

超导性和电子关联在 Kagome 金属 LuOs_3B 中₂

Yusen Xiao^{1,2}, Qingchen Duan², Tao jia¹, Yajing Cui¹, Shaohua Liu³, Zhiwei

Wen⁴, Liangwen Ji⁵, Ruidan Zhong^{2,3*}, Yongliang Chen^{1†}, Yong Zhao^{1,6,7‡}

¹ 磁 *levitation* 技术和磁悬浮列车关键实验室 (教育部), 西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031, 中国

² 李政道研究所, 上海交通大学, 上海 201210, 中国

³ 上海交通大学物理与天文学院, 上海, 200240, 中国

⁴ 智能制造学院, 四川文理学院, 达州 635000, 中国

⁵ 浙江大学物理系, 杭州 310058, 中国

⁶ 福建省高场超导材料与工程协同创新中心, 福州 350117, 中国

⁷ 福建师范大学物理与能源学院, 福州, 福建 350117, 中国

(10Dated: 2025 年 4 月 25 日)

我们报告了对 LuOs_3B_2 物理性质的全面调查, 该物质以理想的基于钨的三角晶格为特征。电阻率和磁化测量证实了 II 型体超导性的出现, 其临界温度为 $T_c \approx 4.63\text{K}$ 。比热跃变以及计算出的电子-声子耦合参数支持适度耦合的超导态。增强的威尔逊比率支持电子关联效应。从头算计算揭示了三角晶格能带结构的标志性特征, 包括狄拉克点、冯·霍夫奇点和准平坦带, 这些主要来源于钨 d 轨道。自旋-轨道耦合的引入在狄拉克点打开了一个间隙, 显著改变了电子性质。此外, 还讨论了同构化合物的超导性和电子特性。这项工作对 LuOs_3B_2 的超导态和正常态进行了深入探索, 加深了对三角晶格超导体的理解。

PACS numbers: XXX

I. 介绍

作为由二维共角三角形构成的独特晶格结构, kagome 晶格因其在量子材料中稳定奇异电子态的能力而成为凝聚态物理学的前沿平台¹⁻³。该晶格的独特对称性导致了 Dirac 点、van Hove 奇异性 (vHSs) 和平带的出现, 这些是驱动拓扑和关联电子行为的关键因素⁴⁻⁶。最近的实验进展主要集中在基于过渡金属的 Kagome 系统上, 如 Fe_3Sn_2 ⁷⁻⁹、 FeSn ^{10,11}、 FeGe ¹²⁻¹⁴、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ^{15,16}, 以及 RT_6X_6 (R = 稀土元素, T = V, Cr, Mn, Nb, X = Sn, Ge)¹⁷⁻²¹, 揭示了丰富的拓扑性质。然而, 交织超导性 (SC)、电子关联和带拓扑在 Kagome 金属中的探索仍受限于缺乏合适的研究平台。

在发现超导和电荷密度波 (CDW) 状态的 AV_3Sb_5 (A = K, Rb, Cs)²²⁻²⁴ 化合物中取得了重大突破。这些化合物表现出额外的有趣现象, 包括配对密度波和异常霍尔效应^{25,26}。值得注意的是, 最近合成的 CsCr_3Sb_5

表现出中等的电子关联, 并在约 4 GPa²⁷⁻²⁹ 的压力下诱导非常规超导性。另一类 Kagome 超导体家族, RT_3X_2 (R = La, Y, Lu, Th; T = Ru, Rh, Ir, Os; X = Si, B, Ga), 也引起了相当大的兴趣³⁰⁻³⁷。其中, LaRu_3Si_2 ($T_c \approx 7.8\text{K}$) 和 YRu_3Si_2 ($T_c \approx 3.0\text{K}$) 因其源自 Kagome 结构的典型能带结构和强烈的电子关联而得到了广泛研究, 这种关联很可能源于 Kagome 平带^{33,34}。然而, RRu_3Si_2 化合物表现出扭曲的三角形格子, LuOs_3B_2 在该系列中脱颖而出, 成为 kagome 几何结构的理想代表³⁸。这种结构差异将 LuOs_3B_2 定位为一个潜在的纯净平台, 用于研究带结构中的 kagome 相关特性及其与超导性的相互作用。

在这项工作中, 我们报告了对 LuOs_3B_2 的超导性和正常态特性的系统研究。通过电阻率、磁化率和比热测量明确建立了临界温度为 $T_c = 4.63\text{K}$ 的体超导性。实验结果支持一种与 BCS 理论预测一致的中等耦合超导状态。有趣的是, 增强的威尔逊比率表明在正常态下存在电子关联效应。从头算计算揭示了 LuOs_3B_2 的电子结构中的进一步复杂性。所计算的能带结构在费米面附近拥有多个非平凡拓扑交叉, 自旋轨道耦合 (SOC) 引入后, 狄拉克点出现了显著的间隙。这些能隙打开机制, 结合沿 Γ -M-K 高对称线的受对称性保护

*E-mail: rzhong@sjtu.edu.cn

†E-mail: llchen@home.swjtu.edu.cn

‡E-mail: zhaoyong@fjnu.edu.cn

的带简并，暗示了在 LuOs_3B_2 中可能存在非平凡拓扑状态和关联电子物理现象的同时存在。

II. 实验的

LuOs_3B_2 的多晶样品由高纯度的 Lu (99.5%)、Os (99.5%, Alfa) 和 B (99.99%, Alfa) 粉末合成。这些粉末按照化学计量比使用玉髓研钵混合，并在手套箱内的氩气环境中冷压成一个圆饼，以确保环境受控。然后将该圆饼在水冷铜坩埚上进行电弧熔炼，经过四次熔化循环并中间翻转以达到成分均匀，最终得到具有金属光泽的样品。

