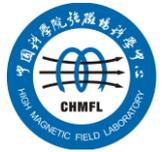


国内外强磁场实验室 科研动态

2025 年第一季度

中国科学院强磁场科学中心

2025/5/8



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主要有东京大学的 MegaGauss 实验室，东北大学的超导材料高场实验室 (HFLSM)、大阪大学的先进强磁场科学中心 (AHMF) 和 NIMS 的筑波磁体实验室 (TML)。

中国强磁场实验室

中国的稳态强磁场装置建成于 2017 年，法人单位是中国科学院合肥物质科学研究院。该装置混合磁体产生了 45.22 T 的世界最高稳态磁场，水冷磁体产生了 42.02 T 的水冷磁体磁场世界纪录，磁体技术和综合性能处于国际领先地位。中国的脉冲强磁场装置建成于 2014 年，法人单位是华中科技大学，最高脉冲磁场达到 94.8 T，位居世界第三。

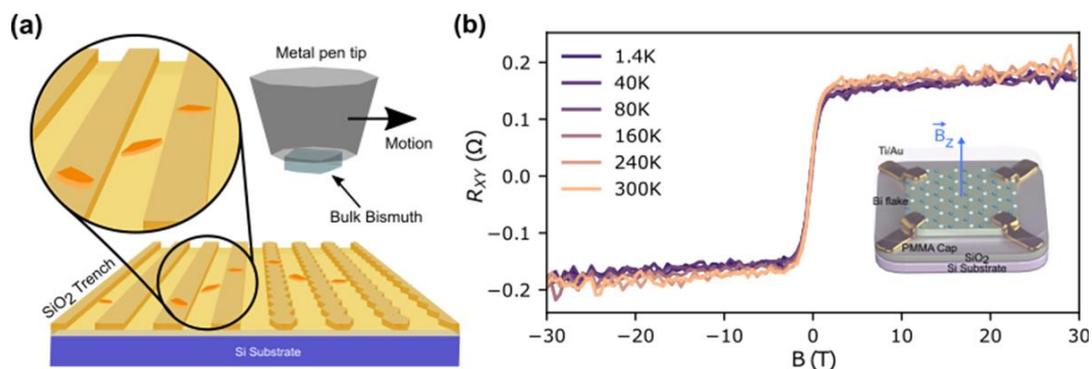
科 研 动 态

1. 美国国家强磁场实验室

● 神秘的磁效应在极端温度下保持不变

研究人员利用一种类似于奶酪刨丝机刨出薄片的独特方法，制造出了厚度约为 68 纳米的超薄铋膜，比头发丝的千分之一还要薄。当暴露在磁场中时，铋的电阻表现出一种不寻常的行为（称为反常霍尔效应），从接近绝对零度到室温都保持不变。

由于铋的磁性，反常霍尔效应不应该发生在铋中，因此这一发现出乎意料。更令人费解的是，这种效应在从接近绝对零度到室温的巨大温度范围内都保持不变——这是以前从未见过的。这表明这种效应是铋固有的，而不是由磁性杂质引起的。展望未来，由于铋的低毒性，它可能成为探索这种效应的量子版本和开发生物兼容电子器件的重要材料。



Cite: [Oulin Yu, et al. Phys. Rev. Lett. 134, 066603 \(2025\)](#)

作者信息：一作 Oulin Yu, 加拿大 McGill 大学本科、博士, 2024 年毕业。

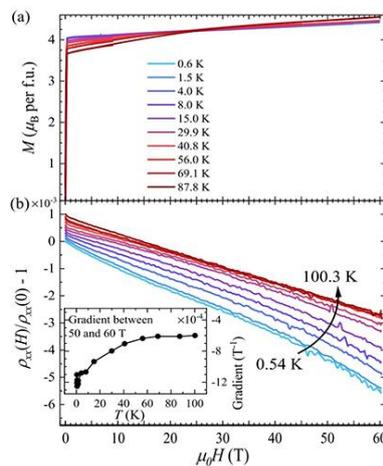
装置：31T 水冷磁体

● 脉冲磁场揭示磁性材料 $\text{Fe}_{3-x}\text{GeTe}_2$ 中隐藏的电子行为

$\text{Fe}_{3-x}\text{GeTe}_2$ (FGT) 是一种薄层生长的特殊材料，是制造设备的理想材料。它具有极佳的导电性，在高温下也能发挥不寻常的磁性，而且磁性和导电性之间有着紧密的联系。这些特性使 FGT 成为低功耗自旋电子器件的理想候选材料，这种器件利用电子的自旋而不仅仅是电荷来实现更高效的数据存储和传输。

科学家们在高达 60 T 的脉冲磁场中研究了 FGT。他们观察到，在 80 K (约 -193°C) 时，FGT 的行为发生了微小但重要的变化，表现为磁化和电阻率对磁场的响应方式发生了转变。这种微妙的变化预示着该材料的电子行为发生了重大改变，这种改变是由近藤效应引起的。

这项研究强调，在设计基于 FGT 的器件时，需要考虑近藤效应。令人兴奋的是，通常出现在铀或钍等稀有元素中的近藤效应，竟然出现在由普通铁制成的 FGT 材料中，这为先进技术开辟了新的可能性。



Cite: [S. Vaidya, et al. Phys. Rev. Research 6, L032008 \(2004\)](#)

