

# 中国科学技术大学高温超导物理研究新进展

陈仙辉<sup>†</sup>

(中国科学技术大学物理系 合肥微尺度物质科学国家实验室 合肥 230026)

**摘要** 在中国科学技术大学(以下简称中国科大)建校 50 周年之际,文章作者对近年来中国科大在高温超导物理方面的最新研究进展情况作一介绍,包括新型高温超导材料探索研究和高温超导机理实验研究.在新型高温超导材料探索研究方面,文章作者首次发现了除高温超导铜基化合物以外第一个超导温度突破麦克米兰极限(39 K)的非铜基超导体——铁基砷化物  $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ , 该类材料的最高超导转变温度可达到 55 K;中国科大还成功地制备出大量高质量的超导化合物单晶,包括  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ ,  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ ,  $\text{Cu}_x\text{TiSe}_2$  等.在高温超导机理实验研究方面,中国科大系统地研究了  $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$  体系的电输运性质给出了该体系的电子相图,发现了在电子型高温超导体中存在反常的热滞现象和电荷-自旋强烈耦合作用;在  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  体系中也开展了系列的工作,并且首次明确了电荷有序态中小自旋的磁结构问题.此外,还系统地研究了  $\text{Cu}_x\text{TiSe}_2$  体系中电荷密度波与超导的相互关系.

**关键词** 高温超导,铁基砷化物,自旋-电荷耦合,电荷有序,电荷密度波

## High- $T_c$ superconductivity research in the University of Science and Technology of China

CHEN Xian-Hui<sup>†</sup>

(*Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale and Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

**Abstract** To celebrate the 50th anniversary of the founding of the University of Science and Technology of China, a brief review is presented of recent research on high- $T_c$  superconductivity there. The search for new high- $T_c$  materials and experimental research on the mechanism of high- $T_c$  superconductivity led to our discovery of the Fe-based arsenide superconductor—— $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ , which is the first non-copper-oxide superconductor with a transition temperature beyond the McMillan limit (39 K), while the highest transition temperature in this system can reach 55 K. A variety of superconducting single crystals including  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ ,  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  and  $\text{Cu}_x\text{TiSe}_2$  have been successfully grown. To understand the mechanism of high- $T_c$  superconductivity we have systematically studied the electronic transport of the  $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$  system and proposed a corresponding electronic phase diagram. Abnormal thermal hysteresis and spin-charge coupling have been found in electron-type high- $T_c$  superconductors. In the  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  system the magnetic structure of the small magnetic moment in the charge ordered state has been clarified. The relationship between charge density waves and superconductivity in the  $\text{Cu}_x\text{TiSe}_2$  system has also been studied.

**Keywords** high- $T_c$  superconductivity, Fe-based arsenide, spin-charge coupling, charge ordering, charge density wave

## 1 引言

上世纪 80 年代末,高温超导铜氧化物的发现引发了全球研究高温超导的热潮.至今,高温超导的研究已经有 22 年的历史,在 20 多年的广泛研究中,

人们积累了大量的实验数据和理论方法.到目前为止,虽然已经有许多很好的理论模型,但是高温超导机理问题仍然没有完全解决,许多实验的结果还存

2008-06-10 收到

<sup>†</sup> Email: chenxh@ustc.edu.cn

在争议。

铜氧化物的奇特物理源自于电子的强关联效应,而且人们发现这种强关联效应是普遍存在于物质之中的,尤其是在 d 电子和 f 电子化合物中最常见。高温超导的研究也不再局限于认识高温超导电性本身,而是要理解强关联效应背后所有的物理现象以及如何建立研究强关联体系的范式。因而强关联体系中的超导现象也就成为高温超导的研究范围,并且吸引了人们极大的兴趣。我们的工作的重点就是围绕新的高温超导材料以及强关联超导材料开展的。

