

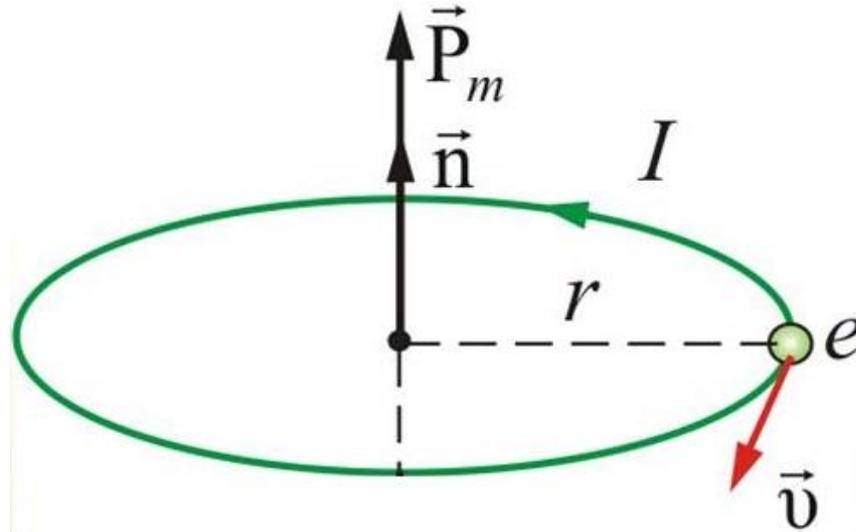
Магнитные свойства вещества

Магнитное поле в веществе

Магнитное поле в веществе

- Все вещества в той или иной мере взаимодействуют с магнитным полем. У некоторых материалов магнитные свойства сохраняются и в отсутствие внешнего магнитного поля.
- *Причина намагничивания материалов - **токи**, циркулирующие внутри атомов – движение электронов в атомах - «**амперовские токи**».*

Магнитное поле в веществе



В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты \vec{P}_m атомов вещества ориентированы обычно беспорядочно, так что создаваемые ими магнитные поля компенсируют друг друга.

Магнитное поле в веществе

При наложении *внешнего магнитного поля* атомы стремятся сориентироваться своими магнитными моментами \vec{P}_m **по направлению внешнего магнитного поля**, и тогда компенсация магнитных моментов нарушается, тело приобретает магнитные свойства – ***намагничивается.***

Все тела способны намагничиваться в той или иной степени, т.е. создавать собственное магнитное поле (которое накладывается на внешнее магнитное поле).

Магнитные свойства вещества определяются магнитными свойствами электронов и атомов.

Магнитное поле в веществе

Электрон движется в атоме по круговой орбите

Круговой ток $I = \frac{q}{t} = \frac{e}{T} = ef$,

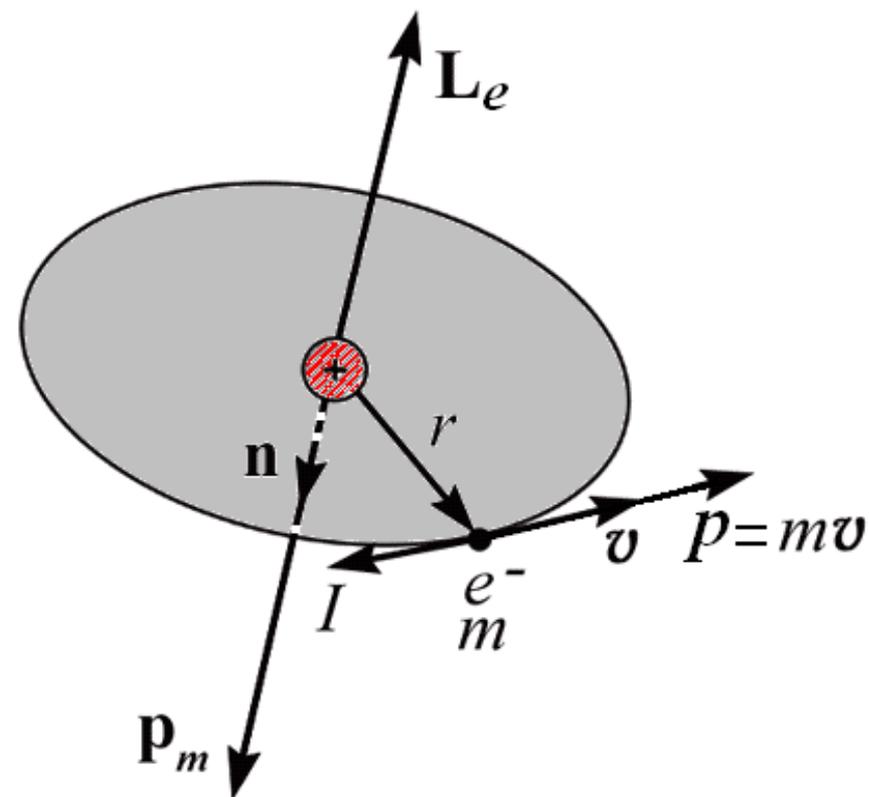
f - частота вращения
электрона по орбите.

