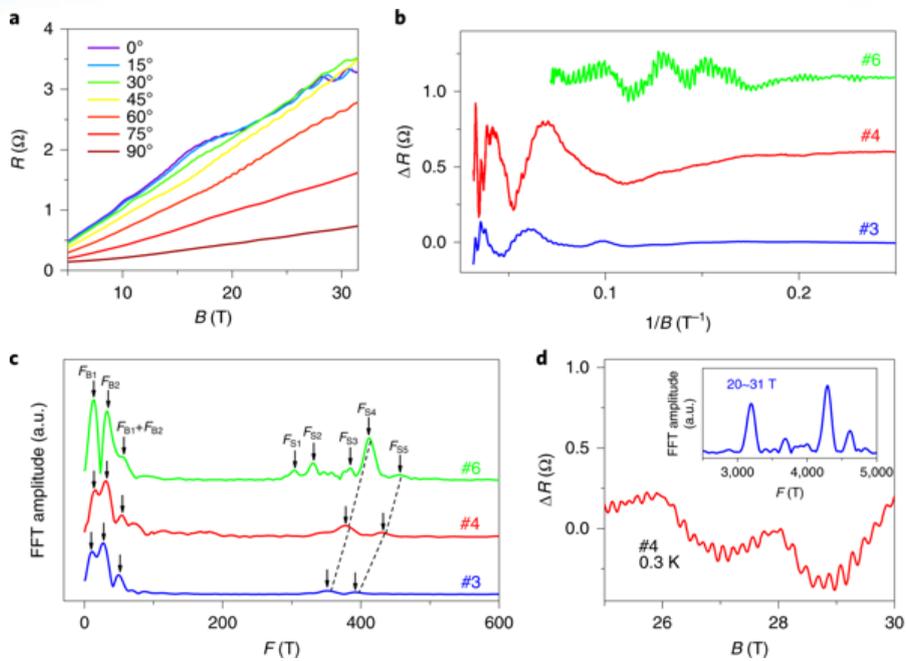


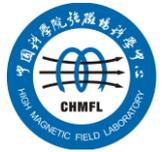
国内外强磁场实验室 科研动态

2019 年第一季度



中国科学院强磁场科学中心·科研办

2019/4/12



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

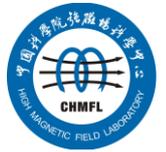
National High Magnetic Field Laboratory 又称 MagLab，是目前世界上规模最大，实验设施最全，用户最多的强磁场实验室。其稳态场部分位于 Tallahassee，脉冲场部分位于 Los Alamos，另有一个 high B/T 组位于 Gainesville。MagLab 于 1994 年建成并不断升级改造，创造并保持了多项世界纪录。

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

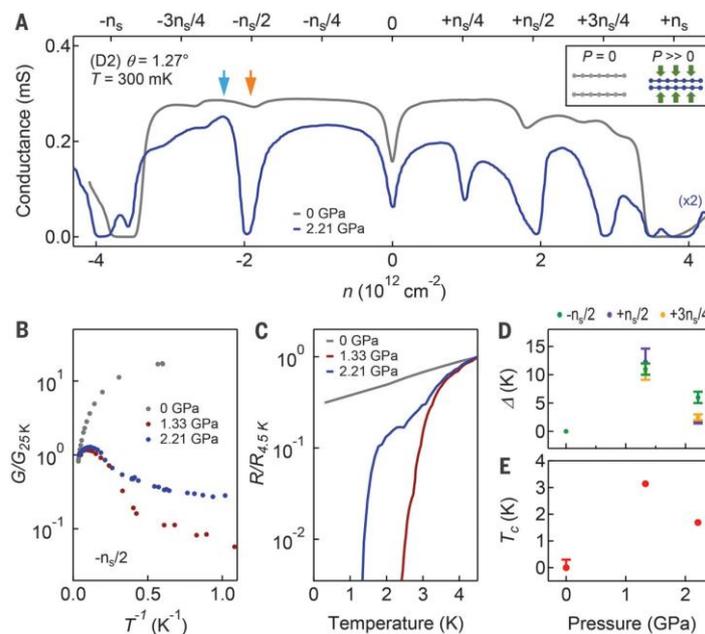
1. 美国国家强磁场实验室

● 解锁石墨烯的超导电性

双层石墨烯通过施加压力可变为超导体。

18年3月MIT曾报道石墨烯超导，是通过将两层原子扭转1.1度来实现的，但实验上精确控制在1.1度非常困难，微小的误差即可导致不同的结果。以哥伦比亚大学为首的科研团队另辟蹊径，通过加压调节两层石墨烯之间的间距来匹配不同的扭转角度，理论上任何角度都能实现超导。

