

# Природа резистивного перехода в ВТСП

Л.С. Мазов

Институт физики микроструктур РАН, 603600 Нижний Новгород, Россия

Представлены свидетельства того, что в ВТСП-купратах сверхпроводящему переходу предшествует магнитный (ВСП) фазовый переход, что и обуславливает «аномальное» поведение купратов в эксперименте, в зависимости от температуры и магнитного поля.

В недавних обзорах по проблеме высоко-температурной сверхпроводимости [1,2] было отмечено, что для объяснения поведения купратных сверхпроводников необходимо учитывать как фоновое рассеяние так и спиновые степени свободы. Более того, в известной монографии [3] было указано, что одним из способов повышения критической температуры сверхпроводящего перехода является появление в системе дополнительного параметра порядка. Хотя такие исследования затем и предпринимались, но до 1986 года это не приводило к заметным результатам. В настоящей работе продемонстрировано, что переход купратных соединений в сверхпроводящее состояние связан с появлением в системе модулированной магнитной (типа волны спиновой плотности (ВСП)) структуры, создающей условия для появления сверхпроводящего состояния ( $T_c^{onset}(H) = T_{ВСП}^{order}(H)$ ).

В первых же измерениях электросопротивления (ЭС) в ВТСП купратах был обнаружен неожиданный эффект: в отличие от традиционных (НТСП) сверхпроводников, где приложение магнитного поля приводило просто к смещению резистивного перехода вниз по температуре, в ВТСП внешнее магнитное поле вызывало сильное уширение резистивного перехода, причем в области перехода возникало выраженное «плечо» (перегиб). Появление такого уширения вызвало ряд практических проблем, так до сих пор отсутствует обычно используемый в НТСП резистивный метод определения  $T_c(H)$ , в том числе при  $H = 0$ . Попытки использовать для оценки  $T_c$  образца критериев «на уровне» 0.5, 0.9 и т.д. привели к возникновению представлений о положительной кривизне определенной таким образом кривой " $H_{c2}(T)$ " вблизи  $T_c(H=0)$  и последующему изучению этого «эффекта», созданию его теоретических моделей и т.д. Исследование причины появления «плеча» в области резистивного перехода в магнитном поле также не приводило к заметным результатам. В работе [4] нами было обнаружено, что на резистивных кривых монокристалла YBCO, измеренных в достаточно широком диапазоне магнитных полей (рис.1а), точки, соответствующие «плечу», ложатся на хорошо известную кривую Блоха-Грюнайзена (БГ) (пунктир), соответствующую рассеянию носите-

лей тока на фононах с температурой Дебая  $\theta_D \approx 400$  К, что соответствовало усредненному значению данной величины для этих соединений.

Было предположено, что дополнительный вклад  $\rho_m(T)$  в полное ЭС  $\rho_{tot}(T)$ , лежащий выше кривой БГ (заштриховано на рис.1а) имеет магнитную природу – рассеяние на спиновых флуктуациях, присутствие которых в ВТСП подтверждалось и нейтронными данными. (Такое разделение ЭС на фононный  $\rho_{ph}(T)$  и магнитный  $\rho_m(T)$  вклады хорошо известно для магнитных металлов).

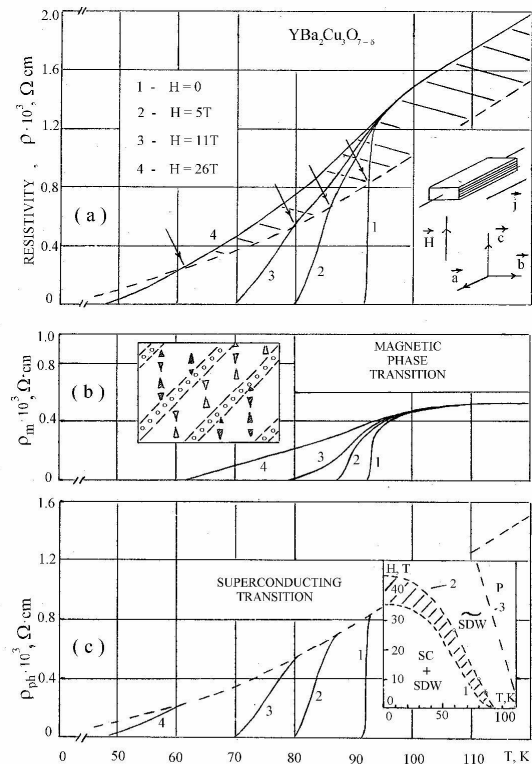


Рис. 1. Температурная зависимость электросопротивления YBCO в магнитном поле (см. [4,6]).

Поведение магнитного вклада  $\rho_m(T)$ , рис.1b, свидетельствует о переходе магнитной подсистемы из спин-разупорядоченного состояния в магнитно-упорядоченное состояние, когда формирование магнитной периодической структуры (в общем случае динамической) приводит к исчезновению магнитной части сопротивления  $\rho_m$ .

Как видно из рис.1c, кривая БГ (пунктир) является, как и в НТСП, геометрическим местом точек для начала собственно СП перехода в магнитном поле, что и указывает на фононный механизм с  $s$ -волновой симметрией параметра порядка в ВТСП.

