

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.1. Намагничивание вещества. Намагниченность

$$f_x = (p_m)_x \frac{dE_x}{dx}$$

Электричество и магнетизм.

Лекция №9. Козел С.М. (МФТИ)

(<http://lectoriy.mipt.ru/lecturer/KozelSM>)

(21:00)

<https://youtu.be/F7wu6W9V9nU>

Paramagnetism of Liquid Oxygen

(<http://tsgphysics.mit.edu>)

(01:00)

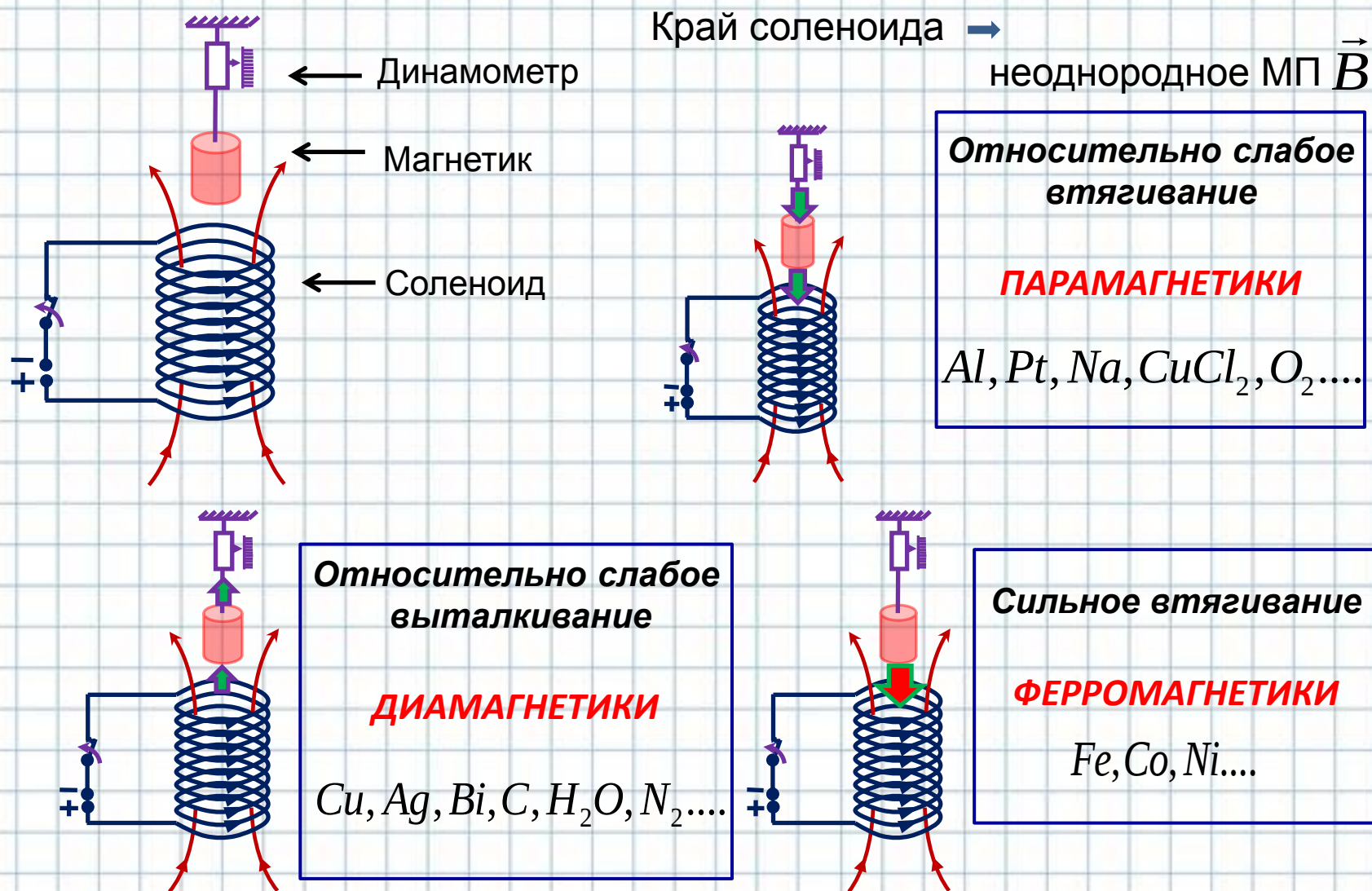
<https://youtu.be/bQKVt27SUR0>

Магнетики – вещества, вступающие во взаимодействие с МП

Магнетики – вещества, способные под действием МП приобретать магнитный момент (намагничиваться)

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.1. Намагничивание вещества. Намагниченность



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.1. Намагничивание вещества. Намагниченность

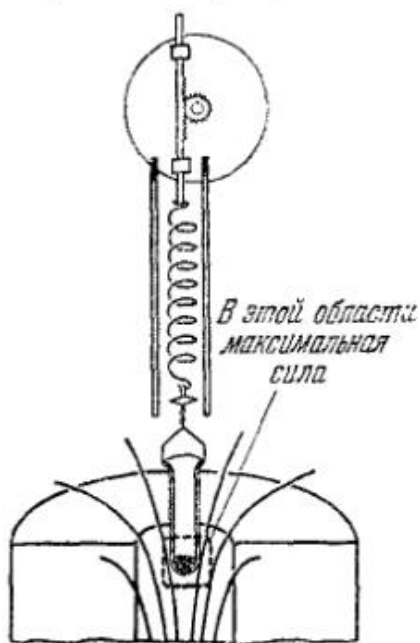


Рис. 10.2. Приспособление для измерения силы, действующей на вещество в магнитном поле.

Сила, действующая на образец, весом в 1 г в магнитном поле
($B_z = 18\,000$ гс, $dB_z/dz = 1700$ гс/см)

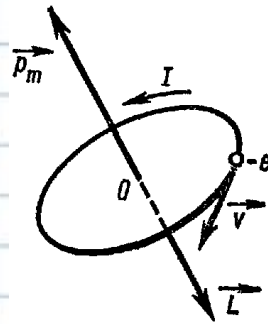
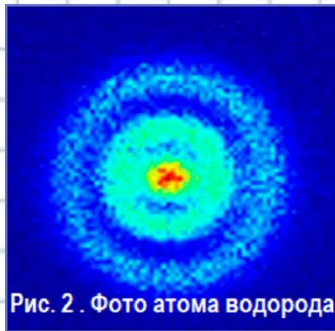
Вещество	Формула	Сила *), дин
Диамagnetики		
Вода	H_2O	—22
Медь	Cu	—2,6
Свинец	Pb	—37
Хлористый натрий	$NaCl$	—15
Кварц	SiO_2	—16
Сера	S	—16
Алмаз	C	—16
Графит	C	—110
Жидкий азот	N_2	—10 (78° K)
Парамагнетики		
Натрий	Na	+20
Алюминий	Al	+17
Хлористая медь	$CuCl_2$	+280
Сернистый никель	$NiSO_4$	+830
Жидкий кислород	O_2	+7500 (90° K)
Ферромагнетики		
Железо	Fe	+400 000
Магнетит	Fe_3O_4	+120 000

*) Направление силы: вниз+, вверх—. Все измерения сделаны при температуре 20°С, за исключением отмеченных в скобках.

