

Лекция 2

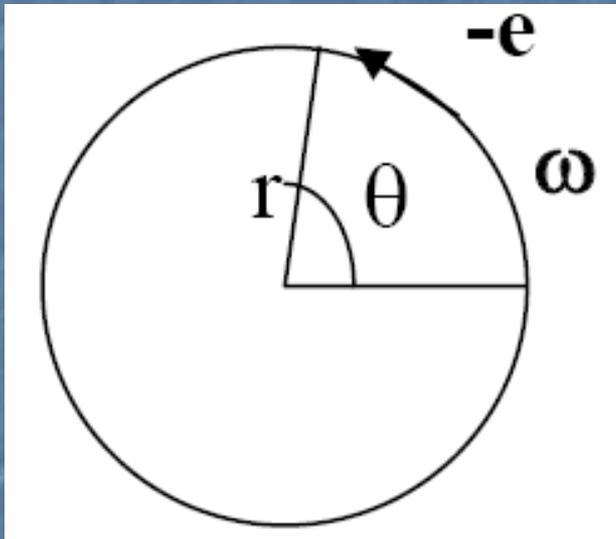
Атомный магнетизм

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



$$p_m = I \cdot S$$

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

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

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

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

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

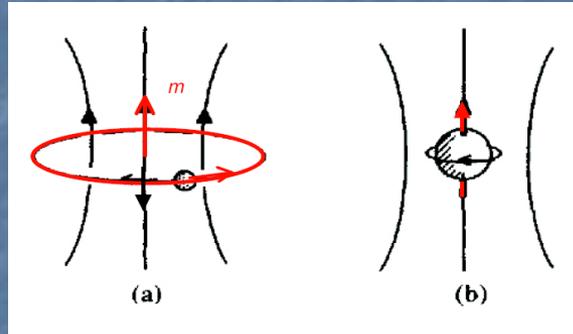
$$p_m = \gamma M$$

Магнитный момент электрона

Орбитальный момент

$$M_l = \hbar \cdot l$$

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



Спиновый момент

$$M_s = \hbar \cdot s$$

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

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

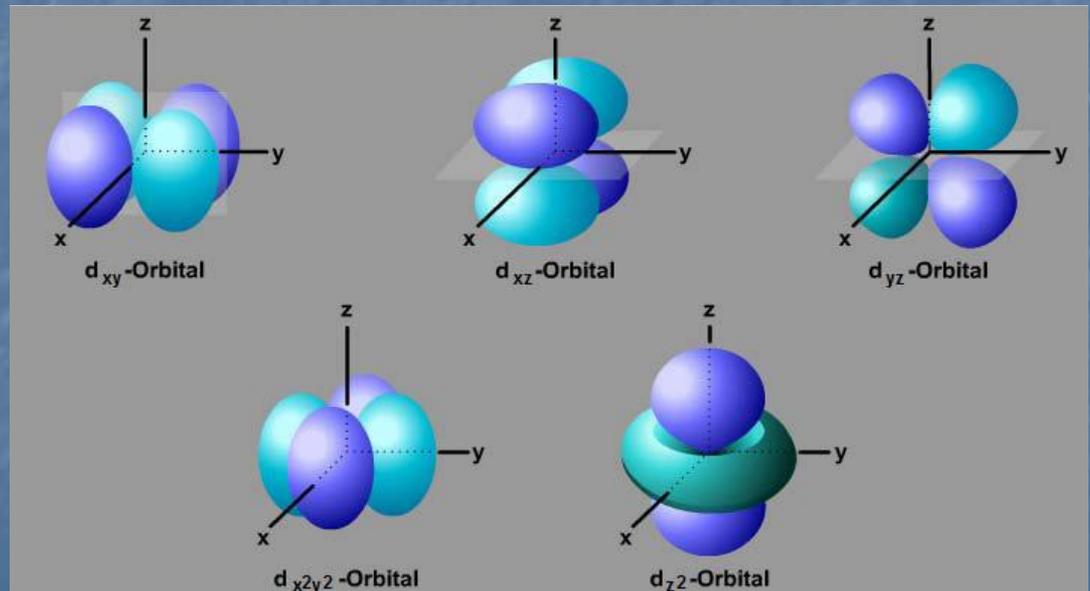
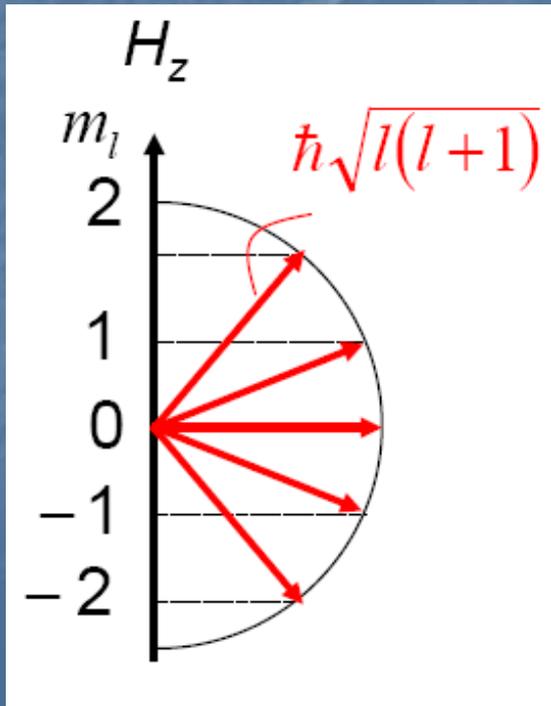
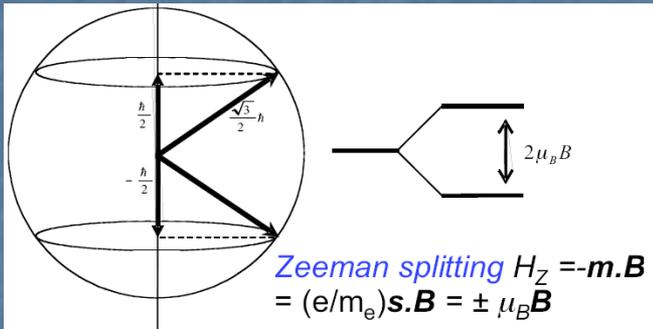
$$P_{ml} = \gamma_l \cdot M_l = \frac{-e}{2m} \cdot \hbar \cdot l = -\mu_B \cdot l$$

