

一维非金属介观环的持续电流^{*}

吴深尚 曹天德

(中山大学物理学系, 广州 510275)

摘要 利用 Zou-Anderson 的电荷自旋分离方案, 通过具有一定掺杂的大 U Hubbard 模型研究非金属型的一维介观环的持续电流. 结果发现, 电荷流振幅受 Spinon 场序参量的影响, 自旋流振幅受 Holon 场序参量影响和材料掺杂浓度 δ 的影响.

关键词 电荷-自旋分离, 介观环, 持续电流, Hubbard 模型

分类号 O 413.3

自 Cheung 提出介观金属环通以磁通能在环中诱导出一个持续电流^[1]以来, 尽管有很多的工作, 但是一维介观环的持续电流一直是个尚未弄清的问题. 传统费米液理论难于解释为何实验中存在比理论值大得多的持续电流. 也有人尝试用 Luttinger 液体理论来解释持续电流^[2], 它从远离半满填充 (away from half-filling) 状态出发, 定性地得到持续电流. 此外用一维 Hubbard 模型讨论介观环持续电流也有不少报道^[3].

Luttinger 液体理论将电子中电荷和自旋二个内禀物理量分离成二种独立的自由度, 而在高温超导机制的研究中, Zou-Anderson 也提出一种电荷和自旋分开的机制^[4]. 他们引入服从玻色统计的电荷元激发 Holon 及服从费米统计的自旋元激发 Spinon, 其共振价键理论 (RVB) 对于强关联的低维 (1D, 2D) 系统是一种很重要的量子液体理论. 因此我们期望带电的 Holon 在低温下的玻色凝聚成为传导电流而解释介观环的持续电流.

本文用一维 Hubbard 模型描述通有一定磁通 h_m 的介观环中的电子, 采用了 Zou-Anderson 所提出的电荷-自旋分离机制来计算低温下的介观持续电荷流及自旋流. 所得结果与其它的理论结果定性一致, 但求得的电荷流振幅受 Spinon 的序参量影响, 而自旋流除受 Holon 序参量影响之外还受到材料的掺杂及 Spinon 间形成 Singlet (单态) 对的影响.

1 1D Hubbard 环的有效哈密顿量

讨论一个周长为 $L = Na$ 的介观环, 环中心穿通与自旋有关的磁通 h_m , 描述这种环的外力型 Hubbard 模型的哈密顿量为

$$\hat{H} = -t \sum_{\substack{\ell=1 \\ c=\pm 1}}^L (c^{\dagger-1} c e^{i h_m \ell} + h \cdot c) + U \sum_{\ell=1}^L n_{\ell\uparrow} n_{\ell\downarrow} \quad (1)$$

* 中山大学高等学术中心资助项目

收稿日期: 1997-07-23 吴深尚, 男, 52 岁, 教授

这里 h 是与电子自旋 e 有关的 AB 型磁通, $\hat{c}_{i-1,e}^\dagger, \hat{c}_e$ 分别是电子在 i site 上的产生及消灭算子, 密度算子 $n^\dagger = \hat{c}_{i-1,e}^\dagger \hat{c}_e^\dagger$, 此外为简单计将元胞之间的距离 a 取为单位长度.

依照 Zuo-Anderson 的自旋电荷分离机制, 引入辅助场算子 e_i, d_i, s_i^e , 它们的关系为

$$\hat{c}_{i-1,e}^\dagger = e_i s_i^e \hat{c}_i + \text{sgn}(e) d_i^\dagger s_i^e \quad (2)$$

并满足如下的对易关系和约束条件

$$[e_i, e_j^\dagger] = W_j, \quad [s_i^e, s_j^e] = W_j W_{j+1} \\ \hat{c}_i^\dagger e_i + d_i^\dagger d_i + \sum_e s_i^e s_i^e = 1 \quad (3)$$

其余的对易关系为零.

