

# Феноменологическая классификация магнетиков

Лектор

доцент Котельникова О.А.

Каф. магнетизма физического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова

**ДИАМАГНЕТИЗМ** (от греч.  $\delta\acute{\iota}\alpha$ - (приставка – здесь означающая расхождение силовых линий), и магнетизм) – в широком смысле – свойство системы макроскопических размеров, помещенной во внешнее магнитное поле, намагничиваться (приобретать отличную от нуля намагниченность) в направлении, противоположном направлению внешнего поля.

В классической физике диамагнетизм объясняется явлением электромагнитной индукции, в силу которой при увеличении внешнего магнитного поля в атомах, молекулах и других структурных единицах вещества индуцируются замкнутые токи, создающие магнитный момент. В соответствии с правилом Ленца этот магнитный момент антипараллелен внешнему полю.

**ПАРАМАГНЕТИЗМ** (греч. *πάρα* - возле, рядом, и магнетизм) – в узком смысле – свойство системы макроскопических размеров, помещенной во внешнее магнитное поле, намагничиваться (приобретать отличную от нуля намагниченность) в направлении примерно совпадающем с направлением внешнего поля. В указанном смысле **ПАРАМАГНЕТИЗМ** противопоставляется **ДИАМАГНЕТИЗМУ**.

Парамагнетизм впервые был описан М. Фарадеем.

**Как понять является вещество диа- или пара магнитным?**

**Поместим образец в градиентное магнитное поле. Диамагнетик будет выталкиваться из области более сильного поля, парамагнетик - втягиваться.**

## Диаманетики

Элемент	$\chi \cdot 10^6$ эксперимент
<b>He</b>	-1,9
<b>Ne</b>	-6,7- -7,5
<b>Ar</b>	-18- -19
<b>Kr</b>	- 28- -29
<b>Xe</b>	-42- -44
<b>Cu</b>	-5,4
<b>Ag</b>	-21,56
<b>Au</b>	-29,59
<b>Cd</b>	-20
<b>Hg</b>	-33,3

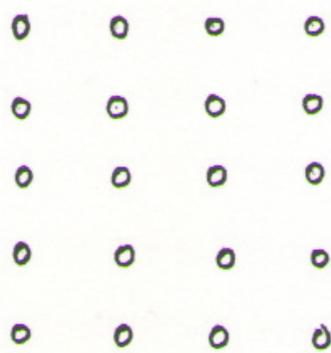
## Парамагнетики

Элемент	$\chi \cdot 10^6$ эксперимент
<b>Li</b>	18 - 25
<b>Na</b>	15,6
<b>K</b>	21,5
<b>Rb</b>	19,2
<b>Cs</b>	29,9
<b>Mg</b>	6
<b>Ca</b>	44
<b>Al</b>	16,7