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

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

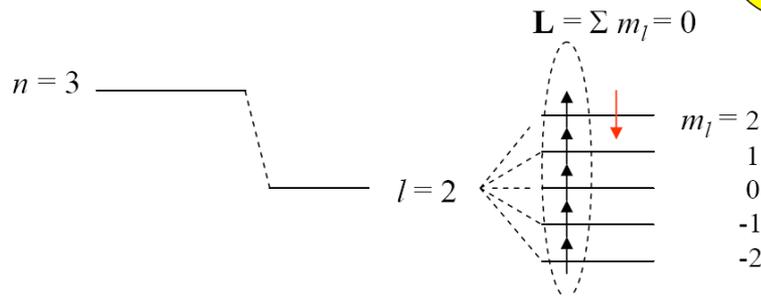
l – квантовое число

орбитального момента

m_l – магнитное квантовое число

m_s – спиновое квантовое число

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



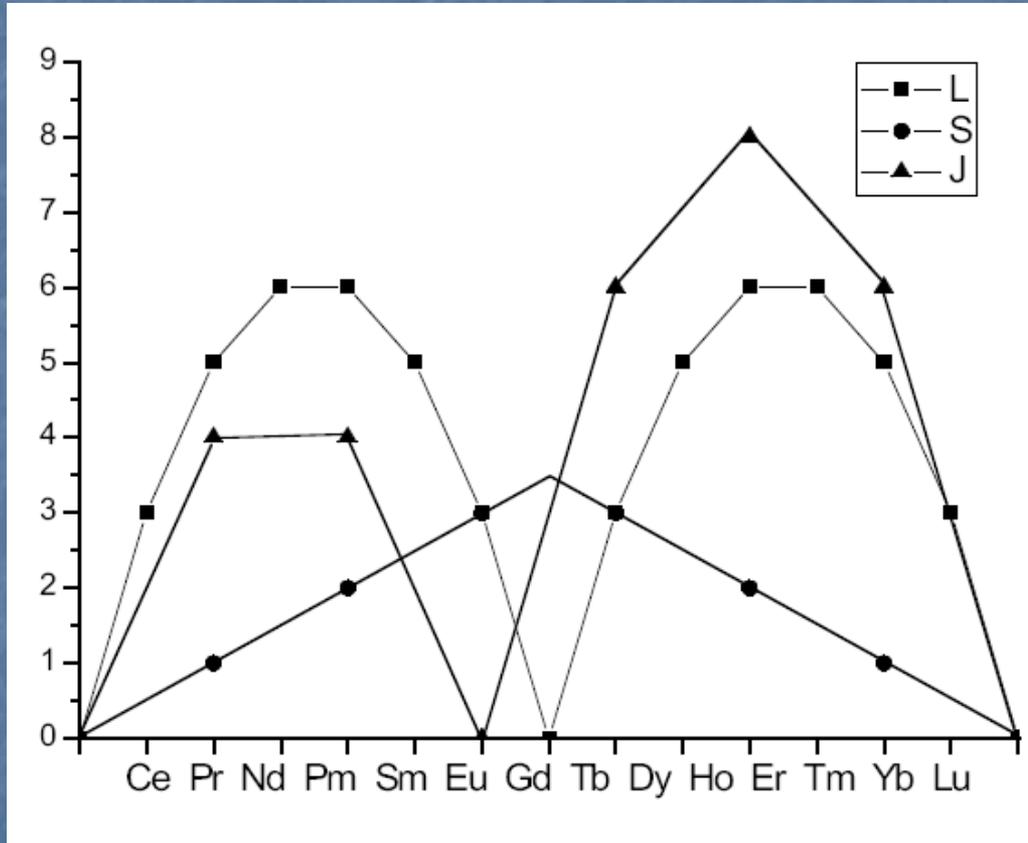
Total $L = 2, S = 2$

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

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

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

Иллюстрация правил Хунда



Тривалентные ионы редко-земельных элементов

Russel-Saunders связь

Если l-*s* спин-орбитальное взаимодействие слабо

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

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

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

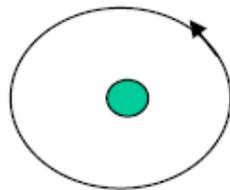
Фактор Ландэ

Магнетизм 3-d металлов

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

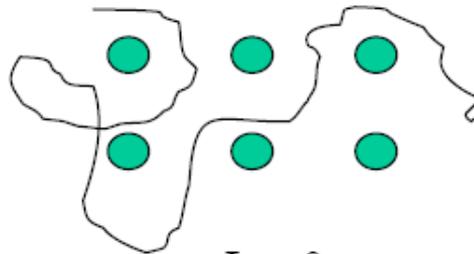
<i>Ion</i>	<i>Configuration</i>	<i>Calculated moment</i>		<i>Measured moment</i>
		$g\sqrt{[J(J+1)]}$	$g\sqrt{[S(S+1)]}$	
Ti ³⁺ , V ⁴⁺	3d ¹	1.55	1.73	1.8
V ³⁺	3d ²	1.63	2.83	2.8
Cr ³⁺ , V ³⁺	3d ³	0.77	3.87	3.8
Mn ³⁺ , Cr ³⁺	3d ⁴	0	4.90	4.9
Fe ³⁺ , Mn ²⁺	3d ⁵	5.92	5.92	5.9
Fe ²⁺	3d ⁶	6.70	4.90	5.4
Co 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

