

## ОБ ОДНОЗНАЧНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРИОДА ГЕЛИКОИДАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ В ТЯЖЕЛЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МАГНЕТИКАХ ОТ ОТНОШЕНИЯ $c/a$ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ И ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ ЭТОЙ ЗАВИСИМОСТИ С ЭЛЕКТРОННЫМ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДОМ

А.В. Андрианов

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова*

119899, Москва

Поступила в редакцию 16 апреля 1992 г.

Установлено, что период геликоидальной магнитной структуры в редкоземельных магнетиках Tb, Dy, Ho, Er однозначно определяется отношением  $c/a$  гексагональной кристаллической решетки этих металлов. Вид этой зависимости может быть объяснен в предположении, что экстремальный диаметр поверхности Ферми, определяющий, по Дзялошинскому, период геликоида, испытывает корневую особенность в результате электронного топологического перехода при  $(c/a)_{cr} = 1,582$ .

Тяжелые редкоземельные магнетики (ТМЗМ) пристально изучаются уже более тридцати лет<sup>1-3</sup>. Однако вопрос о природе геликоидальных (спиральных) антиферромагнитных структур, реализующихся в некоторых из них (Tb, Dy, Ho, Er; их сплавы друг с другом, Gd, Y и т.п.) не считается окончательно решенным<sup>3</sup> (см. ниже).

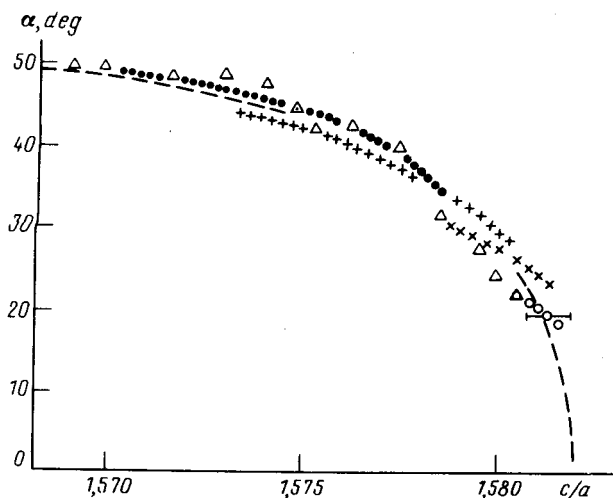
Обменное взаимодействие в этих металлах обусловлено влиянием электронов проводимости (РККИ-взаимодействие). Все эти вещества настолько близки по физическим свойствам, что их можно рассматривать как разные модификации одного и того же объекта. В частности, все они имеют гексагональную плотноупакованную решетку с близкими параметрами.

При этом обстоятельстве появления геликоидальной структуры достаточно разнообразны. В Tb, Dy, Ho она возникает одновременно с магнитным упорядочением при температуре Нееля  $T_N$  и превращается (переходом первого рода) в ферромагнитную фазу при  $T_1 < T_N$ . Например, в Dy,  $T_N = 179$  K,  $T_1 = 85$  K; в Tb  $T_N = 230$  K,  $T_1 = 219$  K. Аналогично ведут себя и сплавы этих элементов с иттрием; при концентрации Y выше некоторой геликоид существует вплоть до самых низких температур. Период геликоида плавно возрастает с понижением температуры. Аномалии, связанные с соизмеримостью решетки и геликоида, малы (если вообще существуют<sup>4</sup>).

В Er, наоборот, геликоидальная структура реализуется лишь при низких температурах при  $T < T_1 = 20$  K.

С изменением температуры, разумеется, меняются также параметры кристаллической решетки. Однако существование геликоидальной структуры не нарушает симметрии решетки; она остается гексагональной<sup>2</sup>.

