

# Бичина Марина Б04-005, Лабораторная работа №. 6.9.1 «закон Кюри-Вейсса и обменное взаимодействие в ферромагнетиках»

## Цель работы:

1. Исследовать температурную зависимость магнитной восприимчивости ферромагнетика в парамагнитной области – выше точки Кюри
2. По полученной температуре Кюри оценить энергию обменного взаимодействия

**Теоретическая справка:** Намагниченность вещества  $I$  связана с внешним магнитным полем  $H$ , под воздействием которого она возникает, соотношением

$$I = \kappa H,$$

где  $\kappa$  называется магнитной восприимчивостью. Рассмотрим, чем определяется восприимчивость парамагнитного вещества, в котором магнитный момент атома обусловлен спином одного электрона. Магнитный момент электрона  $\mu$  во внешнем поле будет направлен либо по, либо против поля, поэтому в магнитном поле возникнут энергии

$$E_{\pm} = \pm \mu B,$$

причём в состоянии  $E_{-}$  магнитный момент параллелен полю. Отношения числа частиц на этих уровнях

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

здесь приближение оправдано, так как даже для  $B = 10^5$  Гс при  $T = 300$  К будет справедливо  $2\mu B/k_B T \approx 0.05$ , а значит, мы можем считать  $\mu B \ll k_B T$ . Соответственно, намагниченность определяется разностью чисел электронов на двух уровнях

$$\Delta N = N_{-} - N_{+} \approx N \frac{\mu B}{k_B T},$$

где  $N = N_{-} + N_{+}$  – количество неспаренных электронов в единице объёма. Отсюда, учитывая  $I = \mu \Delta N$  и  $H \approx B$ , получаем

$$\kappa = \frac{I}{H} = N \frac{\mu^2}{k_B T}. \quad (1)$$

Для атома с более чем одним электроном и суммарным спином  $S$ , эта формула обобщается как

$$\kappa = \frac{Ng^2\mu_B^2 S(S+1)}{3k_B T}$$

где  $g$  – фактор Ланде.

В ферромагнетиках для описание взаимодействия соседних электронов вводится эффективное (или обменное) поле  $H_{\text{эфф}}$ , величина которого пропорциональна намагниченности:

$$H_{\text{эфф}} = \lambda I,$$

где  $\lambda$  – некоторая константа. С учётом этого поля формула (1) переписывается как

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

где

$$\chi \propto \frac{1}{T - \Theta} \quad (2)$$

называемое **законом Кюри–Вейсса**. Температура  $\Theta$  называется парамагнитной точкой Кюри, при стремлении температуры к ней восприимчивость неограниченно возрастает из-за того, что тепловое движение всё меньше препятствует магнитным моментам ориентироваться в одном направлении. *Это не то же самое, что точка Кюри  $T_C$ , которая определяется как температура фазового перехода из парамагнитного в ферромагнитное состояние. Как правило,  $\Theta > T_C$ .*

Теперь выясним связь обменного интеграла с  $\Theta$ . Исходя из наличия эффективного поля  $H_{\text{эфф}}$ , получаем, что энергия, которую необходимо затратить на то, чтобы перевернуть один спин, может быть получена как

$$U_{\text{пер}} = 2\mu H_{\text{эфф}} = 2\mu \cdot \lambda I = 2\mu \frac{\lambda \mu}{V}, \quad (3)$$

где  $V$  – объём, приходящийся на один атом. В то же время, эта энергия переворота в два раза больше обменной энергии системы, так как можно показать, что энергии систем с параллельными и антипараллельными спинами отличаются знаком. Обменная энергия равна

$$U_{\text{обм}} = -2JS_i S_j,$$

где  $J$  – обменный интеграл,  $\mathbf{S}_i \mathbf{S}_j$  скалярное произведение векторов спинов, поэтому в итоге

$$U_{\text{пер}} = 2(2JnS^2),$$

где  $S$  – среднее значение  $\mathbf{S}$  вдоль направления намагниченности,  $n$  – число соседей. Таким образом, с учётом (3) и  $\mu = gS\mu_B$ , получаем

$$\lambda = \frac{2nJV}{g^2 \mu_B^2}.$$

Учитывая, что  $V = 1/N$ , где  $N$  – концентрация атомов, то, с учётом определения  $\Theta$  получим окончательно

$$J = \frac{3k_B \Theta}{2nS(S+1)} \quad (4)$$

**Описание установки:** Ферромагнитный образец 1 располагается внутри пустотелой катушки 2, которая является индуктивностью колебательного контура, входящего в состав LC-генератора.

