

О ВОЗМОЖНОСТИ ОБМЕННО-ОБУСЛОВЛЕННОГО СКРЫТОГО ПАРАМАГНЕТИЗМА В СИСТЕМЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ИОНОВ

*Ю.М.Гуфан, Е.И.Кутьин, В.Л.Лорман,
А.М.Прохоров, Е.Г.Рудашевский*

На основании симметричного анализа магнитных структур в обменном приближении предсказывается, что в системе эквивалентных в парамагнитной фазе ионов трехмерного трехрешеточного магнетика возможно упорядочение, при котором намагниченность одной из подрешеток равна нулю. Вывод о возможности скрытого парамагнетизма в обменном приближении сохраняется и для большего числа подрешеток.

Магнитные ионы, расположенные в кристалле так, что они, будучи эквивалентны в парамагнитной фазе, могут перестать быть эквивалентными в результате магнитного упорядочения уже в обменном приближении. При этом возникают структуры, у которых намагниченность ионов, эквивалентных в парамагнитной фазе, разная. Такие неравномодульные структуры с различными намагниченностями подрешеток не описываются в рамках подходов ^{1, 2} так как при возникновении этих структур понижается пространственная группа симметрии кристалла. Тем не менее неравномодульные структуры существуют и даже могут возникать путем перехода второго рода ³.

В настоящей работе показано, что среди неравномодульных структур есть такие, у которых эффективное обменное поле на некоторых ионах, из числа ионов, эквивалентных в парамагнитной фазе, тождественно равно нулю в силу симметрии магнитоупорядоченной конфигурации. Причем этот результат не связан с низкой размерностью магнетика, как это предполагается при построении теории частично упорядоченной фазы CsCoCl₃ ⁴. Особо обратим внимание на то, что эквивалентность магнитных ионов в парамагнитной фазе принципиально отличает предсказываемые в настоящей работе структуры от ситуации с флуктуационно взаимодействующими подрешетками, рассмотренными в ⁵ на примере Ca₃Fe₂Ge₃O₁₂, где магнитные ионы находятся в неэквивалентных подрешетках.

Для примера рассмотрим трехподрешеточный магнетик, у которого в парамагнитной фазе все три подрешетки, занимаемые магнитными ионами, принадлежат одной правильной системе точек. Введем векторы ферромагнитного момента $\vec{M} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3)$ и антиферромагнитных моментов $\vec{U} = \frac{1}{\sqrt{6}}(2\vec{S}_1 - \vec{S}_2 - \vec{S}_3)$ и $\vec{V} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{S}_2 - \vec{S}_3)$. Обменная группа симметрии трехподрешеточного магнетика будет $C_{3v} \otimes O_3$. Полный базис инвариантов, составленных из компонент векторов $\vec{U}, \vec{V}, \vec{M}$ (или $\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$) будет состоять из девяти инвариан-

тов ⁶. Однако, для перечисления упорядоченных антиферромагнитно фаз и определения областей их стабильности на фазовой диаграмме достаточно ограничиться тремя инвариантами:

$$\begin{aligned} J_1 &= \bar{U}^2 + \bar{V}^2, & J_2 &= (\bar{U}^2 - \bar{V}^2)^2 + 4(\bar{U}\bar{V})^2, \\ J_3 &= (\bar{U}^2 - \bar{V}^2)^3 - 12(\bar{U}^2 - \bar{V}^2)(\bar{U}\bar{V})^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Остальные инварианты опишут появление скрытого антиферромагнетизма ³ или фазы с собственным, а не вынужденным ферромагнетизмом. Используя (1), легко перечислить все различные антиферромагнитные структуры ⁶. Кроме парамагнитной фазы ($\bar{U} = \bar{V} = \bar{M} = 0$) ими будут:

$$\begin{aligned} \text{II. } & \bar{U} \perp \bar{V}, \bar{U}^2 = \bar{V}^2, \bar{M} = 0 (\bar{S}_1^2 = \bar{S}_2^2 = \bar{S}_3^2, (\bar{S}_i \cdot \bar{S}_k) = -\frac{1}{2} S^2); \\ \text{III. } & \bar{U} \perp \bar{V}, \bar{U}^2 > \bar{V}^2, \bar{M} \neq 0 (\bar{S}_1 \perp (\bar{S}_2 - \bar{S}_3), |\bar{S}_1| > |\bar{S}_2| = |\bar{S}_3|); \\ \text{IV. } & \bar{U} \perp \bar{V}, \bar{U}^2 < \bar{V}^2, \bar{M} \neq 0 (\bar{S}_1 \perp (\bar{S}_2 - \bar{S}_3), |\bar{S}_1| < |\bar{S}_2| = |\bar{S}_3|); \\ \text{V. } & \bar{U} \neq 0, \bar{V} = 0, \bar{M} \neq 0 (\bar{S}_1 \neq \bar{S}_3; \bar{S}_2 = \bar{S}_3); \\ \text{VI. } & \bar{U} = 0, \bar{V} \neq 0, \bar{M} = 0 (\bar{S}_1 = 0; \bar{S}_2 = -\bar{S}_3); \\ \text{VII. } & \bar{U} \parallel \bar{V}, \bar{M} \neq 0 (\bar{S}_1 \parallel \bar{S}_2 \parallel \bar{S}_3); \\ \text{VIII. } & \bar{U} \neq 0, \bar{V} \neq 0, \bar{M} \neq 0 (\bar{S}_1 \neq 0, \bar{S}_2 \neq 0, \bar{S}_3 \neq 0). \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно из (2), в фазе VI $\bar{S}_1 = 0, \bar{S}_2 = -\bar{S}_3$, т. е. эффективное обменное поле на одной из подрешеток полностью скомпенсировано. Задача состоит в том, чтобы определить область существования этой фазы на фазовой диаграмме, т. е. доказать ее устойчивость и определить условия ее возникновения. Для построения фазовой диаграммы трехподрешеточного обменного антиферромагнетика, не зависящей от модельных предположений теории, найдем подмножества пространства инвариантов, отвечающие различным антиферромагнитным структурам. Для этой цели подставим (2) в (1) и получим рис. 1, из которого однозначно следует, какие из фаз будут граничить между собой на фазовой диаграмме. Однопараметрическим фазам на рис. 1. отвечают линии II, V, VI. Двухпараметрическим — поверхности III, IV, VII. Самой низкосимметричной фазе соответствует объем (фаза VIII), ограниченный поверхностями III, IV, VII. Отметим интересный факт: в магнетиках тоже есть антизоструктурные фазы. ⁶ В рассматриваемой системе это фазы III и IV. Из (1) следует, что для описания всех фаз потенциал Ландау должен быть не ниже двенадцатой степени и включать квадрат инварианта старшей степени ⁶. Выберем его в структурно устойчивом виде:

$$\phi = a_1 J_1 + a_2 J_1^2 + b_1 J_2 + b_2 J_2^2 + c_1 J_3 + c_2 J_3^2. \quad (3)$$

Фазовая диаграмма, отвечающая (3), обладает всеми особенностями, определяемыми симметрией задачи. Учет в (3) других взаимодействий будет приводить к особенностям, связанным с выбором конкретной модели (искажение линий, изменение рода перехода со второго на первый с появлением трикритической точки и т. д.). Поэтому, для целей данной работы, взаимодействия, не учтенные в (3), не существенны. Как видно из фазовой диаграммы, соответствующей потенциалу (3) (рис. 2), вблизи четырехфазной точки переход из фазы VI в парамагнитную фазу может протекать как фазовый переход второго рода. На рис. 2, б показаны возможные границы между магнитоупорядоченными фазами разной симметрии при $a_1 < 0$, т. е. эта диаграмма характеризует обменные ориентационные переходы в этой системе при низких температурах, например из фазы $\bar{U} \perp \bar{V}$ (IV) в фазу $\bar{U} \parallel \bar{V}$ (VII), см. (2).

