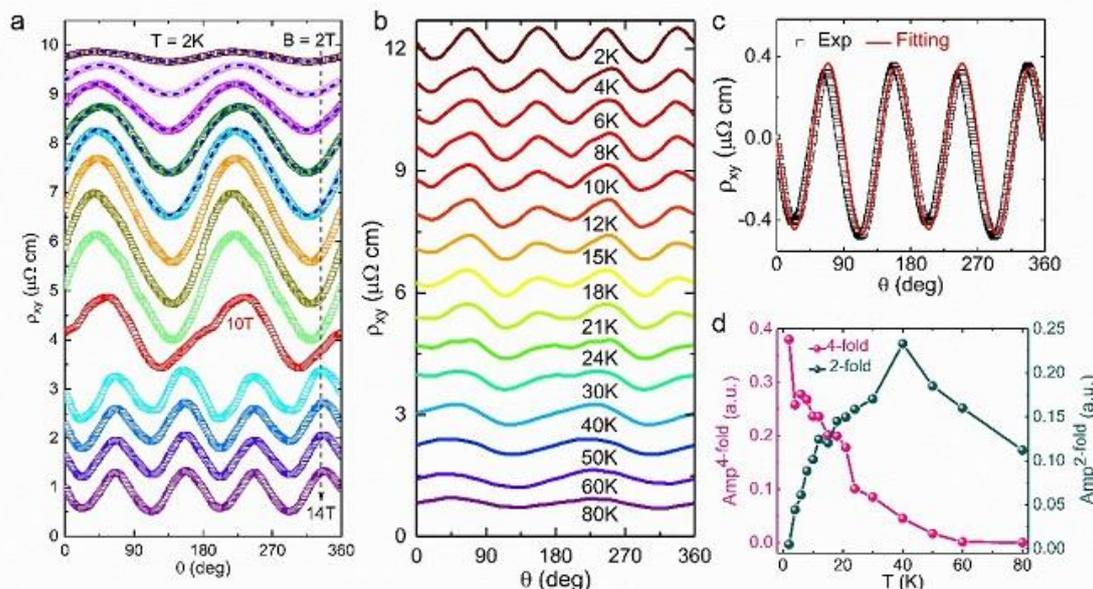


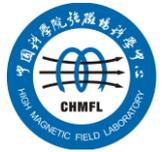
# 国内外强磁场实验室 科研动态

2022 年第一季度



中国科学院强磁场科学中心

2022/4/18



# 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

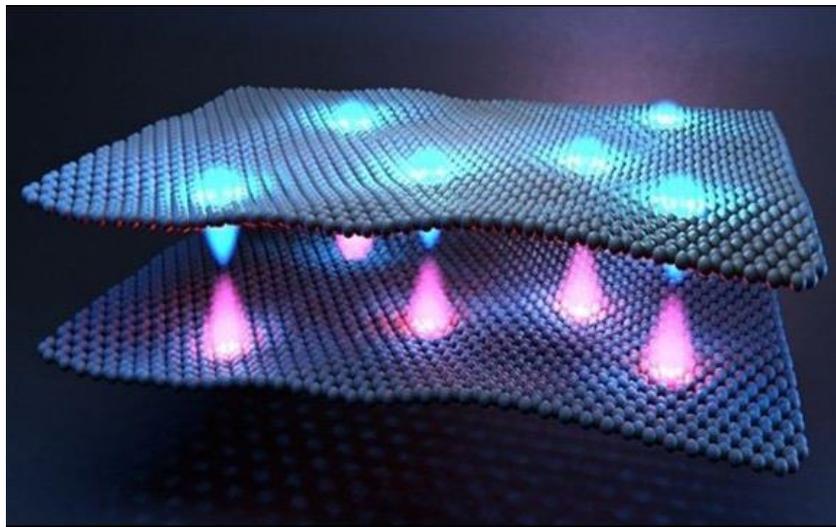
中国科学院强磁场科学中心位于合肥科学岛，其建设的稳态强磁场实验装置 2017 年通过国家验收，是世界上仅有的两个稳态磁场超过 40T 的实验室之一。稳态强磁场实验装置有 3 台水冷磁体创造世界纪录，混合磁体最高磁场达到 42.9T，磁体技术和综合性能处于国际领先地位。

# 科 研 动 态

## 1. 美国国家强磁场实验室

- 强耦合和弱耦合激子超流体之间的跨越

成对的费米子凝聚成量子基态代表了强相互作用系统中最壮观的多体效应之一。根据相互作用的强度，成对的费米子可以紧密结合——就像在玻色-爱因斯坦凝聚体 (BEC) 中一样——或者可以大到与其他对重叠——比如在 Bardeen Cooper Schrieffer (BCS) 配对中。理解 BEC 和 BCS 配对的连续性是过去一个世纪的伟大理论成就之一。尽管在超冷费米气体实验中得到了很好的证实，但在电子系统中观察 BEC-BCS 跨越仍然具有挑战性。



MagLab 用户研究了由原子层厚绝缘体隔开的石墨烯双层。在磁场作用下，电子和空穴穿过势垒耦合形成束缚磁激子。在双层石墨烯中使用与温度相关的库仑牵引和逆流电流测量，研究人员能够通过从强耦合到弱耦合的整个相图连续调整磁激子凝聚体。固态器件中费米子配对的这种可调性能够研究各种配对

强度的费米子凝聚体，并可能有助于更好地理解 BEC-BCS 跨越与非常规超导之间的联系。

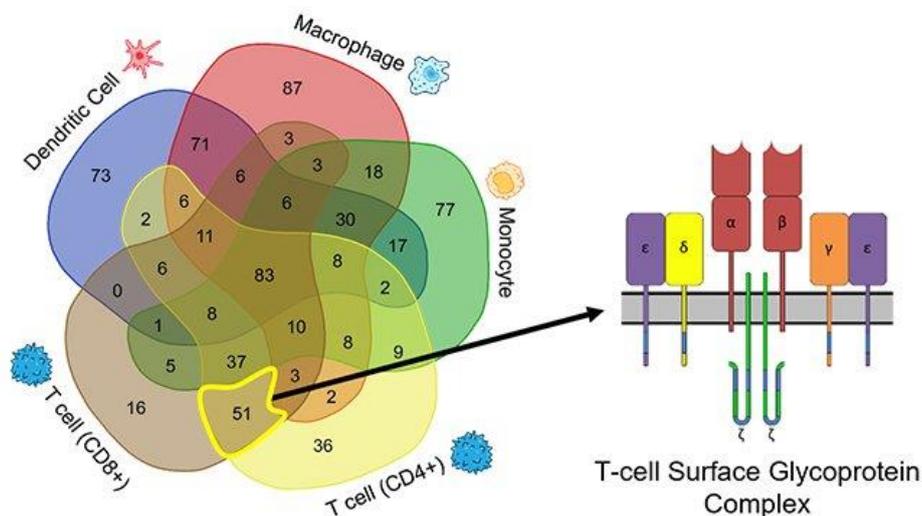
*Cite: X. Liu, et al. Science 375, 205-209 (2022)*

装置：水冷磁体

### ● 绘制人类血细胞蛋白图谱

随着蛋白质组学的迅速发展，基于质谱技术的蛋白质组学分析已经在建立表型和蛋白质水平的联结中作出了贡献，这些研究工作包括绘制组织和细胞特异性蛋白质组成等。然而，转录后、翻译后蛋白加工数据，以及 mRNA 剪接与修饰相结合导致蛋白质多样性数据并不完备。

