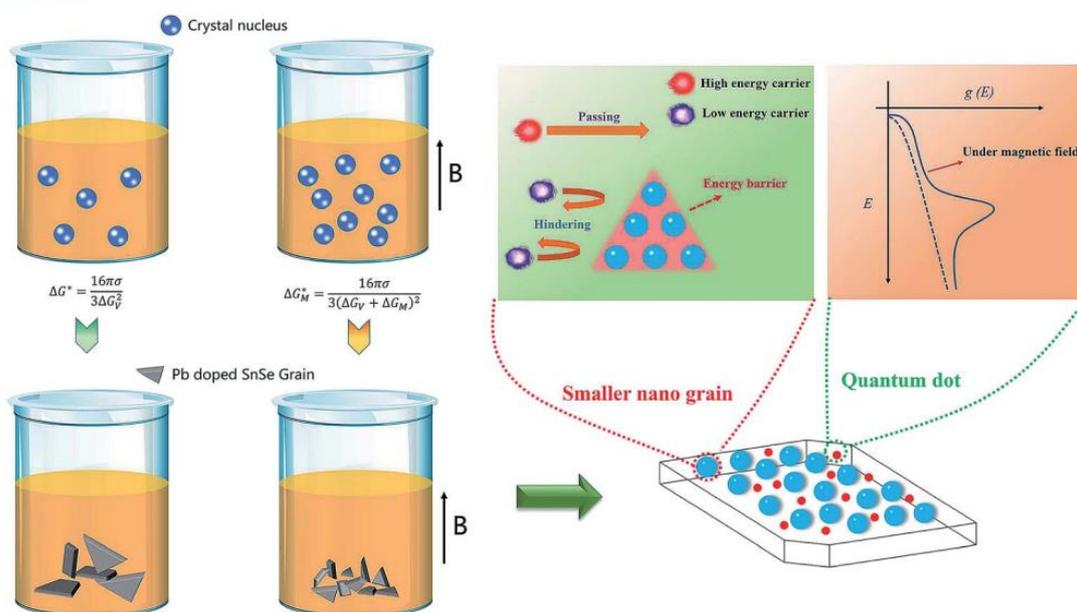


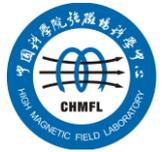
国内外强磁场实验室 科研动态

2019 年第三季度



中国科学院强磁场科学中心·科研办

2019/10/22



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

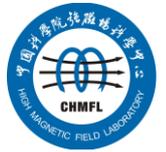
National High Magnetic Field Laboratory 又称 MagLab，是目前世界上规模最大，实验设施最全，用户最多的强磁场实验室。其稳态场部分位于 Tallahassee，脉冲场部分位于 Los Alamos，另有一个 high B/T 组位于 Gainesville。MagLab 于 1994 年建成并不断升级改造，创造并保持了多项世界纪录。

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

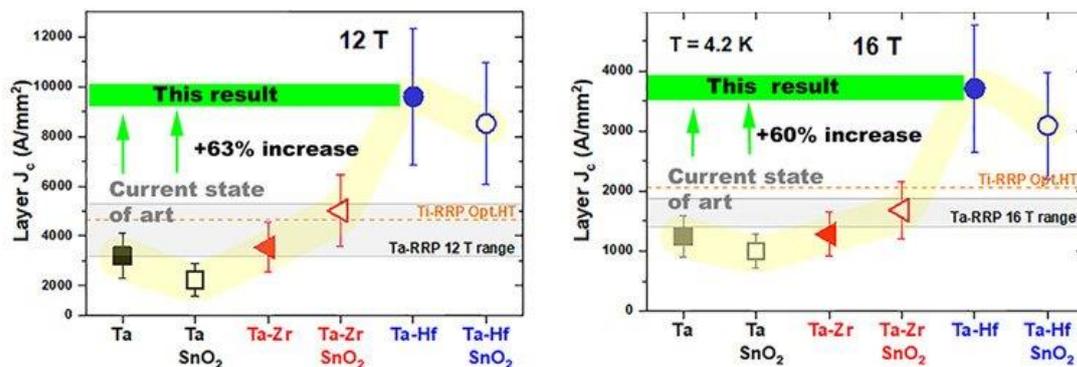
1. 美国国家强磁场实验室

● 铪元素大幅改善 Nb_3Sn 超导性能

MagLab 研究人员发现， Nb_3Sn 中加入铪 (Hf) 元素可以极大地改善导线性能，在 4.2K 温度 16T 磁场下，该导线的载流能力提高了 60%。

实验表明，在钽 (Ta) 的共同作用下 Zr 和 Hf 可将涡旋钉扎力提高到两倍以上。这提高了导线的不可逆场，从而扩大了超导线材应用的磁场范围。

当采用 60% 的典型填充率时，在 16T 和 4.2K 下的临界电流密度 J_c 超过 $3500A/mm^2$ ，表明非铜 J_c 为 $2000A/mm^2$ ，超出了 CERN 计划的未来环形对撞机 (FCC) 的要求。