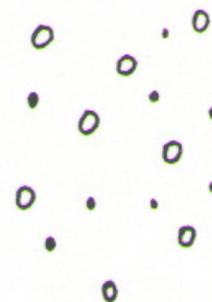
# Диамагнетики

Кристаллический

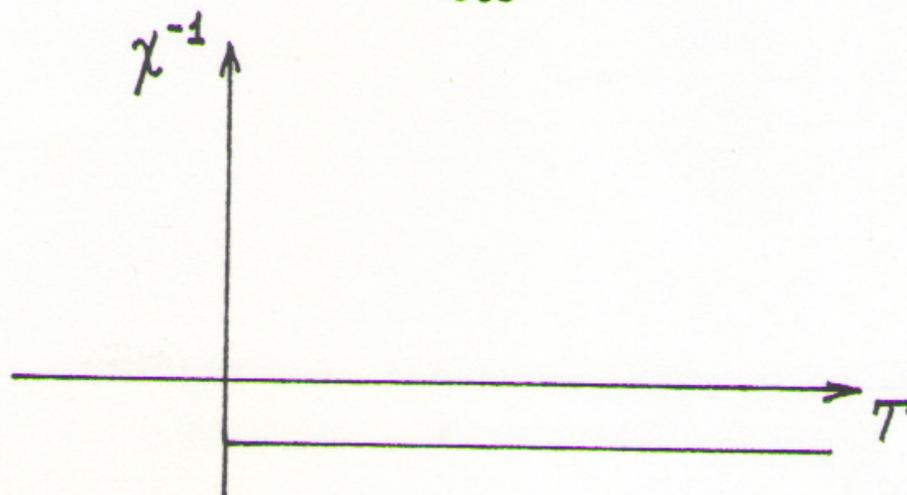
Аморфный



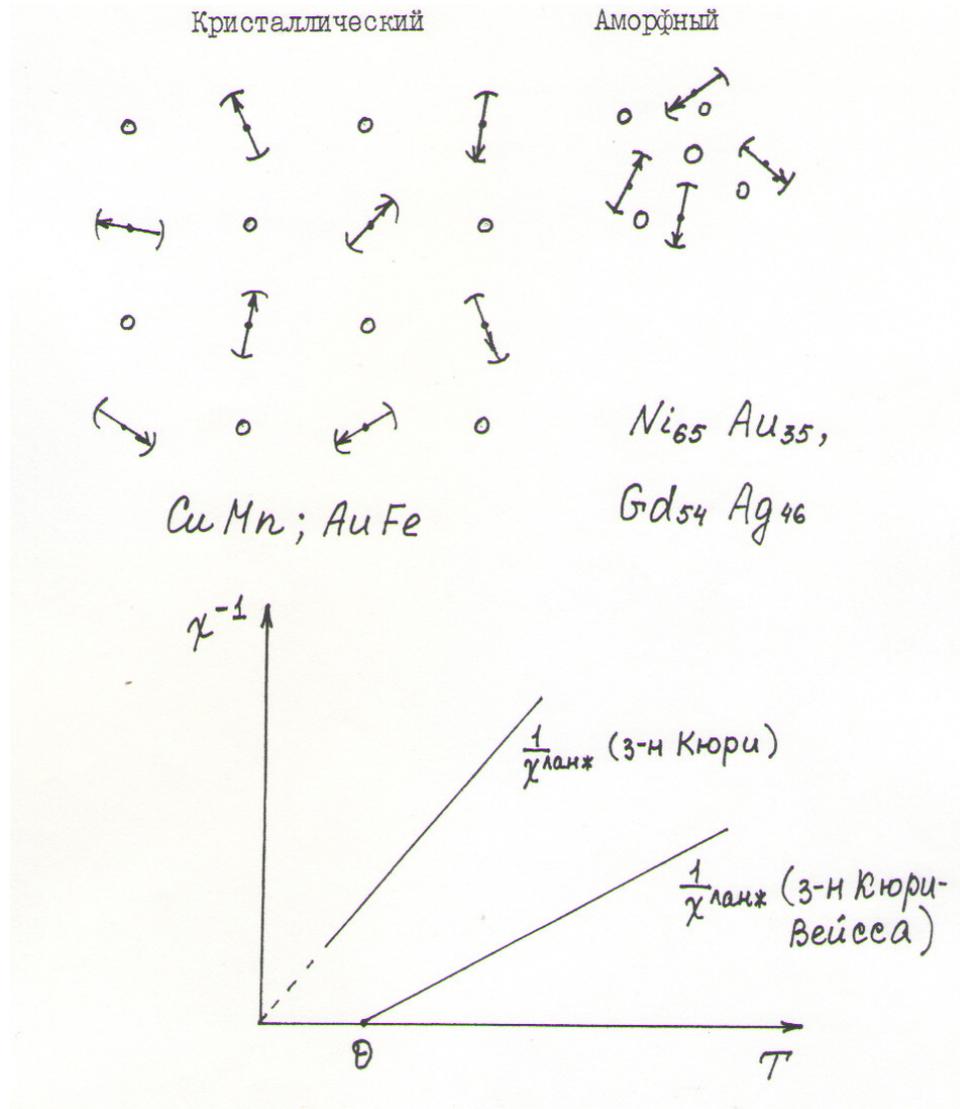
Cu



SiO<sub>2</sub>



# Парамагнетизм



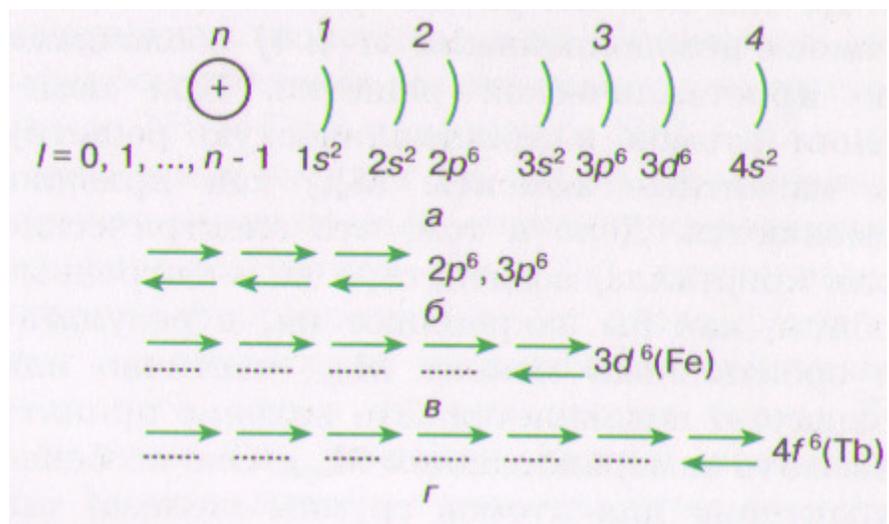
**Ферромагнетизм** (от латинского ferrum – железо и магнетизм) – магнитоупорядоченное состояние вещества, в котором средние значения магнитных моментов всех частиц вещества ориентированы параллельно за счет положительного обменного взаимодействия.

Спонтанная намагниченность отлична от нуля

**Антиферромагнетизм** - магнитоупорядоченное состояние кристаллического вещества, в котором все или часть магнитных моментов соседних атомов ориентированы антипараллельно за счет отрицательного обменного взаимодействия. Спонтанная намагниченность вещества равна нулю.

**Ферримагнетизм** – нескомпенсированный антиферромагнетизм магнитоупорядоченное состояние вещества, в котором магнитные моменты двух или нескольких подрешеток ориентированы антипараллельно за счет отрицательного обменного взаимодействия, но их магнитные моменты отличаются. Спонтанная намагниченность вещества отлична от нуля