实验是在MagLab的极低温-高压-强磁场集成测量系统上完成。



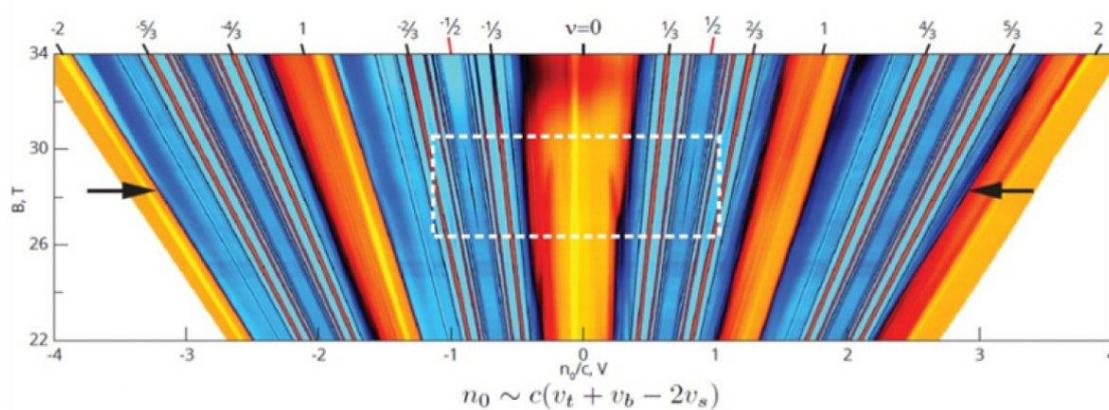
Cite: [M. Yankowitz, et al. Science 363, 1059 \(2019\)](#)

装置：水冷磁体

● 石墨烯中的偶数分数量子霍尔态

在单层石墨烯中，科学家在 28T 磁场附近观察到一种新的未曾理论预言过的分数量子霍尔态。

在高达 34T 的垂直磁场中通过门电压调控测量单层样品的电容，MagLab 的用户观察到从未见过的分数量子霍尔态。这些态仅存在于非常窄范围的磁场中，且接近电荷中性。这些新的分数量子霍尔态来源于石墨烯与电介质衬底（六方氮化硼）的紧密耦合。



Cite: A. Zibrov, et al. Nature Phys. 14, 930-935 (2018)

装置：水冷磁体，混合磁体

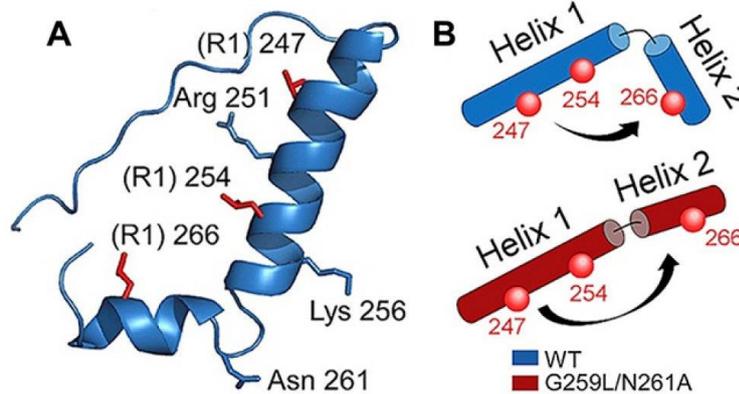
● 科学家们观察了 T 细胞的分子运动

T 细胞是一种白细胞，在预防和对抗疾病方面发挥着重要作用。科学家研究了细胞的表面蛋白，称为 T 细胞抗原受体（TCRs），测量它们与免疫系统激活相关的分子运动。

电子顺磁共振（EPR）和自旋标记技术为测量与细胞膜相关的蛋白质结构提供了独特的机会。这是因为 EPR 测量未成对电子自旋（“自旋标记”）之间的距离以及特定自旋标记浸入蛋白质所附着的膜中的深度。通过这种手段，哈

佛医学院等单位的用户解析了表面蛋白如何响应外部信号以激活免疫反应并攻击患病细胞的过程。

这些发现可能有助于研究人员根据患者的个体差异对 T 细胞疗法进行微调。



Cite: [*K. Brazin et al. Immunity 49, 1 \(2018\)*](#)

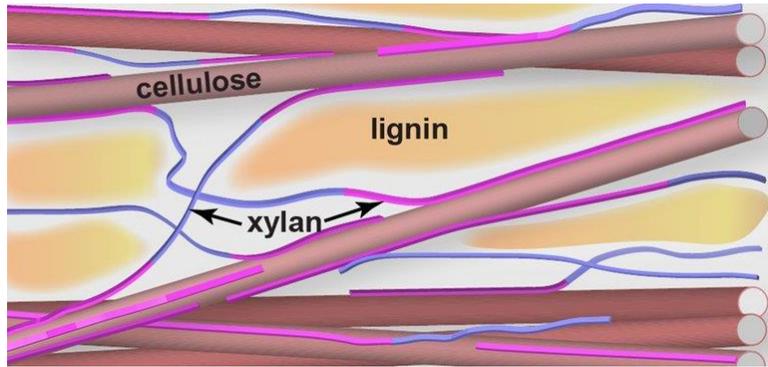
装置：EMR

● 在玉米中发现了新的“建筑”结构

对美国最具经济性的农作物——玉米的新研究揭示了植物的内部结构与以前认识的不同。这一惊人发现有助于优化玉米转化为乙醇的方式。

以前认为纤维素是一种厚而刚性的碳水化合物，其在植物中的作用类似于支架，直接与被称为木质素的防水聚合物相连。然而，MagLab 用户发现，木质素与植物内的纤维素接触有限，反而是通过胶水一样的木聚糖来实现连接。木质素除了作为结构成分，还可以阻止植物中的糖转化为乙醇。因此对这几种成分进行分子层面的研究对优化乙醇生产工艺十分必要。

目前美国的汽油含有约 10% 的乙醇，美国玉米产量的 1/3 (约 1.2 亿吨) 用于乙醇生产。即使仅提高乙醇生产效率 1% 或 2%，也会带来可观的社会效益。



