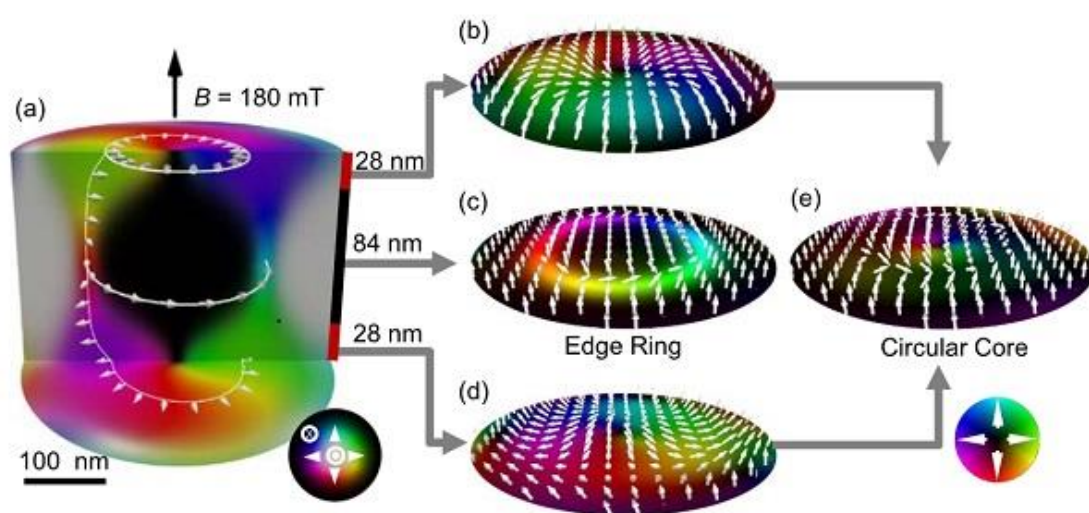


# 国内外强磁场实验室 科研动态

2020 年第四季度



中国科学院强磁场科学中心

2021/1/5



# 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

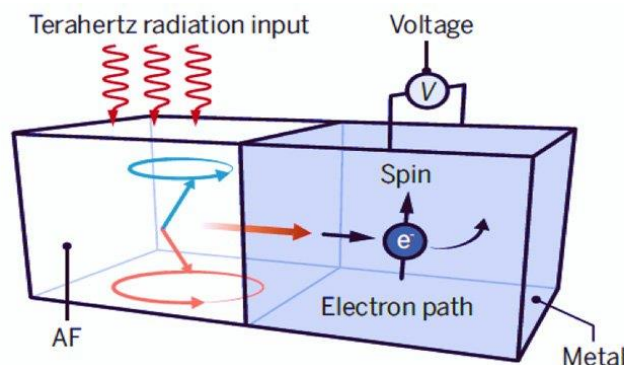
## 1. 美国国家强磁场实验室

### ● 反铁磁体的近太赫兹自旋泵浦

将自旋电流注入铁磁材料可以诱导自旋动力学，从而控制材料的磁性状态，使自旋电子器件能够在干兆赫频率下运作。反过来也可通过自旋泵浦，将磁性转化为相邻金属中的自旋电流。

美国强磁场实验室的一项研究首次证实，使用反铁磁材料  $\text{MnF}_2$  产生自旋电流，其自旋泵浦频率接近太赫兹，比一般铁磁自旋电子器件快两个数量级。MagLab EMR 组的独特谱仪非常必要，因为反铁磁体的典型自旋动力学处于太赫兹范围，而反铁磁有序相中这些超快速自旋动力学要求很高的调谐磁场。

