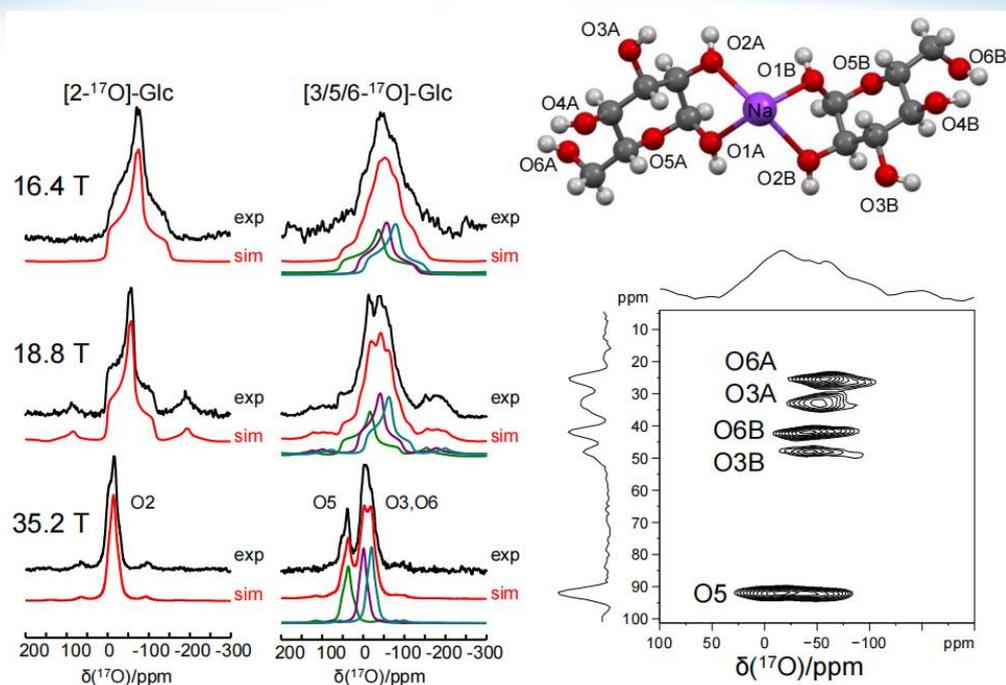


# 国内外强磁场实验室 科研动态

2023 年第二季度



中国科学院强磁场科学中心

2023/7/18



# 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

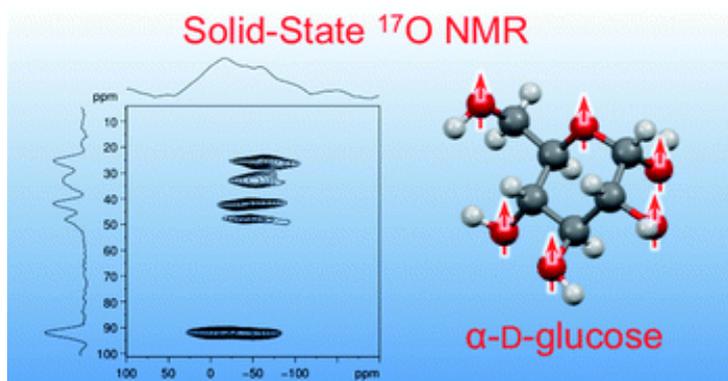
## 1. 美国国家强磁场实验室

### ● 用于有机和生物分子研究的固态 $^{17}\text{O}$ NMR

有机和生物分子可以被认为是由四种类型的碎片（氢、碳、氮和氧）制成的拼图游戏。虽然氧是有机和生物分子的关键成分，但  $^{17}\text{O}$  在很大程度上仍然对NMR“不可见”。在MagLab，研究人员正在努力使这些氧原子对核磁共振“可见”，从而为生物分子核磁共振光谱提供“最后一块拼图”。

MagLab 用户开发了一种合成策略，以位点特异性方式将  $^{17}\text{O}$  标记引入 D-葡萄糖分子中，然后应用最先进的核磁共振技术来获得一套完整的  $^{17}\text{O}$  NMR 参数。这是首次获得碳水化合物的完整  $^{17}\text{O}$  NMR 参数。

概括地说，这项工作将  $^{17}\text{O}$  NMR 添加到化学家可用的“NMR 工具箱”中，用于研究各种感兴趣的含氧材料，包括有机和生物分子。



通讯作者 Gang Wu 和一作 Jiahui Shen 都来自加拿大女王大学。

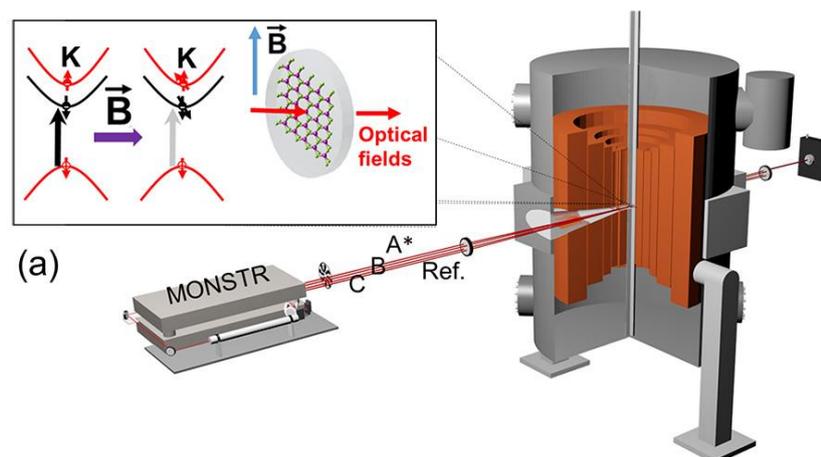
Cite: [\*Jiahui Shen et al. Chem. Sci. 13, 2591-2603 \(2022\)\*](#)

