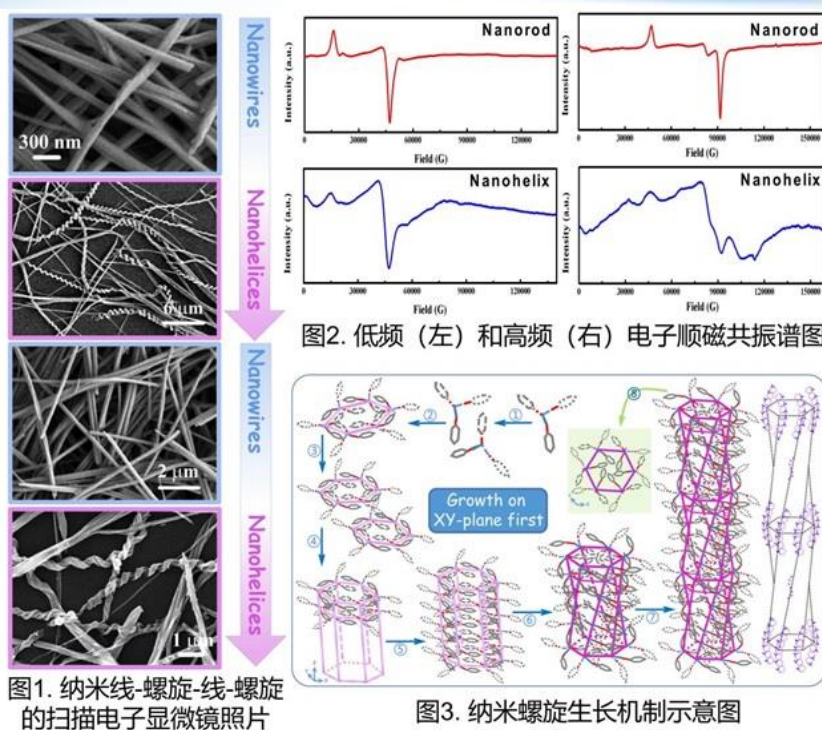


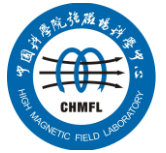
国内外强磁场实验室 科研动态

2023 年第三季度



中国科学院强磁场科学中心

2023/10/16



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

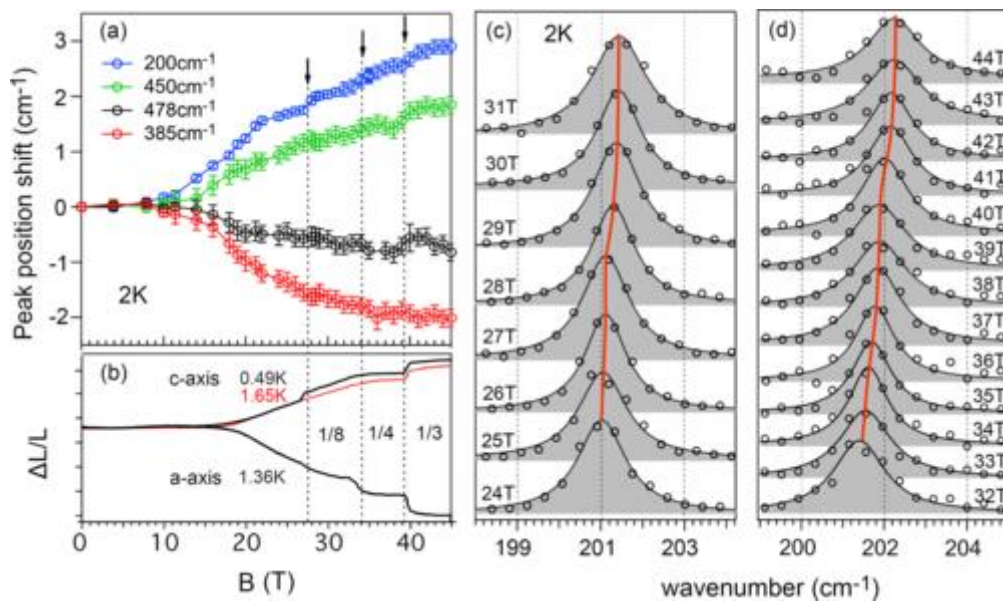
中国科学院强磁场科学中心位于合肥科学岛，其建设的稳态强磁场实验装置是世界上仅有的两个稳态磁场超过 40T 的装置之一。稳态强磁场实验装置有 3 台水冷磁体创造世界纪录，混合磁体最高磁场达到 45.22T，是目前全球范围内可支持科学研究的最高稳态磁场。磁体技术和综合性能处于国际领先地位。

科 研 动 态

1. 美国国家强磁场实验室

● 自旋二聚体化合物 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ 中的磁弹性相互作用

了解微观层面上磁相互作用的性质和起源对于实现未来应用材料的可控特性极其重要。新型量子材料中的磁相互作用涉及电子自旋和晶格之间的相关性。拉曼研究可以揭示自旋和晶格之间的磁弹性耦合，这一点至关重要。对利用温度、压力、电场和磁场等外部因素来稳定量子现象的透彻理解将有助于未来新技术和应用的发展。



MagLab 对自旋二聚体化合物 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ 进行了 45T 下的磁拉曼散射实验，实现了首次动力学测量，并提供了磁相互作用和原子结构之间的直接相关性，识别了控制磁相互作用的特定声子振动。磁拉曼散射实验和第一性原理计算显示了四种声子模式，它们表现出强的磁场响应。观察到的拉曼模式异常提供了磁相互作用和 Cu-O-Cu 角之间的直接相关性，并确定了哪些特定声子促

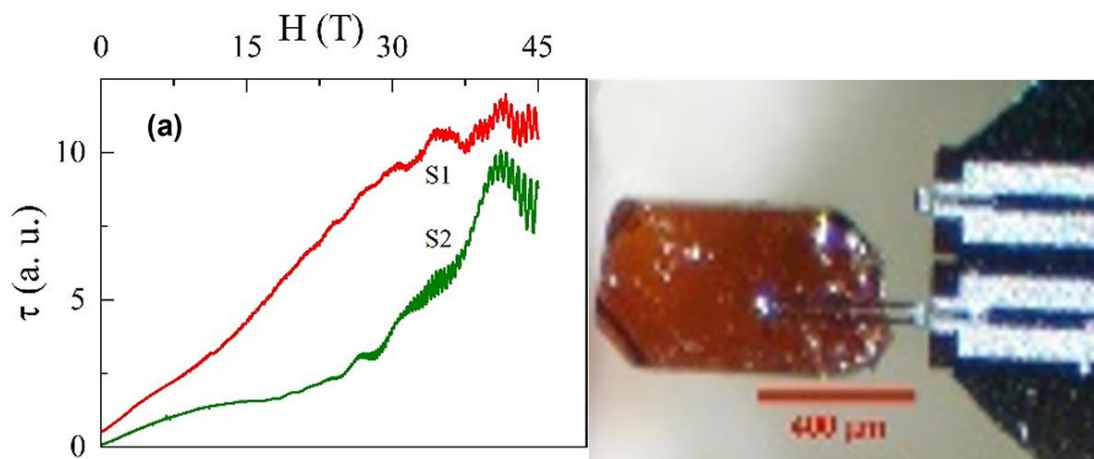
进了 Cu 离子之间的这种相互作用。

Cite: K. Thirunavukkuarasu et al. Phys. Rev. B 107, 064410 (2023)

