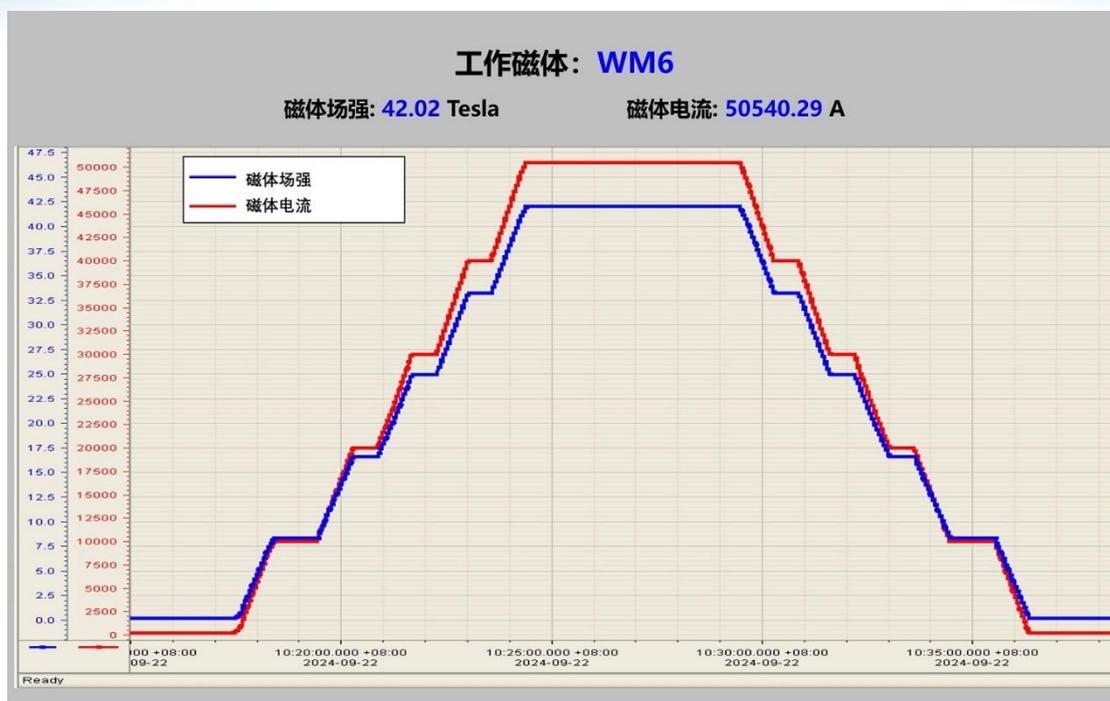


国内外强磁场实验室 科研动态

2024 年第三季度



中国科学院强磁场科学中心

2024/10/15



前 言

本科研动态的宗旨是为强磁场领域的科研技术人员提供国际上最新的科研成果以及各强磁场实验室发展动向，每季度发布一期。以下是美国、欧洲、日本和中国的强磁场实验室简介。

美国国家强磁场实验室

National High Magnetic Field Laboratory 又称 MagLab，是目前世界上规模最大，实验设施最全，用户最多的强磁场实验室。其稳态场部分位于 Tallahassee，脉冲场部分位于 Los Alamos，另有一个 high B/T 组位于 Gainesville。MagLab 于 1994 年建成并不断升级改造，创造并保持了多项世界纪录。

欧洲强磁场实验室

European Magnetic Field Laboratory (EMFL) 是由法国 Grenoble 的稳态场、Toulouse 的脉冲场、荷兰 Nijmegen 的稳态场以及德国 Dresden 的脉冲场实验室于 2015 年组合而成，有统一的用户申请入口。

日本强磁场实验室

日本的强磁场实验室没有整合在一起。比较著名的实验室有东京大学的 MegaGauss 实验室，东北大学的超导材料高场实验室 (HFLSM) 和 NIMS 的筑波磁体实验室 (TML)。

武汉脉冲强磁场科学中心

武汉的强磁场实验室隶属于华中科技大学，全称为国家脉冲强磁场科学中心(筹)，其磁体装置 2014 年通过国家验收，建有 12 个三种类型的系列脉冲磁体，最高场强达到 90.6 T，位居世界第三、亚洲第一。

中国科学院强磁场科学中心

中国科学院强磁场科学中心位于合肥科学岛，其建设的稳态强磁场实验装置是世界上仅有的两个稳态磁场超过 40T 的装置之一。稳态强磁场实验装置有 3 台水冷磁体创造世界纪录，混合磁体最高磁场达到 45.22T，是目前全球范围内可支持科学研究的最高稳态磁场，磁体技术和综合性能处于国际领先地位。



科 研 动 态

1. 美国国家强磁场实验室

● 美国强磁场科学技术现状与未来发展方向

2024 年 8 月，美国国家科学院、工程院和医学院联合发布了“ The Current Status and Future Direction of High-Magnetic-Field Science and Technology in the United States (2024)” 研究报告。报告完整地分析了美国当前强磁场领域的现状和在国际竞争中面临的挑战，并向国家有关部门提出了发展建议。现将主要的建议摘录如下：

- 1) 建议投资建设一系列新磁体，包括 60T 稳态磁体和 120T 脉冲磁体，大口径磁体 (900mm+, 14T+)，40T 全超导磁体 (ppm 均匀度，亚 ppm 稳定度)，以及 14T+ 人体 MRI 和 28T+ 小动物 MRI 磁体；
- 2) 建议提高供应链安全性，包括振兴超导线材工业和确保氦资源稳定供应；
- 3) 建议开发顶尖的强磁场下的测量仪器和方法；
- 4) 建议联合强磁场与 XFEL、同步辐射光源、中子源等大科学装置；
- 5) 建议加强强磁场人才培养。