这里我们将分为两个方面来介绍我们的工作进展,即新型高温超导材料探索 and 高温超导机理实验研究。

## 2 研究工作的进展情况

### 2.1 新型高温超导材料探索

#### 2.1.1 新高温超导体的发现

1986 年,IBM 研究实验室的德国物理学家柏诺兹与瑞士物理学家缪勒在层状铜氧化合物体系中发现了高于 40K 的临界转变温度<sup>[1]</sup>,随后该体系的临界温度不断提高,最终达到了 163K(高压下)<sup>[2]</sup>。该发现掀起了全球范围的超导研究热潮并且对经典的“BCS”理论也提出了挑战。德国物理学家柏诺兹与瑞士物理学家缪勒也因为他们的发现获得了 1987 年的诺贝尔物理学奖。自从层状铜氧化合物高温超导体发现以来,人们一直都在致力于寻找更高临界温度的新超导体。然而到目前为止,临界温度高于 40K 的超导体只有铜氧化合物超导体。在非铜氧化合物超导体中,临界温度最高的就是 39K 的 MgB<sub>2</sub> 超导体<sup>[3]</sup>。但是该超导体的临界温度非常接近“BCS”理论所预言的理论值<sup>[4]</sup>。因此,寻找一个临界温度高于 40K 的非铜氧化合物超导体对于理解普适的高温超导电性是非常重要的,尤其是高温超导的机理到目前还没有得到类似于“BCS”一样完美的理论。在我们最近的研究中,我们在具有 ZrCuSiAs 结构的钐砷氧化物 SmFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub> 中发现了体超导电性<sup>[5]</sup>。我们的电阻率和磁化率测量表明,该体系的超导临界温度达到了 43K。该材料是目前为止第一个临界温度超过 40K 的非铜氧化合物超导体。高于 40K 的临界转变温度也有力地说明了该体系是一个非传统的高温超导体。该发现势必会对我们认识高温超导现象带来新的契机。

#### 2.1.2 超导单晶的制备

在高温超导的研究当中,单晶是获得本征信息的关键,重要的实验结果以及进展往往都是在单晶的基础上完成的,因而开展单晶的制备工作是高温超导机理研究的基础。多年来我们一直致力于高温超导单晶以及新超导体单晶的工作,并取得很好的成绩。

我们主要是利用传统的自助熔剂坩埚法、气相运输沉积法和光学浮区法等方法,成功地制备了电子型超导体 Nd<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, Pr<sub>2-x-y</sub>La<sub>y</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, 空穴型超导体 La<sub>2-x-y</sub>Nd<sub>y</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> 以及新超导材料 Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> 和 Cu<sub>x</sub>TiSe<sub>2</sub> 等其他强关联材料。这些材料的成功获得,为我们进一步开展深入的研究打下了坚实的基础。

### 2.2 高温超导机理实验研究

#### 2.2.1 SmO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>FeAs 体系的电子相图研究

最近,由于在铁基 LaO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>FeAs ( $x = 0.05 - 0.12$ ) 化合物中发现有 26K 的超导电性<sup>[6]</sup>,层状的 ZrCuSiAs 型结构的 LnOMPn (Ln = La, Pr, Ce, Sm; M = Fe, Co, Ni, Ru; Pn = P, As) 化合物引起了科学家很大的兴趣和关注<sup>[7,8]</sup>。今年 3 月,该类材料的超导临界温度在 SmO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>FeAs 化合物中被首次提高到 43K<sup>[5]</sup>,并在随后的研究中发现在该类材料中最高超导临界温度可达到 54K<sup>[9]</sup>。这些重要的发现使得人们又重新对高温超导体的探索产生了极大的兴趣,并且为研究高温超导的机理提供了一个新的材料基础。近期初步研究表明,这类新超导体属于非传统超导体,电声相互作用并不能导致如此高的临界转变温度<sup>[10]</sup>,强的铁磁和反铁磁涨落被认为是可能的原因<sup>[11-13]</sup>,然而其机理还不是很明朗,其丰富的物理性质有待人们展开进一步深入的研究。研究表明,LaOFeAs 母体化合物在 150K 会发生一个自旋密度波(SDW)转变。随着氟原子的掺杂,SDW 会被压制而超导电性则被引入到系统中。系统地研究 SDW 和超导随氟掺杂的演变对认识其物理本质是非常重要的。因而我们系统地研究了氟含量  $x = 0 - 0.3$  样品的电阻和霍尔系数,并且在此基础上给出了体系的相图。在母体化合物中,电阻和霍尔系数在  $T_s = 148K$  都表现出反常,这与 SDW 的发生相一致。随着掺杂,  $T_s$  温度逐渐降低,这表明超导与 SDW 之间存在竞争。在  $x \sim 0.14$  时,随着掺杂,发生了一个从高温线性行为到低温线性行为的转变。以上这些现象都表明,这个体系存在可能的量子相变。这些

