

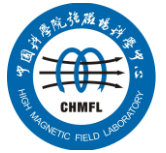
国内外强磁场实验室 科研动态

2021 年第四季度



中国科学院强磁场科学中心

2022/1/14



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

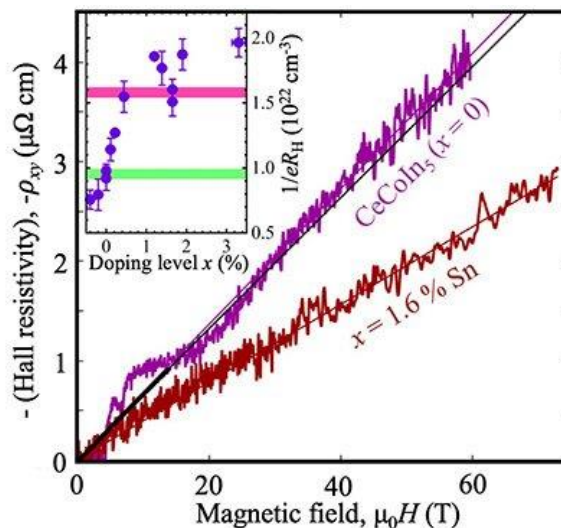
中国科学院强磁场科学中心位于合肥科学岛，其建设的稳态强磁场实验装置 2017 年通过国家验收，是世界上仅有的两个稳态磁场超过 40T 的实验室之一。稳态强磁场实验装置有 3 台水冷磁体创造世界纪录，混合磁体最高磁场达到 42.9T，磁体技术和综合性能处于国际领先地位。

科 研 动 态

1. 美国国家强磁场实验室

● 非常规超导的高场霍尔数据

CeCoIn₅ 与高温超导铜酸盐有许多相似之处，包括晶体结构、输运特性和非常规超导性。用户使用 73T 脉冲磁体，进入了铜酸盐无法到达的高场区，通过高质量的霍尔效应测量发现量子相变的明确证据。



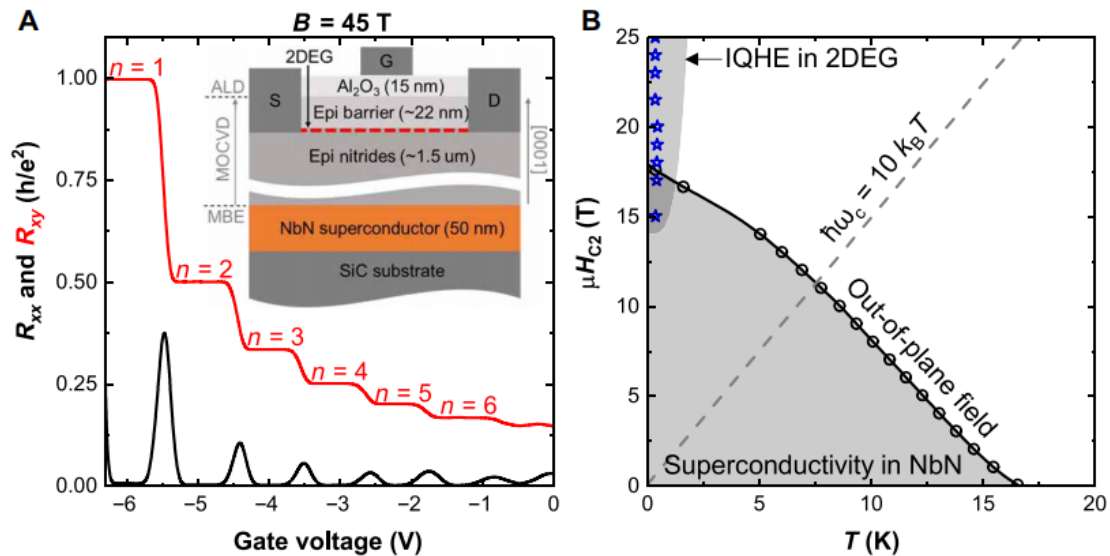
Cite: [N. Maksimovic, et al. Science 375, 76–81 \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体

● 氮化物材料中的量子新现象

研究人员测量了两种传统材料：GaN（半导体）和 NbN（超导体）相结合的新器件结构，其在强磁场中同时表现出通常不共存的两种量子态——量子霍尔态和超导电性。

这种方法的一个挑战是，半导体中的量子霍尔态通常需要强磁场，但超导在强磁场中会被压制，这使得共存变得困难。通过强磁场实验证明这种氮化物结构可以同时承载这两种现象。氮化物体系是应用最广泛和最成熟的半导体之一，因此，该研究对量子计算应用非常有吸引力。