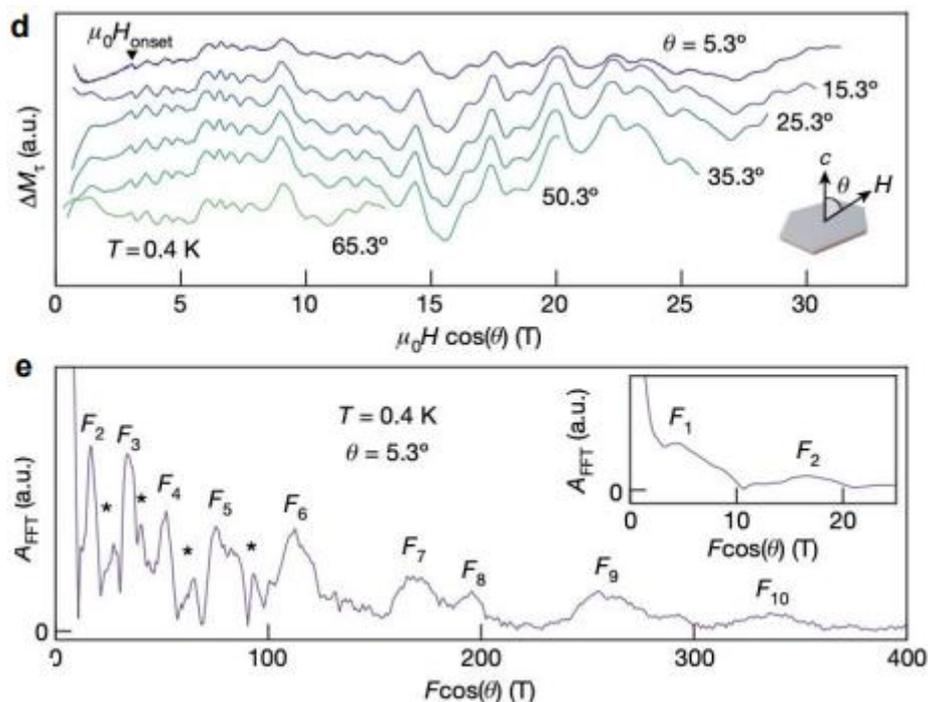
● 结构调制超晶格中的条纹电子相

材料的电子特性可以通过施加调制电场和磁场，也可以通过对材料本身的结构进行调制来控制。类似于两个频率略有不同的音叉发出的敲击声，两个结

构略有不同（不相称）的晶体层之间产生的空间调制为有趣的新电子特性创造了条件（条纹）。

在层状 SrTa_2S_5 中，由于 Sr_3TaS_5 和 H-TaS_2 的周期性结构不同，因此实现了此类条件。由此产生的调制长度约为 4.4nm ，与原子间距相比相当长。研究 SrTa_2S_5 的特性揭示了有趣的超导行为，第一个超导态在 2.3K 时形成，并且由于层内电子配对而被限制在层内。进一步冷却后，在 1.49K 时出现体超导态，出现层间电子配对。

为了更好地理解超导性在 SrTa_2S_5 中为何如此表现，我们在 MagLab 上通过电阻和磁化的量子振荡对费米面进行了测量。测量揭示了费米面频率和层间不公度界面空间调制导致的振荡的复杂叠加。这些数据描绘出了 SrTa_2S_5 中电子迁移率和相干电子态的显著图景。

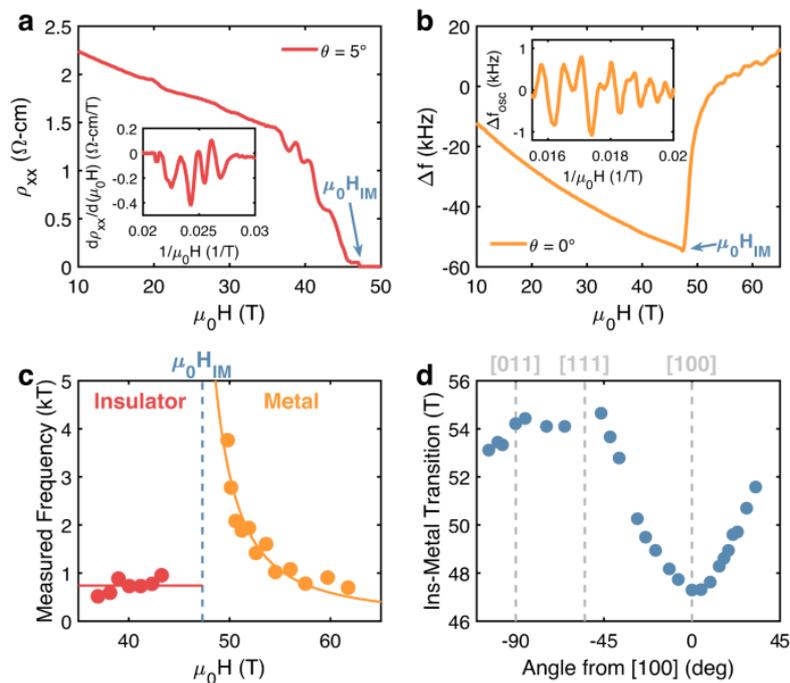


Cite: [A. Devarakonda, et al. Nature 631, 526–530 \(2024\)](#)

装置：水冷磁体

● 发现反向量子极限

非常规电子相有助于科学家探索和检验他们对凝聚态物质系统的理解。在强磁场作用下，特别是当电子之间发生强烈相互作用时，预计这些相会出现在金属中。然而，在这类金属中，其他效应往往占主导地位，因此很难对这些相进行研究。我们发现，这种“量子极限物理学”可以在强相关绝缘体中发生。绝缘体中的这种“反向量子极限”与金属中的量子极限类似，但磁场会导致电子态以相反的方式表现出来。这一发现表明，强相关绝缘体是探索“反向”量子极限中不寻常电子相的最佳平台。它还为 YbB12 的奇特行为提供了新的见解，因为它模糊了金属和绝缘体之间的常规界限。



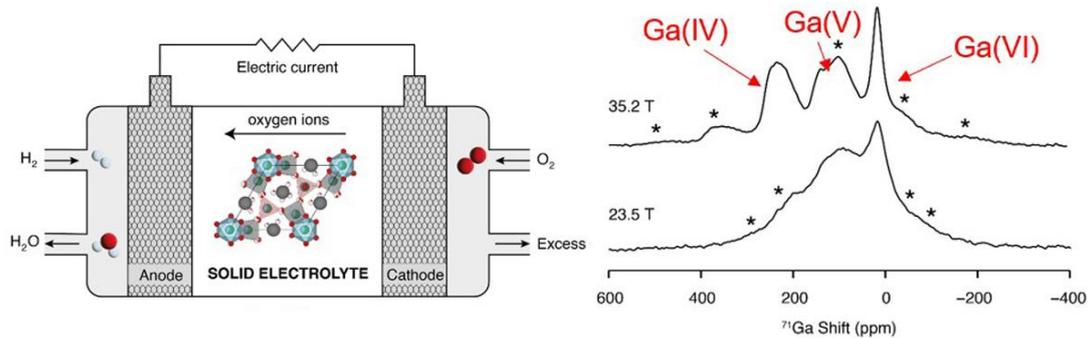
Cite: [Christopher A. Mizzi et al. Nat Comm. 15, 1607 \(2024\)](#)

装置：脉冲磁体

● 利用 ^{71}Ga NMR 光谱探测燃料电池的化学性质

固体氧化物燃料电池通过氧化氢气等绿色燃料和还原大气中的氧气来产生

清洁能源，无需充电，也不会排放造成气候变化的气体。它们使用快速离子导体电解质在电极之间移动氧离子，将化学能转化为电能。我们的研究在世界上磁场最高的磁铁上使用 ^{71}Ga 固态核磁共振光谱仪研究镓原子附近的氧离子数量，这将为设计更好的燃料电池电解质材料提供信息。

