

## ТЕПЛОЕМКОСТЬ БЕЗВОДНОГО $\text{CrCl}_3$ МЕЖДУ 4,5 И 20°К В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

М. О. Кострюкова, Л. В. Лукъянова.

Безводный  $\text{CrCl}_3$  – слоистый антиферромагнетик, в котором антиферромагнитное упорядочение устанавливается при  $T_c = 16,8^\circ\text{K}$  и обнаружены свойства двухмерного ферромагнетизма [1 – 4].

$\text{CrCl}_3$  обладает слоистой кристаллической структурой типа ( $R\widetilde{3}$ ) и, как показали нейтронографические исследования [5], в антиферромагнитном состоянии спины внутри каждого гексагонального слоя металлических ионов упорядочены ферромагнитно, а в соседних слоях, разделенных ионами  $\text{Cl}^-$ , спины антипараллельны, причем ориентированы в плоскости базиса.

Впервые магнитные свойства слоистых антиферромагнетиков были предсказаны Ландау [6]. В последнее время рядом авторов [7, 8, 2] теоретически рассматривался энергетический спектр слоистых антиферромагнетиков. Показано, что если антиферромагнитное взаимодействие между слоями намного меньше ферромагнитного взаимодействия в слое, а анизотропия мала, уже при низких температурах имеет место переход от трехмерного антиферромагнетика к двухмерной ферромагнитной системе.

Изменения восприимчивости монокристалла  $\text{CrCl}_3$  [9, 2] показали, что анизотропия в  $\text{CrCl}_3$  мала, а антиферромагнитная связь между слоями очень слабая и антиферромагнитное упорядочение разрушается в слабых полях; в работе [2] из значения  $\chi_L$  была определена величина обменного взаимодействия между слоями  $J_{\text{af}}/k = -0,018^\circ\text{K}$ .

Нарат и Дэвис [2] исследовали зависимость намагниченности подрешеток  $\text{CrCl}_3$  от поля (до 10 кэ) и температуры между 0,4 и 8°К, используя метод ядерного магнитного резонанса. Внутреннее поле, при котором разрушается антиферромагнитное упорядочение, и выше которого спины в соседних подрешетках выстраиваются параллельно (ферромагнитное состояние) они оценили равным 1,68 кэ, причем в ферромагнитном состоянии  $\text{CrCl}_3^I$  практически изотропен. Температурную зависимость намагниченности подрешеток в отсутствии поля Нарат и Дэвис объясняют особенностями энергетического спектра двухмерной ферромагнитной системы с учетом также взаимодействия спиновых волн. Согласно их оценкам ферромагнитное взаимодействие в слое  $J_\Phi/k = 5,25^\circ\text{K}$ , а эффективное поле анизотропии в антиферромагнитном состоянии  $H_A = 650$  э.

Известны измерения теплоемкости безводного  $\text{CrCl}_3$  в отсутствии поля, выполненные выше 12°К [10, 11]. Авторы этих работ определяют температуру перехода из парамагнитного в антиферромагнитное состояние для  $\text{CrCl}_3$  как  $T_c = 16,8^\circ\text{K}$ .

Низкотемпературные измерения теплоемкости  $\text{CrCl}_3$  [3, 4] без поля были проведены от 2 до 20°К и позволили выделить линейный член магнитной теплоемкости, свойственный двухмерной ферромагнитной

системе. Было найдено, что магнитная теплоемкость  $\text{CrCl}_3$  между 2 и 8°К описывается формулой  $0,0535 \cdot T \text{ кал/моль} \cdot \text{град}$ . Из этих данных оценена величина обменного ферромагнитного взаимодействия в слое  $J_\phi/k = 5,61 \text{ К}$ , которая близка к результату Нарата и Дэвиса.

В настоящей работе мы исследовали поведение теплоемкости  $\text{CrCl}_3$  в магнитном поле и произвели измерения теплоемкости в полях до 8 кэ в области температур от 4,5 до 20°К.