装置：串联混合磁体，NMR

## ● 磁场驱动亮暗激子的相干耦合

许多二维材料自然形成原子薄层，它们的应用范围从发光器件和显示器到电子设备，再到太阳能电池。了解它们在极端条件下的光学特性对于理解它们在潜在应用中的行为非常重要。特别是，了解“暗”特性如何影响所需的光发射和“亮”特性的相干性对于在为新应用（如量子信息技术）中设计器件时至关重要。

该实验探索了一种重要的原子薄二维材料——过渡金属二硫化物，并发现虽然暗激子不具有光学响应性，但它们在磁场驱动下确实与亮激子相互作用，从而影响亮激子的寿命和相干性。



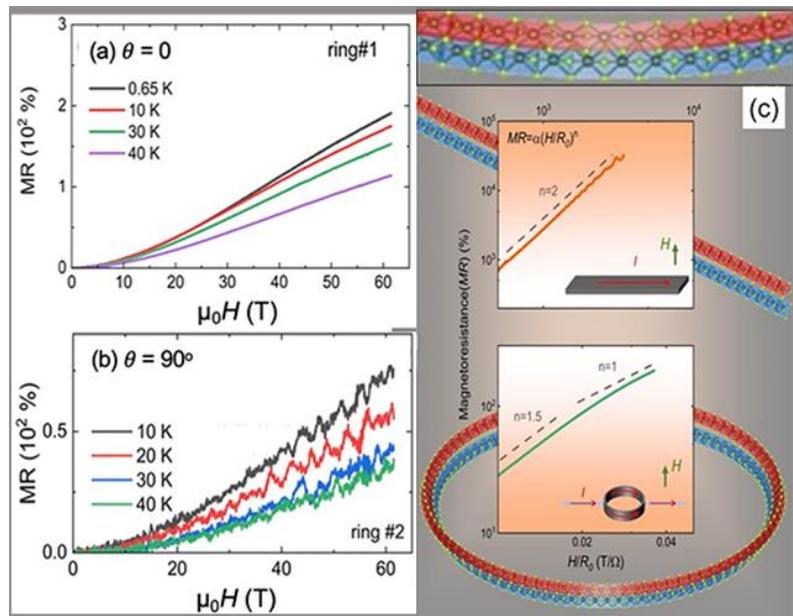
*Cite: V. Mapara et al. Nano Lett. 22, 1680–1687 (2022)*

装置：25T 分裂水冷磁体

## ● 应力调制 TaSe<sub>3</sub> 的拓扑特性

磁阻的行为（包括磁场依赖关系及量子振荡）被称为拓扑的量子力学特性的关键指标。通过测量 TaSe<sub>3</sub> 晶体制成的环形器件在高达 60T 的磁场中的磁阻，获得了不同温度下独特的曲率，显示出磁场引起的量子振荡，证明应变可用于调制低维材料的拓扑性质。这一结果非常重要，因为它表明 TaSe<sub>3</sub> 中电子的量

量子力学行为的巨大变化可能是由微小的应变引起的，这表明了一条通往高灵敏的传感器和器件的新途径。



通讯作者 Rongying Jin 1997 年在瑞士苏黎世联邦理工学院物理专业取得博士学位。曾就职美国路易斯安那州立大学物理系，现任南卡罗来纳大学物理与天文系教授。主要研究领域包括非常规超导电性、低维材料、磁性材料、拓扑绝缘体以及其他新型量子材料。在 Nature、Science 等高水平期刊上发表多篇论文，H 因子高达 42。此外，她还担任美国能源部、中国自然科学基金等的评审工作，获得了 APS Fellow 等多项荣誉。曾于 2015 年访问中科院强磁场中心。一作 Jie Xing 为该组博士后，本科和博士毕业于南京大学。

Cite: [J. Xing et al. Adv. Quantum Tech. 5, 2200094 \(2022\)](#)

装置：脉冲磁体

#### ● 用于脉冲磁体的高强度 Cu-Cr-Zr 导体

Cu-Cr-Zr 导体可在市场上买到，但它们不适合用于脉冲磁体，因为它们缺乏必要的强度和导电率组合：导电率大于纯铜的 80%，强度大于汽车车身面板

中的钢。这两种属性往往会相互竞争，难以同时达到要求。MagLab 研究人员找到了一种将老化和冷拔结合起来的方法，以优化纳米级颗粒的尺寸和分布，并使导体在室温和低温下表现出优异的性能。

本文通讯作者 Ke Han 是 NHMFL “材料开发与表征” 组长，研究方向为强磁场高强度材料及原料，一作 Rongmei Niu 是该组副研究员。



Cite: [\*R. Niu et al. IEEE Trans. Appl. Supercond. 32, 4300405 \(2022\)\*](#)

