

# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

- ❑ Намагничивание вещества.
- ❑ Описание магнитного поля в веществе.
- ❑ Классификация магнетиков.
- ❑ Механизмы намагничивания диамагнетиков и парамагнетиков.
- ❑ Особые свойства ферромагнетиков.

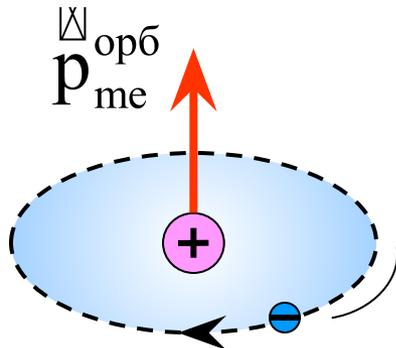
# НАМАГНИЧИВАНИЕ ВЕЩЕСТВА

**Магнетики** – вещества, которые под действием внешнего поля **намагничиваются**, т.е. становятся источниками собственного магнитного поля.

**Гипотеза Ампера**: внутри вещества существуют замкнутые микротоки (внутри молекул и атомов).

По **современным представлениям** магнетизм вещества обусловлен:

- а) орбитальным движением электронов ( $\vec{p}_{me}^{орб}$ ),
- б) спином электронов ( $\vec{p}_{me}^{спин}$ ),
- в) магнитными свойствами ядер ( $\vec{p}_{ян} \ll \vec{p}_{me}$ ).



## Магнитный момент

**атома:**

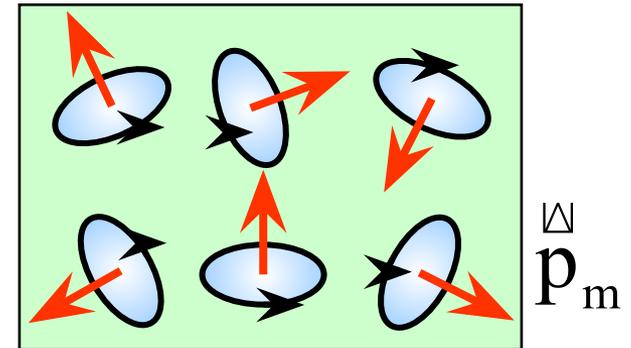
$$\vec{p}_{ян} = \vec{p}_m + \sum_i \vec{p}_i^{орб} + \sum_i \vec{p}_i^{спин}$$

# НАМАГНИЧИВАНИЕ ВЕЩЕСТВА

В отсутствие внешнего магнитного поля:

магнитные моменты атомов вследствие теплового движения ориентированы хаотично 

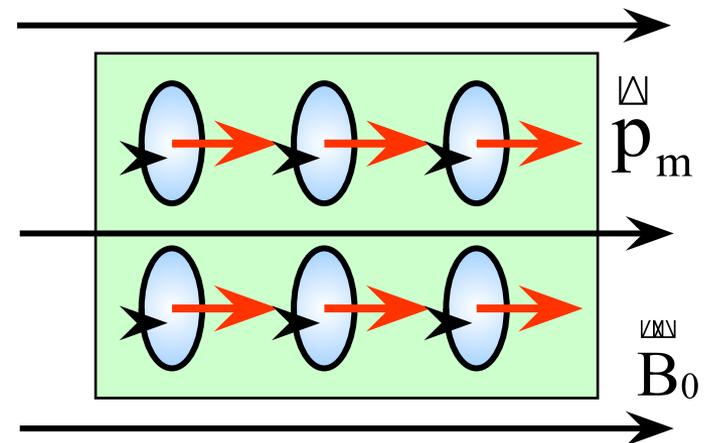
$$\sum_i \overset{\infty}{P}_{m_i} = 0$$



Во внешнем магнитном

поле магнитные моменты атомов ориентируются вдоль линий магнитной индукции так, что

$$\sum_i \overset{\infty}{P}_{m_i} \neq 0$$



# НАМАГНИЧИВАНИЕ ВЕЩЕСТВА

Степень намагниченности магнетика характеризуется **вектором намагниченности**, который определяется суммарным магнитным моментом, приходящимся на единицу объёма вещества:

$$\vec{J} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i \vec{p}_{mi}}{\Delta V} \quad \left[ \frac{\text{А}}{\text{М}} \right] \quad [1]$$