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.1. Намагничивание вещества. Намагниченность

Гипотеза Ампера: в веществе циркулируют микроскопические токи (молекулярные, элементарные, микротоки)



«...для учения о магнетизме существенно не наглядность движения, а механический и магнитный моменты, связанные с ЭТИМ движением.»

По современным представлениям **магнетизм вещества обусловлен:**

орбитальным движением электронов вокруг ядер $(\vec{p}_{me}^{орб})$

собственным вращением (спином) электронов $(\vec{p}_{me}^{спин})$

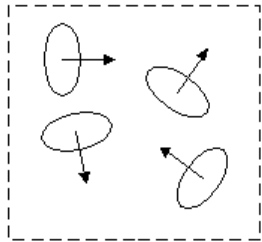
собственным вращением (спином) ядер $(\vec{p}_{мя} \ll \vec{p}_{me})$

Магнитный момент атома:
$$\vec{p}_m = \vec{p}_{мя} + \sum_i (\vec{p}_{me}^{орб})_i + \sum_i (\vec{p}_{me}^{спин})_i$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.1. Намагничивание вещества. Намагниченность

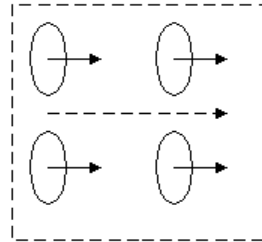
При $\vec{B}_0 = 0$



$$\sum_i (\vec{p}_m)_i = 0$$

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

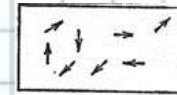
При $\vec{B}_0 \neq 0$



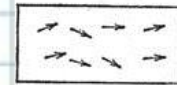
$$\sum_i (\vec{p}_m)_i \neq 0$$

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

Диэлектрики



При $\vec{E}_0 = 0$



При $\vec{E}_0 \neq 0$

$$\sum_i (\vec{p})_i \neq 0$$

$$\vec{E}' \neq 0$$

Вещество намагничивается

Диэлектрик поляризуется

Результирующее МП

Результирующее поле в

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

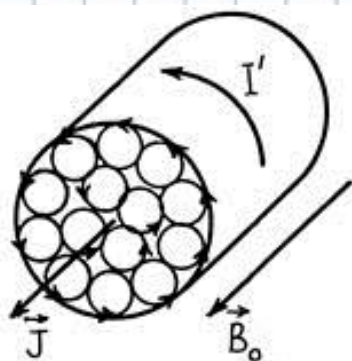
диэлектрике: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

Усреднение по физически
малому объему:

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{макро}} = \langle \vec{B}_{\text{микро}} \rangle = \frac{\sum \vec{B}}{\Delta V}$$

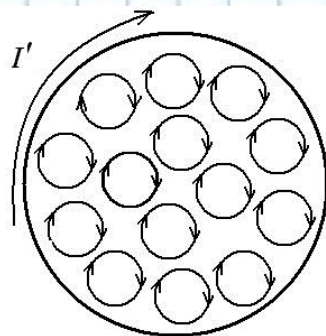
6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.1. Намагничивание вещества. Намагниченность



**Однородный магнетик (стержень)
в однородном МП**

Некомпенсированными
остаются только участки
микротоков, примыкающие к
поверхности стержня



Суммарное действие молекулярных
токов (т.е. возбуждаемое МП) будет
таким, какое вызвал бы
макроскопический ток, текущий
по поверхности стержня
(ток намагничивания I')

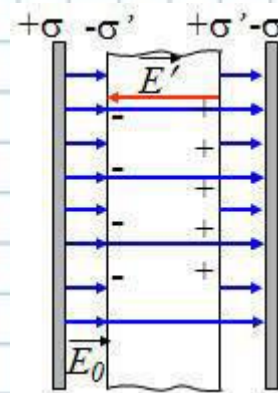
Ток намагничивания возникает
вследствие ориентации микротоков
под действием внешнего МП

**Неоднородное
распределение
микротоков**

→ **объемные токи намагничивания**

Диэлектрики

В однородном
ЭСП однородный
диэлектрик:



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.1. Намагничивание вещества. Намагниченность

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

↑
токи проводимости I

↖
токи намагничивания I'

токи проводимости I

$$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Теорема о циркуляции:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I + I')$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 (\vec{j} + \vec{j}')$$

Диэлектрики

$$\int \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon} + \frac{q'}{\epsilon'}$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.1. Намагничивание вещества. Намагниченность

**Вектор намагничивания
(намагниченность):**

$$\vec{j} = \frac{\sum_i (\vec{p}_m)_i}{\Delta V}$$

$$\vec{j} = \frac{\int \vec{p}_m dV}{\Delta V}$$

$$\vec{j} = n \langle \vec{p}_m \rangle$$

n – концентрация микротоков

Диэлектрики
Вектор поляризации
(поляризованность):

$$\vec{P} = \frac{\sum_i (\vec{p})_i}{\Delta V}$$

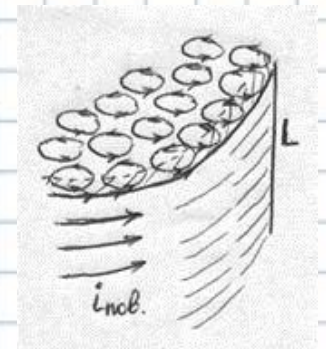
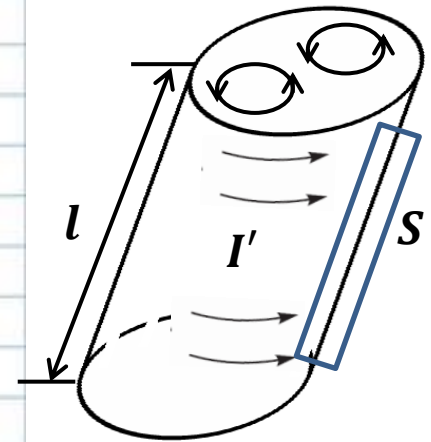
Обозначения:

I' – сила тока (ток намагничивания)

$\vec{j}$ – плотность тока $I = \int (\vec{j}, d\vec{S})$

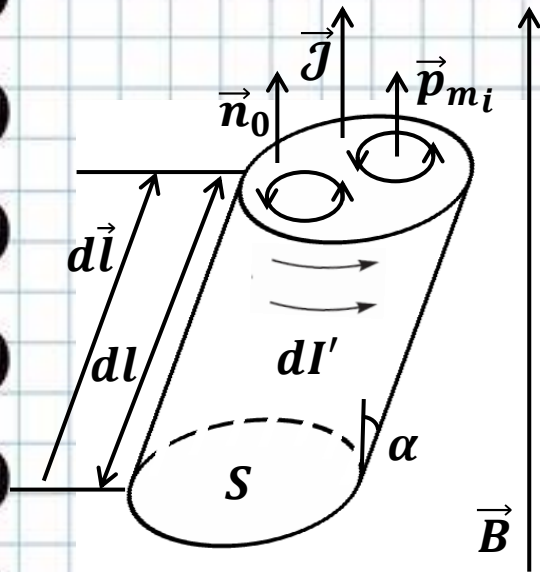
i' – поверхностный ток (намагничивания),
приходящийся на единицу длины $i' = \frac{dI'}{dl}$

$\vec{j} (\vec{M}, \vec{I})$ – намагниченность



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.2. Циркуляция намагниченности



Найдем связь вектора намагничивания с
поверхностной плотностью тока
намагничивания

Диэлектрики
 $(\vec{P}, \vec{n}) = P_n = \sigma'$

Элемент однородного и изотропного магнетика
в виде цилиндра в однородном МП:
образующие составляют угол α с $\vec{B}$
основания перпендикулярны $\vec{B}$

Магнитный момент элемента магнетика:

$$d\vec{p}_m = \vec{J} dV \quad dV = S dl \cos \alpha$$

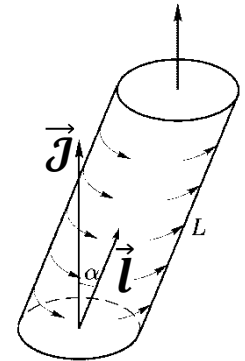
$$d\vec{p}_m = dI' S \vec{n}_0 \rightarrow \vec{J} dl \cos \alpha = dI' S \vec{n}_0 \rightarrow dI' = (\vec{J}, d\vec{l})$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.2. Циркуляция намагниченности

$$i' = J \cos \alpha = J_l$$

линейная плотность поверхностного тока намагничивания вдоль произвольного направления равна проекции вектора намагничивания на это направление

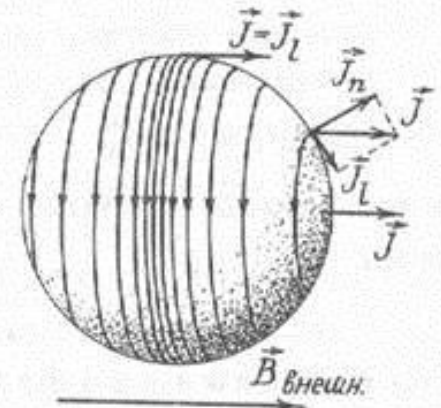


$$dI' = (\vec{J}, d\vec{l})$$

т.е. определяется только осевой составляющей вектора намагничивания

Диэлектрики
 $(\vec{P}, \vec{n}) = P_n = \sigma'$

Поверхностные молекулярные токи в случае однородно намагниченного шара.
Линейная плотность поверхностного тока максимальна на «экваторе» и убывает до нуля при приближении к полюсам



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.2. Циркуляция намагниченности

$$dI' = (\vec{J}, d\vec{l})$$



Циркуляции намагниченности

$$I' = \oint \vec{J} d\vec{l}$$

$$\text{rot} \vec{J} = \vec{j}'$$

$\vec{J} = \text{const}$ (намагниченность однородна) $\rightarrow \vec{j}' = 0$

Диэлектрики

$$\int \vec{P} d\vec{S} = -q'$$

$$\text{div} \vec{P} = -\rho'$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.3. Напряженность МП. Закон полного тока для МП в веществе

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I + I') \rightarrow \oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \oint \vec{j} d\vec{l}$$

Диэлектрики

$$\oint \left(\frac{\vec{B} d\vec{l}}{\mu_0} - \vec{j} d\vec{l} \right) = I$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\int \vec{D} d\vec{S} = q$$

Напряженность магнитного поля:

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

$\rightarrow$

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I$$

Теорема о циркуляции напряженности МП (закон полного тока в веществе)

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}$$

содержит только (известные) токи проводимости

В вакууме

$$\vec{j} = 0 \rightarrow$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$$

Диэлектрики

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{P} = 0$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.4. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость

По силе взаимодействия с магнитным полем все вещества разделяются на **сильномагнитные** и **слабомагнитные**

Сильномагнитные (ферромагнетики):

$\mathcal{J} = \mathcal{J}(H)$ – нелинейная и неоднозначная зависимость $\rightarrow$

наблюдается гистерезис

Слабомагнитные (пара- и диамагнетики):

$\vec{\mathcal{J}} = \chi_m \vec{H}$ – линейная зависимость

Диэлектрики

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$$

χ_m – магнитная восприимчивость вещества

$$\chi > 0$$

Свойства:

безразмерна

$$\chi_m > 0, \quad \chi_m < 0$$

явл. числом для изотропных сред, тензором – для анизотропных сред

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.4. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость

Для изотропных сред:

Диэлектрики

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} = \mu_0 \vec{H} + \chi_m \mu_0 \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$$

$$1 + \chi = \varepsilon$$

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$1 + \chi_m = \mu$$

μ – магнитная проницаемость среды

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

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

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$$

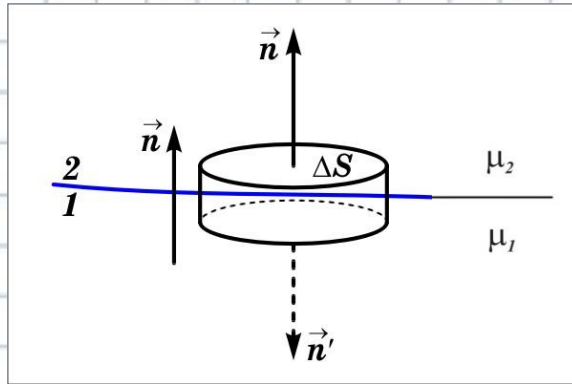
магнитная проницаемость среды показывает во сколько раз
индукция МП в веществе отличается от индукции МП в
вакууме при тех же значениях $\vec{H}$ токов, создающих поле

$$\chi_m > 0, \quad \mu > 1 \quad - \text{парамагнетики} \quad \vec{J} \uparrow \uparrow \vec{H}$$

$$\chi_m < 0, \quad \mu < 1 \quad - \text{диамагнетики} \quad \vec{J} \uparrow \downarrow \vec{H}$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.5. Граничные условия для В и Н на границе 2-х магнетиков



$$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0 = \oint (B_{n_2} S) + (B_{n_1} \cdot S)$$

$$h \rightarrow 0$$

$$B_{2n}S - B_{1n}S = 0$$

На границе раздела 2-х магнетиков

$$B_{2n} = B_{1n}$$

нормальная компонента вектора индукции непрерывна,

$$B = \mu_0 \mu H \Rightarrow$$

$$\mu_2 H_{2n} = \mu_1 H_{1n}$$

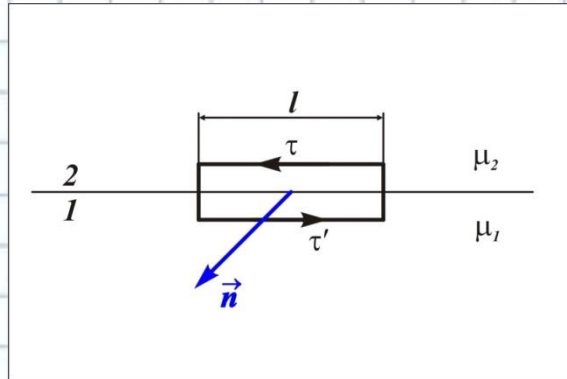
$$\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

нормальная компонента вектора напряженности претерпевает разрыв при

$$\mu_2 \neq \mu_1$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.5. Граничные условия для В и Н на границе 2-х магнетиков



$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I, \quad I - \text{ток проводимости}$$

$$h \rightarrow 0$$

$$H_{2\tau}l - H_{1\tau}l = j_n l \quad I = \int \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

→ нормал. сеч-я.

На границе раздела 2-х магнетиков

$$H_{2\tau} - H_{1\tau} = j_n$$

разрыв тангенциальной составляющей напряженности МП происходит лишь при наличии токов проводимости на границе раздела, в отсутствие токов тангенциальная компонента вектора напряженности непрерывна,

Тогда

$$I = 0$$

:

$$H_{2\tau} = H_{1\tau}$$

,

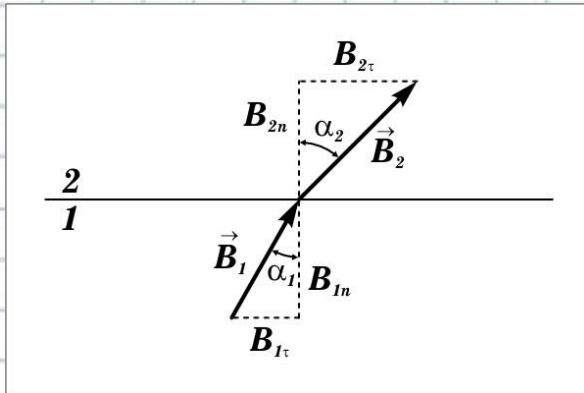
$$\frac{B_{2\tau}}{\mu_2} = \frac{B_{1\tau}}{\mu_1}$$

, т.е. $B = \mu_0 \mu H$

тангенциальная составляющая индукции МП даже в отсутствие токов претерпевает скачок при $\mu_2 \neq \mu_1$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.5. Граничные условия для В и Н на границе 2-х магнетиков



$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{B_{2\tau} \cancel{B_{1n}}}{\cancel{B_{2n}} B_{1\tau}} = \frac{B_{2\tau}}{B_{1\tau}}, \quad \frac{B_{2\tau}}{B_{1\tau}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

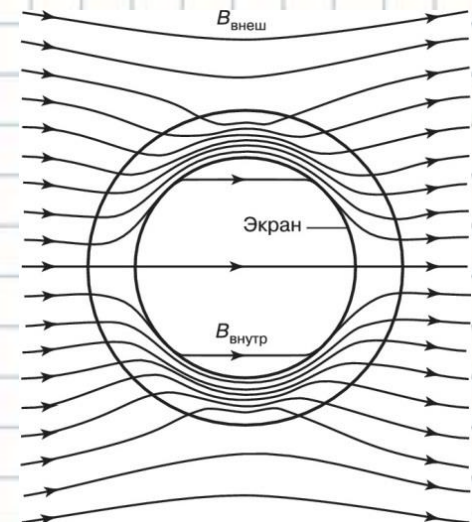
$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

$$\mu_2 > \mu_1$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 > \operatorname{tg} \alpha_1, \quad \alpha_2 > \alpha_1$$

При переходе в магнетик с большей магнитной проницаемостью линии магнитной индукции отклоняются от нормали к поверхности →

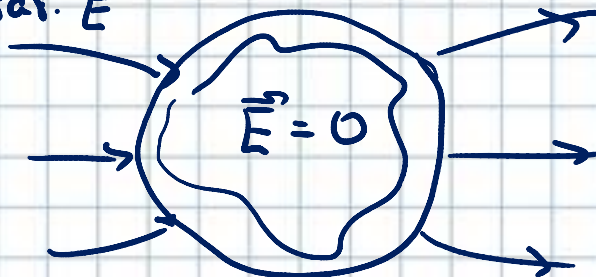
Магнитная защита



сгущение линий магнитной индукции в среде с большей магнитной проницаемостью

электростат. $\vec{E}$

Me:



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.6. Магнитомех-е явления. Спин. Гиромагнитное отношение

$$\vec{L} = [\vec{r}, \vec{v}] \quad \vec{p}_m = \frac{q}{T} S \vec{n}$$

Гиромагнитное отношение

$$\gamma = \frac{p_m}{L} = -\frac{e}{2m} < 0$$

Магнитомеханические (гиромагнитные) явления – явления, обусловленные взаимосвязью магнитного и механического моментов микрочастиц – носителей магнетизма:

**намагничение магнетика приводит к его вращению;
вращение магнетика вызывает его намагничение**

Экспериментально
подтверждение:

Эйнштейн и де Хаас (1915г.)
Барнетт (1915г.)

$$\gamma_s = -\frac{e}{m}$$

Кроме орбитальных (магнитного и механ-го) моментов электрон обладает **собственными** (магнитным и механ-ким) **моментами**, для которых гиромагнитное отношение, совпадает с экспериментальными данными