X 射线衍射 (XRD) 分析使用 Bruker D8 AdvanceEco 衍射仪进行，数据收集范围为 2θ 度的 10° – 90° 。XRD 图谱通过在 GSASII 软件中实现的 Rietveld 方法进行了精修。电阻率和磁阻测量使用配备标准四探针配置的 Quantum Design 物理特性测量系统 (PPMS) 进行。直流磁化测量利用与 PPMS 集成的振动样品磁强计 (VSM) 降至 1.8 K 时进行。比热容测量也通过在 PPMS 中采用弛豫法降至 1.8 K 时进行。

基于密度泛函理论 (DFT)³⁹，使用维也纳从头算模拟包 (VASP) 进行了第一性原理计算。采用广义梯度近似 (GGA) 和 Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) 交换-相关泛函⁴⁰。使用投影增广波 (PAW) 赝势方法来提高计算精度。结构优化采用了 500 eV 的平面波截断能量，并以 $10 \times 10 \times 16$ Monkhorst-Pack k 点网格在 Γ 点为中心对布里渊区进行采样。使用实验晶格参数作为初始输入，每一步总能收敛到 1×10^{-8} eV 以内。对于态密度 (DOS) 计算，使用了更密集的 $20 \times 20 \times 32$ Monkhorst-Pack k 点网格以确保电子结构特征的高精度。

III. 结果与讨论

图 1(a) 展示了 LuOs_3B_2 的 XRD 图案，以及表明 CeCo_3B_2 型结构的 Rietveld 精修轮廓，该结构属于空间群 $P6/mmm$ 。精修后的结构参数总结在表 I 中。晶格参数为 $a = 5.449(3)$ Å 和 $c = 3.058(8)$ Å，与先前的报告³⁸相符。图 1(b) 和 (c) 显示了 LuOs_3B_2 的晶体结构，该结构由交替排列的 Lu – B 和 Os 层沿 c 轴堆叠而成。有趣的是，Os 离子沿晶轴 c 形成了完美的 Kagome 层，这与等结构化合物 LaRu_3Si_2 中观察

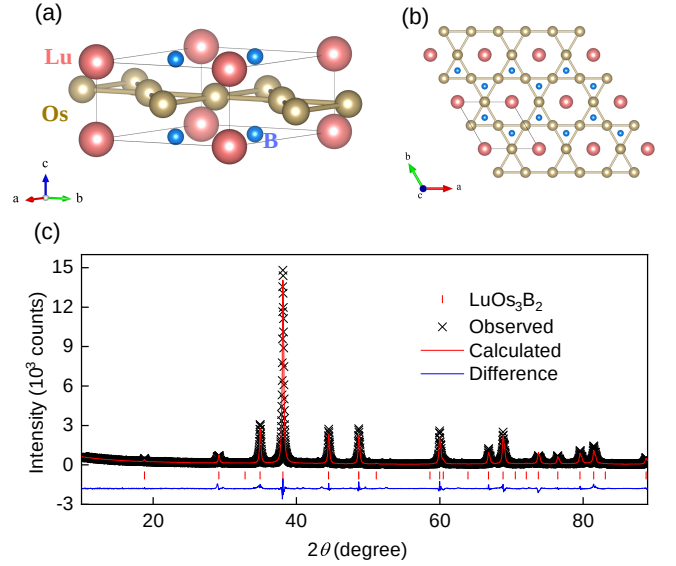


图 1: (彩色在线) (a,b) 镧钪₃硼₂的晶体结构，侧面视图和顶面视图。(c) 镧钪₃硼₂多晶样品的里特韦耳精修轮廓。

表 I: 镧钪₃硼₂在室温下的晶体学数据。

Compounds		LuOs_3B_2				
space group		$P6/mmm$				
a (Å)		5.449(3)				
c (Å)		3.058(8)				
V (Å ³)		78.67				
Os-Os distance (Å)		2.7246				
R_{wp} (%)		9.31				
χ^2		1.99				
Z		1				
atom	site	x	y	z	Occ.	
Lu	1a	0	0	0	1	
Os	3g	0.5	0	0.5	1	
B	2c	0.33333	0.66667	0	1	

到的扭曲的 Kagome 层形成对比。这些 Kagome 层内的 Os-Os 距离为 2.7246 Å，与 AV_3Sb_5 系列中的 V-V 键相当⁴¹。注意短的 c -轴表明了蜂巢平面之间的层间耦合可能增强。

图 2 显示了 LuOs_3B_2 样品的电阻率数据。在 300 K 时，零场电阻率为 $126 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ，与 LaRh_3B_2 ³⁷ 的值相

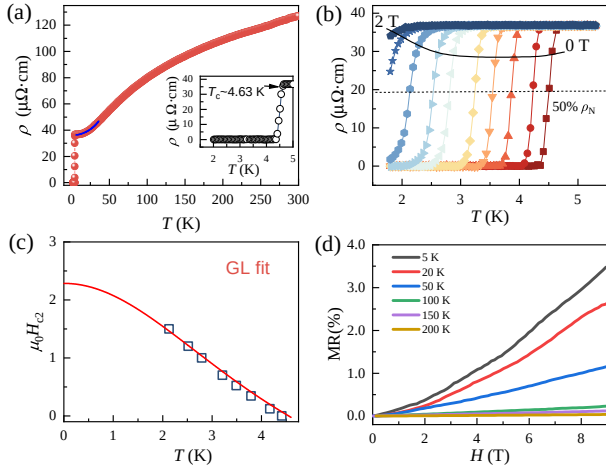


图 2: (彩色在线) (a) LuOs_3B_2 的温度依赖电阻率, 插图说明了确定电阻率下降开始的判据。 (b) 在 0 到 2 T 的外加磁场下, 从 1.8 K 到 5 K 之间的电阻率转变。在正常态电阻率 50% 处的水平虚线定义了磁场下的超导转变温度。 (c) 上临界场 $\mu_0 H_{c2}(T)$ 作为温度的函数, 使用 Ginzburg-Landau 理论进行拟合 (红线)。 (d) 在选定温度下测量的磁阻。

