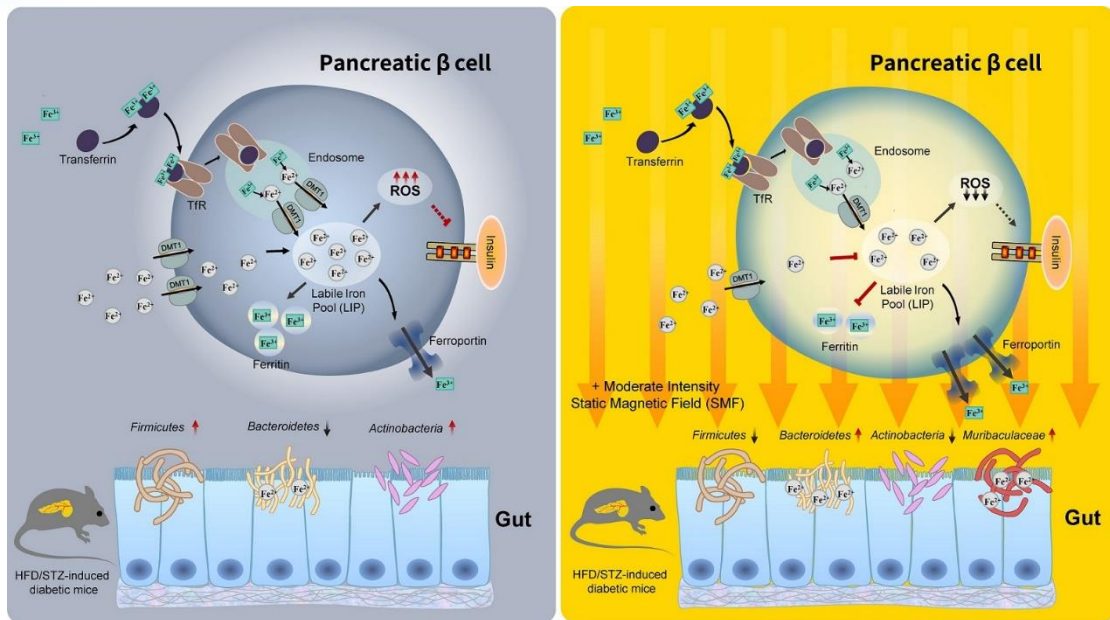


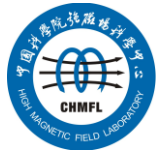
# 国内外强磁场实验室 科研动态

2021 年第一季度



中国科学院强磁场科学中心

2021/4/20



# 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

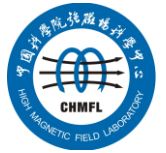
National High Magnetic Field Laboratory 又称 MagLab，是目前世界上规模最大，实验设施最全，用户最多的强磁场实验室。其稳态场部分位于 Tallahassee，脉冲场部分位于 Los Alamos，另有一个 high B/T 组位于 Gainesville。MagLab 于 1994 年建成并不断升级改造，创造并保持了多项世界纪录。

## 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

- 世界最强超导磁体正式投入运行

MagLab 的 32T 超导磁体由牛津公司的 15T 低温超导外磁体和自制 17T 高温超导内插磁体组成，现已正式投入运行并对用户开放。其升场速率 0.5T/min，口径 34mm，配备 1.4K-300K 的 VTI，提供 27.5mm 的样品空间。也可搭配 top-loading 稀释制冷机提供最低 14mK 的极低温。



装置：超导磁体

## ● 通往 40T 的“0 号测试线圈”

MagLab 用 REBCO 超导带材制成了其第一款中型高温超导线圈。该“0 号测试线圈”由 8 个双饼模块堆叠而成，工作在 12T 的背景磁场下同时也产生 12T 的磁场。由于 MagLab 是用户设施，将来的 40T 超导磁体将会经常处于扫场状态，这与在固定磁场下工作的加速器和 NMR 磁体不同，因此磁体循环寿命是 40T 超导磁体的关键设计指标。

