

## ВНЕШНЕЕ КВАДРУПОЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО $\text{Cr}_2\text{O}_3$

Д.Н.Астров\*, А.С.Боровик-Романов, Н.Б.Ермаков\*, Е.Г.Колеватов,  
В.И.Нижанковский<sup>□</sup>

*Институт физических проблем им.Капицы РАН  
117334 Москва, Россия*

*\* Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и  
радиотехнических измерений  
141570 Менделеево, Московская обл., Россия*

<sup>□</sup> *Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур  
Вроцлав, ул. Гаевицка 95*

Поступила в редакцию 2 апреля 1996 г.

Приводятся результаты экспериментального изучения внешнего магнитного поля монокристалла антиферромагнитного  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , надежно подтвердившие, что это поле соответствует полю магнитного квадрупольа, как это было предсказано Дзялошинским [1] и обнаружено Астровым и Ермаковым [2]. Величина квадрупольного момента образца оказалась в несколько раз меньше расчетных предсказаний.

PACS: 75.50.Ee, 75.80.+q

И.Е.Дзялошинский [1] обратил внимание на то, что те антиферромагнетики, магнитная структура которых не обладает центром симметрии, должны создавать вокруг себя квадрупольное магнитное поле. Он рассчитал величину этого поля для типичного представителя таких антиферромагнетиков -  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Результаты его расчетов показали, что для образца объемом порядка  $0.1 \text{ см}^3$  на расстоянии 1 см от центра образца поле может достигать  $10 \cdot 10^{-5} \text{ Э}^1$ . Такое поле вполне доступно для измерения.

Астров и Ермаков [2] провели эксперименты, в которых наблюдалось изменение магнитного поля в неподвижной приемной катушке сверхпроводящего трансформатора магнитного потока, связанного с ВЧ СКВИД'ом, при вращении сферического образца  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  около этой катушки. Образец поворачивался вокруг вертикальной оси, проходившей через его центр и лежавшей в базисной плоскости кристалла. Ось приемной катушки лежала в горизонтальной плоскости, проходившей через центр образца. Ось катушки направлялась или по радиусу, проведенному из центра образца, или перпендикулярно этому радиусу. В первом случае регистрировалась радиальная составляющая поля кристалла  $H_R$ , а во втором - тангенциальная  $H_\theta$ . Полученные кривые угловых зависимостей этих составляющих магнитного поля имели период  $180^\circ$ , что соответствует симметрии поля квадрупольа. Амплитуды измеренных полей совпадали по порядку величины с выводами теории Дзялошинского [3] и зависимость от расстояния между центром образца и приемной катушкой в основном соответствовала теоретической зависимости  $1/R^4$  [3].

Однако качественно такой же результат мог наблюдаться, если внутри сверхпроводящего экрана, окружавшего экспериментальное устройство, оставалось замороженным постоянное магнитное поле порядка 1 Э. В таком поле

<sup>1)</sup> Позднее Дзялошинский обнаружил ошибку в своих расчетах [3] и мы приведем ниже исправленный результат.

при повороте кристалла с сильно анизотропной восприимчивостью должен наблюдаться сигнал того же порядка по величине и также с периодом  $180^\circ$ . Для исключения возможности такой ошибки были проведены эксперименты на другой установке.

