

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ $YBa_2Cu_3O_x$ В НОРМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

А.В.Волкозуб, О.В.Снигирев, И.Н.Макаренко<sup>1)</sup>, С.М.Стишов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт кристаллографии АН СССР

117333, Москва

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

117234, Москва

Поступила в редакцию 1 июля 1991 г.

Проведены измерения магнитной восприимчивости  $\chi$  монокристаллических образцов  $YBa_2Cu_3O_x$  с различным содержанием кислорода в нормальном состоянии. Обнаружено, что при  $x < 7$  магнитная восприимчивость анизотропна  $\chi \parallel c / \chi \perp c > 1$ . Однако при  $x \rightarrow 7$  отношение  $\chi \parallel c / \chi \perp c$  стремится к единице. При направлении магнитного поля  $H \parallel c$  вблизи  $T_c$  обнаружена аномалия, связанная, по-видимому, с анизотропными эффектами флуктуационного диамагнетизма.

В работе <sup>1</sup>, посвященной исследованию магнитных свойств монокристаллов  $YBa_2Cu_3O_x$ , утверждалось, что их магнитная восприимчивость  $\chi$  в нормальном состоянии изотропна и практически не зависит от температуры. Однако в ряде последующих работ обнаружена достаточно сильная анизотропия нормальных магнитных свойств монокристаллов и текстурированных образцов  $YBa_2Cu_3O_x$ <sup>2,3</sup>, а также других соединений, принадлежащих к классу ВТСП<sup>4</sup>. Это противоречие побудило нас провести новые исследования магнитной восприимчивости монокристаллов  $YBa_2Cu_3O_x$ , включая монокристаллы с содержанием кислорода  $x < 7$ .

Как и ранее <sup>1</sup>, измерения магнитного момента образцов проводились с помощью сквид-магнитометра <sup>5</sup> в магнитном поле 100 Э. Абсолютная погрешность определения магнитного момента не превышала  $10^{-8}$  ед. СГС. В качестве образцов использовались стопки одинаково ориентированных относительно оси  $c$  монокристаллов общим объемом  $\sim 0,4$  мм<sup>3</sup>. Исследовались монокристаллы из двух ростовых партий. После извлечения из тигля кристаллы отжигались последовательно в потоке кислорода и в гелиевой атмосфере. Содержание кислорода в образцах оценивалось с помощью рентгеновских измерений <sup>6</sup>.

Относительная погрешность определения  $\chi$  в пределах каждой из двух серий измерений составляла  $\sim 3\%$ . Однако абсолютные значения  $\chi$  могли быть определены с погрешностью  $\sim 20\%$  в связи с ошибкой определения объема образцов. В целях сравнения результатов измерений (см.рис.1 - 4) рассчитанные значения  $\chi$  для обоих образцов были приведены к одной величине при  $x = 7$ .

Следует отметить, что образцы, использованные в настоящей работе, несколько уступают по качеству образцам, исследованным в работе <sup>1</sup>. Ширина сверхпроводящего перехода  $\Delta T$  в настоящих образцах при номинальном составе  $YBa_2Cu_3O_{7,0}$  составляла величину  $\simeq 1$  К по сравнению с  $0,2 \div 0,5$  К для образцов работы <sup>1</sup> по данным резистивных измерений.

Результаты измерений иллюстрируются на рис.1, где даны примеры поведения магнитной восприимчивости образцов составов  $YBa_2Cu_3O_{7,0}$  и  $YBa_2Cu_3O_{6,87}$  при двух ориентациях магнитного поля  $H \parallel c$  и  $H \perp c$ . Видно, что магнитная восприимчивость  $YBa_2Cu_3O_x$  в общем случае анизотропна, причем  $\chi_{\parallel} > \chi_{\perp}$ . Однако отношение  $\chi_{\parallel} / \chi_{\perp} \rightarrow 1$  при  $x \rightarrow 7$  (см. рис.2 и рис.3).

