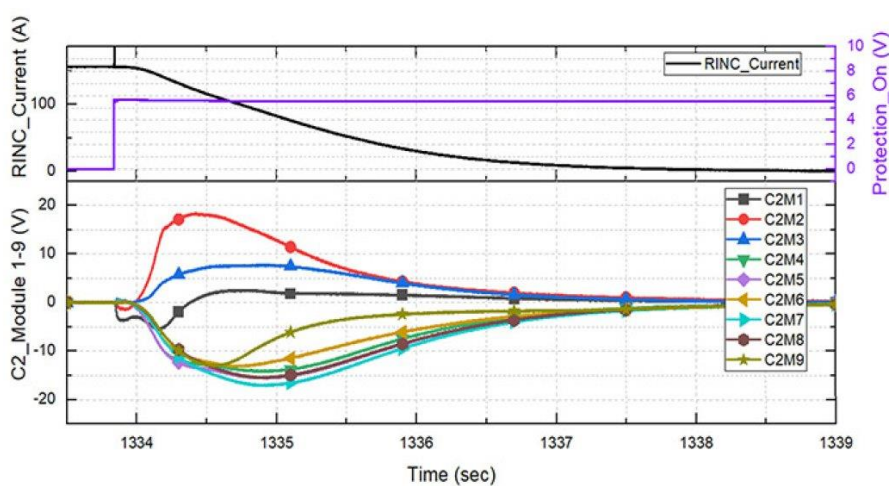


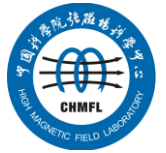
国内外强磁场实验室 科研动态

2022 年第四季度



中国科学院强磁场科学中心

2023/1/16



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是世界上仅有的两个稳态磁场超过 40T 的装置之一。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 45.22T，是目前全球范围内可支持科学研究的最高稳态磁场。磁体技术和综合性能处于国际领先地位。

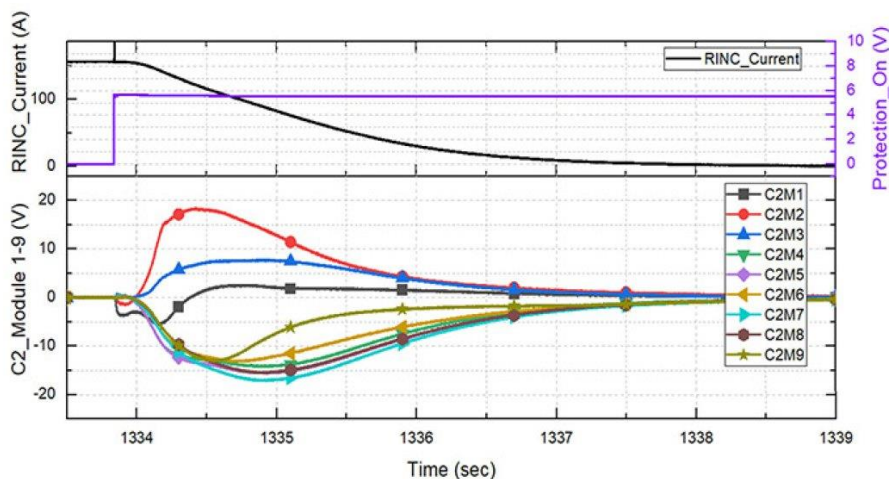
科 研 动 态

1. 美国国家强磁场实验室

● 40T 全超导磁体技术演示用 19T 电阻绝缘试验磁体

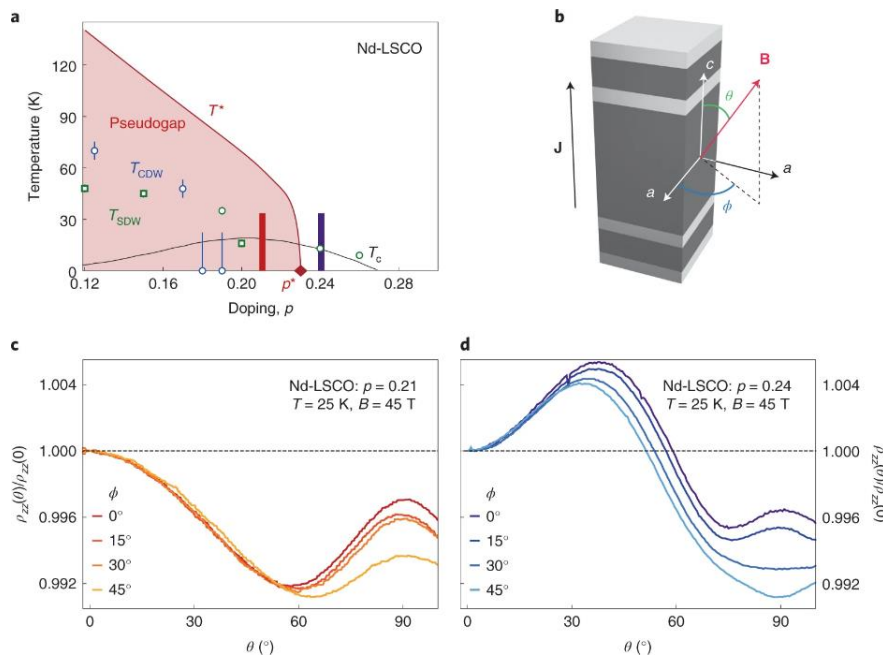
“电阻绝缘” (RI) 磁体技术是 MagLab 40T 全超导磁体的领先设计之一。与 REBCO 高温超导体 (HTS) 带匝之间的传统电绝缘不同，硬质氧化物沉积在与超导体共同缠绕的不锈钢带表面上。在这种配置中，匝间存在有限电阻，并且电流在故障条件下不受限制地沿着 HTS 的匝流动。这导致磁体即使存在导体缺陷也能保持稳定。因此，REBCO 绕组中需要的铜较少，线圈变得更加紧凑。

美国国家强磁场实验室构建了一个重要的测试线圈并测试了 19.2T 的中心场和 0.1MJ 的存储能量，整个线圈上的绝缘电阻测得为 3.25mW。RI 磁体可能会因发生与中平面不对称的失超而损坏。保护策略包括为嵌入在线圈两端的加热器提供能量，以产生对称失超，压倒最初的不对称失超。插图显示了两个嵌套线圈有意对称淬火的演变。9 个模块经历类似的失超传播，导致磁体电流安全衰减（图中的黑色轨迹）。



● 铜酸盐超导体中赝能隙态开始出现时的费米面变换

长期以来一直有迹象表明，磁性和超导性在高温超导体中交织在一起。在高温超导体中，MagLab 用户发现费米面在某个“临界点”发生转变，该临界点对应于赝能隙态开始的载流子浓度。该实验表明，这种磁性出现在赝能隙态的开始阶段。磁性将费米面转变为四个小口袋，从而在赝能隙态形成时显著减少电荷载流子。该实验提供了直接证据，表明与赝能隙相关的临界点也与磁性相关，这一线索可能有助于解决铜酸盐超导体中的高温超导机制。