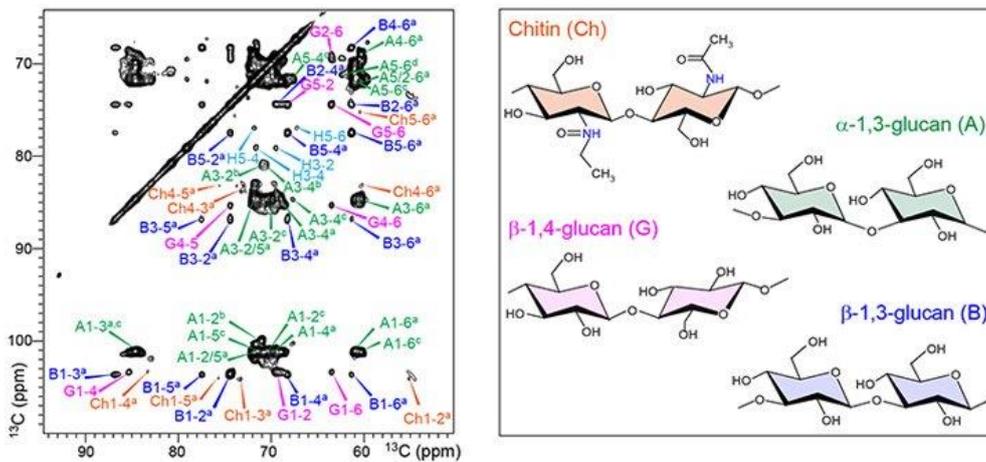
Cite: [X. Kang, et al. Nature Comm. 10, 347 \(2019\)](#)

装置：DNP-NMR

● 揭开真菌细胞壁的秘密

凭借前所未有的分辨率和灵敏度，科学家们首次发现了最常见和致命真菌的细胞壁结构。

这项合作确定了天然和完整真菌中富含碳水化合物的细胞壁的三维结构。通过使用动态核极化核磁共振（DNP-NMR），科学家们现在可以阐明碳水化合物和蛋白质是如何组成最普遍和最致命的真菌的细胞壁的。

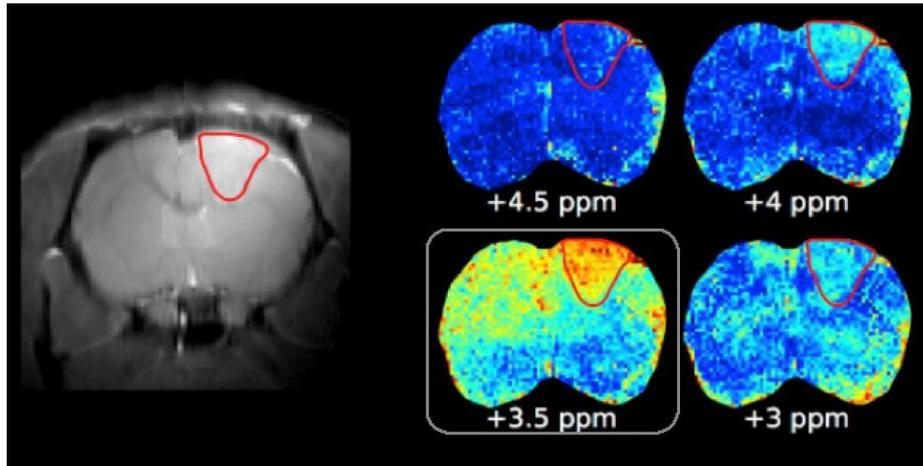


Cite: [X. Kang et al. Nature Comm. 9, 2747 \(2018\)](#)

装置：DNP-NMR

- **科学家们发现了脑疾病的潜在生物标志物**

通过将 MagLab 功能强大，独一无二的 21.1 特斯拉 MRI 磁体与新技术相结合，研究人员发现了新的脑肿瘤潜在疾病标记物。科学家们使用一种新颖的图像对比技术，称为化学交换饱和转移（CEST），以及先进的信号处理算法，来获取这些精细的图像。



Cite: T. Roussel, et al. NMR in Biomed. 31, e3995 (2018)

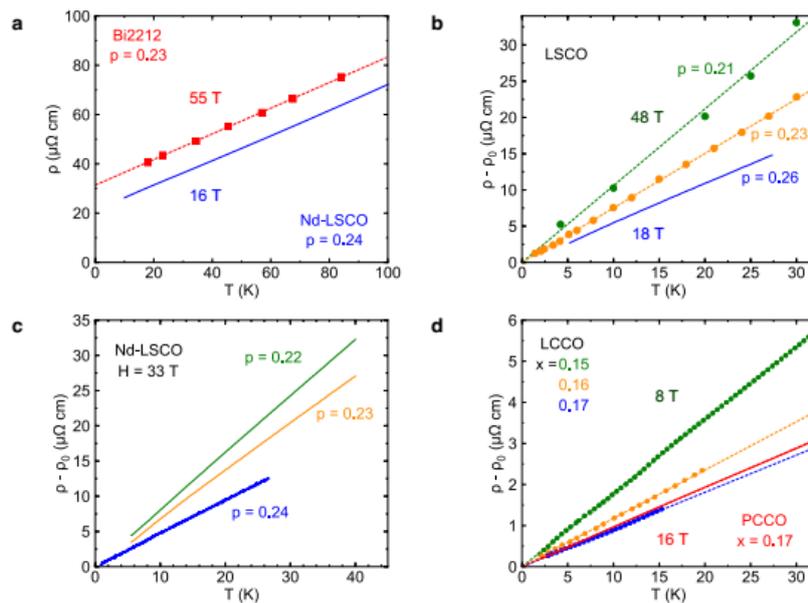
装置：MRI

2. 欧洲强磁场实验室

- **高 T_c 超导体中的普朗克耗散**

测量新材料的电阻通常是研究人员所做的第一个实验，但也常常是最后一个被理解的实验。通常金属在低温下电阻与温度的平方成正比，一些量子材料显示出不同性质，如铜酸盐中的“奇异金属”相就具有线性的电阻温度关系。强烈的电子相互作用肯定是这种现象的根源，但迄今为止尚未有更多详细的解释。

