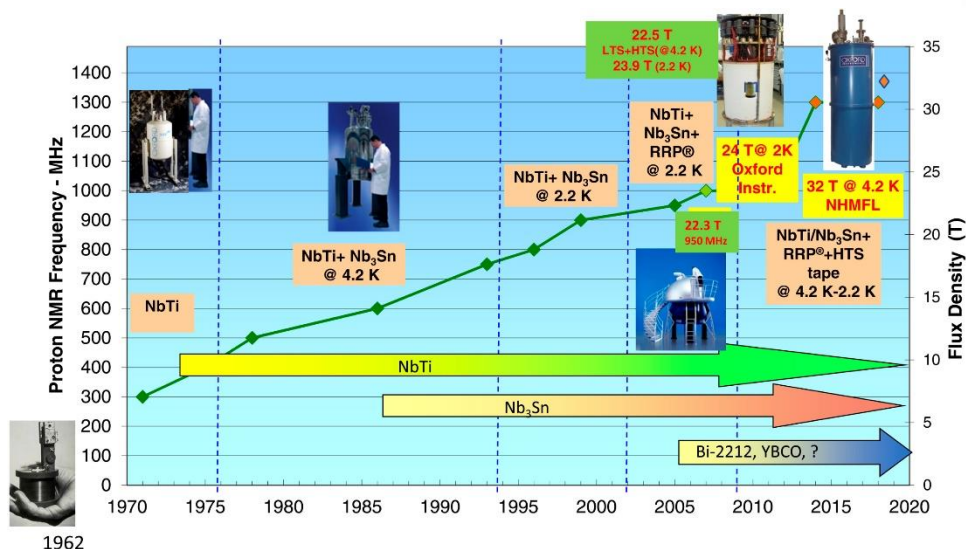


# 国内外强磁场实验室 科研动态

2018 年第四季度



中国科学院强磁场科学中心·科研办

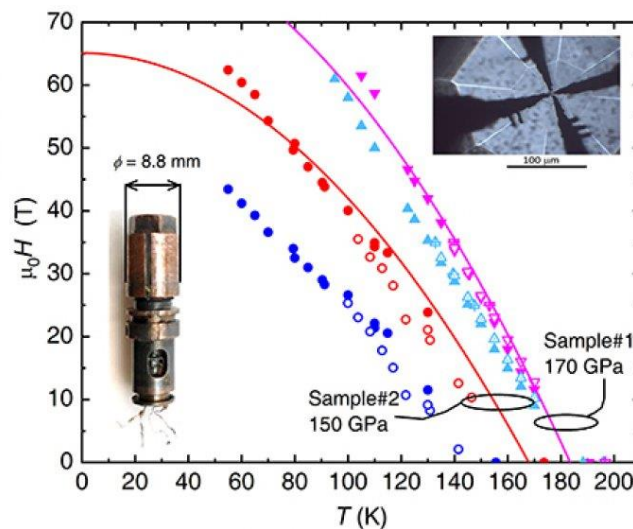
2019/1/18

# 1. 美国国家强磁场实验室

## ● 极端磁场和压力下的超导氢化物

BCS 超导理论表明，在由轻元素（如氢）组成的金属中，存在更高的超导临界温度 ( $T_c$ )。其中声子频率和电-声子耦合常数都较高的材料更有望获得高  $T_c$ 。最近在 160GPa 下发现的硫化氢 203K 的  $T_c$  证实了传统声子介导超导体的 BCS 理论，再次引发人们寻找室温超导材料的热情。

由于强磁场下测量超导相图能提供了电-声子耦合的详细信息, MagLab 的研究人员在超高压以及 35T 的稳态场和 65T 的脉冲场中进行了超导硫化物的磁输运研究。他们将测得的上临界磁场与 BCS 的 WHH 公式进行比较，注意到在使用 65T 磁场可获得的最低实验温度下 WHH 行为的偏差，推断出零温上临界场  $H_{c2}$  超过 100T。



Cite: [\*S. Mozaffari, et al. Manuscript in preparation\*](#)

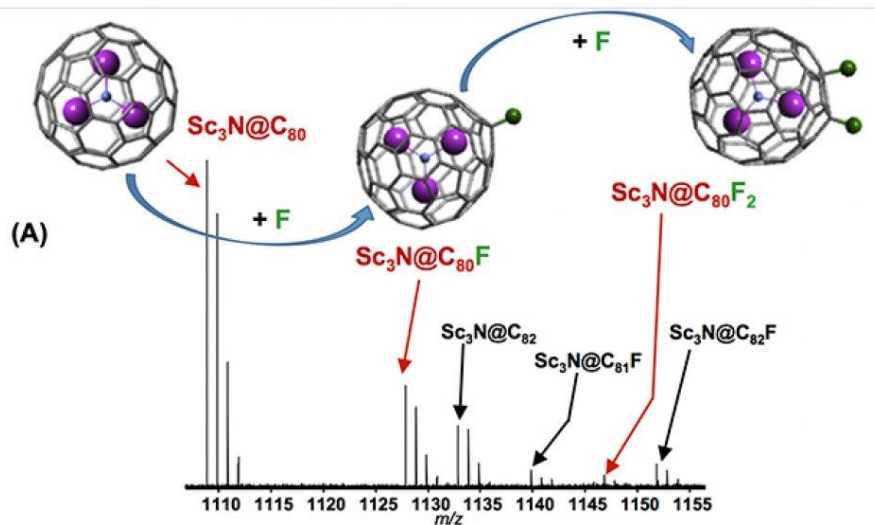
装置：水冷磁体，脉冲磁体

## ● 纳米碳材料的加氟功能化

内嵌金属富勒烯 (EMF) 在其 C80 笼的纳米空隙内含有金属基团簇 (如 Sc<sub>3</sub>N)。它们的特殊性能具有潜在的生物医学和光伏技术应用前景。例如, 水溶性 EMF 是强大的 MRI 造影剂。此外, 向笼中添加氟原子可化学调节纳米材料, 用于塑料太阳能电池技术。

