

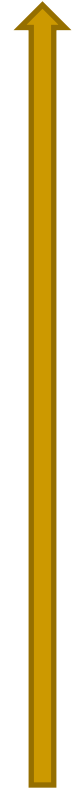
# ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА И НАНОСИСТЕМ

***Физика электрических и магнитных  
функциональных материалов***

*Васильев А.Н., Маркина М.М., Волкова О.С.*

# Магнетизм

H



Диамагнетизм



Парамагнетизм



Антиферромагнетизм



Ферромагнетизм



Ферримагнетизм



Суперпарамагнетизм



Миктомагнетизм



Асперомагнетизм

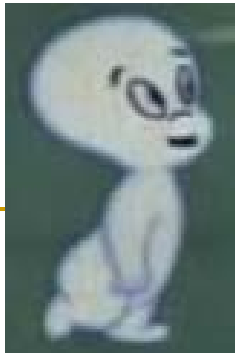


Фотомагнетизм



etc.

наноструктурирование



А также: сверхпроводимость как “призрак” магнетизма!  
(gossamer superconductivity)



# Антиферромагнетизм

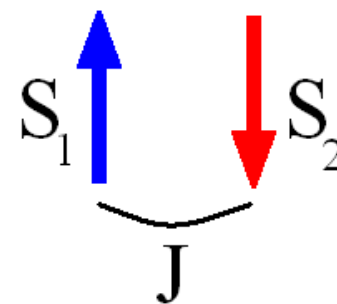
Антиферромагнетизм (или антиферромагнитное упорядочение) очень распространен. Этот тип упорядочения “не противоречит” принципу Паули. Обнаружение нового ферромагнетика случается реже, чем обнаружение нового сверхпроводника.

Антиферромагнетиком называется вещество, в котором установился дальний магнитный порядок при котором магнитные моменты катионов ориентированы антипараллельно. Причем, антипараллельно направленные магнитные подрешетки равны по величине.

Переход парамагнетик – антиферромагнетик происходит при температуре Нееля  $T_N$ , при которой появляется дальний магнитный порядок. Взаимодействия между магнитными моментами в антиферромагнитных изоляторах описываются с помощью гамильтониана:

$$\hat{H} = JS_1 \cdot S_2, J > 0$$

Здесь  $J$  – параметр обменного магнитного взаимодействия или обмен.

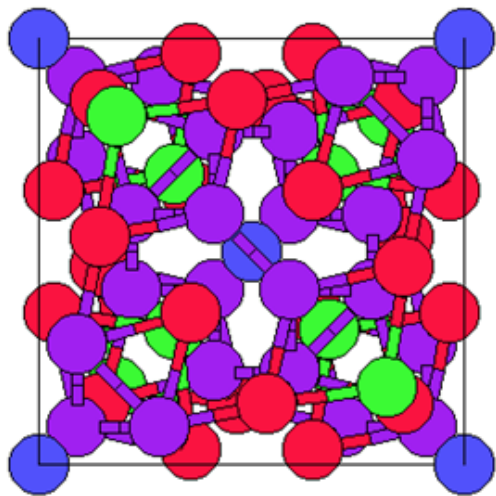
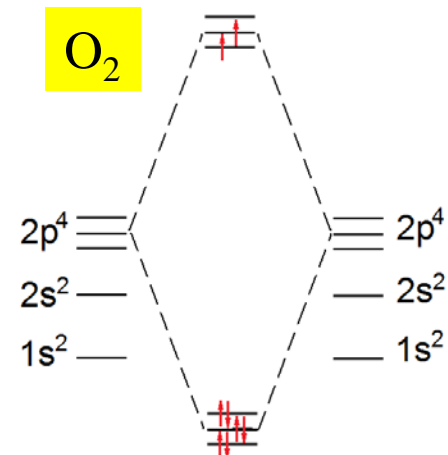


Скалярное векторное произведение векторов  $S_1$  и  $S_2$ :  $(S_1, S_2) = |S_1||S_2|\cos\alpha$

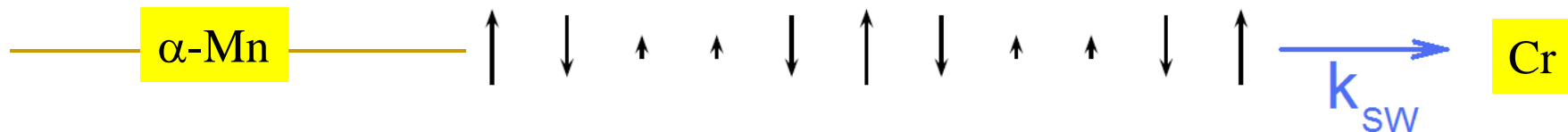
# Антиферромагнетики

Среди химических элементов антиферромагнетиком является твердый кислород  $\alpha$ -модификация при  $T_N = 24$  К. Это молекулярный магнетик со спином  $S = 1$  на разрыхляющих орбиталях.