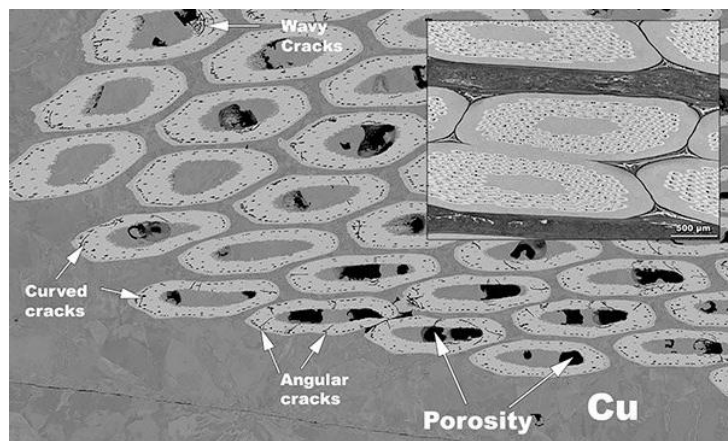
此前 MagLab 制造的 REBCO 测试线圈已经达到了数千个循环，但这些线圈很小，导体长度仅有 1.9m 和 250m。0 号测试线圈导体长度达 1300m 以上，并进行了 225 次疲劳循环，没有发现损坏的迹象。此外，线圈所有组件在 550A 的传输电流下均表现良好。

装置：超导磁体

## ● $Nb_3Sn$ 超导线圈潜在损伤探究

在为 CERN 的大型强子对撞机的高亮度升级设计的  $Nb_3Sn$  磁体模型线圈中发现了裂纹。通过电镜表征了导体损坏的程度，并通过与对照样品比较，确定组装过程中的高应力导致了裂纹的产生。

此外，发现  $Nb_3Sn$  外围铜的硬度是磁体损坏的可靠指标。



*Cite: S. Balachandran, et al. Supercond. Sci. Technol. 34 025001 (2021)*

装置：超导磁体

- **特殊的高强度导体测试可延长脉冲磁体的使用寿命**

MagLab 已经开发并测试了用于检测商业采购的导线中的瑕疵的新方法。对 X 射线照相、涡流测试和超声测试三种方法进行了比较，基于涡流的系统是最有效的，已在较长导线上应用。此外，MagLab 还开发了修复表面缺陷的方法，并最大程度地减少了产生内部裂缝的可能性。



*Cite: J. Lu et al. IEEE Appl. Supercond. 30, 6900405 (2020)*

装置：脉冲磁体

- **为用户提供较低磁场**

MagLab 增加了两个低磁场超导磁体系统对用户开发，即 SCM5 和 SCM6，分别是 QD 公司的 7T MPMS 和 9T PPMS，使用户能够表征基本的材料特性——磁场下的电阻、磁化强度、磁化率和热容等。

获取 MagLab 高场磁体时间的要求之一是在较低磁场下获取的数据，以说明使用高场磁体的必要性。由于与这些磁体系统的购买、操作和维护有一定困难（特别是液氦的获取），大多数非 R1 机构在其校园中都没有低磁场的研究仪器。MagLab 新近增加的两套系统消除了非 R1 学校（包括大量的州立大学、历史悠久的黑人学院以及其他少数族裔服务机构）利用 MagLab 高场设施的鸿沟。

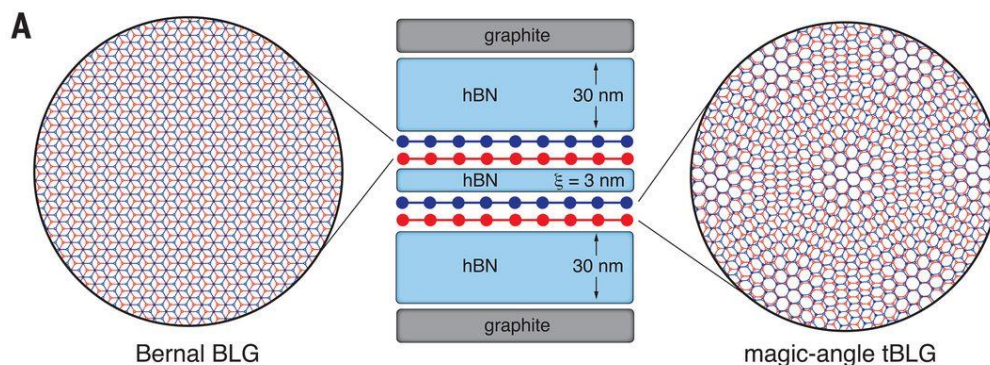
装置：超导磁体

### ● 扭角石墨烯超导新进展

2018 年科学家发现，当两层石墨烯旋转到大约 1.1 度的“魔角”时，该系统将成为超导体，而且很可能是一种非常规超导。

为了深入理解这种奇特的物质状态，布朗大学研究人员通过在扭角石墨烯上覆盖 Bernal 双层石墨烯，来影响扭角石墨烯中的库伦相互作用，从而影响超导。该 Bernal 层可通过改变垂直方向电压从导体变为绝缘体，从而增大扭角石墨烯中的库伦作用。发现此时超导转变温度下降，这是库伦相互作用影响超导的直接证据。

