

НЕСОИЗМЕРИМЫЕ ФАЗЫ В ОКРЕСТНОСТИ МУЛЬТИКРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК

И.Л. Крайзман, В.П. Сахненко

Сформулировано условие, выделяющее параметры порядка, удовлетворяющие критерию Лифшица, но индуцирующие несоизмеримые фазы. В качестве примера рассмотрены каскады фазовых переходов для четырехкомпонентных параметров порядка. Высказано предположение о магнитной структуре модулированной фазы CeAl_2 .

Одной из причин неустойчивости пространственно однородного состояния кристалла вблизи линий фазовых переходов второго рода, носящий симметричный характер, является нарушение условия Лифшица¹. В этом случае, как показано Дзялошинским для магнитных систем, возникают фазы, в которых период магнитного упорядочения несоизмерим с периодом кристаллической решетки². Аналогичная несоизмеримость "основной" решетки и периода упорядочения была найдена также для структурных переходов и в ряде случаев получила объяснение в рамках представлений, основанных на критерии Лифшица³. Здесь мы покажем, что существуют симметричные причины возникновения несоизмеримых фаз и при выполнении условия Лифшица.

Пусть симметричная степень $[T]^n$ представления T , по которому преобразуется многокомпонентный параметр порядка (ПП) η , содержит некоторое представление T' , не удовлетворяющее условию Лифшица. При этом в термодинамический потенциал Φ входят смешанные инварианты степени n по η и линейные по компонентам ξ , относящимся к T' . При конденсации некоторых η_i в потенциале Ландау соответствующей низкосимметричной фазы могут сохраниться члены билинейные по несконденсировавшимся компонентам η_i и ξ_i . Поэтому данная фаза окажется неустойчивой относительно пространственно неоднородных искажений. Иными словами, исходный потенциал Φ содержит нелинейные по η_i градиентные инварианты типа Лифшица, которые в низкосимметричной фазе приобретают обычный лифшицевский вид. Таким образом, переход из рассматриваемой неэквивалентной фазы в другие однородные фазы, описываемые ПП η , может происходить через промежуточную несоизмеримую фазу.

В качестве примера рассмотрим спонтанные ориентационные переходы в кубических кристаллах с симметрией O_h^7 , описываемые четырехкомпонентными ПП звезды вектора $\mathbf{k}_9 = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right)$. Сверхструктуры, относящиеся к таким \mathbf{k} , возникают при антиферромагнитном упорядочении в кубических фазах Лавеса RAI_2 (R – редкоземельный ион). Четырехмерные неприводимые представления T_i ($i = 1, \dots, 4$) этой звезды удовлетворяют условию Лифшица, но содержат в $[T_i]^2$ шестимерное неприводимое представление $T_1^{(k_{10})}$ (нумерация по⁴), не удовлетворяющее этому условию. В соответствии

с этим симметрия допускает градиентный инвариант вида:

$$\left[\eta_1 \eta_2 \frac{\partial(\eta_3 \eta_4)}{\partial x} - \eta_3 \eta_4 \frac{\partial(\eta_1 \eta_2)}{\partial x} \right] + \left[\eta_1 \eta_3 \frac{\partial(\eta_2 \eta_4)}{\partial y} - \eta_2 \eta_4 \frac{\partial(\eta_1 \eta_3)}{\partial y} \right] + \left[\eta_1 \eta_4 \frac{\partial(\eta_2 \eta_3)}{\partial z} - \eta_2 \eta_3 \frac{\partial(\eta_1 \eta_4)}{\partial z} \right]. \quad (1)$$

Потенциал Ландау для этих ПП содержит один анизотропный инвариант четвертой степени $\beta_1 \sum_{i=1}^4 \eta_i^4$. На линии переходов второго рода $\alpha_1(p, T) = 0$ точка $\beta_1 = 0$ разделяет фазы 1 – $(\eta 000)$ и 2 – $(\eta \eta \eta \eta)$. В ней с симметричной фазой могут соприкасаться фазы 3 – $(\eta \eta 00)$ и 4 – $(\eta \eta \eta 0)$, соответствующие седловым точкам функции $\sum_{i=1}^4 \eta_i^4$ ($r^2 = \sum_{i=1}^4 \eta_i^2 = \text{const}$). Все эти фазы в окрестности мультикритической точки p_M, T_M ($\alpha_1 = \beta_1 = 0$) существуют в областях шириной $\sim \tau = \frac{T - T_M}{T_M}$. Как видно из (1), в фазе 3 – $(\eta \eta 00)$ потенциал Ландау содержит инвариант Лифшица, коэффициент при котором имеет порядок τ . В силу этого вблизи p_M, T_M между фазами $(\eta \eta 00)$ и $(\eta \eta \eta 0)$ появляется несоизмеримая фаза, также существующая в области $\sim \tau$. Фазовая диаграмма приведена на рис. 1.