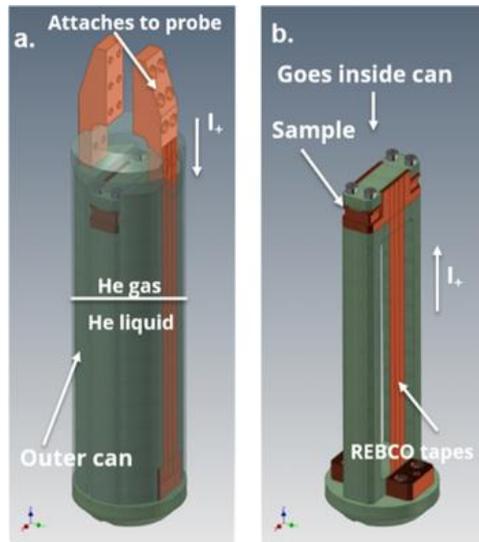
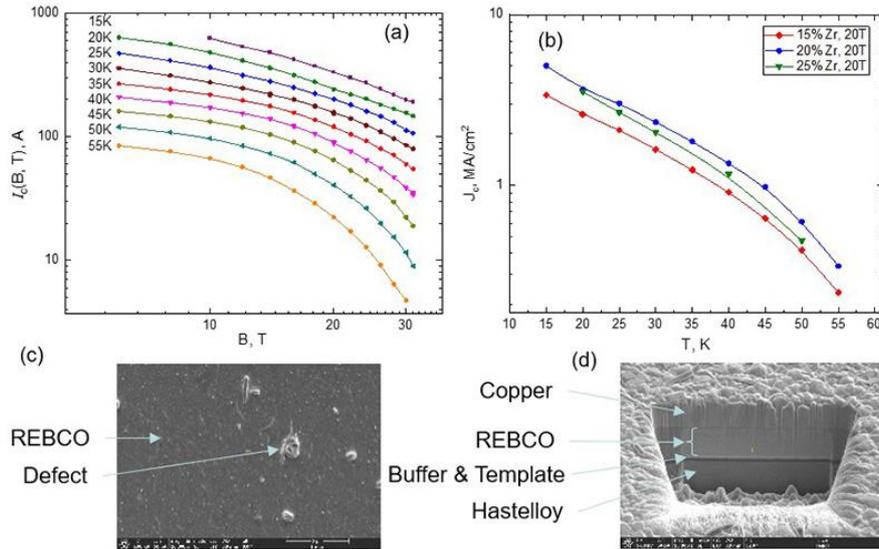


Cite: [Lucia Corti et al. J. Am. Chem. Soc. 146, 14022–14035 \(2024\)](#)

装置：串联混合磁体

● 高场下改进型 SuperPower® REBCO 带材的物性

超导体可以在不损失任何热量的情况下承载电流，最大极限称为临界电流 (I_c)。为了提高 I_c 性能，制造商在 REBCO 陶瓷超导体中添加了纳米氧化物。但是，如果不注意平衡，这些添加物会对 REBCO 陶瓷的特性产生负面影响，特别是在特定磁场 (B) 和温度 (T) 下。我们与 REBCO 导体制造商 SuperPower 公司合作，开发了在 20T 磁场和 20K 温度条件下测量其超导线 I_c 值的方法。我们重新设计了一个变温样品杆，用于测量 MagLab 31T 小口径磁体中的 I_c (B,T)。我们还使用扫描电子显微镜检查缺陷并测量超导体的厚度，通过离子束进行精确切割。



Cite: [Ashleigh Francis et al. Supercond. Sci. Technol. 33, 044011 \(2020\)](#)

装置：水冷磁体

2. 欧洲强磁场实验室

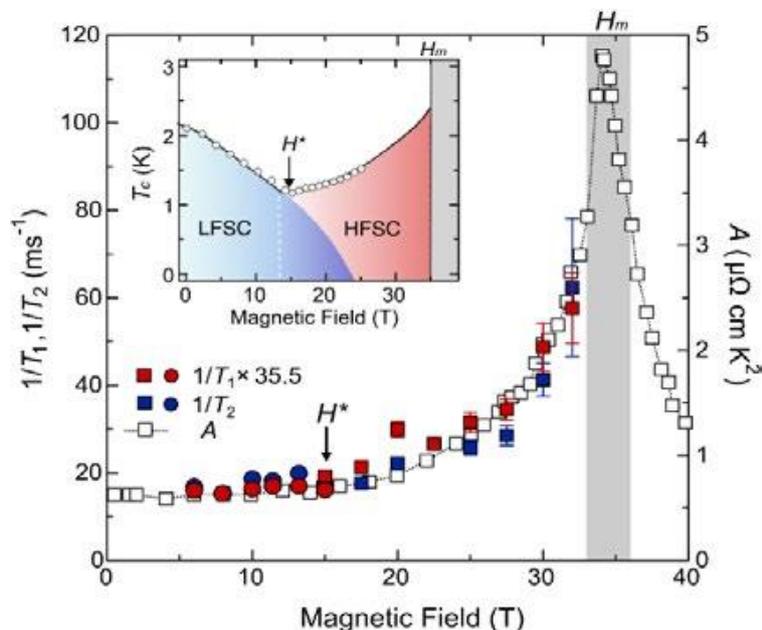
- 高场核磁共振揭示 UTe_2 中的场增强超导电性

铀基超导体 UTe_2 为研究块体材料中自旋三重态和拓扑超导性的新物理提供了一个极具吸引力的平台。2019年，法国强磁场实验室在连续场和脉冲场中进

行的电阻率测量表明，当沿晶体 b 轴施加磁场时， UTe_2 中的超导性会显著增强。这导致上临界场增加到 $H_m = 35 \text{ T}$ 的变磁相变场附近。有人提出，这种场增强超导性的一个基本因素是与 U-5f 电子自旋涨落的相互作用。

为了确认 UTe_2 中自旋涨落的存在并阐明其性质，我们在强磁场中使用富含 ^{125}Te 的高质量单晶进行了 ^{125}Te -NMR 实验。 ^{125}Te 的天然丰度仅为 7%，因此我们高达 99% 的富集大大增强了 NMR 信号，使我们能够测量高达 32 T 的 NMR 弛豫速率 $1/T_1$ 和 $1/T_2$ 的场依赖性。

观察到的 $H//b$ 磁场依赖性以及两个弛豫速率之间的比例 $T_2^{-1}/T_1^{-1} \approx 36$ 表明这种材料的主要涨落是纵向的。虽然 $1/T_1$ 和 $1/T_2$ 在较低场下几乎与场无关，但这两个量开始在 15 T 以上增加，并在 32 T 以上显示出发散的趋势，其中 NMR 自旋回波信号变得不可观察，因为 T_2 变得比 NMR 波谱仪的死时间短。这证实了 H_m 处场诱导的变磁相变附近自旋涨落的发散。先前的宏观研究将 $H^* \approx 15 \text{ T}$ 视为特征场，高于该场时 T_c 出现上升，高场超导相出现在低场超导相之上。我们的 NMR 结果表明， H^* 也是特征场，高于该场时自旋涨落开始在接近变磁相变时发展，证实了这些涨落确实增强了配对相互作用。



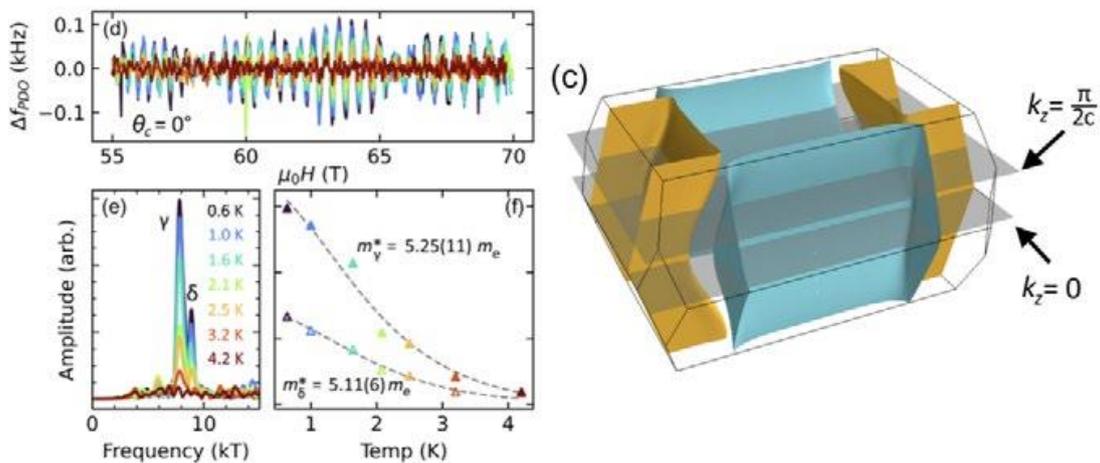
Cite: Y. Tokunaga, et al. Phys. Rev. Lett. 131, 226503 (2023)