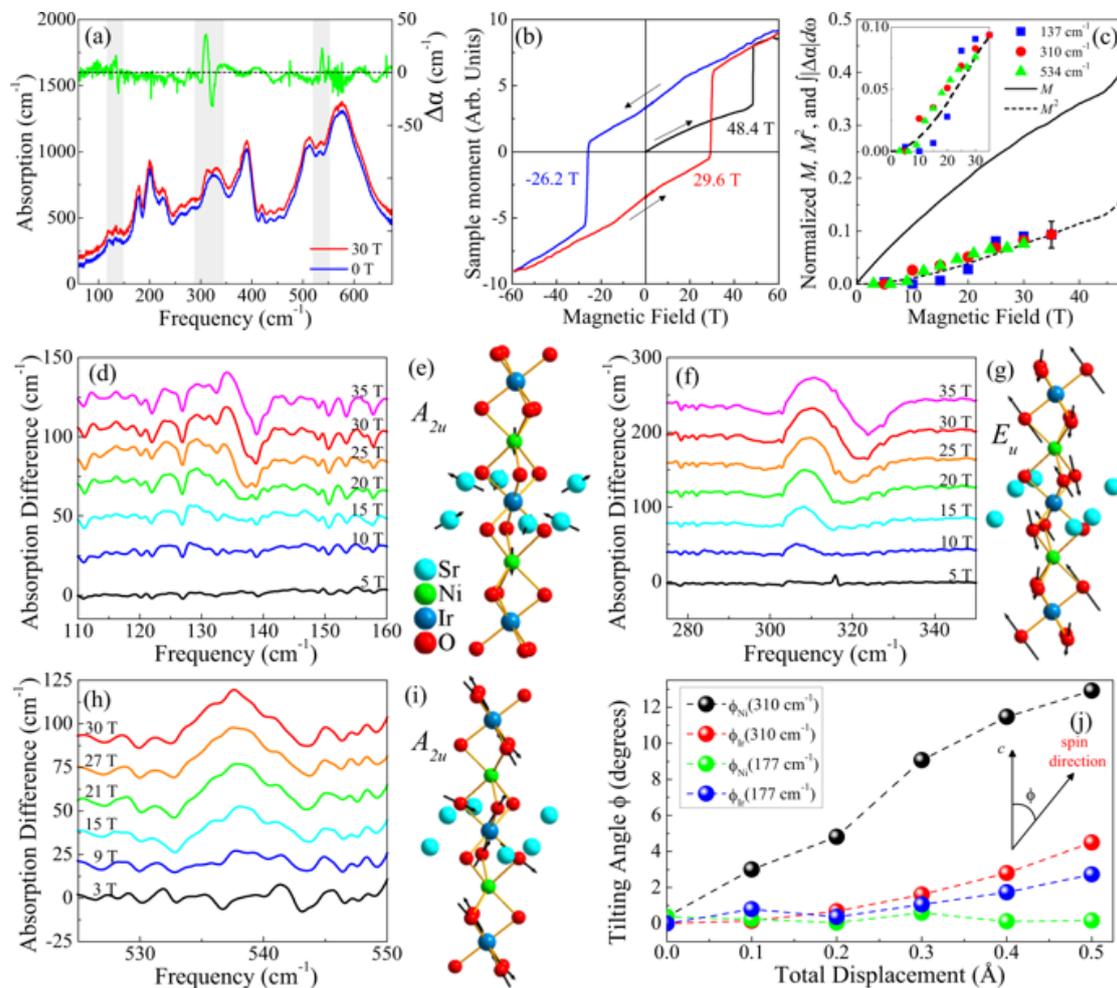
Cite: [S. Balachandran et al. Supercond. Sci. Technol. 32, 044006 \(2019\)](#)

● Sr_3NiIrO_6 中的高场磁开关

MagLab 用户向我们展示了迄今最高的矫顽磁场：55T。

$\text{Sr}_3\text{NiIrO}_6$ 中同时含有 Ni^{2+} 和 Ir^{4+} 磁性离子，它们沿链交替排列。通常具有 3d 过渡金属离子（如 Ni^{2+} ）的材料显示出较强的电子相关性以及窄带宽、强磁性，而具有 5d 磁性离子（如 Ir^{4+} ）的材料具有强的自旋轨道耦合，增强的杂化和更多的扩散轨道。结合这些特性会导致新颖的行为，例如超高矫顽场。

通过高场下的红外光谱发现，三个声子模随着磁场的平方增长。这些数据表明晶格畸变有助于微观自旋重排，从而形成磁序，进而将磁开关推至高达 55T 的磁场。



Cite: *K. R. O'Neal, et al. npj Quantum Mater. 4, 48 (2019)*

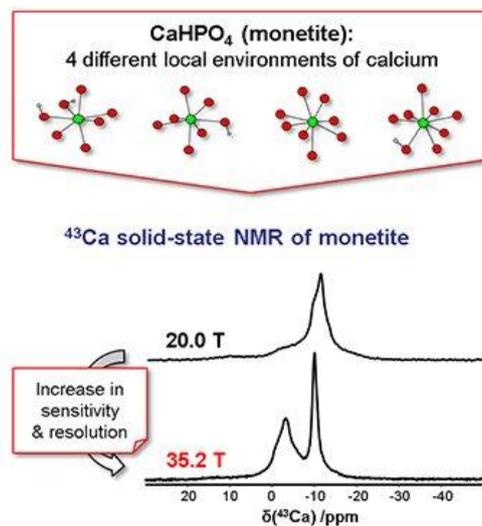
装置：脉冲磁体、水冷磁体（红外）

● 超高磁场为类骨材料提供新的研究方法

钙大量存在于活生物体中，特别是在骨骼和牙齿等矿化组织中。但是，确定钙在此类复杂材料中的周围环境并非易事。这对 NMR 之类的技术极具挑战性，因为 NMR 活性同位素 ^{43}Ca 是自然丰度极低（0.14%）和拉莫频率低的自旋 7/2 核。

