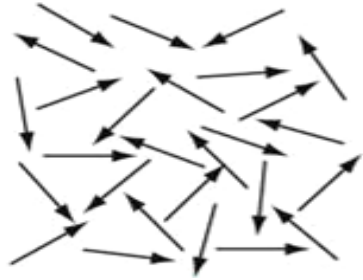


**Сегодня:
понедельник, 20
ноября 2023 г.**

Лекция 18. МАГНЕТИКИ (НАМАГНИЧИВАЮЩИЕСЯ СРЕДЫ)

- **Магнитное поле в веществе**
- **Намагниченность**
- **Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость**

Виды магнетиков



магнетики

$$\chi \leq 10^6$$

магнитно-
неупорядоченные

магнитно-
упорядоченные

диамагнетики

парамагнетики

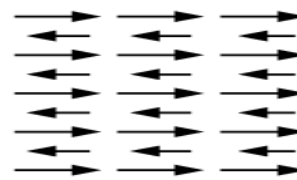
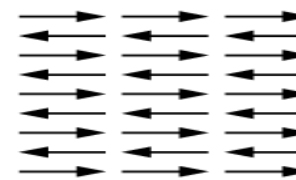
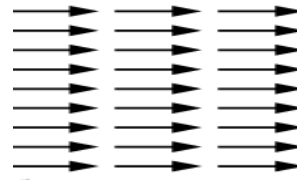
ферромагнетики

антиферромагнетики

ферримагнетики

$$\chi \approx -(1 \div 10) 10^{-6}$$

$$\chi \approx (1 \div 10^3) 10^{-6}$$



N_2, CO_2, H_2O, Ag, Bi

O_2, Al, Pt

Механизмы намагничивания различных магнетиков

В случае диа- и парамагнетиков можно использовать полуклассическое–полуквантовое представление атома на основе боровской теории. Такой подход позволяет описать основные закономерности намагничивания вещества.

Описание свойств ферромагнетиков требует привлечения таких понятий, как спин электрона, обменные силы, условия квантования, поэтому классическое описание становится неприемлемым.

Парамагнетизм

Атомы парамагнетиков обладают собственным магнитным моментом \vec{p}_{m0} . В отсутствие внешнего поля все моменты компенсируют друг друга

При помещении парамагнетика во внешнее магнитное поле на атом будет действовать момент сил

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_{m0}, \vec{B} \right]$$

Он будет стремиться повернуть атом так, чтобы вектор \vec{p}_{m0} был направлен вдоль вектора \vec{B} .

Этому будет препятствовать тепловое движение атомов, оказывающее дезориентирующее воздействие.

В результате двух разнонаправленных тенденций между векторами \vec{p}_{m0} и \vec{B} будет существовать некоторый угол α , и атом будет обладать потенциальной энергией

$$W = -\left(\vec{p}_{m0}, \vec{B} \right) = -p_{m0} \cdot B \cos \alpha$$

В состоянии термодинамического равновесия распределение молекул по энергиям подчиняется распределению Больцмана.

Если N — число молекул в единице объема, то число молекул dN , дипольные моменты которых составляют с вектором α угол, лежащий в диапазоне $(\alpha, \alpha + d\alpha)$, будет равно

$$dN = A \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) d\Omega$$

$d\Omega = 2\pi \sin \alpha \cdot d\alpha$ - элемент телесного угла

A — константа, определяемая из условия нормировки $N = \int dN$

$$A = \frac{N}{\int_0^\pi \exp\left(\frac{p_{m0} \cdot B \cos \alpha}{kT}\right) 2\pi \sin \alpha d\alpha}$$

Среднее значение проекции магнитного момента на направление поля:

$$\langle p_m \rangle = \frac{1}{N} \int_0^\pi p_{m0} \cdot \cos \alpha dN$$

$$\langle P_m \rangle = P_{m0} \frac{\int_0^\pi \cos \alpha \exp\left(\frac{P_{m0} \cdot B \cos \alpha}{kT}\right) \sin \alpha d\alpha}{\int_0^\pi \exp\left(\frac{P_{m0} \cdot B \cos \alpha}{kT}\right) \sin \alpha d\alpha}$$

Из симметрии задачи следует, что средние значения двух других проекций равны нулю.

Для удобства введем параметр $\beta = \frac{P_{m0} B}{kT}$

и вычислим интеграл
в знаменателе

$$J(\beta) = \int_0^\pi \exp(\beta \cos \alpha) \sin \alpha d\alpha$$

$$= -\frac{1}{\beta} \exp(\beta \cos \alpha) \Big|_0^\pi = \left\{ \text{sh} \beta = \frac{e^\beta - e^{-\beta}}{2} \right\} = \frac{2}{\beta} \text{sh} \beta$$