Для измерений теплоемкости мы использовали порошкообразный  $\text{CrCl}_3$  поскольку, как уже указывалось выше, анизотропия в  $\text{CrCl}_3$  весьма мала. Образец спрессованного в форме цилиндра порошкообразного  $\text{CrCl}_3$  весом  $\sim 30 \text{ г}$ , помещенный в калориметр, находился в поперечном магнитном поле, которое создавалось электромагнитом. При этом поле размагничивания составляло 15 – 20% внешнего поля (фактор размагничивания образца  $N \sim 1/2$ ); при оценке поля размагничивания использованы данные Бизетта и Терье [9] по намагниченности  $\text{CrCl}_3$ . Калориметр с образцом содержал угольный термометр фирмы Allen Bradley и нагреватель и заполнялся небольшим количеством теплообменного гелия. Методика калориметрических измерений аналогична ранее описанной [12, 13].

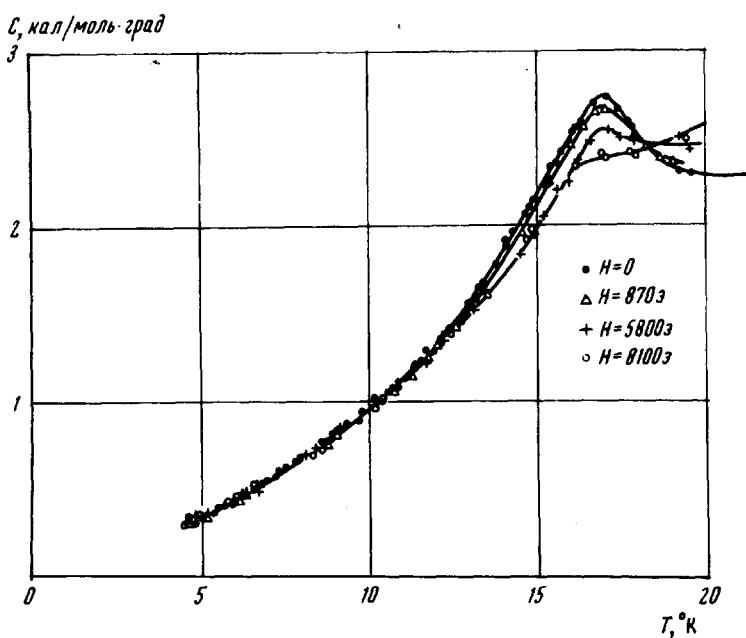


Рис. 1

Результаты наших измерений теплоемкости безводного  $\text{CrCl}_3$  во внешних полях 870, 5800 и 8100 Гц приведены на рис. 1 в координатах  $C$  и  $T$  совместно с ранее полученными данными без поля [4]. Как видно, данные по теплоемкости  $\text{CrCl}_3$  без поля и в полях до  $\sim 8$  кэ близки в области температур от 4,5 до 12°К, а выше 12° теплоемкость зависит от поля.

На рис. 2 эти же результаты ниже 10°К представлены в координатах  $C/T$  и  $T^2$ , причем отложены также данные без поля в гелиевой област-

ти температур [3]. Точки в магнитных полях ложатся практически на ту же прямую, что и без поля

$$C [\text{кал}/\text{моль} \cdot \text{град}] = 0,0535 T + 5,11 \cdot 10^{-4} T^3,$$

где кубический член описывает теплоемкость решетки, а линейный – магнитную теплоемкость. Линейная температурная зависимость магнитной теплоемкости, характерная для двухмерной ферромагнитной системы, сохраняется и в присутствии поля между 4,5 и 8°К.