MagLab 的理论组深度参与到此研究中，并给出了用 Bernal 双层石墨烯进行调控的建议。

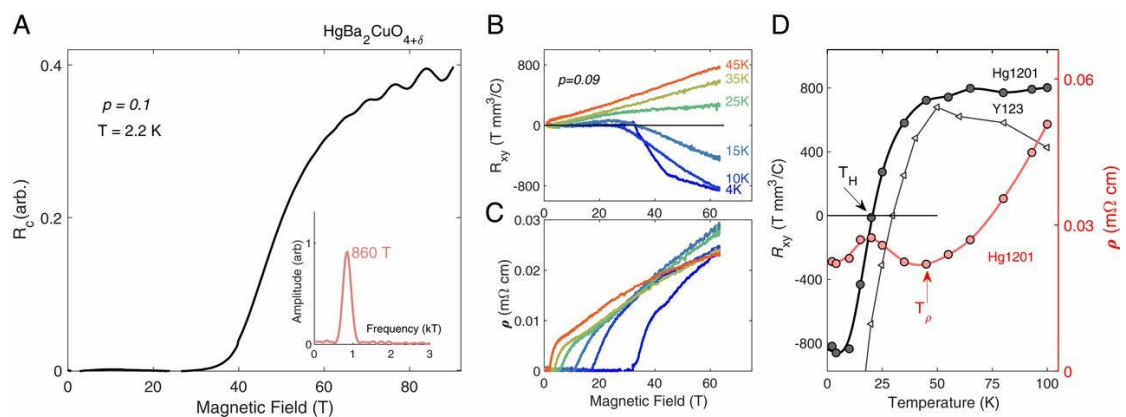


Cite: X. Liu, et al. Science 371, 1261-1265 (2021)

## ● 90T 磁场下的超导研究

非常规超导的普遍理论范式认为，超导是由与零温相变有关的量子临界波动引起的。由于超导相的存在，这些相变通常是“隐藏”的。

最近的实验利用高达 90T 的极端磁场来压制高温超导体中的超导性。发现费米面重构的终止与超导上临界场的上升以及接近最佳掺杂的赝能隙终点相吻合。这些结果将重构的费米面与铜酸盐相图中的超导圆顶所掩盖的两个量子临界点联系起来。



Cite: M. K. Chan, et al. PNAS 117, 9782-9786 (2020)