Намагниченность вещества принято связывать с напряжённостью магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad [2]$$

$\chi$  – **магнитная восприимчивость вещества** – безразмерная величина, зависящая от рода вещества

# КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНЕТИКОВ

📌  $\chi \leq 0$  –  $\chi = -(10^{-6} \div 10^{-5})$

диамагнетики

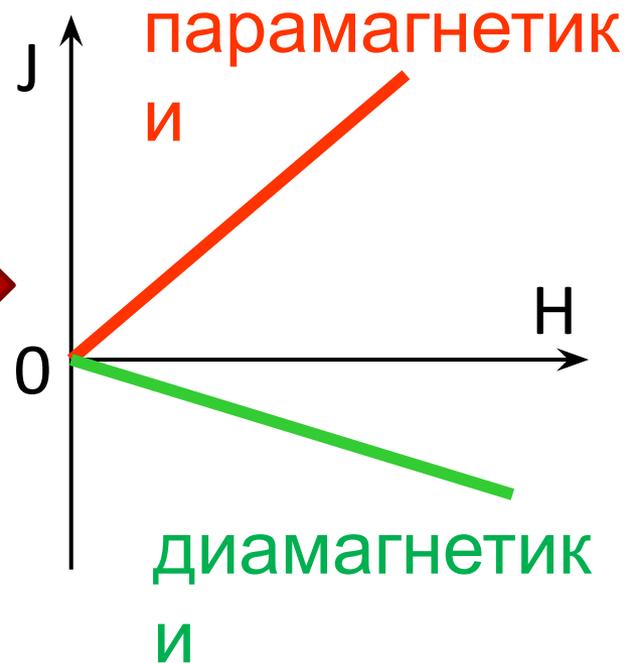
(инертные газы,  $H_2O$ ,  $H_2$ , Si, Zn, Cu, Au, Ar, Bi)

( $\overset{\downarrow}{J} \uparrow \downarrow \overset{\downarrow\downarrow}{H}$ ) – намагничиваются против внешнего

📌  $\chi \geq 0$  – поля.  $\chi = 10^{-6} \div 10^{-4}$

парамагнетики (воздух, Al, W, Pt) ( $\overset{\downarrow}{J} \uparrow \uparrow \overset{\downarrow\downarrow}{H}$ )

В не очень сильных полях зависимость  $J(H)$  для диа- и парамагнетиков – линейная. ➡



📌  $\chi \leq 0$  –

ферромагнетики

(Fe, Ni, Co, их сплавы)

$\chi = (10^3 \div 10^5)$

Зависимость  $J(H)$  нелинейная из-за

# МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Связь между магнитной индукцией и напряжённостью магнитного поля с учётом магнитных свойств вещества:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} \quad [9]$$

$$\mu = \chi + 1$$

– относительная магнитная проницаемость вещества – зависит от рода вещества.

В диа- и парамагнетиках связь между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  – линейная, т.е.  $\mu = \text{const}$  (в не очень сильных полях);

в ферромагнетиках – нелинейная ( $\mu = f(H)$ ).

# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДИАМАГНЕТИКОВ

**Диамагнетики** - это вещества, состоящие из молекул, в которых орбитальные и спиновые магнитные моменты полностью компенсируют друг друга, т.е. магнитный момент молекулы в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю.