装置: 水冷磁体 (法国)

● UTe₂ 中准二维费米面间的量子干涉

三重态超导体中费米面 sheet 的维数可能对超导性的可能拓扑性质具有重要意义。最近对 UTe₂ 磁导率的研究被解释为存在 3D 费米面口袋。在这里, 通过使用德国脉冲场实验室的 70 T 线圈以及 MagLab 的 41 T 水冷磁体的高场磁导率振荡测量, 研究人员证明, 通过考虑磁击穿轨道之间的量子干涉, 可以很好地描述 UTe₂ 中的磁导率振荡。这种量子干涉效应发生在费米面 sheet 之间的 k 空间分离非常小的时候, 允许准粒子在一定强度的磁场下穿过这些 sheet。此外, 本研究的数据不支持任何 3D 费米面口袋的假设。

UTe₂ 费米面的准二维性质的确认为未来的理论发展奠定了基础。令人兴奋的是, UTe₂ 的费米面似乎非常简单, 仅由两个圆柱形的空穴和电子 sheet 组成。这比重费米子系统 (如 UPt₃、URhGe 等) 要简单得多。尽管 UTe₂ 中存在大量奇异的物理现象, 但其简单的电子结构让我们有希望在理解这种材料方面取得有意义的进展。

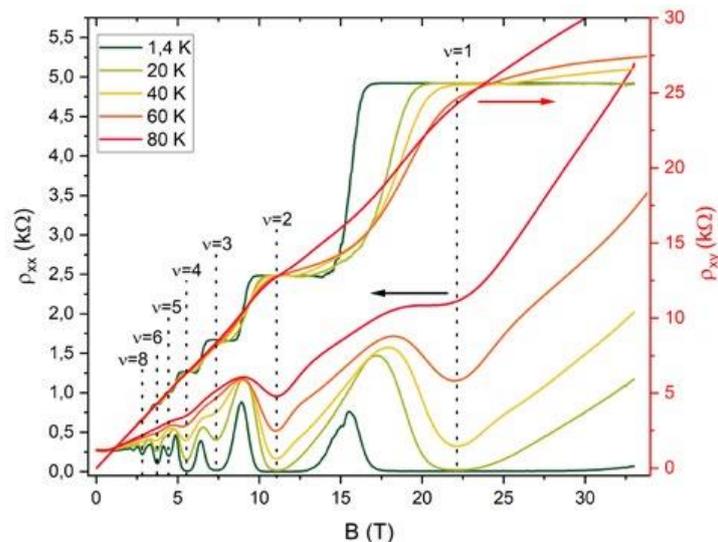


Cite: [T. I. Weinberger, et al. Phys. Rev. Lett. 132, 266503 \(2024\)](#)

装置: 脉冲磁体 (德国)、水冷磁体 (美国)

● 高温下 InAsSb 量子阱中的量子霍尔效应

最近, HFML-FELIX 和瑞士的用户研究了 InSb 和 InAsSb 调制掺杂量子阱 (QW), 以确定这些系统中 QHE 的稳健性。温度相关的磁输运测量表明, QHE 可在高达 60 K 的温度下存在。尽管 QHE 在相对较高的温度下是可观察到的, 但我们的 InAsSb QW 仍然比石墨烯器件表现更好。可以在电荷载体的有效质量中找到可能的解释。从使用两种互补技术 (Shubnikov-de Haas 振荡和回旋共振的温度依赖性) 进行的质量分析中可以得出结论, 质量大于相应块体的值, 这可以归因于不对称掺杂扭曲势阱, 从而有效地减小其宽度并导致更高的质量。利用倾斜磁场还可以确定 g 因子, 这与 InAsSb 的能带结构计算结果一致。此外, 在 InSb 和 InAsSb 中都观察到了相互作用引起的 g 因子增强。



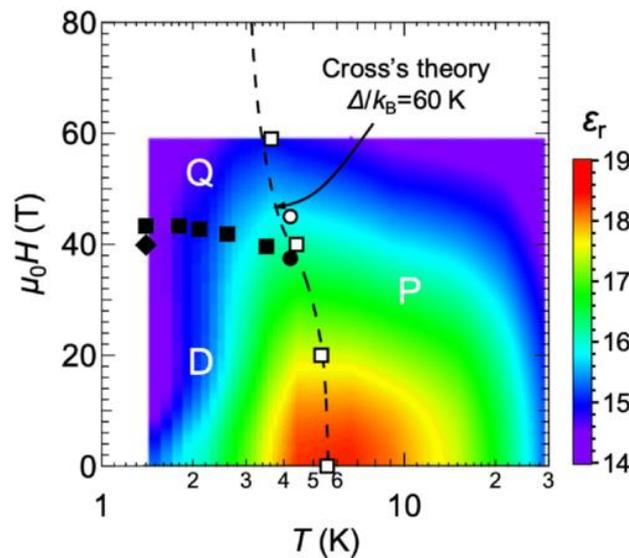
Cite: [M. E. Bal, et al. Phys. Rev. Res. 6, 023259 \(2024\)](#)

装置: 水冷磁体 (荷兰)

3. 日本强磁场实验室

- 铁电自旋-佩尔斯态中的自旋孤子量子液体

该文对一种有机盐进行了高场磁化、介电和超声测量，该有机盐呈现铁电自旋-佩尔斯态 (FSP)，非常接近量子临界点。与传统自旋-佩尔斯态 (SP) 中通常观察到的稀疏分布的气态自旋孤子不同，FSP 表现出由强量子涨落产生的致密液态自旋孤子，即使在低磁场下也是如此。然而，与传统的 SP 系统类似，在 FSP 中也能观察到磁场诱导的转变。在传统的高场 SP 态中，出现的波矢量会导致自旋孤子晶格的形成。然而，在目前的高场 FSP 态中，强烈的量子涨落排除了这种孤子晶格的形成，导致致密孤子保持在量子力学熔融态。这一观察结果意味着在铁电绝缘体中实现了携带自旋和电荷的拓扑粒子的量子液-液相变。

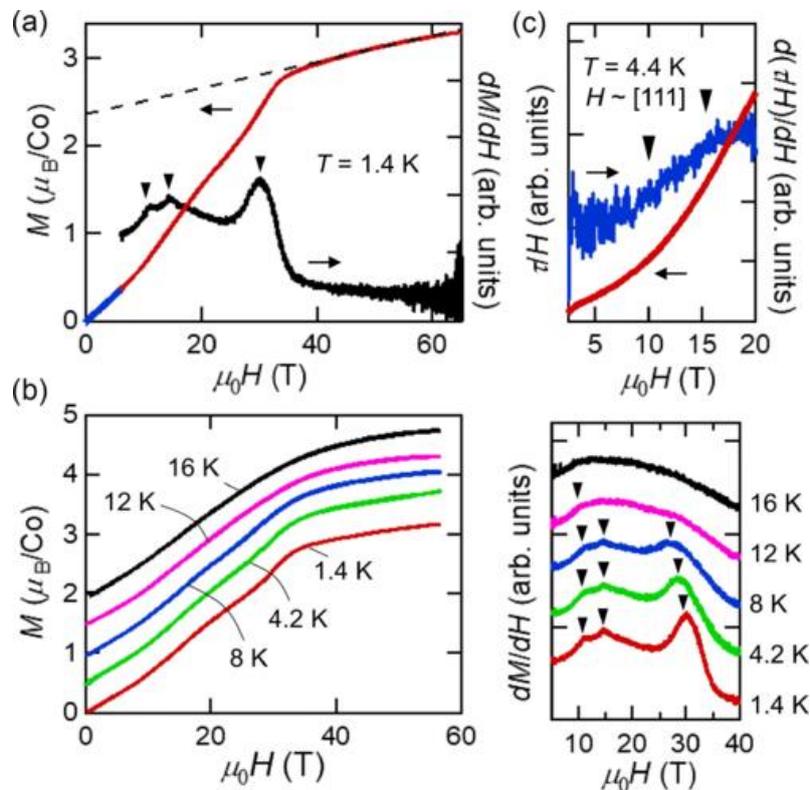


Cite: [Shusaku Imajo, et al. Phys. Rev. Lett. 132, 096601 \(2024\)](#)