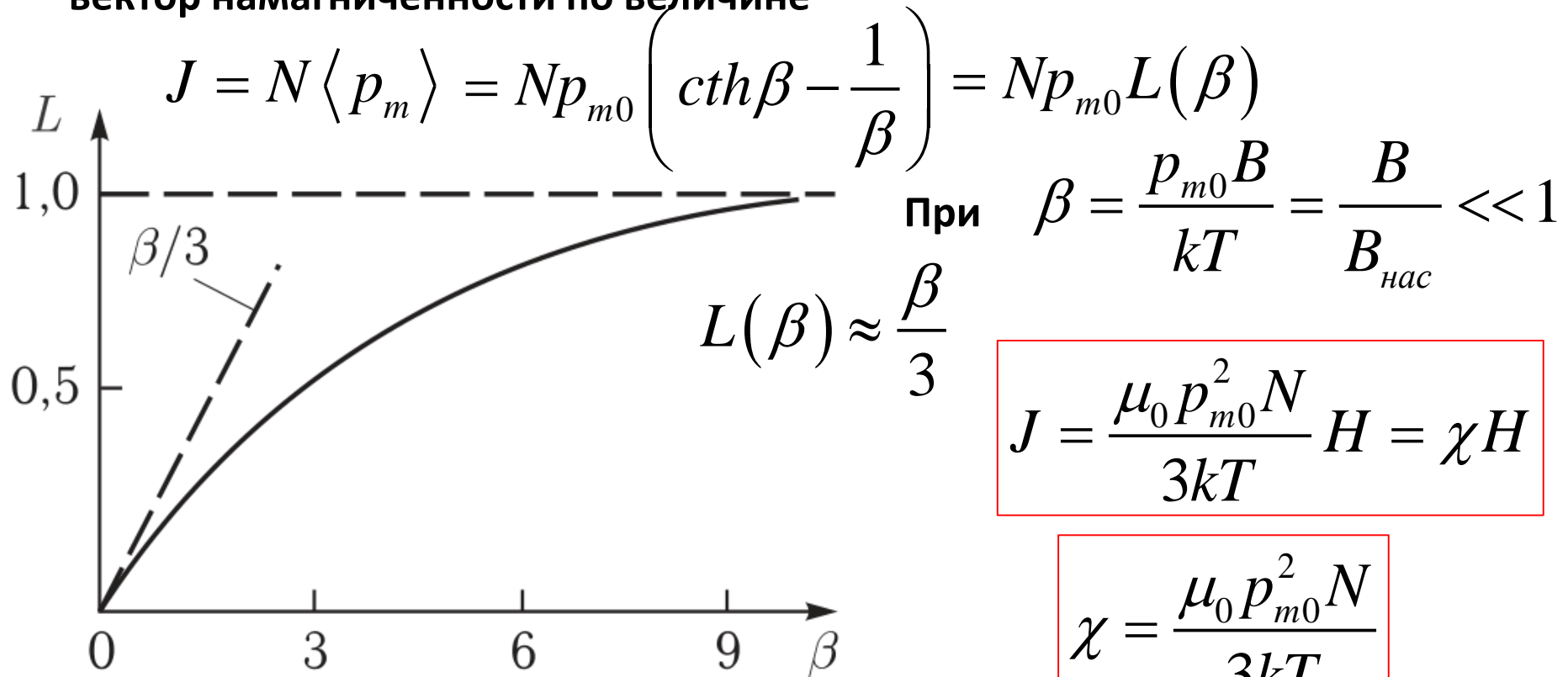
интеграл в числителе равен
производной
по параметру:

$$J'(\beta) = \left[\frac{2}{\beta} \text{sh} \beta \right]' = \frac{2}{\beta} \text{ch} \beta - \frac{2}{\beta^2} \text{sh} \beta$$

$$\langle p_m \rangle = p_{m0} \frac{J'(\beta)}{J(\beta)} = p_{m0} \left(\operatorname{cth} \beta - \frac{1}{\beta} \right) = p_{m0} L(\beta)$$

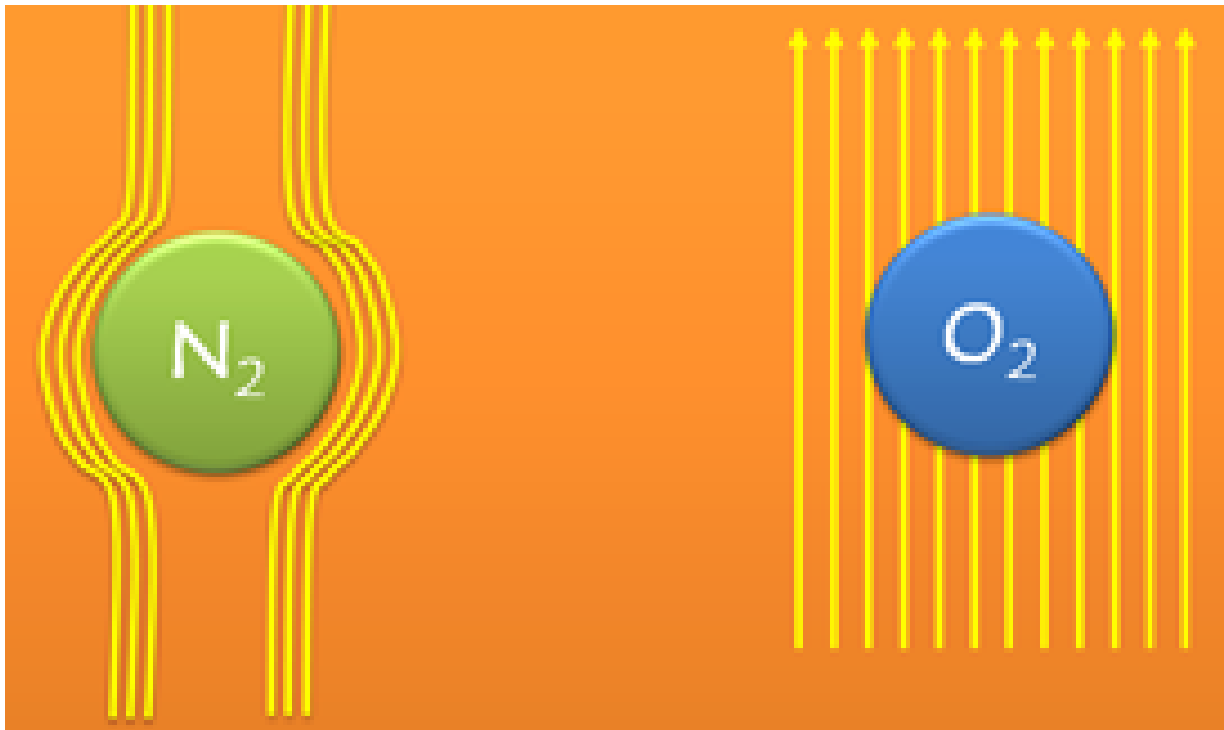
$$L(\beta) = \operatorname{cth} \beta - \frac{1}{\beta} \quad - \text{ функция Ланжевена} \quad \operatorname{cth} \beta = \frac{\operatorname{ch} \beta}{\operatorname{sh} \beta}$$