当。冷却后, 电阻率表现出金属行为且无异常。剩余电阻比 (RRR), 定义为 $\rho(300 \text{ K})/\rho(5 \text{ K})$, 约为 3.5, 表明晶界对电阻率变化有显著贡献。在高温下, 电阻率曲线 $\rho(T)$ 表现出明显的亚线性行为。这一观察结果与最近提出的半经典理论一致, 在该理论中, 这种行为被归因于狄拉克锥和费米面附近范霍夫奇点之间的相互作用^{42,43}。值得注意的是, 类似的现象在其他 Kagome 金属^{33,34,43} 中也有报道。在低温范围 ($5 \text{ K} < T < 40 \text{ K}$), 曲线 $\rho(T)$ 可以用方程 $\rho(T) = \rho_0 + AT^2 + BT^5$ 很好地描述, 其中 ρ_0 代表剩余电阻率, 而项 AT^2 和 BT^5 分别来自电子-电子散射和电子-声子散射。拟合得到 $\rho_0 = 36.1 \mu \text{ cm}$, $A = 6.6 \times 10^{-3} \mu \text{ cm K}^{-2}$ 和 $B = 2.8 \times 10^{-8} \mu \text{ cm K}^{-5}$ 。由于在 50 K 以下 AT^2 主导 BT^5 , 电子-电子散射是低温下电阻率的主要机制。

超导转变在 4.63 K 处被观测到, 表现为电阻率急剧下降, 这与之前的报道一致。图 2(b) 描绘了静态磁场下 (从 0 到 2 T) 电阻率随温度的变化关系。这里, $T_c(H)$ 定义为电阻率降至正常态值 50% 的温度。使用 Ginzburg-Landau (GL) 公式 $\mu_0 H_{c2}(T) = \mu_0 H_{c2}(0) \frac{T_{c,0}^2 - T^2}{T_{c,0}^2 + T^2}$, 其中 $\mu_0 H_{c2}(0)$ 是零温度下的上临界场, $T_{c,0}$ 是零磁场条件下的超导转变温度, 拟合得到 $\mu_0 H_{c2}(0) = 2.3 \text{ T}$ 。该值显著低于 Pauli 极限 $\mu_0 H_c^P = 1.84 T_c = 6.95 \text{ T}$, 表明在 LuOs_3B_2 中轨道配对破坏是

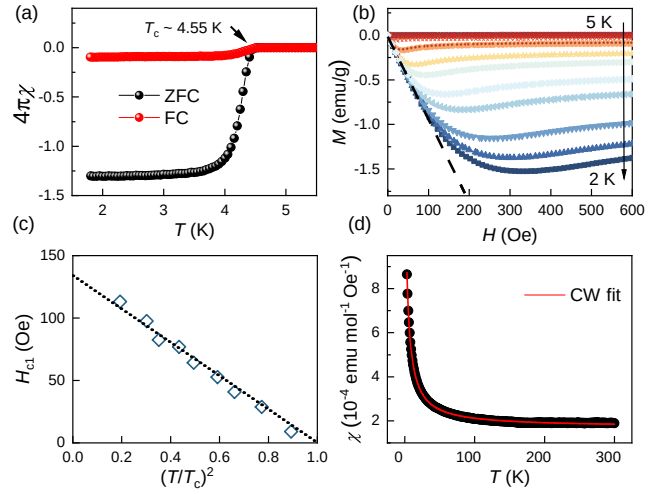


图 3: (彩色在线) (a) 钽铌 LuOs_3B_2 在零场冷却 (ZFC, 黑色) 和场冷 (FC, 红色) 模式下, 在 10 奥斯特磁场中的低温磁化率。 (b) 温度低于 T_c 时的磁场依赖初始磁化强度。 (c) 下临界磁场 $H_{c1}(T)$ 的温度依赖性。 (d) 在 1 特斯拉下的磁化率 $\chi(T)$ 随温度的变化, 红线表示 Curie-Weiss 拟合。

主要机制。相干长度可以使用关系式 $\mu_0 H_{c2}(0) = \frac{\Phi_0}{2\pi\xi^2}$ 计算为 $\xi = 120 \text{ Å}$, 其中 Φ_0 是磁通量子。此外, 在选定温度下高达 9 T 的磁阻测量显示了一个小的、未饱和的正 MR, 如图 2(d) 所示。

图 3(a) 展示了磁化率 $\chi(T)$ 在温度 $H = 10 \text{ Oe}$ 下的零场冷却 (ZFC) 和场冷 (FC) 测量结果的温度依赖性。低于 4.55 K 时, 明显的顺磁信号证实了电阻测量中观察到的超导转变。超导体积分分数在零场冷却 (ZFC) 模式下在 1.8 K 达到 130%, 这归因于去磁效应, 表明体超导性。与 ZFC 曲线相比, FC 曲线表现出较弱的顺磁信号, 这是由于通量钉扎效应, 表明 LuOs_3B_2 是一种第二类超导体。