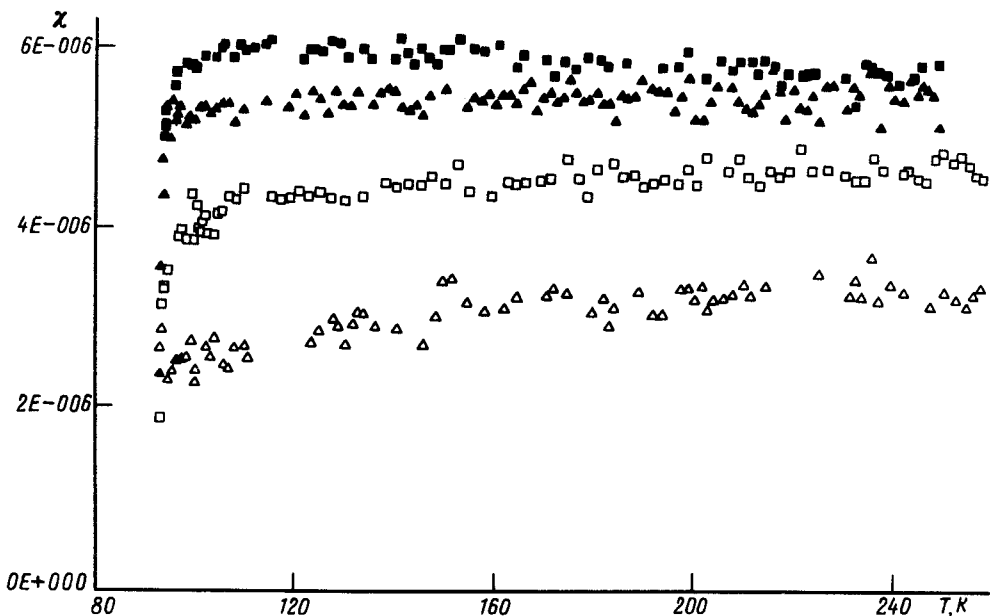


Рис. 1. Объемная магнитная восприимчивость  $\chi$  (ед. СГС) монокристаллических образцов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7,0}$  (зачерненные значки) и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,87}$  (незачерненные) при ориентациях магнитного поля  $H \parallel c$  (квадраты) и  $H \perp c$  (треугольники)

Наблюдаемая слабая температурная зависимость восприимчивости положительна ( $d\chi/dT > 0$ ) для обоих направлений магнитного поля  $H$  и для всех составов, за исключением случая  $x = 7$  при  $H \parallel c$ , где  $d\chi/dT < 0$  (рис.4).

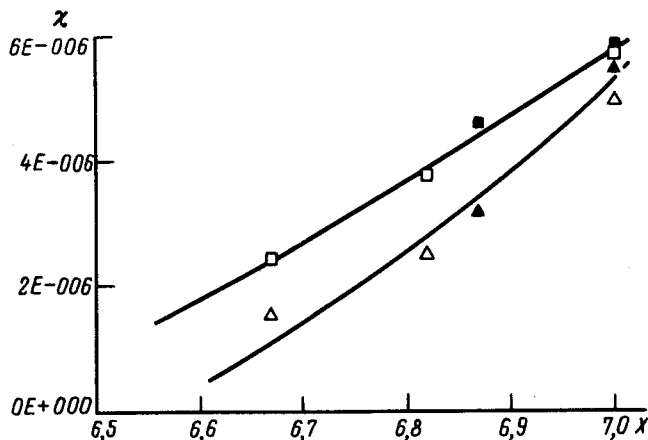


Рис. 2. Средние ( $T = 120 \div 260$  К) значения объемной магнитной восприимчивости  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  в зависимости от содержания кислорода  $x$ :  $H \parallel c$  - квадраты,  $H \perp c$  - треугольники; 1 серия измерений - зачерненные значки, 2 серия - незачерненные

Вблизи  $T_c$  для направления  $H \parallel c$  наблюдается отчетливая диамагнитная аномалия (см. рис.1 и 5). Поскольку производная  $d\chi/dT$  мала, то при обсуждении концентрационной зависимости восприимчивости  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  мы можем оперировать со средними по интервалу температур  $120 \div 260$  К значениями  $\chi$ . Как следует из рис.2, при уменьшении содержания кислорода восприимчивость  $\chi$  падает. Учитывая, что концентрация носителей также падает при уменьшении  $x$ , можно предположить, что паулиевский вклад в восприимчивость  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  является доминирующим. С другой стороны,

наблюдаемая анизотропия  $\chi$  требует рассмотрения и других вкладов в магнитный отклик системы. Учитывая результаты нейтронных исследований (см., например, <sup>7</sup>), можно думать, что анизотропия  $\chi$  связана с планарными спиновыми корреляциями антиферромагнитной природы, исчезающими в пределе  $x = 7$ . Характер анизотропии восприимчивости  $\chi_{\parallel} > \chi_{\perp}$  и ее температурной зависимости  $d\chi/dT$  согласуется с подобным представлением. Этот вывод не исключает, что в случае неоднородных образцов возможно наблюдение эффектов, связанных со спиновыми корреляциями даже при номинальной концентрации кислорода  $x \approx 7$ . В этой связи данные настоящей работы, по-видимому, не противоречат утверждению работы <sup>1</sup> об изотропной восприимчивости для состава  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ .

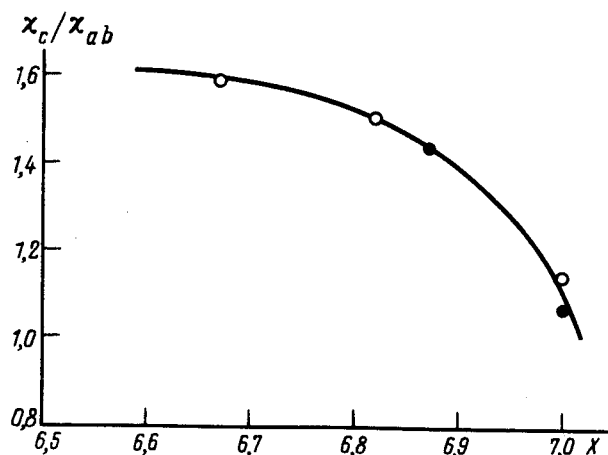


Рис. 3. Отношение средних ( $T = 120 \div 260$  К) значений магнитной восприимчивости  $\chi_{\parallel}/\chi_{\perp}$  для  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (см. рис.2) в зависимости от содержания кислорода  $x$ : 1 серия измерений - зачерненные значки, 2 серия - незачерненные

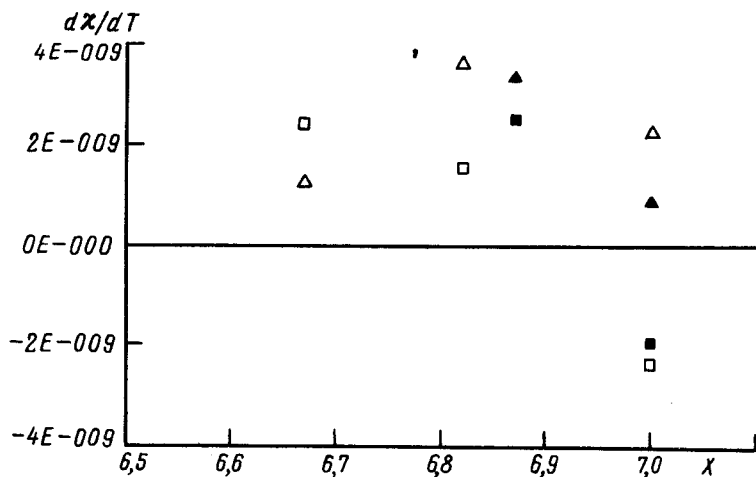


Рис. 4. Среднее ( $T = 120 \div 260$  К) значение наклона кривых  $\chi(T)$  в зависимости от содержания кислорода  $x$ . Обозначения те же, что и на рис.2

Обратимся далее к обсуждению аномалии  $\chi$  вблизи температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$ , проявляющейся в быстром уменьшении  $\chi(T)$  при  $T \rightarrow T_c$ . Как уже отмечалось, эта аномалия наблюдается для направления магнитного поля  $H \parallel c$ . Естественно связывать ее с эффектами флуктуационного диамагнетизма, имеющего сильно анизотропный или квазидвумерный характер.

На рис.5 представлены попытки выделить флуктуационную часть магнитной восприимчивости из экспериментальных данных для образца с  $x \approx 7$  при  $H \parallel c$ . Для этого набор экспериментальных точек аппроксимировался выражением вида <sup>8</sup>:

$$\chi = \chi_{fl} + a + bT, \quad (1)$$

где

$$\chi_{fl} = A \left( \frac{T_c}{T - T_c} \right)^{1/2} \quad (2)$$

для анизотропного 3D-случая или

$$\chi_{fl} = B \left( \frac{T_c}{T - T_c} \right) \quad (3)$$

для квазидвумерного случая,  $A = -(1/6)\pi k_B T \Phi_0^{-2} \xi(0) (M/m)^{1/2}$ ,  $B = -(-1/3)\pi k_B T \Phi_0^{-2} \xi^2(0)/s$ ,  $\Phi_0$  - квант магнитного потока,  $\xi(0)$  - длина когерентности при  $T = 0$  К,  $M/m$  - отношение масс электронных пар для движения поперек и вдоль слоев,  $s$  - численный параметр, имеющий размерность длины, и по порядку величины равный расстоянию между слоями.

