

# Ферромагнетизм

1. Природа ферромагнетизма
2. Обменное взаимодействие
3. Правило Хунда
4. Типы магнитного упорядочения
5. Влияние температуры
6. Магнитные домены, стенки Блоха
7. Классификация ферромагнетиков по величине коэрцитивной силы
8. Ферримагнетики
9. Антиферромагнетики

# Природа ферромагнетизма

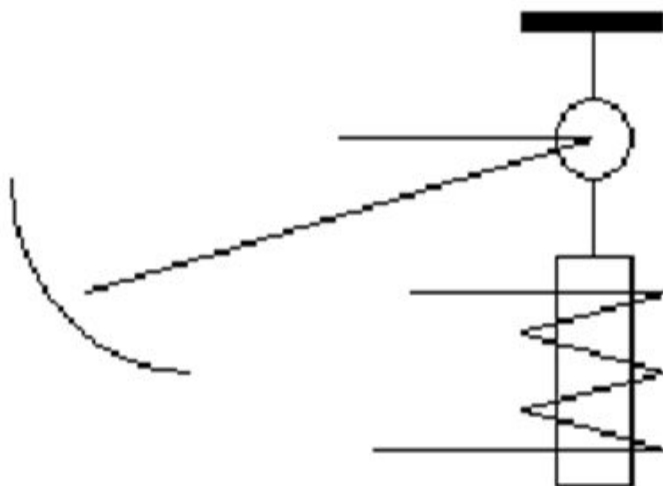
Ферромагнетики имеют магнитный момент  $M > 0$  при  $H = 0$ .

Среди них 9 моноатомных металлов

**3d: Fe, Co, Ni**

**4f: Gd, Dy, Tb, Ho, Er, Tm**

Опыт Эйнштейна –де Гааза



показал, что отношение магнитного момента ( $M$ ) к механическому ( $P$ ) для ферромагнетиков соответствует гиромagnetному отношению для собственных моментов электронов

$$M/P = -e\mu_0/m$$

Это свидетельствует о том, что ферромагнетизм обусловлен не орбитальным, а спиновым магнитным моментом электрона.

# Какова природа упорядочения нескомпенсированных магнитных моментов отдельных атомов?

- Ферромагнетизмом могут обладать лишь переходные элементы, которые имеют недостроенные внутренние оболочки при температурах ниже некоторой температуры, определённой для данного вещества.
- Теория внутреннего молекулярного поля (Розинг Борис Львович -1892 г. Вейсс -1907 г).

$$\mathbf{H}_W = \lambda \mathbf{J}_s, \quad \lambda = \text{const}(T),$$

где  $\mathbf{H}_W$  - внутреннее поле,  $\mathbf{J}_s$  - намагниченность насыщения.

- Ферромагнетизм есть особое свойство электростатически взаимодействующих электронов (1928г. - Френкель и Гейзенберг). В результате электростатического взаимодействия электронов внутренних недостроенных оболочек выгодным оказывается состояние с параллельной ориентацией спинов.

## Обменное взаимодействие

- Является чисто квантовым эффектом, зависящим, от ориентации спинов (подобно обменному взаимодействию при образовании ковалентной связи).

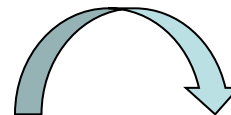
- Энергия системы ( $U$ ) 2х взаимодействующих атомов водорода  $\longrightarrow U = 2E_0 + \frac{K \pm A}{K \pm S^2}$

$E_0$  - энергия 2-х невзаимодействующих атомов водорода;

$K$  – энергия кулоновского взаимодействия зарядов входящих в состав атомов;  $S$  – интеграл неортогональности ( $0 \leq S \leq 1$ );

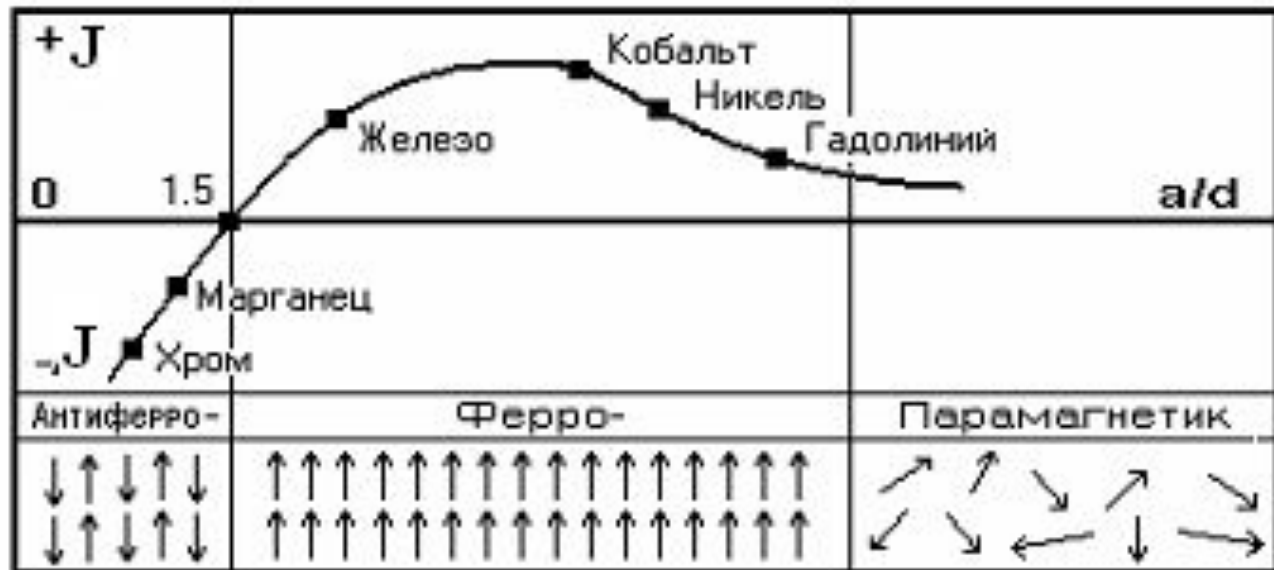
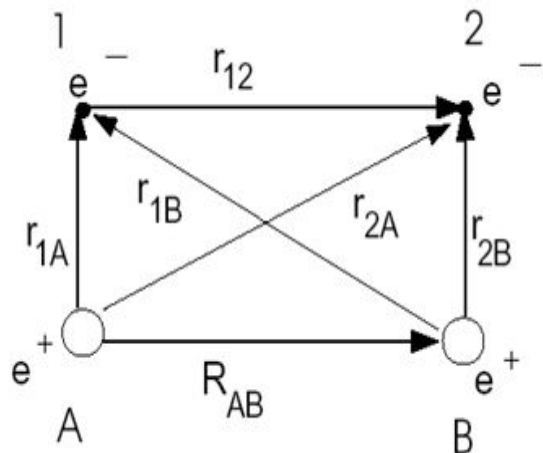
$A = -J(\uparrow_i \uparrow_j)$  – энергия обменного взаимодействия.