图 3(b) 显示了不同温度下的零场冷却磁化强度的磁场依赖性。下临界场 H_{c1} 是从磁化率 M 偏离线性的点确定的。 H_{c1} 的温度依赖性使用 Ginzburg-Landau (GL) 公式 $H_{c1}(T) = H_{c1}(0) \left[1 - (T/T_c)^2 \right]$ 拟合, 其中 $H_{c1}(0)$, 即在 0 K 处的下临界场, 约为 13.4 mT, 如图 3(c) 所示。从关系式 $\mu_0 H_{c1}(0) = \frac{\ln(\lambda/\xi)\Phi_0}{4\pi\lambda^2}$ 和 $\kappa = \lambda/\xi$, 渗透深度和 Ginzburg-Landau 参数分别导出为 $\lambda = 1830 \text{ Å}$ 和 $\kappa = 15.2$ 。0 K 时的热力学临界场 $\mu_0 H_c(0)$ 使用关系式 $H_{c1}(0) \cdot H_{c2}(0) = H_c^2(0) \ln \kappa$ 进行估计。对于 LuOs 的 B_2 , 这给出了 $\mu_0 H_c(0) = 106 \text{ mT}$ 。

在 1 T 的磁场下, 温度高于 200 K 时磁化率几

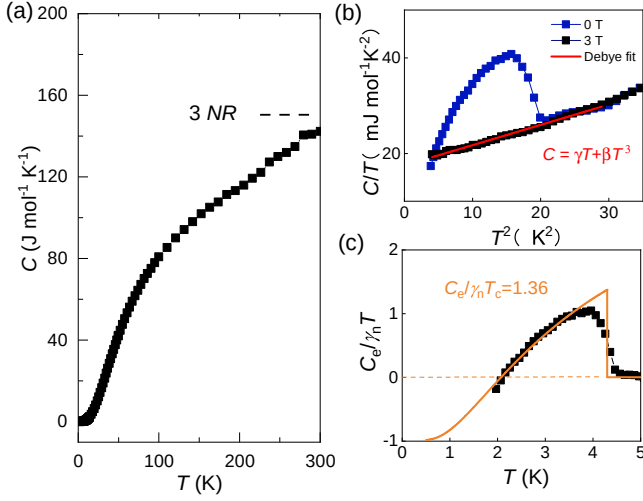


图 4: (彩色在线)(a) 钽铌 $3B_2$ 的零场比热随温度的变化, 从 300 K 到 1.8 K. (b) 0 T 和 3 T 下的低温比热数据, 以 C_p/T 对 T 绘制, 实线代表使用德拜模型拟合 9 T 的数据. (c) 减去正常态贡献后的归一化电子比热 $C_e/\gamma_n T_c$. 红色实线表示对传统 BCS 模型的拟合。

乎保持恒定, 表明处于泡利顺磁态。通过将数据拟合到居里—外斯定律 $\chi(T) = \chi_0 + \frac{C}{T - \theta_W}$, 我们得到 $\chi_0 = 1.71 \times 10^{-4}$ 麦磁矩摩尔 $^{-1}$, $\theta_W = -2.21$ K 和 $C = 0.004007$ 麦磁矩开尔文摩尔 $^{-1}$ 。利用关系式 $C = \frac{\mu_0 \mu_{\text{eff}}^2}{3k_B}$, 居里—外斯常数 C 对应一个小的有效磁矩 $\mu_{\text{eff}} = 0.17 \mu_B/\text{f.u.}$ 。温度无关的磁化率可以表示为 $\chi_0 = \chi_p + \chi_{\text{core}} + \chi_{\text{vv}} + \chi_L$, 其中 χ_p 表示泡利顺磁性, 其余各项分别表示原子核的抗磁性、范·弗莱克顺磁效应和朗道抗磁性 ($\chi_L \approx -\frac{1}{3}\chi_p$)。使用帕斯卡的技术⁴⁴, χ_{core} 计算为 $1.39 \times 10^{-4} \text{emu mol}^{-1}$ 。由于 van Vleck 铁磁性在具有偶数个未配对 $4f$ 电子的稀土离子中通常可以忽略, χ_p 被估计为 $4.63 \times 10^{-4} \text{emu mol}^{-1}$ 。

比热容随温度的变化关系如图 4(a) 所示。在高温下, 数据与杜隆-珀蒂定律的预测值吻合得相当好, 该定律预测的值为 $3NR \approx 150 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$, 其中 N 是每个化学式单位中的原子数, R 是气体常数。如图 4(b) 所示, 在低温下观察到比热容有一个明显的跃升, 表明存在体相超导现象。施加 3 特斯拉的外磁场会抑制超导转变。通常, 低温下的比热容可以表示为 $C = \gamma T + \beta T^3$, 其中第一项代表电子贡献, 第二项则对应于晶格振动。通过拟合低于 5 K (在 $B = 3$ T) 的比热数据, 我们得到参数 $\gamma = 17.8 \text{ mJ mol}^{-1} \text{K}^{-2}$ 和 $\beta = 0.371 \text{ mJ mol}^{-1} \text{K}^{-4}$ 。德拜温度 Θ_D 被估计为

