

Московский физико-технический институт
Факультет молекулярной и химической физики

Лабораторная работа № 3.4.2
«Закон Кюри-Вейсса»

Выполнили:
студенты 2 курса
641 группы ФМХФ
Кутушева Алиса
Ильдаровна
&
Горшков Тимофей
Владимирович

Москва 2017

Аннотация:

В этом отчёте изложены результаты выполнения лабораторной работы «Закон Кюри-Вейсса». В данной работе изучается температурная зависимость $\chi(T)$ магнитной проницаемости гадолиния при температурах выше точки Кюри. Путем исследования зависимости периода колебаний автогенератора от температуры сердечника катушки определяется парамагнитная точка Кюри гадолиния.

Цель работы:

изучение температурной зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетика выше точки Кюри.

В работе используются:

катушка самоиндукции с образцом из гадолиния, термостат, частотометр, цифровой вольтметр, LC-автогенератор, термопара медь-константан.

Теоретические сведения:

Вещества с отличными от нуля атомными магнитными моментами обладают парамагнитными свойствами. Внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты, которые в отсутствие поля располагались в пространстве хаотичным образом.

При повышении температуры T возрастает дезориентирующее действие теплового движения частиц, и магнитная восприимчивость парамагнетиков убывает, в простейшем случае (в постоянном магнитном поле) — по закону Кюри:

$$\chi = C/T, \quad (1)$$

где C — постоянная Кюри.

Для парамагнитных веществ, которые при понижении температуры становятся ферромагнитными, формула (1) должна быть видоизменена. Эта формула показывает, что температура $T = 0$ является особой точкой температурной кривой, в которой χ неограниченно возрастает. При $T \rightarrow 0$ тепловое движение всё меньше препятствует магнитным моментам атомов ориентироваться в одном направлении при сколь угодно слабом внешнем поле. В ферромагнетиках — под влиянием обменных сил — это происходит при понижении температуры не до абсолютного нуля, а до температуры Кюри Θ . Оказывается, что у ферромагнетиков закон Кюри должен быть заменён законом Кюри—Вейсса:

$$\chi \sim \frac{1}{T - \Theta_p}, \quad (2)$$

где Θ_p — температура, близкая к температуре Кюри. Эта формула хорошо описывает поведение ферромагнитных веществ после их перехода в парамагнитную фазу при заметном удалении температуры от 0, но недостаточно точна при $T \approx \Theta_p$. Иногда для уточнения формулы (2) вводят вместо одной две температуры Кюри, одна из которых описывает точку фазового перехода — ферромагнитная точка Кюри Θ , а другая является параметром в формуле (2) — парамагнитная точка Кюри — Θ_p (рис. 1).

Экспериментальная установка:

Схема установки для проверки закона Кюри-Вейсса показана на рис.2. Исследуемый ферромагнитный образец (гадолиний) расположен внутри пустотелой катушки самоиндукции, которая служит индуктивностью колебательного контура, входящего в состав LC-автогенератора. Автогенератор собран на полевом транзисторе КП-103 и смонтирован в виде отдельного блока.

