

观点和展望

高温超导: 推动量子多体理论革命的引擎

向涛[†]

(中国科学院物理研究所, 北京 100190)

(2025 年 3 月 10 日收到; 2025 年 3 月 28 日收到修改稿)

高温超导是凝聚态物理研究的一个基本问题, 也是 21 世纪亟待攻克的关键科学难题之一. 其研究不仅揭示了大量新奇的量子现象, 深化了对量子多体物理的理解, 还极大地促进了实验技术的创新以及关联量子理论与方法的发展. 更为重要的是, 高温超导是一个非微扰的强关联量子系统, 其研究为非微扰量子理论的突破提供了理想的实验平台, 是系统构建非微扰量子场论的关键驱动力. 当前, 高温超导研究面临着诸多挑战, 要取得实质性突破, 不仅需要发展基于新原理的实验探测技术, 构建新的量子多体理论框架和研究手段, 更重要的是要通过对已有实验现象和效应的深入分析, 挖掘这些现象之间的内在关联和规律, 为揭示高温超导机理提供关键线索, 同时推动量子多体理论的整体发展.

关键词: 高温超导, 量子多体理论, 非微扰量子场论, 强关联系统

PACS: 74.20.-z, 71.10.-w, 71.27.+a

DOI: 10.7498/aps.74.20250313

CSTR: 32037.14.aps.74.20250313

1 引言

高温超导机理问题, 或者更广泛地说, 高温超导问题, 是凝聚态物理研究亟待解决的核心科学问题, 也是 21 世纪人类要解决的科学难题之一. 破解这一难题, 不仅能揭示高温超导的微观机制, 还将极大提升我们对高温超导材料的预测、控制及优化能力, 从而加速新的高温超导材料的发现, 并推动超导技术在更广泛领域的应用.

然而, 高温超导研究的意义远不止于此. 一旦在这一领域取得突破性进展, 其影响将不仅限于凝聚态物理, 还将延伸至核物理、粒子物理、量子化学、量子计算等多个学科领域. 事实上, 高温超导的研究为系统构建非微扰量子场论提供了迄今为止最理想的实验平台, 是推动和建立统一描述包括高温超导在内的非微扰量子理论、指导发现新的量子多体物理规律、扩展人类知识边界的重要驱动

力. 为了更深入理解这一点, 我们不妨先回顾一下量子理论百年来的发展历程.

量子理论这场颠覆人类认知的科学革命, 自 20 世纪初萌芽以来, 已深刻重构了现代文明的根基. 它不仅揭示了微观世界的运行密码, 更成为当代科技爆炸式发展的核心引擎. 量子理论的发展大致可分为三个阶段: 第一阶段从 20 世纪初至 20 世纪 20 年代末, 是量子基本规律和量子力学的建立阶段, 奠定了量子理论的基石; 第二阶段大约是从 1927 年到 20 世纪 70 年代, 是微扰量子场论的建立与发展阶段, 是量子力学的基本规律在多体量子系统的应用, 其成果已成为当代量子科学与技术研究的重要手段; 第三阶段从 20 世纪 50 年代开始, 是非微扰量子场论 (即强关联量子多体理论) 的发展阶段. 建立非微扰量子理论比建立微扰量子理论难得多, 因此这一问题至今未能解决, 仍处于探索和发展之中.

在量子理论发展的每个阶段, 尽管有许多物理

[†] E-mail: txiang@iphy.ac.cn

问题需要研究和解决,但其中某些问题的研究对推动量子理论的进步起到了尤为关键且不可替代的作用,成为揭示新规律、建立新理论的试验场. 这些问题具有两个基本特点:一是它们揭示的物理现象不能在当时已有的物理理论框架中得到解释;二是解决这些问题往往会导致新物理理论的产生.