вектор намагниченности по величине

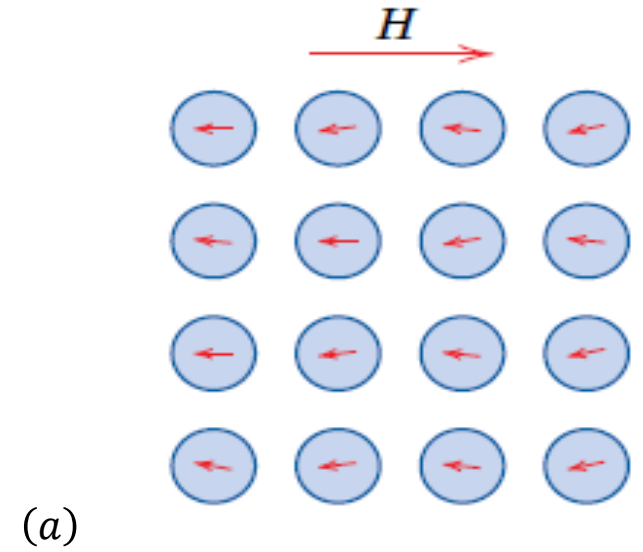
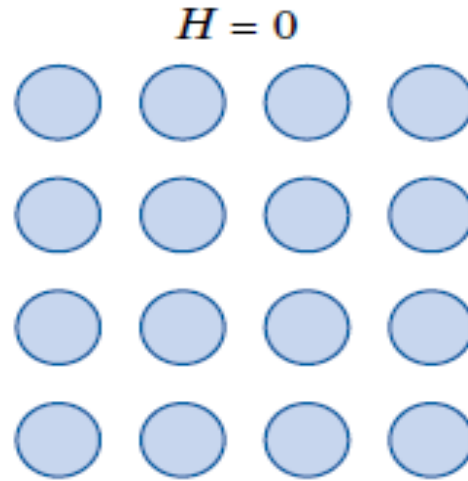


1. **Диамагнетики ($\chi < 0$, $\mathbf{J} \uparrow\downarrow \mathbf{H}$),**
магнитное поле **ослабевает** в веществе

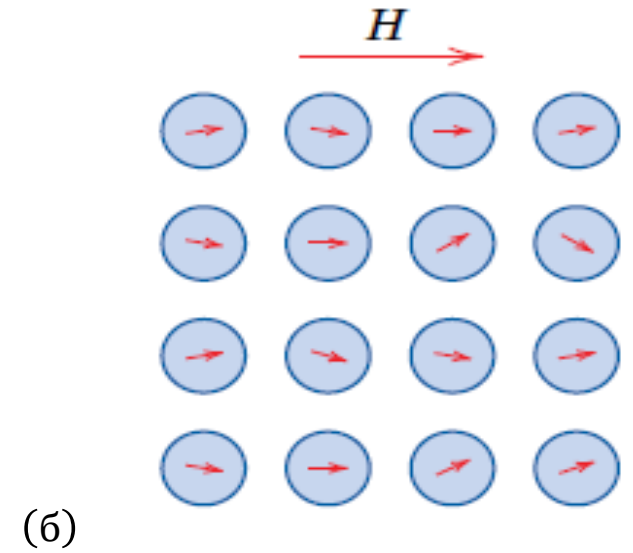
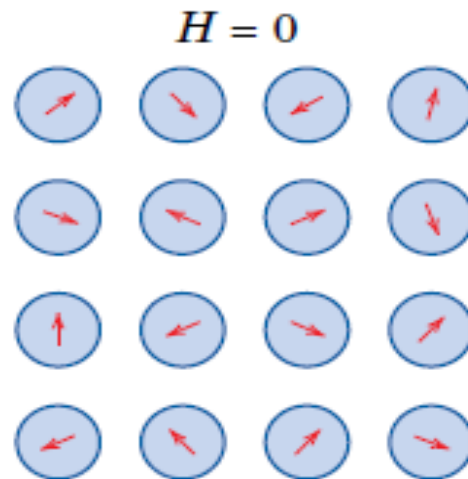
2. **Парамагнетики ($\chi > 0$, $\mathbf{J} \uparrow\uparrow \mathbf{H}$),**
магнитное поле **слабо усиливается**
в веществе