近日，来自美国西北大学的用户利用 MagLab 独有的 21T ICR 绘制了人类血细胞蛋白图谱，并进一步研究了蛋白图谱的临床应用价值。研究团队首先通过流式分选获得所需的细胞，共收集了 21 种人造血细胞和血浆。分析发现共捕获 29620 种 Proteoform（蛋白形态数量总和），数据集比对发现 Proteoform 是细胞类型更好的标志物。通过对肝移植患者的外周血单核细胞蛋白图谱的应用，发现该血细胞蛋白图谱可以作为临床研究和治疗相关的蛋白质信息。

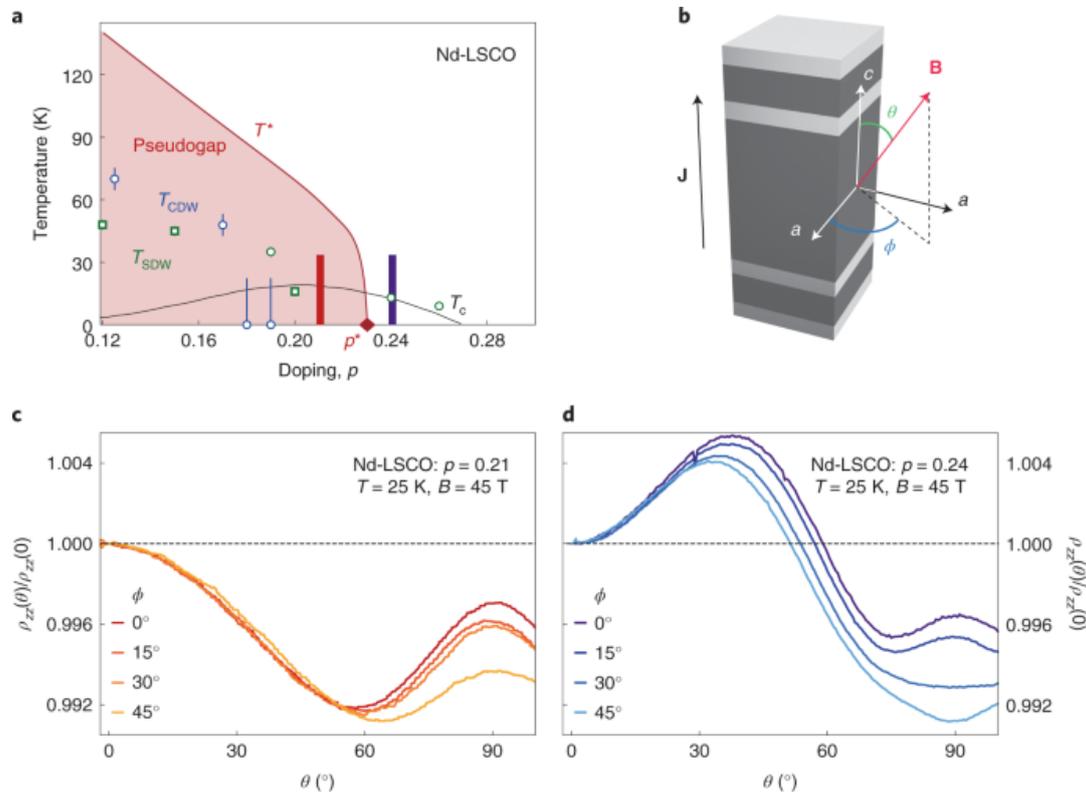


该研究通过绘制人血液、造血细胞蛋白图谱，对人体中存在的蛋白成分有了进一步认识。并且通过分析特定临床背景下蛋白图谱，证明了其潜在的临床应用价值。这些针对细胞和分子特异性的研究有助于推进蛋白质水平诊断的发展。

Cite: [R. D. Melani, et al. Science 375, 411-418 \(2022\)](#)

装置：超导磁体 (ICR)

### ● 铜氧化物超导体赝能隙临界点的费米面变换



赝能隙相的性质仍然是我们理解铜氧化物高温超导性的主要难题。无论这种金属相是否由任何对称性破缺定义，其费米面的拓扑结构仍然是一个基本的悬而未决的问题。MagLab 在 45T 混合磁体上使用与角度相关的磁阻 (ADMR) 来测量  $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  铜酸盐的费米面。在赝能隙相之外，通过拟合 ADMR 数据获得了与角分辨光发射谱数据非常一致的费米面几何形状。在赝能

隙相内，ADMR 在性质上是不同的，揭示了费米面的转变。研究人员排除了准粒子寿命的变化是这种转变的唯一原因，发现赝能隙费米面由小的 nodal 空穴口袋组成，从而解释了赝能隙转变中载流子浓度的下降。

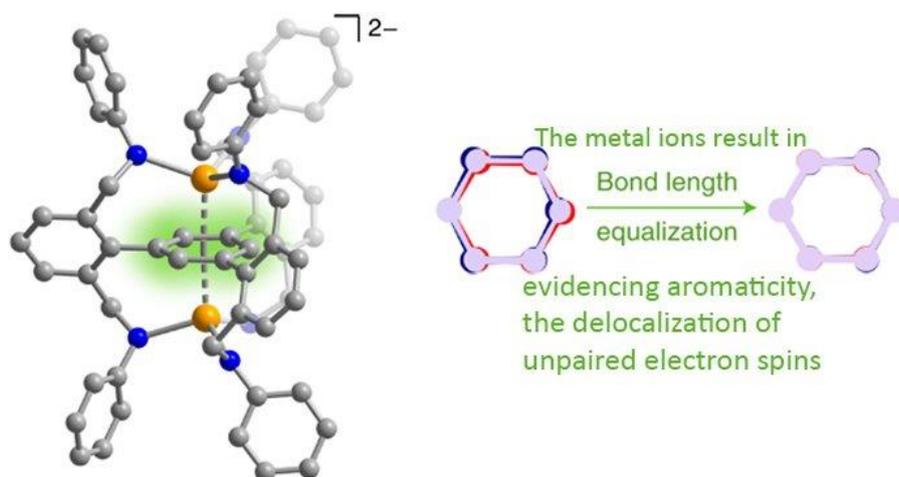
*Cite: Y. Fang et al. Nature Phys. (2022)*

装置：混合磁体

### ● 三重态苯二价阴离子的分离

高场高频电子顺磁共振展示了如何利用配位化学来稳定有机分子中所需的电子/磁性状态。在这个实验中，苯环中长期寻找的磁性（三重态）基态被六碳环上方和下方的一对金属离子稳定。

该研究展示了如何利用配位化学来稳定有机分子中所需的电子/磁性状态。具体来说，这种方法能够分离带负电荷的苯二价阴离子，其自旋  $S = 1$ （三重态），这在通常情况下是高能激发态。反过来，这能够验证几十年前的理论模型，该模型预测苯环上未配对电子的离域性质。

