

国内外强磁场实验室 科研动态

2018 年第一季度



中国科学院强磁场科学中心·科研办

2018/6/26

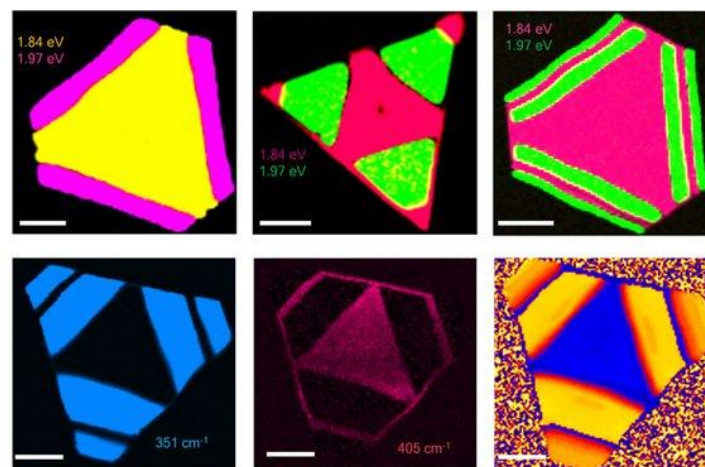
1. 美国国家强磁场实验室

● 构建单层电子器件的新技术

超薄材料已风靡科研界十多年，科学家们乐观地认为他们必将带来崭新的电子和量子技术。然而，这些单原子层材料需要“缝合”在一起，以释放它们的全部潜力，尤其是一些专门的应用（如互补逻辑电路）需要在大面积上拼接这些化合物，这对某些半导体如过渡金属二硫族化合物将是一个特别棘手的过程。

南佛罗里达大学的研究人员已经开发出了一种开创性的方法来结合这些原子级的薄层半导体。这种新方法产生了高质量的结构，科学家可以使用这些结构来开发原型器件。

研究人员使用 MagLab 的高分辨率像差校正电子显微镜观察原子尺度下半导体之间的界面质量。通过电学测量的佐证，研究人员证实，这种拼接方法既灵活又可扩展，有可能在需要透明度、灵活性和轻量化的特殊应用中产生更大的影响。



Cite: P. K. Sahoo, et al. Nature 553, 63 (2018)

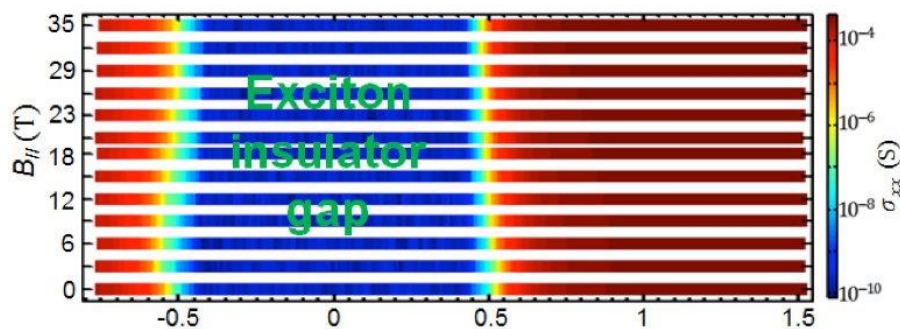
装置：TEM

● 二维电子空穴“超导体”：拓扑激子绝缘体

莱斯大学的杜瑞瑞组在双量子阱半导体器件中观察到拓扑激子绝缘体。

数十年前就有理论指出，激子绝缘体是由准粒子配对产生的，这个过程很像超导的 BCS 理论。在 InAs/GaSb 量子阱中的新的实验发现，不仅解决了这一古老的问题，而且验证了最近关于该双量子阱系统具有潜在拓扑性质的预言。

通过对器件施加电场，研究人员将电子和空穴密度调整到非常低的值，使得量子阱中的电子与另一层中的空穴配对，由此测量到激子绝缘体能隙和量子化的边界态。测量时施加 35 T 的面内磁场，层间隧穿被抑制。



Cite: [L. J. Du, et al. Nature Commun. 8, 1971 \(2017\)](#)

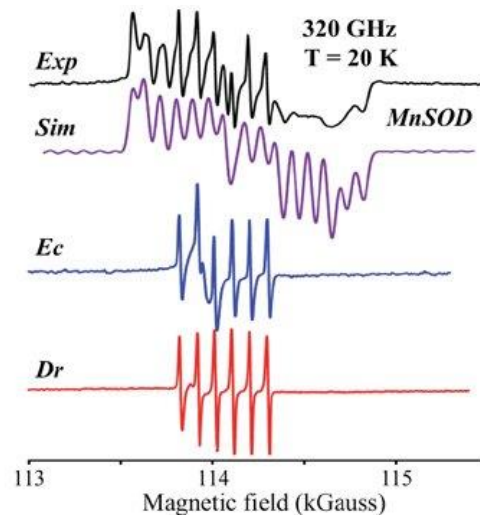
装置：35 T 水冷磁体、³He 低温系统、稀释制冷机

● 使用高场 EPR 技术测量细胞抗辐射性

数十年来的研究一直未能预测细胞在电离辐射 (IR) 下的生存能力。有证据表明，亚锰离子与代谢产物的高对称性抗氧化剂复合物 (H-Mn²⁺) 负责细胞的 IR 抗性。这种 H-Mn²⁺ 能保护蛋白质组 (而不是基因组) 不受 IR 产生的活性氧损害。