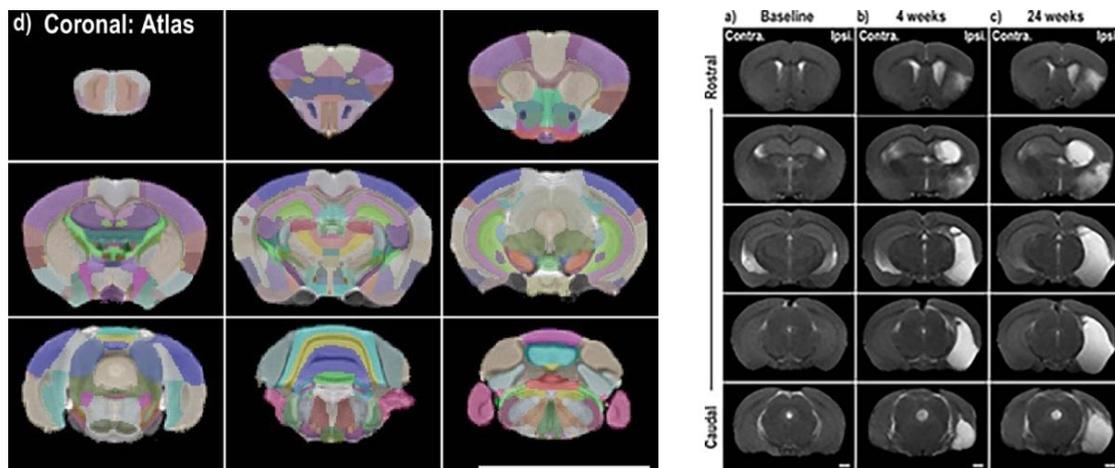
装置：脉冲磁体

● 刺鼠如何从中风中恢复而不再生脑组织

缺血性中风发生时，血管堵塞会切断脑部供氧。它是造成 40 岁以上成年

人残疾和死亡的主要原因。这项研究利用核磁共振成像绘制了非洲刺鼠的大脑图，观察它在中风受伤后的适应情况，发现它在中风后恢复得异常好。与之前的脊髓修复研究结果不同，核磁共振成像扫描显示，小鼠并没有重新长出脑组织。相反，它们利用大脑的其他部分来弥补损伤，从而迅速恢复。

了解这种小鼠如何重新连接大脑，可以为哺乳动物更广泛的大脑发育和愈合提供有价值的见解。



Cite: [Benjamin M. Kidd, et al. npj Regenerative Med. 9, 41 \(2004\)](#)

装置：11T/400mm MRI

2. 欧洲强磁场实验室

● 氧化物界面的非常规电子态

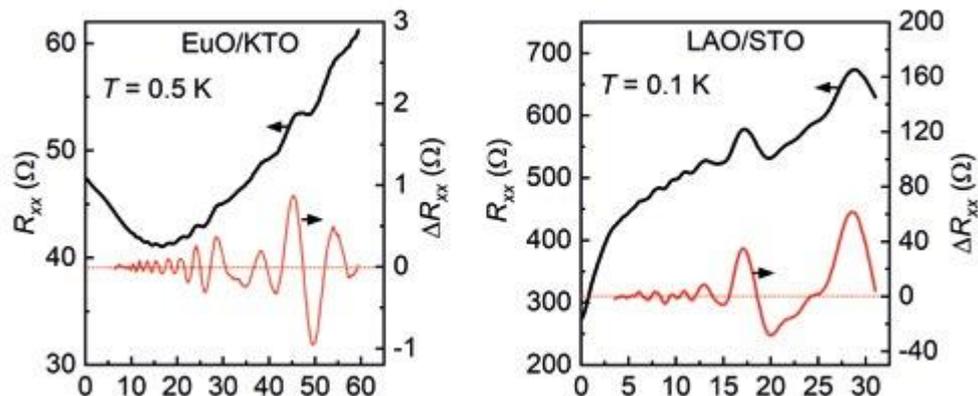
在过去二十年中，人们在钙钛矿过渡金属氧化物的表面和界面上观察到了二维电子系统（2DES）。特别是基于 SrTiO_3 (STO) 和 KTaO_3 (KTO) 的二维电子系统表现出各种有趣的现象，如大磁电阻、拉什巴自旋轨道相互作用、二维超导性和磁性，而这些现象在它们的块体中是不存在的。

为了全面了解氧化物界面中产生这些有趣现象的复杂电子结构，国际合作研究人员对 EuO/KTO、LAO/STO 和无定形 (α)-LAO/KTO 界面的舒布尼科夫-德-哈斯 (SdH) 振荡进行了深入的实验研究。为了最精确地捕捉振荡，研究人员利用洛斯阿拉莫斯 NHMFL 的脉冲磁场 (60 T) 和奈梅亨 HFML-FELIX 的直流磁场 (35 T)，在分别低至 0.5 和 0.1 K 的低温条件下进行了高场电输运实验。

研究发现二维界面区域存在流动电子，它们与深入 STO 和 KTO 的电荷载流子共存。有趣的是，所研究的所有三个界面都表现出有效回旋质量的逐渐线性增加，以及随着磁场的增加 SdH 频率的二次方增加。

结合了线性和抛物线色散关系以及泽曼相互作用的模型可以解释这些奇特但仍相当普遍地发现。事实上，理论模拟的 SdH 振荡支持这两种类型色散的存在，并表明存在非对称电子态，这可能与拉什巴自旋轨道相互作用和/或自旋轨道相互作用导致的沿 Γ -M 的线性色散有关。

