

# **Ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики, обменное взаимодействие**

Сделала: студент 4 курса  
группы 23ф181, Бердюгина  
Елизавета Андреевна

# Введение:

Материалы, помещенные во внешнее магнитное поле, намагничиваются.

Известно, что электроны обладают **орбитальными и спиновыми магнитными моментами**, а магнитные свойства атома обусловлены в основном магнитными свойствами его электронов.

В случае нескольких электронов полный, или **собственный**, магнитный момент атома определяется векторной суммой орбитальных и спиновых моментов с учетом их направления.



Рис.1. Электроны обладают орбитальными и спиновыми магнитными моментами.

# Введение:

Орбитальные и спиновые магнитные моменты могут иметь лишь одно из двух возможных направлений – **согласное или противоположное.**

В том случае, если орбитальные и спиновые магнитные моменты направлены в противоположные стороны, магнитные моменты пары электронов взаимно компенсируются.

Это имеет место в любой полностью заполненной оболочке атома.

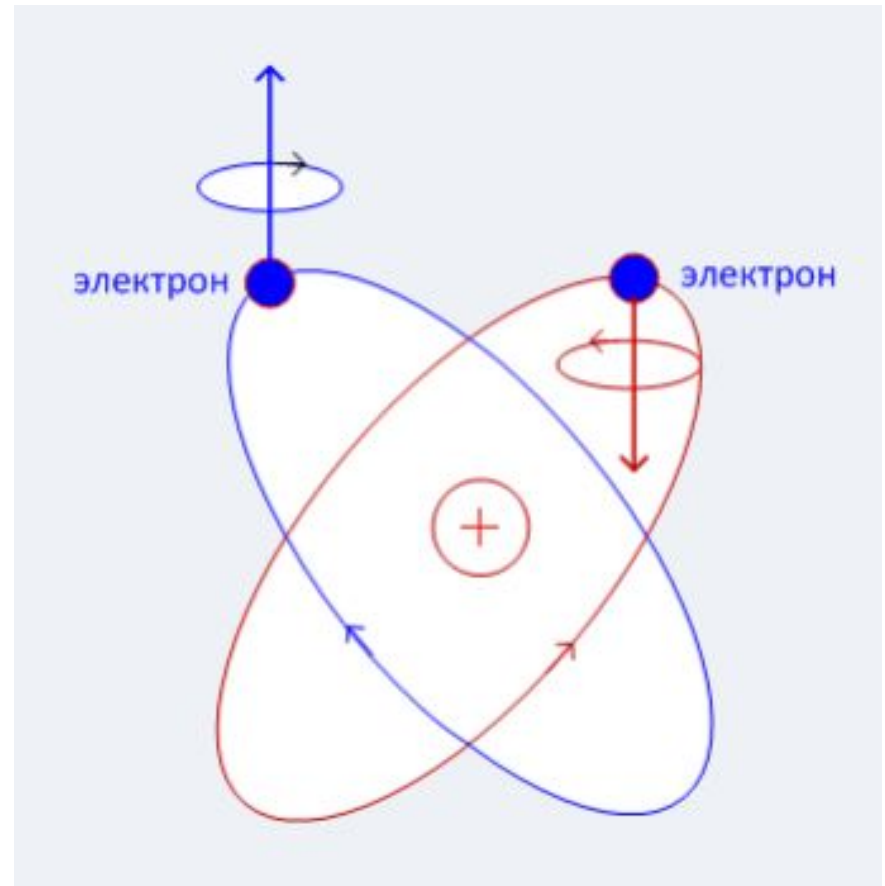


Рис. 2. Магнитные моменты пары электронов взаимно компенсируются.

