

## МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ТЕТРАГОНАЛЬНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ В УГЛОВОЙ ФАЗЕ

**О.Г. Медведевская, канд. физ.-мат. наук;**

**О.А. Хоруженко, мл. науч. сотр.;**

*Сумский государственный педагогический университет, ул. Роменская, 87,  
г. Сумы, 40002*

**Г.К. Чепурных,\* д-р физ. - мат. наук**

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины,  
ул. Петропавловская, 58, г.Сумы, 40030*

*E-mail: [ipfmail@ipfcentr.sumy.ua](mailto:ipfmail@ipfcentr.sumy.ua)*

*Для легкоосных тетрагональных антиферромагнетиков намагниченности подрешеток которых не зависят от величины поля и взаимодействия Дзялошинского является преобладающим, произведен расчет магнитной восприимчивости в продольном магнитном поле. Доказано, что после перехода магнитной подсистемы в угловую фазу, при увеличении поля восприимчивость резко возрастает, а после достижения максимального значения – резко падает, таким образом, в отличие от ферромагнетиков, найденная восприимчивость в угловой фазе существенно не постоянна и реализуется в интервале полей в десятки раз меньшем того интервала, в котором существует угловая фаза.*

Особенности магнитной восприимчивости в магнитоупорядоченных кристаллах обычно обнаруживаются на линиях и точках фазовых переходов [1-4]. На линиях фазовых переходов второго рода происходит скачкообразное изменение восприимчивости, а на линиях фазовых переходов первого рода из-за скачкообразного изменения намагниченности в эксперименте наблюдается пик восприимчивости. Однако изучение физических свойств, обнаруженных в тетрагональном антиферромагнетике (АФМ)  $\text{CoF}_2$  [5,6] и указывающих на существование угловой фазы в продольном магнитном поле, заставляет существенно изменить наши представления и об особенностях восприимчивости, и о тех случаях, когда эти особенности возникают в магнитоупорядоченных кристаллах. Согласно теории и эксперимента (см., например, [7]) в ферримагнетиках из-за различия в намагниченностях подрешеток под влиянием внешнего магнитного поля происходит переход из ферримагнитной фазы в ферромагнитную через угловую фазу. В угловой фазе восприимчивость велика по сравнению с восприимчивостью в коллинеарных фазах и в первом приближении постоянна. Аналогичным образом ведет себя восприимчивость в угловой фазе легкоосных АФМ, рассчитанная в [2]. В то же время экспериментально изученное изменение восприимчивости во фториде кобальта оказалось существенно иным (см. рис. 2 в работе [6]). Согласно [6] после перехода магнитной подсистемы в угловую фазу с увеличением продольного магнитного поля восприимчивость резко возрастает и после достижения максимального значения резко падает, т.е. в угловой фазе восприимчивость существенно не постоянна. Поскольку теории данного явления нет, то цель данной работы – теоретическое определение основных черт тех особенностей магнитной восприимчивости, которые возможны в угловой фазе легкоосного тетрагонального АФМ с преобладающим взаимодействием Дзялошинского (ВД) для случая, когда намагниченности подрешеток не зависят от величины внешнего магнитного поля.

Гамильтониан выберем в виде

$$H = (2M_0) \left[ \frac{1}{2} E m^2 + \frac{b}{2} l_z^2 - d(l_x m_y + l_y m_x) + \frac{a}{2} m_z^2 + f l_x^2 l_y^2 - \mathbf{mH} \right], \quad (1)$$

где  $\mathbf{l} = \frac{\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2}{2M_0}$ ,  $\mathbf{l} = \frac{\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2}{2M_0}$ ,  $\mathbf{l} \perp \mathbf{m}$

$b < 0$ ,  $f > 0$ ,  $d > 0$ ,  $E \gg |b| \gg f$ ,  $2d^2 > fE$ ,  $a_2 > 0$ ,  $\mathbf{EMA} \parallel OZ$ ,  $T \ll T_N$ ;  
 $E$  – параметр обменного взаимодействия;  $b$ ,  $f$ ,  $a_2$  – параметры анизотропии;  $d$  – параметр Дзялошинского;  $\mathbf{H}$  – внешнее магнитное поле;  
 $\mathbf{M}_1$ ,  $\mathbf{M}_2$  – намагниченности подрешеток.

