

Ba-Y-Cu-O 的超导临界温度随 压力变化的理论解释

冯 世 平

(北京师范大学物理系, 低能核物理研究所)

马 本 堃

(北京师范大学物理系)

1987 年 8 月 25 日收到

采用 Anderson 晶格哈密顿量, 根据文献 [6] 提出的非电-声子超导机制理论, 解释了 Ba-Y-Cu-O 的超导临界温度随压力的变化.

近来高 T_c 超导体的实验和理论研究有了许多新的进展^[1-6]. 为了解释高 T_c 超导机制, 人们已提出了许多不同的理论模型^[5,6]. 实验上也已对高 T_c 超导体的 Josephson 效应、同位素效应等进行了深入的研究^[3,4]. 但最使我们感兴趣的是 Murata 等人对 Ba-Y-Cu-O 的超导临界温度随压力变化的实验测量^[7]. 实验结果表明 Ba-Y-Cu-O 的超导临界温度随压力的增大而减小. 本文的目的就是试图在文献 [6] 的基础上解释这个实验事实.

根据对 Ba-Y-Cu-O 等系统的结构分析和能带计算^[6,8], 我们注意到这些高 T_c 超导体能带结构的复杂性: 由 Cu 的 $d_{x^2-y^2}$ 轨道和 O 的 2p 轨道组成的能带被认为是自由电子能带, 而由 Cu 的 d_{z^2} 轨道和 O 的 2p 轨道组成的能带是一个相当窄的能带, 这个能带中的电子的局域性很强. 对于处理这种双能带系统, 大家公认的比较好的模型是推广的 Anderson 模型^[6,9].

$$H = \sum_{k\sigma} \epsilon_k c_{k\sigma}^\dagger c_{k\sigma} + \sum_{k\sigma} \tilde{\epsilon}_{fk} f_{k\sigma}^\dagger f_{k\sigma} + \sum_{i\sigma} V (c_{i\sigma}^\dagger f_{i\sigma} b_i + \text{H.c.}) + \sum_k \lambda b_k^\dagger b_k, \quad (1)$$

$$\tilde{\epsilon}_{fk} = \alpha \epsilon_k, \quad (2)$$

式中 $c_{k\sigma}$ 是自由电子带的电子湮灭算符, $f_{k\sigma}$ 是窄能带的电子湮灭算符, ϵ_k 是自由电子带的能量, $\tilde{\epsilon}_{fk}$ 是重整化后的窄能带的能量, V 是杂化参数, λ 是 Lagrange 不定乘子, b_i 是格点 i 上的 Slave-Boson 场算符. 当对系统施加压力后, 我们认为系统中的窄能带和 Fermi 能级要发生相对移动, 同时增大了窄能带中的电子与自由电子带中的电子的杂化. 在低压情况下, 这些效应可以通过下列方式引入:

$$\alpha = \alpha_0 - x_1 \bar{v} \quad x_1 > 0, \quad (3)$$

$$E_F = E_0 - x_2 \bar{v} \quad x_2 > 0, \quad (4)$$

$$\bar{v} = v_0 - v, \quad (5)$$

式中 E_F 是系统的 Fermi 能量, α_0 , E_0 是在零压力下对应的值, v_0 是零压力下的比容,

ν 是压力为 P 时的比容. 当系统处于正常态时, 我们可求出其基态能量^[6]为

$$E_g = \frac{3}{5} (1 + \alpha) E_F. \quad (6)$$

为了确定比容与压力的关系, 我们定义系统的焓

$$Q = E_g + P\bar{\nu} \quad (7)$$

由平衡条件 $\partial Q / \partial \bar{\nu} = 0$, 可得

$$P - \frac{3}{5} (1 + \alpha_0) x_2 - \frac{3}{5} E_0 x_1 + \frac{6}{5} x_1 x_2 \bar{\nu} = 0. \quad (8)$$

