

Определение температуры Кюри гадолиния

Шмаков Владимир Б04-105

Сентябрь, МФТИ

Введение

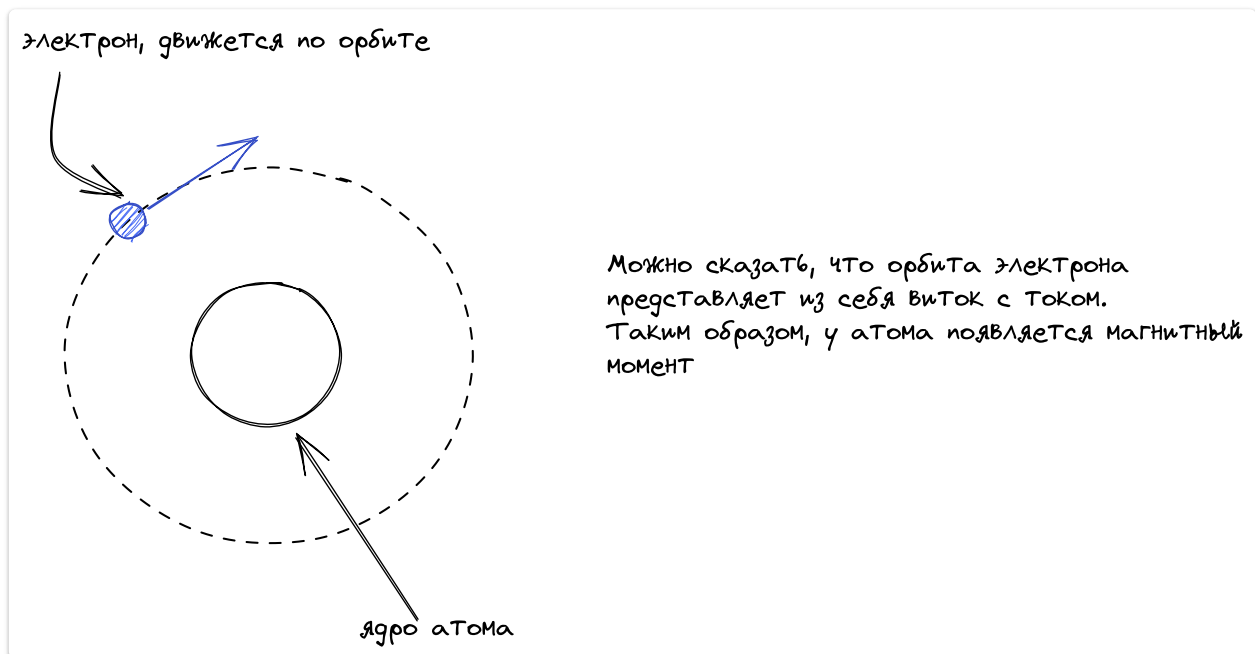
Целью данной работы является изучение температурной зависимости магнитной восприимчивости. Данные, полученные в работе, позволят вычислить температуру Кюри Θ_p и парамагнитную температуру Θ_k .

Эффект изменения магнитной восприимчивости вещества от температуры может быть использован для проектирования датчиков, измеряющих температуру окружающей среды.

Более широкое применение получил обратный эффект - эффект изменения температуры вещества от приложения внешнего магнитного поля (*магнитное охлаждение*). Существуют методы получения сверхнизких температур (< 1 K), основанные на данном эффекте.

Основные сведения о зависимости магнитной восприимчивости от температуры

Парамагнетики - вещества, атомы которых обладают магнитным моментом в отсутствие внешнего магнитного поля:



Пусть атомы некоторого парамагнетика обладают магнитным моментом m_a . Приложим внешнее магнитное поле B . Тогда энергия каждого из атомов определяется как скалярное произведение (\vec{B}, \vec{m}_a) . Максимальное значение данного произведения $U_{max} = Bm_a$.

Вещество находится в состоянии равновесия \rightarrow энергия атомов подчиняется распределению Гиббса:

$$dn \propto e^{-\frac{U(\alpha)}{k_B T}} d\alpha \quad (1)$$

Разложим экспоненту по формуле Тейлора, получим:

$$n_+ = n_0 e^{m_a B / k_B T} \approx n_0 \left(1 + \frac{m_a B}{k_B T} \right) \quad n_- \approx n_0 \left(1 - \frac{m_a B}{k_B T} \right) \quad (2)$$

Где n_+ - количество атомов, магнитный момент которых сонаправлен с внешним магнитным полем.