反铁磁材料的相干近太赫兹自旋泵浦技术，为频率高两到三个量级的高频自旋电子器件打开了大门，这将对从磁记录到通信到医学成像等未来应用产生广泛影响。

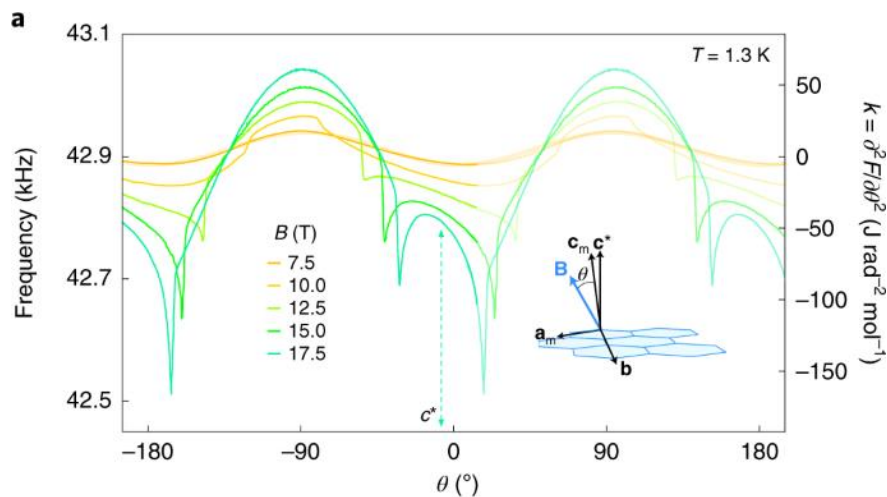


Cite: [P. Vaidya, et al. Science 368, 160-165 \(2020\)](#)

装置：EMR

### ● 强磁场下 $\text{RuCl}_3$ 的标度不变磁各向异性

在  $\text{RuCl}_3$  中，非弹性中子散射和拉曼光谱揭示了一个连续的非自旋波激发在高温下仍然存在，这表明蜂窝状晶格上存在自旋液体态。根据 Kitaev 模型，磁场引入元激发之间的相互作用，因此必须探索与自旋交换能量尺度相近的强磁场的影响。该研究发现，磁场和温度相互竞争，以一种独立于内在交换作用能的方式来决定磁响应。这种标度不变磁各向异性提供了高度交换阻挫，有利于在  $\text{RuCl}_3$  中形成自旋液体。

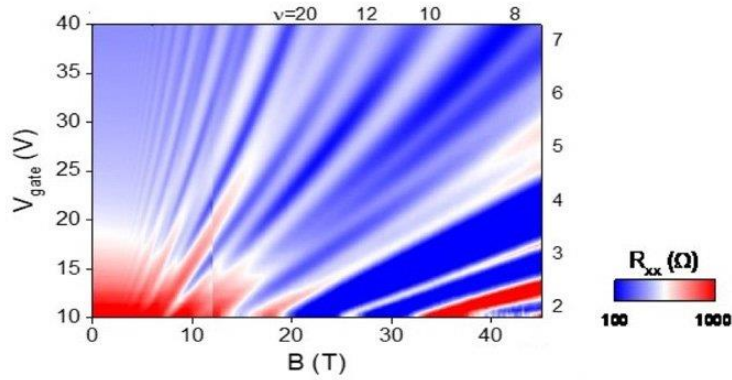


Cite: [K. A. Modic, et al. Nature Phys. \(2020\)](#)

装置：水冷磁体、脉冲磁体

### ● 强磁场下手性碲烯中的可调谐外尔费米子

普度大学的研究人员合成了一种新的二维材料碲烯薄膜，并利用该薄膜制备了半导体器件。在强磁场下，首次在碲烯中观测到了量子霍尔效应。一个有限的 Berry 相位(等于  $\pi$ )表明在碲的导带边缘附近存在外尔费米子，这可能与其手性晶体结构有关。

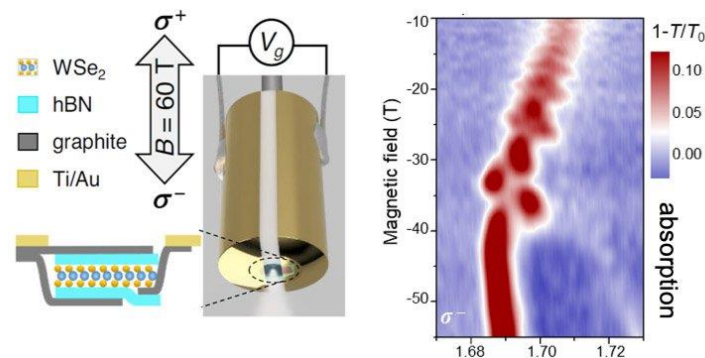


Cite: [G. Qiu, et al. Nature Nanotech.15, 585-591 \(2020\)](#)

装置：混合磁体

● 原子层厚半导体中自发的“谷极化”