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

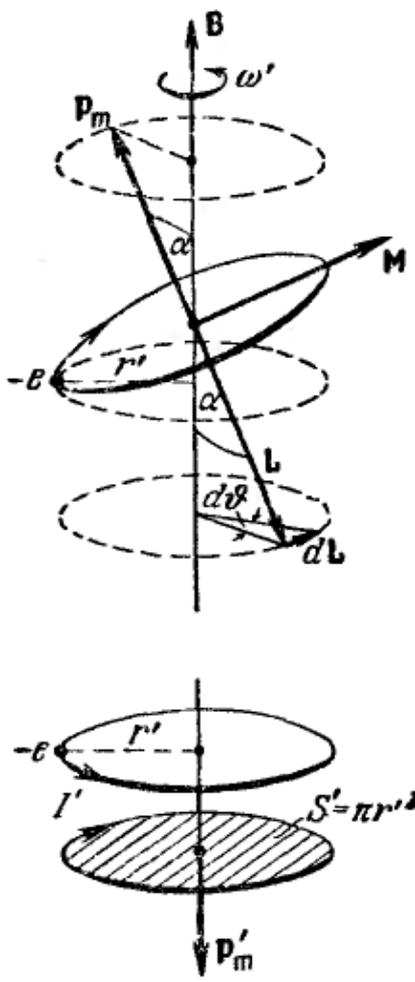
Индукцированный магнитный момент

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

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

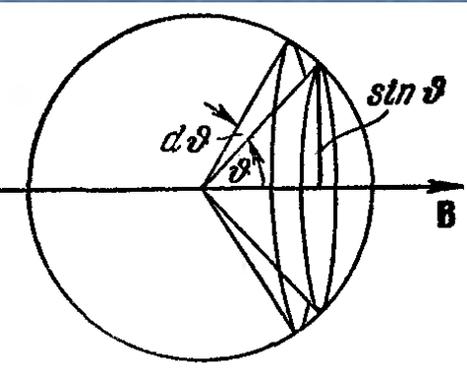
Энергия атома в поле

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

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

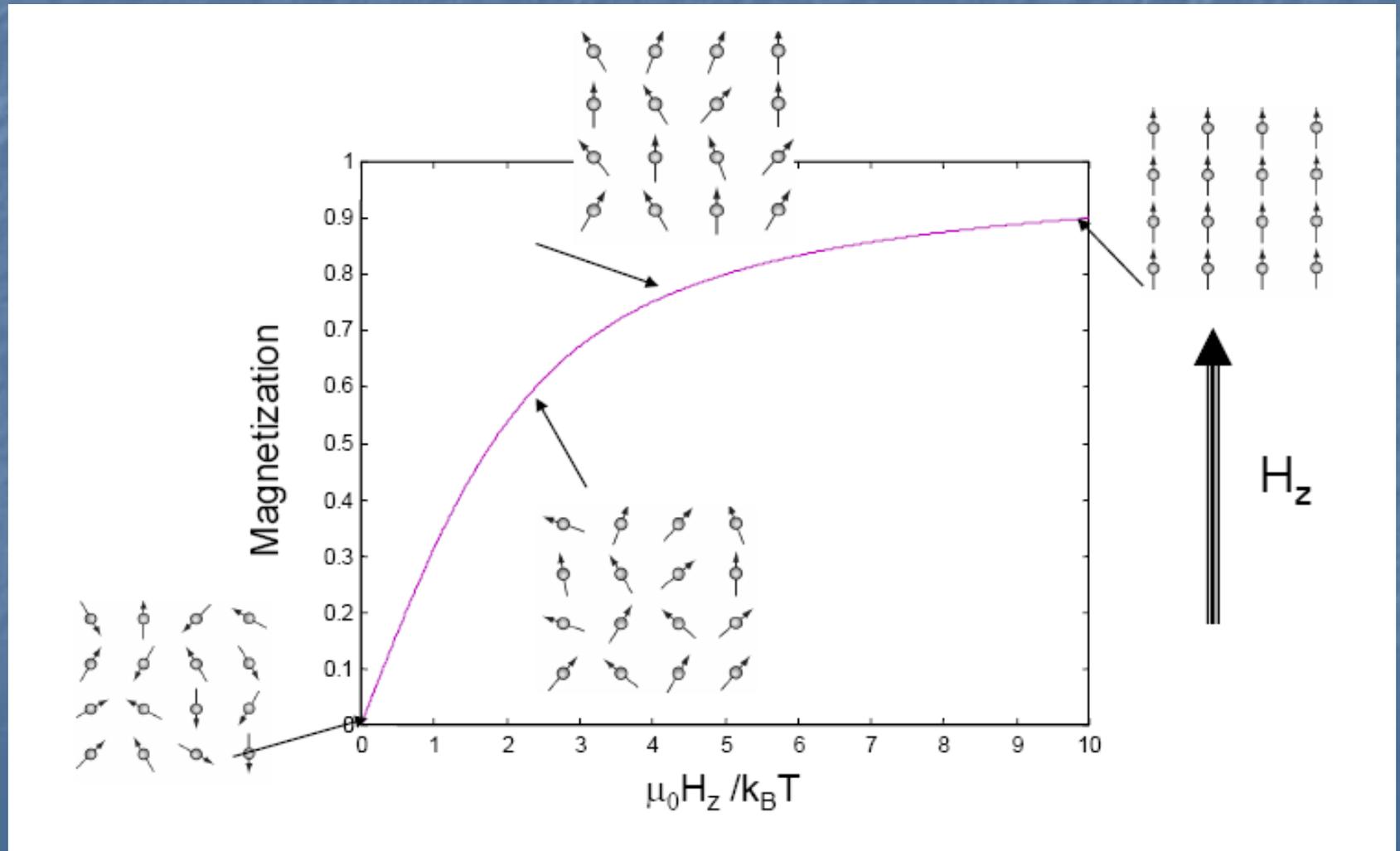
$$dn_\theta = A \cdot e^{\frac{p_m B \cos \theta}{kT}} \cdot n \cdot \frac{\sin \theta d\theta}{2}$$