该发现为深入理解复杂氧化物中的界面提供了一个通用模型，并为解释其他材料如狄拉克和外尔半金属中的非三价电子态提供了一个很好的起点。



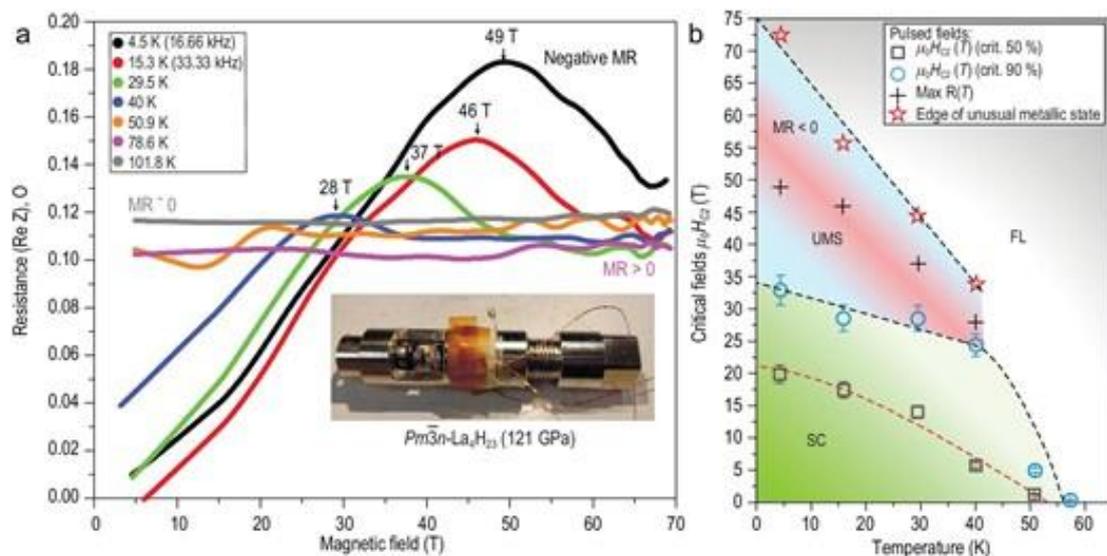
Cite: [K. Rubi, et al. Phys. Rev. Res 6, 043231 \(2024\)](#)

装置：水冷磁体、脉冲磁体

● 超导 A15 型 La_4H_{23} 中不寻常的金属状态

超氢化物即金属氢化物，在超高温、兆巴压力下表现出超导性 (SC)。高达 250 K 的超导临界温度 (T_c) 的观测，重新点燃了科学家们对室温超导的梦想。尽管当前的研究重点是进一步提高 T_c ，但基于氢化物超导的室温应用受限于样品空间狭小以及所需的金刚石压砧压力室内的极端条件。

根据 BCS 理论，超氢化物超导的基本机制被认为是传统的，即库珀对可以在声子的帮助下形成。然而，在不断增长的超氢化物家族成员中（迄今为止，已知的化合物超过 20 种），也观察到了与传统理论相矛盾的相当不寻常的行为。



来自吉林大学和北京高压科学研究中心的团队，对超氢化物 La_4H_{23} 相当不寻常的正常态特性进行了研究。在高达 70 T 的脉冲磁场的帮助下，该研究报告了新合成氢化物立方 A15 型 La_4H_{23} 中不寻常金属状态的实验证据，其 T_c 在 118 GPa 时达到 105 K。低于 40 K 时，研究人员在非超导状态下观察到较大的负磁阻，即高于临界磁场 H_{c2} ，可在磁相图的特定区域检测到。该研究揭示了 A15 型 La_4H_{23} 在强磁场下的异常电子特性，暗示正常状态下存在非常规输

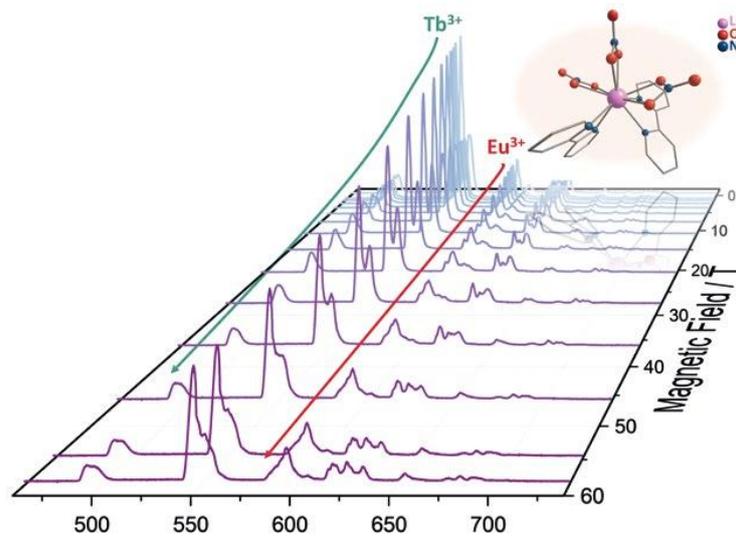
运，让人联想到在非常规超导体的奇异亚态中发现的情况。以前曾报道过 Ce 基超氢化物具有类似的异常行为。结果表明，超氢化物的多样性似乎蕴含着超越正常金属行为的物理特性。

