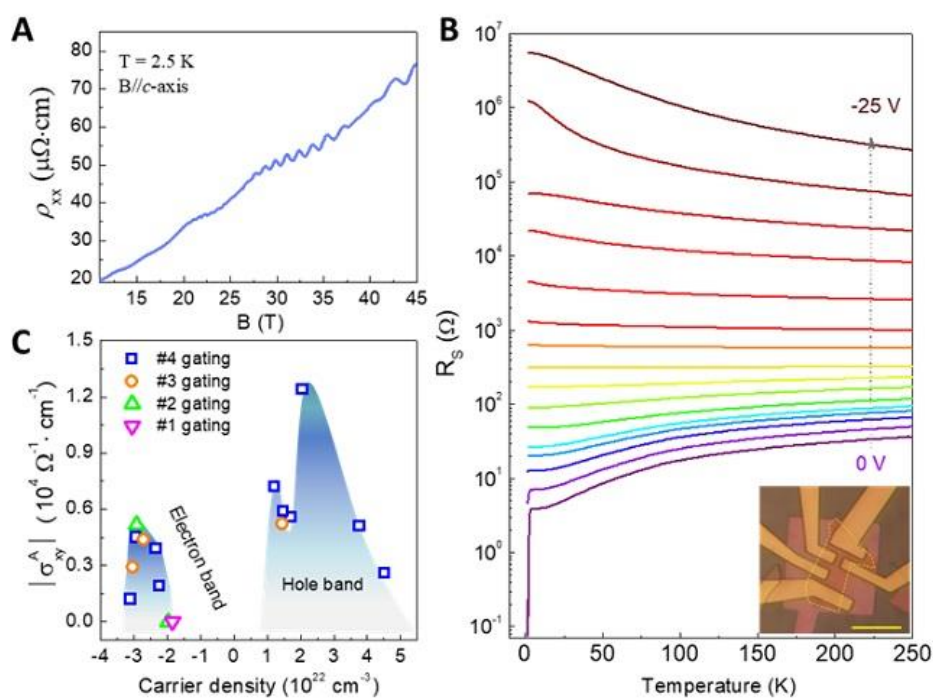


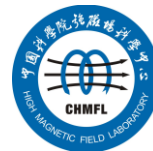
# 国内外强磁场实验室 科研动态

2023 年第一季度



中国科学院强磁场科学中心

2023/5/5



# 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

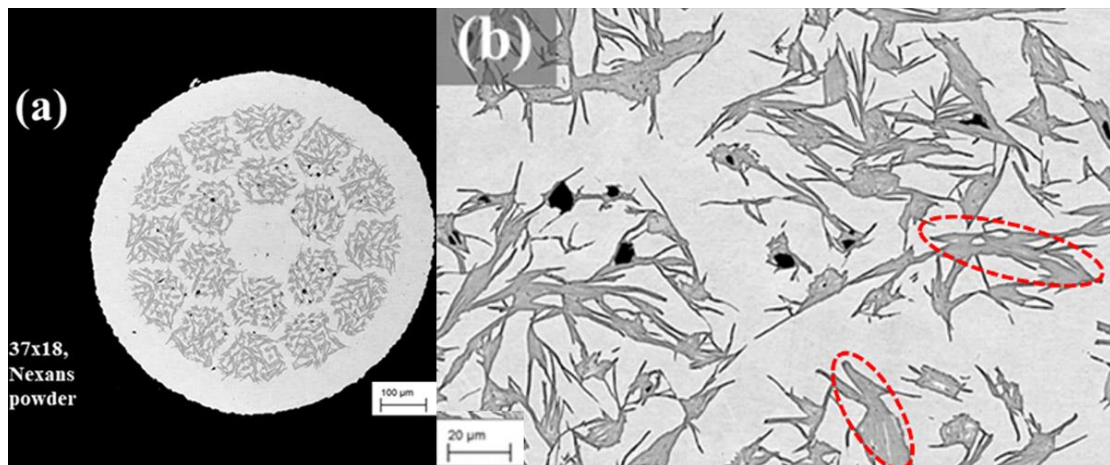
## 1. 美国国家强磁场实验室

- 用于减少磁化损耗的多股绞合圆线

由高温超导材料 Bi-2212 制成的圆线已开发为具有增强的性能，可满足世界上最大的核能项目 (ITER) 的需求。

虽然 MagLab 及其应用超导中心一直致力于改善 Bi-2212 导体的关键性能特性，但这一亮点侧重于减少“磁化损耗”，这是由于导体内部感应的循环电流导致的，以响应不断变化的磁场。通过找到减少 Bi-2212 圆线中超导丝之间互连的方法，MagLab 已经能够将 Bi-2212 磁化损耗降低到等于或低于 ITER 项目规定的最大损耗限值。

这些发现证明 Bi-2212 圆线具有效率和性能的组合，可以使下一代聚变磁体和其他超导磁体进行频繁充放电。这项工作获得了 2022 年 Jan Evetts 奖。

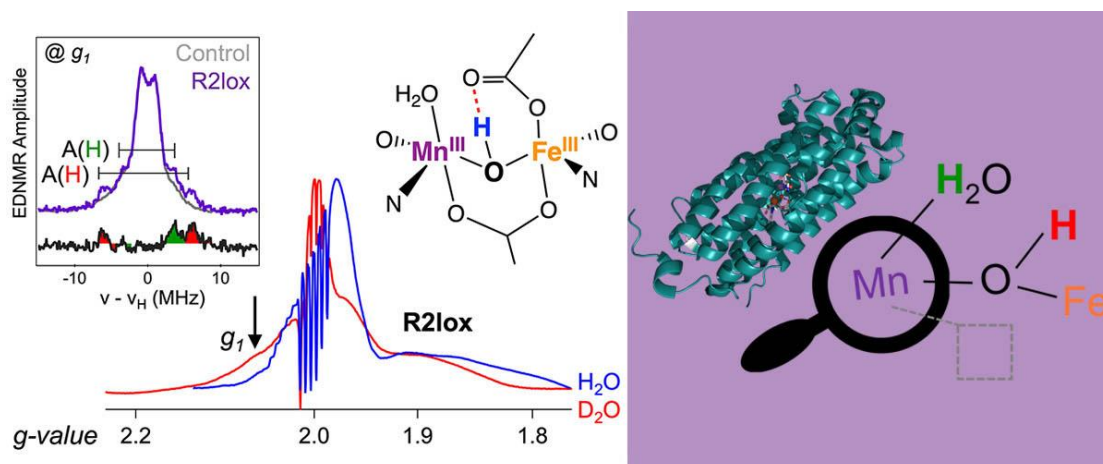


Cite: [Y. Oz et al. Supercond. Sci. Tech. 35, 064004 \(2022\)](#)

- 用高场电子磁共振探测结核金属蛋白

虽然所有生物都需要铁才能生存，但细菌生存的一种方式是在新陈代谢中用其他金属代替铁。在结核病和其他一些病原体中，金属蛋白“R2lox”进化为具有“混合金属”锰铁 (Mn/Fe) 位点，取代了典型的双铁 (Fe/Fe) 活性位点。由于 R2lox 已被确定为结核病的毒力因子，了解其化学性质可为抗击这种疾病提供一种新的且具有潜在价值的方法。

本研究中，MagLab 用户使用高场脉冲电子磁共振研究 Mn/Fe R2lox 蛋白中起重要作用的电子。这些实验提供的极其精细的结构信息揭示了紧挨着锰原子的一个未被占据的原子位点，这表明目标分子可以接近并结合到金属核上。这一发现迈出了理解 R2lox 蛋白在结核病细菌中的化学作用的第一步。



Cite: [E. C. Kisgeropoulos et al. J. Am. Chem. Soc. 144, 11991-12006 \(2022\)](#)

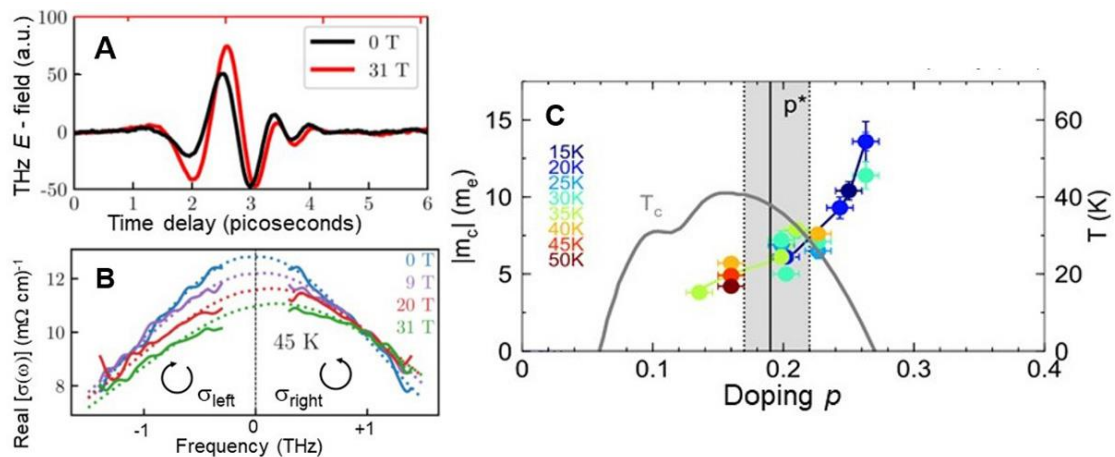
装置：EMR

### ● 脉冲磁场中的超快太赫兹光谱学

支撑高 Tc 超导性的物理机制仍存在广泛争论。过去三十年的研究表明，电子相互作用和相关性在高温超导中起着至关重要的作用。这种相关性导致电荷载流子表现得好像很重——也就是说，是普通电子质量的许多倍。这种“有效