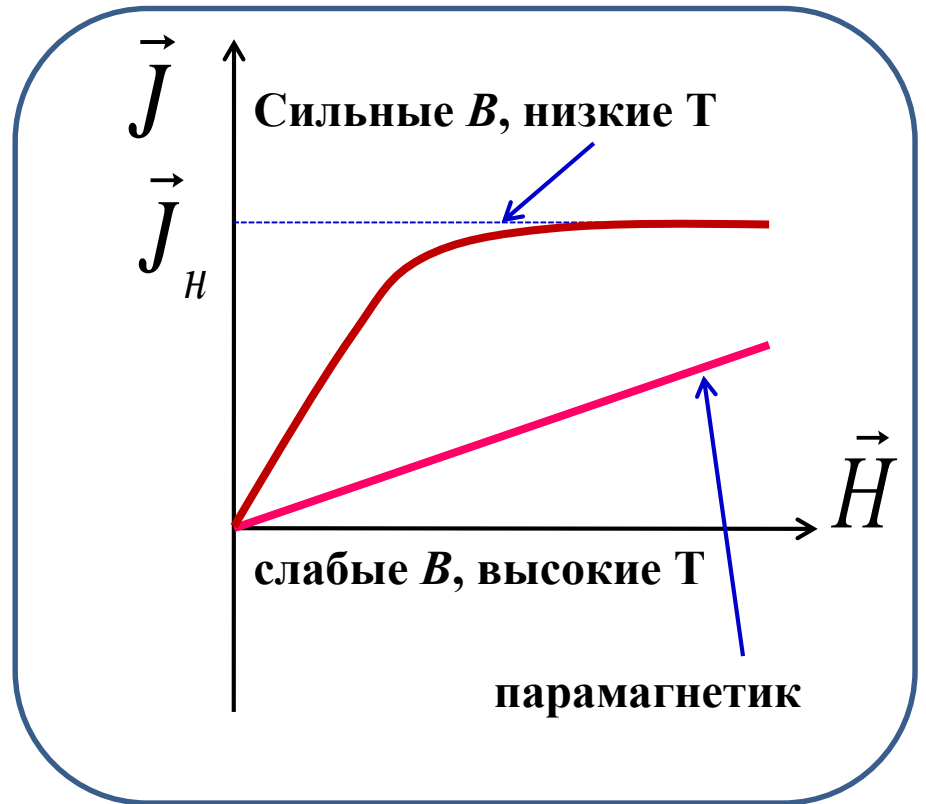
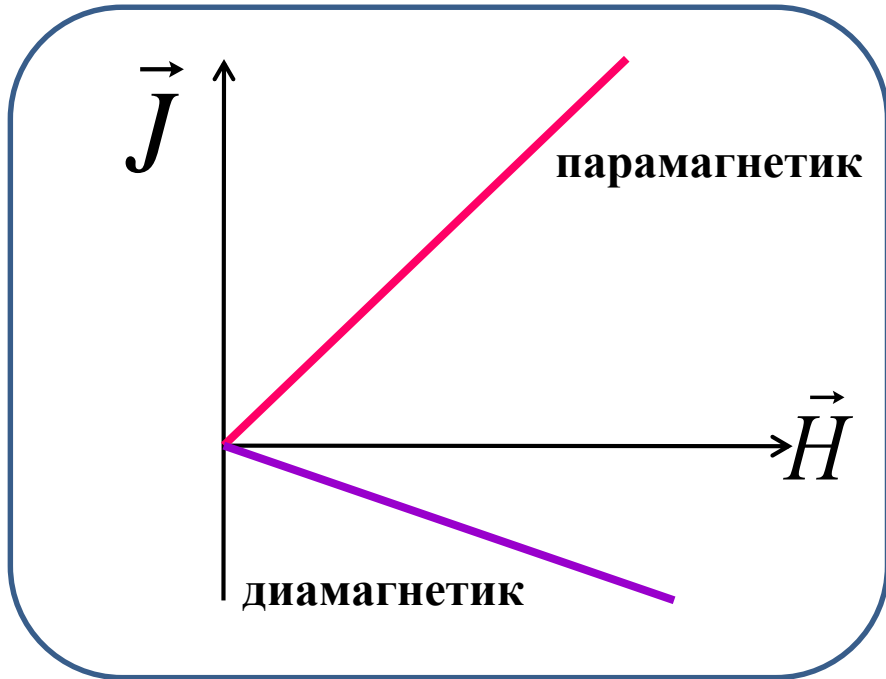