装置：脉冲磁体

- 草酸钴 MOF 中的 $J_{\text{eff}}=1/2$ 超八边形晶格

该文报告了以超八边形晶格为特征的草酸钴 MOF 的磁特性。通过热力学测量揭示了高自旋 Co^{2+} ($3d^7$) 离子的 $J_{\text{eff}}=1/2$ 态, 以及在零磁场条件下的两个连续磁相变, 其中有两段熵释放。 ^{13}C -NMR 显示中温相不存在内部磁场。在 40 T 左右达到完全饱和之前, 可以观察到多个磁场诱导相。研究人员认为, 独特的草酸钴网格产生了 Kitaev 相互作用和/或键阻挫效应, 为超八边形晶格上的阻挫磁性提供了一个非常规平台。



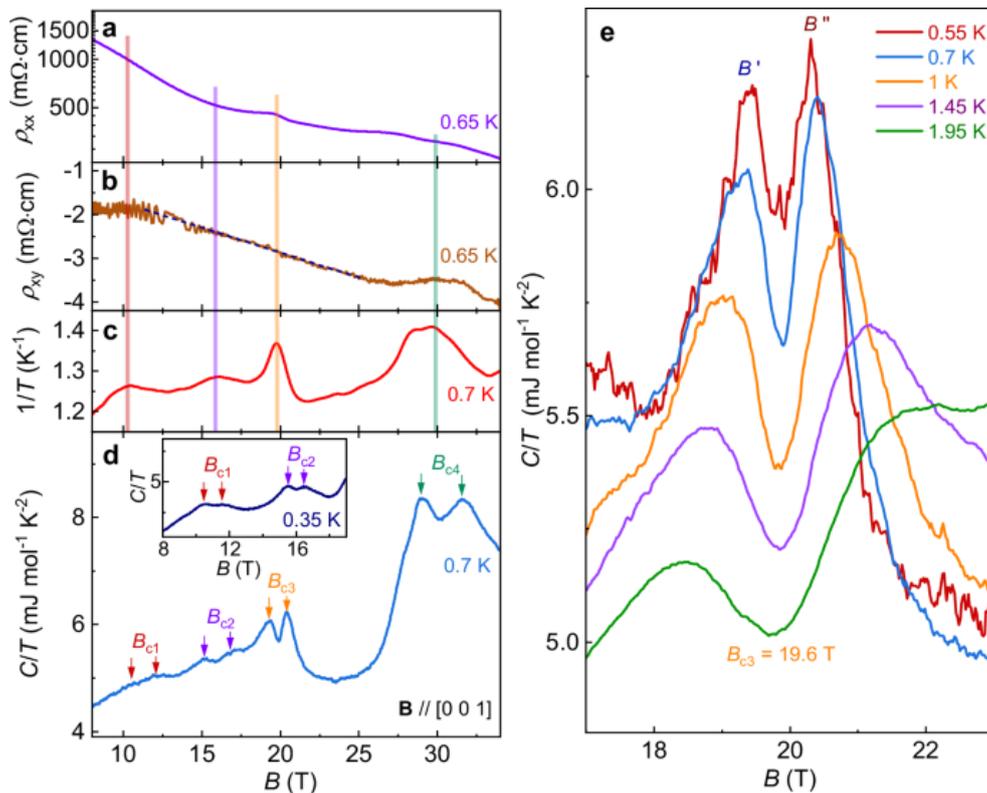
Cite: [Hajime Ishikawa, et al. Phys. Rev. Lett. 132, 156702 \(2024\)](#)

装置: 脉冲磁体

● 近藤绝缘体带隙内费米子准粒子态大热力学特征的证据

混价化合物 YbB_{12} 在具有发达绝缘电荷间隙和没有电子费米面的情况下, 在电阻率和磁矩方面显示出矛盾的量子振荡。然而, 这种不寻常的费米子准粒子在其他块体热力学观测指标中的特征却一直缺失。在这里, 研究人员报告了

在比热中观察到的一系列与磁场函数相关的尖锐双峰特征。在热力学异常的磁场范围内霍尔电阻率表现平滑，因此排除了传统电子作为其起源的可能性。在三维绝缘体中观察到的热力学反常现象为绝缘体中存在新兴的分散费米子激元提供了证据，这为进一步研究其他相关混价化合物中的电子分化奠定了基础。



Cite: [Zhuo Yang, et al. Nature Comm. 15, 7801 \(2024\)](#)

装置：脉冲磁体

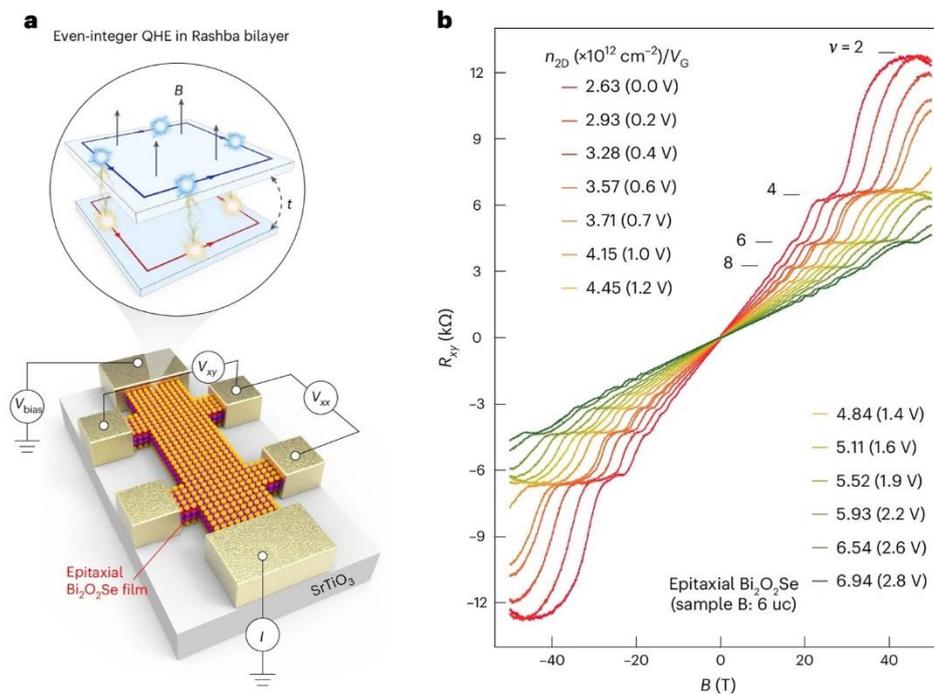
4. 武汉脉冲强磁场科学中心

● 发现 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 中偶数量子霍尔效应

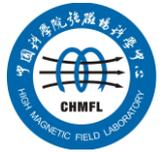
量子霍尔效应是 20 世纪以来凝聚态物理学中最重要的科学发现之一，对于探测和理解二维体系中的新电子态具有重要意义，而实验上观测量子霍尔效应