- $J$  – обменный интеграл - показывает вероятность обмена электронами между атомами.



## Обменное взаимодействие

$$J = e^2 \int (1/r + 1/r_{a2} - 1/r_{a1} - 1/r_{b2}) \Psi_a(1) \Psi_b(2) \Psi_a(2) \Psi_b(1) dr_1 dr_2.$$

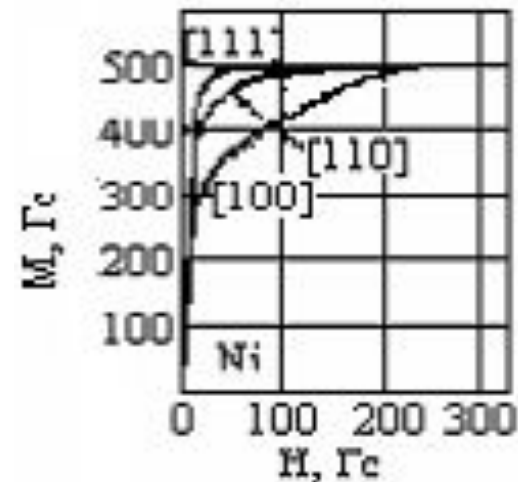
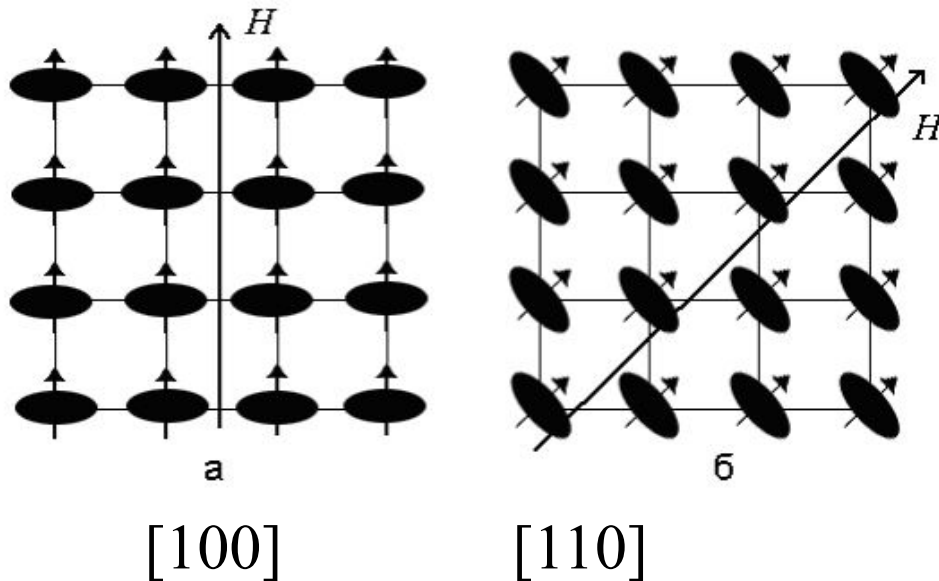


$a$  – атомное расстояние,  $d$  - радиус атома.

В обменный интеграл входят как положительные, так и отрицательные слагаемые, поэтому он может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Это зависит от отношения межатомного расстояния ( $a$ ) к диаметру незаполненных электронных оболочек ( $d$ ).

# Магнитная анизотропия

Величина и знак обменного интеграла могут быть различным для одной и той же пары атомов. Это обуславливает, в частности, существование эффекта магнитной анизотропии и многих типов магнитного упорядочения.



Анизотропия магнитного намагничивания никеля.

Ориентации магнитных моментов по [100] или по [110] в заданном поле соответствует разная энергия. Эту энергию называют энергией магнитной анизотропии.

# Правило Хунда

Позволяет объяснить существование нескомпенсированного спинового магнитного момента у металлов с частично заполненными 3d оболочками.

Согласно правилу Хунда спины электронов в оболочке всегда складываются друг с другом таким образом, чтобы дать максимально возможные значения момента количества движения и магнитного момента.

На d оболочке может находиться 10 электронов: 5 с ↓ и 5 с ↑.

Если электронов 2, то ↓ ↓ или ↑ ↑ ;

Если электронов 5, то ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ или ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ;

Если электронов 7, то ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↑ ↑ или ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↓ ↓ ;

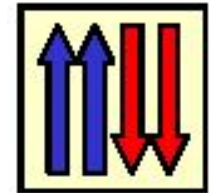
# Магнитное упорядочение

Электронные спины 3d орбиталей заполняются в соответствии с правилом Хунда.

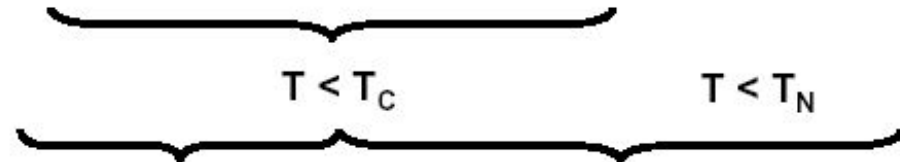
Sc 21 ↑	Ti 22 ↑↑	V 23 ↑↑↑	Cr 24 ↑↑↑↑
Mn, Mn <sup>2+</sup> 25 ↑↑↑↑↑	Fe, Fe <sup>2+</sup> 26 ↑↑↑↑↑ ↓	Co, Co <sup>2+</sup> 27 ↑↑↑↑↑ ↓↓	Ni, Ni <sup>2+</sup> 28 ↑↑↑↑↑ ↓↓↓
Cr <sup>3+</sup> 24 ↑↑↑	Mn <sup>4+</sup> 25 ↑↑↑	Fe <sup>3+</sup> 26 ↑↑↑↑↑	