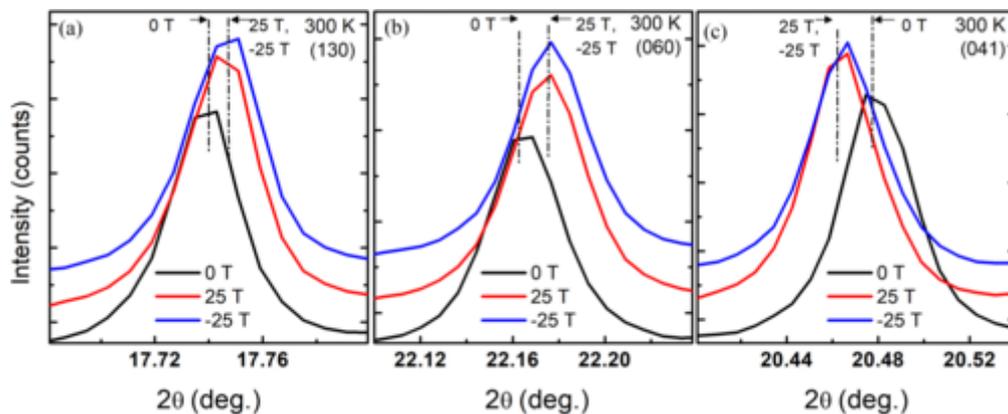


*Cite: C. A. Gould et al. Nature Chem. 13, 1001–1005 (2021)*

装置：超导磁体（高场高频 EMR）

## ● 25T XRD 测量 $\text{AlFe}_2\text{B}_2$ 的磁致伸缩

磁致伸缩响应磁场产生形状变化。磁致伸缩材料可以将电磁能转化为机械能，反之亦然，并可用于制造测量磁场或检测力的传感器。此外，重复的机械循环会导致疲劳，必须理解这一点以避免材料过早失效。MagLab 使用 25T 分裂磁体上的 XRD 研究了铁磁  $\text{AlFe}_2\text{B}_2$  中的各向异性磁致伸缩。该实验展示了 XRD 在探索磁致伸缩材料方面的实用性。基于与实验结果一致的朗道模型估计磁致伸缩的热力学关系。这种方法适用范围广，正在开发用户。



Cite: [S. Sharma et al. Phys. Rev. Mater. 5, 064409 \(2021\)](#)

装置：分裂水冷磁体 (XRD)

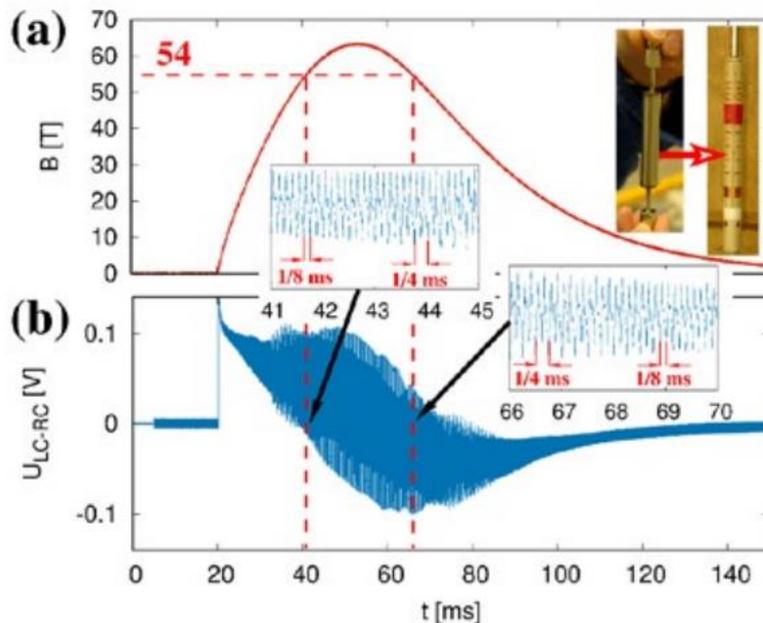
## 2. 欧洲强磁场实验室

### ● 脉冲场下的液态铷 ALFVÉN 波实验

日冕高达几百万 K 的高温是太阳物理学中尚未解决的主要问题之一。尽管磁场被明确地认为是造成“锅比炉子热”的原因，但这种加热机制到底是因为磁力线的突然重连，还是等离子体中不同波的衰减，仍然存在争议。在这方面，一个重要的研究区域是日冕下方的磁冠，在那里声波和 Alfvén 波的速度大致相

同，因此可以很容易地相互转换。然而，在此前所有的液态金属实验中，Alfvén 波的速度都远低于声速。其原因是稳态磁场强度的限制，无法产生足够的磁张力使 Alfvén 波达到声速。

利用德国脉冲场实验室提供的脉冲磁场，可以让 Alfvén 波穿过“声障”。实验使用液态铷，声障出现在 54 T。同时测量到的交流信号在超过 54 T 的“魔点”时出现频率减半，降场时得以恢复。这项工作对于揭示太阳日冕相关的加热机制非常重要。



Cite: [F. Stefani, et al. Phys. Rev. Lett. 127, 275001 \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体

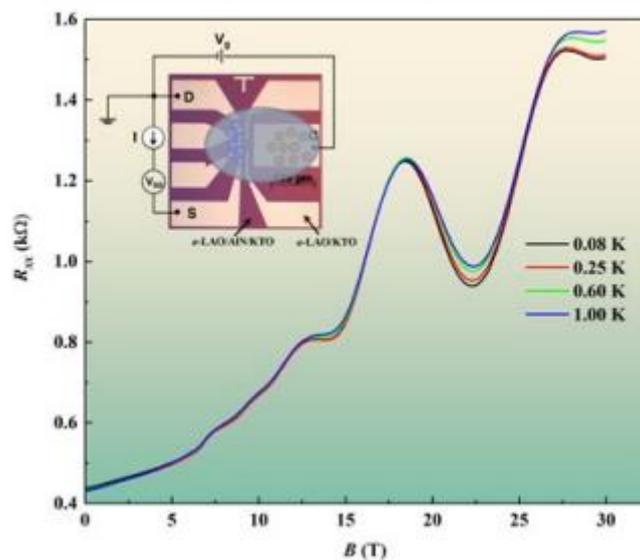
### ● 5d 氧化物界面的量子振荡

科研人员研究了准二维电子气(2DEG)在新的 5d 氧化物异质界面 LaAlO<sub>3</sub>/KTaO<sub>3</sub> 上的电子特性。通过在室温下实施离子液体门控过程在界面处诱导高迁移率载流子。除了有关 KTaO<sub>3</sub> 中 2DEG 能带结构的详细信息外，该研

究还为其他无法构建外延异质界面的 5d 氧化物创建高迁移率 2DEG 铺平了道路。

研究团队在低至 80 mK 的强磁场（荷兰 30 T 的稳态场和 法国 55 T 的脉冲场）中对  $\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3$  异质结构进行了量子输运测量。不同磁场方向的磁阻振荡表明，大部分电子被限制在界面附近的几个原子层内。多个频率的振荡及其温度依赖性证明了电子处在小能量间隔轻重子带中，子带特性与角分辨光电子能谱和带结构计算非常吻合。

此外低密度区的磁阻涨落可能源于电子的量子干涉，展示了基于氧化物的量子电子器件的前景和研究相关二维电子中的量子相干传输的平台。



Cite: [K. Rubi, et al. Phys. Rev. Research 3, 033234 \(2021\)](#)

