

О ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

© Сайханов Муса Баудинович

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова Российской академии наук, Российская Федерация г. Грозный;
лаборатория экспериментальных исследований, в.н.с., к.ф.-м.н.,
saikhanov_musa@mail.ru

Аннотация. Показано, что на квантово-статистическом уровне рассмотрения возникновения сверхпроводимости в керамиках удаётся объяснить на основе топологической концепции непрерывности и диссипативного процесса спаривания сильно коррелированных электронов.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, кинетическое моделирование, энергетический спектр связанных электронов, топология, связность, спаривание электронов, диссипативный процесс, когерентность.

ON THE TOPOLOGICAL NATURE OF THE ORIGIN OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY

© Saikhanov Musa Boudinovich

Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Grozny; experimental research laboratory, leading researcher, PhD in Physics.,
saikhanov_musa@mail.ru

Abstract. It is shown that, at the quantum-statistical level of consideration, the onset of superconductivity in ceramics can be explained on the basis of the topological concept of continuity and the dissipative process of pairing of strongly correlated electrons.

Key words: high-temperature superconductivity, kinetic modeling, energy spectrum of bound electrons, topology, connectivity, electron pairing, dissipative

Как известно, в керамиках (например, в купратных оксидах) нет свободных электронов, а энергетический спектр валентных электронов является слоистым [14, 7, 3]. Это обусловлено наличием в таких материалах локализованных состояний, т. е. подсистем связанных электронов, энергетический спектр которых в локальном масштабе можно считать квазинепрерывным в смысле возможности переходов электронов с одного уровня на другой.

При этом в исходном состоянии энергетические барьеры между слоями настолько велики, что переходы электронов между ними без внешних и внутренних воздействий (температуры, давления, электрического и магнитного полей, допирования) невозможны [5].

В результате этих воздействий на локальном уровне происходит трансформация энергетического спектра связанных электронов в сторону их уплотнения и расширения, так что барьеры между слоями уменьшаются и энергетический спектр становится квазинепрерывным в глобальном масштабе всей системы. С физической точки зрения здесь речь идёт о мотовском переходе диэлектрик - проводник, а с математической (топологической) – переходе всей системы валентных электронов в односвязное состояние [15, 11]. Собственно, для возникновения сверхпроводящего состояния кроме вышеуказанной топологической перестройки энергетического спектра электронов необходимо обеспечить также их бездиссипативное прохождение в проводнике. Это происходит уже на квантово-кинетическом уровне благодаря сильно коррелированному спариванию электронов и последующему их объединению в когерентные сверхпроводящие цепочки [8].

Ранее топологический аспект крупнозернисто проквантованного энергетического спектра неравновесной системы вдали от равновесия в рамках термодинамического описания рассматривался в работе [12]. Было показано, что размерность m гиперповерхности функционала полного произведения энтропии

$$P = P(X_1^1, \dots, X_i^j, \dots, X_n^m, \dot{X}_1^1, \dots, \dot{X}_i^j, \dots, \dot{X}_n^m), \quad (1)$$

где $X_i^j = X_i^j(t)$, $\dot{X}_i^j = \dot{X}_i^j(t)$ – локальные по энергетической шкале параметры обобщенных термодинамических сил и скоростей их изменения (i, j – номера необратимого процесса и квазистационарной подсистемы), при релаксации неравновесной системы к стационарному состоянию всегда уменьшается, а при наличии возмущающего воздействия извне увеличивается. Аналогичная ситуация наблюдается и в случае ВТСП, причём уменьшение числа локализованных состояний может быть достигнуто уже на этапе его приготовления [5].