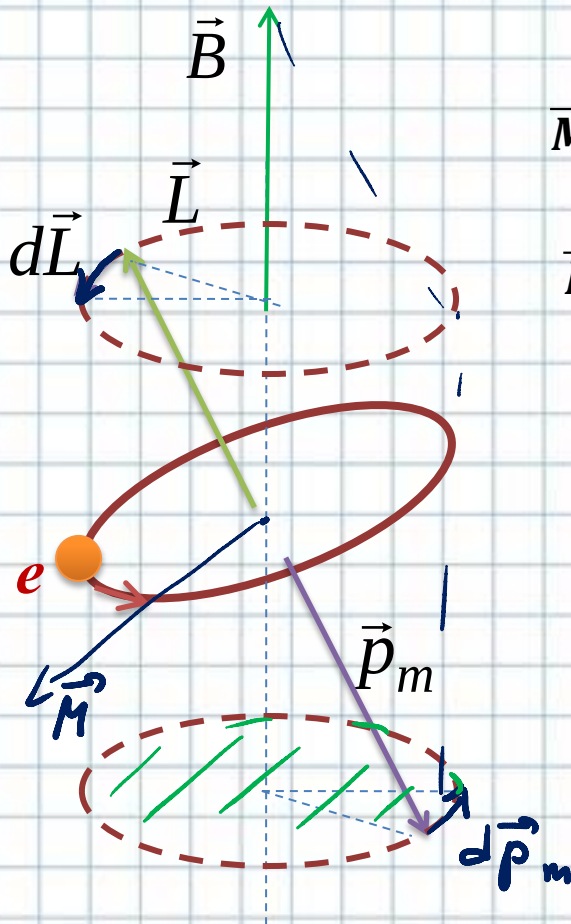
$$\gamma_s = \frac{p_{ms}}{L_s} \quad \text{Спин: } L_s = \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi} = \frac{1}{2} \hbar$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\text{Магнетон Бора: } p_{ms} = \frac{\hbar e}{2m}$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.7. Диамагнетики



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

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$

Прецессия:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = [\vec{\Omega}, \vec{L}]$$

Частота (ларморова) прецессии:

$$\Omega = \frac{M}{L}$$

$$\Omega = \frac{eB}{2m}$$

$$\Omega = \gamma B$$

Допол. движение: $I' = -\frac{e}{T} = -\frac{e}{2\pi} \omega$

(вращ. с $\vec{e} \in \vec{B}$

плоскости $\perp \vec{B}$) $I' = -\frac{e^2 B}{4\pi m}$

$$\rho'_m = I' \cdot S = -\frac{e^2 B S}{4\pi m} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^2 S H}{m}$$

$$B = \mu_0 H$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.7. Диамагнетики

н. показать, что $S = \frac{2}{3} \pi \langle r^2 \rangle \Rightarrow p'_m = -\frac{\mu_0}{6} \frac{e^2 \langle r^2 \rangle H}{m}$

Для атома:

$$p_{mat} = \sum_{i=1}^Z p'_m = -\frac{\mu_0}{6} \frac{e^2 H}{m} \sum_{i=1}^Z \langle r^2 \rangle$$

$$\sum_{i=1}^Z \langle r^2 \rangle = Z \cdot \langle a^2 \rangle$$

$$J = n \cdot p_{mat} = -\frac{\mu_0 e^2 H}{6 m} \cdot n \cdot Z \langle a^2 \rangle$$

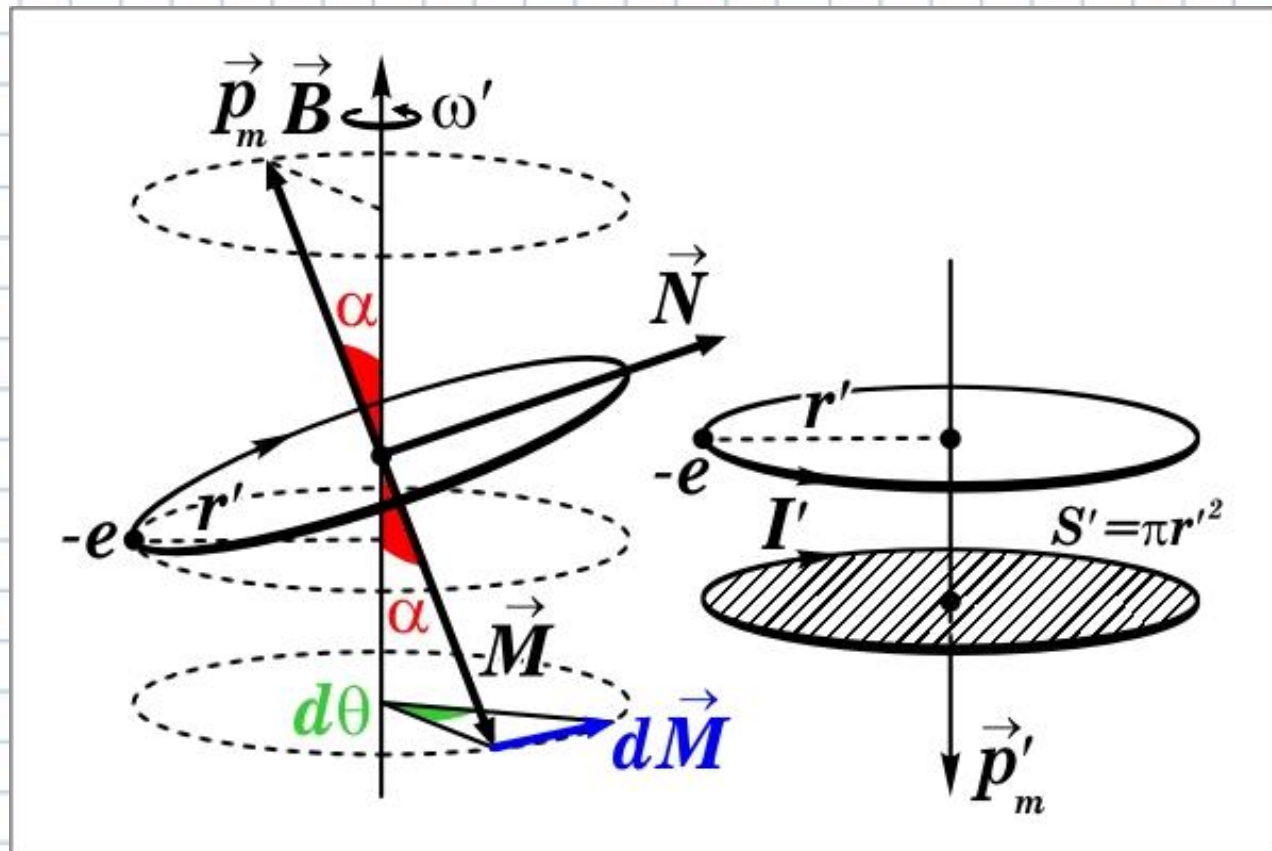
$$\chi = \frac{J}{H} = -\frac{\mu_0 e^2 \langle a^2 \rangle n Z}{6 m}$$

