

# 超导“小时代”之二十六

## 山重水复疑无路

罗会仟<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2017-09-26收到

<sup>†</sup> email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20171208

众里寻他千百度，蓦然回首，那人却在，灯火阑珊处。

——南宋·辛弃疾《青玉案·元夕》

话说，行走江湖，身不由己。最担心受怕的，一是遇到熟人，不知如何是好；二就是山中迷路，不知去向何处。幸运者，可以豁然开朗偶遇桃花源；不幸者，或跌入山谷粉身碎骨，或被山中猛兽吞噬。山重水复之中，谁不曾想柳暗花明之时(图1)。然，生活总是喜欢和人们捉迷藏，以致于在不断赶路中忘记了出路，在失望中追求偶尔的满足，在睡梦中解脱清醒的苦，却一直流浪在灯火阑珊处。

在前面几节，我们已经从不同角度领略了铜氧化物高温超导材料中复杂的物理现象，从某种程度上说，它们甚至超出了物理学家目前的认知和掌控能力。经过多年的艰苦奋斗，许多科学家甚至都畏难放弃了高温超导的相关研究，有的在

转战其他领域之后取得了巨大的成就，也有的从此默默无闻度一生。高温超导问题之难，不仅在于物理现象很难理解，还在于理解物理现象的过程充满艰辛。比如：对于同一个物理性质，实验测量结果可能很不一样，有时甚至同一测量手段对同一样品得到的结果是截然相反的。又如：理论对实验数据的理解很不一样，一万个理论物理学家，就有一万套高温超导理论，哪怕数据其实只有一份。简单来说，就是实验结果乱七八糟，理论解释五花八门，高温超导微观机理之路深深隐藏在了山重水复之中，让一波又一波的江湖高手陷入苦逼的探索中难以自救<sup>[1]</sup>。幸运的是，即使在如此穷山恶水中，物理学家还是艰难地闯出了几条看似可通的路线，距

离彻底理解高温超导机理似乎也不是那么遥远。

要回答高温超导是如何产生的这个重大问题，首先第一个问题是：铜氧化物高温超导体中，究竟是什么载体负责超导电性的？难道还是配对的库珀电子对吗？答案是百分百肯定的。非常规超导体绝大部分是第二类超导体，如果能够在材料中观测到一个单位的量子磁通涡旋，那么必然意味着它们是以成对电子导电的形式存在。因为一个磁通量子等于  $h/2e$ ，需要至少两个电子一起形成环流<sup>[2]</sup>。而在铜氧化物高温超导体中，量子磁通涡旋可以在实验上直接观测到，库珀对的存在是妥妥的(见本系列第二十二节：天生我材难为用)。其实不仅仅是高温超导体，目前发现的几乎所有超导体都是依赖库珀对来导电的，令人不禁慨叹库珀当年的真知灼见！

第二个问题是：既然是库珀电子对来扛起导电大旗，那么究竟是怎样的一群库珀对呢？在前面其实我们已经提到，就是那个扭捏的d波库珀对(见本系列第二十四节：雾里看花花非花)。高温超导里的库珀对，已经不再是常规金属超导体中那群天真无邪、各处同性的s波库珀对，而是花里胡哨、偶尔玩消



图1 孙文勃画作《山重水复》(来自 sunwenbo.artron.net)

失的d波库珀对。库珀电子对的能隙在空间某些位置存在为零的节点，在非零的区域，相位还存在交叉演变。验证d波配对的实验方法有很多，其中最直接的证据是在高温超导三晶界上，观察到半个量子磁通  $h/4e$ 。由于在不同晶体取向，d波对同时在大小和相位上都有变化，构成一个三角围栏之后，就会因为量子干涉效应形成半整数的磁通量子。这个非常精密的实验由华人物理学家 C. C. Tsuei(崔长琦)成功实现<sup>[3]</sup>，以无可争议的事实证明了d波配对的存在，在当时极其混乱不堪的高温超导对称性争议中杀出一条坦坦大道(图2)。

