

Отчёт по лабораторной работе №6.9.1
Закон Кюри-Вейса и обменное взаимодействие в
ферромагнетиках

Плюскова Н.А. Б04-004

17 сентября 2023 г.

1. Аннотация

В данной работе исследуется температурная зависимость магнитной восприимчивости ферромагнетика в парамагнитной области - выше точки Кюри. По полученной в работе температуре Кюри оценивается энергия обменного взаимодействия. Объектом исследования является металлический гадолиний.

2. Теоретическое введение

2.1 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 χ : $I = \chi H$

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 низкоэнергетическом 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:

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

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 λ – 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.

2.2 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 λ . Найдем 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 λ из температуры Θ , мы получаем:

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

3. Экспериментальная установка и принцип измерений

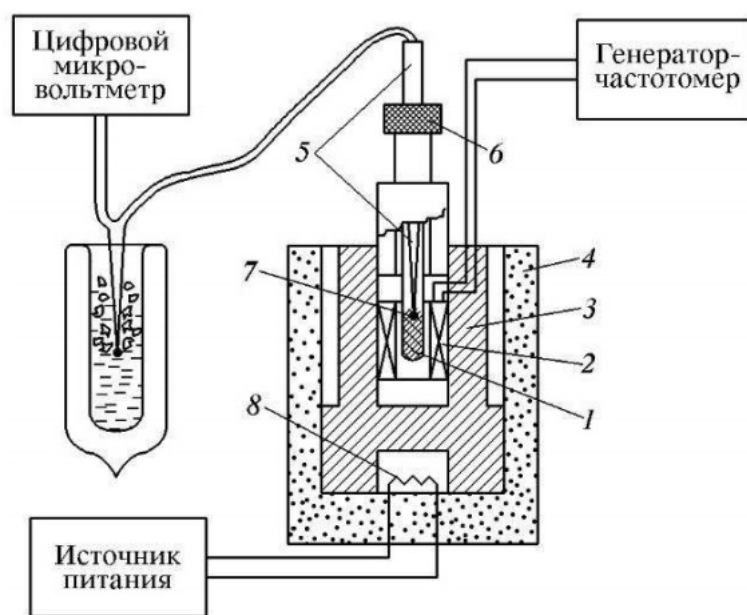


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

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:

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

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

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

4. Результаты эксперимента 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 2 °C до 50 °C с шагом в примерно 3 °C, результаты представлены в Таблице 1 в разделе Приложение.

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

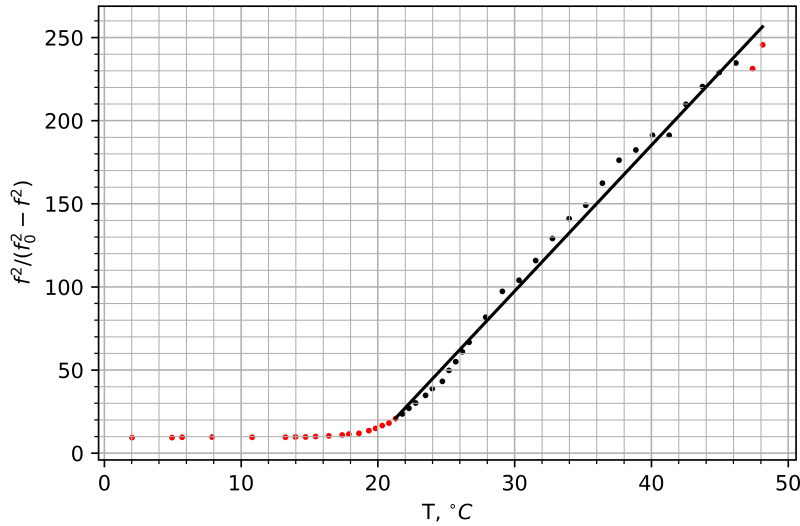


Рис. 2: Зависимость $\frac{f^2}{f_0^2 - f^2}(T)$

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

$$k = 8.78 \pm 0.40$$

$$b = -165.87 \pm 13.14$$

Пользуясь соотношениями (3) и (6), получаем

$$\Theta = -\frac{b}{k} = 18.90 \pm 1.66 \text{ °C} = 291.9 \pm 25.6 \text{ K}$$

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

$$J = 0.200 \pm 0.019 \text{ мЭВ}$$

5. Вывод

В ходе работы была исследована температурная зависимость магнитной восприимчивости гадолиния и определена температура Кюри $\Theta = 291.9 \pm 25.6$ К, что в пределах σ совпадает с табличным значением 293.4 К. По измеренным данным видно, что закон Кюри-Вейса не выполняется при температурах, ниже Θ , т.е. в ферромагнитной области. По полученному значению Θ был оценен обменный интеграл $J = 0.200 \pm 0.019$ мэВ.