$a \sim 10^{-10} \text{ м}$
 $n \sim 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$

$$\chi \sim -10^{-6} \cdot Z \quad (\text{экспер-т})$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.7. ДИАМАГНЕТИКИ



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.7. ДИАМАГНЕТИКИ

Для диамагнетиков:

—

$$\chi \neq \chi(T)$$

$$\chi < 0$$

—

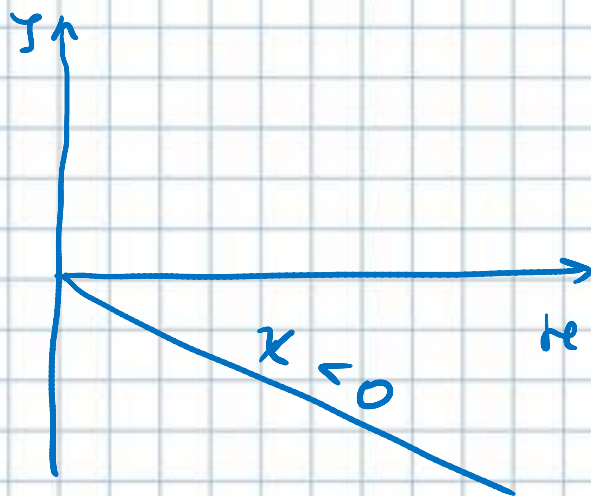
$$\chi \neq \chi(H)$$

$$J = \chi H$$

—

$$\chi \sim Z$$

—



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.8. Парамагнетики

Диамagnetики - не $\vec{p}_m$ - в отсутствие
извн. $\vec{p}_m$ - во внем. поле.

Парамагнетики - м-и обладают $\vec{p}_m$ и в
отсутствие мп.

Но $\sum \vec{p}_{m_i} = 0$. (в отст.-е поле) из-за kT .

тип $\vec{B}_0$:
 $\vec{p}_m^{\text{орб}}$ $\uparrow \uparrow \vec{B}_0$
 $\vec{p}_m^{\text{спин}}$ $\uparrow \uparrow \vec{B}_0$

$$\chi \sim \frac{1}{T}$$

Распределение Больцмана

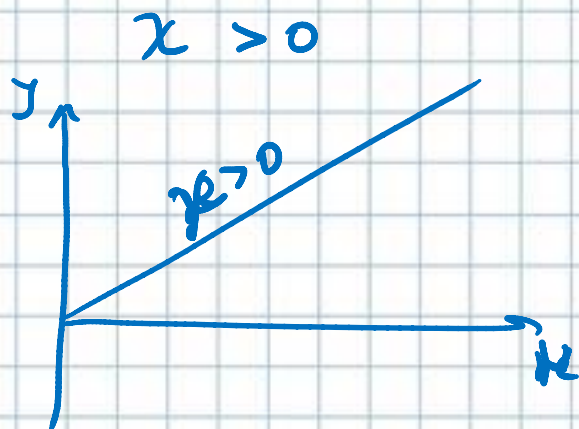
$$W = -(\vec{p}_m, \vec{B})$$

Закон Кюри:

$$\chi = \frac{C}{T}$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.8. Парамагнетики



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

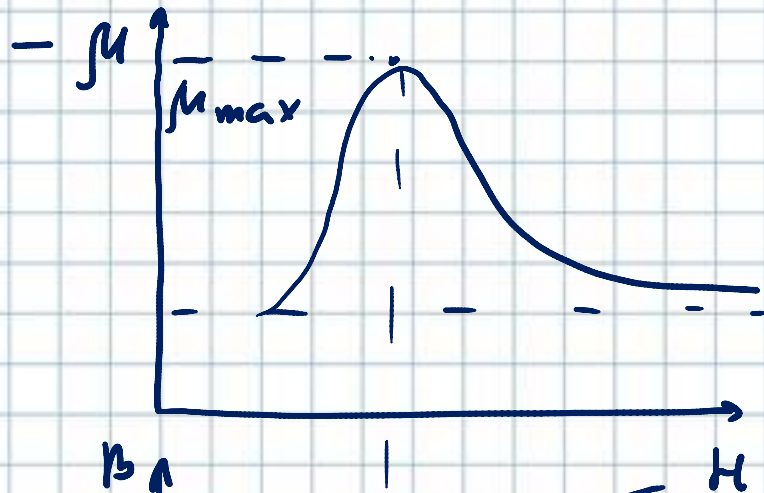
6.9. Ферромагнетики

св. в-ва:

— обладают J даже в отсут-е внеш. МП.