- Круговой ток обладает **орбитальным магнитным моментом**

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} = ef\vec{S}, \quad \vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{n}.$$

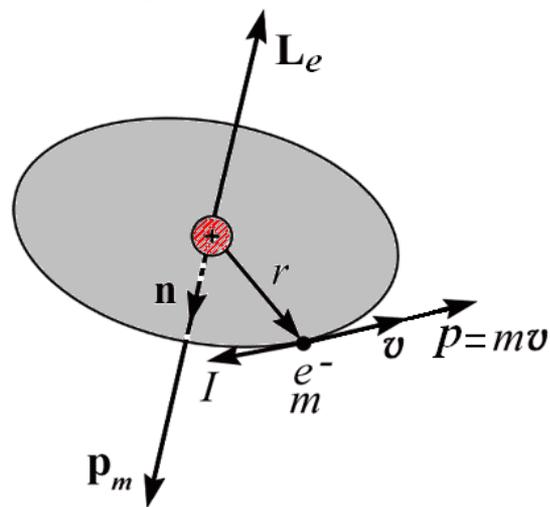
S – площадь орбиты,

\vec{n} – нормаль к S (правило правого винта).



Магнитное поле в веществе

- Движущийся по круговой орбите электрон обладает *орбитальным механическим моментом* импульса



$$L_e = \underbrace{mvr}_p = \left(\begin{array}{l} v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f \\ S = \pi r^2 \end{array} \right) = 2mfS$$

$$\vec{L}_e = [\vec{r}, \vec{p}] \quad \Rightarrow \quad \vec{p}_m \uparrow \downarrow \vec{L}_e$$

– направлены в разные стороны.

$$p_m = efS \quad \Rightarrow \quad \vec{p}_m = -\frac{e}{2m} \vec{L}_e,$$

$g = -\frac{e}{2m}$ – *гиромангнитное соотношение орбитальных моментов.*

Магнитное поле в веществе

- В квантовой механике показано, что кроме орбитальных моментов p_m , L_e электрон обладает *собственным механическим моментом* импульса L_{eS} , называемым *СПИНОМ*:

$$L_{eS} = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Джс}}{\text{с}}$ — постоянная Планка:

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Джс}}{\text{с}}$$

Магнитное поле в веществе

- Спину электрона соответствует *спиновый (собственный) магнитный момент*

$$\vec{p}_{ms} = g_s \vec{L}_{eS}$$

$$\Rightarrow \vec{p}_{ms} \uparrow \downarrow \vec{L}_{eS}.$$

$$g_s = -\frac{e}{m} \quad \text{— гиромагнитное отношение спиновых моментов.}$$

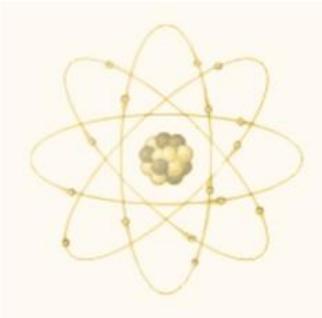
Магнитное поле в веществе

Полный магнитный момент электрона

$$\vec{p}_{e^-} = \vec{p}_m + \vec{p}_{ms}$$

Полный магнитный момент атома

складывается из магнитных моментов входящих в атом электронов и магнитного момента ядра, который складывается из магнитных моментов протонов и нейтронов:



$$\begin{aligned}\vec{p}_{am} &= \vec{p}_я + \sum \vec{p}_{e^-} \\ &= \sum \vec{p}_m + \sum \vec{p}_{mS}\end{aligned}$$

Намагниченность

При изучении магнитного поля в веществе различают два типа токов – *макροтоки* и *микροтоки*.

Макροтоками называются токи проводимости, связанные с движением заряженных макроскопических тел.

Микροтоками (молекулярными токами) называют токи, обусловленные движением электронов в атомах, молекулах и ионах.