Cite: [Yawen Fang et al. Nature Phys. 18, 558-564 \(2022\)](#)

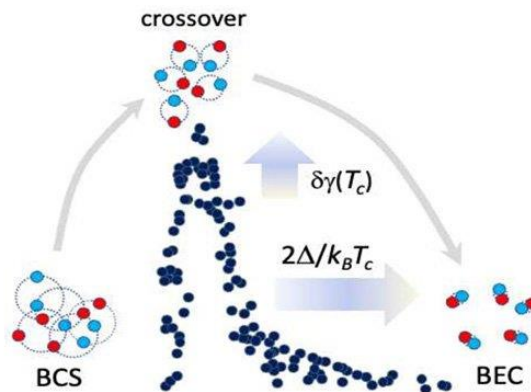
◇ 一作方雅雯：康奈尔大学高场低温实验室 Research Assistant。

装置：混合磁体

● 铜酸盐中“BCS 超导到玻色-爱因斯坦凝聚态”交叉的魔隙比

玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 是一种宏观量子态，其中所有粒子在低温下都获得相干性。在这样做的过程中，他们表现出超流性。MagLab 的科学家比较了来自七种不同超导铜酸盐的数据，发现了一个神奇的间隙比，在这个比率下，

凝聚态的稳健性最大。这表明导致费米子对在超冷温度下获得宏观相位相干性的相同基本原理也会导致在高 T_c 铜酸盐中发生相同的效应。

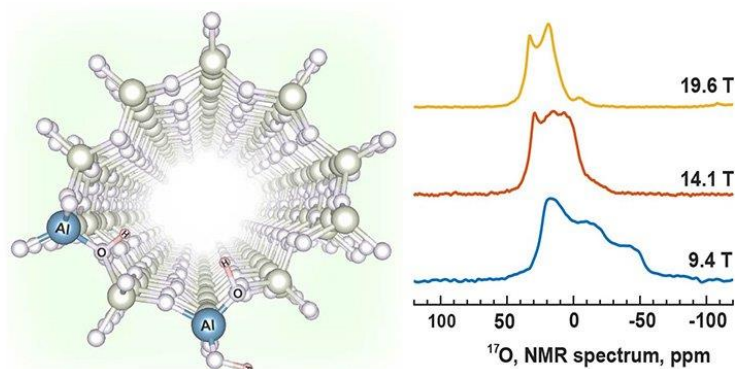


Cite: [N. Harrison, et al. Phys. Rev. Lett. 129, 017001 \(2022\)](#)

装置：脉冲磁体

● ^{17}O 标记揭示沸石催化剂中成对的活性位点

沸石催化剂广泛用于现代工业过程，例如石化精炼和生物质转化。经济、环境和工程要求对结构和性能的基本了解以推动新催化剂的开发。最近的研究表明，活性催化位点比以前认为的更复杂。一个非常重要的现象是协同效应，即两个邻近活性位点的反应性相对于相隔很远的两个位点的反应性增加。对富含 ^{17}O 同位素的各种催化剂样品进行的超高磁场 ^{17}O ssNMR 实验揭示了潜在的协同位点结构。这些信息对于合理设计、合成和制造具有更高效率和产量的催化剂至关重要。



Cite: [Kuizhi Chen et al. J. Am. Chem. Soc. 144, 16916-16929 \(2022\)](#)

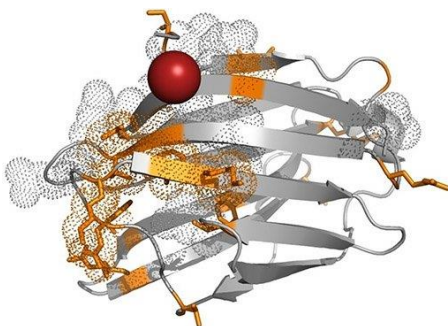
◇ 一作陈魁智：于2017年在俄克拉荷马州立大学获博士学位，后在MagLab甘哲宏组做博士后，目前已回国任大连化物所研究员，入选海外优青。本文共同通讯作者Jeffery White为其博士导师。

装置：串联混合磁体

● 对聚合物改善蛋白质治疗的原子级洞察

一个由化学家、生物化学家和结构生物学家组成的合作团队能够将聚合物附着到蛋白质上，并确定聚合物如何提高将蛋白质开发成治疗药物的潜力。聚乙二醇 (PEG) 是一种常用的聚合物，被发现可以提高蛋白质的稳定性，使其更适合作为治疗癌症和炎症性疾病的潜在疗法。

蛋白质是很有前途的疗法，但在人体内通常不稳定。此外，包括聚乙二醇化蛋白质在内的生物制剂越来越多地用作治疗剂，但关于聚合物如何影响生物制剂特性的实验数据很少。使用核磁共振，美国国家强磁场实验室提供了洞察聚合物如何提高缀合物中蛋白质热稳定性机制的能力。该数据将扩展到其它研究，为设计具有可预测化学性质的蛋白质-聚合物缀合物提供了合理依据。



Cite: [A. Pritzlaff et al. Angew. Chem. Int. Ed. 61, e202203784 \(2022\)](#)

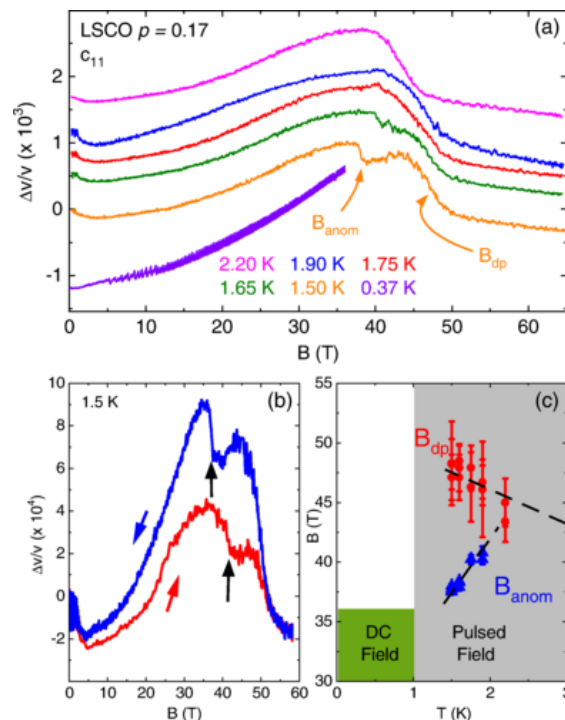
装置：NMR

2. 欧洲强磁场实验室

● 铜酸盐高温超导体中的方形-方形涡旋-晶格转变的证据

在二维 d 波超导体中，范霍夫奇点的存在会产生非常规的涡旋晶格相和涡旋跃迁。这些问题已经在理论上进行了研究，并且二十年前 Nakai 及其合作者已经预测了发生在上临界场附近的奇异涡旋晶格转变。事实上，利用 Eilenberger 的涡旋晶格理论，他们预测 d 波超导有序参数的四重对称性和范霍夫奇点产生的费米速度之间的竞争将导致方形涡旋晶格的旋转。然而二十年后他们的预测仍缺乏实验证实。