Cite: Jianning Guo, et al. Nat. Sci. Rev. 11, nwae149 (2024)

装置：脉冲磁体（德国）

● 极端磁场中的发光温度计

发光测温法作为一种多功能、非侵入式的远程测温工具，已在纳米医学、微电子学、催化和等离子体等多个领域引起了广泛关注。其显著优势之一是不受强电磁场影响，这使其看似非常适合在传统温度计失效的环境中应用。然而，这一假设缺乏实验验证，尤其是对于依赖磁性离子（例如镧系元素）的温度计而言。为了弥补这一缺陷，我们的研究考察了分子温度计 $[\text{Tb}_{0.93}\text{Eu}_{0.07}(\text{bpy})_2(\text{NO}_3)_3]$ ($\text{bpy} = 2,2'$ -联吡啶) 在高达 58 T 的脉冲磁场下的测温性能。



我们使用图卢兹脉冲场 (LNCMI-Toulouse) 的独特装置，探究了其在宽温度范围 (2 – 290 K) 和不同磁场强度 (高达 58 T) 下的发光响应。经研究发现， Tb^{3+} 和 Eu^{3+} 发射跃迁与温度和磁场均表现出显著的相关性。这种热磁依赖



性损害了它们即使在相对较弱的磁场下也能实现精确温度传感的可靠性。为了应对这一挑战，我们采用皮尔逊相关分析来识别对磁场敏感性最小的替代电子跃迁。这种创新方法使我们能够建立一个新的测温参数，该参数能够在高达 20 T 的磁场下进行可靠的温度测量。此外，在超过 120 K 的温度下，分子温度计在更强的磁场下仍能保持可操作性。

这项工作首次系统地评估了发光温度计在极端磁场条件下的性能，挑战了长期以来对磁场免疫的信念。它强调了测温行为的材料特异性，并为开发适用于强磁场环境的下一代温度计提供了一个强大的框架。

Cite: M. Aragon-Alberti, et al. J. Am. Chem. Soc. 146, 33723 (2024)

装置：脉冲磁体（法国）

● 法国的混合磁体达到 42T

位于格勒诺布尔的 LNCMI 的混合磁体现已达到 42 T。这是欧洲首次实现如此高的磁场。几个月后，LNCMI 将把这台磁体提供给欧洲磁场实验室的科学家。

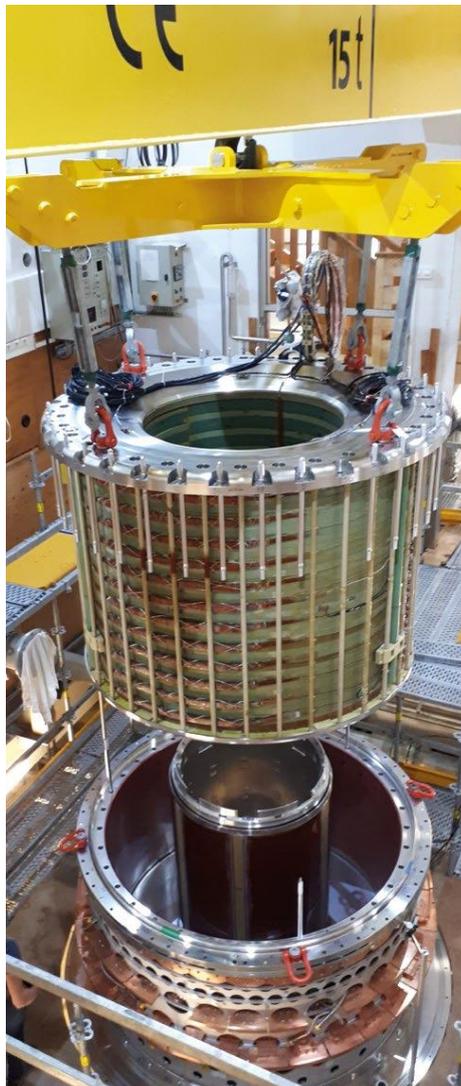
2024 年 11 月 8 日，法国国家磁场实验室（LNCMI，CNRS）的 Equipex LASUP 实现了其目标之一：该团队在一个内径为 34 毫米的线圈中产生了持续约 10 分钟的 42 T 连续磁场。这一成果是多年辛勤工作的成果，意味着 LNCMI 与美国 Tallahassee、中国合肥一起，跻身全球能够提供 40 T 以上磁场的实验室之列。美国和中国可以在直径 32 毫米的空间中进行约 45 T 的实验。

格勒诺布尔磁体将在几个月后向 EMFL 用户开放。它将使需要超强磁场的研究团队能够开展实验。如今，如此强的磁场对于研究信息技术、磁共振成像、

能源材料（电池、太阳能电池板等）和量子技术领域的先进材料至关重要。

该混合磁体经过优化，可减少碳足迹，采用内径 1100 毫米（8.5 T）的超导部分和电阻部分（33.5 T）。电阻磁体受益于 LNCMI 的长期专业知识，尤其是在电源方面，由于其能够长时间运行，其在世界上独一无二。此外在冷却方面，混合磁体采用加压超流氦冷却。