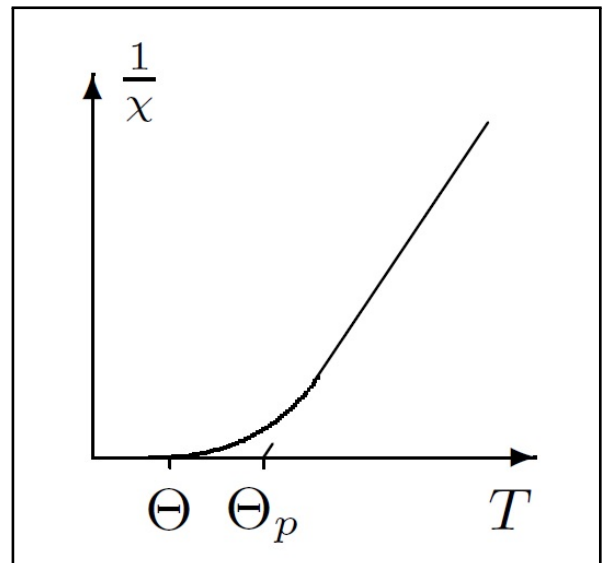


Рис. 1. Зависимость обратной величины магнитной восприимчивости от температуры

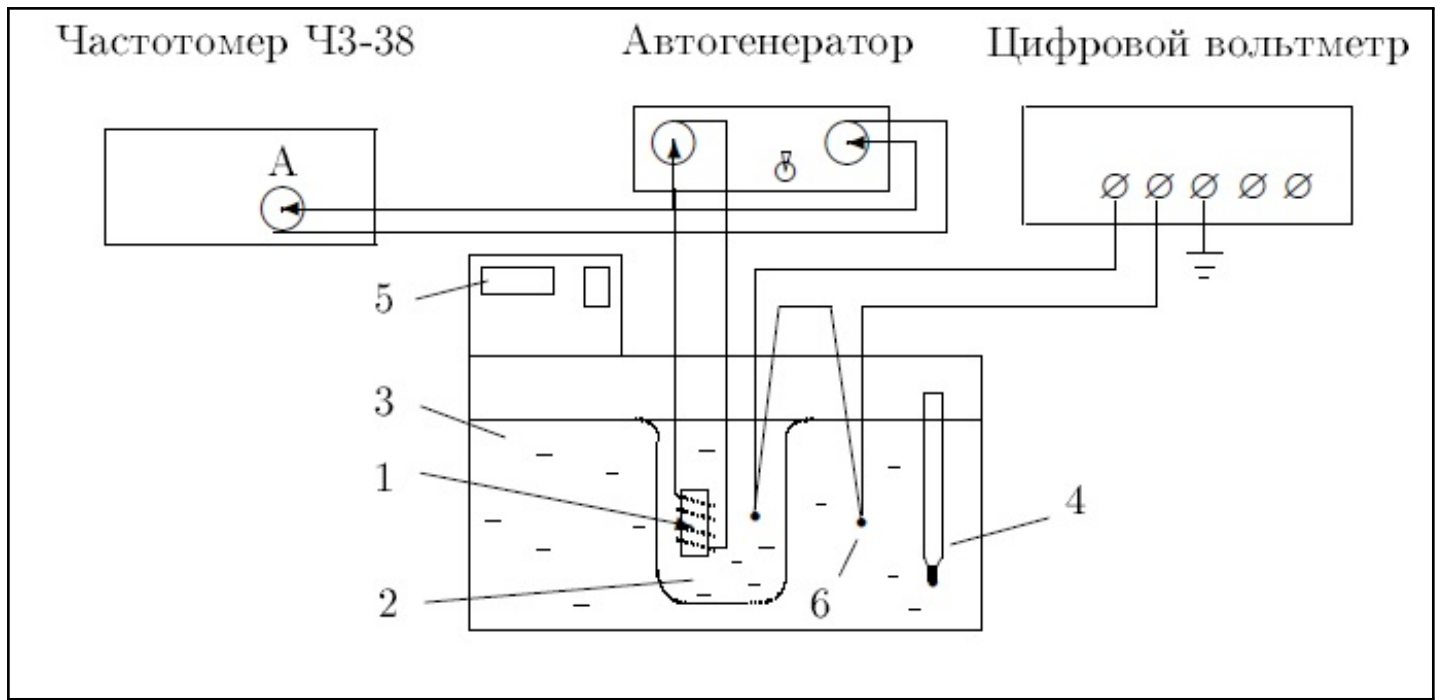


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Гадолиний является хорошим проводником электрического тока, а рабочая частота генератора достаточно велика (50 кГц), поэтому для уменьшения вихревых токов образец изготовлен из мелких кусочков размером около 0,5 мм. Катушка 1 с образцом помещена в стеклянный сосуд 2, залитый трансформаторным маслом. Масло предохраняет образец от окисления и способствует ухудшению электрического контакта между отдельными частичками образца. Кроме того, оно улучшает тепловой контакт между образцом и термостатируемой (рабочей) жидкостью 3 в термостате. Ртутный термометр 4 используется для приближённой оценки температуры. Температура образца регулируется с помощью термостата. Рассчитаем температуру T образца с учётом показаний термопары и величину $1/(\tau^2 - \tau_0^2)$, данные занесем в таблицу 1. Построим график зависимости $1/(\tau^2 - \tau_0^2) = f(T)$. Экстраполируя полученную прямую к оси абсцисс, определим парамагнитную точку Кюри Θ_p для гадолиния.