目前观察到这种转变的最佳前景材料是接近其掺杂诱导的 Lifshitz 转变的高 Tc 铜酸盐超导体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 。然而，这在实验上是一项具有挑战性的任务，因为传统上用于研究涡旋晶格的技术不适用于这种情况。观察涡旋跃迁所需的磁场远远超出了小角度中子散射的能力，而扫描隧道显微镜也不适用，因为没有高质量的表面。



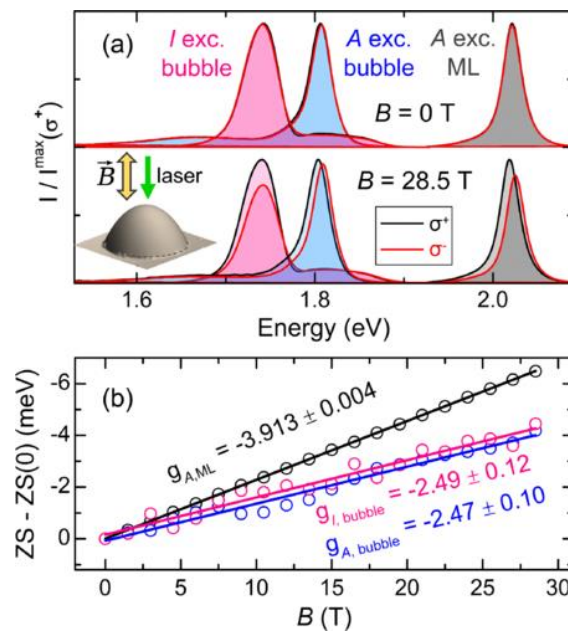
最近法国强磁场的研究人员与苏瑞士、日本合作，使用一种新方法通过高达 60T 的超声波测量来测试这一预言。超声波对涡旋晶格的弹性和钉扎都敏感。实验发现，在超过 35T 的磁场中 LSCO 涡旋晶格压缩模量的新转变处于混合态深处。这种转变仅在钉扎的涡旋固相内观察到，表明它与涡旋固相的结构转变有关。

Cite: [*D. J. Campbell, et al. Phys. Rev. Lett. 129, 067001 \(2021\)*](#)

装置：脉冲磁体

● **强磁场揭示二维晶体中的应力诱导激子杂化**

过渡金属二硫化物 (TMD) 单层 (ML) 中应力与激子磁矩之间的相互作用尚不清楚。典型的加压装置很难装入磁体狭小的孔中，最近通过 ISABEL 项目的双重访问计划，荷兰强磁场实验室和波兰的区域合作伙伴进行的一系列实验克服了这一障碍。



通过高压氢气填充的原子级微泡，WS₂ 单层受到强烈的机械形变。气泡中可以达到超过 2% 的双轴应变值，从而导致价带态的重新排序和直接到间接激子

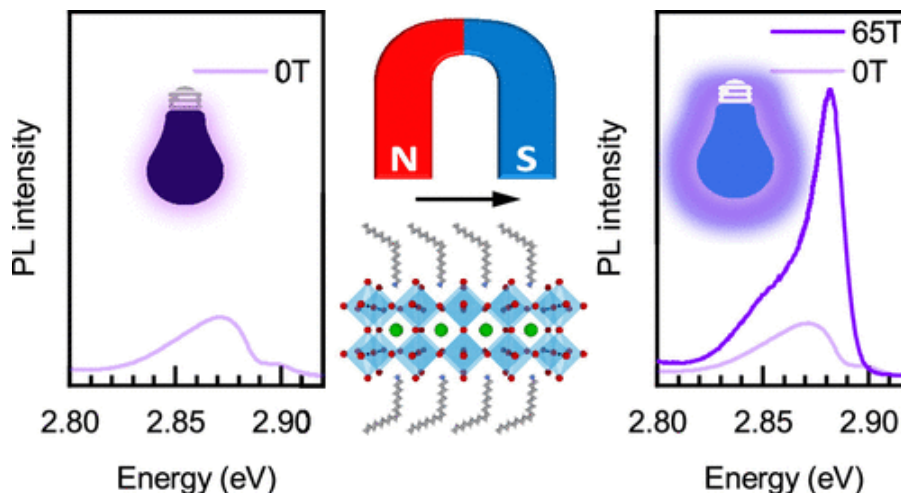
跃迁。特别是，气泡的应变在直接和间接激子能级之间产生可控的开/关共振条件，最终混合。以上现象需要使用强磁场下的显微光致发光，揭示了激子塞曼分裂对应力的不可预测的依赖性。发现激子 g 因子模量急剧减少。

Cite: E. Blundo, et al. Phys. Rev. Lett. 129, 067402 (2022)

装置：水冷磁体

● 二维金属卤化物钙钛矿中的磁性增亮暗激子

优化利用钙钛矿纳米晶体和纳米片作为高效光源需要详细了解激子流形内的能量间距。暗激子态在其中特别关键，因为它们代表降低辐射效率的通道。法国强磁场实验室首次应用面内强磁场来增亮基于 CsPbBr_3 纳米片的光学非活性态。这种方法使科学家们能够访问暗态并直接确定暗-亮分裂，对于最薄的纳米片达到 22 meV。由于激子限制减少，较厚的纳米片分裂明显较少。此外，暗态和亮态群体是非热化的，这表明激子弛豫过程中存在声子瓶颈。



Cite: Shuli Wang, et al. Nano Lett. 22, 7011-7019 (2022)