1. Диамagnetики

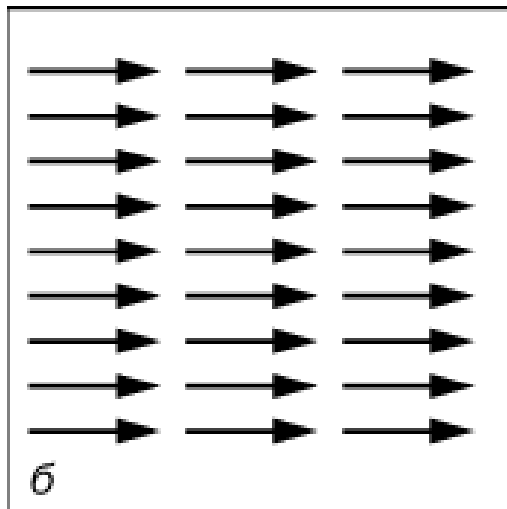


2. Парамагнетики

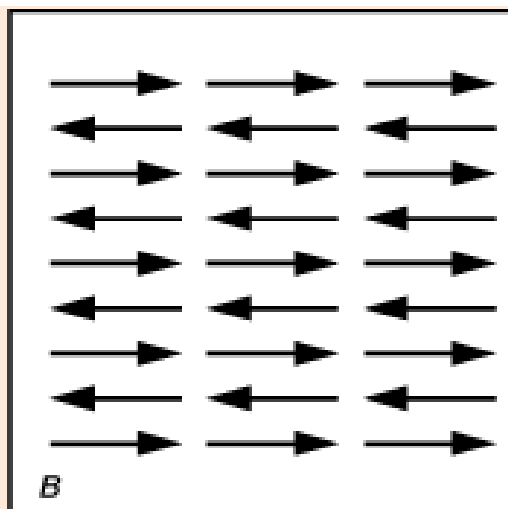




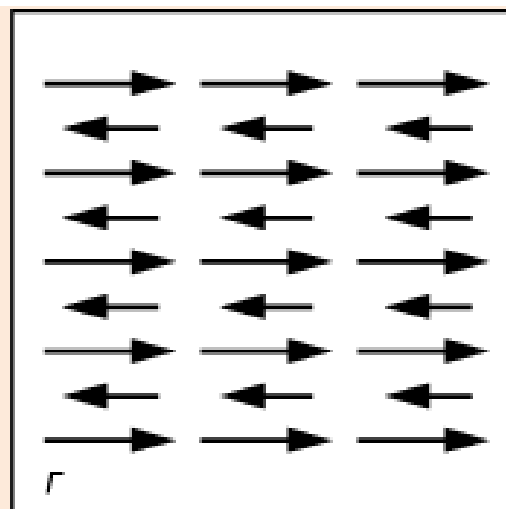
Спонтанная намагниченность



Ферромагнитное
вещество —
атомные магниты
упорядочены



Антиферромагнитное
вещество —
атомные магниты
ориентированы
антипараллельно
и магнитный момент
отсутствует



Ферримагнитное
вещество —
нескомпенсированная
антипараллельная
ориентация

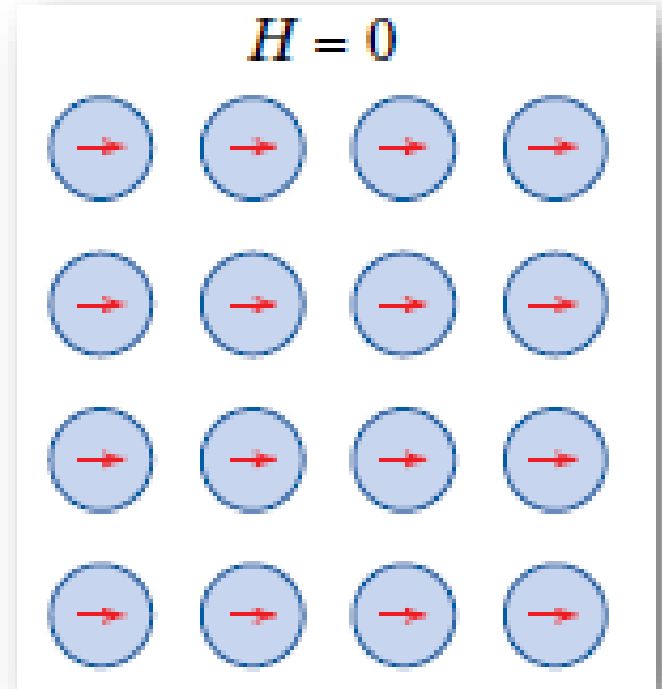
Взаимная ориентация магнитных моментов

Постоянные магнитные моменты в ферро магнитных веществах обусловлены атомными магнитными моментами, создаваемые нескомпенсированными спинами электронов.

Вклад орбитального магнитного момента мал.

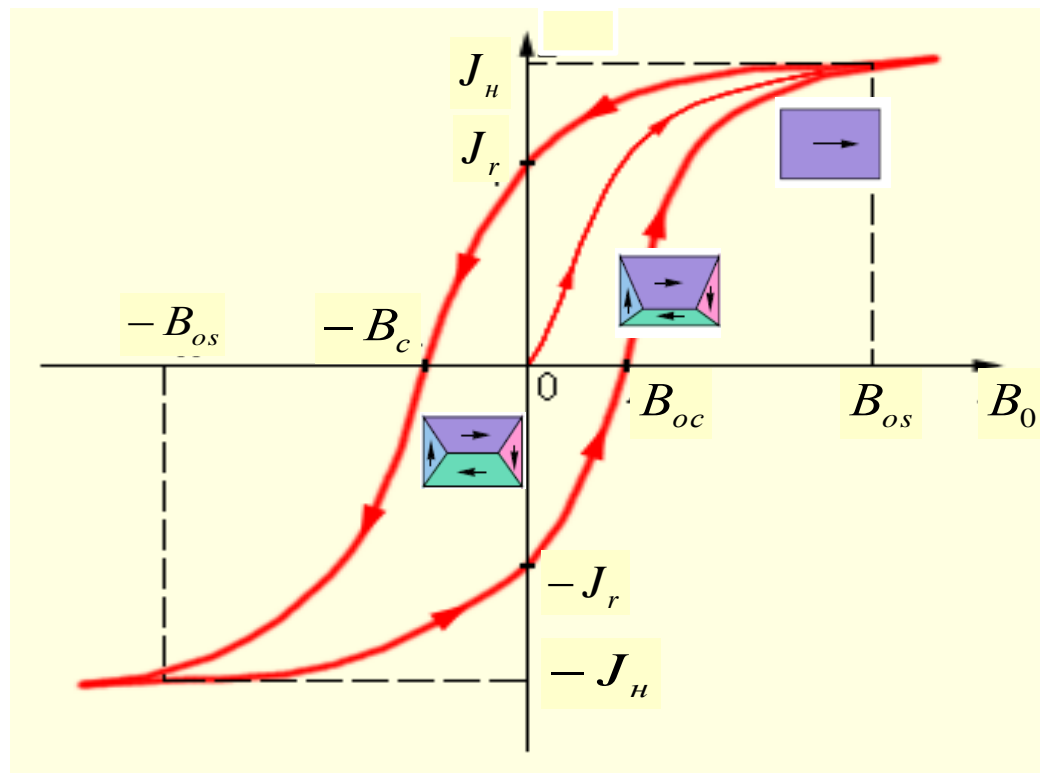
Парные взаимодействия приводят к возникновению ненулевых суммарных спиновых моментов соседних атомов, которые ориентируются параллельно друг другу даже в отсутствии внешнего поля