Магнитная восприимчивость образца χ определяется по изменению самоиндукции катушки. Обозначив через L самоиндукцию катушки с образцом и через L_0 — её самоиндукцию в отсутствие образца, получим:

$$(L - L_0) \sim \chi \quad (3)$$

При изменении самоиндукции образца меняется период колебаний автогенератора:

$$\tau = 2\pi\sqrt{LC} \quad (4)$$

где C — ёмкость контура автогенератора. Период колебаний в отсутствие образца определяется самоиндукцией пустой катушки:

$$\tau = 2\pi\sqrt{L_0C} \quad (5)$$

Из (4) и (5) имеем

$$(L - L_0) \sim (\tau^2 - \tau_0^2) \quad (6)$$

Таким образом,

$$\chi \sim (\tau^2 - \tau_0^2) \quad (7)$$

Из формул (2) и (7) следует, что закон Кюри-Вейсса справедлив, если выполнено соотношение:

$$\frac{1}{\chi} \sim (T - \Theta_p) \sim \frac{1}{(\tau^2 - \tau_0^2)} \quad (8)$$

Ход работы:

1. Подготовим приборы к работе.

2. Оценим допустимую ЭДС термопары (допустимая разность температур образца и рабочей жидкости $\Delta T = 0.5^\circ\text{C}$, постоянная термопары $k = 24$ град/мВ):

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{k} = \frac{0.5}{24} = 0.021 \text{ мВ} \quad (9)$$

3. Исследуем зависимость периода колебаний LC-генератора от температуры образца, отмечая период колебаний τ по частотомеру, а температуру T — по показаниям дисплея и цифровому вольтметру (ΔU с учётом знака). Термопара подключена так, что при знаке «+» на табло вольтметра температура образца выше температуры рабочей жидкости. Проведем измерения в диапазоне от 14°C до 40°C через 2°C . Занесем данные в таблицу 1. Запишем период колебаний τ_0 без образца, указанный на установке: $\tau_0 = 9.050$ мкс.

Таблица 1. Экспериментальные данные

| № | T_0 , К | τ , мкс | ΔU , мВ | T , К | $\frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2}, 10^{12} \text{с}^{-2}$ |
|----|-----------|--------------|-----------------|---------|--|
| 1 | 288 | 10.780 | 0.001 | 288.024 | 0.02915 |
| 2 | 290 | 10.681 | -0.021 | 289.496 | 0.03107 |
| 3 | 292 | 10.494 | -0.021 | 291.496 | 0.03543 |
| 4 | 294 | 10.213 | -0.016 | 293.616 | 0.04464 |
| 5 | 296 | 9.877 | -0.018 | 295.568 | 0.06389 |
| 6 | 298 | 9.563 | -0.019 | 297.544 | 0.10473 |
| 7 | 300 | 9.392 | -0.012 | 299.712 | 0.15855 |
| 8 | 302 | 9.324 | -0.015 | 301.64 | 0.19863 |
| 9 | 304 | 9.279 | -0.015 | 303.64 | 0.23825 |
| 10 | 306 | 9.247 | -0.021 | 305.496 | 0.27743 |
| 11 | 308 | 9.221 | -0.017 | 307.592 | 0.32007 |
| 12 | 310 | 9.201 | -0.015 | 309.64 | 0.36286 |
| 13 | 312 | 9.187 | -0.015 | 311.64 | 0.40025 |

Обратка результатов:

1. Рассчитаем температуру T образца с учётом показаний термопары и величину $\frac{1}{(\tau^2 - \tau_0^2)}$, данные занесем в таблицу 1. Построим график зависимости $\frac{1}{(\tau^2 - \tau_0^2)} = f(T)$. Экстраполируя полученную прямую к оси абсцисс, определим парамагнитную точку Кюри Θ_p для гадолиния.

$f(T) = k \cdot T + b$, где $k = (21.0 \pm 0.2) \cdot 10^9$, а $b = (-6130 \pm 70) \cdot 10^9$. $\Theta_p = -\left(\frac{b}{k}\right) = \frac{6130}{21} = 291.9 \text{ K}$

2. Оценим погрешности эксперимента и сравним результат с табличным. Для частного погрешность рассчитывается по формуле (10):

$$\varepsilon_{\Theta_p} = \sqrt{(\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2)} \quad (10)$$

$$dT = \Theta_p * \sqrt{\left(\left(\frac{db}{b}\right)^2 + \left(\frac{dk}{k}\right)^2\right)} = 291.9 * \sqrt{\left(\left(\frac{70}{6130}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{21}\right)^2\right)} = 4 \quad (11)$$

$$\Theta_p = 292 \pm 4 \text{ K}.$$

Табличное значение: $\Theta_p = 289 \text{ K}$.