例如,在量子力学的建立阶段,有两个关键物理问题的研究对量子力学的诞生起到了决定性作用:其一是黑体辐射,普朗克正是在解决这一问题时首次提出了量子的概念,开启了量子理论的研究;其二是氢原子光谱,这一问题的研究为量子力学数学框架的建立提供了重要实验依据. 在第二阶段,即微扰量子场论的发展阶段,量子电动力学研究占据了核心地位,其重要性远超其他问题. 这个问题的研究不仅为微扰量子场论的建立,也为其完善提供了关键的理论基础和实验验证平台,成为这一阶段最具标志性的科学成就.

在第三阶段,对关键性问题的研究最初聚焦于原子核中发现的强相互作用问题. 由于这种相互作用很强,无法通过微扰展开的方法处理,超越了微扰量子场论能处理的范围. 同时,由于对强相互作用问题的实验研究需要超大规模的粒子加速器,使得这方面的研究进展一直较为缓慢. 正当研究陷入困境时,20世纪80年代中期,高温超导体的发现为解决这个问题带来了曙光^[1]. 高温超导是一个强关联系统,其相互作用也无法用微扰方法近似处理,但与强相互作用问题相比,高温超导的研究在实验室中更容易实现,理论的正确性都能得到及时验证,研究门槛低得多.

同时,高温超导的研究揭示了许多新颖的物理现象和效应,这些现象具有一定的普适性,为总结和发现强关联量子多体系统的运动规律提供了一个相对完备的参照系. 这些现象无法在现有量子理论框架下得到解释,对量子场论提出了挑战. 因此,高温超导体不仅是一种具有广泛应用潜力的材料,更是建立量子多体理论重要的实验平台.

2 高温超导研究的科学和应用背景

超导是低温下出现的一种宏观量子态,我们通常把超导的相变临界温度接近或者超过 40 K 的超导体叫作高温超导体. 根据现有实验观测,已发现的高温超导体按是否存在强磁性涨落特征可分为

两类:一类是存在强反铁磁涨落的高温超导体,包括铜氧化物^[1]、铁基^[2]和镍基超导体^[3];另一类则缺乏反铁磁涨落特征,典型代表有二硼化镁^[4]以及高压氢化物超导体^[5].

超导体是一个理想的导体,没有电阻,同时也是一个理想的抗磁体. 如果对超导体施加一个磁场,磁场会被完全排斥在这个超导体之外,这是超导体有别于一般导体的一个特性. 没有电阻,输电就没有能耗和发热效应,超导体因此能够通过一个很大的临界电流,产生一个用其他导体无法产生的强磁场. 此外,超导体对磁的微小变化非常敏感,可用于高灵敏磁探测,也是其他材料所不具备的优势.

超导技术的应用范围极为广泛,涵盖了量子计算、超导磁悬浮列车、热核聚变、大型加速器、大功率输电到心脑磁图诊疗等多个前沿方向,横跨电子信息、交通运输、能源电力、机械工程、生物医学,以及大科学装置等诸多领域. 作为当代科技发展的重要支柱,超导技术已成为全球高科技竞争的焦点之一.

目前大多数超导应用,仍依赖于超导相变温度较低的常规金属超导体. 高温超导材料虽然能够显著降低维持低温的成本并提高系统稳定性,但由于制备工艺复杂和机械性能不足,应用成本较高,限制了应用范围. 要突破这一瓶颈,不仅需要提升高温超导材料的制备技术,更关键的是要深入理解高温超导的物理规律,发现更多性能优异且实用的高温超导材料.

超导现象的发生依赖于两个关键过程:电子配对和量子相干凝聚^[6]. 电子配对是指两个电子通过某种吸引相互作用形成类玻色子的束缚态,这种束缚态被称为库珀对. 当这些库珀对的量子位相发生相干时,会凝聚到一个宏观的超导态中,从而表现出零电阻和抗磁性等超导特性.

在常规超导体中,电子配对的吸引相互作用主要来源于电子-声子相互作用,电子通过扰动晶格,进而间接吸引另一个电子形成库珀对. 然而,在铜氧化物和铁基高温超导体中,驱动电子配对的相互作用机制至今仍未完全阐明. 磁性相互作用、强关联效应,以及其他未知因素可能在其中扮演重要角色. 揭示高温超导体中电子配对的起源,正是高温超导机理研究要解决的核心科学问题.

