

配对对称性和超导性在 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 薄膜中

Wenyuan Qiu,^{1,*} Zhihui Luo,^{1,*} Xunwu Hu,² and Dao-Xin Yao^{1,†}

¹Center for Neutron Science and Technology, Guangdong Provincial Key Laboratory of Magnetolectric Physics and Devices, State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Physics,

School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, 510275, China

²Department of Physics, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, 510632, China

(10Dated: 2025 年 6 月 28 日)

近期在镧镍氧化物薄膜 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 和 $(\text{La,Pr})_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中发现转变温度 T_c 超过 40 K 的超导性, 标志着镍酸盐超导体领域的一个重要进展。这里, 我们使用双层两轨道 $t-J$ 模型对 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 薄膜中的超导性进行了重正化平均场理论研究。我们的结果显示了由强层间超交换耦合的 d_{z^2} 轨道驱动的 s_{\pm} 波配对对称性, 类似于加压块体的情况。此外, 我们大致重现了实验报告的超导间隙在 β 口袋和超导 T_c 中的无节点形状。为了深入了解超导性的轨道特征, 我们探讨了不同配对键在费米面上的投影。我们发现, β 波段的无节点间隙与 d_{z^2} 和 $d_{x^2-y^2}$ 轨道内的层间配对有关, 其中后者通过杂化由前者触发, 并且两者具有相同的符号。

引言。— 超导性在 Ruddlesden-Popper (RP) 双层镍酸盐 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (LNO) 中发现的转变温度 T_c 接近 80 K [1], 引起了高- T_c 超导性领域的广泛关注, 并随后在三层镍酸盐 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ (其中 $T_c=20-30$ K [2, 3]) 中观察到超导性, 两者均在高压下实现。RP 镍酸盐超导体的发现标志着高- T_c 超导领域的一项突破, 因此引发了大量后续的理论 [4–38] 和实验研究 [39–46]。然而, 对高压的需求大大限制了一些关键实验技术直接探测超导相的能力, 例如角度分辨光电子能谱 (ARPES) 和扫描隧道显微镜 (STM), 这阻碍了在各种理论提案中确认超导配对的决定性证据 [16, 34]。另一方面, 实现常压超导是实际应用的一个关键步骤, 在这一点上, 有一些关于可能途径的建议, 如使用化学替代 [47–49] 或施加应变 [50–53]。

非常近期, 报道了在环境压力下 LNO [54] 和 $(\text{La,Pr})_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ [55] 薄膜中 T_c 超导温度超过 40 K。X 射线吸收光谱 (XAS) 分析和扫描透射电子显微镜 (STEM) 揭示, LNO 薄膜中的镍离子保持混合价态, 并且顶点 Ni-O-Ni 键角接近 180° [54], 这与高压块状相的 LNO 非常相似。薄膜中的 ARPES 测量 [56] 也证实了费米能级附近主要存在 Ni- $d_{x^2-y^2}$ 和 d_{z^2} 轨道的光谱权重, 这与 DFT 计算 [52, 53, 57–59] 相一致。此外, 最近直接在费米面 (FS) 上进行了超导电子结构的 ARPES 测量 [60], 这揭示了 β FS 层上的显著能隙打开, 并且沿布里渊区 (BZ) 对角方向没有显示出任何节点。这一观察结果伴随着在超导状态下进行的另一

项 STM 测量 [61], 显示 FS 上存在双能隙结构, 并且对这些能隙的拟合表明了优选各向异性 s 波配对。这两个结果总体上倾向于系统中主要的 s_{\pm} 波配对对称性, 这与若干理论研究的预测一致 [7, 16, 18, 35, 58]。

在这篇论文中, 使用一个能够捕捉 LNO 薄膜关键成分的双层 $t-J$ 模型, 我们进行了重正化平均场理论 (RMFT) [7] 计算超导性。我们的结果揭示了 s_{\pm} 波配对, 并再现了在 Ref. [60] 报告的 β 口袋处无节点形状的超导间隙。显然, 布里渊区对角线上存在有限间隙表明了直接在 $d_{x^2-y^2}$ 轨道上的 s_{\pm} 波配对。一般来说, 费米表面的能隙结构对实空间中配对构型的相对强度很敏感, 我们的结果表明这种能隙形状是 d_{z^2} 和 $d_{x^2-y^2}$ 轨道内层间配对键共同努力的结果。