## Правила Хунда. Атомы переходных металлов.



# Периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева

период	ряд	группы элементов																			
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII					
		а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б				
1	I	Водород <b>H</b> 1,00794 Hydrogen	<b>1</b> 1s <sup>1</sup>													Гелий <b>He</b> 4,0026 Helium	<b>2</b> 1s <sup>2</sup>				
2	II	Литий <b>Li</b> 6,941 Lithium	<b>3</b> 2s <sup>1</sup>	Бериллий <b>Be</b> 9,012182 Beryllium	<b>4</b> 2s <sup>2</sup>	Бор <b>B</b> 10,811 Boron	<b>5</b> 2p <sup>1</sup>	Углерод <b>C</b> 12,011 Carbon	<b>6</b> 2p <sup>2</sup>	Азот <b>N</b> 14,00674 Nitrogen	<b>7</b> 2p <sup>3</sup>	Кислород <b>O</b> 15,9994 Oxygen	<b>8</b> 2p <sup>4</sup>	Фтор <b>F</b> 18,9984032 Fluorine	<b>9</b> 2p <sup>5</sup>	Неон <b>Ne</b> 20,1797 Neon	<b>10</b> 2p <sup>6</sup>				
3	III	Натрий <b>Na</b> 22,989768 Sodium	<b>11</b> 3s <sup>1</sup>	Магний <b>Mg</b> 24,3050 Magnesium	<b>12</b> 3s <sup>2</sup>	Алюминий <b>Al</b> 26,981539 Aluminum	<b>13</b> 3p <sup>1</sup>	Кремний <b>Si</b> 28,0855 Silicon	<b>14</b> 3p <sup>2</sup>	Фосфор <b>P</b> 30,973762 Phosphorus	<b>15</b> 3p <sup>3</sup>	Сера <b>S</b> 32,066 Sulfur	<b>16</b> 3p <sup>4</sup>	Хлор <b>Cl</b> 35,4527 Chlorine	<b>17</b> 3p <sup>5</sup>	Аргон <b>Ar</b> 39,948 Argon	<b>18</b> 3p <sup>6</sup>				
4	IV	Калий <b>K</b> 39,0983 Potassium	<b>19</b> 4s <sup>1</sup>	Кальций <b>Ca</b> 40,078 Calcium	<b>20</b> 4s <sup>2</sup>	Скандий <b>Sc</b> 44,955910 Scandium	<b>21</b> 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>	Титан <b>Ti</b> 47,88 Titanium	<b>22</b> 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>	Ванадий <b>V</b> 50,9415 Vanadium	<b>23</b> 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>	Хром <b>Cr</b> 51,9961 Chromium	<b>24</b> 3d <sup>4</sup> 4s <sup>1</sup>	Марганец <b>Mn</b> 54,93805 Manganese	<b>25</b> 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>	Железо <b>Fe</b> 55,847 Iron	<b>26</b> 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>27</b> 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>	Кобальт <b>Co</b> 58,93320 Cobalt	<b>28</b> 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	Никель <b>Ni</b> 58,6934 Nickel
	V		<b>29</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	Медь <b>Cu</b> 63,546 Copper	<b>30</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	Цинк <b>Zn</b> 65,39 Zinc	Галлий <b>Ga</b> 69,723 Gallium	<b>31</b> 4p <sup>1</sup>	Германий <b>Ge</b> 72,61 Germanium	<b>32</b> 4p <sup>2</sup>	Мышьяк <b>As</b> 74,92159 Arsenic	<b>33</b> 4p <sup>3</sup>	Селен <b>Se</b> 78,96 Selenium	<b>34</b> 4p <sup>4</sup>	Бром <b>Br</b> 79,904 Bromine	<b>35</b> 4p <sup>5</sup>	Криптон <b>Kr</b> 83,80 Krypton	<b>36</b> 4p <sup>6</sup>			
5	VI	Рубидий <b>Rb</b> 85,4678 Rubidium	<b>37</b> 5s <sup>1</sup>	Стронций <b>Sr</b> 87,62 Strontium	<b>38</b> 5s <sup>2</sup>	Иттрий <b>Y</b> 88,90585 Yttrium	<b>39</b> 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>	Цирконий <b>Zr</b> 91,224 Zirconium	<b>40</b> 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>	Ниобий <b>Nb</b> 92,90638 Niobium	<b>41</b> 4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup>	Молибден <b>Mo</b> 95,94 Molybdenum	<b>42</b> 4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup>	Технеций <b>Tc</b> [98] Technetium	<b>43</b> 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>	Рутений <b>Ru</b> 101,07 Ruthenium	<b>44</b> 4d <sup>6</sup> 5s <sup>1</sup>	Родий <b>Rh</b> 102,90550 Rhodium	<b>45</b> 4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup>	Палладий <b>Pd</b> 106,42 Palladium	<b>46</b> 4d <sup>10</sup>
	VII		<b>47</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	Серебро <b>Ag</b> 107,8682 Silver	<b>48</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	Кадмий <b>Cd</b> 112,411 Cadmium	Индий <b>In</b> 114,818 Indium	<b>49</b> 5p <sup>1</sup>	Олово <b>Sn</b> 118,710 Tin	<b>50</b> 5p <sup>2</sup>	Сурьма <b>Sb</b> 121,757 Antimony	<b>51</b> 5p <sup>3</sup>	Теллур <b>Te</b> 127,60 Tellurium	<b>52</b> 5p <sup>4</sup>	Иод <b>I</b> 126,90447 Iodine	<b>53</b> 5p <sup>5</sup>	Ксенон <b>Xe</b> 131,29 Xenon	<b>54</b> 5p <sup>6</sup>			
6	VIII	Цезий <b>Cs</b> 132,90543 Cesium	<b>55</b> 6s <sup>1</sup>	Барий <b>Ba</b> 137,327 Barium	<b>56</b> 6s <sup>2</sup>	Лантан <b>La</b> 138,9055 Lanthanum	<b>57</b> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	Гафний <b>Hf</b> 178,49 Hafnium	<b>72</b> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>	Тантал <b>Ta</b> 180,9479 Tantalum	<b>73</b> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	Вольфрам <b>W</b> 183,84 Tungsten	<b>74</b> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	Рений <b>Re</b> 186,207 Rhenium	<b>75</b> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	Осмий <b>Os</b> 190,23 Osmium	<b>76</b> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	Иридий <b>Ir</b> 192,22 Iridium	<b>77</b> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	Платина <b>Pt</b> 195,08 Platinum	<b>78</b> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup>
	IX		<b>79</b> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>	Золото <b>Au</b> 196,96654 Gold	<b>80</b> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	Ртуть <b>Hg</b> 200,59 Mercury	Таллий <b>Tl</b> 204,3833 Thallium	<b>81</b> 6p <sup>1</sup>	Свинец <b>Pb</b> 207,2 Lead	<b>82</b> 6p <sup>2</sup>	Висмут <b>Bi</b> 208,98037 Bismuth	<b>83</b> 6p <sup>3</sup>	Полоний <b>Po</b> [209] Polonium	<b>84</b> 6p <sup>4</sup>	Астат <b>At</b> [210] Astatine	<b>85</b> 6p <sup>5</sup>	Радон <b>Rn</b> [222] Radon	<b>86</b> 6p <sup>6</sup>			
7	X	Франций <b>Fr</b> [223] Francium	<b>87</b> 7s <sup>1</sup>	Радий <b>Ra</b> 226,025 Radium	<b>88</b> 7s <sup>2</sup>	Актиний <b>Ac</b> [227] Actinium	<b>89</b> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	Резерфордий <b>Rf</b> [261] Rutherfordium	<b>104</b>	Дубний <b>Db</b> [262] Dubnium	<b>105</b>	Сиббгориум <b>Sg</b> [266] Seaborgium	<b>106</b>	Борий <b>Bh</b> [267] Bohrium	<b>107</b>	Хассий <b>Hs</b> [269] Hassium	<b>108</b>	Мейтнерий <b>Mt</b> [268] Meitnerium	<b>109</b>	Дармштадтий <b>Ds</b> [269] Darmstadtium	<b>110</b>
	XI		<b>111</b>	<b>112</b>	<b>113</b>	<b>114</b>	<b>115</b>	<b>116</b>	<b>117</b>	<b>118</b>											



- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

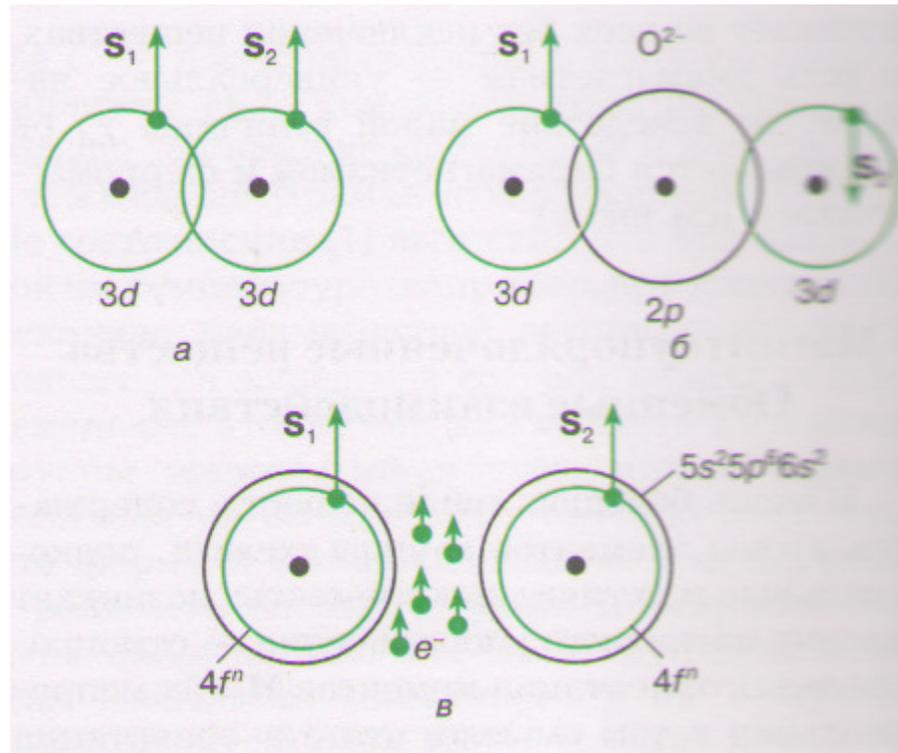
## Лантаноиды Lanthanides

Церий <b>Ce</b> 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 140,115 Cerium	Прозеродим <b>Pr</b> 4f <sup>3</sup> 140,90765 Praseodymium	Неодим <b>Nd</b> 4f <sup>4</sup> 144,24 Neodymium	Прометий <b>Pm</b> 4f <sup>5</sup> [145] Promethium	Самарий <b>Sm</b> 4f <sup>6</sup> 150,36 Samarium	Европий <b>Eu</b> 4f <sup>7</sup> 151,965 Europium	Гадолиний <b>Gd</b> 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 157,25 Gadolinium	Тербий <b>Tb</b> 4f <sup>9</sup> 158,92534 Terbium	Диспрозий <b>Dy</b> 4f <sup>10</sup> 162,50 Dysprosium	Гольмий <b>Ho</b> 4f <sup>11</sup> 164,93032 Holmium	Эрбий <b>Er</b> 4f <sup>12</sup> 167,26 Erbium	Тулий <b>Tm</b> 4f <sup>13</sup> 168,93421 Thulium	Иттербий <b>Yb</b> 4f <sup>14</sup> 173,04 Ytterbium	Лютеций <b>Lu</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 174,967 Lutetium
---	--	--	--	--	---	--	---	---	---	---	---	---	--

## Актиноиды Actinides

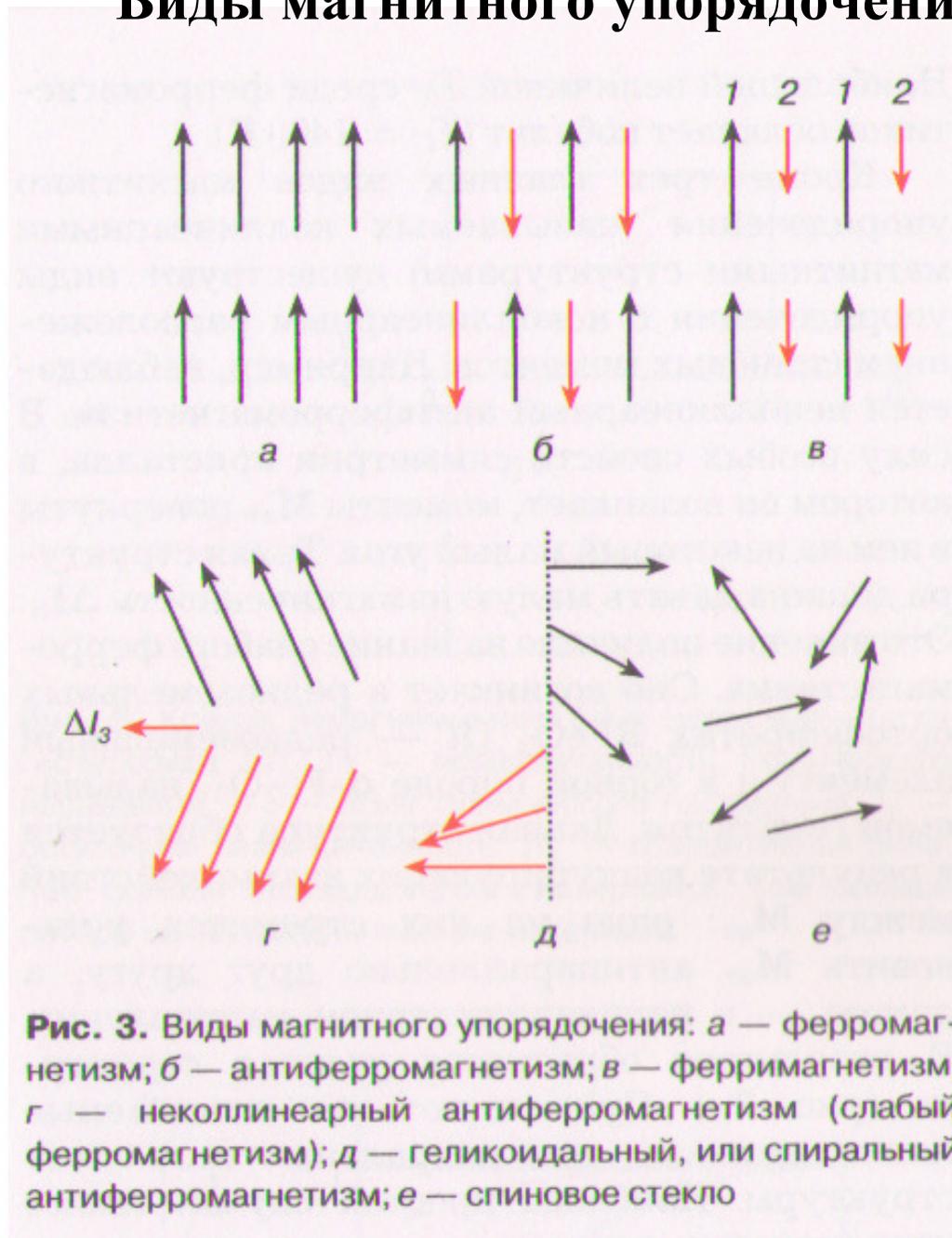
Торий <b>Th</b> 7s <sup>2</sup> 6d <sup>2</sup> 232,0381 Thorium	Протактиний <b>Pa</b> 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 231,03588 Protactinium	Уран <b>U</b> 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 238,0289 Uranium	Нептуний <b>Np</b> 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> [237] Neptunium	Плутоний <b>Pu</b> 5f <sup>6</sup> [244] Plutonium	Америций <b>Am</b> 5f <sup>7</sup> [243] Americium	Кюрий <b>Cm</b> 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> [247] Curium	Берклий <b>Bk</b> 5f <sup>9</sup> [247] Berkelium	Калифорний <b>Cf</b> 5f <sup>10</sup> [251] Californium	Эйнштейний <b>Es</b> 5f <sup>11</sup> [252] Einsteinium	Фермий <b>Fm</b> 5f <sup>12</sup> [257] Fermium	Менделевий <b>Md</b> 5f <sup>13</sup> [258] Mendelevium	Нобелий <b>No</b> 5f <sup>14</sup> [259] Nobelium	Лоуренсий <b>Lr</b> 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> [262] Lawrencium
---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--

## Обменное взаимодействие



Типы обменного взаимодействия: а – прямое, б – косвенное через возбуждение анионов кислорода, в – косвенное через электроны проводимости.

