

# ОБ АНОМАЛЬНОМ ЗНАКЕ МАГНЕТОКАЛОРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ФЕРРИТАХ В РАЙОНЕ ТОЧКИ КОМПЕНСАЦИИ

К.П.Белов, Е.В.Талалаева, Л.А.Черников, В.И.Ивановский

В литературе имеется лишь три публикации [1–3], в которых сообщается об измерениях магнетокалорического эффекта –  $\Delta T(H)$  в ферритах. Между тем, изучение этого эффекта в ферритах представляет значительный интерес; поскольку эффект  $\Delta T(H)$  является "энергетической" характеристикой магнетика, измерения ее могут дать полезные сведения о проявлении сложных магнито-подрешеточных взаимодействий в ферритах.

Мы провели измерения эффекта  $\Delta T(H)$  в феррите-гранате  $Gd_3Fe_5O_{12}$  и феррите-шпинеле  $Li_2O \cdot 2Fe_2O_3 \cdot 5Cr_2O_3$  в широком интервале температур. Образцы ферритов имели форму сфер диаметром 5 мм. В этих сферах высоверливались узкие углубления, внутрь которых вставлялся горячий спай медь-константановой термопары. Изменения температуры  $\Delta T$ , происходящие при адиабатическом включении магнитного поля, фиксировались с помощью потенциометрической установки с усилителем чувствительностью  $0,5 \cdot 10^{-3}$  град. Образец помещался в откачиваемую стеклянную ампулу, на которую одевалась бифилярно намотанная печь; все устройство размещалось между полюсами электромагнита.

На рис. 1 приведены результаты измерений для феррита-граната гадолиния. Видно, что в области температуры Кюри  $\theta_f$ , имеется характерный положительный максимум  $\Delta T$ , обусловленный парапроцессом. Далее видно, что при понижении температуры, знак  $\Delta T$  становится отрицательным, в точке компенсации  $\theta_k$  наблюдается небольшой отрицательный максимум, а затем, после прохождения температуры компенсации, знак  $\Delta T$  снова становится положительным.

Таким образом, в некотором интервале температур выше  $\theta_k$  при адиабатическом включении поля происходит не нагревание, что обычно имеет место в ферромагнетиках при парапроцессе (Co, Ni), а охлаждение образца.

Возникновение аномального знака магнетокалорического эффекта в исследуемом феррите-гранате в области  $\theta_k < T < \theta_f$ , по нашему мнению, объясняется следующей причиной.

Характерным свойством ферритов, обладающих точками компенсации, является то, что в них интенсивный парапроцесс имеет место во всем интервале температур существования магнитного упорядочения (а не только вблизи точки Кюри). Этот интенсивный парапроцесс возникает за счет ориентации магнитных моментов ионов, находящихся в подрешетке, магнитный порядок в которой создается сравнительно слабым обменным полем. В случае феррита-граната такой подрешеткой является подрешетка  $C_y$ , в которой находятся редкоземельные ионы, в данном случае ионы  $Gd^{3+}$ . На эти ионы действует эффективное обменное поле –  $H_{\text{обм}}$  со стороны железных подрешеток порядка 300 кэ [4]. Благодаря тому, что магнитные моменты ионов  $Gd^{3+}$  велики, уже при включении внешнего поля  $\sim 20$  кэ возникает восприимчивость парапроцесса, которая

по величине сравнима с восприимчивостью парапроцесса в районе точки Кюри, где она достигает максимальной величины. Соответственно этому магнетокалорический эффект  $\Delta T$  в этом феррите будет сравним по величине с эффектом  $\Delta T$  в районе точки Кюри. При этом при температурах  $T < \theta_k$ , поскольку здесь внешнее поле направлено параллельно полю  $H_{\text{обм}}$ , эффект  $\Delta T$  должен иметь положительный знак, что и на-