第三个问题是：库珀对的能隙是如何形成的？这个问题至今没有确切答案。尽管我们知道库珀对的能隙是d波，但却搞不清楚能隙从何而来。其中最大的困扰之一，就是赝能隙的存在。除了超导能隙，远在超导温度之上就形成的赝能隙，和超导能隙有没有关系，是不是超导的前奏？赝能隙和超导能隙，大部分情况都具有类似d波的特征，它们是同一个能隙的不同表现形式吗？赝能隙往往出现在费米弧之上，它对体系的电子态行为究竟有什么样的影响？仔细测量赝能隙和超导能隙随掺杂的演变，会发现超导能隙基本上和临界温度成正比关系，但赝能隙则完全随掺杂增加单调递减直至消失，好像又说明它们不是一回事(图3)<sup>[4]</sup>。哥俩就像一个妈的两个孩子，长得很像，但又不完全一样。随着人们对铜氧化物高温超导体中各种电子有序态的深入研究，目前大家倾向于认为赝能隙是由于体系中的电荷密度波等其他有序态造成的，但争议是仍然存在的。

第四个问题是：库珀对是如何凝聚成超导态的？光有库珀对，是不足以形成超导现象的，还需要所有的库珀对都发生相位相干，一起团结凝聚到足够低能的组态，形成超电流(简称超流)。在传统金属超导体中，因为费米面附近所有电子都组对进入了有能隙的超导态，超导电子密度(超流密度)是非常之高的。此时，和临界温度成正比关系的，主要是超导能隙大小，而不是超流密度<sup>[5]</sup>。然而在高温超导体中，能隙的分布往往杂乱无章，大部分情况下能隙和临界温度关系是没有规律可循的。此时，和临界温度有最直接关系的，反而是超流密度，和临界温度成简单正比标度关系。也就是说，超导电子的浓度越高，对应的超导临界温度就越高。这个现象由 Yasutomo J. Uemura(植村庸友)提出，又称 Uemura 标度关系，或 Uemura 图<sup>[6]</sup>。后来的研究结果令人惊讶地发现，Uemura 关系几乎在所有铜氧化物高温超导材料中都得以成立<sup>[7]</sup>，哪怕是进入过掺杂

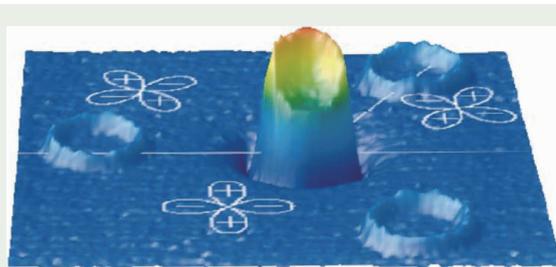


图2 三晶界中的半个磁通量子(来自 www.kirtleyscientific.com)

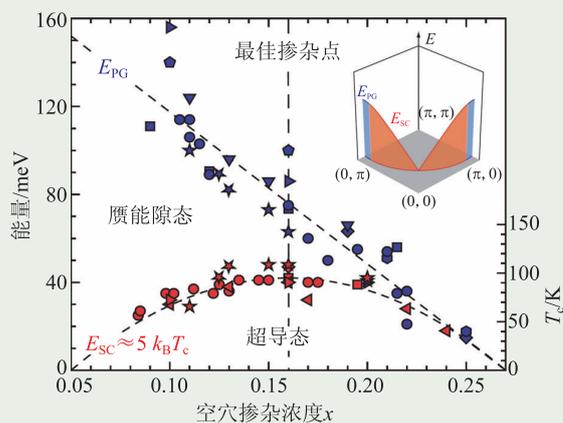


图3 铜氧化物高温超导体中的赝能隙与超导能隙<sup>[4]</sup>(来自 www.nature.com)

