

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

# **ЗАКОН КЮРИ-ВЕЙССА**

Выполнил:  
**Деревянченко Михаил**  
Группа:  
**Б03-106**

Долгопрудный, 2022

## Оглавление

1. Аннотация.....	3
2. Теоретические сведения.....	4
3. Экспериментальная установка и методика измерений.....	8
4. Проведение измерений и обработка результатов.....	11
5. Обсуждение результатов.....	14

# 1. Аннотация

Целью данной работы являются:

1. Исследование зависимости периода колебаний автогенератора от температуры сердечника катушки
2. Определить парамагнитную точку Кюри гадолиния

## 2. 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.

Оценим температурную зависимость магнитной восприимчивости парамагнетика в классической модели. Пусть среднее число атомов в единице объёма равно  $n$ , а абсолютная величина магнитного момента атома  $m_a$ . В магнитном поле с индукцией  $B$  энергия магнитного диполя, составляющего с направлением поля угол  $\alpha$ , равна

$$U = -m_a B \cos \alpha$$

Из термодинамики известно, что доля атомов  $dn$ , обладающих в условиях равновесия энергией  $U(\alpha)$ , определяется распределением Больцмана:

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

Пусть внешнее магнитное поле достаточно мало, так что энергия магнитных моментов атомов в нём много меньше тепловой:  $m_a B \ll k_B T$ . Число атомов, имеющих положительную ( $\alpha > 0$ ) проекцию на направление  $B$ , может быть записано как

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

$n_0$  – некоторая нормировочная константа.

Для атомов с отрицательной проекцией момента ( $\alpha < 0$ )

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

Учитывая условие нормировки  $n_+ + n_- = n$ , найдём:  $n_0 \approx n/2$ . Величину суммарного магнитного момента единицы объёма можно оценить как

$$M \sim n_+ m_a + n_- \cdot (-m_a) \approx \frac{m_a^2 n}{k_B T} B$$

Более аккуратное усреднение по углам даст поправочный множитель порядка единицы (в классической модели получается коэффициент  $1/3$ ). Таким образом, парамагнитная восприимчивость равна

$$\chi_{\text{пар}} \sim \mu_0 \frac{m_a^2 n}{3k_B T} \propto \frac{1}{T}.$$

Температурная зависимость восприимчивости парамагнетиков данного вида называется **законом Кюри**.

В простейшем случае (в постоянном магнитном поле) — по закону Кюри:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (1)$$

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  $\chi$  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  $\Theta$ . Оказывается, что у ферромагнетиков закон Кюри должен быть заменён законом Кюри–Вейсса:

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

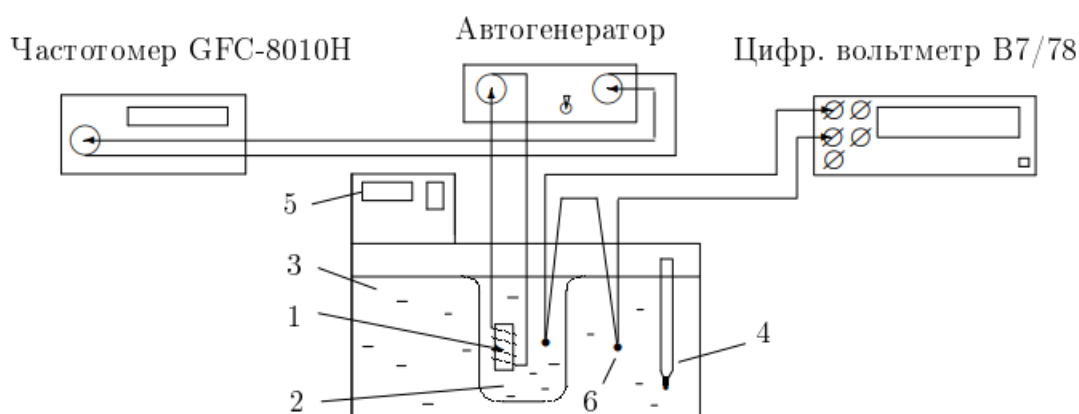
где  $\Theta_p$  — температура, близкая к температуре Кюри.

