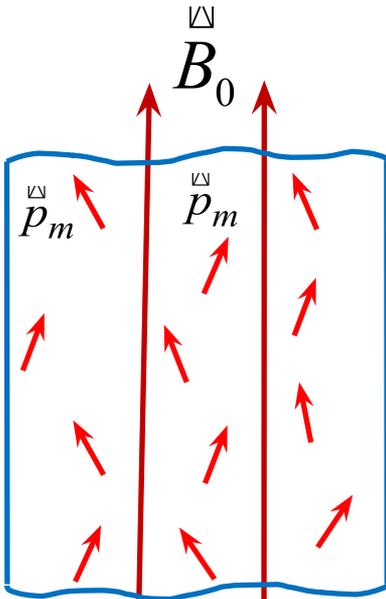
Малый объём

$$(\vec{B} \approx const)$$

$$\vec{B}_0 = 0$$

Ориентация магнитных моментов атомов носит случайный характер

$$\vec{J} = 0$$



$$\vec{B}_0 \neq 0$$

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}_0]$$

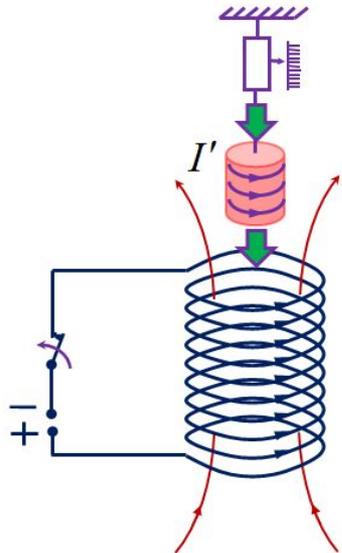
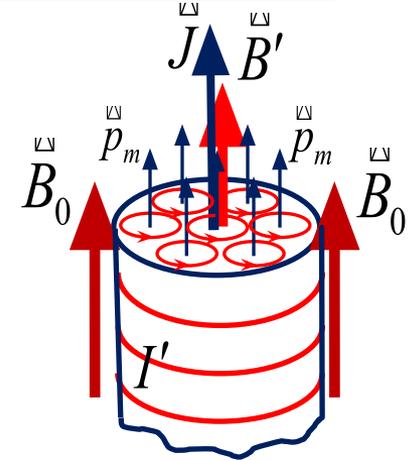
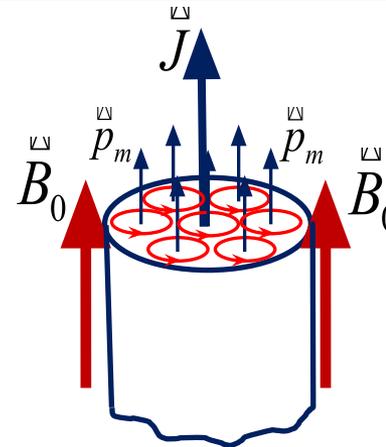
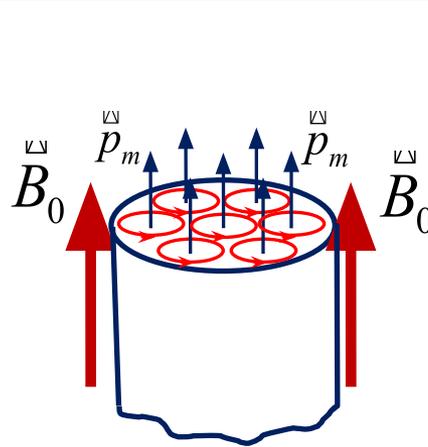
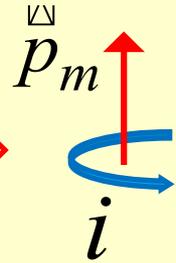
Тепло разупорядочивает

Магнитное поле выстраивает магнитные моменты атомов вдоль линий магнитной индукции

$$\vec{J} \neq 0$$

## Гипотеза молекулярных токов

**Ампера:** каждому атому (молекуле) можно сопоставить некоторый круговой ток с соответствующим магнитным моментом.



Парамагнетики усиливают магнитное поле



$$B > B_0$$