# Введение:

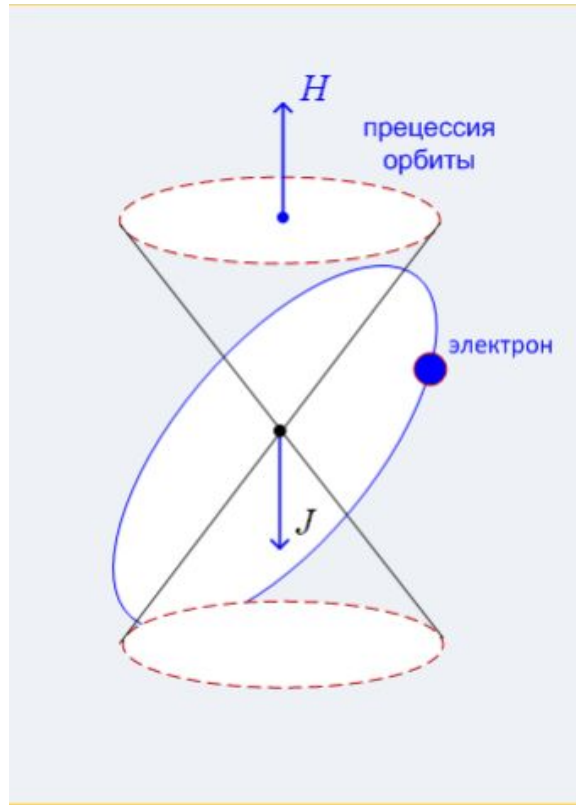


Рис.3. Прецессия орбиты электрона.

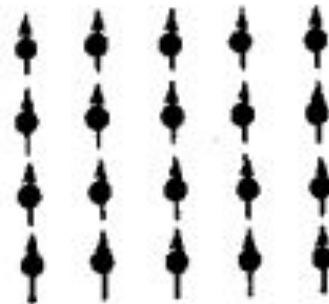
Если на атом воздействует внешнее магнитное поле напряженностью  $H$ , то возникает **прецессия орбит** электронов вокруг вектора этого поля.

Прецессия орбиты сопровождается появлением дополнительного магнитного момента, направление которого согласно правилу Ленца всегда противоположно направлению внешнего магнитного поля.

# Ферромагнетики

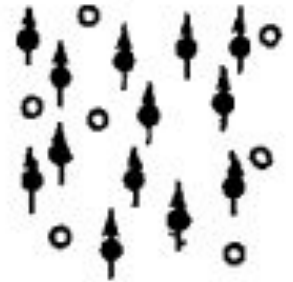
**Ферромагнетики** – вещества, в которых наблюдается (ниже температуры Кюри) магнитная упорядоченность, соответствующая параллельному расположению спинов в макроскопических областях (доменах) даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

*Кристаллический*



Fe

*Аморфный*



Fe<sub>80</sub>P<sub>20</sub>, FeF<sub>2</sub>

Рис.4. Идеальный ферроматизм.

# Ферромагнетики

Магнитная восприимчивость  $\chi \sim 10^{-2} \div 10^{-5}$

Магнитная проницаемость  $\mu \approx 1,0001..$



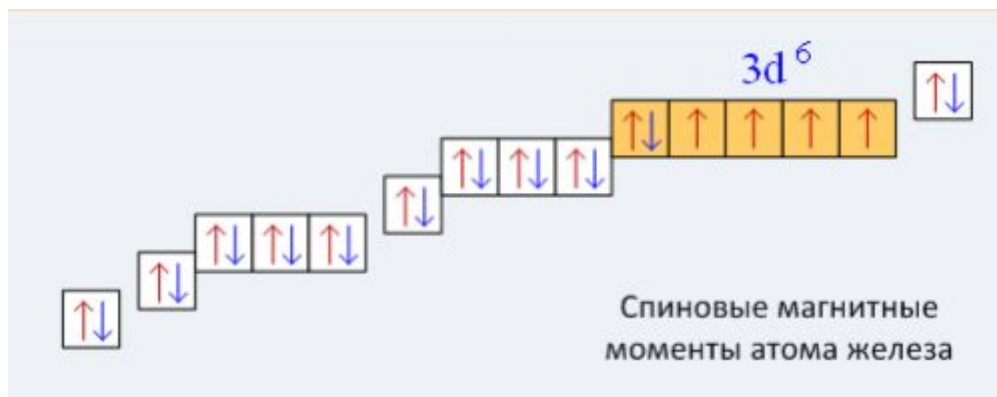
# Ферромагнетики

В создании магнитного момента атома принимают участие не все его электроны, а только небольшая их часть. Это объясняется тем, что магнитные спиновые моменты части электронов имеют противоположные направления и **взаимно компенсируют друг друга**, вследствие чего эти электроны становятся нейтральными в магнитном отношении.

Ферромагнитные свойства определяются нескомпенсированными спинами электронов.

# Ферромагнетики

В атоме железа не заполнена предпоследняя подоболочка ( $3d$ ), которой не хватает четырех электронов. У этой оболочки имеются пять «положительных» спинов и один «отрицательный» спин. Таким образом, имеется **четыре нескомпенсированных спина**, которые и определяют результирующий магнитный момент атома.