发现将对于我们认识这个体系的超导电性带来非常有用的信息。

### 2.2.2 电子型超导体 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 的研究

$\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4\pm\delta}$  (NCCO) 是电子型铜氧化物超导体中的一个代表性体系, 随着 Nd 被 Ce 的取代, 电子被注入到  $\text{CuO}_2$  面上, 一个很明显的证据是霍尔系数 ( $R_H$ ) 和热电势 (TEP) 都为负值<sup>[14]</sup>. 进一步研究表明: 在某一合适的掺杂范围内, NCCO 和 PC-CO 的输运行为是由电子和空穴两种载流子的竞争结果起作用<sup>[15-25]</sup>. 角分辨光电子谱 (ARPES) 实验得到的费米面的结果也直接支持了两种载流子共存的这一观点<sup>[26]</sup>. 理论计算显示费米面能有效地用两能带体系来描述<sup>[27, 28]</sup>. 最近罗洪刚和向涛提出了  $d_{x^2-y^2}$  对称的弱耦合两能带模型<sup>[29]</sup>, 这个模型能很好地描述电子型铜氧化物超导体中超流密度  $\rho_s$  的异常的温度依赖行为. 另外, Anderson<sup>[30]</sup> 强调, 在铜氧化物超导体中, 输运行为由两种不同的散射时间所决定, 其中  $\tau_H (\propto T^{-1})$  决定平面内电阻行为而霍尔角受  $\tau_H (\propto T^{-2})$  所决定. 其他的观点也认为霍尔角的余切正比于散射率的平方, 而此散射率能通过零场的面内电阻直接得出<sup>[31]</sup>. 因此, 研究 NCCO 体系中霍尔角与面内电阻率的关系将是很有意思的事. 我们系统测量了 NCCO 单晶中  $x = 0.025, 0.06, 0.17$  和  $0.20$  的霍尔系数和欠掺杂到过掺杂区域的样品的热电势<sup>[32]</sup>. 结果显示随着掺杂的增加,  $R_H$  和 TEP 都发生符号从负到正的转变. 霍尔角的研究表明, 在  $x = 0.025$  和  $0.06$  的组分中, 霍尔角的余切遵循  $T^4$  的行为, 而对  $x = 0.20$  的样品, 则是  $T^2$  的行为. 尽管这三个组分的电阻率在金属行为的温区几乎都是  $T^2$  依赖关系, 但其霍尔角的余切对温度依赖行为则表现出巨大的不同. 这与空穴型的超导体有很大的不同. 这种行为被认为是与费米面形状随掺杂的演化而紧密联系的. 通过研究  $eR_H x = V$  的行为, 我们也试图从同一个角度来解释电子型掺杂 NCCO 和空穴型掺杂的 LSCO 这两个不同的体系中的  $R_H$  的符号改变行为. 我们认为, 必须从两能带模型出发才能很好地解释  $R_H$  和 TEP 的这种符号改变的行为.

极欠掺杂反铁磁铜氧化物中电荷与  $\text{Cu}^{2+}$  自旋磁矩之间具有很强的耦合作用, 并且在此体系中观察到了许多奇特的现象<sup>[33-36]</sup>. 在电子型铜氧化物母体材料中 ( $\text{Pr}_2\text{CuO}_4, \text{Nd}_2\text{CuO}_4$ ), 自旋序排列形成反铁磁 noncollinear 结构<sup>[37, 38]</sup>. 在反铁磁 collinear 结构的排列中, 所有的自旋方向都以平行或反平行的方

