

Лекция 2

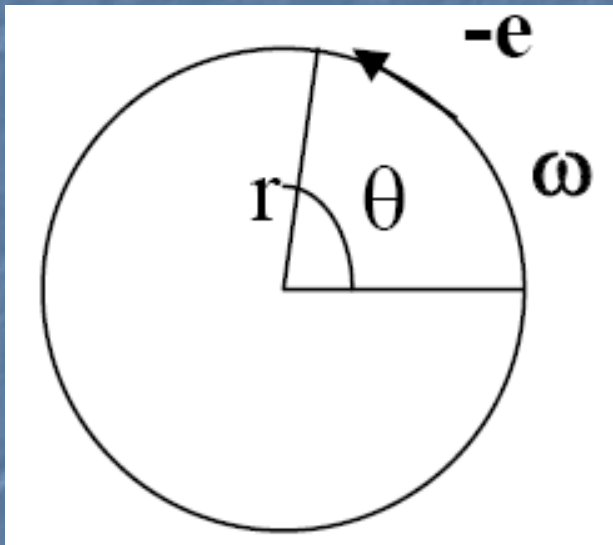
Атомный магнетизм

О.С. Трушин
с.н.с. ЯФ ФТИАН РАН

План

- Гиромагнитное отношение
- Магнитный момент электрона
- Пространственное квантование
- Заполнение электронных оболочек
- Магнитный момент атома
- Диамагнетизм.
- Парамагнетизм.
- Магнетизм свободных электронов.

Гиромангнитное отношение



$$p_m = I \cdot S$$

$$S = \pi \cdot r^2$$

$$I = e \cdot \frac{\omega}{2\pi}$$

$$p_m = \frac{e \cdot \omega \cdot r^2}{2}$$

$$M = m \cdot \omega \cdot r^2$$

$$\gamma = \frac{p_m}{M} = \frac{e}{2m}$$

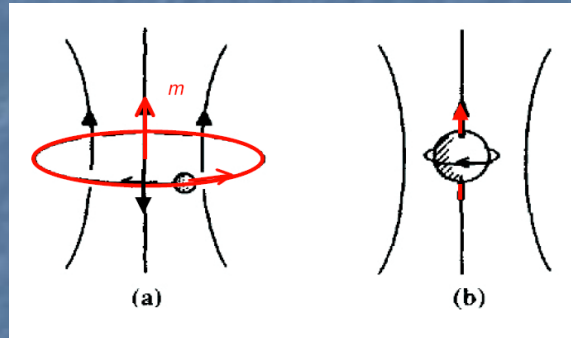
$$p_m = \gamma M$$

Магнитный момент электрона

Орбитальный момент

$$M_l = \hbar \cdot l$$

$$P_{ml} = \gamma_l \cdot M_l$$



Спиновый момент

$$M_s = \hbar \cdot s$$

$$s = \pm \frac{1}{2}$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 0.927 \cdot 10^{-23} (A \cdot m^2)$$

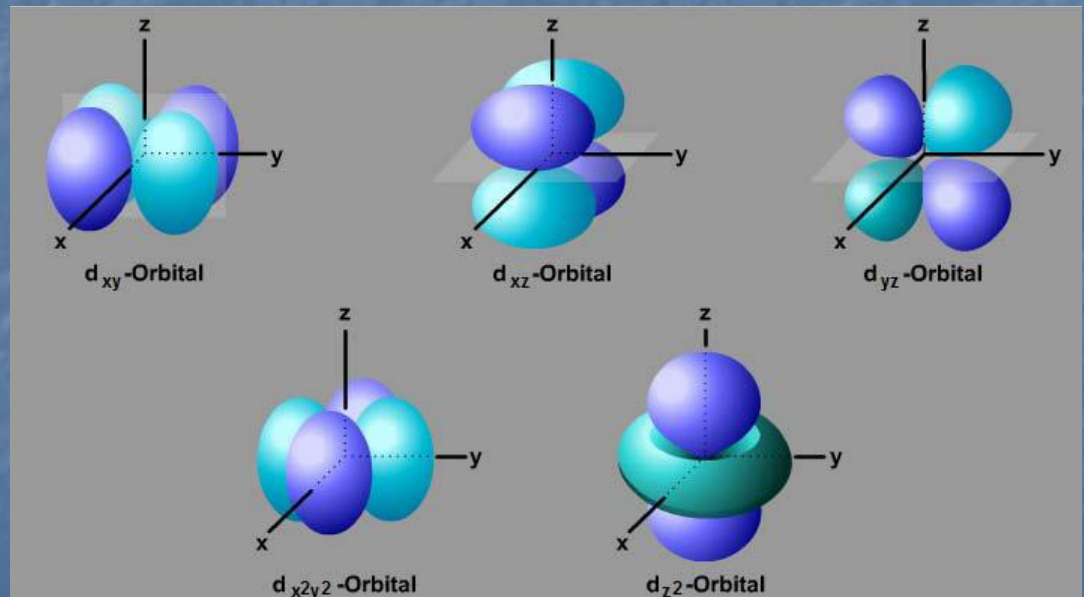
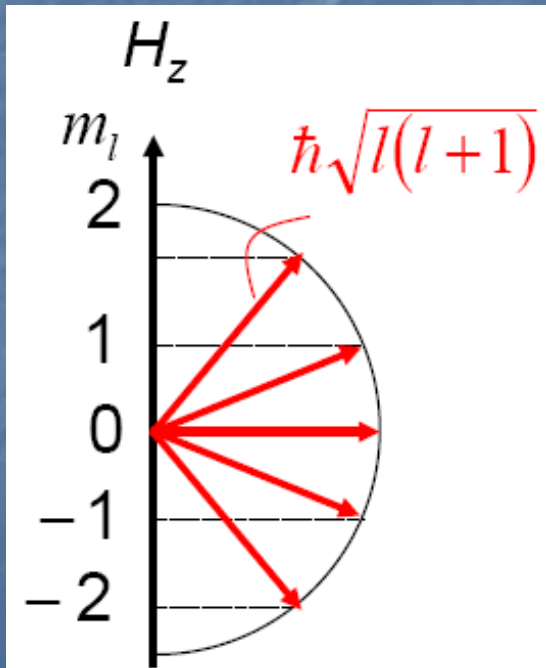
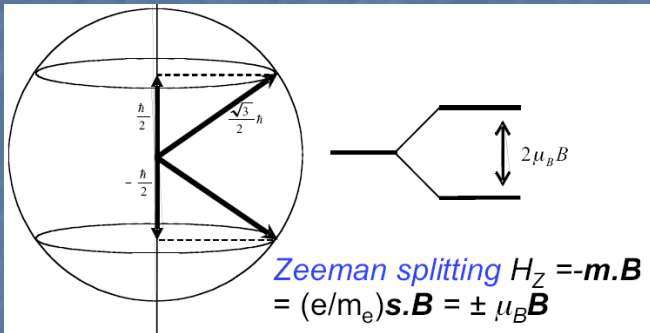
$$P_{ml} = \gamma_l \cdot M_l = \frac{-e}{2m} \cdot \hbar \cdot l = -\mu_B \cdot l$$

$$P_{ms} = \gamma_s \cdot M_s = \frac{-e}{m} \cdot \hbar \cdot s = -2 \cdot \mu_B \cdot s$$