Атомный магнитный момент  $\uparrow = \mu_B$  - магнетон Бора

магнитное упорядочение в доменах



ферро-магнетизм      ферри-магнетизм      антиферро-магнетизм



ферромагнетизм возможен только если есть электроны проводимости

ферри- и антиферромагнетизм возможен в изоляторах

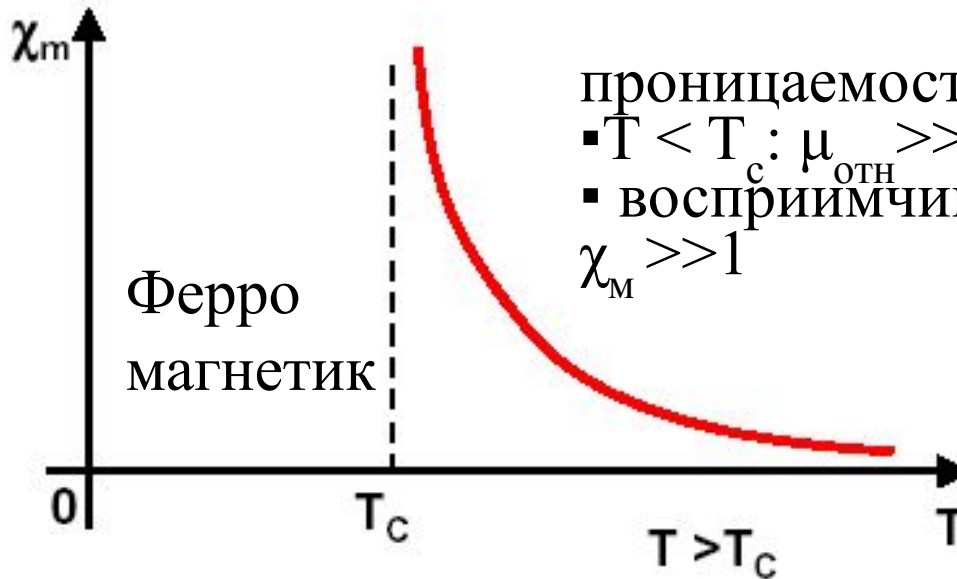
металлы

металлы и оксиды металлов

формирование  $Mn^{2+}, Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}$  не влияет на 3d орбитали 4-s валентных электронов

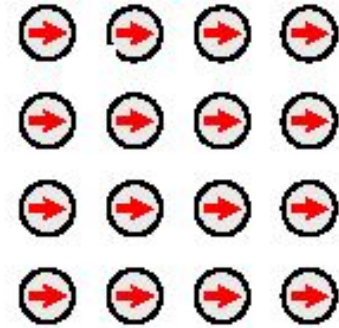


# Ферромагнетизм



проницаемость:  
 ▪  $T < T_c : \mu_{отн} \gg 1 \Rightarrow$   
 ▪ восприимчивость  
 $\chi_M \gg 1$

$H = 0, T < T_c$



температурная зависимость  $T > T_c$

$$\chi_M = \frac{C}{T - T_c}$$

$T_c$  - температура Кюри  
 (закон Кюри- Вейса  
 $M_c$  - падает до нуля при  $T_c$

- атомы с постоянными магнитными диполями
- спонтанная ориентировка магнитных диполей при  $T < T_c$

максимально возможная намагниченность:

- насыщение намагниченности  $M_H$
- насыщение магнитной индукции  $B_H$

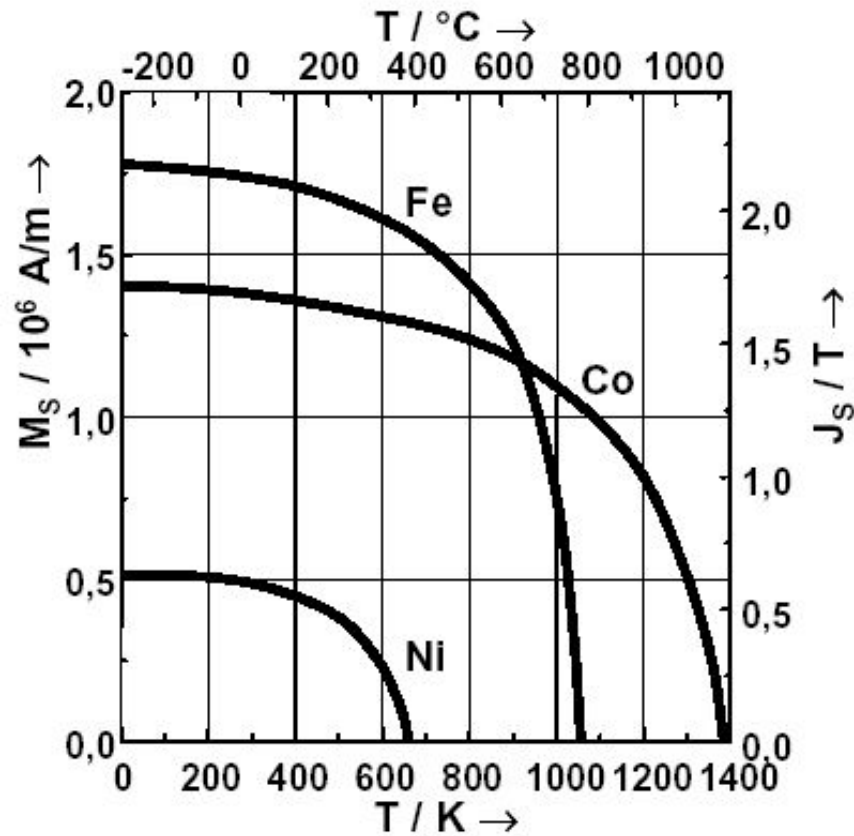
$B_H$

materials: iron, cobalt, nickel, gadolinium;  $\mu_a \cong 50...100.000$   
 $T_c$  (K): 1043, 1404, 631, 289

# Зависимость намагниченности от температуры

Намагниченность насыщения  $M_S$  как функция температуры.