的难度很大。近年来，二维半导体材料的发展为探索量子霍尔效应和新奇量子物态提供了新机遇，虽然科学家们在多种二维半导体材料体系（如黑磷、硒化铟等）中观测到了整数量子霍尔效应，但因体系中的自旋轨道耦合较弱，强磁场下塞曼效应导致奇数与偶数量子化平台同时出现，量子霍尔效应中奇/偶量子物态的调控一直没有取得实验突破。

该研究中，用户团队利用分子束外延技术生长了高质量的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 薄膜，借助脉冲强磁场设施的电输运实验平台，观测到了一种全新的偶数量子霍尔效应，即在高达 50T 的脉冲强磁场下， $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 薄膜中仅出现偶数量子霍尔效应，而奇数量子霍尔平台全部缺失。通过理论结合实验研究发现， $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 中强磁场下的全新偶数量子霍尔效应源于其自身独特的隐藏自旋极化效应。同时，通过改变 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的面外极化场，还可以有效地调节其中的偶数量子霍尔效应，并在实验上同时观测到了奇数与偶数量子化平台共存的量子霍尔效应。



该研究工作在高迁移率二维半导体 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 中首次发现隐藏自旋极化诱导的偶数量子霍尔效应，并实现了量子霍尔效应中奇/偶量子态的精确控制，为发



现新奇量子霍尔效应、调控能带拓扑与自旋织构、探究自旋相关物理现象以及构筑高速低功耗自旋电子学器件提供了一个理想材料平台。

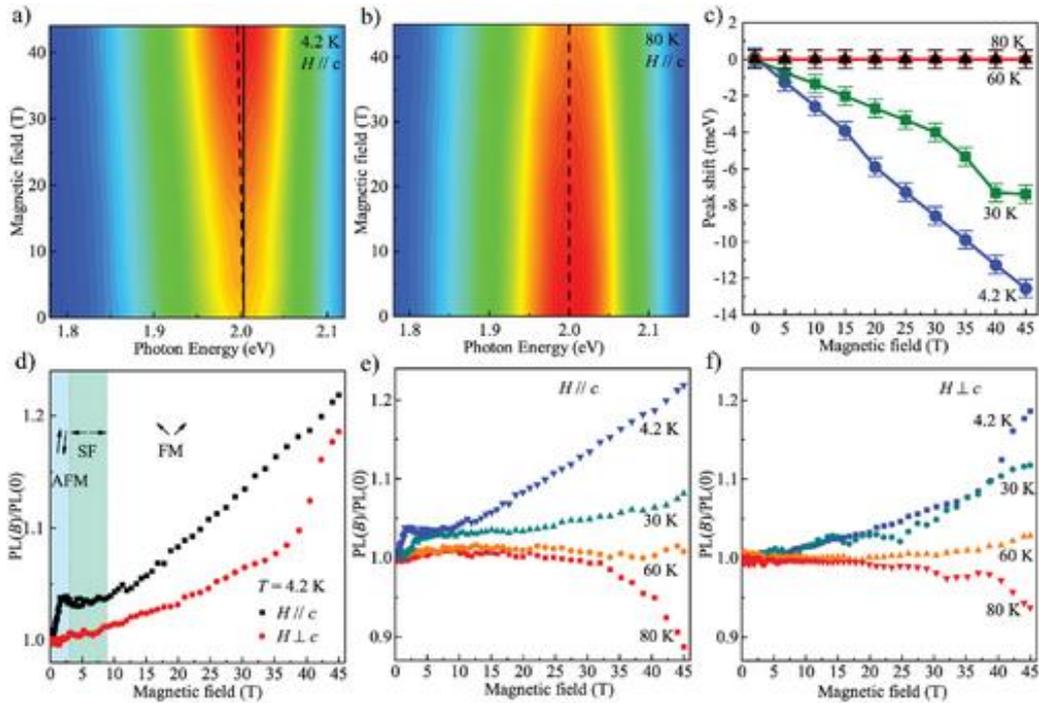
Cite: Jingyue Wang et al. Nature Nanotech. (2024)

装置：脉冲磁体

● 二维锰基钙钛矿磁光谱的研究

二价锰离子具有 $3d^5$ 轨道电子，在晶体中它同时具有 d-d 轨道电子跃迁产生的高效率可见光波段光发射和 $5/2$ 高自旋态相关的丰富磁相变，因而在磁性发光材料领域具有广泛应用价值。以往的研究集中在半导体稀磁掺杂 Mn^{2+} 离子体系，Mn-Mn 自旋相互作用较弱，且激子-杂质相互作用使得相关物理机制复杂化，因而磁有序对发光性质影响的研究较为薄弱。

针对此问题，武汉脉冲场实验室与武汉工程大学合作，研制了具有高发光效率的甲胺锰氯透明单晶，在 369nm 紫外光激发下该晶体在 600nm 附近展现宽波段红光发射。磁化率和电子自旋共振测量表明，温度低于 47K 时， $MnCl_6$ 八面体在 ab 面形成倾斜磁相互作用层，在面外具有强反铁磁相互作用，同时在面内具有弱铁磁相互作用，温度高于 47K 时为顺磁态。利用脉冲强磁场设施的磁光谱测量平台，在 0-45T 磁场下测量了发光峰位、峰强变化，发现 Mn-Mn 自旋反铁磁有序时对发光产生抑制，来源于反铁磁交换引发的激发态能量传递作用；Mn-Mn 自旋铁磁有序时对发光产生增强作用，源于对八面体对称性晶体场中单自旋跃迁定则的打破；在高温顺磁态区域，发光强度随磁场变弱，与以往的研究结果近似。该研究结果，特别是铁磁有序增强发光，为无铅钙钛矿发光材料在自旋发光器件和磁光功能材料方面的应用提供了基础。



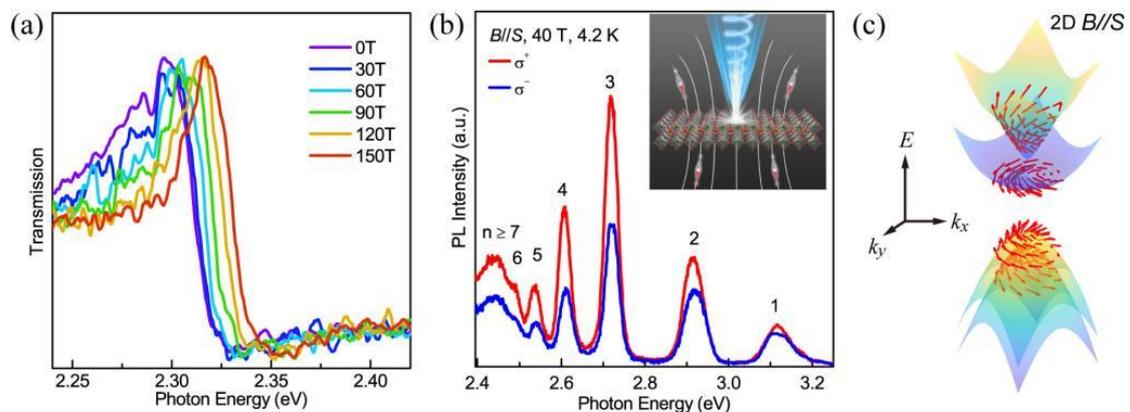
Cite: [Kun Zhang et al. Adv. Opt. Mater. 12, 2400936 \(2024\)](#)

