

# 国内外强磁场实验室 科研动态

2017 年第四季度



中国科学院强磁场科学中心·科研办

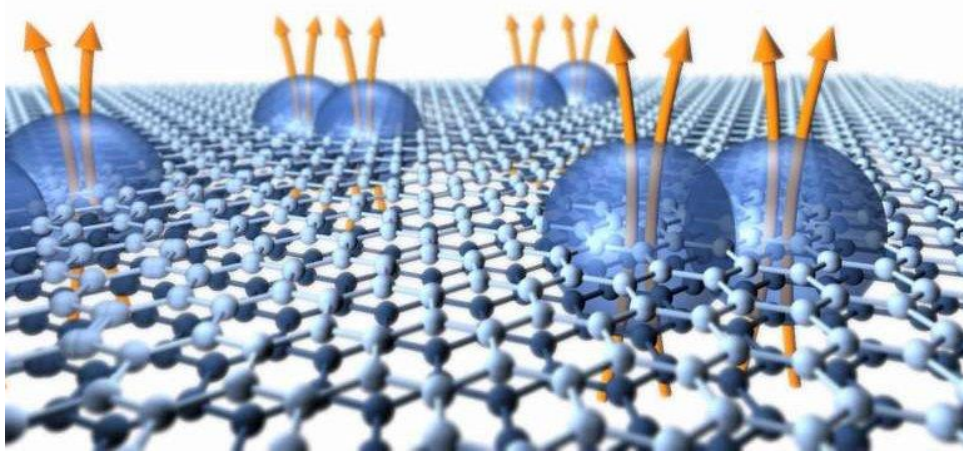
2018/2/26

# 1. 美国国家强磁场实验室

## ● 双层石墨烯中的奇异量子粒子

哥伦比亚大学的团队通过输运测量发现双层石墨烯中存在偶数分母分数量子霍尔效应。

1980 年代在 GaAs 异质结中发现  $5/2$  分数量子霍尔效应，这一现象是仅有的特例，因为分数量子霍尔效应通常都是奇数分母。很快理论研究指出这是一种奇异的超导态，可以用于量子计算。然而实验工作举步维艰，因为这需要非常高质量的样品和 mK 级的极低温。而现在，在双层石墨烯中的相同量子态是在几 K 的温度发现的。通过转角测量，还证实了一些理论预言的性质，如自旋极化。



就在分数量子霍尔效应发现后不就，人们提出了任意子的概念，在准粒子交换的时候，相因子既不是 1（玻色子）也不是 -1（费米子），而是个分数。 $5/2$  态是一种非阿贝尔任意子，它存储的信息特别稳定，因此很多人认为  $5/2$  态适合于量子计算。

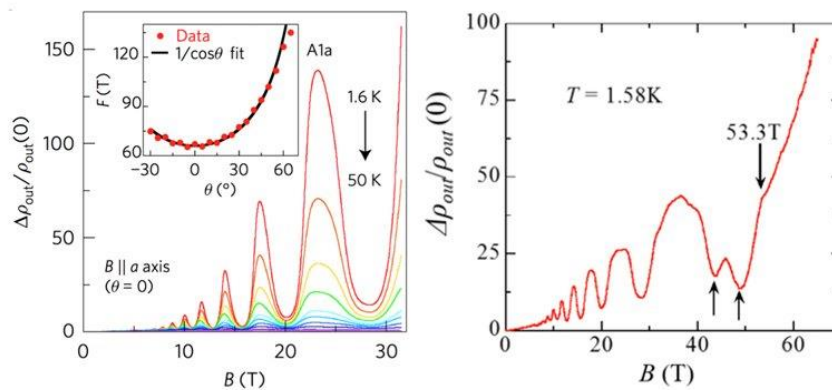
值得一提的是，MagLab 的另一位用户用电容测量的方法也观察到类似的现象。

Cite: [J. I. A. Li, et al. Science 358, 648 \(2017\)](#); [A. A. Zibrov, et al. Nature 549, 360 \(2017\)](#)

装置: 35 T 水冷磁体

### ● 一种新型磁性拓扑半金属

杜兰大学毛志强研究组及其合作者发现了一种新型半金属  $\text{Sr}_{1-y}\text{Mn}_{1-z}\text{Sb}_2$  ( $y, z < 0.1$ ), 其费米子几乎无质量 ( $m^* = 0.04-0.05 m_0$ )。铁磁有序出现在 304-565 K 的温度区间, 在此之下是有铁磁成分的倾斜反铁磁。这种相对论性费米子与铁磁性的耦合提供了一个研究自发时间反演对称破缺的契机。