( $\mathbf{EMA}$  – easy magnetization – axis).

Гамильтониан (1) рассматривается как функция  $m$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$  и  $\varphi_{\perp}$  (рис. 1) и поэтому возможные состояния магнитной подсистемы определяются системой уравнений

$$\frac{\partial H}{\partial m} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial \varphi_{\perp}} = 0 \quad . \quad (2)$$

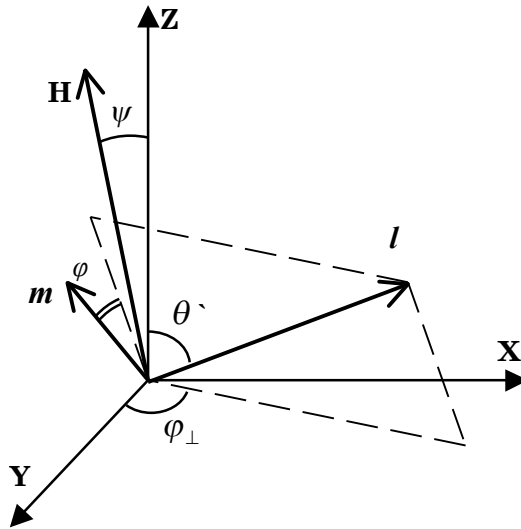


Рисунок 1 - Ориентация вектора антиферромагнетизма  $\mathbf{l}$  и вектора намагниченности  $\mathbf{m}$  при произвольной ориентации внешнего магнитного поля в плоскости  $ZY$ :

$\theta$  и  $\varphi_{\perp}$  – полярный и азимутальный углы вектора  $\mathbf{l}$ ;

$\varphi$  – угол, характеризующий направление вектора  $\mathbf{m}$  в плоскости, перпендикулярной  $\mathbf{l}$  (этот угол отсчитывается от линии пересечения указанной плоскости с плоскостью, проходящей через ось  $Z$  и вектор  $\mathbf{l}$ )

Поскольку используется условие  $2d^2 > fE$ , благодаря которому реализуется угловая фаза при  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{EMA}$  (см. [8]), то параметр  $f$  не учитывается. Параметр  $a_2$  необходим, главным образом, в области перехода из антиферромагнитной фазы в угловую, и им можно пренебречь. Кроме того, рассматриваются поля, при которых выполняется условие  $m^2 \ll 1$ . Используя систему (2) при указанных

ограничениях, получаем следующее уравнение относительно угла  $\theta$ , справедливое в угловой фазе для  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{EMA}$  и  $\theta < 0$ .

$$\begin{aligned} & \cos\theta \left[ \left( 0,4 \frac{H}{H_{C1}} \right)^4 - 1 \right] + \left\{ 1,6 \frac{H}{H_{C1}} \cos^2\theta - (3\cos^2\theta + \cos 2\theta) \left[ \left( 0,4 \frac{H}{H_{C1}} \right)^3 + 0,4 \frac{H}{H_{C1}} \right] \right\} + \\ & + \cos\theta \left\{ 2\cos^2\theta + 2 \left( 0,4 \frac{H}{H_{C1}} \right)^2 - (\cos^2\theta + \cos 2\theta) \left[ 3 \left( 0,4 \frac{H}{H_{C1}} \right)^2 + 1 \right] \right\} - \\ & - 0,4 \frac{H}{H_{C1}} \left[ \cos^2\theta (\cos^2\theta + 3\cos 2\theta) - (3\cos^2\theta + \cos 2\theta) \right] - \sin^2\theta \cos\theta (1 - \cos 2\theta) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $H_{C1} = \sqrt{|b|E} - d$  – поле перехода между антиферромагнитной и угловой фазами (см. [8]).

Уравнение (3) допускает только численные решения. Эти решения и соответствующие им поля приведены в таблице 1.