在诸如 WSe<sub>2</sub> 的原子层厚半导体的新家族中，电子-电子相互作用可以驱动不稳定性，所有电荷载流子自发占据相同的“谷赭自旋”态。该实验将双门 WSe<sub>2</sub> 单层直接组装在单模光纤的纤芯上，从而能够在 60T 脉冲场下实现圆偏振吸收光谱。在某些载流子（空穴）密度下，K 和 K' 谷中的朗道能级接近准直，这时吸收谱的不连续性揭示了 K' 谷中磁场相关填充和朗道能级的不连续排空，表明自发谷极化。



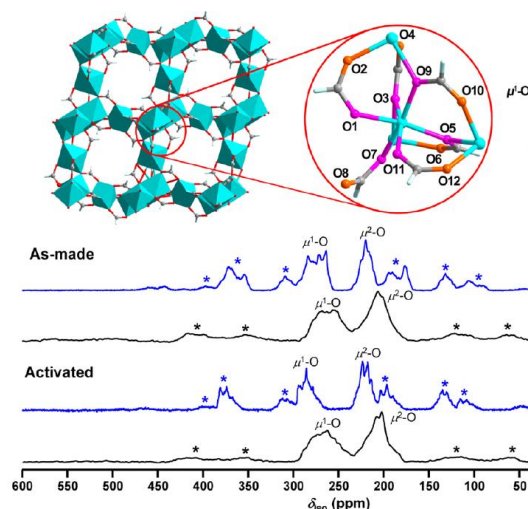
Cite: [J. Li, et al. Phys. Rev. Lett. 125, 147602 \(2020\)](#)

装置：脉冲磁体

## ● 用 35.2T $^{17}\text{O}$ NMR 探测 MOF

金属有机框架材料(MOFs)是通过金属离子和有机连接剂的自组装而成的新一代多孔材料。MOFs 具有高热稳定性、永久多孔性、骨架柔韧性和极高的表面积等特性, 有望在催化、药物传递、化学分离、气体吸附和存储、燃料电池, 甚至在经典和量子数据存储方面有许多潜在的应用。

美国强磁场实验室的串联混合磁体提供的  $^{17}\text{O}$  NMR 有无可比拟的分辨率, 从而准确判断出 $\alpha\text{-Mg}_3(\text{HCOO})_6$  MOF 的 12 个 O 位点, 以分辨新鲜制备和活化后的 MOF 结构上的差异。



Cite: [V. Martins, et al. J. Am. Chem. Soc. 142, 14877-14889 \(2020\)](#)

装置: 串联混合磁体

## 2. 欧洲强磁场实验室

### ● 43+T 混合磁体新进展

Grenoble 计划建造一个 43T/34mm 混合磁体, 其中外超导磁体提供 8.5T 磁场, 1.1m 冷孔径。

该外超导磁体采用 Nb-Ti/Cu Rutherford Cable On Conduit Conductor (RCOCC)技术, 1.8K 超流氦冷却。2017 年 Grenoble 强磁场实验室将导体交给 Bilfinger Noell GmbH 公司制造线圈。如今, 线圈制造完成并交付强磁场实验室。这是一个新的里程碑。接下来的工作将集中在低温系统与磁体的连接以及总装, 整个项目有望在 2021 年底完成。



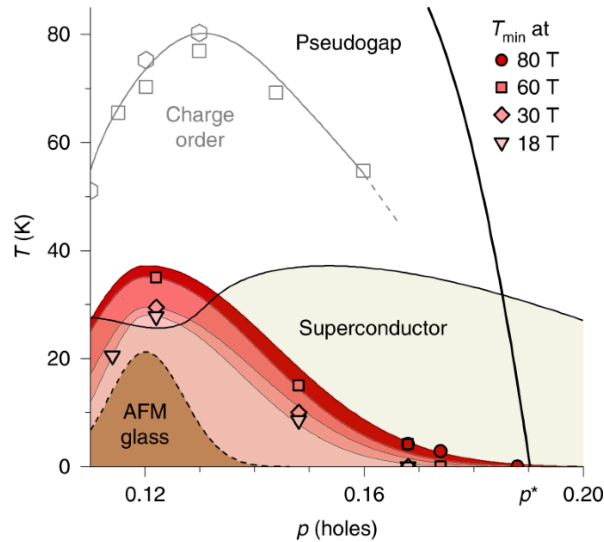
#### ● 欧洲强磁场实验室的可持续发展计划

欧盟给予 EMFL 一个 4900 万欧元的 H2020-ISABEL 项目(Improving the Sustainability of the EMFL)。项目从 2020 年 11 月开始, 为期 4 年, 旨在扩大开放、增强社会效益和提升科研影响力。