Полный магнитный момент

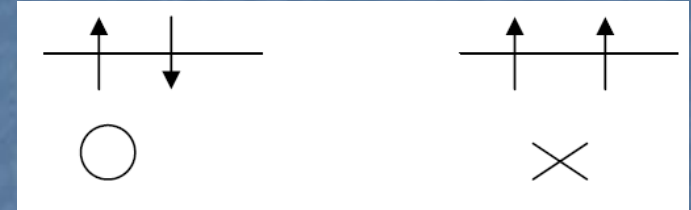
$$\mu = \mu_l + \mu_s = -(l + 2s)\mu_B$$

Пространственное квантование



Магнитный момент атома

Принцип Паули: Только 2 электрона с противоположными спинами на 1 уровне



Правила Хунда:

- 1) максимальный спин S
- 2) максимальный орбитальный момент L
- 3) $J=L-S$ для заполненных менее половины
 $J=L+S$ для заполненных более половины

Russel-Sounders связь (для легких)

jj – связь для тяжелых

n – главное квантовое число

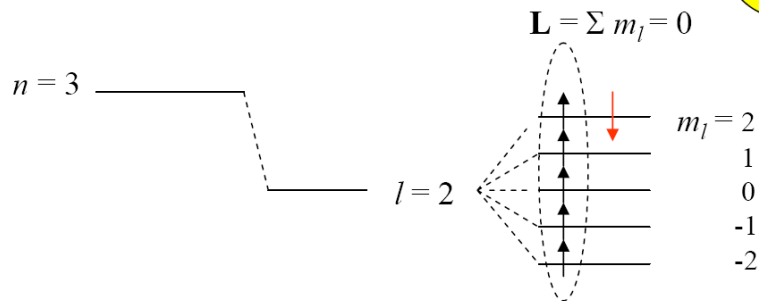
l – квантовое число

орбитального момента

m_l – магнитное квантовое число

m_s – спиновое квантовое число

Ex) $3d^6 : Fe^{2+}$ ion



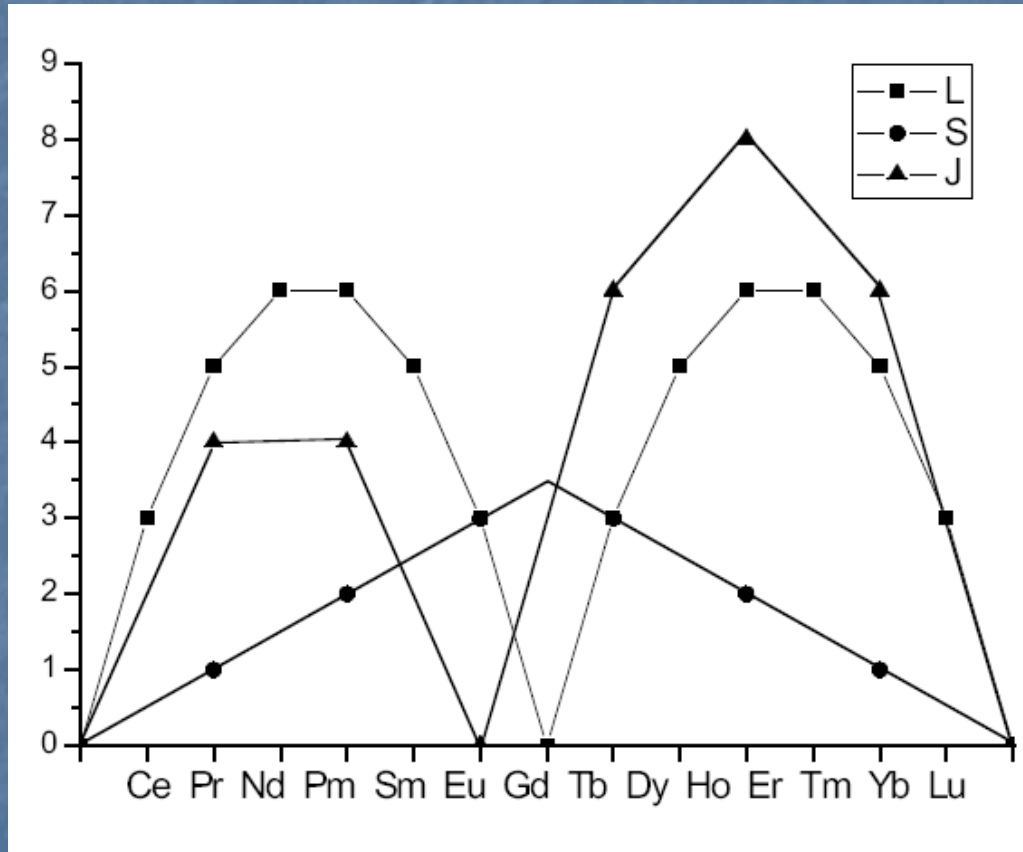
Total $L = 2, S = 2$

$$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

$$m_l = -l, -l+1, \dots, l-1, l$$

$$m_s = -1/2, +1/2$$

Иллюстрация правил Хунда



Тривалентные ионы редко-земельных элементов

Russel-Saunders связь

Если l-с спин-орбитальное взаимодействие слабо

$$J = L + S = \sum l_i + \sum s_i$$

$$\mu = \mu_B (L + 2S) = g\mu_B J$$

$$g = \frac{[3J(J + 1) + S(S + 1) - L(L + 1)]}{2J(J + 1)}$$

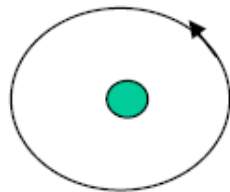
Фактор Ландэ

Магнетизм 3-d металлов

Table 10.1 Magnetic moments of isolated ions of the 3d transition metal series

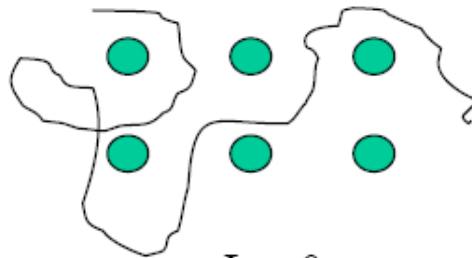
Ion	Configuration	Calculated moment		Measured moment
		$g\sqrt{[J(J+1)]}$	$g\sqrt{[S(S+1)]}$	
Ti ³⁺ , V ⁴⁺	3d ¹	1.55	1.73	1.8
V ³⁺	3d ²	1.63	2.83	2.8
Cr ³⁺ , V ³⁺	3d ³	0.77	3.87	3.8
Mn ³⁺ , Cr ³⁺	3d ⁴	0	4.90	4.9
Fe ³⁺ , Mn ²⁺	3d ⁵	5.92	5.92	5.9
Fe ²⁺	3d ⁶	6.70	4.90	5.4
Co ²⁺	3d ⁷	6.63	3.87	4.8
Ni ²⁺	3d ⁸	5.59	2.83	3.2
Cu ²⁺	3d ⁹	3.55	1.73	1.9

$$J = S$$



$$L \neq 0$$

Isolated atom



$$L = 0$$

Solid

Магнитный момент 3-d металлов в основном обусловлен спином

J-J СВЯЗЬ

Для тяжелых атомов l-с спин-орбитальное взаимодействие сильно

$$J = \sum j_i = \sum (l_i + s_i)$$

Выводы для свободных ионов

- **Заполненные электронные оболочки не дают вклад в магнитный момент, так как вклады электронов с противоположным спином компенсируются**
- **Только частично заполненные оболочки могут обладать магнитным моментом**
- **Магнитный момент атома определяется его полным моментом, формируемым согласно правилам Хунда**
- **Орбитальный момент 3-d ионов «заморожен» в твердом теле**