美国西北大学的研究表明，非照射活细胞中 H-Mn^{2+} 的数量可以通过电子顺磁共振 (EPR) 光谱很容易地进行测量，并且在 γ 辐射暴露后高度诊断 DNA 修复效率和存活率。重要的是，高场 EPR 的高分辨能力可以证明超氧化物歧化酶 (MnSOD) 在细菌 *Deinococcus Radiodurans* (Dr) 中的含量微不足道，从而驳斥了先前的论断，即 MnSOD 对于 Dr 的 IR 存活至关重要。事实上，Dr 的 EPR 谱中的窄六线峰是高对称性 H-Mn^{2+} 。

这项研究提供了已知细胞电离辐射抗性的最强的生物学指标，其潜在应用包括放疗的优化等。



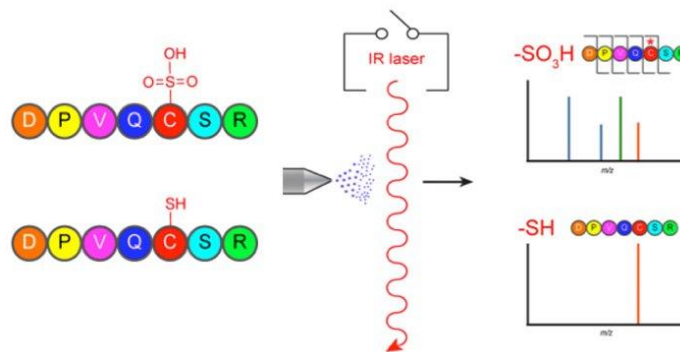
Cite: [A. Sharma, et al. PNAS 114, E9253 \(2017\)](#)

装置：高场 EPR

- **通过选择性红外多光子解离质谱进行肽的靶向注释**

蛋白质氧化损伤在许多疾病中都很常见，包括癌症，神经退行性疾病和心血管疾病等。然而，人们对氧化损伤致病机理知之甚少。密歇根大学的研究人员开发了一种新技术，利用红外激光与质谱仪相结合，选择性识别复杂蛋白质

混合物中的氧化位点。这个敏感和快速的平台可能胜过目前所有的技术，用来揭示氧化损伤在各种疾病中的作用。

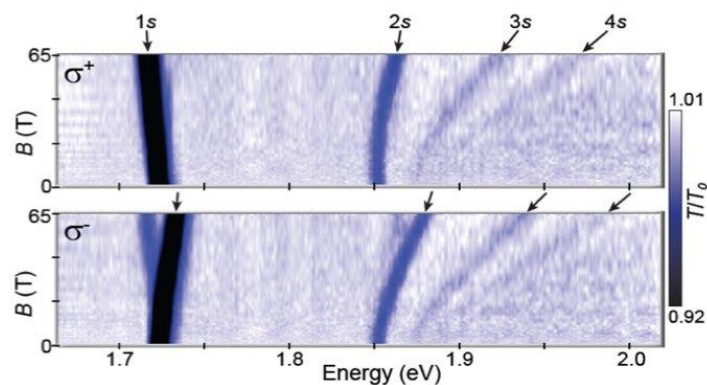


Cite: *N. B. Borotto, et al. Anal. Chem. 89, 8304 (2017)*

装置：离子回旋共振谱

● 一种新的单层半导体中的激子态

强磁场使我们能够首次直接测量一种新的二维材料 (WSe_2) 中基本粒子的质量。激子是半导体中一种基本的光激发，在太阳能电池或 LED 等应用中起着至关重要的作用。这些激子的质量几乎影响器件性能的所有方面。在最近发现的二维半导体如 WSe_2 或 MoS_2 中，激子的质量只能从理论推断出来。Los Alamos 脉冲强磁场实验室的研究人员提供了这个重要且基本的物理参数的第一个实验测量。预计这些 2D 半导体将成为新一代超薄、轻量 and 高效光电子器件的基础。