质量”的测量是必不可少的，因为了解质量及其如何随温度和成分而变化可以阐明产生高温超导的物理机制。

电子和其他带电粒子通过遵循圆形轨道（称为“回旋共振”）对磁场做出响应，它们的轨道频率取决于它们的有效质量。MagLab 用户使用远红外（“太赫兹”）光脉冲和脉冲磁场，首次直接测量了高温超导体中载流子的回旋共振，提供了一种新的直接测量有效质量的方法。



Cite: [A. Legros et al. Phys. Rev. B 106, 195110 \(2022\)](#)

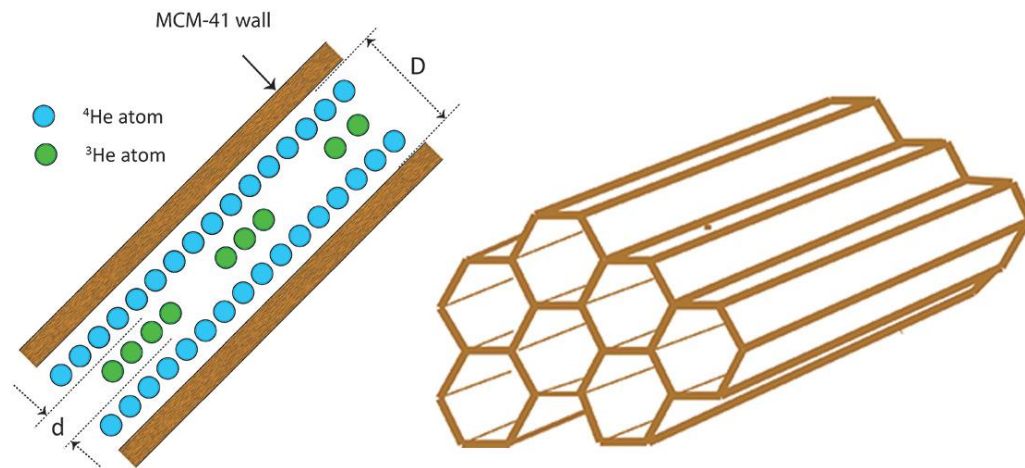
装置：脉冲磁体

### ● $^3\text{He}$ 原子的 Luttinger 液体行为

尽管费米液体理论在理解三维费米子系统的特性方面非常有效，例如金属中的电子和极低温下的液态  $^3\text{He}$ ，但费米液体理论在一维费米子系统的情况下完全失效。相反，一维系统的动力学被认为以 Luttinger 液体理论描述的相互作用为特征。许多实验努力都集中在寻找电子系统中 Luttinger 液体的特征。由于电子是带电粒子这一事实引起的电子系统的不稳定性，Luttinger 液体存在的确切证据仍然难以捉摸。这项用户研究代表了对电荷中性一维费米子系统的

首次动力学研究之一，该系统已充分冷却到超低温，可以检测到 Luttinger 液体的实验特征。

在 MagLab 的 High B/T 设施中使用独特的超低温核磁共振技术来探测由  $^3\text{He}$  原子构建的一维系统，该系统被限制在一个直径只有 1 纳米的一维区域。这是通过排列在中空纳米管内部的惰性  $^4\text{He}$  原子实现的。该实验展示了 Luttinger 液体理论的清晰实验特征，这是一维相互作用费米子的精确量子力学解决方案。



Cite: [\*J. Adams et al. Phys. Rev. B 106, 195402 \(2022\)\*](#)

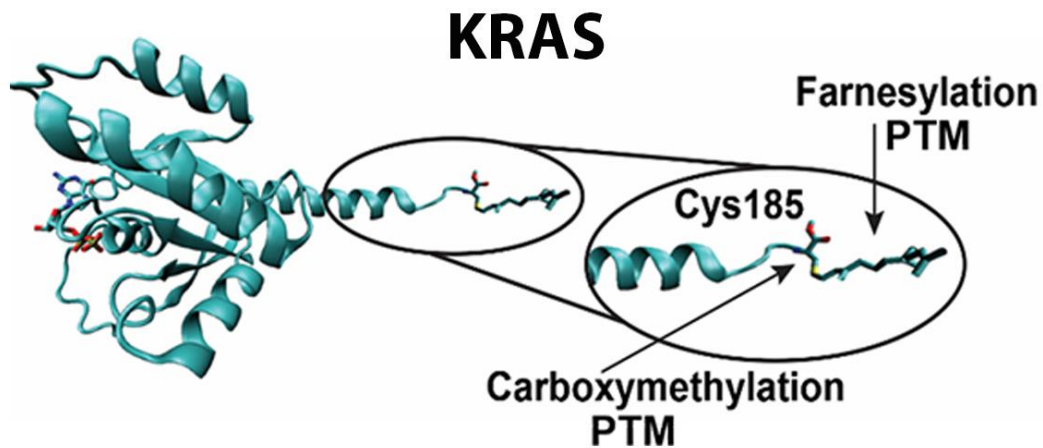
装置: High B/T

### ● 绘制结直肠癌中的 KRAS 蛋白质组图

所谓的“KRAS 基因”产生一种参与细胞分裂调节的蛋白质（称为“KRAS”）。用户使用 MagLab 的 21 特斯拉 FT-ICR 质谱仪测量完整的 KRAS 蛋白分子，获得了结肠癌肿瘤中 KRAS 蛋白的第一个清晰图谱，包括 28 种以前未知的蛋白质形式。

通过测量完整的蛋白质分子，发现了一类新的缺少末端残基 (C185\*) 的 KRAS 蛋白质。通过活细胞成像，研究人员发现剪下的 KRAS 不与细胞膜结合，在细胞膜上它充当调节细胞生长的开关。

在近 30% 的人类肿瘤中发现了 KRAS 基因的突变。KRAS 翻译后修饰 (PTM) 以化学方式改变蛋白质的结构，在调节 KRAS 在细胞内的位置方面起着至关重要的作用。这项工作可能对未来开发以膜结合为目标的抗 KRAS 药物至关重要。



Cite: [Lauren M. Adams, et al. J. Bio. Chem. 299, 102768 \(2023\)](#)

装置：FT-ICR

## 2. 欧洲强磁场实验室

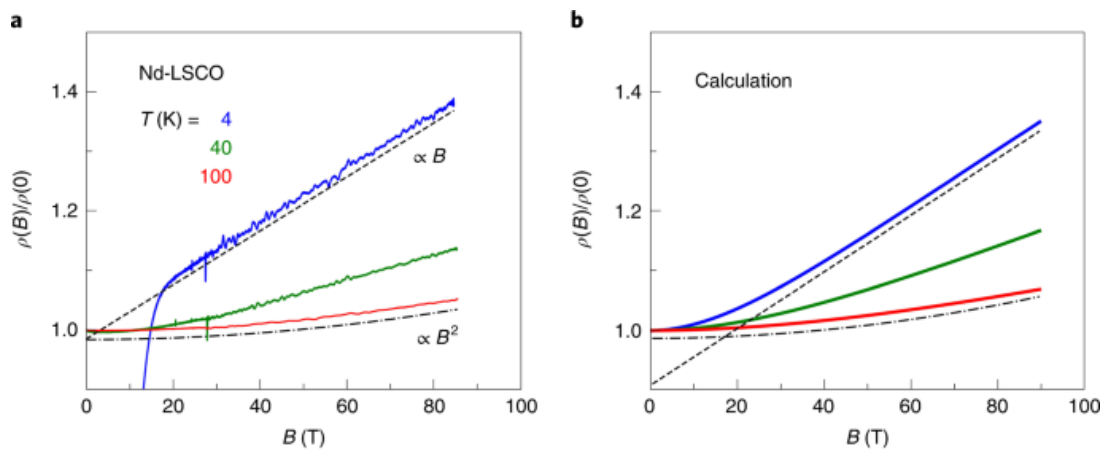
- 强磁场对发生普朗克耗散的电子的影响

在奇异金属中，电阻率在低温下遵循完美的线性温度依赖性。值得注意的是，最近的研究表明，这些奇异金属中的电子以普朗克常数设定的速率相互碰撞。这种被称为“普朗克耗散”的有趣现象似乎是奇异金属的普遍特性，它仍然是一个基本难题。

