

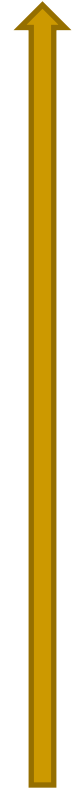
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА И НАНОСИСТЕМ

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

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

Магнетизм

H



Диамагнетизм



Суперпарамагнетизм

Парамагнетизм



Миктомагнетизм

Антиферромагнетизм



Асперомагнетизм

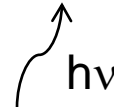
Ферромагнетизм



Ферримагнетизм



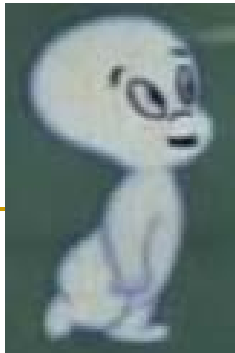
Фотомагнетизм



etc.

наноструктурирование

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



Магнитометрия -

комплекс методов измерения (квази) статических магнитных свойств.

Измеряемой величиной является всегда намагничённость M , хотя при измерениях в слабых магнитных полях удобным оказывается также обсуждение нормированной намагничённости или магнитной восприимчивости:

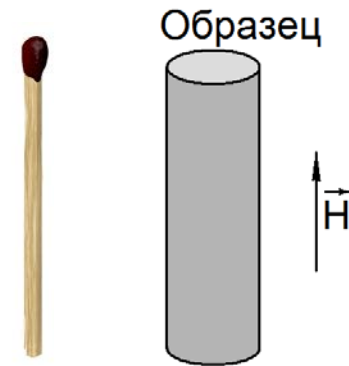
$$\chi = \frac{M}{H}$$

$$[M] = \frac{emu}{mol}$$

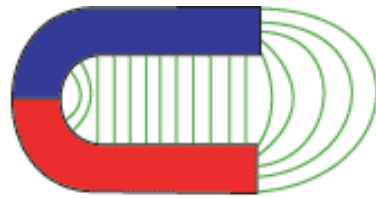
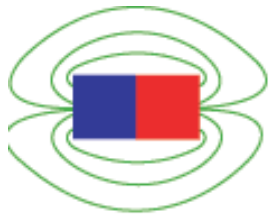
$$[H] = Oe$$

$$[\chi] = \frac{emu}{mol}$$

Для уменьшения влияния размагничивающего фактора образец должен иметь форму цилиндра, вытянутого вдоль поля.



Функциональные материалы - магнетики



Магнетизм — форма взаимодействия движущихся электрических зарядов, осуществляемая на расстоянии посредством магнитного поля.

Какими частицами осуществляется магнитное взаимодействие?

Диамagnetизм

- намагничивание вещества навстречу направлению действующего на него внешнего поля.
- следствие индукционных токов, наводимых в заполненных электронных оболочках ионов внешним магнитным полем. Эти токи создают магнитный момент, направленный, согласно правилу Ленца, навстречу внешнему полю

Правило Ленца: индукционный ток, возникающий при относительном движении проводящего контура и источника магнитного поля имеет такое направление, что его магнитный поток компенсирует изменение магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Опыт Гейма