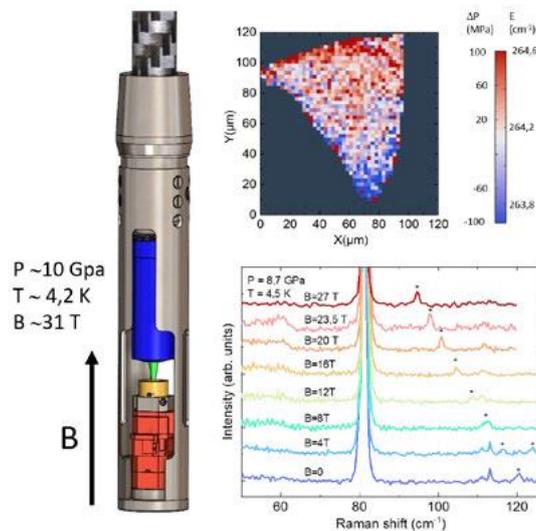
装置：水冷磁体、脉冲磁体

#### ● 低温高压强磁场极端条件下的空间分辨光谱

法国稳态场的研究人员设计了一个可同时在低温、高压和强磁场极端环境下工作的光谱学实验装置，同时还具有微米级空间分辨率，可用于研究微结构

的奇异相。

研究人员用层状三硫化铁磷块材进行了第一次实验。结果表明，这种设置允许对三个热力学参数进行独立调整。因此，该设置可用于研究不同系统的相图并用光谱探测它们的特性。由于空间分辨率，可以通过光谱学（拉曼散射环、光致发光、反射率）研究大型样品上的微小结构或特定位置。这种设置在层状材料领域特别有用，因为压力允许调整层间距离和相关的相互作用效应。



Cite: [I. Breslavetz, et al. Rev. Sci. Instrum. 92, 123909 \(2021\)](#)

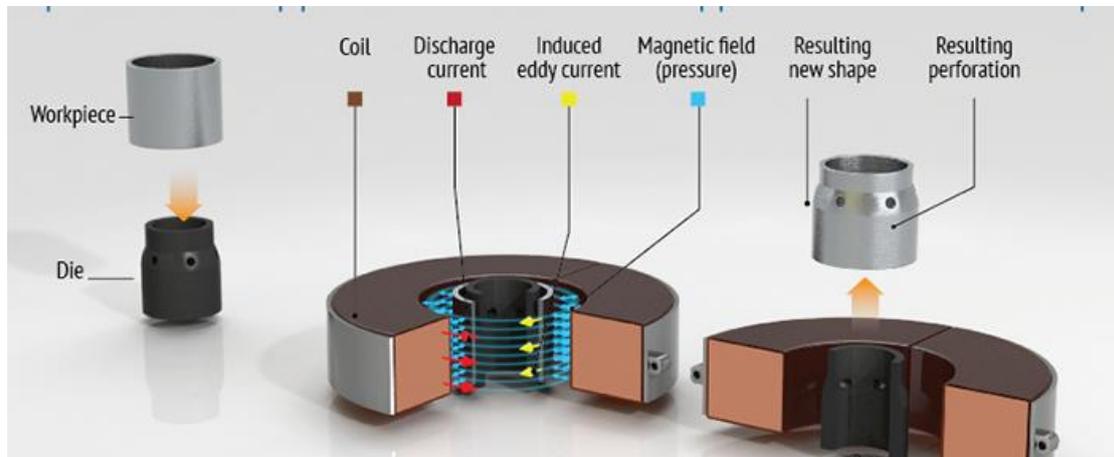
装置：水冷磁体

### ● 长寿命磁成型线圈

磁成型可以以合理的成本制造具有其他方法无法获得的形状的精密零件。为此目的而设计的脉冲电磁铁会产生非常短且强的磁场脉冲，从而在待成型的金属部件中感应出电流。然后将零件以非常高的速度投送到模具上，从而获得所需的形状。该操作在几十微秒内完成，并且零件形状的精度达到了奢侈品、航空和汽车行业等非常苛刻的行业的期望。

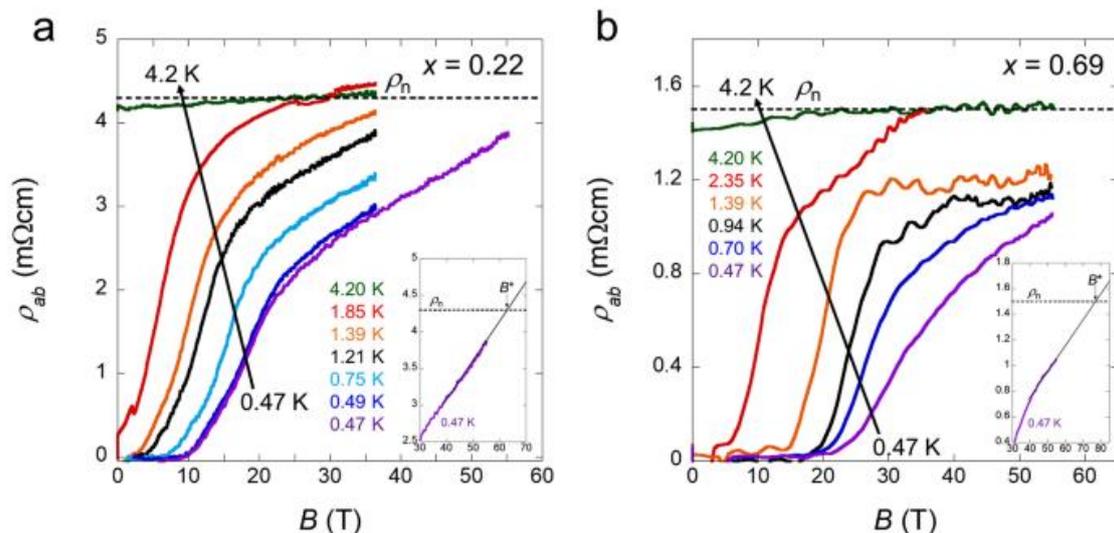
自 2013 年起，图卢兹脉冲场实验室与 Bmax / I Cube Research 公司合作

设计长寿命的磁成型线圈。经过不懈努力，目前线圈寿命已提高到 30000 次脉冲，是之前的 50 倍。

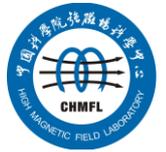


### 3. 日本强磁场实验室

- BiCh<sub>2</sub> 基层状超导体的超高上临界场



具有局域反演对称破缺的中心对称化合物具有非常有趣的物理性质。东大强磁场实验室的用户报告了在基于 BiCh<sub>2</sub> 的系统 LaO<sub>0.5</sub>F<sub>0.5</sub>BiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> 中存在极高的面内上临界场 ( $x = 0.22$  和  $0.69$ )。超导状态并没有被高达 55 T 的外加磁