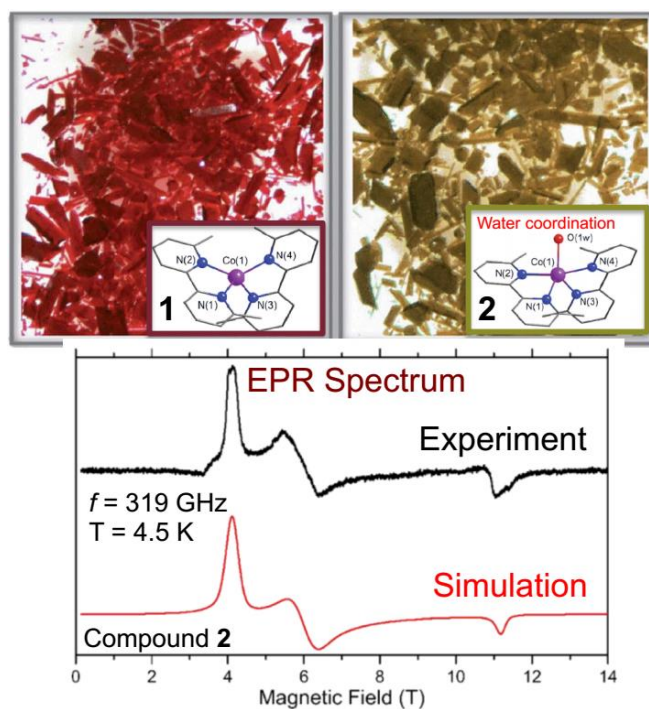
Cite: [J. Y. Liu, et al. Nature Mater. 16, 905 \(2017\)](#)

装置: 65 T 脉冲; 35 T 水冷磁体

### ● 多功能材料的可逆磁开关

加一滴水, 材料就会变色, 同时磁性也随之变化。这是西班牙瓦伦西亚大学与 MagLab 合作的研究成果。

一种钴(II)分子材料在无水条件下是深红色, 同时退磁很慢, 而该材料在吸水后变为橙-绿色, 此时的退磁过程很快。高场电子自旋共振 (ESR) 揭示了这两种状态在电子和磁性上的差别。这种水合过程可逆而且可重复。



Cite: [\*J. Vallejo, et al. Chem. Sci. 8, 3694 \(2017\)\*](#)

装置：高场 ESR

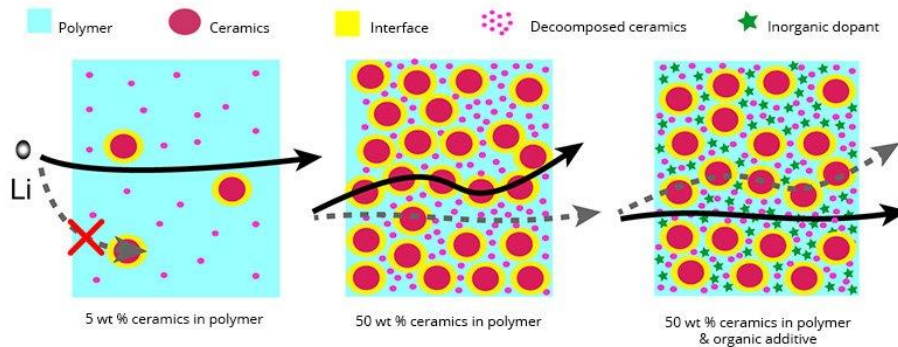
### ● 新的 NMR 技术助力寻找更好的电池

现在，科学家们终于可以实时观测锂离子在电解质中的运动了。

目前大部分锂离子电池采用液态电解质，但液态电解质常常在电极间产生金属通路，也就是造成电池短路。因此科学家们希望发展固态电解质，使得电池更安全，容量更大。

MagLab 的研究人员开发了一种用 NMR 技术研究锂离子在固体中的移动路径的新方法。锂有两种同位素，当 Li-6 穿过电解质时会置换出 Li-7。利用这一现象，并且通过一种叫 operando NMR 的技术可以观测到，当不同组分和结构的电解质会导致完全不同的锂离子通道。

锂离子电池的容量和安全性一直是限制其应用的首要因素，本实验展示了一种研究锂离子电池的全新而且便捷的方法。



Cite: *J. Zheng, et al. Angew. Chem. Int. Ed. 55, 12538 (2016)*

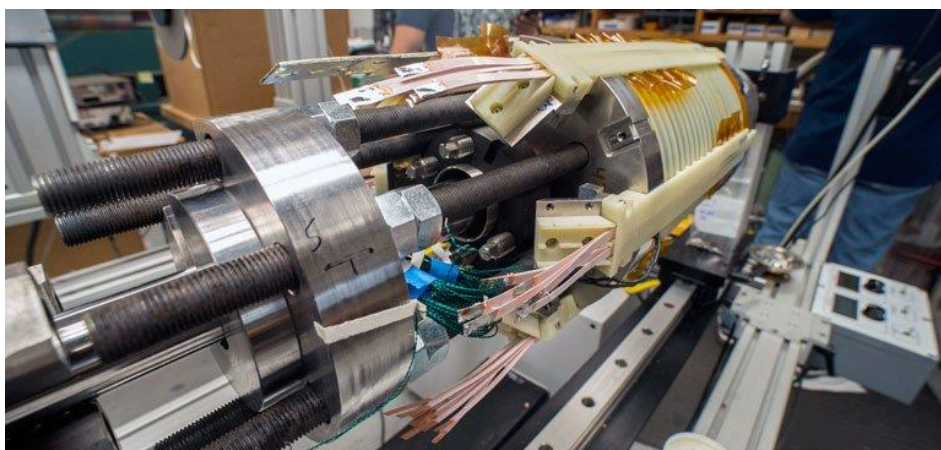
装置: 500 MHz 固体 NMR

### ● 超导磁体新世界记录诞生

2017 年 12 月 8 日, 由 MagLab 设计制造的开创性的超导磁体达到了创纪录的 32 T, 将这一记录提高了三分之一!