Диамagnetизм

$$\vec{p}_{ml} = \gamma_l \cdot \vec{L} \quad \vec{M} = [\vec{p}_{ml} \times \vec{B}] \quad \frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \gamma [\vec{L} \times \vec{B}]$$

$$dL = L \cdot \sin \alpha \cdot d\theta$$

$$dL = L \cdot \gamma B \cdot \sin \alpha \cdot dt$$

Ларморова прецессия

$$\omega_L = \frac{d\theta}{dt} = \gamma B = \frac{e}{2m} \cdot B$$

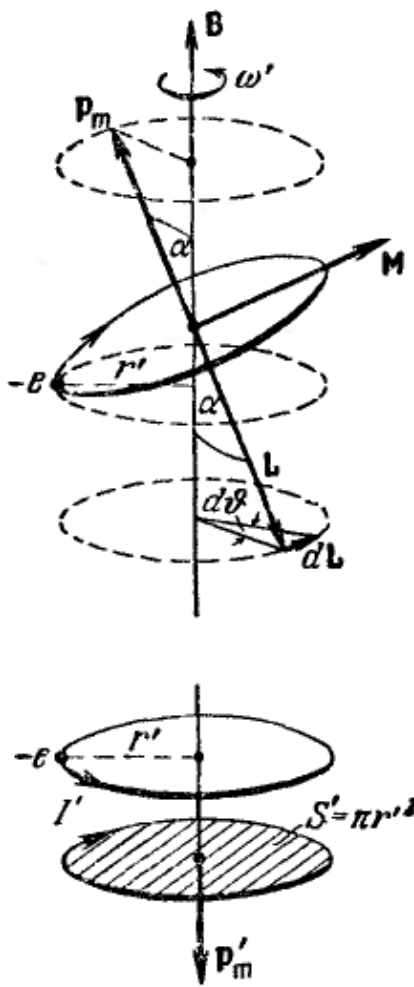
Индукцированный магнитный момент

$$p'_m = I' \cdot S = e \cdot \frac{\omega_L}{2\pi} \cdot \pi r'^2 = \frac{e \omega_L}{2} \cdot r'^2$$

Намагниченность против внешнего поля

(правило Ленца – реакция системы на внешнее воздействие)

$$\chi < 0$$



Material	χ_{Langevin} at RT
He	$-1.9 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3/\text{mol}$
Xe	$-43 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3/\text{mol}$
Bi	$-16 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3/\text{g}$
Cu	$-1.06 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3/\text{g}$
Ag	$-2.2 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3/\text{g}$
Au	$-1.8 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3/\text{g}$

Сверхпроводники !!!

Парамагнетизм

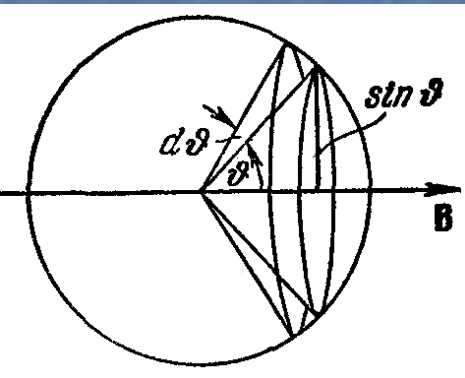
Энергия атома в поле

$$W = -p_m B \cos \theta$$

По закону Больцмана

вероятность данного состояния

$$e^{-\frac{W}{kT}} = e^{-\frac{p_m B \cos \theta}{kT}}$$



При случайной ориентации моментов их число в единице объема

$$dn'_\theta = n \cdot \frac{2\pi \sin \theta d\theta}{4\pi} = n \cdot \frac{\sin \theta d\theta}{2}$$

С учетом ориентирующего действия поля

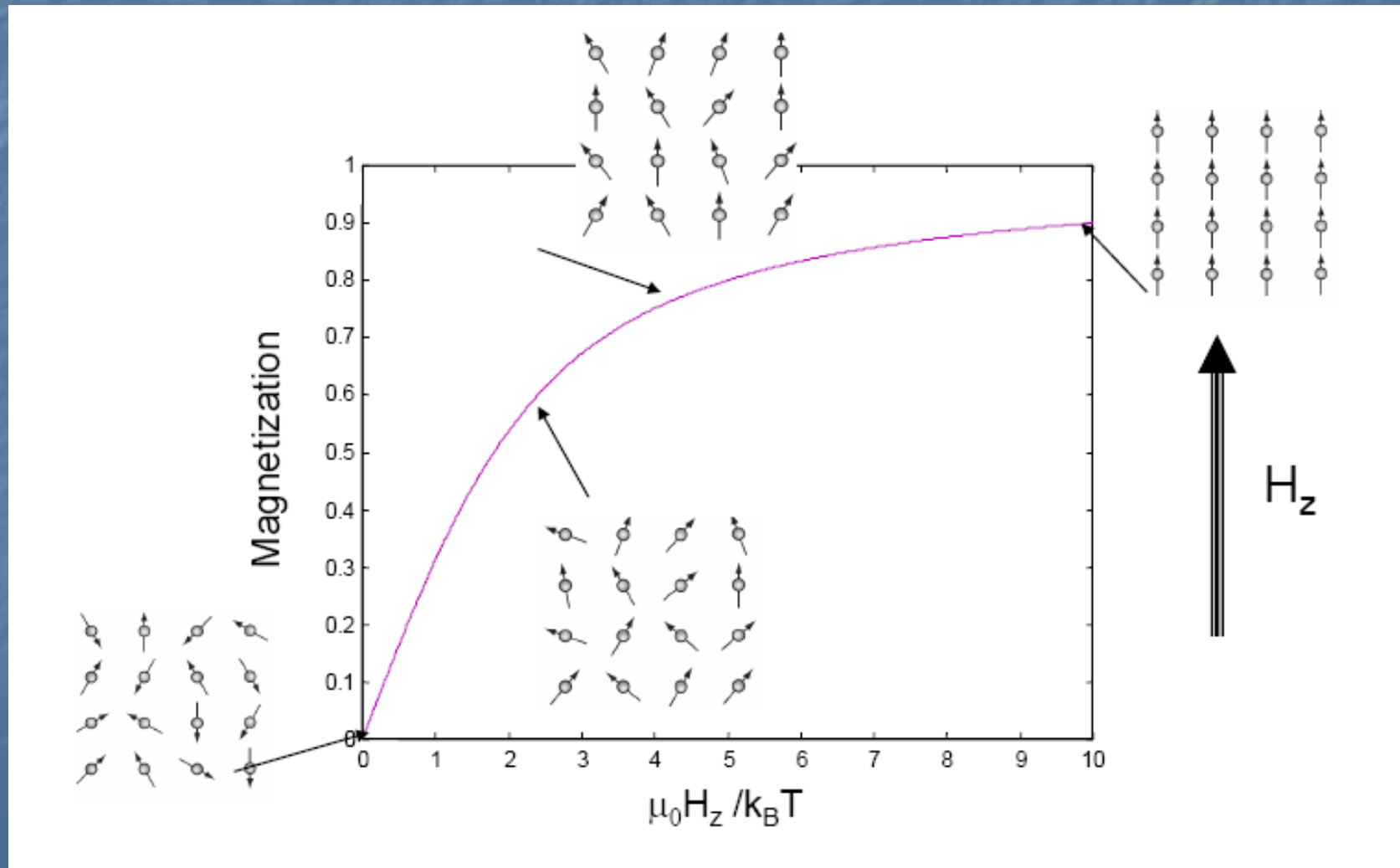
$$dn_\theta = A \cdot e^{-\frac{p_m B \cos \theta}{kT}} \cdot n \cdot \frac{\sin \theta d\theta}{2}$$