来自西班牙的用户在 MagLab 的离子回旋共振 (ICR) 装置上使用了激光化学取样技术来完成 C80 笼加氟过程。向 Sc<sub>3</sub>N@C80 中加氟是一个难以实现的目标, 此前所有的尝试都破坏了富勒烯笼。在这项工作中, 研究人员发现了一种使用廉价聚四氟乙烯的路线, 可选择性地将一到两个氟原子添加到笼中。

该研究表明, 高场 ICR 质谱与理论计算相结合, 可以发现新的碳化合物, 揭示碳纳米材料的形态。



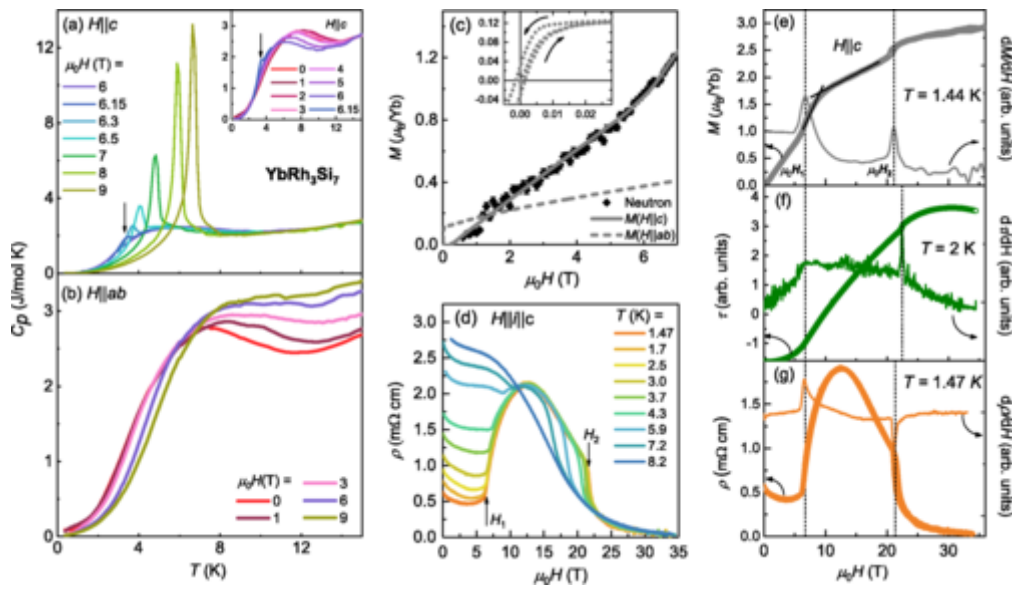
Cite: [A. Moreno-Vicente, et al. Carbon 129, 750 \(2018\)](#)

装置: ICR

#### ● 低载流子密度 Kondo 晶格 YbRh<sub>3</sub>Si<sub>7</sub> 中的反常变磁性

来自莱斯大学的 MagLab 用户报道了新的低载流子 Kondo 反铁磁体 YbRh<sub>3</sub>Si<sub>7</sub> 的单晶中复杂的变磁转变。电传输、磁化和比热测量显示 T<sub>N</sub>=7.5K 时

存在反铁磁有序。中子衍射实验表明， $\text{YbRh}_3\text{Si}_7$  的基态是共线反铁磁体，磁矩沿  $ab$  平面。在这种有序态中沿  $c$  轴施加磁场时，本不期望有磁性转变，而实际上磁化率、磁扭矩和电阻率测量均表明在 6.7T 和 21T 处存在两个变磁转变。当外场从  $c$  轴方向转向  $ab$  平面时，两个变磁转变都移向更高磁场。第一次变磁转变导致电阻率的突然增加，而第二次变磁转变伴随着电阻率的显著降低。这些结果表明， $\text{YbRh}_3\text{Si}_7$  中的磁性和电子自由度是强耦合的，其变磁性与各向异性有关。



Cite: [B. K. Rai, et al. Phys. Rev. X 8, 041047 \(2018\)](#)

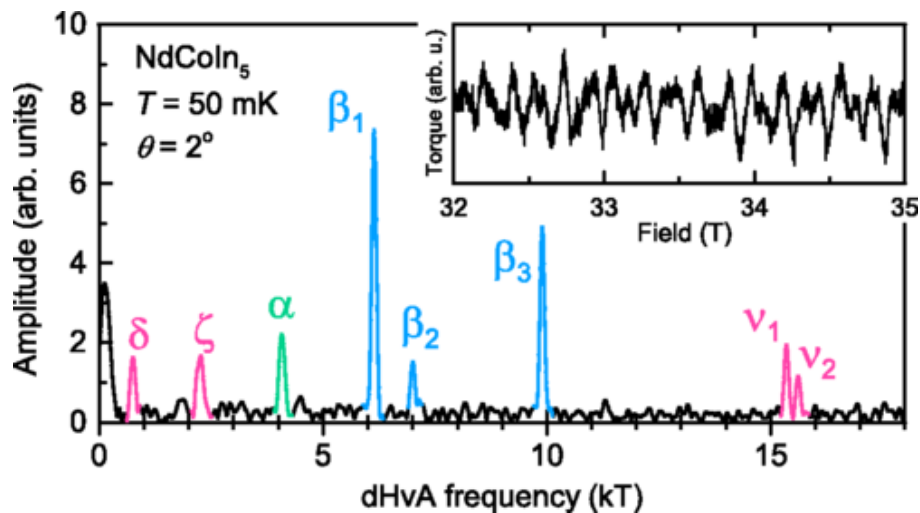
装置：水冷磁体，脉冲磁体

● **Nd 掺杂  $\text{CeCoIn}_5$  中的准二维到三维费米面拓扑变化**

众所周知，重费米子系统表现出奇异的量子现象。一个最著名的 Q 相体系  $\text{CeCoIn}_5$ ，在高场下具有交织的磁和超导序。

来自欧洲强磁场实验室和 MagLab 的科学家们合作，对一系列高品质  $\text{Ce}_{1-x}\text{Nd}_x\text{CoIn}_5$  晶体进行 de Haas-van Alphen 测量。由于电子间相互作用很强，