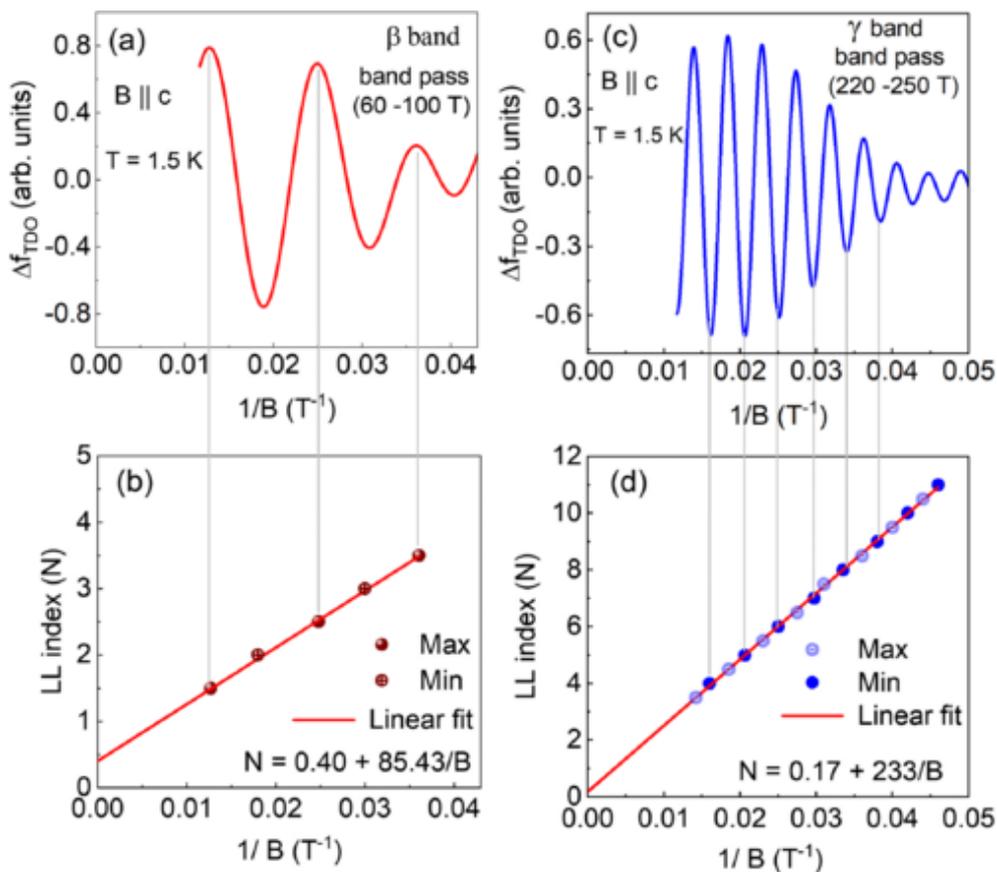
## 2. 欧洲强磁场实验室

### ● KAGOME 超导体 $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$ 的磁击穿和拓扑

最近发现的 kagome 晶格化合物  $\text{AV}_3\text{Sb}_5$  ( $A = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$ ) 显示出超导性、电荷密度波 (CDW) 和电子能带结构的非平庸拓扑之间令人着迷的相互作用。CDW 级数本身是非常规的，因为手性电荷级数的存在和时间反转对称性破缺会导致大的异常霍尔效应和非互易输运。进入 CDW 态的转变伴随着费米面的广泛重建。虽然角分辨光发射光谱 (ARPES) 在探索电子结构方面具有不可估

量的价值，但基质元素的影响在很大程度上阻碍了重建能带结构的可视化。相比之下，量子振荡是费米面的直接表现，可以揭示有关准粒子有效质量、寿命和拓扑状态的信息。

法国脉冲场的用户使用隧道二极管振荡器技术在高达 86 T 的磁场中对高质量 CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> 单晶进行了量子振荡测量，揭示了一系列磁击穿轨道并构建了 CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub> 折叠费米面的模型。值得注意的是，这些费米面片尚未在 ARPES 中检测到。除了绘制这个折叠费米面，我们还从量子极限附近的朗道能级扇形图中提取了电子轨道的贝里相，而无需外推，从而明确地建立了该图中几个电子带的非平庸拓扑特征。



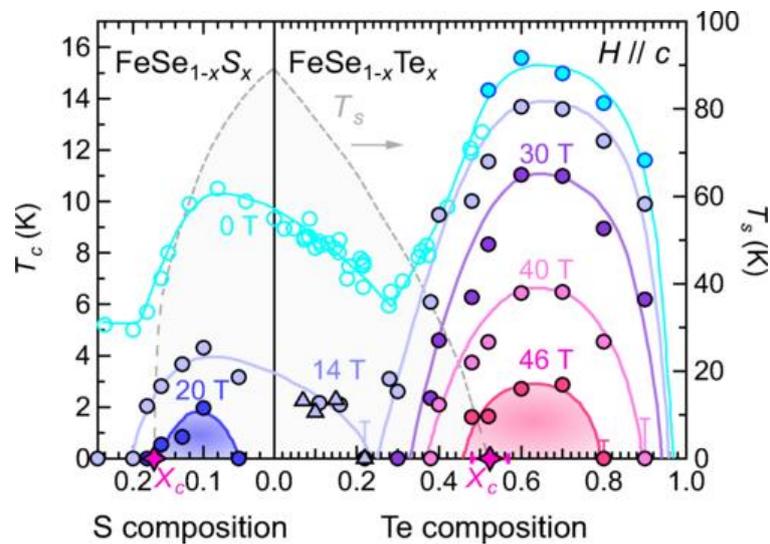
Cite: [R. Chapai, et al. Phys. Rev. Lett. 130, 126401 \(2023\)](#)

装置：脉冲磁体

## ● 纯向列量子临界点附近增强的超导配对

高温超导是凝聚态物理中尚未解决的最大问题之一，因为它具有非常规的超导配对机制，超越了标准的电-声子相互作用。许多具有这种非常规超导态的材料通常具有与超导态竞争和/或共存的附加反铁磁 (AFM) 相。有趣的是，超导转变温度  $T_c$  在 AFM 量子临界点 (QCP) 附近经常会升高。这种相关性使人们坚信，AFM 量子临界涨落在非常规超导体的超导配对中起着决定性作用。