装置：混合磁体，拉曼

● Kagome 超导体中的非平庸拓扑

通过施加 45T 的极高直流磁场，在 KV_3Sb_5 磁化强度中观察到许多以前未观察到的量子振荡频率。此外，研究人员可以跟踪大多数频率的角度变化，以明确费米面贝里相位计算的准二维性质。通过构建朗道能级扇图，确认了 KV_3Sb_5 中的非平庸能带拓扑。此外，计算表明，由于 KV_3Sb_5 中的电荷密度波排序，费米面发生了严重的重构，理论计算的频率值与实验结果一致。



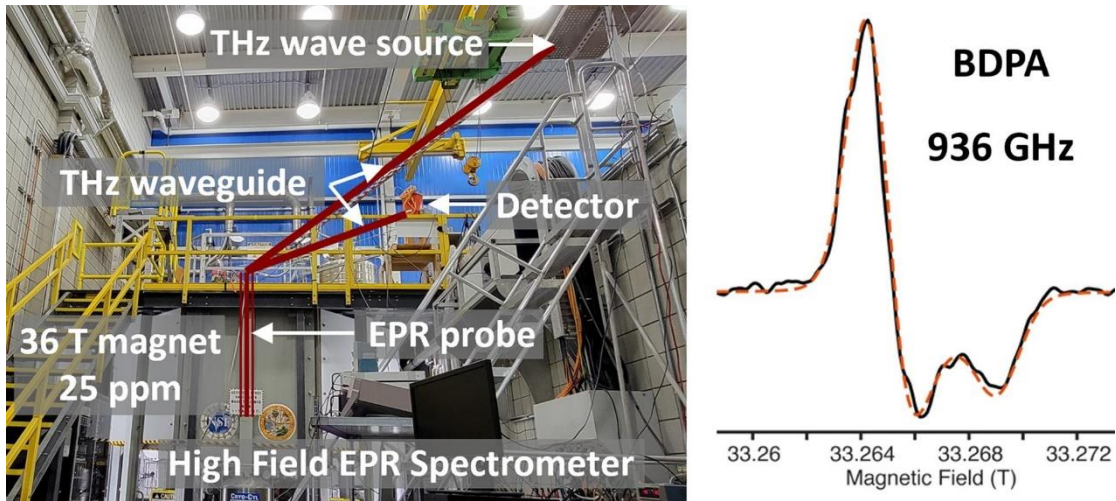
Cite: K. Shrestha et al. Phys. Rev. B 107, 155128 (2023)

装置：混合磁体

● 高均匀性 36T 串联混合磁体中的太赫兹 EPR 谱

MagLab 科学家开发了新仪器，用于在 MagLab 的 36T 串联混合 (SCH) 磁体中开展电子顺磁共振 (EPR) 实验。与用户合作对两种含有稀土元素钆的化合物进行了测量，揭示了最高磁场下极高分辨率的 EPR 光谱。

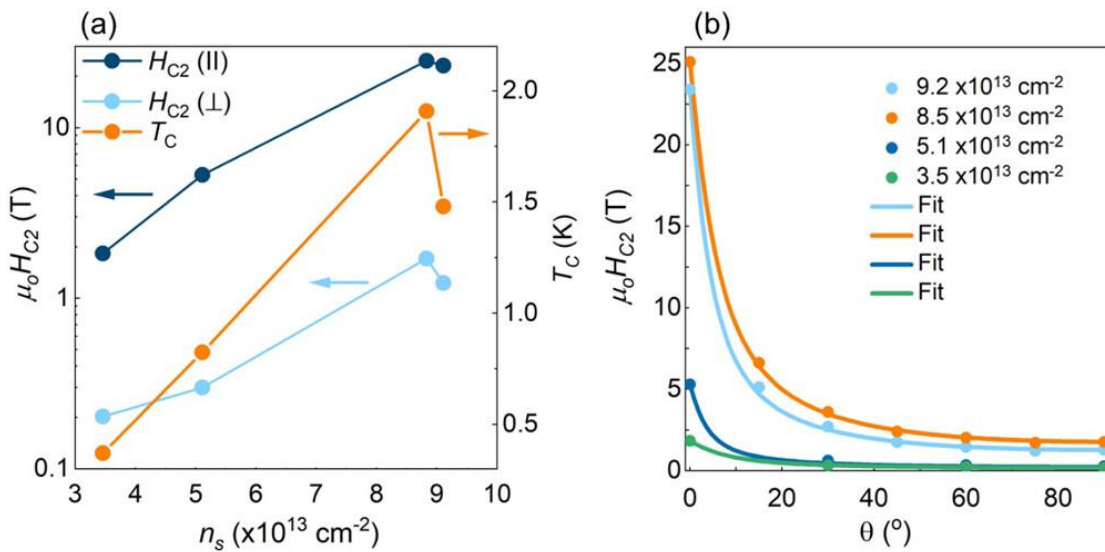
正在研究的钐化合物作为磁性标签，可以附着在蛋白质等大型生物分子上，因此可以使用 EPR 测量来研究它们的结构和功能，提供长度和频率尺度的详细信息。本研究中获得的高分辨率光谱证明了钐标签在极高磁场下的生物分子 EPR 研究中的潜在用途。