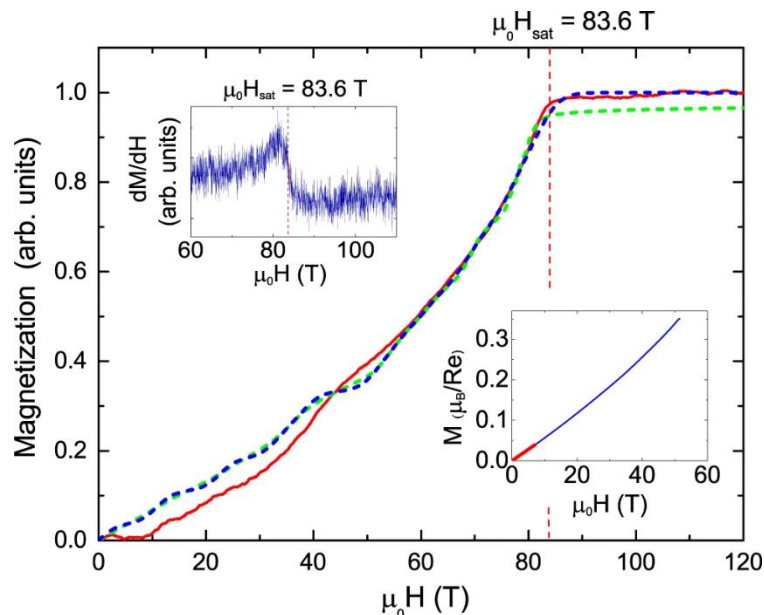
装置：脉冲磁体

3. 日本强磁场实验室

● 三角晶格反铁磁体中的降维和不相称的动力学相关性

对 $S=1/2$ 三角形反铁磁体 $\text{Ca}_3\text{ReO}_5\text{Cl}_2$ 中旋子激发的观察揭示了磁相关的准一维性质，尽管名义上是 2D 磁结构。这种现象被称为阻挫引起的维度降低。德日两国的科学家发现在高场下进行电子自旋共振光谱和磁化研究，不仅可以改进自旋哈密顿参数，还可以研究其低能自旋动力学的特性。作者认为均匀的 DM 相互作用的存在改变了动量空间中的旋子连续体，结果在 Γ 点打开了一个零场间隙并直接观察到。这种转变与有序态下的结构调制一致，表明这种材料是一个完美的模型三角晶格系统，可以实现纯 DM 相互作用螺旋基态。

以上高场磁化率在日本东大强磁场实验室完成，高场 ESR 在德国强磁场的 16T 超导磁体上完成。

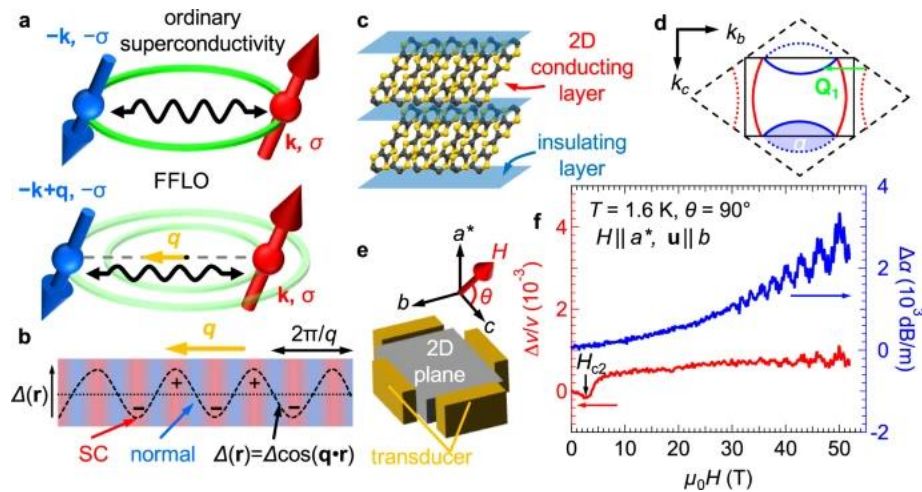


Cite: [S. A. Zvyagin, et al. Nature Comm. 13, 6310 \(2022\)](#)

装置：120T 破坏式脉冲磁体、51T 非破坏式脉冲磁体、高场 ESR

● FFLO 态的呈展各向异性

奇异超导是由非常规电子配对形成的，并表现出各种基本理论无法解释的独特性质。Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 态被称为一种奇异的超导态，因为电子对具有有限的质心动量，从而导致超导的空间调制。空间调制赋予 FFLO 态以呈展的各向异性。然而，各向异性从未通过实验得到证实。日本东大强磁场实验室的团队根据出现在泡利极限之上的各向异性声学响应说明，二维 FFLO 态具有与费米面上的嵌套向量平行的质心动量。这些发现不仅有助于理解固体中的超导性，而且有助于理解各种粒子的奇异配对。



Cite: *S. Imajo, et al. Nature Comm. 13, 5590 (2022)*

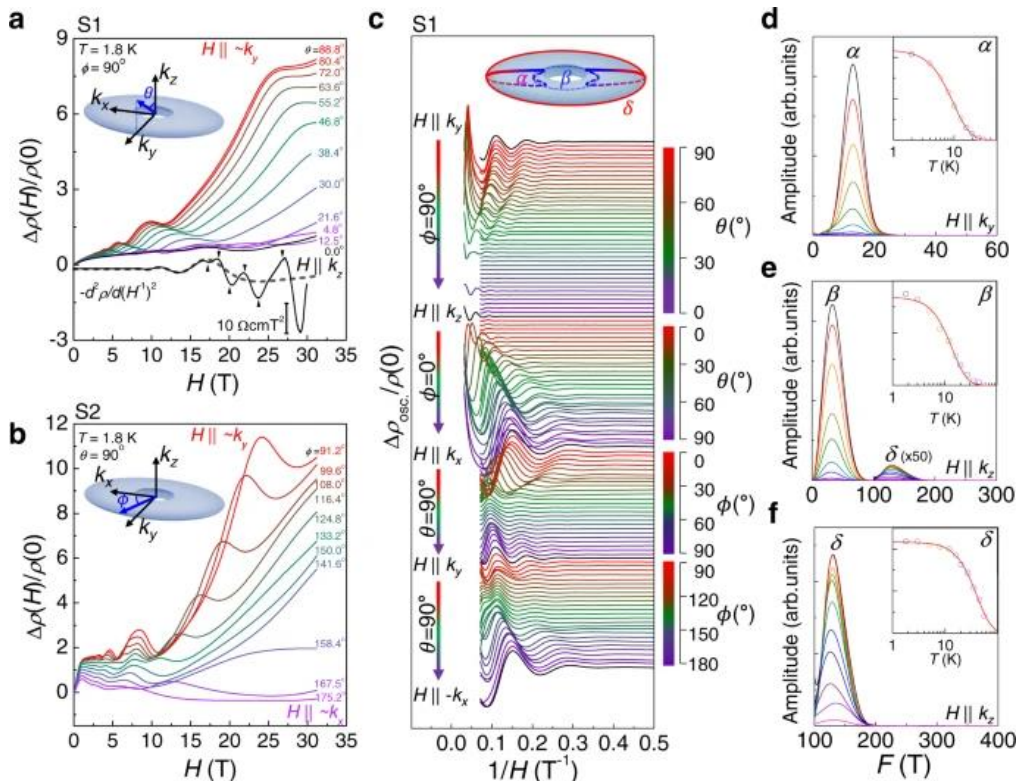
装置：脉冲磁体

● 孤立拓扑节线费米子的量子输运证据

由非平庸带拓扑决定的异常输运是将拓扑材料应用于先进电子学和自旋电子学的关键。拓扑节线半金属是一种非常有前途的体系，因为它们具有丰富的拓扑结构和奇异的物性。然而它们的输运特征经常被带交叉的复杂性或共存的拓扑平庸态所掩盖。韩国的科研团队通过实验表明，在轻空穴掺杂的 SrAs_3 中，单环节线态与平庸态很好地隔离，并完全决定输运响应。磁输运特性的量子振