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

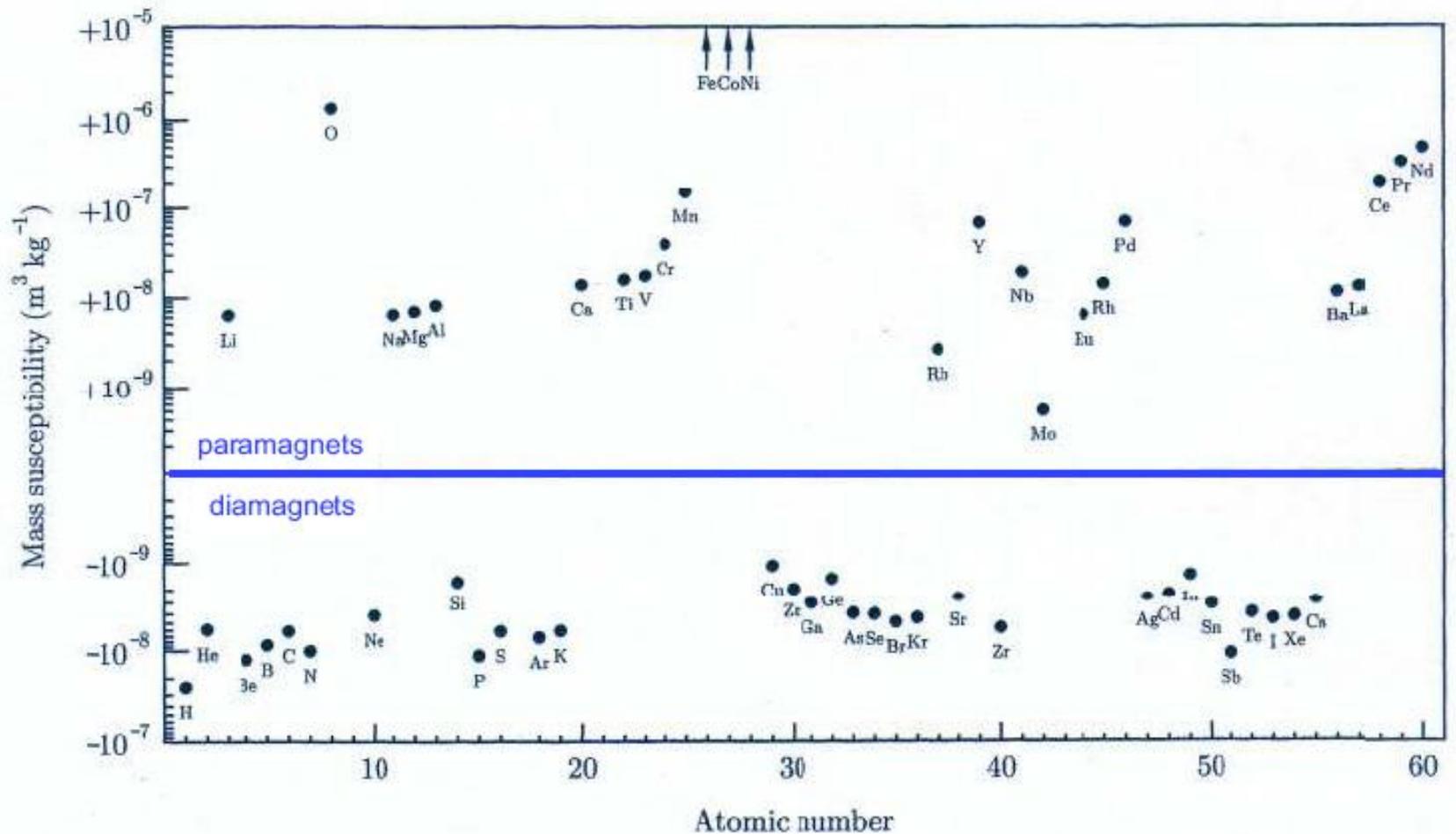
$$J = \int p_m B \cos \theta \cdot dn_\theta = \frac{np_m^2 B}{3kT}$$

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

Намагничивание парамагнетика



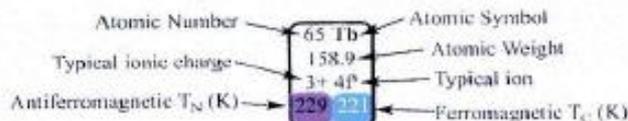
Магнитная восприимчивость элементов



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 ¹	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 ¹																					