Однако более детальное и наглядное представление о связности энергетического спектра электронов в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) удаётся получить на квантово-статистическом уровне рассмотрения, если вместо локальных параметров X_i^j использовать локальные параметры плотностей квантовых состояний n_i^j [6, 13]. Определим функциональную зависимость указанных параметров, используя для этого уравнение баланса энтропии для подсистемы j [2]:

$$P^j = \sum_i X_i^j J_i^j, \quad (2)$$

где $P^j = dS^j / dt$ - производство энтропии; X_i^j, J_i^j - парциальные значения обобщённой силы и потока, обусловленные необратимым процессом i . Для этого производство энтропии P^j в левой части равенства (2) выразим через статистический вес, т.е. через число квантовых состояний в слое $\Delta\Gamma^j$ [6]. Тогда уравнение баланса энтропии при наличии теплового, диффузионного и электронного потоков, а также изменении объема и степени полноты химических реакций будет иметь вид [9]:

$$\frac{d \ln \Delta\Gamma^j}{dt} = \nabla \beta^j \frac{dE^j}{dt} - \nabla \mu_k^j \beta^j \frac{dN^j}{dt} - \nabla \varphi^j \beta^j \frac{dQ^j}{dt} - p^j \beta^j \frac{dV^j}{dt} + \sum_k A_k^j \beta^j \frac{d\xi_k^j}{dt}. \quad (3)$$

Здесь $\beta^j = 1/kT^j$ - обратная температура в энергетических единицах; μ_k^j, φ^j - соответственно химический и электрический потенциалы; A_k^j, ξ_k^j - химическое сродство и степень полноты реакции компонента k ; E^j, N^j, Q^j - внутренняя энергия, число частиц, тепловая энергия слоя j ; p^j - внешнее давление. Из уравнения (3) получаем следующую зависимость между парциальными дифференциальными параметрами обобщенных сил и плотностей квантовых состояний:

$$\begin{aligned} \nabla \beta^j &= \frac{1}{\Delta \Gamma^j} \left(\frac{\partial \Delta \Gamma^j}{\partial E^j} \right)_{N^j, Q^j, V^j, \xi_k^j}, & \nabla \mu_k^j \beta^j &= \frac{1}{\Delta \Gamma^j} \left(\frac{\partial \Delta \Gamma^j}{\partial N^j} \right)_{E^j, Q^j, V^j, \xi_k^j}, & \nabla \varphi_k^j \beta^j &= \frac{1}{\Delta \Gamma^j} \left(\frac{\partial \Delta \Gamma^j}{\partial Q^j} \right)_{E^j, Q^j, V^j, \xi_k^j}, \\ p_k^j \beta^j &= \frac{1}{\Delta \Gamma^j} \left(\frac{\partial \Delta \Gamma^j}{\partial V^j} \right)_{E^j, N^j, Q^j, \xi_k^j}, & A_k^j \beta^j &= \frac{1}{\Delta \Gamma^j} \left(\frac{\partial \Delta \Gamma^j}{\partial \xi_k^j} \right)_{E^j, N^j, Q^j, V^j}. \end{aligned} \quad (4)$$

Легко видеть, что частные производные в правой части равенств (4) представляют собой не что иное, как парциальные плотности квантовых состояний n_i^j , обусловленных соответствующими внешними и внутренними воздействиями. Поэтому эти соотношения можно записать в более компактном обобщённом виде:

$$X_i^j = \frac{n_i^j}{\Delta \Gamma^j}. \quad (5)$$

Поскольку в стационарном состоянии локальные параметры $X_i^j, \Delta \Gamma^j$ являются постоянными [10], то из (5) получаем также

$$n_i^j = const. \quad (6)$$

Далее для изучения топологических свойств энергетического спектра электронов весьма полезным являются также парциальные параметры густоты D_i^j , связанные с парциальными плотностями состояний простым соотношением [9 Ландау]:

$$D_i^j = 1/n_i^j = \Delta E^j / \Delta \Gamma_i^j, \quad (7)$$

где $\Delta \Gamma_i^j, \Delta E^j$ - парциальное значение параметра числа состояний и ширина энергетического слоя j . Затем, с учетом аддитивности парциальных $\Delta \Gamma_i^j$ и суммарного $\Delta \Gamma^j$ чисел квантовых состояний и соотношений (7), находим плотности чисел квантовых состояний и густоту энергетического спектра в самом слое j :