**В отсутствие магнитного**

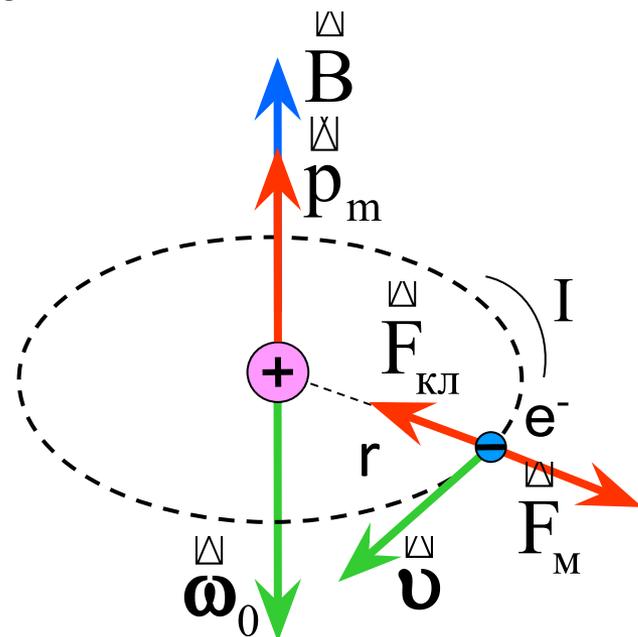
**поля:**  
 $m a_{\text{КЛ}} = F \quad \rightarrow \quad m \omega_0^2 r = F$

$\omega_0$  – угл. скорость вращения  $e^-$  без магнитного поля.

**В магнитном**

**поле:**  
 $m a_{\text{КЛ}} = F_M \pm F \quad \rightarrow \quad m \omega^2 r = F_{\text{КЛ}} \pm e v B$

$\omega$  – угл. скорость вращения  $e^-$  в магнитном



# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДИАМАГНЕТИКОВ

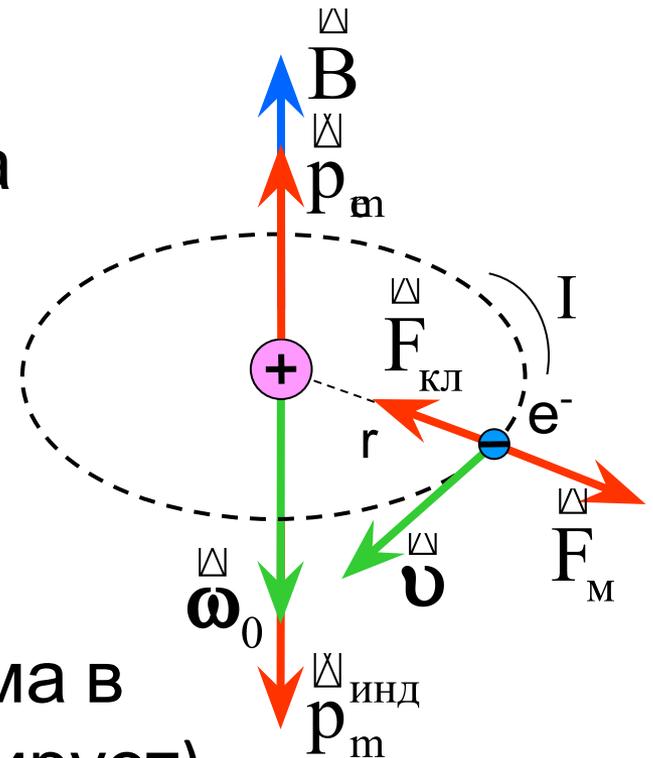
Происходит изменение угловой скорости  $e^-$  в магнитном поле на величину:

$$\Delta\omega = \omega_L = \pm \frac{eV}{2m} \quad [10]$$

$\Delta\omega$  - ларморова частота.

Дополнительное вращение атома в магнитном поле создаёт (индуцирует) магнитный момент:

$$\vec{p}_{m \text{ инд}} \uparrow \downarrow \vec{B} \quad \rightarrow \quad \vec{J} \uparrow \downarrow \vec{B}$$



Магнитная индукция в диамагнетике уменьшается!