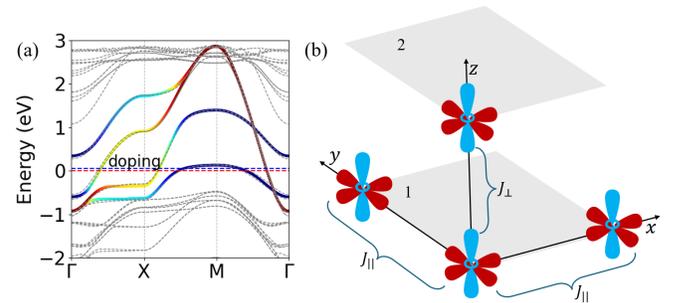


图 1. (a) 由双层 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 薄膜的 DFT 模拟中采用的 4 轨道紧束缚模型的能带结构 [57]。红色虚线表示未掺杂情况下的 DFT 结果, 而蓝色线条则表示稍加电子掺杂的情况, 这在我们的研究中被使用。(b) 模型中 $d_{x^2-y^2}$ (红色) 和 d_{z^2} (蓝色) 轨道的示意图。绘制了两种主要的超交换耦合 J_{\perp}, J_{\parallel} 。详见正文。

模型和方法。— 双层两轨道 $t-J$ 模型定义为

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_t + \mathcal{H}_J, \quad (1)$$

$$\mathcal{H}_t = \sum_{ij} \sum_{\mu\nu} \sum_{\sigma} t_{ij}^{\mu\nu} c_{i\mu\sigma}^\dagger c_{j\nu\sigma} - \mu \sum_{i\mu\sigma} n_{i\mu\sigma} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_J = & J_{\perp} \sum_i \mathbf{S}_{iz_1} \cdot \mathbf{S}_{iz_2} + J_{\parallel} \sum_{\langle ij \rangle}^{\mu=x_1, x_2} \mathbf{S}_{i\mu} \cdot \mathbf{S}_{j\mu} \quad (3) \\ & + J_{xz} \sum_{\langle ij \rangle}^{\mu\nu=x_1 z_1, x_2 z_2} \mathbf{S}_{i\mu} \cdot \mathbf{S}_{j\nu} - J_H \sum_i \mathbf{S}_{i\mu} \cdot \mathbf{S}_{i\nu}. \end{aligned}$$

在此模型中, 基底是 $\Psi = (d_{z_1}, d_{x_1}, d_{z_2}, d_{x_2})^T$, 它包含了第一层和第二层的 d_{z^2} 和 $d_{x^2-y^2}$ 轨道, 如图 1(b) 所示。 \mathcal{H}_t 是从双层堆叠 LNO 薄片的 DFT 模拟中采用的紧束缚哈密顿量 [57]。这里, $ij, \mu\nu, \sigma$ 分别表示格点、轨道和自旋指标。能带结构如图 1(a) 所示, 在计算中我们使用了化学势为 $\mu = -0.05$ 的小电子掺杂水平, 以更好地与实验相符, 这给出了电子填充率 $n_z=0.8, n_x=0.58$ 。对于海森伯项 \mathcal{H}_J , J_{\perp} 是 d_{z^2} 轨道的层间超交换耦合, 而 J_{\parallel}, J_{xz} 是 $d_{x^2-y^2}$ 轨道的面内最近邻超交换耦合以及分别与 $d_{x^2-y^2}$ 和 d_{z^2} 之间的超交换耦合。此外, 为了通用性还包括了洪德耦合 J_H 。为了定量估计 $J_{\perp}, J_{\parallel}, J_{xz}$, 我们进行了精确对角化 (ED) 计算。以 J_{\perp} 为例, 在沿 z 轴的包含两个 d_{z^2} 和三个 p_z 轨道的 5 位链上执行 ED, 其中 $p-d$ 跳跃也从 DFT 计算 [57] 中获得。在对应的半填充 d_{z^2} 轨道的原子子空间 ($N=8, S_z=0$) 中, J_{\perp} 被确定为最低单重态和三重态能量差 [8]。我们最终得到 $J_{\perp}=0.135$ eV, $J_{\parallel}=0.084$ eV, $J_{xz}=0.03$ eV。除此之外, 在本研究中还使用了实际的 $J_H=1$ eV。

上述 $t-J$ 模型是在 RMFT 下求解的。RMFT [62] 遵循传统的平均场分解自旋交换, 这在自旋对称性下产生了序参量 $\chi_{ij}^{\mu\nu} = \langle c_{i\mu\uparrow}^\dagger c_{j\nu\uparrow} \rangle$ 和 $\Delta_{ij}^{\mu\nu} = \langle c_{i\mu\uparrow}^\dagger c_{j\nu\downarrow}^\dagger \rangle$ 。此外, \mathcal{H}_t 和 \mathcal{H}_J 分别通过 Gutzwiller 重正化因子 g_t 和 g_J 进行耦合, 以恢复来自关联 [63] 的强重正化。获得的二次哈密顿量随后进行自洽计算, 在此过程中电子密度被固定在某个水平。最终的配对对称性可以从各种配对键 $\Delta_{ij}^{\mu\nu}$ 的相结构中确定。我们建议读者参考文献 [7] 以获取该方法的全面介绍。