— $\chi = \chi(H) \Rightarrow B = B(H)$ — не линейная

$$J = J(H)'$$

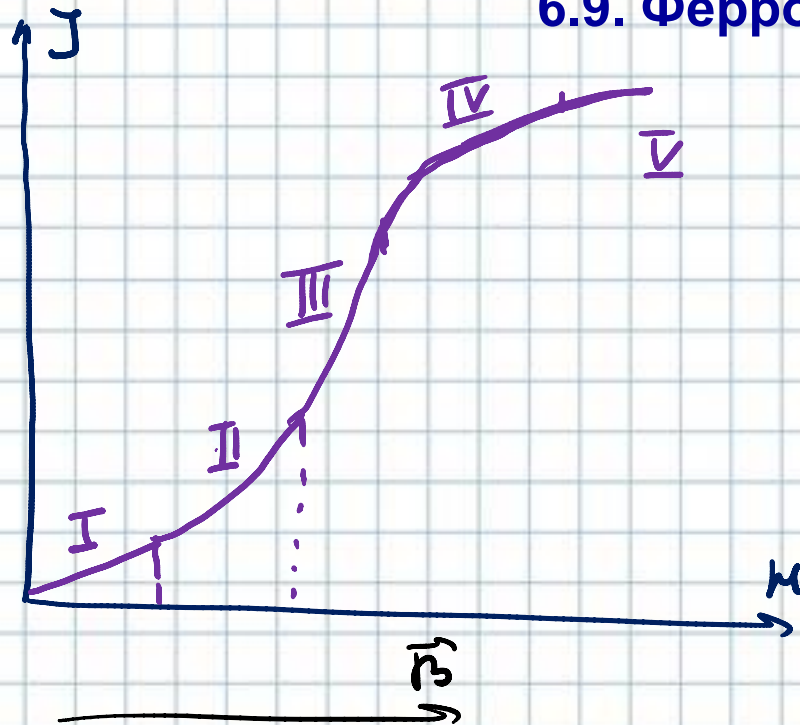


— $\chi = \chi(T)$

— гистерезис

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.9. Ферромагнетики

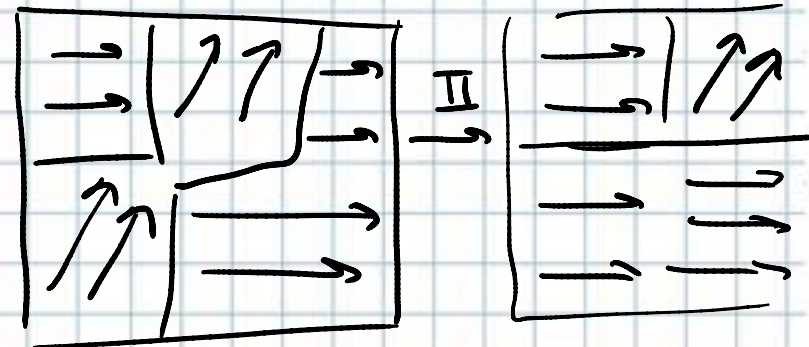
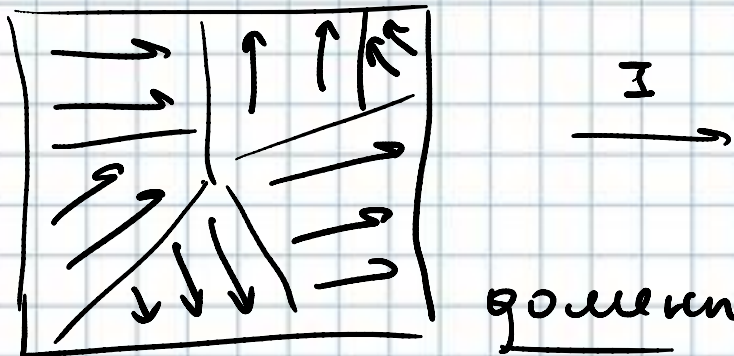


- квант. теория.

- спин. магн. моменты
 $\vec{e}\vec{e}$

Участок I - область
обратного
магнетизма

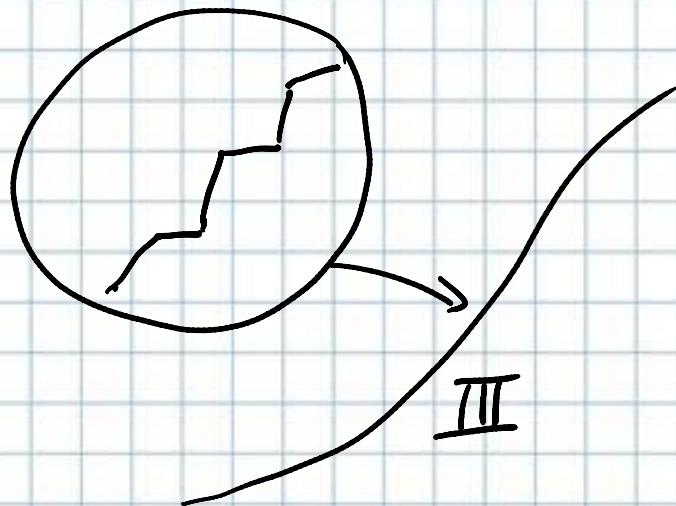
Участок II - квант.
зависимость
обрат. процес + необрат.
процес



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.9. Ферромагнетики

Участок III



Участок IV

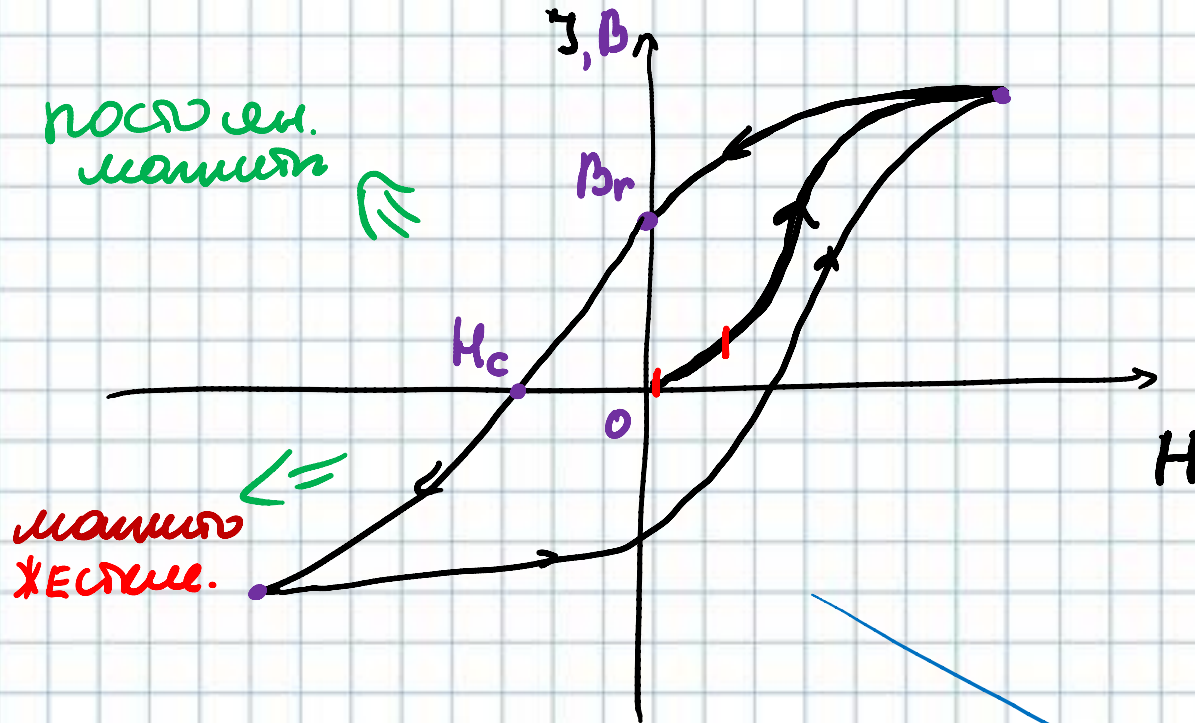
Завершение быстрого
всех роменов
полю

Участок V
намагничен.