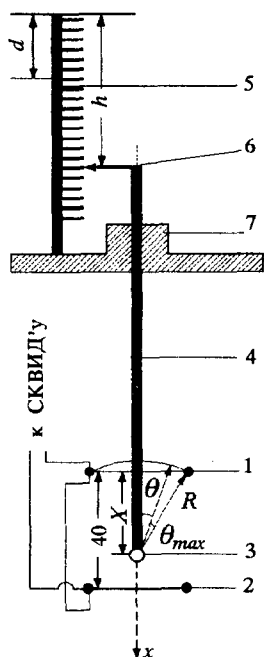


Рис. 1

Рис. 1. Схема установки

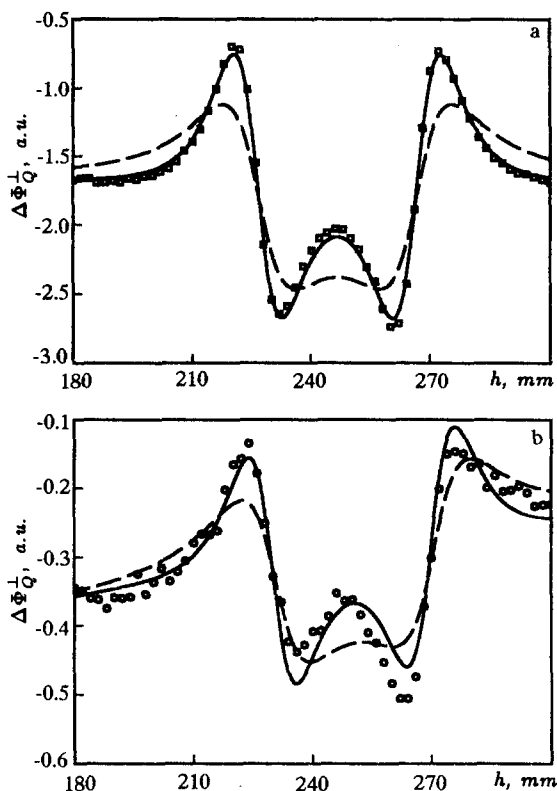


Рис. 2

Рис. 2. Результаты экспериментов с квадрупольной катушкой (a) и образцом (b), когда оси катушки и образца перпендикулярны  $x$

Ниже описываются результаты изучения топологии и величины магнитного поля образца  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , полученные с помощью другой схемы измерений, а также новые результаты, полученные на модернизированной установке ВНИ-ИФТРИ. Схема новой установки (собранный в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур во Вроцлаве) изображена на рис.1. Образец – монодоменизированный шарик 3 из монокристалла  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  диаметром 6,3мм (тот же, что изучался и в работе [2]) перемещался на держателе 4 вдоль вертикальной оси  $x$  системы из двух включенных навстречу витков трансформатора потока 1, 2 СКВИД'а постоянного тока. Радиус витков  $a = 12$ мм, а расстояние между ними  $\delta x = 40$  мм. Положение образца фиксировалось по положению конца держателя 6 над каплей дьюара 7 и отсчитывалось через каждые 2мм по приложенной линейке 5. При этом фиксировались показания СКВИД'а, пропорциональные разности магнитных потоков  $\Delta\Phi(x)$ , проходящих через витки трансформатора потока.

При такой конфигурации эксперимента регистрируется интеграл от радиальной составляющей  $H_R$  по площади приемного витка. Важной особенностью установки является мощная экранировка пермаллоевыми экранами и отсутствие сверхпроводящих экранов вокруг образца.

Радиальная и тангенциальная составляющие магнитного поля квадруполь, величина которого  $Q$  (Гс·см<sup>4</sup>) выражаются следующими формулами:

$$H_R = \frac{3Q}{4R^4}(3 \cos^2 \theta - 1) = \frac{9Q}{8R^4}(\cos 2\theta + 1/3); \quad H_\theta = \frac{3Q}{4R^4} \sin 2\theta, \quad (1)$$

где  $\theta$  угол с тригональной осью  $C_3$ . В случае, когда квадруполь, ось которого параллельна оси установки  $x$ , а сам он расположен на ее оси на расстоянии  $x$  от верхнего витка трансформатора потока, магнитный поток через этот виток

$$\Phi_Q^{\parallel} = \frac{3}{4} \frac{Q}{R^4} 2\pi R^2 \int_0^{\theta_{max}} (3 \cos^2 \theta - 1) \sin \theta d\theta = \frac{3}{2} \pi Q \frac{a^2 x}{(a^2 + x^2)^{5/2}} = A \Phi_1(x), \quad (2)$$

где  $\theta_{max} = \arcsin(a/R)$ ,  $R = \sqrt{a^2 + x^2}$  (см. рис. 1). Суммарный поток через оба витка

$$\Delta \Phi_Q^{\parallel}(h)'' = A[\Phi_1(h-b) - \Phi_1(h-b-40)], \quad (3)$$

где  $h$  – отсчет по линейке,  $b$  – показания линейки, когда  $x=0$ ,  $A = 3/2\pi Q$ .

Как видно из формулы (1), при заданном расстоянии  $R$  величина радиального поля  $H_R$ , перпендикулярного оси  $C_3$ , в два раза меньше  $H_R \parallel C_3$ . Соответственно, повторив приведенный выше расчет для случая, когда ось квадруполь перпендикулярна  $x$ , мы получили формулы для  $\Delta \Phi_Q^{\perp}(h)$ , тождественные (2) и (3), но с коэффициентом  $A$ , в два раза меньшим, и с противоположным знаком.