$$\frac{p_m B}{kT} \ll 1$$

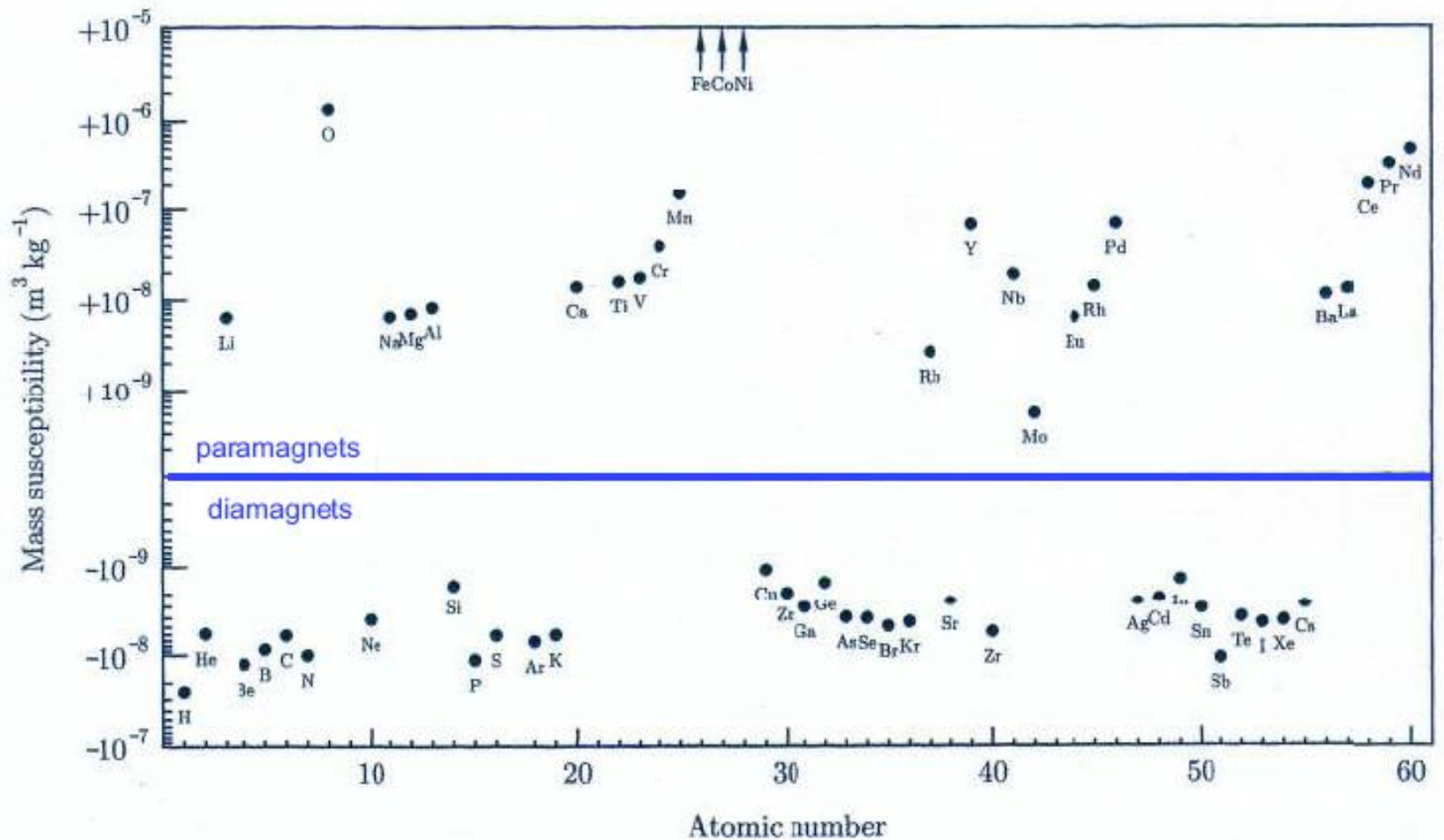
$$J = \int p_m B \cos \theta \cdot dn_\theta = \frac{np_m^2 B}{3kT}$$