Намагниченность

Полное магнитное поле в веществе \vec{B} является суперпозицией двух полей:

внешнего $\vec{B}_{внеш}$ магнитного поля, создаваемого **макротоками** и

внутреннего $\vec{B}_{внутр}$ или собственного, магнитного поля, создаваемого **микротоками**:

$$\vec{B} = \vec{B}_{внеш} + \vec{B}_{внутр}$$

Намагниченность

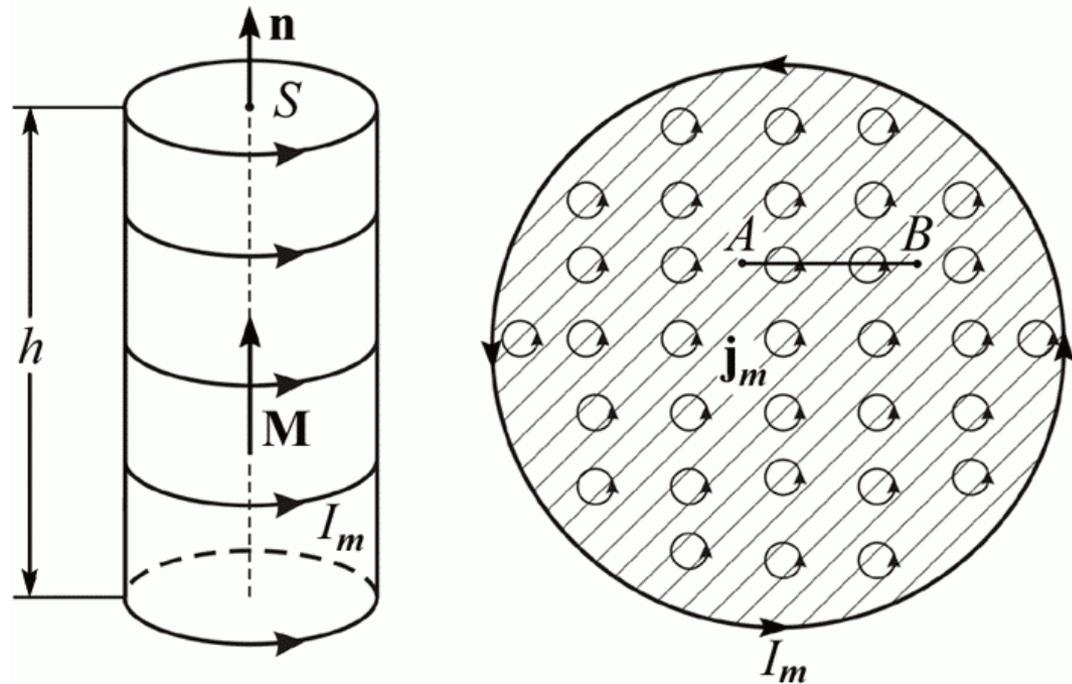
Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит – *намагниченность* \vec{J} , равная магнитному моменту в единице объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{P}_{at}}{V}$$

где $\vec{P}_m = \sum \vec{P}_{at}$ – магнитный момент вещества, складывающийся из магнитных моментов атомов, содержащихся в объеме V .