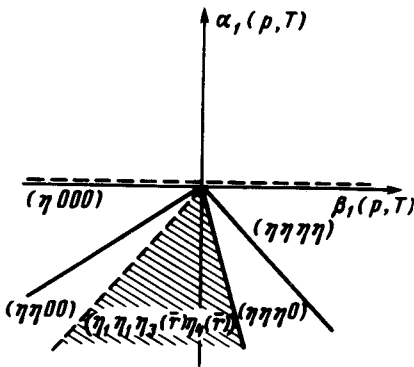


Рис. 1

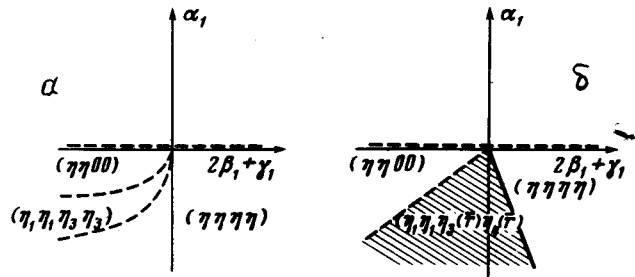


Рис. 2

Рис. 1. Каскад фазовых переходов в окрестности мультикритической точки, содержащий несоизмеримую фазу (неприводимое представление T_i ($i = 1, \dots, 4$) звезды $k_9 = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right)$ пространственной группы O_h^7). Сплошные линии – переходы первого рода, пунктирные – второго, заштрихованная фаза – несоизмеримая

Рис. 2. Вытеснение угловой фазы несоизмеримой (заштрихованной) в окрестности 4-х фазной точки. Неприводимое представление T_i ($i = 1, \dots, 4$) звезды $k_{11} = \frac{1}{2} b_2$ пространственной группы D_{3h}^7 . Сплошные линии – переходы первого рода, пунктирные – второго

Проведенное рассмотрение, с нашей точки зрения, позволяет внести ясность в дискуссию о наблюдаемых при гелиевых температурах магнитных фазах в CeAl_2 . Были высказаны два предположения. Первое – возникает $3k$ -структура с конденсацией трех компонент 24-компонентного ПП звезды $k = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right)$, а наблюдаемый сверхструктурный рефлекс, относящийся к $k_9 = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right)$, обусловлен нелинейными взаимодействиями, т. е. 4-

компонентный ПП выпадает как несобственный ⁵. Однако, в ⁶ показано, что такое предположение противоречит экспериментальным данным, полученным при исследовании CeAl_2 под действием одноосных напряжений. Со своей стороны в ⁶ высказано предположение, что ниже $T_c = 3,8\text{K}$ при нормальном давлении наблюдается смесь фаз — однородной антиферромагнитной и фазы модулированной вдоль $[110]$. В действительности же, как следует из проведенного выше анализа, наблюдаемое состояние кристалла может быть однофазным с двумя однородными ($\eta_1 = \eta_2 = \eta$) и двумя модулированными $\eta_3(y, z), \eta_4(y, z)$ компонентами 4-компонентного ПП η . Однако, такая фаза, как следует из фазовой диаграммы, не может возникнуть при фазовом переходе второго рода непосредственно из симметричной, — между ними должны находиться фазы с однородным упорядочением. Существование таких фаз в CeAl_2 можно предположить из экстраполяции $x \rightarrow 0$ экспериментальных данных по фазовым переходам в $\text{Ce}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Al}_2$, свидетельствующей о существовании выше $T_c = 3,8\text{K}$ соизмеримой антиферромагнитной структуры ⁷. Отметим, наконец, что аналогичные (рис. 1) каскады фазовых переходов с чередованием соизмеримых и несоизмеримых (длиннопериодических) фаз должны быть типичными для ПП размерностью $n \geq 4$. Так в группе O_n^7 все ПП с $n \geq 4$ либо не удовлетворяют условию Лифшица, либо допускают существование инвариантов типа (1).

Учет нелинейных градиентных инвариантов типа Лифшица может приводить и к более радикальной перестройке фазовых диаграмм. Так в простейшем случае тетрагональной анизотропии $\beta_1 \sum_{i=1}^4 \eta_i^4 + \gamma_1 (\eta_1^2 \eta_2^2 + \eta_3^2 \eta_4^2)$ в точке $\alpha_1 = 0, 2\beta_1 + \gamma_1 = 0$ на линии фазовых переходов второго рода граничат фазы $(\eta\eta 00)$ и $(\eta\eta\eta\eta)$. При учете только однородных состояний фазовая диаграмма в $\alpha_1, 2\beta_1 + \gamma_1$ плоскости имеет вид (рис. 2, а). Однако, в том случае, когда в Φ присутствуют инварианты типа (1) фазовая диаграмма качественно изменяется — вместо угловой фазы $(\eta_1 \eta_1 \eta_3 \eta_3)$ "шириной" $\sim \tau$ между фазами $(\eta\eta 00)$ и $(\eta\eta\eta\eta)$ возникает несоизмеримая фаза, шириной $\sim \tau$ (рис. 2, б). Такая ситуация имеет место, например, для 4-компонентного ПП звезды $k_{11} = 1/2 b_2$ группы D_{4h}^{19} .

Литература

1. Лифшиц Е.М. ЖЭТФ, 1941, 11, 253, 269.
2. Дзялошинский И.Е. ЖЭТФ, 1964, 46, 1420.
3. Леванюк А.П., Санников Д.Г. ФТТ, 1976, 18, 423.
4. Ковалев О.В. Неприводимые представления пространственных групп., Киев, 1961.
5. Shapiro S.M. Gurewitz E., Parks R.D., Kupferberg L.C. Phys. Rev. Lett., 1979, 43, 1748.
6. Barbara B., Rossignol M.F., Boucherle Y.X., Vettier C. Phys. Rev. Lett., 1980, 45, 938.
7. Barbara B., Boucherle Y.X., Buevoz J.L., Rossignol M.F., Schweitzer J. J. Magn. Mater., 1979, 14, 221.