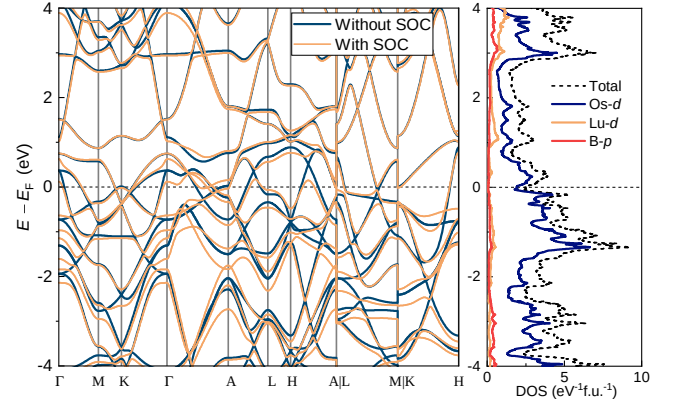


图 5: (彩色在线) 钽铌 $3B_2$ 的从头算电子结构计算。

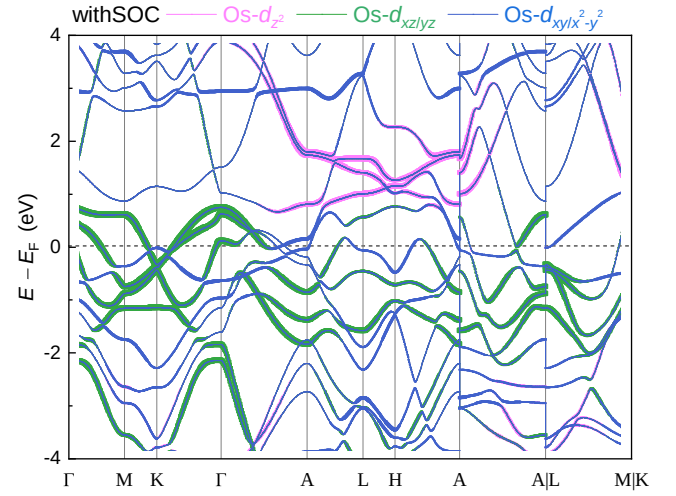


图 6: (彩色在线) 钽的 d 轨道分解的能带结构。钽铌 3 铌 2 。

316.2 K, 使用公式 $\Theta_D = \left[\frac{12\pi^4 NR}{5\beta} \right]^{1/3}$ 。

扣除声子贡献后, 归一化的电子比热 $C_e/\gamma_n T_c$ 如图 4(c) 所示。在 T_c 处的电子比热跃变给出 $C_e/\gamma_n T_c \sim 1.36$, 进一步证实了 LuOs_3B_2 中的体超导性。此值接近理论上的 BCS 弱耦合极限 1.43。此外, 无量纲的电子-声子耦合常数 λ_{ep} 可以使用逆 McMillan 方程⁴⁵ 进行估算:

$$\lambda_{ep} = \frac{1.04 + \mu^* \ln(\Theta_D/1.45T_c)}{(1 - 0.62\mu^*) \ln(\Theta_D/1.45T_c) - 1.04},$$

其中 $\mu^* = 0.13$ 是多价过渡金属的库仑伪势。评估此方程给出 $\lambda_{ep} = 0.61$, 表明 LuOs_3B_2 表现出中等耦合超导性。

电子结构作为阐明 kagome 材料内在性质的基本框架。图 5 展示了 LuOs_3B_2 的第一性原理计算结果, 包括考虑和不考虑自旋轨道耦合效应的情况。分析显示

有多个能带穿过费米能级，证实了该材料的金属性质。低能量的能带结构主要来源于 $\text{Os}d$ 轨道状态。与最小 kagome 紧束缚模型预测一致， LuOs_3B_2 展现出典型的 kagome 能带特征，包括在布里渊区 (BZ) 角 K 点的对称保护 Dirac 交叉、接近 BZ 边界 M 点的 van Hove 奇异性以及在 Γ -M-K 平面内的准平带。图 6 显示了 $\text{Os}d$ -轨道分解的能带结构，表明 Kagome 特征能带主要源自 $\text{Os}-d_{xz/yz}$ 轨道。这种轨道依赖性与在 LaRu_3Si_2 中观察到的情况显著不同，在后者中相应的能带主要由 $\text{Ru}-d_{z^2}$ 轨道³⁰ 主导。这种区别表明两个系统在电子结构和轨道贡献上存在显著差异，这可能源于 $5d$ (锇) 和 $4d$ (钌) 轨道在其各自带结构形成中的不同作用。此外，自旋轨道耦合的引入导致了显著的能带分裂，在狄拉克节点处形成了明显不同的能量间隙。另外，这些狄拉克点接近费米面表明可能存在拓扑表面态，尽管它们的实验观测可能会因等能量处重叠的体态而变得复杂。费米面上的状态密度 $N(E_F)$ 计算约为 2.5 个状态/电子伏特/原胞。利用这个值，能带结构的索末菲系数估计为 $\gamma_{\text{band}} = \frac{\pi^2 k_B^2}{3} N(E_F) = 5.9$ 毫焦/摩尔/开尔文²。实验上的 γ 值超出带计算一个 $\gamma/\gamma_{\text{band}} \approx 3$ 倍数，这可能表明由于关联效应的电子质量重正化。有趣的是，在 Kagome 超导体 CsCr_3Sb_5 ²⁷ 中，这种重整化表现得尤为明显。

为了进一步量化电子关联效应，威尔逊比⁴⁶， R_W ，使用以下表达式进行评估：

$$R_W = \frac{4\pi^2 k_B^2}{3(g\mu_B)^2} \frac{\chi_p}{\gamma},$$

其中， χ_p 是泡利磁化率， γ 是比热系数， $g \approx 2$ 是朗德因子，而 μ_B 是玻尔磁子。威尔逊比是一个无量纲量，在非相互作用电子气体中约为 1，而在相互作用费米液体中则在 1 到 2 的范围内。当 $R_W > 2$ 时，预期会出现强烈的电子关联效应，这通常在像 Mott 绝缘体^{47,48} 这样的系统中被观察到。对于 LuOs_3B_2 ，获得的 R_W 值为 1.89，表明存在适度的电子关联。请注意，在等结构化合物 RRu_3Si_2 中也观察到了类似的 Wilson 比率。^{34,35} LuOs_3B_2 的所有相关物理参数总结在表 II 中。