式排列在同一方向上. 在反铁磁 noncollinear 结构的排列中, 相邻两层间的自旋排列互相垂直. 在极欠掺杂的  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  中, 磁场能诱导磁结构的 noncollinear 结构向 collinear 结构的转变, 并且这种转变也引起了面内及面外电阻率的一系列的奇特性质<sup>[36]</sup>. 最近的中子衍射实验的结果指出, 在  $\text{Nd}_{1.975}\text{Ce}_{0.025}\text{CuO}_{4\pm\delta}$  中, 在  $ab$  面内加磁场时会引起  $c$  方向自旋无序排列, 进一步引起反铁磁相变产生回滞行为<sup>[39]</sup>. 我们系统地研究了极欠掺杂  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4\pm\delta}$  中面外磁阻  $\Delta\rho_c/\rho_c$  对温度的依赖<sup>[40]</sup>, 对掺杂浓度的依赖和对磁场转动角度的依赖行为. 结果显示,  $c$  方向的电阻和磁电阻在自旋重新取向的温度观察到明显的异常, 这就明显给出巡游电子与局域自旋耦合的直接证据. 在磁阻曲线中也观察到了磁滞行为. 另一个有趣的特征是磁阻随磁场转动角度的各向异性行为在每个不同的反铁磁自旋结构中显示四度对称, 而在自旋重新取向的温度则为两度对称.

### 2.2.3 $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ 体系的研究

最近对层状钴氧化物  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  的研究成为凝聚态物理研究中的一个热门课题. Na 的掺杂导致了自旋为  $1/2$  的  $\text{Co}^{4+}$  转变为无自旋的  $\text{Co}^{3+}$ .  $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$  中  $5\text{K}$  的超导电性的发现<sup>[41]</sup>吸引了很多科学家的注意. 人们自然而然地会问  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  中超导电性是否和铜氧化物中的超导电性一样, 都是通过对母体 Mott 绝缘体进行掺杂而引入的? 进一步, 人们预期在这种层状三角格子的钴氧化物中, 应该会有一些奇特的电子性质和磁性. 比如说存在安德森的共振价键态<sup>[42]</sup>和强的拓扑受挫相<sup>[43-45]</sup>. 实际上,  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  体系中存在许多异常的输运性质, 诸如大的磁场依赖的热电势 (TEP)<sup>[46]</sup>, 霍尔系数具有线性温度依赖行为, 并且延伸到  $500\text{K}$  都没有观察到饱和现象<sup>[47]</sup>, 电阻率存在非常规的线性温度依赖行为<sup>[46, 48, 49]</sup>, 存在巨大的电子-电子散射<sup>[50]</sup>等等, 这些结果表明,  $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$  中的超导电性是非传统的机制. 在没有水插层的  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  中, 电输运性质对  $x$  值变化的响应非常灵敏. 当  $x = 0.5$  时,  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  处于绝缘基态, 并且在热电势、Hall 系数和热导上有异常变化<sup>[48]</sup>. 这个组分的晶体结构中 Na 有序的排成 Z 字形长链, 这种有序的结构调制了钴氧面内的 Co 离子, 使得它也处于电荷有序的状态<sup>[51]</sup>. 理论上还预言, 在  $x = 1/3$  和  $1/4$  时, 也会出现电荷有序行为<sup>[43]</sup>. 但是到目前为止, 还没有在实验中被观察到.

关于电荷有序  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  体系的磁结构一直以

来都存在争议,被大家普遍接受的磁结构有两种:一种是由美国 MIT 实验组提出的类似“stripe”的磁结构<sup>[52]</sup>,另一种是由日本实验组提出的有大、小磁矩的磁结构<sup>[53]</sup>.通过研究磁场下角度依赖的磁阻,我们从实验上给出了强有力的证据,证明了日本实验组给出的磁结构更加合理<sup>[54]</sup>,从而解决了关于磁结构的争论.并且我们还通过我们的结果首次确定了电荷有序  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  体系的小磁矩的磁结构.另外我们还在实验中发现,在  $x=0.55$  时,体系的小磁矩会形成面内铁磁性<sup>[55]</sup>.该实验进一步证明了大、小磁矩磁结构的正确性,并且表明体系的小磁矩的磁结构是强烈依赖于 Na 的含量.基于以上两个发现,我们又进一步证明了,在强场下,小磁矩会发生一个磁场诱导的自旋 90 度翻转,并且同时伴随有磁性的转变<sup>[56]</sup>.至此,我们对该体系的磁结构有了一个完整的认识,并且给出了该体系在电荷有序附近的磁性相图.在对磁结构认识的同时,我们还发现了该体系具有很强的自旋电荷耦合,这将有助于我们理解体系的超导电性.