Возможные причины расхождения теоретического и экспериментального значений температуры Кюри:

- Точно не успевали снимать значения частот f и f_0
- Не учитывалась погрешность константы термопары
- Чем выше была температура, тем точнее были измерения f и f_0
- При выполнении эксперимента сталкивались с проблемой колебаний температуры на 3-4 единицы вниз

6. Приложение

| U , мкВ | σ_U , мкВ | T , °С | f , кГц | σ_f , кГц | f_0 , кГц | σ_{f_0} , кГц |
|-----------|------------------|----------|-----------|------------------|-------------|----------------------|
| -900 | 10 | 2,02 | 909,23 | 0,01 | 956,13 | 0,01 |
| -780 | | 4,95 | 909,32 | | 956,51 | |
| -750 | | 5,68 | 909,63 | | 955,71 | |
| -660 | | 7,88 | 909,83 | | 955,83 | |
| -540 | | 10,80 | 909,92 | | 956,03 | |
| -440 | | 13,24 | 909,70 | | 955,73 | |
| -410 | | 13,98 | 910,21 | | 955,78 | |
| -380 | | 14,71 | 910,51 | | 955,83 | |
| -350 | | 15,44 | 911,65 | | 955,94 | |
| -310 | | 16,41 | 912,90 | | 955,80 | |
| -270 | | 17,39 | 915,09 | | 955,89 | |
| -250 | | 17,88 | 916,83 | | 955,81 | |
| -220 | | 18,61 | 918,34 | | 955,99 | |
| -190 | | 19,34 | 922,57 | | 955,98 | |
| -170 | | 19,83 | 925,47 | | 956,00 | |
| -150 | | 20,32 | 928,62 | | 956,04 | |
| -130 | | 20,80 | 930,62 | | 955,98 | |
| -110 | | 21,29 | 933,84 | | 956,05 | |
| -90 | | 21,78 | 936,34 | | 955,98 | |
| -70 | | 22,27 | 938,78 | | 956,01 | |
| -50 | | 22,76 | 940,37 | | 955,82 | |
| -20 | | 23,49 | 942,53 | | 955,97 | |
| 0 | | 23,98 | 943,87 | | 955,94 | |
| 30 | 10 | 24,71 | 945,11 | 0,01 | 955,99 | 0,01 |
| 50 | | 25,20 | 946,34 | | 955,80 | |
| 70 | | 25,68 | 947,37 | | 955,94 | |
| 90 | | 26,17 | 948,24 | | 955,98 | |
| 110 | | 26,66 | 948,91 | | 956,00 | |
| 160 | | 27,88 | 950,12 | | 955,91 | |
| 210 | | 29,10 | 950,97 | | 955,84 | |
| 260 | | 30,32 | 951,46 | | 956,02 | |
| 310 | | 31,54 | 951,91 | | 956,01 | |
| 360 | | 32,76 | 952,33 | | 956,01 | |
| 410 | | 33,98 | 952,64 | | 956,01 | |
| 460 | | 35,20 | 952,80 | | 955,99 | |
| 510 | | 36,41 | 953,04 | | 955,97 | |
| 560 | | 37,63 | 953,20 | | 955,90 | |
| 610 | | 38,85 | 953,41 | | 956,02 | |
| 660 | | 40,07 | 953,54 | | 956,03 | |
| 710 | | 41,29 | 953,54 | | 956,03 | |
| 760 | | 42,51 | 953,75 | | 956,02 | |
| 810 | | 43,73 | 953,82 | | 955,98 | |
| 860 | | 44,95 | 953,94 | | 956,02 | |
| 910 | | 46,17 | 953,94 | | 955,97 | |
| 960 | | 47,39 | 954,03 | | 956,09 | |
| 990 | | 48,12 | 954,14 | | 956,08 | |

Таблица 1: Результаты измерений.