Антиферромагнетиком при  $T_N = 95$  К становится также  $\alpha$ -модификация Mn с 58 атомами в элементарной магнитной ячейке  $2[1+12+12+4]$ .  $\beta$ -модификация Mn – зонный парамагнетик.



При  $T_N = 312$  К Cr переходит в антиферромагнитное состояние с поперечной волной спиновой плотности, как показано на рисунке. При  $T_{SF} = 123$  К Cr испытывает спин – флип переход, переходя в состояние с продольной волной спиновой плотности. Период магнитной структуры, несоизмеримый с решеткой, составляет около 21 межатомного расстояния.



# Антиферромагнетики

В редкоземельных металлах в некотором интервале температур наблюдаются сложные антиферромагнитные структуры. Эти металлы обладают сильно выраженной легкоплоскостной анизотропией.

$$E = J_1 M_1 M_2 \cos \varphi + J_2 M_1 M_3 \cos 2\varphi$$

$$M_1 = M_2 = M_3 = M$$

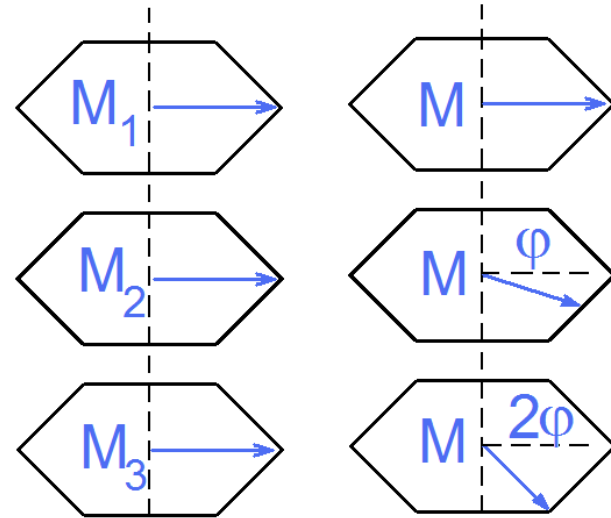
$$\frac{\partial E}{\partial \varphi} = -J_1 M^2 \sin \varphi - 4J_2 M^2 \sin \varphi \cos \varphi$$

$$\sin \varphi = 0 \Rightarrow \varphi = 0, \pi$$

Коллинеарные магнитные структуры

$$\cos \varphi = -\frac{J_1}{4J_2} \Rightarrow \varphi = \arccos\left(-\frac{J_1}{4J_2}\right)$$

Геликоидальные магнитные структуры



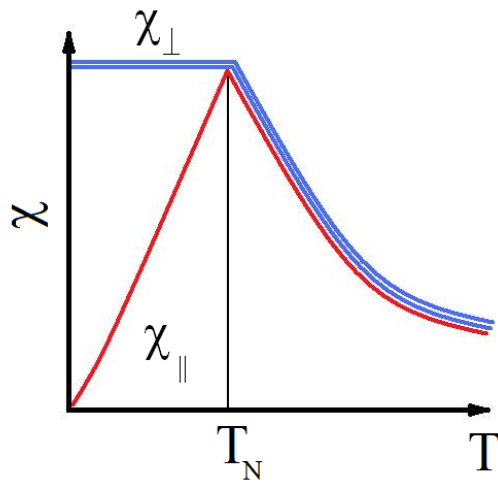
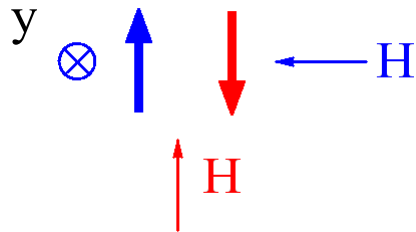
Элемент	$T_1$ , К	$T_N$ , К
Dy	85	179
Ho	20	133
Er	20	85
Tm	22	60
Tb	219	230