Эта формула хорошо описывает поведение ферромагнитных веществ после их перехода в парамагнитную фазу при заметном удалении температуры от  $\Theta$ , но недостаточно точна при  $T \approx \Theta$ .

Иногда для уточнения формулы (2) вводят вместо одной две температуры Кюри, одна из которых описывает точку фазового перехода — ферромагнитная точка Кюри  $\Theta$ , а другая является параметром в формуле (2) — парамагнитная точка Кюри —  $\Theta_p$ .

# 3. Экспериментальная установка и методика измерений

- Экспериментальная установка:



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.

Гадолиний является хорошим проводником электрического тока, а рабочая частота генератора достаточно велика ( $\sim 50$  кГц), поэтому для уменьшения вихревых токов образец изготовлен из



мелких кусочков размером  $\sim 0,5$  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. При изменении температуры меняется магнитная восприимчивость образца  $\chi$ , а следовательно, самоиндукция катушки и период колебаний  $\tau$  автогенератора. Для измерения периода используется частотомер. Закон Кюри-Вейсса справедлив, если выполнено соотношение:

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

где  $\tau_0$  - период колебаний в отсутствие образца. Измерения проводятся в интервале температур от  $12^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$ . С целью экономии времени следует начинать измерения с низких температур.

Для охлаждения образца используется холодная водопроводная вода, циркулирующая вокруг сосуда с рабочей жидкостью (дистиллированной водой); рабочая жидкость постоянно перемешивается. Величина стабилизируемой температуры задаётся на дисплее 5 термостата. Для нагрева

служит внутренний электронагреватель, не показанный на рисунке. Когда температура рабочей жидкости в сосуде приближается к заданной, непрерывный режим работы нагревателя автоматически переходит в импульсный (нагреватель то включается, то выключается) - начинается процесс стабилизации температуры. Температура исследуемого образца всегда несколько отличается от температуры дистиллированной воды в сосуде. После того как вода достигла Заданной температуры, идёт медленный процесс выравнивания температур образца и воды. Разность их температур контролируется с помощью медноконстантановой термопары 6 и цифрового вольтметра. Один из спаев термопары находится в тепловом контакте с образцом, а другой погружён в воду. Концы термопары подключены к цифровому вольтметру. Рекомендуется измерять период колебаний автогенератора в тот момент, когда указанная разность температур становится  $\leq 0,5^{\circ}\text{C}$ . Чувствительность термопары  $K = 24 \text{ град /В}$ .

- Методика измерений:

1. Измерение зависимости периода колебаний от температуры образца
2. Обработка результатов

# 4. Проведение измерений и обработка результатов

Максимальное допустимое напряжение на вольтметре:

$$\Delta U_{\max} = 0.02 \text{ мВ}$$

Погрешности

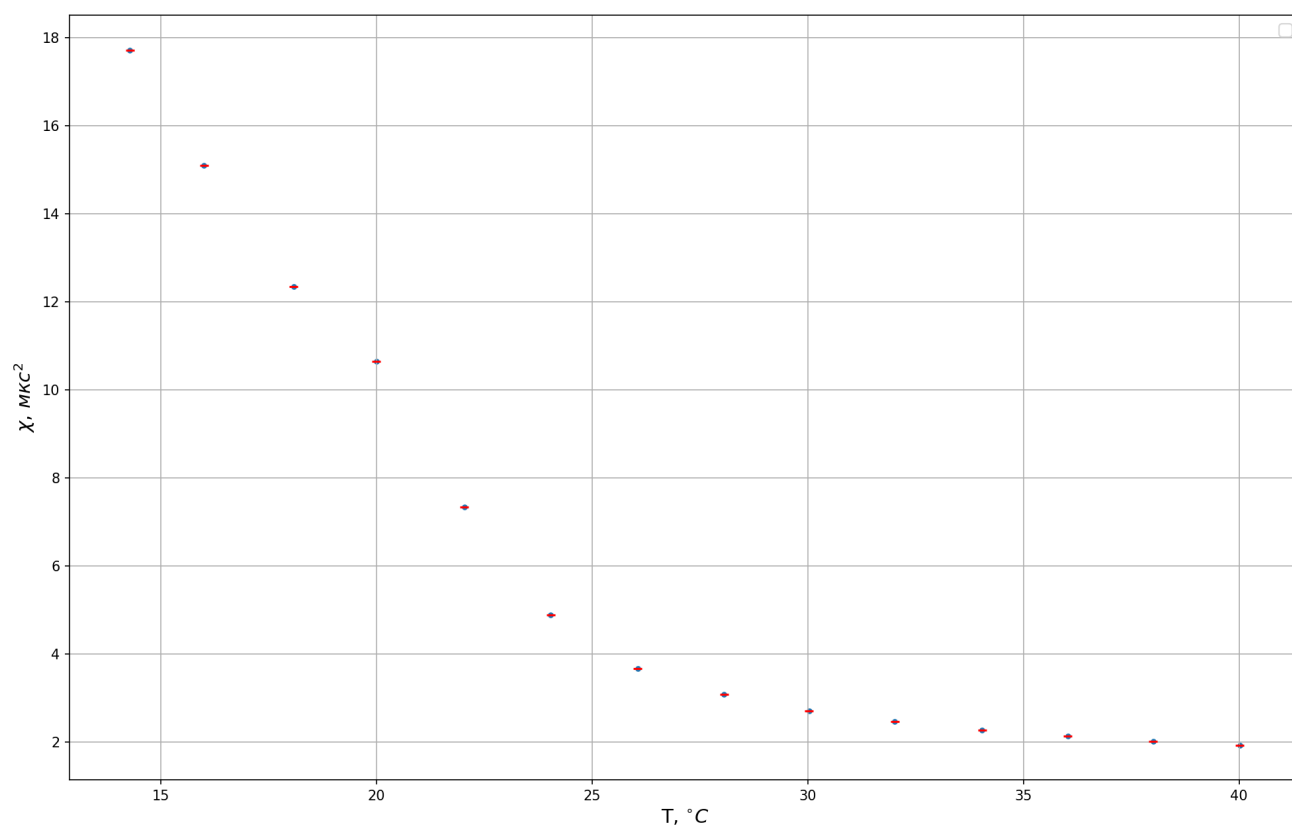
$\sigma_{\tau}$ , мкс	$\sigma_{\text{кал}}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_U$
0.0001 мкс	0.1	0.004%