需要高达 35T 的磁场和低至 40mK 的温度来精确测量费米面。相应的能带结构计算和观察到的 Nd 掺杂  $x=0.02$  和  $0.05$  之间的拓扑变化揭示了 Q 相的来源于自旋密度波量子临界点。



Cite: [J. Klotz, et al. Phys. Rev. B 98, 081105 \(2018\)](#)

装置：水冷磁体，稀释制冷机

## 2. 欧洲强磁场实验室

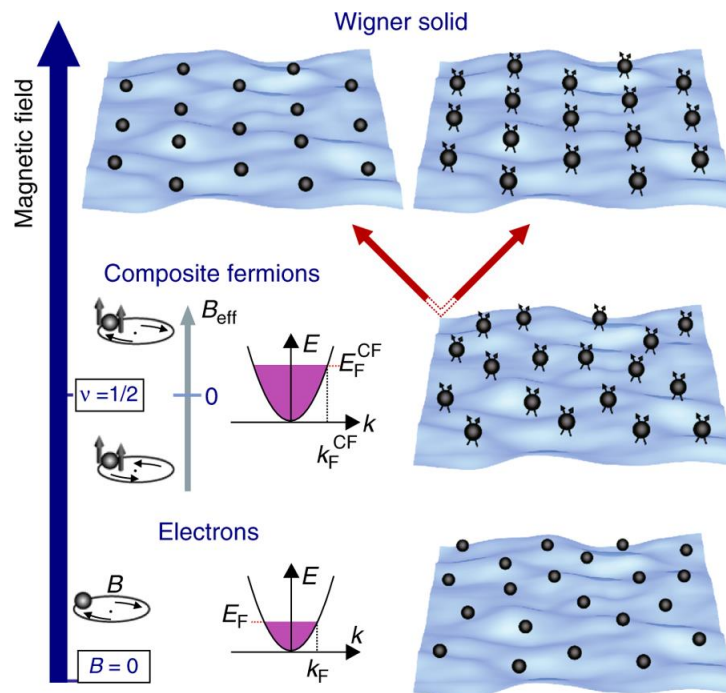
- 强磁场下的基础物理研究

2017 年五月于图卢兹举行的 Workshop on High Magnetic Fields for FUNdamental Physics (HIMAFUN)展示了当前和未来的基于高场磁体的实验，如测量真空的磁双折射，搜索超轻暗物质粒子和复杂系统（包括含反物质成分的外来原子）的精密光谱等，并讨论了当今最先进的稳态和脉冲磁体技术以及未来发展的前景。会议综述见：[R. Battesti, et al. Phys. Rep. 765-766, 1 \(2018\)](#)

- 高磁场中的电子相位 - Laughlin 液体与 Wigner 固体的竞争

电子是固体的基本成分之一，负责凝聚态物理中的大多数重要现象和应用。理解、控制和操纵电子特性仍然是凝聚态物质研究的重大挑战之一。这种努力的理想测试平台是受强磁场影响的高质量二维电子系统（2DES）。其动能和电子间相互作用之间的竞争驱动 2DES 在气相、液相和固相之间转变，这可以通过温度和磁场来控制。

来自 RIKEN 和东京大学的研究人员观察并解释了 MgZnO/ZnO 异质结的 2DES 中所有这些相。与荷兰强磁场实验室的科学家合作，他们在 60mK 极低温和 33T 强磁场下进行了电子输运实验，直接观察到一系列 2DES 中的固液相变。更具体地说，他们观察到 2DES 中 Laughlin 液体和 Wigner 固体在前所未有的大范围内的竞争。毫无疑问，这是我们理解固体中由相互作用驱动的电子相的重要一步。



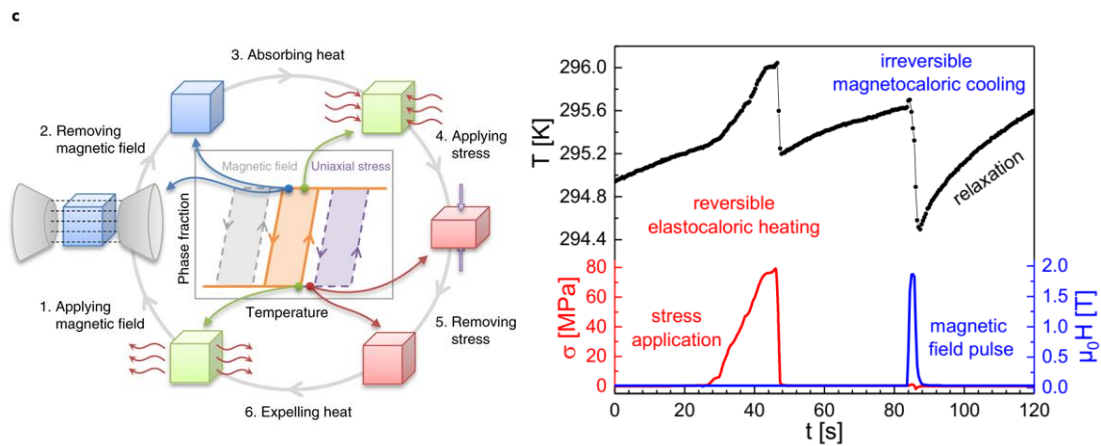
Cite: [D. Maryenko, et al. Nat. Commun. 9, 4356 \(2018\)](#)