均匀的超高磁场特别适合解决钙 43 的不良感受性。这项研究利用了 MagLab 的 35.2T 串联混合磁体，利用 ^{43}Ca 固态 NMR 研究了一系列合成的生物材料，包括晶体和非晶体。研究人员发现串联混合磁体前所未有的灵敏度和分辨率水平，例如可以使用 35.2T 的一维 ^{43}Ca NMR 实验首次解析 CaHPO_4 中的钙环境，该分辨率是以前 20.0T 磁体不可能达到的。

此类分析为将来在各种引起人们广泛关注的含钙材料（包括生物材料，矿化组织、水泥和混凝土）中钙环境的更详细研究开辟了新的途径。这些深入的结构分析将对材料内部有更全面的了解，包括其性质的原子尺度起源。



Cite: [C. Bonhomme, et al. Chem. Commun. 54, 9591-9594 \(2019\)](#)

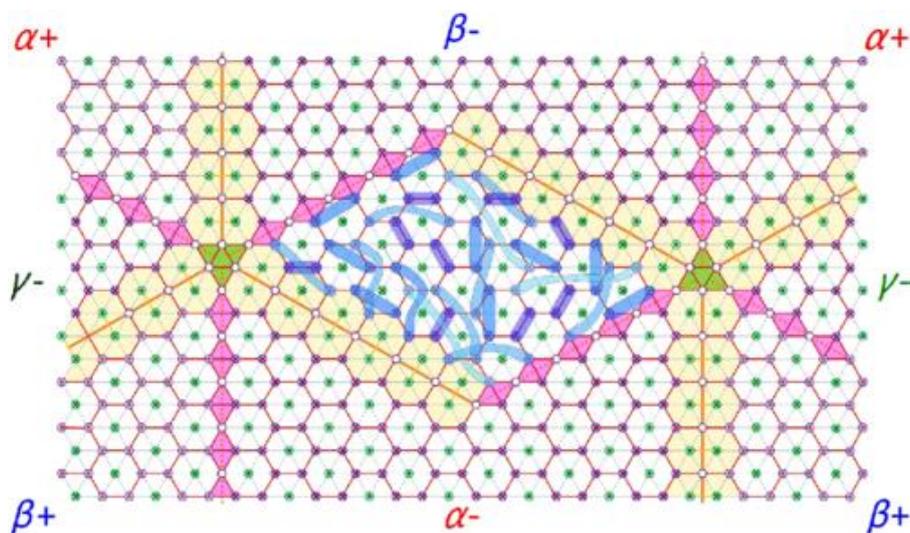
装置：串联混合磁体（NMR）

● 在 TbInO_3 中具有拓扑边缘态的自旋液体“湖”

最新的脉冲磁场实验支持 TbInO_3 作为自旋液体的候选，其结构和铁电边界在自旋液体区域周围产生拓扑边缘态。

TbInO_3 具有磁性 Tb 离子的阻挫二维三角结构。它是一种铁电体，其中 In 原子可以三聚化，并且 Tb 原子可以在 2D 平面上方或下方位移，从而创建六种不同类型的铁电畴 (α^\pm , β^\pm , γ^\pm)。畴壁与畴内部具有不同的磁交换相互作用，这导致了磁边缘态。

MagLab 用户用低至 0.15K 温度，高达 65T 的磁场中的比热测量排除了该材料中的磁有序性，而磁交换相互作用可能高达 20K，这表明 TbInO_3 中出现了自旋液体态。另外，由于两个 Tb 位置中只有一个具有磁性基态，说明这是呈展蜂窝状磁性晶格。理论研究表明，自旋液体区域之间的清晰的原子级厚度的边界可以产生马约拉那费米子。



Cite: [J. Kim, et al. Phys. Rev. X 9, 031005 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