# Температурная зависимость $\chi$ антиферромагнетика

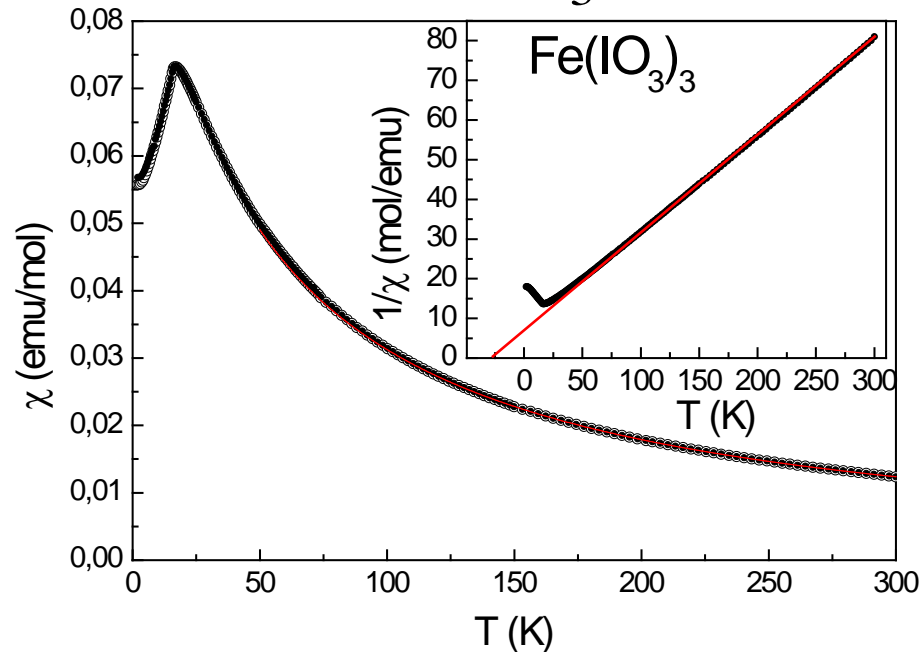
$$\chi_{AF} \sim 1 \text{ emu/mol}$$

В монокристаллах при низких температурах ( $T < T_N$ ) поведение магнитной восприимчивости зависит от направления внешнего магнитного поля.

В поликристаллических образцах магнитная восприимчивость

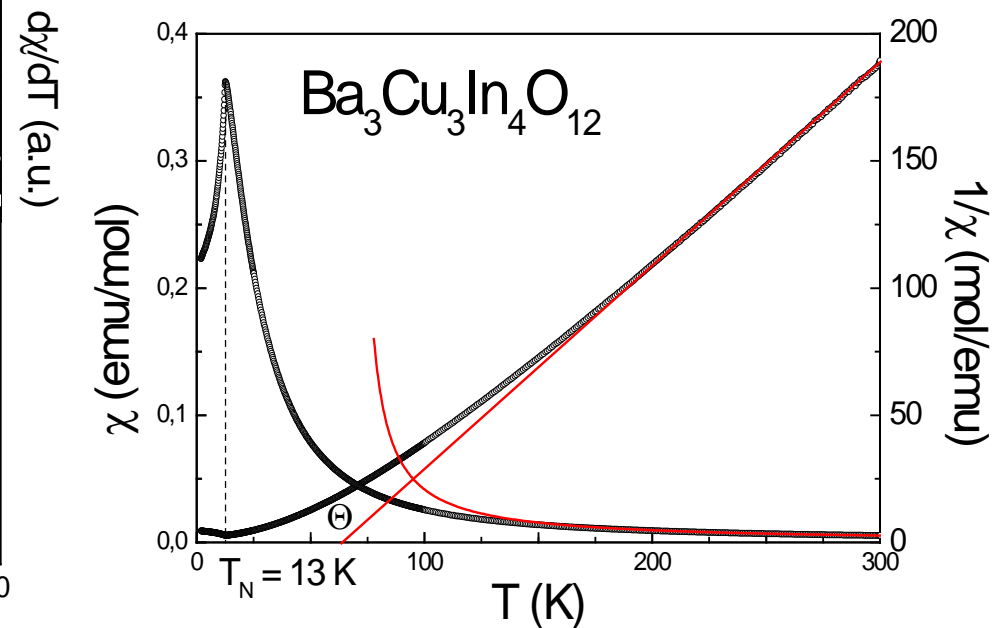
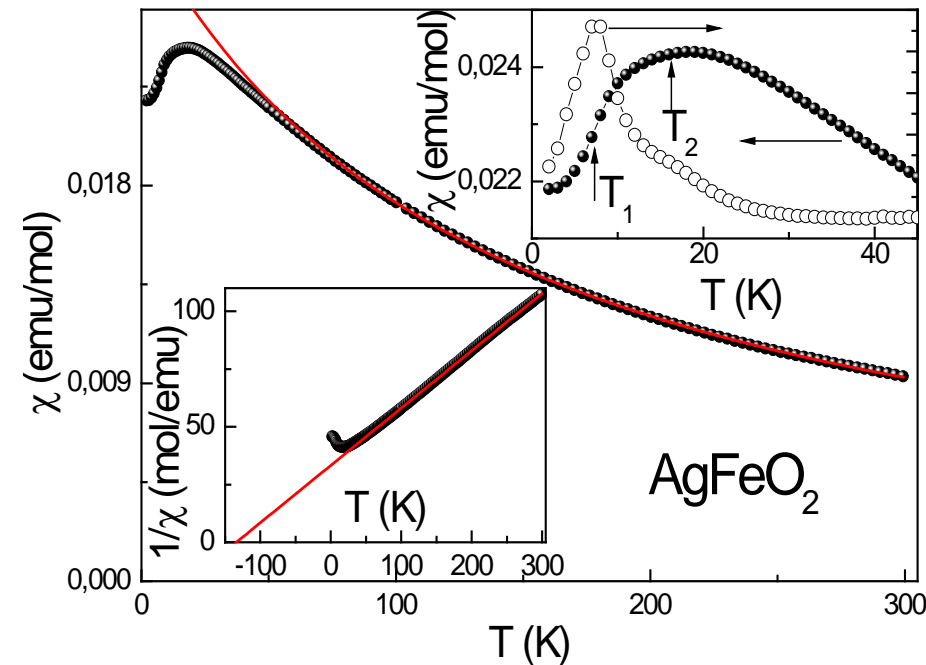
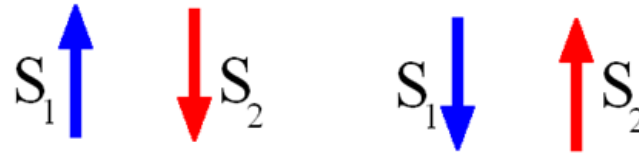