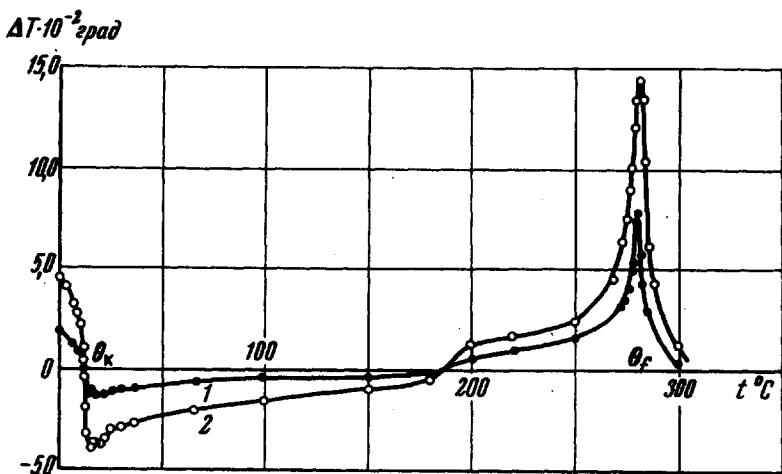


Рис. 1. Магнетокалорический эффект в феррите-гранате гадолиния  $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ : 1 – 6,6 кэ; 2 – 16 кэ;

блюдается на рис. 1. Здесь ситуация такая же как в нормальных ферромагнетиках: парапроцесс при наличии параллельного расположения векторов  $H$  и  $H_{\text{обм}}$ . В этой области температур магнитный момент гадолиниевой подрешетки больше магнитного момента  $a-d$  железной подрешетки, и вектор результирующей намагниченности направлен вдоль магнитного момента гадолиниевой подрешетки, т.е. вдоль обменного поля, действующего со стороны железных подрешеток на ионы  $\text{Gd}^{3+}$ . Поэтому поворот магнитных моментов ионов  $\text{Gd}^{3+}$ , разориентированных тепловым движением, по внешнему полю (и по полю  $H_{\text{обм}}$ ) совершается с выделением тепла.

В интервале температур  $\theta_k < T < \theta_f$  внешнее поле  $H$  направлено антипараллельно полю  $H_{\text{обм}}$ . В этой области температур из-за уменьшения магнитного момента гадолиниевой подрешетки вектор результирующей намагниченности направлен против магнитного момента подрешетки  $c$ . Поэтому здесь будет иметь место парапроцесс антиферромагнитного типа – ориентация магнитных моментов ионов  $\text{Gd}^{3+}$  внешним полем в направление, противоположное полю  $H_{\text{обм}}$ . Этому процессу соответствует эффект  $\Delta T$  отрицательного знака [5], что и наблюдается на рис. 1.

Таким образом, в феррите-гранате гадолиния в широком интервале температур знак и характер магнетокалорического эффекта определя-

ются парапроцессом в гадолиниевой подрешетке; в области  $T < \theta_k$  парапроцессом "ферромагнитного" типа, а в области  $T > \theta_k$  – "антиферромагнитного" типа. В районе точки Кюри, как показали наши опыты [6], имеет место наложение обоих типов парапроцесса (ферромагнитного – за счет ионов Fe и антиферромагнитного – за счет ионов Gd). При этом результирующий магнетокалорический эффект в районе температуры Кюри имеет положительный знак, поскольку здесь результирующая намагниченность железной подрешетки больше, чем гадолиниевой.

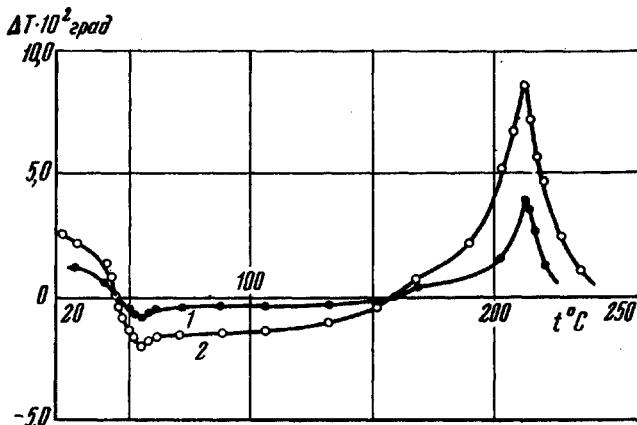


Рис.2. Магнетокалорический эффект в феррите  $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2,5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2,5\text{Cr}_2\text{O}_3$ . 1 – 6,6 кэ; 2 – 16 кэ

В работе [7] для феррита-хромита лития, обладающего точкой компенсации, в области  $\theta_k < T < \theta_f$  было найдено, что  $\Delta R_{||}/R$  и  $\Delta R_{\perp}/R$ , измеренные в полях  $\sim 10^4$  э, имеют одинаковые положительные знаки. Это является аномалией, так как при парапроцессе в обычных ферромагнетиках  $\Delta R_{||}/R$  и  $\Delta R_{\perp}/R$  всегда имеют отрицательные знаки. Для нас теперь ясно, что аномальные знаки  $\Delta R_{||}/R$  и  $\Delta R_{\perp}/R$  в этом феррите вызываются парапроцессом антиферромагнитного типа.

