

PACS: 75.30. — М. УДК 537.61

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В МАГНЕТИКАХ С ТЕНЗОРНЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И. П. Шаповалов, П. А. Сайко

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,
42, ул. Пастера, Одесса, 65000, Украина
e-mail: dtp@onu.edu.ua

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В МАГНЕТИКАХ С ТЕНЗОРНЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И. П. Шаповалов, П. А. Сайко

Аннотация. Исследованы фазовые переходы в одноосных магнитных кристаллах с тензорными взаимодействиями. Рассмотрен случай, когда значение атомных спинов S равно единице, а внешнее магнитное поле h направлено вдоль кристаллографической оси (ось z). При этих условиях в системе могут реализоваться три одноподрешеточные аксиально-симметричные фазы: ферромагнитная (ФМФ), квадрупольная (КФ) и парамагнитная (ПМФ). В координатах температура-поле построена фазовая диаграмма системы. На диаграмме имеется тройная точка, координаты которой зависят от параметров гамильтониана. При фиксированной температуре индуцируемые увеличением магнитного поля фазовые переходы (ФП) первого рода из КФ в ФМФ происходят при определенном значении поля h_c и сопровождаются скачкообразным возникновением в системе большого магнитного момента. При низких температурах величина h_c практически не зависит от температуры, что позволяет использовать изучаемый кристалл в качестве низкотемпературного датчика, сигнализирующего о достижении магнитным полем критического значения h_c .

Ключевые слова: магнетики, кристаллическое поле, биквадратный обмен, фазовые переходы, датчики магнитного поля

ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ В МАГНЕТИКАХ З ТЕНЗОРНИМИ ВЗАЄМОДІЯМИ Й НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ДАТЧИКИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

И. П. Шаповалов, П. О. Сайко

Анотація. Досліджено фазові переходи в одноосьових магнітних кристалах з тензорними взаємодіями. Розглянуто випадок, коли значення атомних спінів S дорівнює одиниці, а зовнішнє магнітне поле h спрямоване уздовж кристаллографічної осі (вісь z). При цих умовах у системі можуть реалізуватися три одно-підграткові аксиально-симетричні фази: феромагнітна (ФМФ), квадрупольна (КФ) і парамагнітна (ПМФ). У координатах температура-поле побудована фазова діаграма системи. На діаграмі є потрійна точка, координати якої залежать від параметрів гамільтоніана. При фіксованій температурі індуковані збільшенням магнітного поля фазові переходи (ФП) першого роду із КФ у ФМФ відбуваються при певному значенні поля h_c й супроводжуються стрибкоподібним виникненням у системі великого магнітного моменту. При низьких температурах величина h_c практично не залежить від температури, що дозволяє використовувати досліджуваний кристал як низкотемпературний датчик, що сигналізує про досягнення магнітним полем критичного значення h_c .

Ключові слова: магнетики, кристалічне поле, біквдратний обмін, фазові переходи, датчики магнітного поля

**PHASE TRANSITIONS IN MAGNETS WITH TENSOR INTERACTIONS
AND LOW-TEMPERATURE MAGNETIC FIELD SENSORS**

I. P. Shapovalov, P. A. Sayko

Abstract. Phase transitions in uniaxial magnetic crystals with tensor interactions are investigated. The case of the unity atomic spin values S and where external magnetic field h is directed along the crystallographic axis (the z -axis) is considered. Under these conditions in system three single-sublattice axial symmetrical phases: ferromagnetic (FMP), quadrupole (QP) and paramagnetic (PMP) phases can be realised. In the temperature-field coordinates the phase diagram of system is plotted. There is a triple point in the diagram, whose coordinates depend on the Hamiltonian parameters. At the fixed temperature the phase transitions (PT) of the first kind from the QP to the FMP induced by increase of the magnetic field occur at certain value of the field h_c and are accompanied by an abrupt appearance in system of the large magnetic moment. At low temperatures the value h_c practically does not depend on temperature that allows to use a studied crystal as the low-temperature sensor signalling about achievement by a magnetic field of critical value h_c .

Keywords: magnets, a crystal field, a biquadrate exchange, phase transitions, magnetic field sensors

1. Гамильтониан системы и аксиально-симметричные фазы

При значении атомного спина $S=1$ в магнитном кристалле помимо обычного обменного взаимодействия (ОВ) возможны два типа тензорных взаимодействий: взаимодействие спинов с кристаллическим полем и биквадратный обмен (БО). Гамильтониан, учитывающий наличие внешнего магнитного поля и все перечисленные типы взаимодействий, имеет вид

$$H = -h \sum_i S_i^Z - \sum_{i,j(i \neq j)} J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j + D \sum_i O_{2i}^0 - \sum_{i,j(i \neq j)} K_{ij} (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j)^2, \quad (1)$$

где J_{ij} — константы ОВ, D — константа кристаллического поля, K_{ij} — константы БО. Квадрупольный оператор O_2^0 связан с z -компонентой оператора спина соотношением

$$O_2^0 = (S^Z)^2 - (2/3) \cdot I, \quad (2)$$

где I — единичный оператор.