场完全压制。因此，我们认为面内上临界场通过局域反演对称性破坏及其分层结构得到增强。该研究通过关注局域反演对称性破坏，为发现具有高上临界场的超导体开辟一条新途径。

*Cite: [K. Hoshi, et al. Sci. Rep. 12, 288 \(2022\)](#)*

装置：脉冲磁体

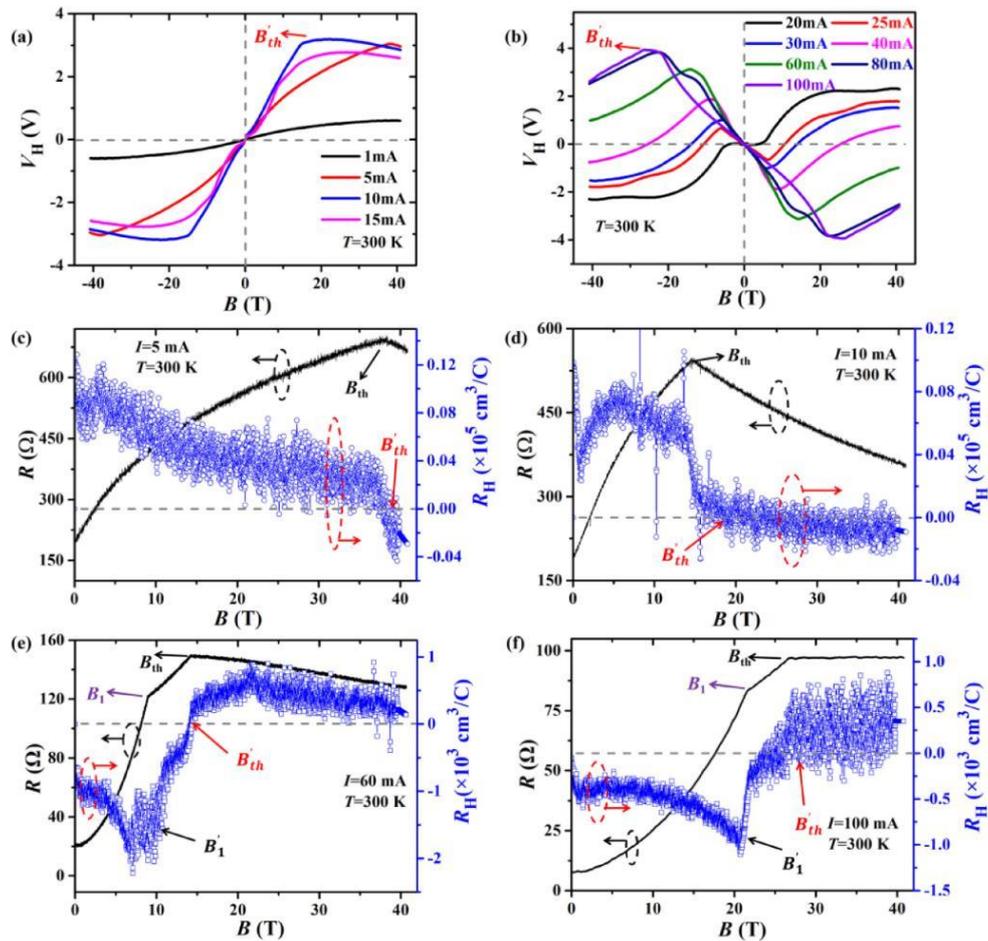
## 4. 武汉脉冲强磁场科学中心

### ● 强磁冲击下锗基半导体器件磁阻行为演变上取得重要进展

非磁性材料呈现出的不饱和巨磁阻性能引发了研究人员的物理兴趣，在磁传感、非易失性可重构逻辑器件等电子器件中具有重要的应用前景。考虑到与现代电子工业的高度兼容性，非磁性半导体将是更好的候选材料。在脉冲强磁场下，带电粒子受到极强洛伦兹力的作用，研究这些非磁性半导体材料及其电子器件的磁阻行为如何演变，是一个值得深入探讨的科学问题。以往强磁场下的磁阻行为研究工作主要集中在材料的欧姆输运区域，非欧姆输运区域的磁阻行为仍不清楚，这不利于基于非磁性半导体的电子器件在强磁场环境中的应用，也不利于评估这些电子器件在强磁脉冲环境下的稳定性和可靠性。

在主要载流子为单一空穴的欧姆导电区 ( $I < 5\text{mA}$ )，磁阻数值随外加磁场强度的增加而增加，呈现出传统的不饱和行为。然而，在以双极（电子和空穴）输运为主的两个非欧姆导电区域 ( $5\text{mA} \leq I \leq 100\text{mA}$ ) 中，在脉冲强磁场（45T）冲击下可观察到明显的磁阻折返行为。结合霍尔测量结果与双极驱动输运模型，该研究推测此行为可能与占主导地位的载流子类型发生转变有关，这种转变可

能源自于强磁场下洛伦兹力对电子与空穴的极强调制作用。该工作为评估基于非磁性半导体的磁阻器件在强磁脉冲干扰下性能的稳定性和可靠性提供了参考。



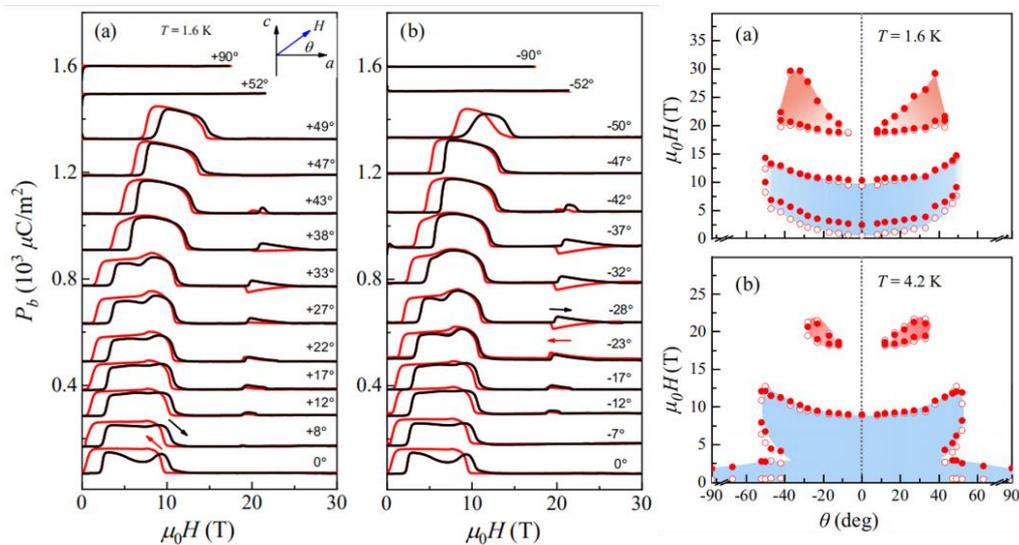
Cite: [X. He et al. J. Mater. Sci. Techn. 114, 1 \(2021\)](#)

装置：脉冲磁体

● 强磁场驱动的“鬼脸”铁电相研究进展

在该项研究中，利用脉冲场下的转角电极化测量研究了 30T 下  $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  中的铁电相图随角度的依赖关系。研究发现，当磁场沿晶轴 a 方向时，低场区域出现由磁场诱导的低场铁电相 LF。随着磁场在 ac 面内旋转，LF 相逐渐向高场移动并在  $|\theta|=54^\circ$  时突然消失。与此同时， $12^\circ \leq |\theta| \leq 43^\circ$  出现另一个高场铁电相 HF (20T 处)。通过分析可知，LF 相来源于  $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  中  $\text{Ni}^{2+}$  kagome 晶格的

spine 自旋螺旋序，而 HF 相则与 kagome 晶格的 cross-tie 自旋相关。当磁场沿 ac 面旋转时，两种不等价的  $\text{Ni}^{2+}$  自旋随磁场的响应关系分别导致 LF 相与 HF 相的出现并构成“鬼脸”相图：其中 LF 相连续出现在  $|\theta| \leq 54^\circ$  区间，而 HF 相只出现在  $12^\circ \leq |\theta| \leq 43^\circ$  区间。该项工作揭示了 kagome 梯状结构的  $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  角度依赖的磁电相图，并证实了旋转磁场对于探索新的铁电相具有重要且现实的科学意义。