2. 欧洲强磁场实验室

● HFML-FELIX 联合装置正式运行

2019年7月8日，荷兰教科文部长 Ingrid van Engelshoven 宣布 HFML-FELIX 联合装置正式运行。

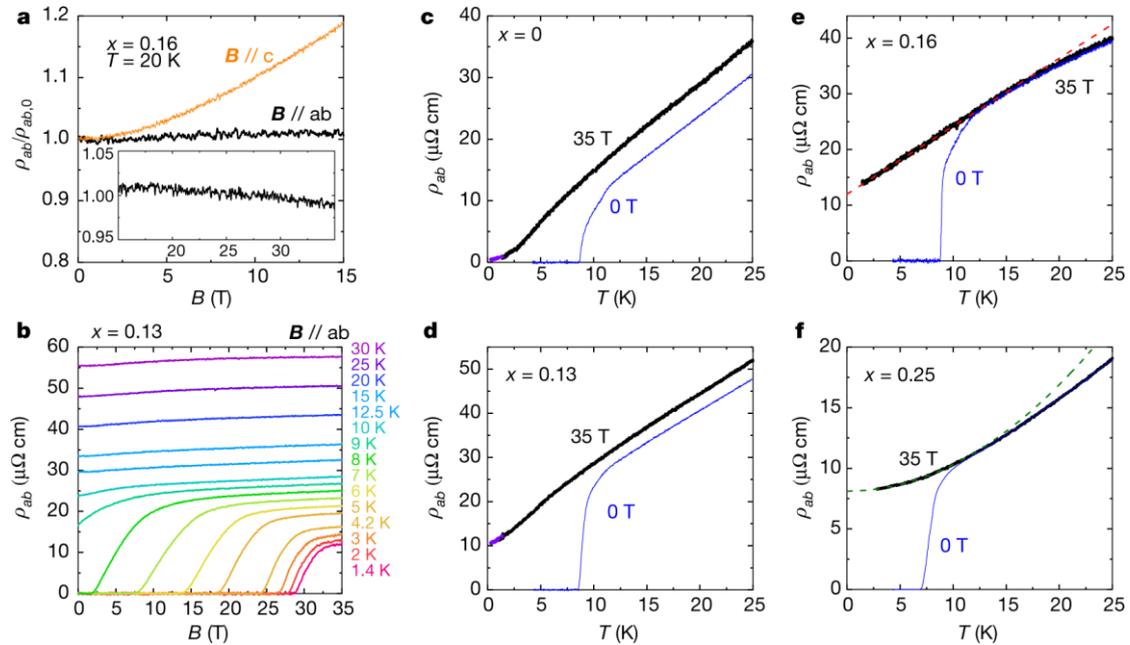


● FeSe 量子临界点附近的电输运研究

荷兰强磁场的研究人员与日本合作者一起，尝试了一种使超导消失的方法，并探索了极低温下的金属态。在 FeSe 中，电子似乎在 100K 附近转变为纯向列相。当 1/6 的 Se 原子被 S 原子取代时，向列相的转变温度被压制到 0K。量子临界点受超导电性的保护，必须首先将超导除去。强磁场可以压制超导，然后奇异金属态显现出来。随着接近量子临界点，由于向列序的涨落不断加剧，电子变得越来越重。

结果与理论预期不同。首先，此前只在靠近磁性量子临界点的体系中才观察到奇异金属行为，而纯向列体系中没有。其次，当接近向列量子临界点时涨

落变强而超导性并未变强。向列波动是导致高温超导的一种可能途径，但似乎在硫属硫化物中并非如此。



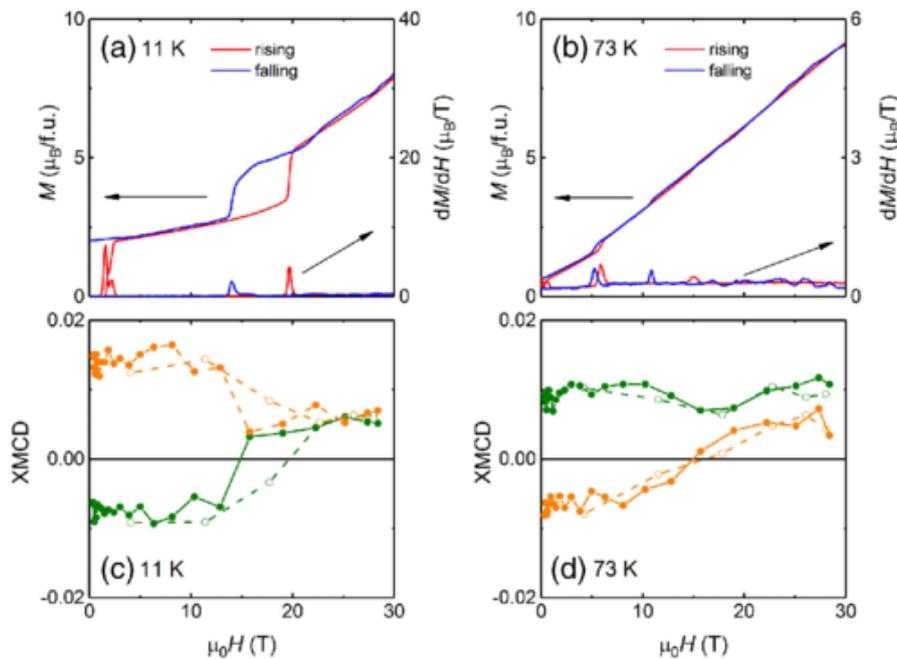
Cite: S. Licciardello, et al. Nature 567, 213–217 (2019)