现在让我们讨论 132 族化合物的超导性和电子结构。初步研究表明这些化合物表现出传统的声子介导的 BCS 超导性³³⁻³⁶，但最近的研究发现 $\text{La}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)_3\text{Si}_2$ 中的电荷有序，暗示可能存在非常规超导机制³¹。此外，在这些系统中增强的电子关联

表 II: LuOs_3B_2 在超导态和正常态的物理参数。

Parameter	Value	Units
T_c	4.63	K
$\mu_0 H_{c1}(0)$	13.4	mT
$\mu_0 H_{c2}(0)$	2.3	T
$\mu_0 H_c(0)$	106	mT
ξ_{GL}	120	Å
λ_{GL}	1830	Å
κ_{GL}	15.2	
γ	17.8	mJ·mol ⁻¹ ·K ⁻²
Θ_D	316.2	K
$\Delta C_{\text{ele}}/\gamma T_c$	1.36	
$\lambda_{\text{e-ph}}$	0.61	
R_W	1.89	

是一个普遍特征，通常归因于基于 Ru 化合物在费米能级附近的平坦带^{30,34,35}。相比之下，对于 LuOs_3B_2 ，平坦带远离开尔文能级，观察到的电子关联很可能是由范霍夫奇异性及强自旋轨道耦合驱动的。这些特性源自完美的理想 Kagome 格子和 $\text{Os}-5d$ 轨道的扩展性质。值得注意的是，Dirac 点处由 SOC 引发的能隙打开进一步增强了 LuOs_3B_2 承载拓扑保护超导性的潜力。为了全面探索这一可能性，生长高质量单晶是推进我们理解的关键。未来的实验工作结合 μSR 、STM 和 ARPES 将对于阐明此系统中电子关联、拓扑态和超导性之间的相互作用至关重要。

IV. 结论

总之，我们对 Kagome 金属 LuOs_3B_2 的综合实验和理论研究表明了超导性、电子关联以及拓扑带特征之间的多方面相互作用。电阻率、磁化率和比热数据的详细分析揭示了一个在低于 $T_c = 4.63\text{K}$ 时出现的体 II 型超导相，表现出中等强度的电子-声子耦合 ($\lambda_{\text{ep}} = 0.61$) 以及一个上临界场 $\mu_0 H_{c2}(0) = 2.3\text{T}$ 。在正常状态下，磁化率遵循 Curie-Weiss 行为，而电阻力则展示了低温下的费米液体特性。另一方面，增强的 Wilson 比表明系统中存在中等程度的电子关联效应。第一性原理计算揭示了由 $\text{Os}d$ 轨道主导的状态在接近 E_F 时所形成的电子结构，并且这种状态由于 Kagome 格子几何而具有非平凡的拓扑特征。这项工作不仅推进了对 132 型 Kagome 超导体的基本理解，还将其定

位为一种有前景的材料类别，用于研究相关拓扑系统中量子现象之间的相互作用。

致谢

这项工作得到了国家自然科学基金（资助号

11104224）、四川省科技发展计划项目（编号2021ZYD0027）和四川省自然科学基金（编号2022NSFSC0340）的支持。我们衷心感谢教育部磁悬浮技术与磁浮车辆重点实验室基金的支持。