装置：水冷磁体

● 一种可利用热回滞的多热冷却循环模式，

巨大的磁热效应可以用于制冷，但目前的商业应用还比较有限。来自西班牙的用户和德国强磁场实验室合作，提出了一种新型磁冷却方法，这种方法打破了材料中磁结构相变固有的磁滞必须最小化的传统观念。他们引入了第二个刺激——单轴应力，这样就可以利用而不是避免回滞。这种装置的工作原理如下左图。该循环允许在去除磁场时锁定铁磁相，这会大幅减少昂贵的 NdFeB 永磁体的使用量，从而降低成本。

为了评估多热 (multicaloric) 材料的适用性，在脉冲场中直接测量绝热温度变化是至关重要的。磁场在 1 到 50T 之间变化还有助于深入研究材料中的一级相变的时间依赖性。在脉冲磁场和单轴载荷下 Ni-Mn-In Heusler 合金的温度响应证明了这种方法的技术可行性 (如下右图)。



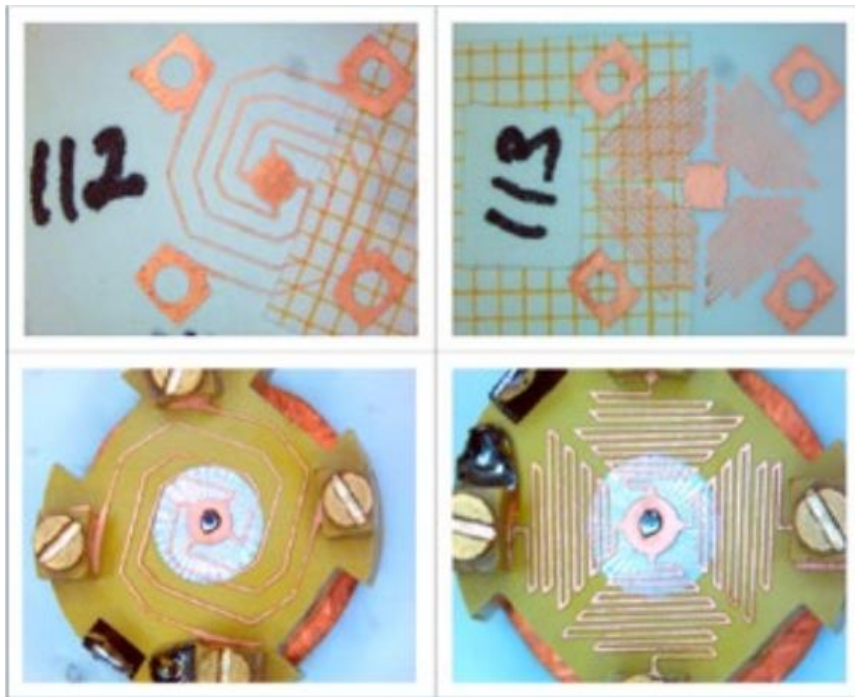
Cite: [T. Gottschall, et al. Nat. Mater. 17, 929 \(2018\)](#)

装置：脉冲磁体

● 法拉第平衡磁力计

Grenoble 强磁场实验室开发了一种用于低温和高磁场的新型法拉第平衡磁力计，可用于探测纵向样品磁化。其工作原理为：样品放置在悬浮的 CuBe 平

台上，在存在磁场梯度的情况下样品受力引起电容变化从而反推出样品磁矩大小。该装置适用于  $1 \times 1 \times 0.5 \text{ mm}$  的小单晶，使用温度为 1.3K（计划拓展至稀释制冷机），最高可达 36T 磁场，可测到的最小磁矩约  $10^{-7} \text{ emu}$ ，可观察到良好分辨的量子振荡。



- 用于中子散射的 40T 脉冲磁体

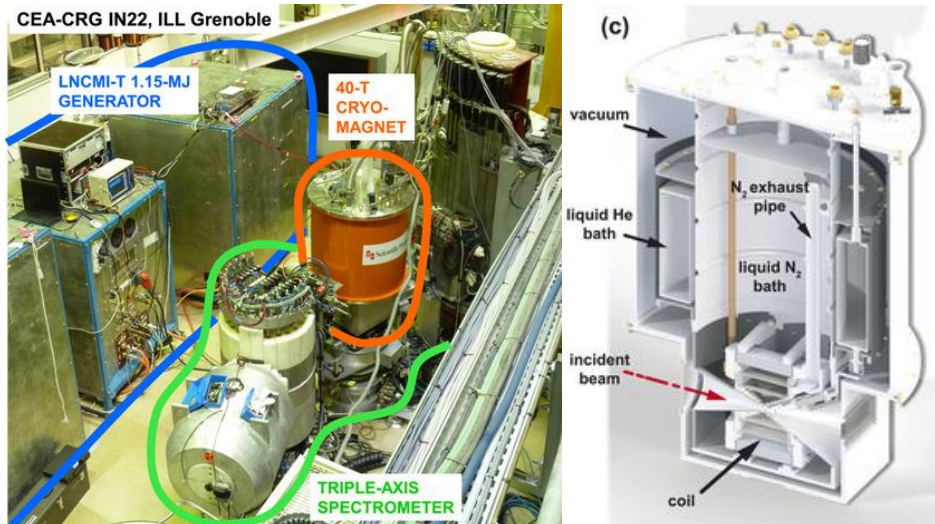
用于单晶弹性中子散射的 40T 脉冲磁体具有前所未有的高占空比，现在为劳厄-朗之万研究所（ILL）提供低至 2K 的低温强磁场测量环境。

磁体产生双锥形几何形状的水平场，开口度上游  $\pm 15^\circ$ ，下游  $\pm 30^\circ$ 。使用安装在三轴光谱仪 IN22 上的 1.15MJ 可移动发电机，产生 100ms 持续时间的脉冲磁场，上升时间为 23ms，速率为每小时 7 个脉冲。