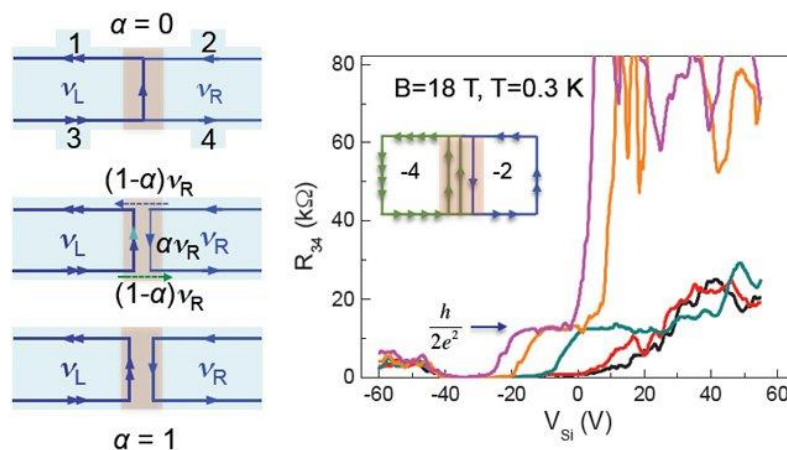
Cite: [A. V. Stier, et al. Phys. Rev. Lett. 120, 057405 \(2018\)](#)

装置: 65 T 脉冲磁体

● 双层石墨烯中的门控量子霍尔边缘态

石墨烯在其被发现后的 14 年中, 以突破性的物理和技术潜力展现在世人面前, 令全世界的科学家惊叹不已。双层石墨烯表现出偶数分母分数量子霍尔态, 其集体激发遵循不寻常的量子统计, 并可用作拓扑量子计算的基础。集体激发的实验测量需要电子干涉仪。量子霍尔效应内的门控边缘态是实现干涉仪的第一步。

宾州州立大学的研究人员利用高超的光刻工艺, 用双层石墨烯制造出双分裂门器件, 其中两个量子霍尔系统的边缘态之间的隧穿势垒的高度由门电压控制。这使得研究人员可以连续调整边缘态的传输率来研究整个 $0 \leq \alpha \leq 1$ 区间。研究人员还观察到各个边缘态的连续夹断的实验证据。



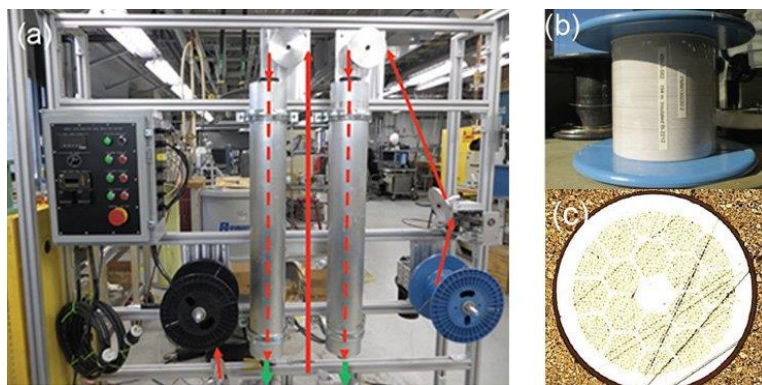
Cite: [J. Li, et al. Phys. Rev. Lett. 120, 057701 \(2018\)](#)

装置: 18 T 超导磁体、³He 低温系统、水冷磁体

● 用于高温超导导线的陶瓷绝缘材料

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-x}$ (Bi-2212) 是一种高温超导线材，可用于制造磁场远超商业磁体的新型磁体，尤其是核磁共振 (NMR) 和磁共振成像 (MRI) 所需的高均匀磁体。高温超导线材的使用对绝缘材料特别具有挑战性，因为在线圈绕制期间它必须是柔性的，还要经受 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温热处理，这样高的温度将导致传统的聚合物绝缘材料熔化。

MagLab 开发了一种用于高温超导体 (Bi-2212) 圆线的氧化钛基陶瓷涂层。这种新型涂层已被证明适合用作超导磁体的电绝缘。使用连续的卷对卷浸涂工艺将涂层施加到电线上。图中的箭头显示了从蓝色卷轴，通过加热器（虚线）和两次进入浸渍缸（底部绿色箭头所指）的导线路径。



Cite: H. Kandel, et al. Supercond. Sci. Technol. 28, 035010 (2015)