-
- ¹ S. Sachdev, Kagomé- and triangular-lattice Heisenberg antiferromagnets: Ordering from quantum fluctuations and quantum-disordered ground states with unconfined bosonic spinons, *Phys. Rev. B* **45**, 12377 (1992).
 - ² H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, A. Sakai, A. Kobayashi, T. Nakano, K. Yakushiji, R. Arita, S. Miwa *et al.*, Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state, *Nature* **580**, 608–613 (2020).
 - ³ C. Broholm, R. J. Cava, S. A. Kivelson, D. G. Nocera, M. R. Norman, T. Senthil, Quantum spin liquids, *Science* **367**, eaay0668 (2020).
 - ⁴ Z. Li, J. Zhuang, L. Wang, H. Feng, Q. Gao, X. Xu, W. Hao, X. Wang, C. Zhang, K. Wu *et al.*, Realization of flat band with possible nontrivial topology in electronic Kagome lattice, *Sci. Adv.* **4**, eaau4511 (2018).
 - ⁵ M. Kang, L. Ye, S. Fang, J.-S. You, A. Levitan, M. Han, J. I. Facio, C. Jozwiak, A. Bostwick, E. Rotenberg *et al.*, Dirac fermions and flat bands in the ideal kagome metal FeSn, *Nat. Mater.* **19**, 163–169 (2020).
 - ⁶ H. D. Scammell, J. Ingham, T. Li, O. P. Sushkov, Chiral excitonic order from twofold van Hove singularities in kagome metals, *Nat. Commun.* **14**, 605 (2023).
 - ⁷ L. Ye, M. K. Chan, R. D. McDonald, D. Graf, M. Kang, J. Liu, T. Suzuki, R. Comin, L. Fu, J. G. Checkelsky, de Haas-van Alphen effect of correlated Dirac states in kagome metal Fe₃Sn₂, *Nat. Commun.* **10**, 4870 (2019).
 - ⁸ Z. Lin, J.-H. Choi, Q. Zhang, W. Qin, S. Yi, P. Wang, L. Li, Y. Wang, H. Zhang, Z. Sun *et al.*, Flatbands and emergent ferromagnetic ordering in Fe₃Sn₂ kagome lattices, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 096401 (2018).
 - ⁹ L. Wang, J. Zhu, H. Chen, H. Wang, J. Liu, Y.-X. Huang, B. Jiang, J. Zhao, H. Shi, G. Tian *et al.*, Orbital magnetononlinear anomalous Hall effect in kagome magnet Fe₃Sn₂, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 106601 (2024).
 - ¹⁰ M. Kang, L. Ye, S. Fang, J.-S. You, A. Levitan, M. Han, J. I. Facio, C. Jozwiak, A. Bostwick, E. Rotenberg *et al.*, Dirac fermions and flat bands in the ideal kagome metal FeSn, *Nat. Mater.* **19**, 163–169 (2020).
 - ¹¹ B. C. Sales, J. Yan, W. R. Meier, A. D. Christianson, S. Okamoto, M. A. McGuire, Electronic, magnetic, and thermodynamic properties of the kagome layer compound FeSn, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 114203 (2019).
 - ¹² X. Teng, J. S. Oh, H. Tan, L. Chen, J. Huang, B. Gao, J.-X. Yin, J.-H. Chu, M. Hashimoto, D. Lu *et al.*, Magnetism and charge density wave order in kagome FeGe, *Nat. Mater.* **19**, 814–822 (2023).
 - ¹³ M. Uchida, N. Nagaosa, J. P. He, Y. Kaneko, S. Iguchi, Y. Matsui, Y. Tokura, Topological spin textures in the helimagnet FeGe, *Phys. Rev. B* **77**, 184402 (2008).
 - ¹⁴ M. Wenzel, E. Uykur, A. A. Tsirlin, S. Pal, R. M. Roy, C. Yi, C. Shekhar, C. Felser, A. V. Pronin, M. Dressel, Intriguing low-temperature phase in the antiferromagnetic kagome metal FeGe, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 266505 (2024).
 - ¹⁵ N. Morali, R. Batabyal, P. K. Nag, E. Liu, Q. Xu, Y. Sun, B. Yan, C. Felser, N. Avraham, H. Beidenkopf, Fermi-arc diversity on surface terminations of the magnetic Weyl semimetal Co₃Sn₂S₂, *Science* **365**, 1286–1291 (2019).
 - ¹⁶ M. Tanaka, Y. Fujishiro, M. Mogi, Y. Kaneko, T. Yokosawa, N. Kanazawa, S. Minami, T. Koretsune, R. Arita, S. Tarucha *et al.*, Topological Kagome magnet Co₃Sn₂S₂ thin flakes with high electron mobility and large anomalous Hall effect, *Nano Lett.* **20**, 7476–7481 (2020).
 - ¹⁷ Y. Xiao, Y. Chen, H. Ni, Y. Li, Z. Wen, Y. Cui, Y. Zhang, S. Liu, C. Wang, R. Zhong *et al.*, Preparation, Crystal Structure, and Properties of the Kagome Metal ThV₆Sn₆, *Inorg. Chem.* **63**, 23288–23295 (2024).
 - ¹⁸ Y. Xiao, Q. Duan, Z. Li, S. Guo, H. Tan, R. Zhong, Kagome Metal GdNb₆Sn₆: A 4d Playground for Topological Magnetism and Electron Correlations, *arXiv:2501.00996* (2025).
 - ¹⁹ H. Tan, B. Yan, Abundant lattice instability in kagome metal ScV₆Sn₆, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 266402 (2023).
 - ²⁰ N. J. Ghimire, R. L. Dally, L. Poudel, D. C. Jones, D. Michel, N. T. Magar, M. Bleuel, M. A. McGuire, J. S. Jiang, J. F. Mitchell *et al.*, Competing magnetic phases and fluctuation-driven scalar spin chirality in the kagome metal YMn₆Sn₆, *Sci. Adv.* **6**, eaabe2680 (2020).
 - ²¹ Z. Du, A. Rahman, J. Song, J. Zhao, W. Liu, J. Fan,