*Cite: F. Duc, et al. Rev. Sci. Instrum. 89, 053905 (2018)*

装置：脉冲磁体





### 3. 日本强磁场实验室

- **MnGe 中具有拓扑自旋织构的大磁热电势**

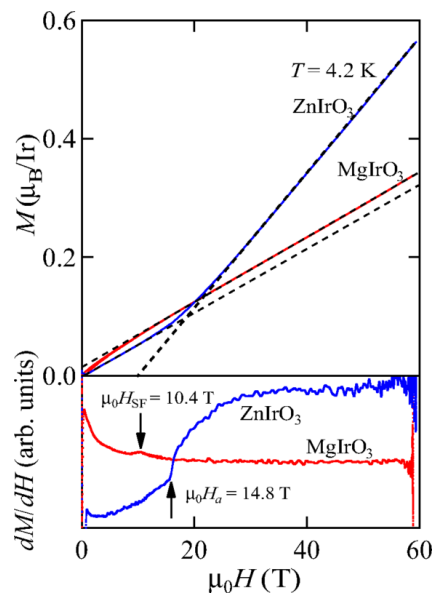
以非平庸拓扑为特征的量子态产生很多有趣的现象。这些现象的一个来源是呈展磁场，这是具有自旋手性的拓扑结构和传导电子之间相互作用的结果。然而这些现象几乎从未被用于热电转换领域。东京大学、呈展材料科学中心的研究组与东京、仙台两地的强磁场实验室合作，通过在 MnGe 拓扑自旋织构中施加磁场来获得异常增强的热电势。通过对电子结构和性质的定量研究，推断大磁热电势可能来自于非常规载流子散射引起的电荷输运寿命的强能量依赖性。此外，强磁场下的测量证实即使在名义上的铁磁区域中也存在磁涨落，导致热电势随磁场增强。本发现可为拓扑磁体的热电功能铺平道路。

*Cite: Y. Fujishiro, et al. Nature Commun. 9, 408 (2018)*

装置：25T 超导磁体，脉冲磁体

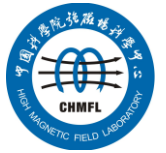
### ● 蜂窝状晶格铱氧化物中各向异性的磁有序化

来自京都的研究组合成了具有  $\text{Ir}^{4+}$  蜂窝晶格  $\text{ZnIrO}_3$  和  $\text{MgIrO}_3$  的新型反铁磁体，并研究了它们的磁性和热力学性质。这两种铱氧化物结构相同，但却具有不同的磁性。 $\text{ZnIrO}_3$  显示出低于 46.6K 的反铁磁有序，而  $\text{MgIrO}_3$  显示出低于 31.8K 的弱铁磁行为，这是由于形成了倾斜的反铁磁有序。使用取向粉末样品测量磁化率揭示了存在磁各向异性和倾斜磁性结构。此外， $\text{ZnIrO}_3$  和  $\text{MgIrO}_3$  上至 60T 的磁化曲线表现出不同的行为，表明二者磁基态不同。 $\text{MgIrO}_3$  中的弱铁磁性来自于 DM 相互作用和自旋阻挫。



*Cite: Y. Haraguchi, et al. Phys. Rev. Materials 2, 054411 (2018)*

装置：脉冲磁体



## 4. 武汉脉冲强磁场科学中心

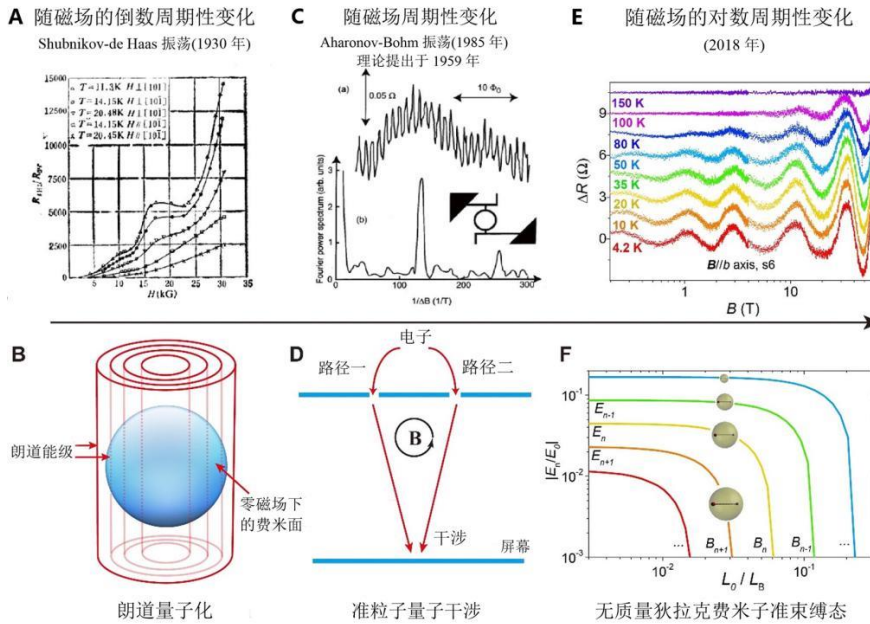
### ● 脉冲强磁场下发现第三种量子振荡现象：对数周期量子振荡

在低温和强磁场作用下，材料的电导或电阻等物理量会随着磁场强度的变化而呈现周期性的振荡现象，这种现象即量子振荡。量子振荡自发现以来，就一直为物理学界所关注，并逐渐成为揭示新奇物理现象的一个重要研究工具，以磁电阻中的 Shubnikov-de Haas(简称 SdH)振荡为例，它已成为探测材料费米面信息和物性的重要实验手段，在拓扑材料的探索中起到了非常重要的作用。按照随磁场变化规律，目前已知的量子振荡分为两大类：第一类量子振荡表现为随磁场的倒数呈周期性变化，起源于体系形成朗道能级，代表为磁电阻中的 SdH 振荡；第二类量子振荡表现为随磁场呈周期性变化，起源于介观系统中的准粒子量子干涉，代表有环状和柱状结构磁电阻中的 Aharonov-Bohm(简称 AB)振荡、Altshuler-Aronov-Spivak(简称 AAS)振荡。