装置：水冷磁体

● 揭示 HoFe_5Al_7 中磁致相变的微观性质

HoFe_5Al_7 是强各向异性的亚铁磁体。在 2K 时，它显示出 13-20 和 34-38T 两段磁致相变。德国强磁场的研究人员在高达 30 T 的脉冲磁场中进行了 X 射线磁圆二色谱 (XMCD) 实验，以跟踪各个亚晶格磁化强度的旋转。在 11K 时，观察到 14 至 19.5T 之间的一阶相变。在 73K 时，5.5 至 6T 之间以及 11 至 15T 之间出现两个弱跃迁。从 XMCD 数据推断出的与场有关的 Fe 和 Ho 亚晶格磁矩都在 11K 的相变处发生旋转，Fe 的磁矩甚至反转。在补偿温度以上，Ho 磁矩从 6T 开始持续增加，至 16T 反转。对于 Fe 磁矩，在 10 和 27.5T 处打开两个小的磁回滞，同时伴随着 Ho 磁矩反转的开始和结束。对单个亚晶格磁化强

度的建模使我们能够确定接近基态的面内各向异性常数 $K \approx 0.5 \text{ MJ/m}^3$ 。补偿温度以上观测到的附加磁致相变可以解释为：Ho 亚晶格磁矩不再是刚性的，因为在此温度范围内，施加的磁场与 Ho-Fe 分子场相反。这项研究首次为强各向异性亚铁磁体在脉冲磁场中的磁化过程提供了微观见解。



Cite: [D. I. Gorbunov, et al. Phys. Rev. Lett. 122, 127205 \(2019\)](#)

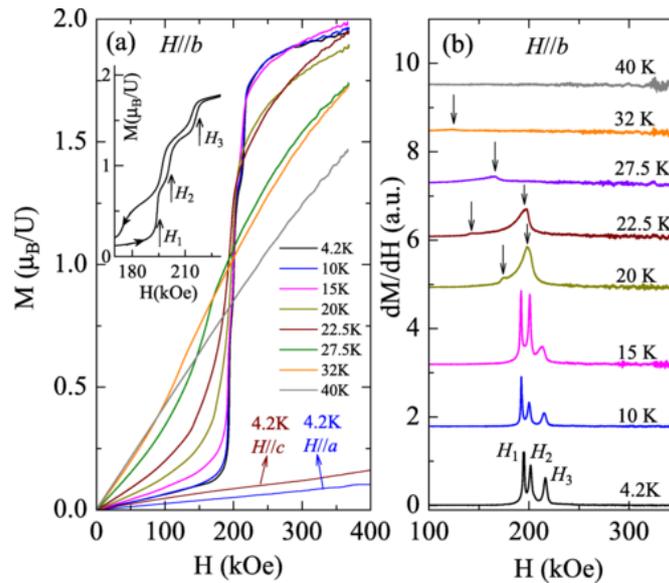
装置：脉冲磁体 (XMCD)

3. 日本强磁场实验室

- 一维轴 zigzag 链三元化合物 $\text{U}_2\text{Ir}_3\text{Si}_5$ 的电学、磁学性质

利用磁化率、比热、电阻率等测量手段研究了具有 $\text{U}_2\text{Co}_3\text{Si}_5$ 型正交结构的新型三元铀化合物 $\text{U}_2\text{Ir}_3\text{Si}_5$ 单晶的物性。 $\text{U}_2\text{Ir}_3\text{Si}_5$ 在 $T_N=36\text{K}$ 时经历反铁磁相变，在 $T_0=25.5\text{K}$ 时经历一阶相变，比热、磁性和电输运测量都提供了有力的证据。沿 a 轴和 b 轴的电输运测量显示了在宽温度范围内电阻的负温度系数，

这可以根据窄带隙半导体模型或 Kondo 效应来理解。沿 b 轴在 4.2K 处测得的 M-H 曲线在 200kOe 的狭窄磁场区域内出现了三级变磁转变，并且在第一个转变场附近存在较大的磁滞，而 a、c 方向在 560kOe 以下没有任何跃迁，表明强烈的磁各向异性。准一维铀 zigzag 链引起的磁四极序可能是 T_0 处一阶相变的来源。



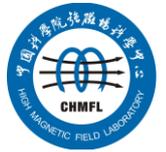
Cite: [D. X. Li, et al. Phys. Rev. B 99, 054408 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

4. 武汉脉冲强磁场科学中心

● 非共线反铁磁手性磁畴壁行为上取得重要进展

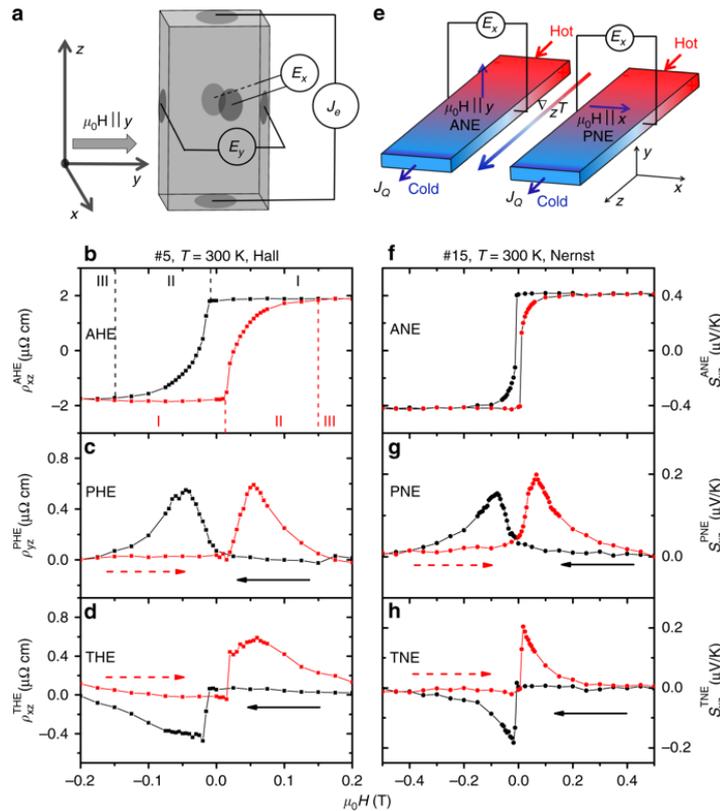
反铁磁体系是一类在基础研究上具有非常重要研究意义且具有重要应用价值的材料，是近些年电子自旋器件的重要研究对象，国际顶级杂志 Nature Physics 和 Review of Modern Physics 曾于 2018 年分别进行专刊约稿综述报道反铁磁电子自旋器件研究和展望。反铁磁材料拥有众多优异的性能，例如在