几十年以来, 超导磁体的世界纪录一直在缓慢的增长, 这一次的大跨越超过了过去 40 年的增长。值得注意的是, 这是 MagLab 继 36 T 串联混合磁体和 41.4 T 水冷磁体之后, 13 个月之内的第三个世界纪录。

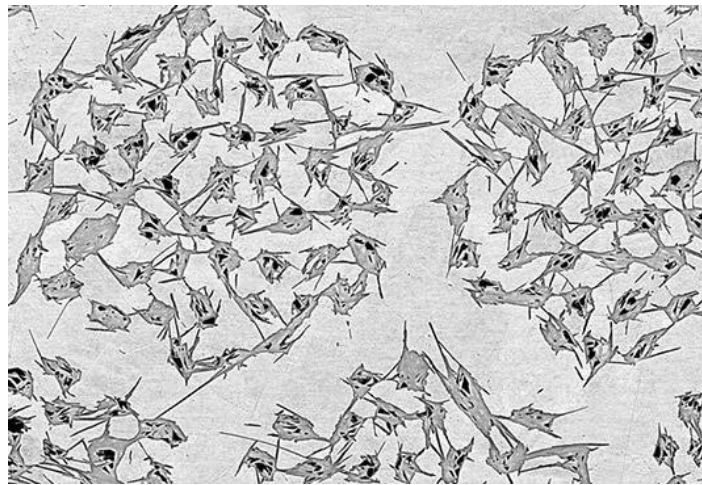
32 T 超导磁体是由低温超导和高温超导部分组合而成, 低温超导部分由牛津仪器设计制造, 高温超导材料由 SuperPower Inc. 公司提供。新磁体预计将在 2018 年投入开放运行。



### ● Bi-2212 临界电流新纪录

在 MagLab 和工业界的共同努力下，Bi-2212 的超导临界电流密度从 4200 A/mm<sup>2</sup> 提高到 5600 A/mm<sup>2</sup>，幅度高达 33%。

导线制造的前两步 Bi-2212 粉末的合成和银护套导线的制造在 nGimat 和 BOST 两家公司完成，最后一步热处理在 MagLab 的高压氧炉进行。

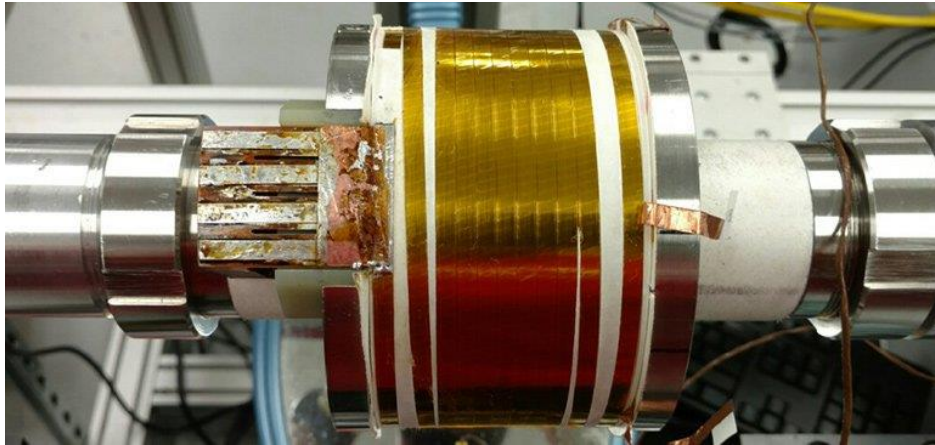


### ● 下一代 NMR 磁体高温超导线圈测试成功

由于采用 Nb<sub>3</sub>Sn 或 NbTi 等低温超导材料，目前最强的 NMR 磁体只能达到 24 T 左右。为了实现更高磁场，科学家们采用高温超导材料来制作下一代 NMR 磁体。

MagLab 的科学家们用了 240 米 Sumitomo Electric 公司的 Bi-2223 带材绕制的线圈在 14 T 背景场下产生了 5.5 T 的磁场，此时的应力在 0.8%，电流密度 243 A/mm<sup>2</sup>。

根据这个测试结果，MagLab 已经设计了一套采用低温超导+高温超导线圈的 30.5 T (1.3 GHz) NMR 磁体方案。



Cite: [\*W. S. Marshall, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond. 27, 4300905 \(2017\)\*](#)