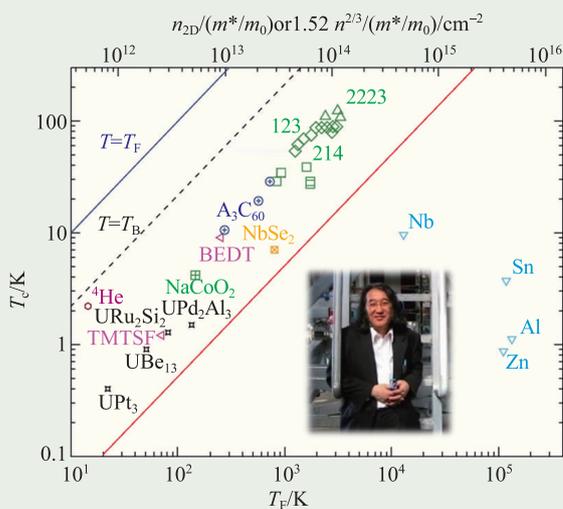


图4 超流密度与临界温度的Uemura标度关系<sup>[7]</sup>(来自 www.sciencemag.org)

区，临界温度也是和超流密度成正比<sup>[8]</sup>。更神奇的是，即便是重费米子超导体和C<sub>60</sub>超导体，也是满足这个简单的标度关系。如果把超流密度换算成费米速度，那么低温下进入超流态的液氦，也是基本满足这

个关系的<sup>[7]</sup>(图4)! 透过 Uemura 关系, 可以发现超导体基本上可以根据是否满足此关系分成两大组: 传统的金属超导体超流密度高的同时反而临界温度相对低, 都是常规超导体, 可以用BCS理论来理解; 其他超导体超流密度基本决定了临界温度, 属于非常规超导体<sup>[8]</sup>。这个关系也暗示, 寻找更高临界温度的超导体, 需要在非常规超导体中寻找超流密度高的那些, 对它们来说, 超导库珀对在单位体积内凝聚越多则越有利于超导的稳定。这和材料中可参与导电(费米面附近)的电子越多则金属性越好有着异曲同

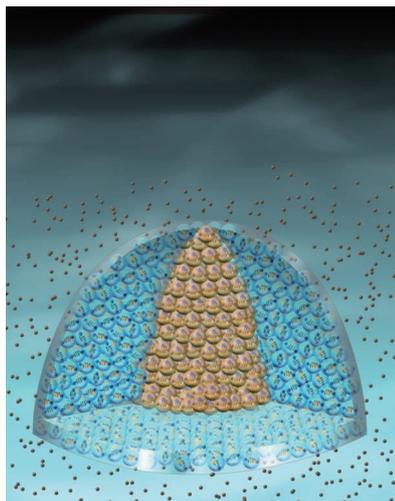


图5 超导电子对凝聚与费米面(来自 physics.illinois.edu)

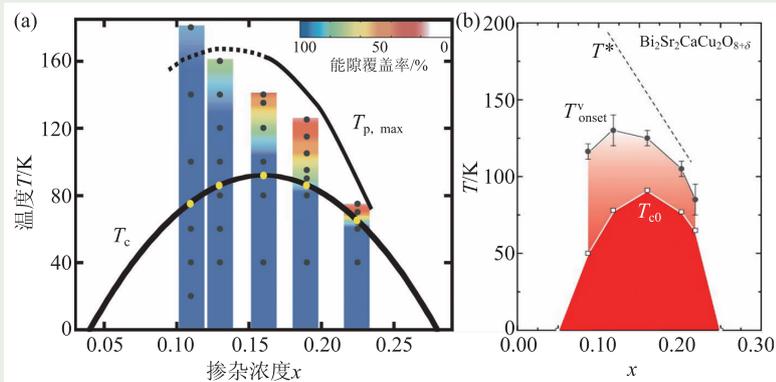


图6 超导临界温度以上的能隙涨落与能斯特信号<sup>[10, 12]</sup>(来自 www.nature.com 及清华大学王亚愚教授)

工之妙, 所谓“电多力量大”是也(图5)<sup>[9]</sup>!