某些反铁磁材料里能拥有比铁磁体系更大或相当的反常霍尔效应 (AHE)、反常能斯特效应 (ANE)、反常里纪-勒杜克效应 (ARLE)。其中, Mn_3Sn 是一种反铁磁转变温度高达 420K 的室温 Kagome 非共线反铁磁材料, 可以成为一种非常好的室温电子自旋器件的研究平台。

该研究中, 朱增伟团队利用脉冲强磁场实验装置的电输运平台, 对 Mn_3Sn 横向电磁输运特性和横向磁化性质进行研究, 发现了三种新的物理效应, 分别是: 一种新机制产生的平面霍尔和能斯特效应 (planar Hall and planer Nernst effect), 横向磁化效应 (transverse magnetization), 以及手性磁畴翻转记忆效应 (memory effect)。传统的霍尔效应是在垂直于磁场和电流的方向上进行观测, 但平面霍尔效应打破了这种固定思维。研究发现, 当用外部磁场调控晶体内部磁畴翻转时, 在磁畴壁 (domain wall) 的精细结构中可能存在与外部磁场方向垂直的自旋磁矩状态, 这些垂直的自旋磁矩可以在晶体内部产生高达 50T 的虚拟内场, 所以即使在平行于磁场的方向, 也能观察到平面反常霍尔效应。同时, 传统磁化测量是在与磁场平行的方向进行探测, 该团队巧妙地利用二维电子气 (2DEG) 霍尔探测芯片紧贴在样品表面, 通过转角, 在与外磁场垂直方向上探测到了非常大的横向磁化效应。

为了更深入地理解这些新发现的现象, 该团队提出了一种 Mn_3Sn 的自旋晶格结构。从磁场导致的单畴到反向磁场的单畴过程, 可根据不同磁畴内部的自旋转向构型就可以解释四种翻转过程顺时针上 (下)、逆时针上 (下) 翻转, 成功解释了所有的实验发现。基于此理论的分析, 还成功预言并实验观测到了一种新的记忆效应, 即样品所经历的先驱磁场记忆, 可以对平面霍尔效应和横向磁化的信号进行正负符号的开关切换, 有望用于记忆器件。



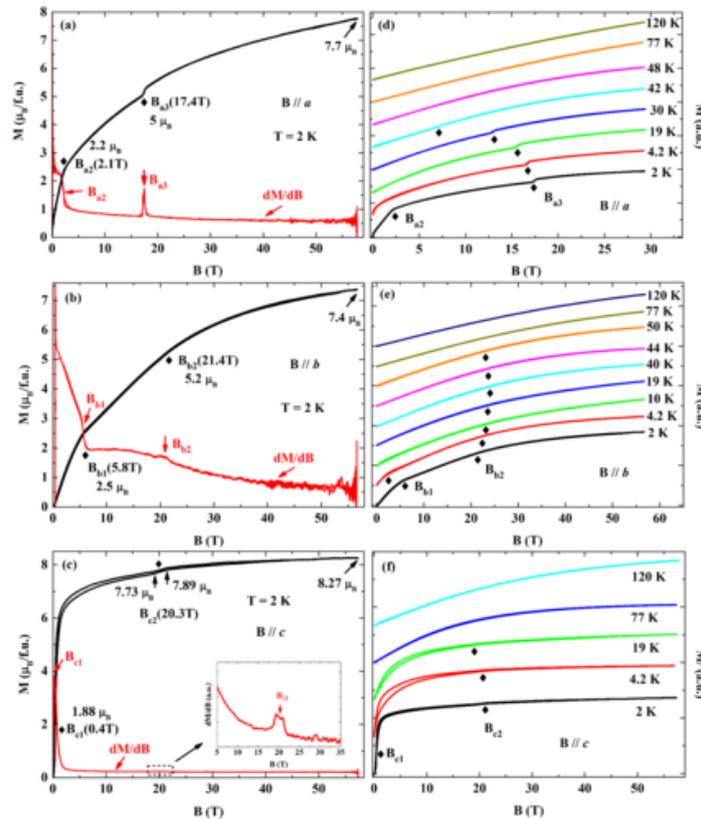
Cite: [X. K. Li, et al. Nature Comm. 10, 3021 \(2019\)](#)