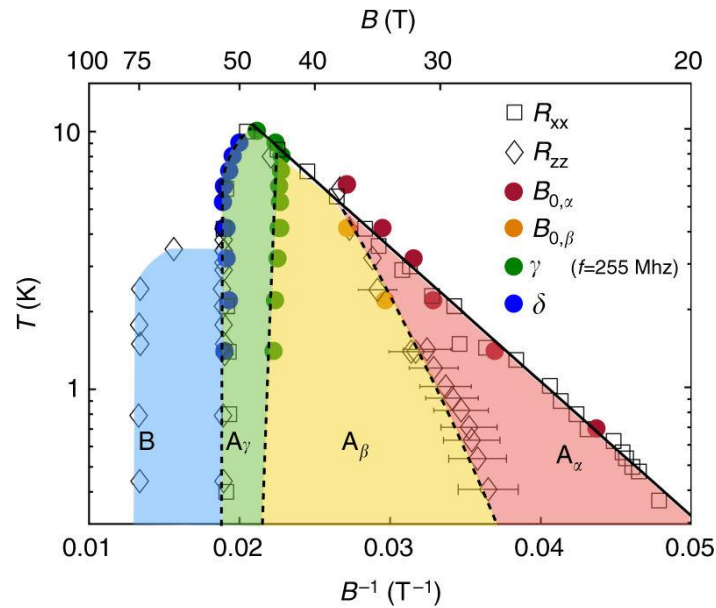
## 2. 欧洲强磁场实验室

- 石墨量子极限下的超声测量

在足够高的磁场下，载流子被限制在最低的朗道能级，达到所谓的量子极限。在这种极限状态下电子的相关性产生新的电子态，如二维系统中的复合费米子和拓扑态。在三维尺度上量子极限的探索还很欠缺，但预测会出现很多奇异的性质。半金属石墨的量子极限在 30 多年前就开始探索，而最近从磁阻测量结果发现了意想不到的转变，重新引起了人们的兴趣。这些研究都集中在输运测量，还无法全面准确的表征这些物性。

法国强磁场实验室的研究团队在稳态和脉冲磁场下首次研究了石墨的弹性系数和超声衰减。利用超声技术，首次提供了石墨量子极限中一系列相变存在的热力学证据。此外，还与荷兰强磁场实验室合作进行电阻率和磁致伸缩的测量。经过两个实验室通力合作，最终构建出石墨的量子极限相图（实心为超声数据，空心为输运数据）。晶格在量子态形成中的作用在理论上长期被忽略，

而此次的实验结果有力的表明晶格与电子相之间有明显的耦合，这对于量子极限电子液体的理解具有深远的意义。



*Cite: D. LeBoeuf, et al. Nature Comm. 8, 1337 (2017)*

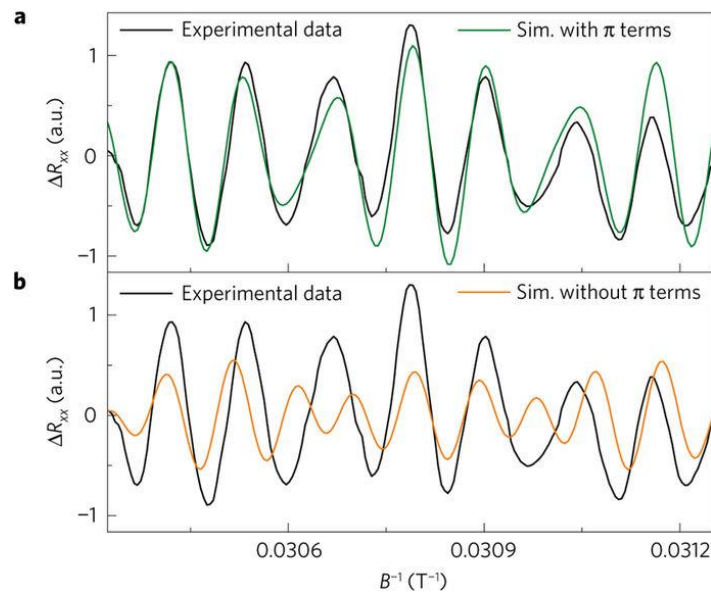
### ● ZrSiS 中的非常规量子振荡

在倒空间中，半金属的能带接触点分为 Weyl, Dirac 和 nodal-line (节线) 三种类型。在 ZrSiS 这种具有 Si 方形平面的四方晶体中，线性分散的能带沿着三维环相互接触。与许多其他拓扑半金属相比，ZrSiS 的费米能级上的能带有高达 2 eV 的大范围色散，因此是研究狄拉克准粒子的理想材料。

荷兰强磁场实验室的团队在 33 T 强磁场下对高质量 ZrSiS 晶体进行输运测量发现，电荷不再沿费米口袋周围的常规轨道，而是沿狄拉克线上的所谓击穿轨道运动，在电阻测量上表现为快速的振荡，特征频率范围 8-11 kT。变温测量显示出振荡幅度的非常规演变，揭示了与电子间相互作用形成的准粒子质量的增强。此外，击穿轨道可以选择性地包围环的顶点，这导致围绕 Berry 曲率



的奇点的绕组数量不同，为电子态的拓扑特性提供了新的“诊断工具”。该成果是在拓扑半金属中实现集体量子态的一个里程碑。

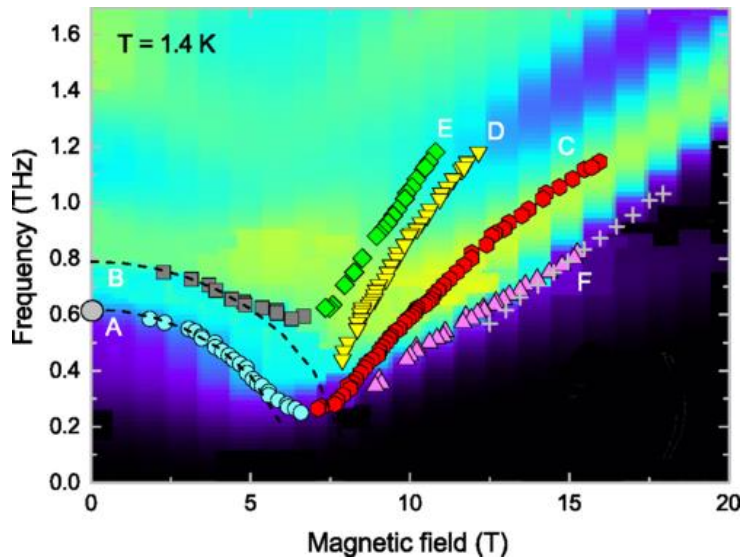


Cite: [S. Pezzini, et al. Nature Phys. 14, 178 \(2018\)](#)