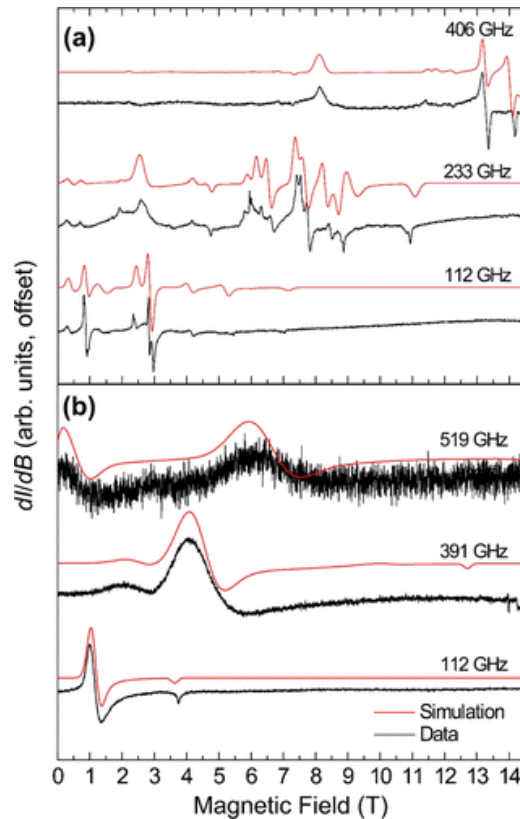
装置：脉冲磁体

## ● 分子磁体中的强磁耦合

通过使用 MagLab 提供的独特的高频电子磁共振技术，研究人员发现了具有直接金属轨道重叠（而不是弱的超交换相互作用）的单分子磁体，其行为类似于金属铁磁体。



这项工作确定了使用低成本、高丰度元素自下向上合成坚固的铁磁纳米颗粒的新策略，为未来分子级磁存储应用的发展提供了希望。



Cite: *K. Chakarawet, et al. J. Am. Chem. Soc. 142, 19161-19169 (2020)*

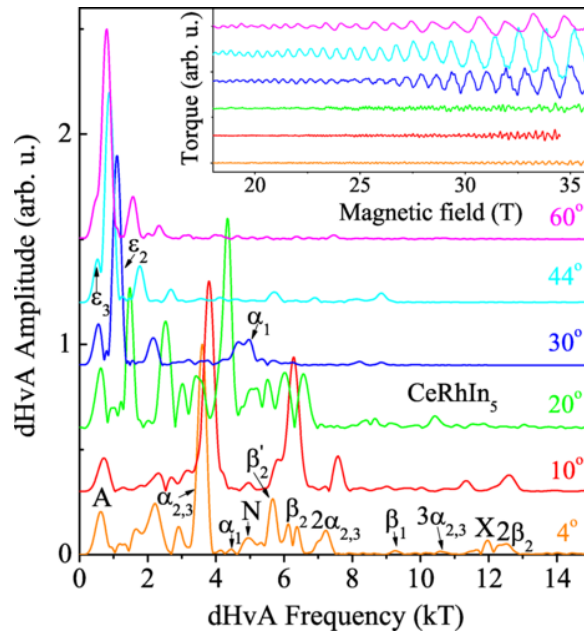
装置：EMR，超导磁体

## 2. 欧洲强磁场实验室

### ● CeRhIn<sub>5</sub> 在强磁场下健壮的费米面拓扑

科研人员使用稳态（最高 36T）和脉冲（最高 70T）磁场对 CeRhIn<sub>5</sub> 进行了全面的 dHvA 研究。发现在强磁场下逐渐出现了几种 dHvA 频率，其中的  $\beta_1$  分支是首次观察到。与非 4f 化合物 LaRhIn<sub>5</sub> 的角度依赖性 dHvA 谱比较，结合能带结构计算表明，CeRhIn<sub>5</sub> 中的 Ce 4f 电子保持局部化至 70T。这排除了任