为解决这个问题，Toulouse 脉冲场实验室和加拿大的研究人员在高达 60T 的磁场中测量了 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 薄膜的电阻率，观察到电阻率保持线性至非常低的温度。此外通过一系列定量分析揭示了一种被称为普朗克耗散的普遍机制，能量耗散的最小时间由海森堡不确定性给出。这一限制意味着电子散射率 h/τ 可以简单地由 $k_B T$ 给出。

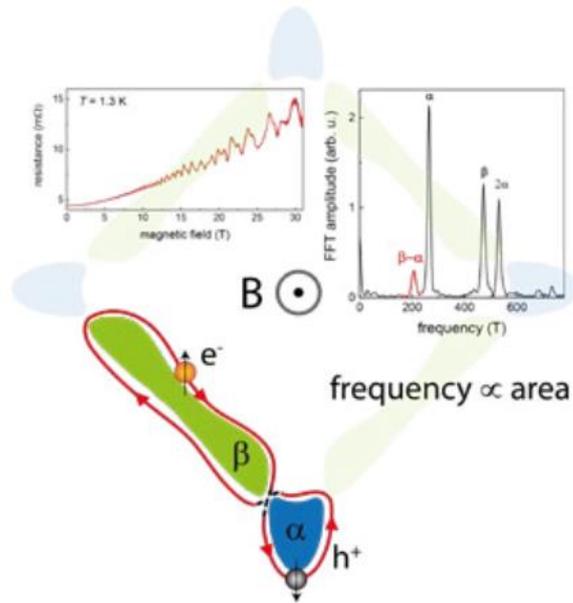


Cite: [A. Legros, et al. Nature Phys. 15, 142 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

● 量子振荡揭示的动量空间中的电子-空穴隧穿

来自德、美、英的研究人员和荷兰强磁场实验室合作，在节线半金属 HfSiS 的动量空间中发现了电子-空穴隧穿的证据。这种特定的隧穿现象在低温和强磁场中电阻的量子振荡中被揭示，并且可以理解为包含一个电子和一个空穴口袋的“8 字形轨道”。这些研究表明，动量空间中的电子空穴隧穿是具有相邻电子和空穴口袋的半金属的普遍性质，条件是施加的磁场强到足以克服它们的 k 空间分离。

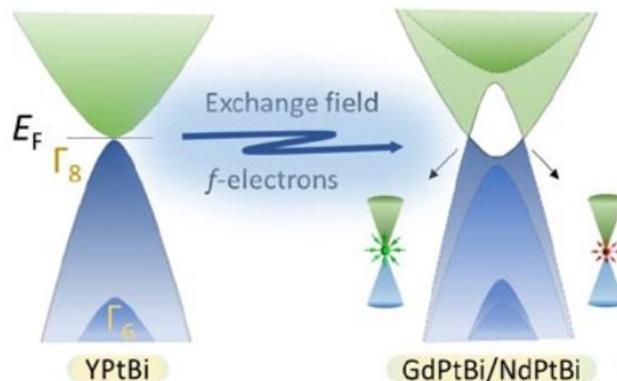


Cite: [M. R. van Delft, et al. Phys. Rev. Lett. 121, 256602 \(2018\)](#)

装置：水冷磁体

● 外尔半金属 GdPtBi 的反常霍尔效应

德国、瑞士的科学家与德国、荷兰强磁场实验室合作，在低温和高达 70T 的高磁场下进行了磁输运实验，观察到外尔费米子介导的 GdPtBi 和 NdPtBi (Heusler 家族的两个成员) 的极大的手性异常，这来源于外尔点对之间泵浦的外尔费米子，还观察到由于非零 Berry 曲率引起的大的反常霍尔效应。二者的温度依赖性遵循相似的趋势，表明它们有共同的起源。这项研究还表明，通过能带的交换分裂，磁性在产生外尔费米子方面起着至关重要的作用。

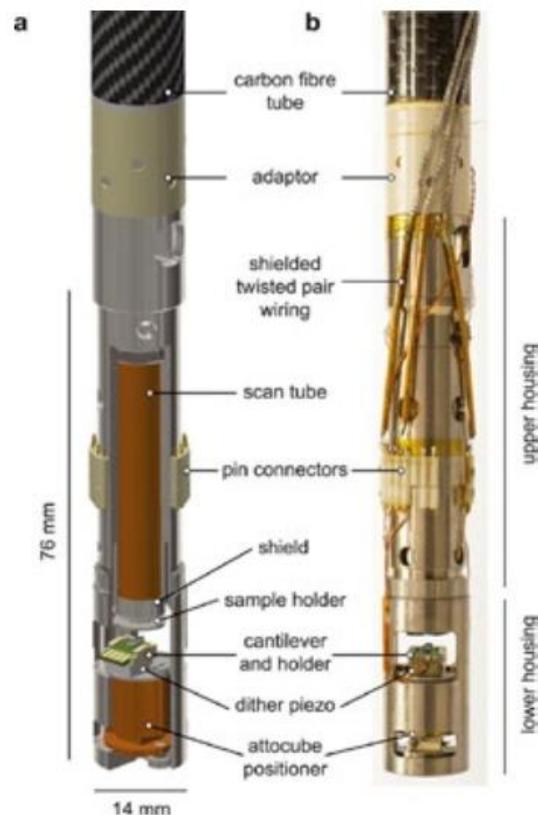


Cite: [C. Shekhar, et al. PNAS 115, 9140 \(2018\)](#)