第五个问题是: 库珀对到底是什么时候/温度形成的? 这个问题在常规超导体中根本不是什么合适的问题。因为几乎所有的超导现象, 都发生在降温过程的超导临界转变之中。库珀对形成、位相相干、组团凝聚都是同时发生的, 但在高温超导体中, 似乎没有那么简单。高温超导材料中的超导能隙分布在空间上尽管有点乱, 但如果看得足够仔细, 对每个小区域的能隙进行统计和测量, 就会发现其实小范围能隙在临界温度之上依然可以存在, 只是对整个超导体的覆盖率在不断下降而已<sup>[10, 11]</sup>。为什么在临界温度之上仍然存在超导能隙(注意不是赝能隙), 唯一可能的解释就是超导临界温度之上就存在库珀对。这还可以通过能斯特效应实验加以验证, 因为高温超导材料中的能斯特信号对应着磁通涡旋的存在, 而在多个铜氧化物体系中能斯特信号消失温度都要远高于超导临界温度(图6)<sup>[12]</sup>。库珀对在超导临界温度之上可以存在, 就像电子和电子之间早就按捺不住互相眉来眼去了, 这被称之为“预配对”现象(图7)<sup>[13]</sup>。要特别注

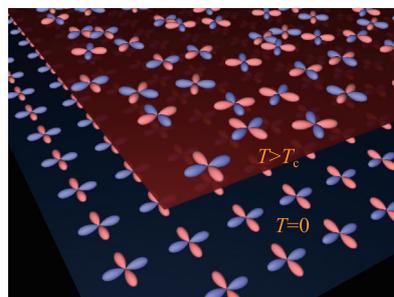


图7 铜氧化物高温超导体中的“预配对”现象<sup>[13]</sup>(来自 davisgroup.lassp.cornell.edu)

意的是, 预配对的温度是要低于赝能隙温度的, 赝能隙的形成和预配对对有没有关系, 也是不太清楚的。

最后一个问题是: 库珀对是如何形成的。既然高温超导现象同样来自库珀对的相干凝聚, 那么究竟是一种什么力量驱使了库珀对的形成? 它能够在临界温度之上就做媒促成对儿吗? 它能构造出d波的对儿吗? 它能拉拢越来越多的对儿凝聚成相位相干的稳定团队吗? 这种神奇的力量, 科学家称之为库珀对的“胶水”。在常规超导体中, 库珀对的胶水就是晶格振动量子——声子<sup>[5]</sup>。但在高温超导体中, 这个胶水是什么, 至今仍然没有确切答案, 也是高温超导微观机理中最困难的问题。理论学家们八仙过海各显神通, 发明了各种各样的“胶水”, 有的甚至非常之奇怪, 至今也没在实验上找到过<sup>[14]</sup>。不可否认的是, 在高温超导材料中, 电子和电子之间的相互作用能量尺度, 要远远大于电子和声子的相互作用。我们无法彻底排除声子是否为胶水配方的一部分, 也无法真正确定电子之间的电荷和自旋相互作用是否能够起到胶水的作用。著名的理论物理学家P. W. Anderson(安德森)坚持他早期提出的共振价键理论(RVB)<sup>[15]</sup>, 他大胆地认为有没有胶水根本不重

要。电子之间的电荷相互作用和自旋相互作用能量都在电子伏特(eV)量级,而超导能隙则在毫电子伏特(meV)量级,如果把这3种相互作用都关在低温的冰箱里,就像一头猛犸象和一头大象塞得满满的,谁也不会去注意到它们脚下还有一只小小的老鼠(图8)<sup>[16]</sup>。或者,换言之,我们有足够能量尺度的电子—电子相互作用,只需要“借用”其中一丁点儿能量,或许就可以形成高温超导现象。高温超导的背后原理,或许,其实可以很简单。