双重对称性和超导隙。— 图 2(a) 显示了超导间隙矩阵 $[g_t \Delta]_{\mu\nu}$ 投影到费米面的情况, 这表明 β, γ 区域没有节点且符号相反, 而 α 区域显示出符号翻转。为了更好地说明间隙特征, 图 2(b-d) 分别显示了角度 θ 的 $g_t |\Delta|$ 的绝对值对于 α, β 和 γ 口袋。对于图 2(b) 中

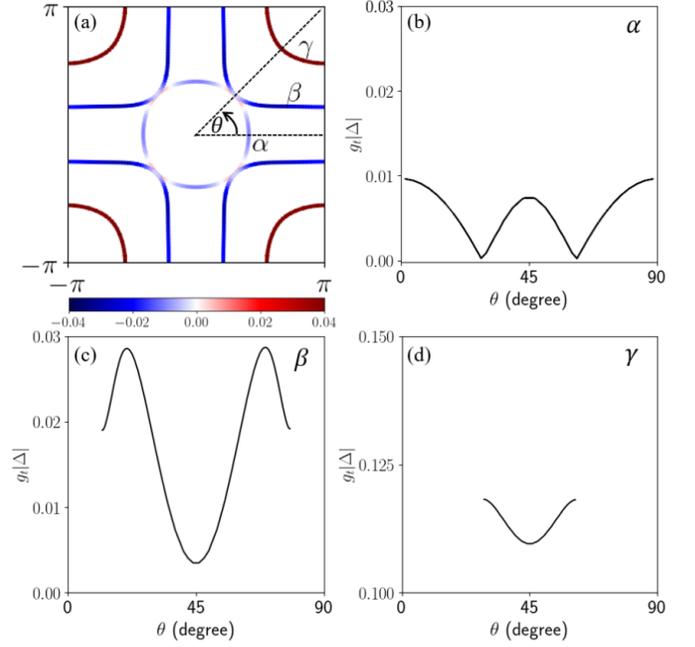


图 2. (a) 超导间隙 $g_t \Delta$ 投影到 FS 上的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 薄膜。(b-d) $g_t |\Delta|$ 随角度 θ 的变化, 分别对应于 α, β 和 γ 囊。 θ 表示在 (a) 中。

的 α 袋, 间隙显示出 $\theta = 45^\circ \sim 90^\circ$ 之间的节点。对于图 2(c) 中的 β 袋, 间隙呈现出以 $\theta = 45^\circ$ 为中心的抛物线形状, 在接近角落时略有减小。请注意, 我们的结果中围绕 BZ 对角方向的间隙形状及其大小通常与 ARPES 结果 [60] 相协调, 这表明我们的 RMFT 捕捉到了 LNO 薄膜中的关键成分。对于图 2(d) 中的 γ 包围域, 我们发现能隙大小约为图 2(b) 的 5 倍, 并且在布里渊区对角线方向也识别出一个最小值。显然, γ 包围域能隙的大幅开启应归因于较强的层间超交换耦合 J_{\perp} , 这与之前对于体相 LNO [7, 16, 18, 25] 的计算结果一致。总体而言, 图 2 中的配对结构应描述为 s_{\pm} 波, 这也可以从我们的结果看出, 在 d_{z^2} 轨道 (Δ_{\perp}^z) 形成较大的层间配对键的同时, 平面内的配对键在沿 x, y 方向时对于 $d_{x^2-y^2}$ 和 d_{z^2} 轨道 ($\Delta_{\parallel}^x, \Delta_{\parallel}^z$) 具有相同的大小。请注意, 在我们的 $t-J$ 模型中, 仅成对键 $\Delta_{\perp}^z, \Delta_{\parallel}^x, \Delta_{\parallel}^z$ 与应用的 $J_{\perp}, J_{\parallel}, J_{xz}$ 相关联, 而其他项如层间 $d_{x^2-y^2}$ 轨道 (Δ_{\perp}^x) 的配对没有相应的 J , 不应出现在计算中。然而, 它们仍然可以从平均场波函数作为 $\Delta_{ij}^{\mu\nu} = \langle nk | c_{i\mu\uparrow}^\dagger c_{j\nu\downarrow}^\dagger | nk \rangle$ 获得有限值, 这反映了在全局相干态下的配对倾向。因此, 在图 2 中我们已经包含了所有的相关 Δ , 接下来我们将说明不同的 Δ 在 FS