与上述两类量子振荡不同，北京大学王健教授及其团队通过对三维层状拓扑材料  $ZrTe_5$  单晶进行强磁场下的电输运测量，在该材料的量子极限以上首次观测到了包含五个对数振荡周期的明显结构，并经过不同样品、不同磁场强度、不同实验设备下的多次测量验证和理论分析，最终证实并确定了这是不同于以往所有已知量子振荡的新型量子振荡——随磁场呈对数周期变化的磁电阻振荡。同时，该研究还进一步阐述了这种对数周期量子振荡的物理机制：无质量狄拉克费米子在超临界库仑吸引下形成两体准束缚态，这些满足离散标度不变性的准束缚态在磁场的影响下逐个经过费米面，引起磁电阻的对数周期量子振荡。这一发现，不仅预示着量子振荡家族增加了一个新的成员，掀开了量子振荡新篇章，更为重要的是，它还揭示出一定条件下拓扑材料或狄拉克系统可以作为

同时观测原子超临界坍缩及其离散标度不变性的实验平台，为解决超重原子中的超临界塌缩这一核物理领域的前沿科学难题提供了重要实验工具，有望发现新的相对论量子现象。

### 量子振荡家族



Cite: [H. C. Wang, et al. Science Adv. 4, eaau5096 \(2018\)](#)

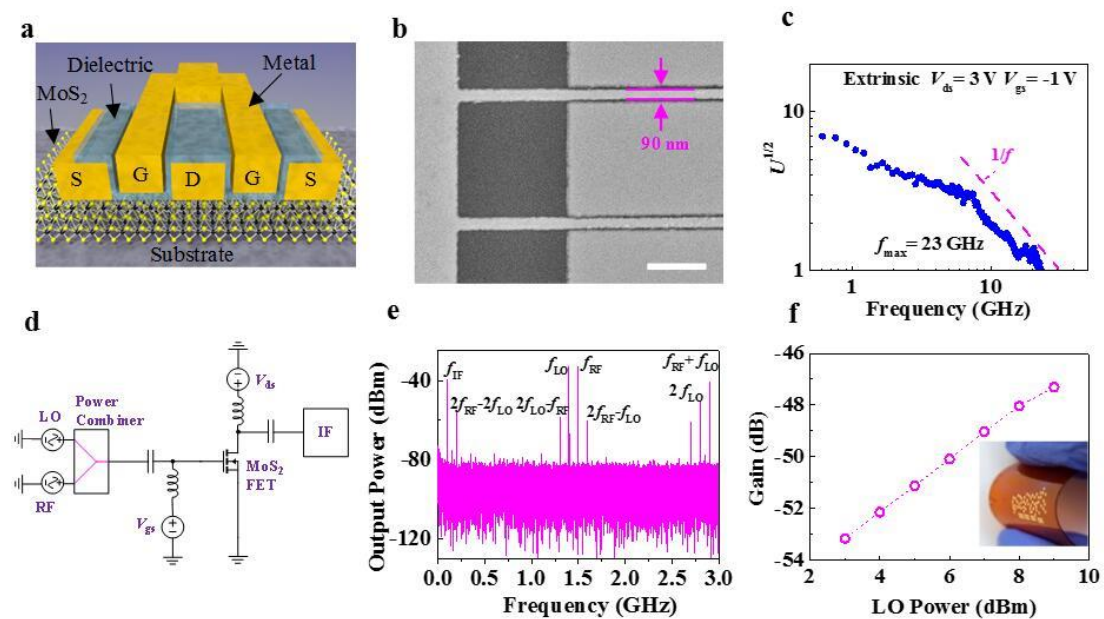
装置：脉冲磁体

#### ● 吴燕庆教授团队在双层二硫化钼的高性能射频器件研究上取得进展

二维半导体材料因其原子级的薄体和优异的载流子输运特性，在传感器、存储器以及逻辑应用等新兴的电子产品领域应用中受到极大的关注，其中具有代表性的是二硫化钼 ( $\text{MoS}_2$ ) 等二维过渡金属硫化物。已有研究表明，通过机械剥离制备的  $\text{MoS}_2$  射频晶体管性能高，但难以批量规模化生产；基于化学气相沉积 (CVD) 生长的单层  $\text{MoS}_2$  射频晶体管成本低、可扩展，但其性能远低于机械剥离的  $\text{MoS}_2$  器件，而双层  $\text{MoS}_2$  的载流子迁移率要高于单层，能够获得更高

的性能，但是现阶段通过 CVD 方法生长的双层 MoS<sub>2</sub> 存在尺寸小、且迁移率较低的问题，限制了其器件性能。

该研究中，强磁场中心吴燕庆教授课题组在熔融玻璃上制备出了具有高迁移率、大尺寸的双层 MoS<sub>2</sub>，获得了晶畴尺寸达到 200 $\mu\text{m}$ 、室温电子迁移率高达 36 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  的双层 MoS<sub>2</sub>。研究发现，这种基于 CVD 生长的双层 MoS<sub>2</sub> 短沟道晶体管在 300K 时能够提供 427 $\mu\text{A}\mu\text{m}^{-1}$  的开态电流，在 4.3K 时进一步提升为 1.52 $\text{mA}\mu\text{m}^{-1}$ 。此外，沟长为 90nm 的晶体管的去嵌入前的非本征截止频率  $f_T$  为 7.2GHz，最大振荡频率  $f_{\text{max}}$  为 23GHz，该  $f_{\text{max}}$  为目前文献报道的二维半导体射频器件的最大值。同时在柔性 PI 衬底上实现了工作在 GHz 的混频器。该成果实现了高性能短沟道  $f_{\text{max}}$  射频晶体管，在未来的柔性电子通信领域有良好的应用前景。