### ● 蜂巢晶格材料 $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$ 的磁激发

$\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  具有几乎理想的二维蜂巢结构，但该材料在 7 K 时会转变为反铁磁有序锯齿态。值得注意的是，可以通过沿着蜂巢面施加 7-8 T 的抑制磁场，将系统转变为一个有间隙的磁性无序（量子顺磁性）相。场诱导相的基态和自旋动力学仍有待深入研究。

在德国强磁场实验室进行的高场 ESR 实验在低温下观察到丰富的激发。在有序相中观察到两种反铁磁共振模，在磁场诱导的量子顺磁相中出现四个 ESR 模。实验数据与计算结果非常吻合。最重要的是，该实验揭示了  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  中自旋激发的非常相干的多粒子性质。强烈的铁磁 Kitaev 耦合促进了从一个双磁子连续体分裂出来的束缚态的形成，这或许可以解释这种不寻常的自旋动力学行为。



Cite: [A. N. Ponomaryov, et al. Phys. Rev. B. 96, 241107\(R\) \(2017\)](#)

#### ● 超 100 T 磁场下的宽带近红外光谱测量

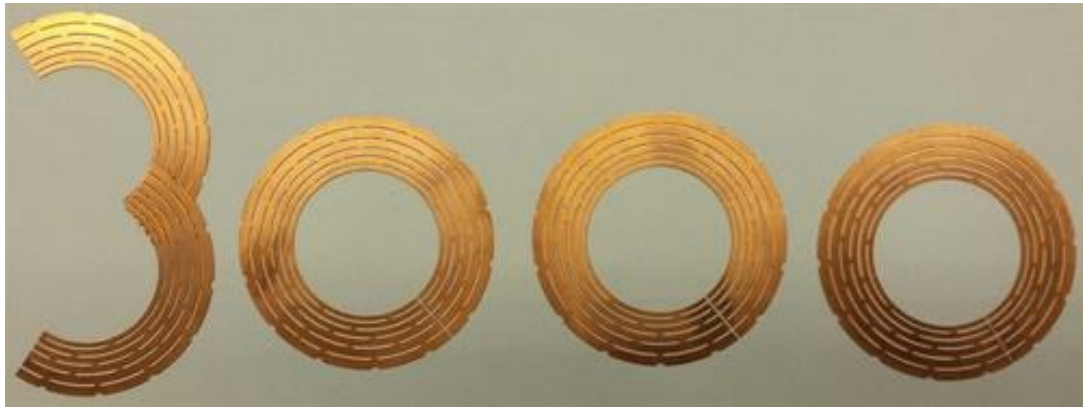
Toulouse 脉冲场实验室的半破坏式装置加场后线圈破坏，样品空间保持完整。用此装置能够获得超过 100 T 磁场，但脉冲宽度相当窄，通常不超过几微秒。这对于常规的多道测量完全不够用，因为积分时间通常都在几十微秒。超快条纹相机可以在此时间尺度下工作，但其工作波长范围在可见光区。

近日，该实验室开发出一个全新的宽带近红外谱仪，可在一个脉冲时间范围内采集 1150-1650 nm 光谱。其采用的超连续激光脉冲宽度 20 ns，重复频率 1 kHz。目前已在 10 K 成功测得  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  的红外谱。

#### ● 荷兰强磁场实验室开放运行达到新的里程碑

2017年12月20日，荷兰强磁场实验室 (HFML) 在2017年进行了3000小时的运行，首次达到了全部运行能力。早在2010年，HFML 每年仅限运行1000小时，但在Radboud大学，NWO-I (荷兰科学研究基金会) 和 EPSRC

(英国工程和物理科学研究理事会) 的持续支持下, HFML 已经有效地将业务能力翻了三倍。



### 3. 日本强磁场实验室

- 拓扑自组装高对称性镧系团簇的交换耦合“指纹”