Cite: *T. Dubroca et al. J. Magn. Reson. 353, 107480 (2023)*

装置：串联混合磁体

● 新超导体的鲁棒性



超导性的本质及其与 KTaO_3 (111) 界面处强自旋轨道耦合的相互作用仍然

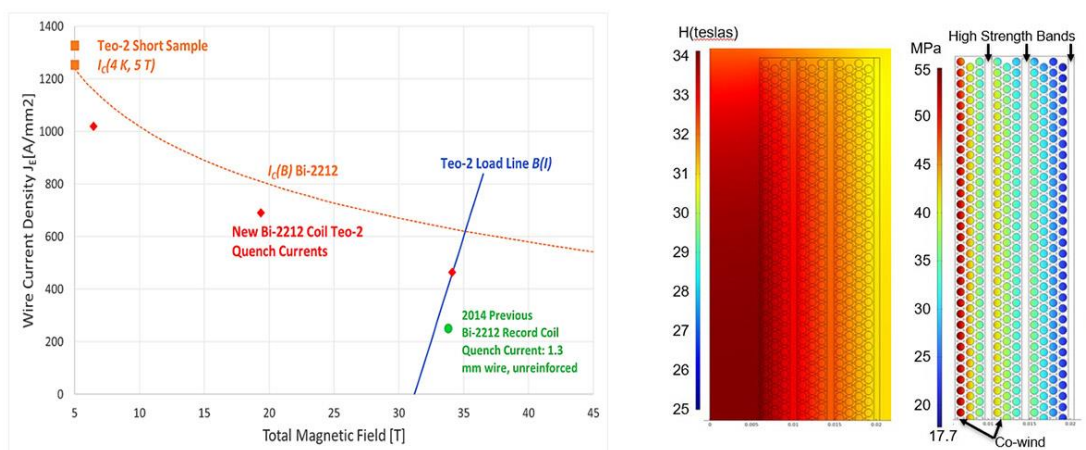
是一个争论的话题。为了解决这个问题，MagLab 用户生长了外延 $\text{LaMnO}_3/\text{KTaO}_3$ (111) 异质结构。通过全球唯一的 32T 全超导磁体的测量发现，超导对于面内磁场具有鲁棒性，在最佳掺杂异质结构中超导的临界场达到 ~ 25 T。超导有序参数对载流子密度高度敏感。研究者认为，自旋轨道耦合驱动了磁矩消失的反常准粒子的形成，从而提供了对超出泡利顺磁极限的磁场的显著的凝聚免疫。

Cite: Athby H. Al-Tawhid, et al. Nano Lett. 23, 6944–6950 (2023)

装置：32T 全超导磁体

● 34T 磁场 Bi-2212 高温超导测试线圈

紧凑型超高场 ($> 25\text{T}$) 磁体将产生 200MPa 至 500MPa 的应力，远远超过任何未增强超导体的强度。快速变化的电流斜率将使未来 25T 级高温超导研究磁体能够进行快速样品测试，并且是未来更高磁场加速器磁体和紧凑型聚变欧姆加热磁体所需要的。



一组 Bi-2212 超导测试线圈在 $464\text{A}/\text{mm}^2$ 的线电流密度 (J_E) 下产生 34T 的峰值磁场，支持高达 270MPa 的峰值环向应力，远远超过裸线的断裂应力。

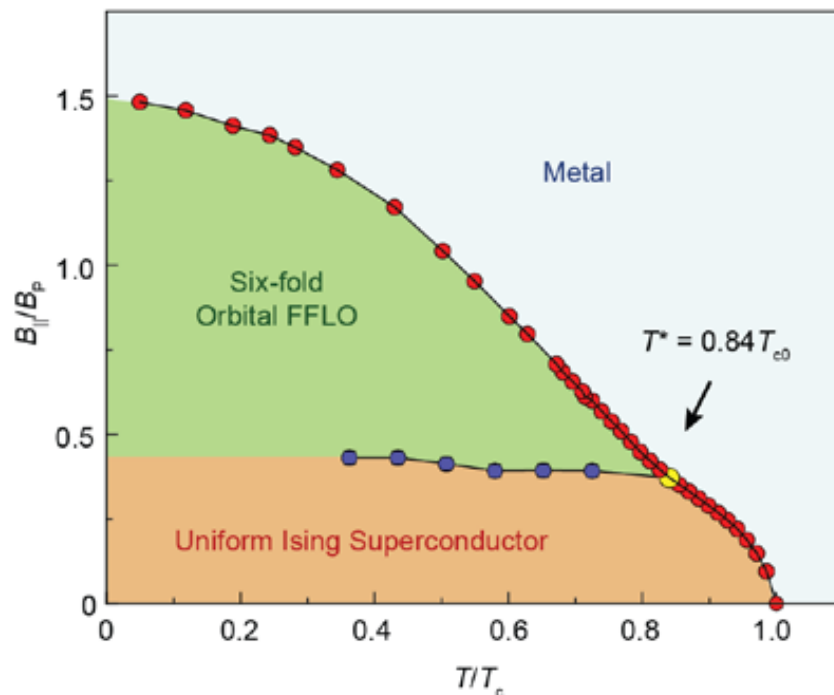
线圈以高达 3200A/s 的速率升场，高升场速率后性能没有下降。

Cite: [专利 Appl.No. 16390512 \(2019\)](#)

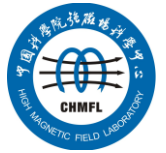
2. 欧洲强磁场实验室

● 依辛超导体中的轨道高场 FFLO 态

在具有强自旋轨道耦合的伊辛超导体中，塞曼效应被抑制，面内上临界场 B_{c2} 原则上将由轨道效应决定。HFML 用户的研究提供了伊辛超导体中轨道驱动的 FFLO 态的第一个清晰指纹。传统超导体中的 FFLO 态需要低温和非常强的磁场，这使得它很难产生。然而，在伊辛超导体中，该态是在较弱的磁场和较高的温度下达到的。尽管如此，HFML 的高磁场对于研究人员建立这一新现象的完整相图仍然很重要。



★作者信息：通讯作者叶剑挺 2000 年浙大物理系本科毕业，于港科大攻读博士



学位，接着分别在香港、日本做博士后，留日工作至 2013 年，后就职于荷兰格罗宁根大学 Zernike 先进材料研究所。其研究方向为二维材料和界面物理。第一作者万普华北航材料学院硕士，格罗宁根大学博士，目前为叶剑挺的博士后。来自哈工大的袁凡奇参与了理论研究。

Cite: [Puhua Wan, et al. Nature 619, 46–51 \(2023\)](#)