再由条件 $P = 0$ 时, $\bar{\nu} = 0$, 最后可得 P 与 $\bar{\nu}$ 的关系为

$$\bar{\nu} = \frac{5}{6} \cdot \frac{1 + \alpha_0}{x_1^2 E_0} P. \quad (9)$$

在 Anderson 哈密顿量 (1) 和 (2) 式的基础上, 我们已经求出系统的超导临界温度^[6]为

$$T_c = 1.13 W_c e^{-(1+\alpha)/\gamma N_F}, \quad (10)$$

式中 W_c 是切断能量, N_F 是 Fermi 面上的态密度, γ 是耦合常数. 从文献 [6] 中已经知道 γ 与杂化参数 V 的平方成正比, 因而当对系统施加压力后, 由于窄能带中的电子与自由带中的电子杂化的增大, 我们认为应该有

$$\gamma = \gamma_0 - \beta \bar{\nu} \quad \beta > 0. \quad (11)$$

为了讨论 Ba-Y-Cu-O 的超导临界温度随压力的变化, 我们自然是将 (3), (11), (9) 式代入 (10) 式中, 在低压情况下可得

$$T_c^P = T_c^0 e^{-aP + bP^2}, \quad (12)$$

式中

$$a = \frac{5(1 + \alpha_0)}{6N_F \gamma_0 x_1^2 |E_0|} \left[\frac{1 + \alpha_0}{\gamma_0} \beta - x_1 \right], \quad (13)$$

$$b = \frac{25\beta(1 + \alpha_0)^2}{36N_F \gamma_0^2 x_1^3 E_0^2}. \quad (14)$$

从这些表达式中可以看出: 参数 a 和 b 是一些更基本的参数的组合, 而这些参数的确定需要做非常仔细的计算, 这在现阶段是不可能的, 因而在本文中我们将视 a 和 b 为可调参数, 取 $a = 0.005$, $b = 0.0001$. 从图 1 中可以看出理论值与实验值符合较好, 从而定性

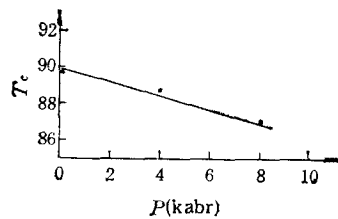


图 1

实线为理论值; ● 为实验值

地解释了 Ba-Y-Cu-O 的超导临界温度随压力变化的实验事实.

作者感谢与黄祖洽教授的有益讨论

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Muller, *Z. Phys. B*, **64**(1986), 189.
[2] C. W. Chu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 405; M. K. Wu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 908; 赵忠贤等, *科学通报*, **32**(1987), 412.
[3] J. S. Tsai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1979; J. T. Chen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1972.
[4] B. Barlogy *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 2333; L. C. Boume *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 2337.
[5] P. W. Anderson, preprint; A. E. Ruckenstein *et al.*, Preprint; C. M. Varma *et al.*, *Solid State Comm.*, **62**(1987), 681; W. Weber, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1371.
[6] 冯世平、马本菴, 已投物理学报.
[7] K. Murata *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**(1987), L471.
[8] L. F. Mattheis, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987) 1028; J. Yu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987) 1035; D. M. Lee and J. Ihm, *Solid State Comm.*, **62**(1987), 811.
[9] P. Coleman, in "Theory of Heavy Fermions and Valence Fluctuations", edited by T. Kasuya and T. Saso, Springer-Verlag, New York, (1985).

THEORETICAL EXPLANATION OF THE CHANGES OF SUPERCONDUCTING CRITICAL TEMPERATURE OF Ba-Y-Cu-O WITH PRESSURES

FENG SHI-PING

(*Department of Physics, Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University*)

MA BEN-KUN

(*Department of Physics, Beijing Normal University*)

ABSTRACT

Using the Anderson lattice Hamiltonian, we have explained the changes of superconducting critical temperature of Ba-Y-Cu-O with pressures in the framework of electron-electron mechanism which was proposed by the authors.