Для калибровки установки использовалась система из двух соосных катушек по 10 витков каждая. Размеры катушек ( $2r = 4.3$  мм и расстояние между ними  $l = 3.55$  мм) были схожи с размерами образца. Будучи включены навстречу друг другу, эти катушки должны были создавать поле квадруполь, величина которого  $Q = 0.4 \cdot 10SI$  (где  $S = \pi r^2$ ,  $I$  сила тока). При  $I = 100$  мкА  $Q_k = 2.06 \cdot 10^{-5}$  Гс·см<sup>4</sup>

На рис. 2а показана полученная нами экспериментальная зависимость  $\Delta \Phi_Q(h)$  при прохождении калибровочной катушки через приемные витки трансформатора потока СКВИД'а, когда ось катушки была перпендикулярна  $x$ . Показания СКВИД'а снимались каждый раз при перемещении катушки на 2 мм и изображены на рисунках светлыми точками (приведенные на рис. 2 и 3 условные единицы приблизительно соответствуют следующему магнитному потоку через приемный виток: 1 а.е. =  $1.1 \cdot 10^{-5}$  Гс·см<sup>2</sup>). Сплошные кривые 1 на рисунках получены компьютерной подгонкой формулы для  $\Delta \Phi_Q^{\perp}(h)$  к экспериментальным точкам. Мы видим, что качественно согласие весьма хорошее. Кривые для параллельной установки получились менее симметричными. Отношение  $A_{\parallel}/A_{\perp} = 2.2$  на 10 % отличается от теоретического, что может быть связано с недостаточно точной установкой оси катушки. В согласии с формулой для  $\Delta \Phi_Q(h)$  максимумы и минимумы кривых расположены на расстояниях  $\delta h = a/2 = 6$  мм от положения центров витков. Любопытно отметить, что экспериментальные точки достаточно хорошо следуют теоретической формуле для точечного квадруполь даже на расстояниях, равных размерам катушки (и образца). Благодаря достаточно большому диаметру приемных

витков СКВИД'а, полученные кривые дают не просто информацию о магнитном поле на оси  $x$ , а достаточно полно описывают топологию исследуемого поля. Сигнал в максимуме (минимуме) снимается, когда магнитный поток через виток ограничен конусом с раствором образующих доходющим до  $140^\circ$ . Форма кривой также хорошо отражает зависимость магнитного поля от  $1/R^4$ . Для иллюстрации сказанного пунктирные кривые на рис. 2а и б демонстрируют попытку подождать к экспериментальным результатам кривую, проведенную по формуле (3), в которой степень  $5/2$  заменена на  $3/2$ . Видно, что экспериментальные точки описываются пунктирными кривыми, которые соответствуют кубической зависимости  $H_R(R)$ , гораздо хуже.

На рис. 2б приведены результаты измерения магнитного потока  $\Delta\Phi_Q$  от образца, когда его ось была направлена перпендикулярно оси установки. Мы видим, что качественно экспериментальные точки также хорошо описываются формулой  $\Delta\Phi_Q^\perp$  для поля квадруполь (если к ней добавить член  $d(h-b)$ , учитывающий линейный дрейф магнитометра), хотя разброс точек больше, так же как и нарушение симметрии. Это легко понять, так как сигнал от образца примерно в 5 раз меньше, чем от калибровочной катушки. Тем не менее, полученные данные, несомненно, подтверждают существование квадрупольного внешнего поля у исследуемого образца  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Сравнение количественных данных для  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  с данными для калибровочной катушки дают следующее значение квадрупольного момента образца  $Q = 3.2 \cdot 10^{-6}$  Гс·см<sup>4</sup>.

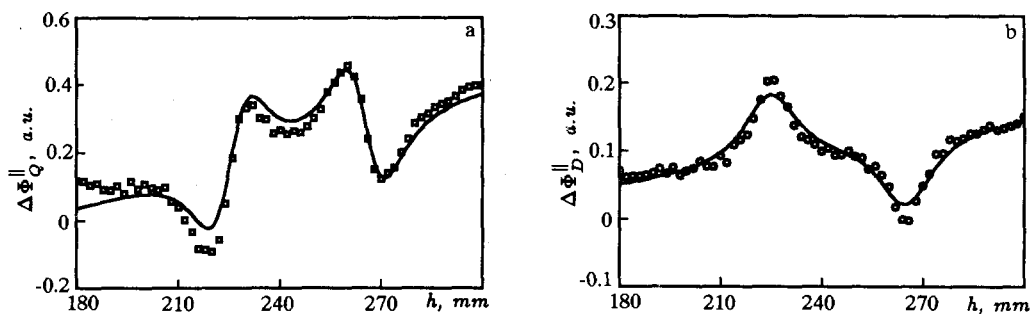


Рис. 3. Результаты экспериментов для образца, когда  $C_3 \parallel x$ : а - полусумма, б - полуразность