Диамagnetизм

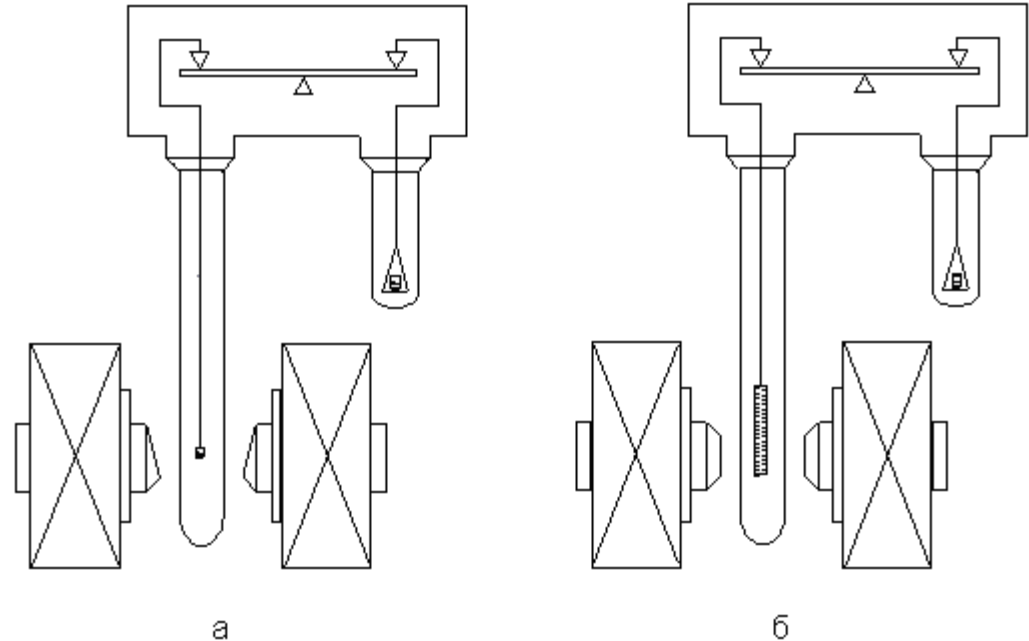
Задача

Определить градиент поля, который был использован в опыте Гейма.

m (лягушки) = 100 г

$H = 16$ Т

$$F = \chi m H \frac{\partial H}{\partial z}$$



Метод Фарадея опирается на измерение силы F , действующей вдоль оси z на образец массой m , помещенный в неоднородное магнитное поле напряженностью H . Он требует специальной геометрии полюсов магнита.

Диамagnetизм

Диамagnetная восприимчивость аддитивна.

Молярная диамagnetная восприимчивость может быть рассчитана по схеме Паскаля:

$$\chi_{dia} = \sum_i \chi_{dia_i} + \sum_i \lambda_i \approx \sum_i \chi_{dia_i}$$

Диамagnetная восприимчивость атомов в ковалентных соединениях:

Atom	$\chi_{Di}/(1 \times 10^{-6} \text{ emu mol}^{-1})$	Atom	$\chi_{Di}/(1 \times 10^{-6} \text{ emu mol}^{-1})$	Atom	$\chi_{Di}/(1 \times 10^{-6} \text{ emu mol}^{-1})$	Atom	$\chi_{Di}/(1 \times 10^{-6} \text{ emu mol}^{-1})$
Ag	-31.0	C (ring)	-6.24	Li	-4.2	S	-15.0
Al	-13.0	Ca	-15.9	Mg	-10.0	Sb(III)	-74.0
As(III)	-20.9	Cl	-20.1	N (ring)	-4.61	Se	-23.0
As(V)	-43.0	F	-6.3	N (open chain)	-5.57	Si	-13
B	-7.0	H	-2.93	Na	-9.2	Sn(IV)	-30
Bi	-192.0	Hg(II)	-33.0	O	-4.6	Te	-37.3
Br	-30.6	I	-44.6	P	-26.3	Tl(I)	-40.0
C	-6.00	K	-18.5	Pb(II)	-46.0	Zn	-13.5

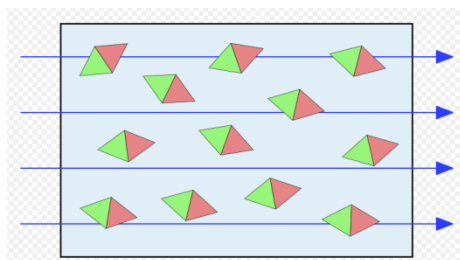
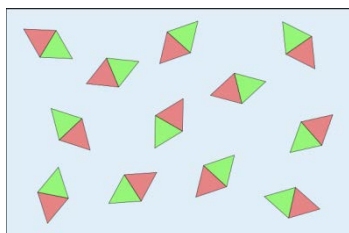
Какова диамagnetная восприимчивость воды?

Диамagnetная восприимчивость отрицательна, не зависит от температуры и может достигать

$$\chi_{dia} \sim -10^{-4} \text{ emu/mol}$$

Парамагнетизм

Парамагнетики — вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля.



Атомы (молекулы или ионы) парамагнетика обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешних полей ориентируются по полю и тем самым создают результирующее поле, превышающее внешнее. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле. В отсутствие внешнего магнитного поля парамагнетик не намагничен, так как из-за теплового движения собственные магнитные моменты атомов ориентированы беспорядочно.

Парамагнетиками становятся ферро- и антиферромагнитные вещества при температурах, превышающих, соответственно, температуру Кюри или Нееля (температуру фазового перехода в парамагнитное состояние).