可是电子如何在磁场的影响下进行普朗克耗散？最近对奇异金属的实验表明，电阻率在低温下表现出磁场线性相关性，这与传统金属预期的标准二次相关性形成对比。这种异常的磁场线性电阻率是普朗克耗散的另一个方面吗？

在图卢兹的脉冲场实验室进行了一系列高场实验，以测量两种铜酸盐超导体（Nd-LSCO 和 LSCO）在空穴掺杂时的电阻率或磁阻（MR）的磁场依赖性。选取  $p = 0.24$  的掺杂这样它们的电子态就处于奇异金属态。磁场施加于垂直铜氧面的方向。

研究人员观察到低温下的磁场线性相关性，在高温下演变成磁场二次相关性。然后计算了传统玻尔兹曼输运理论预期的 MR，发现很好地并且定量地再现了测量的 MR。说明 Nd-LSCO 和 LSCO 中磁场线性 MR 的起源与弹性散射率的强面内各向异性有关。最后得出结论，普朗克耗散在其温度依赖性方面是异常的，但在场依赖性方面不是异常的，并且散射率不具有磁场依赖性。



Cite: [A. Ataei, et al. Nature Phys. 18, 1420-1424 \(2022\)](#)

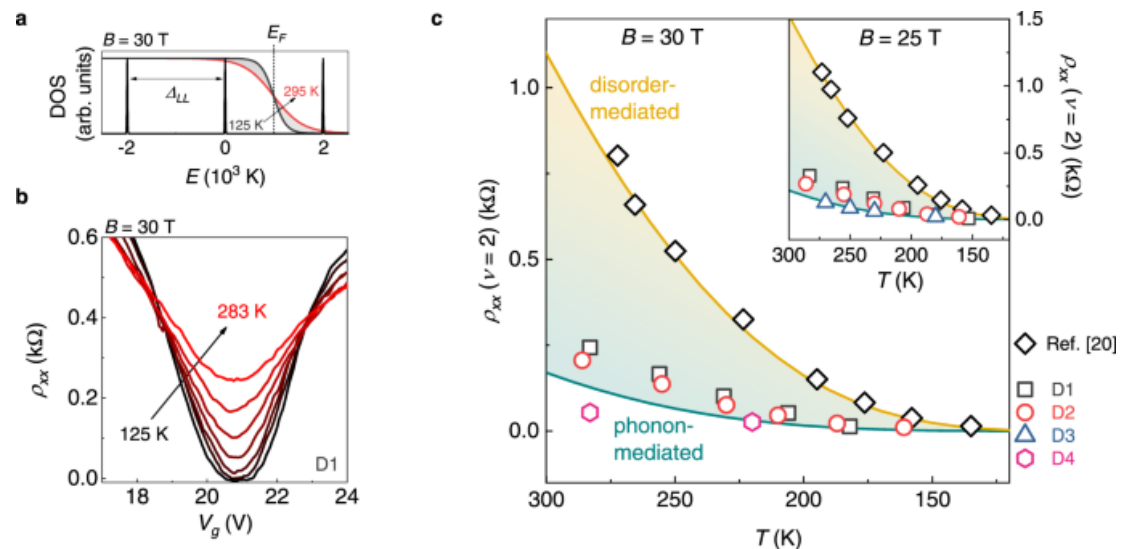
装置：脉冲磁体

### ● 石墨烯室温量子霍尔效应中电-声子散射的优势

二维电子系统中的量子霍尔（QH）效应通常在液氦温度下观察到，其中晶



格振动受到强烈抑制，体内载流子散射以无序为主。然而，由于较大的朗道能级分裂 ( $B=30\text{ T}$  时约为  $2000\text{ K}$ )，石墨烯可以支持高达室温的 QH 效应，伴随着不可忽略的声学声子数量，其波矢与反电子磁长度相称。HFML 的研究人员及合作者证明封装在六方氮化硼 (hBN) 中的石墨烯实现了一种新颖的传输机制，其中 QH 相中的耗散主要由电-声子散射控制。在一组门控器件中研究上至室温的填充因子 2 的热激活输运，表明强磁场行为与其零场输运迁移率相关。通过这种方式，将超洁净石墨烯中广为接受的声子极限电阻率概念扩展到了高场领域。



Cite: [D. Vaquero, et al. Nature Comm. 14, 318 \(2023\)](#)

装置：水冷磁体

### ● 层状反铁磁体 $\text{FePS}_3$ 中磁极化子的高压调谐

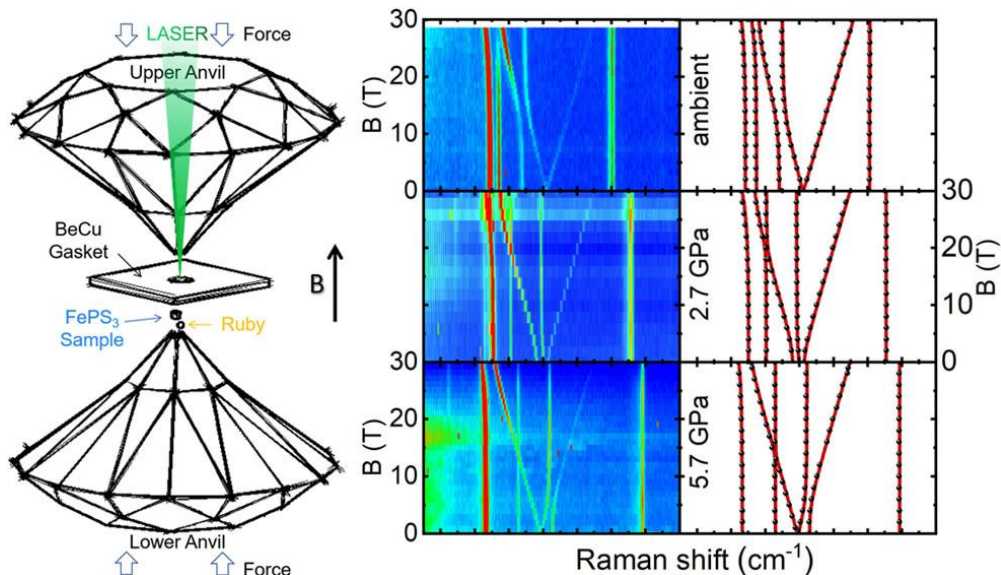
磁性有序固体中的自旋波（磁振子）是自旋系综的集体激发。它们在固体中传播并与主体材料的声子耦合，产生新的准粒子，称为磁控极化子。这种耦合非常重要，因为它定义了磁子的特性，而磁子是自旋电子学的核心。

当两个激发的能量共振时，这种耦合和磁振子-声子相互作用的共振性质得

到最好的证明。在反铁磁材料的情况下，可以通过使用外部磁场调整磁振子能量来实现这种特定条件。然后解除磁振子双简并，由于塞曼的贡献，两个磁振子组分之一的能量随着外部磁场的增加而增加，从而可以探索更高的能量范围，而另一个组分的能量随着磁场的增加而降低。

格勒诺布尔稳态场的团队使用高压环境通过磁振子调整声子谱，以观察一种新的磁振子极化子案例，其中所产生的准粒子涉及声子和双退化反铁磁磁振子。在层状反铁磁体  $\text{FePS}_3$  块体中，他们证明了磁振子能量在一阶近似中不依赖于所施加的静压力，这可能来自于层间的强面内磁交换常数。这种分层磁系统的面内自由度似乎受外部压力的影响非常微弱，而声子对任何变形都非常敏感，并且可以通过磁振子激发进行有效调谐。