Более сложные результаты были получены при исследовании магнитного потока от образца, когда его ось  $C_3$  направлена параллельно оси установки. Оказалось, что при повороте образца на  $180^\circ$  результаты существенно менялись. Такого эффекта не может быть у поля квадруполь, но должен быть у поля диполя. Мы предположили, что образец, кроме квадрупольного момента, обладает и дипольным, который в перпендикулярной ориентации не должен проявляться. Чтобы разделить квадрупольный и дипольный вклады, мы рассматриваем зависимости для полусумм и полуразностей измеренных нами магнитных потоков при двух противоположных направлениях оси  $C_3$  образца. Полученные таким образом результаты приведены на рис. 3а (полусумма) и рис. 3б (полуразность). В соответствие с нашим предположением экспериментальные точки для полусуммы можно удовлетворительно описать формулой для квадруполь  $\Delta\Phi_Q''(h)$  (с добавочным членом  $d(h-b)$ ). Однако величина квадрупольного момента, полученная из этих экспериментальных данных,  $Q = 1.6 \cdot 10^{-6}$  Гс·см<sup>4</sup> оказалась вдвое меньше, чем в опытах с  $C_3 \perp x$ . Возмож-

ной причиной этого расхождения является то обстоятельство, что сигнал для перпендикулярной установки меньше зависит от точной ориентации образца, чем в случае  $C_3 \parallel x$ . Также следует учесть, что в параллельной ориентации конечные размеры образца проявляются сильнее.

Приведенные на рис. 3б данные для полуразности качественно подтверждают наличие дипольного вклада во внешнее поле нашего образца, который должен проявляться именно в полуразности, так как поле диполя меняет знак при повороте образца на  $180^\circ$  и не должно давать вклада в магнитный поток через приемный виток, когда ось  $C_3 \perp x$ , как это было в экспериментах, описанных в начале статьи. Экспериментальные точки для полуразности хорошо описываются приведенной на рисунке теоретической кривой  $\Delta\Phi_D^{\parallel}(h)$ , которая получается аналогично тому, как получена формула (3). Наиболее вероятным источником дипольного момента у образца являлось загрязнение его поверхности ферромагнитными примесями, которые в процессе монодоменизации образца были намагничены вдоль оси  $C_3$ . От этих примесей, по-видимому, удалось избавиться путем дополнительного промывания ацетоном и повторной монодоменизацией, что было показано в последующих экспериментах на модернизированной установке во ВНИИФТРИ, в которой был смонтирован один виток трансформатора потока, имевший диаметр  $2a = 10$  мм. На рис. 4а приведен полученный результат при протягивании образца, ориентированного так, что  $C_3 \parallel x$  через этот виток. Сравнение полученных экспериментальных точек с теоретической кривой (2) магнитного потока магнитного квадрупольа показывает очень хорошее согласие и отсутствие собственного дипольного момента у исследованного образца.

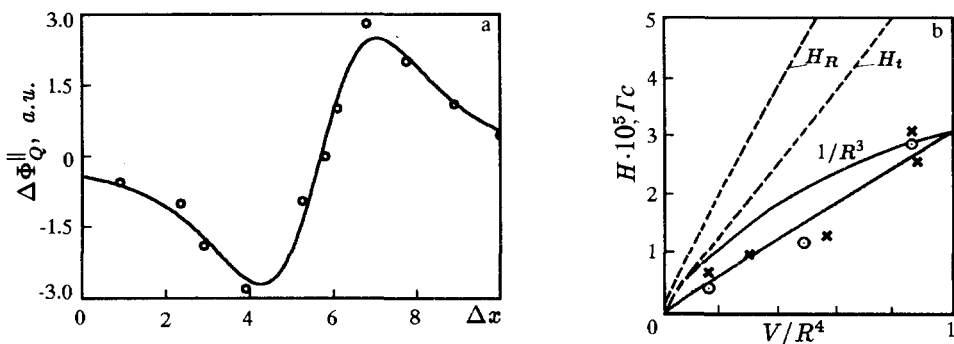


Рис.4. а – Магнитный поток при протягивании образца, ось которого перпендикулярна плоскости витка. б – Результаты исследования зависимости  $H_R$  – ○ и  $H_\theta$  – × от расстояния  $R$