中的作用。

轨道解析超导间隙。— 图示。3 分别展示了 (a) Δ_{\perp}^z , (b) Δ_{\parallel}^z , (c) Δ_{\perp}^x 和 (d) Δ_{\parallel}^x 的轨道分辨超导间隙。对于图 3(a) 中的 Δ_{\perp}^z , α, γ 腔的成键分支上的能隙为正, 并且 β 腔的反键分支上的能隙为负。对于图 3(b) 中的 Δ_{\parallel}^z , 能隙结构清楚地表明了符号翻转的 s_{\pm} 波, 并且节点出现在减小后的布里渊区边界上。同时, 在图 3(a,b) 的 BZ 对角方向上也识别到了另一个节点, 这是由于杂化消失所致。对于图 3(c,d) 中的 $\Delta_{\perp}^x, \Delta_{\parallel}^x$, 与图 3(a,b) 相比观察到类似的行为, 但幅度要小得多。值得注意的是, 图 3(d) 中的符号与图 3(b) 中即 $\text{sgn}(\Delta_{\parallel}^x) = -\text{sgn}(\Delta_{\parallel}^z)$ 的符号相反。此特性也在从属玻色子平均场研究中观察到 [31], 可以解释为 J_{\perp} 偏好 s_{\pm} 波和 J_{\parallel} 偏好 d 波配对之间竞争的结果 [64]。最后, 结合图 3(a,c), 可以看出在 β 口袋中观察到的无节点间隙是由于 $d_{x^2-y^2}$ 和 d_{z^2} 轨道内层间配对共同作用的结果。关于真实空间配对结构中的间隙结构, 更多见解见补充 [64]。

转变温度。— 在图 4 中, 我们展示了超导间隙作为温度 T 的函数, 这揭示了来自 d_{z^2} 轨道的两个主导配对键 (红色), 与图 3 一致。随着增加 T , 这些间隙以平均场方式减小, 并同时在本 $T_c \approx 60$ K 处降至零。此值与薄层中实验报告的 $T_c = 40 \sim 60$ K 相当 [50, 54, 55]。鉴于我们之前的 RMFT 研究也获得了与实验可比较的 $T_c \approx 80$ K 值对于加压的块状 LNO [7], 合理地认为薄膜中 T_c 的减少应该源自于 J_{\perp} 的减少。这一推测引导我们注意到电子结构的不同, 特别是在主要关注的层间跃迁 t_{\perp}^z 对于 d_{z^2} 轨道。令人惊讶的是, 我们发现在本研究中 $J_{\perp} = 0.135$ eV 比根据 ED 估算的加压体 [8] 的 $J_{\perp} = 0.18$ eV 小 $\sim 25\%$, 这与使用 $J_{\perp} \propto (t_{\perp}^z)^2$ [4, 57] 进行的简单估算相一致。最近, 在 LNO 薄膜中进行的应变调节实验报告称, 在 20 GPa 压力下, T_c 从受拉伸应变的 SrTiO₃ 基底中的 10 K 增加到受压缩应变的 LaAlO₃ 基底中的 60 K [50]。这表明 T_c 与晶格比 c/a 存在正相关关系, 并且乍一看违反了上述理解。然而, 我们认为 J_{\perp} 只能确定 T_c 的上限, 而其他因素如杂化、密度波和层间约瑟夫森耦合也可能有复杂的影响, 正如参考文献 [50, 65–70] 中所指出的。

讨论。— 我们对 LNO 薄膜中超导性的 RMFT 研究预测了 s_{\pm} 波配对对称性。结果与加压块状 LNO [7, 16, 18, 25] 的情况非常相似, 表明电子结构的类似性。

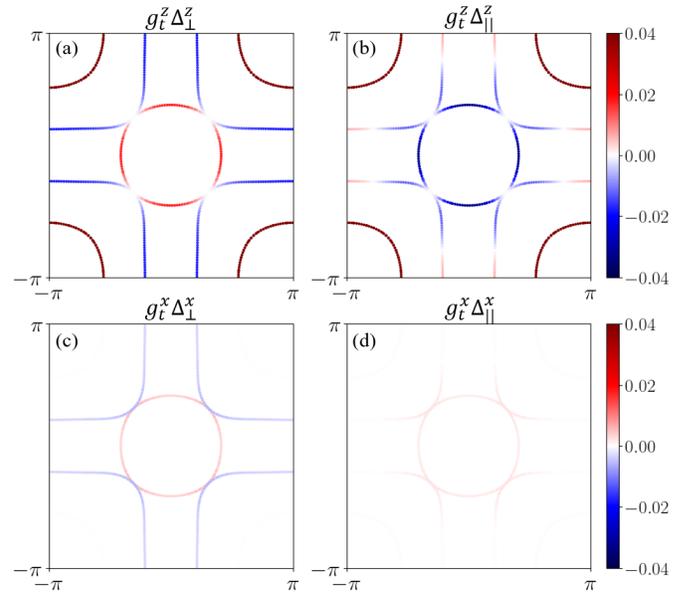


图 3. 轨道分辨的超导能隙在费米面 (FS) 上的分布为: (a) Δ_{\perp}^z , (b) Δ_{\parallel}^z , (c) Δ_{\perp}^x , 和 (d) Δ_{\parallel}^x . $g_t^{z/x}$ 是 $d_{z^2}/d_{x^2-y^2}$ 轨道的重正化因子。 $\Delta_{\perp/\parallel}^{z/x}$ 表示 $d_{z^2}/d_{x^2-y^2}$ 轨道的层间/面内配对键。