荡和导致弱反定域化二维行为的量子干涉效应清楚地表明了特征性的圆环形费米面和相关的节线费米子的环绕贝里通量。这些独特的量子输运特征使得 SrAs₃ 基于其拓扑电荷和自旋输运成为新型器件的理想选择。

稳态磁场由美国国家强磁场实验室提供，脉冲磁场由日本东大强磁场实验室提供。



Cite: [H. Kim, et al. Nature Comm. 13, 7188 \(2022\)](#)

装置：水冷磁体、脉冲磁体

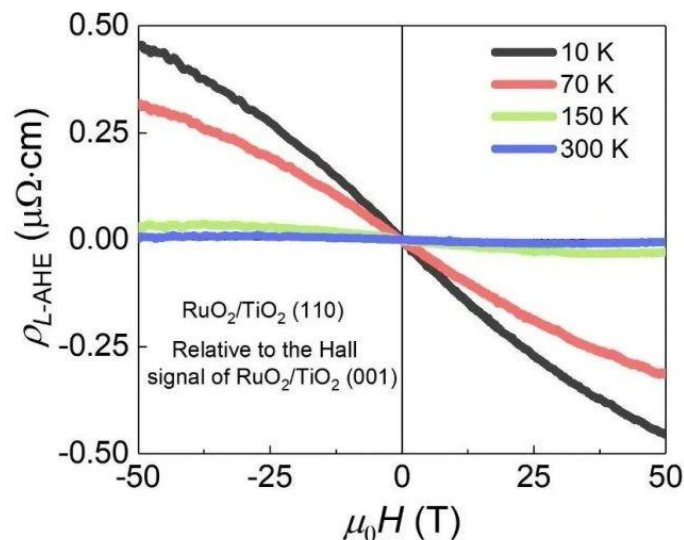
4. 武汉脉冲强磁场科学中心

- 交变磁体 RuO₂ 中的反常霍尔效应

整个 20 世纪，反常霍尔效应的研究几乎都集中在铁磁材料。近年来，非共线反铁磁材料中的反常霍尔效应也逐渐被理论和实验所发掘，这包括一些具有

复杂磁结构的非共面反铁磁以及共面但非共线的反铁磁材料体系等。然而，由于时空反演对称性的保护，磁性材料中数量最多的一类材料——共线反铁磁——长期以来被认为不会呈现出反常霍尔效应。近期理论研究表明，对于一些具有特定晶体对称性的共线反铁磁材料，非磁性原子的低对称性排布可以打破时空反演对称，从而使得共线反铁磁中反常霍尔效应的存在成为可能。这样一种由非磁性原子的低对称性排布和共线反铁磁序共同诱发的反常霍尔效应被称之为晶体霍尔效应（Crystal Hall Effect）。

北航刘知琪教授团队制备出了高电导率的金红石相 RuO_2 共线反铁磁外延单晶薄膜，通过结构、电输运、磁输运、磁性测量等表征手段，并依托脉冲强磁场设施的 50T 脉冲磁场条件，在此共线反铁磁材料中实验观测到了很大的反常霍尔电导率。这项实验工作协同前期理论研究，将反常霍尔材料体系拓展到了磁性材料中数量最为丰富的共线反铁磁中，并将其起源拓展到了非磁性原子的排布对称性上，从而有望在共线反铁磁研究中激发出更多新奇物态。

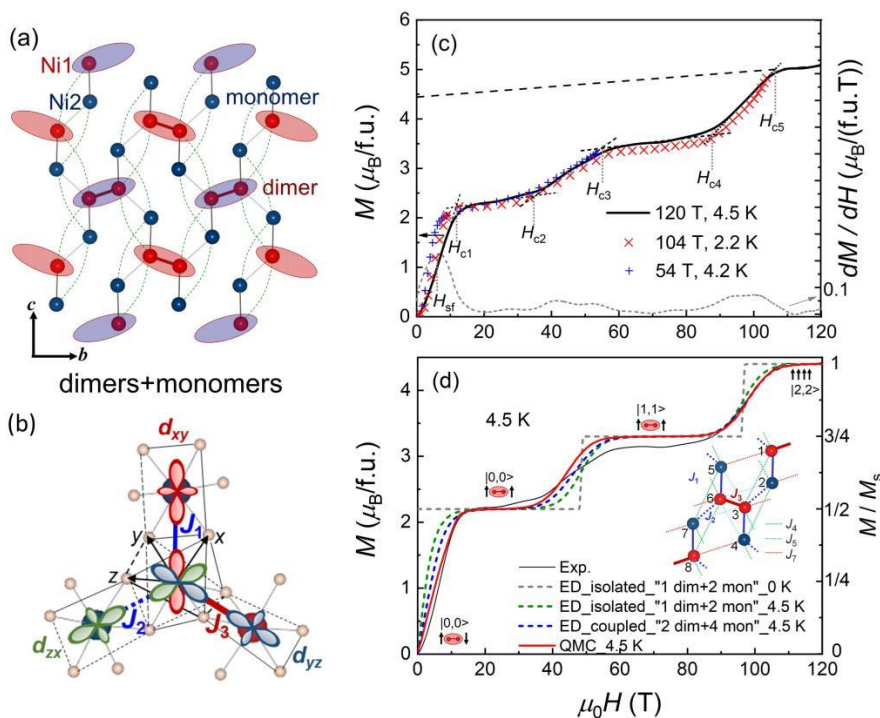


Cite: [Zexin Feng et al. Nature Electr. 5, 735-743 \(2022\)](#)

装置：脉冲磁体

● $\text{Ni}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 中的二聚化和磁化平台

维度降低和团簇化物理重燃了人们对量子磁体的兴趣。 $\text{Ni}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 在结构上是一个交替的斜交链，但磁学上该体系既呈现出经典的三维反铁磁有序，也表现出量子效应——宽的 $1/2$ 磁化平台。有关 $1/2$ 平台的起源一直没有得到合理的解释。



欧阳钟文课题组利用 120T (破坏性) 的超高磁场，研究了 $\text{Ni}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 的磁化过程，除了之前发现的 $1/2$ 磁化平台之外，还观察到一个新的、磁场范围更宽的 $3/4$ 磁化平台。新平台的出现及其解释带来了新的挑战。首先，我们进行了系统的密度泛函理论计算，考虑了七个独立的交换相互作用。计算结果表明，链间最近邻交换相互作用远大于链内最近邻和其他次近邻相互作用。通过 Ni-d 态的分轨道态密度，我们阐述了链间二聚化是由 Ni-d 轨道在特定方向上的重叠引起的。基于密度泛函理论计算得到的结果，我们提出了“二聚体+单体”模型，用精确对角化和量子蒙特卡洛方法模拟了高场磁化过程，结果与实验数据吻合。因此， $1/2$ 平台起源于弱耦合的 Ni_2 单体，而 $3/4$ 平台起源于强耦合的