$$H \ll J, B \cong \mu_0 J$$



$$\vec{J}_{\text{нас}} = n\vec{J}$$

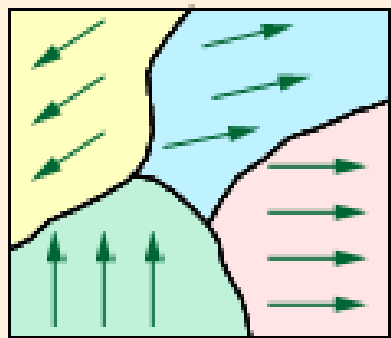
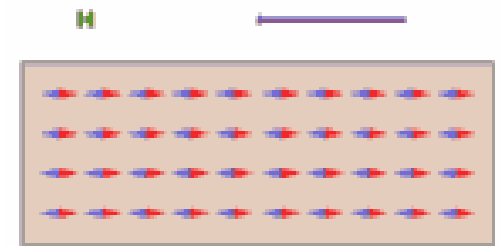
(Fe, Co, Ni: $\rho_m = 2,22\mu_B, 1,72\mu_B, 0,60\mu_B$)



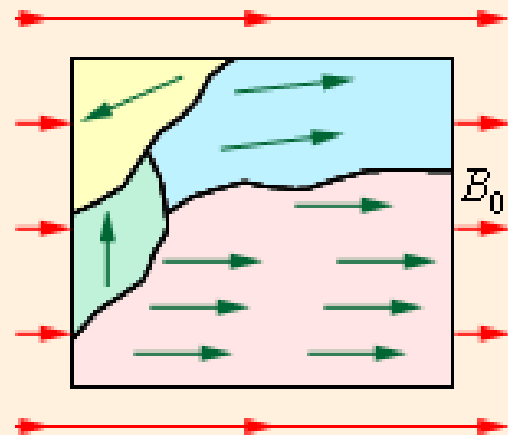
Смещение границ доменов

вращение

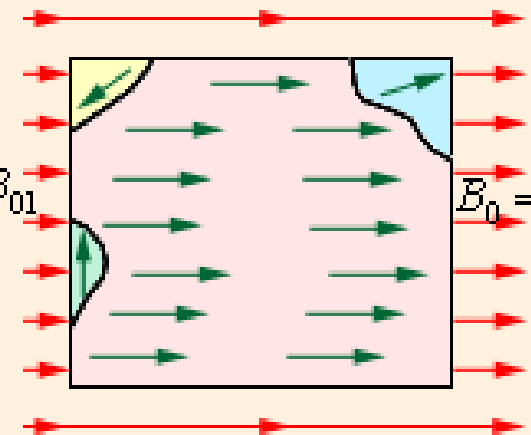
парапроцессы



(1)