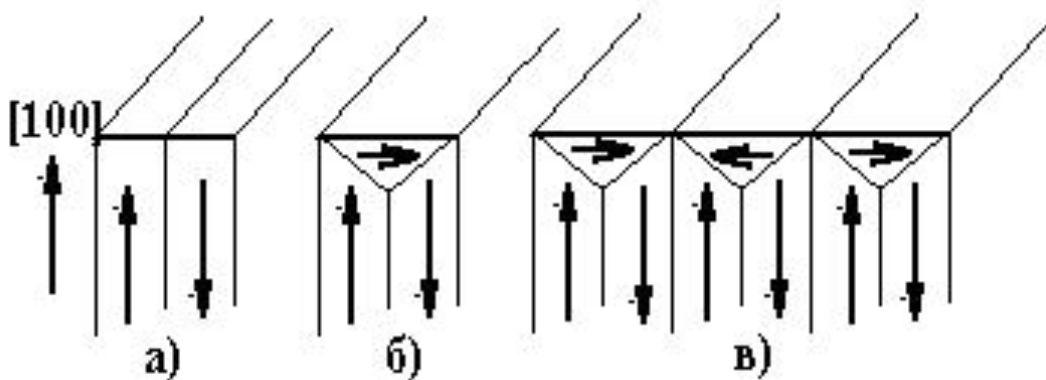
Свойства **Fe, Co, Ni**



	iron	cobalt	nickel
atomic number	26	27	28
atomic weight	55,8	58,9	58,7
crystal structure	krz	hdp	kfz
lattice constant a	2,86	2,50	3,52
Gitterkonstante c	-	4,06	-
specific weight / ( $\text{g/cm}^3$ )	7,9	8,8	8,9
melting point / $^\circ\text{C}$	1536	1495	1453
Curie-temperature	770	1130	358
saturation magnetisation / ( $10^5 \text{ A/m}$ )	17,3	14,4	5,1
spontaneous magnetisation (300 K) / ( $10^5 \text{ A/m}$ )	17,1	14,2	4,9
saturation polarisation / T	2,18	1,81	0,64
spontaneous polarisation (300 K) / T	2,16	1,78	0,61

# Доменная структура ферромагнетиков

Возникновение магнитных свойств у ферромагнетиков связано с их доменным строением. **Домены** - это области самопроизвольной намагниченности, возникающие даже в отсутствие внешнего магнитного поля, в которых магнитные моменты атомов ориентированы параллельно.

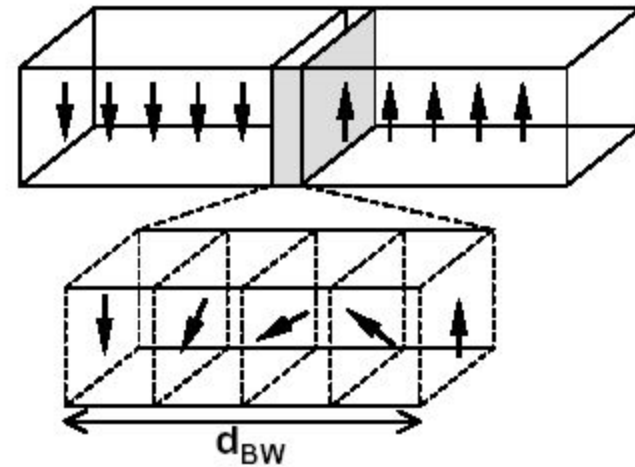
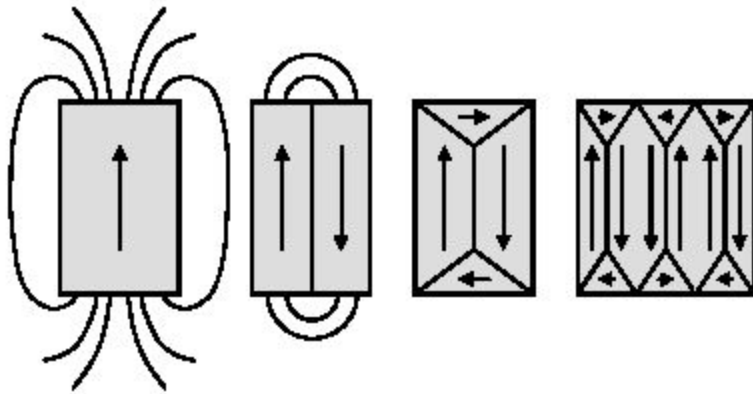


Два соседних домена с противоположными векторами намагниченности  $[100]$  и  $[-100]$  не обладают упругой энергией.

Энергия ферромагнитного образца понижается при образовании домена в форме 3-х гранной призмы, **замыкающей** магнитный поток. Т.о в замыкающем домене сосредоточен некоторый запас **магнитоупругой энергии**.

# Стенки Блоха

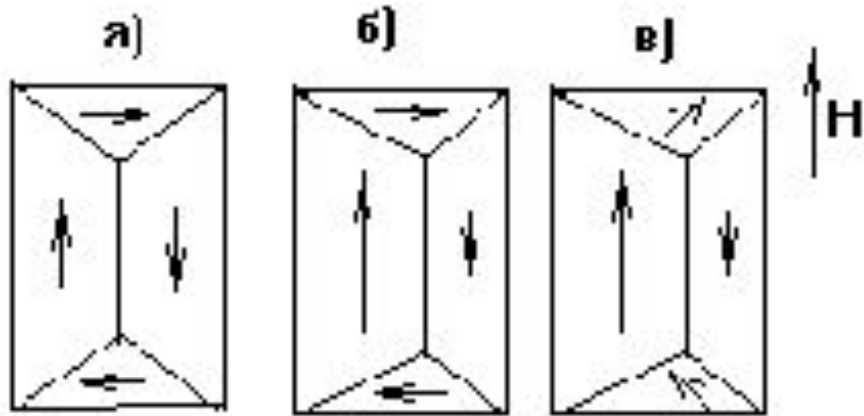
Домены отделены друг от друга границами, в которых осуществляется изменение ориентации спина (**стенками Блоха**).