3 高温超导对量子多体理论的挑战

在过去的近四十年中, 高温超导研究揭示了一系列令人瞩目的新奇物理现象, 这些现象在现有的量子理论框架中难以得到合理解释, 不仅阻碍了高温超导机理的解决, 也为量子多体理论的发展带来了严峻挑战. 以下是高温超导研究中几个最引人注目的未解之谜.

1) **线性电阻问题** 在常规金属导体中, 低温电阻通常随温度的平方或五次方变化. 然而, 在最佳掺杂的高温超导材料中, 低温电阻却表现出随温度线性变化的行为^[7]. 这一现象的物理根源和机制至今仍未阐明.

2) **电阻的 Mott-Ioffe-Regel 极限问题** 导体中电子散射会导致电阻的产生, 其强度可以用电子的平均自由程来描述. 根据传统的电子输运理论, 电子的平均自由程不可能小于原子间距, 因此原子的半径设定了电阻的一个上限, 这个上限就是 Mott-Ioffe-Regel 极限^[8]. 然而, 在高温超导材料中, 实验发现电阻可以完全超越这一极限^[7,8], 这一现象挑战了传统电子输运理论的基本假设.

3) **赝能隙问题** 当导体转变为超导体时, 其比热在超导相变临界温度附近会出现一个尖峰, 随后随温度降低迅速衰减, 这是电子形成束缚态并打开能隙的结果. 赝能隙^[9-11]是在正常相 (非超导相) 中电子在部分费米面上出现能隙现象, 由此也会导致比热在超导相变温度之上就会随温度降低而下降. 赝能隙的存在导致低能熵 (能量低于 25 meV) 的缺失^[12,13], 而红外光谱实验发现这些缺失的低能熵转移到了 1 eV 左右的高能量态上. 这种极高能态对低能态的显著影响在以往的物理研究中几乎从未出现过, 暗示着微扰量子场论的一些基本原则 (如可重正性) 需要重新审视.

4) **费米弧问题** 在常规导体中, 费米面是布里渊区中的一个封闭曲面. 然而, 在赝能隙出现时, 高温超导体的费米面不再封闭, 而是呈现为弧状结构^[14]. 这种不封闭的费米弧是赝能隙的直接后果. 令人困惑的是, 在这种系统中, 实验发现强磁场下依然会出现只有封闭费米面系统才可能观测到的量子振荡现象^[15]. 这一矛盾现象为理解高温超导体的电子结构带来了新的挑战.

5) **线性电阻与超导相变温度的关联问题** 实验发现, 在过掺杂的高温超导体中, 低温线性电阻系

数的平方根与超导相变温度之间存在线性相关性^[16], 表明导致铜氧化物高温超导和线性电阻的相互作用具有相同的起源, 但产生这种关联性的原因尚不清楚.

事实上, 高温超导体中发现的令人费解的问题远不止上述这些, 但这些现象与现有理论的冲突最为突出. 这些现象, 尤其是其间的相互联系不仅是对现有理论的挑战, 也为新的量子理论的诞生提供了契机. 解决这些问题, 不仅将推动高温超导机理的突破, 还可能催生全新的量子多体理论和研究方法, 为凝聚态物理和其他领域带来深远影响.

4 高温超导对量子多体研究的推动作用

高温超导的机理问题尽管还没能解决, 但高温超导的研究对量子多体理论起到的推动作用巨大的, 主要体现在以下三个方面.

其一, 深化了我们对强关联量子效应的理解. 通过大量的实验和理论分析, 科学家们证实了高温超导电子配对具有 d 波对称性^[17], 并发现了一系列新颖的量子现象和效应. 这些发现不仅帮助我们建立了对这些量子现象的定量化描述, 还加深了对强关联物理现象的全面理解, 为后续研究奠定了坚实基础. 此外, 高温超导的研究还推动了重费米子、巨磁阻、量子自旋液体等凝聚态物理前沿领域的发展, 成为推动量子多体问题研究的源动力.

