

Е. Б. Амитин, К. Р. Жданов, Ю. А. Ковалевская

Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: amit@che.nsk.su

## ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВБЛИЗИ ТОЧКИ НЕЕЛЯ В ДИСПРОЗИИ

В результате анализа экспериментальных данных по теплоемкости и тепловому расширению диспрозия было установлено, что фазовый переход из антиферромагнитного состояния в парамагнитное не может быть описан в рамках теории скейлинга. Редкоземельный элемент диспрозий в антиферромагнитной фазе образует магнитную структуру типа простой спирали.

В конце 1960-х гг. появились теоретические исследования Мермина, Вагнера [1] и Хоенберга [2], в которых было показано, что в идеальных двумерных системах не может существовать фаза с отличным от нуля параметром дальнего порядка. Расчеты Березинского, проведенные в 1970 г. [3; 4], показали, что в двумерных изотропных идеальных системах все-таки может существовать фазовый переход. Такой переход

может быть связан с образованием / распадом решетки из магнитных вихрей. Аналогичный результат был получен в работах Костерлица и Таулесса [5; 6].

Идеальных двумерных систем реально не существует. На практике приходится иметь дело с квазидвумерной системой. Теоретические исследования реальных квазидвумерных структур были проведены в работе Косевича, Воронова и Манжоса [7], а также в работе Жузе и др. [8]. Квазидвумерные структуры могут быть образованы из геликоидальных одномерных магнитных вихрей с полным магнитным моментом, направленным вдоль гексагональной оси кристалла. На рис. 1 показана структура вихря согласно работе [7].

Квазидвумерные системы образуются в структурах, в которых взаимодействие в плоскости в несколько раз превышает взаимодействие вдоль перпендикулярной оси. Расчеты энергии обменного взаимодействия для РЗЭ были проделаны в работе Касуя [9]. Полученные значения удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами. Расчетная величина обменного взаимодействия между соседними магнитными моментами в плоскости легкого намагничивания составляют  $I_0 = 3,2 \times 10^{-13}$  эрг. В то же время обменное взаимодействие между моментами вдоль гексагональной оси (по Касуя) составляют величину  $I_1 = 8 \times 10^{-14}$  эрг [9]. В соответствии с этими оценками отношение  $I_0 / I_1 = 4$ .

Редкоземельные элементы в упорядоченном антиферромагнитном состоянии образуют разнообразные длиннопериодические

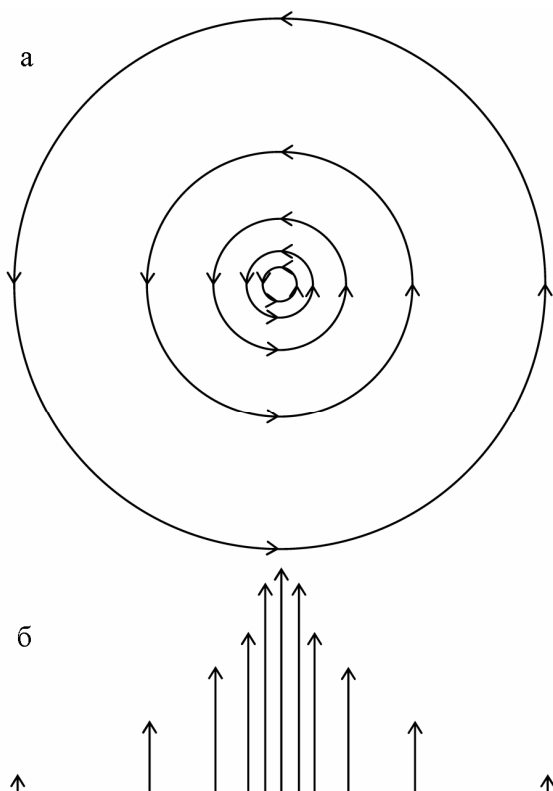


Рис. 1. Структура вихря: а – проекция моментов вихря на плоскость XY, б – проекция на ось Z

\* Работа поддерживается Междисциплинарным интеграционным проектом СО РАН на 2006–2008 гг. № 81.

магнитные структуры. Причем простейшими из них являются одноосные простые спирали. Такая структура реализуется в диспрозии, тербии и гольмии в антиферромагнитных фазах этих элементов.