装置：脉冲磁体、水冷磁体

- 用于 30 T 以上磁场的超紧凑低温扫描探针显微镜

荷兰强磁场实验室刚刚研制了一台扫描探针显微镜（SPM），这是世界上唯一一台可以在 30T 以上磁场中工作的 SPM，同时它非常紧凑，只有 14x76mm，因此可以同时工作在低温环境下。

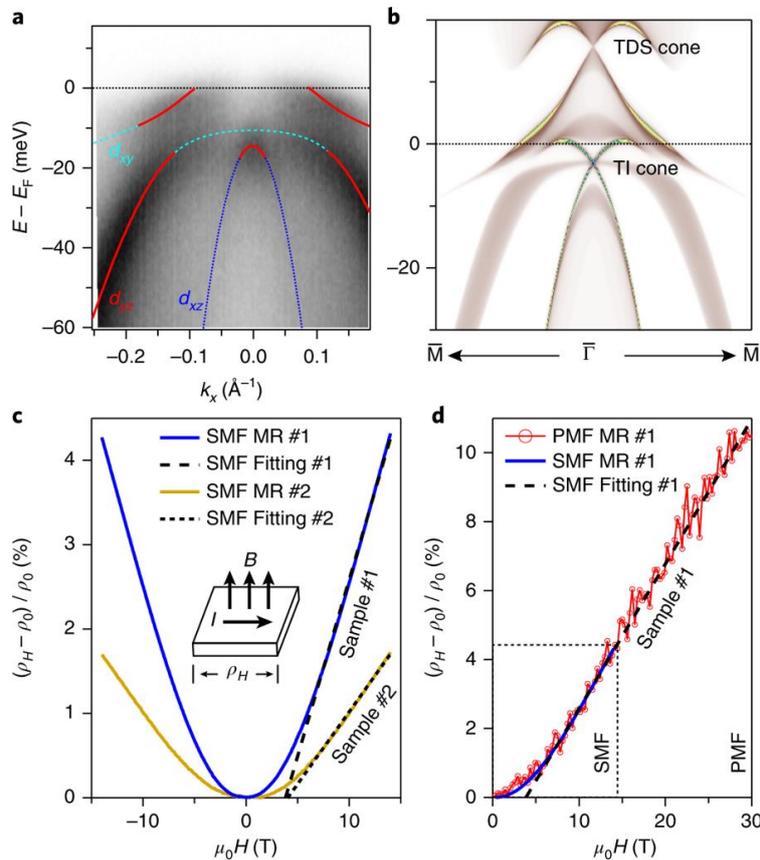


Cite: [L. Rossi, et al. Rev. Sci. Instrum. 89, 113706 \(2018\)](#)

3. 日本强磁场实验室

- 铁基超导体中的多种拓扑态

拓扑材料和非常规铁基超导体都是重要的研究领域，但迄今为止，这两个领域之间的重叠程度相对较小。然而，拓扑带和超导的组合有望表现出奇异的超导态，包括 Majorana 费米子，它是拓扑量子计算的核心组成部分。日、美、德、中四国的科研人员合作，使用自旋分辨和角分辨的光电子能谱和密度泛函理论计算，在不同的铁基超导化合物中确定了费米能附近的拓扑绝缘体和狄拉克半金属态。载流子掺杂可以将这些拓扑非平庸能带调到费米能附近，可能允许在相同材料中获得几种不同的超导拓扑态。这些结果揭示了铁基超导体中超导性和多种拓扑态的共存，表明这一类材料是高温拓扑超导的潜在候选。

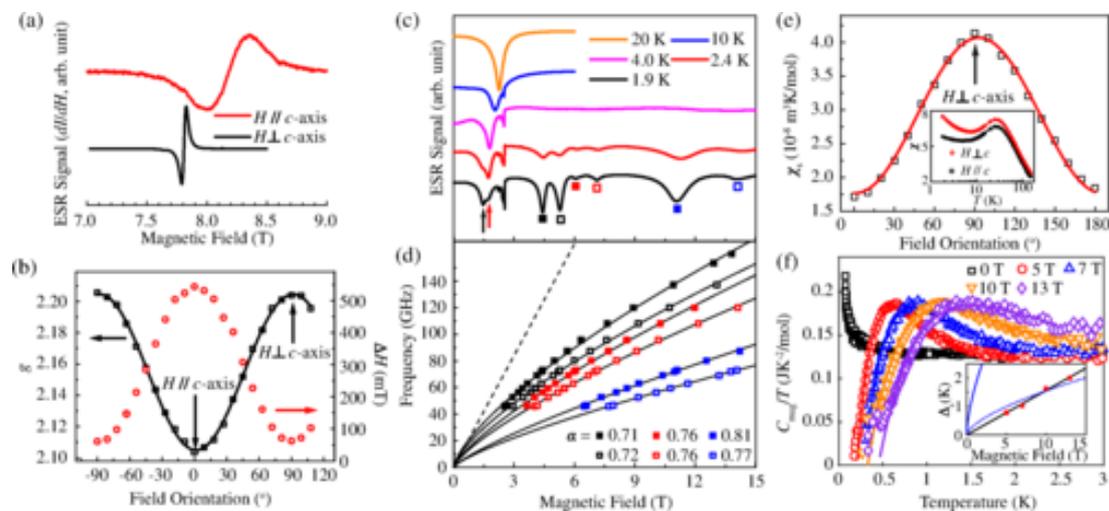


Cite: [P. Zhang, et al. Nature Phys. 15, 41 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