#### ● 铜氧化物超导中的隐藏磁性

空穴掺杂的铜氧化物超导体的赝能隙相的性质仍未完全理解。一些实验表明, 该相到临界空穴掺杂  $p^*$  结束, 但是对于低掺杂基态的性质仍存在争议。法国 Grenoble 强磁场的研究人员使用 NMR 和超声测量结果显示, 一旦强磁场压制了超导,  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  的自旋玻璃相将延续到  $p^*$  的掺杂水平。在这种材料中, 反铁磁玻璃相从掺杂  $p=0.02$  的 Mott 绝缘体一直延伸到  $p^*\approx 0.19$ , 这在赝能隙与 Mott 绝缘体之间建立了联系。



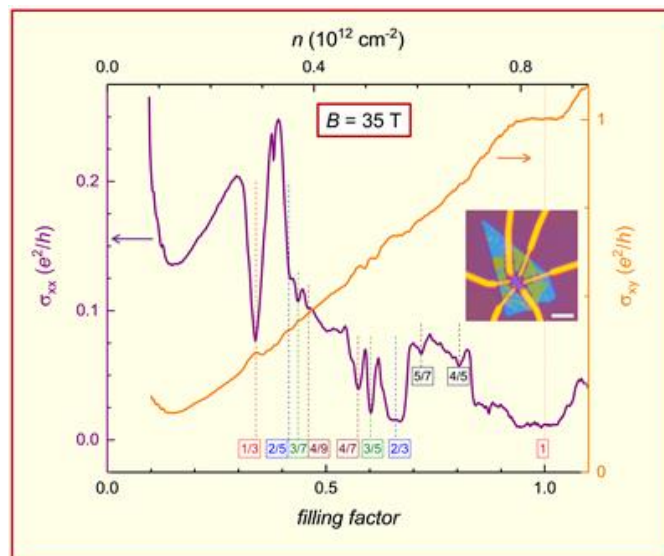


Cite: [M. Frachet, et al. Nature Phys. 16, 1064-1068 \(2020\)](#)

装置：水冷磁体

● CVD 石墨烯的分数量子霍尔效应

分数量子霍尔效应 (FQHE) 对样品质量很高，因此可被视作器件质量的证明。之前石墨烯中的 FQHE 还仅限于机械剥离样品，最近亚琛工业大学与荷兰强磁场合作，用 35T 低温高场磁输运实验成功地观察到 CVD 生长的石墨烯中的 FQHE。数据显示，CVD 生长的石墨烯其迁移率与机械剥离样品相近。这可能开启了一个用 CVD 技术生长大面积高质量 2D 材料的新时代。

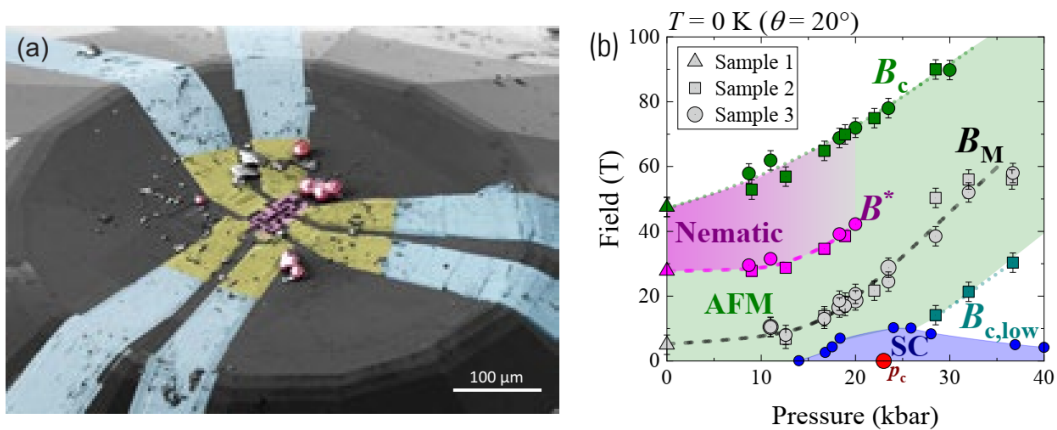


Cite: [M. Schmitz, et al. 2D Mater. 7, 041007 \(2020\)](#)