在大 $U (U \geq 5t)$ 及小掺杂 ($W \leq t/U$) 下, 将 site 上电子产生的双占据态当做虚过程的中间态. 将 (2) 式代入 (1) 式得到真实的跳跃项

$$- \sum_{i=1}^L e^{ih_{eL}} (e_{i+1}^\dagger \hat{c}_i^\dagger + d_i^\dagger d_{i+1}) s_{i+1,e}^\dagger s_i^e + h \cdot c$$

以及做为中间虚过程的混合项

$$- \sum_{i=1}^L (e_i d_i \text{sgn}(e) s_{i+1,e}^\dagger s_i^e e^{ih_{eL}} + d_{i+1}^\dagger e_i^\dagger s_i^e s_{i+1,e} e^{-ih_{eL}}) + h \cdot c$$

在大 U 条件下忽略双占据态, 而虚过程的混合项等效一个二级微扰修正. 这样求出介观环的有效哈密顿量

$$\hat{H}_{\text{eff}} = - \sum_{i=1}^L (e^{ih_{eL}} e_{i+1}^\dagger \hat{c}_i^\dagger s_{i+1,e}^\dagger s_i^e + h \cdot c) - \sum_{i=1}^L (s_{i+1,e}^\dagger s_i^e s_{i+1,e} - s_{i+1,e}^\dagger s_i^e s_{i+1,e}^\dagger) \quad (4)$$

这里, $J \equiv 4t^2/U$.

将有效哈密顿量变换到动量空间, 并对其进行平均场处理, 则

$$\hat{H}_{\text{eff}} = \hat{H}_h + \hat{H}_s \\ \hat{H}_h = -4t^d \sum_k \cos(k_n + h_{eL}) \hat{c}_k^\dagger c_k \quad (5)$$

其中, $d^f \equiv \sum_k \langle s_{i+1,e}^\dagger s_i^e \rangle$, $k_n = \vec{k} \cdot \vec{a} = \frac{2\pi}{N} n$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$$\hat{H}_s = [-2t^d \sum_k \cos(k_n - h_{eL}) - \frac{J}{4}(1-W) + J^d \cos k_n] s_{i+1,e}^\dagger s_i^e + \\ \sum_k [s_{-K}^\dagger s_{K+1}^\dagger \Delta_k^\dagger + s_{K+1}^\dagger s_{-K}^\dagger \Delta_k] \quad (6)$$

这里引入了序参量 $d^f \equiv \langle \hat{c}_i^\dagger e_{i+1} \rangle$ 及关系式 $\sum_e \langle s_i^e s_i^e \rangle = 1 - W$, $W \equiv \langle \hat{c}_i^\dagger e_i \rangle$ 为空穴 (掺杂)

浓度, $\Delta_k = \frac{1}{2} \cos k_n \langle s_{i+1}^\dagger s_{i+1}^\dagger - s_{i+1}^\dagger s_{i+1}^\dagger \rangle$.

2 Holon 能谱及持续电荷流

由介观环的循环边条件 $c_{i+N} = c_i \exp(2\pi i h/h_b)^{[5]}$, 将电子在环中循环运动时的位相 h 表达为

$$h = 2\pi (h_m/h_b + h_g) \quad (7)$$

h_m/h_b 是由磁通引起的位相, h_g 是纯几何因素的 Berry 位相, $h_b \equiv hc/e$.

则由 (5) 式哈密顿量描述的 Holon 的能谱为

$$E_n = -4td^{\beta} \cos \left[\frac{2\pi}{N} (n + h_m/b + h_g) \right] \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

相应 Holon 引起的持续电荷流可由下式求出

$$I_h^n = -c \frac{\partial E_n}{\partial h_m} = (-4td^{\beta} e / \hbar) \sin \left[\frac{2\pi}{N} (n + \frac{h_m}{b} + h_g) \right] \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9)$$

结果说明由 Holon 产生的电荷流仍然是磁通的周期函数, 但电流的振幅与 Spinon 的序参量 d^{β} 有关. 由于 Holon 服从玻色统计, 所以当 Holon 在玻色凝聚温度下将有相当的数量 n_0 凝聚于最低能级, 形成较大的持续电流. 而在高于凝聚温度时系统的持续电荷流则由下式求出

$$I_h(h, T) = \sum_n I_h^n f(E_n) \quad (10)$$

这里, $f(E_n)$ 是能量为 E_n 的玻色分布函数, I_h 由 (9) 式给出.

3 Spinon 能谱及持续自旋流

由 (6) 式哈密顿量描述的 Spinon, 由于包含了非对角形式的项, 所以在求能谱时必需进行对角化. 为此引入如下的正则变换

$$s_{k\uparrow} = u_k r_{k\uparrow} + v_k r_{-k\downarrow}^{\dagger}, \quad s_{-k\downarrow} = v_k r_{k\uparrow}^{\dagger} + u_k r_{-k\downarrow} \quad (11)$$

经过计算, 可得

$$H_s = \sum_{k^e} X_k r_{k^e}^{\dagger} r_{k^e} + \text{常数项}$$

其中, $X_k = (k_x^2 - \Delta_k^2)^{1/2}$, $k_x \equiv -2td^{\beta} \cos(k_x - h_{IL}) - \frac{J}{4}(1 - W) + Jd^{\beta} \cos k_x$

X_k 表示在系统的 Spinon 形成自旋 Singlet 的 RVB 态时, 破坏一个 Singlet 对而产生的准粒子的能量, 相应的 Δ_k 是元激发的能隙.

