



行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

以 Fermion-spin 理論探討強關聯系統與高溫超導材料
之反常物理性質和超導機制

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2112-M-032-017-

執行期間： 91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

計畫主持人：陳惟堯

共同主持人：

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學

國科會專題研究計畫成果報告 --- 精簡報告

計畫名稱：以 Fermion-Spin 理論探討強關聯系統與高溫超導
材料之反常物理性質和超導機制

中文摘要：

關鍵詞：強關聯系統、非費米液體、費米子自旋理論、超導機制

中文摘要：

氧化物超導材料，是一種典型的強關聯系統，及一高度各向異性材料，其物理性質主要是由在此類材料中共有的二氧化銅平面上電子的強關聯行為所決定。此強關聯行為使得任一格點上不能存在兩個電子的雙重佔據，亦即每一格點均存在一個電子單佔據的局域約束條件 $\sum_{\sigma} C_{i\sigma}^+ C_{i\sigma} \leq 1$ 。亦即等價於將整個系統限制在一個沒有電子雙佔據的 Hilbert 子空間裏。氧化物超導材料，是凝聚態物理至今研究最複雜系統之一，其物理性質隨攙雜而變化，在正常態和超導態時顯示非常豐富的反常物理性質：如無准粒子傳播、帶電自由度與自旋自由度分離、有費米面存在但系統的波函數重整化常數 $Z_k = 0$ ；此等物理性質皆不能在費米液體理論 (Fermi-Liquid theory) 框架下得到解釋。

目前大家均相信，氧化物超導材料的一些主要物理特性，可以由 $t-J$ 模型，或類似的 $t-t'-J$ 等模型來描述，本計畫主持人針對此類議題研究多年，並與馮世平教授合作，部分研究成果已發表在國際知名學術刊物上。為進一步深入理解這類

材料的其他反常性質和超導機制，本研究計畫將以費米自旋理論，針對欠參摻雜雙層銅氧化物(underdoped bilayer cuprates)的電導現象，及其他特性加以探討，發現雙層銅氧化物除了會導致能帶分離現象外，其電導現象大致與單層銅氧化物一致，其導電能譜(conductivity spectrum)含一低能峰(low-energy peak)，及一異常的中紅外能帶(unusual midinfrared band)。當溫度增加時，此中紅外能帶將受到嚴重壓抑，此外電阻在超欠摻雜區(heavily underdoped region)則顯出由高溫的類金屬(metalliclike)至低溫的類絕緣(insulatinglike)的轉變。

ABSTRACT :

Keywords: strongly correlated system、non-Fermi Liquid、Fermion-spin theory、mechanism of the superconductivity

Abstract:

Cuprate superconductors are typical strongly correlated systems, and the physical properties of these materials are mainly determined by the strong electron correlation in copper oxide planes. The strong electron correlation restricts the systems in the no doubly occupied Hilbert subspace, i.e., where there is the single occupancy local constraint $\sum_{\sigma} C_{i\sigma}^{\dagger} C_{i\sigma} \leq 1$, which lead to that cuprate superconducting materials are one of the most complicated systems in condensed matter physics so far. The physical properties of cuprate materials depend on the extent of dopings, and show very rich anomalous properties in both normal- and superconducting-states, such as the charge-spin separation, vanishing of the quasiparticle residue, and d-wave symmetry in the superconducting-state.

It is believed that the physics of cuprate superconducting materials may be effectively described by the t-J model or the similar t-t'-J model acting on the space with no doubly occupied sites. Based on the t-J model and t-t'-J model, we have discussed some unusual normal-state properties and collaborated with Professor Shiping Feng in Beijing Normal University. In this research project, we have studied the charge transport in underdoped bilayer cuprates and other abnormal phenomena,

we found that besides the bilayer interaction leads to the band splitting in the electronic structure, the qualitative behavior of the charge transport is the same as in the case of single-layer cuprates. The conductivity spectrum shows a low-energy peak and the unusual midinfrared band. This midinfrared band is suppressed severely with increasing temperature, while the resistivity in the heavily underdoped regime is characterized by a crossover from the high-temperature metalliclike to the low-temperature insulatinglike behaviors.

報告內容：

前言：

本研究計畫係以費米子自旋理論，研究強關聯系統，與氧化物高溫超導材料之反常物理性質，和電荷動力學和自旋動力學相關的一些反常物理性質，和超導機制。

我們都知道，氧化物超導材料是一種典型的強關聯多電子系統，同時又是一種高度各向異性材料，其物理性質主要是由這類材料中共有的二氧化銅平面裏電子的強關聯行為所決定。氧化物超導材料是凝聚態物理中至今研究的最為複雜的系統之一，其物理性質隨摻雜而變化，摻雜多寡被劃分為欠摻雜區，最佳摻雜區，和過摻雜區。特別是在欠摻雜區和最佳摻雜區域中，氧化物超導材料在正常態和超導態時顯示非常豐富多樣的反常物理性質，而且這些反常的物理性質並不能在費米液體理論 (*Fermi-Liquid theory*) 架構下得到解釋。所以徹底理解此一系統的各種反常物理現象極為重要。

