Письма в ЖЭТФ, том 54, вып. 9, стр. 514 — 516 10 ноября 1991 г.

К ТЕОРИИ СПИНОВОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ

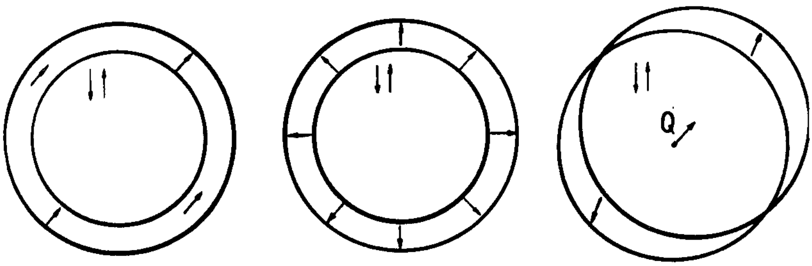
В.И.Марченко

Институт физики твердого тела АН СССР
142432, Черноголовка

Поступила в редакцию 19 сентября 1991 г.

Выяснена обменная симметрия спирального и spin-split состояний металлов. Обе структуры являются спиновыми нематиками.

В металлах, при нарушении условий Померанчука [1] для электронной ферми-жидкости, должно осуществляться некоторое состояние с пониженной симметрией. Простейший пример - ферромагнетик (рис.*а*). Ахиезер и Чудновский [2] указали на возможность особого спинового упорядочения - спирального (рис.*б*). Недавно Хирш [3] рассмотрел еще одну, аналогичную спиральной, структуру: spin-split state (рис.*в*).



а б в

В ферромагнетике спиновая динамика описывается уравнением Ландау - Лифшица. В остальных случаях вопрос о спиновой динамике и вообще о магнитных свойствах остался невыясненным. Заметим, что все представленные состояния буквально не могут быть собственными состояниями какого-либо разумного гамильтониана, однако, рисунок отражает симметрию спинового упорядочения. В обсуждаемых состояниях релятивистские эффекты предполагаются малыми, поэтому их свойства должны полностью определяться обменной симметрией [4–6].

В структуре *б* изотропия спинового пространства полностью нарушена, в структуре *в* остается аксиальная симметрия. В обоих состояниях сохраняется симметрия по отношению к изменению знака времени. Указанными свойствами обладают спиновые нематики [5]. Чтобы убедиться в том, что рассматриваемые состояния действительно являются спиновыми нематиками, выясним в них характер спиновых корреляций.

Начнем с более простого случая *в*. Найдем коррелятор $s_{xy}(\vec{r}) = < s_x(0)s_y(\vec{r}) >$ (ось z в спиновом пространстве ориентирована вдоль аксиальной оси). Учитывая связь

$$s^+ = a_\uparrow^+ a_\downarrow; \quad s^- = a_\downarrow^+ a_\uparrow; \quad s_z = (a_\uparrow^+ a_\uparrow - a_\downarrow^+ a_\downarrow)/2 \tag{1}$$

спиновых операторов $s^\pm = s_x \pm i s_y$, s_z с операторами рождения и уничтожения электронов с определенными z-проекциями спина, имеем

$$s_{xy}(\vec{r}) = \frac{1}{4i} < (a_\uparrow^+ a_\downarrow + a_\downarrow^+ a_\uparrow)_0 (a_\uparrow^+ a_\downarrow - a_\downarrow^+ a_\uparrow)_{\vec{r}} >=$$

$$= \frac{1}{4i} \sum < (a^+_{\uparrow\vec{k}1} a_{\downarrow\vec{k}2} + a^+_{\downarrow\vec{k}1} a_{\uparrow\vec{k}2})_0 (a^+_{\uparrow\vec{k}3} a_{\downarrow\vec{k}4} - a^+_{\downarrow\vec{k}3} a_{\uparrow\vec{k}4})_{\vec{r}} > e^{i(\vec{k}1-\vec{k}2)\vec{r}} =$$

$$= \frac{1}{2} \sum n_{\uparrow\vec{k}} n_{\downarrow\vec{q}} \sin(\vec{k} - \vec{q})\vec{r}. \tag{2}$$

Заменим переменные $\vec{k} \to \vec{k} + \vec{Q}/2$ и $\vec{q} \to \vec{q} - \vec{Q}/2$, где $\vec{Q}$ - относительный сдвиг ферми-сфер электронов с противоположными спинами (рис.*в*), тогда

$$s_{xy}(\vec{r}) = \frac{1}{2} \sum n_{\uparrow\vec{k}+\vec{Q}/2} n_{\downarrow\vec{q}-\vec{Q}/2} \sin(\vec{k} - \vec{q} - \vec{Q})\vec{r} =$$

$$= \frac{1}{2} \sin\vec{Q}\vec{r} \sum_k n_{\uparrow\vec{k}+\vec{Q}/2} \cos\vec{k}\vec{r} \sum_q n_{\downarrow\vec{q}-\vec{Q}/2} \cos\vec{q}\vec{r} =$$

$$= \pi \sin\vec{Q}\vec{r} \{ \int_0^{k_F} \int_0^{\pi} \cos(qr\cos\theta) \frac{k^2 dk}{(2\pi)^3} \sin\theta d\theta \}^2. \tag{3}$$