数学上, 我们在多轨道 $t-J$ 模型中应用 Gutzwiller 投影 [18, 62], 对重正化条件施加了一个约束, 从而简化了哈密顿量的二次形式, 因此可以像标准的巴丁-库珀-斯立芬 (BCS) 理论一样自洽求解。因此, 可以预期获得的 s_{\pm} 波主要反映了 LNO 中 FS 拓扑的配对偏好 [71]。然而, 我们发现 s_{\pm} 波在从弱到强耦合的各种方法下都非常稳健, 这使我们认为相关原子态的波动可能不会显著改变这种图景。在这个图景中, γ 腰部发挥着核心作用。实验上, 有两个相关的 ARPES 测量结果, 在正常状态下 [56] 进行的测量中 γ 腰部显示出明显的轮廓, 但在超导状态下 [51] 则不可见。从我们的结果来看, 这种矛盾可能是由于一个超过检测能量范围的大间隙打开所致, 如图 2(d) 所示。进一步的实验证据预计会在这一问题上出现。

结论 — 总结来说, 我们使用双层 $t-J$ 模型对 LNO 薄膜中的超导性进行了 RMFT 研究。我们的结果显示了一个由层间超交换耦合驱动的 s_{\pm} 波配对对称性, 类似于块体 LNO 的情况。我们的结果也大致重现了实验报告的在 β 腰部 [60] 附近的无节点超导隙形状以及超导 T_c 。此外, 我们系统地分析了轨道分辨配对键与 FS 上间隙结构之间的关系。结果显示, β 包的无节点间隙与 d_{z^2} 和 $d_{x^2-y^2}$ 轨道内的层间配对有关, 其中后

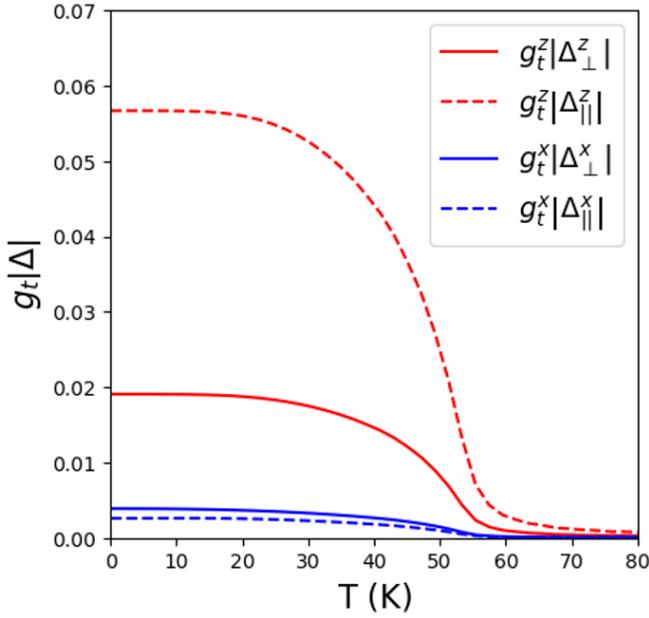


图 4. 超导能隙作为不同配对键温度的函数。 $g_t^{z/x}$ 是 $d_{z^2}/d_{x^2-y^2}$ 轨道的重正化因子，而 $\Delta_{\perp/\parallel}^{z/x}$ 是 $d_{z^2}/d_{x^2-y^2}$ 轨道的层间/面内配对键。

者通过杂化由前者触发。两者具有相同的符号。

我们感谢与 Wéi Wú 的有用讨论。本项目得到国家自然科学基金 (NSFC-12494591, NSFC-92165204)、国家重点研发计划 (NKRDPC-2022YFA1402802)、广东省磁电物理与器件重点实验室 (2022B1212010008)、广东省磁电物理学基础研究机构 (2024B0303390001) 和广东省量子科学战略计划 (GDZX2401010) 的支持。

* These authors contributed equally to this work

† yaodaox@mail.sysu.edu.cn

- [1] H. Sun, M. Huo, X. Hu, J. Li, Z. Liu, Y. Han, L. Tang, Z. Mao, P. Yang, B. Wang, J. Cheng, D.-X. Yao, G.-M. Zhang, and M. Wang, *Nature* **621**, 493 (2023).
- [2] Y. Zhu, D. Peng, E. Zhang, B. Pan, X. Chen, L. Chen, H. Ren, F. Liu, Y. Hao, N. Li, Z. Xing, F. Lan, J. Han, J. Wang, D. Jia, H. Wo, Y. Gu, Y. Gu, L. Ji, W. Wang, H. Gou, Y. Shen, T. Ying, X. Chen, W. Yang, H. Cao, C. Zheng, Q. Zeng, J.-g. Guo, and J. Zhao, *Nature* **631**, 531 (2024).
- [3] Q. Li, Y.-J. Zhang, Z.-N. Xiang, Y. Zhang, X. Zhu, and H.-H. Wen, *Chin. Phys. Lett.* **41** (2024).
- [4] Z. Luo, X. Hu, M. Wang, W. Wú, and D.-X. Yao, *Phys.*

Rev. Lett. **131**, 126001 (2023).