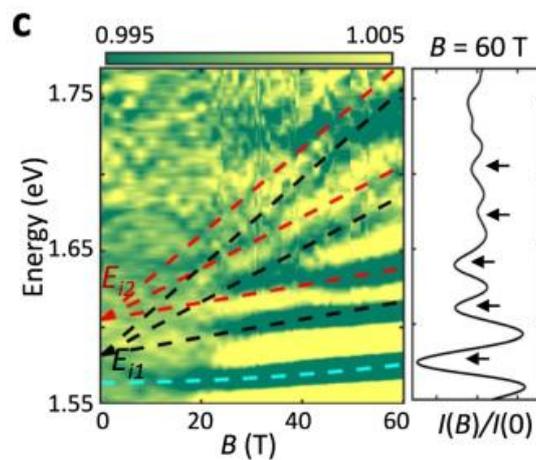
欧洲合作伙伴参与了该项目，包括 CEA Saclay（超导部分设计、超导线圈保护系统）、法国公司 SDMS 和 CRYO DIFFUSION（生产低温恒温器和低温管线）以及德国公司 BRUKER 和 BILFINGER（生产超导电缆和超导线圈）。



3. 日本强磁场实验室

- 探测和调控 In_2Se_3 的墨西哥帽形价带

基于范德华半导体的铁电体是一类新兴材料，可用于从神经形态计算到低功耗电子器件等各种颠覆性技术。然而，关于其电子特性的许多理论预测还有待实验证实和利用。在这里，我们利用纳米级角度分辨光发射电子能谱和强磁场中的光学透射揭示了范德华铁电体 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 的电子能带结构。这种间接带隙半导体具有弱分散价带，其形状就像一顶倒置的墨西哥帽。通过在超高真空中进行热退火， $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 不可逆地转变为 $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$ ，其形态发生了变化。密度泛函理论为实验提供了支持，并揭示了自旋轨道耦合对价带形式的关键贡献。测量到的能带结构及其原位操作为铁电体的精确工程设计及其功能特性提供了超越传统半导体系统的机会。



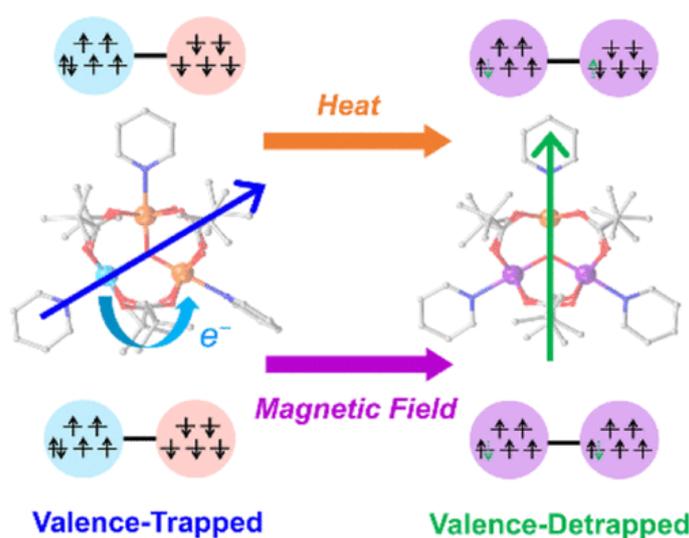
Cite: [James Felton, et al. Nature Comm. 16, 922 \(2025\)](#)

装置：脉冲磁体

- 氧化桥接三核铁配合物中的价阱极化转换

通过外部刺激切换电极化是各种应用的技术基础。在这里，我们报告了在

氧化桥接混合价配合物 $\text{Fe}_3\text{O}(\text{piv})_6(\text{py})_3$ 中观察到的极化转换行为。详细的变温穆斯堡尔谱分析明确证实，在两个不等价的铁位点之间发生了电子定位-脱定位转变。鉴于该化合物在极性空间群中结晶，分子偶极矩的变化导致了在这一转变过程中观察到的热释电效应，表明了热诱导的极化转换行为。由于该复合物的价活泼位点不对称，且它们之间存在反铁磁相互作用，因此我们还根据最近的预测，即在混合价体系中通过磁场调节电子脱局域程度来实现极化转换，讨论了该化合物中磁电耦合的可能性。



Cite: [Wen-Huang Xu, et al. J. Am. Chem. Soc. 147, 5051-5059 \(2025\)](#)

作者信息：一作 Wen-Huang Xu，九州大学博士在读。共同通讯作者吴树旗，清华本硕，九州大学博士毕业。共同通讯作者苏胜群，长春应化所博士毕业。以上三人目前均在九州大学佐藤组工作学习。