装置：脉冲磁体

● 铯铅溴纳米片中二维受限激子的自旋极化发光

二维 (2D) CsPbBr_3 纳米片因其较大激子结合能、高量子产率、强量子限域效应，强自旋轨道耦合以及 Rashba 效应，可能成为一种自旋光电子学材料，因此受到了广泛关注。韩一波课题组利用热注入法，通过改变卤素离子浓度，成功制备了不同原子层数的 CsPbBr_3 纳米片，与东京大学 Yoshimitsu Kohama 团队合作开展了基于单匝线圈的 150T 透射光谱研究，结果表明 CsPbBr_3 纳米片中存在高密度的 2D 限域的激子。利用脉冲强磁场设施的磁光谱测量系统，在 0-40T 磁场下分别测量了磁场垂直和平行于 2D 纳米片的 PL 谱，实验结果表明，当磁场与纳米片表面垂直时，存在明显的磁致发光，但无圆偏振极化；而当磁场与纳米片表面平行时，相较于块材，表现出显著的圆偏振极化和激子 g 因子增强。

为了解释 2D CsPbBr₃ 纳米片中激子自旋极化增强的机理，与徐刚教授课题组展开合作，利用 $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ 模型对 2D CsPbBr₃ 带边激子自旋极化进行了分析。计算结果表明 2D 纳米片中 Rashba 能带会在磁场作用下在能量空间进一步劈裂，利用跃迁矩阵元对圆偏振极化进行计算，理论计算得到圆偏振度与实验结果基本一致。这表明 2D 纳米片中的 Rashba 效应对磁场下 PL 圆偏振度的增强起到至关重要的作用。这项研究为深入理解强自旋轨道耦合效应下的自旋相关光学特性，开发基于 2D 钙钛矿的自旋光子器件奠定了坚实基础。



Cite: [Ruiqin Huang et al. ACS Photonics 11, 3160–3166 \(2024\)](#)

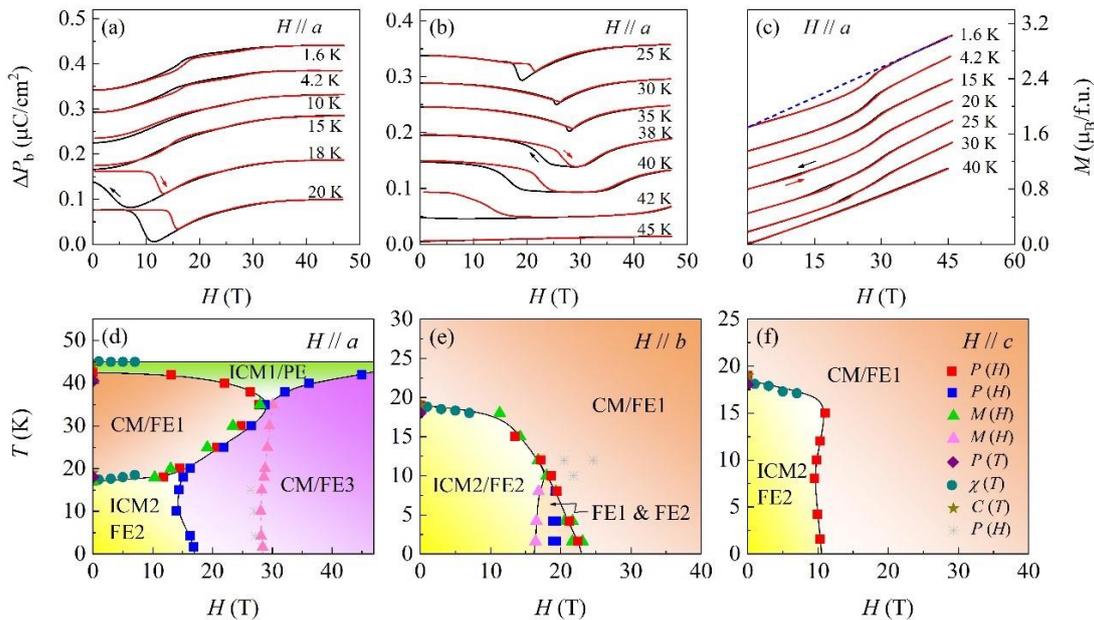
装置：破坏式脉冲磁体（日本）、长脉冲磁体（武汉，300ms）

● 多铁性锰酸盐 YMn_2O_5 单晶的磁电相图

多铁性材料体系 RMn_2O_5 (R 为稀土元素、Bi) 因在磁场中呈现的奇特物理效应而备受关注，如磁场诱导的拓扑保护磁电开关、磁场驱动的极化强度翻转/反转、巨大的磁电容等。这些磁电特性与 Mn-R、Mn-Mn 之间复杂的磁相互作用密切相关，而且往往在它们相图上得到很好的体现。虽然 RMn_2O_5 的磁/铁电态随着稀土离子的变化而变化，但它们的磁/铁电相变却存在一些共性。此外，由于 Y^{3+} 是非磁性离子，导致 Mn-Y 之间没有磁相互作用，因此 YMn_2O_5

为研究该体系磁电相图提供了一个理想的平台。

该工作中，研究团队利用脉冲强磁场设施的磁化和电极化测量技术，对三个主轴方向 YMn_2O_5 的物理特性开展系统研究。研究发现，当 $T=1.6\text{K}$ 时， a 方向 28T 附近出现二阶磁相变；当温度升高至 18K 时，10T 附近出现额外的一阶磁相变。有意思的是，前者几乎不受温度影响，而后者随着温度提升向高磁场方向移动，最终两者融合。对于 b 方向，仅一阶磁相变出现在 18K 以下，而 c 方向无任何异常。在铁电性方面，三个轴向均出现了磁场诱导极化反转的现象，但是起因有所不同。在此基础上，研究团队构建了 YMn_2O_5 的强磁场磁电相图。除此之外，还从晶体/磁结构、磁相互作用等方面对其中的物理机制进行了探讨，并给出了相应的物理模型。