荷兰强磁场的研究人员首次表明，类似的  $T_c$  升高也发生在纯向列 QCP 附近。这项研究是在铁基超导体  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  和  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  上进行的，它们的独特之处在于超导性是从纯电子向列相中产生的，这是一种打破旋转对称性同时保持平移对称性的特殊态。 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  和  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  的  $T_c$  值分别通过高达 35 T (荷兰) 和 60 T (日本) 的强磁场中的电阻率测量来确定。



根据确定的  $T_c$ ，研究人员成功构建了针对不同场强的  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  和  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  的组合  $T_c$  与  $x$  相图。对于零场， $T_c$  在整个测量的  $x$  范围内保持有限，在各自的向列 QCP 处没有明显升高 ( $x_c = 0.16$  和  $0.50$ )。由于这种行为，长期以来人们一直认为，与 AFM QCP 相比，向列 QCP 对  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  和  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  的超导性影响很小或没有影响。然而，我们的测量表明，强磁场的施加会导致

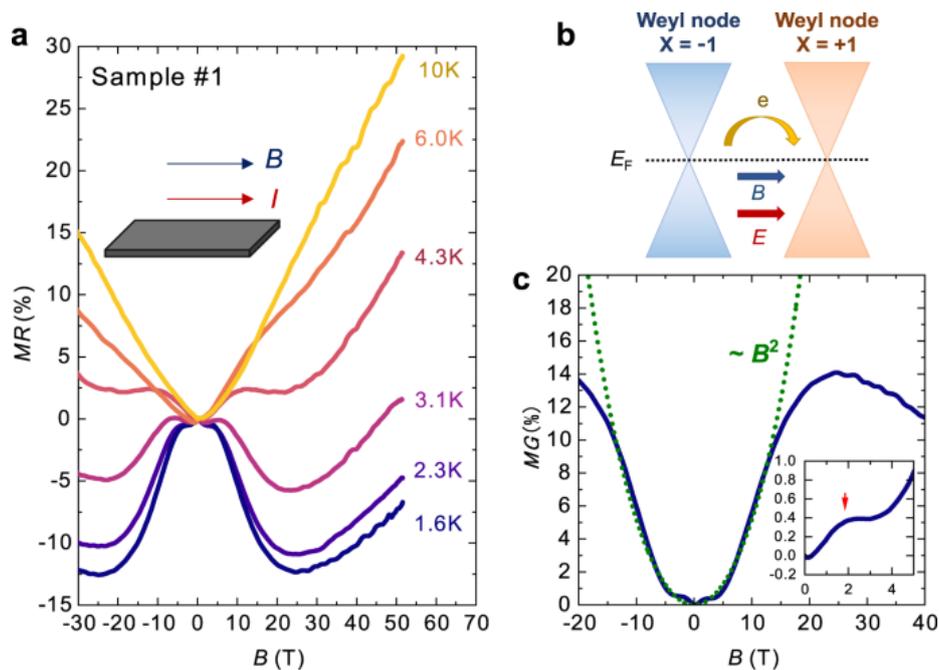
$T_c$  受到抑制，从而出现两个不同的 SC 圆顶，其中  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  的圆顶中心位于  $x_c \approx 0.50$ ，正是向列 QCP 发生的位置。这种行为表明，与之前的预期相反，向列量子临界涨落实际上可能在  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  的超导配对机制中发挥主导作用。

Cite: [M. Saito, et al. Phys. Rev. X 13, 011032 \(2023\)](#)

装置：水冷磁体，脉冲磁体

### 3. 日本强磁场实验室

- 具有相对论费米子的相关驱动有机 3D 拓扑绝缘体



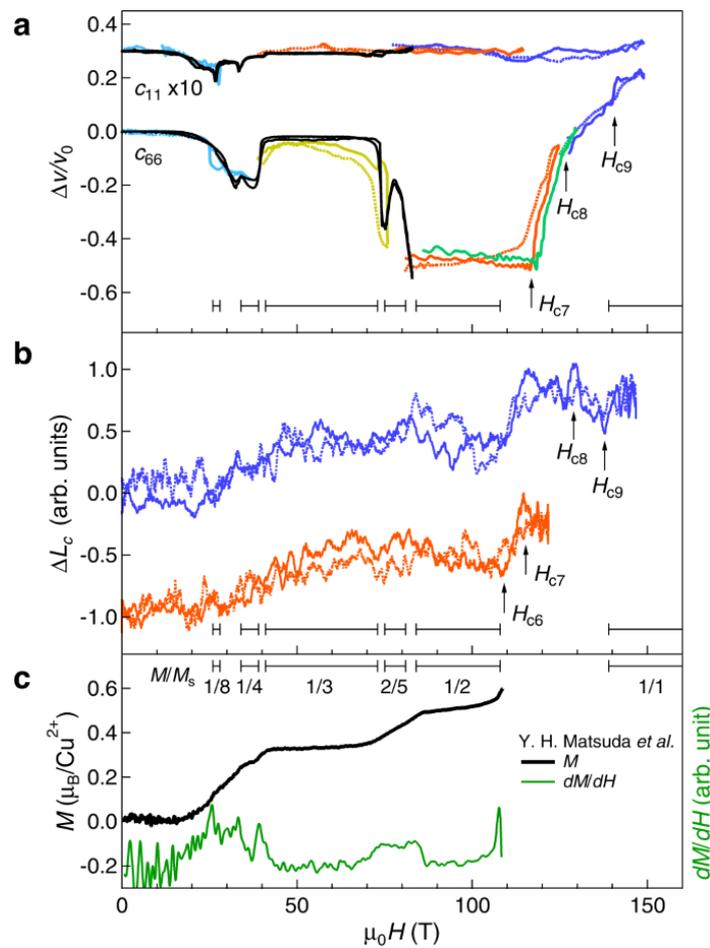
探索由强电子关联引起的新拓扑现象和功能一直是现代凝聚态物理学的中心问题。一个例子是拓扑绝缘体 (TI) 态及其功能由库仑斥力而不是自旋轨道耦合驱动。我们报告了在有机零能隙系统  $\alpha\text{-(BETS)}_2\text{I}_3$  中实现的“相关驱动” TI 态。在电阻的温度和磁场依赖性中观察到拓扑表面态和手性异常，表明低温下的三维 TI 态。此外，我们观察到直流电流在 TI 态和非平衡狄拉克半金属态之