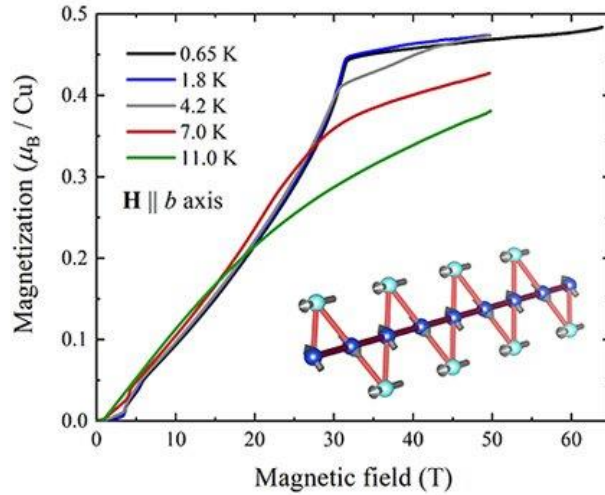
Cite: [P. Dang, et al. Sci. Adv. 7, eabf1388 \(2021\)](#)

装置：混合磁体

● 红铜矿中不寻常的高场态

红铜矿 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 是一种“阻挫”量子磁体。在这种阻挫的系统中，可能会出现许多复杂而新颖的磁态，例如量子自旋液体和磁化平台。识别和表征阻挫磁体对于了解尚未发现的新物质状态背后的机制至关重要。

强磁场下的磁化率测量发现与理论预测有偏差：虽然确实发现了一个高于 31.5 T 的平台区域，但该平台比预期要宽得多，并且出现在意想不到的磁场范围。

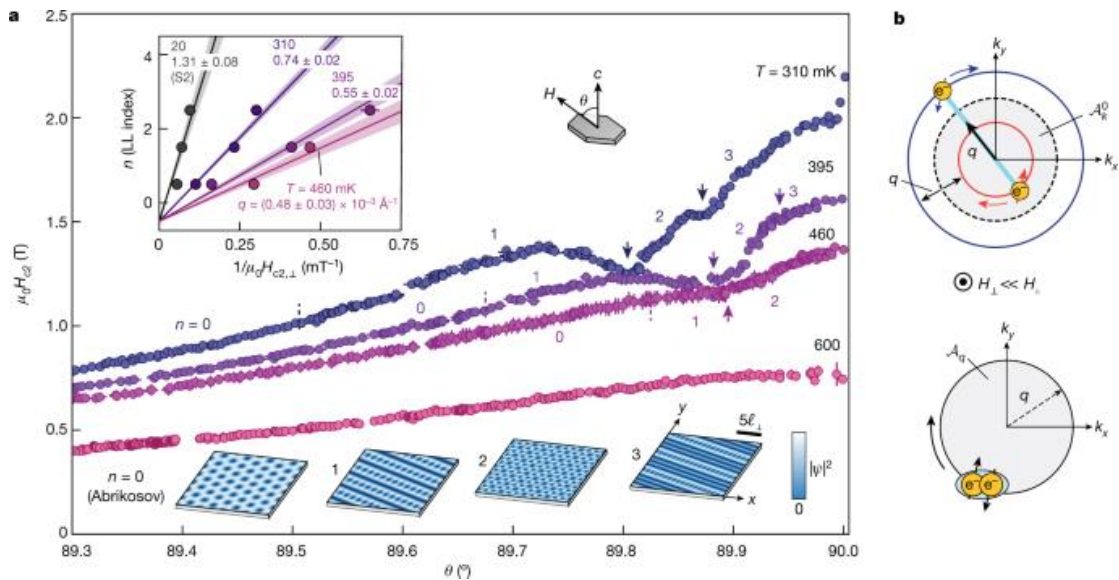


Cite: *L. Heinze et al. Phys. Rev. Lett. 126, 207201 (2021)*

装置：脉冲磁体

● 有限动量超导体中玻色子朗道能级的特征

MagLab 用户在一种新材料中展示了一种奇异的超导性形式——有限动量超导。这种超导最早于 1960 年代提出，但一直被认为是不稳定的。



虽然超导性通常会被磁场破坏，但有限动量超导体可以通过形成富集/缺乏库珀对的区域来维持存在。事实证明，当库珀对在量子力学轨道之间移动时，

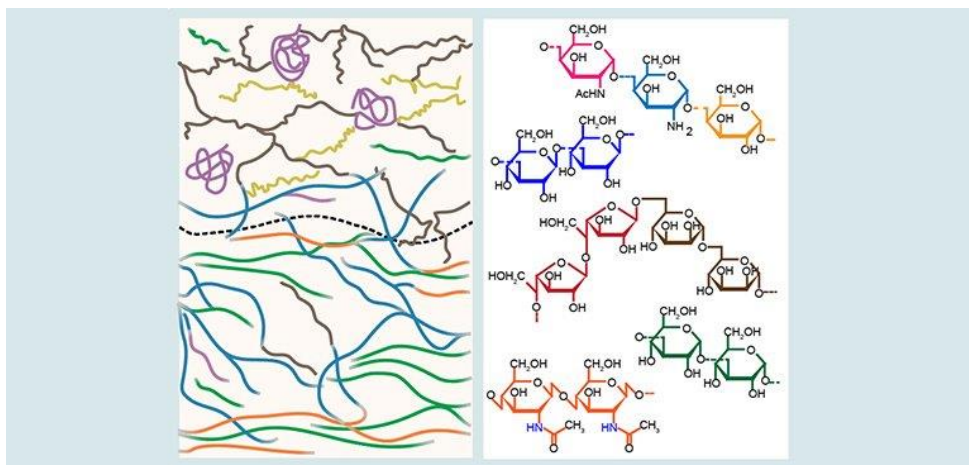
这种超导体可以被调控形成各种不同模式。这意味着可以在同一种材料中创造出不同的超导模式。