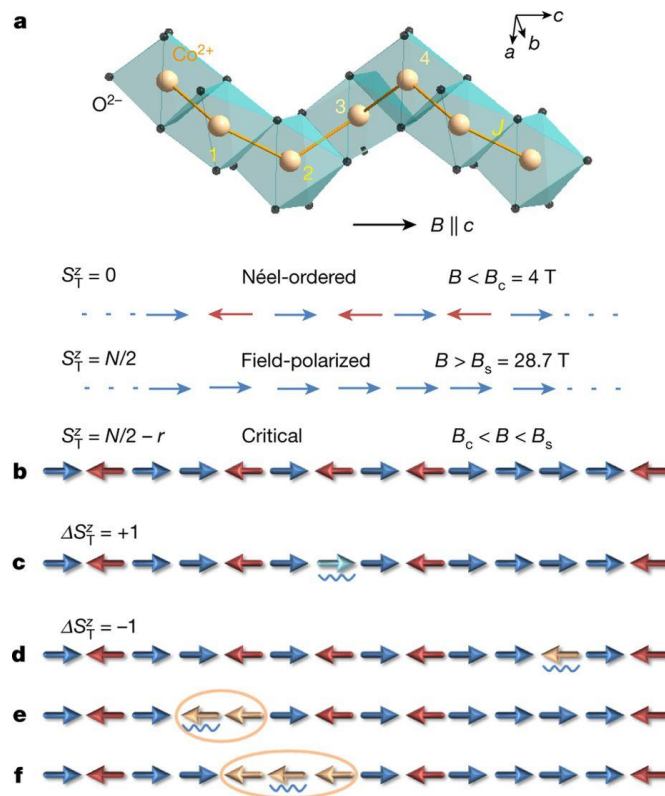
2. 欧洲强磁场实验室

- 用强磁场下的太赫兹谱实验观测贝特弦

1931年，德国物理学家汉斯·贝特 (Hans Bethe) 发表了题为 Eigenwerte und Eigenfunktionen der linearen Atomkette (线性原子链的本征值和本征函数) 的文章。他在维尔纳·海森堡 (Werner Heisenberg) 理论工作的基础上，

提出了一种研究一维量子多体系统的理论方法。利用这种被称为 Bethe Ansatz 的统计物理方法，反映电子集体行为的贝特弦态 (Bethe strings) 可以被严格描述。贝特弦态也被称为“磁激发的复杂束缚态”。

缺乏合适的一维材料和适当的实验方法使得对多体弦态的实验验证一直是不可能完成的任务。如今在材料合成方面取得了令人瞩目的进展，加上强磁场下的太赫兹光谱的发展，使得这种实验检测首次成为可能。



首先， $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$ 晶体在德国完成合成和表征。这些晶体中钴离子形成自旋 $S=1/2$ 的一维 Heisenberg-Ising 自旋链，随后在奥格斯堡大学和荷兰强磁场实验室用太赫兹光谱进行了研究，后者使用的磁场可达 30 T。通过比较 UCSD 科学家利用 Bethe ansatz 得到的理论结果，长度为 2 和 3 的弦态最终在太赫兹光谱中被识别。贝特的结果不仅在量子磁学领域中很重要，而且在冷原子和弦理论的研究中也更为广泛。因此，弦态的识别将有助于所有复杂多体系统的研究。

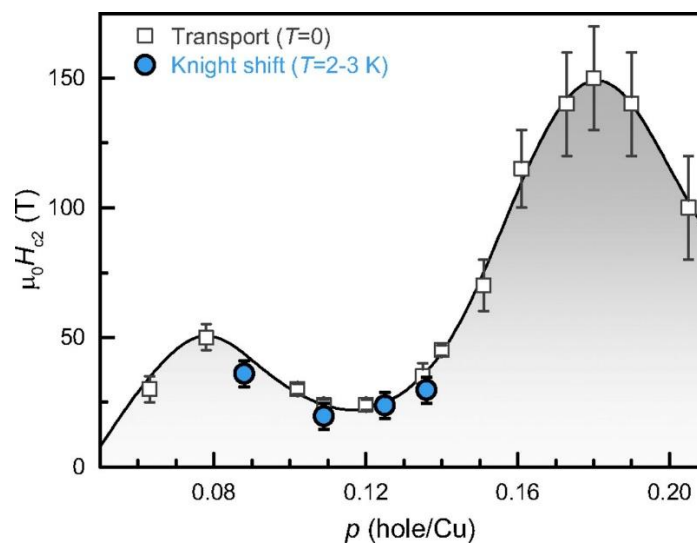
Cite: [Z. Wang, et al. Nature 554, 219 \(2018\)](#)

装置: 35 T 水冷磁体

● $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 中电荷有序弱化超导电性

最近, 关于高 T_c 铜氧化物的 H_{c2} 值一直存在争议, 特别是在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 中超导电性和电荷密度波 (CDW) 之间存在竞争的背景下。

法国 Grenoble 强磁场实验室的研究人员首次使用局部探针 ^{17}O NMR 测量低温下电荷有序 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 中 CuO_2 面的自旋磁化率来解决这个问题。这项研究的核心结果是观察到自旋磁化率在 20 到 40 T 范围内 (取决于空穴掺杂水平) 基本线性增加, 然后保持一个恒定值。这些饱和场的值与文献 Nature Commun. 5, 3280 (2014) 中的 H_{c2} 值非常一致, 最小值出现在空穴掺杂 $p=0.12$ 处, 此时 CDW 最强。这一结果与未掺杂的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 中 CDW 降低 H_{c2} 的解释是一致的。