装置：水冷磁体

● 能够检测低剂量率 X 射线的层状 BiOI 单晶

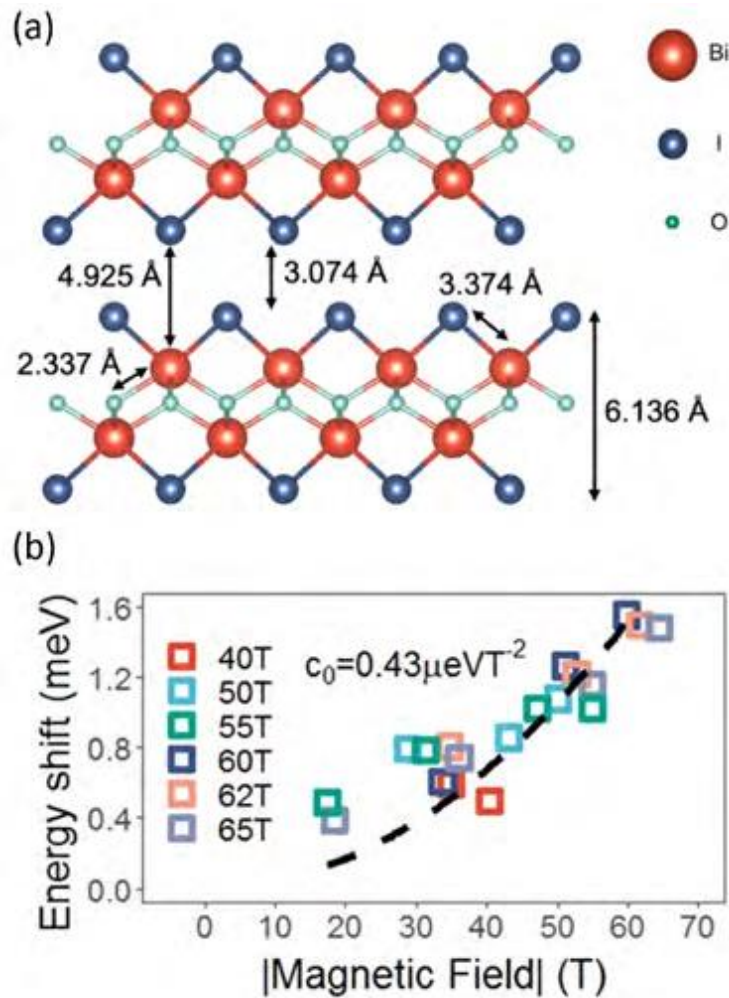
X 射线成像的现代进步极大地提高了医疗护理质量。检测低剂量 X 射线的的能力对于安全放射工具的开发至关重要，但现有的吸收材料有其局限性。减少 X 射线剂量不仅可以最大限度地减少对患者的伤害，还可以实现 X 射线视频技术等创新应用。

X 射线吸收的理想材料应该具有高的有效原子质量 (Z) 和质量密度、长的载流子漂移长度以及低且稳定的暗电流密度。最近，金属卤化物钙钛矿在 X 射线检测方面表现出了有前景的特性。然而，卤化铅钙钛矿会受到离子迁移的影响，并且含有有毒的铅。另一方面，由于激子自捕获效应，铋基双钙钛矿的载流子漂移长度较低。

法国脉冲场用户展示了碘氧化铋 (BiOI) 在 X 射线检测方面的巨大潜力。碘氧化铋是二维层状晶体，其 [I-Bi-O-Bi-I] 层通过范德华力连接。这种材料具有较高的有效 Z 数和密度，从而产生强烈的 X 射线衰减。广泛的光谱和磁光测量以及第一原理计算阐明为什么这种材料还表现出显著的漂移长度，这对于 X 射线探测器至关重要。当光激发的电荷载流子使晶格结构变形时，它们形成离域

的大极化子，而不是其他卤化物中常见的自捕获激子或小极化子。

为了研究激子的径向膨胀，研究人员在高达 65 T 的强磁场下进行了运输实验。通过分析吸收边的位移作为磁场的函数，他们确定了抗磁位移的系数并推导了 1-s 激子的径向膨胀，给出了 $0.43 \mu\text{eV T}^{-2}$ 的抗磁位移系数，从而得到了 1-s 激子的半径为 15.3 \AA 。这些值与其他层状材料（如 WS_2 ）的值相当，并且支持二维万尼尔激子性质，其跨越平面内的多个晶胞。本研究中讨论的光物理原理为 X 射线探测器的含重元素材料和低维电子结构提供了新颖的设计机会。



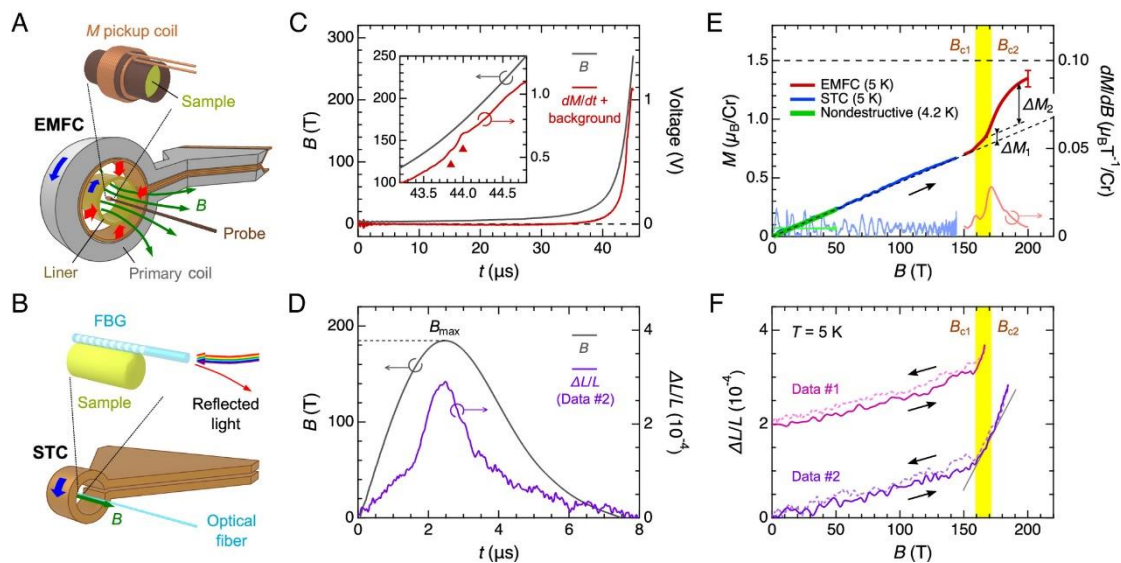
Cite: [Robert A. Jagt, et al. Nature Comm. 14, 2452 \(2023\)](#)

装置：脉冲磁体

3. 日本强磁场实验室

● 呼吸烧绿石反铁磁体中超高磁场感应的磁性超结构相

在几何受限磁体中寻找奇异的磁态，例如量子自旋液体和磁性超结构，一直是近 30 年来的中心研究课题。理论上，自旋和晶格自由度的相互耦合已被提出，可以在各种自旋模型中诱导丰富的磁相。东京大学通过在高达 600 T 的超高磁场中最先进的磁化和磁致伸缩测量，观察到呼吸烧绿石反铁磁体的非常规多步磁结构转变，表明出现了具有共线 3 上 1 下和倾斜反铁磁态周期性阵列的磁性超结构相。这一发现可归因于自旋晶格耦合和呼吸各向异性之间的相互作用。