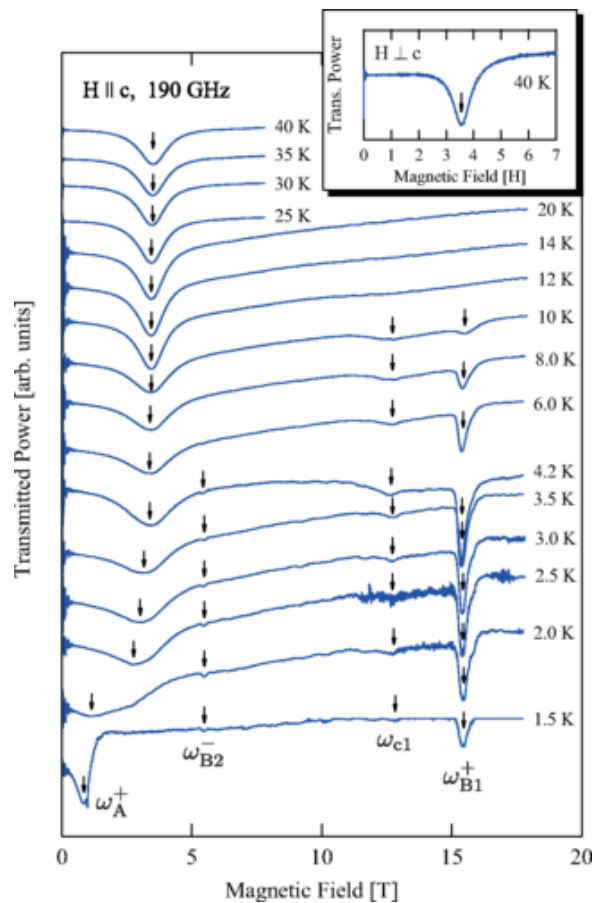
众所周知, C60 通过六边形和五边形的组合实现近球状结构。借鉴这一思路, 也可以用镧系金属元素构建出近球状结构, 其基本单元为  $\{\text{Ln}_3(\mu_3\text{-OH})\}$  三角形,  $\{\text{Ln}_4(\mu_4\text{-OH})\}$  正方形,  $\{\text{Ln}_4(\mu_4\text{-OH})_4\}$  四面体,  $\{\text{Ln}_5(\mu_5\text{-Cl})\}$  五边形, and  $\{\text{Ln}_6(\mu_6\text{-CO}_3)\}$  六边形。本文研究的是一系列用三价 Gd ( $S=7/2$ ) 构建的高对称性多面体 Gd20, Gd32, Gd50 和 Gd60。通过磁性研究发现导数带与 Gd-O-Gd 角之间存在一定的关系。这一磁与结构的关系可以作为鉴别这些笼状结构的指纹。

*Cite: L. Qin, et al. J. Am. Chem. Soc. 139, 16405 (2017)*

装置: 脉冲磁体

- 高度阻挫反铁磁体  $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$  的复杂磁性

东京工业大学的团队利用东北大学的高场多频 ESR 装置，研究了高度阻挫反铁磁体  $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$  的磁性。研究发现该化合物由 A、B 两个解耦的磁性子系统组成，一个是自旋 1/2 三角格子海森堡反铁磁体，另一个是蜂巢晶格  $J_1$ - $J_2$  伊辛反铁磁体。其磁相变温度在  $T_{N1}=12$  K 和  $T_{N2}=3$  K。当磁场平行于 c 轴时，子系统 B 显示出连续的变磁性转变，磁化强度在 1/3 和 1/2 处出现平台。低于  $T_{N2}$  在 ESR 谱上出现了三角格子海森堡反铁磁体弱各向异性的特征峰。另外还观察到一个局域激发模，对应子系统 B 的伊辛状自旋单翻转。



Cite: [P. Chanler, et al. Phys. Rev. B 96, 064419 \(2017\)](#)