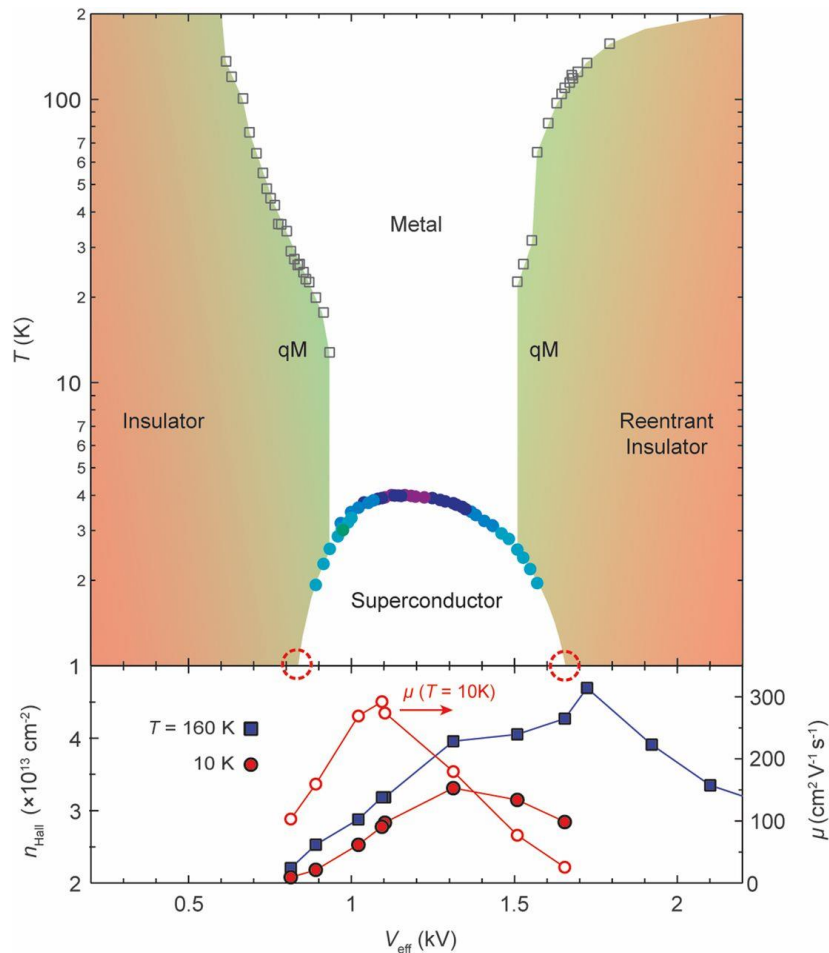


Cite: [R. Zhou, et al. PNAS 114, 13148 \(2017\)](#)

装置: 水冷磁体

● 单层 WS₂ 中跨越超导圆顶的门控调制

与三维超导体相比，原子级超导体被认为更容易应用于电子应用。来自荷兰格罗宁根大学的研究人员与荷兰强磁场实验室合作，使用场效应门控技术在单层半导体 WS₂ 中寻找“圆顶形”超导相。随着掺杂量的变化可以出现绝缘体、超导体以及重入型绝缘体等电子相。大约 30 meV 的自旋轨道耦合使得 WS₂ 具有对外部磁场最强保护的超导态。跨越完整的超导圆顶所展示的宽可调性为单层超导体在功能电子器件中的应用铺平了道路。



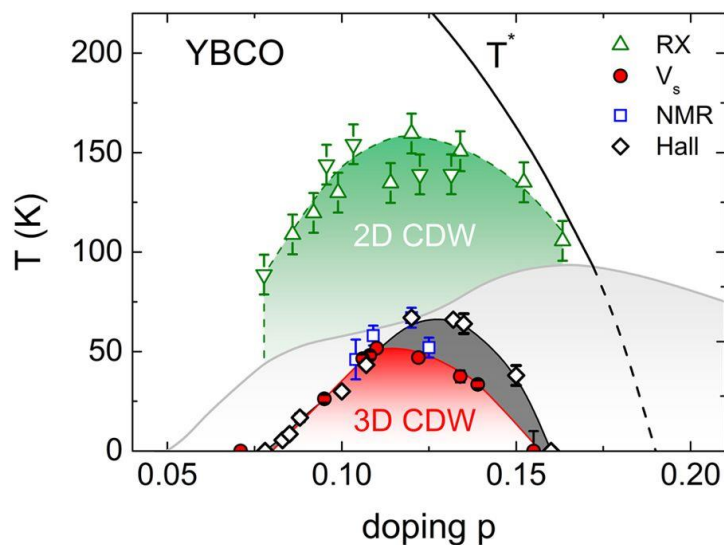
Cite: [J. Lu, et al. PNAS 115, 3551 \(2018\)](#)

装置：35 T 水冷磁体

● 穿越 YBCO 相图的高场电荷序

在空穴掺杂的铜酸盐中，现在有令人信服的证据表明，在赝能隙相中，电荷密度波（CDW）破坏了平移对称性。在 YBCO 中 CDW 分两步出现：在零场和高温下在赝能隙相中出现二维序，而当加磁场使超导减弱时在 T_c 以下出现三维序。通过核磁共振和 X 射线测量证实，这些 CDW 在低温下共存，但它引发了一些有趣的问题：两个 CDW 是否拥有相同的临界掺杂？低温下它们如何影响费米面？

法国强磁场实验室的研究人员使用强磁场下的声速测量来研究三维 CDW 的起始温度、起始磁场与掺杂的关系。正如对于二阶相变所预期的那样，在强磁场下测量的声速的温度依赖性中看到了跳跃。通过比较三维 CDW（红色圆圈）的起始温度 T_{c0} 与 X 射线观察到的二维 CDW 的起始温度（空心绿三角）的掺杂依赖性，我们发现两个 CDW 在同样的掺杂范围内可在低温下共存。此外，CDW 和赝能隙的临界点不同，表明这是两种不同现象。