- C. Ma, M. Ge, Y. Xiong, L. Pi *et al.*, Field-induced anisotropic magnetic phase transitions and tricritical phenomena in GdCr_6Ge_6 , *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **66**, 297511 (2023).
- ²² S. D. Wilson, B. R. Ortiz, A V_3Sb_5 kagome superconductors, *Nat. Rev. Mater.* **9**, 420–432 (2024).
- ²³ D. Subires, A. Korshunov, A. H. Said, L. Sánchez, B. R. Ortiz, S. D. Wilson, A. Bosak, S. Blanco-Canosa, Order-disorder charge density wave instability in the kagome metal $(\text{Cs}, \text{Rb})\text{V}_3\text{Sb}_5$, *Nat. Commun.* **14**, 1015 (2023).
- ²⁴ H. Li, H. Zhao, B. R. Ortiz, T. Park, M. Ye, L. Balents, Z. Wang, S. D. Wilson, I. Zeljkovic, Rotation symmetry breaking in the normal state of a kagome superconductor KV_3Sb_5 , *Nat. Phys.* **18**, 265–270 (2022).
- ²⁵ H. Chen, H. Yang, B. Hu, Z. Zhao, J. Yuan, Y. Xing, G. Qian, Z. Huang, G. Li, Y. Ye *et al.*, Roton pair density wave in a strong-coupling kagome superconductor, *Nature* **599**, 222–228 (2021).
- ²⁶ G. Zheng, C. Tan, Z. Chen, M. Wang, X. Zhu, S. Albarakati, M. Algarni, J. Partridge, L. Farrar, J. Zhou *et al.*, Electrically controlled superconductor-to-failed insulator transition and giant anomalous Hall effect in kagome metal CsV_3Sb_5 nanoflakes, *Nat. Commun.* **14**, 678 (2023).
- ²⁷ Y. Liu, Z.-Y. Liu, J.-K. Bao, P.-T. Yang, L.-W. Ji, S.-Q. Wu, Q.-X. Shen, J. Luo, J. Yang, J.-Y. Liu *et al.*, Superconductivity under pressure in a chromium-based kagome metal, *Nature* **632**, 1032–1037 (2024).
- ²⁸ C. Xu, S. Wu, G.-X. Zhi, G. Cao, J. Dai, C. Cao, X. Wang, H.-Q. Lin, Frustrated altermagnetism and charge density wave in kagome superconductor CsCr_3Sb_5 , *arXiv:2309.14812* (2023).
- ²⁹ S. Wu, C. Xu, X. Wang, H.-Q. Lin, C. Cao, G.-H. Cao, Flat-Band Enhanced Antiferromagnetic Fluctuations and Unconventional Superconductivity in Pressurized CsCr_3Sb_5 , *arXiv:2404.04701* (2024).
- ³⁰ C. Mielke III, Y. Qin, J.-X. Yin, H. Nakamura, D. Das, K. Guo, R. Khasanov, J. Chang, Z. Wang, S. Jia *et al.*, Nodeless kagome superconductivity in LaRu_3Si_2 , *Phys. Rev. Mater.* **5**, 034803 (2021).
- ³¹ I. Plokhikh, C. Mielke III, H. Nakamura, V. Petricek, Y. Qin, V. Sazgari, J. Küspert, I. Biaó, S. Shin, O. Ivashko *et al.*, Discovery of charge order above room-temperature in the prototypical kagome superconductor $\text{La}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)_3\text{Si}_2$, *Commun. Phys.* **7**, 182 (2024).
- ³² S. Chakraborty, R. Kumar, N. Mohapatra, Effect of tunable spin-orbit coupling on the superconducting properties of LaRu_3Si_2 containing kagome-honeycomb layers, *Phys. Rev. B* **107**, 024503 (2023).
- ³³ S. Li, B. Zeng, X. Wan, J. Tao, F. Han, H. Yang, Z. Wang, H.-H. Wen, Anomalous properties in the normal and superconducting states of LaRu_3Si_2 , *Phys. Rev. B* **84**, 214527 (2011).
- ³⁴ C. Gong, S. Tian, Z. Tu, Q. Yin, Y. Fu, R. Luo, H. Lei, Superconductivity in kagome metal YRu_3Si_2 with strong electron correlations, *Chin. Phys. Lett.* **39**, 087401 (2022).
- ³⁵ Y. Liu, J. Li, W.-Z. Yang, J.-Y. Lu, B.-Y. Cao, H.-X. Li, W.-L. Chai, S.-Q. Wu, B.-Z. Li, Y.-L. Sun *et al.*, Superconductivity in kagome metal ThRu_3Si_2 , *Chin. Phys. B* **33**, 057401 (2024).
- ³⁶ X. Gui, R. J. Cava, LaIr_3Ga_2 : a superconductor based on a kagome lattice of Ir, *Chem. Mater.* **34**, 2824–2832 (2022).
- ³⁷ S. Chaudhary, Shama, J. Singh, A. Consiglio, D. Di Sante, R. Thomale, Y. Singh, Role of electronic correlations in the kagome-lattice superconductor LaRh_3B_2 , *Phys. Rev. B* **107**, 085103 (2023).
- ³⁸ H. C. Ku, G. P. Meisner, F. Acker, D. C. Johnston, Superconducting and magnetic properties of new ternary borides with the CeCo_3B_2 -type structure, *Solid State Commun.* **35**, 91–96 (1980).
- ³⁹ G. Kresse, J. Hafner, Ab initio molecular dynamics for liquid metals, *Phys. Rev. B* **47**, 558–561 (1993).
- ⁴⁰ G. Kresse, D. Joubert, From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method, *Phys. Rev. B* **59**, 1758–1775 (1999).
- ⁴¹ B. R. Ortiz, L. C. Gomes, J. R. Morey, M. Winiarski, M. Bordelon, J. S. Mangum, I. W. H. Oswald, J. A. Rodriguez-Rivera, J. R. Neilson, S. D. Wilson *et al.*, New kagome prototype materials: discovery of KV_3Sb_5 , RbV_3Sb_5 , and CsV_3Sb_5 , *Phys. Rev. Mater.* **3**, 094407 (2019).
- ⁴² N. Peshcherenko, N. Mao, C. Felser, Y. Zhang, Sublinear transport in kagome metals: Interplay of Dirac cones and Van Hove singularities, *arXiv:2404.11612* (2024).
- ⁴³ S. Mozaffari, W. R. Meier, R. P. Madhugaria, N. Peshcherenko, S.-H. Kang, J. W. Villanova, H. W. S. Arachchige, G. Zheng, Y. Zhu, K.-W. Chen *et al.*, Universal sublinear resistivity in vanadium kagome materials hosting charge density waves, *Phys. Rev. B* **110**, 035135 (2024).
- ⁴⁴ G. A. Bain, J. F. Berry, Diamagnetic corrections and Pascal’s constants, *J. Chem. Educ.* **85**, 532 (2008).
- ⁴⁵ W. L. McMillan, Transition temperature of strong-coupled superconductors, *Phys. Rev.* **167**, 331–344 (1968).

- ⁴⁶ K. G. Wilson, The renormalization group: Critical phenomena and the Kondo problem, *Rev. Mod. Phys.* **47**, 773 (1975).
- ⁴⁷ S.-I. Ikeda, Y. Maeno, S. Nakatsuji, M. Kosaka, and Y. Uwatoko, Ground state in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$: Fermi liquid close to a ferromagnetic instability, *Phys. Rev. B* **62**, R6089 (2000).
- ⁴⁸ T. Hogan, Z. Yamani, D. Walkup, X. Chen, R. Dally, T. Z. Ward, M. P. M. Dean, J. Hill, Z. Islam, V. Madhavan *et al.*, First-order melting of a weak spin-orbit Mott insulator into a correlated metal, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 257203 (2015).
- ⁴⁹ All data are available from the authors upon reasonable request