На рис. 4б показаны результаты измерений зависимости амплитуд периодических сигналов, полученные при экспериментах, выполненных по схеме, описанной в работе [2], от расстояния  $R$ . Точки × получены для тангенциальной компоненты поля квадрупольа, а точки ○ – для радиальной. Кривая, обозначенная  $1/R^3$ , – возможная аппроксимация кубической зависимостью, и ее соответствие экспериментальным точкам много хуже, чем для  $1/R^4$ . Штриховыми кривыми показаны ожидавшиеся зависимости от расстояния, найденные по исправленным формулам Дзялошинского [3]. Отметим также, что из данных, показанных на рис.4, следует, что амплитуды компонент поля  $H_R$  и

$H_\theta$  практически совпадают. Это обстоятельство противоречит теоретическим формулам для квадруполья (1).

Сравним теоретические расчеты величины квадрупольного момента  $Q$  для нашего образца с экспериментальными результатами. Дзялошинский рассчитал квадрупольный момент одной элементарной ячейки антиферромагнитного  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [3] и, умножив на число ячеек в нашем образце, получил  $Q = 5.9 \cdot 10^{-6}$  Гс·см<sup>4</sup>. В настоящей работе было рассчитано магнитное поле  $H_z$  от ромбоэдра из  $10^4$  элементарных ячеек для нескольких точек, расположенных на оси на различных расстояниях от центра ромбоэдра и из этих данных по формуле (1) вычислен квадрупольный момент ромбоэдра. Таким образом, получен  $Q = 3.3 \cdot 10^{-6}$  Гс·см<sup>4</sup>. Можно рассмотреть квадруполь, составленный из двух подрешеток ( $M_0$  - намагниченность подрешеток в образце), раздвинутых на расстояние между спинами, направленными друг против друга. Полученный при этом результат:  $Q = 2uM_0 = 8 \cdot 10^{-6}$  Гс·см<sup>4</sup>. Мы видим, что все три оценки близки друг к другу.

Наиболее надежными экспериментальными данными мы считаем результаты, полученные при протягивании образца с осью  $C_3 \perp x$ . Полученное значение  $Q = 3.2 \cdot 10^{-6}$  Гс·см<sup>4</sup> в два раза меньше предсказанного Дзялошинским. Измеренные достаточно надежно поля  $H_R$  и  $H_\theta$  также оказались меньше рассчитанных по Дзялошинскому соответственно в три и два раза.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты подтверждают, что внешнее поле антиферромагнитного  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  имеет топологию квадрупольного поля и по порядку величины соответствует теоретическим расчетам. Наблюдающееся расхождение численных данных для квадрупольного момента образца как между результатами разных экспериментов, так и с теоретическими предсказаниями превышает ожидаемые ошибки эксперимента. Одно из наиболее вероятных объяснений состоит в том, что размеры образца сравнимы с расстояниями, на которых производились измерения как магнитных потоков, так и магнитных полей.

Из соображений симметрии квадрупольное магнитное поле могут создавать только те антиферромагнетики, которые, как  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , не обладают центром инверсии. Недавно Андреев [4] рассмотрел более общую задачу о внешнем макроскопическом поле любого антиферромагнетика, обусловленном намагниченностью поверхностных слоев образца.

В заключение приносим благодарность А.Ф. Андрееву, В.Н. Марченко и А.И. Смирнову за полезные обсуждения проблемы внешних полей антиферромагнетиков и Е.К. Ждановой за техническую помощь.

Выполнявшаяся во ВНИИФТРИ часть работы была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, а часть работы, выполнявшаяся в ИФП, поддерживалась частично Российским фондом фундаментальных исследований (грант 95-02-04569а) и частично проектом INTAS 940968.

- 
1. I.E.Dzyaloshinskii, Sol. St. Comm., **82**, 579 (1992).
  2. Д.Н.Астров, Н.Б.Ермаков, Письма в ЖЭТФ **59**, 274 (1994).
  3. И.Е.Дзялошинский, частное сообщение (1996).
  4. А.Ф.Андреев, Письма в ЖЭТФ, этот выпуск (1996).