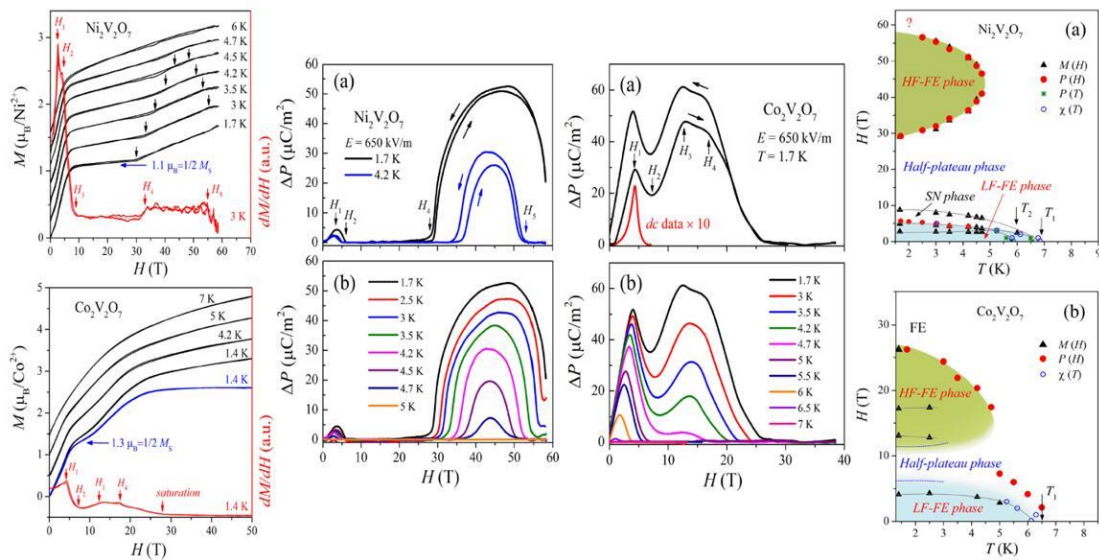


Cite: [Q. G. Gao, et al. Nature Commun. 9, 4778 \(2018\)](#)

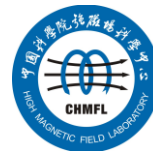
装置：脉冲磁体

● 阻挫磁性材料的强磁场研究取得进展

低维阻挫磁性材料在强磁场下表现出丰富的物理性质，如分数磁化平台、磁场诱导的多铁性等。前者是一种量子现象，表现为磁化台阶与饱和磁化值之比是一个分数值；后者指系统中同时存在磁有序和铁电序等，可以通过磁场调控铁电性或者通过电场调控磁性。由于这两种不同的物理现象都对磁结构或自旋排列提出了特定要求，很难同时出现在同一种材料中，使得同时具有这两种新奇物性的阻挫材料非常稀少，而这类材料则被称为阻挫多功能磁性材料。目前，已被发现的阻挫多功能磁性材料只有  $\text{CuFeO}_2$  和  $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  两种，并受到了广泛关注和研究。其中， $\text{CuFeO}_2$  具有  $1/5$  和  $1/3$  磁化平台，在 7-14T 表现为多铁性； $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  具有  $1/2$  磁化平台，在 2-11T 和 19-24T 之间表现为多铁性。



近日，强磁场中心材料物理组王俊峰研究员和欧阳钟文教授合作，利用 60T 脉冲强磁场下的磁化和电极化测量，对螺旋链  $\text{R}_2\text{V}_2\text{O}_7$  ( $\text{R}=\text{Ni}, \text{Co}$ ) 多晶陶瓷样品进行了深入研究。研究发现，这两种材料分别在 8-30T 和 7-12T 之间呈现  $1/2$  量子磁化平台，并在低于和高于磁化平台的磁场区间表现为多铁性，高场铁电相的电极化值达到  $50\text{-}60\text{mC/m}^2$ 。通过系统的变温实验测量，研究还得到了完整的强磁场磁电相图，并进一步揭示了  $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$  中强的磁电耦合效应。该研究



不仅证明了  $R_2V_2O_7$  ( $R=Ni, Co$ ) 是一类新的同时具有磁化平台和多铁性的阻挫多功能材料, 还预示着磁场诱导的自旋向列态和波色-爱因斯坦凝聚等新奇量子态的出现。