$$\chi_{poly} = \langle \chi \rangle = \frac{\chi_{\parallel} + 2\chi_{\perp}}{3}$$



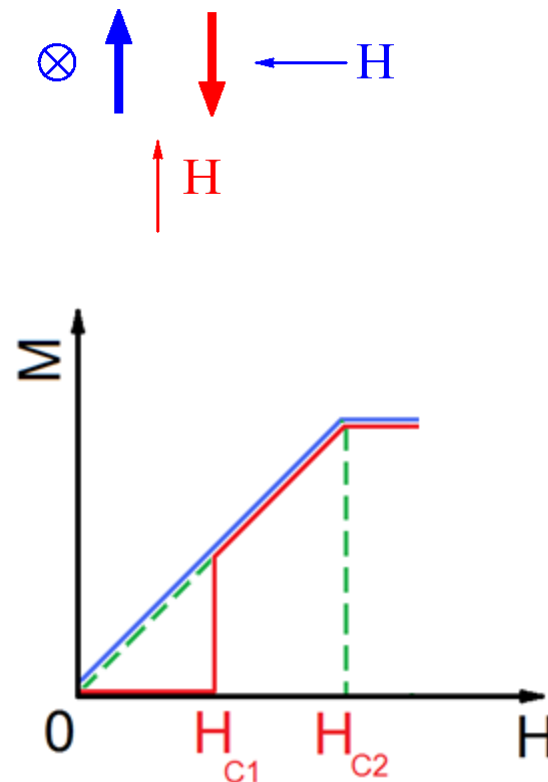
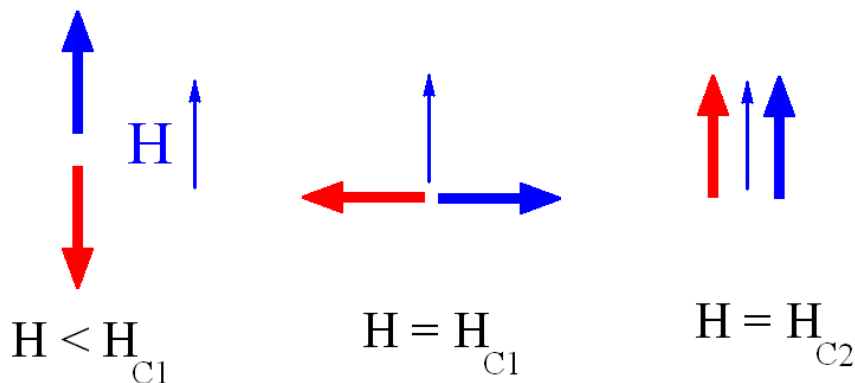
# Температурная зависимость $\chi$ антиферромагнетика

При высоких температурах  $T \gg T_N$  зависимость  $\chi(T)$  подчиняется закону Кюри –Вейсса:  $\chi = \chi_0 + C/(T-\Theta)$ . В АФ температура Вейсса  $\Theta$ , как правило, отрицательна и по абсолютной величине больше температуры Нееля:  $\Theta/T_N = 2 \div 3$ . Однако, в сильно – фрустрированных системах  $\Theta$  может превышать  $T_N$  в 10 раз. Иногда в антиферромагнетиках  $\Theta$  бывает положительна.