在 3 GPa 的压力和共振条件下观察到三种模式的避免交叉。这些不同模的特征可以通过施加外部磁场来确定，外部磁场通过调整磁振子能量来解开混合激发。



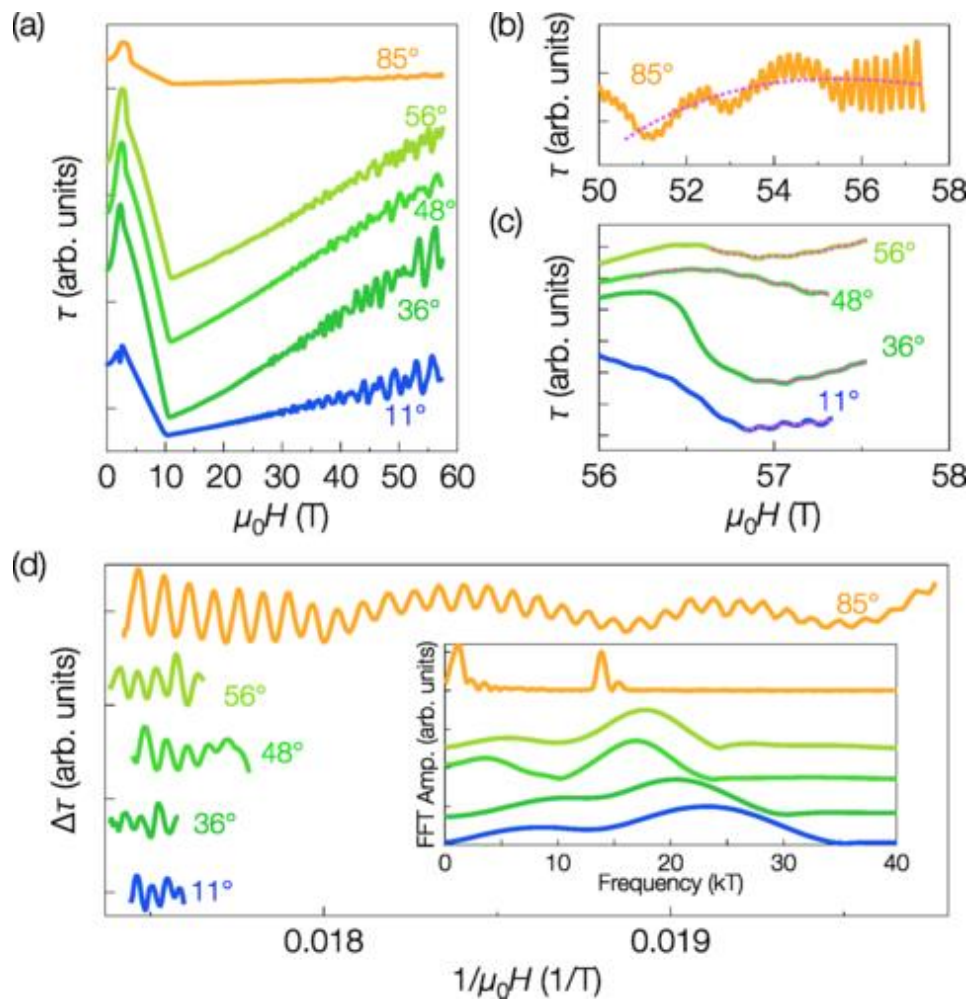
Cite: [A. Pawbake, et al. ACS Nano 16, 12656-12665 \(2022\)](#)

装置：水冷磁体

### 3. 日本强磁场实验室

- 中心对称 skyrmion 承载磁体  $\text{GdRu}_2\text{Si}_2$  中的量子振荡

我们对中心对称的 skyrmion 材料  $\text{GdRu}_2\text{Si}_2$  进行了磁扭矩和电阻率测量，在强制铁磁相中观察到 de Haas-van Alphen 和 Shubnikov-de Haas 振荡。量子振荡频率的角度依赖性可以通过从头算来再现。在双 Q 相中也观察到 de Haas-van Alphen 振荡，其频率不同于强制铁磁相中的频率，表明由于局部自旋和传导电子之间的耦合而导致的费米面重建。基于这些实验结果，讨论了该系统中的磁相互作用。

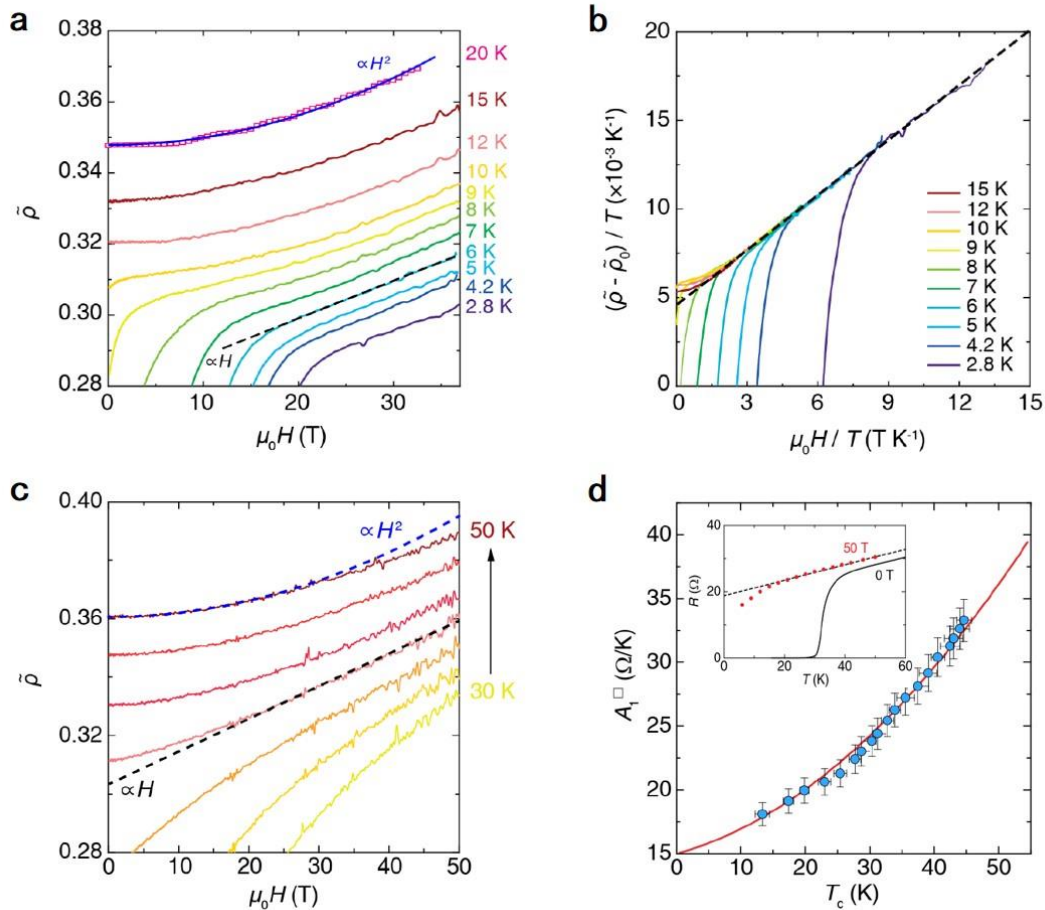


Cite: [N. Matsuyama, et al. Phys. Rev. B 107, 104421 \(2023\)](#)

装置：脉冲磁体

## 4. 武汉脉冲强磁场科学中心

- 铁基超导与奇异金属态间的量化规律



高温超导微观机理是凝聚态物理最具挑战的科学难题之一。当高温超导电性被外磁场破坏后，其正常态电阻率会展现出随温度线性变化（从高温延伸至接近绝对零度）的“奇异金属”行为。物理所金魁、陈其宏研究团队采用脉冲激光沉积法生长了 FeSe 薄膜，并利用离子液体调控技术进行电子掺杂，实现了 FeSe 的超导转变温度  $T_c$  从 8K 至 45K 的连续调控。然后利用脉冲强磁场设施的 50T 强磁场压制超导，首次获得了 FeSe 体系奇异金属态的实验证据：强磁场下正常态电阻率随温度线性依赖、低温下正常态电阻率随磁场线性依赖、以及磁电阻率随温度和磁场的  $H/T$  标度不变行为。通过离子液体精细调控获得了



在很宽的掺杂范围内超导温度  $T_c$  和奇异金属态线性电阻斜率  $A_1$  的系统数据，证实其具有抛物线关系，即  $T_c \propto A_1^{0.5}$  关系对 FeSe 基超导体成立。在同期发表的 Research Briefing 中，Nature Physics 杂志主编 David Abergel 评价“这个工作报道的奇异金属态和超导之间的定量化关系是一个令人兴奋的发现，说明铁基和铜基超导很可能具有相同的机制”。