На рис.2 приведены кривые  $\Delta T(t)$  для феррита  $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2,5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2,5\text{Cr}_2\text{O}_3$ , полученные в настоящей работе. Видно, что характер кривых на рис. 2 такой же, как и на рис. 1. Ясно, что в области  $\theta_k < T < \theta_f$  в этом феррите отрицательный знак  $\Delta T$  обусловлен парапроцессом антиферромагнитного типа. Роль гадолиниевой подрешетки здесь играет октаэдрическая подрешетка, в которой помимо ионов  $\text{Fe}^{3+}$ , находятся ионы  $\text{Cr}^{3+}$ . Следует отметить, что отрицательный знак  $\Delta T$  в области  $\theta_k < T < \theta_f$  был наблюден в работе [3] для феррита-шпинели  $\text{NiFeCrO}_4$ , однако интерпретации этому явлению в ней дано не было.

В заключение укажем, что отрицательный знак  $\Delta T$  может давать вращение вектора ферримагнетизма –  $I_s$  против сил магнитной анизотропии [8, 9] и градиентов магнитных неоднородностей. Эффект  $\Delta T$  за счет вращения  $I_s$  всегда много меньше по величине [8]. Наиболее ощутимый вклад он может давать вблизи  $\theta_k$ , так как при приближении к этой температуре вращение  $I_s$  сильно затрудняется, о чём свидетельствует сильный рост коэрцитивной силы в районе  $\theta_k$  [10]. Возможно,

что небольшое возрастание  $\Delta T$  (отрицательного знака), наблюдаемое вблизи  $\theta_k$  (рис. 1), объясняется указанной причиной.

Выражаем благодарность А.Н.Горяге и С.А.Никитину за участие в обсуждении результатов, К.М.Большовой и Т.А.Елкиной за предоставление образца феррита-хромита лития.

Физический факультет  
Московского  
государственного университета  
им.М.В.Ломоносова

Поступило в редакцию  
10 апреля 1968 г.

### Литература

- [1] C.Clark, W.Sucsmith. Proc. Roy. Soc., A 225, 147, 1954.
- [2] Л.Бейтс. Изв. АН СССР, сер. физ., 21, 1184, 1957.
- [3] В.И.Николаев, И.А.Дубовцев, Г.Г.Угодников, С.С.Якимов Изв. АН СССР, сер. физ., 30, 949, 1966.
- [4] К.П.Белов, С.А.Никитин, Phys. Stat. Sol., 12, № 1, 1965; К.П.Белов, М.А.Белянчикова, Р.З.Левитин, С.А.Никитин. Редкоземельные ферро- и антиферромагнетики. Изд. "Наука", 1959.
- [5] Б.К.Власов. Изв. АН СССР, сер. физ., 19, 481, 1955.
- [6] К.П.Белов, С.А.Никитин, Е.В.Талалаева, Л.А.Черникова, Г.А.Ярхо. ЖЭТФ, 55, вып. 7, 1968.
- [7] К.П.Белов, А.Н.Горяга, Линь-Чжан-да. ЖЭТФ, 40, 752, 1961.
- [8] Н.С.Акулов, Л.В.Киренский. J. of Phys., 3, 31, 1940.
- [9] В.И.Ивановский. ФММ 7, 29, 1959.
- [10] К.П.Белов, А.В.Педько. ЖЭТФ, 39, 961, 1960.

## ЭФФЕКТ КОНДО И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

*Н.В.Волженингейн, В.Е.Старцев*

В недавно опубликованной работе [1] теоретически рассмотрен вопрос о взаимодействии электронов проводимости с парамагнитными примесями в сверхпроводнике.

Один из результатов этой работы сводится к утверждению возможности существования сверхпроводимости и эффекта Кондо, приводящего к появлению минимума в температурной зависимости электросопротивления.

Поскольку результаты работы [1] являются принципиальными в понимании возможных воздействий на механизм сверхпроводимости, представляет интерес экспериментальная проверка приведенного выше утверждения.

Мы провели измерения электросопротивления монокристалла молибдена с очень небольшой примесью железа ( $\sim 2 \cdot 10^{-4}\%$ ) в области темпе-