# Полевая зависимость $M$ антиферромагнетика

При  $T \ll T_N$  приложение к АФ внешнего магнитного поля может приводить к развороту спинов перпендикулярно полю по достижению им критической величины  $H_{C1}$ . Это явление называется спин – флоп переходом. При дальнейшем увеличении магнитного поля магнитные моменты доворачиваются вдоль направления поля. Достижение полного момента насыщения происходит в критическом поле  $H_{C2}$ , которое называется полем спин – флип перехода.





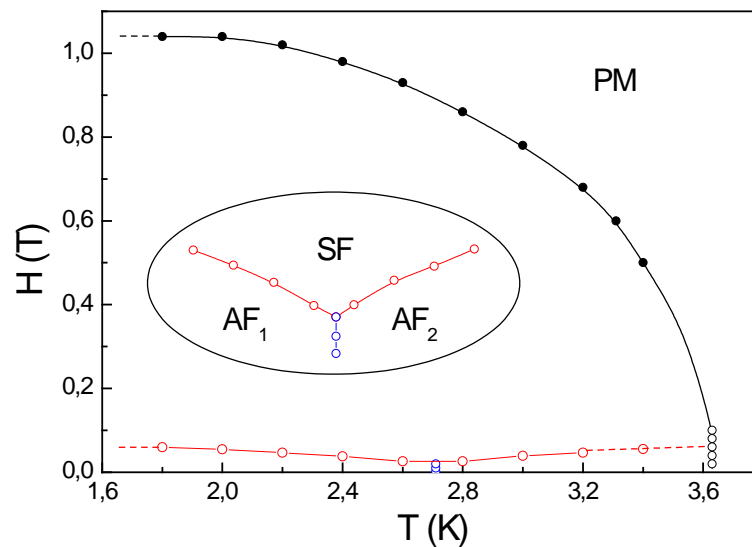
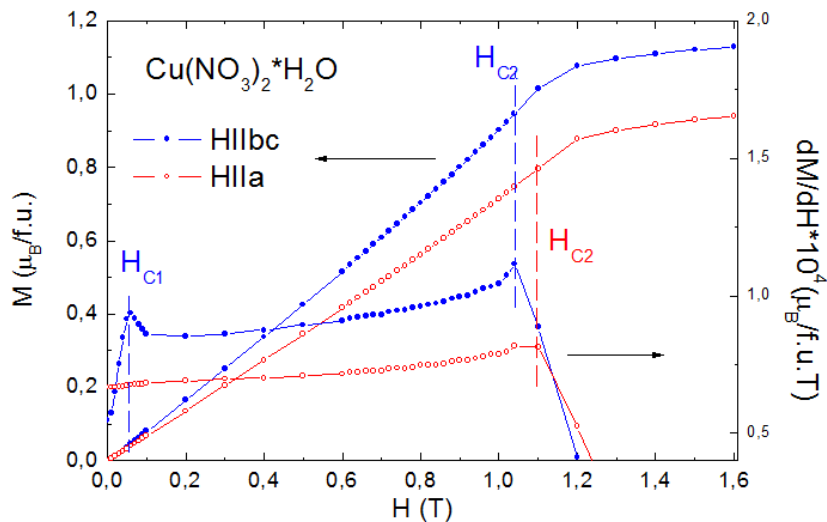
# Полевая зависимость $M$ антиферромагнетика

Поле спин – флоп перехода определяется магнитной анизотропией:

$$H_{C1} = \sqrt{H_E^2 - 2H_E H_A}$$

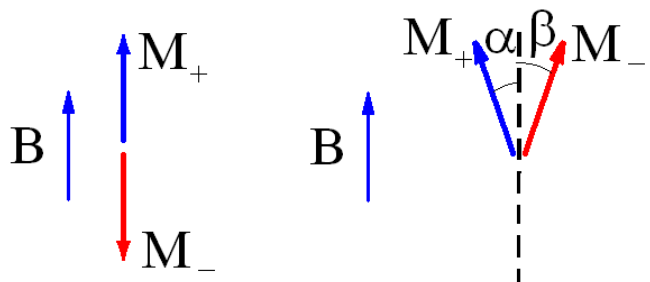
Поле спин – флип перехода определяется обменным магнитным полем  $H_E$ :

$$H_{C2} = H_E = 2J$$



Магнитная фазовая  
H-T диаграмма

# Природа спин – флоп перехода



Полная энергия системы включает обменное слагаемое  $AM^2$ , Зеемановский вклад  $MB$ , а также слагаемое из-за магнитокристаллической анизотропии  $1/2\Delta(\cos^2\alpha + \cos^2\beta)$ .