На рисунке приведено семейство зависимостей угла поворота геликоида  $\alpha$  (пропорционального обратному периоду, а также волновому вектору геликоида  $k_H$ :  $k_H = 2\pi/c \cdot 2\alpha/360^\circ$ ) от отношения  $c/a$  кристаллической решетки для всех четырех указанных элементов и для сплава Tb<sub>0,91</sub>Y<sub>0,09</sub>. Данные взяты из<sup>1-3</sup>. (В эксперименте оба этих параметра суть функции температуры, но из рисунка температура исключена. С понижением температуры отношение  $c/a$  увеличивается). Зависимость для Er сводится к одной точке (в области существования в нем геликоида его параметры почти не меняются). Там же приведены величины углов геликоида в различных сплавах Tb-Y при их температурах Нееля.



Зависимости угла геликоида  $\alpha$  от отношения  $c/a$  кристаллической решетки:  $\bullet$  — Ho,  $+$  — Dy,  $\times$  — сплав  $Tb_{0,91}Y_{0,09}$ ,  $\circ$  — Tb,  $\Delta$  — Er во всем диапазоне существования геликоида;  $\Delta$  — различные сплавы  $Tb_xY_{1-x}$  при их температурах Нееля

Видно, что все эти зависимости в пределах ошибок измерения лежат на одной плавной кривой (пунктир).

Таким образом, при всем разнообразии температурных интервалов существования геликоидальных структур в ТРЗМ, период геликоида однозначно определяется отношением  $c/a$  кристаллической решетки и ничем больше.

Причина этого представляется следующей. Период геликоидальной структуры должен однозначно определяться свойствами РККИ-взаимодействия. Но само это взаимодействие определяется лишь формой поверхности Ферми данного металла. А так как структура внешних электронных оболочек у всех ТРЗМ одинакова, то форма поверхности Ферми, в свою очередь, должна однозначно определяться отношением  $c/a$  кристаллической решетки. Это и означает однозначную связь между отношением  $c/a$  и периодом геликоида. (Приведенное рассуждение ничего не говорит об условиях самого существования геликоидальной структуры. Этот вопрос представляется значительно более сложным и в работе не рассматривается).

Данные по сплавам ТРЗМ также подтверждают универсальность зависимости рис.1. Так, известно, что в сплавах Tb, Dy, Er, Ho с Y, при увеличении содержания иттрия угол геликоида  $\alpha$  монотонно возрастает, стремясь к  $50^\circ$ <sup>3</sup>. Из рисунка видно, что такой зависимости и следует ожидать - чистому гексагональному иттрию ( $c/a = 1,569$ ) соответствует как раз  $A = 50^\circ$ ; во всех указанных сплавах значение  $c/a$  больше, и угол геликоида должен быть меньше.

Известно также, что в сплавах Tb-Gd антиферромагнетизм (то есть геликоид) не реализуется при содержании гадолиния выше 6 ат.%, в сплавах Dy-Gd - при содержании гадолиния больше 50 ат.%, в сплавах Gd-Y - при содержании гадолиния больше 63 ат.%.<sup>3</sup> Отношение  $c/a$  для гадолиния в парамагнитной фазе равно 1,590<sup>3</sup>, то есть значительно больше  $(c/a)_{cr}$ . Легко видеть, что для всех этих систем значение  $c/a$  при пороговой концентрации гадолиния (в парамагнитной фазе) равно  $1,582 \pm 0,0005$ , т.е. совпадает с  $(c/a)_{cr}$ . (В сплавах ТРЗМ друг с другом и с иттрием параметры решетки линейно зависят от концентраций компонент). Это полностью согласуется с предположением, что при  $c/a > (c/a)_{cr}$  геликоидальная структура не реализуется вообще.

Итак, все имеющиеся экспериментальные данные указывают на универсальный для всех трех ТРЗМ и их сплавов характер зависимости угла геликоида от параметра  $c/a$ . Встает вопрос о физической природе такой зависимости.

