

XXIV Международная научная конференция

НОВОЕ в
МАГНЕТИЗМЕ и
МАГНИТНЫХ
МАТЕРИАЛАХ



1 – 8 июля 2021 года
Сборник трудов

Москва, 2021

537.632

АНОМАЛИИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНОГО ЛИНЕЙНОГО ДИХРОИЗМА И МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В $\text{HoFe}_3(\text{VO}_3)_4$

Малаховский А.В.

д. ф.-м. н., с.н.с., Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск,
Россия

Гудим И.А.

к. ф.-м. н., с.н.с., Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск,
Россия

Качур И.С.

к. ф.-м. н., с.н.с. Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН
Украины, Харьков, Украина

Пирятинская В.Г.

к. ф.-м. н., с.н.с., Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН
Украины, Харьков, Украина

***Аннотация.** Исследован магнитный линейный дихроизм (МЛД) перехода $^5I_8 \rightarrow ^5F_3$ в базисной плоскости монокристалла $\text{HoFe}_3(\text{VO}_3)_4$ при распространении света вдоль тригональной оси c при температуре 2К в функции от магнитного поля 0-65 кЭ, направленного вдоль c -оси. МЛД – чётная функция магнитных моментов. Однако было обнаружено, что дихроизм между поляризациями вдоль a и b осей в магнитном поле, параллельном тригональной оси c , не только существует в лёгкоосном состоянии кристалла, но и меняет знак при смене знака поля. Таким образом, магнитное поле $H||c$ нарушает аксиальную симметрию магнитной структуры гольмия в изученных возбуждённых состояниях. Мы доказали существование спонтанной электрической поляризации в $\text{HoFe}_3(\text{VO}_3)_4$ при 2 К и рассмотрели магнитоэлектрическое взаимодействие, как один из источников нарушения аксиальной симметрии и других особенностей локальных магнитных свойств гольмия.*

***Ключевые слова:** магнитный линейный дихроизм, магнитоэлектрическое взаимодействие, f - f переходы, возбуждённые состояния, локальные магнитные свойства*

ANOMALIES OF MAGNETIC LINEAR DICHROISM BEHAVIOR AND MAGNETO-ELECTRIC INTERACTION IN $\text{HoFe}_3(\text{VO}_3)_4$

Malakhovskii A.V.

Dr.Sc., Kirensky Institute of Physics, KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation.

Gudim I.A.

PhD, Kirensky Institute of Physics, KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation.

Kachur I.S.

PhD, B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkiv,
Ukraine.

Piryatinskaya V.G.

PhD, B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkiv,
Ukraine.

Annotation. We studied spectra of magnetic linear dichroism (MLD) of $^5I_8 \rightarrow ^5F_3$ transition in the basal plane of the $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ single crystal in the light propagated along the trigonal c axis at temperature 2 K as a function of magnetic field $0 - 65$ kOe directed along c axis. MLD is an even function of magnetic moments. However it was found, that dichroism between polarizations along a and b axis in the magnetic field parallel to the trigonal c axis not only exists in the easy axis state of the crystal, but it changes sign with the changing of the field sign. Thus, magnetic field $H||c$ violates the axial symmetry of the Ho magnetic structure in the studied excited states. We proved existence of a spontaneous electric polarization in $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ at 2 K and considered magneto-electric interaction as one of the sources of violation of the axial symmetry and of other features of the local holmium magnetic properties.

Keywords: magnetic linear dichroism, magneto-electric interaction, f - f transitions, excited states, local magnetic properties

При температуре 360 К тригональный кристалл $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ испытывает фазовый переход с понижением симметрии от $R32$ к $P3_121$. В низкосимметричной фазе ионы Ho^{3+} занимают позиции с симметрией C_2 . При температуре 38-39 К кристалл становится антиферромагнетиком типа «лёгкая плоскость». При понижении температуры до $T_{SR} = 4.7$ К происходит спонтанный фазовый переход в лёгкоосное состояние. При этом моменты железа направлены вдоль тригональной оси c , а моменты гольмия образуют осесимметричную спиральную структуру с направлением среднего момента трёх соседних ионов спирали также вдоль оси c [1]. При $T < T_{SR}$ приложение магнитного поля H_{SR} вдоль любой из кристаллографических осей приводит к реориентационному переходу в лёгкоплоскостное состояние. В частности, при 2 К $H_{SR} = 5.7$ кЭ в поле $H||c$.

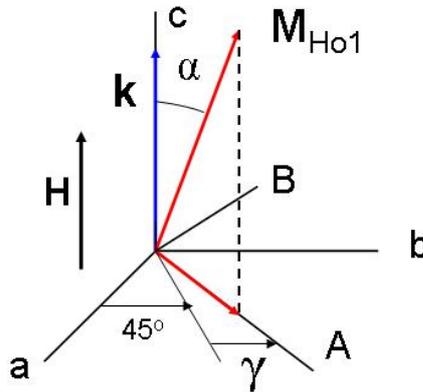


Рис. 1. Схема эксперимента. a параллельно оси C_2 , $b \perp a$.