间的拓扑相切换，这是相关驱动 TI 态的独特功能。研究结果表明，相关驱动的 TI 不仅是实用电子设备的有前途的候选者，而且也是发现新拓扑现象的领域。

*Cite: Tetsuya Nomoto, et al. Nature Comm. 14, 2130 (2023)*

装置：脉冲磁体

### ● 揭示 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ 中达到饱和磁场的量子相



在磁场下，量子磁体经常经历各种有序的奇异相变。Shastry-Sutherland 化合物  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  中一系列分数磁化平台的发现在量子材料的高场研究中发挥了核心作用，但迄今为止该系统只能探测到饱和值的一半的磁化强度。在东大强磁场实验室，研究人员报告了该化合物在 140 T 及以上饱和磁场下的首次实验和理论研究。使用超声波和磁致伸缩技术结合广泛的张量网络计算 (iPEPS),

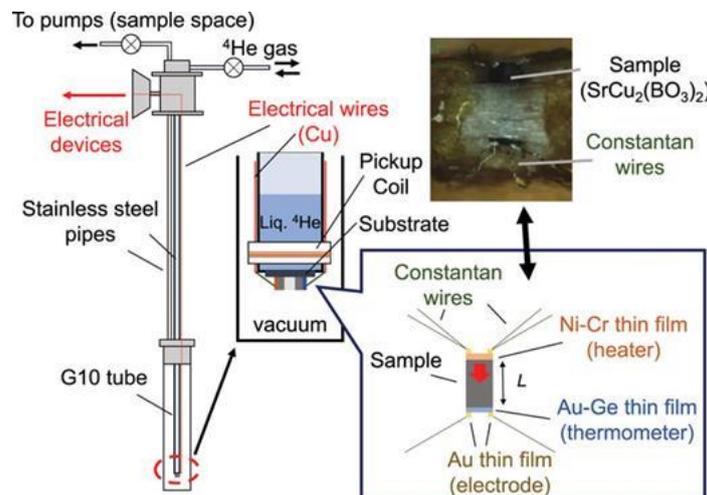
在  $1/2$  平台和饱和 ( $1/1$  平台) 之间揭示了几个自旋超固相。相当引人注目的是,  $1/2$  平台的声速急剧下降-50%, 这与棋盘型磁振子晶体的四方到正交的不稳定性有关。这一范式量子系统的揭开本质是探索极端条件下出现的奇异物质量子态的一个新里程碑。

*Cite: T. Nomura, et al. Nature Comm. 14, 3769 (2023)*

装置: 脉冲磁体

### ● 同步测量脉冲磁场中的比热和导热系数

东大强磁场实验室报告了一种实验装置, 用于在低温下同步测量持续 50 毫秒的反馈控制平顶脉冲磁场中的比热和导热率。该装置可在 37.2 T 下 22-16 K 温度范围内获得热物性绝对值。通过对几何阻挫量子自旋二聚体系统  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  的单晶样品的测量来验证本方法的性能。结果与使用标准稳态方法获取的数据非常一致。