Отсутствие компенсации спиновых моментов в одном из внутренних слоев электронной оболочки атома является необходимым условием ферромагнетизма.



# Ферромагнетики

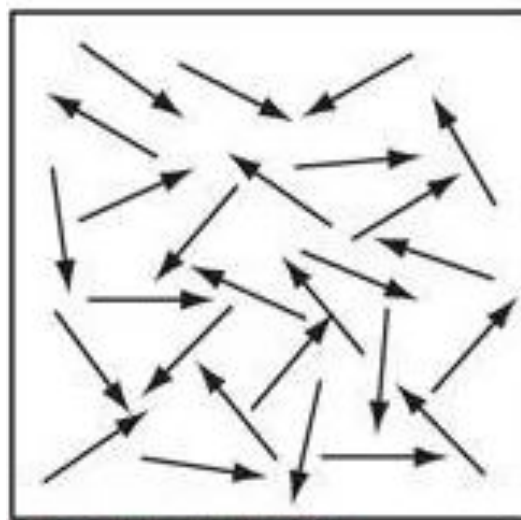
Наличие нескомпенсированных спинов во внутренних слоях является **необходимым, но недостаточным условием ферромагнетизма.**

Вторым условием возникновения ферромагнетизма является **наличие сильного электростатического взаимодействия между электронами соседних атомов, способного ориентировать их нескомпенсированные спиновые магнитные моменты одинаковым образом.**

# Модель Кюри-Вейсса:

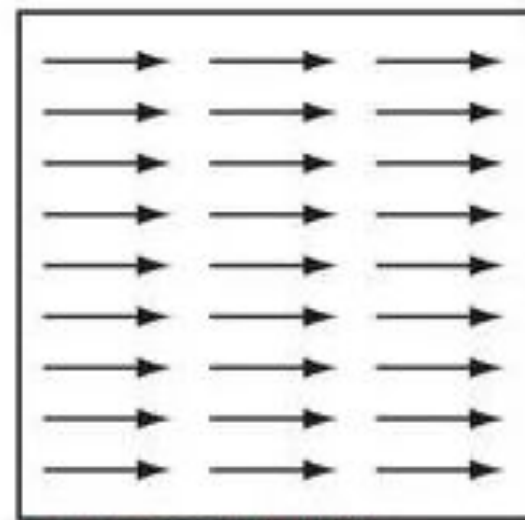
Наличие у вещества спонтанной намагниченности  $\vec{M}_s$  означает, что атомные угловые и магнитные моменты ориентированы в веществе упорядоченным образом.

С ростом температуры наступает момент когда тепловое возбуждение разрушает упорядочение магнитных моментов и ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.



ПАРАМАГНЕТИКИ

$$T > T_c$$



ФЕРРОМАГНЕТИКИ

$$T = 0$$

# Модель Кюри-Вейсса:

В модели Кюри-Вейсса считается, что обменное поле  $\vec{B}_E$  пропорционально намагниченности вещества  $\vec{M}$  :

$$\vec{B}_E = \lambda \vec{M}$$

Здесь  $\lambda$  – постоянная величина, не зависящая от  $T$ .  
Определяется из опыта.

Газ магнитных стрелок упорядочивается полем

$$\vec{B} + \vec{B}_E = \vec{B} + \lambda \vec{M}$$

Где  $\vec{B}$  – внешнее магнитное поле.

# Модель Кюри-Вейсса:

Для определения намагниченности ферромагнетика получаем следующие трансцендентное уравнение.

$$M = N\mu_B \tanh \frac{\mu_B(B + \lambda M)}{k_B T}$$

Где  $N$  – число парамагнитных ионов в единице объема,  $\mu_B$  - магнитный момент,  $k_B T$  - тепловая энергия.

# Модель Кюри-Вейсса:

Проанализируем решение уравнения при  $B = 0$ :

$$M_s = N\mu_B \operatorname{th} \lambda \frac{\mu_B M_s}{k_B T}$$

Пусть уравнение вида:

$$bx = \operatorname{th} x$$

Решениями данного трансцендентного уравнения:

1. Высокие температуры:

$$x_1 = 0, M_s = 0$$

2. Низкие температуры:

$$x_1 = 0 \quad x_2 = -x_2 \neq 0, M_s \neq 0$$

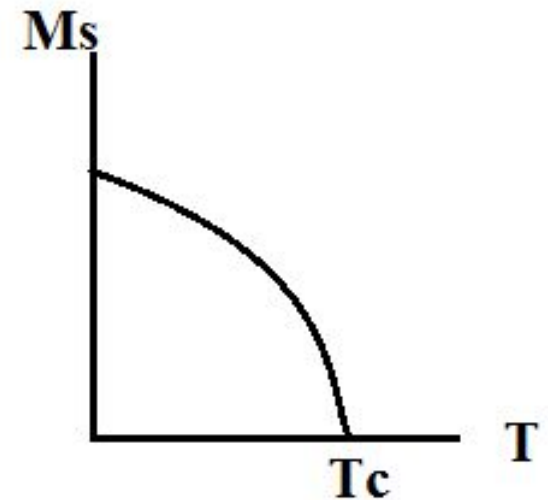
# Модель Кюри-Вейсса:

- Дипольное взаимодействие является магнитным по своей природе и меньше кулоновского взаимодействия.
- Обменное взаимодействие связано с действием кулоновских сил между электронами при учете их квантово-механической природы.

# Влияние температуры:

При повышении температуры усиливается дезориентирующее действие теплового движения атомов, которое стремится разрушить состояние самопроизвольной намагниченности ферромагнетика, обусловленное обменным взаимодействием электронов соседних атомов.

При повышении температуры спонтанная намагниченность **уменьшается** и при некоторой температуре, называемой **температурой Кюри**, обращается в нуль.



При  $T$  больше  $T_c$  ферромагнетик становится парамагнетиком.

## Основные особенности ферромагнетиков.

1

Наличие макроскопических областей (доменов) спонтанного (самопроизвольного) намагничивания до насыщения без воздействия внешнего магнитного поля.

2

Сильная зависимость магнитного состояния от напряженности внешнего магнитного поля и температуры.

3

Наличие температуры (температуры Кюри), выше которой ферромагнетик теряет свойства ферромагнетика и становится парамагнетиком.

4

Наличие отставания намагниченности от напряженности магнитного поля (**магнитный гистерезис**).

5

Изменение линейных размеров и формы при изменении магнитного состояния (**явление магнитострикции**).



# Антиферромагнетики

**Антиферромагнетики** – материалы, в которых в результате обменного взаимодействия соседних атомов происходит антипараллельная ориентация равных по величине магнитных моментов.

Магнитная восприимчивость  $\chi \sim 10^{-2} \div 10^{-5}$

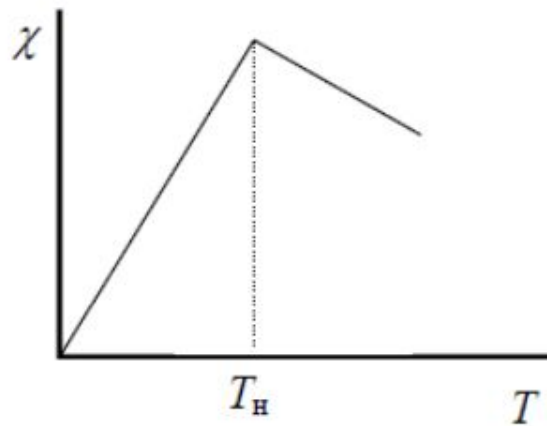
Магнитная проницаемость  $\mu \approx 1,0001..$



Гематит

# Антиферромагнетики

В точке Нееля  $T_N$  упорядоченное расположение спинов полностью нарушается и антиферромагнетик становится парамагнетиком, после чего зависимость  $\chi(T)$  подчиняется закону Кюри-Вейсса.



Зависимость магнитной восприимчивости антиферромагнетика от температуры

# Ферримагнетики

**Ферримагнетики** – материалы, в которых обменное взаимодействие соседних атомов приводит к антипараллельной ориентации различных по величине (нескомпенсированных) магнитных моментов.

Магнитная восприимчивость  $\chi \sim \text{до } 10^7$

Магнитная проницаемость  $\mu \text{ до } 10^7$



Титаномагнетит

# Литература

- 1. Легостаев, Николай Степанович Материалы электронной техники: учеб. пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 239 с.
- 2. Иванов С. В., Мартышко П.С., Избранные главы физики: Магнетизм, магнитный резонанс, фазовые переходы. Курс лекций. Изд. 2-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2012.-208 с.
- 3. H u r d С.М. Varieties of Magnetic Order in Solids.—Contemp. Phys., 1982, v. 23, No. 5, pp. 469—493.— Перевод А. С. Пахомова.