Были проведены исследования температурных зависимостей теплоемкости и теплового расширения диспрозия вблизи температуры Нееля  $T_N$  [10]. Экспериментальные данные получены на особо чистых монокристаллических образцах. Совершенство образцов обычно определяется отношением сопротивлений  $r = R(300 \text{ К}) / R(4,2 \text{ К})$ . В исследуемых образцах это отношение составляло величины от 80 до 200. Температура Нееля зависела от чистоты образцов и составляла  $T_N = 180_{-0,7}^{+1,2}$  К для  $r = 82$  и  $T_N = 179_{-0,3}^{+0,3}$  К для  $r = 200$ .

Теплоемкость изучаемых образцов была измерена в вакуумном адиабатическом микрокалориметре. Объем микрокалориметра составлял  $0,3 \text{ см}^3$ , что позволило провести калориметрические исследования на монокристалле диспрозия.

Известно, что в рамках модели Бэка–Мукамеля [11] критический индекс  $\alpha$  для теплоемкости изотропной системы с четырехкомпонентным параметром порядка составляет величину  $-0,17$ . При этом предполагается, что в точке Нееля имеется фазовый переход 2-го рода. Реально оказывается, что величина критического индекса существенно зависит от интервала аппроксимации вблизи температуры Нееля. На рис. 2 горизонтальные линии указывают на интервал аппроксимации. Вертикальными линиями показаны доверительные интервалы для критического индекса. При уменьшении интервала и приближении его к температуре Нееля величина критического индекса резко возрастает, а при  $|T - T_N| \ll 1 \text{ К}$  величина  $\alpha$  становится неразумно большой ( $\alpha \gg 1$ ). Кроме того, исчезает адекватность описания аномальной части теплоемкости  $C_{an}$  степенной функцией  $C_{an} \propto |T - T_N|^{-\alpha}$ .

Отсутствие скейлингового поведения аномальной части теплоемкости вблизи точки Нееля предполагает, что разрушение магнитного упорядочения происходит, по-видимому, в два этапа. Сначала «плавится» вихревая решетка, а затем происходит исчезновение дальнего магнитного порядка внутри вихрей.

В работе Костерлица и Таулесса [5] рассмотрен распад спаренных вихревых структур как фазовый переход 2-го рода. Используя ренорм-групповой метод авторы получили для аномальной части теплоемкости выражение в ближайшей окрестности температуры Нееля:

$$\frac{C_{an}}{T} = A + B\tau^{-2} \exp\left(-\frac{b}{\sqrt{\tau}}\right), \quad (1)$$

$$\text{где } \tau = \frac{T_{KT} - T}{T_{KT}}.$$

Температурная зависимость (1) имеет максимум, который не совпадает с температурой Костерлица–Таулесса  $T_{KT}$ , причем  $T_{KT} > T_N$ . Максимум этой функции возникает

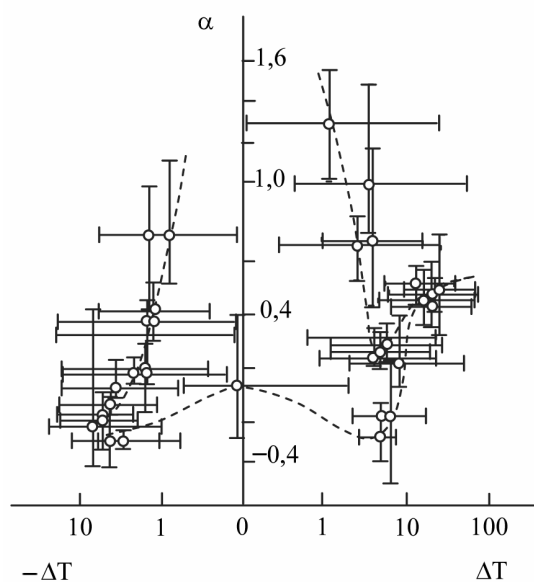


Рис. 2. Критические индексы теплоемкости для соответствующих интервалов аппроксимации в широком интервале температур для образцов диспрозия