Cite: [F. Laliberté, et al. npj Quantum Mater. 3, 11 \(2018\)](#)

装置：水冷磁体、脉冲磁体

- **荷兰强磁场实验室 45T 混合磁体研制进程**

2018年3月初，随着外超导磁体线圈的完成，荷兰强磁场实验室开发45T混合磁体的一个重要里程碑已经实现。线圈外径为1.2米，高度为1米，重量为7.5吨，于2012年在美国开始建造。225公里的直径为0.8毫米的高电流密度超导 Nb_3Sn 股线，与芬兰生产的高纯度铜线一起，插入特殊的不锈钢管中并压成2.5公里长的长方形截面CICC导体。CICC导体的制造由3家不同的意大利公司完成。

2015年初，这些导体被运送到美国MagLab来处理。线圈制造过程花了超过2.5年的时间，包括线圈绕组，截面和引线接头加工，在 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的热处理，用环氧树脂进行真空浸渍，失超保护装置等。

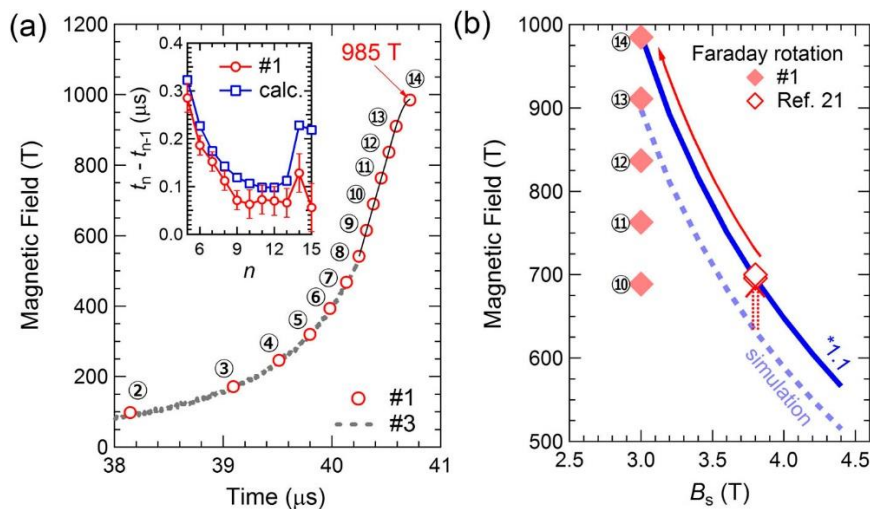
如今线圈和冷却装置已从美国运回。线圈将被安装在其低温恒温器中，并将在未来一年内进行系统集成。待内插磁体完成后，45T混合磁体将于2019年底投入使用。



3. 日本强磁场实验室

- **向 1000 T 磁场迈进**

超过 100T 的磁场有多种产生方式。如果还要在该磁场下进行可靠的物性测量，则要求脉冲宽度不能太窄，也不能采用爆炸的方式。电磁通量压缩技术就可以很好地满足这一需求。之前的室内世界纪录是 2011 年的 730 T，如今通过将种子磁场由 3.8 T 下降到 3.0 T，成功地将峰值磁场提升到了 985 T，接近 1000 T。该工作由东京大学的 International MegaGauss Science Laboratory 独立完成，文章获得 Rev. Sci. Instrum. 杂志的编辑推荐。



Cite: [D. Nakamura, et al. Rev. Sci. Instrum. 89, 016106 \(2018\)](#)