Катушка самоиндукции помещена в термостат, представляющий собой массивный медный цилиндр 3, расположенный в пенопластовом корпусе 4. С помощью термостата производится охлаждение образца.

Исследуемый ферромагнетик (в нашей работе это гадолиний Gd) является проводником, а рабочая частота генератора высока, поэтому для того, чтобы не возникло

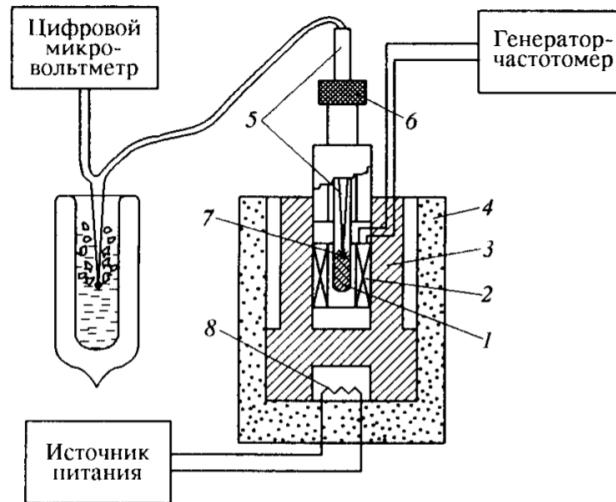


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

токов Фуко, образец изготовлен из мелких гранул размером менее 0.1 мм. Он помещён в тефлоновую капсулу, которую с помощью штока 5 можно перемещать вдоль катушки самоиндукции.

Магнитная восприимчивость образца определяется по изменению самоиндукции при его введении в катушку:

Пусть  $L$  – индуктивность с образцом, а  $L_0$  – без

Тогда

$$L = \mu L_0,$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость образца, т.е.

$$\frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \mu - 1.$$

Принимая в расчёт, что длина образца сильно больше его диаметра, можно пренебречь размагничивающим фактором, тогда

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

С учётом того, что собственная частота контура обратно пропорциональна корню из индуктивности, получим

$$\frac{1}{\chi} \propto \frac{f^2}{f_0^2 - f^2} \quad (5)$$

Для рабочей установки:

1. Истинный 0: 0.03 мВ
2. Константа термопары: 41 мкВ/К
3. Комнатная температура: 24 °C

### Ход работы:

1. Произведем измерения в интервале температур от 274 К до 320 К Охлаждение образца производится с помощью массивного медного цилиндра 3, который

предварительно охлаждается в морозильнике бытового холодильника или при помощи жидкого азота

Для нагревания служит электронагреватель 8, находящийся в тепловом контакте с цилиндром 3

Данные, полученные в ходе эксперимента, приведены в таблице 1

U, мВ	T, К	f, кГц	$f_0$ , кГц		U, мВ	T, К	f, кГц	$f_0$ , кГц
-0.9	274.317	803.885	857.049		0.14	299.683	851.3	858.149
-0.82	276.268	803.833	856.99		0.27	302.854	852.78	858.35
-0.72	278.707	803.796	857.081		0.40	306.024	853.97	858.41
-0.59	281.878	804.358	857.081		0.51	308.707	854.5	858.41
-0.46	285.049	805.577	857.289		0.61	311.146	854.99	858.58
-0.33	288.220	811.200	857.405		0.71	313.585	855.4	858.616
-0.23	290.659	820.875	857.615		0.81	316.024	855.84	858.630
-0.11	293.585	837.475	857.921		0.91	318.463	856.08	858.85
0.02	296.756	847	858.147		1.01	320.902	856.27	858.801

Таблица 1: Зависимость частот от температуры образца

2. По данным из таблицы построим график зависимости  $\frac{f^2}{f_0^2 - f^2}(T)$  по МНК на участке, где зависимость будет линейно-возрастающей:

Для нашей работы зависимость будет выглядеть как

$$y = (5.39 \pm 0.12)x - 1559 \pm 38 \quad (y = kx + b, k = 5.39 \pm 0.12, b = -1559 \pm 38)$$