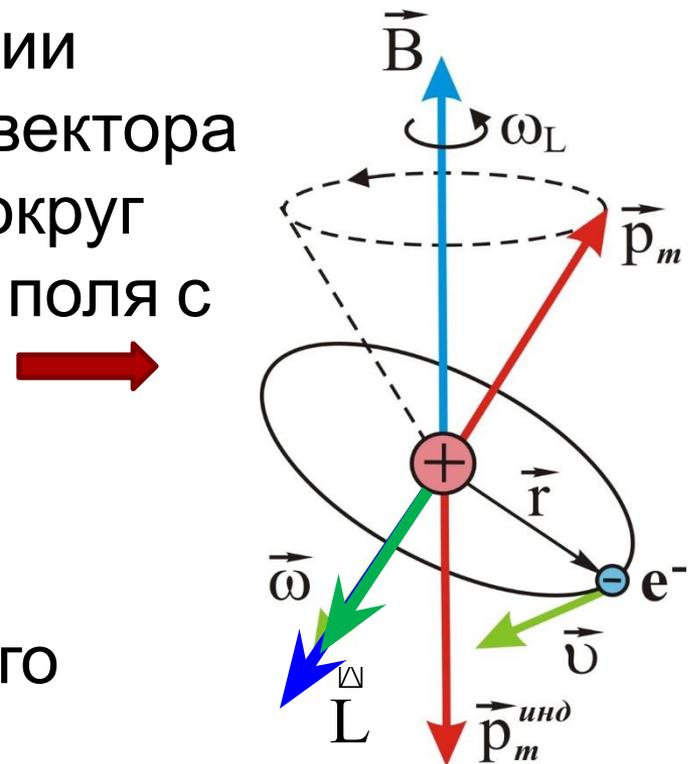
## МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДИАМАГНЕТИКОВ

В случае произвольной ориентации орбиты электрона относительно вектора  $\mathbf{B}$  возникает прецессия орбиты вокруг направления индукции внешнего поля с частотой Лармора [10].

Диамagnetная левитация – диамagnetные объекты выталкиваются из области сильного



Мощный магнит из сплавов с редкоземельными металлами ( $B \sim 1$  Тл) может висеть между двумя блоками из диамagnetного висмута.

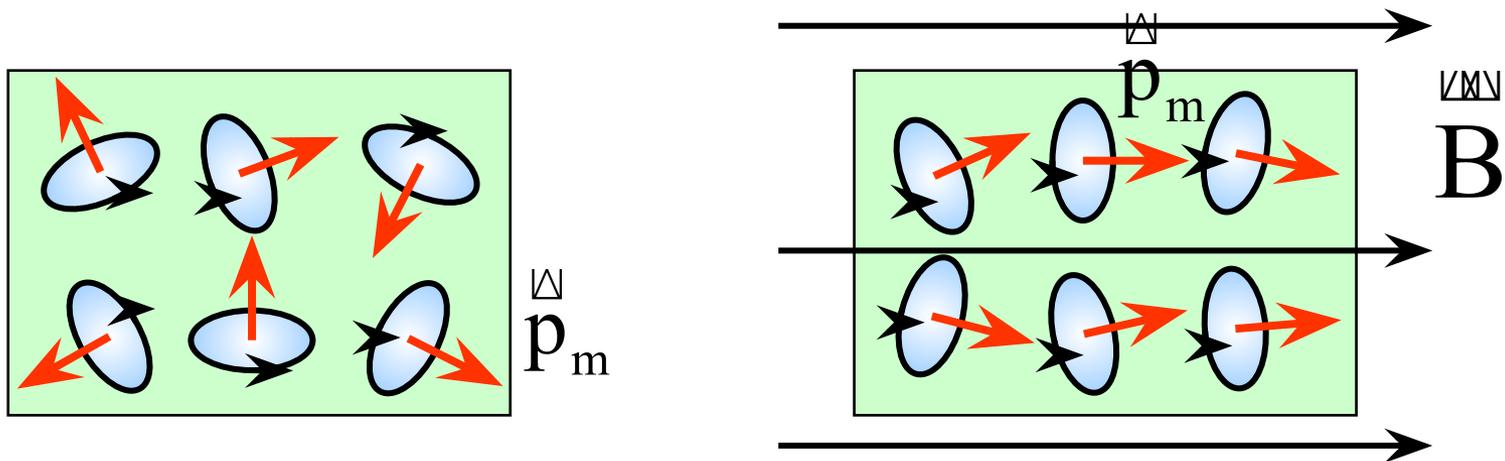


# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПАРАМАГНЕТИКОВ

**Парамагнетики** – это вещества, состоящие из атомов (молекул), имеющих магнитный момент и в отсутствие внешнего магнитного поля.