#### 2.2.4 $\text{Cu}_x\text{TiSe}_2$ 体系的研究

过渡金属二硫族化合物(TMD's)具有非常丰富的物理现象.不同的化学组成和结构可以导致迥然不同的物理性质.例如,二维体系的电荷密度波是首先在 TMD's 中发现的<sup>[57]</sup>.电荷密度波态,1T 结构的  $\text{TaS}_2$  会在费米面打开一个能隙<sup>[58]</sup>,但在 2H 结构的  $\text{TaS}_2$  中,能隙只是部分打开<sup>[59]</sup>,而在 1T 结构中的  $\text{TiSe}_2$  中却没有任何能隙的打开<sup>[60]</sup>.非常有趣的是,超导电性总是在 2H 结构的 TMD's 材料中和电荷密度波相互共存、相互竞争<sup>[61-63]</sup>,但在 1T 结构的化合物中,却很少观察到这种现象.最近,在 1T 结构的  $\text{Cu}_x\text{TiSe}_2$  中发现的超导电性进一步丰富了 TMD's 材料的物理内容<sup>[64]</sup>.在不掺杂的 1T 结构的  $\text{TiSe}_2$  中,体系表现为 CDW,并且这种材料中的 CDW 机制到目前还在争论中.随着铜原子的掺杂,CDW 转变温度会迅速下降,这种情况类似于  $\text{M}_x\text{-TiSe}_2$ 's ( $\text{M} = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ta}, \text{V}$  和  $\text{Nb}$ )化合物<sup>[65-68]</sup>.与此同时,超导电性会在掺杂量为  $x=0.04$  出现,并在  $x=0.08$  达到最大值 4.3K,然后转变温度开始下降,在  $x=0.10$  时下降为 2.8K.令人惊奇的是,这样一个相图和高温超导铜氧化物以及重费米子体系是非常的类似的<sup>[69]</sup>,所不同的是,在这里与超导相互竞争的是电荷序,而在高温超导铜氧化物以及重费米子体系中是反铁磁序.在 1T -  $\text{Cu}_x\text{TiSe}_2$  体系中存在这种普适的相图是非常重要的,对它的研究将会

给其他相关领域也带来重要的帮助.基于以上考虑,我们系统地研究了  $\text{Cu}_x\text{TiSe}_2$  ( $0.015 \leq x \leq 0.110$ ) 单晶的输运性质、电子结构以及低温热导 ( $x = 0.55$ )<sup>[70-72]</sup>.当  $x \leq 0.025$ ,体系在低温下会形成电荷密度波,并在面内和面外的电阻率随温度曲线都表现出一个宽峰行为.随着 Cu 的掺杂,电荷密度波被完全压制在  $x=0.55$  附近,随后体系会出现超导电性且随 Cu 掺杂而增强.体系的超导电性在  $x \geq 0.08$  以后开始被压制,在  $\text{Cu}_{0.11}\text{TiSe}_2$  样品中,直到 1.8K 都没有发现超导电性.通过角分辨光电子谱的研究,发现 1T -  $\text{TiSe}_2$  母体具有半导体类型的能带结构,并且发现,随着 Cu 掺杂体系的化学势显著提高,从而导致电荷密度波的压制以及超导电性的出现.我们还通过低温热导的测量确定了该体系的超导为单带的 s 波超导.