3. Вычислим точку Кюри для ферромагнетика, исходя из условия  $y = 0$

$$(5.39 \pm 0.12)\theta - 1559 \pm 38 = 0$$

$$\theta = \frac{1559}{5.39} \approx 289 K$$

Погрешность можно найти по формуле

$$\Delta\theta = \theta \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2} = 289 \sqrt{\left(\frac{0.12}{5.39}\right)^2 + \left(\frac{38}{1559}\right)^2} = 9 K,$$

Окончательно получим

$$\theta = 290 \pm 9 K \quad (6)$$

4. Оценим величину обменного интеграла  $J$  (примем для гадолиния  $n = 12$   $S = 7/2$ ) по формуле 4

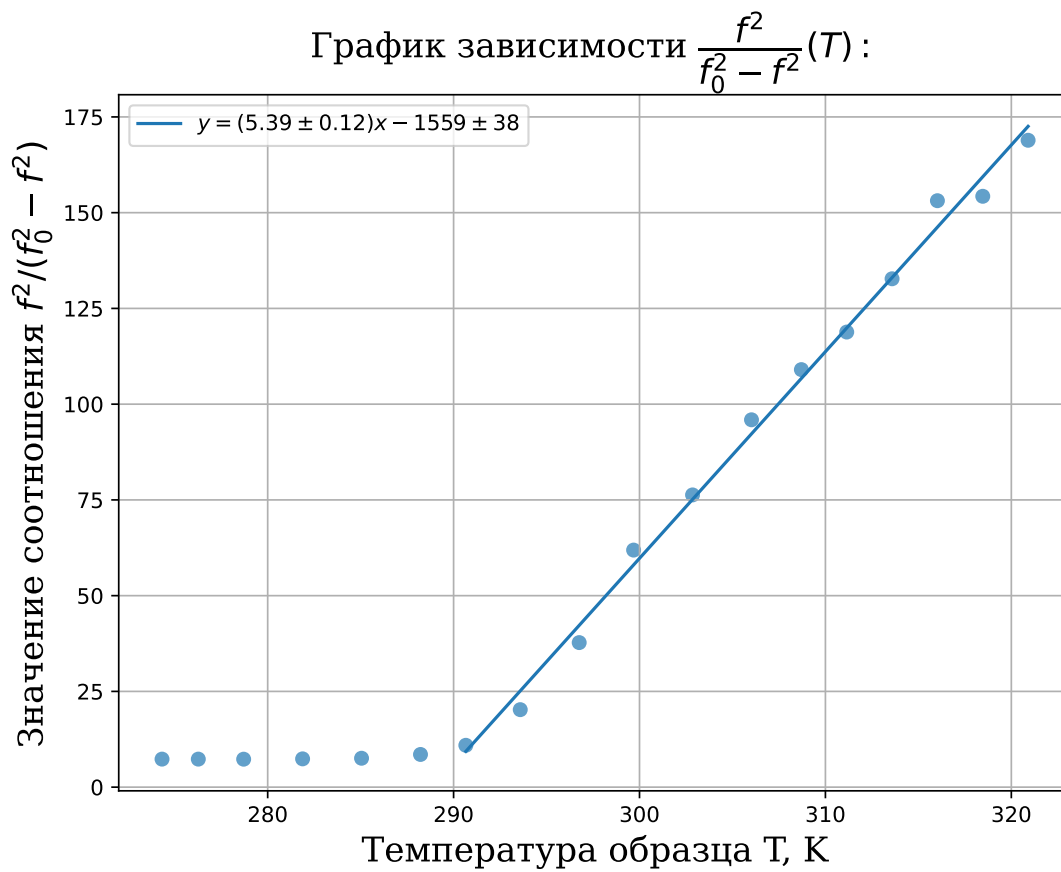
$$J = \frac{3k_B \cdot 290}{2 \cdot 12 \cdot 3,5 \cdot 4,5} \approx 3.18 \cdot 10^{-16} \text{ эрг} = 198 \text{ мкэВ}$$

Погрешность:

$$\Delta J = J \frac{\Delta\theta}{\theta} = 6 \text{ мкэВ}$$

Окончательно получим:

$$J = 200 \pm 6 \text{ мкэВ} \quad (7)$$



### Выводы:

1. В ходе работы была исследована температурная зависимость магнитной восприимчивости гадолиния и определена температура Кюри  $\Theta = 290 \pm 9$  К
2. По полученному значению  $\Theta$  был оценен обменный интеграл  $J = 200 \pm 6$  мкэВ.