研究所用的样品也非同寻常，是将原子尺度的超薄层叠起来，中间加上间隔层保护而制得的大块样品，可以完美保持二维体系的性质。

Cite: A. Devarakonda et al. Nature 599, 51–56 (2021)

● 真菌如何构建它们的碳水化合物盔甲

在 MagLab 的 800 MHz NMR 磁体和 HCN 探针的帮助下，用户团队研究了烟曲霉的细胞壁的分子结构和对压力的结构反应。该团队将固态核磁共振谱与功能基因组学方法相结合，使用烟曲霉的多种突变体，每种突变体选择性地消除一种类型的结构碳水化合物。



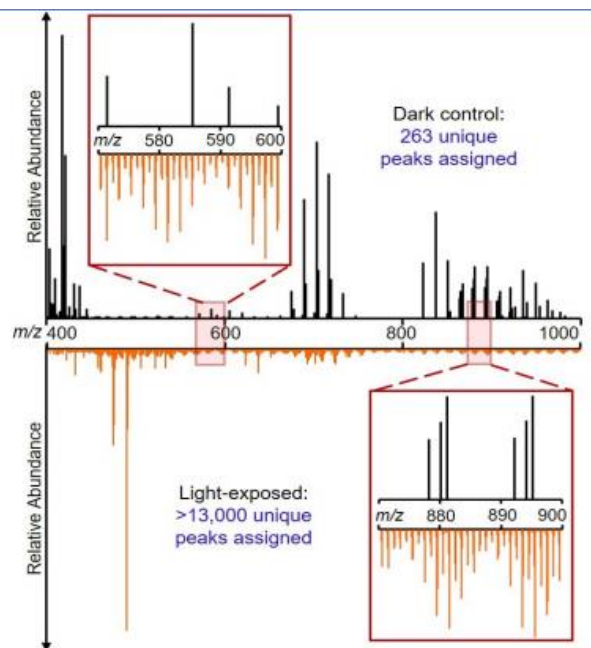
Cite: A. Chakraborty et al. Nature Comm. 12, 6346 (2021)

装置：NMR

● 阳光将塑料转化为复杂的化学物质

借助 MagLab 的 21T 离子回旋共振谱仪，用户发现所有塑料在阳光照射下都会产生高度复杂的化学物质，而且纯 PE 和含有添加剂的塑料消费品之间有着

巨大的差别。这些发现挑战了长期以来塑料在环境中是惰性的认识，同时告诉我们，阳光可以将其分解成一系列环境影响未知的新化合物。

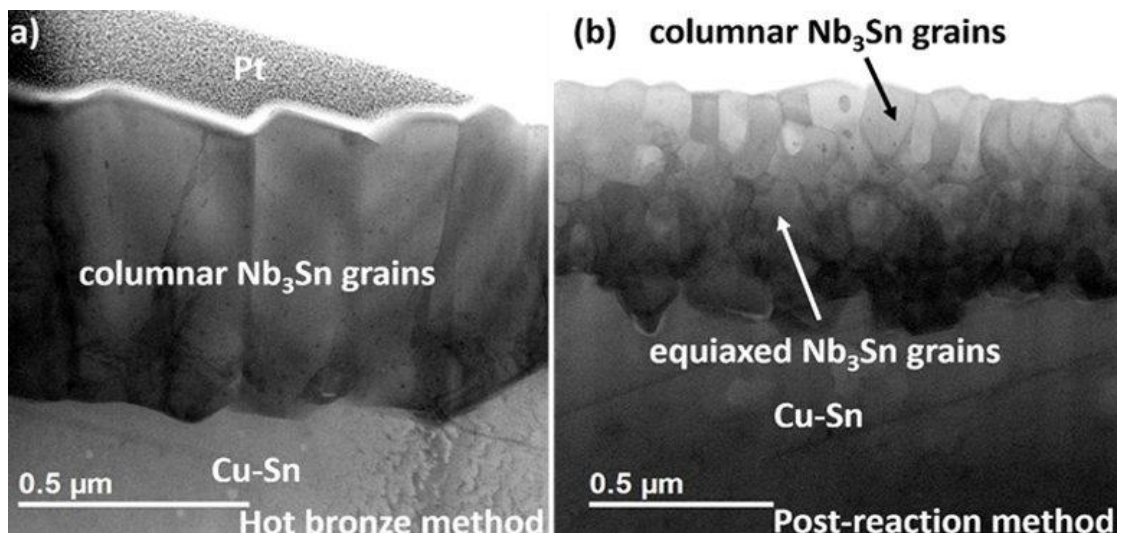


Cite: [A. N. Walsh et al. Environ. Sci. Technol. 55, 12383-12392 \(2021\)](#)