скачки Баркхаузена
нагрев
необрат. процесс

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.9. Ферромагнетики



$$\chi = \chi(T)$$

при $T = \theta$
ферр. $\rightarrow$ пар-к.

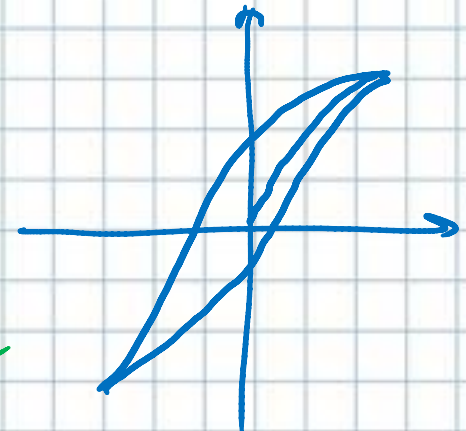
$$\chi = \frac{C}{T - \theta}$$

3-й Кюри-Вейсса
 θ - темп-ра Кюри.

B_r (retained) - оставшееся

H_c (coercive) - принудительный
магнитный

трансформатор



6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.10. Другие виды магнетиков

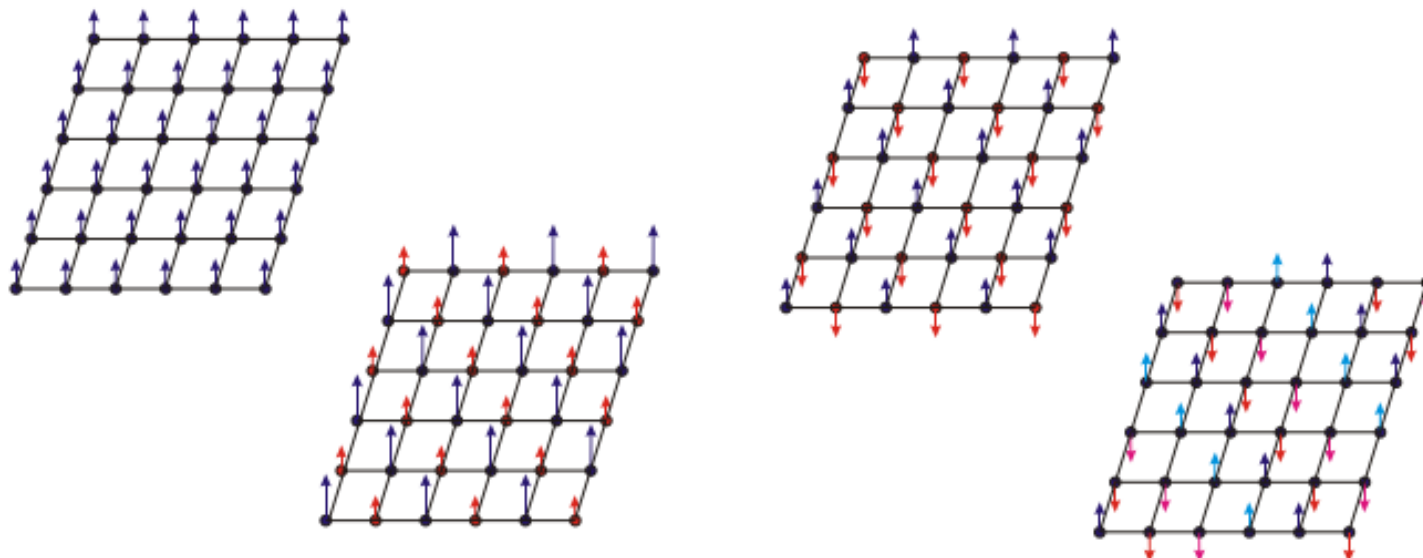


Рисунок 1: Схематическое изображение различных типов упорядочения на двумерной решётке. Цветом выделены элементы одной подрешётки. Слева направо: ферромагнетик, коллинеарный ферримагнетик, коллинеарная антиферромагнитная структура неелевского типа с двумя подрешётками, коллинеарная антиферромагнитная структура типа "два вверх-два вниз" с четырьмя подрешётками.

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.10. Другие виды магнетиков

Основными видами магнитного упорядочения являются следующие:

1. Парамагнетик (неупорядоченный магнетик). Отсутствует средний магнитный момент магнитных ионов и отсутствуют незатухающие корреляции между магнитными моментами на разных узлах.
2. Ферромагнетик. Существует полный магнитный момент у всего кристалла. В случае, если в кристалле локальные намагниченности в различных позициях различаются по величине или направлению (в кристалле есть несколько *магнитных подрешёток*), то такой ферромагнетик называют ферримагнетиком. Температуру перехода в ферромагнитное состояние называют точкой Кюри или температурой Кюри.
3. Антиферромагнетик. Существует средний магнитный момент у магнитных ионов, магнитные моменты расположены регулярно, но полной намагниченности у кристалла нет. Во многих случаях антиферромагнетик также можно разбить на несколько подрешёток, простейшей моделью является двухподрешёточный антиферромагнетик в котором две подсистемы параллельно упорядоченных магнитных моментов сориентированы антипараллельно и полностью компенсируют полный магнитный момент. Если подрешётки параллельны, то говорят о коллинеарном антиферромагнетике, если подрешётки не параллельны, то говорят о неколлинеарном антиферромагнетике. Температуру перехода в антиферромагнитное состояние называют точкой Нееля или температурой Нееля.

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

6.11. Применение

Области применения магнитных материалов:

- Акустические системы, реле и бесконтактные датчики (магнитные мины)
- Электромашины, генераторы переменного тока
- Магнитные сепараторы, холодильники
- Магнитные элементы кодовых замков и охранной сигнализации
- Тахогенераторы, датчики положения, электроизмерительные приборы
- Медицина (магнитотерапия, магнитные матрацы)
- Магнитное покрытие для полов офисов и промышленных помещений
- Магнитные компоненты для глушителей автомобилей
- Периферийные устройства компьютеров, мобильные телефоны, фотоаппараты, кинокамеры
- Магнитные устройства для обработки воды, углеводородного топлива, масел; магнитные фильтры
- Магнитные устройства для использования в рекламе, торговле, при оснащении выставок, конференций, спортивных мероприятий т. д.
- Неразрушающие методы контроля (Магнитопорошковый контроль)

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

- Магнетизм и магнитные свойства веществ
- <https://youtu.be/6-SKiShuaHU>

**Диамagnetная Левитация Пиролитический
Графит Магнитный Подвес**