Ni¹⁺ 二聚体。我们进一步提出了可能的超固态的存在。自旋链中的强二聚体化现象比较少见，这方面的实验发现有望引起相关理论研究。

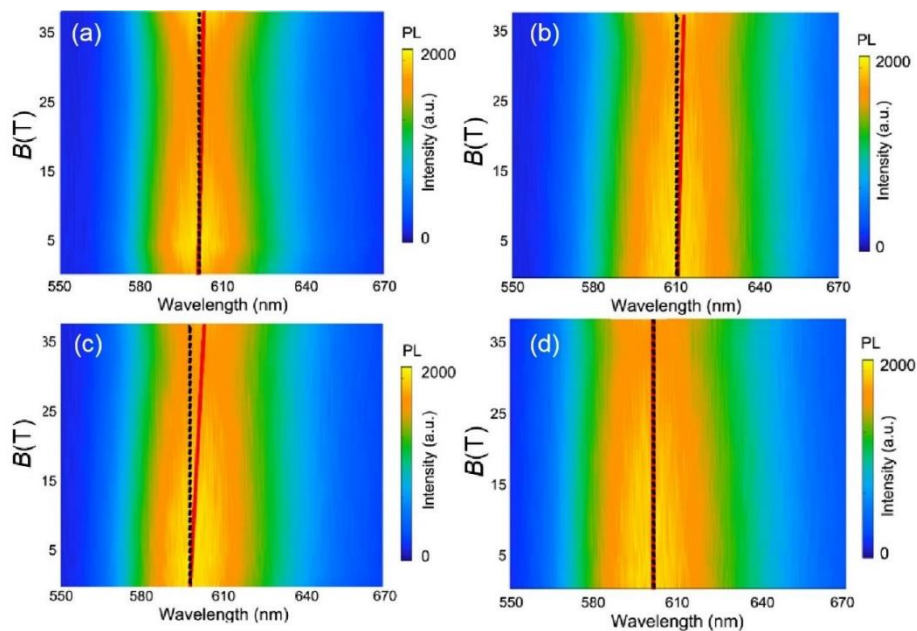
120T 脉冲磁场实验在日本东大强磁场实验室进行。

Cite: J. J. Cao et al. Phys. Rev. B 106, 184409 (2022)

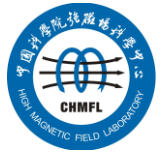
装置：脉冲磁体

● 层状磁性钙钛矿独特磁光效应的新视角探索

荧光材料在 LED 照明、生物医学等领域具有广泛的应用，当有外界磁能刺激时，可表现出一些有趣的现象，如塞曼效应、法拉第效应、磁光克尔效应等，但基本都集中在纯无机材料中。分子基材料也可表现磁光性质，大部分集中在有机自由基中，而且已报道的例子很少。文献显示，施加磁场刺激只能改变这些材料的发光强度，并未观察到其它有趣的发光现象。



南大宋友课题组研究了 $(C_6H_5C_2H_3FNH_3)_2MnCl_4$ 单晶在 40T 强磁场下的磁光耦合效应。结果表明，在温度高于二维层 $[MnCl_4]_2^-$ 反铁磁有序温度(76K)的时候，外加磁场刺激只改变材料的发光强度，但是在低于 76 K 的时候可以很明



显地观察到材料的发光光谱发生了红移，同时很低场时就能产生磁致光滞，属低能耗磁光器件候选材料。该项工作揭示了强磁场对于探索新的磁光效应具有重要的科学价值。

Cite: Zhao-Bo Hu et al. Aggregate (2022)

装置：脉冲磁体

5. 中科院强磁场科学中心

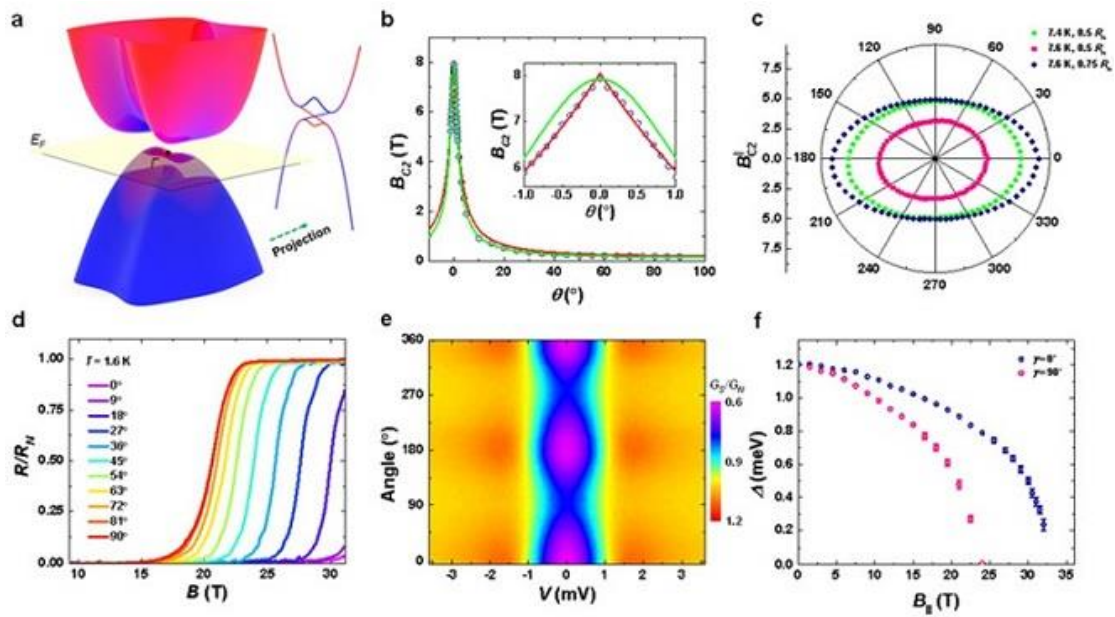
● 低功耗量子材料研究团队在关联电子体系演生现象研究中取得新进展

近年来，二维层状单晶超导体成为国际上备受关注的研究重点。相较于传统非晶态和多晶态超导薄膜，二维层状单晶超导体由于其极高的单晶质量而能将超导态保持到纳米级的原胞层厚度，为人们理解和探测样品的本征二维超导的新奇特性提供了很好的研究平台。二维层状单晶超导体中一个很重要的研究方向就是研究其超导在面内强临界场下的行为，寻找其中可以对抗较大外界磁场的超导体。这一类研究无论对于基础物理学研究，还是对超导的应用研究都具有重要意义。