何费米面重建，无论是在向列相变  $B^*$  处或 QCP 的  $B_c$  处。这些结果证明了费米面的健壮性以及 AFM 相内外 4f 电子的局域性质。



*Cite: S. Mishra, et al. Phys. Rev. Lett. 126, 016403 (2021)*

装置：水冷磁体，脉冲磁体

### ● 铜酸盐的霍尔载流子浓度与奇异金属区

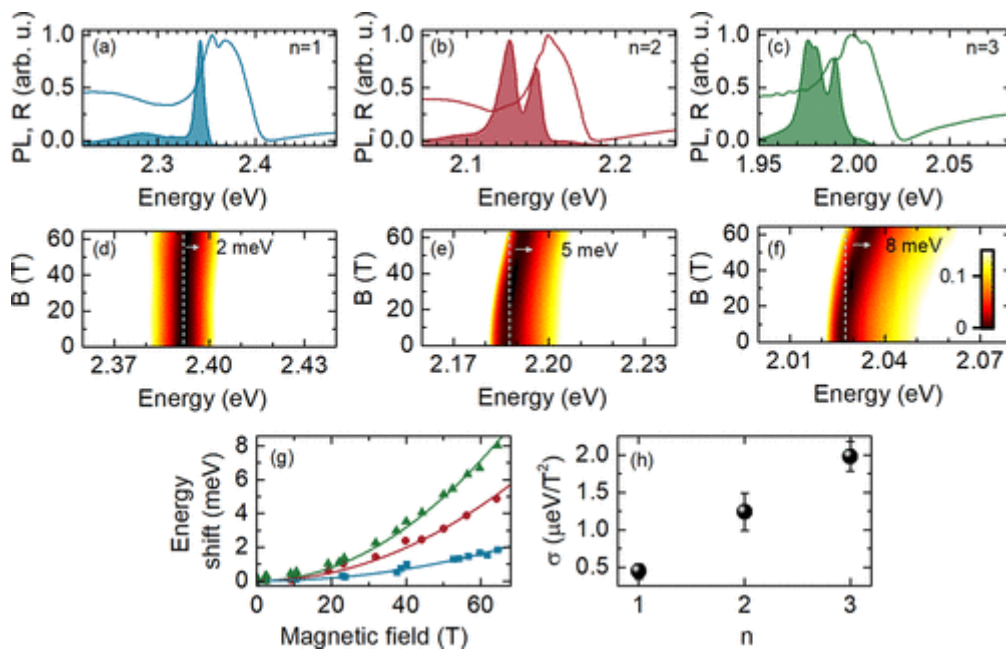
研究人员在低温和强磁场极端条件下对两种铜酸盐的面内霍尔电阻率进行了测量，首次确定低温霍尔数从  $p$  到  $1+p$  ( $p$  是掺杂空穴数) 在奇异金属区的范围内平稳过渡。该研究表明，这种转变不仅仅与正常态赭能隙的闭合有关，因为霍尔数的减少发生在赭能隙打开之前。而是，载流子浓度的降低被认为与电阻率温度线性分量的强度增加相关。因此，这一发现暗示了一种铜酸盐奇异金属的全新特征，该特征将奇异金属相的性质与准粒子的退相干联系起来。

*Cite: C. Putzke, et al. Natuer Phys. In press (2021)*

装置：水冷磁体，脉冲磁体

### ● 通过量子限域调节二维钙钛矿材料的激子性质

通过强磁场下的光谱测量，我们观察到带间朗道能级跃迁，获得二维钙钛矿材料 $(\text{PEA})_2\text{MA}_{n-1}\text{Pb}_{n1}3_{n+1}$ 的载流子有效质量  $\mu$ ，其中  $n=1, 2, 3$ 。证明  $\mu$  随着无机层数  $n$  的增加而增加，到  $n=3$  时  $\mu$  与三维  $\text{MAPbI}_3$  相当。这说明通过选择不同有机间隔层以及调节层数，可以有效调控载流子有效质量，既可以调低也可以调高。确定  $\mu$  后，还能得到所有重要的激子参数，如结合能、面内半径等以及这些参数如何随着  $n$  的增加而演化。



Cite: *M. Dyksik, et al. J. Phys. Chem. Lett. 12, 1638-1643 (2021)*

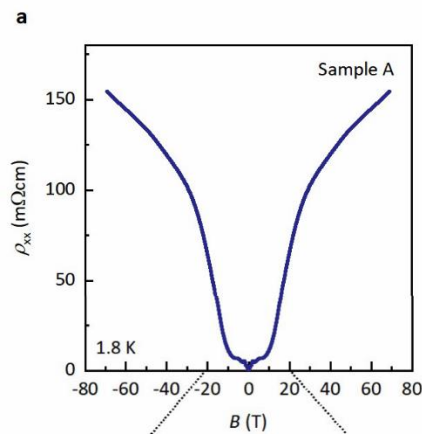
装置：脉冲磁体

### ● HfTe<sub>5</sub> 量子极限下的非常规霍尔响应

德国的研究小组测量了量子极限下块材  $\text{HfTe}_5$  的霍尔电导，揭示了一个非常规的关联电子态。观测到的平台伴随着纵向电阻率的 Shubnikov-de Haas 最小值，其幅值大约为  $3/5(e^2/h)k_{F,z}/\pi$ ，其中  $k_{F,z}$  是费米波矢。

为了排除费米能第二个口袋等原因，他们在高达 70T 的脉冲场下测量磁输运，排除了这种可能性。

对导数关系的分析和能隙的估计表明，该特征与量子霍尔物理有关。具有相似电子迁移率和费米波矢的同构型材料  $\text{ZrTe}_5$  的量子极限中没有这种非常规特征，表明关联态可能是通过自旋-轨道耦合来稳定。



Cite: [S. Galeski, et al. Nature Commun.11, 5926 \(2020\)](#)