- [5] Y. Zhang, L.-F. Lin, A. Moreo, and E. Dagotto, *Phys. Rev. B* **108**, L180510 (2023).
- [6] F. Lechermann, J. Gondolf, S. Bötzel, and I. M. Eremin, *Phys. Rev. B* **108**, L201121 (2023).
- [7] Z. Luo, B. Lv, M. Wang, W. Wú, and D.-X. Yao, *npj Quantum Mater.* **9**, 1 (2024).
- [8] W. Wú, Z. Luo, D.-X. Yao, and M. Wang, *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **67**, 117402 (2024).
- [9] M. Wang, H.-H. Wen, T. Wu, D.-X. Yao, and T. Xiang, *Chin. Phys. Lett.* **41** (2024).
- [10] D. A. Shilenko and I. V. Leonov, *Phys. Rev. B* **108**, 125105 (2023).
- [11] Y.-f. Yang, G.-M. Zhang, and F.-C. Zhang, *Phys. Rev. B* **108**, L201108 (2023).
- [12] J. Huang, Z. D. Wang, and T. Zhou, *Phys. Rev. B* **108**, 174501 (2023).
- [13] V. Christiansson, F. Petocchi, and P. Werner, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 206501 (2023).
- [14] Y. Shen, M. Qin, and G.-M. Zhang, *Chin. Phys. Lett.* **40**, 127401 (2023).
- [15] H. Oh and Y.-H. Zhang, *Phys. Rev. B* **108**, 174511 (2023).
- [16] Y.-B. Liu, J.-W. Mei, F. Ye, W.-Q. Chen, and F. Yang, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 236002 (2023).
- [17] Z. Liao, L. Chen, G. Duan, Y. Wang, C. Liu, R. Yu, and Q. Si, *Phys. Rev. B* **108**, 214522 (2023).
- [18] Q.-G. Yang, D. Wang, and Q.-H. Wang, *Phys. Rev. B* **108**, L140505 (2023).
- [19] C.-Q. Chen, Z. Luo, M. Wang, W. Wú, and D.-X. Yao, *Phys. Rev. B* **110**, 014503 (2024).
- [20] S. Xu, C.-Q. Chen, M. Huo, D. Hu, H. Wang, Q. Wu, R. Li, D. Wu, M. Wang, D.-X. Yao, T. Dong, and N. Wang, *Phys. Rev. B* **111**, 075140 (2025).
- [21] J.-J. Yang, D.-X. Yao, and H.-Q. Wu, *Phys. Rev. B* **110**, 235155 (2024).
- [22] Z. Ouyang, M. Gao, and Z.-Y. Lu, *npj Quantum Mater.* **9**, 1 (2024).
- [23] H. Sakakibara, M. Ochi, H. Nagata, Y. Ueki, H. Sakurai, R. Matsumoto, K. Terashima, K. Hirose, H. Ohta, M. Kato, Y. Takano, and K. Kuroki, *Phys. Rev. B* **109**, 144511 (2024).
- [24] G. Heier, K. Park, and S. Y. Savrasov, *Phys. Rev. B* **109**, 104508 (2024).
- [25] Y. Zhang, L.-F. Lin, A. Moreo, T. A. Maier, and E. Dagotto, *Nat Commun* **15**, 2470 (2024).
- [26] Y. Zhang, L.-F. Lin, A. Moreo, T. A. Maier, and