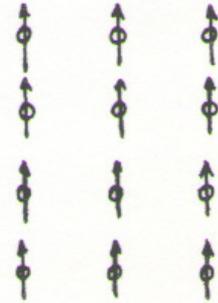
# Виды магнитного упорядочения



# Ферромагнетизм

Кристаллический

Аморфный

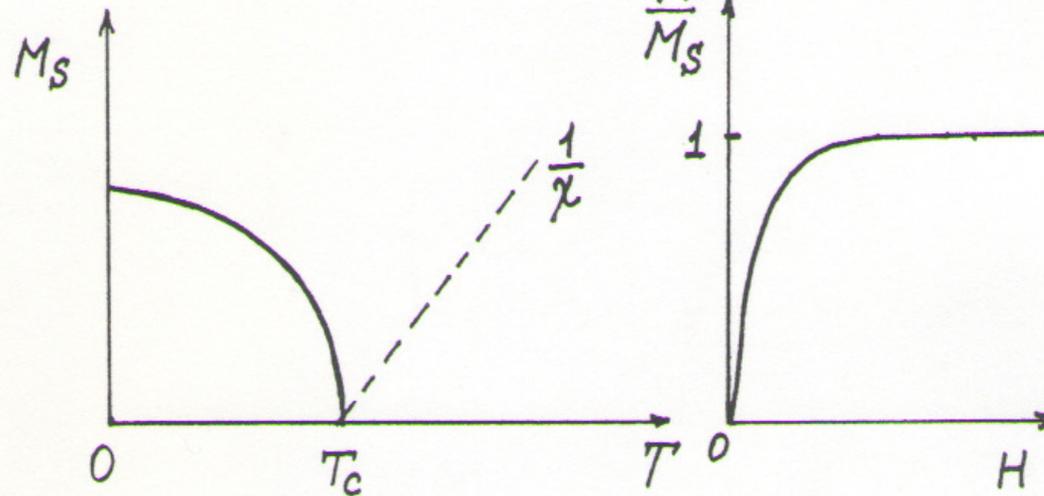


Fe

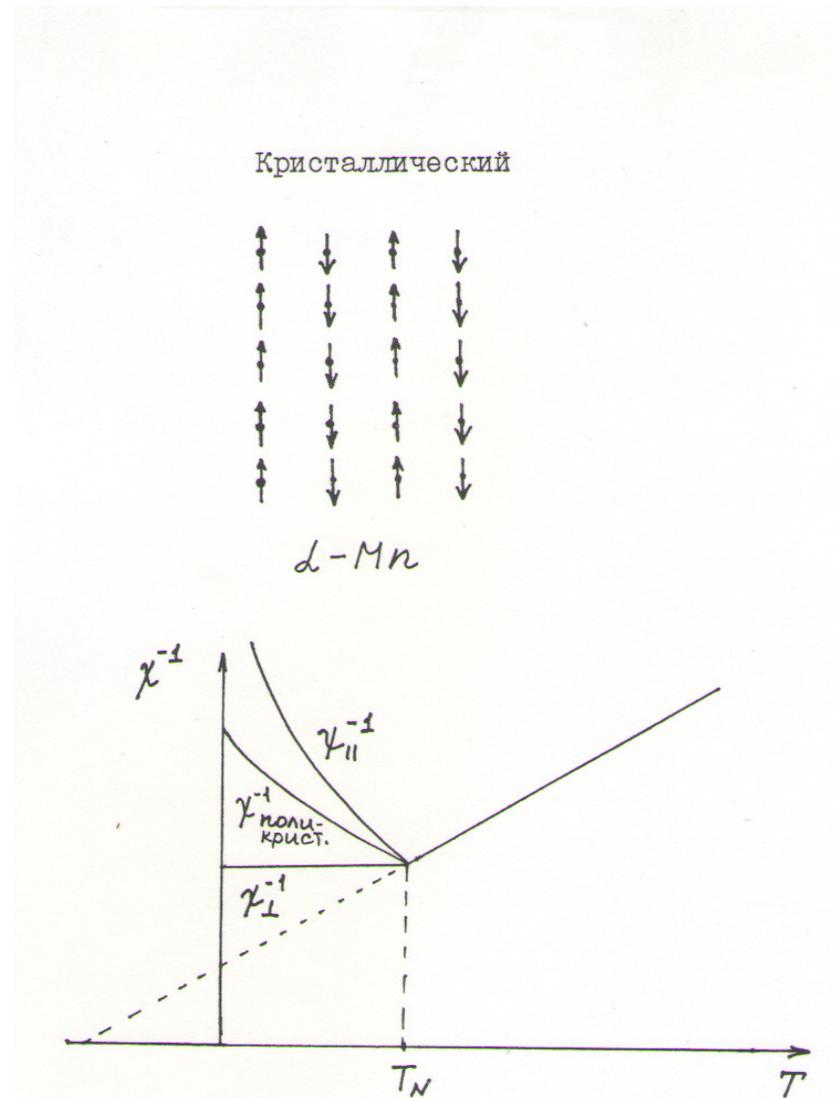


Fe F<sub>2</sub>

$$|\gamma| \gg |\beta|$$
$$\gamma > 0$$

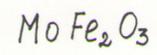


# Антиферромагнетизм

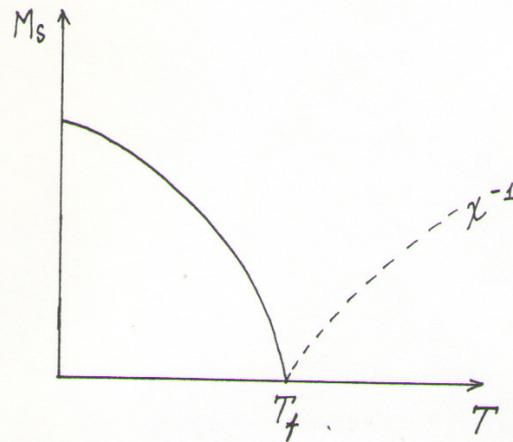


# Ферримагнетизм

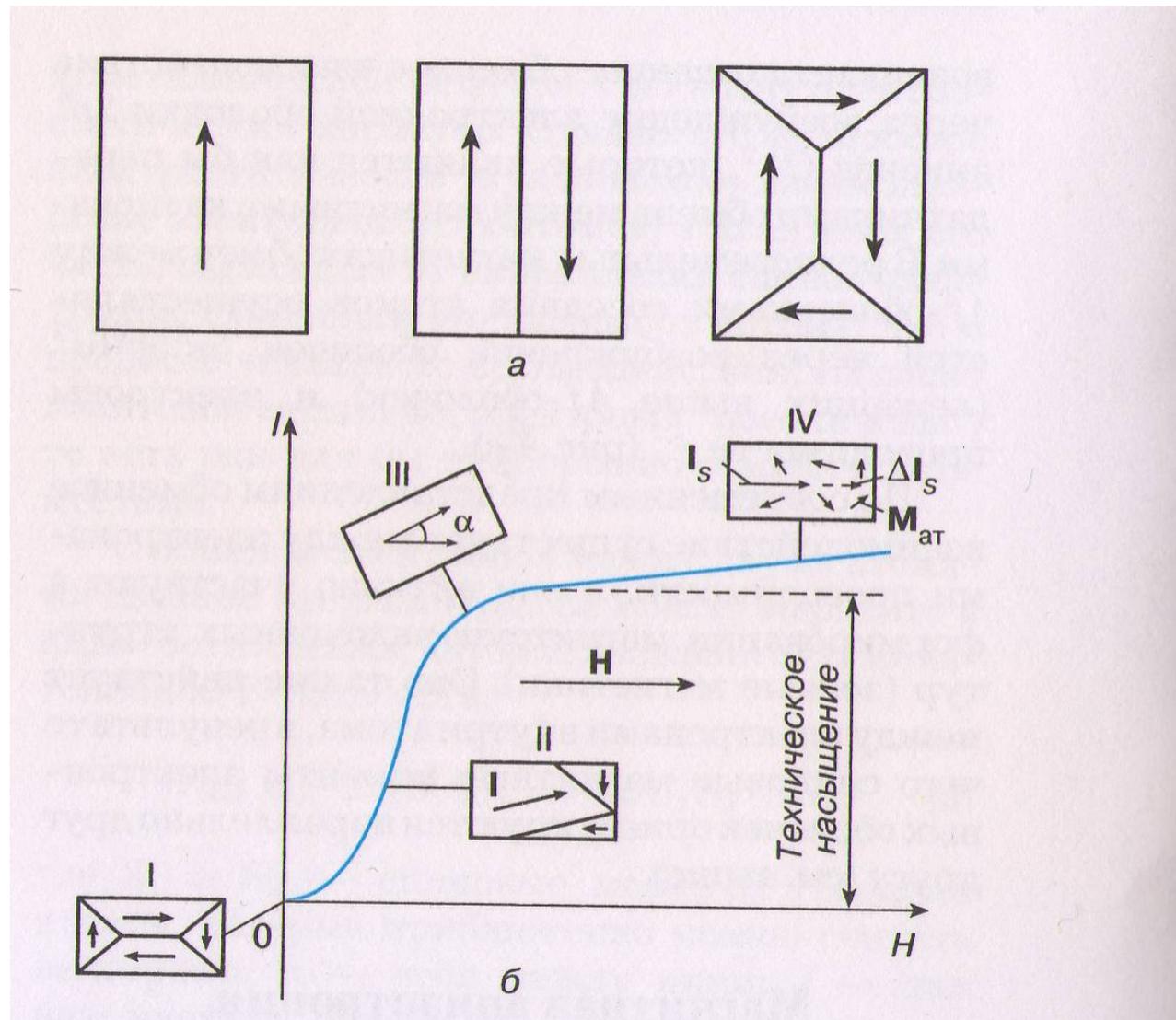