Парамагнетизм

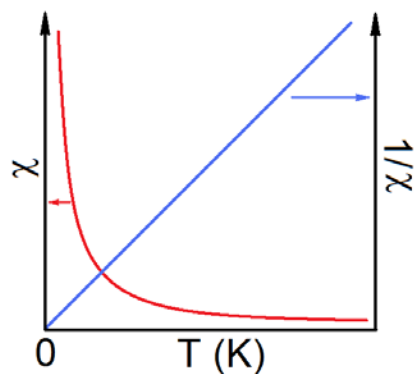
Температурная зависимость магнитной восприимчивости парамагнетика подчиняется закону Кюри $\chi = C/T$. Этот закон выводится методами статистической физики и учитывает вероятность заполнения уровней с различными направлениями спинов в зависимости от соотношения магнитной энергии $\mu_B B$ и тепловой энергии $k_B T$.

Постоянная Кюри $C = (N_A/3k_B)\mu_{\text{eff}}^2$

При комнатной температуре $\chi_{\text{para}} \sim 1 \text{ emu/mol}$.

Квадрат эффективного магнитного момента $\mu_{\text{eff}}^2 = ng^2 J(J+1)\mu_B^2$

Здесь n – число магнитных атомов на формульную единицу, $g = 2$ – фактор Ландэ, J – полный магнитный момент, $\mu_B = 9.274 \cdot 10^{-21} \text{ Эрг/Гс}$



$$\chi = \chi_0 + \frac{C}{T - \Theta}$$

χ_0 – вклад в магнитную восприимчивость, независящий от температуры,
 Θ - температура Вейсса

Температура Вейсса $\Theta \neq 0$ указывает на взаимодействие между магнитными моментами.



Происхождение χ_0

1. χ_{dia} - независящий от температуры диамагнитный вклад в магнитную восприимчивость от внутренних электронных оболочек;
2. χ_{para} - парамагнетизм Паули проявляется в металлах в присутствии постоянного магнитного поля, когда имеет место Зеемановское расщепление энергетических подзон с разнонаправленными спинами. Более заселённой оказывается нижележащая подзона, у электронов которой спиновый магнитный момент направлен по полю.
3. χ_{dia} - диамагнетизм Ландау - независящий от температуры вклад в магнитную восприимчивость от коллективизированных электронов.

При $m^* = m_e \longrightarrow \chi_{\text{dia}} \text{ (Ландау)} = -1/3 \chi_{\text{para}} \text{ (Паули)}$

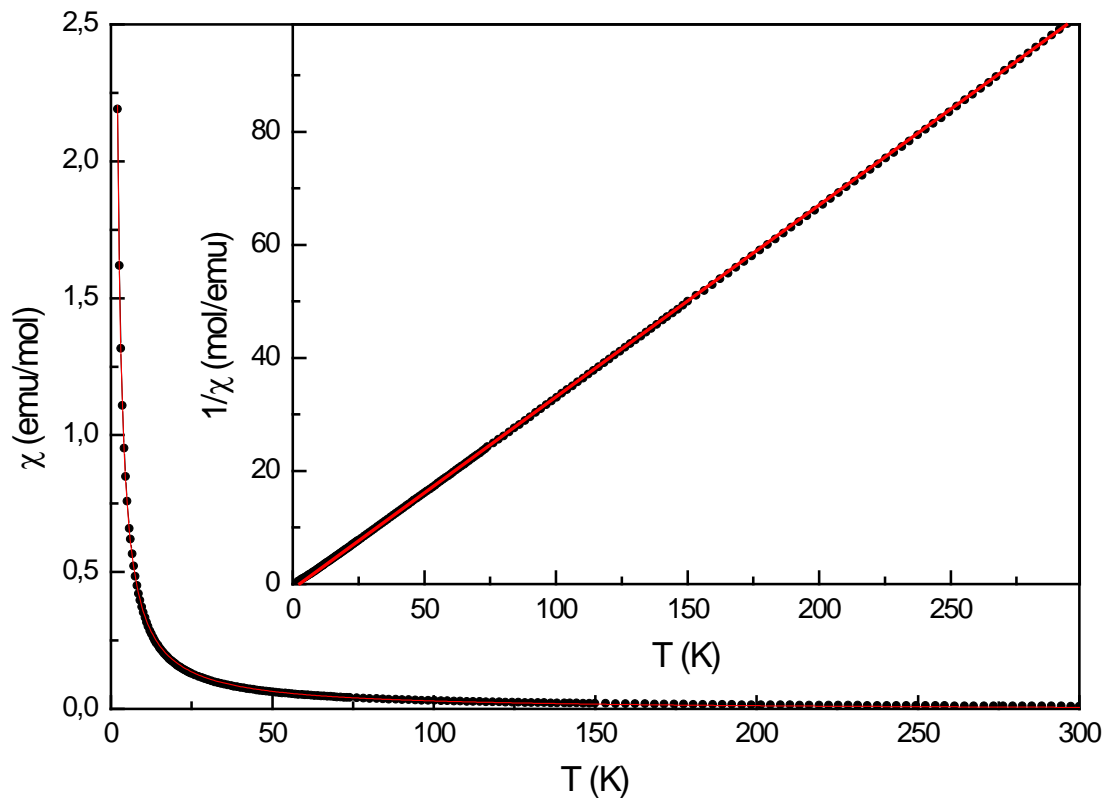
4. $\chi_{\text{para}} = \chi_{\text{vV}}$ - парамагнетизм Ван - Флека, обязанный вкладу квантовых переходов между основным состоянием системы E_0 и ее возбужденными состояниями E_n