Из условия $n_+ + n_- = n$ находим, что нормировочная константа $n_0 = n/2$.

Таким образом суммарный магнитный момент равен:

$$M = n_+ m_a - n_- m_a = \frac{m_a^2 n}{k_B T} B = \frac{B}{\chi}$$

Получили закон Кюри:

$$\chi \propto \frac{1}{T} \quad (3)$$

Методика

Оборудование

В эксперименте используется следующее оборудование:

- Катушка
- Образец из гадолиния
- Термостат
- Частотомер
- Цифровой вольтметр
- LC автогенератор
- Термопара медь-константан

Экспериментальная установка

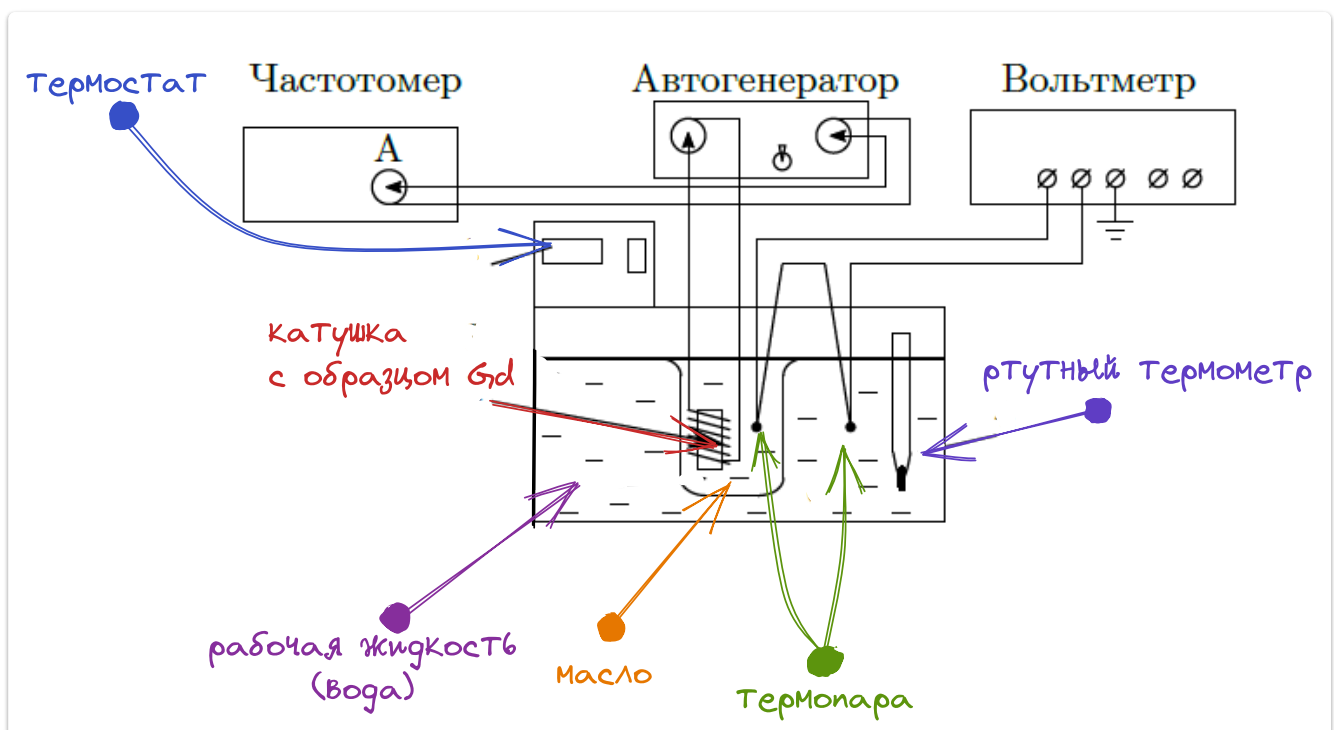


Схема экспериментальной установки изображена выше.