$$n^j = \sum_i n_i^j = \sum_i \Delta \Gamma_i^j / \Delta E^j = \Delta \Gamma^j / \Delta E^j, \quad (8)$$

$$D^j = 1/n^j = \Delta E^j / \Delta \Gamma^j. \quad (9)$$

Кроме определяемых по формулам (8) и (9) квантово-статистических параметров n^j и D^j , для интерпретации топологической связности энергетического спектра электронов ВТСП нам понадобятся также параметры расстояний между соседними энергетическими слоями ΔE^j и ΔE^{j+1} [18]:

$$D^{j,j+1} = E_{\min}^{j+1} - E_{\max}^j, \quad (10)$$

где E_{\max}^j и E_{\min}^{j+1} - наибольший и наименьший уровни энергии в слоях j и $j+1$. Следует отметить, что с точки зрения математики дискретные энергетические спектры отдельных слоев, также как и дискретный спектр в целом, состоящий из слоев и энергетических щелей

между ними, не являются связными. Однако с физической, т.е. квантово-статистической точки зрения, это вполне возможно, если под связностью понимать возможность перехода электронов между энергетическими уровнями внутри слоев и между ними [16, 17]. В первом случае это происходит вследствие достаточной близости, локализованных энергетических состояний электронов, т.е. достаточной малости величин D^j , для достижения перекрытия волновых функций. Во втором случае электронам приходится преодолевать более значительные энергетические барьеры между соседними по энергетической шкале слоями. Это может быть достигнуто либо путем уменьшения энергетических щелей между слоями (сжатие, допирование), либо за счет увеличения кинетической энергии спаренных электронов. Сверхпроводящее состояние при этом достигается только в том случае, если указанные переходы электронов внутри слоев и между ними происходят без потерь энергии. Для этого подсистемы ионов решетки и спаренных электронов проводимости должны быть самосогласованными (когерентными) как внутри самих себя, так и между собой [4].

В заключение автор выражает глубокую благодарность заведующему кафедрой квантовой статистики и теории поля МГУ им. М.В. Ломоносова, профессору Б.И. Садовникову, поддержка которого способствовали написанию этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрикосов А.А. Резонансное туннелирование в высокотемпературных сверхпроводниках // 1998. Успехи физических наук. 168(6). С. 683-695.
2. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. М.: Мир, 1974. 304 с.
3. Капаев В.В., Копаев Ю.В. Высокотемпературные сверхпроводники как гетероструктуры // Письма в ЖЭТФ. 1998. 68 (3). С. 211-216.
4. Келдыш Л.В. Когерентные состояния электронов // 2017. Успехи физических наук. 187(11). С. 1273-1279.
5. Коршунов М.М., Тогушова Ю.Н., Долгов О.В. Примеси в многозонных сверхпроводниках // Успехи физических наук. 2016. 186 (12). С. 1315-1347.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 584 с.
7. Москаленко В.А., Полистрант М.Е., Вакалюк В.М. Высокотемпературная сверхпроводимость на основе учёта особенностей электронного энергетического спектра // Успехи физических наук. 1991. 161 (8). С. 155-178
8. Плакида Н.М. Теория сильной связи в многозонных сверхпроводниках // Теоретическая и математическая физика. 2013. 171 (2). С. 313-325.
9. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.
10. Сайханов М.Б. О диссипативной природе спаривания электронов и возникновении высокотемпературной сверхпроводимости // Вестник КНИИ РАН. 2021. №5. С. 17-26.
11. Сайханов М.Б. О некоторых топологических свойствах кинетического моделирования неравновесной системы // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2012. № 1. С. 34-37.