### 3 小结

以上介绍了我们在高温超导领域的最新进展.我们不但在高温超导铜基化合物中取得了不错的成绩,在新超导体研究中也处于国际领先水平,尤其是在新的铁基高温超导体的研究方面.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Bednorz J G, Muller K A. *Z. Phys. B*, 1986, 64 : 189
- [ 2 ] Gao L, Xue Y Y, Chen F *et al.* *Phys. Rev. B*, 1994, 50 : 4260
- [ 3 ] Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T *et al.* *Nature*, 2001, 410 : 63
- [ 4 ] McMillan W L. *Phys. Rev.*, 1968, 167 : 331
- [ 5 ] Chen X H, Wu T, Wu G *et al.* *Nature*, 2008, 453 : 761
- [ 6 ] Kamihara Y *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, 130 : 3296
- [ 7 ] Dong J *et al.* *arXiv*, 2008 0803 3426
- [ 8 ] Cruz C *et al.* *arXiv*, 2008 0804 0795
- [ 9 ] Ren Z A *et al.* *arXiv*, 2008 0803 4283 V1
- [ 10 ] Boeri L *et al.* *arXiv*, 2008, 0803 2703
- [ 11 ] Cao C *et al.* *arXiv*, 2008, 0803 3236
- [ 12 ] Dai X *et al.* *arXiv*, 2008, 0803 3982
- [ 13 ] Ma F, Lu Z Y. *arXiv*, 2008, 0803 3286
- [ 14 ] Onose Y, Taguchi Y, Ishizaka K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001 87 217001
- [ 15 ] Hagen S J, Peng J L, Li Z Y *et al.* *Phys. Rev. B*, 1991 43 : 13606
- [ 16 ] Seng P, Diehl J, Klimm S *et al.* *Phys. Rev. B*, 1995, 52 : 3071
- [ 17 ] Jiang W, Mao S N, Xi X X *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73 : 1291