*Таблица 1 - Рассчитанные зависимости угла  $\theta$ , определяющего ориентацию вектора антиферромагнетизма  $\mathbf{l}$  и магнитной восприимчивости от величины продольного магнитного поля*

$0,4 \frac{H}{H_C}$	0,425	0,4375	0,45	0,455	0,46	0,465	0,47	0,475	0,5	0,525
$\theta$ (градусы)	6	8,73	10,8	11,54	12,22	12,87	13,48	14,07	16,7	19
Восприимчивость	3,74	4,79	6,78	3,54	3,37	3,2	3,05	2,95	2,535	2,2

Значения угла  $\theta$  указаны, начиная с  $\theta = 6^0$ , так как при меньших значениях угла  $\theta$  уравнение (3) не корректно (начинает проявляться пренебрежение параметром  $a_2$ ). Для угловой фазы и при указанных выше ограничениях выражение для приведенной намагниченности  $m$  имеет вид

$$m = \frac{H_{C1}}{0,4E} \left( 0,4 \frac{H}{H_{C1}} + \cos\theta \right) \sin\theta. \quad (4)$$

Используя решения уравнения (3), приведенные в таблице, и выражение (4) для намагниченности можно определить значение восприимчивости в окрестности любого найденного решения. Покажем это на примере одного из решений, приведенных в таблице. Например, возьмем решение  $\theta = 6^0$ . Этому решению соответствует поле  $H$ , удовлетворяющее условию  $0,4 \frac{H}{H_{C1}} = 0,425$ .

Положим в уравнении (3) поле

$$0,4 \frac{H}{H_{C1}} = 0,425 + K_1 \quad (5)$$

и соответственно угол

$$\theta = 6^0 + \theta_1. \quad (6)$$

Далее, принимая во внимание, что при условии  $K_1 \ll 1$ , выполняется также и условие  $\theta_1 \ll 1$ , находим из уравнения (3)

$$\theta_1 = 2,6 K_1. \quad (7)$$

Используя (5) – (7), получаем из выражения (4)

$$m_1 = 0,15 + 3,74 K_1. \quad (8)$$

В этом случае восприимчивость в окрестности поля  $0,4 \frac{H}{H_{C1}} = 0,425$  и угла  $\theta = 6^\circ$  равна

$$\frac{\partial m_1}{\partial K_1} = 3,74. \quad (9)$$

Аналогичным образом определены все остальные значения восприимчивости в окрестности найденных решений и соответствующих им полей (табл. 1). На основании данных величин, приведенных в таблице 1, на рис. 2 построена зависимость восприимчивости от поля. Обращает на себя внимание тот факт, что интервал полей, в котором существует резкий максимум восприимчивости, в десятки (если не в сотни) раз меньше интервала полей, в котором реализуется угловая фаза. То же самое следует из экспериментальных исследований фторида кобальта, если признать, что отсутствие особенности на зависимости от величины поля частоты антиферромагнитного резонанса в поле  $H_{C2}$  (см. рис. 4 в работе [6]) является экспериментальным доказательством сохранения в  $\text{CoF}_2$  угловой фазы вплоть до поля spin – flip перехода<sup>1)</sup>.