$$\chi = \frac{J}{H} = \frac{\mu_0 p_m^2 n}{3kT}$$

Намагничивание парамагнетика



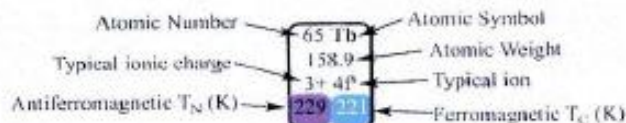
Магнитная восприимчивость элементов



2.7 Magnetic elements

MAGNETIC PERIODIC TABLE

1 H 1.00																	2 He 4.00						
3 Li 6.94 1+ 2s ¹	4 Be 9.01 2+ 2s ²																	5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00 24	9 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99 1+ 3s ¹	12 Mg 24.21 2+ 3s ²																	13 Al 26.98 3+ 3p ¹	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
19 K 39.10 1+ 4s ¹	20 Ca 40.08 2+ 4s ²	21 Sc 44.96 3+ 3d ¹	22 Ti 47.88 4+ 3d ²	23 V 50.94 4+ 3d ³	24 Cr 52.00 3+ 3d ⁵ 312	25 Mn 54.94 2+ 3d ⁵ 96	26 Fe 55.85 3+ 3d ⁶ 104.3	27 Co 58.93 2+ 3d ⁷ 1390	28 Ni 58.69 2+ 3d ⁸ 629	29 Cu 63.55 2+ 3d ⁹	30 Zn 65.39 2+ 3d ¹⁰	31 Ga 69.72 3+ 3d ¹⁰	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80						
37 Rb 85.47 1+ 5s ¹	38 Sr 87.62 2+ 5s ²	39 Y 88.91 3+ 4d ¹	40 Zr 91.22 4+ 4d ²	41 Nb 92.91 5+ 4d ⁴	42 Mo 95.94 3+ 4d ⁵	43 Tc 97.9	44 Ru 101.1 3+ 4d ⁷	45 Rh 102.9 3+ 4d ⁸	46 Pd 106.4 2+ 4d ⁸	47 Ag 107.9 1+ 4d ¹⁰	48 Cd 112.4 2+ 4d ¹⁰	49 In 114.8 3+ 4d ¹⁰	50 Sn 118.7 4+ 4d ¹⁰	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.6						
55 Cs 132.9 1+ 6s ¹	56 Ba 137.3 2+ 6s ²	57 La 138.9 3+ 4f ⁰	72 Hf 178.5 4+ 5d ²	73 Ta 180.9 5+ 5d ³	74 W 183.8 6+ 5d ⁴	75 Re 186.2 4+ 5d ⁵	76 Os 190.2 3+ 5d ⁶	77 Ir 192.2 4+ 5d ⁷	78 Pt 195.1 2+ 5d ⁸	79 Au 197.0 1+ 5d ¹⁰	80 Hg 200.6 2+ 5d ¹⁰	81 Tl 204.4 3+ 5d ¹⁰	82 Pb 207.2 4+ 5d ¹⁰	83 Bi 209.0	84 Po 209	85 At 210	86 Rn 222						
87 Fr 223	88 Ra 226.0 2+ 7s ²	89 Ac 227.0 3+ 5f ⁰																					

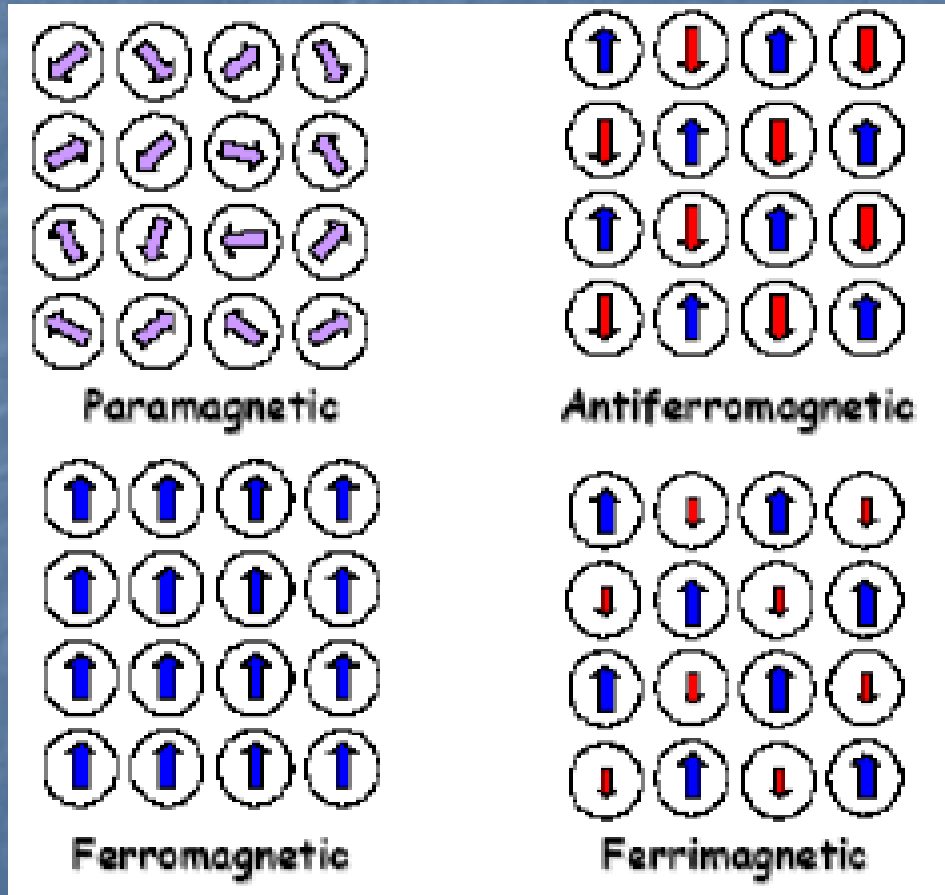


Eight elements (blue) and many compounds are ferromagnetic. They possess a spontaneous magnetization - eleven elements (purple) are antiferromagnetic

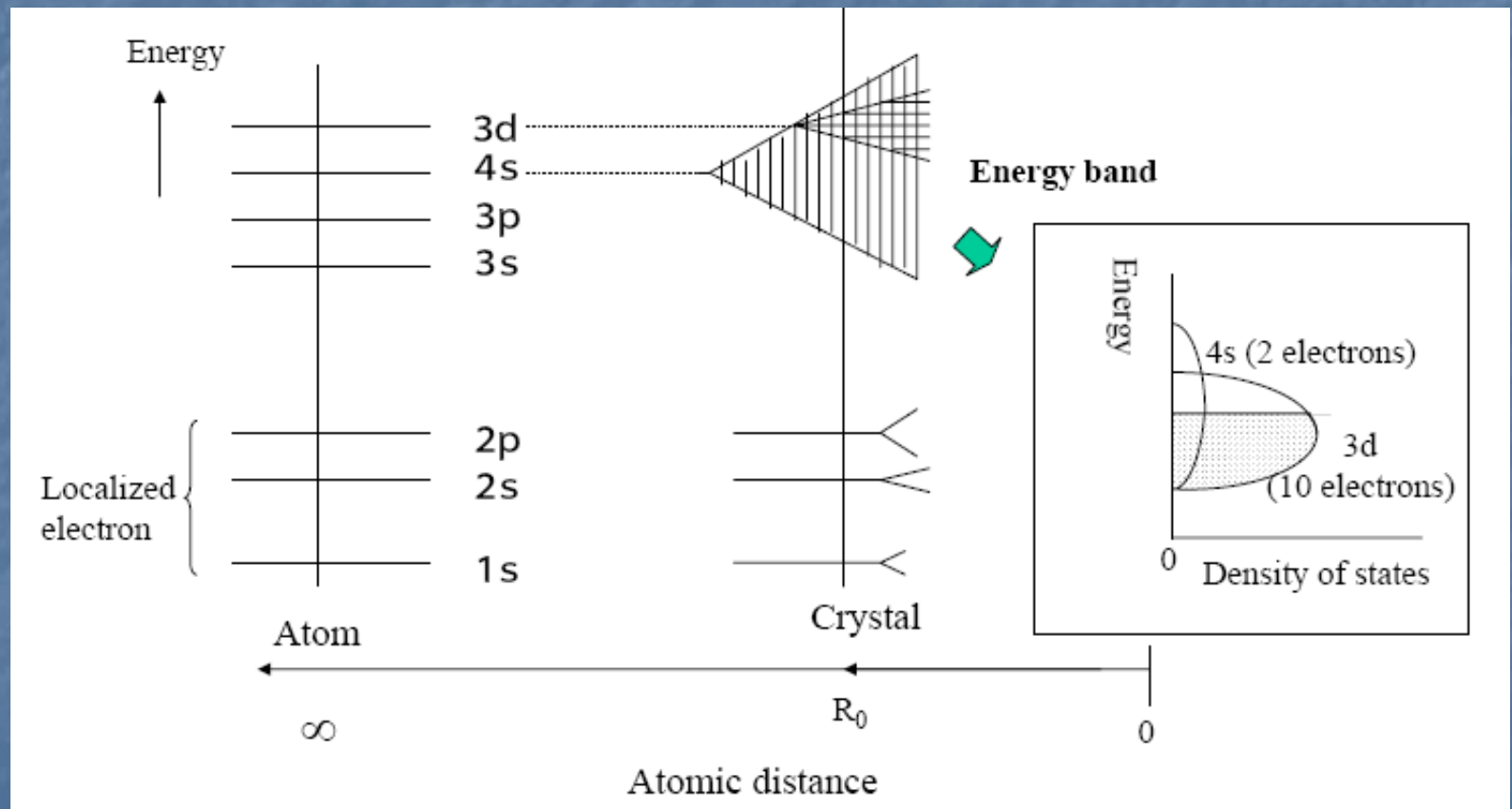
Ferromagnetic with $T_C > 290$ K
Antiferromagnetic with $T_N > 290$ K
Antiferromagnetic with $T_N < 290$ K
Elements with ferromagnetic and antiferromagnetic transitions
Metals
Radioactive elements