Первый член в гамильтониане (1) — это энергия атомных спинов во внешнем магнитном поле (зеemanовская энергия), второй член — энергия ОВ, третий член — энергия спинов в кристаллическом поле, четвертый член — энергия БО.

В настоящей работе мы ограничились рассмотрением одноподрешеточных структур в легкоплоскостных магнетиках, что обеспечивается условием $J_{ij} > 0$, $K_{ij} > 0$, $D > 0$.

В системе, описываемой гамильтонианом (1), могут реализоваться три одноподрешеточные аксиально-симметричные фазы. Первая из них — ФМФ с осью ферромагнитного упорядочения, направленной вдоль оси z . Вторая — КФ, в которой при нулевой температуре ($T=0$) даже в присутствии магнитного поля h намагниченность в системе равна нулю [1]. Третья фаза — ПМФ. Спиновая структура в каждой из фаз полностью определяется двухкомпонентным параметром порядка — $\eta(\sigma, \lambda)$, где $\sigma = \langle S^Z \rangle$, $\lambda = 3 \langle O_2^0 \rangle$ [2].

В приближении молекулярного поля гамильтониан (1) принимает вид

$$H = -(h_z + J_0 \sigma) \sum_i S_i^Z + (D - 3K_0 \lambda) \sum_i O_{2i}^0, \quad (3)$$

где J_0 и K_0 равны: $J_0 \equiv \sum_i J_{ij}$, $K_0 \equiv \sum_i K_{ij}$.

В этом же приближении компоненты параметра порядка σ и λ при отличных от нуля температурах определяются системой двух уравнений [3]:

$$\sigma = \frac{2sh((h + J_0 \sigma)/\theta) \exp((K_0 \lambda - D)/\theta)}{1 + 2ch((h_z + J_0 \sigma)/\theta) \exp((K_0 \lambda - D)/\theta)}, \quad (4)$$

$$\lambda = 1 - \frac{3}{1 + 2ch((h_z + J_0 \sigma)/\theta) \exp((K_0 \lambda - D)/\theta)},$$

где θ — температура в энергетических единицах ($\theta = kT$).

Свободная энергия системы может быть представлена в виде

$$F = -\frac{2}{3}\tilde{d} -$$

$$-\theta \ln \left[1 + \exp\left(\frac{(\tilde{h}-\tilde{d})}{\theta}\right) + \exp\left(-\frac{(\tilde{h}-\tilde{d})}{\theta}\right) \right], \quad (5)$$

где \tilde{h} и \tilde{d} определяются выражениями $\tilde{h} = h + J_0\sigma$, $\tilde{d} = D - K_0\lambda$.

2. Численное исследование

Численное исследование системы (4) дало следующий результат. В случае, когда температура превышает некоторое значение T^* , система (4) при любом значении магнитного поля h имеет единственное решение. При условии $T < T^*$ для каждого значения T существует интервал значений магнитного поля, в котором система (4) имеет два решения. Одно из них соответствует КФ, другое — ФМФ. При этом линия ФП между КФ и ФМФ совпадает с линией, на которой равны значения свободной энергии в обеих фазах:

$$F(\sigma_{\text{ФМФ}}, \lambda_{\text{ФМФ}}) = F(\sigma_{\text{КФ}}, \lambda_{\text{КФ}}). \quad (6)$$

На рис.1. приведена фазовая диаграмма исследуемой системы в безразмерных координатах $\tilde{\theta} - \tilde{h}$, где $\tilde{\theta} = \theta/J_0$, $\tilde{h} = h/J_0$. В области **a** реализуется КФ, в области **b** — ФМФ, а в области **c** — ПМФ. Линия 1 определяется условием (6). Линии 2 и 3 являются границами ПМФ с КФ и ФМФ соответственно. Точка А — тройная точка КФ, ФМФ и ПМФ. Ее координаты $\tilde{\theta}^*$ и \tilde{h}^* являются функциями параметров гамильтониана.

Приведем соображения, которые были использованы для построения границ ПМФ. В КФ при фиксированном значении магнитного поля h с ростом температуры намагниченность σ увеличивается, а в ПМФ — уменьшается. Поэтому температуре перехода между КФ и ПМФ соответствует максимальное значение функции $\sigma(T)$. В ФМФ при фиксированном значении h с ростом температуры квадратичная составляющая параметра порядка λ уменьшается, проходя через ноль, а в ПМФ увеличивается, стремясь к нулю. Следова-

но, температуре перехода между ФМФ и ПМФ соответствует минимальное значение функции $\lambda(T)$. Зависимости координат тройной точки от констант \tilde{K}_0 и \tilde{D} приведены на рис. 2. и 3.