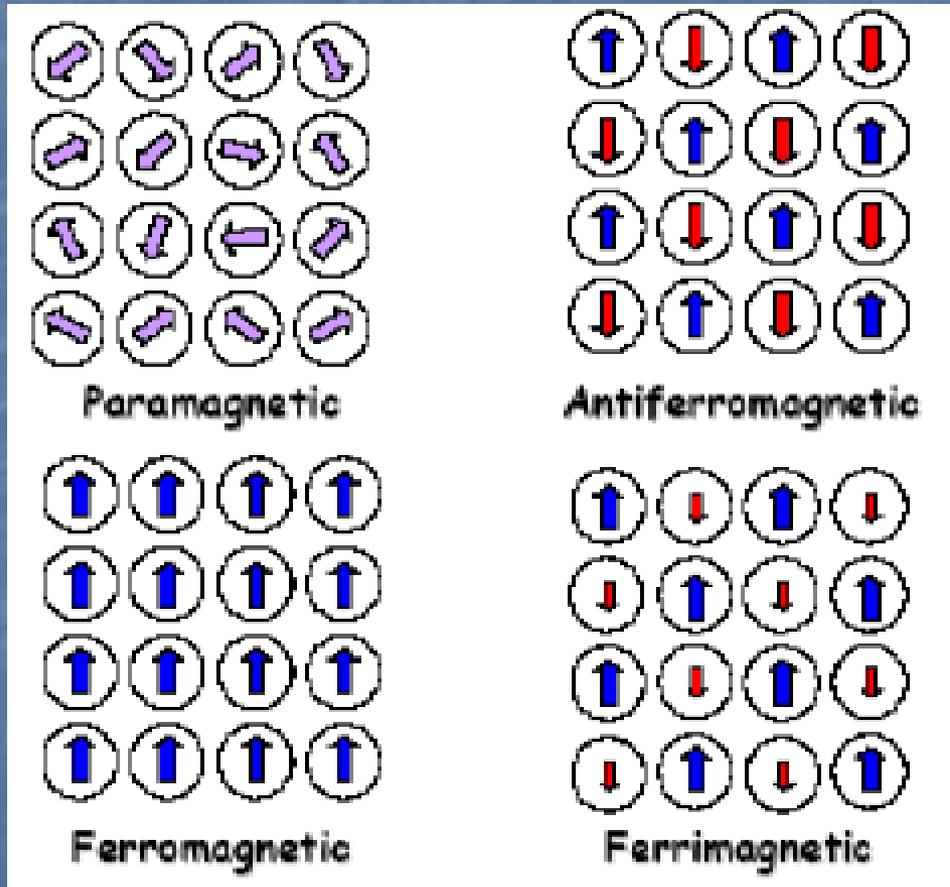


Eight elements (blue) and many compounds are ferromagnetic. They possess a spontaneous magnetization - eleven elements (purple) are antiferromagnetic

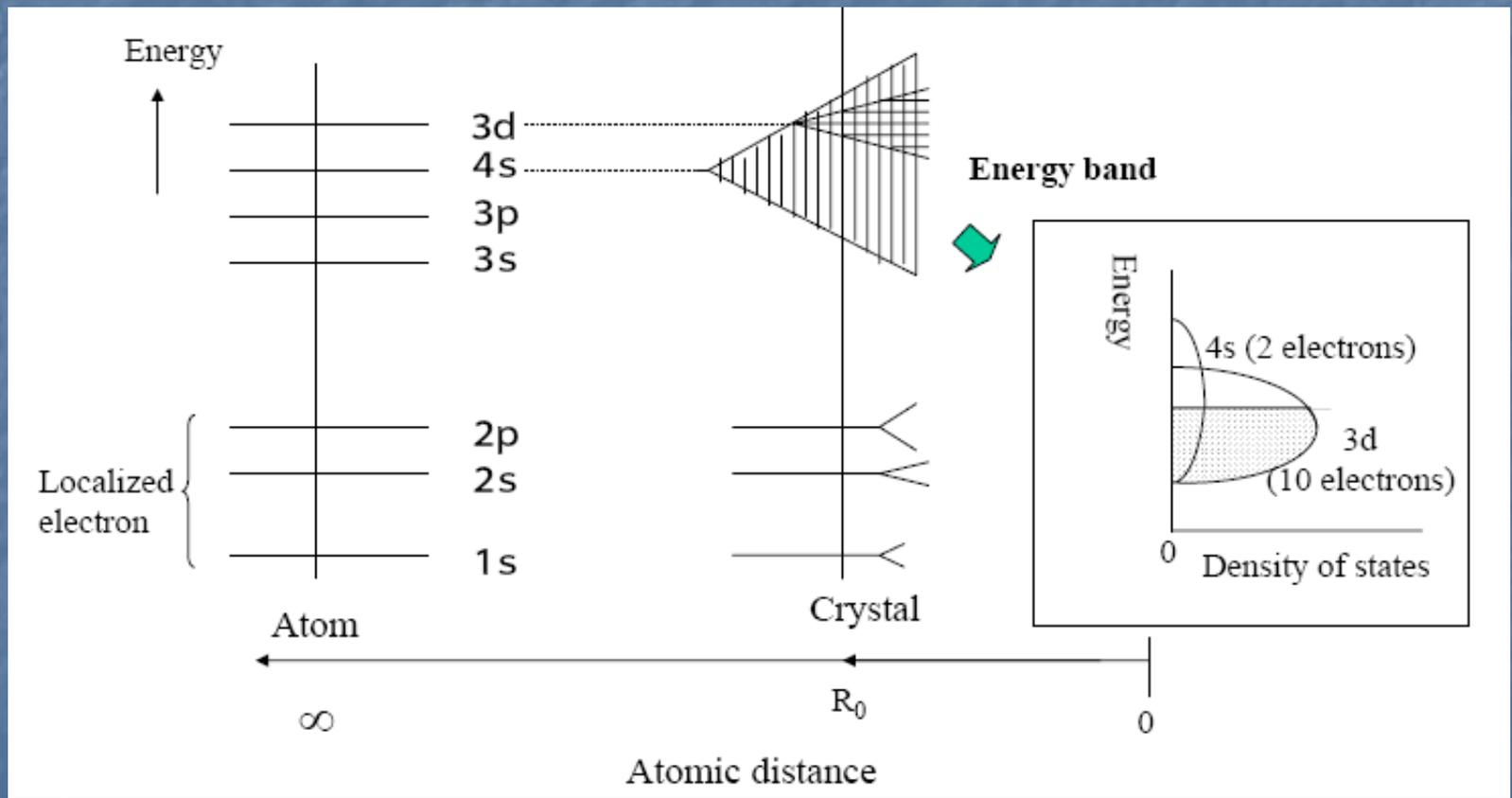
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ferromagnetic 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 ¹	91 Pa 231.0 5+ 5f ²	92 U 238.0 4+ 5f ³	93 Np 237.0 5+ 5f ⁴	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
--	--------------------------------------	--	--------------	---	--	---	---	--	---	--	---	---------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------