В отсутствие магнитного поля магнитные моменты всех атомов разориентированы.

Внешнее магнитное поле стремится установить магнитные моменты атомов вдоль  **$\mathbf{B}$** .



# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПАРАМАГНЕТИКОВ

Атом обладает в магнитном поле потенциальной энергией:

$$W = \mu_m B \cos \theta$$

Минимум энергии достигается при  $\mu_m \uparrow \uparrow B$  

Переориентация магнитных моментов и их равновесное распределение по направлениям происходит при столкновении и взаимодействии атомов друг с другом 

С ростом температуры магнитная восприимчивость парамагнетиков уменьшается:

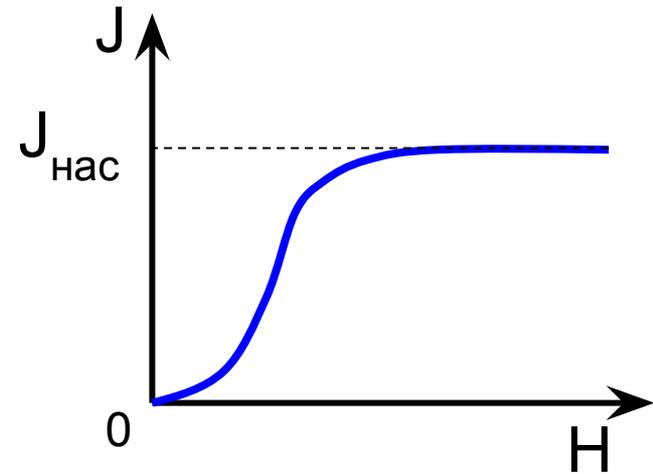
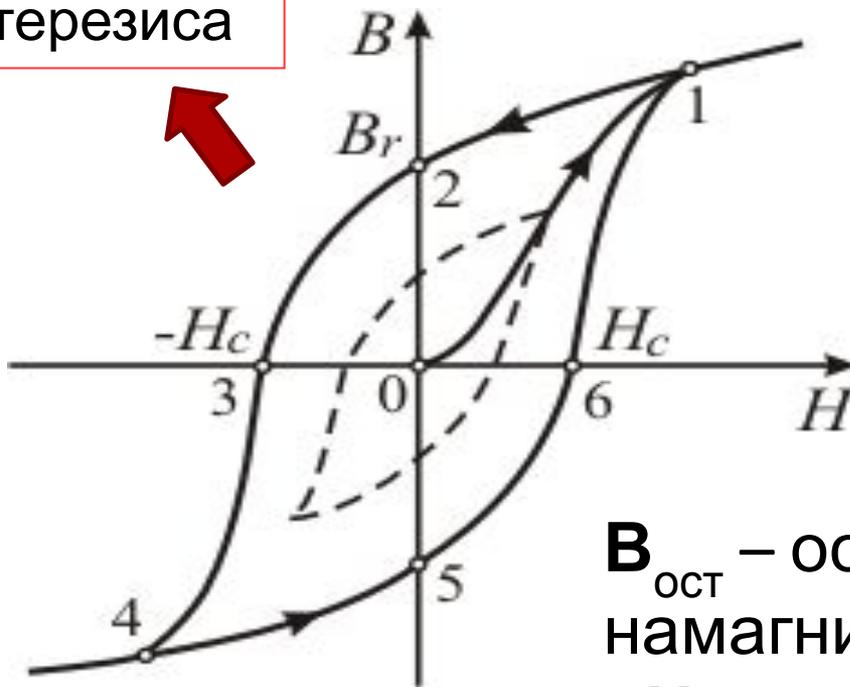
$$\chi \propto 1/T$$

- закон Кюри.

# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

**Ферромагнетики** – вещества, способные обладать намагниченностью и в отсутствие внешнего поля.

петля  
гистерезиса



$B_{\text{ост}}$  – остаточная  
намагниченность;

$H_c$  – коэрцитивная сила – поле,  
способное размагнитить

# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

ПЕТЛЯ  
ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ  
ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

ФЕРРОМАГНЕТИКИ  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

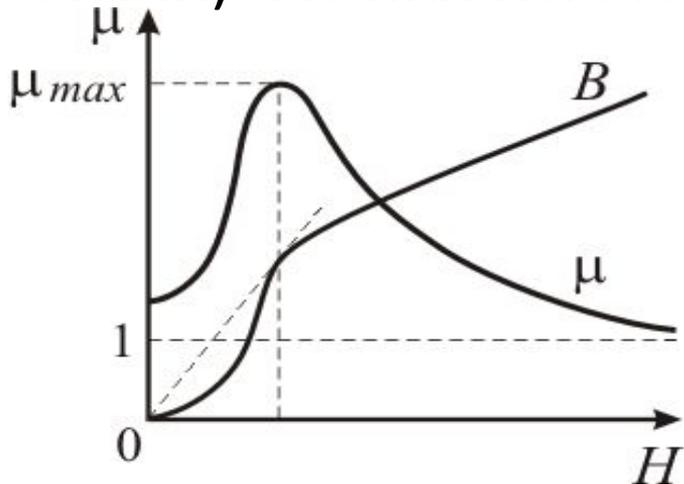
В неоднородном магнитном поле:  
Диамагнетики выталкиваются из области сильного поля  
Парамагнетики и ферромагнетики притягиваются

# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

## Ферромагнетики:

**Мягкие** - с малой  $H_c$  (от  $10^{-3}$  до 1-2 А/см) и узкой петлей гистерезиса (мягкое железо, сплав железа с никелем) сердечники трансформаторов и катушек индуктивности.

**Жесткие** - с большой  $H_c$  (от 10 до  $10^3$  А/см) и широкой петлей гистерезиса (углеродистые и вольфрамовые стали). Из них изготавливают постоянные магниты.



- характерно:  
большие значения  $\mu$  (железо - 10, супермаллой - 800 000);
- зависимость  $\mu$  от  $H$ :

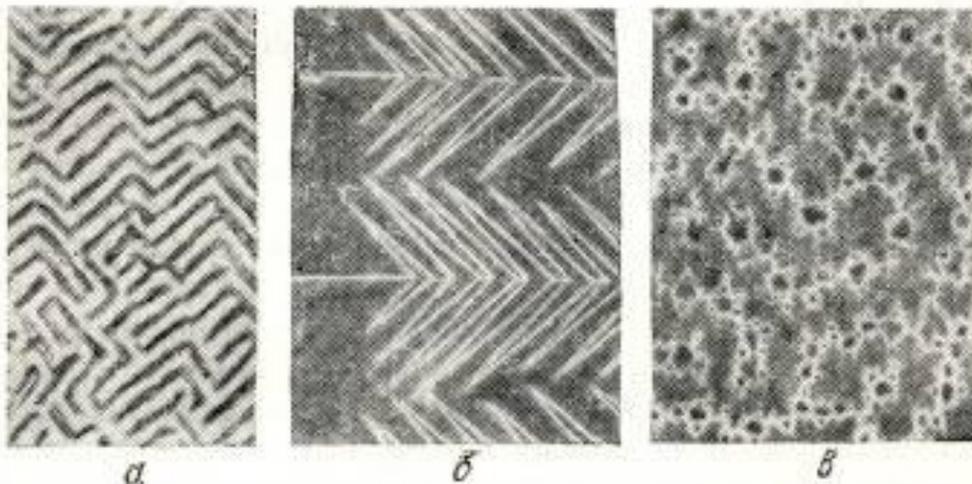
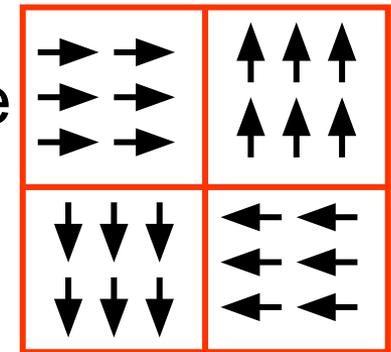
$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = 1 + \frac{H_f}{H}$$

# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Ферромагнетик состоит из **доменов** – областей размером 1÷10 мкм, обладающих **спонтанной намагниченностью**:

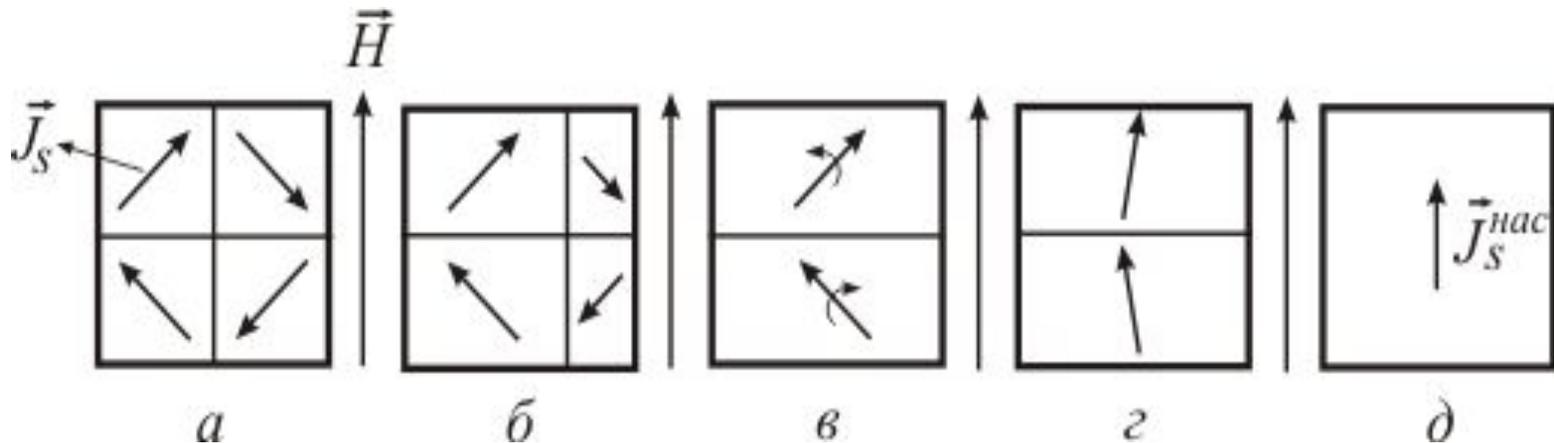
Внутри каждого домена магнитные моменты всех атомов сонаправлены;

Без внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов разориентированы.



Домены в чистом железе (а), кремнистом железе (б) и кобальте (в).

# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ



а) В пределах домена ферромагнетик намагничен до насыщения и имеет определённый магнитный момент. В отсутствии внешнего поля суммарный момент образца равен нулю.

б) Смещение границ доменов. В слабых полях - это обратимый процесс.

в,г) Поворот магнитных моментов доменов в направлении поля – необратимый процесс (служит причиной гистерезиса).

# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

- В атомах ферромагнетиков орбитальные магнитные моменты имеют такие же значения (по порядку величины), как и у парамагнетиков.
- Опыты показывают, что ферромагнетизм вызывается спиновыми моментами электронов.
- Ферромагнитными могут быть те элементы, атомы которых имеют нескомпенсированные спины.
- При образовании кристалла между атомами возникают обменные силы, которые ориентируют спиновые магнитные моменты параллельно.
- Параллельная ориентация спинов в ферромагне соответствует минимуму потенциальной энергии

# МЕХАНИЗМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Магнитная восприимчивость ферромагнетиков зависит от температуры:

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

Закон Кюри – Вейса

C – постоянная Кюри,  
 $\theta$  - температура Кюри.

При  $T > \theta$   
ферромагнетик  
становится  
парамагнетиком, т.к.  
нарушается спонтанная  
намагниченность

**РАЗРУШЕНИЕ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ  
СВОЙСТВ.  
ТОЧКА КЮРИ**