装置：超导磁体（21T-ICR）

● 用于紧凑型加速器的新型“热青铜” Nb_3Sn

MagLab 应用超导中心的研究人员开发了一种新的 $\sim 700^\circ\text{C}$ “热青铜” Nb_3Sn 大规模涂层配方，可在青铜基材上生产高质量的 Nb_3Sn 薄膜。

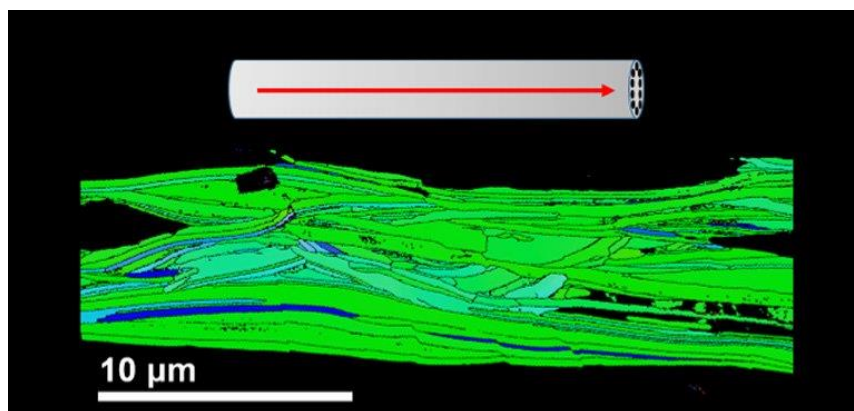


这种新配方可以扩展到下一代超导射频腔 (SRF) 的生产上。这种腔体将能够在比当前最先进的铌腔体更高的温度 (4-8K) 下运行, 从而显著降低运营成本, 并将有力支持未来需要紧凑、便携式加速器的工业、医疗、科学和环境应用。

Cite: [*W. K. Withanage, et al. Supercond. Sci. Technol. 34, 06LT01 \(2021\)*](#)

● 可恢复性 Bi-2212 圆线

为优化 Bi-2212 超导圆线的性能, MagLab 应用超导中心研究了氧过掺杂的 Bi-2212 圆线中去除氧后的性能变化。结果发现, 尽管从 Bi-2212 圆线中去除氧会降低其性能, 但该样品并未出现明显的超电流瓶颈, 这表明超导细丝的微观结构本质上对弱连接的形成具有很强的恢复性, 这是 Bi-2212 独有的情况。



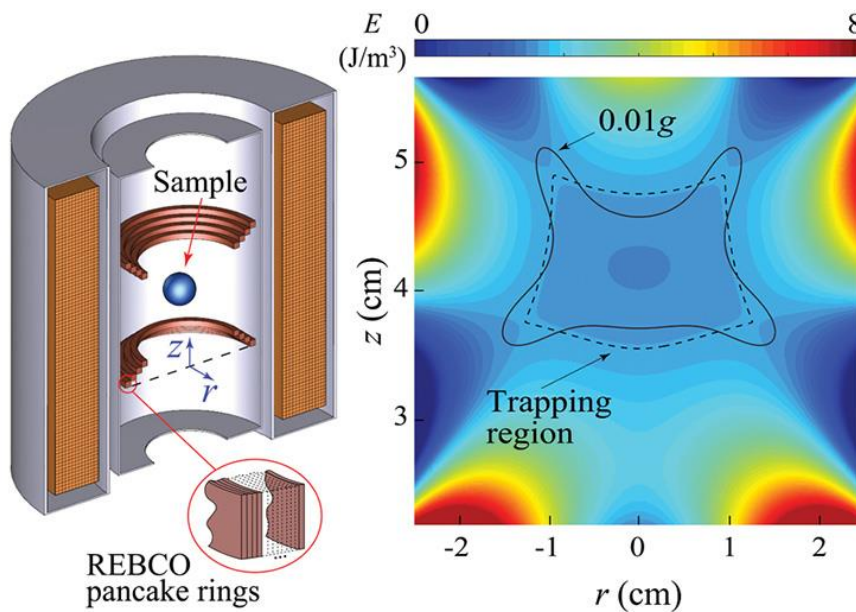
Cite: [*Y. Oz, et al. Phys. Rev. Materials 5, 074803 \(2021\)*](#)

● 新型磁浮微重力模拟器

MagLab 和 FAMU-FSU 工程学院的研究人员开发了一种微重力模拟器, 有望为未来的空间研究开辟新天地。

传统的微重力模拟是通过高塔坠落或抛物线飞行的航空器来实现, 只能工作几秒到几分钟。磁浮微重力模拟具有高经济性、高可及性、重力可调以及近

乎无限的工作时间等优势，但通常的磁体仅能产生非常小的微重力区。该设计在超导磁体中集成梯度麦克斯韦线圈，将微重力区容量扩大了 1000 倍。



Cite: [H. Sanavandi, et al. npj Microgravity 7, 40 \(2021\)](#)