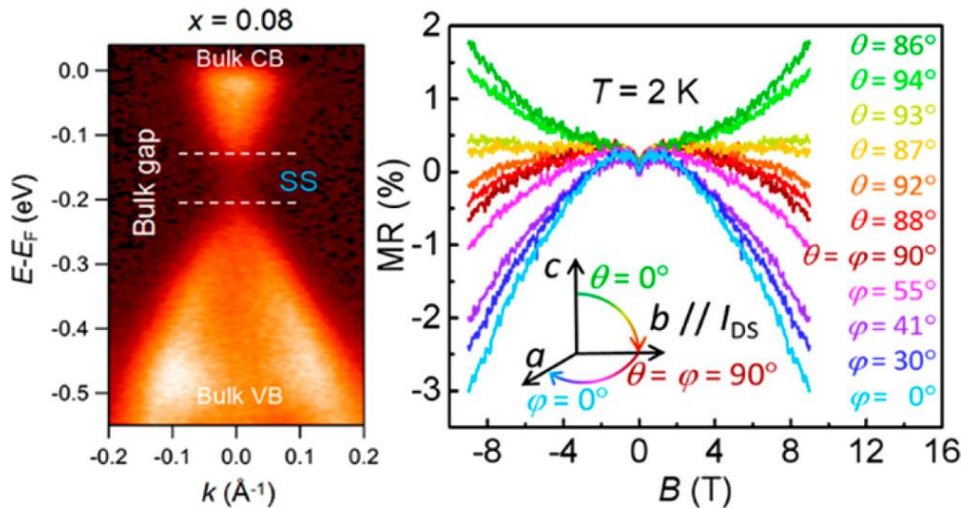
4. 武汉脉冲强磁场实验室

● 拓扑相变诱导 $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$ 纳米器件的三轴矢量磁电阻

近年来兴起的拓扑绝缘体及其量子相变体系存在着多种新奇物理效应，并趁着 2016 年拓扑相变获得诺贝尔物理学奖的“东风”，在凝聚态物理学、量子材料科学、信息电子学等多学科领域产生了广泛而深远的影响，在未来低功耗自旋电子器件中具有潜在应用。与普通半导体相比，三维拓扑绝缘体(如硒化铋 Bi_2Se_3)最大的特色在于其存在独特的拓扑表面态。而通过引入非磁元素(如铟

In) 掺杂，拓扑表面态会在拓扑临界点发生奇异的量子相变，也就是说，材料从拓扑非平庸态向拓扑平庸态逐渐发生转变。因此，拓扑量子相变在能带上有着极强的调控力度，它可以使表面态逐渐打开能隙，进而使表面态消失。然而，如何利用拓扑临界点的量子相变效应发展新原理拓扑功能型器件一直是该研究领域的空白。

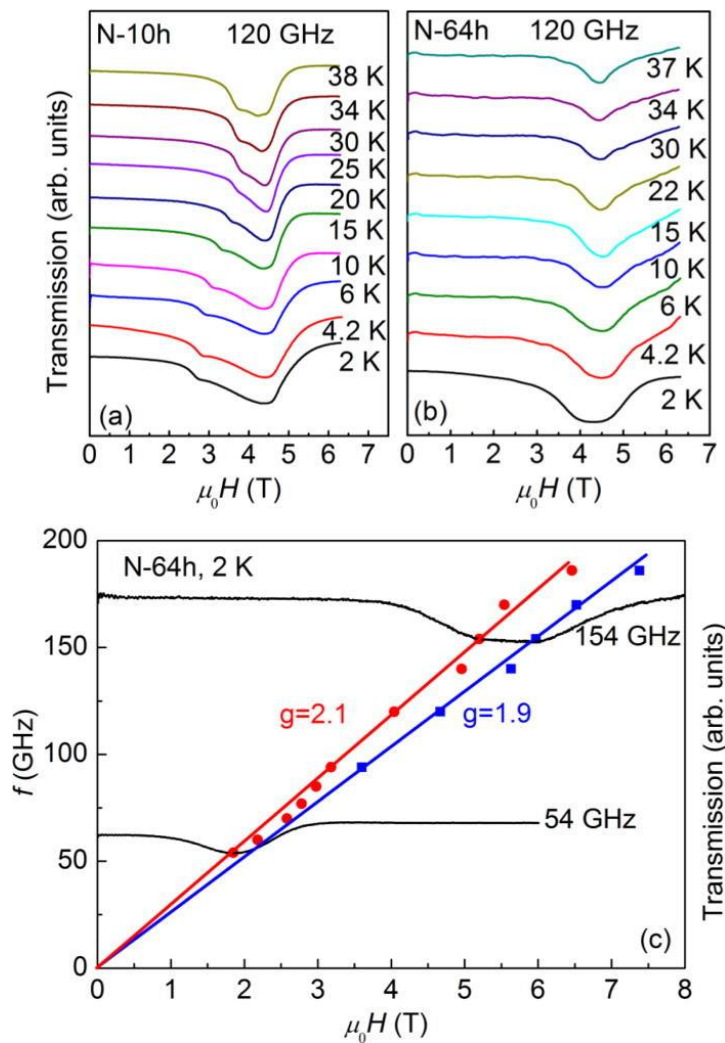
根据拓扑绝缘体在相变过程中的奇异磁输运性质，南京大学的研究人员发展出了具有多维度、全空间矢量磁探测能力的新型拓扑磁传感器。研究中，该团队利用角分辨光电子能谱 (ARPES) 技术确认了 8% 的 In 组分能使 Bi_2Se_3 拓扑绝缘体单晶的能带结构最靠近拓扑临界点，并通过对磁场下纳米器件样品进行三维方向的变角度磁电阻输运测量与分析，发现该器件在磁场面内扫场时呈现出反常的负磁电阻现象，其原因在于拓扑临界点诱导的纳米薄片上下表面态的量子相干增强的耦合效应。研究表明，该原型器件的三轴矢量磁场探测的工作温度可达到室温，具有极大的实际应用前景。



Cite: [M. H. Zhang, et al. ACS Nano 12, 1537 \(2018\)](#)