Оптические спектры поглощения $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ исследовались нами в ряде работ (например, [2]). В настоящей работе представлено исследование магнитного линейного дихроизма (МЛД). Линейно поляризованный свет распространялся вдоль тригональной оси c кристалла; в этом же направлении прикладывалось и внешнее магнитное поле (рис. 1). Магнитный момент M_{Ho1} возбуждённого атома определяет МЛД перехода, который может быть записан в виде: $\Delta k_M = k_A - k_B \sim M_{\text{Ho1}}^2 \sin^2 \alpha$. Здесь k_A и k_B – коэффициенты поглощения нормальных волн, поляризованных вдоль (A) и перпендикулярно (B) проекции M_{Ho1} на ab -плоскость, соответственно. Мы измеряли коэффициенты поглощения волн, поляризованных вдоль a - и b -осей и соответствующий дихроизм $\Delta k_H = k_a - k_b$. Можно показать, что при малом МЛД:

$$\Delta k_H = -\Delta k_M \sin 2\gamma \sim M_{\text{Ho1}}^2 \sin^2 \alpha \sin 2\gamma \quad (1)$$

Величины Δk_H были измерены при $T=2$ К в области перехода $^5I_8 \rightarrow ^5F_3$ в функции магнитного поля $0 - 65$ кЭ (рис. 2). Состояние 5F_3 расщепляется в кристаллическом поле симметрии C_2 следующим образом: $A_2(F1) + (A_2 + A_1 + A_2)(F2) + (A_1 + A_1 + A_2)(F3)$. Переход в состояние F1 очень

слаб. Основываясь на соотношении (1), можно показать, что для осесимметричной спиральной структуры $\Delta k_H=0$. Существование МЛД в поле $H||c$ ниже H_{SR} означает, что магнитные моменты гольмия в спирали не эквивалентны относительно тригональной оси, и средний магнитный момент M_{Ho} трёх соседних ионов спирали не параллелен оси c .

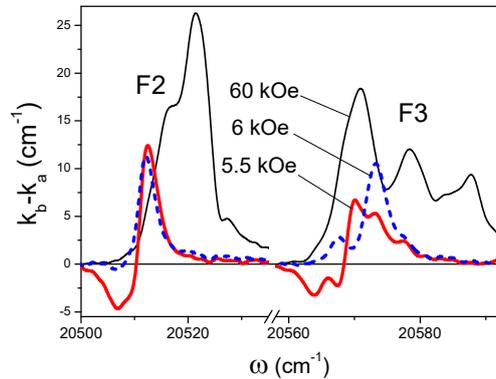


Рис. 2. Спектры МЛД полос F2 и F3 в поле $H||c$ ниже (5.5 кЭ) и выше (6 и 60 кЭ) H_{SR}

Сразу после перехода в лёгкоплоскостное состояние ($H>H_{SR}$) направления магнитных моментов железа близки к базисной плоскости [3]. Если бы ориентация среднего момента гольмия M_{Ho} в возбуждённом состоянии следовала за ориентацией момента железа M_{Fe} , то МЛД сильно увеличился бы скачком после реориентационного перехода в соответствии с (1) и уменьшался бы при дальнейшем увеличении поля. Однако наблюдаются противоположные явления (рис. 2). Такое поведение МЛД возможно, если в рассматриваемом возбуждённом состоянии M_{Ho} почти не изменяет ориентацию при реориентационном переходе кристалла, и M_{Ho} и M_{Fe} приблизительно взаимно перпендикулярны при $H>H_{SR}$.

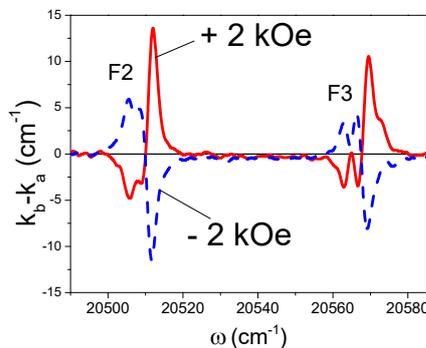


Рис. 3. Спектры МЛД в противоположных магнитных полях

На рис. 3 представлены спектры МЛД в магнитных полях противоположного знака, направленных вдоль c -оси. Спектры практически идентичны, но имеют разные знаки. Такая же ситуация сохраняется до 65 кЭ. Симметрия спектра относительно $H=0$ означает, в частности, что в строго нулевом поле МЛД действительно равен нулю. МЛД – чётная функция магнитных моментов (1). Поэтому можно было предположить, что МЛД будет чётной функцией также и магнитного поля. Однако это не так, и мы имеем дело с особым поведением спиральной структуры в магнитном поле. Прежде всего, ненулевой МЛД в поле $H||c$ ниже H_{SR} означает, что средний момент M_{Ho} не параллелен оси c в соответствии с (1). Изменение знака МЛД при изменении знака поля означает, что M_{Ho} не изменяет знак, а вращается (угол γ в (1) изменяет знак), иначе МЛД был бы неизменен, так как МЛД – чётная функция магнитных моментов. Зеемановская энергия конкурирует с магнитно кристаллической анизотропией, приводя к реориентации спиральной магнитной структуры с изменением магнитного поля [4].