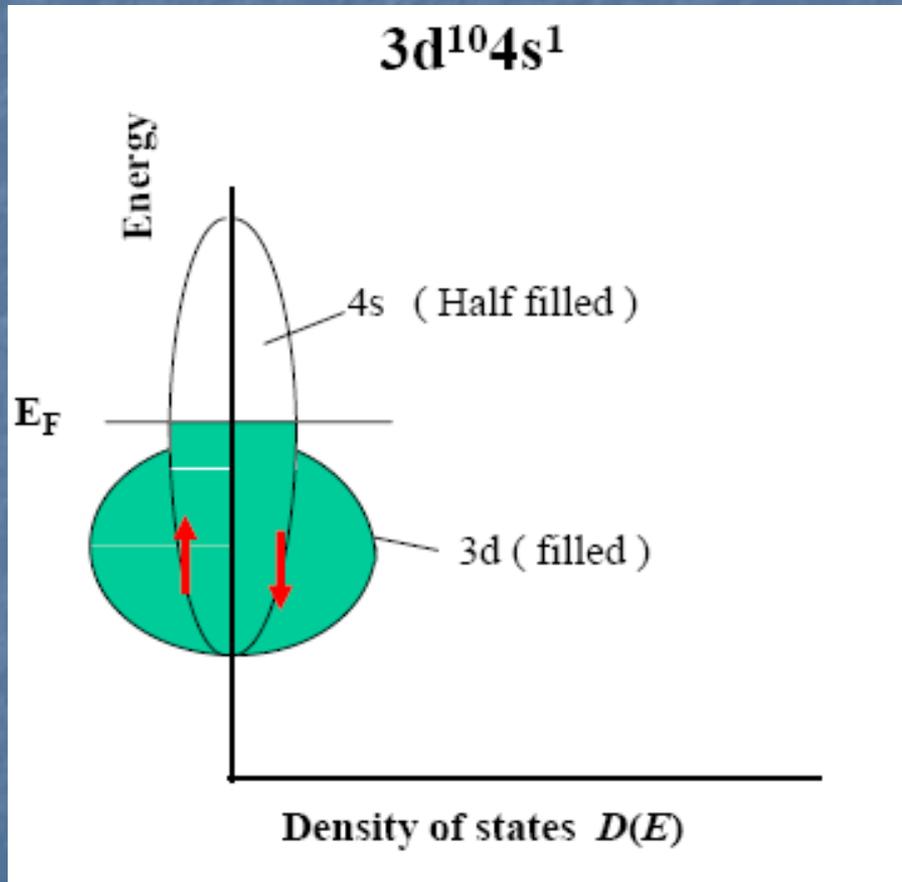
Основные виды магнетиков



Образование зонной структуры в кристалле

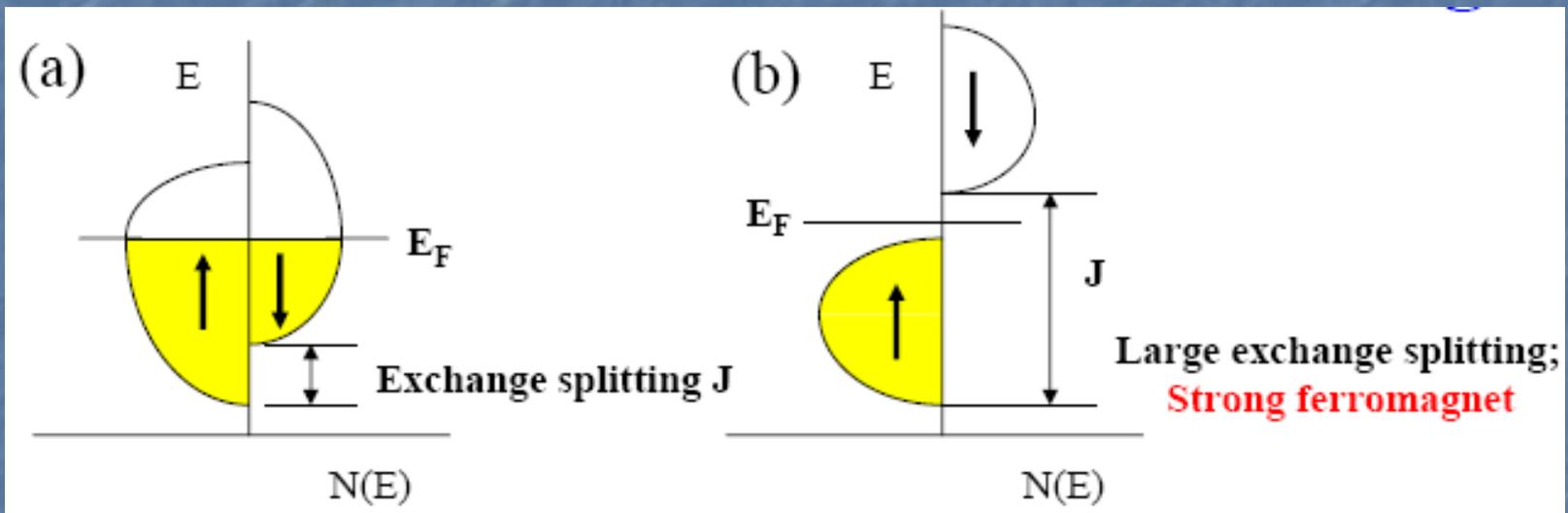