$$E = AM^2 \cos(\alpha + \beta) - MB \cos \alpha - MB \cos \beta - \frac{1}{2} \Delta (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta)$$

Если  $\alpha=0, \beta=\pi$ , то  $E = -AM^2 - \Delta$

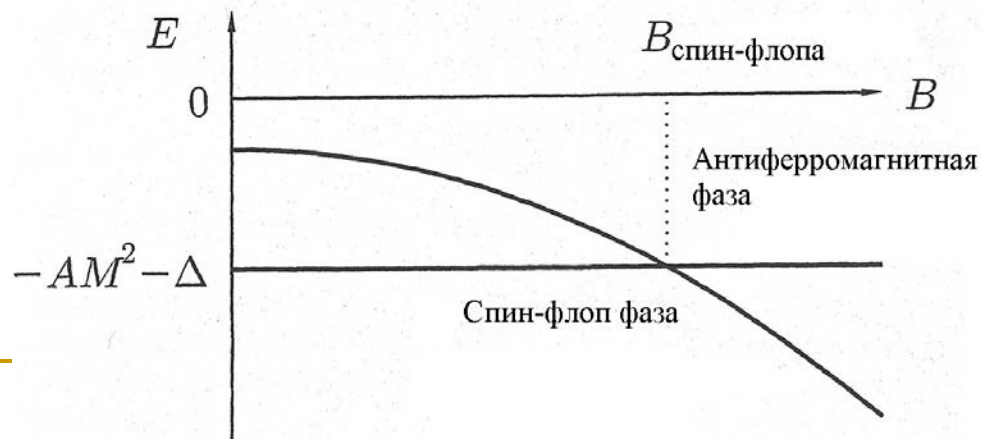
Если  $\alpha=\beta$ , то  $E = AM^2 \cos 2\alpha - 2MB \cos \alpha - \Delta \cos^2 \alpha$

Условие минимума обменной энергии (без анизотропийного слагаемого):

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = 0 = -2AM^2 \sin 2\alpha + 2MB \sin \alpha$$

$$-4AM^2 \sin \alpha \cos \alpha + 2MB \sin \alpha = 0$$

$$\alpha = \arccos \frac{B}{2AM}$$



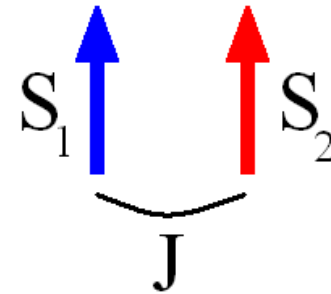
Подставляем это решение обратно в выражение для полной энергии.

# Ферромагнетизм

Ферромагнетики — вещества, в которых ниже определённой критической температуры (точки Кюри) устанавливается дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов (в неметаллических кристаллах) или моментов коллективизированных электронов (в металлических кристаллах). Иными словами, ферромагнетик — такое вещество, которое при охлаждении ниже определённой температуры приобретает магнитные свойства.

$$\hat{H} = JS_1 \cdot S_2, J < 0$$

Здесь  $J$  — параметр обменного магнитного взаимодействия или обмен.



Ферромагнетики втягиваются в область более сильного магнитного поля.

Магнитная восприимчивость ферромагнетиков положительна и значительно больше единицы в магнитоупорядоченной области.

$$M_{\text{FM}} \sim 10^4 \text{ emu/mol}$$

# Температурная зависимость $M$ ферромагнетика

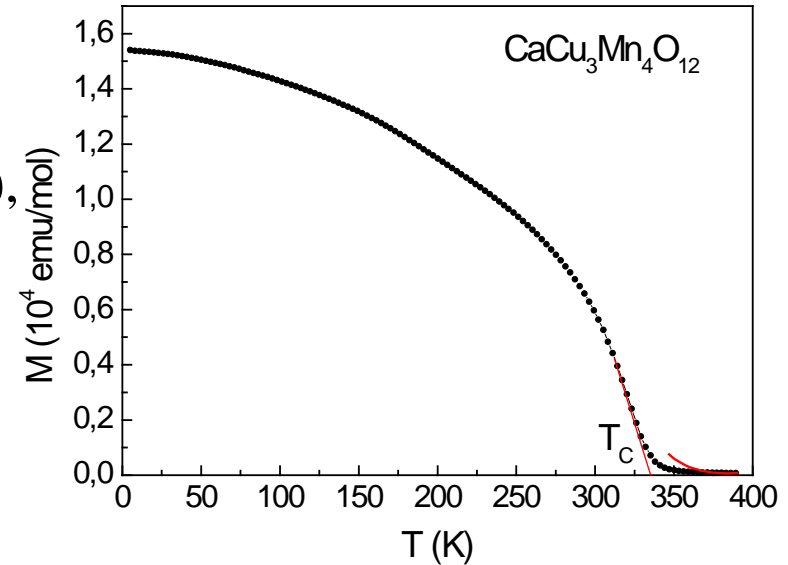
При высоких температурах  $T > T_C$  зависимости  $\chi(T) = M/H$  описывается законом Кюри-Вейсса. Причем,  $\Theta \approx T_C$ .