為進一步深入理解這一類材料的其他反常性質本研究計畫將以費米子自旋理論針對欠參摻雜雙層銅氧化物(*underdoped bilayer cuprates*)的電導現象，及其他特性加以探討。

研究目的、文獻探討、研究方法：

自從氧化物高溫超導材料被發現後，我們發現此等材料在正常態和超導態中，有許多反常的物理特性。這些材料是一種准二維的高度各向異性系統，他們共有的二氧化銅平面中電子的強關聯行為，導致的他們大部分的物理特性，現在我們已經相信氧化超導材料是非費米液體，其主要特徵是，沒有准粒子傳播，帶電自由度與自旋自由度分離，有費米面存在，但系統的波函數重整化常數 $Z_k = 0$ 。在理論上大家現在已經相信，氧化物高溫超導材料的主要物理特性可利用 $t-J$ 模型或 $t-t'-J$ 等模型(大 U 極限的 *Hubbard* 模型)來解釋。在這些模型中最困難的便是，如何處理好電子局域單佔據的約束條件。

研究強關聯氧化物超導材料的最大困難在於如何處理強關聯效應，而反映此強關聯效應的是在這類系統中存在一個電子局域單佔據約束條件。如此約束條件處理不好，將導致許多無物理意義的結果。馮世平教授與其合作者在 1994 年提出一個較好的處理此類約束條件的理論，亦即 *Fermion-spin* 理論 [Phys. Rev. B 49, 2368 (1994)]。該理論得到國際同行的好評與認可，並且已應用此理論，綜合的討論了有關氧化物超導材料的一些反常物理性質，其涵概層面，包括與攙雜有關的反鐵磁長程序、光電子譜、准粒子譜、電荷動力學(光電導、*ab* 平面的電阻率、*c*-軸電阻率等)，自旋動力學(動力學自旋結構因子、動力學磁化率、自旋-晶格弛豫時間等)，層能隙問題(*pseudogap*)等物理現象。

Fermion-spin 理論 [Phys. Rev. B 49, 2368 (1994)] 的最大優點即在於能在實際的計算中，嚴格處理氧化物超導材料中，電子局域單佔據約束條件，亦即可有效的處理好這些強關聯效應。並進一步應用此 *Fermion-spin* 理論，討論了不少這些材料的物理特性，如與攙雜有關的反鐵磁長程序、准粒子光譜、光電子譜、電荷動力學，及自旋動力學等。

在 *Fermion-spin* 理論中已將電子算符寫成費米子 h_i (*holon*) 和 *Hard-core* 玻色子 S_i (*spinon*) 的乘積型式 $C_{i\uparrow} = h_i^+ S_i^-$, $C_{i\downarrow} = h_i^+ S_i^+$ ，此 *Hard-core* 玻色子是一層自旋算符 (*pseudospin operator*)，它的基本性質是在同一格點上服從費米統計，而在不同格點上遵從玻色統計。在 *Fermion-spin* 此一理論框架下，即使為平均場近似下，電子的局域單佔據約束條件也可滿足。由於電子的局域單佔據約束條件已自動滿足，這也等價於處理好這類系統中的強相關聯效應。本計畫主持人，曾討論此等議題多年，亦曾與馮世平教授合作研究，攙雜三角形反鐵磁的自旋動力學 (*Spin dynamics in doped triangular antiferromagnets*) (Phys. Rev. B 62, 13828 (2000))、銅氧化物在欠攙雜區的不相容磁漲 (*Incommensurate magnetic fluctuations in the underdoped copper oxide materials*) (Commun. Theor. Phys. 36, 370 (2001))、攙雜雙腿梯子型之光電導和輸運性 (*Optical and transport properties in doped two-leg ladder antiferromagnet*) (Phys. Rev. B 65, 155117 (2002))、以及攙雜雙腿子反鐵磁材料 $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$ 之能量相依相容中子散射峰 (*Energy dependence of commensurate neutron scattering peak in doped two-leg ladder antiferromagnet $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$*) (Phys. Rev. B 67, 094420 (2003))。

結果與討論:

本研究計畫係以費米自旋理論, 針對欠參摻雜雙層銅氧化物(underdoped bilayer cuprates)的電導現象, 及其他特性加以探討, 發現雙層銅氧化物除了會導致能帶分離(band splitting)現象外, 其電導和電阻現象大致與單層銅氧化物一致。其中該與頻率及溫度相關的電導(frequency-and-temperature-dependent conductivity)特性顯示, 雙層銅氧化物(underdoped bilayer cuprates) 在欠參摻雜區域其電導係數顯現出一尖銳的低能峰(sharp low-energy peak), 及在電荷轉換能隙中出現一異常的中紅外能帶(unusual midinfrared band)。經分析後發現此一電導低能峰隨能量增加其衰變極快 (as $\sigma(\omega) \sim \frac{1}{\omega}$), 呈現 non-Drude fall-off。同時中紅峰帶之權值, 與摻雜有關, 當摻雜增加時, 其峰之位置往低能移動。至於當溫度增加時, 其中紅外能帶則將受到嚴重壓抑。