*Cite: R. Chen, et al. Phys. Rev. B 98, 184404 (2018)*

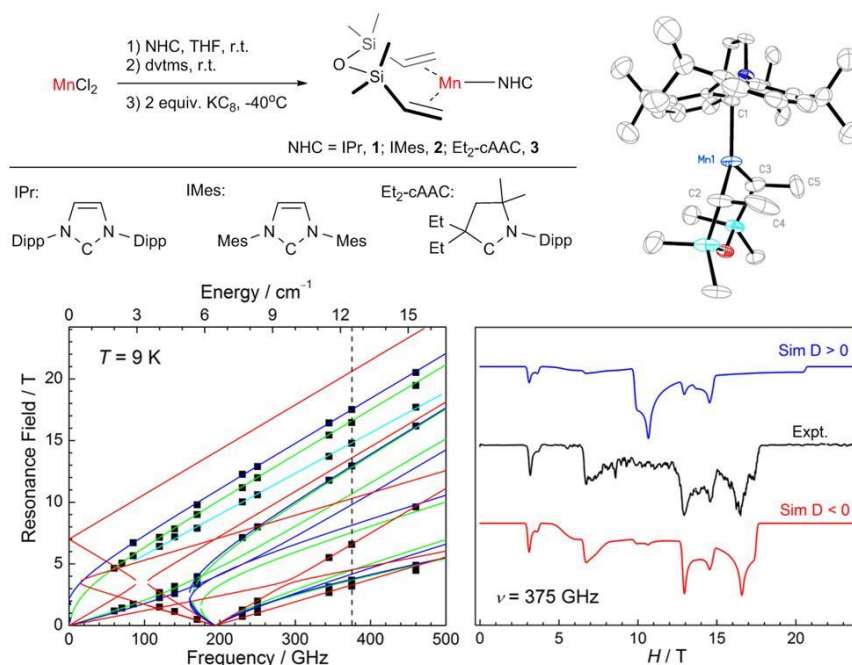
装置: 脉冲磁体

### ● ESR 团队在低配位零价锰配合物研究上取得新进展

低配位零价过渡金属配合物被认为是多种过渡金属催化反应中的重要中间体, 在新型配合物合成、小分子活化和材料科学等领域具有重要的应用价值。目前, 关于低配位零价过渡金属配合物的研究进展主要集中于第 VIII 族金属, 常用的配体包括膦配体、烯烃配体和氮杂环卡宾配体等。锰位于元素周期表第一过渡系第 VII 族, 与零价后过渡金属相比, 零价锰具有更强的还原性和更大的原子半径, 通常表现出更高的反应活性, 也增大了合成的难度。现有文献中报道的零价锰配合物以五配位和六配位为主, 低配位的例子极少。

强磁场中心 ESR 团队与上海有机所、马普所合作, 利用 NHC 和 dvtms (四甲基二乙烯基二硅氧烷) 的配体组合, 成功合成了首例三配位零价锰配合物, 并详细研究了这类配合物的电子结构和反应性质。研究发现, 通过  $MnCl_2$  与 NHC、dvtms 及  $KC_8$  (石墨钾) 反应, 能够以 41%-65% 的产率分离得到三配位零价锰配合物  $[(NHC)Mn(\eta^2:\eta^2-dvtms)]$  (NHC = IPr,1; IMes,2;  $Et_2cAAC$ ,3)。该配合物的分子结构呈平面三角构型, dvtms 中乙烯基碳-碳键长为 1.382(8)-1.432(2)Å (自由的乙烯基硅烷中碳-碳键长为 1.32Å), 表明零价锰中心对烯烃配体存在显著的电子反馈作用。单晶 X-射线衍射、SQUID、X 波段 EPR 和变频高场电子顺磁共振 (HF-EPR) 表征数据及理论计算 (CASSCF 和

B3LYP) 结果表明, 这类配合物的基态自旋为  $S=3/2$ , 金属与配体间存在强的共价相互作用。该项研究合成了目前首例三配位零价锰配合物, 对发展新型廉价过渡金属催化的有机转化反应具有重要意义。



Cite: [J. Cheng, et al. Chem 4, 2844 \(2018\)](#)

装置: 脉冲磁体

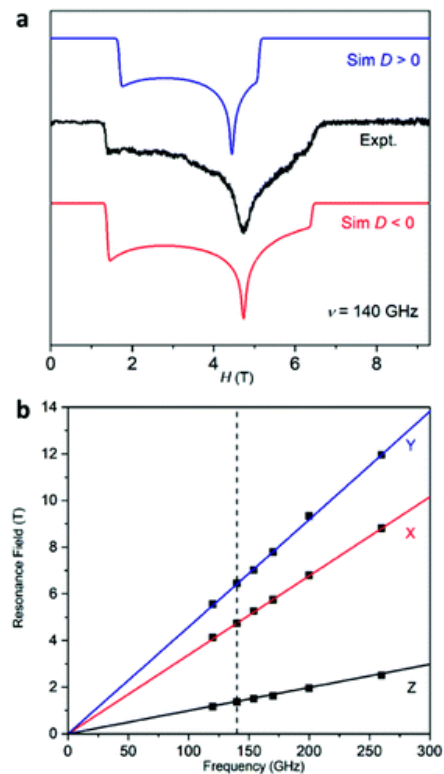
### ● 单核钴化合物中自旋交叉与单分子磁体行为

自旋交叉化合物作为目前研究得最为广泛和深入的分子双稳态现象之一, 自旋交叉体系在信息存储材料、传感器材料、分子开关及信息记忆材料等领域均有广泛的潜在应用价值。然而, 具有磁耦合的自旋交叉与单分子磁体性质的化合物还未见文献报道。

近期, 强磁场中心 ESR 团队与南京大学、南京师范大学等单位合作, 合成了第一例具有单分子磁性和自旋交叉行为、且存在单晶到单晶可逆转变的单核钴化合物, 并运用晶体学、磁测量学、脉冲强磁场电子顺磁共振和 CASPT2 计



算等多项研究方法手段，对该单核钴化合物进行了详细研究。该项研究观测到了一个前所未有的自旋交叉和单分子磁体同时展现“开关”的现象，造成这种“开关”现象的原因是单核钴化合物的结构经历了“单晶到单晶”的转化。在这种非常罕见的可逆转变过程中，分子间的相互作用起到重要作用。该项研究为合成和调控多功能自旋交叉化合物提供了一种新的思路。



*Cite: D. Shao, et al. Chem. Sci. 9, 7986 (2018)*

装置：脉冲磁体



## 5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场中心研发出针对急性髓性白血病 FLT3-ITD 突变选择性第三代新型 FLT3 激酶抑制剂
- 强磁场中心解析出 DNA 分子间 V-形 G-四链体复合物 NMR 结构
- SHMFF 用户 Nature 发文揭示基于外尔轨道的三维量子霍尔效应
- SHMFF 辅助固体所在团簇结构研究方面取得重大进展
- 强磁场中心在锰氧化物薄膜中观察到结构畴壁对相分离的调控作用
- 强磁场中心首次在氧化物薄膜中直接观测到斯格明子
- SHMFF 用户首次发现二元钙钛矿氧化物  $Mn_2O_3$  中的磁电多铁性
- 强磁场下关联电子晶体研究取得突破进展
- SHMFF 用户 Science 发文破解分枝杆菌能量代谢奥秘,助力抗结核新药研发
- 强磁场中心在狄拉克半金属  $Cd_3As_2$  纳米片中观测到平面霍尔效应
- “2018 氦低温工程青年论坛” 在合肥召开

详见: <http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>