Кристаллический



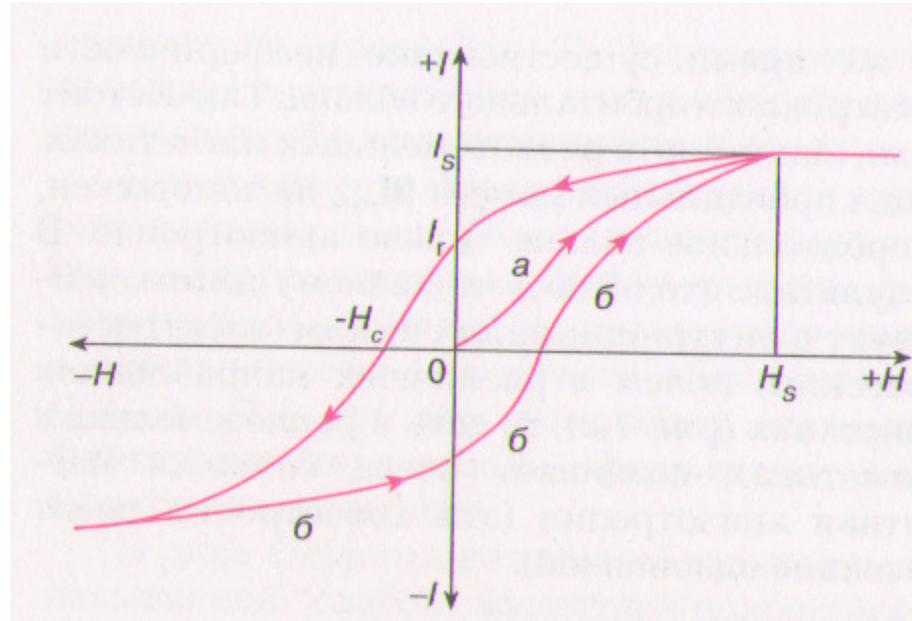
Аморфный



# Процесс намагничивания ферромагнетика



## Петля магнитного гистерезиса



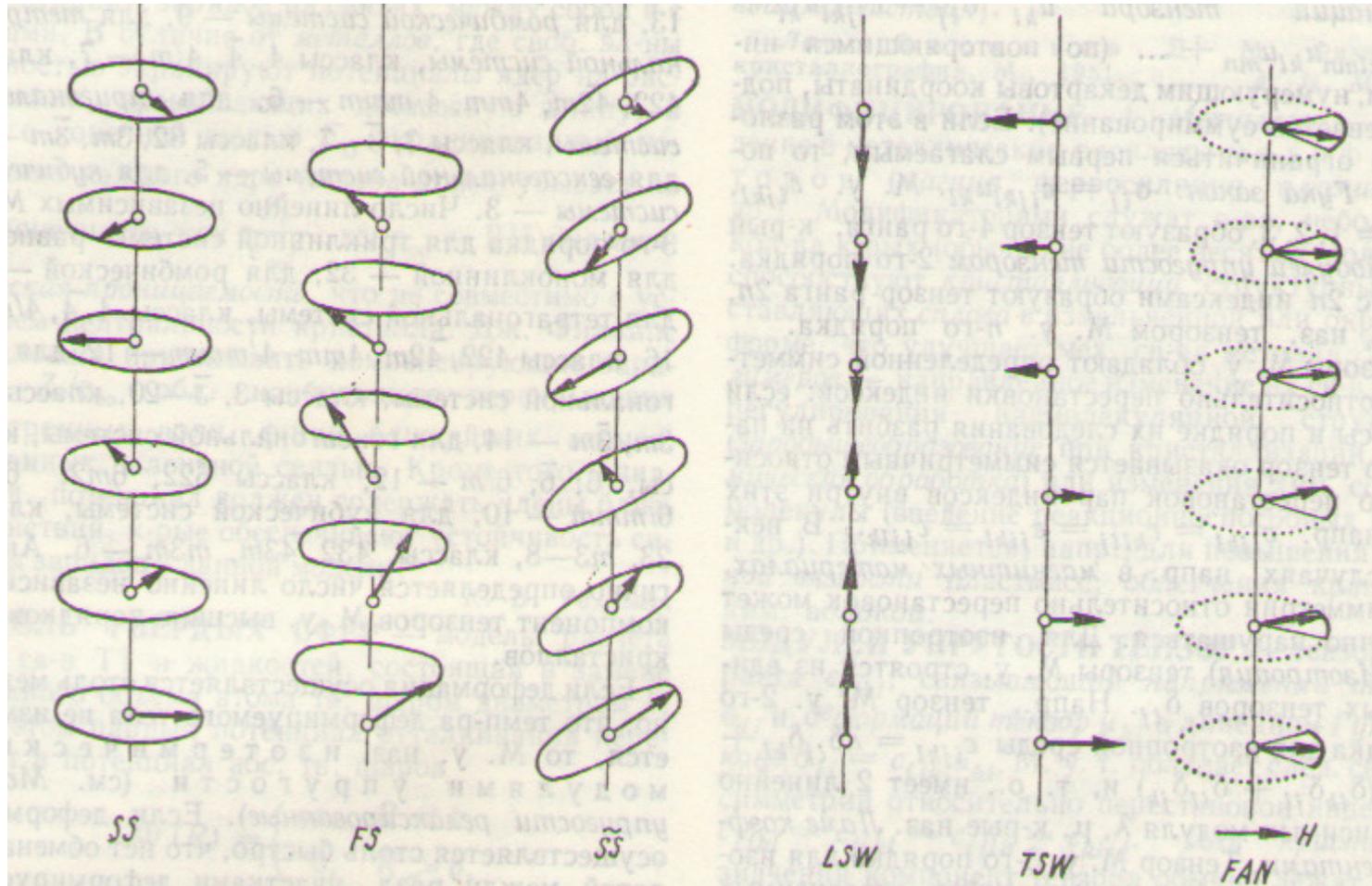
а - кривая намагничивания, б - петля гистерезиса

$I_s$  - намагниченность технического насыщения,

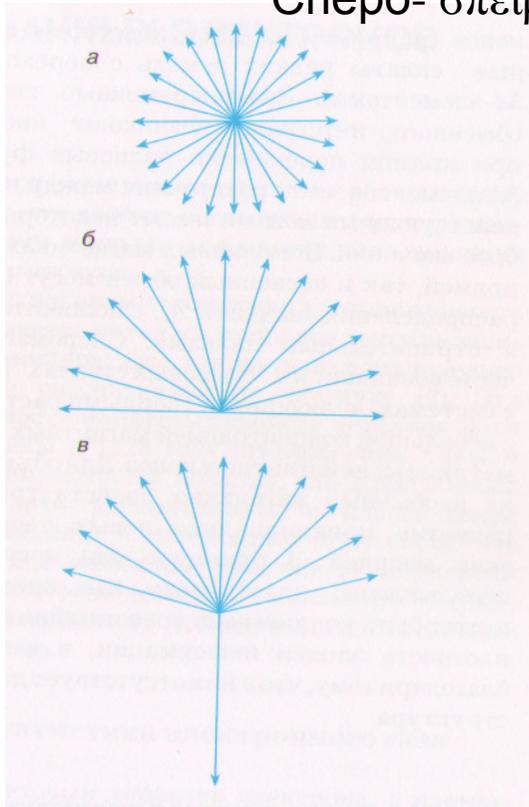
$H_s$  - поле технического насыщения,  $I_r$  - остаточная намагниченность,

$H_c$  - коэрцитивная сила.