- **S = 1/2 手性交错链中的非常规场诱导自旋能隙**

英国、日本与美国的科研人员研究了基于分子的手性自旋链 $[\text{Cu}(\text{pym})(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SiF}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (pym=嘧啶) 的低温磁性。ESR、磁性和热容测量显示出交错的 g 张量, 丰富的低温激发光谱, 交错的磁化率以及在施加磁场时打开的自旋能隙。尽管 sine-Gordon 模型很好地解释了热容的温度依赖性, 但是无法解释能隙的大小以及磁场的线性依赖关系。作者提出, 是该体系的手性结构, 特别是均匀的 D-M 耦合和四重周期交错场, 使得哈密顿量中的附加项产生差异。



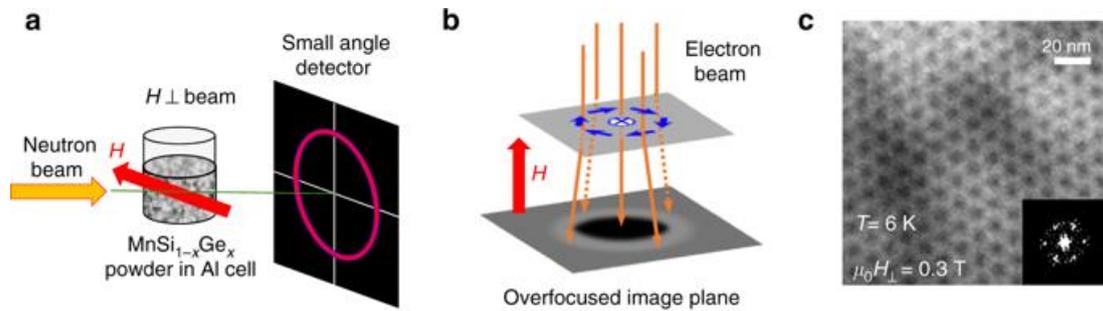
Cite: [J. Liu, et al. Phys. Rev. Lett. 122, 057207 \(2019\)](#)

装置：高场 ESR

● 立方手征磁体中的 skyrmion 和 hedgehog 晶格态之间的拓扑转换

操纵拓扑自旋织构是探索前所未有的呈展电磁现象的关键。目前的研究集中在 skyrmion 晶格相与传统磁有序之间的转变, 而对不同拓扑序的自旋织构之间的转变知之甚少。日本的科研人员开发了一系列手性磁体 $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$, 作为 skyrmion 和 hedgehog 晶格态之间转换的平台。通过中子散射, 洛伦兹电镜和高场输运测量, 根据 Si / Ge 配比的不同观察到三种不同的拓扑自旋织构,

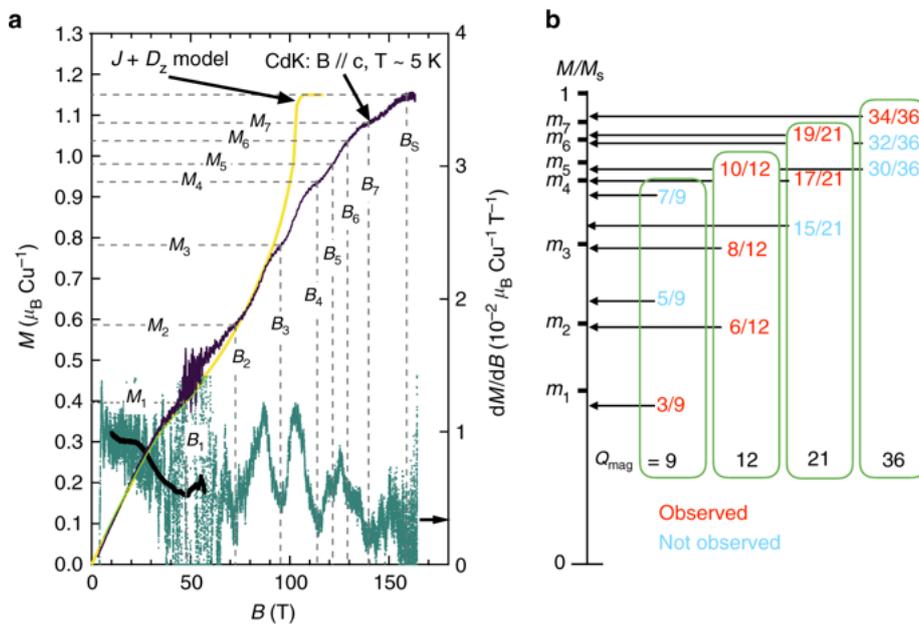
分别是二维 skyrmion 晶格和两种不同的三维 hedgehog 晶格。通过化学压力控制材料中各种拓扑自旋态的实现为直接通过机械压力来调控提供了想象空间。



Cite: [Y. Fujishiro, et al. Nature Comm. 10, 1059 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