其二, 促进了实验技术的创新. 作为实验技术创新的强大催化剂, 高温超导研究加速了角分辨光电子谱 (ARPES)、扫描隧道显微镜 (STM)、中子散射、共振非弹性 X 射线散射 (RIXS) 等实验技术的发展. 这些技术不仅在高温超导研究中发挥了关键作用, 还在凝聚态物理和材料科学的其他领域得到了广泛应用, 推动了物理学及其交叉学科的全面的发展.

其三, 推动了量子多体理论和方法的发展. 尽管目前尚未建立起一个完整的量子多体理论框架, 但高温超导研究极大地加深了我们对多体量子世界, 特别是量子临界行为和量子纠缠特性的理解. 此外, 它还促进了量子蒙特卡罗、密度矩阵及张量网络重正化群等量子多体计算方法的发展. 这些受高温超导启发而建立的理论和方法, 对整个量子多体问题的研究也产生了深远的影响.

尽管有以上这些进展,但要真正解决高温超导问题并推动量子多体理论的发展,还需建立描述高温超导及其他量子多体系统的基本理论框架. 这个框架的建立,不能只是发现更多的实验现象,收集更多的实验数据,而是要通过对实验数据和现象的深入分析,揭示数据之间存在的内在联系. 唯有如此,才能为实验研究提供更清晰的理论指导,帮助发现新的物理效应,并从根本上破解高温超导机理难题.

5 普适性规律的发现是量子多体理论突破的关键

高温超导研究揭示了大量先前未知的量子现象,拓展了我们对多体量子系统复杂性和多样性的认知,但同时也凸显出现有研究的局限性. 当前的研究过于注重对表观现象的解释,缺乏对内在规律的深入探索. 理论研究往往停留在“头痛医头,脚痛医脚”的现象分析层面,未能系统性地揭示各种现象之间的本质联系和深层规律. 这种研究现状制约了我们对高温超导机制的整体理解,也阻碍了相关领域的突破性发展.

纵观物理学发展史,新理论体系的构建往往遵循着从经验规律到数学公式化描述的认知路径. 首先,研究者通过观察和实验,提炼出具有普适性的经验规律,继而在此基础上建立定量化的物理定律,并最终将其转化为精确的数学表述. 这一研究范式在经典力学、量子力学等重大理论突破中得到了充分验证. 对于非微扰量子理论体系的构建而言,发现普适性规律同样是不可或缺的探索步骤. 特别是在高温超导领域,对电子配对机制等核心问题的规律性认识,将成为未来取得突破的关键所在.

在高温超导研究中,决定超导相变温度的最关键因素是什么? 是否存在某种规律可循? 这是过去四十年来高温超导研究亟需归纳和总结的核心问题.

不难理解,超导相变温度主要取决于超导电子配对的相互作用强度: 相互作用越强,超导相变温度越高. 这看似简单的道理,但要发现其背后的物理机制却非易事. 在已知的高温超导体中,反铁磁涨落在铜氧化物和铁基超导体中扮演了重要角色,而电子-声子相互作用则在二硼化镁 (MgB_2) 和高

压下的富氢化合物超导体中更为显著. 此外,准二维性和轨道涨落也对超导性质有很大影响. 这些差异反映了不同超导体体系的表现特征.

那么,高温超导的电子配对相互作用是否存在共性规律? 现有研究给出了肯定的回答. 通过对各种高温超导体定域电子结构的深入分析,发现它们普遍存在强化学键 (特别是 σ 共价键) 电子的金属化趋势^[18]. 这一共性特征已在铜氧化物^[18]、二硼化镁^[19] 和富氢高温超导体^[20] 中通过理论计算和实验分析得到验证. 铁基超导体尽管其铁离子的多轨道特性增加了复杂性,但 σ 键电子的金属化仍是一个合理的推论. σ 键电子被金属化后,晶体的键合结构必然变得不那么稳定,因此机械性能会变差,同时,材料会易于进行化学掺杂. 这与铁基超导体及铜氧化物超导体的特性相符,进一步支持了对这一规律的普适性判断.