Магнитное поле в веществе

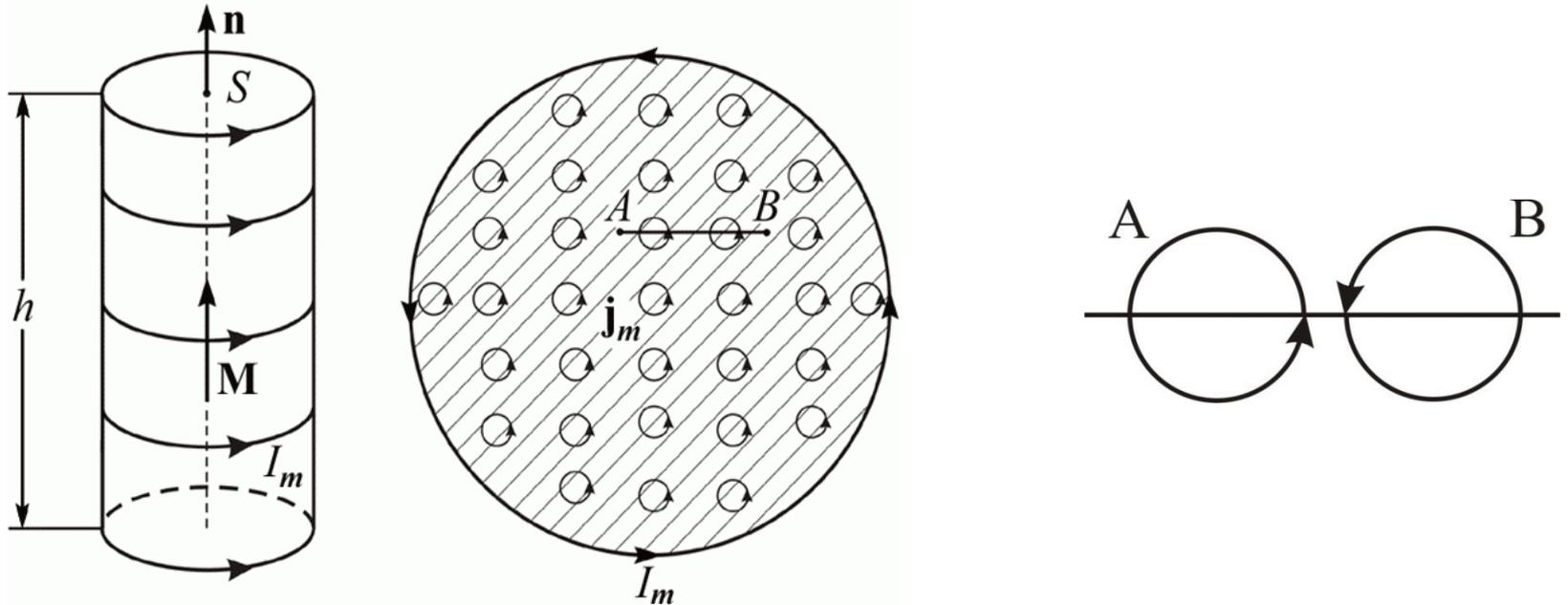
Для того чтобы связать вектор \mathbf{J} с током $I_{\text{микро}}$, рассмотрим цилиндрический стержень равномерно намагниченный параллельно оси:



Равномерная намагниченность означает, что плотность атомных циркулирующих токов внутри материала $I_{\text{микро}}$ повсюду постоянна.

Магнитное поле в веществе

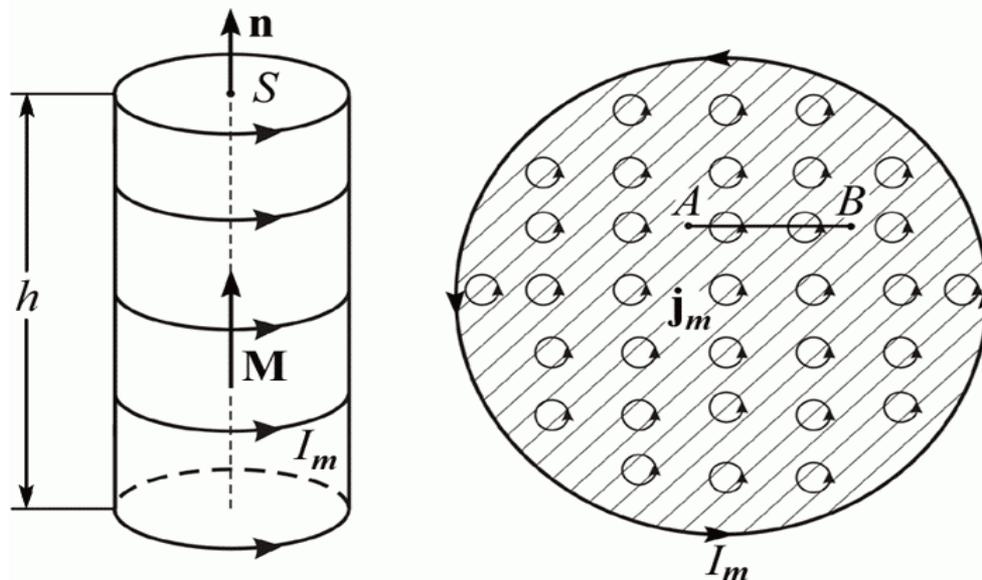
Каждый атомный ток в плоскости сечения стержня, перпендикулярной его оси, представляет микроскопический кружок, причем все микротоки текут в одном направлении – против часовой стрелки.



В местах соприкосновения отдельных атомов и молекул молекулярные токи противоположно направлены и компенсируют друг друга.

Магнитное поле в веществе

Некомпенсированными остаются лишь **токи, текущие вблизи поверхности материала**, создавая на поверхности материала некоторый **микроток $I_{\text{микро}}$** , возбуждающий во внешнем пространстве магнитное поле, равное полю, созданному всеми молекулярными токами.