装置：脉冲磁体

4. 武汉脉冲强磁场实验室

● 多铁性材料中的拓扑磁电开关效应

磁电研究迄今已有 60 多年历史，其进程大致分为两个阶段：前 50 年以线

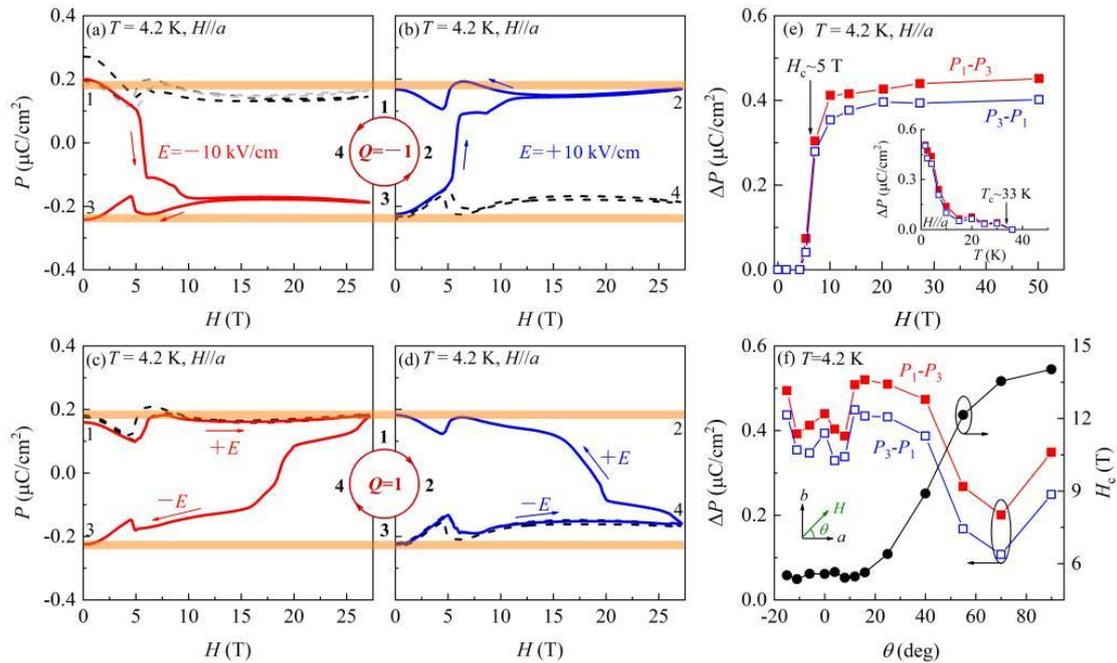


性磁电耦合为主，近 20 年集中在高阶磁电方面，特别是微观机制研究成果突出。在此过程中，拓扑物理飞速发展，与许多研究方向交叉并取得了系列显著成果，例如拓扑绝缘体、拓扑半金属、拓扑超导体、量子自旋霍尔效应、量子反常霍尔效应以及马约拉纳费米子等，但它与磁电交叉极少，仅在少数几个磁电体系中发现磁性斯格明子等。实际上，作为数学概念的拓扑对物理行为描述并不仅限于动量空间中电子、声子、光子的能带，随着拓扑和铁性系统的整合，实空间的磁、电偶极子也能够显示出拓扑结构。

最近，拓扑物理出现在某些具有拓扑绕数行为特殊磁电过程的多铁性材料中，这将拓扑物理与磁电物理相结合，开启了磁电研究的第三个阶段。从实际应用角度讲，拓扑磁电开关具有特定明确的轨迹，也就意味着人们能够精确控制磁、电偶极矩的状态，使它具有重要的科学研究和潜在的应用价值。然而，多铁性材料因磁相互作用会存在很多自由能极小值，导致磁电耦合翻转等具有很大的随机性，如何精确地控制磁电态是该领域的一大难题。虽然拓扑磁电开关可以解决此问题，但通常情况下它是非常特殊和脆弱的。因此，迫切需要找到一种有效途径来获得更宽工作温区、不受磁场取向限制以及适用于其他材料的拓扑磁电。

围绕于此，合作研究团队提出了一种获取拓扑保护磁电开关的新方案。首先，对 GdMn_2O_5 单晶中的拓扑磁电开关作进一步拓展研究，即利用电场 E 设计 GdMn_2O_5 的势能面，从而产生类似于仅由磁场驱动拓扑保护磁电开关的效果，其优势是可以解除相关磁电态的简并度。实验上，在 H - E 的作用下， GdMn_2O_5 的能量面可以任意调整，磁场 H 不再需要沿着特定的方向，温度 T 也可持续到铁电居里温度点附近 (33 K)，进一步拓展了获得拓扑磁电开关的

窗口。除此之外，通过理论模拟的导向，在 DyMn_2O_5 和 ErMn_2O_5 中也发现了类似于 GdMn_2O_5 的拓扑磁电开关效应，研究表明 4f 电子的磁矩对于降低能量势垒起到至关重要的作用。



Cite: [Haowen Wang et al. Phys. Rev. Lett. 134, 016708 \(2025\)](#)

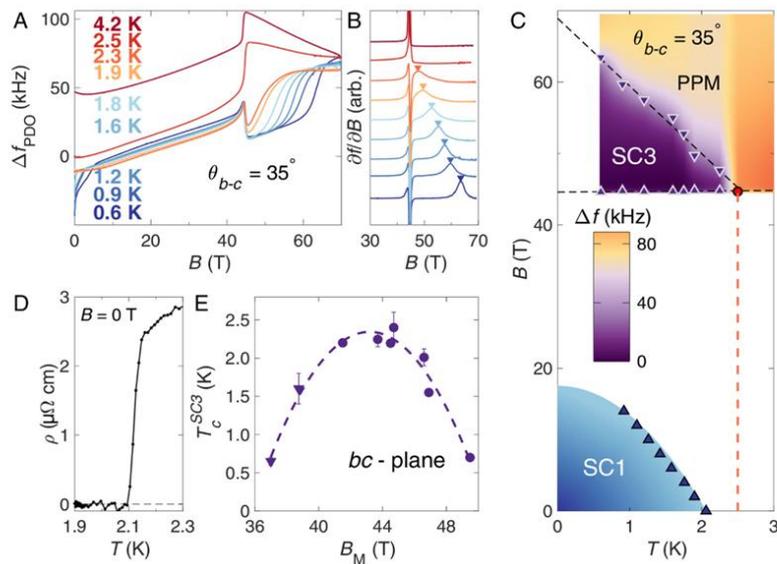
装置：脉冲磁体

● 强磁场下超导临界温度的提升

超导体在临界温度(T_c)以下可以无损耗地传输电荷，但通常情况下，施加磁场会抑制 T_c ，直至 T_c 降至 0K。二碲化铀 (UTe_2) 是一种三重态超导体，表现出许多奇宇称（自旋三重态）超导配对的特征。例如，在所有磁场方向的上临界场强度都超过了泡利破坏极限，且在穿过 T_c 时，其核磁共振奈特位移变化很小，而在强磁场下， UTe_2 展示出两个场诱导的超导态，热力学分析表明这两个超导态与零磁场时的基态超导性不同。