自旋-轨道-宇称耦合的超导最早由香港科技大学罗锦团教授理论预言提出。指的是具有拓扑能带翻转的二维中心对称超导体中，在具有相反奇偶性宇称的拓扑能带翻转区域附近，会打开一个拓扑能隙。在这种情况下，仅包含自旋和动量的传统自旋轨道耦合（SOC）项由于体系具有空间反演对称性而被禁止，但是空间反演对称性却允许体系的自旋、动量和电子态的宇称在拓扑能带翻转区域附近耦合在一起，称为自旋-轨道-宇称耦合，这种自旋-轨道-宇称耦合会

使得体系在拓扑能带翻转区域附近产生新奇的超导态，称为自旋-轨道-宇称耦合超导，该超导具有巨大的（超过泡利极限）并且各向异性的面内上临界磁场。

为了寻找自旋-轨道-宇称耦合超导，修发贤课题组与合作者研究了新型层状单晶超导体 2M-WS₂，这种新兴的层状单晶超导体由于其能带中具有拓扑能带翻转特性，是探测自旋-轨道-宇称耦合超导理想的实验平台。用机械剥离的方法，修发贤课题组制备了 2M-WS₂ 薄层电输运器件。通过测量发现，4nm 左右厚度的 2M-WS₂ 拥有约 7.6K 的超导临界温度，并且超导处于 clean limit。磁输运也证明，与块材中不同的是，薄层 2M-WS₂ 中的超导具有二维超导的属性。如器件的 I-V 关系曲线呈现幂次现象，器件的小角度范围内的面外向面内转角的上临界磁场遵循二维 Tinkham 公式等。



基于薄层 2M-WS₂ 中的二维超导，课题组利用 WM5 的输运测量系统研究了薄层 2M-WS₂ 在低温强磁场下，面内上临界磁场的行为和超导能隙的演化。研究发现在超导转变温度以下，薄层 2M-WS₂ 的面内上临界磁场大大超出了泡利极限，且呈现出很强的二重简并各向异性。与之相一致，微分电导测量表明其超导能隙可以存在于远大于泡利极限的面内磁场下，也具有很强二重简并各



向异性。理论合作者的平均场理论计算也表明：薄层 2M-WS₂ 由于具有拓扑能带翻转特性而产生不对称的自旋-轨道-宇称耦合，这种耦合能有效地钉扎住拓扑能带交叉附近的自旋态并且能够各向异性地重整化外界 Zeeman 场的影响，从而导致了在上述实验中观测到的超导在面内强磁场下的新奇现象。上述研究也表明，薄层 2M-WS₂ 中的超导机制即为自旋-轨道-宇称耦合超导。

该项研究成果首次在实验上发现了自旋-轨道-宇称耦合超导。揭示出在具有拓扑能带翻转特性的二维中心对称超导体中，由于自旋-轨道-宇称耦合的影响，上临界磁场不但可以大大超过泡利极限，并且具有很强的面内各向异性。对于深入理解具有拓扑能带翻转特性的二维中心对称超导体中的奇异超导行为具有重要意义。同时，新型层状单晶超导体 2M-WS₂ 在研究中所展现出的独特的物理属性也表明其在探究高阶拓扑超导和新器件方面具有较好的研究价值。

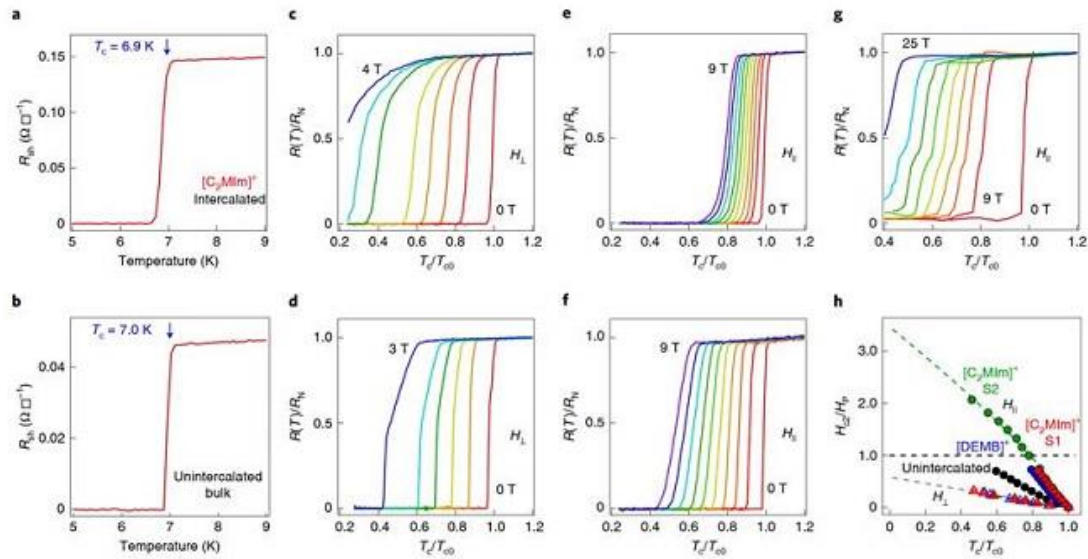
Cite: [Enze Zhang et al. Nature Phys. \(2022\)](#)

装置：水冷磁体

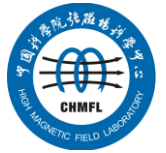
● 离子液体插层调控二硒化铌超导电性

层状材料维度的调控具有重要的意义，通过降低材料的厚度实现从三维体材料到二维薄膜材料的转变，可以获得本征体材料所不具备的新奇物理性质。例如，单层 NbSe₂ 薄膜由于破坏了面内中心反演对称性，使得形成超导库伯对的配对电子自旋锁定在垂直平面方向，从而形成具有显著增强且高于传统泡利极限的面内抗磁性的伊辛超导。然而，这些新奇物性的出现，往往是以牺牲其它重要物理特性为代价。例如，单层 NbSe₂ 等金属性二维薄膜在空气中往往不

稳定，并且单层 NbSe₂ 与单晶体材料相比超导转变温度更低（从 7.0 K 下降到低于 3.7 K）。因此，寻找材料维度调控的新方法是一个重要的科学问题。



清华周树云通过在单晶 NbSe₂ 体材料插入大尺寸的离子液体阳离子，对 NbSe₂ 的维度和超导电性进行了有效调控，获得优于单晶体材料和单层样品的超导电性。结合角分辨光电子能谱测量和输运测量，他们对 NbSe₂ 与有机阳离子形成的复合材料开展研究并揭示了离子插层对其电子结构及超导电性的影响。插层 NbSe₂ 与单晶 NbSe₂ 具有相似的超导转变温度，然而插层后样品的面内抗磁性比单晶 NbSe₂ 显著增强。基于 SHMFF 所属水冷磁体 WM5 开展的强磁场输运测量结果表明，插层 NbSe₂ 的面内上临界磁场高于 25 T，呈现出类似单层 NbSe₂ 的伊辛超导。在电子结构方面，角分辨光电子能谱实验结果显示该复合材料具有与单层样品类似的能带结构，表明阳离子的嵌入有效地调控了材料的维度，使其实现从三维到二维电子结构的转变。此外，费米能处空穴口袋尺寸的变化表明嵌入的阳离子有效地调控了材料的载流子浓度。插层 NbSe₂ 不仅比单晶插层 NbSe₂ 具有更高的面内上临界磁场，还具有优于单层 NbSe₂ 的性质，体现在其超导转变温度显著高于单层 NbSe₂ 样品，并且该复合材料的晶格结构