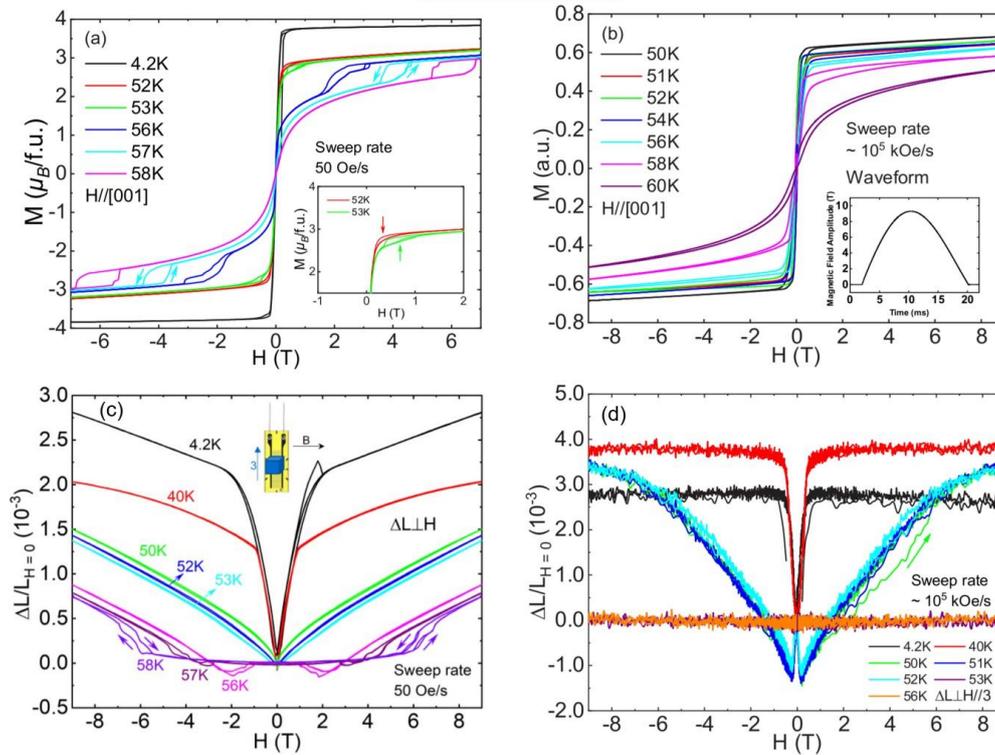
Cite: [C. Dong et al. Phys. Rev. B 105, 024427 \(2022\)](#)

装置：脉冲磁体

### ● 尖晶石 $\text{MnV}_2\text{O}_4$ 的自旋-轨道关联效应研究上取得进展

$\text{MnV}_2\text{O}_4$  是一种被广泛研究的材料，具有丰富的物理性质，是研究不同自由度间相互作用的理想平台。 $\text{MnV}_2\text{O}_4$  在  $\sim 56\text{K}$  时发生非共线亚铁磁转变，并且伴随轨道序以及立方-四方结构相变的产生，在  $\sim 52\text{K}$  时有另一相变产生，这一相变的来源仍然没有定论。在该工作中，研究团队指出  $\sim 52\text{K}$  处相变的可能起源，并利用脉冲磁场测量平台研究了尖晶石  $\text{MnV}_2\text{O}_4$  中自旋-轨道自由度间相互作用的动力学特性。实验发现，该材料表现出依赖于扫场速率的磁化和磁致

伸缩行为，研究人员分析认为这是一种新颖的动力学行为，并据此提出一种准绝热的自旋-轨道关联机制。该研究充分体现了脉冲磁场是研究不同自由度间相互作用及相关物性动力学特性的有力工具。



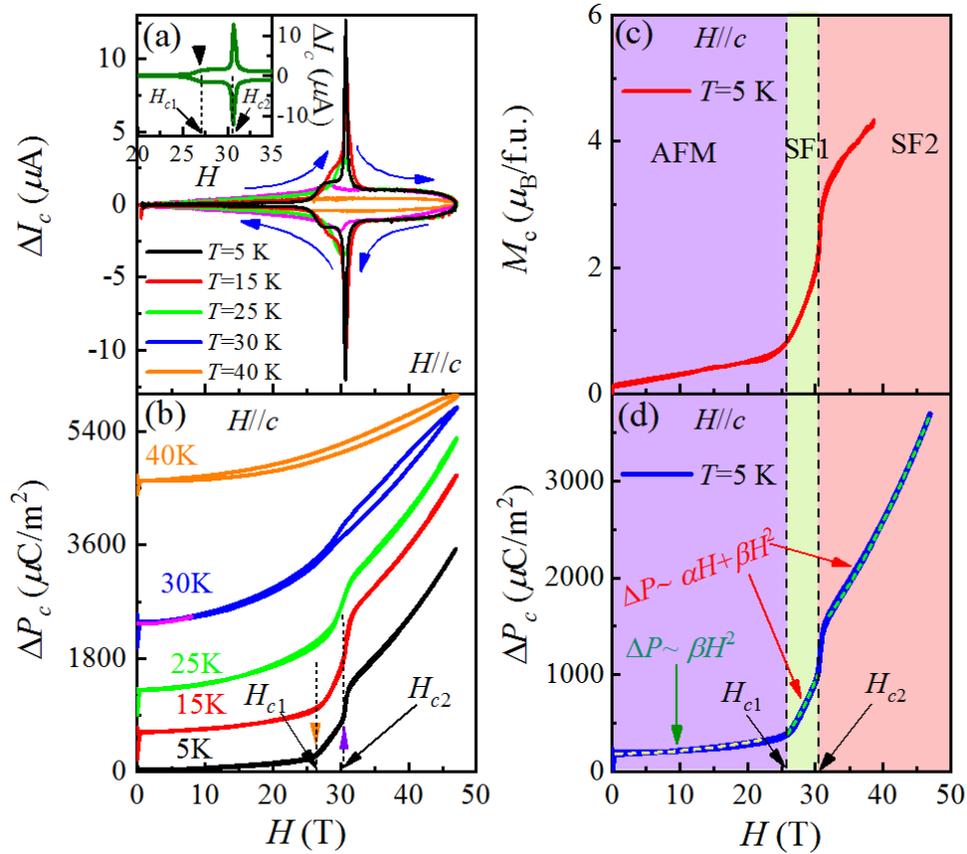
Cite: [H. Y. Niu, et al. Phys. Rev. B 105, 054401 \(2022\)](#)

装置：脉冲磁体

● 用户在强磁场诱导多铁相变研究上取得进展

南大刘俊明课题组研究了  $\text{Co}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  单晶在 60T 强磁场下可能的磁相变与磁电耦合效应。研究表明，在磁场  $H//c$  时，磁致电流和磁场诱导铁电极化分别在  $H_{c1} \sim 27\text{T}$  和  $H_{c2} \sim 31\text{T}$  附近展现出两个连续的异常，值得关注的是  $c$  方向的磁矩同样在  $H_{c1}$  和  $H_{c2}$  处出现了两个连续的跳变，表明铁电序和磁序之间的本征耦合；另外，不同区域铁电极化随磁场的依赖关系也不同，低场下极化与磁场呈现抛物线的平方关系，即  $\Delta P_c \sim \beta H^2$ ，然而磁场高于  $H_{c1}$  之后，极化与磁场主要展现出