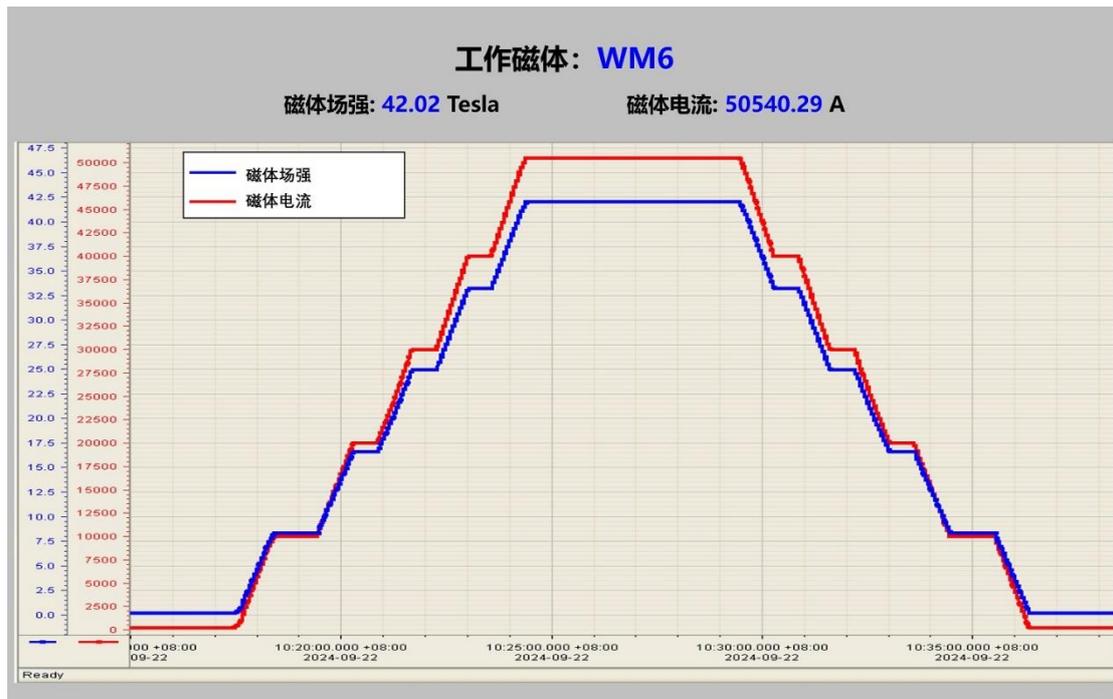
Cite: [Haowen Wang et al. Phys. Rev. B 110, 014430 \(2024\)](#)

装置：脉冲磁体

5. 中科院强磁场科学中心

● 合肥科学岛稳态强磁场刷新水冷磁体世界纪录

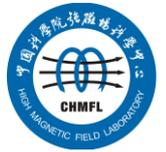
9月22日，中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心自主研制的水冷磁体产生了42.02万高斯（即42.02特斯拉）的稳态磁场，打破了2017年由美国国家强磁场实验室水冷磁体产生的41.4万高斯的世界纪录，成为国际强磁场水冷磁体技术发展新的里程碑。这也是稳态强磁场实验装置继2022年混合磁体成功创造45.22万高斯的世界稳态磁场纪录之后，取得的又一项重大技术突破。



在中国科学院和安徽省联合科研攻关项目的支持下，经过近四年的不懈努力，强磁场技术研究团队创新了磁体结构、优化了制造工艺，最终在32.3兆瓦的电源功率下产生42.02万高斯的稳态磁场，标志着我国乃至世界强磁场水冷磁体技术发展的新高峰。这一磁体的研制成功不仅更好地满足了科研用户对快

捷调控的稳态强磁场的实际需求，为科学家们探索新现象、揭示新规律提供了强大的实验条件，更为我国建设更高场强的稳态磁体奠定了一项关键技术基础。





稳态强磁场磁体分为三种类型，即水冷磁体、超导磁体以及由水冷磁体和超导磁体组合的混合磁体。水冷磁体是科学家们最早使用的磁体类型，拥有磁场调控灵活快捷、且具有能够产生磁场强度迄今远高于超导磁体的优势，为物质科学研究提供了可靠和高效的实验条件。

强磁场科学中心学术主任匡光力研究员将稳态强磁场技术的发展形象地比作乒乓球赛场上的竞技，“水冷磁体、超导磁体都是‘单打高手’，混合磁体是‘混双组合’，2022年我们曾以综合优势问鼎‘混双冠军’，今天我们在这一领域又有了新的突破，拿下了一项‘单打冠军’。”

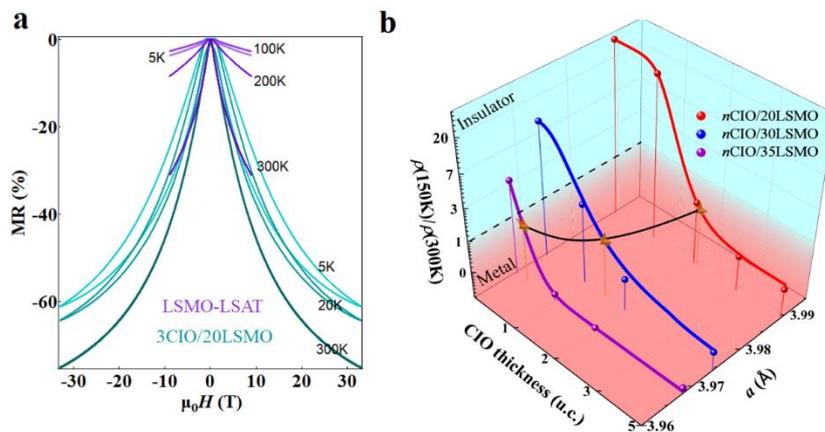
稳态强磁场是物质科学研究需要的一种极端实验条件，是推动重大科学发现的“利器”。几十年来，全球科学家在稳态强磁场条件下的科学研究取得了许多重大科研成果，先后有十多项科研成果获得诺贝尔奖。因此，强磁场技术的发展成为国际科技竞争的重要领域，目前国际上有五大稳态强磁场实验室，分布于美国、法国、荷兰、日本和中国合肥科学岛。

● 原胞级精准可控的绝缘体-金属转变

绝缘型异质结中的导电界面，如PN结，是现代电子产业的核心。这一类绝缘型异质结至少包含一种能带绝缘体，如 SrTiO_3 和 KTaO_3 。与能带绝缘体相比，关联绝缘体通常具有更为丰富的相图，是实现绝缘体-金属转变的良好介质。然而，在完全由关联绝缘体组成的绝缘型异质结中，目前鲜有导电界面的报道。为实现这一目标，一个直观的思路是选择具有稳固金属性基态但可被调控至绝缘态的电子关联体系来构造异质结。而Dirac型semi-metal CaIrO_3 (CIO)和half-metal $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ (LSMO)正是达成此次设计的理想材料。更重要的

是，以往的铋氧化物/锰氧化物异质结研究中已经坐实 5d/3d 界面的强电荷转移效应，这有利于促进异质结的电子态转变。

基于以上考虑，郝林课题组利用激光分子束外延技术合成了一系列的 nC1O/mLSMO (n 和 m 分别代表 C1O 和 LSMO 的原胞层数) 异质结。在强烈拉伸应变的作用下，单独的 C1O 和 LSMO 分别被驱动至绝缘态，然而异质结却表现出随 C1O 层数可变的电输运行为。更为有趣的是，异质结具有截然不同于单组份材料的超高饱和场。例如，水冷磁体 WM5 的电输运测量结果表明，3C1O/20LSMO 异质结在 20 K 时的饱和场甚至已经大于 30 T。输运行为的巨大差异暗示异质结可能存在电子相分离，高磁场的施加使得分离的金属团簇得以汇聚，导致样品整体导电性能的提高。强磁场的电输运结果也意味着异质结中的绝缘体-金属转变有可能来自于界面电荷转移下的渗流效应。为验证这一思路，研究人员进一步调控电子关联强度，并最终在 nC1O/35LSMO 的异质结体系中，实现单原胞层可控的绝缘体-金属转变。这一工作表明全关联绝缘体的异质结不仅是探索新奇物理现象的沃土，在开发精密型电子器件方面也有巨大潜力。



Cite: [Enyang Men et al. Nature Comm. 15, 8427 \(2024\)](#)

装置：水冷磁体