● **稀土铁氧体 ErFeO_3 强磁场研究上取得新进展**

稀土铁氧体 RFeO_3 (R 为稀土元素) 由于存在多种磁相互作用 (如 Fe^{3+} 离子之间、 R^{3+} 离子之间以及 Fe^{3+} 和 R^{3+} 之间相互作用) 和很强的自旋晶格耦合而表现出丰富的物理性质 , 如多铁性、光磁效应、超快自旋翻转等。最近研究还表明这类材料中也存在迪克协同效应 , 这是在凝聚态磁性系统中发现的第一个迪克协同作用的实例。然而由于 R 4f-Fe 3d 之间复杂的相互作用 , RFeO_3 体系中铁离子在稀土离子有序温度以下的磁结构还存在争议。

近日 , 强磁场中心夏正才教授和物理所成昭华研究员合作 , 利用 60T 脉冲强磁场研究了稀土铁氧体 ErFeO_3 单晶三个方向的磁化行为。研究发现 , 除了温度诱导的自旋重取向 ($\Gamma_4 \rightarrow \Gamma_2$) , 磁场也能诱导自旋重取向 ($\Gamma_4 \leftarrow \Gamma_2$) 的发生。基于铁离子晶格可能存在的三种磁结构 (Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_4) , 通过对磁化过

程的详细分析，给出了 ErFeO_3 单晶高场下详细的磁相图。该研究对于理解稀土铁氧体这一类材料中的磁结构、磁相变以及其中复杂的 3d-4f 相互作用具有指导意义。



Cite: [X. X. Zhang, et al. Phys. Rev. B 100, 054418 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

● 金属玻璃中弛豫过程的研究上取得重要进展

非晶态物质（也称为玻璃态物质）兼具固体和液体的性质，是现代科学技术的重要材料。

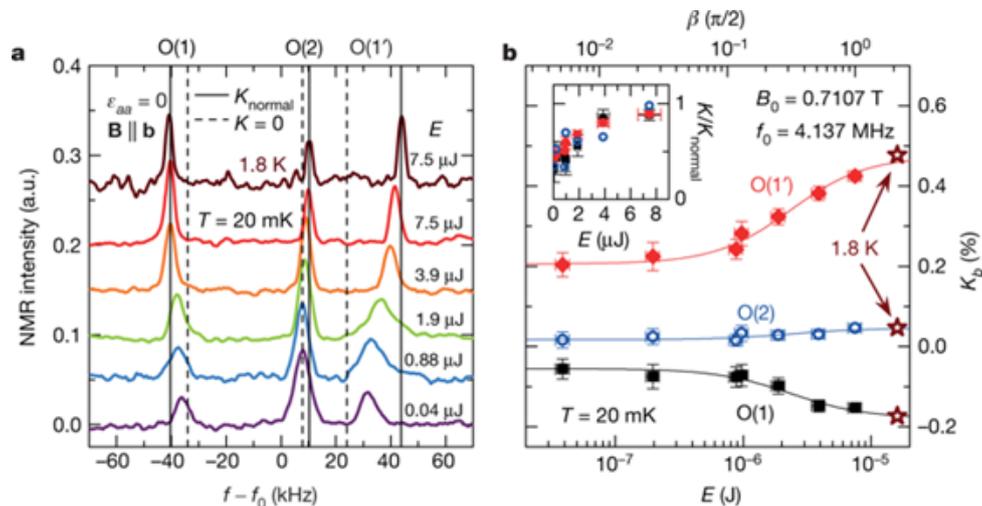
于海滨教授团队利用大规模分子动力学模拟，使得时间尺度达到微秒量级，预测了一种非晶态铝合金中存在复杂的弛豫模式。研究发现，该金属玻璃中除了主弛豫（ α 弛豫）以外，还在液氮温度下出现了明显的次级弛豫（ β 弛豫）和一个异常的 α_2 弛豫过程。在此基础上，他们通过实验证实了这些弛豫过程，其

中 α_2 弛豫是首次在非晶态合金中发现。进一步的理论模拟也澄清 β 弛豫和新发现的 α_2 弛豫的微观机理： β 弛豫来源于体系存在大量链状原子协同运动， α_2 弛豫主要来源于体系中不同组成原子的运动能力在低温下的显著差别。该研究有助于理解非晶态物质的本质，对新型非晶态合金材料的设计具有重要意义。

Cite: [Y. Sun, et al. Phys. Rev. Lett. 123, 105701 \(2019\)](#)

● 《自然》刊发罗永康教授团队在 Sr_2RuO_4 超导配对对称性上的研究成果

在凝聚态物理中，物质的相通常由对称性及其序参量来表征。然而，在某些材料中，对称性和序参量的测量却非常艰难，比如 Sr_2RuO_4 的超导对称性。 Sr_2RuO_4 长期被认为是具有奇对称、自旋三重态配对、拓扑性质等特性的非常规超导体的典型代表。