按照自旋流的计算方法^[5,6]

$$I_s^n = -\frac{1}{h} \partial X_k / \partial h_g = \frac{2td^{\beta}}{\hbar} \frac{k_x}{X_k} \sin \left[\frac{2\pi}{N} (n - \frac{h_m}{b} - h_g) \right], \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (12)$$

$$I_s(h, T) = \sum_n I_s^n f(X_k) \quad (13)$$

这里 $f(X_k)$ 是能量为 X_k 的费米分布函数.

从 (12), (13) 式看出自旋流除受到 Holon 场的序参量 d^{β} 影响之外, 还受到 Spinon 形成 Singlet 对的影响, 如果 $\Delta_k = 0$, 即不存在 Spinon 的 Singlet 对, 则自旋流的形式与 Holon 的电荷流形式一致. 此外还明显地受到材料的掺杂 W 的影响.

4 讨 论

从一维 Hubbard 模型出发, 求出 Spinon 及 Holon 的有效哈密顿量, 然后分别算出介观环的持续电荷流和自旋流. 文中方法与 Luttinger 理论^[2] 相同之处在于都是将电子的电荷、自旋自由度分离. 但是, 求出的电荷及自旋流都有明显的周期形式, 即电荷流、自旋流都是磁通 h_m 的周期函数. 这一点与其它 (费米液理论) 理论的结果形式一致.

其次从一个强关联的哈密顿量出发 (描述过高温超导体的大 U Hubbard 模型)^[4] 来描述介观环, 它可以是一个掺杂某些元素的非金属介观环. 由此得到一些新的结果.

(1) 电荷流振幅受到 Spinon 场序参量的影响, 因而比一般金属环的理论电流振幅减少.

(2) 自旋流振幅除了受 Holon 场序参量影响之外还受到材料的掺杂浓度 W 的影响.

以上所述的都是定性的结论,详细的数值计算结果及讨论将另文报导.

参 考 文 献

- 1 Cheung H F, Gefen Y R, Shih W H. Persistent currents in small one-dimensional metal rings, *Phys Rev(B)*, 1988, 37 6050
- 2 Schmeltzer D. Persistent current for a Luttinger liquid. *Phys Rev(B)*, 1993, 47 7591
- 3 Rudolf A, Romer, Alexander P. Enhanced charge and spin currents in the one-dimensional disorder mesoscopic Hubbard ring. *Phys Rev(B)*, 1995, 52 14809
- 4 Wu S S, Hu L, Ji Z R, et al. Peierls transition in the two-dimensional doped large-U Hubbard model. *Phys Lett(A)*, 1990, 144 393
- 5 Wu S S, Ma Z S, Wang J. Influence of ferromagnetic spin waves on persistents in one-dimensional mesoscopic rings. *Phys Rev(B)*, 1996, 53 16372
- 6 Loss D, Goldbart P M. Berry's phase and persistent charge and spin currents in textured mesoscopic ring. *Phys Rev Lett*, 1990, 65 1655

Persistent Currents in One-Dimensional Non-Metal Mesoscopic Ring

Wu Shenshang Cao Tiande*

Abstract The persistent currents in one-dimensional non-metal mesoscopic ring are studied using Zou-Anderson's Slave-Fermion method with large-U Hubbard model at heavy doping condition. It is shown that the charge current is affected by the spinon's order parameter and that the spin current is affected by Holon's order parameter and by the doping fraction W .

Keywords charge-spin separation, mesoscopic ring, persistent currents, Hubbard model

· 简 讯 ·

1997年中山大学获国家自然科学基金情况

1997年,中山大学共获得国家自然科学基金 39项(如:陈树辉的强非线性结构振动分析的新方法及其应用等),其中,国家自然科学基金重点项目 2项(庞义的斜纹夜蛾杆状病毒的侵染机理及疾病流行规律研究和屈良鹄的新的核仁小分子 RNA 基因结构 表达及功能研究),国家杰出青年科学基金 2项(章明秋的高分子复合材料界面层各向异性结构与性能的关系)。

(芊 子)

* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China