线性关系，即  $\Delta P_c \sim \alpha H + \beta H^2$ 。通过磁空间点群分析， $6'mm'$ 允许的磁电张量与各向异性磁电耦合测量结果相吻合。该项工作揭示了强磁场对于探索新的磁电相具有重要的科学价值。



Cite: [Y. S. Tang et al. Phys. Rev. B 105, 064108 \(2022\)](#)

装置：脉冲磁体



## 5. 中科院强磁场科学中心

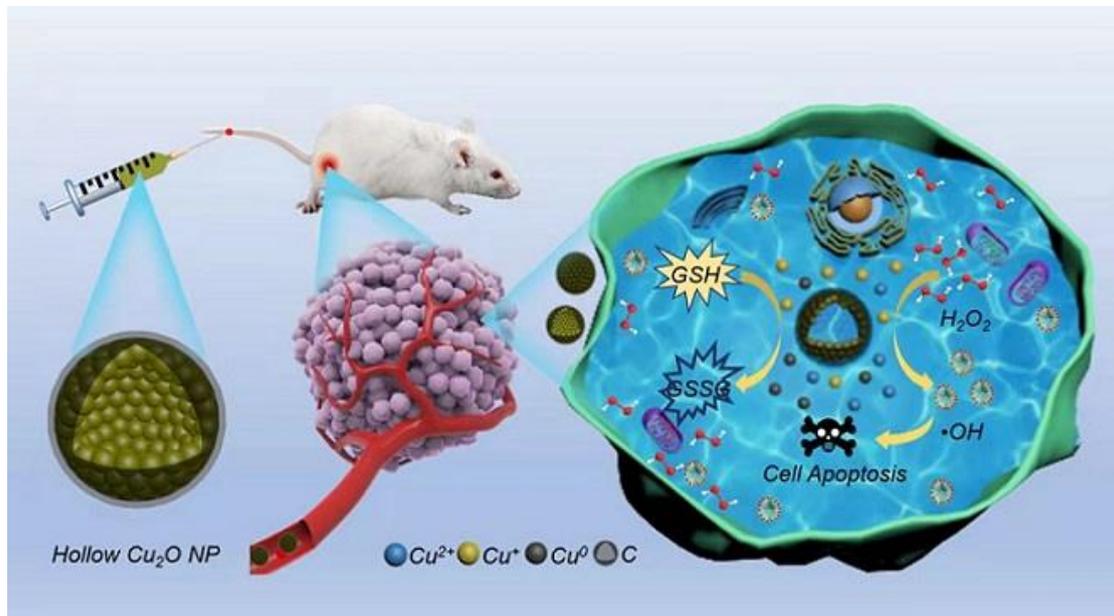
### ● 高效癌症化学动力学治疗取得新进展

近年来，由于选择性高、侵袭性小，肿瘤微环境（TME）响应性的化学动力学治疗（CDT）受到研究者的广泛关注。由于传统 CDT 主要集中在  $\text{Fe}^{2+}$  介导的 Fenton 反应，其受到较强肿瘤微酸环境和较低反应速率的限制。此外，肿瘤细胞中谷胱甘肽（GSH）的过度表达会破坏细胞内的活性氧（ROS），导致治疗效果有限。因此，设计一种生物相容性的纳米催化剂来抑制 GSH 的过度表达以增强 CDT 效果变得很有必要。

在各种金属基纳米催化剂中，亚铜基纳米催化剂在弱酸性条件下甚至在中性介质中都表现出作为类芬顿剂的巨大潜力。此外，由于  $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$  的低氧化还原电位，亚铜基纳米催化剂对  $\cdot\text{OH}$  的生成和降低 GSH 过度表达具有更高的催化活性。然而，亚铜基纳米催化剂的易氧化性和潜在的离子毒性限制了其临床应用。

中科院合肥物质科学研究院强磁场科学中心王辉研究员与中国科学技术大学陈乾旺教授、合肥研究院健康所钱俊超副研究员合作，采用溶剂热法设计了一种氮掺杂碳包覆的氧化亚铜空心纳米胶囊（HCONC），HCONC 中  $\text{Cu}^+$  介导的类 Fenton 反应不仅能在相对宽松的条件下有效地分解  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成  $\cdot\text{OH}$ ，同时在肿瘤微环境中释放的  $\text{Cu}^+$  也可以消耗过度表达的 GSH，防止新生的 ROS 被分解。此外，薄层碳巧妙地附着在空心氧化亚铜（ $\text{Cu}_2\text{O}$ ）纳米晶表面，有效地阻止了  $\text{Cu}^+$  的氧化，提高了  $\text{Cu}_2\text{O}$  纳米晶的稳定性和生物相容性。体外和体内实验均表明，HCONC 具有出色的抗肿瘤能力，可用于降低肿瘤细胞中 GSH 过

度表达并加速 CDT 的效果，因此在肿瘤化学动力学治疗中有望展现出更广阔的应用前景。



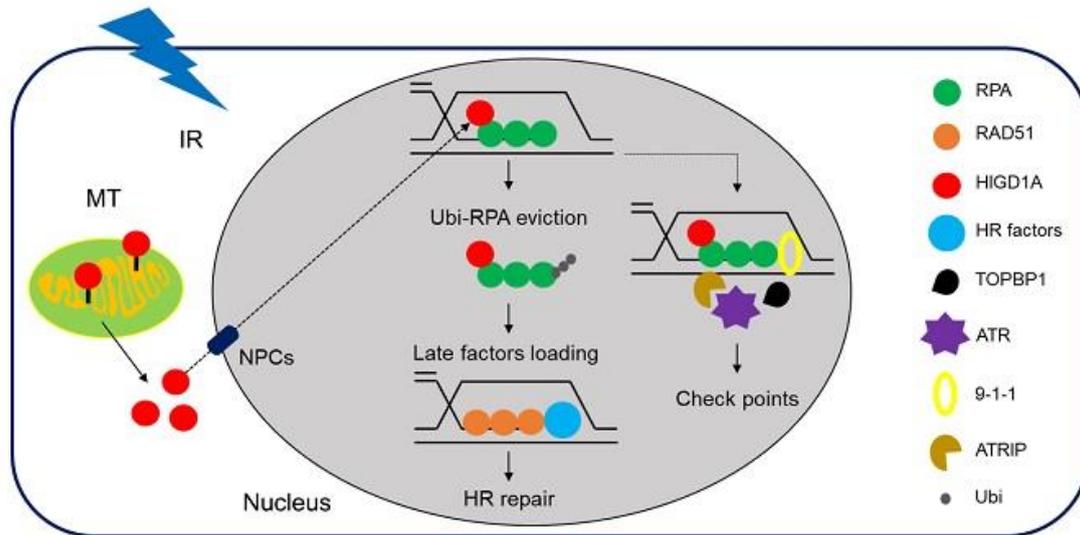
Cite: [M. F. Meng et al. \*Small\* 18, 2107422 \(2022\)](#)