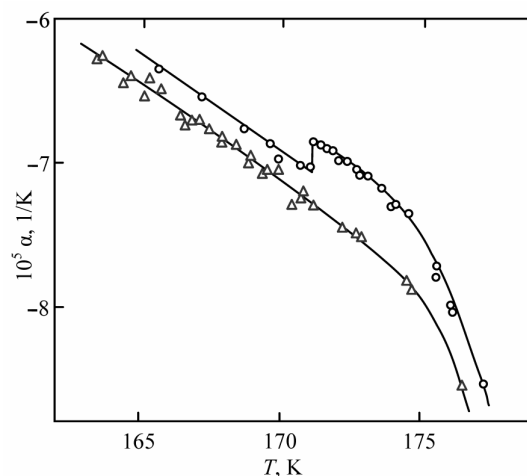


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента теплового расширения диспрозия:  $\Delta$  – нагрев;  $\circ$  – охлаждение

из-за конкуренции степенной функции и экспоненты. Выражение (1) адекватно описывает поведение аномальной составляющей теплоемкости в узкой температурной области вблизи ее максимума.

Экспериментальные исследования температурной зависимости коэффициента линейного расширения монокристаллического диспрозия проводились вдоль гексагональной оси кристалла. Было обнаружено, что при нагревании образца в антиферромагнитной фазе вплоть до температуры Нееля отсутствуют какие-либо признаки скачкообразных изменений. Однако при охлаждении кристалла из парамагнитной фазы наблюдается гистерезис в антиферромагнитной фазе. При охлаждении образца ниже температуры Нееля наблюдается скачок теплового расширения.

На рис. 3 представлены экспериментальные значения коэффициента теплового расширения  $\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$  в окрестности температуры Нееля.

Квазидвумерие может играть существенную роль не только в упорядочивающихся магнитных системах (ферро и антиферро). Аномальное поведение может проявиться в высокотемпературных сверхпроводниках. Квазидвумерные явления в ВТСП-системах рассмотрены подробно в обзоре Мория [12] и в первую очередь связаны со слоями Cu-O. Кроме фазовых переходов в сверхпроводящее состояние, в системе YBCO имеет место фазовый переход в стеклянную фазу в области температур 250–350 К [13]. При этом гистерезисные явления, по-видимому, тесно связаны с распределением атомов кислорода в плоскостях Cu-O.

### Список литературы

1. Mermin N., Wagner H. Absence of ferromagnetism or antiferromagnetism in one or two-dimensional isotropic Heisenberg models // Phys. Rev. Lett. 1966. Vol. 17. P. 1133–1136.

2. Hohenberg P. C. Existence of long range order in one and two dimensions // Phys. Rev. 1967. Vol. 158. P. 383–386.

3. Березинский В. Л. Разрушение дальнего порядка в одномерных и двумерных системах с непрерывной группой симметрии // ЖЭТФ. 1970. Т. 59. С. 907–920.

4. Березинский В. Л. Разрушение дальнего порядка в одномерных и двумерных системах. Квантовый случай // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. С. 1144–1156.

5. Kosterlitz J. M., Thouless D. J. Ordering metastability and phase transition in two dimensional system // J. Phys. C. 1973. Vol. 6. P. 1181–1203.

6. Kosterlitz J. M. The critical properties of the two dimensional XY model // J. Phys. C. 1974. Vol. 7. P. 1046–1060.

7. Косевич А. М., Воронов В. П., Манжос И. В. Нелинейные коллективные возбуждения в легкоплоскостном магнетике // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. С. 148–159.

8. Jose J., Kadanoff L., Kirkpatrick S., Nelson D. Renormalization, vortices and symmetry-breaking perturbation in the two-dimensional planar model. Phys. Rev. B. 1977. Vol. 16. P. 1217.

9. Kasuya T. s-d and s-f interaction and rare earth metals // Magnetism / Ed. by G. T. Rado. L.: Academic Press, 1966. Vol. 2B. P. 215–294.

10. Амитин Е. Б., Бессергенов В. Г., Ковалевская Ю. А. Особенности термодинамических свойств диспрозия как квазидвумерной магнитной системы // ЖЭТФ. 1984. Т. 84. С. 205–214.

11. Bak P., Mukamel D. Physical realization of n≥4 component vector model. Phase transition in Cr, Eu, Ho, Dy, Tb // Phys. Rev. B. 1976. Vol. 13. P. 5086.

12. Moriya T. Spin Fluctuations and Superconductivity around the Magnetic Instability // ArXiv: cond-mat/0207669.

13. Nagel P., Rykov A., Tajima S. et al. Anomalously large oxygen-ordering contribution to the thermal expansion of untwinned YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.95</sub> single crystals: a glass-like transition near room temperature // ArXiv: cond-mat/0001287.