При низких температурах  $T < T_C$  намагниченность описывается функцией Бриллюэна.

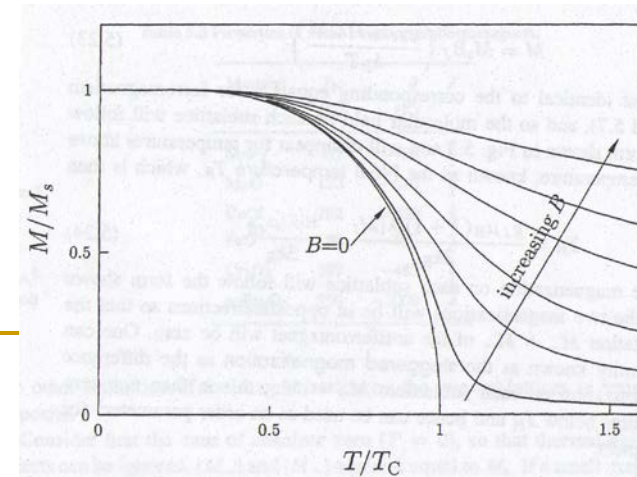
$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{1}{2J}x\right),$$

$$x = \frac{g\mu_B JB}{k_B T}$$

$$\coth x = \frac{\exp(x) + \exp(-x)}{\exp(x) - \exp(-x)}$$



В магнитном поле использование термина “температура Кюри” некорректно. Как можно определить точку Кюри?



# Определение $T_C$ методом Белова - Арротта

Ниже температуры Кюри возникает спонтанная намагниченность. Нечетными степенями пренебрегаем, т.к. энергия системы не должна зависеть от знака магнитного момента.

$$E = \frac{1}{2} \alpha M^2 + \frac{1}{4} \beta M^4 - MH$$

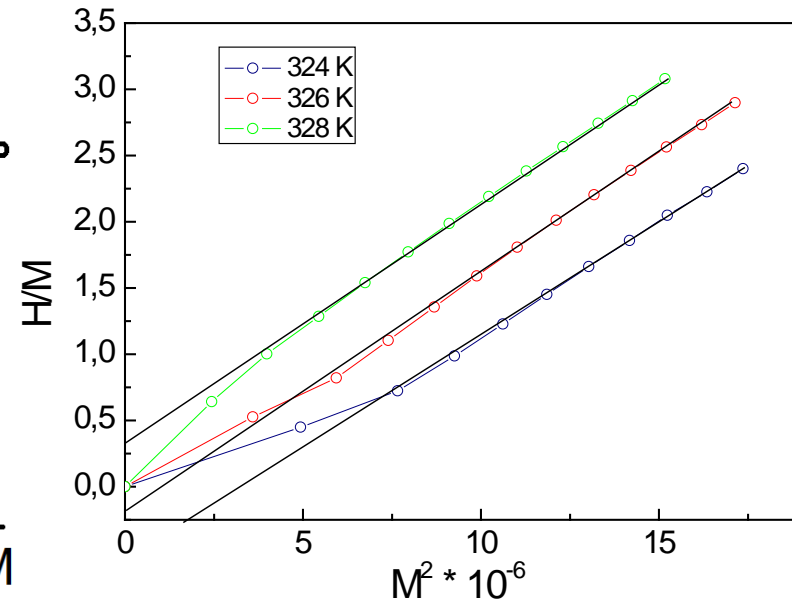
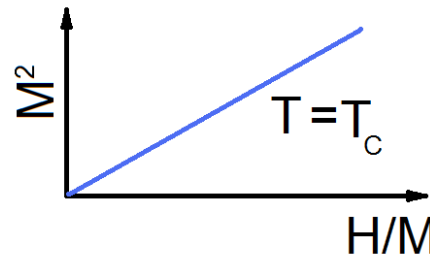
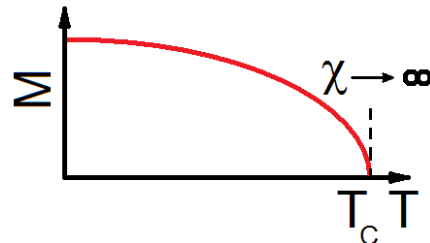
Последнее слагаемое добавляется из-за взаимодействия ферромагнетика со внешним магнитным полем.