- E. Dagotto, *Phys. Rev. B* **109**, 045151 (2024).
- [27] Y.-H. Tian, Y. Chen, J.-M. Wang, R.-Q. He, and Z.-Y. Lu, *Phys. Rev. B* **109**, 165154 (2024).
- [28] S. Rye, N. Witt, and T. O. Wehling, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 096002 (2024).
- [29] J.-X. Zhang, H.-K. Zhang, Y.-Z. You, and Z.-Y. Weng, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 126501 (2024).
- [30] X.-S. Ni, Y. Ji, L. He, T. Xie, D.-X. Yao, M. Wang, and K. Cao, *npj Quantum Materials* **10**, 1 (2025).
- [31] C. Lu, Z. Pan, F. Yang, and C. Wu, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 146002 (2024).
- [32] X.-Z. Qu, D.-W. Qu, J. Chen, C. Wu, F. Yang, W. Li, and G. Su, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 036502 (2024).
- [33] H. Yang, H. Oh, and Y.-H. Zhang, *Phys. Rev. B* **110**, 104517 (2024).
- [34] Z. Fan, J.-F. Zhang, B. Zhan, D. Lv, X.-Y. Jiang, B. Normand, and T. Xiang, *Phys. Rev. B* **110**, 024514 (2024).
- [35] H. Sakakibara, N. Kitamine, M. Ochi, and K. Kuroki, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 106002 (2024).
- [36] Y. Cao and Y.-f. Yang, *Phys. Rev. B* **109**, L081105 (2024).
- [37] R. Jiang, J. Hou, Z. Fan, Z.-J. Lang, and W. Ku, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 126503 (2024).
- [38] X. Chen, P. Jiang, J. Li, Z. Zhong, and Y. Lu, *Phys. Rev. B* **111**, 014515 (2025).
- [39] J. Yang, H. Sun, X. Hu, Y. Xie, T. Miao, H. Luo, H. Chen, B. Liang, W. Zhu, G. Qu, C.-Q. Chen, M. Huo, Y. Huang, S. Zhang, F. Zhang, F. Yang, Z. Wang, Q. Peng, H. Mao, G. Liu, Z. Xu, T. Qian, D.-X. Yao, M. Wang, L. Zhao, and X. J. Zhou, *Nat Commun* **15**, 4373 (2024).
- [40] Y. Zhang, D. Su, Y. Huang, Z. Shan, H. Sun, M. Huo, K. Ye, J. Zhang, Z. Yang, Y. Xu, Y. Su, R. Li, M. Smidman, M. Wang, L. Jiao, and H. Yuan, *Nat. Phys.* **20**, 1269 – 1273 (2024).
- [41] J. Hou, P.-T. Yang, Z.-Y. Liu, J.-Y. Li, P.-F. Shan, L. Ma, G. Wang, N.-N. Wang, H.-Z. Guo, J.-P. Sun, Y. Uwatoko, M. Wang, G.-M. Zhang, B.-S. Wang, and J.-G. Cheng, *Chin. Phys. Lett.* **40**, 117302 (2023).
- [42] S. Fan, Z. Luo, M. Huo, Z. Wang, H. Li, H. Yang, M. Wang, D.-X. Yao, and H.-H. Wen, *Phys. Rev. B* **110**, 134520 (2024).
- [43] G. Wang, N. Wang, X. L. Shen, J. Hou, L. Ma, L. F. Shi, Z. A. Ren, Y. D. Gu, H. M. Ma, P. T. Yang, Z. Y. Liu, H. Z. Guo, J. P. Sun, G. M. Zhang, S. Calder, J.-Q. Yan, B. S. Wang, Y. Uwatoko, and J.-G. Cheng, *Phys. Rev. X* **14**, 011040 (2024).
- [44] Z. Liu, M. Huo, J. Li, Q. Li, Y. Liu, Y. Dai, X. Zhou, J. Hao, Y. Lu, M. Wang, and H.-H. Wen, *Nat Commun* **15**, 7570 (2024).
- [45] Q. Li, Y.-J. Zhang, Z.-N. Xiang, Y. Zhang, X. Zhu, and H.-H. Wen, *Chin. Phys. Lett.* **41**, 017401 (2024).
- [46] J. Li, D. Peng, P. Ma, H. Zhang, Z. Xing, X. Huang, C. Huang, M. Huo, D. Hu, Z. Dong, X. Chen, T. Xie, H. Dong, H. Sun, Q. Zeng, H.-k. Mao, and M. Wang, *National Science Review* [10.1093/nsr/nwaf220](https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf220) (2025).
- [47] Z. Pan, C. Lu, F. Yang, and C. Wu, *Chinese Physics Letters* **41**, 087401 (2024).
- [48] Y. Zhang, L.-F. Lin, A. Moreo, T. A. Maier, and E. Dagotto, *Phys. Rev. B* **108**, 165141 (2023).
- [49] F. Li, Z. Xing, D. Peng, J. Dou, N. Guo, L. Ma, Y. Zhang, L. Wang, J. Luo, J. Yang, J. Zhang, T. Chang, Y.-S. Chen, W. Cai, J. Cheng, Y. Wang, Z. Zeng, Q. Zheng, R. Zhou, Q. Zeng, X. Tao, and J. Zhang, (2025), [arXiv:2501.14584](https://arxiv.org/abs/2501.14584).
- [50] M. Osada, C. Terakura, A. Kikkawa, M. Nakajima, H.-Y. Chen, Y. Nomura, Y. Tokura, and A. Tsukazaki, *Commun. Phys.* **8**, [10.1038/s42005-025-02154-6](https://doi.org/10.1038/s42005-025-02154-6) (2025).
- [51] B. Y. Wang, Y. Zhong, S. Abadi, Y. Liu, Y. Yu, X. Zhang, Y.-M. Wu, R. Wang, J. Li, Y. Tarn, E. K. Ko, V. Thampy, M. Hashimoto, D. Lu, Y. S. Lee, T. P. Devereaux, C. Jia, H. Y. Hwang, and Z.-X. Shen, (2025), [arXiv:2504.16372](https://arxiv.org/abs/2504.16372).
- [52] L. Bhatt, A. Y. Jiang, E. K. Ko, N. Schnitzer, G. A. Pan, D. F. Segedin, Y. Liu, Y. Yu, Y.-F. Zhao, E. A. Morales, C. M. Brooks, A. S. Botana, H. Y. Hwang, J. A. Mundy, D. A. Muller, and B. H. Goodge, (2025), [arXiv:2501.08204](https://arxiv.org/abs/2501.08204).
- [53] Y. Liu, E. K. Ko, Y. Tarn, L. Bhatt, B. H. Goodge, D. A. Muller, S. Raghu, Y. Yu, and H. Y. Hwang, (2025), [arXiv:2501.08022](https://arxiv.org/abs/2501.08022).
- [54] E. K. Ko, Y. Yu, Y. Liu, L. Bhatt, J. Li, V. Thampy, C.-T. Kuo, B. Y. Wang, Y. Lee, K. Lee, J.-S. Lee, B. H. Goodge, D. A. Muller, and H. Y. Hwang, *Nature* **638**, 935 (2025).
- [55] G. Zhou, W. Lv, H. Wang, Z. Nie, Y. Chen, Y. Li, H. Huang, W. Chen, Y. Sun, Q.-K. Xue, and Z. Chen, *Nature* **640**, 641 (2025).
- [56] P. Li, G. Zhou, W. Lv, Y. Li, C. Yue, H. Huang, L. Xu, J. Shen, Y. Miao, W. Song, Z. Nie, Y. Chen, H. Wang, W. Chen, Y. Huang, Z.-H. Chen, T. Qian, J. Lin, J. He, Y.-J. Sun, Z. Chen, and Q.-K. Xue, (2025), [arXiv:2501.09255](https://arxiv.org/abs/2501.09255).
- [57] X. Hu, W. Qiu, C.-Q. Chen, Z. Luo, and D.-X. Yao,