- [ 18 ] Jiang W , Xu X Q , Hagen S J *et al.* Phys. Rev. B , 1993 , 48 : 657
- [ 19 ] Wang Z Z , Chien T R , Ong N P *et al.* Phys. Rev. B , 1991 , 43 : 3020
- [ 20 ] Yang H S , Chai Y S , Liu J *et al.* Physica C , 2004 , 403 : 203
- [ 21 ] Fournier P , Jiang X , Jiang W *et al.* Phys. Rev. B , 1997 , 56 : 14149
- [ 22 ] Brinkmann M , Bach H , Westerholt K. Phys. Rev. B , 1996 , 54 : 6680
- [ 23 ] Fournier P , Mohanty P , Maiser E *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 , 81 : 4720
- [ 24 ] Brinkmann M , Rex T , Stief M *et al.* Physica C , 1996 , 269 : 76
- [ 25 ] Dagan Y , Qazilbash M M , Hill C P *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 : 167001
- [ 26 ] Armitage N P , Ronning F , Lu D H *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2002 , 88 : 257001
- [ 27 ] Yuan Q S , Chen Y , Lee T K *et al.* Phys. Rev. B , 2004 , 69 : 214523
- [ 28 ] Kusko C , Markiewicz R S , Lindroos M *et al.* Phys. Rev. B , 2002 , 66 : 140512( R )
- [ 29 ] Luo H G , Xiang T. Phys. Rev. Lett. , 2005 , 94 : 027001
- [ 30 ] Anderson P W. Phys. Rev. Lett. , 1991 , 67 : 2092
- [ 31 ] Varma C M , Abrahams E. Phys. Rev. Lett. , 2001 , 86 : 4652
- [ 32 ] Wang C H , Wang G Y , Wu T *et al.* Phys. Rev. B , 2005 , 72 : 132506
- [ 33 ] Thio T , Thurston T R , Preyer N W *et al.* Phys. Rev. B , 1988 , 38 : 905 ; Thio T , Chen C Y , Freer B S *et al.* Phys. Rev. B , 1990 , 41 : 231
- [ 34 ] Ando Y , Lavrov A N , Segawa K. Phys. Rev. Lett. , 1999 , 83 : 2813
- [ 35 ] Ando Y , Lavrov A N , Komiyama S. Phys. Rev. Lett. , 2003 , 90 : 247003
- [ 36 ] Lavrov A N , Kang H J , Kurita Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 : 227003
- [ 37 ] Skanthakumar S , Lynn J W , Peng J L *et al.* Phys. Rev. B , 1993 , 47 : 6173
- [ 38 ] Sumarlin I W , Lynn J W , Chattopadhyay T *et al.* Phys. Rev. B , 1995 , 51 : 5824
- [ 39 ] Li S L , Mandrus D , Zhao B R *et al.* Phys. Rev. B , 2005 , 71 : 054505
- [ 40 ] Chen X H , Wang C H , Wang G Y *et al.* Phys. Rev. B , 2005 , 72 : 064517
- [ 41 ] Takada K , Sakurai Hiroya , Takayama – Muromachi E *et al.* Nature ( London ) , 2003 , 422 : 53
- [ 42 ] Anderson P W. Mater. Res. Bull. , 1973 , 8 : 153 ; Anderson P W. Science , 1987 , 235 : 1196
- [ 43 ] Baskaran G. Phys. Rev. Lett. , 2003 , 91 : 097003
- [ 44 ] Kumar B , Shastry B S. Phys. Rev. B , 2003 , 68 : 104508
- [ 45 ] Wang Q H , Lee D H , Lee P A. Phys. Rev. B , 2004 , 69 : 092504
- [ 46 ] Wang Y Y , Rogado N S , Cava R J *et al.* Nature , 2003 , 423 : 425
- [ 47 ] Wang Y Y , Rogado N S , Cava R J *et al.* cond – mat/0305455
- [ 48 ] Maw L F , Wang Y Y , Satoshi W *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 : 247001
- [ 49 ] Hasan M Z , Chuang Y D , Qian D *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 : 246402
- [ 50 ] Li S Y , Louis T , Hawthorn D G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 93 : 056401
- [ 51 ] Huang Q , Foo M L , Lynn J W *et al.* J. Phys. : Condens. Matter , 2004 , 16 : 5803
- [ 52 ] Gasparovic G , Ott R A , Cho J H *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006 , 96 : 046403
- [ 53 ] Mai Yokoi , Taketo Moyoshi , Yoshiaki Kobayashi *et al.* J. Phys. Soc. Jpn. , 2005 , 74 : 3046
- [ 54 ] Wang C H , Chen X H , Wu G *et al.* Phys. Rev. B , 2006 , 74 : 172507
- [ 55 ] Wang C H , Chen X H , Wu T *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006 , 96 : 216401
- [ 56 ] Wu T , Fang D F , Wang G Y *et al.* Phys. Rev. B , 2007 , 76 : 024403
- [ 57 ] Wilson J A , Di Salvo F J , Mahajan S. Adv. Phys. , 1975 , 24 : 117
- [ 58 ] Pillo T *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1999 , 83 : 3494
- [ 59 ] Shen D W *et al.* Arxiv cond – mat/0612064
- [ 60 ] Aebi P *et al.* Phys. Rev. B , 2000 , 61 : 16213
- [ 61 ] Valla T *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 92 : 086401
- [ 62 ] Castro Neto A H. Phys. Rev. Lett. , 2001 , 86 : 4382
- [ 63 ] Yokoyama T *et al.* Science , 2001 , 294 : 2518
- [ 64 ] Morosan E *et al.* Nature Physics , 2006 , 2 : 544
- [ 65 ] Cui X Y *et al.* Phys. Rev. B , 2006 , 73 : 085111
- [ 66 ] Di Salvo F J , Waszczak J V. Phys. Rev. B , 1978 , 17 : 3801
- [ 67 ] Levy F. J. Phys. C : Solid St. Phys. , 1980 , 13 : 2901
- [ 68 ] Baranov N V *et al.* J. Phys. : Condens. Matter , 2007 , 19 : 016005
- [ 69 ] Dagotto E. Science , 2005 , 309 : 257
- [ 70 ] Wu G , Yang H X , Zhao L *et al.* Phys. Rev. B , 2007 , 76 : 024513
- [ 71 ] Zhao J F , Ou H W , Wu G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007 , 99 : 146401
- [ 72 ] Li S Y , Wu G , Chen X H *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007 , 99 : 107001