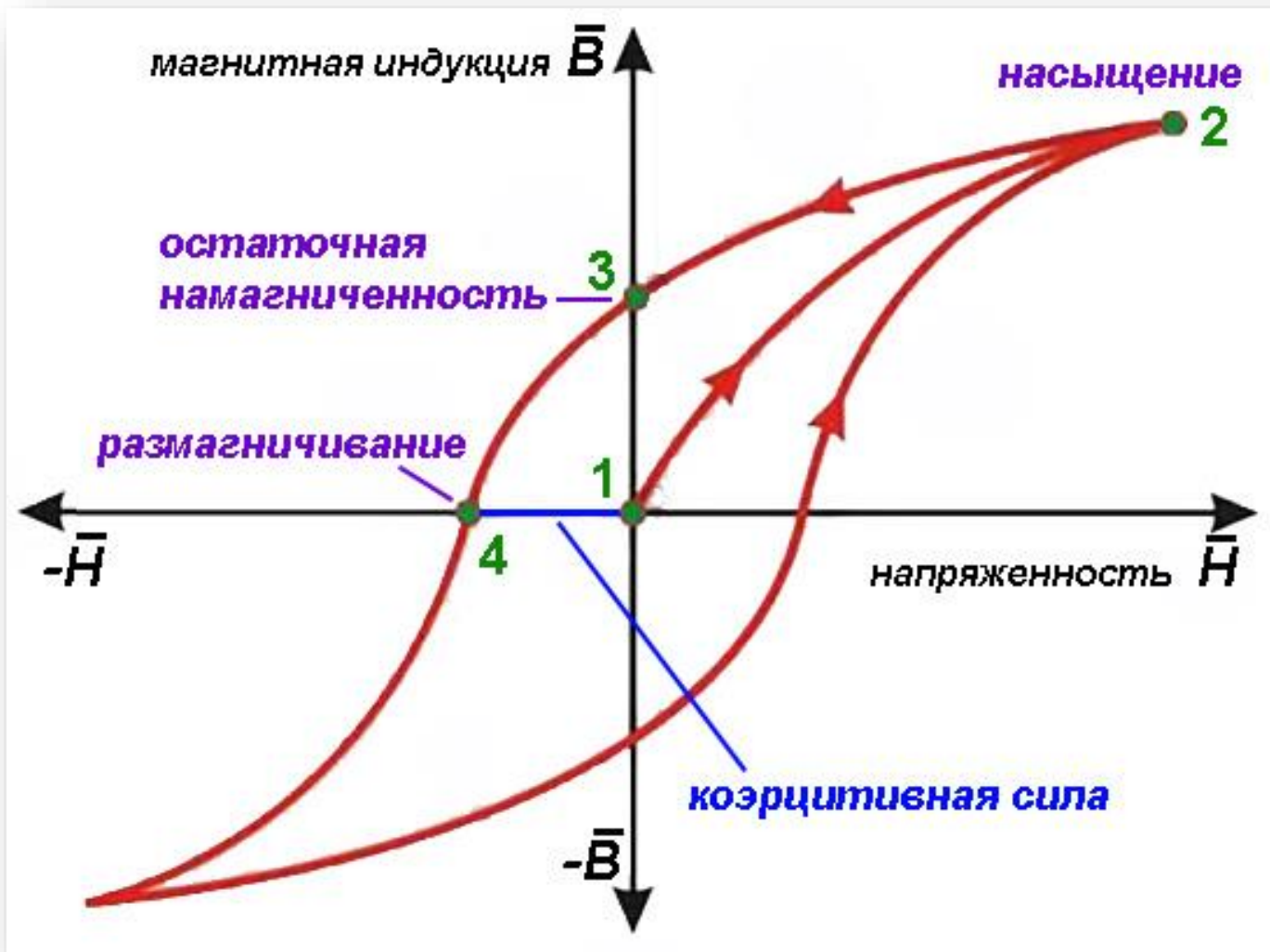


(2)

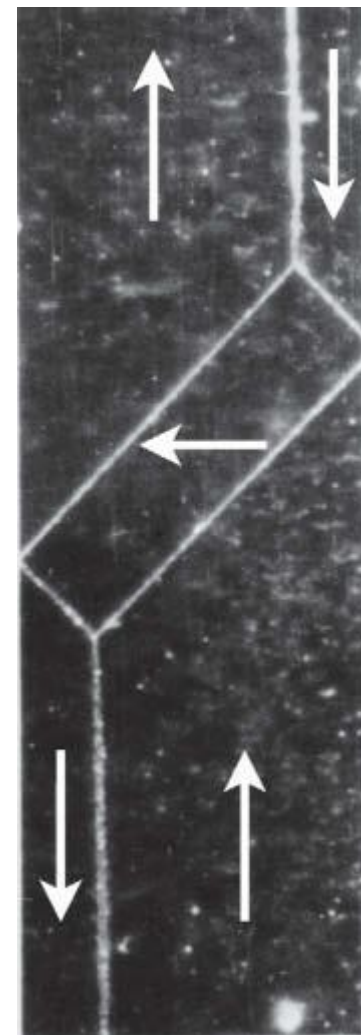
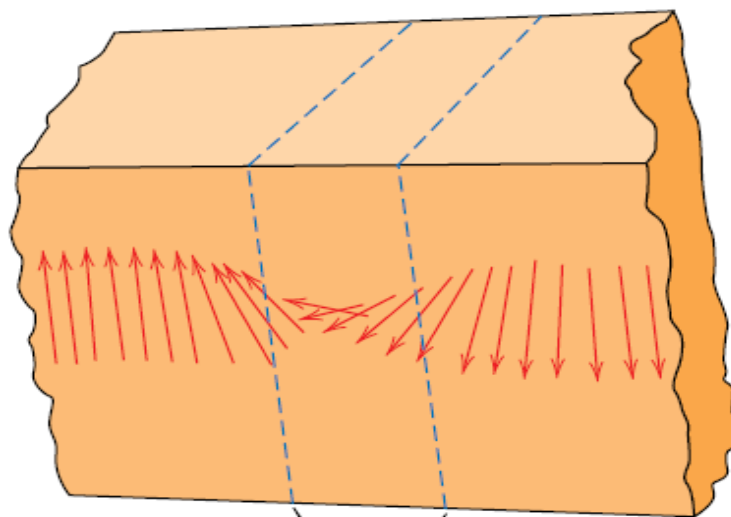
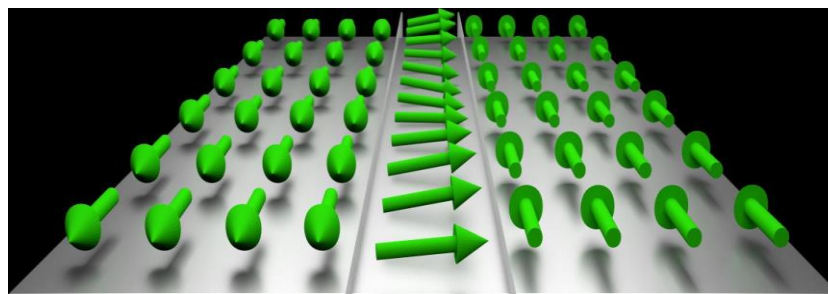
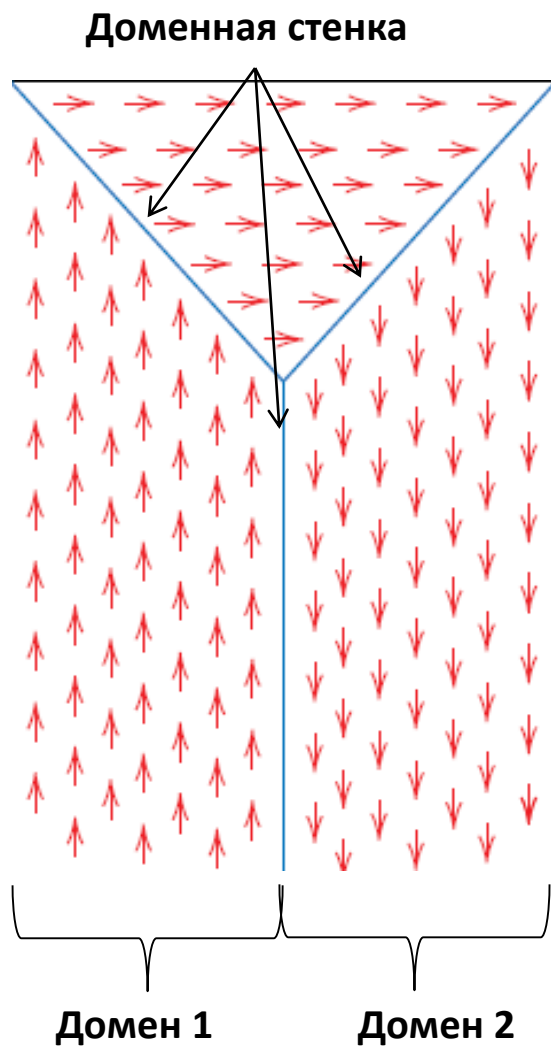