Далее мы обнаружили, что поворот образца на 180° вокруг a -оси изменяет знак МЛД, когда $H||c$ (рис. 4). Это возможно, если при 2 К существует спонтанная независимая от магнитного поля электрическая поляризация. При таком повороте изменяется также абсолютная величина МЛД. Это означает, что электрическая поляризация не параллельна ни одной из осей a , b и c . Поскольку существует электрическая поляризация, возможна оптическая магнитоэлектрическая анизотропия направления, которая предположительно проявляется при распространении света вдоль вектора $\mathbf{P} \times \mathbf{M}$, где \mathbf{P} – электрическая поляризация, а \mathbf{M} – намагниченность. В нашем случае существует небольшая компонента M_{Ho} , перпендикулярная распространению света, что необходимо для эффекта. В поле $H||a, b$ компонента $M \perp k$ велика, но зависимость МЛД от знака поля не наблюдалась. Следовательно, мы имеем дело с влиянием магнитоэлектрического взаимодействия на магнитную структуру, которая, в свою очередь, влияет на МЛД.

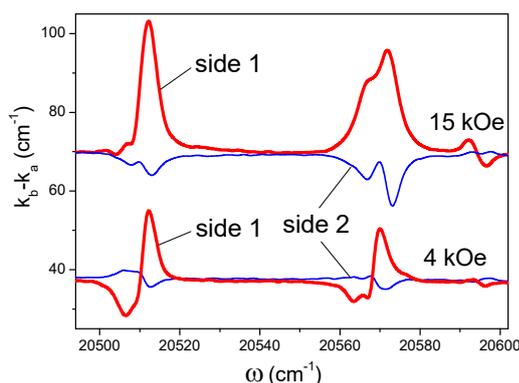


Рис. 4. Спектры МЛД при падении света с разных сторон образца

Магнитоэлектрическое взаимодействие характеризуется вкладом в свободную энергию: $E \sim \mathbf{P} \cdot (\mathbf{M} \times \mathbf{L})$, где L – параметр антиферромагнитного порядка. Соответственно, оно требует одновременного нарушения инвариантности относительно пространственной и временной инверсии. В частности, необходимо существование намагниченности \mathbf{M} . Аксиально симметричная антиферромагнитная структура гольмия не нарушается в строго нулевом магнитном поле, как было показано выше. Внешнее магнитное поле создаёт намагниченность и, следовательно, включает магнитоэлектрическое взаимодействие, которое влияет на магнитную структуру. Таким образом, локальное магнитное поведение иона гольмия определяется обменным взаимодействием Ho-Fe, локальной магнитной анизотропией и магнитоэлектрическим взаимодействием. Всё это существенно связано с возбуждённым состоянием гольмия.

А.В. Малаховский благодарит за финансовую поддержку РФФИ грант № 19-02-00034, а также Российский фонд фундаментальных исследований, Правительство Красноярского края и Красноярский краевой фонд науки в рамках научного проекта: № 19-42-240003 «Влияние локального окружения на магнитооптические свойства $f-f$ переходов в редкоземельных алюмоборатах и ферроборатах»

Список использованных источников:

- [1] Ritter C., Vorotynov A., Pankrats A., Petrakovskii G., Temerov V., Gudim I., Szymczak R. Magnetic structure in iron borates $RFe_3(BO_3)_4$ ($R = Y, Ho$): a neutron diffraction and magnetization study // J. Phys.: Condens. Matter. – 2008. – V. 20. – P. 365209-1–365209-9.
- [2] Malakhovskii A.V., Gnatchenko S.L., Kachur I.S., Piryatinskaya V.G., Gudim I.A. Transformation of the $HoFe_3(BO_3)_4$ absorption spectra at reorientation magnetic transitions and local properties in the excited 5F_5 states of the Ho^{3+} ion // Phys. Rev. B. – 2017. – V. 96. – P. 224430 (1 – 10).
- [3] Демидов А.А., Волков Д.В. Магнитные свойства $HoFe_3(BO_3)_4$ // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, № 5. – С. 926-935 [Physics of the Solid State. – 2011. – V. 53, № 5. – P. 985-996].
- [4] Milde P. et al. Field-induced reorientation of helimagnetic order in Cu_2OSeO_3 probed by magnetic force microscopy // Phys. Rev. B. – 2020. – V. 102. – P. 024426 (1 – 11).