58 Ce 140.1 3+ 4f ¹ 13	59 Pr 140.9 3+ 4f ²	60 Nd 144.2 3+ 4f ³ 19	61 Pm 145	62 Sm 150.4 3+ 4f ⁵ 105	63 Eu 152.0 2+ 4f ⁷ 90	64 Gd 157.3 3+ 4f ⁷ 293	65 Tb 158.9 3+ 4f ⁸ 229 221	66 Dy 162.5 3+ 4f ⁹ 179 89	67 Ho 164.9 3+ 4f ¹⁰ 132 20	68 Er 167.3 3+ 4f ¹¹ 85 20	69 Tm 168.9 3+ 4f ¹² 56	70 Yb 173.0 3+ 4f ¹³	71 Lu 175.0 3+ 4f ¹⁴
90 Th 232.0 4+ 5f ⁰	91 Pa 231.0 5+ 5f ¹	92 U 238.0 4+ 5f ²	93 Np 237.0 5+ 5f ³	94 Pu 244	95 Am 243	96 Cm 247	97 Bk 247	98 Cf 251	99 Es 252	100 Fm 257	101 Md 258	102 No 259	103 Lr 260

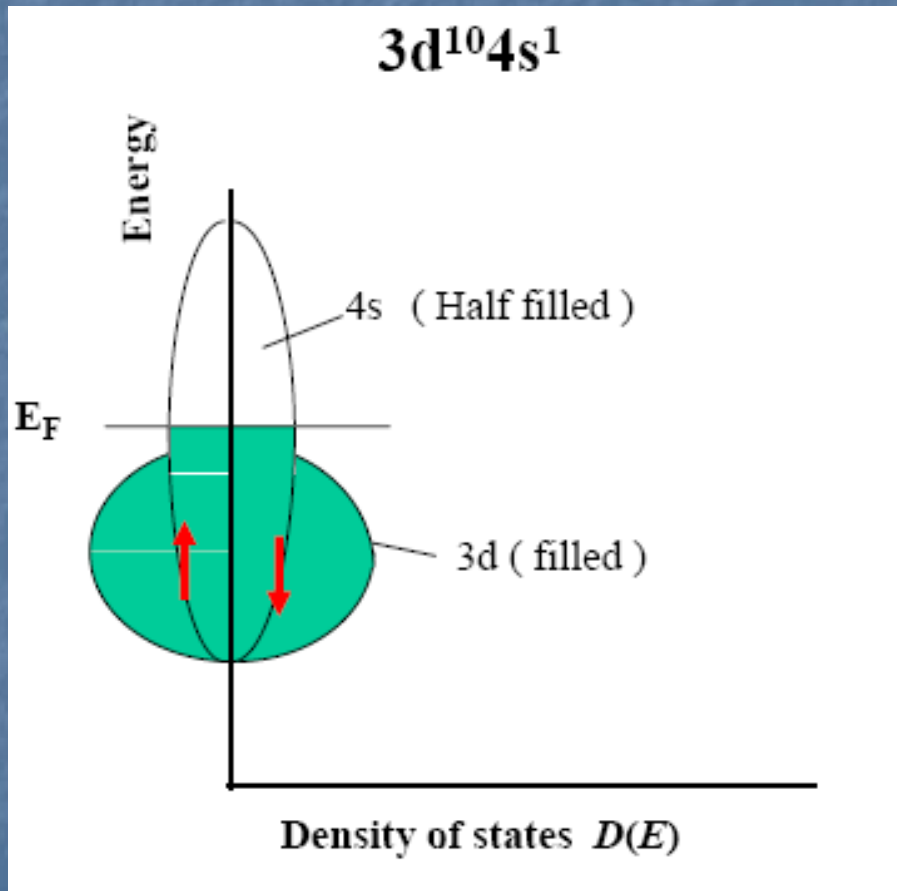
Основные виды магнетиков



Образование зонной структуры в кристалле

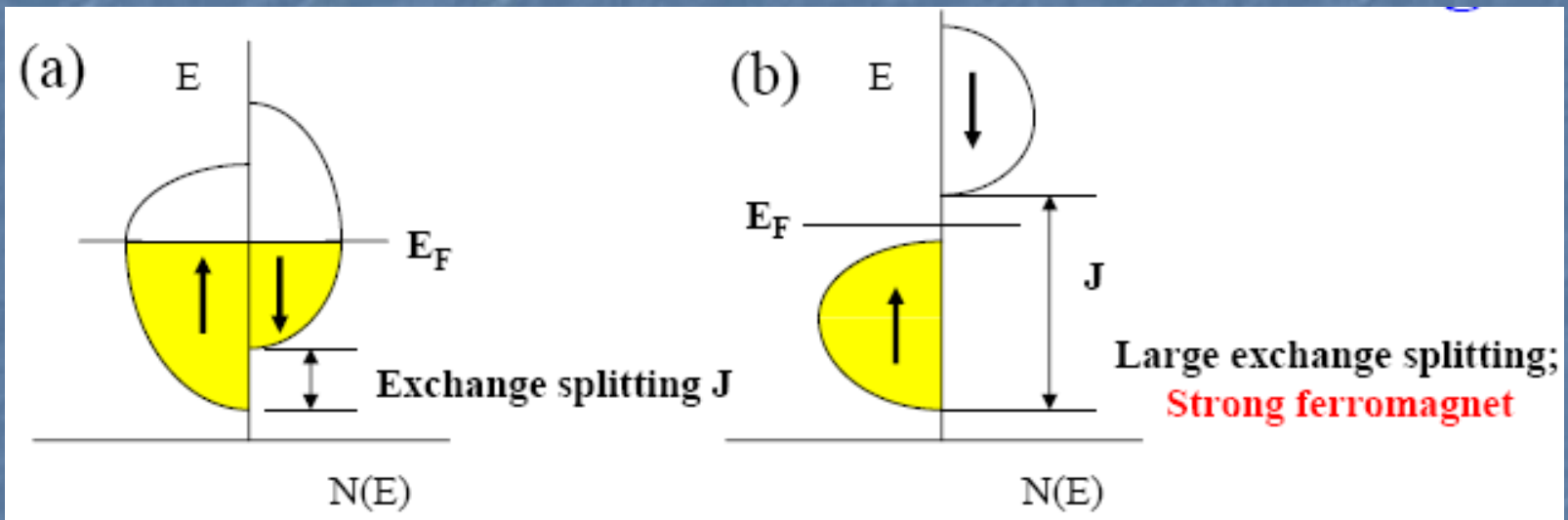


Немагнитный кристалл - Cu



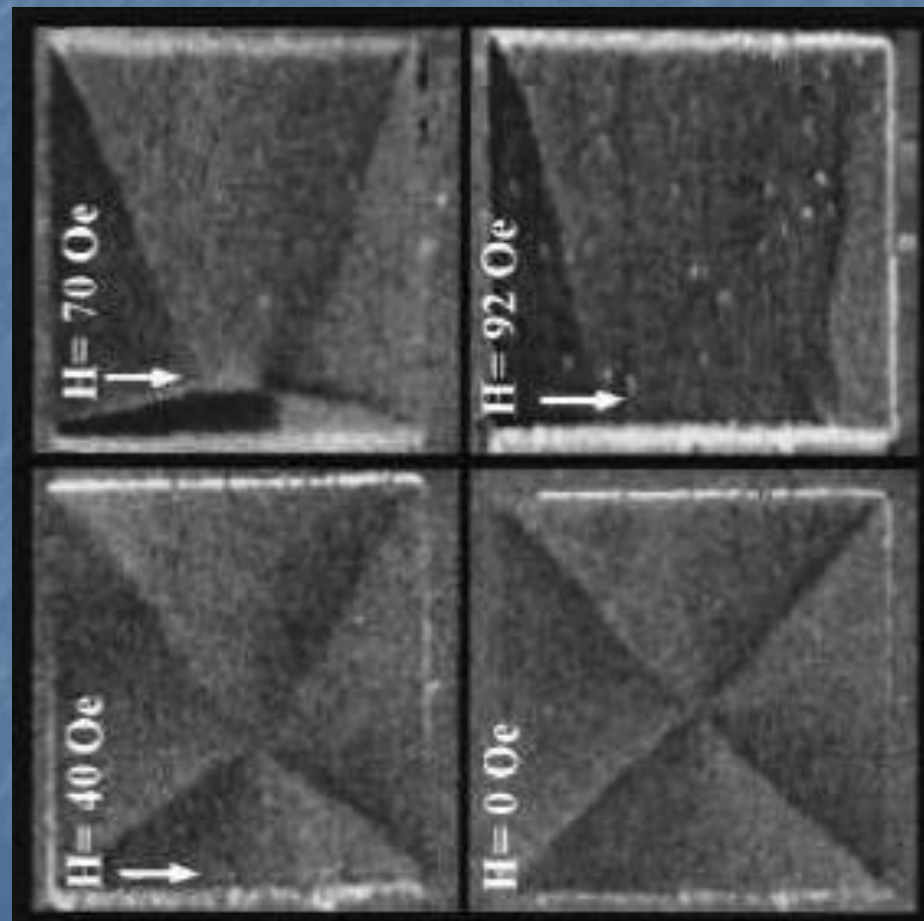
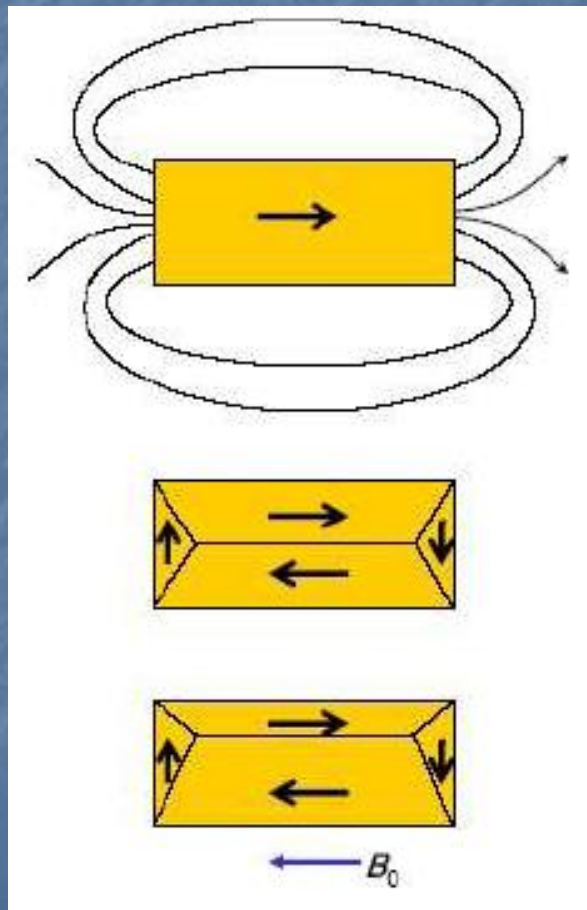
Отсутствует асимметрия по спину - Диамагнетик