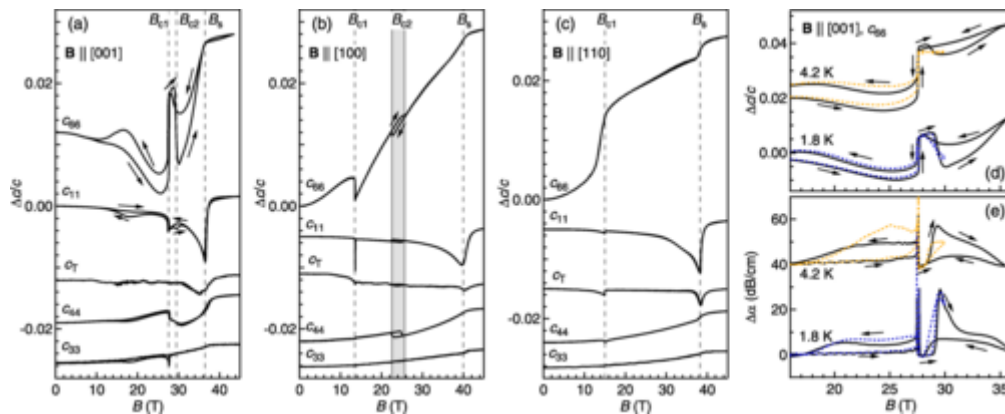
Cite: [Masaki Gen, et al. PNAS 120, e2302756120 \(2023\)](#)

装置：脉冲磁体

● 手性晶格反铁磁体 $\text{Sr}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ 的高场相图

日本的研究人员通过超声、介电和磁热效应测量研究了手性晶格反铁磁体 $\text{Sr}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ 的高场相图。这些实验技术揭示了高场下的两种新的相变，

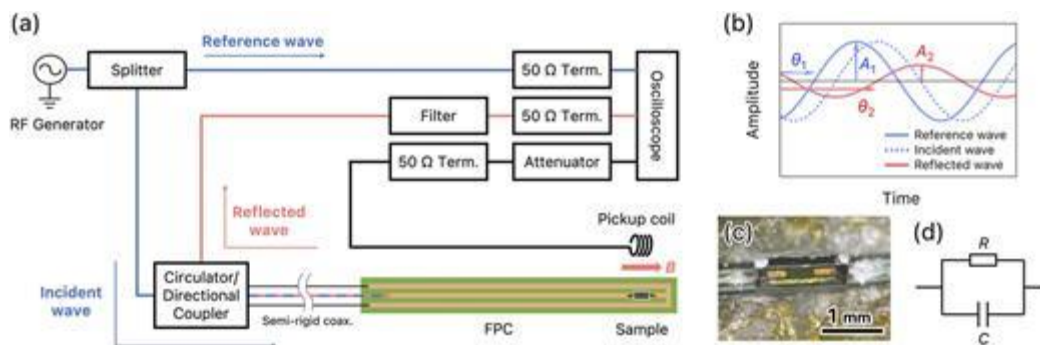
以前的磁化实验尚未解决这些问题。具体来说， c_{66} 声学模显示出沿 c 轴施加的磁场随磁滞的剧烈变化，表明存在强磁弹性耦合。结合簇平均场理论，研究人员讨论了这些相变的起源。通过考虑手性晶体结构所固有的 Cu_4O_{12} 单元的手性扭曲效应，可以合理地再现相图。实验与理论之间的一致性表明，这种材料是一种独特的准二维自旋系统，具有竞争交换相互作用和手性，从而产生丰富的相图。



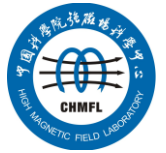
Cite: [Toshihiro Nomura, et al. Phys. Rev. B 108, 054434 \(2023\)](#)

装置：脉冲磁体

● 破坏性脉冲磁场下的射频电阻测量



东京大学开发了一种使用射频反射的电阻测量方法，以研究 100 T 以上破坏性脉冲磁场下的电输运特性。由自制柔性印刷电路组成的样品台降低了脉冲磁场感应电压引起的噪声，提高了反射波测量的准确性。根据获得的反射率数



据，通过用导纳图分析相位成功地确定了磁阻的绝对值。这些发展使得脉冲磁场中的电阻测量更加准确和全面。

Cite: T. Shitaokoshi, et al. Rev. Sci. Instrum. 94, 094706 (2023)

装置：脉冲磁体

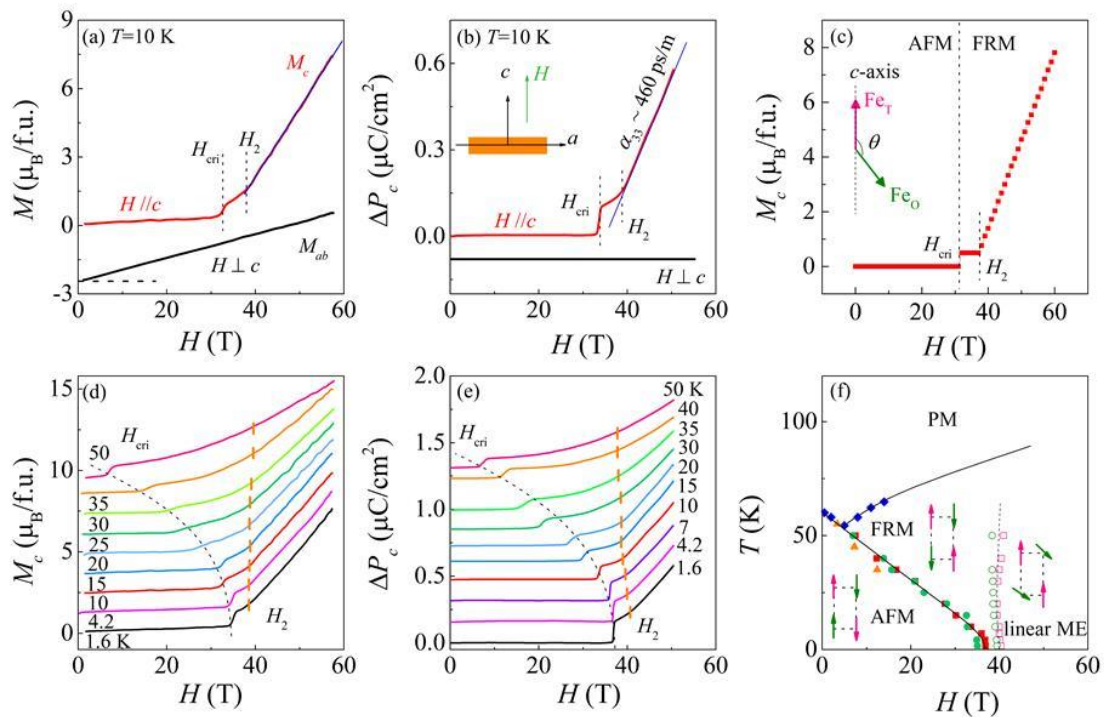
4. 武汉脉冲强磁场科学中心

● 陆成亮教授课题组在线性磁电效应研究上取得重要进展

线性磁电效应是指磁场 (H) 与电极化 (P) 或电场 (E) 与磁化强度 (M) 呈线性关联的一类标准磁电效应。线性磁电效应因其空间反演对称性破缺和时间反演对称性破缺的相互作用，使其涌现一系列的物理性质，包括铁环性、磁电单极子、准粒子的非互易输运等。与传统磁电材料相比，线性磁电材料在应用中可能具有更高精度的独特优点，源于其中电、磁之间的线性对应。线性磁电的研究已有几十年，但其较弱的磁电耦合 (α 值仅 1~10 ps/m) 是该领域一大难题。