Немагнитный кристалл - Cu



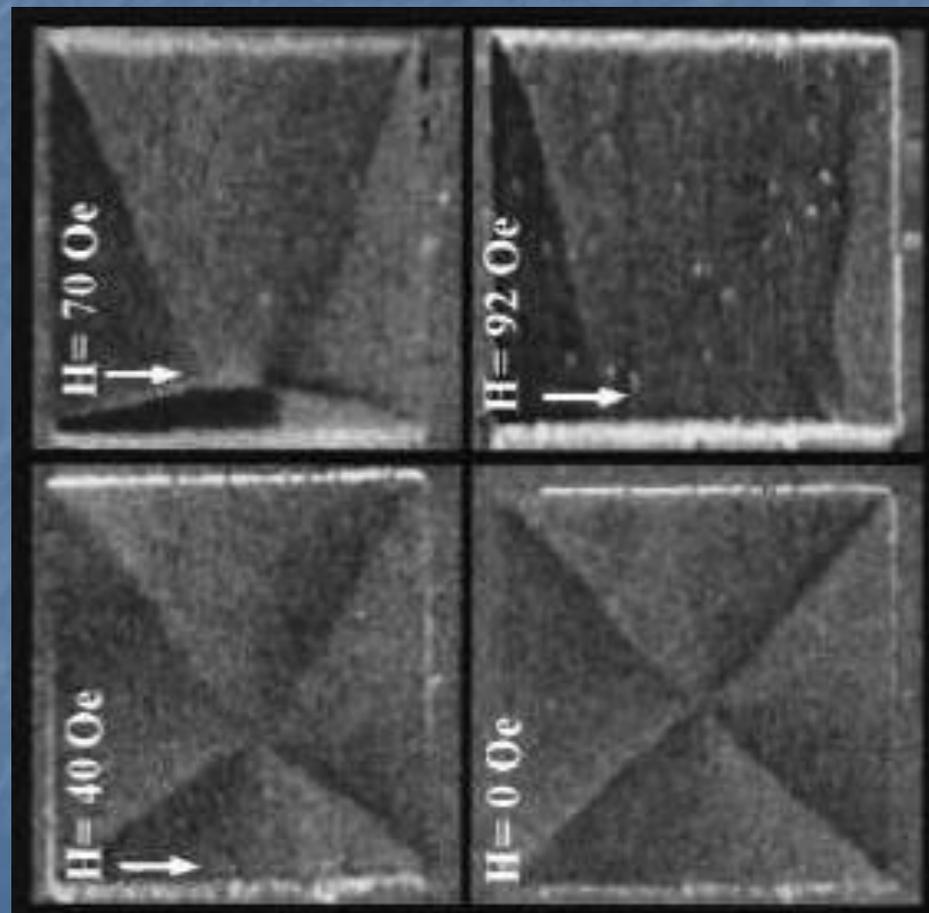
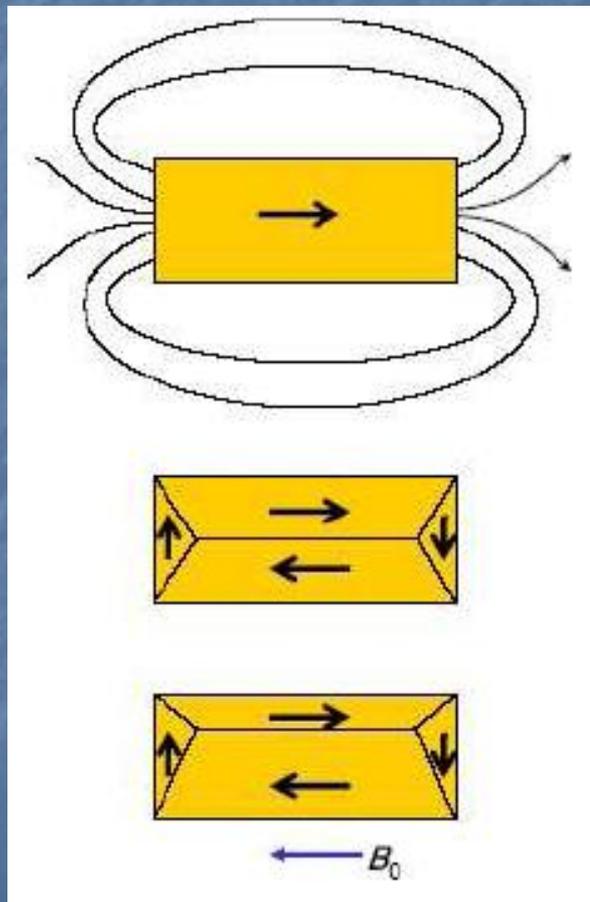
Отсутствует асимметрия по спину - Диамагнетик