«Ядром» установки является автогенератор (LC контур). В колебательный контур помещен образец гадолиния. Таким образом величина ее индуктивности изменяется в зависимости от магнитной восприимчивости образца:

$$L - L_0 \propto \chi \quad (4)$$

Период колебаний LC контура находится по формуле:

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

Таким образом, период колебаний без образца равен:

$$\tau_0 = 2\pi\sqrt{L_0C} \quad (6)$$

Из формул 0,1,2 понимаем, что величина χ пропорциональна разности квадратов периодов колебаний τ и τ_0 :

$$\tau^2 - \tau_0^2 \propto L - L_0 \propto \chi \quad (7)$$

Таким образом, должно выполняться соотношение пропорциональности

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

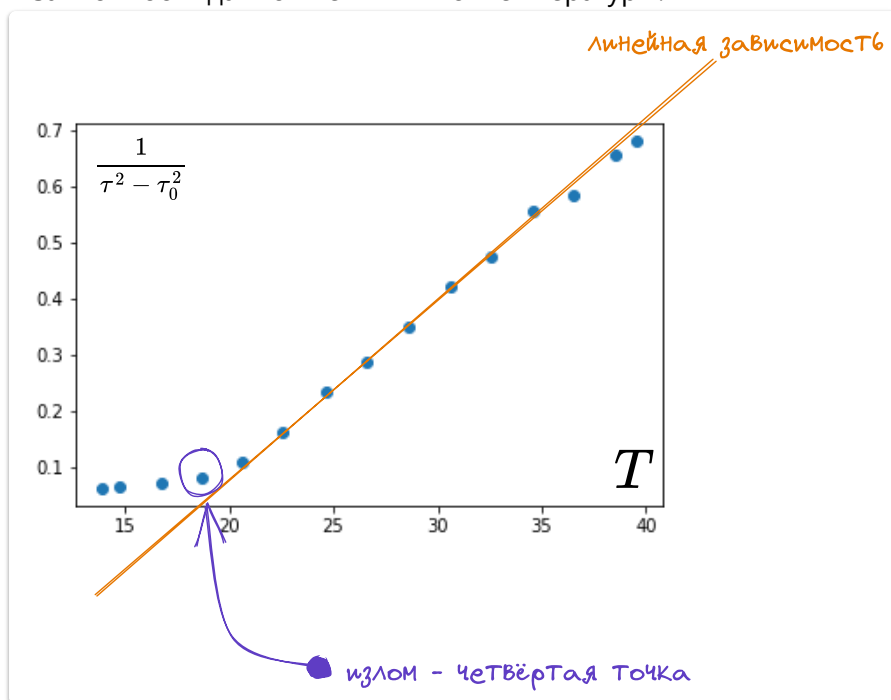
Обработка результатов эксперимента

Предварительный график

Для каждого измерения вычислим величину

$$\frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2}$$

Построим график зависимости данной величины от температуры:



На графике видим характерный излом - отклонение от линейной зависимости.

Линейная интерполяция

Из предварительного графика понимаем, что линейная зависимость имеет излом около четвертой точки. Интерполируем точки часть зависимости после $T = 20^\circ$ методом наименьших квадратов. Получим:

Коэффициент наклона $\alpha = 0.031 \pm 0.0005$

Пересечение с осью y : $\beta = -0.5 \pm 0.01$

Теперь можем найти пересечение линейной интерполяции с осью x . Найденная точка является искомой температурой Θ_p :