Обратим внимание, что угол геликоида меняется в несколько раз при изменении отношения  $c/a$  менее чем на один процент. Настолько резкий ход и общий характер этой зависимости наводит на мысль об электронном топологическом переходе при  $(c/a)_{cr} = 1,582$  и о связанной с таким переходом характерной корневой особенности<sup>5</sup>. Расчеты<sup>6,7</sup> поверхности Ферми ТРЗМ (прямые экспериментальные данные отсутствуют) показывают, что такой переход типа "разрыв перемычки" действительно может иметь место (разрыв так называемой "ленточной особенности"), причем перемычка существует при меньших  $c/a$ .

Согласно Дзялошинскому<sup>8</sup> волновой вектор геликоидальной структуры  $k_H$  должен быть равен одному из экстремальных диаметров поверхности Ферми. В ТРЗМ таким диаметром предположительно является поперечный диаметр той самой ленточной особенности<sup>7</sup>. При разрыве этот диаметр должен изменяться как  $(\epsilon_{cr} - \epsilon_F)^{1/2}$ ,  $\epsilon_F$  - энергия Ферми,  $\epsilon_{cr}$  - ее критическое значение. Считая, что  $\epsilon_F$  и  $\epsilon_{cr}$  линейно зависят от  $c/a$ , получаем, что в первом приближении  $k_H \propto ((c/a)_{cr} - c/a)^{1/2}$ .

Таким образом, по Дзялошинскому волновой вектор геликоида  $k_H$  и его угол  $\alpha$  вблизи перехода должны испытывать корневую аномалию по параметру  $c/a$ , причем с той стороны, где перемычка существует, то есть со стороны меньших  $c/a$ . Именно такой ход мы наблюдаем на рисунке.

С другой стороны, существует традиционный феноменологический подход, объясняющий существование геликоида исключительно конкуренцией обменных взаимодействий между ближайшими, "через одного" и так далее узловыми моментами<sup>2</sup>. Однако в рамках этого подхода кажется невозможным объяснить наблюдаемую резкую зависимость угла геликоида от  $c/a$  - трудно представить, чтобы константы РККИ-обмена, определяемые интегрально всеми электронами проводимости, изменились в несколько раз (что необходимо для наблюдаемого изменения угла  $\alpha$ ) при изменении отношения  $c/a$  меньше чем на один процент.

Окончательные выводы представляются такими. Период геликоидальных магнитных структур в ТРЗМ действительно однозначно определяется экстремальным диаметром ленточной особенности на поверхности Ферми. При этом сам этот диаметр задается отношением  $c/a$  кристаллической решетки и испытывает по этому параметру корневую особенность, связанную с электронным топологическим переходом при  $(c/a)_{cr} = 1,582$ . Эта особенность отражается такой же особенностью в зависимости угла геликоида от  $c/a$ .

Итак, получено несколько менее косвенное, чем раньше, подтверждение справедливости выводов Дзялошинского для ТРЗМ. Если выводы работы справедливы, то редкоземельные магнетики - первый пример объекта, где электронный топологический переход не только отражается в кинетических параметрах, но и однозначно определяет магнитную структуру.

Автор выражает свою благодарность М.И.Каганову, А.Н.Васильеву, Ю.П.Гайдукову и С.А.Никитину за полезные обсуждения.

1. К.Тейлор, М.Дарби, Физика редкоземельных соединений. М.: Мир, 1974.
2. К.П.Белов, М.А.Беляникова, Р.З.Левитин, С.А.Никитин, Редкоземельные ферро- и антиферромагнетики. М.: Наука, 1965.
3. С.А.Никитин, Магнитные свойства редкоземельных металлов. - М.: изд-во МГУ, 1989.
4. В.Г.Бессергенов, В.В.Гюгава, А.Г.Манджавидзе и др., Письма в ЖЭТФ **47**, 92 (1988).
5. И.М.Лившиц, ЖЭТФ, **33**, 1569 (1960).
6. T.Loucks, Phys. Rev. **144**, 504 (1966).
7. S.Liu, Electronic structure of Rare Earth Metals. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earth Eds. K.Gscheider, and L.Eyring, North Holland Company **3**, 235 (1978).
8. И.Е.Дзялошинский, ЖЭТФ **47**, 336 (1964).