2. 欧洲强磁场实验室

● 43T+混合磁体新进展

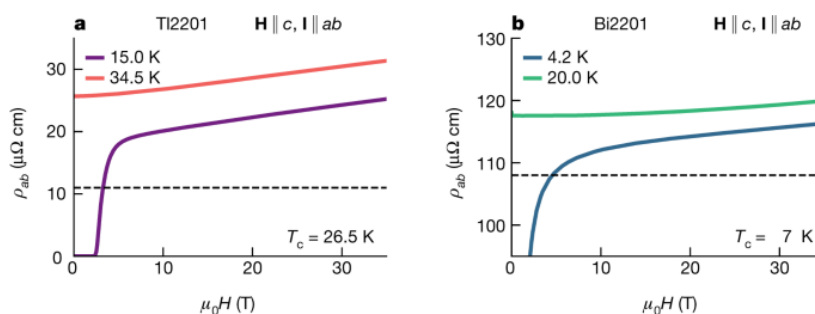
Grenoble 正在建设的混合磁体在 2021 年达到了重要的里程碑。成功地将 1100 mm 孔径的外超导线圈插入其液氮容器。在 SDMS 公司的支持下，按照严格的程序实现了液氮容器的闭合焊接。在对焊缝进行成功的染料渗透测试后，将进一步进行压力和泄漏测试。6 月 30 日，Cryo Diffusion 公司交付了低温传输线，用来将磁体低温恒温器连接到产生加压超流氦的卫星箱。预计将于 2022 年第二季度开始进行超导磁体冷却。



● 高 TC 铜酸盐的奇异金属体系中非相干传输的特征

荷兰强磁场的研究人员与外国学者合作，研究了过度掺杂的高 T_c 铜酸盐的高场磁输运特性，发现其行为与普通金属明显不同。这种“奇异金属”相中电阻率线性依赖于温度和场。奇怪的是，发现这种行为在很大范围的参数上持续存在。

考虑到早期的霍尔效应测量，该团队认为他们已经发现了铜酸盐中两种不同电荷载流子类型的令人信服的证据——一种是相干的，另一种是不相干的。

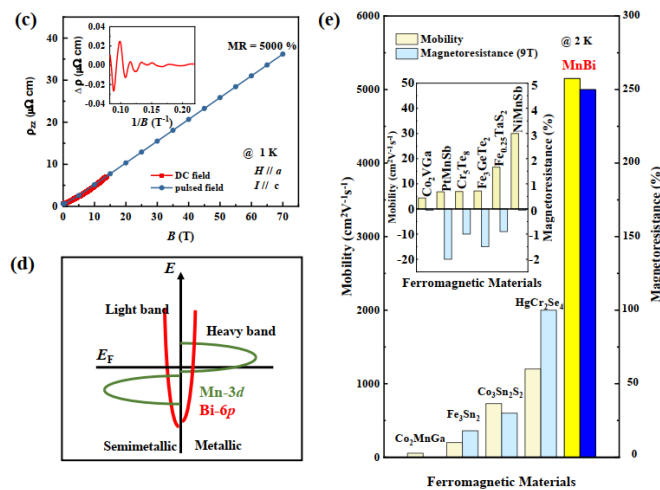


Cite: [J. Ayres, et al. Nature 595, 661 \(2021\)](#)

装置：水冷磁体

● 铁磁 MnBi 中的大线性非饱和磁阻和高迁移率

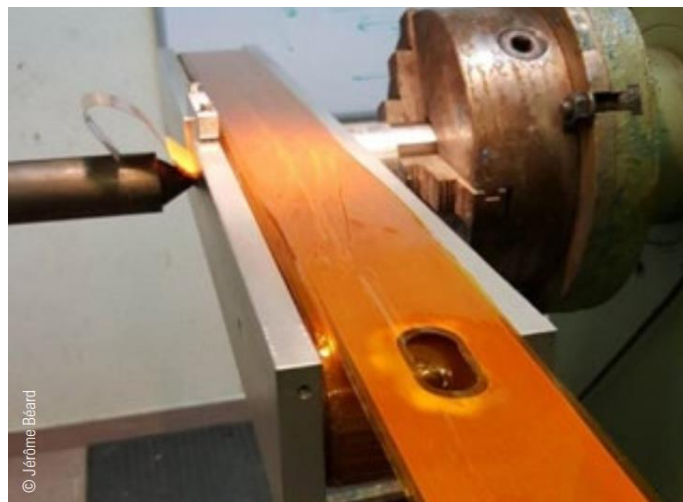
德国强磁场的用户在铁磁 MnBi 单晶中发现了大的线性正磁阻和高电荷载流子迁移率。具体来说，磁阻强烈依赖于磁场方向，并且在 70 T 时达到最大值 5000%，场沿 a 轴排列并垂直于电流。频率仅为 23 T 的 SdH 振荡表明了较小的费米面，有效质量约为自由的 0.4 倍。在 2 K 时，迁移率 5000 cm²V⁻¹s⁻¹ 对电子和空穴类载流子几乎相同，也是迄今为止报道的铁磁材料中最高的迁移率。



Cite: [Y. He, et al. Nat. Commun. 12, 4576 \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体

