Физика низких температур, 1995. . 21, № 4, с. 459–461 УДК 537.312.62;538.945

Письма редактору

О возможной роли нелинейных магнитных возбуждений в высокотемпературных сверхпроводниках

В. М. Локтев

Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Украина, Киев-143, ул. Метрологическая, 146

В. А. Стефанович

Институт физики полупроводников НАН Украины, Украина, Киев-28, пр. Науки, 45

Статья поступила в редакцию 3 января 1995 г.

Высказано предположение об образовании в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) *вортексонов* — связанных состояний дырок и вихрей, — спаривание которых обеспечивается притяжением вихрей с противоположными топологическими зарядами.

Висловлено припущення щодо виникнення у високотемпературних надпровідниках (ВТНП) *вортексонів* — зв'язаних станів дірок та вихорів — спарювання яких забезпечується притяганням вихорів з протилежними топологічними зарядами.

Сосуществование и взаимное влияние магнитных и сверхпроводящих (СП) свойств металлооксидов остаются среди актуальных проблем физики этих соединений с момента открытия ВТСП. Главным при этом является вопрос: способствует ли наблюдаемый в них ярко выраженный сильный магнетизм или, наоборот, препятствует высоким T_c? В общей постановке подобный вопрос, разумеется, не нов; уже более тридцати лет назад обмен линейными магнитными возбуждениями — магнонами — как причина формирования конечной T_c либо (наряду с фононами) ее усиления в магнетиках рассматривался А. И. и И. А. Ахиезерами [1] (для случая ферромагнитных металлов) и И. А. Привороцким [2] (для антиферромагнитных (АФМ) металлов). Их выводы об орбитальной и спиновой симметрии параметра порядка конденсата для этих случаев СП и знаке косвенного взаимодействия между носителями в том или другом виде воспроизводились и обобщались (включая модели, соответствующие ВТСП купратам) многими авторами (см., например, обзоры [3–10]).

Тем не менее в самое последнее время магнетизм купратов вызывает повышенный интерес в связи с появлением сравнительно большого числа экспериментальных свидетельств в пользу d-волнового характера спаривания дырок в ВТСП [11–15], которое находит свое истолкование на основе учета АФМ спиновых флуктуаций [16–18]. Несмотря на имеющуюся специфику, упомянутые работы есть не что иное, как обобщение механизма БКШ (в рамках схемы Элиашберга) на ВТСП. Ситуацию, однако, нельзя считать ясной, поскольку расчеты с учетом как одно-, так и двухмагнонных процессов пока не дают окончательной оценки величины T_c [9,16,19–21], сохраняя необходимость поиска и других возможностей.

Одной из них служат попытки объяснения ВТСП с противоположных позиций, а именно: исходя из опирающегося на малую длину когерентности предположения о существовании в металлооксидах не куперовских, а локальных пар (в частности, биполяронов), конденсирующихся подобно бозе-жидкости [22]. Эта, привлекательная со многих точек зрения, концепция развивается Моттом [23], допускающим, что своим появлением в ВТСП локальные пары обязаны не собственно решетке, а образующим ее спинам ионов Cu^{2+}. Тем самым биполяроны становятся в значительной степени магнитными. Они при этом не должны иметь вид ферронов (см. [24]), поскольку дырки, будучи в ВТСП (в магнитном отношении) ортогональными (фрустрирующими) [25], практически не испытывают ограничений при движении по АФМ упорядоченной среде. Это, в свою очередь, означает, что структура магнитного полярона в ВТСП остается неизвестной.

© В. М. Локтев, В. А. Стефанович, 1995

В настоящем сообщении мы хотели бы обратить внимание на тот (насколько известно, еще не отмечавшийся) факт, что в ВТСП локальные пары могут формироваться иным образом. Для этого напомним, что медные ВТСП оксиды имеют слоистое строение с отчетливо выраженным *2D*-характером магнитных свойств. Более того, величина $T_N \neq 0$ (или дальний магнитный порядок) наблюдается в ВТСП лишь в их диэлектрических фазах, а металлическое состояние, возникающее как результат допирования, обнаруживает только ближние АФМ корреляции. Учитывая при этом, что обменное взаимодействие между локализованными спинами ионов меди составляет величину $\geq 10^3$ K, легко допустить, что при конечных T среди возбужденных состояний почти вырожденной плоской магнитной подсистемы ВТСП в металлической фазе имеются состояния, соответствующие нелинейным возбуждениям — вихрям — роль которых в *2D*-системах была понята Березинским (см. [26]).

Находясь в нулевом обменном поле окружающих спинов, ортогональная дырка (вследствие *pd*-гибридизации [25]) взаимодействует с поперечными локальными флуктуациями намагниченности $\mathbf{m}(\mathbf{r})$, легко подстраивается под них и, как показывают оценки, независимо от знака топологического заряда вихря образует с последним связанное состояние. По аналогии с другими типами устойчивых (составных) квазичастиц, такие заряженные вихри можно выделить в отдельный класс — вортексоны.

Хотя поведение $\mathbf{m}(\mathbf{r})$ обусловлено вихрем, существующим и без дырки, в АФМ она тем не менее воздействует на него, так, что результирующая связь оказывается нелинейной (полярноподобной); при этом вихрь играет еще добавочную роль потенциальной ямы для дырки и ситуация здесь похожа на случай связанного магнитного полярона [24]. Притяжение между вортексонами возникает благодаря известной ($\simeq \ln |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$) тенденции к образованию «молекул» из вихрей с противоположными топологическими зарядами [26]. Понижение T приводит к аннигиляции таких вихрей; коллапсу же вортексонов будет препятствовать кулоновское отталкивание, стабилизирующее бивортексоны.