домены с различным направлением намагниченности обеспечивают уменьшение магнитной энергии

соседние домены разделяются доменными стенками в которых направление намагниченности постепенно меняется  $d_{BW} \sim 60$  нм для Co

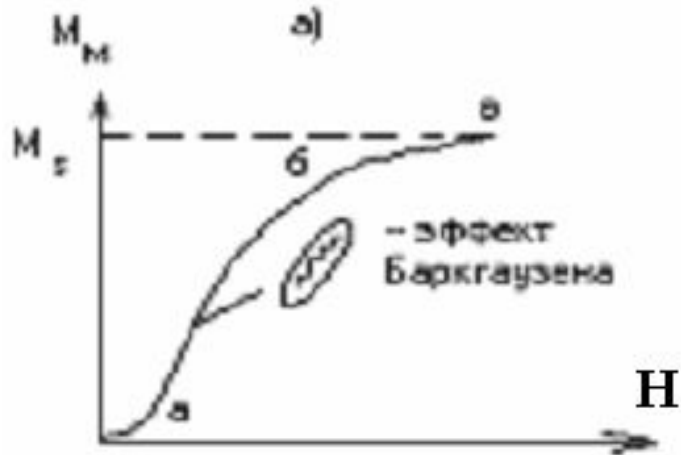
## Поведение доменов в магнитном поле



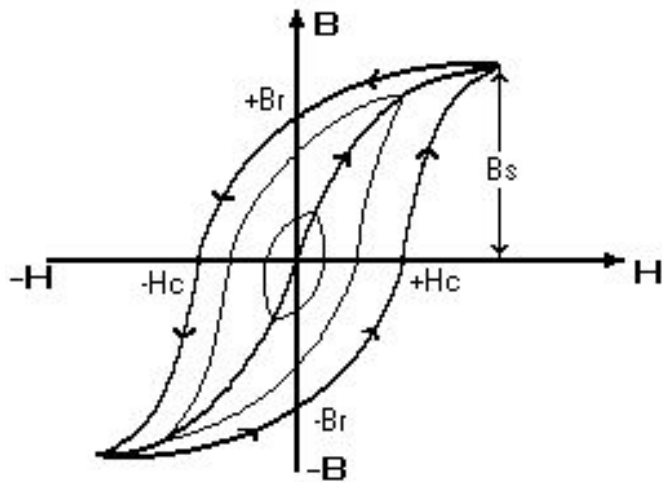
В магнитном поле наблюдается увеличение объема "выгодно" расположенных относительно внешнего поля доменов, за счет доменов с "невыгодной" ориентацией, т.е. происходит процесс смещения (движения) границ доменов.

Процесс смещения обратим (при малых  $H$ ). При увеличении поля  $H$  рост выгодно ориентированных доменов осуществляется за счет необратимых процессов. Обратимому смещению границ доменов могут, например, препятствовать дефекты кристаллической структуры. Чтобы преодолеть их действие, граница домена должна получить от внешнего поля достаточно большую энергию. Это приводит к эффекту Баркгаузена.

# Поведение ферромагнетиков в магнитном поле



- С ростом напряженности магнитного поля  $H$  намагниченность ферромагнетиков быстро возрастает, причем на наиболее крутом участке характеристики увеличение намагниченности происходит не плавно, а мелкими скачками (**эффект Баркгаузена**).



- Для ферромагнетиков характерен **эффект магнитного гистерезиса**. Площадь петли под кривой пропорциональна запасенной магнитной энергии, которая при перемагничивании переходит в тепло.

$H_c$  — коэрцитивная сила.

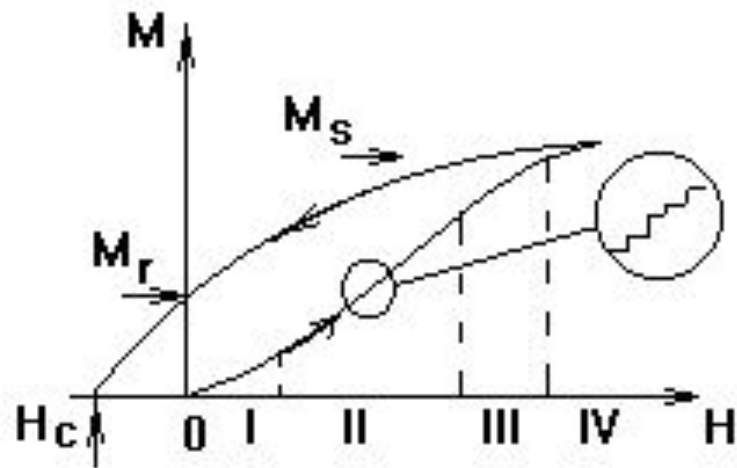
## Стадии намагничивания

I - область линейного намагничивания (обратимого смещения);

II - необратимых смещений;

III - технического насыщения, когда происходят процессы разворота векторов намагниченностей доменов вдоль поля  $H$ ;

IV - очень медленный рост намагничивания за счет разворота по полю тех спинов внутри доменов, которые были разупорядочены благодаря конечной температуре.