以上6个问题,是高温超导机理研究的核心。需要特别注意的是,对上述问题的回答,都未必是最后正确的答案。三十年来,新的实验结果和更多的可能理论解释不断涌现,关于高温超导问题的争

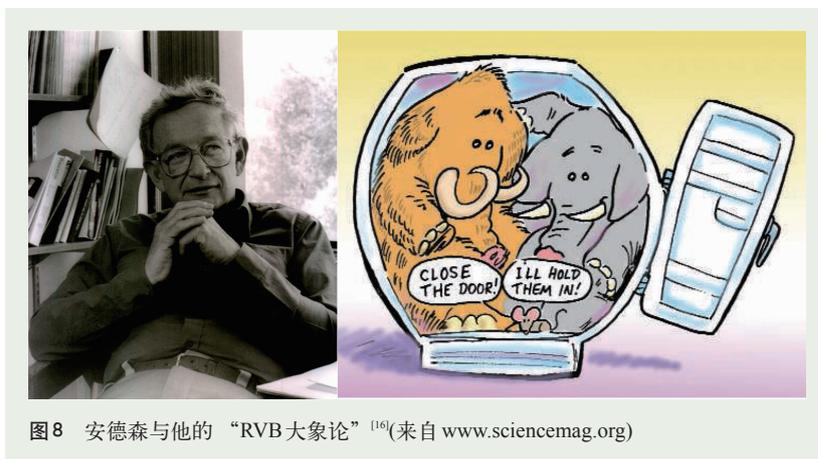


图8 安德森与他的“RVB大象论”<sup>[16]</sup>(来自www.sciencemag.org)

论,从来就没有停止过<sup>[17]</sup>。山还是那座山,水还是那股水,只是迷失的实验家迷失了,相逢的理论家还会再相逢。终极的高温超导微观理论,不仅要全面回答以上问题,还得经得住更多实验的考量<sup>[18]</sup>。未来新的高温超导之路,需要不断探索新型体系的高温超导家族,需要发

展新的实验探测技术并不断提升实验测量精度,需要建立能够处理强关联电子多体系统的理论体系,最终以越来越多的实际例证、不断清晰的实验规律、坚实可靠的理论模型来彻底回答高温超导机理这个物理难题。

## 参考文献

- [1] Leggett A. *Nature Physics*, 2006, 2 (3): 134
- [2] Kirtley J R *et al.* *Europhys. Lett.*, 1996, 36:707
- [3] Tsuei C C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73:593
- [4] Kohsaka Y *et al.* *Nature*, 2008, 454: 1072
- [5] Tinkham M. *Introduction to Superconductivity*. New York: Dover Publications Inc., 2004
- [6] Uemura Y J. *J. Phys. Condens. Matter.*, 2004, 16: S4515
- [7] Hashimoto K *et al.* *Science*, 2012, 336: 1554
- [8] Božović I. *Nature*, 2016, 536: 309
- [9] <https://physics.illinois.edu/people/directory/profile/dimer>
- [10] Gomes K K *et al.* *Nature*, 2007, 447: 569
- [11] Hanaguri T *et al.* *Nature Physics*, 2007, 3: 865
- [12] Wang Y Y. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95: 247002
- [13] Norman M R. *Science*, 2009, 325: 1080
- [14] Dalla Torre E G *et al.* *Nature Physics*, 2016, 12: 1052
- [15] Anderson P W. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013, 449: 012001
- [16] Anderson P W. *Science*, 2007, 317: 1705
- [17] 阮威,王亚愚. *物理*, 2017, 46(8): 521
- [18] 向涛,薛健. *物理*, 2017, 46(8): 514

## 读者和编者

## 《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投稿与物理学相关的封面素材。要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用,均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649470; 82649029

《物理》编辑部