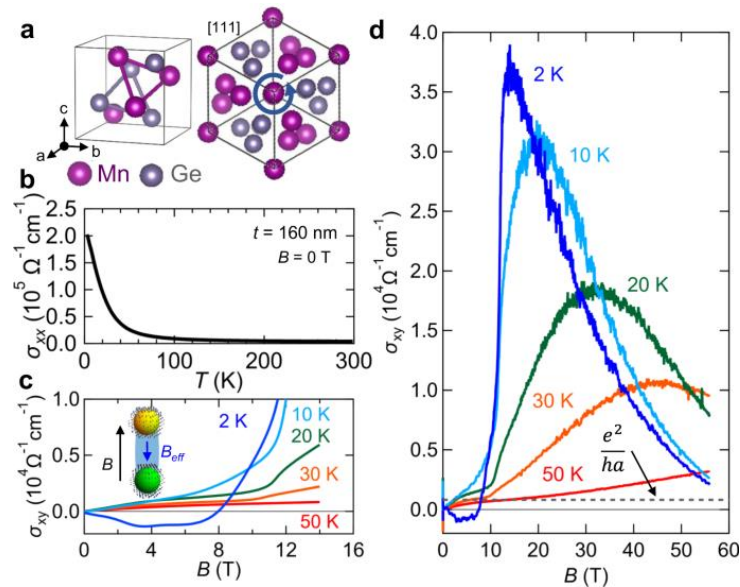
装置：脉冲磁体

### 3. 日本强磁场实验室

- 手性磁体中自旋手性散射的巨大反常霍尔效应

通过传导电子与磁性的相互作用，可以显著增强霍尔效应，这被称为反常霍尔效应（AHE）。尽管已经针对能效电子学深入研究了与能带拓扑有关的机制，但是电子散射机制受到的关注还很有限。近日，日本研究人员报告了在手性磁体  $\text{MnGe}$  薄膜中电子散射起源的巨大 AHE 的观察结果。在铁磁区域中，霍尔电导率和霍尔角分别达到  $40,000\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  和 18%，超过了本征和非本征

AHE 的常规极限。大的 AHE 的可能来源是具有标量自旋手性的热激发自旋团簇引起的新型偏斜散射，这可以从 AHE 对薄膜厚度或磁晶各向异性敏感来证实。该结果可能会开辟一个新领域，以探索各种巨大的 AHE 响应，包括阻挫磁体和薄膜异质结构。

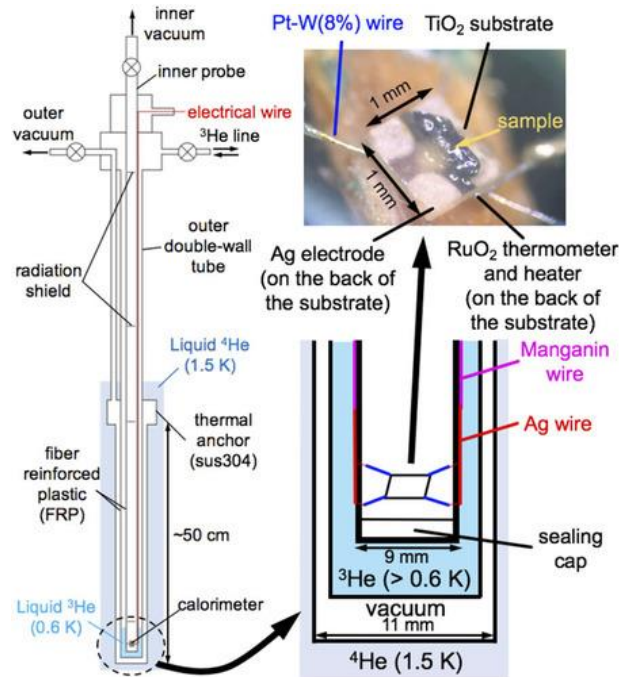


Cite: *Y. Fujishiro, et al. Nature Commun. 12, 317 (2021)*

装置：脉冲磁体

### ● 脉冲磁场中的高分辨率量热法

东京大学脉冲场实验室开发了一种新的量热仪，用于测量脉冲磁场中的热力学性质。使用 43.5T 的平顶脉冲场测量三个样品来证明量热仪的正常运行。该装置可用于其他高场脉冲磁体。



Cite: [S. Imajo, et al. Rev. Sci. Instru. 92, 043901 \(2021\)](#)