Ферромагнитный кристалл

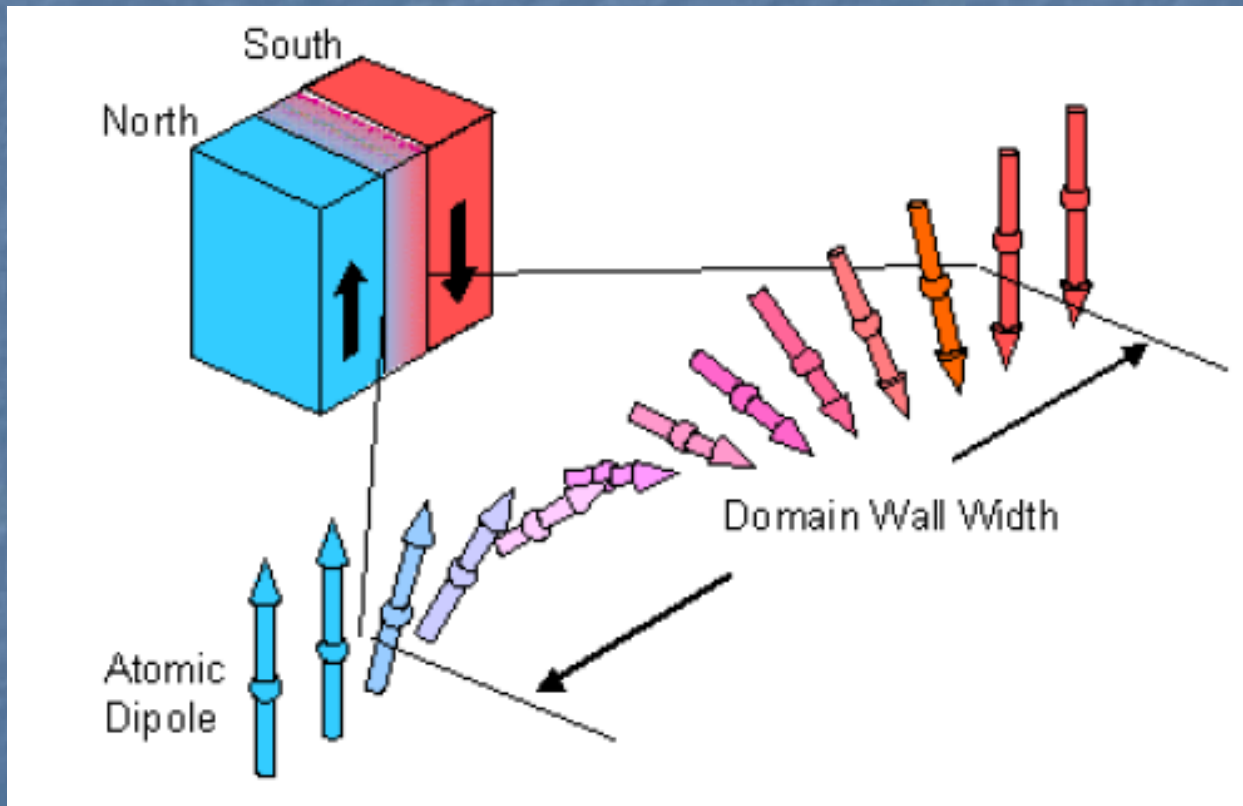


- Магнитный момент возникает из-за неспаренных электронов
- Нецелый магнитный момент на атом

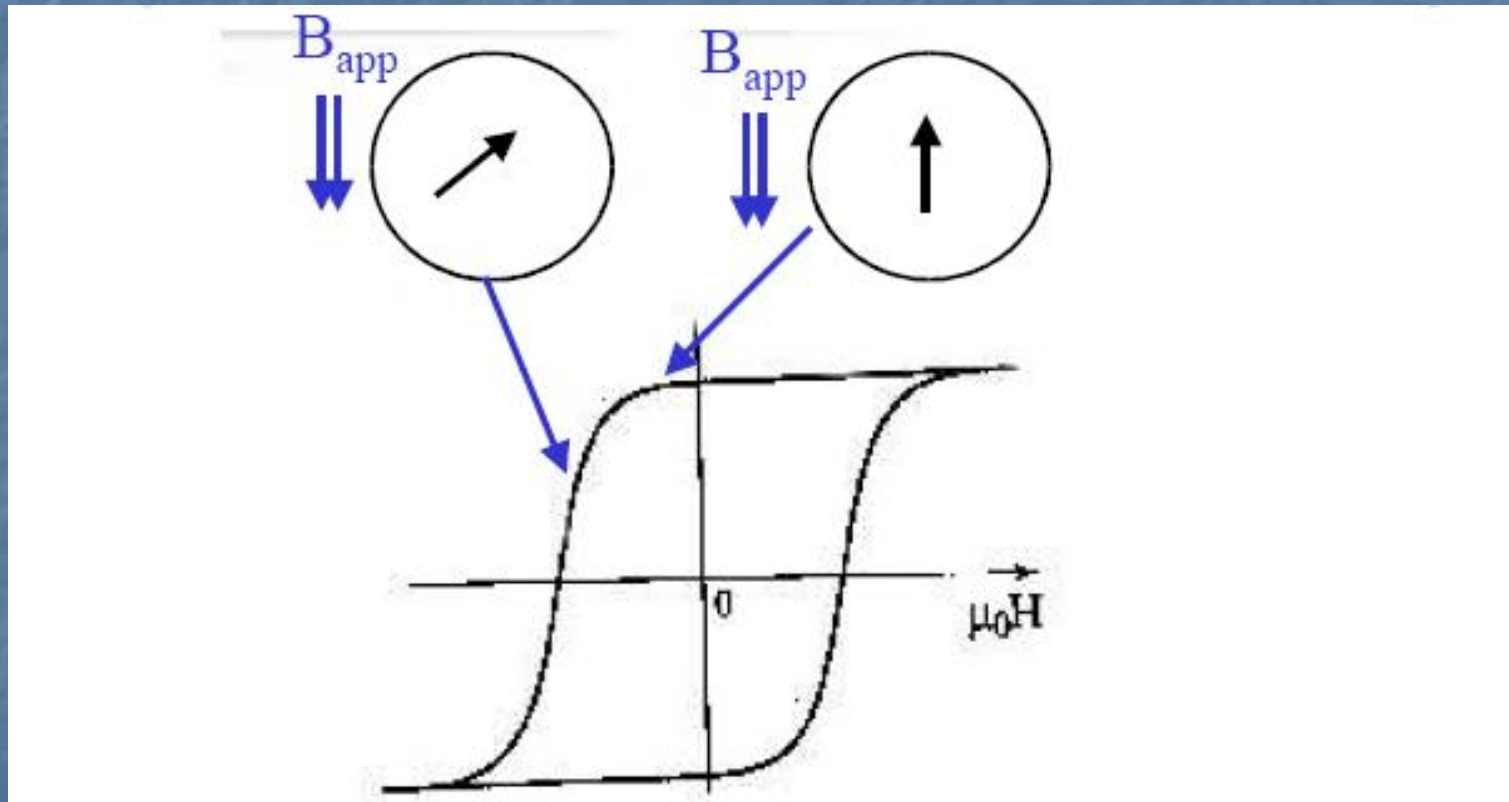
Доменная структура ферромагнетика



Доменные стенки



Петля гистерезиса



Выводы

- Магнетизм имеет квантовую природу
- Диамагнетизм обусловлен прецессией электронных орбит
- Парамагнетизм обусловлен упорядочением атомных магнитных моментов
- Ферромагнетизм обусловлен спиновым упорядочением (локальные магнитные моменты и магнитные моменты электронов проводимости)
- Сложная картина магнитных явлений еще содержит белые пятна

Литература

- Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильнер Лекции по магнетизму, М: Физматлит 2005
- В.А. Боков Физика магнетиков, С.П.: Невский диалект 2002
- С.С. Аплеснин Основы спинтроники С.П.: Лань 2010