σ 键电子的金属化之所以有利于高温超导的出现,根本原因在于 σ 共价键本质上是分子中一对电子的强束缚态. 在晶体中, σ 键电子通过杂化形成能带,是稳定晶体结构的主要相互作用. σ 键电子的金属化意味着这一强键合的断裂,使 σ 电子能够自由移动并参与导电. 当然,这一过程同时也会破坏晶体结构的稳定性,使得金属化 σ 键电子极具挑战性. 这也是高温超导体难以发现的一个基本原因.

在保持晶体结构完整性的前提下, σ 键的金属化可以为高温超导电子配对的形成提供关键条件. 这一机制在 MgB_2 中得到了充分体现: 通过 σ 键的金属化,原本具有类石墨结构的材料转变为了高温超导体. 尽管 σ 键电子在金属化后其束缚相互作用会有所减弱,但其强度仍可能显著高于其他类型的相互作用,从而成为主导高温超导电子配对的关键因素. 这一现象表明, σ 键或其他强化学键电子的金属化是实现高温超导的普适途径. 这个规律的认识深化了我们对高温超导机制的理解,也为探索新型高温超导材料提供了理论依据. 然而,如何定量化描述这一规律,并建立其与超导转变温度之间的精确关联,仍然是当前研究面临的一个重大挑战.

6 总 结

高温超导是关联量子新现象、新概念、新方法和新技术发展的源泉. 在铜氧化物和铁基超导体中

发现的物理现象和物理效应,不能在现有的多体量子理论的框架中得到满意的解释,是量子多体理论面临的严峻挑战,同时也为其提供了理想的研究平台. 高温超导的研究不仅能推动强关联量子理论的发展,也为探索新的量子态和量子效应提供了独特的机会.

要解决高温超导的机理问题,首先需要发现并建立对高温超导现象的规律性描述. 这一过程不仅依赖于对实验数据的深入分析,还需要发展和建立系统可靠的研究量子多体问题的理论方法. 与此同时,实验技术的概念创新也至关重要. 我们需要发展能够直接探测微观相互作用的实验技术和方法,特别是那些具有能量和动量分辨能力的探测手段^[13]. 通过这些技术,我们可以精确地确定究竟是哪种相互作用导致了电子的配对,从而从根本上解决高温超导配对机理这一世纪性难题.

总之,高温超导研究不仅揭示了量子多体物理的深层次问题,也为量子理论和实验技术的突破提供了契机. 通过理论与实验的紧密结合,我们有望最终揭开高温超导的奥秘,为量子多体理论的发展开辟新的道路.

参考文献

- [1] Bednorz J G, Müller K A 1986 *Z. Phys. B* **64** 189
- [2] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M, Hosono H 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 3296
- [3] Li D, Lee K, Wang B Y, Osada M, Crossley S, Lee H R, Cui Y, Hikita Y, Hwang H Y 2019 *Nature* **572** 624
- [4] Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T, Zenitani Y, Akimitsu J 2001 *NATURE* **410** 63
- [5] Drozdov A P, Eremets M I, Troyan I A, Ksenofontov V, Shylin S I 2015 *Nature* **525** 73
- [6] Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R 1957 *Phys. Rev.* **108** 1175
- [7] Gurvitch M, Fiory A T 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 1337
- [8] Hussey N E, Takenaka K, Takagi H 2004 *Philos. Mag.* **84** 2847
- [9] Warren W W, Walstedt R E, Brennert G F, Cava R J, Tycko R, Bell R F, Dabbagh G 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 1193
- [10] Alloul H, Ohno T, Mendels P 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 1700
- [11] Loram J W, Mirza K A, Cooper J R, Liang W Y 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1740
- [12] Loram J W, Mirza K A, Cooper J R, Tallon J L 1997 *Physica C: Superconductivity* **282-287** 1405
- [13] Xiang T, Xue J 2017 *Physics* **46** 514 (in Chinese) [向涛, 薛健 2017 *物理* **46** 514]
- [14] Norman M R, Ding H, Randeria M, Campuzano J C, Yokoya T, Takeuchi T, Takahashi T, Mochiku T, Kadowaki K, Guptasarma P, Hinks D G 1998 *Nature* **392** 157
- [15] Doiron-Leyraud N, Proust C, LeBoeuf D, Levallois J, Bonnemaïson J B, Liang R, Bonn D A, Hardy W N, Taillefer L 2007 *Nature* **447** 565
- [16] Yuan J, Chen Q, Jiang K, Feng Z, Lin Z, Yu H, He G, Zhang J, Jiang X, Zhang X, Shi Y, Zhang Y, Qin M, Cheng Z G, Tamura N, Yang Y F, Xiang T, Hu J, Takeuchi I, Jin K, Zhao Z 2022 *Nature* **602** 431
- [17] Xiang T, Wu C J 2022 *D-wave Superconductivity* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [18] Gao M, Lu Z Y, Xiang T 2015 *Physics* **44** 421 (in Chinese) [高森, 卢仲毅, 向涛 2015 *物理* **44** 421]
- [19] An J M, Pickett W E 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4366
- [20] Zhang J F, Zhan B, Gao M, Liu K, Ren X G, Lu Z Y, Xiang T 2023 *Phys. Rev. B* **108** 094519