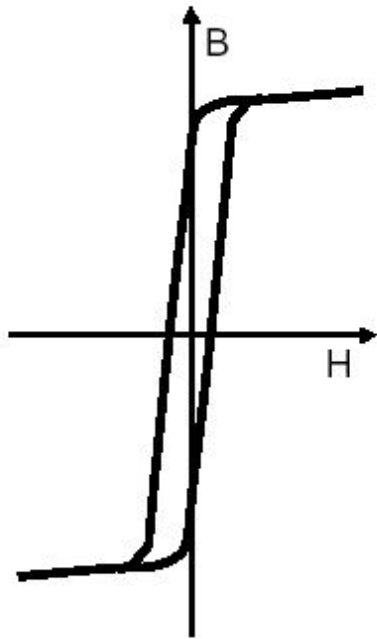


# Классификация ферромагнетиков по величине коэрцитивной силы

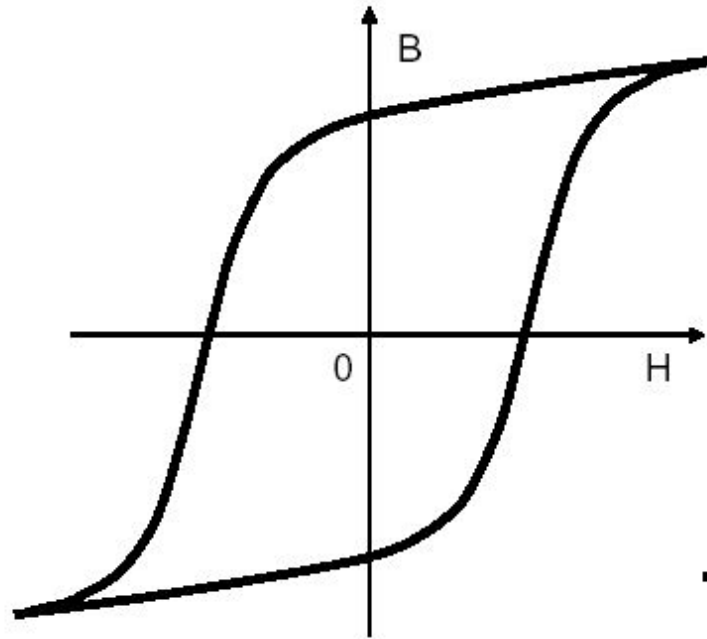
- Ферромагнетики подразделяются на мягкие - с малой коэрцитивной силой и жесткие, или высококоэрцитивные - с широкой теплой гистерезиса.
- Магнитомягкие материалы, у которых величина  $H_c$  может быть сделана не более 0.1 А/м, используют для статоров и роторов электромашин и магнитопроводов электромагнитных устройств (трансформаторы, дроссели, реле и т.д).
- У магнито жестких материалов, применяемых для постоянных магнитов, коэрцитивная сила может быть повышена до 106 А/м.



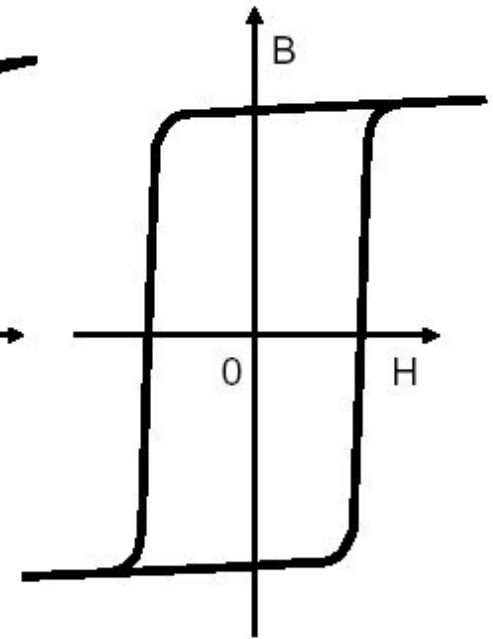
# Поведение намагниченности



магнитомягкий  
материал

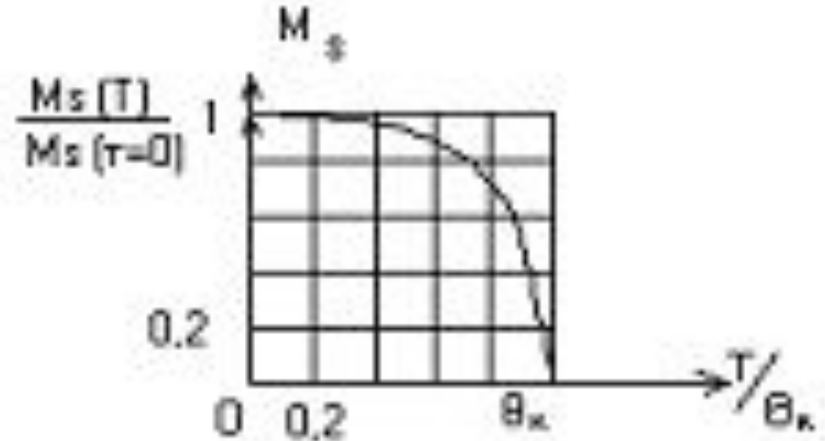
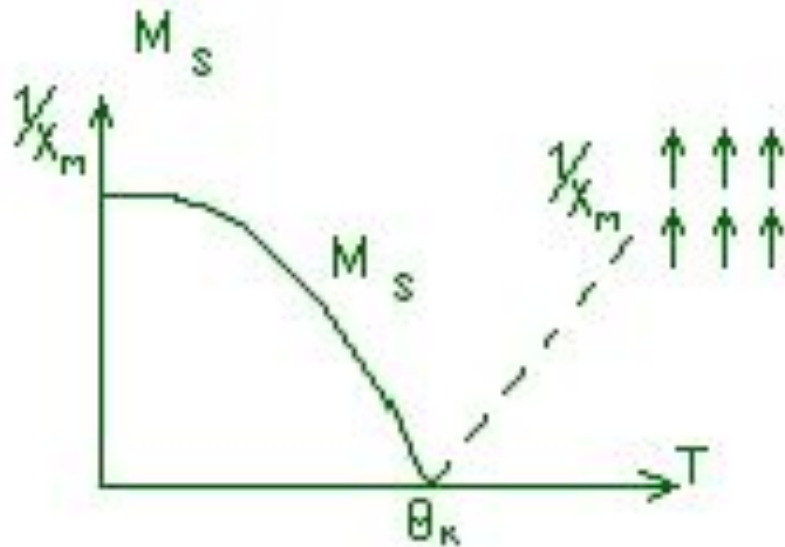