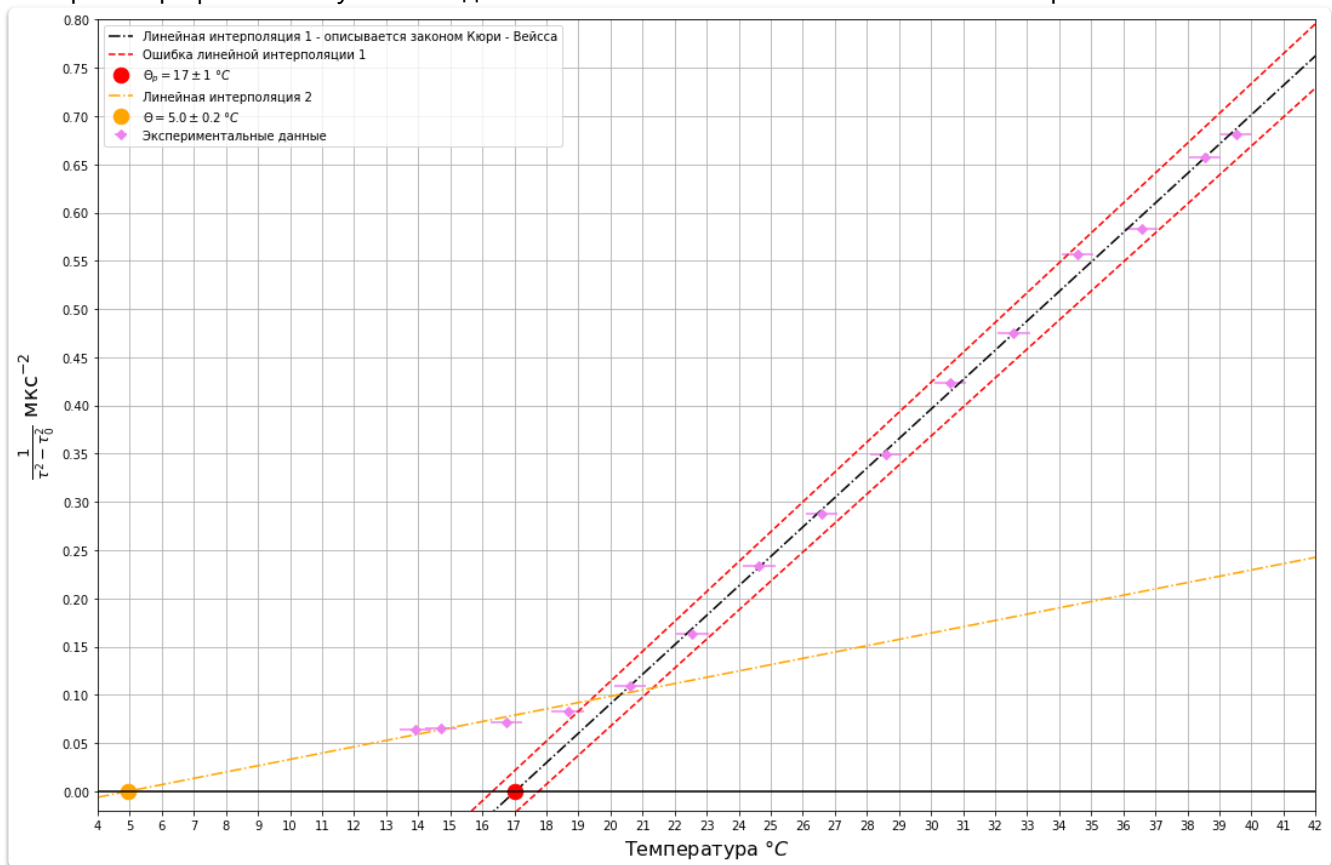
$$\Theta_p = -\frac{\beta}{\alpha}$$

Оценив погрешность получаем: $\Theta_p = 17 \pm 1^\circ \text{C}$

Используя участок нелинейной зависимости можем оценить температуру максимальной намагниченности Θ . К сожалению, на этом участке всего 4 экспериментальные точки, поэтому достоверно восстановить исходную зависимость не является возможным. Попробуем провести наилучшую прямую через данные точки.

Итоговый график

Построим график по полученным данным. Нанесём на него вышеописанные прямые:



Сравним полученные значения с табличными

Согласно источнику [википедия](#) температура Кюри Gd составляет примерно 19°C .

В эксперименте нашли парамагнитную температуру $\Theta_p = 17 \pm 1^\circ\text{C}$.

Как видим величина Θ_p близка к Θ_k . И они отличаются лишь на 5%.

По участку графика, отклоняющемуся от линейной зависимости, оценили величину Θ - температуру максимальной намагниченности. По нашим данным она составила примерно 5°C .

Согласно источнику [википедия](#), данная температура составляет примерно $4.9^{\circ}C$. Таким образом экспериментально вычисленное значение Θ совпало с табличным.

Вывод

Удалось вычислить величину Θ_p . Погрешность измерения Θ_p составила $\sim 6\%$.

Помимо Θ_p удалось вычислить температуру максимальной намагниченности гадолиния. Получилось $\Theta = 5^{\circ}C$.

Приложение

Данные, полученные в ходе работы:

	tau [mus]	T [C]	deltaU [mV]
0	7.970000	14.200000	-0.012000
1	7.948000	15.070000	-0.015000
2	7.861500	17.120000	-0.015000
3	7.729300	19.100000	-0.018000
4	7.540100	21.090000	-0.020000
5	7.338700	23.080000	-0.022000
6	7.211700	25.090000	-0.019000
7	7.156100	27.070000	-0.020000
8	7.113000	29.070000	-0.020000
9	7.078000	31.080000	-0.020000
10	7.060000	33.060000	-0.020000
11	7.038000	35.060000	-0.020000
12	7.032200	37.040000	-0.020000
13	7.018400	39.030000	-0.020000
14	7.014700	40.000000	-0.020000

Ссылки

Программа для расчетов размещена в репозитории: <https://github.com/ShmakovVladimir/Labs>
Табличные значения взяты из википедии