装置：水冷磁体

### ● 压力导致的 CeRhIn<sub>5</sub> 的强磁场向列相和磁性

德国强磁场实验室通过高压磁阻，在氦三低温下测量了 CeRhIn<sub>5</sub> 的微纳器件。加压到 20kbar 后，向列相开启磁场从 28T 上升到 40T，AFM 临界场也向高场方向移动。压力高于  $p_c$  时存在场致 AFM 重入。



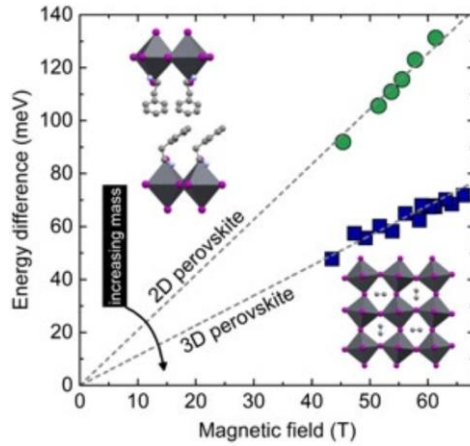
Cite: [T. Helm, et al. Nature Commun. 11, 3482 \(2020\)](#)

装置：脉冲磁体

### ● 2D 卤化物钙钛矿的宽可调载流子有效质量

2D 有机-无机卤化物钙钛矿因其在低成本、高效光吸收和光发射中的应用而引起了光电子学领域的极大兴趣。与其三维基材类似，层状钙钛矿衍生物在光伏和发光器件中表现出了很有前途的性能，同时表现出更高的环境稳定性。增强的环境稳定性来自于大的疏水有机阳离子 L。在二维体系里有大量的有机阳离子可以生成稳定的化合物，这使得 2D 钙钛矿成为一种前所未有的可调节光电性质的体系。

法国 Toulouse 强磁场实验室用强磁场光谱发现  $(\text{PEA})_2\text{PbI}_4$  和  $(\text{PEA})_2\text{SnI}_4$  存在带间跃迁, 而且  $\mu$  可以从  $0.05m_0$  到  $0.15m_0$  大范围调节, 远超三维体系。此外, 还观察到二维的有效质量低于三维, 这与经典理论相悖。

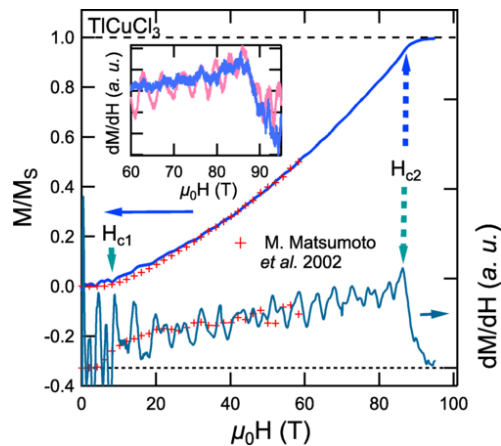


Cite: [M. Dyksik, et al. ACS Energy Lett. 5, 3609-3616 \(2020\)](#)

装置: 脉冲磁体

### 3. 日本强磁场实验室

- 100T 下  $\text{TICuCl}_3$  自旋二聚体的粒子-空穴对称破缺



使用单匝技术对  $\text{TICuCl}_3$  在 100T 范围内的整个磁化过程进行了研究。在 2K 下观察到上临界场为 86.1T。在下临界场和上临界场之间清晰观察到 M-H 曲