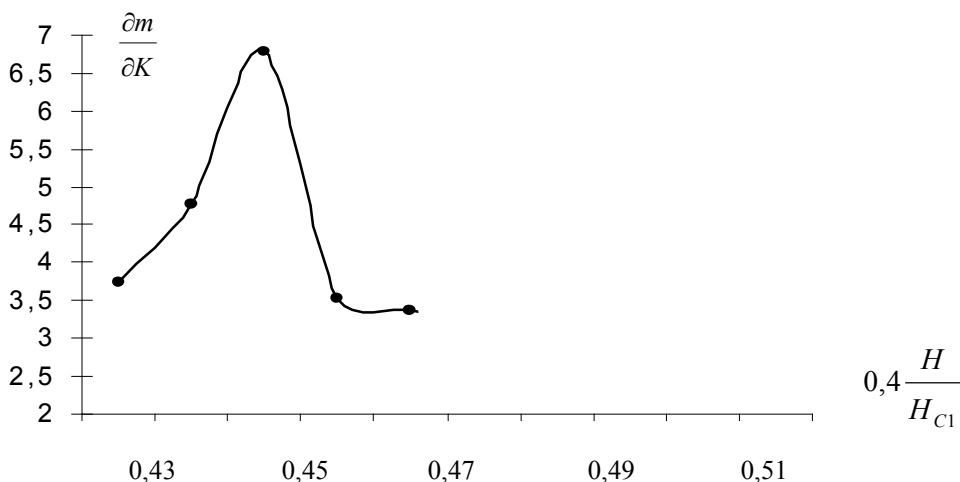


Рисунок 2 - Зависимость магнитной восприимчивости в тетрагональном легкоосном антиферромагнетике от продольного магнитного поля

<sup>1)</sup> Заметим, что, как обращают внимание авторы [6], пик восприимчивости такой амплитуды ( $\sim 10^3$ ) еще не доказывает наличия в поле  $H_{C2}$  перехода первого рода (см. стр. 1945 в [6]).

## ВЫВОДЫ

Таким образом, из выполненной работы следует существование особенностей магнитной восприимчивости вне линий и точек фазовых переходов, что представляет научный и научно-технический интерес.

## SUMMARY

MAGNETIC RECEPTIVITY OF TETRAGONAL ANTYFERROMAGNETYCS IN AN ANGULAR PHASE

*O.G. Medvedovskaya, O.A. Horyzenko,*

*Sumy State Pedagogical University, Romens'ka str., 87, Sumy, 40002*

*G.K. Chepurnykh*

*Applied Physics Institute, 58, Petropavlovskaya St., 40030, Sumy, Ukraine*

*For lightaxis tetragonal antyferromagnetyks, to magnetize of undergrating of which does not depend on the size of the field and the cooperation of Dzaloshinsky is prevailing, the calculation of magnetic receptivity in the longitudinal magnetic field is produced. It is proved, that after transition of magnetic subsystem in an angular phase, with the increase of the field, receptivity increases sharply, and after achievement of maximal value - slumps, i.e. in a difference from ferrymagnetyks the found receptivity in an angular phase is substantially inconstant and will be realized in the interval of the fields in ten one times less that interval, which an angular phase is in.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – Москва: Наука, 1982.– С. 613.
2. Туров Е.А.. Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. – Москва: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 218.
3. Изюмов Ю.А., Скрябин Ю.Н. Модель двойного обмена и уникальные свойства манганитов // УФН. – 2001. –Т.171, № 2. – С.121-147.
4. Абдулвагидов Ш.Б., Камилов И.К., Алиев А.М., Батдалов А.Б. Теплоемкость и электросопротивление манганита  $\text{Sm}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{MnO}_3$  вблизи  $T_c$  в полях до 26 кЭ: флуктуационные эффекты и сценарий развития колоссального магнитосопротивления // ЖЭТФ. – 2003. –Т.123, Вып. 4. – С. 857-866.
5. Харченко Н.Ф., Еременко В.В., Белый Л.И. Магнитооптические исследования индуцированного продольным магнитным полем неколлинеарного состояния антиферромагнитного фторида кобальта // ЖЭТФ. – 1982. – Т.82, № 3. – С. 827.
6. Гуртовой К.Г., Лагутин А.С., Ожогин В.И. Неколлинеарные магнитные фазы в сильно анизотропном антиферромагнетике  $\text{CoF}_2$  с большим взаимодействием Дзялошинского // ЖЭТФ. – 1982. – Т.83, № 5(11). – С.1941.
7. Гуртовой К.Г., Лагутин А.С., Ожогин В.И. Магнитная фазовая диаграмма ферритов-гранатов системы  $\text{Y}_{3-x}\text{GdFe}_5\text{O}_{12}$  в полях до 50 Т // ЖЭТФ. – 1980. – Т. 78, № 2. – С.847.
8. Чепурных Г.К., Иваний В.С., Медведовская О.Г., Никитина О.А. Особенности фазовых переходов в легкоосных тетрагональных антиферромагнетиках // ФТТ. – 1999. – Т. 41, № 11. – 2044.

*Поступила в редакцию 6 октября 2006 г.*