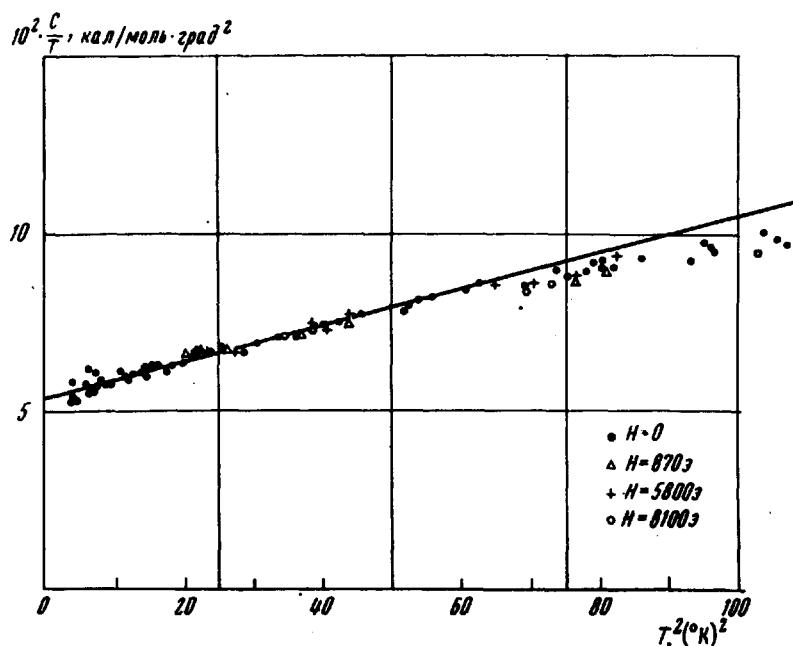


Рис. 2

Из результатов, представленных на рис. 1, видно, что в поле 870 э уже проявляется зависимость теплоемкости от поля; при этом теплоемкость в максимуме уменьшилась. Максимум теплоемкости практически не сместился с температурой в полях 870 и 5800 э, но в поле 5800 э горб на кривой теплоемкости заметно уменьшился. В поле 8100 э кривая теплоемкости еще более сгладилась и максимум исчез. Таким образом, при наложении магнитного поля аномалия теплоемкости в  $\text{CrCl}_3$  постепенно сглаживается, начиная с малых полей.

Исчезновение теплоемкостного пика наблюдается у обычных ферромагнетиков в магнитном поле [14] и объясняется отсутствием у них фазового перехода в магнитном поле. Сглаживание максимума теплоемкости в поле в  $\text{CrCl}_3$ , также, видимо, свидетельствует об исчезновении фазового перехода в поле. По-видимому, это свойственно слоистым антиферромагнетикам со слабым антиферромагнитным взаимодействием между слоями, у которых уже в малых полях устанавливается ферромагнитное упорядочение.

В заключение выражаем глубокую благодарность за внимание к работе Н.Б.Брандту и А.С.Боровику-Романову, принявшему участие в обсуждении результатов.

Московский  
Государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
6 декабря 1972 г.

### Литература

- [ 1] A.Narath. Phys. Rev. 131, 1929, 1963.
- [ 2] A.Narath, H.L.Davis. Phys. Rev., 137, A168, 1965.
- [ 3] М.О.Кострюкова. Письма в ЖЭТФ, 8, 231, 1968.
- [ 4] М.О.Кострюкова, Л.В.Лукьянова. ЖЭТФ, 61, 732, 1971.
- [ 5] J.W.Cable, W.K.Wilkinson, E.O.Wollan. J. Phys. Chem. Solids, 19, 29, 1960.
- [ 6] Л.Д.Ландау. Сow. Phys., 4, 675, 1933.
- [ 7] A. Yoshimori. Phys. Rev., 130, 1312, 1963.
- [ 8] H.B.Shore. Phys. Rev., 131, 2496, 1963.
- [ 9] H.Bizette, C.Terrier. J. Phys. Radium, 29, 486, 1962.
- [ 10] О.Н.Трапезникова, Л.В.Шубников, Г.Милютин. Сow Phys., 9, 237, 1936.
- [ 11] W.N.Hansen, M.Griffel. J. Chem. Phys., 28, 902, 1958.
- [ 12] М.О.Кострюкова. ДАН СССР, 96, 959, 1954.
- [ 13] М.О.Кострюкова. ЖЭТФ, 30, 1163, 1956.
- [ 14] G.Garton, M.J.M.Leask, W.P.Wolf, A.F.G.Wyatt. J. Appl. Phys., 34, 1083, 1963.