*Cite: [Xingyu Jiang et al. Nature Phys. 19, 365-371 \(2023\)](#)*

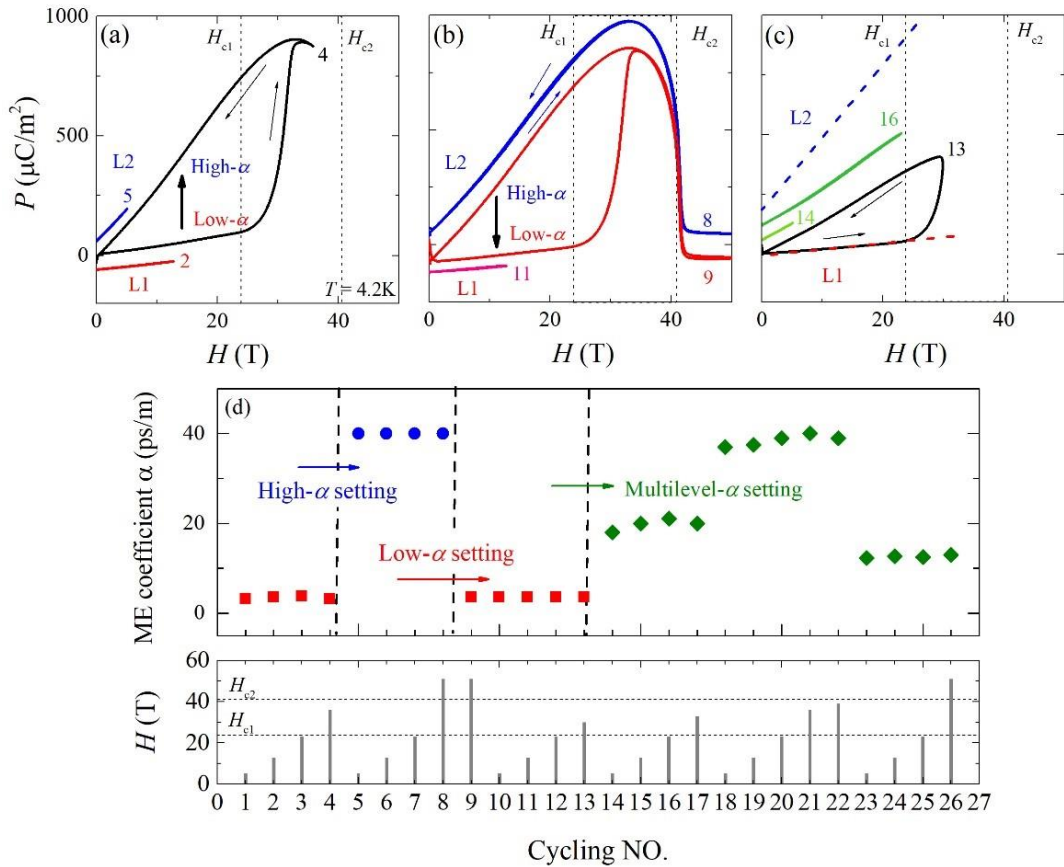
装置：脉冲磁体

#### ● 蜂窝状反铁磁 $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ 中的线性磁电记忆及锻炼效应

磁电效应因展现出丰富的物理和重要的应用前景，是当前凝聚态与材料物理的前沿阵地之一。其中尤为引人瞩目的是线性磁电耦合，即磁化强度与电场，或者电极化与磁场之间线性关联。从应用角度讲，这种简单的线性关联意味着器件中输入信号与输出信号一一对应，是获得高精度读写的基础。从物理层面看，线性磁电往往表现出零剩余电极化（即  $H=0$  时， $P=0$ ），因而难于实现记忆效应等基本功能属性。

近期，华中科技大学物理学院陆成亮教授课题组利用 55T 脉冲场实验条件揭示了  $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$  中存在新颖的线性磁电记忆效应和锻炼行为。该项研究利用脉冲场下的电极化、磁化以及磁弹等测量技术，研究了  $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$  中磁电耦合以及调控。研究发现，体系的电极化与磁场曲线 ( $P(H)$ ) 可以出现显著的回滞现象，即出现两个截然不同的线性磁电系数 ( $\alpha=dP/dH$ )，对应于两种记忆状态。进一步研究表明，线性磁电记忆态能够通过磁场实现有效切换。线性磁电系数的符号也能够通过外加电场进行控制。分析表明， $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$  中线性磁电

记忆效应及锻炼行为与其中的反铁磁畴演化密切相关。



Cite: [Yuting Chang et al. Phys. Rev. B 107, 014412 \(2023\)](#)

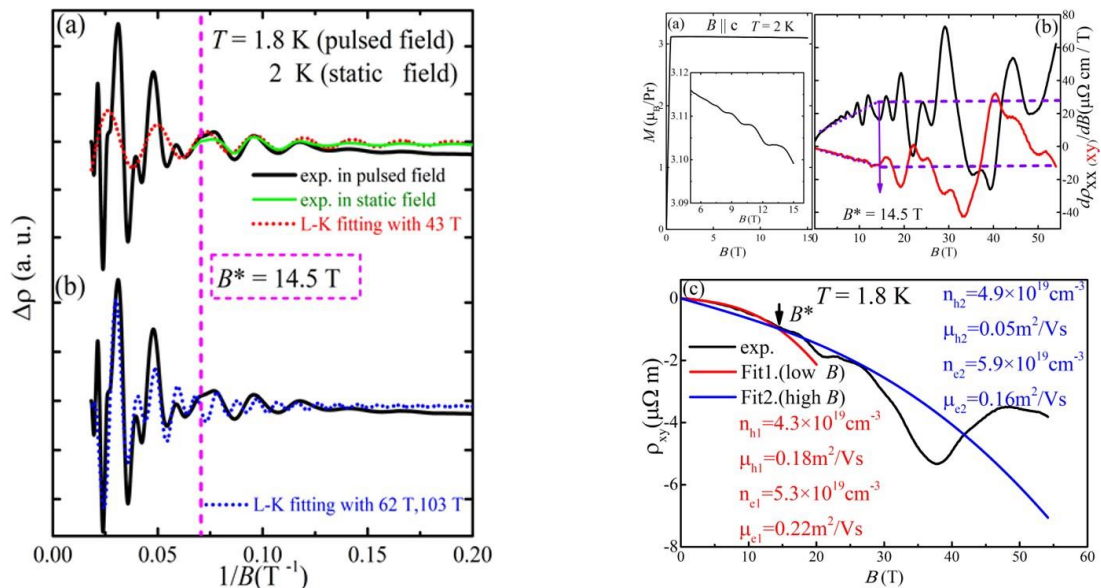
装置：脉冲磁体

### ● 磁场诱导磁性外尔半金属的 Lifshitz 相变研究

Lifshitz 相变是费米面在能带结构或费米能变化的驱动下发生的电子拓扑跃迁。由于这种转变并不一定需要同时的对称性破缺，并且它可以在温度接近零度时发生，也可以被除了温度以外的压力、应变、掺杂、磁场等参数调节，因此可以认为是拓扑量子相变。其中，由磁场驱动的 Lifshitz 相变的例子比较少见，主要是由于实验用的磁场能量尺度 (1-10meV) 远小于大多数金属的特征能量尺度 ( $\sim 10^2$ - $10^3\text{meV}$ )。此前，Lifshitz 相变主要在重费米子材料中被发现，也正是由于重费米子材料中传导电子和局域的 f 电子之间的杂化作用，使

得其具有很小的费米能进而容易被调节。

该研究中，朱增伟教授团队利用脉冲强磁场设施的输运实验平台，系统研究了新型磁性外尔半金属 PrAlSi 的磁阻行为。首先，他们对磁场下的 Shubnikov-de Hass(SdH)振荡进行了分析，分别用不同的频率参数对振荡数据进行拟合，结果表明磁场小于 14.5T 时具有单一频率  $F_1=43\text{T}$ ，磁场大于 14.5T 时产生两个新频率  $F_2=62\text{T}$  和  $F_3=103\text{T}$ 。此外，由霍尔数据进行双带拟合分析，得到的载流子浓度变化也验证了费米口袋的演化。故此，根据对输运测量的分析，在 PrAlSi 中观察到了 Lifshitz 相变，临界磁场为 14.5T。



其次，综合第一性原理计算得到的费米面和角度依赖的 SdH 振荡的分析可知，Lifshitz 相变发生在布里渊区  $\Gamma$ -X 方向且具有外尔特性的费米口袋上（如图 4）。由于 PrAlSi 中 Pr-4f 电子能带远低于费米能级以及其低载流子浓度的特性，排除了塞曼项和近藤效应的作用。另外，Pr<sup>3+</sup>引起的晶体场效应也可能是该磁场诱导 Lifshitz 相变的原因，其物理机制需要更丰富的实验来验证。

该项研究表明，在磁性外尔半金属 PrAlSi 中，随着相变的发生，一个空穴口袋演变为一个电子口袋和一个空穴口袋，说明了范霍夫奇点的存在。PrAlSi



也成为了磁场诱导 Lifshitz 相变的特殊材料，丰富了磁场诱导 Lifshitz 相变的例子，也为进一步研究拓扑、磁性和电子相关性之间的相互作用提供了新的平台。

*Cite: [Lei Wu et al. npj Quan. Mater. 8, 4 \(2023\)](#)*

装置：脉冲磁体

### ● 李亮教授团队获 2022 年湖北省技术发明一等奖

3 月 16 日，湖北省科技创新大会在武汉召开，会上宣读了《湖北省人民政府关于 2022 年度湖北省科学技术奖励的决定》，国家脉冲强磁场科学中心李亮教授牵头完成的“大型永磁电机整体充退磁技术及一体化装备”项目荣获湖北省技术发明奖一等奖。