Магнитное поле в веществе

Закон полного тока для магнитного поля в веществе:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}})$$

где $I_{\text{микро}}$ и $I_{\text{макро}}$ – алгебраическая сумма макро- и микротоков сквозь поверхность, натянутую на замкнутый контур L .



Вклад в $I_{\text{микро}}$ дают только те молекулярные токи, которые нанизаны на замкнутый контур L .

Магнитное поле в веществе

Алгебраическая сумма сил микротоков связана с циркуляцией вектора намагниченности \mathbf{J} соотношением:

$$I_{\text{микро}} = \oint_L \mathbf{J} d\vec{\Gamma},$$

тогда **закон полного тока** можно записать в виде

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \mathbf{J} \right) d\vec{\Gamma} = I_{\text{макро}}$$

$$\begin{aligned} \oint_L \vec{B} d\vec{\Gamma} &= \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}) \\ \oint_L \frac{\vec{B} d\vec{\Gamma}}{\mu_0} - I_{\text{микро}} &= I_{\text{макро}} \end{aligned}$$

Вектор \mathbf{H} называется **напряженностью магнитного поля**.

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

Магнитное поле в веществе

Закон полного тока для магнитного поля в веществе утверждает, что **циркуляция вектора напряженности магнитного поля** вдоль произвольного замкнутого контура L равна алгебраической сумме макротоков сквозь поверхность натянутую на этот контур:

$$\oint_L \vec{H} dl = I_{\text{макро}}$$

Магнитное поле в веществе

Намагниченность \vec{J} изотропной среды связана с **напряженностью** \vec{H} соотношением
$$\vec{J} = \chi \vec{H}$$

χ называется **магнитной восприимчивостью среды** - это коэффициент пропорциональности, характеризующий магнитные свойства данного конкретного вещества.

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

$$\mu = (1 + \chi)$$

магнитная проницаемость вещества

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0(1 + \chi)}$$

Диамагнетики.
Парамагнетики.
Ферромагнетики.

Парамагнетик (Ce^{3+} , Pr^{3+} , Ti^{3+} , V^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Li, Na)

$$\mu = \frac{B}{B_0} > 1$$

Диамагнетик (Bi, Cu, Ag, Au и др.)

$$\mu = \frac{B}{B_0} < 1$$

Ферромагнетиками (Fe, Co, Ni и пр.)

$$\mu = \frac{B}{B_0} \gg 1$$

Диамagnetики. Парамагнетики.

Все известные вещества под действием магнитного поля способны приобретать магнитный момент (намагничиваться). По этой причине их называют **магнетиками**.

Когда **вещества помещают в магнитное поле**, то оказывается, что одни вещества **ослабляют** внешнее магнитное поле, а другие **усиливают** его.

Первые называются **диаманитными** (диаманетики), вторые **парамагнитными** (парамагнетики).

Среди **парамагнетиков** выделяется группа веществ, вызывающих **очень большое усиление внешнего поля**. Эти вещества называются **ферромагнитными** (ферромагнетики).

Диамагнетики.

В отсутствие внешнего магнитного поля *немагнитны*, т.к. магнитные моменты электронов взаимно компенсируются и

$$\vec{p}_{am} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum \vec{p}_{am} = 0$$

Диамагнитный эффект (ослабления внешнего магнитного поля) объясняется действием внешнего магнитного поля на электроны атомов вещества.

Парамагнетики.

В отсутствие внешнего магнитного поля у парамагнетиков магнитные моменты электронов взаимно не компенсируются, поэтому

$$\vec{P}_{\text{атом(молекулы)}} \neq 0, \quad \text{но} \quad \sum \vec{P}_{\text{ат}} = 0,$$

Во внешнем магнитном поле у парамагнетика магнитные моменты атомов ориентируются по полю, следовательно, парамагнетик *намагничивается*, т.е. создает свое дополнительное магнитное поле, которое по направлению совпадает с внешним магнитным полем и усиливает его – это *парамагнитный эффект*.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков

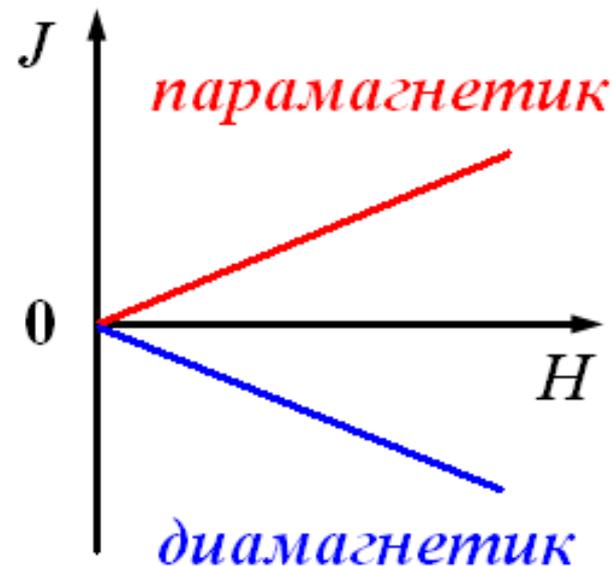
Вещество	$\chi_{\text{мол}} \cdot 10^{-6}$
He	-2,02
Cu	-5,41
Zn	-11,40
Ag	-21,50
Au	-29,59
Bi	-284,0
CO ₂	-21

Магнитная восприимчивость парамагнетиков в расчете на один моль (атом)

Вещество	$\chi_{\text{мол}} \cdot 10^{-6}$	Вещество	$\chi_{\text{мол}} \cdot 10^{-6}$
Mg	13,25	Sr	91,2
Na	15,1	Ti	161,0
Rb	18,2	U	414,0
Ba	20,4	Pu	627,0
K	21,25	FeS	1074,0
Li	24,6	EuCl ₃	2650,0
Ca	44,0	CoCl ₃	121660,0
W	55,0		

Диамагнетики. Парамагнетики.

- *Диамагнетики:* $\chi < 0$, по правилу Ленца поле микротоков противоположно внешнему полю B_0 .
- *Парамагнетики:* $\chi > 0$, поле микротоков совпадает с внешним полем B_0 .



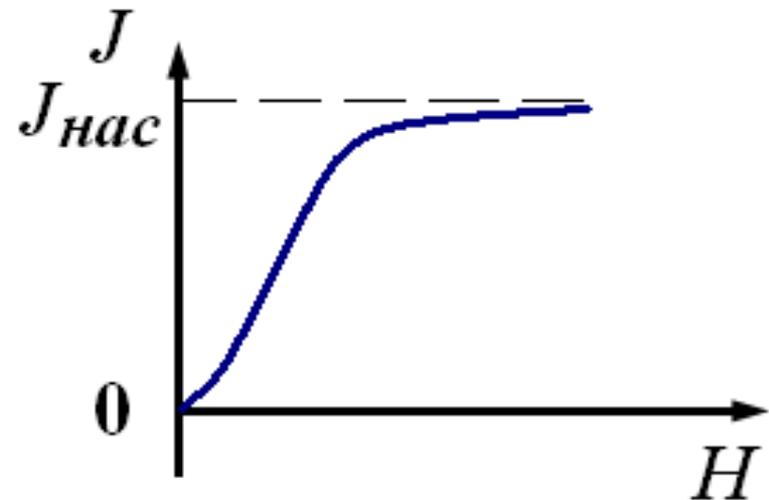
Ферромагнетики.

Сильномагнитные вещества, обладающие спонтанной намагниченностью, т.е. намагниченностью без внешнего магнитного поля (*Fe, Co, Ni*).

- Функциональная зависимость нелинейная с насыщением.

Насыщение возникает, когда все молекулярные магнитные моменты ориентируются по внешнему магнитному полю.

$$J = f(H)$$



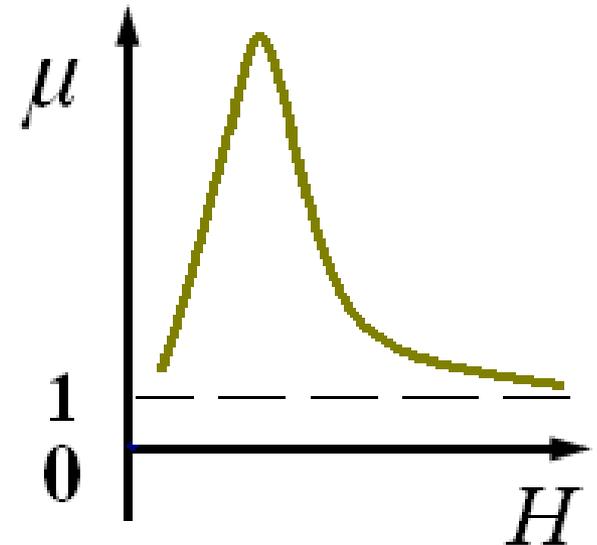
Ферромагнетики.