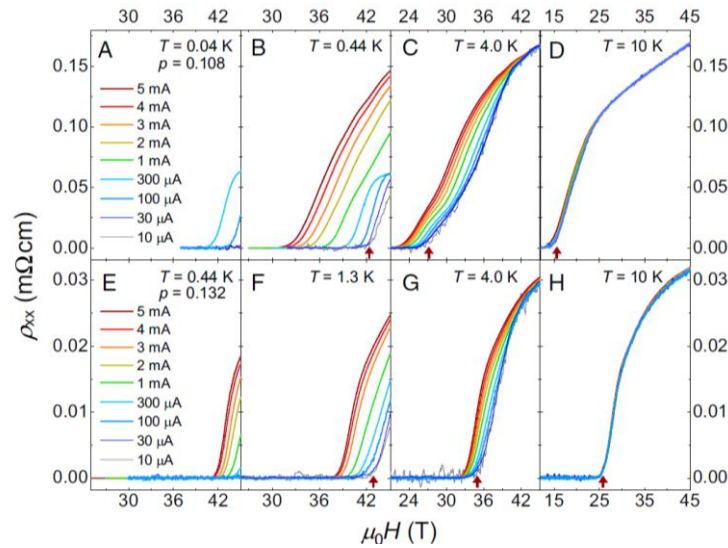
装置：脉冲磁体

## 4. 武汉脉冲强磁场科学中心

### ● 剑桥大学用户在高温超导研究中取得新进展

在欠掺杂铜基超导体的相关研究中，赝能隙基态的本质是一个非常重要的问题。已有研究发现，在磁场（约 22T）破坏超导态后，样品中观测到了量子振荡的行为，并由此推断出赝能隙区域的本质是传统的金属态。为了进一步研究赝能隙区域的本质，Suchitra E. Sebastian 教授团队合成了超高纯度的欠掺杂铜基超导体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ，并测量了不同电流下样品电阻随温度和磁场的依赖行为。实验表明，样品的电阻表现出明显不同的非常规量子涡旋物质基态的

特点：消失的电阻、磁滞以及非欧姆输运等。在此基态中，量子振荡与 d 波超导能隙的共存亟需一种新的自旋模型来解释。



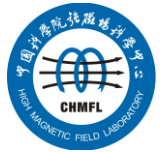
Cite: [Y. T. Hsu, et al. PNAS 118, e2021216118 \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体

### ● 清华大学用户在反铁磁自旋霍尔效应研究上取得进展

反铁磁材料因其不会产生静磁耦合、内禀频率高（太赫兹频段）和抗外磁场干扰等优势，在超快、超高密度信息存储和高频电子器件领域有广阔的应用前景。如果能通过操控反铁磁磁矩来调控其自旋霍尔效应，不仅可以丰富自旋霍尔效应的物理内涵，还可能为构建超快、超高密度、低功耗的信息存储器件提供新的契机。

该研究中，研究团队基于  $\text{Mn}_2\text{Au}$  薄膜的局域空间反演对称性破缺，观察到面外自旋极化的自旋流，发现了反铁磁自旋霍尔效应，即可以通过操控反铁磁磁矩来实现自旋流的有效调控。同时，他们还利用所获得的面外自旋极化，实现了与  $\text{Mn}_2\text{Au}$  相邻铁磁层的零场翻转。该研究结果有望成为提高第三代磁随机存储器（SOT-MRAM）工作效率的一种方案。



该研究利用脉冲强磁场设施提供的 62T 强磁场实验条件，测量了  $\text{Mn}_2\text{Au}$  在不同强磁场下的磁电阻。结果表明， $\text{Mn}_2\text{Au}$  的磁电阻在 30T 磁场下几乎不变，磁场从 30T 增加到 62T 时仅减小 0.8%（可能是自旋翻转导致），表现出了非常好的稳定性。