此项研究中，团队使用近邻探测振荡器(PDO)方法，结合中心特制的脉冲

磁场同轴线原位转角测量杆进行非接触式电导测量，通过一系列的变温和转角实验，对磁场在 UTe_2 的 b - c 面内不同方向的超导性质进行测量。研究发现，在高于 40T 强磁场下， UTe_2 的超导临界温度 T_c 约为 2.4K，高于零磁场时纯净样品极限的超导临界温度(2.1K)，表明在强磁场下 UTe_2 超导相的形成机制与零磁场时有本质区别。这种磁场诱导的超导性现象非常罕见，为理解重费米子超导体在极端条件下的行为提供了新的视角，对探索新型超导材料及其机制具有重要意义。该研究通过对 UTe_2 在强磁场下的超导性质进行深入研究，揭示了其在强磁场下独特的超导相变行为，为超导材料研究领域带来了新的发现和启示。



Cite: [Z. Wu et al. PNAS 122, e2422156122 \(2025\)](#)

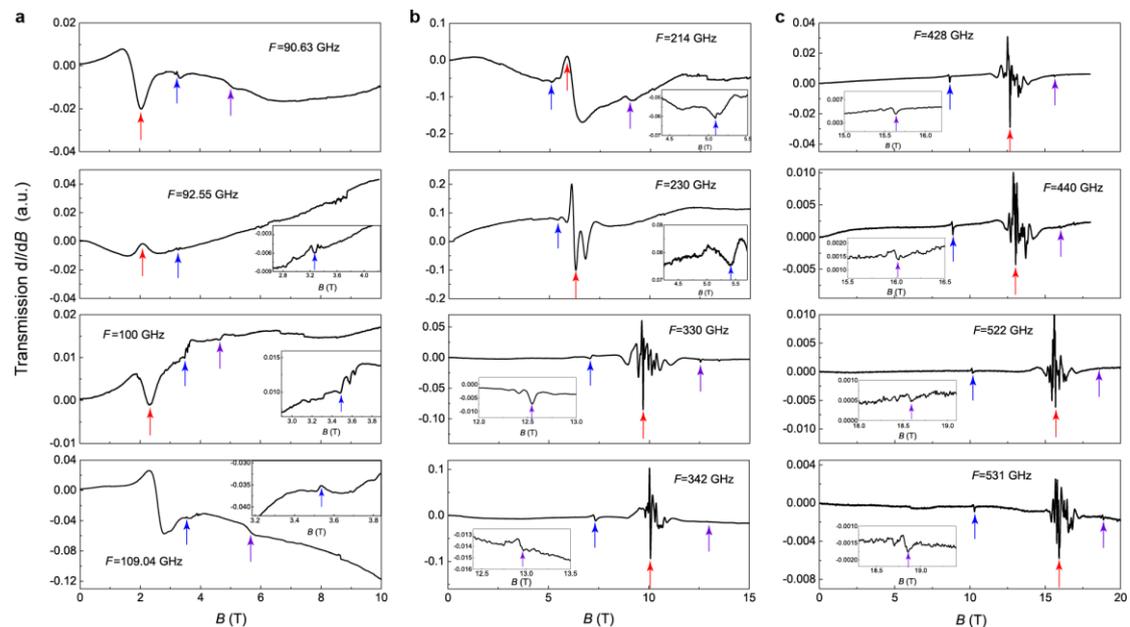
装置：脉冲磁体

5. 合肥稳态强磁场实验室

- 首次直接观测到双磁振子束缚态玻色-爱因斯坦凝聚

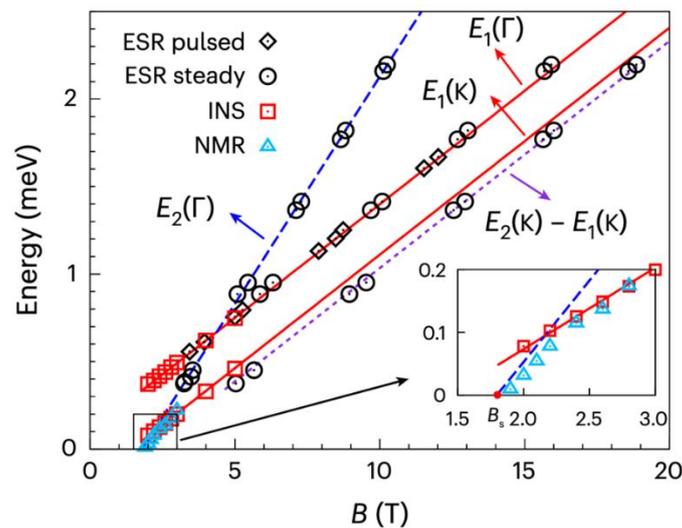
基于费米子配对凝聚形成的超导体是凝聚态物理的重要研究对象。因此，

研究量子材料中准粒子的配对行为以及准粒子对相干而产生的相变，是理解包括超导等宏观量子现象机理的重要基石。与费米子类似，量子材料中自旋的集体激发—自旋波（磁振子）作为玻色子，也可以在温度、磁场等调控手段下发生凝聚相变而产生全新的物态。理论上，双磁振子（two-magnon bound state）配对后，作为一类全新的玻色子集体激发，在量子材料中会与常规的单磁振子共存，并在特定条件下比单磁振子更早地发生凝聚相变，从而产生自旋向列序这一类“隐藏序”。然而，无论是双磁振子凝聚相变，还是自旋向列序，迄今没有直接的实验证据发现它们存在于已知凝聚态体系中。



在此项研究中，吴留锁课题组与梅佳伟、于德洪教授团队合作首先进行了自旋 $S=1$ 三角晶格材料 $\text{Na}_2\text{BaNi}(\text{PO}_4)_2$ 极低温热力学与中子散射的研究。基于实验得到的相图与中子散射数据，汪臻涛课题组建立了相关的微观模型，发现双磁振子束缚态在反铁磁三角晶格模型中可以通过单轴各向异性稳定存在，并定量预言了双磁子束缚态在不同磁场下的能量变化。但是，由于选择定则的存在，双磁振子束缚态在常规的中子散射实验中无法被直接观测到。因此，汪臻涛课题组提出了转角测电子自旋共振（ESR）的方案以克服选择定则，最初