此项研究中，陆成亮教授与合作团队报道了极性磁体 $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 中巨大的线性磁电效应，并揭示其物理机制。该工作主要利用脉冲强磁场设施的磁化与电极化实验测试平台，深入研究极性磁体 $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 在高达 58T 脉冲强磁场下的磁化与电极化特性。研究发现，强磁场可以诱导 $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 磁结构的连续变化以及电极化的线性增长，其对角分量的磁电系数 α_{33} 的值可达到 480ps/m，这比以往报道的磁电系数大了近两个数量级，并且线性磁电效应可以在 40~58T 较宽磁场范围内持续存在。这一实验结果在理论模型中得到再现，并

揭示了交换伸缩机制在线性磁电耦合中的重要贡献。



Cite: [Yuting Chang et al. Phys. Rev. Lett. 131, 136701 \(2023\)](#);

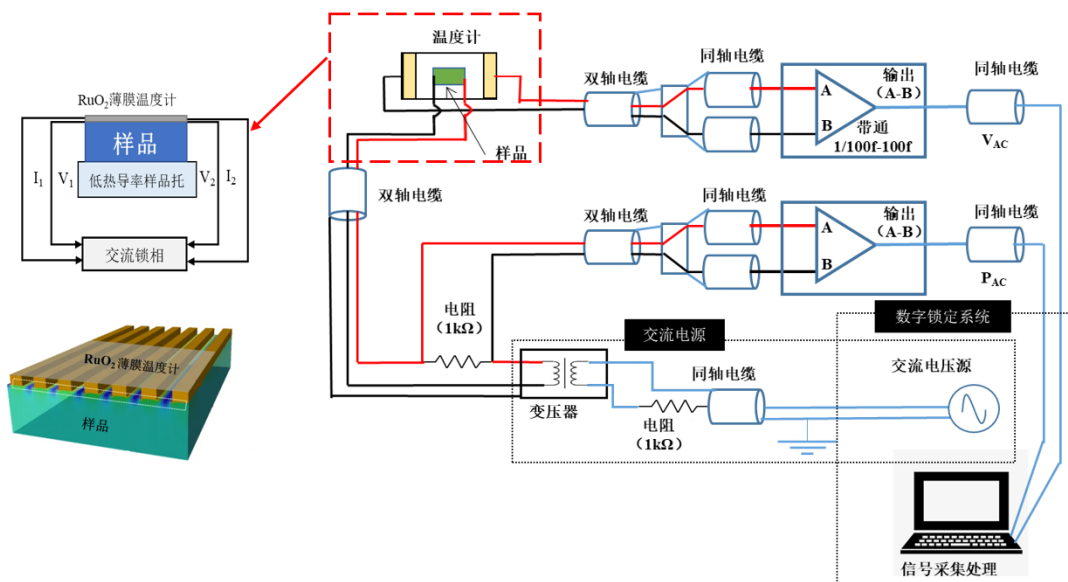
装置：脉冲磁体

● 中心用户在新型磁致冷材料研究上取得进展

磁卡效应是指样品在磁场作用下发生的吸热或者放热现象，脉冲强磁场下的磁卡效应测量能够在绝热条件下直接探测样品温度随磁场的变化关系，是研究物质磁性、量子材料、巨磁卡效应等体系中磁相变、热力学参数和磁热行为的重要实验手段。利用国家脉冲强磁场科学中心毫秒量级时间的磁场条件和超高真空样品测量杆，我们成功搭建了脉冲强磁场下的磁卡效应测量系统，通过薄膜温度计的精准热探测和快速锁相技术，实现样品在 0-60T 超强磁场和 1.5-300K 温区下的绝热温变测量。

目前，镓钆石榴石（GGG）在液氦温区下的磁制冷技术中发挥着重要作用。

该工作研究了 LiREF_4 (RE 为稀土元素 Tb、Dy、Ho、Er、Yb) 等系列单晶样品, 发现其磁热性能远优于 GGG 材料。例如, LiHoF_4 在 0.5T 磁场下表现出巨大的熵变 ($16.7\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), 远高于同等条件下 GGG 熵变 ($1.0\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)。在 25T 脉冲强磁场下, LiREF_4 (RE=Tb, Ho, Dy) 几种单晶的绝热温变均高达 20K 以上, 表现出优良的巨磁卡效应。这种具有磁场驱动的巨熵变和磁热性能的材料是液氦温区下磁制冷技术的理想工质。该实验结果也进一步验证了脉冲强磁场下磁卡效应测量系统的可靠性, 为将来开展更多相关科学研究打下了基础。



Cite: [Peng Liu et al. NPG Asia Mater. 15, 41 \(2023\)](#)

装置: 脉冲磁体

5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场助力首次人工实现纳米螺旋-解旋-再螺旋

纳米螺旋的可逆变化是自然界、生命过程中最精致和最重要的现象之一。然而，纳米材料扭转形成螺旋晶体通常比较困难。考虑已报道的纳米螺旋生成的驱动力通常是不可逆的，其反向过程（解旋）就显得更难实现，更不用说纳米螺旋经解旋后再重新螺旋。因此，化学反应的两个稳定晶态产物之间的多重可逆扭转变化是一个超低概率事件，需要在它们之间建立非常微妙的能量平衡。这种纳米螺旋的可逆变化长期以来一直被认为是难以获得的。