● 用于磁线性双折射测量的脉冲磁偶极子



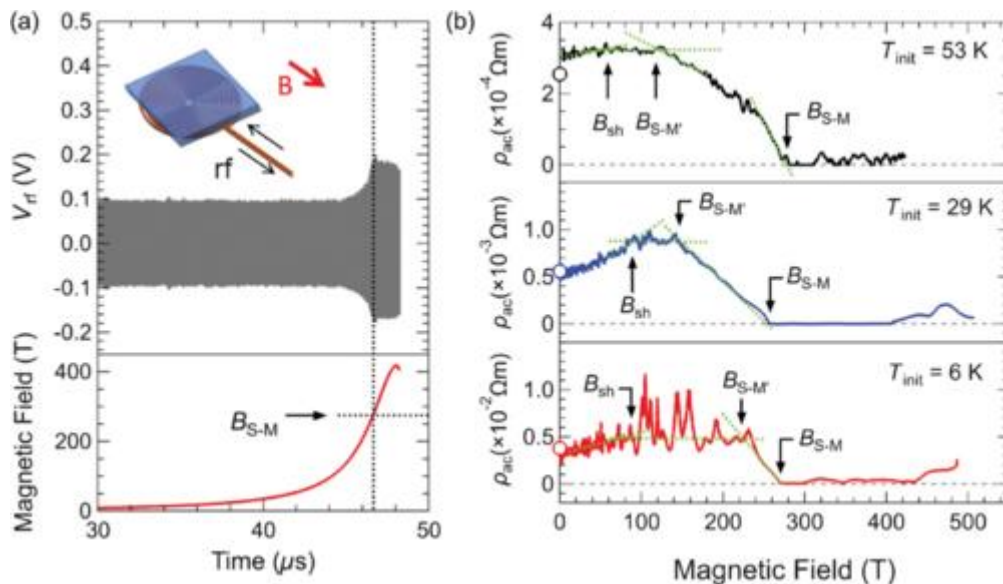
法国图卢兹的研究小组设计了一种新颖的脉冲磁偶极子，也称为箔线圈，可在无低温设备的情况下沿 0.85 m 的光学通路提供超过 10 T 的横向磁场，持续约 6 ms 的时间。该磁铁专用于线性磁双折射测量。

Cite: [J. Béard, et al. Rev. Sci. Instrum. 92, 104710 \(2021\)](#)

3. 日本强磁场实验室

- 超强磁场中相 FeSi 的磁导率

在磁通量压缩发生器提供的高达 500 T 的磁场中，通过射频自谐振螺旋线圈技术研究了相关窄带隙半导体 FeSi 的磁阻。半导体到金属的转变在 270 T 左右完成，观察到磁阻的急剧变化，意味着通过带边的塞曼位移关闭了杂化间隙。在温度-磁场相图中，发现半导体-金属转变场几乎与温度无关。

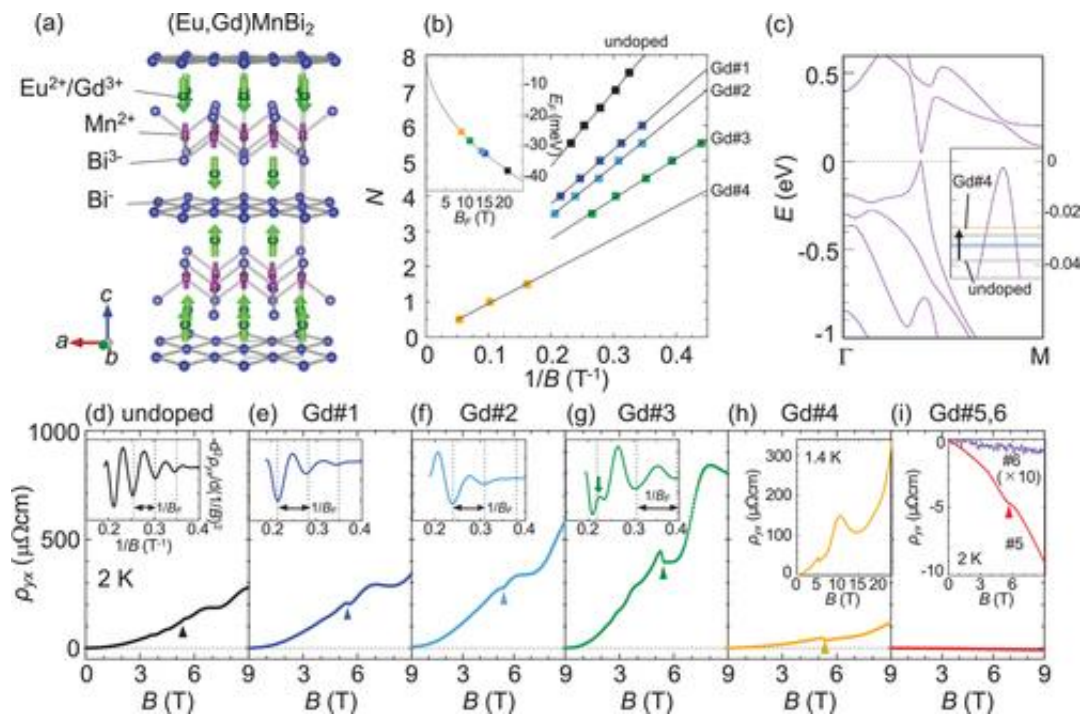


Cite: [D. Nakamura, et al. Phys. Rev. Lett. 127, 156601 \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体