在脉冲场高频 ESR 实验中观测到与中子衍射吻合的单磁振子激发，但始终没有测到双磁振子束缚态；研究团队通过特别的角度设计和 SHMFF 所属稳态 MFHF ESR 的实验测量，从 90GHz 到 531GHz（扫场 0-20T）的一系列频点中顺利观测到了双磁振子束缚态的微小信号，并发现其精确地落在理论预测的能量上，该实验结果为证实双磁振子束缚态的玻色-爱因斯坦凝聚提供了关键的实验证据；并且其随磁场的改变严格按照理论预言，外推至饱和场量子相变点。在王强团队的支持下，通过极低温（低至 30mK）核磁共振实验，吴留锁团队进一步确认了双磁振子束缚态在更低能量下仍然按理论预期发生玻色-爱因斯坦凝聚。这一发现预示着玻色子配对的自旋向列序在该体系的饱和磁场之下存在，为探索新型量子态和复杂相变机制提供了全新视角。



Cite: [Jieming Sheng et al. Nature Mater. 24, 544–551 \(2025\)](#)

装置：水冷磁体（ESR）

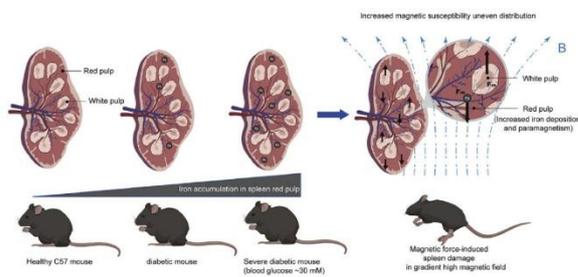
● 生物磁性研究新进展

近年来，人们对磁场作用于生物体的效应与机制研究已取得一系列显著进展，但仍无法完全解释同一磁场在不同生物个体间产生差异性生物学效应的现

象。这表明生物体对磁场的响应可能受到多种复杂因素的影响，包括但不限于个体遗传背景和生理病理状态等。

针对这一问题，张欣课题组从磁性角度对生物体进行了系统研究。通过比较不同生理病理状态下小鼠对磁场的响应，发现铁代谢异常、氧化还原失衡和自由基水平变化是导致生物体内磁性改变及磁场效应差异的关键因素。

铁代谢异常导致生物磁性变化



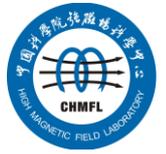
Fund. Res. 2024

自由基和氧化还原异常导致生物磁性变化



Redox. Biol. 2025

研究团队首先利用超导量子干涉仪磁性测量系统，发现严重 1 型糖尿病小鼠的脾脏磁化率较正常组升高约 20%。值得注意的是，脾脏红髓与白髓之间由于铁沉积造成了显著的磁性差异，这种差异直接导致脾脏在梯度强磁场下受力不均，进而造成脾脏损伤，加速了严重糖尿病小鼠的死亡进程，而对正常小鼠的影响则微乎其微【*Fund. Res. 2024*】。研究团队进一步对核因子 E2 相关因子 2 (*nuclear factor erythroid 2-related factor 2, NRF2*)基因敲除小鼠进行了研究，利用超导量子干涉仪和电子顺磁共振测量技术，发现在 *NRF2* 基因敲除小鼠模型中，氧化还原异常不仅导致自由基水平升高，引起组织器官磁性改变，而且由于肝脏和脾脏本身富含铁元素，在芬顿反应等因素的作用下，这两个器官的磁性变化较其他组织更为显著【*Redox. Biol. 2025*】。这一系列发现为理



解生物磁性变化与病理状态的关系提供了新的视角。

Cite: [Ruowen Guo et al. Fundamental Research \(2024\) online](#) ; [Chuanlin](#)

[Feng et al. Redox Biology 81, 103561 \(2025\)](#)

装置: ESR 等