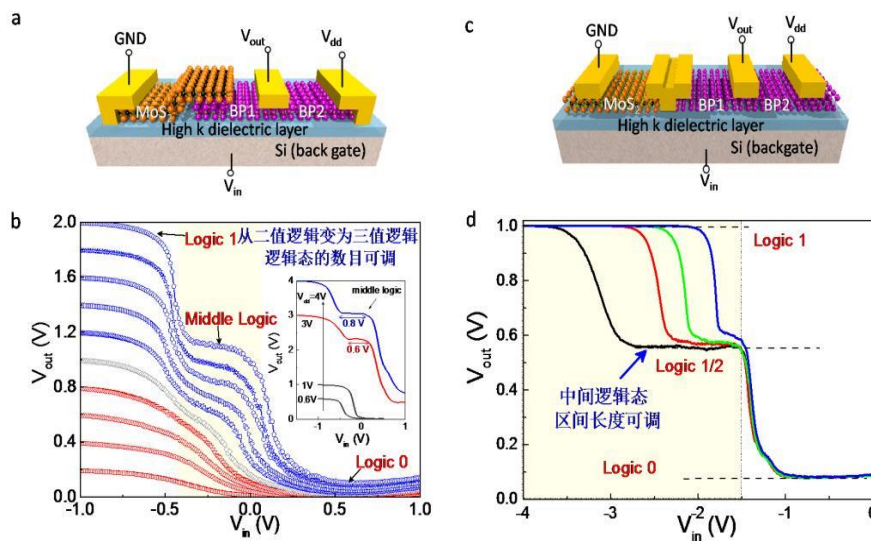
装置：25 T 脉冲磁体；18 T 水冷磁体

## 4. 武汉脉冲强磁场实验室

- 《自然·纳米技术》刊发吴燕庆教授课题组关于二维材料范德华异质结研究进展

吴燕庆教授团队创新性地设计与构筑了基于窄禁带 p 型为主的黑磷与宽禁带 n 型二硫化钼两种二维半导体的垂直与平面异质结，并且背栅是由超薄的高介电常数介质所制备，因此可以在相对低电压时即可实现有效的静电学控制。同时与横向电场可以在同一个 Vdd 范围内对异质结实现协同作用，同时调控其能带弯曲与费米能级的位置。由于掺杂种类与禁带宽度的差异，这两个方向电场的协同作用可以使这个异质结的能带排列从 I 型向 II 型、III 型转变，因此在跨导曲线中实现丰富的非单调变化。基于此原理，首创了可调式三进制 (ternary) 逻辑门电路。这种三进制逻辑门除了常规“逻辑 1”和“逻辑 0”，还包含全新的逻辑中间态：“逻辑 1/2”。更为关键的是，在典型的“逻辑输入-逻辑输出”反相器曲线中，中间逻辑态“逻辑 1/2”出现的区间范围、幅值、甚至中间逻辑态自身的存在与否都可以通过电场或者沟长进行可控调节。在通过电场调节的器件中，“逻辑输入-逻辑输出”曲线可以随着横向电场的逐渐增大从典型的二值逻辑演变为三值逻辑。在通过沟长调节的器件中，此平行区域亦可通过随沟长变化的转移特性曲线的横向负平移产生，据此亦可实现通过沟长调制中间逻辑态的三值逻辑器件。这种可调性使得现有的三进制逻辑既可兼容传统二进制逻辑电路，又可以在功能多样化与更高密度等方面优于二进制逻辑，且可以进一步拓展为多值存储。在器件特性改良方面，经过沟长和金半接触工艺方面的改进与优化，实现了增益高达 152 的 CMOS 反相器。另外，针对二维材料，尤其是黑磷的温度与空气稳定性方面，本文在反相器层面也首次作

了深入系统的研究。通过数纳米的无机保护层材料，即可有效隔绝空气中的水氧侵蚀而使得反相器在大气环境中放置长达两个月后电学性能依然没有下降趋势。本文又进一步测试了文中所用多值及二值反相器从室温降至低温 20 K 时的电学性能，并分析了其中电压增益变大的现象。综上所述，本文在基于二维半导体材料的范德华异质结电学功能器件中，在新功能拓展与电性能提升上实现了阶段性进展。

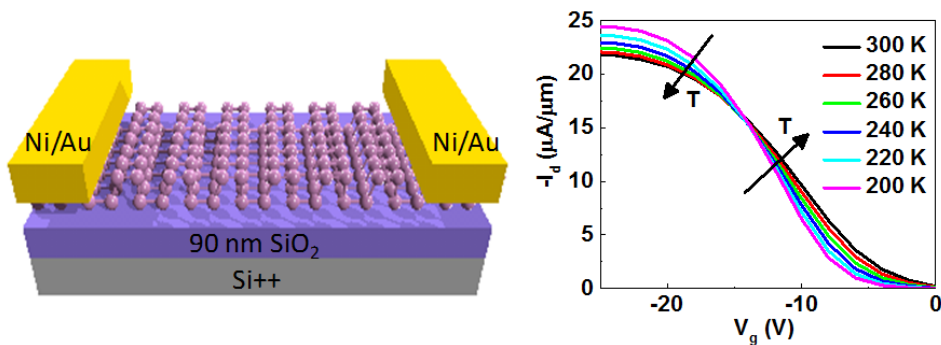


Cite: [M. Q. Huang, et al. Nature Nanotech. 12, 1148 \(2017\)](#)

### ● 吴燕庆教授团队在黑磷的电输运特性研究上取得进展

黑磷是近年来新发现的一种新型二维层状半导体材料，与石墨烯相比最大优势在于拥有带隙，且其为直接带隙半导体，具有各向异性，制备的晶体管开关比  $10^4$  以上，迁移率  $1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  左右。这表明，二维黑磷场效应晶体管在纳米电子器件应用方面具有极大的潜力。由于黑磷的超薄特性，金属与少层黑磷接触的性能与经典金属-半导体肖特基结表现出不同的输运特性，基于此类肖特基结的载流子的输运机制目前也并不清楚。针对这个问题，武汉强磁场的团

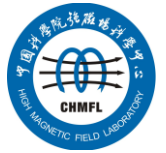
队研究了不同温度下金属-黑磷接触的输运性能。阐明了使用经典的热发射理论得到的肖特基势垒的缘由，并且解释了在转移曲线中观察到的金属-绝缘态转变的现象。研究发现背栅电压可以调节金属-黑磷之间的肖特基势垒高度，当背栅电压超过零界点时，肖特基势垒变得很小，此时经典的热发射理论不能再用来描述载流子的输运。在背栅电压的作用下，载流子从高能尾态（次能带）遵守的麦克斯韦-玻尔兹曼分布转变为低能态费米面电子遵守的费米-狄拉克分布，因此导致了金属-绝缘态转变，并且基于此确认了两种独立的受到隧穿限制的输运区域。我们的实验与理论结果相一致，该结果对层状黑磷半导体的机理研究和电学应用具有重要的理论和实际意义。



Cite: [X. F. Li, et al. Nano Lett. 18, 26 \(2018\)](#)

#### ● 于海滨教授在非晶金属玻璃次级弛豫机理研究取得进展

处于能量亚稳态的复杂非晶态固体（即玻璃态）物质中存在各种弛豫行为。弛豫现象起源于多体系统的不可逆过程，取决于一些基本物理定律。这种不可逆的物理及化学过程是使系统微扰和耗散得以进行的必要条件，是维持平衡和进一步演化的前提。由于弛豫行为决定了非晶凝聚态物质的基本特征和应用，研究认识非晶的弛豫行为非常重要，一直是非晶态物理研究的核心内容。然而，