# Модулированные магнитные структуры



Сперо- σπέρω – рассеиваю, разбрасываю



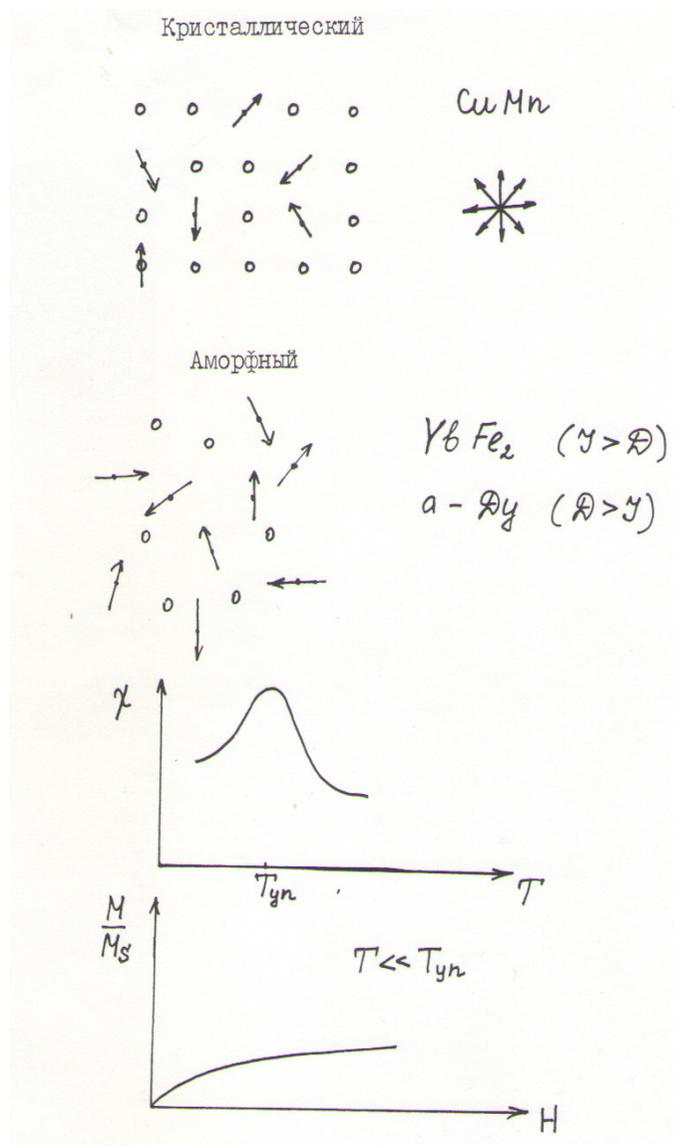
- а) сперомагнитная структура;
- б) асперомагнитная структура;
- в) сперимагнитная структура

**Сперомагнетизм:** равновесные, сохраняющиеся во времени ориентации магнитных моментов отдельных магнитных атомов или ионов распределены в пространстве хаотически, так что спонтанная намагниченность отсутствует.