为深入研究 Sr_2RuO_4 的超导态性质，罗永康教授与合作者对 Sr_2RuO_4 进行了更进一步的 ^{17}O NMR 测量和分析，为揭示 Sr_2RuO_4 的超导配对对称性提供了新的启示。研究发现：首先，无论应变是否存在， Sr_2RuO_4 的自旋磁化率在超导相变前后均有明显的变化；其次，这些现象无法用常规的手性 p 波表象来理解，甚至所有与 z 方向平行的超导序参量都存在疑问，从而启迪人们重新审

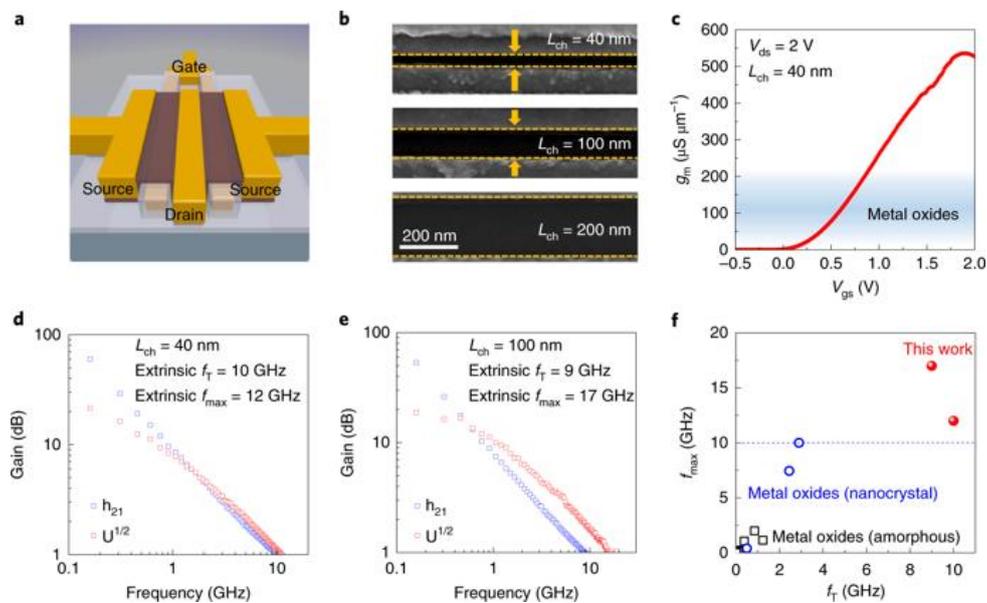
视它的超导对称性。该项工作并不完全排除所有的 p 波对称性的可能，要证明或证伪它们，还需要更精确地测量超导前后自旋磁化率的改变量。

罗永康教授为论文的共同第一作者兼通讯作者。

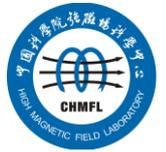
Cite: A. Pustogow et al. Nature 574, 72–75 (2019)

● 高性能先进晶体管领域取得重要进展

近年来，随着可穿戴应用和便携式设备需求高涨，超低功耗电子器件一直是研究热点。基于新材料沟道的电子器件面临大面积材料合成、超短沟道器件性能、工艺与现有平面晶体管制备工艺的兼容性等诸多挑战。



微纳电子器件课题组通过精确控制材料本身沉积过程中的环境氛围及界面掺杂，实现了表面平整、一致性极高且厚度为 4nm 的超薄 ITO 薄膜，并通过量子约束效应实现了沟道富余载流子的耗尽。通过使用 La 掺杂的 HfO_2 (HfLaO) 作为高 k 栅介质获得了等效物理厚度 (EOT) 0.8nm，实现了优异的界面特性。此外，器件沟长从 $30\mu\text{m}$ 缩小至 40nm，依然保持极好的器件性能，其开关比大于 9 次方，亚阈斜率小于 70mV/dec。该工作中，40nm ITO 器件优异的短



沟道效应主要归因于超薄 ITO 体特性和 HfLaO 高 k 介质材料特性，40nm 沟长的 ITO 器件的开态电流和开关比的综合表现远超过之前基于二维材料和其他金属氧化物器件。同时，利用该超薄体结构的 ITO 晶体管构建了逻辑反相器，在 0.5V 偏压下反相器电压增益可达 178。此外，40nm 沟长的 ITO 器件实际测试截止频率 f_r 和最大振荡频率 f_{max} 可同时大于 10GHz，这些指标均也远超之前金属氧化物晶体管与二维半导体。该成果为未来先进的低功耗电子器件尺寸缩小至 5 nm 以后的进一步拓展提供了前景。

Cite: S. M. Li et al. Nature Mater. 18, 1091–1097 (2019)

5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场中心研发出针对胃肠间质瘤的新型广谱 c-KIT 激酶突变抑制剂
- SHMFF 用户利用磁场辅助微结构调控热电材料性能取得新进展
- 强磁场中心研发出用于 X 散射装置的 10T 分离超导磁体
- 强磁场中心在张应力 LaCoO_3 薄膜中直接观测到半占据的铁磁分布状态
- SHMFF 助力中科大刘扬中研究团队取得系列科研成果
- 强磁场中心在二维铁磁材料研究中取得进展
- SHMFF 用户在反铁磁 CrAs 基化合物中发现巨负热膨胀效应
- SHMFF 用户发现拓扑量子材料热电性能的磁场增强效应

详见：<http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>