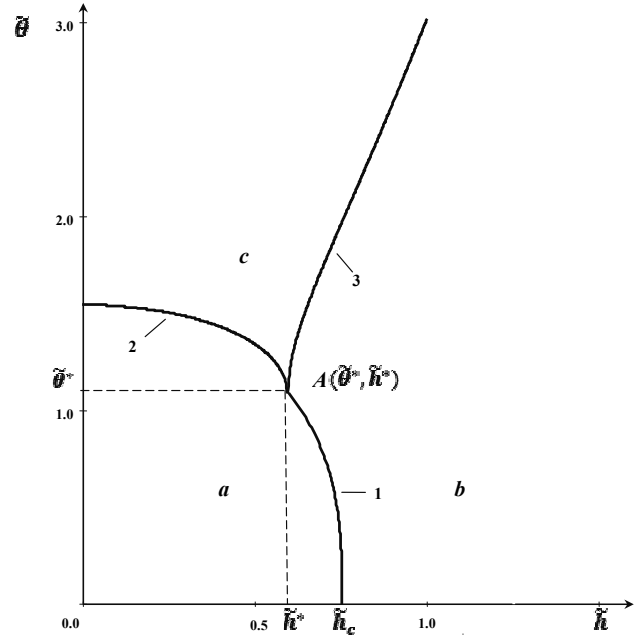


Рис. 1. Фазовая диаграмма одноосного магнетика с тензорными взаимодействиями. Диаграмма построена при $\tilde{D} = 0,5$; $\tilde{K}_0 = 1,25$

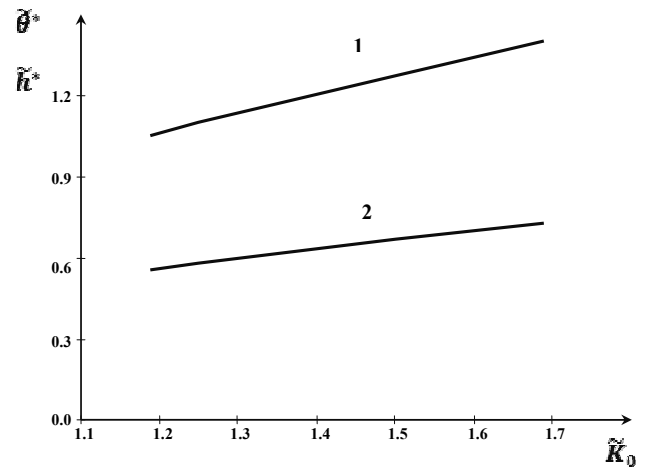


Рис. 2. Зависимость координат тройной точки от \tilde{K}_0 при $\tilde{D} = 0,5$. 1 — линия, соответствующая зависимости $\tilde{\theta}^* = f_1(\tilde{K}_0)$. 2 — линия, соответствующая зависимости $\tilde{h}^* = f_2(\tilde{K}_0)$

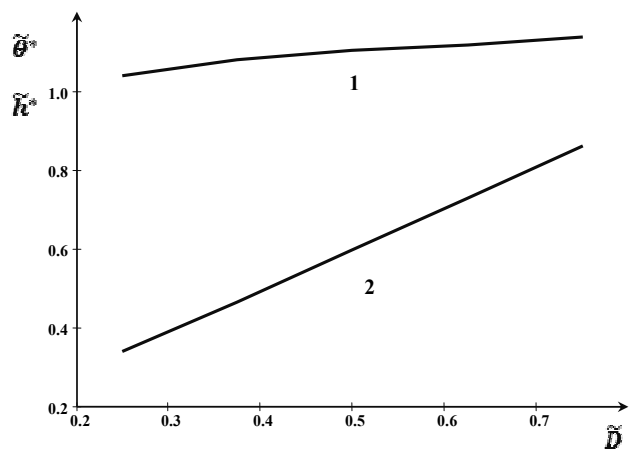


Рис. 3. Зависимость координат тройной точки от \tilde{D} при $\tilde{K}_0 = 1,25$. **1** — линия, соответствующая зависимости $\tilde{\theta}^* = f_1(\tilde{D})$; **2** — линия, соответствующая зависимости $\tilde{h}^* = f_2(\tilde{D})$

3. Датчики магнитного поля

В основе регистрации магнитного поля может быть положен следующий принцип. При условии $T < T^*$ решения системы (4) различны для различных фаз, а увеличение внешнего маг-

нитного поля индуцирует ФП из КФ в ФМФ. Этот переход происходит как ФП первого рода и сопровождается скачком намагниченности [4]. При низких температурах критическое значение магнитного поля h_c , при котором происходит ФП, практически не зависит от температуры (рис.1.). Таким образом, фиксируя скачок намагниченности σ , можно судить о достижении магнитным полем критического значения h_c .

Литература

1. Матвеев В. М., Квантовый квадрупольный магнетизм и фазовые переходы при биквадратичном обмене //ЖЭТФ. — 1973. — Т.65, № 4(10). — С.1626–1636.
2. Нагаев Э. Л., Магнетики со сложными обменными взаимодействиями. — М.:Наука, 1988. — 232с.
3. Онуфриева Ф. П., Низкотемпературные свойства спиновых систем с тензорным параметром порядка //ЖЭТФ. — 1985. — Т. 89, № 6(12). — С. 2270–2287.
4. Шаповалов І. П., Ферромагнітна фаза одновісного магнетика у присутності анізотропної биквадратичної обмінної взаємодії //УФЖ. — 2010. — Т.55, №3. — С.306–311.