Система устойчива в минимуме энергии:

$$\frac{dE}{dM} = \alpha M + \beta M^3 - H = 0$$

$$\alpha M + \beta M^3 = H$$

$$\alpha + \beta M^2 = \frac{H}{M} = 0$$

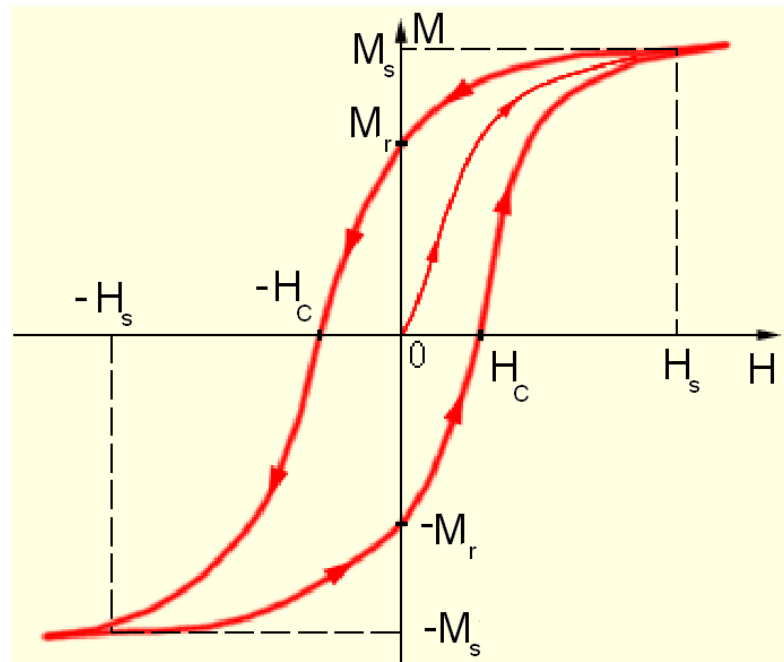
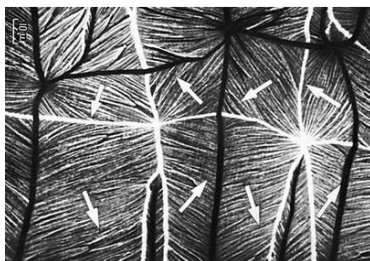


# Полевая зависимость $M$ ферромагнетика

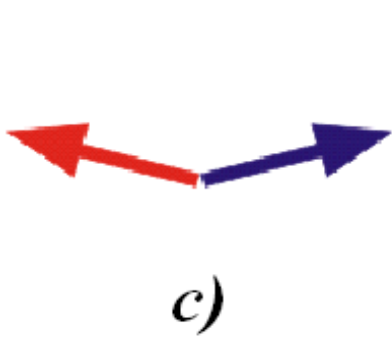
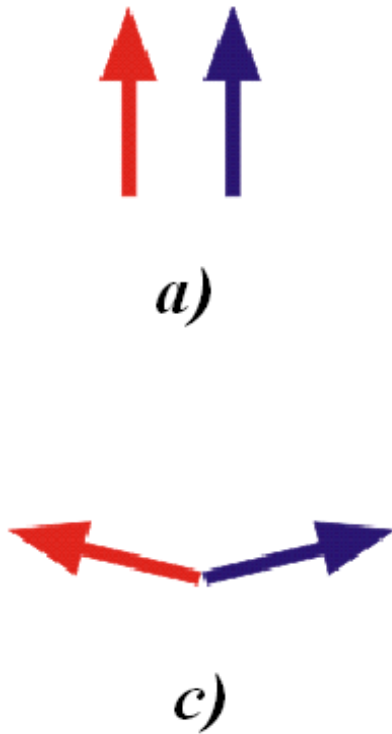
Вид кривой намагничивания ферромагнетика определяется доменными процессами: смещением доменных границ и вращением векторов намагниченности в доменах.

Если образец ферромагнетика был намагничен во внешнем поле до насыщения  $M_s$ , то после выведения поля на ноль остается остаточный магнитный момент  $M_r$ . Для того, чтобы размагнитить образец нужно приложить к нему магнитное поле противоположного направления — коэрцитивная сила  $H_C$ .

Магнитомягкие материалы размагничиваются в отсутствие магнитного поля ( $M_r$  — мало), магнитожесткие — наоборот ( $M_r$  — велико).



# Ферримагнетизм



Структуры, промежуточные между ферромагнетиками и антиферромагнетиками называются ферримагнетиками.

c) Скошенный антиферромагнетик появляется, благодаря включению в гамильтониан векторного произведения магнитных моментов (взаимодействие Мория - Дзялошинского).

d) Антиферромагнетизм в системе ионов с разными значениями магнитных моментов.