$$\chi_{\text{vV}} = 2N_A \sum_{n=1}^p \frac{\left| \langle n | \hat{M}_z | 0 \rangle \right|^2}{E_n - E_0}$$

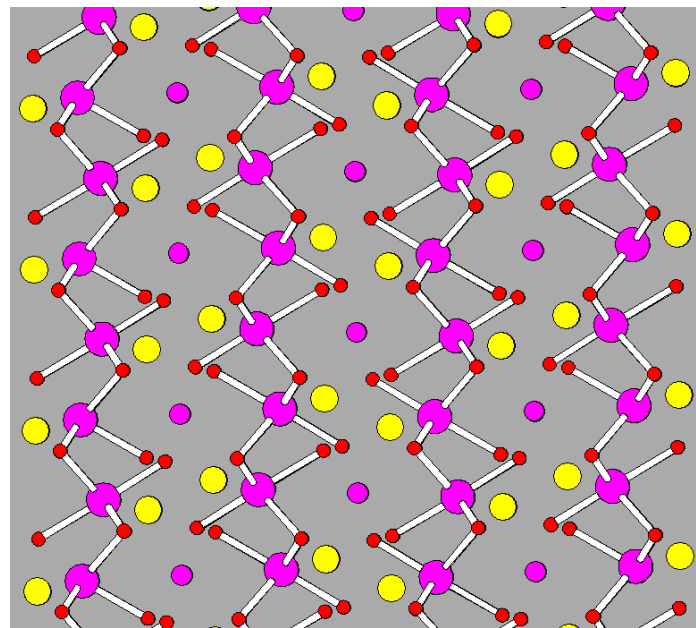
Температура Вейсса Θ

Температура Вейсса является мерой взаимодействия между магнитными центрами.

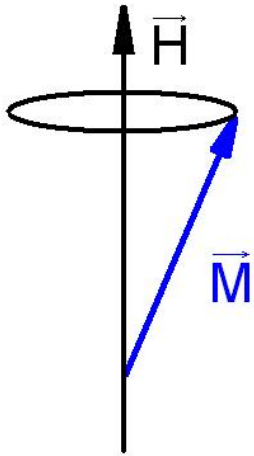
$$\Theta = \frac{zS(S+1)}{3} \frac{J}{k_B}$$



$\Theta = 3\text{K}$



g - фактор



Если магнитный момент поместить во внешнее магнитное поле, то он начнет прецессировать подобно вращающемуся волчку или гироскопу, т. е. его ось вращения будет медленно двигаться, описывая конус.

Частота прецессии ν определяется напряженностью внешнего магнитного поля H и отношением магнитного момента объекта M_S к его угловому моменту вращения M_L .

Отношение M_S/M_L называется g-фактором частицы. Для свободного электрона $g = 2$.

Экспериментально g- фактор можно определить с помощью электронного парамагнитного резонанса.

Электронный парамагнитный резонанс

Электрон со спином $s = 1/2$ имеет проекции магнитного момента $m_s = +1/2$ и $m_s = -1/2$.