магнито жесткий  
материал



прямоугольная  
петля гистерезиса

# Зависимость намагниченности ферромагнетика от температуры

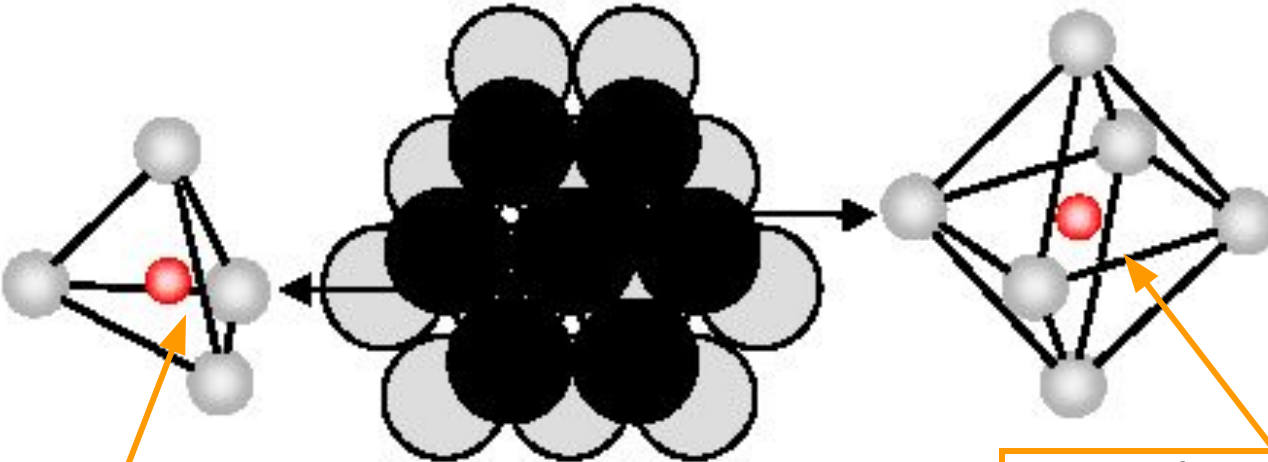


С ростом  $T^\circ$  К намагниченность ферромагнетика уменьшается, и при определенной температуре  $Q_K$ , называемой ферромагнитной точкой Кюри, он превращается в парамагнетик с линейной зависимостью  $\chi_m$  от  $1/T$  (закон Кюри-Вейсса).

Для всех ферромагнетиков характерна идентичная зависимость где  $M_s(T)$  - намагниченность насыщения при температуре  $T$ . Величина  $Q_K$  равна 1043 К для Fe; 1403 К для Co и 631К для Ni.

# Ферримагнетизм

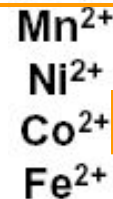
Пример: кубическая структура ферритов типа шпинели



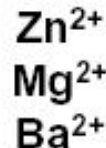
Катион на тетрагональном месте в решетке.  
Координационное число +4

Катион на октаэдрическом месте в решетке.  
Координационное число=6

МАГНЕТИК



НЕМАГНЕТИК



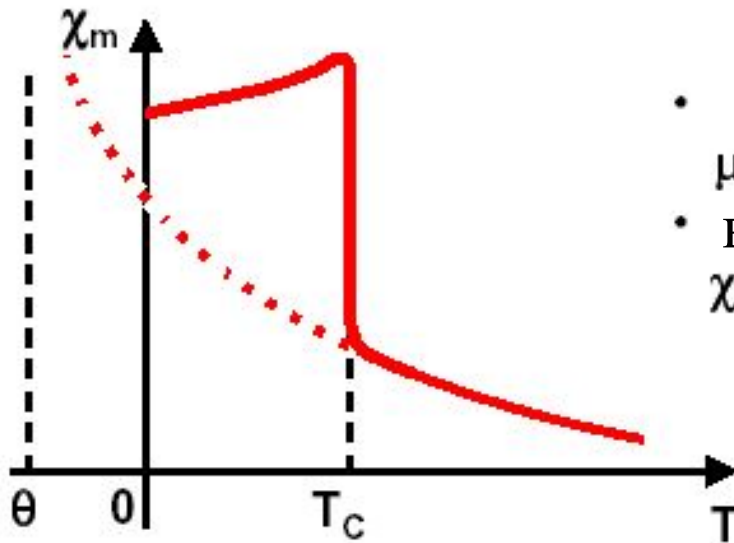
МАГНЕТИК



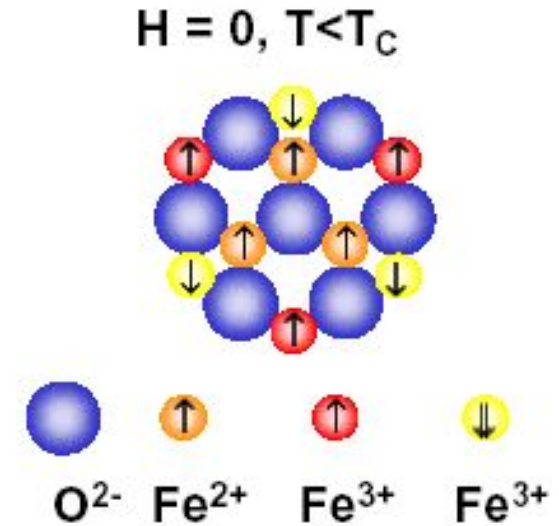
НЕМАГНЕТИК



# Магнитные свойства ферримагнетиков



- проницаемость  
 $\mu_r \gg 1$
- восприимчивость  
 $\chi_m > 0$



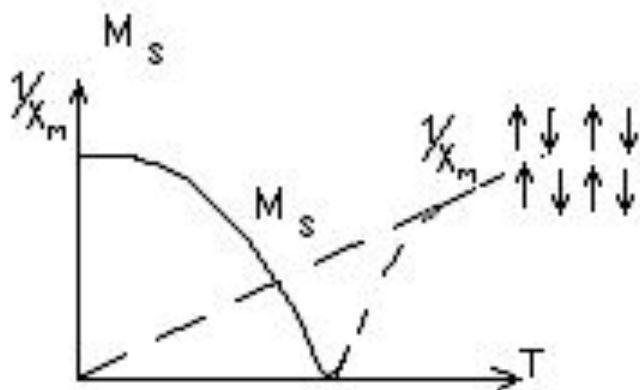
- температурная зависимость

$$T > T_c: \chi_m = \frac{C}{T - \Theta}$$

$$T < T_c: \chi_m$$

- атомы с постоянными магнитными дипольными моментами
- антипараллельное расположение ведет к частичной компенсации
- при  $T < T_c$  ориентация магнитных диполей (магнитные домены)