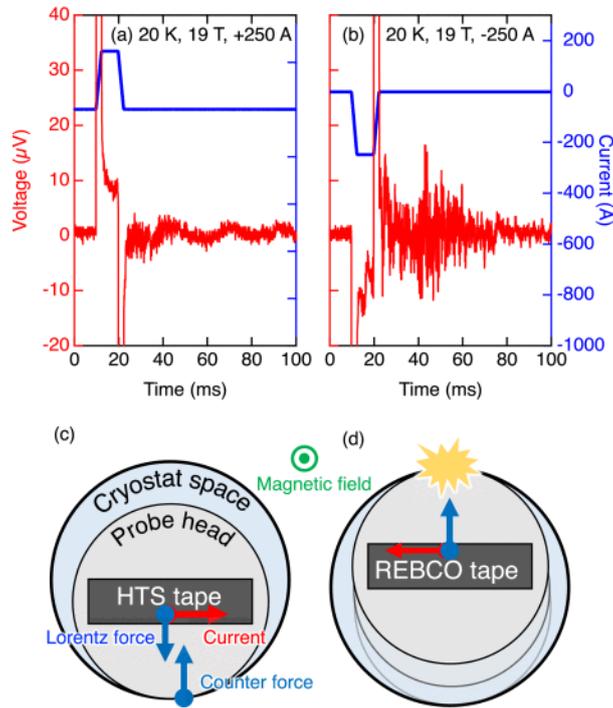


作者之一董超现任武汉脉冲强磁场中心工程师。

*Cite: T. Nomoto, et al. Rev. Sci. Instrum. 94, 054901 (2023)*

装置: 脉冲磁体

● 在低温高场中使用脉冲电流测量高温超导带的临界电流



高温超导 (HTS) 带材一直是各种应用深入研究的主题。除了在液氮冷却的高温下使用外，它们预计还可用于低温下 30T 或更高的超高磁场磁体，以及中间温度范围的紧凑型聚变反应堆和旋转机械。每家公司在提高高温超导带的临界电流方面都取得了重大进展，因此需要开发具有可变温度和高电流的测试设施，例如 2000 A 和 20 T 级的测试设施。通常，稳定电流用于临界电流测量。在本研究中，我们重点关注脉冲电流测量，以便在强磁场的有限空间内执行高电流的临界电流测量。制作了低电感探针，并使用 500 A 级脉冲电源对样品施加 2-10 ms 的梯形脉冲电流。使用高分辨率隔离示波器记录样品的电流和电压。通过将该系统与 20 T 无制冷剂超导磁体和 He 流低温恒温器集成，在 4 K 至 77 K 的温度和高达 19 T 的磁场下测量了 4 mm 宽的市售 HTS 带的临界电流。洛伦兹力导致探头振荡，通过固定电压引线并改变探头上洛伦兹力的方向，在 19 T、500 A 条件下，噪声降低至 0.6 μV。对以脉冲电流和稳态电流为特征的 HTS REBCO 带中临界电流的场依赖性进行了比较，并确定它们是等效的。

Cite: Y. Tsuchiya, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond. 33, 8001105 (2023)

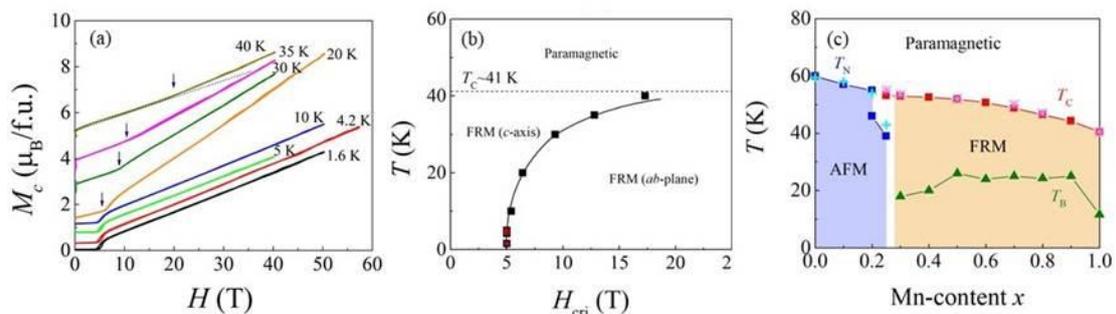
装置: 超导磁体

## 4. 武汉脉冲强磁场科学中心

### ● 极性磁体磁性调控研究

磁电效应蕴含丰富的多重量子序耦合与调控物理，是凝聚态物理研究的前沿阵地。近年来，极性磁体  $\text{Fe}_2\text{Mn}_3\text{O}_8$  家族因表现出巨大的线性磁电和热霍尔效应等新颖物性而备受关注，并且这些现象都与其中的磁结构密切相关。

该工作结合脉冲和稳态磁场测量技术，深入研究了  $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  中引入磁性  $\text{Mn}^{2+}$  离子产生的显著磁性调控行为。研究发现， $(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  体系中 Mn 取代 ( $x=0.25$ ) 可以改变系统的磁基态，即由  $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  类型的反铁磁基态转变为  $\text{Mn}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  类型的亚铁磁基态，且自旋诱导的电极化 ( $\Delta P \sim 1000 \mu\text{C}/\text{m}^2$ ) 在所有组分样品中普遍存在。同时，亚铁磁态的样品 ( $0.3 \leq x \leq 1$ ) 表现出矩形磁滞回线，其中的剩余磁化强度和矫顽场显著依赖于 Mn 含量以及样品温度。 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  中磁性质的变化可能与其中反铁磁和亚铁磁序的共存与竞争相关。



Cite: [\*Yuting Chang et al. ACS Appl. Mater. Interfaces 15, 22204–22211 \(2023\)\*](#)