● **kagomé 反铁磁体在超高磁场下出现一系列磁子晶体**



几何阻挫和强磁场是在磁性材料中实现非常规量子态的两个关键因素。具体而言，传统的磁有序可能会被竞争的相互作用破坏，形成一些被称为磁子的准粒子，其密度和化学势由磁场控制。有一种合成铜矿物 Cd-kapellasite，它包含一个由自旋 1/2 的 Cu²⁺ 离子组成的 kagomé 晶格，在高达 160 T 的超高

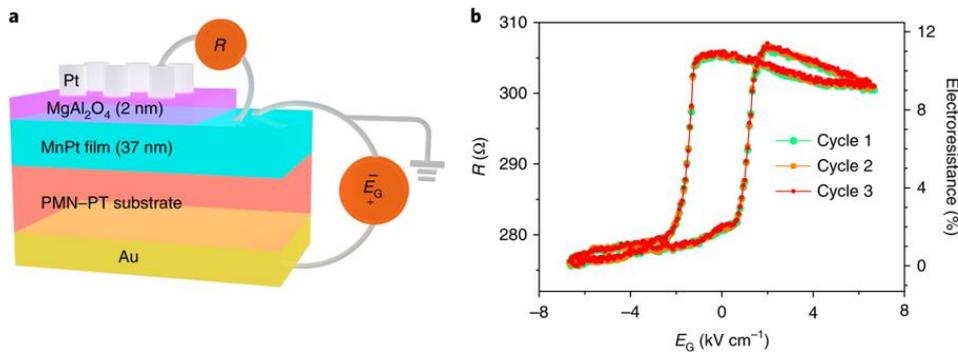
磁场中展现出前所未有的系列分数磁化平台。这些量子态可以理解为位于 kagomé 晶格六边形上的呈展磁子的晶化。

Cite: R. Okuma, et al. Nature Comm. 10, 1229 (2019)

装置：脉冲磁体

4. 武汉脉冲强磁场科学中心

● 北航刘知琪教授团队在反铁磁记忆器件领域取得进展



刘知琪教授团队和武汉强磁场中心朱增伟教授合作，利用脉冲强磁场实验装置提供的 60T 脉冲强磁场，测试了反铁磁材料 MnPt 在超强脉冲磁场下的响应，实现了可抵抗超强磁场并具有超低功耗的反铁磁记忆器件。该研究团队通过将 MnPt 纳米薄膜生长在铁电单晶材料 PMN-PT 上，采用电场操控的压电应力对 MnPt 的自旋轴和电阻进行了非易失性调控，先是在 9T 和 14T 磁场下证实了这种器件制成的硬盘可以完全抵抗外界磁场，然后在此基础上测试了 MnPt 在 60T 磁场下的响应，发现其电阻态在 60T 下几乎不变化 ($\sim 0.1\%$)，从而证实了这种记忆器件的数据态即使在 60T 超强磁场下也不会“消磁”，将反铁磁材料抵抗磁场的优势推向了极致。同时，基于压电应力对 MnPt 薄膜中反铁磁自旋轴的



调控，研究团队还制备出了反铁磁隧道结器件，在室温下实现了 11.2% 的电阻调控，从而克服了之前的反铁磁隧道结很难在室温下工作的不足，并将这种新型器件向高密度集成方向推进了重要的一步。

Cite: Y. Han, et al. Nature Nanotech. 14, 131–136 (2019)

装置：脉冲磁体

● 准一维重费米子材料 CeCo_2Ga_8 的近藤链效应研究进展

武汉强磁场中心罗永康教授团队与中科院物理所石友国、杨义峰研究员合作，重新研究了准一维重费米子材料 CeCo_2Ga_8 中的电运输和磁性质的各向异性。从电运输性质看，c 方向的电阻率在 17K 以下出现相干晶体散射，而 a 和 b 方向的电阻率在 2K 以上一直保持着非相干近藤散射，表明它具有准一维的电性质。从磁性质看，磁化率的各向异性可以通过晶体场效应理论来描述，拟合得到的磁性交换作用的强度分别为 $J^a \approx 2.5\text{K}$ 、 $J^b \approx 3\text{K}$ 、 $J^c \approx -12\text{K}$ ，以及各向异性比例 $|J^c/J^{a,b}| \approx 4-5$ ，表明它具有准一维的磁性质。从而证明了 CeCo_2Ga_8 无论在电学上还是磁学上都是准一维的，即近藤链。迄今为止， CeCo_2Ga_8 是第一个具有近藤链效应的重费米子材料。

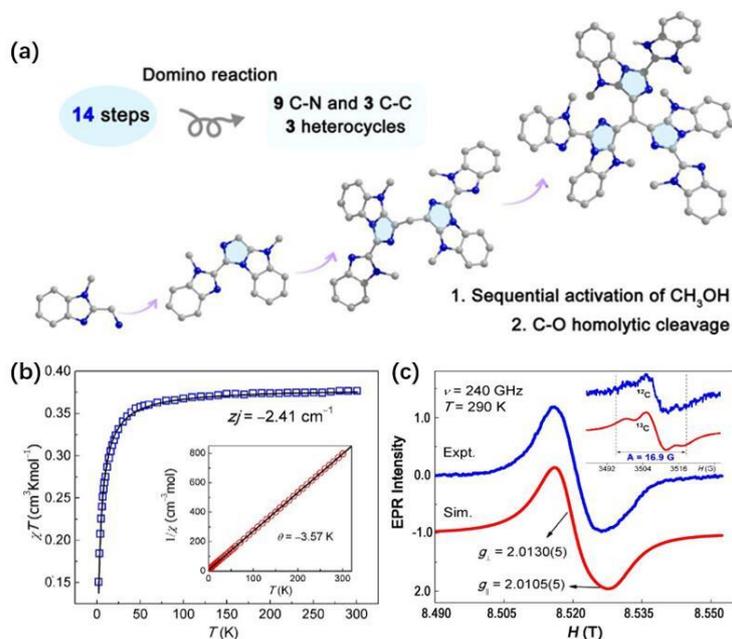
Cite: K. Cheng, et al. Phys. Rev. Mater. 3, 021402(R) (2019)