Можно было бы думать, что отмеченное обстоятельство делает последние (как, собственно, и вортексоны) метастабильными*. Однако именно нелинейность взаимодействия носитель — вихрь, а значит, самосогласованный характер их связи делает вортексоны устойчивыми относительно разрыва этой связи под действием, например, внешнего электромагнитного поля. Если же говорить о поведении газа бивортексонов, то он, по-видимому, аналогичен биполяронам малого радиуса. В целом же представляется, что из-за квази *2D*-характера магнетизма ВТСП систем, вортексоны больше отражают их магнитную специфику, чем магнитные поляроны, хотя в обоих случаях вклад в энергию связи может быть обусловлен обычным поляронным искажением решетки.

Таким образом, концептуально предложенная картина ближе теориям, так или иначе опирающимся на малый размер пар в ВТСП. В них образование синглетных пар малого или промежуточного радиуса никак не связано с обменом каким-либо (включая нелинейное) возбуждением и полностью обусловлено спецификой состояний вырожденной магнитной системы. Отсутствие в ней дальнего магнитного порядка не только не служит фактором, разрушающим (из-за возможного сильного рассеяния носителей) сверхпроводимость, но является (как причина существования вихревых возбуждений) предпосылкой или необходимым условием появления притяжения. В рамках высказанной гипотезы в принципе понятно, почему корреляционная магнитная длина в ВТСП совпадает со средним расстоянием между дырками в медно-кислородных плоскостях, а сверхпроводимость исчезает с ростом концентрации носителей, когда их количество становится больше числа вихрей, «помещающихся» на единице площади. Расчеты энергии связи вортексонов и бивортексонов в дальнейшем будут нами опубликованы.

Один из нас (В. М. Л.) благодарит П. И. Голода, М. А. Иванова, А. М. Косевича, В. А. Миранского, М. А. Стржемечного, А. Э. Филиппова и Ю. А. Фреймана за обсуждения, замечания и поддержку.

Данная работа частично поддержана грантом № U68000 Международного научного фонда.

1. А. И. Ахиезер, И. А. Ахиезер, *ЖЭТФ* **43**, 2208 (1962).
2. И. А. Привороцкий, *ЖЭТФ* **43**, 2255 (1962).
3. С. В. Вонсовский, Ю. А. Изюмов, *УФН* **78**, 3 (1962).
4. В. В. Мощалков, *Высокотемпературные сверхпроводники*, Значие, Москва (1987).
5. Ю. А. Изюмов, *УФН* **161**, 1 (1991).
6. В. М. Локтев, *Препринт ИТФ-89-1Р Киев, ИТФ АН УССР* (1989).
7. Lu Yu, Zh.-B. Su, and M. Li, *Chinese J. of Phys.* **31**, 579 (1993).
8. P. W. Anderson and R. Schrieffer, *Phys. Today*, N 6, *55* (1991).
9. D. Pines, *Preprint Univ. of Illinois* (1993).

* Это замечание сделано М. А. Стржемечным.

10. I. Riera and E. Dagotto, *Preprint of Nat. Magn. Lab., Florida St. Univ.* (1993); Phys. Repts. (in press).
11. W. N. Hardy, D. A. Bonn, D. C. Morgan, R. Liang, and R. Zhang, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 3999 (1993).
12. D. A. Wollman, D. J. Van Harlingen, W. C. Lee, D. M. Ginsberg, and A. J. Leggett, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2134 (1993).
13. I. Iguchi and Z. Wen, *Phys. Rev.* **B49**, 12388 (1994).
14. A. Mathai, Y. Gim, R. C. Black, A. Amar, and F. Wellstood, *Preprint Univ. of Maryland* (1994).
15. V. J. Emery, *Nature* **370**, 597 (1994).
16. A. J. Millis, H. Monien, and D. Pines, *Phys. Rev.* **B42**, 167 (1990).
17. N. Bulut and D. J. Scalapino, *Phys. Rev.* **B47**, 3419 (1993).
18. P. Monthoux and D. Pines, *Phys. Rev.* **B47**, 6067 (1993).
19. В. С. Бабиченко, Ю. М. Каган, *Письма в ЖЭТФ* **56**, 305 (1992).
20. Ю. А. Изюмов, В. М. Лаптев, *ФММ* №1, 5, (1991).
21. H. Shimahara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **63**, 1861 (1994).
22. А. С. Александров, А. Б. Кребс, *УФН* **162**, 1 (1992).
23. N. F. Mott, *J. Phys.* **C5**, 3487 (1993).
24. Э. Л. Нагаев, *Физика магнитных полупроводников*, Наука, Москва (1979).
25. В. М. Локтев, *ФНТ* **19**, 375 (1993).
26. А. З. Паташинский, В. Л. Покровский, *Флуктуационная теория фазовых переходов*, Наука, Москва (1982).

On possible role of nonlinear magnetic excitations in high-temperature superconductors

V. M. Loktev and V. A. Stephanovich

The supposition of *vortexons* (bound states of holes and magnetic vortices) formation in high-T_c superconductors (HTSC) is put forward. The *vortexons* pairing is due to attraction of vortices with opposite sign topological charges.