12. Сайханов М.Б. Топологическая природа инерционности неравновесной системы вдали от равновесия // Теоретическая и математическая физика. 2017. 191 (1). С. 116-125.
13. Фудзита С. Введение в неравновесную квантовую статистическую механику. М.: Мир, 1969. 207 с.
14. Элиашберг Г.М. Носители тока и магнетизм в высокотемпературных сверхпроводниках // Успехи физических наук. 1989. 158 (2). С. 343-346.
15. Элиашберг Г.М., фон ден Линден. Переход Мотта и сверхпроводимость // Письма в ЖЭТФ. 1994. 59 (6). С. 413-417.
16. Feigelman M.V., Ioffe L.B. Superfluid density of a pseudogapped superconductor near the superconductor-insulator transition // 2015. Phys. Rev. B 92 100509(R).
17. Fujita K., Kim Ch. K., Lee I., Lee J., Hamidian M.H., Fermo L.A., Mukhopadhyay S., Eisaki H., Uchida S., Lawler M.J., Kim E.A., Davis J.C. Simultaneous Transitions in Cuprate Momentum-Space Topology and Electronic Symmetry Breaking // 2014. Science. 344. Pp. 1-13.
18. Saikhanov M.B. Chemical Affinity and the Density of Energy Levels // 2015. Journal of Modern Physics. 6. Pp. 1452-1455.

REFERENCES

1. Abrikosov A.A Resonant tunneling in high-temperature superconductors // 1998. Uspekhi fizicheskikh nauk. 168 (6). Pp. 683-695.
2. Gyarmati I. Nonequilibrium thermodynamics. Field theory and variational principles. Moscow: Mir, 1974. 304 p.
3. Капаев V.V., Копяев Yu.V. High-temperature superconductors as heterostructures // JETP Letters. 1998.68 (3). Pp. 211-216.
4. Keldysh L.V. Coherent states of electrons // 2017. Uspekhi fizicheskikh nauk. 187 (11). Pp. 1273-1279.
5. Korshunov MM, Togushova Yu.N., Dolgov OV. Impurities in multiband superconductors // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2016.186 (12). Pp. 1315-1347.
6. Landau L. D., Lifshits E. M. Statistical physics. Part 1.M.: Nauka, 1976. 584 p.
7. Moskalenko V.A., Polistrant M.E., Vakalyuk V.M. High-temperature superconductivity based on taking into account the electronic energy format // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1991.161 (8). Pp. 155-178
8. Plakida N.M. Strong coupling theory in multiband superconductors // Theoretical and mathematical physics. 2013. 171 (2). Pp. 313-325.
9. Prigogine I., Kondepudi D. Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures, Second Edition. 2015 John Wiley & Sons, Ltd. 506 p.
10. Saikhanov M.B. On the dissipative nature of electron pairing and the appearance of high-temperature superconductivity // Bulletin of CI RAS. 2021. № 5. Pp. 17-26.
11. Saikhanov M.B. On some topological kinetic modeling of a nonequilibrium system // Moscow University Bulletin. Series 3. Physics. Astronomy. 2012. № 1. Pp. 34-37.
12. Saikhanov M.B. The topological nature of the inertia of a nonequilibrium system far from equilibrium // Theoretical and Mathematical Physics. 2017.191 (1). Pp. 116-125.

13. Fujita S. Introduction to nonequilibrium quantum statistical mechanics. 1966. W.B. Saunders Company, Philadelphia – London.
14. Eliashberg G.M. Carriers of current and magnetism in high-temperature superconductors // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1989. 158 (2). Pp. 343-346.
15. Eliashberg GM, von den Linden. Mott transition and superconductivity // *JETP Letters*. 1994. 59 (6). Pp. 413-417.
16. Feigelman M.V., Ioffe L.B. Superfluid density of a pseudogapped superconductor near the superconductor-insulator transition // 2015. *Phys. Rev. B* 92 100509 (R).
17. Fujita K., Kim Ch. K., Lee I., Lee J., Hamidian M.H., Fermo L.A., Mukhopadhyay S., Eisaki H., Uchida S., Lawler M.J., Kim E.A., Davis J.C. Simultaneous Transitions in Cuprate Momentum-Space Topology and Electronic Symmetry Breaking // 2014. *Science*. 344. Pp. 1-13.
18. Saikhanov M.B. Chemical Affinity and the Density of Energy Levels // 2015. *Journal of Modern Physics*. 6. Pp. 1452-1455.