装置：ESR

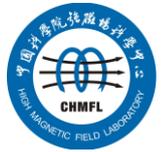
#### ● 赵国平课题组在线粒体靶调控辐射敏感性研究中取得重要进展

DNA 损伤反应是肿瘤放射治疗的基本原理，辐射通过破坏 DNA 杀伤肿瘤细胞，而肿瘤组织的放射抗性则与异常增强的 DNA 损伤修复能力相关。因此抑制肿瘤细胞的 DNA 损伤修复能力，会成为增强肿瘤放射治疗效果的有效途径，将为研制新型癌症治疗剂奠定基础。线粒体是真核细胞中重要的细胞器，是物质代谢和能量转换的中心。传统观点认为外源信号诱导的 DNA 损伤修复信号是由线粒体 ROS 介导的。后来不断有研究发现，DNA 损伤修复途径高度依赖能量，细胞能量耗竭会导致 DNA 修复不完全，最终会导致细胞死亡。并且，在 TCA 循环中形成的代谢产物是 DDR 通路中关联蛋白的重要底物。这些研究均表明线粒体广泛参与了核内 DNA 损伤修复途径。近期研究还发现，线粒体蛋白

HIGD1A 在严重应激下具有明显的核定位，暗示其可能具有额外的“月光作用”，在核内损伤中发挥重要的调控作用，但是具体机制并不明确。



在本研究工作中，中科院合肥研究院强磁场中心赵国平课题组通过运用生物信息学分析、RNA-seq、LC-MS/MS 等技术手段，发现辐射诱导 HIGD1A 的转位入核依赖于核孔复合物，核孔蛋白 NUP93 通过与 HIGD1A 保守序列内的 46-60 氨基酸直接作用介导 HIGD1A 入核。进一步研究发现，HIGD1A 入核后与 RPA 作用调控 HR。在 HR 的早期阶段，HIGD1A 促进 RPA 加载到 DSB 损伤位点处并增强 9-1-1 以 DNA 损伤依赖的方式在染色质上结合，从而激活 ATR-Chk1 依赖的 G2/M 周期损伤检查点。在 HR 的后期阶段，在促进 RPA-ssDNA 结合后，HIGD1A 反过来通过促进 RPA1 的泛素化并诱导其最终的蛋白酶体降解来抑制 RPA1 病灶的异常持续存在，使 HR 得以最终完成。此外，使用虚拟筛选方法确定了与 HIGD1A-NUP93 相互作用结合口袋相关的临床药物 Preveon。经液体 NMR 验证，该化合物可直接与 HIGD1A 相互作用，能够抑制辐射诱导的 HIGD1A 转位入核。总的来说，该研究证明了 HIGD1A 在辐射诱



导的 DNA 损伤中的新功能，并为使用 HIGD1A 抑制剂作为癌症治疗剂提供了基本原理。

*Cite: B. Chen et al. Oncogene 41, 1918–1930 (2022)*

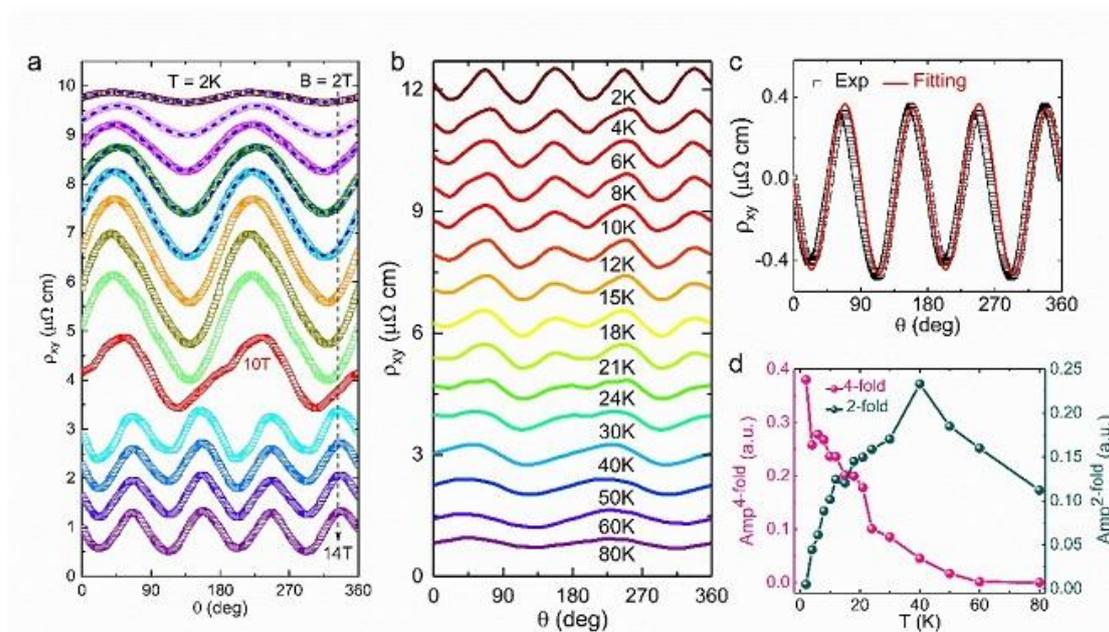
装置：NMR

- **强磁场科学中心在反铁磁拓扑绝缘体  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  中发现  $\pi/2$  周期的平面霍尔效应**

拓扑量子材料由于其独特的性能，在未来低功耗量子自旋器件中具有重要的应用价值，是当前相关领域的研究热点。在拓扑材料中，贝里曲率和轨道磁矩是两个基本的赝矢量，对材料物性会产生重要的影响。虽然轨道磁矩在谷电子学和手性磁效应中具有重要作用，相比于贝里曲率的研究，轨道磁矩相关新奇物性的研究还很少。近年来，本征反铁磁拓扑绝缘体  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  受到了广泛关注。这个体系不仅具有丰富的物性，比如量子反常霍尔效应、拓扑轴子态等，同时也为研究轨道磁矩和贝里曲率对量子输运现象的影响提供了一个很好的平台。

中科院合肥研究院强磁场中心田明亮课题组利用微纳加工技术制备了基于  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  纳米片的 Hall-bar 器件，通过平面霍尔效应的测量，研究了贝里曲率和轨道磁矩对输运现象的影响。实验发现，在低温下弱磁场 ( $B < 7\text{T}$ ) 下，平面霍尔效应表现出二重对称性且电阻各项异性大于零。通过分析，这种  $\pi$  周期的平面霍尔效应可以归因于无能隙的拓扑表面态。而当体系进入极化铁磁态时 ( $B > 10\text{T}$ )，平面霍尔效应的周期从  $\pi$  转变成  $\pi/2$ ，同时幅值由正变为负。为了阐明  $\pi/2$  周期的物理机制，研究人员进行了理论计算。计算结果表明，

$\pi/2$  周期的平面霍尔效应来源于体态 Dirac 电子的拓扑轨道磁矩，且理论结果与实验结果完全吻合。进一步的实验发现，随着温度的升高，由于体态和表面态的竞争，平面霍尔效应会发生非平庸演化。该工作不仅揭示了轨道磁矩诱导的新颖电磁效应，也为磁性拓扑材料在低功耗自旋电子学中的应用提供了指引。



Cite: [M. Wu et al. Nano Lett. 22, 73-80 \(2022\)](#)

更多成果详见: [http://www.hmfl.ac.cn/xwzx\\_2021/jqyw/](http://www.hmfl.ac.cn/xwzx_2021/jqyw/)