大型永磁电机是新能源发电、电气化交通和舰船驱动等领域的关键装备。传统“先充磁后组装”磁极制造技术因磁钢间的强磁场力，磁极装配精度低、气隙磁场一致性差，且传统热退磁技术磁极报废率极高、能耗巨大。本项目在国际上首次提出大型永磁电机“无磁装配-整体充退磁”方法，突破大尺寸磁极整体充磁和复杂磁路约束下精准原位退磁的技术瓶颈，研制国际唯一的大型永磁电机充退磁一体化系列装备，充磁体积提高 30 倍，退磁能耗降低两个量级。成果应用于湘潭电机、明阳智慧能源、哈电风能等企业的 2.5-11MW 永磁风力发电机，实现了大型永磁电机制造技术引领和跨越式发展。

该项目由华中科技大学与湘潭电机股份有限公司、明阳智慧能源集团股份有限公司联合完成，获奖团队主要成员包括李亮、吕以亮、韩小涛、丁洪发、朱亮、罗荣锋。该项目是脉冲强磁场技术应用的重要成果，带动了大型永磁电气装备技术和产业的高质量发展，将为我国实现碳达峰、碳中和目标贡献重要力量。



- **“十四五”国家重大科技基础设施脉冲强磁场实验装置优化提升项目初步设计顺利通过教育部评审**

2月28日，教育部在北京组织召开“十四五”国家重大科技基础设施脉冲强磁场实验装置优化提升项目初步设计专家评审会。专家组听取了项目初步设计汇报，审阅了相关材料，经质询、讨论后，对该项目初步设计工作给予了高度评价，同意通过评审。



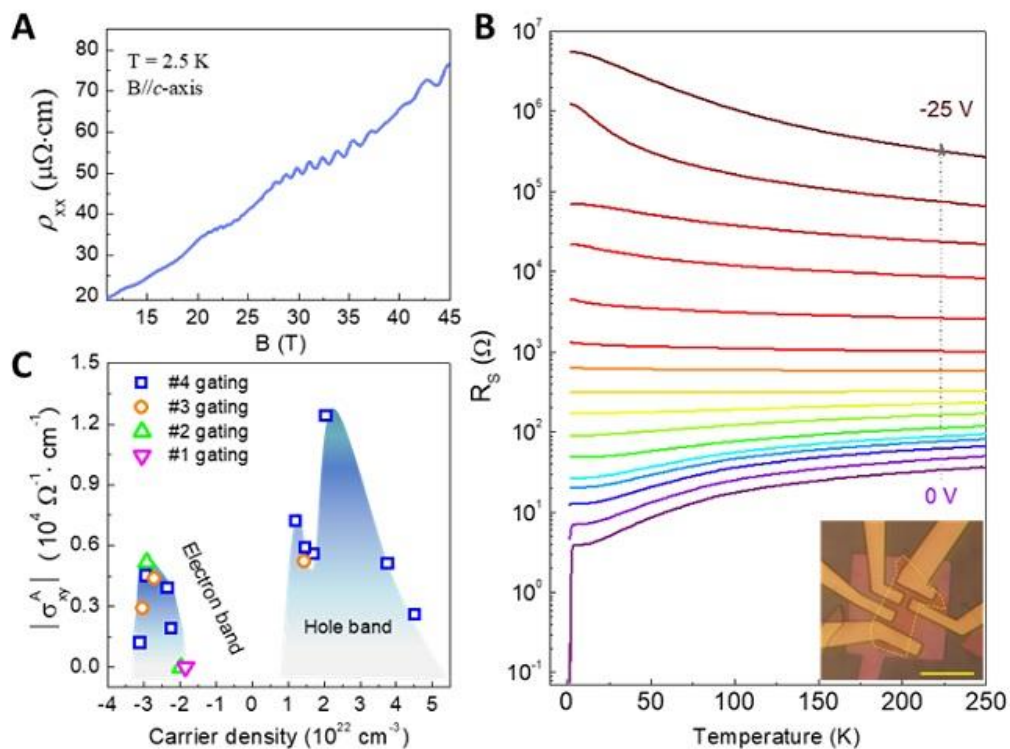
## 5. 中科院强磁场科学中心

- **笼目金属  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  中实现超导-绝缘体相变和反常霍尔效应的电调控**

拓扑笼目金属体系由于电子关联效应以及非平庸的能带结构使其展现出丰富的物性，包括非常规超导电性、电荷密度波以及巨大的反常霍尔效应(AHE)等。然而，目前人们对该体系中巨大反常霍尔效应产生的物理机理以及体系是

否存在量子相变尚不清楚。利用门电压技术实现这些电子关联态以及反常霍尔效应的调控有助于揭示反常霍尔的物理起源。

为此，强磁场中心陈正博博士生长出了高质量的  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  单晶并在混合磁体上观测到清晰的量子震荡。随后，郑国林研究员与澳大利亚皇家墨尔本理工大学谈诚博士利用新发展的固态质子门电压调控技术，系统地研究了不同厚度  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  纳米片在质子门电压调控下的低温输运特性。研究发现质子插层诱导的无序能很快抑制掉超薄  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  纳米片(25 nm 以内)中的超导电性，且电阻-温度 (R-T) 曲线在低温下展现出了半导体特性。而在更大门电压 (>20 V) 下， $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  纳米片在低温下的方块电阻 (sheet resistance) 达到  $10^6 \Omega$  以上，远大于库伯对的量子电阻值( $\sim 6450\Omega$ )，表明  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  纳米片在较强的无序下出现了超导-绝缘体相变。而与传统绝缘体不同的是， $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  纳米片绝缘态的电阻在温度趋近于 0 K 时呈现出饱和的趋势，这种非典型的“绝缘态”可能源于局域的库伯对之间的有限隧穿。





对于较厚的  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  纳米片 (>40 nm), 研究人员发现较小的门电压 (<7V) 不会改变超导转变温度, 即无序效应被极大地抑制。然而, 低温霍尔电阻的斜率在门电压下被连续改变, 表明在较厚的纳米片中施加较小的质子门电压即可实现载流子浓度的大范围调控。我们发现, 体系中巨大的反常霍尔效应发生在布里渊区中 M 点附近的空穴带中 (对应的空穴浓度  $2 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ ), 并且首次在电子带中也观测到大的反常霍尔效应。结合理论分析与计算, 我们发现体系中巨大的反常霍尔效应主要起源于平带中空穴的斜散射。

*Cite: [Guolin Zheng et al. Nature Comm. 14, 678 \(2023\)](#)*

装置: 45T 混合磁体

## ● 二维非晶碳材料的构效关系研究

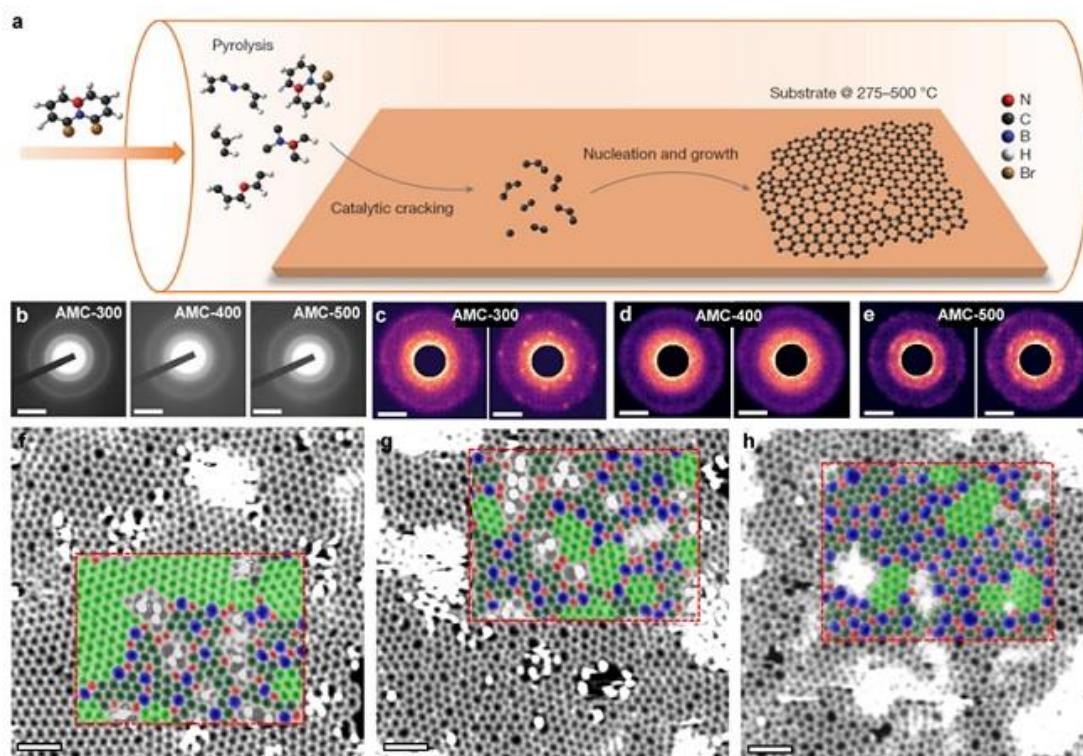
近日, 稳态强磁场实验装置 (SHMFF) 用户北京大学材料学院刘磊研究员课题组联合中科院合肥研究院强磁场中心王钊胜研究员和其他合作者, 在二维非晶碳 (AMC) 样品的研究中借助 SHMFF 实验条件, 首次揭示了二维非晶材料中的构效关系。3月2日, 相关研究成果以 “Disorder-tuned conductivity in amorphous monolayer carbon” 为题在线发表于 Nature 期刊。