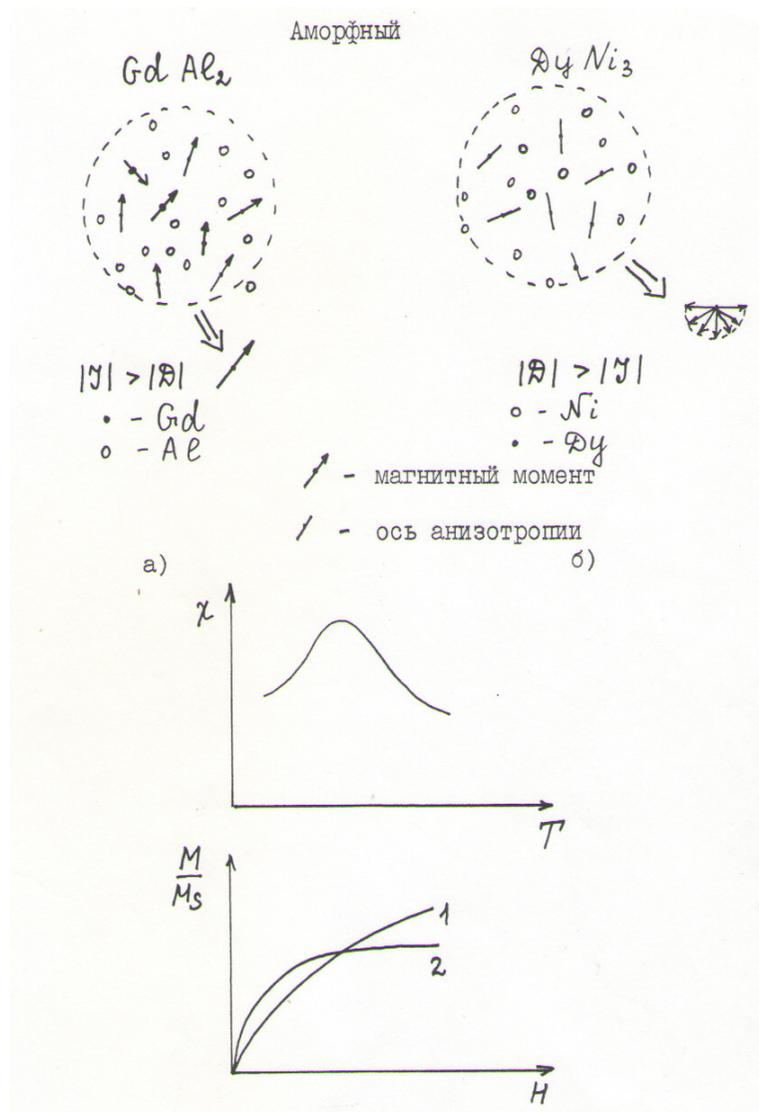
**Асперомагнетизм:** равновесные, сохраняющиеся во времени ориентации магнитных моментов отдельных магнитных атомов или ионов распределены в пространстве хаотически, но распределение направлений не полностью сферически симметрично (хаотизированный ферромагнетик).

**Сперимагнетизм** - неколлинеарный ферромагнетизм

# Сперомагнетизм



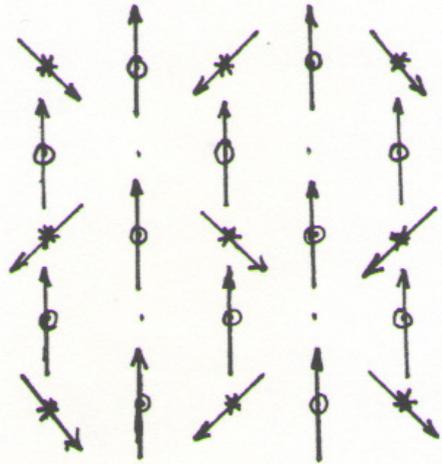
# Асперомагнетизм



- а) случай доминирующего обменного взаимодействия,  
б) случай доминирующей анизотропии

## Сперимагнетизм (неколлинеарный ферримагнетизм)

Кристаллический



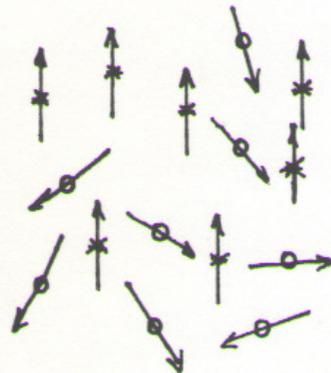
Fe Pd<sub>1,6</sub> Pt<sub>1,4</sub>

\* - Fe

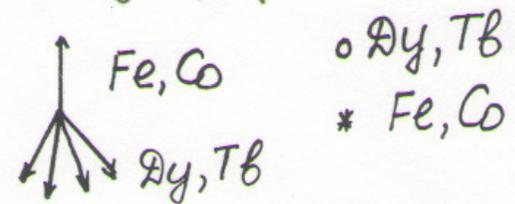
o - Pd, Pt

$D_1 > J$

Аморфный



DyFe; DyCo<sub>3</sub>; TbFe<sub>2</sub>



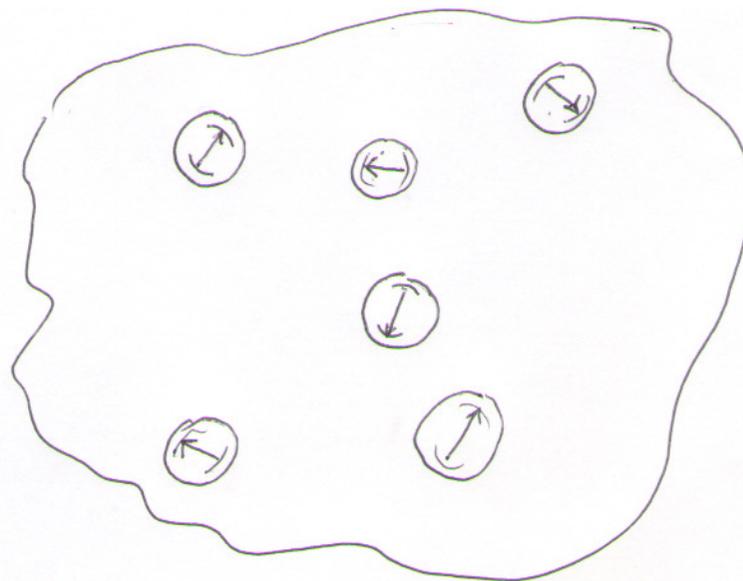
Fe, Co

o Dy, Tb

\* Fe, Co

$D_2 < J$

## Суперпарамагнетизм



Аморфный Fe  
40 ат.% в Hg

**Спасибо за внимание!**