和超导电性在空气中十分稳定。这种离子液体阳离子插层的方法对薄层 NbSe₂ 同样有效，并且可以推广到大量二维层状材料。该研究工作表明，离子液体阳离子插层是调控样品的维度和载流子浓度的有效手段，可获得优于单晶体材料和单层薄膜的新物性。

Cite: [Haoxiong Zhang et al. Nature Phys. 18, 1425-1430 \(2022\)](#)

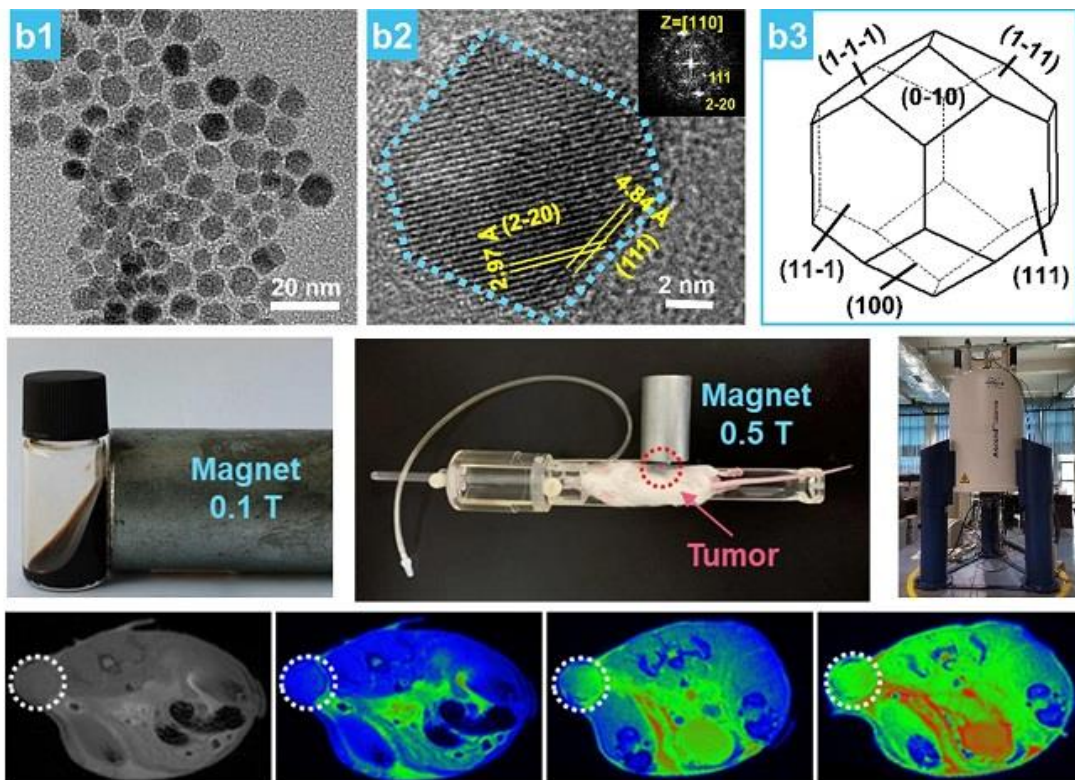
装置：水冷磁体

● 基于近红外触发纳米酶介导的肿瘤催化治疗

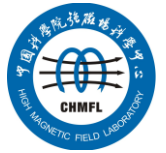
地球上许多动物能利用地磁场导航，如鸽子、海龟、蜥蜴等都发展出独特的磁导航机制长途迁徙。同样，原核生物中的趋磁细菌（Magnetotactic bacteria）也能够响应地磁场定向游弋。趋磁细菌具有鞭毛和独特的细胞内结构—磁小体（magnetosome）：由膜包被的纳米尺寸的磁铁矿颗粒构成的磁小体链状排布，作为细菌的“生物罗盘”。结合鞭毛的动力系统，趋磁细菌可以在地磁场或人工磁场中沿磁场方向定向移动。趋磁细菌从周围环境中获取铁元素，在严格的生物矿化机制调控下合成四氧化三铁纳米颗粒，并组装成功能化的磁小体，可以快速地响应外部磁场。磁小体粒径分布约在 40-50nm，具有高度均一性。相比目前工业生产的磁性纳米材料，磁小体在磁性能、生物兼容性、稳定性和磁热效等指标具有明显优势。因此，磁小体作为磁靶向的磁性纳米颗粒，具有广泛的应用前景。然而，天然磁小体颗粒之间的强磁相互作用导致从趋磁细菌中直接分离提取的磁小体在体外环境中十分容易聚集沉淀，从而阻碍了它们穿透病变组织的能力，并且在血管中的沉积也存在潜在的危险和生

物毒性。因此，合成尺寸小但保留了天然磁小体软铁磁特点的一类磁小体纳米材料，不仅是对仿生合成技术的挑战，在生物医学应用上也有着巨大价值。

前期研究表明，趋磁细菌基因编码的一个特殊蛋白 Mms6，在调控磁小体晶体形貌中起到至关重要的作用。成熟的 Mms6 蛋白在 N 端有一个疏水区域，预测为膜结合区；C 端有一个高酸性的结构域，推测是其与铁离子结合的区域，参与磁小体晶体的形成。



在本研究工作中，基于课题组前期对磁小体生物矿化机制的系统性研究，提出了类磁小体仿生合成的新策略：考虑到趋磁细菌生物矿化所需的两个关键因素：磁小体膜与磁小体调控蛋白，研究人员通过在反相胶束体系中引入 Mms6 蛋白，构建了一个类似天然磁小体囊泡的纳米反应器，在体外重构了趋磁细菌磁小体生物矿化的微环境。通过这一方法，仿生矿化合成的类磁小体晶体成具有与天然磁小体一致的立方八面体的晶型以及类似的磁学性质及高饱和



磁化强度，可以快速响应外部磁场，同时，仿生合成的类磁小体还具有优异的单分散性、均一的小尺寸和良好的亲水溶性。体内 MRI 实验与组织分布实验结果表明，与其他磁性纳米药物相比，仿生合成的类磁小体在肿瘤组织中的靶向性与穿透性提高了一个数量级。综上所述，这项工作不仅为纳米药物磁靶向递送提供一个高效的载体，也为体外研究趋磁细菌生物矿化机制提供了新的模式系统。

Cite: [Kun Ma et al. PNAS 119, e2211228119 \(2022\)](#)

装置：NMR