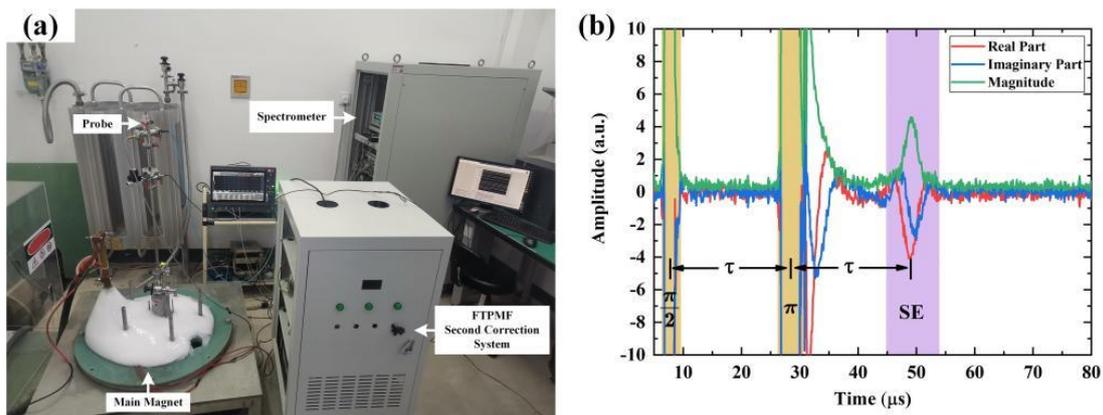
装置：脉冲磁体

### ● 平顶脉冲强磁场核磁共振谱仪技术进展

强磁场是支撑物理、化学、材料等领域前沿基础研究重要的极端实验条件，能够影响物质的电子态和量子化，进而探测特殊体系的奇异性质，且磁场强度越高，科学发现机遇越大。目前国际上非破坏性脉冲磁体可实现的最高磁场已达 100 特斯拉 (T)，但由于其固有的时变性与暂态性，难以开展核磁共振 (NMR)、比热、I-V 曲线等磁场需稳定持续一定时长条件的高精度测量实验，亟需发展新的强磁场技术。平顶脉冲磁场是一种特殊的时变磁场，兼具磁场强度高和稳定度高的双重优点，使得以前只能在稳态强磁场下的科学测试成为可能，也为强磁场科学研究提供了一种新的磁场环境。以 NMR 为例，其在凝聚态物理、生命科学以及医学成像等诸多领域具有广泛应用，是解析微观结构的主要手段之一。脉冲强磁场核磁共振测量 (PMF-NMR) 技术具有脉冲强磁场物性调控能力和核磁共振原子级微观探测能力，有望为发现新现象、提出新原理和合成新材料带来新的机遇，但现有 PMF-NMR 都是在变化磁场下开展的测量，存在场频精确同步共振困难、信号谱线畸变严重、商用 NMR 谱仪难以满足高频宽带应用需求等问题，难以有效开展相应科学研究。

在此背景下，韩小涛教授团队依托脉冲强磁场实验装置，进一步发展了平顶脉冲强磁场技术，在国际上率先提出平顶脉冲强磁场核磁共振谱仪方案 (FTPMF-NMR)，发明了“场路耦合-线性反馈”磁场波形调控方法，解决了

脉冲强磁场非线性时变高稳定度波形调控难题，成功实现了峰值 45.199T、平顶持续时间 8ms、平顶区间磁场波动 $\pm 5\text{mT}$ （稳定度约 110ppm）的高稳定度平顶脉冲磁场；团队自主研制了 NMR 谱仪射频链路关键器件与分层控制交互程序，实现收/发频率 1GHz、实时带宽 20MHz、双端隔离度 100dB 的高频宽带模块化 NMR 谱仪。团队在此基础上搭建了相应科学实验平台，并在 40T 平顶磁场下实现了  $^{93}\text{Nb}$  核的 NMR 信号测量，为超强脉冲磁场下的 NMR 科学测量奠定了坚实基础。FTPMF-NMR 技术将为强磁场下前沿科学研究提供新的测试手段，支撑高温超导机理、重费米子材料的量子临界点、量子自旋系统的基态和相变等前沿基础研究，对于解决相关领域重大科学问题具有重要意义。



Cite: [Wenqi Wei et al. IEEE Trans. Instru. Meas. 72, 6004309 \(2023\)](#); [Le Yuan et al. IEEE Trans. Instru. Meas. 72, 6004109 \(2023\)](#)

装置：脉冲磁体

- **国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项“脉冲强磁场下微结构的能态及动力学响应表征技术”项目启动**

“脉冲强磁场下微结构的能态及动力学响应表征技术”是国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项于 2022 年立项的项目，由华中科技大学

牵头，厦门大学、武汉大学、山东大学、北京航空航天大学 and 南京大学共同承担。项目依托脉冲强磁场大科学装置，以发展后摩尔时代微型化、低能耗磁-光-电功能器件这一重要科学问题为牵引，针对国内外科研单位对超强磁场下微结构和微器件物态调控研究的巨大需求，发展脉冲强磁场下多样性、高灵敏度和高时空分辨能力的先进光学测量技术，研制脉冲强磁场下针对微结构和微纳器件的一系列先进光学测量系统，将大幅提升我国脉冲强磁场大科学装置的服务效能，助力我国在后摩尔时代新材料、新物态、新型器件等方面的研究取得重要突破。



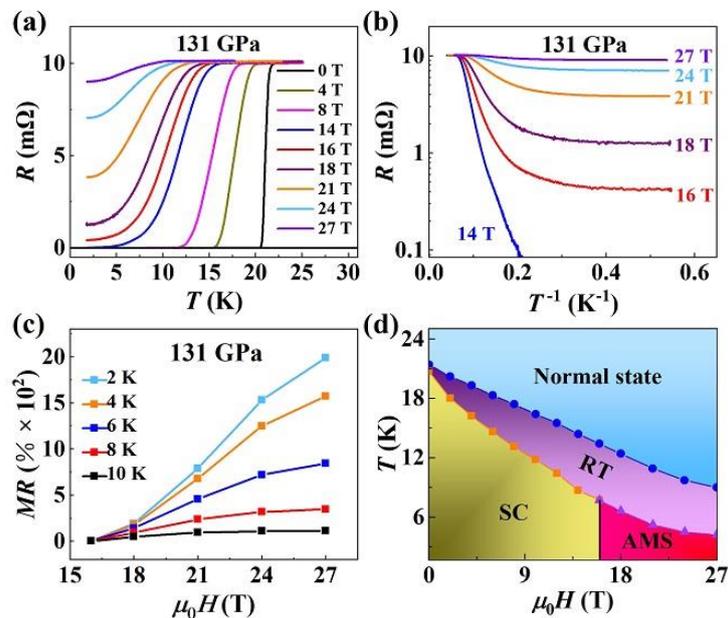
## 5. 中科院强磁场科学中心

### ● SHMFF 用户在强磁场超高压下探索金属单质钛的新物态

费米液体理论是物理学领域的基础理论之一，成功描述了金属在低温条件下的输运行为。然而，反常金属态的行为违背了这一传统的金属输运理论。反常金属态最初是在二维无序体系中被发现，后续相关研究主要集中在二维材料