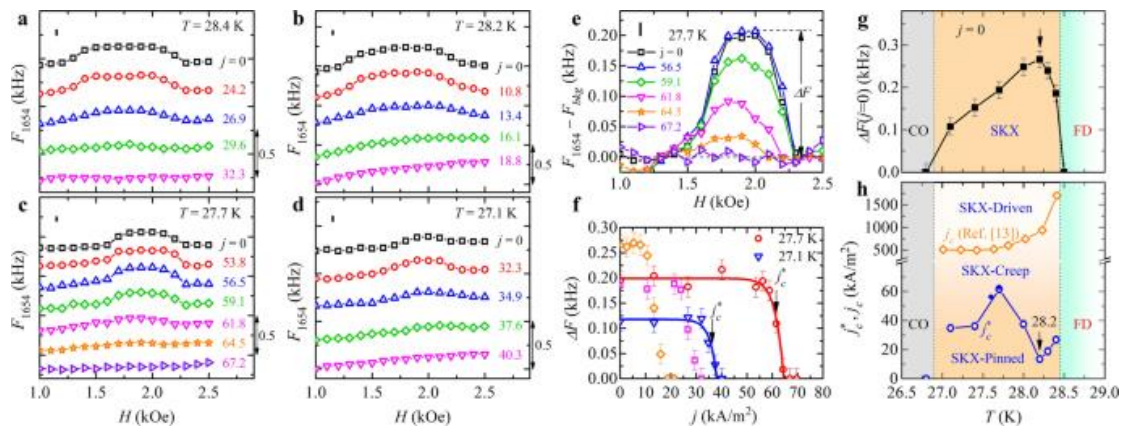
线的凸斜率，这表明粒子-空穴对称性被破坏了。通过量子蒙特卡罗模拟等理论方法，我们发现粒子-空穴对称性的破坏是由于强烈的二聚体相互作用造成的。

Cite: [X. Zhou, et al. Phys. Rev. Lett. 125, 267207 \(2020\)](#)

装置：脉冲磁体

## 4. 武汉脉冲强磁场科学中心

### ● 共振超声谱研究 MnSi 斯格明子相与晶格之间的磁晶耦合



罗永康教授与合作者利用共振超声谱技术测量斯格明子的典型材料 MnSi 中的斯格明子相与晶格之间的磁晶耦合，描绘出体系的相图与传统的交流磁化率等测量得出的结果一致。由于该磁晶耦合的存在，使得原本是立方晶系的 MnSi 的对称性降低为四方晶系。在共振超声谱测量的基础上，通过进一步对测量样品施加直流电流，研究斯格明子格子的钉扎效应，发现当电流密度达到  $j_c^* \sim 62 \text{ kA/m}^2$  时，斯格明子与晶体之间的耦合消失。该数值比人们以往通过拓扑霍尔效应、小角度中子散射等测量得到的脱钉扎临界电流密度  $j_c \sim 1500 \text{ kA/m}^2$  小了 20 多倍，表明在  $j_c^*$  和  $j_c$  之间还存在一个新的区间，其间斯格明子

与晶格之间已经脱钉扎，但尚未形成集体的、定向的运动，他们称之为斯格明子蠕动 (Creep) 相。

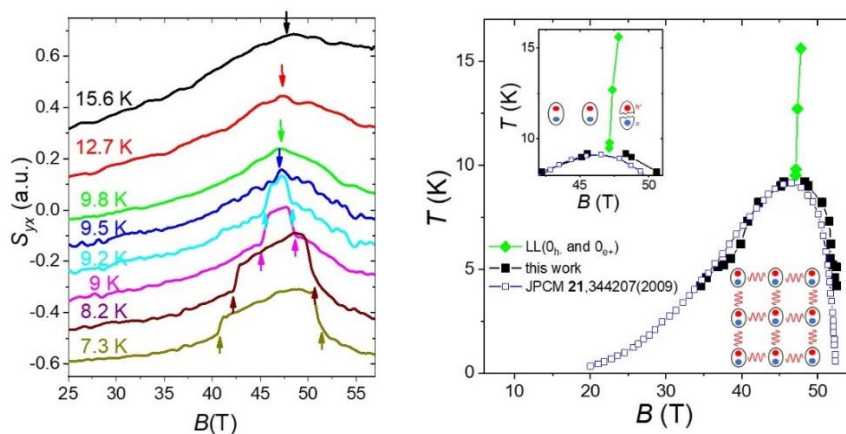
*Cite: Y. Luo, et al. Commun. Mater. 1, 83 (2020)*