- **纳米晶 Haldane 自旋链中巨磁热效应的研究进展**

近期, ESR 团队对 $\text{Gd}_2\text{BaNiO}_5$ 纳米晶的巨磁热效应进行了深入研究, 发现纳米尺度使体系反铁磁相关长度变小, 长程反铁磁有序和自旋隙得到有效抑制, 并在纳米粒子表面释放出大量的顺磁性 Gd^{3+} 和 Ni^{2+} 离子, 脉冲强磁场高频 ESR 的结果也进一步证实了顺磁性离子的存在。这些顺磁性离子在外磁场下很容易沿着外磁场方向排列, 产生巨大的磁熵变, 在 2K 低温和 0-7T 磁场范围内的最大磁熵变为 $-\Delta S_m = 36 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 超过目前已经报道的大部分过渡金属氧化物在低温下的磁熵变。同时, 由于不存在热滞和场滞效应, $\text{Gd}_2\text{BaNiO}_5$ 纳米晶可用做潜在的低温磁制冷候选材料。

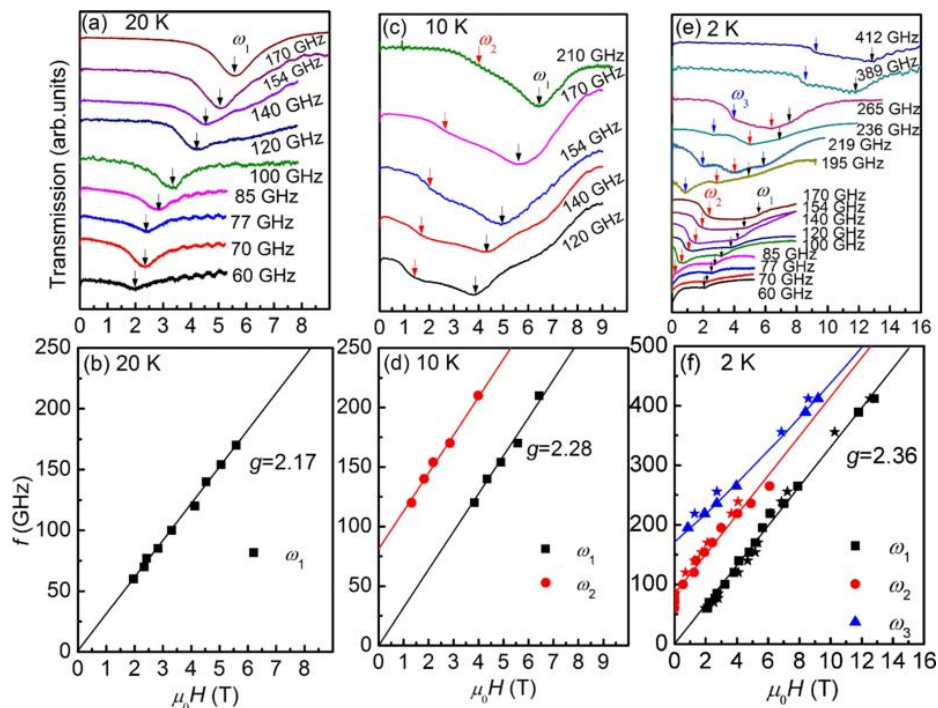


Cite: [M. Y. Ruan, et al. Appl. Phys. Lett. 111,122403 \(2017\)](#)

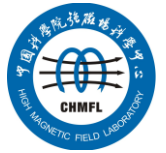
● 自旋液体材料的新发现：一种新的 kagome 晶格量子磁体 $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{FCl}$

众所周知，Kagome 晶格反铁磁体因强阻挫效应而呈现出磁无序，被认为是实现自旋液体态的最佳载体。目前，已报道的著名 Kagome 晶格量子磁体 $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{FCl}$ 中，由于 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的位置无序，限制了对自旋液体基态本质的研究。

最近，ESR 团队与福建物构所合作，成功合成了一种新的几何完美的 kagome 晶格量子磁体 $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{FCl}$ ，不仅避免了非磁性离子造成的位置无序，还在 Kagome 层与层之间引入了新的磁性离子，从而增加了层间 Cu^{2+} 离子与层内 Cu^{2+} 离子的交换作用。研究发现，由于层间 Cu^{2+} 离子的引入，磁化率在低温下存在两个磁转变，而比热数据却没有出现 λ 型尖峰，并通过高频 ESR 测量观察到三种共振模式——两个自旋隙（85GHz 和 170GHz）模式和一个无隙激发模式，由此证实了 ESR 共振模式的出现与层间 Cu^{2+} 离子的行为有关。



Cite: [X. Y. Yue, et al. Phys. Rev. B 97, 054417 \(2018\)](#)



5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场中心两项成果入选中科院 2017 年年度科技亮点工作
- 中科院授予稳态强磁场实验装置研究集体杰出科技成就奖
- 强磁场中心解析金头蜈蚣毒素的溶液三维结构
- 强光磁集成实验装置召开建设方案咨询会
- 太赫兹应力调制器研究取得进展
- 碳基材料电催化析氢研究取得新进展
- 强磁场中心获得首个美国发明专利授权
- Advanced Science 报道代谢调控成骨的新机制

详见: <http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>