上。迄今为止，三维系统中的反常金属态行为鲜见报道，这在一定程度上阻碍了人们对其内在机制的深入研究。

本工作中，该研究团队在高度压缩的三维金属钛中观测到反常金属态。在 135 GPa 的压强下，单质钛的超导转变温度高达 25.1 K；在强的外磁场下，金属钛的电阻在超导转变温度附近出现骤降，但是在低温下饱和在一个定值，并且展现了巨磁电阻效应，这些反常的输运行为揭示了超导态至反常金属态的转变。另外，该团队构建了单质钛在超高压下的温度-磁场相图，展示了正常态、超导态和反常金属态之间的转变，这与传统的三维超导体不同。在传统的二维体系中，电子关联、无序、量子限域效应等因素引起的复杂行为可能与反常金属态共存并相互影响，阻碍了对机制的理解。三维单质钛提供了一个简单的材料平台，对于拓展反常金属态的研究领域和推进对其物理机制的理解具有重要意义。

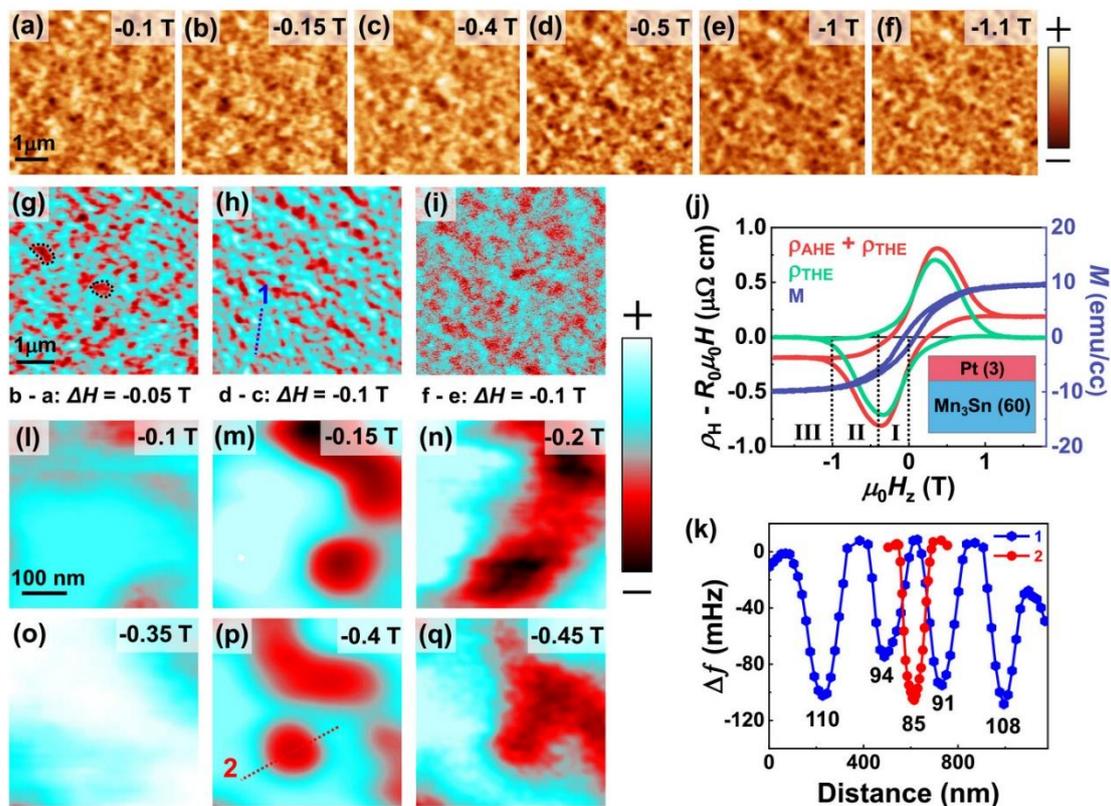


Cite: [Kui Wang et al. PNAS 120, e2218856120 \(2023\)](#)

装置：水冷磁体

## ● SHMFF 用户在反铁磁拓扑磁结构方面的研究

ChatGPT 等人工智能的崛起吸引了众多关注，其核心硬件基础是大型数据中心，他们的进一步发展依赖于“更小”、“更快”、“更冷”的新型磁存储器的突破。反铁磁材料因具有抗外磁场性强、超快响应速度、杂散场低等优点，被视为下一代高速、高密度磁存储理想材料。鉴于反铁磁净磁矩为零且磁结构演变较复杂，如何实现反铁磁中磁结构，尤其是对斯格明子等新颖拓扑纳米磁存储单元的实空间观测和调控研究是当前自旋电子学领域的重要研究前沿。



在本工作中，研究团队在 Mn<sub>3</sub>Sn/Pt 异质结构中，通过界面 Dzyaloshinskii–Moriya 相互作用的调控，诱导出可观的拓扑霍尔效应。更重要的是，MFM 实空间成像直接论证了室温斯格明子的存在，并给出了尺寸、密度等重要信息以及斯格明子完整的成核、演变、湮灭过程。更进一步，MFM 结果配合第一性原理 Monte Carlo 模拟确定其自旋构型为 Bloch 型，并发现了温



度诱导的斯格明子-反铁磁类半子 (meron-like) 的拓扑自旋构型转变, 确定其机制为反铁磁交换相互作用的温度依赖。该工作为基于反铁磁材料体系的斯格明子自旋电子学器件的搭建提供了理论基础和应用方向。

*Cite: [Xionghua Liu et al. Adv. Mater. 35, 2211634 \(2023\)](#)*

装置: 超导磁体