VIEWS AND PERSPECTIVES

High-temperature superconductivity: A driving force for the revolution in quantum many-body theory

XIANG Tao[†]*(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)*

(Received 10 March 2025; revised manuscript received 28 March 2025)

Abstract

High-temperature superconductivity, a fundamental topic in condensed matter physics, presents one of the critical scientific challenges of this century. The potential for breakthroughs in this field not only promises to reveal numerous novel quantum phenomena and deepen our understanding of quantum many-body physics but also to significantly drive advancements in experimental techniques, theories, and methodologies in probing correlated quantum systems. More importantly, as a non-perturbative quantum system, high-temperature superconductivity offers an ideal platform and a crucial driving force for systematically establishing non-perturbative quantum field theory. Currently, research on high-temperature superconductivity stands at a critical turning point. Achieving significant breakthroughs requires the development of cutting-edge detection technologies built upon novel concepts, the establishment of innovative theoretical frameworks and methodologies, and insightful elucidation of the physical pictures revealed by experimental findings. Such extensive exploration is vital for unveiling fundamental relationships and identifying the governing principles. By integrating these efforts, we can gain profound insights into the mechanisms of high-temperature superconductivity and significantly expand the horizons of quantum many-body theory.

Keywords: high-temperature superconductivity, quantum many-body theory, non-perturbative quantum field theory, strongly correlated systems

PACS: 74.20.-z, 71.10.-w, 71.27.+a

DOI: [10.7498/aps.74.20250313](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250313)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250313](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250313)

[†] E-mail: txiang@iphy.ac.cn

高温超导：推动量子多体理论革命的引擎

向涛

High-temperature superconductivity: A driving force for the revolution in quantum many-body theory

XIANG Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 077403 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250313

CSTR: 32037.14.aps.74.20250313

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250313>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非厄米临界动力学及其在量子多体系统中的应用

Non-Hermitian critical dynamics and its application to quantum many-body systems

物理学报. 2022, 71(17): 174501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220914>

基于冷原子的非平衡量子多体物理研究

Non-equilibrium quantum many-body physics with ultracold atoms

物理学报. 2023, 72(23): 230701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231375>

量子多体系统中的拓扑序与分数化激发

Topological order and fractionalized excitations in quantum many-body systems

物理学报. 2024, 73(7): 070301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240222>

高温超导体电子结构和超导机理的角分辨光电子能谱研究

Angle-resolved photoemission spectroscopy studies on the electronic structure and superconductivity mechanism for high temperature superconductors

物理学报. 2021, 70(1): 017406 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201913>

离子阱中以声子为媒介的多体量子纠缠与逻辑门

Phonon-mediated many-body quantum entanglement and logic gates in ion traps

物理学报. 2022, 71(8): 080301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220360>

镍基超导体中电荷序的实验研究进展

Experimental research progress of charge order of nickelate based superconductors

物理学报. 2024, 73(19): 197104 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240898>