非晶多体系统中的弛豫与扩散问题的物理机制仍然不清楚，是一个重要而又未解决的物理问题。

在各种非晶玻璃态物质中，例如有机高分子/小分子玻璃、氧化物玻璃、以及非晶态药物甚至蛋白质等，存在两种本征的基本弛豫模式，即  $\alpha$  弛豫和  $\beta$  弛豫。 $\alpha$  弛豫（也称为主弛豫）涉及非晶中大范围的粒子扩散运动，而  $\beta$  弛豫（也称为次级弛豫）与非晶体系中局域的区域粒子运动行为有关。在玻璃态材料中， $\beta$  弛豫与玻璃转变、塑性形变等物理性质有密切的联系，是非晶态材料性能调控的一个重要过程。例如， $\beta$  弛豫使得玻璃材料可能具有良好的塑性变形能力，而在非晶态药物方面  $\beta$  弛豫又需要抑制，因其可能造成玻璃的结晶化使得非晶态药物优点消失。尽管如此， $\beta$  弛豫对应的物理机制目前还不清楚，存在多种模型和假说。

该研究中，于海滨教授与合作者利用大规模的分子动力学模拟，使得模拟时间尺度（皮秒-微秒）与实验时间尺度（微秒-秒量级）趋近一致，澄清了金属玻璃材料中  $\beta$  弛豫的原子运动机理：在看似无序、混乱的运动中，有一部分运动较快的原子以链状形式协调运动。该结果也表明，在复杂和无序中存在简单的规律。

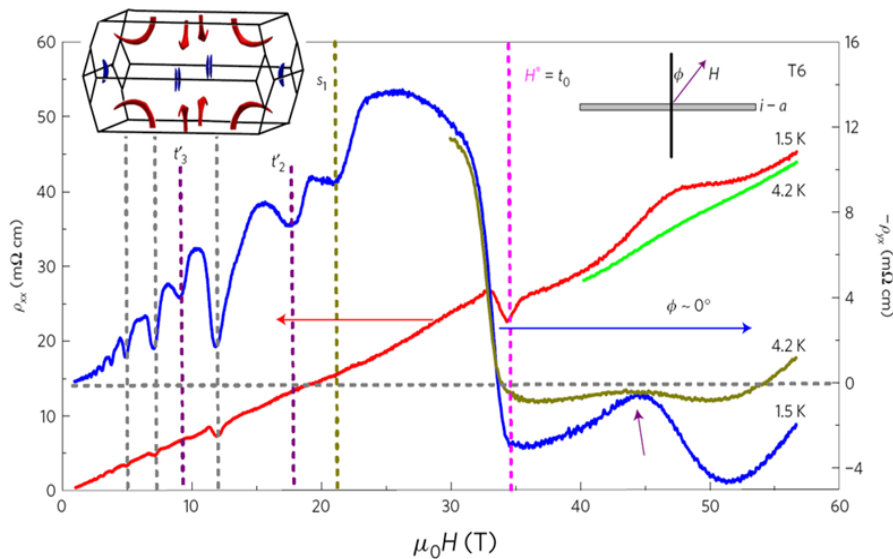
*Cite: [H. B. Yu, et al. Science Advances 3, e1701577 \(2017\)](#)*

#### ● 王俊峰研究员在外尔费米子领域合作研究取得突破

外尔半金属及外尔费米子的发现是拓扑半金属研究领域的一项重大进展。晶体中实现的外尔费米子是一种受拓扑保护的稳定准粒子，一对具有相反手性的外尔点只有被移动到同一动量坐标上才会发生湮灭。然而，这种粒子与反粒



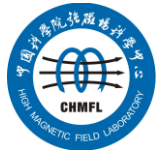
子的相互湮灭现象在不改变能带结构的条件下是很难实现的，只有当外磁场足够强，电子的磁长度倒数与两个相反手性外尔点的动量距离相比拟，在物理上允许发生磁隧穿效应时，才有可能实现能隙的打开以及外尔费米子的湮灭。为此，王俊峰研究员与北京大学贾爽研究员、南方科技大学卢海舟教授等研究团队合作，利用 65 特斯拉脉冲磁体，通过一系列的变温和转角电输运测量以及第一性原理计算，对新型外尔半金属 TaP 开展了强磁场下的电输运研究。研究发现，在 34.4 T 的临界磁场下，TaP 的霍尔信号发生明显反转，由此证实了 TaP 的一对手性相反的外尔点在强磁场下 (34.4 T) 发生湮灭。该研究在国际上首次观察并证实了外尔点的湮灭现象，深刻揭示了外尔费米子在强磁场下的非平庸拓扑性质，进一步加深了人们对外尔费米子的理解。



Cite: [C. L. Zhang, et al. Nature Phys. 13, 979 \(2017\)](#)

## 5. 中科院强磁场科学中心

- 混合磁体的外超导磁体再创新纪录



- Nature Communication 报道肿瘤代谢重编程与周期调控机制研究新进展
- PRL 报道强磁场中心拓扑 Skyrmion 研究最新成果
- 强磁场中心在拓扑新物态研究中取得新进展
- 强磁场中心在小细胞肺癌靶向治疗研究中取得新进展
- SHMFF 用户对钉氧化物 Mott 相变晶格-轨道耦合调控研究方面取得新进展
- SHMFF 用户在拓扑半金属低维结构中首次观测到量子霍尔效应
- 强磁场中心在手性磁孤子材料研究中取得新进展
- 强磁场科学中心研发出克服急性髓性白血病 FLT3-ITD-F691L 耐药突变的新型抑制剂

详见: <http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>