装置：脉冲磁体

### ● 石墨中激子的波色-爱因斯坦凝聚的临界点

武汉强磁场中心克服脉冲强磁场下热电测量困难，成功测量到石墨在 60T 强磁场下对相变敏感的横向热电效应——能斯特效应。通过该效应发现石墨在低温 ( $T=9.2\text{K}$ ) 和强磁场 ( $B=47\text{T}$ ) 的临界点会发生波色-爱因斯坦凝聚，从而进入激子绝缘体态。该成果表明石墨是迄今为止第一个利用强磁场实现激子绝缘体态的材料，并可以通过调节磁场实现凝聚强度的调控，为后续研究强关联三维电子气的行为提供了一条切实可行的道路。

该实验是国际上首次利用 60T 脉冲强磁场测量能斯特效应，彰显了脉冲强磁场设施在输运测量上的国际领先地位。

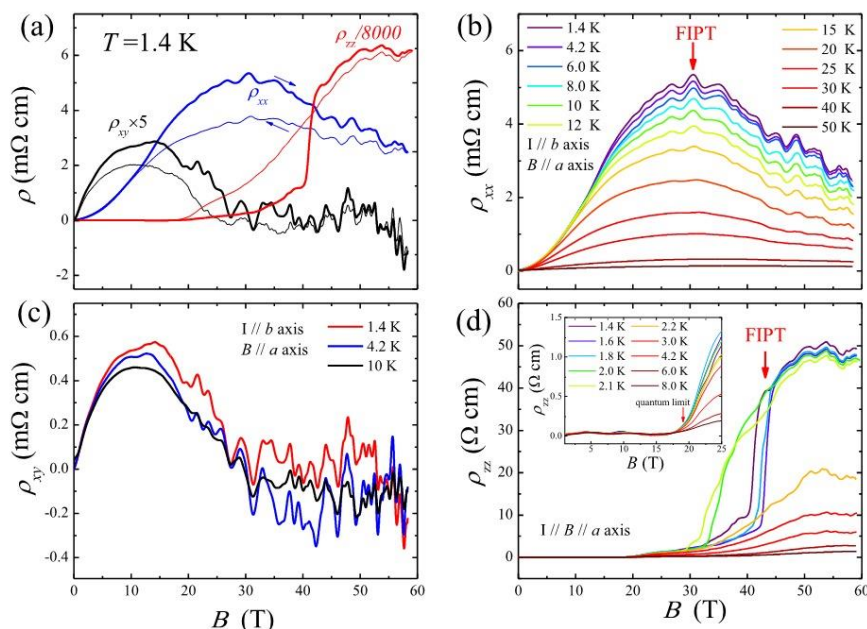


*Cite: J. Wang, et al. PNAS 117, 30215-30219 (2020)*

装置：脉冲磁体

## ● 强磁场诱导准二维电荷密度波导体 $\eta$ - $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$ 费米面重构

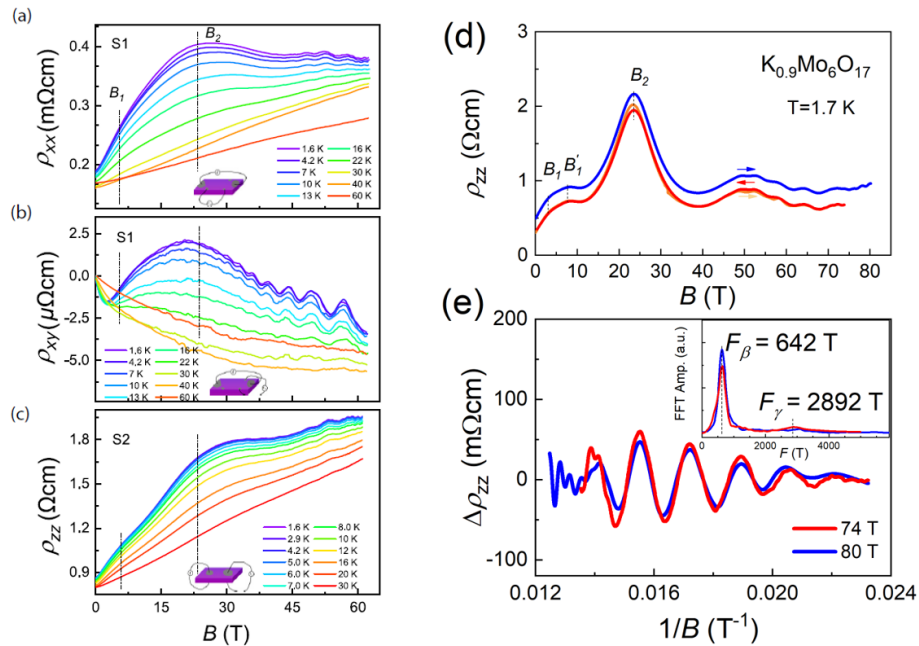
该研究首次系统报道了 $\eta$ - $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$  在高达 59 T 强磁场下的磁电阻和霍尔电阻性质。研究发现，在量子极限(19T)以上， $\eta$ - $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$  面内磁电阻、霍尔电阻以及层间磁电阻表现出显著的量子振荡行为。通过傅里叶分析，发现量子振荡的频率随磁场升高而不断增加。这种快速量子振荡的出现，表明系统的费米面结构在磁场作用下发生改变。通过计算发现，高频量子振荡对应的费米面与未发生嵌套时的正常金属态费米面积大小一致。此外，他们在层间磁电阻上观测到了一个显著的相变，在相变以上也出现与面内磁电阻一致的高频量子振荡。另一方面，霍尔电阻在强磁场下逐渐减小并最终趋于零，表明载流子数目随着磁场而不断增加。根据以上结果，他们提出了基于磁击穿效应的费米面重构模型： $\eta$ - $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$ 的费米面随着磁场增加而不断演化，最终在 CDW 被完全抑制下诱导出正常金属态费米面。