● 通过费米能级调制增强热电信号

狄拉克/外尔半金属的潜在热电应用最近受到关注，因为其超高迁移率载流子可以产生大的热电和能斯特功率因数。东大强磁场实验室用户在层状磁体 EuMnBi_2 的绝缘层中用 Gd^{3+} 部分代替 Eu^{2+} ，使电子掺杂到狄拉克费米子层中而不会降低迁移率，因此费米能在狄拉克点是可调的。即使在掺杂样品中也观察到清晰的量子振荡，可以结合第一性原理计算定量估计费米能量偏移并优化功率因数。此外，能斯特信号随着载流子密度的降低而急剧增加，超出了简单的理论预测，这可能源于由于与 Eu 矩的交换相互作用而导致的 Dirac 带的场诱导间隙减小。



Cite: [K. Tsuruda, et al. Adv. Func. Mater. 31, 2102275 \(2021\)](#)

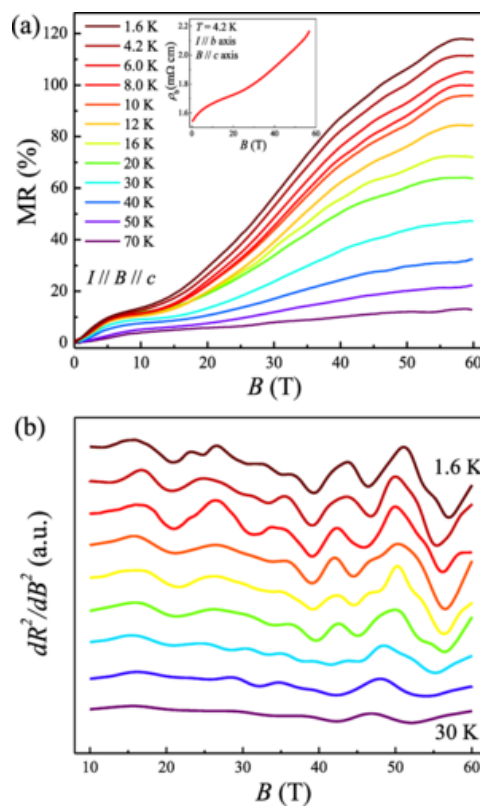
装置：脉冲磁体

4. 武汉脉冲强磁场科学中心

● 低维强关联电子材料研究上取得新进展

研究小组利用化学气相输运法成功合成了高质量的 γ - Mo_4O_{11} 单晶样品。不同于 η 相的单斜结构， γ 相具有正交结构。系统的磁化率、比热、R-T 曲线揭示 γ - Mo_4O_{11} 属于准二维导体，其不显著的 CDW 相变发生在 $\sim 96\text{K}$ 附近。进一步研究发现， γ 相的 CDW 能隙近似完全打开，因此可以观察到类似准一维钼青铜中的非线性 I-V 特性；同时，极少量的残余费米面使得层间磁电阻在高达 60T 强磁场下出现明显的量子振荡特征。该工作为研究准二维系统中的 CDW 行为尤其是非线性输运性质提供了理想研究对象。

本文为 PRB 当期编辑推荐论文。



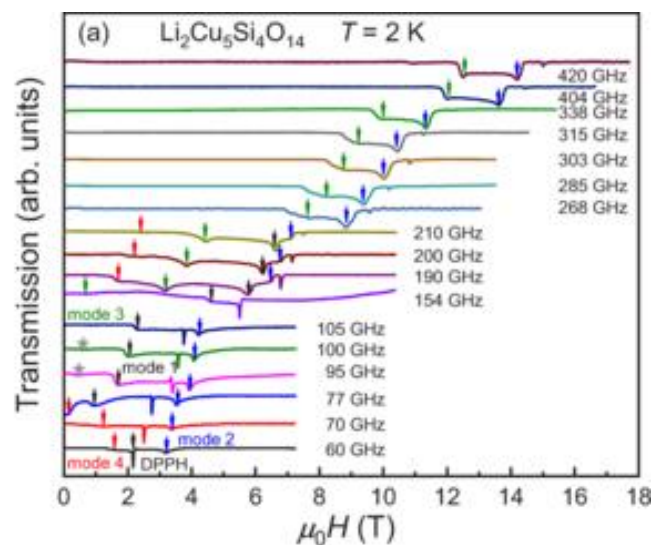
Cite: [J. Z. Ke et al. Phys. Rev. B 104, 195154 \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体