结构决定性质, 这一底层认知逻辑和研究范式已被多次验证和使用, 广泛应用于新物理现象的理解和预测、新材料的设计等。非晶态材料中原子的排布无长程序、内部原子无法被直接观测而导致其三维原子结构依然成谜, 原子尺度上的构效关系仍不清楚。因为缺乏对真实非晶结构的理解, 半个世纪前 Philip W. Anderson 把无序度高度凝练成一个物理变量做简单处理。直到现在来看, 探索和表征非晶结构中的无序度依然是材料科学和凝聚态非晶物理最具

挑战性的科学问题之一。针对这一关键科学问题，该研究团队利用“二维材料的原子都暴露在表面，其位置可以被精准解析”的这一特性，来解决非晶材料原子结构解析的难题。

该工作利用一种环状芳香分子（1,8-二溴代 B、N 杂萘）作为前驱体，选用化学气相沉积方法，将金属衬底的温度作为主要调控参数，精确调控分子源热裂解程度及样品的成核生长，得到了不同结构无序度的二维非晶碳（AMC）样品。进一步，利用电子衍射和扫描透射电子显微技术揭示了 AMC 的原子结构，系统分析了 AMC 中程序差异和原子结构的温度依赖特性。

在电学性质的测量中，研究人员发现了 AMC 材料的高度温度依赖特性：在较低温度下（275-300 °C）AMC 具有微弱的中程序而呈现高导电性（方块电阻  $R_s$ : 32k $\Omega$ /persquare）、325 °C 得到的样品则变为绝缘态、进一步升高温度后， $R_s$  与生长温度负相关。研究人员最终实现了 AMC 导电性在 9 个数量级中的连续可调。SHMFF 的变温霍尔测量为确定样品的导电行为提供了重要证据。





研究人员利用密度泛函理论计算和蒙特卡洛计算成功关联了二维非晶碳的原子结构和电学性质，揭示了 AMC 导电性差异的微观机理：AMC-300 与 AMC-400 导电性差异的主要来源是中程序的有无；AMC-400 和 AMC-500 的中程序差异不大，其导电性的差异则主要源于纳米晶区域的密度。为此，研究人员引入了一个新的结构序参量—跳跃岛密度；结合中程序，成功绘制了“微观结构-宏观导电性能”相图。这一发现也表明了非晶材料无序度的复杂性，难以直接用中程序完备描述其构效关系。该工作首次在一个非晶材料实例中实现了精准的构效关系，为二维材料、非晶材料物理及应用等领域提供了全新思路。

*Cite: Huifeng Tian et al. Nature 615, 56–61 (2023)*

装置：超导磁体

#### ● 中等和强稳态磁场生物安全性研究取得系列新进展

近日，中科院合肥物质科学研究院强磁场科学中心张欣课题组在中等和强稳态磁场对多种疾病小鼠模型的生物安全性影响方面取得系列新进展，包括发现中等强度近均匀稳态磁场常年暴露对正常小鼠自然衰老的延缓，对化疗药物顺铂引起的小鼠肾损伤的减轻，发现梯度稳态强磁场暴露对严重 1 型糖尿病小鼠的危害，三项研究结果分别发表在 *Antioxidants* 和 *Zoological Research* 上。

前期，张欣课题组对健康小鼠在稳态强磁场中的安全性进行了探索。课题组成员研究发现健康小鼠暴露于 3.5–23.0 T 稳态强磁场 2 小时和 7.0–33.0 T 稳态强磁场 1 小时都具有较好的生物安全性 (*Neuroimage*, 2019; *JMRI*, 2021)，还发现其对小鼠记忆和认知方面的潜在正面影响和抗抑郁效果 (*European Radiology*, 2022; *JMRI*, 2022)。然而，长时间的稳态磁场



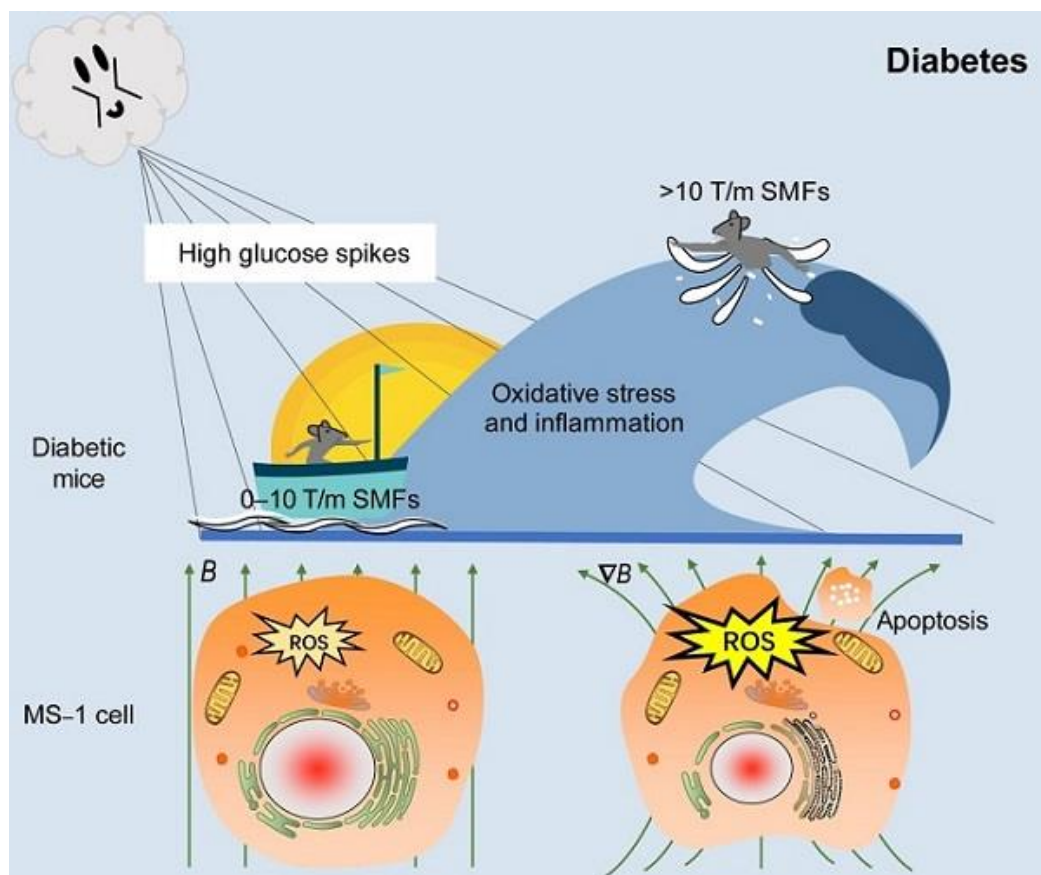
暴露，以及不同病理状态下小鼠的磁场安全界限是否与正常健康小鼠有所不同，这些并不清楚。

因此，课题组成员首先在中等强度近均匀稳态磁场中开展研究，将正常小鼠长期连续暴露在由永磁铁提供的~0.1T中等强度近均匀稳态磁场长达1.7年，发现不仅无不良影响，而且可以改善其生存状态，包括运动功能等，甚至还延缓了其自然衰老的过程，延长了寿命 (Fan et al. *Antioxidants*, 2023a)。此外，同样的中等强度近均匀稳态磁场还可以缓解由化疗药物顺铂在乳腺癌MDA-MB231 荷瘤小鼠体内引起的慢性肾损伤，并改善由顺铂诱发的急性肾损伤 (Yu et al. *Antioxidants*, 2023b)。这两项工作都与中等强度近均匀稳态磁场所引起的细胞和组织内的氧化应激水平降低有关。