Ферромагнитный кристалл

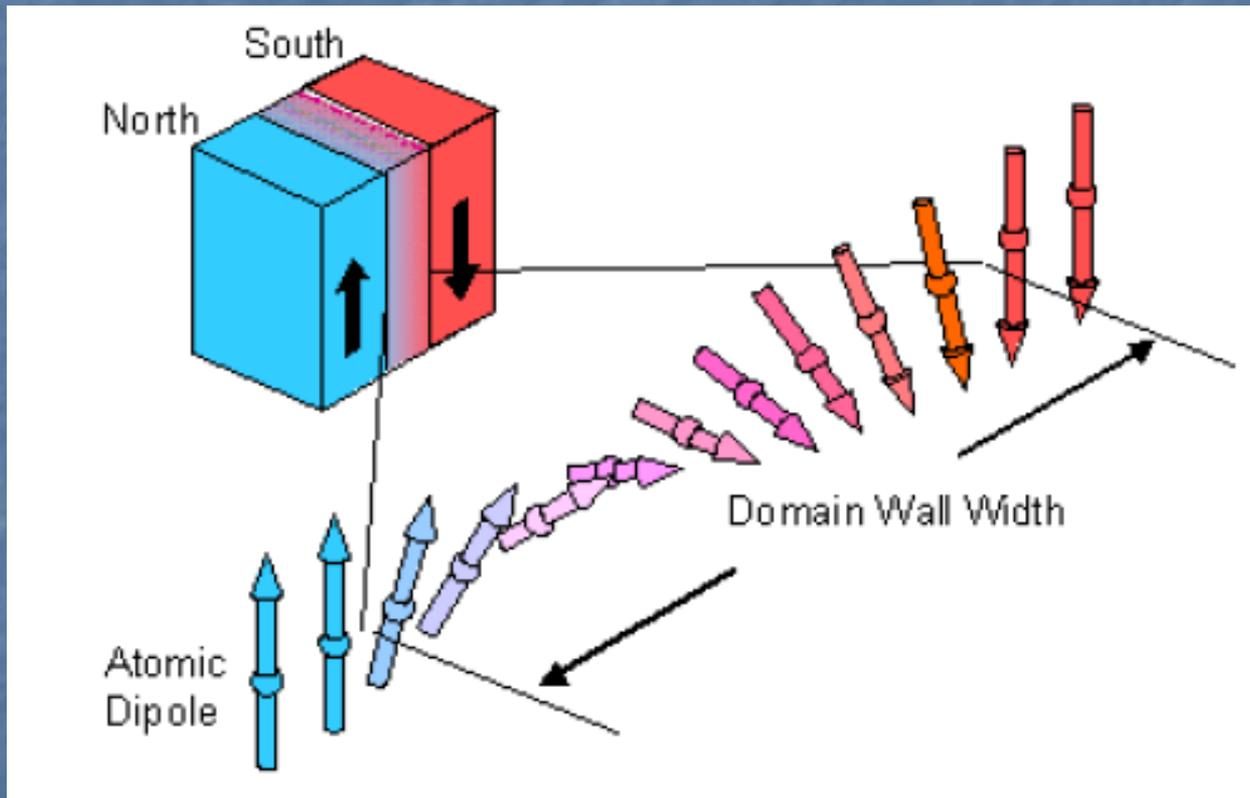


- Магнитный момент возникает из-за неспаренных электронов
- Нецелый магнитный момент на атом

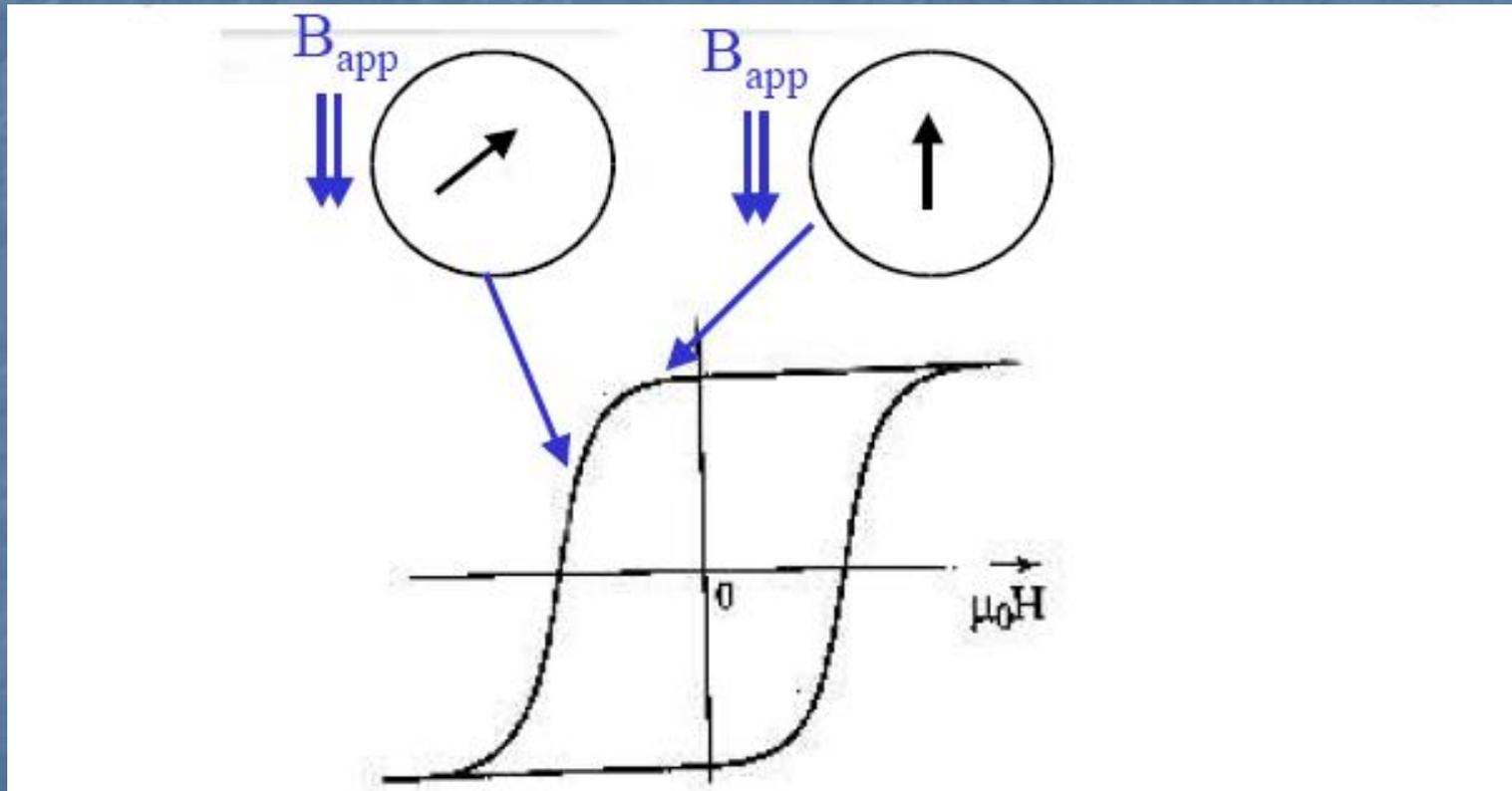
Доменная структура ферромагнетика



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