Примером трехмерных магнитных структур, в которых может наблюдаться фаза VI являются магнитные перовскиты, расположение магнитных ионов которых приведено на рис. 3. На

рисунке видно, как противоположно направленные обменные эффективные поля ионов 2 и 3 компенсируются в месте расположения иона 1. Такую же наглядную картину магнитной структуры с полной компенсацией эффективных обменных полей в месте расположения одного из эквивалентных в парамагнитной фазе ионов, представляют, структуры типа RCO_3Ga_2 , производные интерметаллидов типа RCO_5 . Этот результат очень интересен и для понимания свойств CsCoCl_3 , так как указывает на то, что выбор магнитной структуры, произведенный в ⁴ не однозначен: R -фактор допускает и структуру V.

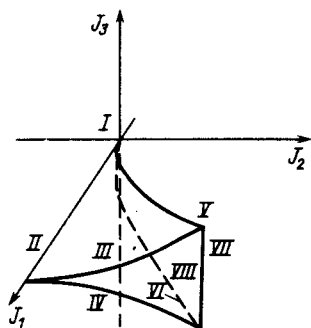


Рис. 1

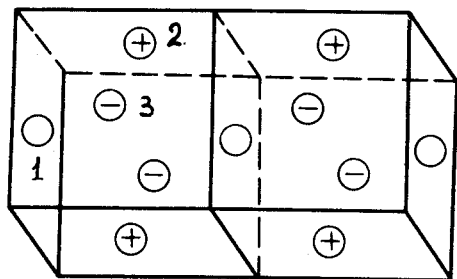
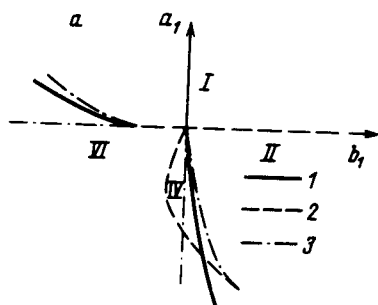


Рис. 3



б

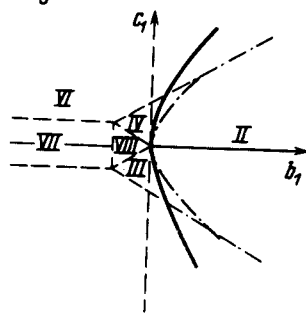


Рис. 2

Рис. 1. Подмножества в пространстве инвариантов, отвечающие различным магнитоупорядоченным структурам

Рис. 2. Фазовая диаграмма в пространстве феноменологических параметров: 1 – линии переходов первого рода, 2 – линии переходов второго рода, 3 – линии потери устойчивости фаз; а – вблизи перехода в парамагнитную фазу, б – при низких температурах

Рис. 3. Магнитная структура перовскита в фазе со скрытым парамагнетизмом: значки \oplus , \ominus – характеризуют две антипараллельно расположенные подрешетки, обозначение \circ соответствует третьей подрешетке, обменные поля на которой полностью скомпенсированы

Отметим, что аналогичные результаты получены и для большего числа магнитных подрешеток, в частности, для четырех эквивалентных в парамагнитной фазе подрешеток существуют 22 разные по симметрии антиферромагнитные структуры, три из которых обладают скрытым парамагнетизмом.

Литература

1. Андреев А.Ф., Марченко В.И. ЖЭТФ, 1976, 70, 1522.
2. Барьяхтар В.Г., Яблонский Д.А. ФНТ, 1980, 130, 345.
3. Дзялошинский И.Е., Манько В.И. ЖЭТФ, 1964, 46, 1352.
4. Mekata M., Adachi K. J. Phys. Soc. Jap., 1978, 44, 806.
5. Смирнов О.П., Шендер Е.Ф. ФТТ, 1985, 27, 1872.
6. Гуфан Ю.М. Структурные фазовые переходы, М.: Наука, 1982.