- У ферромагнетиков большое значение магнитной проницаемости $\mu \gg 1$.
- Нелинейная зависимость магнитной проницаемости μ от величины внешнего магнитного поля H :

$$\mu = f(H)$$

В слабых полях μ растет с ростом H , достигает максимума, затем начинает уменьшаться и в сильных полях стремится к 1.

$\mu = f(H)$ - *кривая Столетова*.



Ферромагнетики.

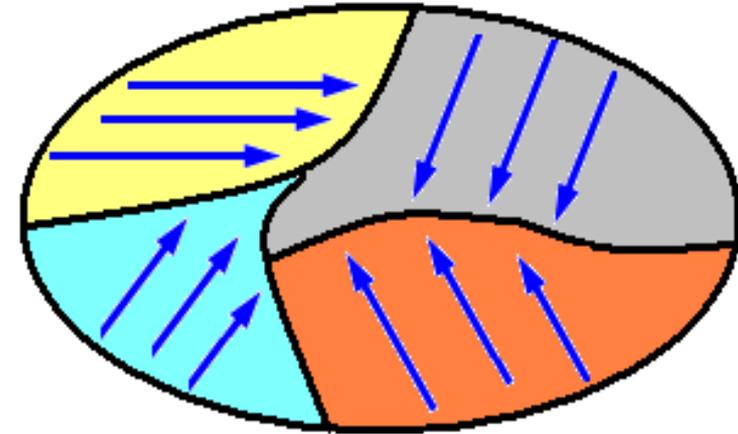
- Ферромагнетики обладают ***точкой Кюри*** – при определенной температуре теряют свои магнитные свойства.

Ферромагнетики.

Большая величина намагниченности J ферромагнетиков объясняется сильным взаимодействием *спиновых магнитных моментов электронов* (p_{ms}), в результате которого происходит *упорядочение* ориентации p_{ms} атомов в решетке.

Ферромагнетики.

Весь ферромагнетик разбивается на области самопроизвольной намагниченности до полного насыщения намагниченности \vec{J} в них. Эти области называются **доменами**. Их линейные размеры порядка 10^{-2} см.



В отсутствие внешнего магнитного поля намагниченность доменов \vec{J} направлена хаотично, поэтому

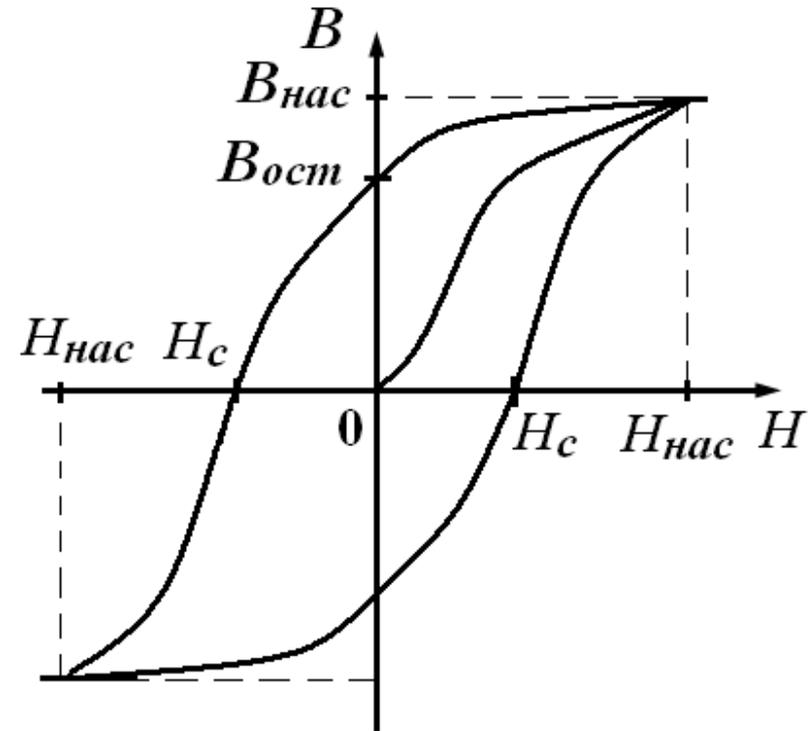
$$\vec{J}_{\text{ферромагнетика}} = \sum \vec{J}_{\text{доменов}} = 0.$$

При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле

- 1) изменение направлений спонтанной намагниченности отдельных доменов и всего магнетика в целом в результате поворота векторов магнитного момента \mathbf{p}_m внутри доменов по полю,
- 2) смещение границ доменов, что приводит к росту объема доменов, у которых намагниченность ориентирована наиболее близко к направлению внешнего магнитного поля, за счет соседних доменов.