*Cite: X. Z. Chen, et al. Nature Mater. (2021)*

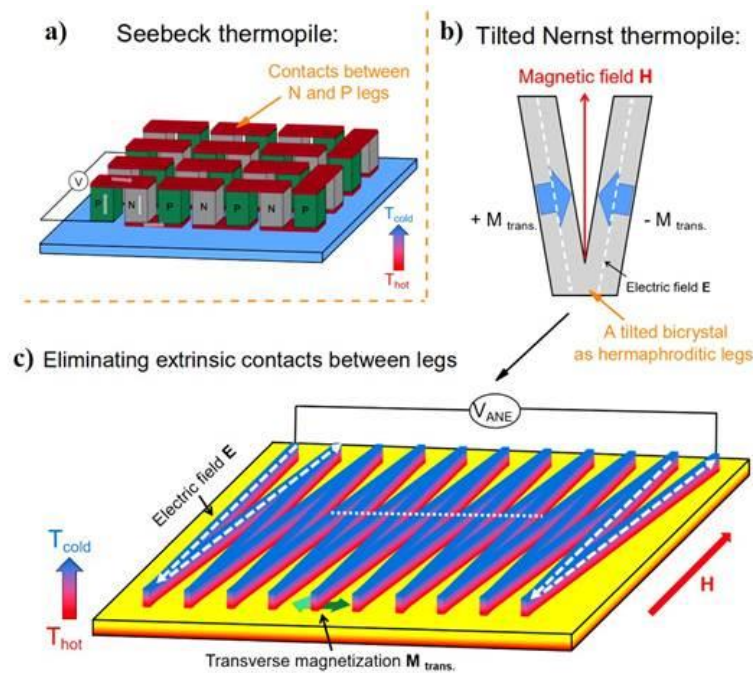
装置：脉冲磁体

### ● 朱增伟团队在能斯特热电装置的新型设计上取得突破性进展

热电转化技术是一项环境友好型技术，可用于废热回收、太阳能利用、热通量探测等领域。热电堆装置是热电转化技术的核心，传统热电堆是一组基于塞贝克效应（Seebeck effect）的热电偶阵列，在纵向温度梯度的作用下，N 和 P 型两种不同的热电基元内部将感应出不同朝向的热电势；通过导体将若干彼此相邻的 N 和 P 型热电基元连接，即可将由热能转为而得的电能进行导出并利用。传统热电堆因其原理简单、信号突出，一直备受研究者的广泛关注，但也面临着两大工艺难题。一是热电堆阵列需要同时使用两种热电材料和一种导体材料，并且构造复杂，使得其工艺制备成本高昂。二是连接 N 和 P 型两种不同热电材料将产生大量的接触电极，接触电极所引入的接触电阻将极大增加热电堆内阻，使能量在内部被耗散；接触电极所引入的热阻将严重阻碍纵向温差的建立，降低热能的使用效率；同时，在接触电极处的机械应力、热膨胀系数等性质不匹配也将严重影响热电堆的使用寿命。因此，工艺成本和接触问题严重阻碍了热电堆装置的大规模工业化应用。

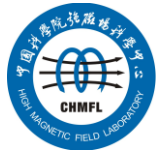


反常能斯特效应 (anomalous Nernst effect) 是一种横向热电效应, 横向热电势同时垂直于自发磁化和温度梯度。该研究中, 朱增伟教授团队基于 V 形状的倾斜双基元结构, 设计出了一种可将拓扑磁体横向自发磁化方向相邻基元自动交替的新型反常能斯特热电堆装置。由于此新型装置只需使用单一材料进行制备, 且具有无接触电极、工艺简单等特点, 有望为解决传统热电堆的两大工艺难题提供新思路。此外, 该研究还通过实验直接验证了此模型的可行性, 并通过纵横比依赖的平面霍尔效应和滞后角实验揭示了非共线反铁磁体  $Mn_3Sn$  横向自发磁化行为的物理机制。



Cite: [X. K. Li, et al. Adv. Mater. \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体



## 5. 中科院强磁场科学中心

- 王俊峰课题组开发出笼状 BSA 超分子结构包覆的高生物兼容性铁基 T1 造影剂
- 强磁场科学中心在拓扑半金属材料研究中取得新进展
- 张欣课题组发现特定参数稳态磁场可通过调节铁代谢来降低血糖
- 许安课题组发现无毒浓度纳米银可拮抗砷诱导的遗传毒性
- 周建辉课题组在  $Ta_2Se_8I$  中发现第三类外尔费米子
- 强磁场科学中心发现压力诱导光伏半导体  $ZnSiP_2$  的超导电性
- SHMFF 用户揭示并阐明新型柔性光驱动器原理

详见：[http://www.hmfl.ac.cn/xwzx\\_2021/jqyw/](http://www.hmfl.ac.cn/xwzx_2021/jqyw/)