Вывод:

В ходе данной работы исходя из теоретических пропорциональностей было экстраполировано значение парамагнитной точки Кюри. Табличное значение $\Theta_p = 289 \text{ K}$ попало в доверительный интервал истинных значений: $\Theta_p = 292 \pm 4 \text{ K}$. Значение относительной погрешности составило $\varepsilon_{\Theta_p} = \frac{dT}{\Theta_p} * 100\% = \frac{4}{292} * 100\% = 1.4\%$

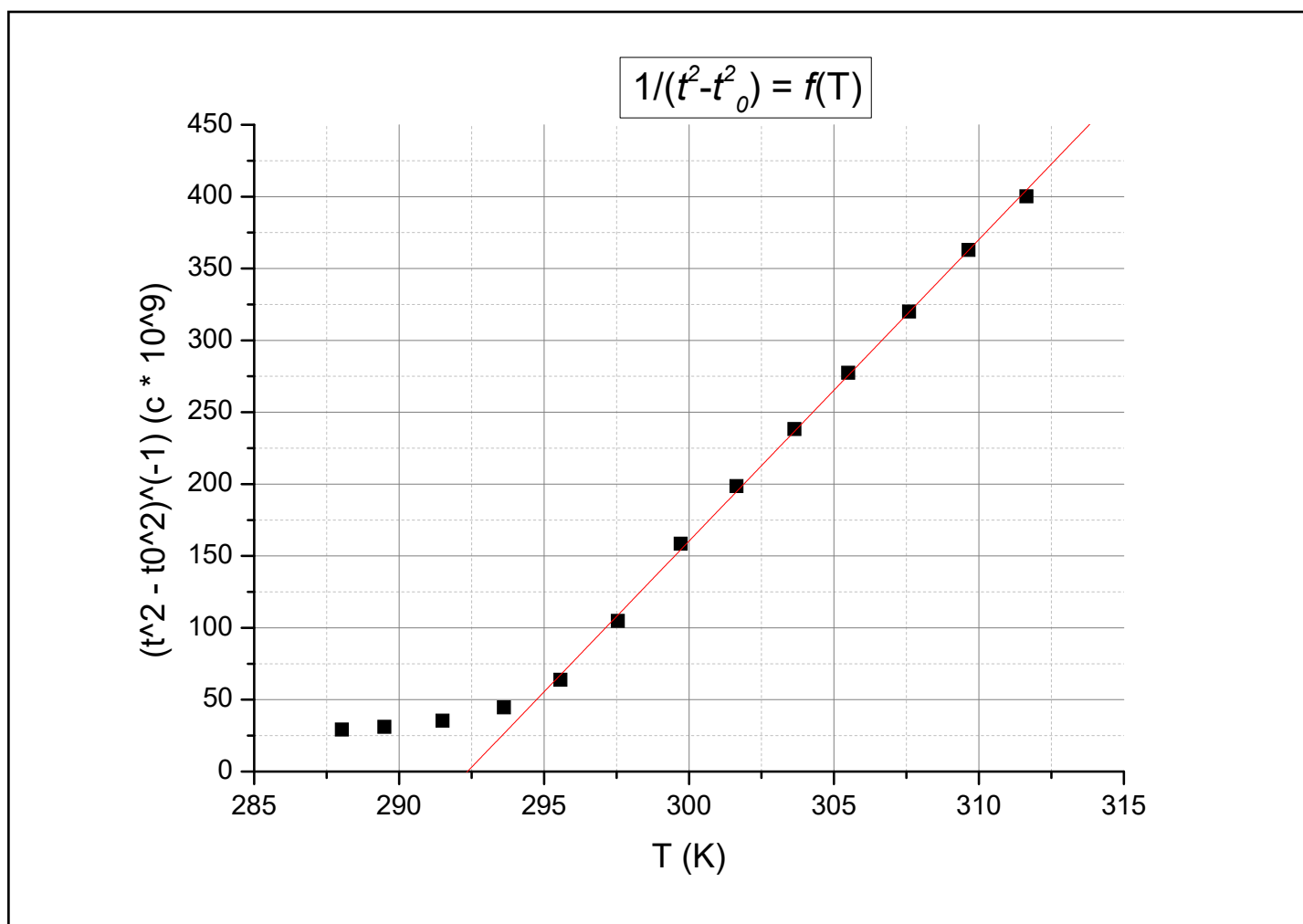


Рис. 3. График экстраполируемой зависимости