$$\tau_0 = 6.9092 \text{ мкс}$$

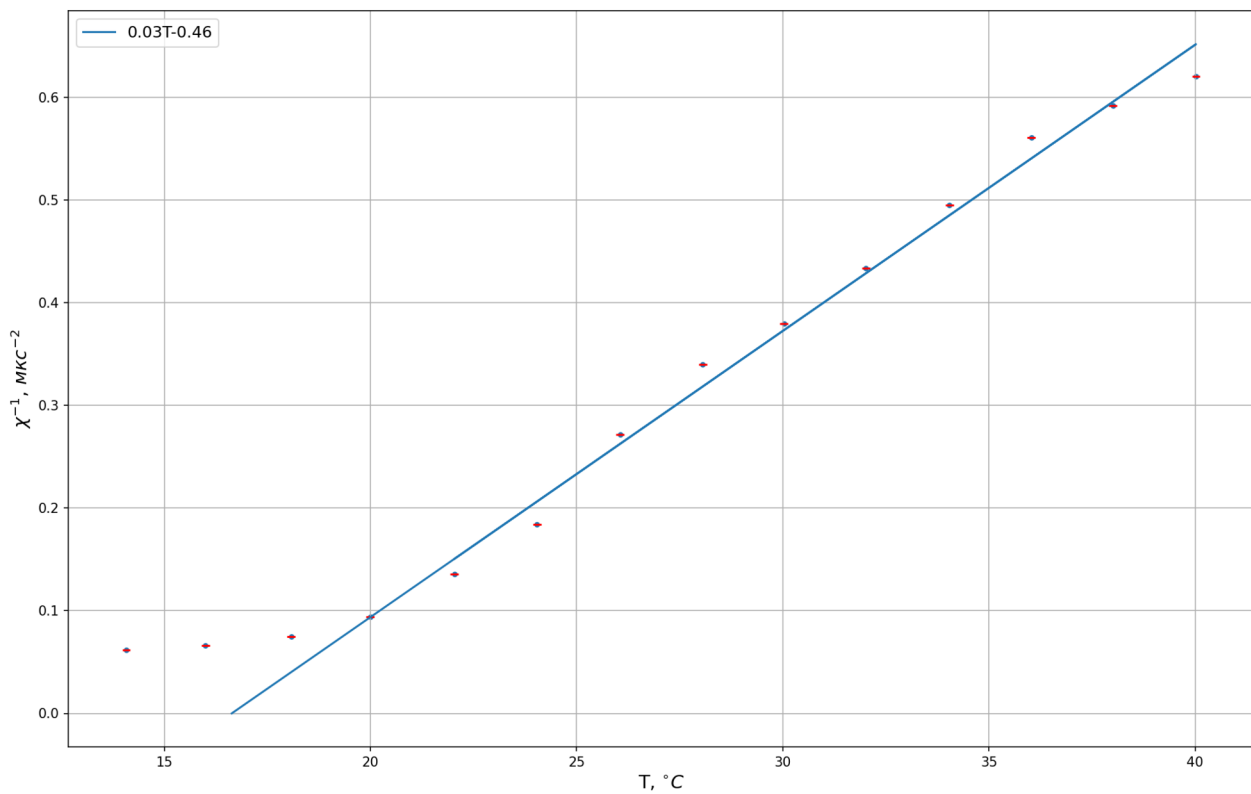
$T_{\text{жид}}, ^\circ\text{C}$	$\tau$ , мкс	$\Delta U$ , мкВ	$T_{\text{об}}, ^\circ\text{C}$	$1/(\tau^2 - \tau_0^2)$ , мкс <sup>-2</sup>
14.0	7.9849	-5	13.88	0.062
16.1	7.9275	-13	15.80	0.066
18.12	7.8091	-10	17.88	0.075
20.10	7.6412	-13	19.80	0.094
22.10	7.4212	-11	21.84	0.136
24.10	7.2546	-11	23.84	0.204
26.10	7.1699	-10	25.86	0.262
28.10	7.1288	-10	27.86	0.310
30.09	7.1027	-11	29.83	0.350

32.08	7.0849	-11	31.82	0.384
34.08	7.0714	-10	33.84	0.434
36.07	7.0616	-10	35.83	0.495
38.07	7.0540	-11	37.81	0.561
40.06	7.0479	-10	39.82	0.581

Зависимость величины магнитной восприимчивости от температуры



### Зависимость обратной величины магнитной восприимчивости от температуры



С помощью МНК находим точку пересечения аппроксимирующей прямой с осью абсцисс, т.е. парамагнитную точку Кюри.

( $\sigma_{\Theta}$  = погрешность МНК).

$$\Theta_p = 16.9 \pm 0.3^{\circ}C$$

# 5. Обсуждение результатов

Была найдена точка Кюри Гадолиния, равная

$$\Theta_p = 16.9 \pm 0.3^\circ \text{C}$$

Табличное значение колеблется от 18 до 20°C. Полученное значение не входит в данный диапазон с учетом вычисленной погрешности, при этом составляет ошибку меньше 10% от реального. Такая погрешность может быть связана с:

1. Удаленном расположении концов термопары от образца(может не касаться его) и от сосуда, в котором он находился.

2. Полученные значения частот колебаний, которые при достижении установленной на калориметре температуре, значительно колебались, в результате чего значения расходились после 1 знака после запятой.

3. Погрешность МНК.

4. Систематические погрешности приборов(привнесли не значительный вклад).