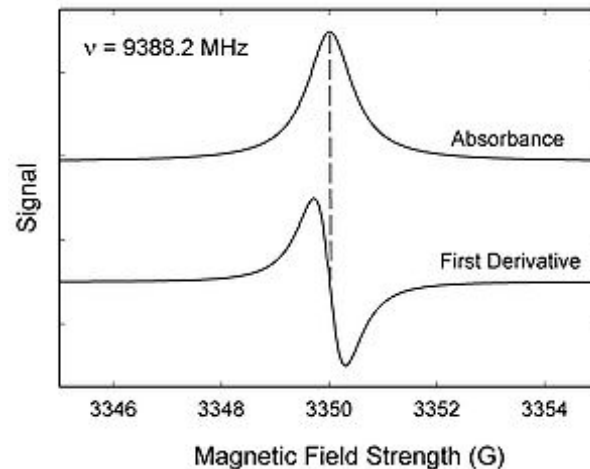
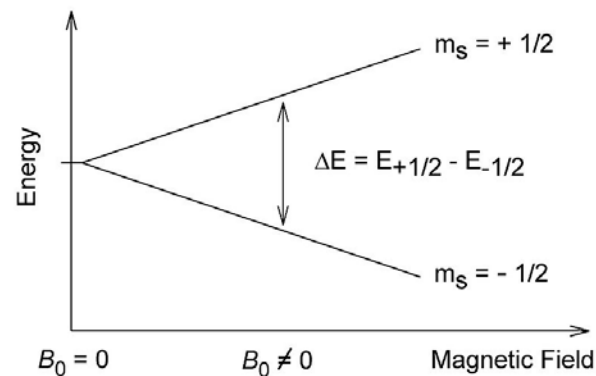
Разница в энергиях $\Delta E = g\mu_B B$ – эффект Зеемана.

Неспаренный электрон может перемещаться между этими уровнями, излучая или поглощая электромагнитную энергию.

Фундаментальная формула ЭПР $h\nu = g\mu_B B$



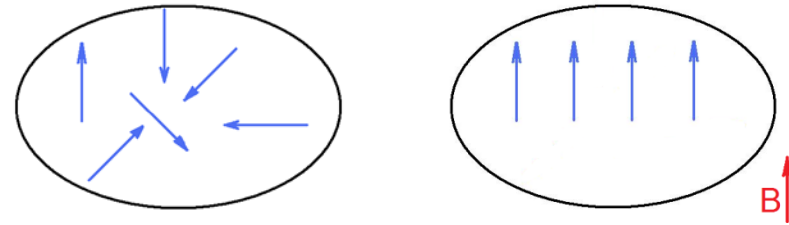
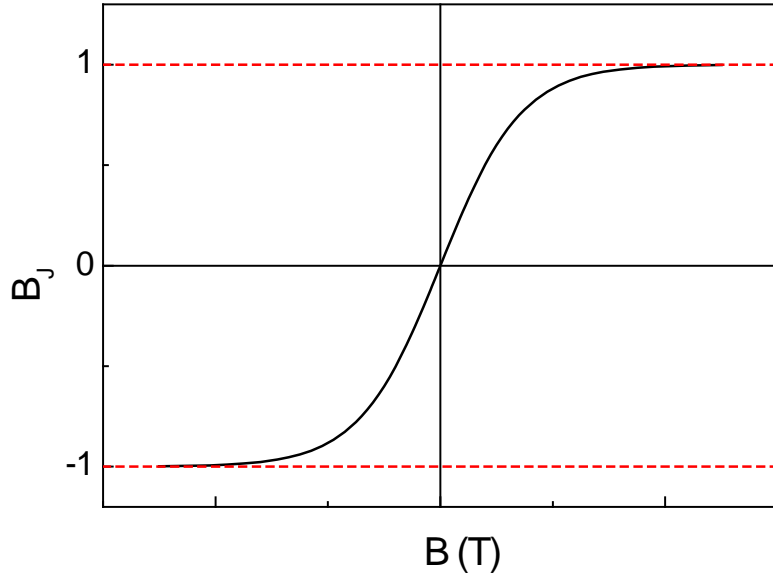
Е.К. Завойский



На какой частоте произойдет резонансное поглощение в поле 0.3 Т?

Парамагнетизм, кривая намагничивания

Функция Бриллюэна



$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{1}{2J}x\right),$$
$$x = \frac{g\mu_B JB}{k_B T}$$

$$M = ng\mu_B J \cdot B_J(x)$$

Чем выше температура, тем более сильные магнитные поля требуются для выведения системы в насыщение. Строго говоря, при любой конечной температуре полное магнитное насыщение невозможно.

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