- (2025), [arXiv:2503.17223](#).
- [58] C. Yue, J.-J. Miao, H. Huang, Y. Hua, P. Li, Y. Li, G. Zhou, W. Lv, Q. Yang, H. Sun, Y.-J. Sun, J. Lin, Q.-K. Xue, Z. Chen, and W.-Q. Chen, (2025), [arXiv:2501.06875](#).
- [59] H. Shi, Z. Huo, G. Li, H. Ma, T. Cui, D.-X. Yao, and D. Duan, (2025), [arXiv:2502.04255](#).
- [60] J. Shen, Y. Miao, Z. Ou, G. Zhou, Y. Chen, R. Luan, H. Sun, Z. Feng, X. Yong, P. Li, Y. Li, L. Xu, W. Lv, Z. Nie, H. Wang, H. Huang, Y.-J. Sun, Q.-K. Xue, Z. Chen, and J. He, (2025), [arXiv:2502.17831](#).
- [61] S. Fan, M. Ou, M. Scholten, Q. Li, Z. Shang, Y. Wang, J. Xu, H. Yang, I. M. Eremin, and H.-H. Wen, (2025), [arXiv:2506.01788](#).
- [62] F. C. Zhang, C. Gros, T. M. Rice, and H. Shiba, *Superconductor Science and Technology* **1**, 36 (1988).
- [63] M. C. Gutzwiller, *Physical Review* **137**, A1726 (1965).
- [64] W. Qiu, Z. Luo, X. Hu, and D.-X. Yao, Supplementary material.
- [65] Q. Qin and Y.-f. Yang, *Phys. Rev. B* **108**, L140504 (2023).
- [66] K. Chen, X. Liu, J. Jiao, M. Zou, C. Jiang, X. Li, Y. Luo, Q. Wu, N. Zhang, Y. Guo, and L. Shu, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 256503 (2024).
- [67] Y. Meng, Y. Yang, H. Sun, S. Zhang, J. Luo, L. Chen, X. Ma, M. Wang, F. Hong, X. Wang, and X. Yu, *Nat Commun* **15**, 10408 (2024).
- [68] M. Zhang, C.-Q. Chen, D.-X. Yao, and F. Yang, (2025), [arXiv:2505.15906](#).
- [69] R. Khasanov, T. J. Hicken, D. J. Gawryluk, V. Sazgari, I. Plokhikh, L. P. Sorel, M. Bartkowiak, S. Bötzel, F. Lechermann, I. M. Eremin, H. Luetkens, and Z. Guguchia, *Nat. Phys.* **21**, 430 (2025).
- [70] Y.-Y. Zheng and W. Wú, *Phys. Rev. B* **111**, 035108 (2025).
- [71] J. Hu and H. Ding, *Scientific Reports* **2**, 10.1038/srep00381 (2012).