此外其溫度相關的電阻(temperature-dependent resistivity), 在超欠摻雜區(heavily underdoped region), 則顯出由高溫的類金屬(metalliclike), 至低溫的類絕緣(insulatinglike)的轉變特性。這些結果均與相關的實驗一致。

本研究計畫主持人, 將利用 *Fermion-spin* 理論, 繼續探討強關聯氧化物超導材料中, 與電荷動力學和自旋動力學相關的一些反常物理性質和超導機制, 以及在磁通子動力學方面, 有關 KT 相變、臨界電流, 與及峰頂效應(peak effect)等理論研究。

參考文獻：

1. Shiping Feng, Z. B. Su and L. Yu, Fermion-Spin Transformation to Implement the Charge-Spin Separation, *R. R. B.* 49, 2368 (1994).
2. Shiping Feng, Y. Song and Z. B. Huang, Estimation of the Doping Dependence of Antiferromagnetism in the Copper Oxide Material, *Mod. Phys. Lett. B* 10, 1301 (1996).
3. J. V. Emery, S. A. Kivelson and O. Zachar, Spin-Gap Proximity Effect Mechanism of High-Temperature Superconductivity, *Phys. Rev. B.* 56, 6120 (1997).
4. Shiping Feng and Yun Song, Theory of Photoemission from Copper Oxide Materials, *Phys. Rev. B* 55, 642 (1997).
5. Shiping Feng and Zhongbing Huang, Charge Dynamics from Copper Oxide Materials, *Phys. Lett. A.* 232, 293 (1997).
6. Shiping Feng, Jordan-Wigner Approach to Study the Spin Excitation Spectrum in the Heisenberg Antiferromagnet, *Phys. Rev. B* 53, 11671 (1996).
7. Zhongbing Huang and Shiping Feng, Spin Dynamics for the t-J Model, *Phys. Lett. A* 242, 94 (1998).
8. Shiping Feng and Zhongbing Huang, In-Plane Resistivity from the Copper Oxide Materials, *Physica C* 282-287, 1687 (1997).
9. Zhan-bai Dong and Shiping Feng, Spin-Liquid State for Two-Dimensional Heisenberg Antiferromagnets on a Triangular Lattice, *Mod. Phys. Lett. B* 12, 677 (1998).
10. Zhongbing Huang and Shiping Feng, Optical Conductivity in the Copper Oxide Materials, *Mod. Phys. Lett. B* 12, 735 (1998).
11. Tom Timusk and Bryan Statt, The Pseudogap in High-Temperature Superconductors: An Experimental Survey, *Rep. Prog. Phys.* 62, 61 (1999).
12. W. Q. Yu and Shiping Feng, Electronic Properties of the Doped Antiferromagnet on a Kagome Lattice, *Phys. Rev. B* 59, 13546 (1999).
13. Shiping Feng, Coexistence of the Electron Cooper Pair and Antiferromagnetic Short-Range Correlation in Copper Oxide Materials, *Phys. Lett. A* 257, 325 (1999).
14. Shiping Feng, F. Yuan, W.Q. Yu and P. P. Zhang, Anomalous C-Axis Charge Dynamics in Copper Oxide Materials, *Phys. Rev. B* 60, 7565 (1999).
15. Weiqiang Yu and Shiping Feng, Spin-Liquid State for Two-Dimensional Heisenberg Antiferromagnets on a Triangular Lattice, *Eur. Phys. J. B* 13, 265 (2000).

16. W. Q. Yu, Shiping Feng, Z. B. Huang and H. Q. Lin, Charge Dynamics in Doped Triangular Antiferromagnets, *Phys. Rev. B* 61, 7409 (2000).
17. Shiping Feng, Feng Yuan and Weiqiang Yu, Pseudogap Effects on the C-Axis Charge Dynamics in Copper Oxide Materials, *Eur. Phys. J. B* 15,607 (2000).
18. Pengpeng Zhang, Shiping Feng and Wei Yeu Chen, Spin Dynamics in Doped Triangular Antiferromagnets, *Phys. Rev. B* 62, 13828 (2000).
19. Feng Yuan, Shiping Feng, and Wei Yeu Chen, Incommensurate magnetic fluctuations in the underdoped copper oxide materials, *Commun. Theor. Phys.* 36, 370 (2001) No. NSC 90-2112-M-032-013.
20. Jihong Qin, Yun Song, Shiping Feng, and Wei Yeu Chen, Optical and transport properties in a doped two-leg ladder antiferromagnet, *Phys. Rev. B* 65, 155117 (2002). No. NSC 90-2112-M-032-013.
21. Jianhui He, Shiping Feng, and Wei Yeu Chen, Energy dependence of commensurate neutron scattering peak in doped two-leg ladder antiferromagnet $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$, *Phys. Rev. B* 67, 094402 (2003).