Полученная картина не была неожиданной. Из теории взаимодействия СП и магнетизма в системах коллективизированных (итинерантных) электронов следует, что при понижении температуры сначала формируется ВСП-щель на симметричных участках поверхности Ферми (нормальное состояние) и лишь затем СП-щель. Такая анизотропия

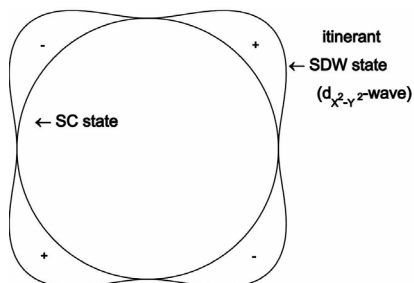


Рис. 2. Схематическое представление сосуществования ВСП и СП параметров порядка в ВТСП [6].

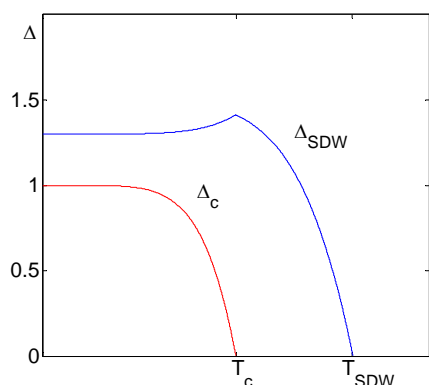


Рис. 3. Температурная зависимость СП и ВСП параметров порядка в ВТСП купратах (схема) [6].

хорошо согласуется с  $d_{x^2-y^2}$ -волновой симметрией

псевдощели, которая сейчас наблюдается во многих экспериментах. К такому же выводу о ВСП(ВЗП) природе псевдощели также недавно пришел и Р.Клемм [5]. Т.к. псевдощель сохраняется и в СП состоянии, то ее  $d$ -волновая симметрия имитирует симметрию параметра порядка, измеряемого в СП состоянии, например, с помощью ARPES методики.

Температурное поведение как магнитного вклада  $\rho_m$  в ЭС, так и ВТСП системы в целом объясняется в рамках представлений об амплитудных флуктуациях локальной спиновой плотности (ФЛСП), когда выше некоторой характерной температуры  $T^*(H)$  в спектре ФЛСП преобладают поперечные компоненты, и в системе возникают так называемые температурно-индуцированные локальные магнитные моменты (ТИ ЛММ), у которых флуктуирует как ориентация так и амплитуда. В режиме ТИ ЛММ магнитное поле оказывает только слабое воздействие на систему

(отрицательное магнитосопротивление (МС)), в то время как при понижении температуры, возникает положительное МС, что и приводит к уширению магнитной части резистивного перехода.

Использование концепции ТИ ЛММ при анализе поведения ЭС в LSCO и BLSCO в сильных магнитных полях позволило найти прямые свидетельства кривой БГ (и т.о. ключевой роли рассеяния носителей на фононах) в купратах [6]. Далее, в недавних экспериментах по упругому рассеянию нейтронов в LCO и LSCO соединениях было получено, что СП и статический АФ ВСП порядок появляются при одной и той же температуре  $T_{BCP}^{order}(0) = T_{СП}^{onset}(0)$ , что совпадает с нашим выводом в [4] (см. выше, рис.1а). В рамках этой картины также детально (и с единой точки зрения) объясняется и широко обсуждаемое сейчас в литературе возникновение «индуцированного» магнитным полем АФ ВСП порядка, наблюдаемого в корах вихрей и другие эффекты в резистивном состоянии.

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами [1,2], что «в купратах...существенны как электрон-фононное взаимодействие (ЭФВ) так и ... (... быть может, и спиновое) взаимодействия»[1], которое фактически и является «чем-то определяющим вместе с ЭФВ СП механизм в ВТСП системах» [2]. Проведенный нами анализ [4,6], позволяет также ответить на два главных вопроса, возникающих при описании ВТСП в рамках только ЭФВ: «наблюдаемое анизотропное  $d$ -волновое спаривание» и «большое значение  $2\Delta(0)/k_B T_c$ » [1,2]. Эти особенности, относимые в настоящее время к свойствам  $d_{x^2-y^2}$ -волновой СП, оказываются, фактически, прямым следствием сосуществования СП и ВСП параметров порядка ниже  $T = T_k(H)$  (см. рис.1а), когда ВСП-щель с ее  $d_{x^2-y^2}$ -волновой симметрией и относительно большой величиной ( $\Delta_{SC} < \Delta_{SDW}$ , рис. 2, 3) преобладает в энергетическом спектре, измеряемом в эксперименте.

1. В.Л.Гинзбург, УФН 170, 619 (2000).
2. Е.Г.Максимов, УФН 170, 1033 (2000).
3. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости (под ред. В.Л.Гинзбурга и Д.А.Киржница), М.: Наука, 1977. – 400 с.
4. Л.С.Мазов, ФНТ 17, 1372 (1991); см., также in: Progress in High Temperature Superconductivity vol.32, Eds. A.G.Aronov, A.I. Larkin, V.S.Lutovinov, (World Scientific, Singapore, 1992), p.605-610.
5. R.A.Klemm, Int.J.Mod.Phys. B 12, 2920 (1997).
6. L.S.Mazov, Phys.Rev. B 70, 054501 (2004); see, also in: Superconductivity Research at the Leading Edge, Ed. by P.S.Lewis (Nova Science Publishers, Inc., NY, 2004), p.1-23.