(3)

ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА



ДОМЕНЫ И ГИСТЕРЕЗИС

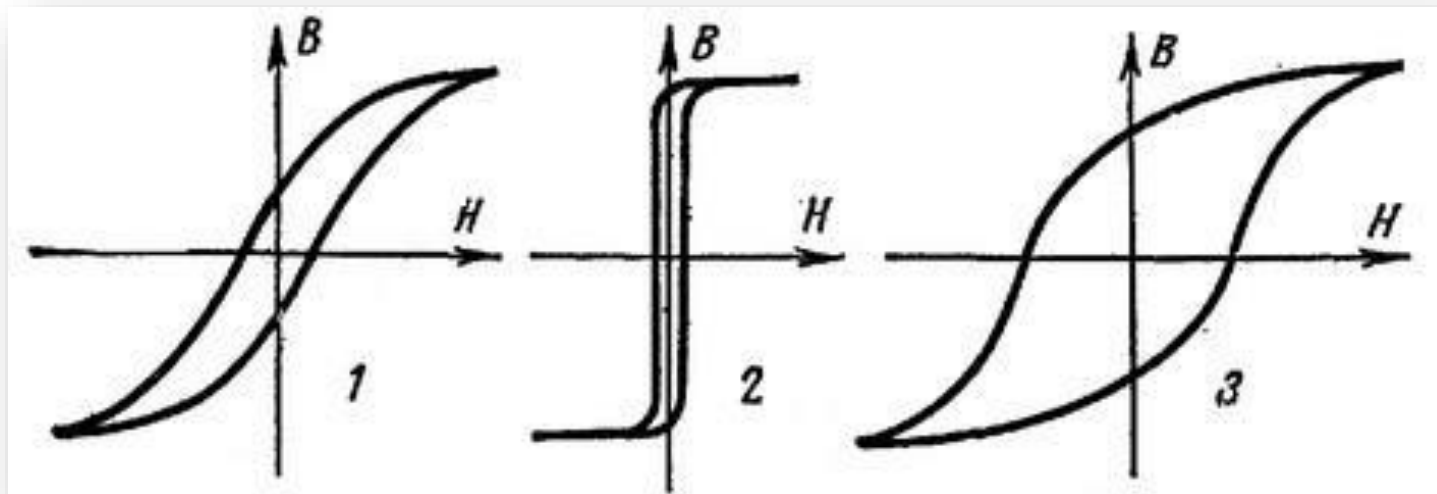


Ферромагнетики



Магнито-мягкие материалы
с низкими значениями
 $B_c < 800$ А/м
Сердечники трансформаторов

Магнито-твердые материалы
с высокими значениями
 $B_c > 4000$ А/м
Постоянные магниты



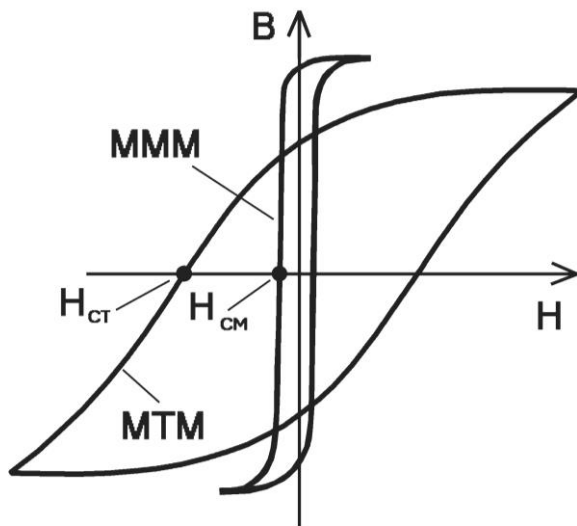
Площадь петли характеризует потери магнитной энергии на единицу объема, происходящие в течение одного цикла процесса намагничивания-размагничивания. Эти потери переходят в тепло, рассеиваемое в объем магнитного материала и повышающее его температуру.

МАГНИТО-МЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Используются в устройствах с циклическими изменениями магнитного поля, где потери энергии небольшие – сердечники трансформаторов – должны достигать намагниченности насыщения при низких значения напряженности МП, легко намагничиваться и размагничиваться.

- Структурные дефекты – препятствия перемещению доменных стенок
- Вихревые токи — источник потерь

Решение: Повысить электрическое сопротивление (твердые растворы Fe +Ni, Fe +Si), ТП +МП = прямоугольная петля – магнитные усилители, импульсные трансформаторы))



МАГНИТО-ТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Используются для создания постоянных магнитов, т.е. не должны поддаваться размагничиванию – должна быть высокая остаточная намагниченность, большая коэрцитивная сила, большая индукция насыщения

$(BH)_{max}$ - энергетическое произведение

$$B_d \times H_d < (BH)_{max}$$

1. Традиционные (2 – 80 кДж/м³)

Кунифе

Алнико

Гексагональные ферриты ($BaO-6Fe_2O_3$)

2. Высокоэнергетические (> 80 кДж/м³)

$SmCo_5$ (120-240 кДж/м³)

$Nd_2Fe_{14}B$

Применение: аккумуляторные дрели, шурупверты, автомобили, динамики

