

## 6.9.1 Закон Кюри-Вейсса и обменное взаимодействие в ферромагнетиках.

*Богатова Екатерина*

**Цель работы:** исследовать температурную зависимость магнитной восприимчивости ферромагнетика в парамагнитной области – выше точки Кюри. По полученной в работе температуре Кюри оценить энергия обменного взаимодействия.

### 1. Теоретическая справка

#### 1.1 Феноменологическое описание ферромагнетиков: парамагнитная фаза и эффективное поле Вейсса

Намагниченностью называется магнитный момент  $I$  единицы объёма, который связан с внешним магнитным полем  $H$  через магнитную восприимчивость  $\chi$ :  $I = \chi H$

Рассмотрим восприимчивость парамагнитного вещества, в котором магнитный момент атома обусловлен только спином одного электрона. Тогда в магнитном поле у атома возникают два возможных уровня энергии:  $E_- = -\mu B$  и  $E_+ = +\mu B$ , причем в низкоэнергетичном состоянии – магнитный момент параллелен магнитному полю.

В соответствии с Больцмановским распределением отношение числа электронов  $N_+$  с энергией  $E_+$  к числу электронов  $N_-$  с энергией  $E_-$  равно

$$\frac{N_+}{N_-} = \exp\left(-\frac{2\mu B}{k_B T}\right) \simeq 1 - \frac{2\mu B}{k_B T} \quad (1)$$

Намагниченность вещества определяется только разностью чисел электронов, магнитные моменты которых ориентированы по полю или против поля, а поскольку мы рассматриваем проекцию магнитного момента на одну ось, то парамагнитная часть восприимчивости равна:

$$\chi = \frac{I}{H} = N \frac{\mu^2}{k_B T} = N \frac{N g^2 \mu_B^2 S(S+1)}{3k_B T} \quad (2)$$

Для описания взаимодействия соседних электронов в ферромагнетике предположим, что в ферромагнетике имеется некоторое эффективное магнитное поле  $H_{\text{эфф}}$ . Величина обменного поля пропорциональна имеющейся намагниченности образца:  $H_{\text{эфф}} = \lambda I$ , где  $\lambda$  – некоторая константа. Тогда, учитывая поправку на дополнительное поле  $H_{\text{эфф}}$ , получим закон Кюри-Вейсса:

$$\chi = \frac{I}{H} = N \frac{g^2 \mu_B^2 S(S+1)}{3k_B (T - \Theta)} \propto \frac{1}{T - \Theta} \quad (3)$$

Где  $\Theta = \frac{N \mu^2 \lambda}{k_B} = N \frac{g^2 \mu_B^2 S(S+1)}{3k_B} \lambda$  – параметр, имеющий размерность температуры.

Этот закон носит приближенный характер и не позволяет описать, что происходит в ферромагнитной области, но достаточно точно характеризует температурную зависимость магнитной восприимчивости в парамагнитной фазе.

## 1.2 Связь эффективного поля Вейсса с обменным интегралом.

Энергия обменного взаимодействия  $U_{\text{обм}}$  атомов  $i$  и  $j$  представляет собой разность между средними значениями кулоновской энергии для параллельных и антипараллельных спинов  $S_i$  и  $S_j$ , а  $J$  – коэффициент пропорциональности, называемый обменным интегралом, величина которого зависит от степени перекрытия распределённых зарядов атомов  $i$  и  $j$ .

$$U_{\text{обм}} = -2JS_iS_j \quad (4)$$

Установим приближенно связь между обменным интегралом  $J$  и константой Вейсса  $\lambda$ . Найдём энергию  $U_{\text{пер}}$ , требуемую для переворота данного спина в присутствии всех других спинов его ближайших соседей. С одной стороны, эта энергия вдвое больше обменной энергии системы с какой-то определенной ориентацией спина. С другой стороны, каждый магнитный атом испытывает действие эффективного поля, следовательно, воздействие всех спинов на данный характеризуется средней намагниченностью  $I = \mu/V$ , и мы можем записать равенство

$$2 \cdot 2JnS^2 = U_{\text{пер}} = 2\mu H_{\text{эфф}} = 2\mu \frac{\lambda\mu}{V}$$

Выразив константу  $\lambda$  из температуры  $\Theta$ , мы получаем:

$$J = \frac{3k_B \Theta}{2nS(S+1)} \quad (5)$$

## 2. Экспериментальная установка и принцип измерений

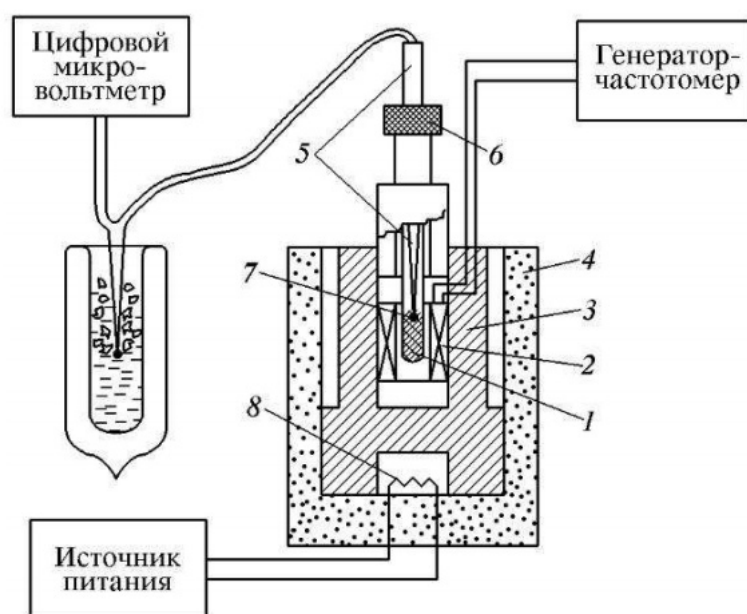


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка для измерения восприимчивости магнетиков приведена на рис. 1. Ферромагнитный образец 1 располагается внутри пустотелой катушки 2, которая является индуктивностью колебательного контура, входящего в состав LC-генератора. Частота колебаний генератора высвечивается на цифровом табло блока. Катушка самоиндукции помещена в термостат, представляющий собой массивный медный цилиндр 3, расположенный в пенопластовом корпусе 4. Образец помещен в тefлоновую капсулу. С помощью штока 5 капсулу можно перемещать вдоль оси катушки самоиндукции. Когда шток опущен, образец введен в катушку, а когда поднят – образец из неё вынут.

Магнитная восприимчивость образца определяется по изменению самоиндукции, происходящему при его введении в катушку. Обозначая через  $L$  индуктивность катушки с образцом и через  $L_0$  её индуктивность в отсутствии образца, получим:

$$\frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \mu - 1 = 4\pi\chi$$

Учитывая, что частота  $f$  колебательного LC-контура определяется выражением  $\frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{LC}$ , получим:

$$\frac{1}{\chi} \propto \frac{f^2}{f_0^2 - f^2} \quad (6)$$

### 3. Выполнение и обработка данных

При выполнении работы образец сначала охлаждается ниже точки Кюри, а затем медленно нагревается. Исследуем зависимость частот  $f$  и  $f_0$  от температуры, постепенно нагревая образец. Измерения проводим в интервале от 0 °C до 50 °C с шагом в примерно 3 °C, результаты представлены в Таблице 1.

U, мкВ	T, °C	f <sub>0</sub> , кГц	f, кГц	U, мкВ	T, °C	f <sub>0</sub> , кГц	f, кГц
-900	1	956,1	909,2	60	24,5	956	947
-780	4	956,5	909,3	180	27,4	955,9	950,4
-750	4,7	955,7	909,6	300	30,3	955,8	951,9
-660	6,9	955,8	909,8	420	33,2	955,9	952,7
-540	9,8	956	909,9	540	36,2	955,9	953,1
-420	12,8	956,1	910,6	660	39,1	955,9	953,4
-300	15,7	955,4	913,4	780	42	955,8	953,9
-180	18,6	955,8	923,4	900	45	956	954
-60	21,5	955,9	939	990	47,1	955,9	954,1

Таблица 1: Результаты измерений.

Результаты измерения изобразим на графике (Рис. 2) в координатах  $\left(T, \frac{f^2}{f_0^2 - f^2}\right)$ .

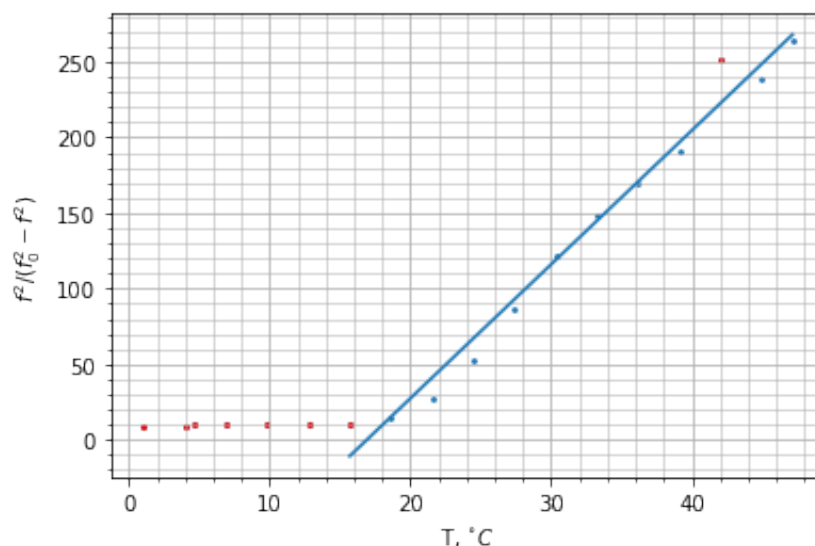


Рис. 2: Зависимость  $\frac{f^2}{f_0^2 - f^2}(T)$

Линейный участок аппроксимируем прямой, искомые коэффициенты из метода наименьших квадратов равны:

$$k = 8.86 \pm 0.40$$

$$b = -149.82 \pm 13.14$$

Пользуясь соотношениями (3) и (6), получаем

$$\Theta = -\frac{b}{k} = 16.9 \pm 1.7 \text{ } ^\circ\text{C} = 289.9 \pm 1.7 \text{ K}$$

Пользуясь формулой (5), оценим величину обменного интеграла, считая, что для гадолиния  $n = 12$ ,  $S = 7/2$ :

$$J = 0.198 \pm 0.019 \text{ мЭВ}$$

## 4. Выводы

В ходе работы была исследована температурная зависимость магнитной восприимчивости гадолиния и определена температура Кюри  $\Theta = 289.9 \pm 1.7 \text{ K}$ , что хорошо соответствует табличному значению  $293.4 \text{ K}$ . По измеренным данным видно, что закон Кюри-Вейса не выполняется при температурах, ниже  $\Theta$ , т.е. в ферромагнитной области. По полученному значению  $\Theta$  был оценен обменный интеграл  $J = 0.198 \pm 0.019 \text{ мЭВ}$ .