● 量子自旋团簇链的强磁场 ESR 研究

自旋团簇是磁性离子通过交换相互作用聚集起来形成的凝聚态物质，这类材料因其“从零维到三维交叉”而引起的量子临界性，吸引了广泛的理论和实验研究兴趣。 $\text{Li}_2\text{Cu}_5\text{Si}_4\text{O}_{14}$ 是由二聚体和三聚体交替形成的团簇链材料，其反铁磁有序温度为 22 K。该团队利用脉冲强磁场设施的 55T 强磁场磁化和 ESR 测量，系统地研究了 $\text{Li}_2\text{Cu}_5\text{Si}_4\text{O}_{14}$ 的磁性。结果表明，2K 下的磁化曲线在 2.6T 磁场附近呈现出自旋-翻转转变，随后磁化强度呈非线性增加。温度依赖的 ESR 谱表征了材料的反铁磁有序和各向异性 g 因子。有趣的是，频率依赖的 ESR 谱揭示了两个具有双轴各向异性的共线反铁磁子晶格的形成。这是非常不寻常的，因为 $\text{Li}_2\text{Cu}_5\text{Si}_4\text{O}_{14}$ 是包含五个子晶格的三维有序的反铁磁体，其磁性可用由二聚体-三聚体组成的“赝双子晶格” ($\uparrow\uparrow, \uparrow\downarrow$) 和 ($\downarrow\downarrow, \downarrow\uparrow$) 来描述。这项工作为自旋二聚体和三聚体共存的自旋链材料提供了新的认识。

中国科学院强磁场科学中心童伟研究员提供了 X 波段 EPR 测量。



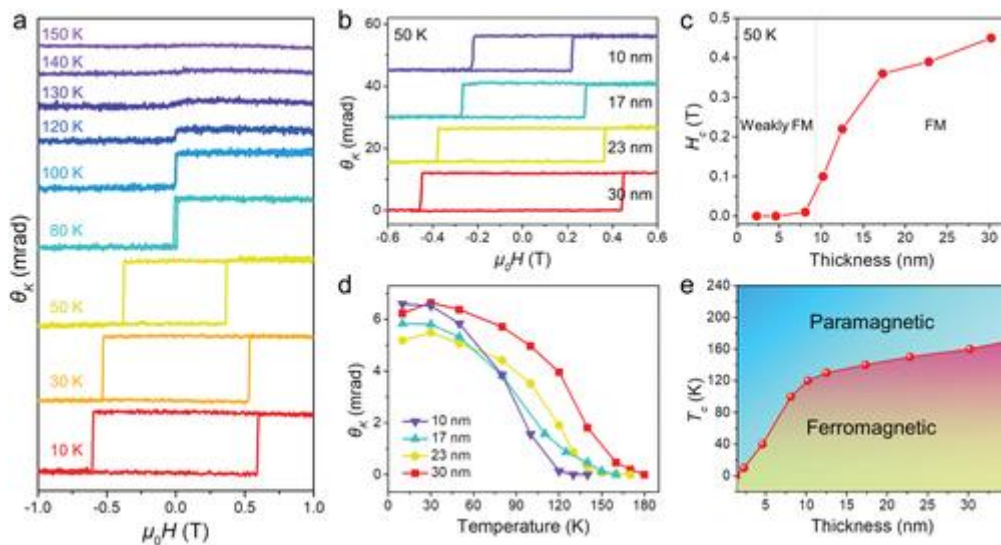
Cite: [X. P. Jin et al. Phys. Rev. B 104, 174423 \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体

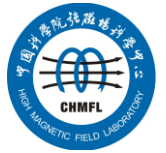
● 二维磁性材料的合成与物性

Cr_xTe_y 晶体是一类具有良好空气稳定性的磁性材料，通过调控 Cr、Te 原子比可以显著调控其磁性，文献报道 CrTe 和 Cr_2Te_3 纳米片具有较好的空气稳定性和室温铁磁性。为了丰富 Cr_xTe_y 家族成员并获取新型二维磁性材料，本工作利用化学气相沉积法制备了非范德瓦尔斯 Cr_5Te_8 纳米片，利用磁光克尔技术研究了不同厚度 Cr_5Te_8 的磁学特性，获得了 Cr_5Te_8 的居里温度-厚度相图，且研究发现二维 Cr_5Te_8 纳米片具有良好空气稳定性，经过三月老化后其磁性几乎不变。 Cr_5Te_8 的可控合成及其出色的铁磁性稳定性为其进一步制作器件奠定了基础，该研究将促进二维铁磁材料在自旋电子学器件中的应用和发展。

该组近几年在二维磁性材料方面发表了 *Adv. Mater.* 等多篇研究成果。



Cite: [C. Chen, et al. Adv. Mater. 34, 2107512 \(2021\)](#)



5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场科学中心受邀在 *Journal of Physical Chemistry Letters* 发表前瞻性文章
- SHMFF 用户在磁性拓扑新材料方向取得重要进展
- 准二维笼目金属 CsV_3Sb_5 中非平庸电子结构的量子输运研究取得重要进展
- 强磁场科学中心研发出一种基于声子的新型单频磁控太赫兹源
- 强磁场科学中心发现二维范德瓦尔斯磁性材料中超长自旋弛豫现象
- 张钠课题组发现硫黄素 T 差异性识别假镜像对称的异分子间端粒 G-四链体
- 强磁场科学中心召开 SHMFF 科技委员会/用户委员会会议
- 第九届“趋磁细菌研究及其应用”研讨会在合肥成功举办

详见：http://www.hmfl.ac.cn/xwzx_2021/jqyw/