Здесь учтено то, что в состоянии *в* $n_{\uparrow\vec{k}+\vec{Q}/2} = n_{\downarrow\vec{q}-\vec{Q}/2} = n_{\vec{k}}$, где $n_{\vec{k}}$ - распределение Ферми с импульсом Ферми k_F. На больших расстояниях $r \gg k_F^{-1}$ находим

$$s_{xy}(\vec{r}) = \frac{1}{32\pi^4} \frac{k_F^2}{r^4} \cos^2 k_F r \sin\vec{Q}\vec{r}. \tag{4}$$

Нетрудно проверить, что

$$s_{xy}(\vec{r}) =< s_x(0) s_y(\vec{r}) >= - < s_x(\vec{r}) s_y(0) >= -s_{yx}(\vec{r}). \tag{5}$$

При произвольном выборе координат антисимметричная часть спиновой корреляционной функции имеет следующий вид

$$s_{\alpha\beta}(\vec{r}) = e_{\alpha\beta\gamma} P_\gamma \sin\vec{Q}\vec{r}\Phi(r), \tag{6}$$

где функция $\Phi(r)$ не изменяется под действием элементов симметрии. Псевдовектор P_γ является параметром порядка одного из спиновых нематиков, исследованных Андреевым и Грищуком [5]. Спиновая динамика в этом состоянии описывается [5] теми же уравнениями, что и динамика коллинеарных антиферромагнетиков ([4] §4).

Состояние *в* было предложено Хиршем [3] для описания упорядочения в хроме. Однако, в спиновом нематике из-за симметрии по отношению к изменению знака времени не может быть сверхтонкого поля, которое обнаружено в хроме (см. обзор [8]). Отметим еще, что Хирш предположил существование спонтанного спинового тока. С точки зрения симметрии нет возражений, однако, вычисляя точно выражение для спинового тока приведенное в [3] нетрудно убедиться, что в равновесии спиновый ток равен нулю. Заметим, что здесь, так же как и при рассмотрении допустимого по симметрии электрического тока в структуре *б* во внешнем магнитном поле, выражение для спинового тока сводится к полной производной (ср. с выводом формулы (19) в работе [9]).

В случае *б* лучше перейти к оператором $a_{\vec{k}+,-}$ электронов с определенной спиральностью

$$a_{\vec{k}\uparrow} = e^{i\varphi/2} \cos\frac{\theta}{2} a_{\vec{k}+} - e^{i\varphi/2} \sin\frac{\theta}{2} a_{\vec{k}-}$$

$$a_{\vec{k}\downarrow} = e^{-i\varphi/2} \sin\frac{\theta}{2} a_{\vec{k}+} + e^{-i\varphi/2} \cos\frac{\theta}{2} a_{\vec{k}-} \qquad (7)$$

(ср. с соотношениями (23, 14) в книге [7]). Антисимметричная по спиновым индексам часть корреляционной функции здесь отсутствует. Для разницы средних $< s_z(0) s_z(\vec{r}) > - < s_x(0) s_x(\vec{r}) >$, где ось z выбрана вдоль направления $\vec{r}$, получим

$$|\sum_{\vec{k}} e^{i\vec{k}\vec{r}} \cos\theta (n_{\vec{k}+} - n_{\vec{k}-})|^2 = \frac{1}{4\pi^4} \frac{k_F^2}{r^4} \cos^2 k_F r \sin^2 Qr. \qquad (8)$$

Величина $Q \ll k_F$ определяет сдвиг импульсов Ферми для частиц с определенной спиральностью относительно среднего значения k_F. Спиновая динамика в этом состоянии описывается уравнениями характерными для неколлинеарного антиферромагнетика [4].

Благодарю В.И.Фалько и Е.М.Чудновского за полезное обсуждение.

1. Померанчук И.Я., ЖЭТФ, 1958, 35, 524.
2. Ахиезер И.А., Чудновский Е.М., ФТТ, 1976, 18, 1427.
3. Hirsch J.E., Phys. Rev. B, 1990, 41, 6628, 6820; 42, 4774.
4. Андреев А.Ф., Марченко В.И., УФН, 1980, 130, 39.
5. Андреев А.Ф., Грищук И.А., ЖЭТФ, 1984, 87, 467.
6. Марченко В.И., Письма в ЖЭТФ, 1988, 48, 387.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1980.
8. Fawcett E., Rev. Mod. Phys., 1988, 60, 209.
9. Chudnovsky E.M., Vilenkin A., Phys. Rev. B, 1982, 25, 4301.