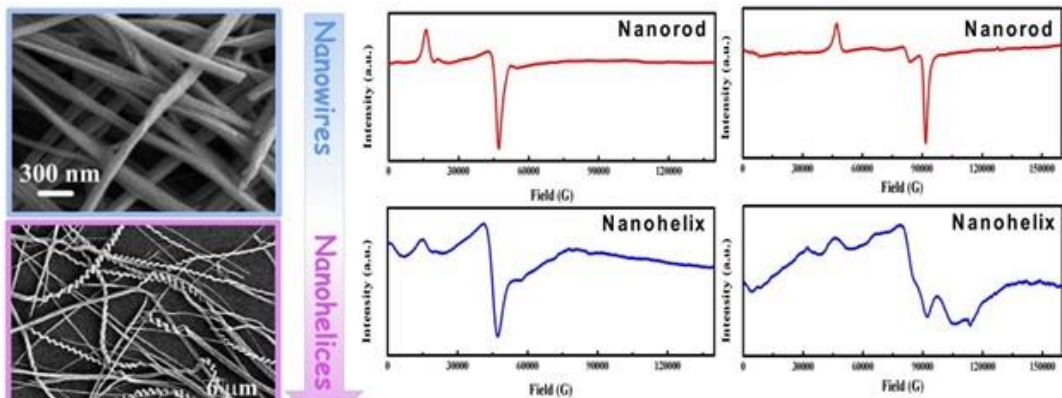


图2. 低频（左）和高频（右）电子顺磁共振谱图

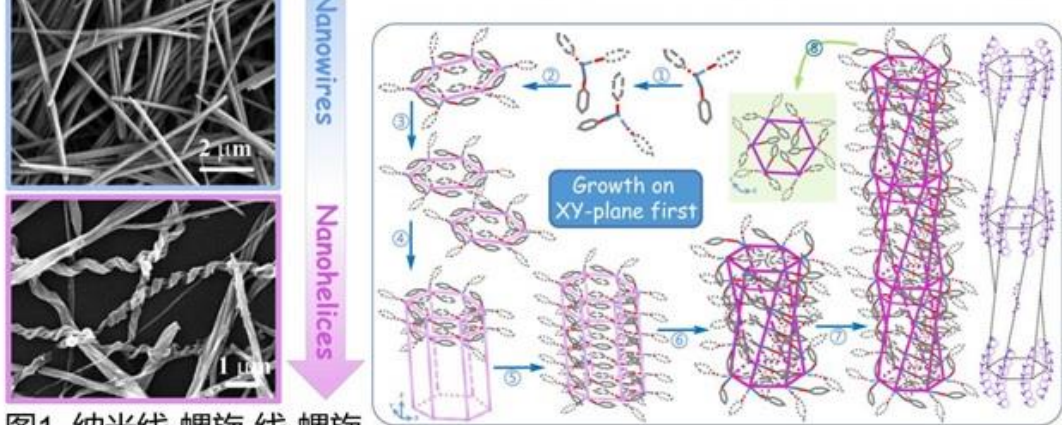


图1. 纳米线-螺旋-线-螺旋的扫描电子显微镜照片

图3. 纳米螺旋生长机制示意图

南京大学陆轻铨教授&高峰教授课题组，与中国科学院合肥物质院强磁场中心、中国科学技术大学合作，依托稳态强磁场实验装置（SHMFF），发现一种晶体结构中微妙的竞争和协作关系，在螺旋和解旋产物晶体结构之间建立了微妙的能量平衡，首次实现了纳米线与纳米螺旋之间的多重可逆变化（图 1）。电子顺磁共振（ESR,包括高场 ESR）（图 2）证明纳米螺旋中 Co (II) 配位环境

的变化以及对称性的降低。固体核磁共振谱和太赫兹谱表明 π - π 相互作用是螺旋生长中的关键作用力。结合理论计算和各种验证实验，推测出螺旋机制来源于缩合反应和 π - π 堆积过程之间的竞争作用（图 3），这种独特的竞争生长机制以及生长方式的微观可调性，是构建细致可调的能量平衡体系、实现螺旋可逆变化的关键。针对性地设计改变分子间作用力，精细调控不同方向生长速度，使整体结构保持不变，能量平衡方向定向改变，成功实现了纳米结构的螺旋、解旋和再螺旋。

Cite: [Wei Du et al. Nature Comm. 14, 4426 \(2023\)](#)

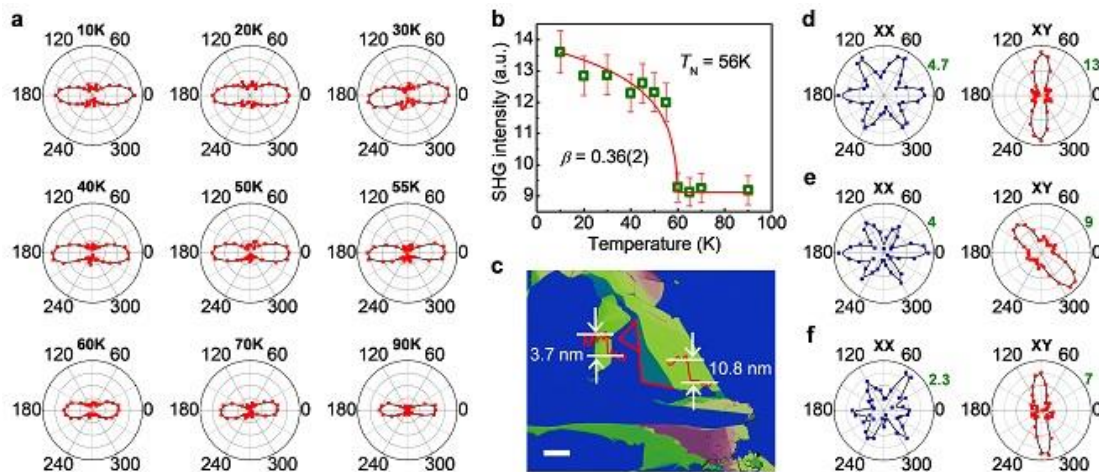
装置：高场 EPR

- **稳态强磁场实验装置用户首次发现二维 Néel 型反铁磁 VPS₃ 中的相干激子-磁子耦合效应**

二维范德华(vdW)反铁磁材料由于具有太赫兹共振、多维磁序态和超快自旋动力学等特征而受到广泛关注，近年来在自旋-轨道纠缠激子态和电子自旋转移矩等领域的研究中取得了的重要进展。然而，由于反铁磁缺乏净磁化强度以及外磁场响应能力，准确识别它们的磁结构、进而深入理解其反铁磁衍生效应仍然是一个严酷挑战，这极大地限制了二维反铁磁的基础研究和实际应用。

为了探究二维反铁磁材料的磁构型及其衍生效应，研究团队利用 SHMFF 的非线性二次谐波（SHG）和拉曼（Raman）光谱技术研究了层状反铁磁单晶 VPS₃，揭示了具有面外各向异性的二维反铁磁体 VPS₃ 中的 Néel 型反铁磁序，发现这种长程反铁磁序在超薄极限下仍然存在。随后，团队首次在单层 WSe₂/VPS₃ 异质结中检测到了 Néel 型反铁磁序诱导的强层间激子-磁子耦合

(EMC)及其所产生的增强激子态。这一研究成果不仅在国际上首次用实验方法证实了 VPS_3 的精细磁结构，而且发现了基于此构型诱发的强激子-磁子耦合行为。这为二维反铁磁材料的研究提供了新的光学途径，并促进了它们在磁-光和光-自旋电子器件中的潜在应用。