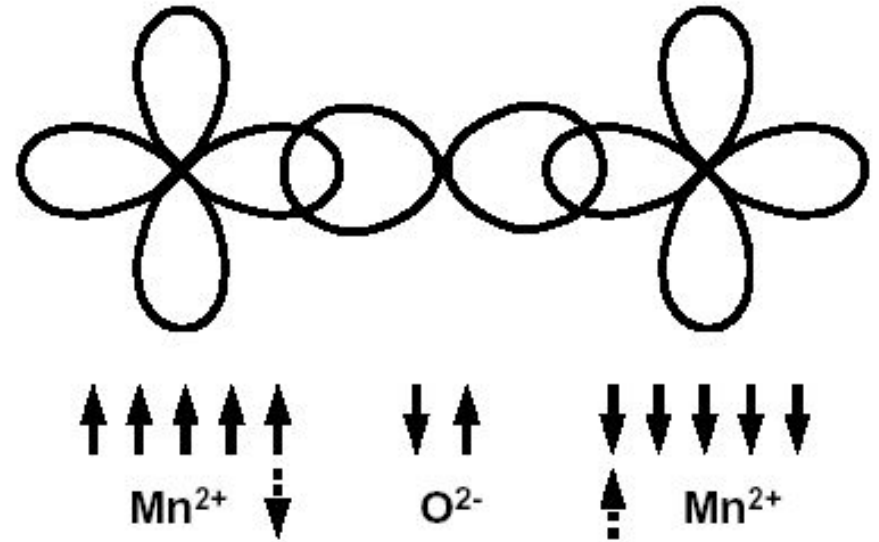
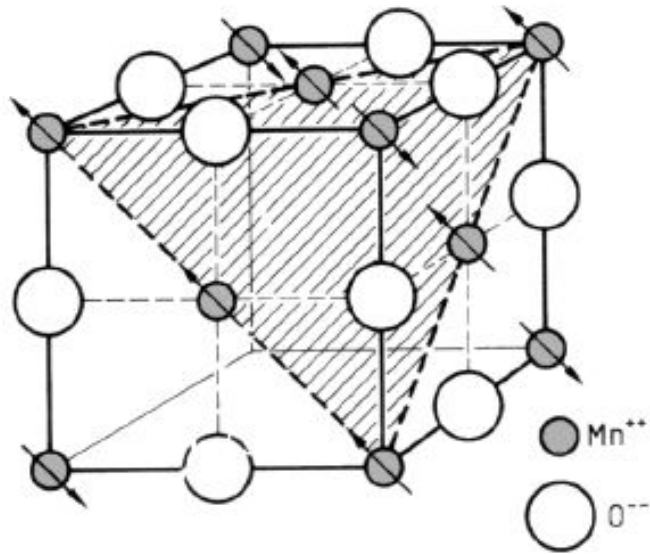
## Применение ферримагнетиков



К ферримагнетикам относятся ферриты - вещества типа  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , где  $Me$  - двухвалентный металл.

В ферримагнетиках возможно появление спонтанного намагничивания и поведение их аналогично поведению ферромагнетиков (рис). Ферриты нашли широкое применение в технике, поскольку, обладая хорошими магнитными свойствами, они в то же время имеют большое электрическое сопротивление (до  $10^7$  Ом·м) и могут использоваться в технике СВЧ в виду малых потерь на вихревые токи. Ферриты широко применяют также при изготовлении постоянных магнитов и в ячейках памяти ЭВМ.

# Антиферромагнетизм

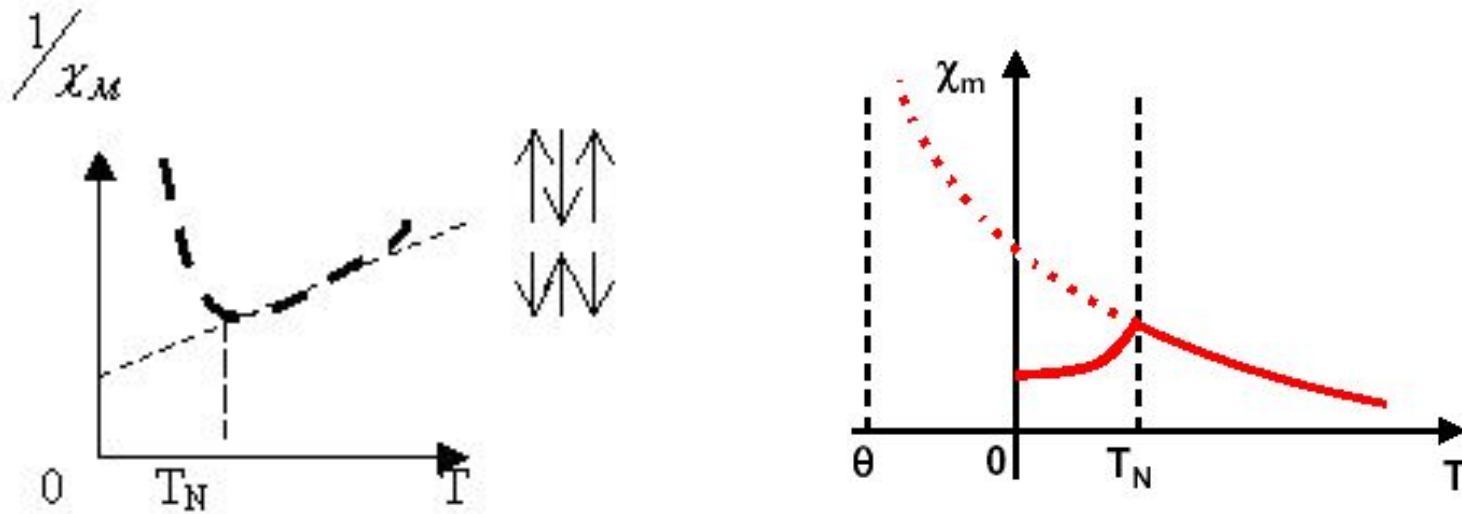


- кристаллическая решетка и ориентация спина в MnO
- противоположные магнитные моменты смежных Mn<sup>2+</sup> компенсируют друг друга

- расположение и спиновая ориентация соседних 3d – электронов в Mn<sup>2+</sup> и 2p электронов в O<sup>2-</sup>
- орбитальное перекрытие ведет к антипараллельной ориентации спинов

# Поведение антиферромагнетиков в магнитном поле при разной температуре

У антиферромагнетиков не возникает самопроизвольной намагниченности и при  $T=0^\circ\text{K}$  значение  $\chi_M=0$ . С ростом температуры магнитная восприимчивость возрастает и достигает максимума при  $T=T_N$ , где  $T_N$  - точка Нееля (антиферромагнитная точка Кюри).



При  $T > T_N$  антиферромагнетик теряет свои свойства и превращается в парамагнетик с линейной зависимостью

$$1/\chi_M = f(T^\circ\text{K})$$

Спасибо за внимание