装置：脉冲磁体

● 湖北大学曾明华教授团队在多米诺反应研究上取得进展

曾明华教授团队发现了世界上最长的新型串联反应（14 步），并高产率得到新型的三杂芳基甲基自由基终产物。在产物中新生成了 12 个化学键（9 个 C-N 键、3 个 C-C 键）和 3 个五元杂环。综合利用电喷雾质谱、X-射线晶体学、同

位素标记、磁性、强磁场 ESR 等实验手段，跟踪了反应过程，并解析了上述反应的机理。值得注意的是，溶剂甲醇在反应过程中经历了罕见的三重 C-H 键及 C-O 键活化，而生成该自由基终产物的关键步骤是叔醇碳氧键的均裂，这打破了 100 多年来通过碳负离子氧化生成三芳基甲基自由基的方法局限，有助于拓展该类新型自由基的系列化合成。



Cite: *B. Liu, et al. Angew. Chem. Int. Ed. 58, 3748 (2019)*

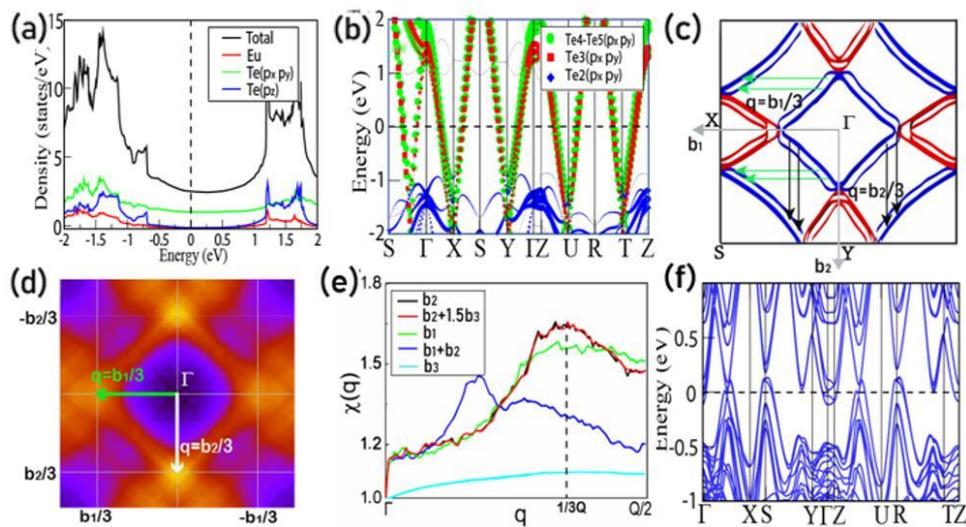
装置：高场 ESR

● 准二维 CDW 材料 EuTe_4 的研究取得进展

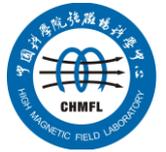
EuTe_4 是一种新型准二维稀土化合物。当温度降低以后，X 射线晶体分析和透射电镜研究表明，面内的 Te 原子层发生强烈的结构畸变，形成 $1a \times 3b$ 的超晶胞结构，为 CDW 的形成提供了实验证据，而与温度有关的电荷输运测量证实了在 $T_c=255\text{K}$ 附近发生了 CDW 转变。

武汉强磁场中心的徐刚研究组利用第一性原理计算，揭示了 EuTe_4 是一个典型的由费米面嵌套驱动的准二维 CDW 材料。他们计算了室温结构下的投影态

密度和能带，计算结果显示室温结构的 EuTe_4 具有金属和各向异性的电子结构，其中费米能级附近的电子主要来自 Te 网格中的 $p_x p_y$ 轨道。通过计算其费米面发现，有两个波矢能够产生较大的费米面嵌套效应，即 $q=b_1/3$ 和 $q=b_2/3$ 。细致的林哈德函数计算结果显示， $q=b_2/3$ 波矢处的费米面嵌套不稳定性更为强烈，这与实验上观察到的 $1a*3b$ 的超晶胞结果完全符合。低温结构下的电子结构说明由于费米面的嵌套效应使得费米能级附近的态密度显著降低，这也很好解释了体系在低温下的半导体性质。该成果为 CDW 驱动的二维半导体机制的研究提供了一个很有前景的系统，这将为探索具有集体电子态的新型二维半导体提供新的思路。



Cite: [D. Wu, et al. Phys. Rev. Mater. 3, 024002 \(2019\)](#)



5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场中心与北大合作研究揭示外尔半金属 TaAs 的不饱和量子磁性
- 稳态强磁场装置助力发现超高电导率材料
- 癌症碳基药物载体研究取得新进展
- 反应容器几何形状作为热力学参量控制化学反应进程和结果
- “老药”卡博替尼的新适应症：c-KIT 激酶突变驱动的胃肠间质瘤
- SHMFF 用户成果入选 2018 年度“中国生命科学十大进展”
- SHMFF 用户在强磁场超高压下合金超导电性研究取得重要进展

详见：<http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>