Ферромагнетик во внешнем магнитном поле

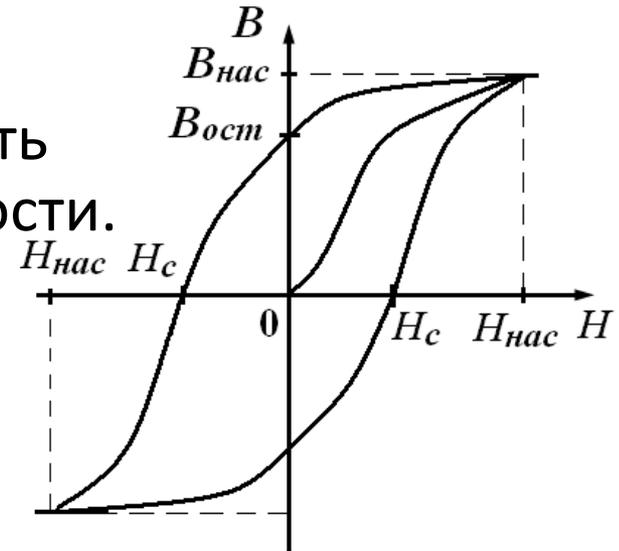
1. Намагниченность ферромагнетика растет от 0 до насыщения $B_{нас}$.
2. При уменьшении внешнего магнитного поля H до нуля ферромагнетик остается намагниченным – $B_{ост}$. намагниченность.



С наличием $B_{ост}$ связано существование *постоянных магнитов*.

Ферромагнетик во внешнем магнитном поле

3. Для того чтобы размагнитить ферромагнетик необходимо поместить его в поле противоположной полярности.



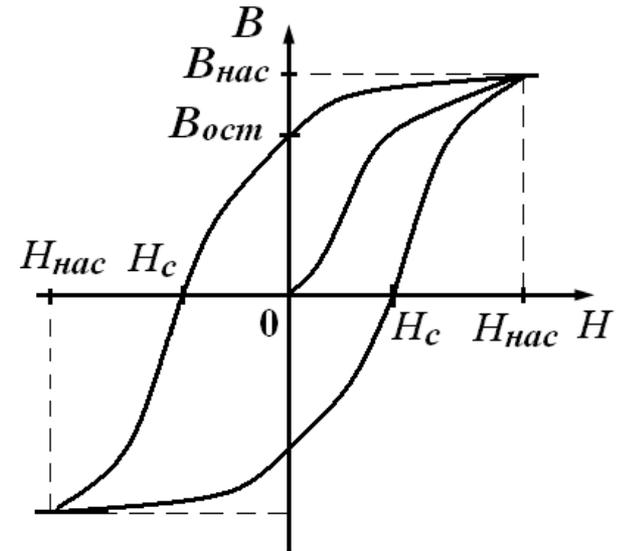
Намагниченность обращается в ноль под действием поля H_c – называемого **коэрцитивной силой**.

H_c – мала, магнетик магнитомягкий,

H_c – велика, магнетик жесткий.

Ферромагнетик во внешнем магнитном поле

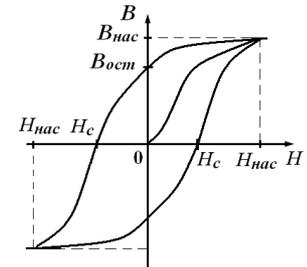
4. При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик перемагничивается и при $H_{нас}$ достигает насыщения.



Затем ферромагнетик можно опять размагнитить, т.о. при действии на ферромагнетик переменного магнитного поля его намагниченность J и индукция B изменяются в соответствии с замкнутой кривой – **петля гистерезиса**.

Ферромагнетик во внешнем магнитном поле

- Площадь петли пропорциональна работе, совершенной при перемагничивании.



- Эта работа определяет потери энергии на гистерезис.

$$\oint HdB$$

- Так как во внешнем магнитном поле внутри ферромагнетика происходит перестройка его структуры (смещение и поворот границ доменов), следовательно, это приводит к изменению его размеров.

Явление магнитострикции –

изменение формы и объёма ферромагнетика при его намагничивании.

- Обратный эффект – изменение намагниченности при деформации ферромагнетика.