Cite: [J. Z. Ke, et al. Phys. Rev. B 102, 245135 \(2020\)](#)

装置：脉冲磁体

●  $A_{0.9}Mo_6O_{17}$  电荷密度波态量子振荡和磁场诱导费米面重构



该研究系统报道了  $Na_{0.9}Mo_6O_{17}$  在 62T 强磁场下的面内磁电阻、霍尔电阻和层间磁电阻，以及  $K_{0.9}Mo_6O_{17}$  在高达 80T 超强磁场下的层间磁电阻性质。对  $Na_{0.9}Mo_6O_{17}$  在强磁场的量子振荡研究发现，霍尔电阻的振荡只有一个频率 ( $F_\alpha=384T$ )，而面内磁电阻振荡有两个频率 ( $F_\beta=574T$  和  $F_\gamma=2779T$ )，层间磁电阻振荡则同时显示出  $F_\alpha$ 、 $F_\beta$  和  $F_\gamma$  三个频率。此外，强磁场转角输运测量也证实了这三个频率振荡来源于其二维费米面。而  $K_{0.9}Mo_6O_{17}$  的磁电阻振荡在 60T 磁场下只探测到  $F_\beta$  频率。他们认为，随着磁场的进一步升高， $F_\gamma$  振荡也将出现。为此，他们利用中心双线圈脉冲磁体提供的 80T 超强磁场条件，研究了  $K_{0.9}Mo_6O_{17}$  的层间磁电阻性质，并成功观测到了频率为  $F_\gamma=2892T$  的 SdH 振荡。这种高频振荡的出现，预示了强磁场下这两种 CDW 材料的费米面结构均发生了变化，揭示了强磁场对 CDW 态的抑制作用。通过进一步的数据分析，他们构建了  $A_{0.9}Mo_6O_{17}$  系统的 CDW 费米面结构，并澄清了 ARPES 实验的研究争论。



Cite: [H. P. Zhu, et al. Phys. Rev. B 102, 235164 \(2020\)](#)

装置：脉冲磁体

## 5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场科学中心科研人员制备出非金属基癌症诊疗试剂
- 王俊峰课题组利用液体核磁共振技术在生物膜环境下研究蛋白质相互作用方面取得进展
- 强磁场中心林文楚课题组肺癌治疗新方案研究方面取得进展
- 强磁场中心在磁斯格明子研究领域取得新进展
- 强磁场中心林文楚团队采用“合成致死”策略治疗小细胞肺癌取得进展
- 强磁场中心在太赫兹宽带可调器件研究方面取得新进展
- 强磁场中心在单层  $1T' - \text{WTe}_2$  体系中栅极电压调控超导电性机理方面取得新进展
- Obatoclax 增强蛋白酶体抑制剂对小细胞肺癌的抗肿瘤作用
- 强磁场中心在线粒体蛋白跨膜转运研究领域中取得突破性进展
- 科学岛在新型高效糖尿病治疗药物开发研究中取得重要进展

详见: <http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>