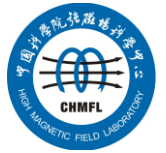
Cite: [Chaocheng Liu et al. Adv. Mater. 35, 2300247 \(2023\)](#)

装置：超导磁体，超快光学，拉曼光谱

● 强磁场团队揭示新型 DNA 链置换反应实现 G 四链体重组装

DNA 链置换反应通常基于经典 Watson-Crick 碱基配对原则，以一条 DNA 单链将另一条序列相似的目标 DNA 单链从所处的 DNA 双螺旋结构中置换出来。这种在 DNA 双链螺旋结构中进行的常规链置换反应，已被广泛应用于纳米分子组装、生物传感器、基因诊断与分子治疗等领域。

不同于 DNA 经典双螺旋结构，G 四链体是由富含鸟嘌呤 G 的核酸序列折叠而成的独特拓扑结构，在人类基因组中分布广泛，备受生物、医药等领域关注。G 四链体具有丰富的结构多样性，根据核酸链聚集度，可分为单聚、二聚或四聚 G 四链体，极少有三聚 G 四链体的报道。G 四链体结构具有优良的稳定

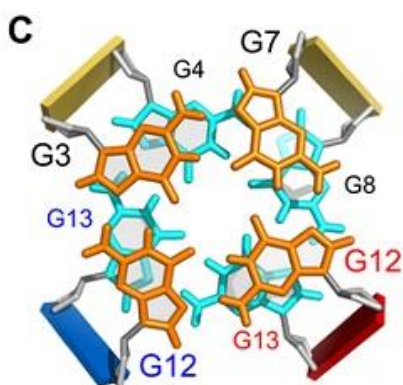
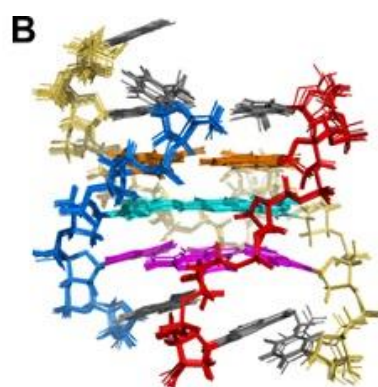
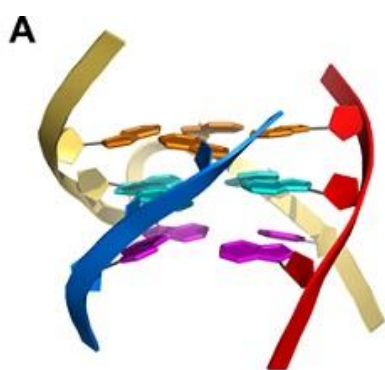
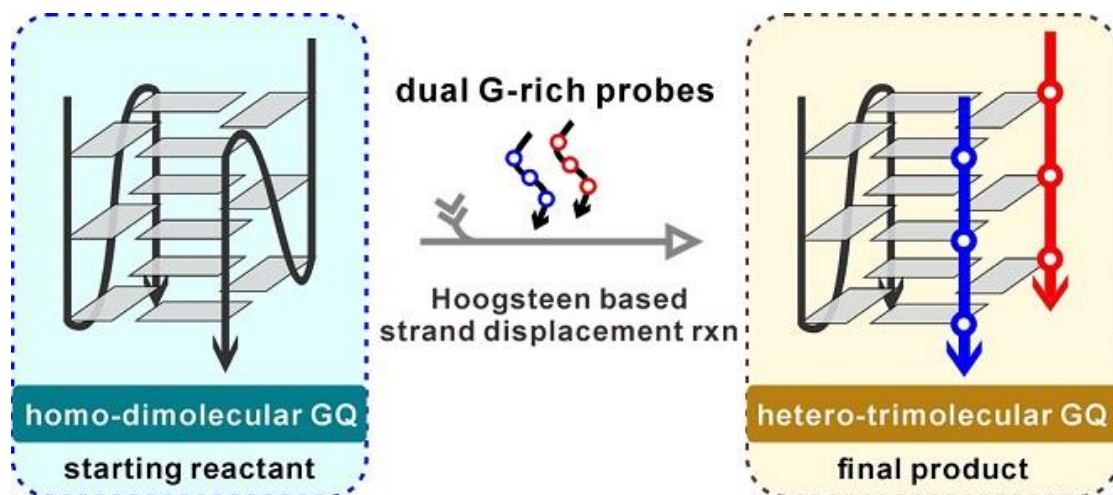


性，通常不与其他富 G 序列进行链置换，长期以来 G 四链体一直被认为对富 G 链置换反应有惰性。

源于人类微管蛋白 $\beta 2$ 基因启动子区的 DNA 序列 ***Tub10*** d(CAGGGAGGGT) 在 K^+ 溶液中完全折叠成具有良好热稳定性 (T_m 值 57.7°C) 的全平行自二聚 G 四链体。在本研究中发现，尽管该 G 四链体在室温下足够稳定，但它在新型 Hoogsteen 氢键配对的链置换反应中并非惰性，而是能作为起始反应物自发地接受双份富 G 短链探针 ***P1*** d(TGGGA) 的链置换进攻，获得由一条靶标链 ***Tub10*** 和两条探针链 ***P1*** 构成的全平行异三聚 G 四链体终产物 ***Tub10/2P1***，成功实现 G 四链体重组装。

研究人员利用液相核磁共振技术对其全原子精细结构进行了解析，揭示了不同 DNA 富 G 序列在相互识别时存在着靶标链与探针链之间独特的 1:2 结合模式；富 G 短链探针 ***P1*** 与传统反义探针相比具有更高的结合特异性，能特异性识别全平行二聚 G 四链体；富 G 短链探针 ***P1*** 还可以同时进攻双螺旋中的富 G 链与富 C 链，自发地将 ***Tub10*** 从双链螺旋中捕获出来，形成异三聚 G 四链体产物 ***Tub10/2P1***。

本研究揭示了由双份富 G 短链探针同时参与基于 Hoogsteen 氢键配对方式自发进行的新型链置换反应，拓展、补充了由 Watson-Crick 配对介导的常规核酸链置换反应，突破了 G 四链体呈现富 G 链置换惰性的传统认知；为 DNA 纳米材料领域提供新的理论和实践基础，解决目前多为相同富 G 链自组装的不足，有利于获得更复杂、更多功能的全新纳米组装结构；还为靶向 G 四链体的新型富 G 探针设计开辟了新思路。



Cite: [Wenxuan Hu et al. J. Am. Chem. Soc. 145, 18578–18590 \(2023\)](#)

装置: NMR