

ГИГАНТСКИЙ ИЗОТОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПО КИСЛОРОДУ В МЕТАЛЛООКСИДНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

А. С. Александров

Показано, что теория поляронной сверхпроводимости допускает большие значения изотопического эффекта $\alpha > 0,5$. Указано на возможность аномально большого изотопического эффекта по кислороду в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

Первые эксперименты¹ по изотопическому замещению кислорода в новых ВТСП (YBCO, LSCO) показали относительно низкое значение изотопической константы

$$\alpha = - \frac{d \ln T_c}{d \ln M} \lesssim 0,2, \quad (1)$$

что было интерпретировано в ряде работ как указание на роль мягких мод,² ангармонизма и кулоновского взаимодействия, либо как на преобладающую роль нефононного механизма спаривания носителей (см., например,³). Здесь M – масса атома кислорода.

С другой стороны зонные⁴ и аналитические⁵ расчеты, сравнение туннельных характеристик с нейтронными спектрами колебаний⁶, температурная зависимость теплопроводности⁷ и ряд других экспериментов⁸ свидетельствуют о сильном взаимодействии носителей в металлооксидных ВТСП с выделенными жесткими модами колебаний легких кислородных анионов, которое, в принципе, должно, приводить к более заметному изотопическому эффекту.

Причина низких α в экспериментах¹ по замещению O^{16} на O^{18} может заключаться в том, что O^{16} не уходит с кристаллографических позиций в медных плоскостях, а замещению подвергается, в основном, более подвижный кислород в медных цепочках и в окружении Ba, изотопическое состояние которого слабо влияет на T_c . Это подтверждается недавно полученными результатами⁹ по синтезу YBCO из исходных окислов, вообще не содержащих изотоп O^{16} :

$$\alpha \approx 2,5, \quad (2)$$

что соответствует понижению T_c с 92 К в образцах на изотопе O^{16} до 59 К и 77 К в образцах, приготовленных идентично на изотопах O^{18} и O^{17} соответственно. Гигантский изотопический эффект (2) в пять раз превышает предельное значение, предсказываемое теорией БКШ как в случае слабой так и сильной электрон-фононной связи.

В данной статье предлагается объяснение аномального изотопического эффекта⁹ в рамках поляронной модели ВТСП², согласно которой достаточно сильное электрон-фононное взаимодействие ($\lambda \geq 1$) приводит к образованию тяжелых малых биполяронов с эффективной массой m^{**} , конденсирующихся в сверхтекучую заряженную бозе-жидкость при температуре¹⁰:

$$T_c = f(p) / m^{**}, \quad (3)$$

где $f(p)$ – функция концентрации носителей p , не зависящая от массы изотопа. В области малых концентраций ($\hbar = k_B = 1$):

$$f(p) \approx 3,3 (p/2)^{2/3}. \quad (4)$$

Согласно¹¹ в простейшем случае взаимодействия с бездисперсионной модой колебаний с частотой ω :

$$m / m^{**} = 2T_{ij} \Delta^{-1} M (1,1 + \Delta/\omega, 2g^2), \quad (5)$$

где $\Delta = (2g^2 \omega - V_c)$ – энергия связи биполярона, не зависящая от массы изотопа, V_c – потенциал кулоновского отталкивания, g – безразмерная константа фреilihовского взаимодействия; T_{ij} – интеграл перескока в жесткой решетке, определяющий зонную массу m ,

${}_2F_1(a, c, z)$ – вырожденная гипергеометрическая функция:

Полагая $\omega \sim M^{-1/2}$, $g^2 \sim M^{1/2}$, из (3–5) получим:

$$\alpha = g^2 F(\Delta/\omega, 2g^2), \quad (6)$$

где

$$F(x, y) = 1 + M^{-1} (1, 1 + x, y) (M(1, 2 + x, y) - (x/y) dM(1, 1 + x, y)/dx)$$

изменяется от $F(0, y) = 1$ до $F(\infty, y) = 2$.

Таким образом, как следует из выражения (6), теория биполяронной сверхпроводимости ¹⁰ дает принципиальную возможность получить изотопический эффект $\alpha > 0,5$ при значениях $g^2 \gtrsim 1$, обеспечивающих условие существования полярона малого радиуса ¹⁰. Значение (2) соответствует $g^2 = 1,25 \div 2,5$, что согласуется с оценками ² эффективной массы биполярона, полученными из величины T_c , глубины проникновения магнитного поля, и коэффициента электронной теплоемкости в $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

Автор благодарен В.В.Кабанову за помощь в числовых расчетах.

Литература

1. Leary K.J., Loye H. C., Keller S.W. *et al.* Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 1236. Batlogg B., Konrouklis G., Weber *et al.* Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 912.
2. Александров А.С. В сб.: Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Свердловск, 1987, ч. 1, стр. 150.
3. Anderson P.W. *Science*, 1987, 235, 1196.
4. Weber W. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 1371.
5. Гайдидей Ю.Б., Локтев В.М. Препринт ИТФ-87-103 Р, Киев, 1987.
6. Булаевский Л.Н. Доклад на Международной конференции HTSC-M², 1988.
7. Bagot V., Delannay F., Dewitte C. *et al.* Sol. St. Comm., 1987, 63, 983.
8. Gardona M., Liu R., Thomsen C. *et al.* Sol. St. Comm., 1988, 65, 71.
9. Otts K. Superconductivity News, 1988, 1, № 8,7.
10. Alexandrov A., Ranninger J. Phys. Rev., 1988, B24, 1164; Alexandrov A.S., Ranninger J., Robaszkewicz S. Phys. Rev., 1986, B33, 4526.
11. Александров А.С., Кабанов В.В. ФТТ, 1986, 28, 1129.