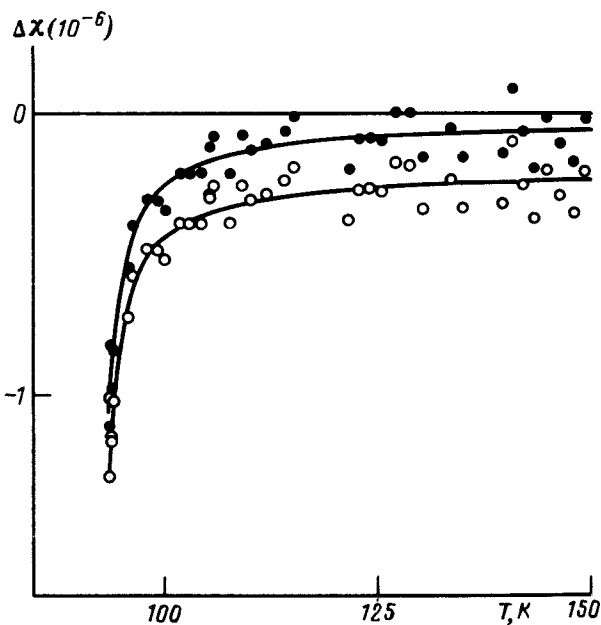


Рис. 5. Флуктуационная часть магнитной восприимчивости  $\chi_{fl}$  образца  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  для  $H \parallel c$ : o - трехмерный случай, • - квазидвумерный случай (см. текст)

Как следует из рис.5, ввиду большой дисперсии экспериментальных точек оба выражения согласуются с экспериментальными данными. Однако предположение о 3D-характере флуктуаций приводит к чрезмерно большой флуктуационной области (см. рис.5). Кроме того, не следует игнорировать и наши непосредственные наблюдения, свидетельствующие, что аномалия заметна только при направлении  $H \parallel c$ .

Оценка длины когерентности  $\xi_{ab}(0)$  в плоскости  $ab$  с помощью формулы (3) дает для образца с  $x = 7$  при  $s = 3,8 \text{ \AA}$  значение  $\approx 7 \text{ \AA}$ . По сравнению с другими оценками это значение представляется слишком малым <sup>9</sup>. С другой стороны, для анизотропного трехмерного случая, полагая  $(M/m)^{1/2} \approx 2$ ,

получим  $\xi_{ab}(0) \approx 25\text{\AA}$ . Если полагать, что при малых значениях  $\tau = \Delta T/T_c$  имеет место  $2D - 3D$ -кроссовер, то полученные результаты представляются разумными. Следует заметить, что быстрое уменьшение аномальной части  $\chi_{\parallel}$  при уменьшении содержания кислорода  $x$ , по-видимому свидетельствует о сокращении эффективной длины когерентности  $\xi$  в силу соотношения  $\xi_{eff} = (\xi_0 l)^{1/2}$ , где  $l$  - длина свободного пробега.

В заключение отметим, что анизотропный характер флуктуаций в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  может объяснить кажущееся различие критических температур, полученных при измерении электрического сопротивления  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  вдоль и поперек слоев  $\text{CuO}_2$ <sup>10</sup>.

- 
1. Авдеев Л.З., Волкозуб А.В., Снигирев О.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 474.
  2. Miljak M., Collin G., Hamzic A. JMMM, 1988, 76&77, 609.
  3. Lee W.C., Johnston D.C. Phys. Rev. B, 1990, 41, 1904.
  4. Johnston D.C., Cho J.H. Phys. Rev. B, 1990, 42, 8710.
  5. Avdeev L.Z., Snigirev O.V., Khanin V.V. IEEE Trans. Magn., 1985, 21, 914.
  6. Александров И.В., Быков А.Б., Зибров И.П. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, 48, 449.
  7. Bourges P., Gehring P.M., Hennen B. et al. Phys. Rev. B, 1991, 43, 449.
  8. Lawrence W.E., Doniach S. Proceedings of the Twelfth International Conference on Low Temperature Physics, Kyoto, 1970, ed. E.Kanda (Keigaku, Tokyo, 1971), 361.
  9. Kapitulnik A., Beasley M.P., Castellani C. et al. Phys. Rev. B, 1988, 37, 537.
  10. Макаренко И.Н., Никифоров Д.В., Быков А.Б. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, 48, 52.