另一方面，由于核磁共振成像 (MRI) 技术已被广泛应用于疾病诊断，而稳态磁场强度的提高对 MRI 图像质量的提升至关重要。其中，9.4 T MRI 已在健康志愿者中进行研究，但对糖尿病患者的影响尚不清楚。基于此，研究人员评估了1.0–9.4 T强磁场对两种1型糖尿病 (T1D) 和一种2型糖尿病 (T2D) 小鼠生物安全性的影响，包括>10 T/m和0–10 T/m两种不同梯度，并在细胞水平上对相关生物学机制进行了探索 (Yu et al. *Zoological Research*, 2023)。为了探索磁场安全上限，我们采用了14小时超长时间的磁场暴露。结果显示，持续14小时的梯度稳态强磁场 (1.0–8.6 T) 处理后，T1D和T2D小鼠均产生了不同程度的有害影响，包括脾脏、肝脏和肾脏组织损伤，以及血糖、糖基化血清蛋白、炎症和焦虑水平升高等；而0–10 T/m ~9.4 T的低梯度和近均匀强磁场比较安全，并没有出现以上现象。此外我们还发现，在血糖 $\geq 16.7$  mM的普通T1D小鼠肾脏中，>10 T/m的梯度强磁场增加了组织丙二

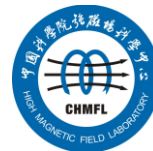
醛水平，减少了超氧化物歧化酶的含量。然而，在血糖 $\geq 30.0\text{mM}$  严重 T1D 小鼠中， $>10\text{ T/m}$  梯度强磁场不仅明显增加多器官损伤，还降低了小鼠存活率。体外细胞研究表明，梯度强磁场增加了小鼠胰岛内皮细胞 (MS-1) 的活性氧水平，并促进细胞凋亡和减少细胞增殖。

这些结果表明，暴露于 $>10\text{ T/m}$  梯度强磁场（比目前临床 MRI 高 35~1380 倍）14 小时（比临床 MRI 显著延长）会对糖尿病小鼠，尤其是严重 T1D 小鼠产生有害影响。相比而言，与 MRI 直接相关的 $\sim 9.4\text{ T}$  近均匀稳态强磁场并无明显不良影响，这为稳态磁场，尤其是高场核磁共振成像 (MRI) 的未来发展和临床应用提供了重要信息。



Cite: [Yixiang Fan et al. Antioxidants 12, 108 \(2023\)](#) ; [Xin Yu et al. Antioxidants 12, 73 \(2023\)](#) ; [Biao Yu et al. Zool. Res. 44, 249-258 \(2023\)](#)

装置：MRI



## ● 应用分子间双量子相干技术在复杂环境下获得磷脂水解的反应动力学信息

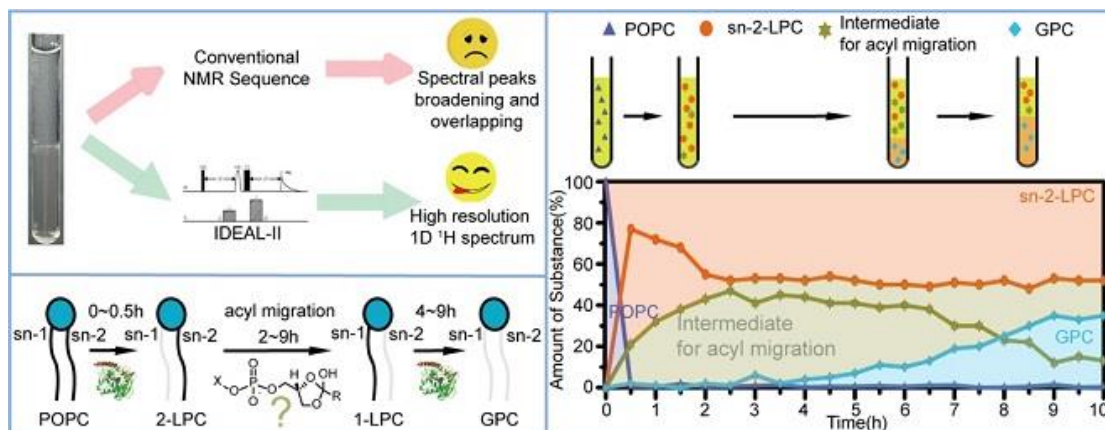
近日，中科院合肥研究院强磁场科学中心王俊峰研究员课题组应用基于分子间双量子相干技术提出的 IDEAL-II 序列，克服了反应过程中产生的复杂相分离环境，探究了水溶液中磷脂水解反应的动力学过程。

磷脂是指含有磷酸的脂质，而卵磷脂为取代基团为胆碱的甘油磷脂，卵磷脂是细胞膜、肺泡表面活性物质、脂蛋白和胆汁的重要组成成分，也是溶血磷脂酰胆碱、磷脂酸、甘油二酯、溶血磷脂酸和花生四烯酸的来源。近年来，卵磷脂及其水解产物在食品、化妆品、医药等领域受到了越来越多的关注和应用。然而由于卵磷脂和其水解产物的复杂性，对天然磷脂的组分进行定性和定量分析是非常具有挑战性的。核磁共振技术在实时动态跟踪水解过程并进行定性和定量分析方面具有其独特的优势。核磁共振波谱由于其非侵入性和揭示分子/原子水平信息的能力，在当代生物学研究中得到了广泛的应用。一般来说，核磁共振波谱研究要求磁场具有很高的均匀性。而磷脂水解体系受到内部宏观磁化率不均匀的影响，其核磁共振谱线将扩展和重叠，直到整个光谱成为一个大的包络线，失去了提供有用信息的能力，如化学位移或 J 耦合信息。随着水解反应的进行，整个反应体系的宏观磁化率不断发生变化，对磁场产生进一步的干扰。因此，直接进行常规的一维核磁共振实验很难获得卵磷脂水解过程的高分辨核磁共振谱。

近年来，由分子间远程偶极相互作用所产生的分子间多量子相干 (iMQCs) 已被证明能够在非均匀场中获得高分辨率光谱。基于 iDQC 提出的 IDEAL-II 序列可以在非均匀场中通过 2D 采集获得 1D 高分辨液体 NMR 谱图。研究团队结合强磁场核磁共振谱仪的优势，展示了 IDEAL-II 实时动态跟踪 PLA1 催化

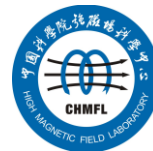


POPC 水解过程的一系列 1D 氢谱，在对 POPC 的质子谱进行了谱峰的归属后，对关键质子峰的峰面积进行了计算和统计，并通过质谱的佐证，提供了 POPC 水解过程的关键步骤和时间节点。基于宏观观察、核磁谱线的半高宽和动态光散射提供的数据，我们首先验证了 POPC 水解体系的非均匀环境的变化过程，而后对动态跟踪反应过程获得的核磁共振数据进行分析。我们发现在水解反应开始的前半个小时，POPC 的 sn-1 位点被 PLA1 催化断裂，形成了 2-LPC 和棕榈酸，此时胶束的结构相对稳定；随后 2-LPC 上的 sn-2 位点上的支链通过酰基转移作用缓慢地转移到 sn-1 位点上形成 1-LPC，该过程在 2-3 小时后达到平衡；然后 1-LPC 上的 sn-1 位点再次被 PLA1 水解生成 GPC 和油酸，LPC 含量的降低和油酸浓度的升高开始破坏胶束的结构，逐渐形成较大的六边形聚集体；此时亲水的 GPC 头基的产生破坏了脂滴周围的乳化界面；随着 GPC 和油酸的积累，水相开始从乳液中分离；9 小时后反应停止，这可能是由于 PLA1 失活或 PLA1 在脂质上相浓度过低所致。研究团队利用核磁共振技术在复杂环境下获得了磷脂水解过程的反应动力学信息，该项研究结果不仅填补了磷脂水解过程 1H NMR 谱数据的空白，而且为其他复杂的异质体系的动态分析提供了有效的思路。



Cite: [Changhao Wang et al. LWT 177, 114592 \(2023\)](#)

装置：NMR



- **“稳态强磁场实验装置实现重大突破” 入选两院院士评选的“2022 年中国十大科技进展新闻”**

2023 年 1 月 12 日，由中国科学院、中国工程院主办，中国科学院学部工作局、中国工程院办公厅、中国科学报社承办，中国科学院院士和中国工程院院士投票评选的“2022 年中国十大科技进展新闻、世界十大科技进展新闻”在京揭晓。

“国家重大科技基础设施‘稳态强磁场实验装置’实现重大突破”成功入选“2022 年中国十大科技进展新闻”。

此项年度评选活动至今已举办了 29 次评选结果经新闻媒体广泛报道后，在社会上产生了强烈反响，使公众进一步了解国内外科技发展的动态，对普及科学技术起到了积极作用。

稳态强磁场是物质科学研究需要的一种极端实验条件，是推动重大科学发现的“利器”。创造世界纪录的混合磁体吸引了更多大学和科研院所的高端用户来该实验平台上开展前沿科学研究，自去年 8 月中旬以来，混合磁体已运行 347 小时，为复旦大学、中国科学技术大学、上海大学等高端用户提供了最高场极端实验条件，助力更多学科领域的科学家们发现物质新现象、探索物质新规律。

《两院院士评选“2022 年中国/世界十大科技进展新闻”揭晓》报道链接：

<https://news.sciencenet.cn/zt/ss2022>