

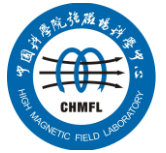
# 国内外强磁场实验室 科研动态

2020 年第三季度



**中国科学院强磁场科学中心**

2020/10/13



# 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

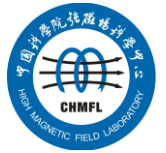
National High Magnetic Field Laboratory 又称 MagLab，是目前世界上规模最大，实验设施最全，用户最多的强磁场实验室。其稳态场部分位于 Tallahassee，脉冲场部分位于 Los Alamos，另有一个 high B/T 组位于 Gainesville。MagLab 于 1994 年建成并不断升级改造，创造并保持了多项世界纪录。

## 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

- **MagLab 获 150 万资助开发更优质低温超导材料**

美国能源部已向 MagLab 的科学家提供 150 万美元，以开发更高效，更稳健的超导材料。

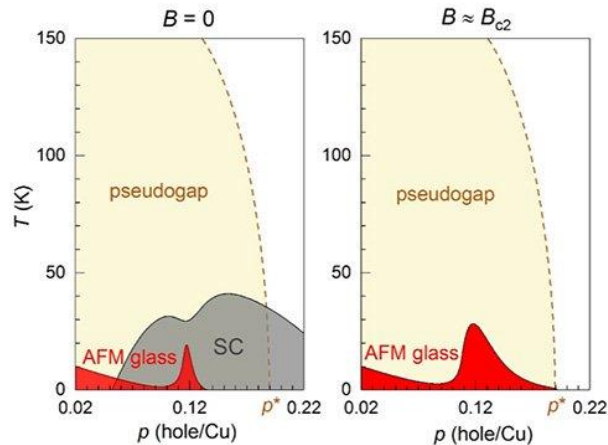
这项为期三年的经费使研究团队能够继续进行由美国能源部资助 Nb<sub>3</sub>Sn 超导材料研究。在之前的研究中，他们通过掺入 Hf 和 Zr，使得 Nb<sub>3</sub>Sn 导线在 16 T 磁场下的电流密度翻倍。该项目负责人 David Larbalestier 今年 9 月获得了英国皇家工程院院士。



- **铜氧化物超导体中的隐藏磁性**

对铜氧化物 La<sub>2-p</sub>Sr<sub>p</sub>CuO<sub>4</sub> 的研究表明，特定形式的磁性（反铁磁玻璃相与赝能隙）之间存在联系。这些高场实验显示，尽管该化合物是金属性的，但其磁性却不像普通金属，而更接近于绝缘体。

这项工作还指出，该玻璃态磁性可能会影响赝能隙边  $p^* \sim 0.19$  附近的其他高场测量。

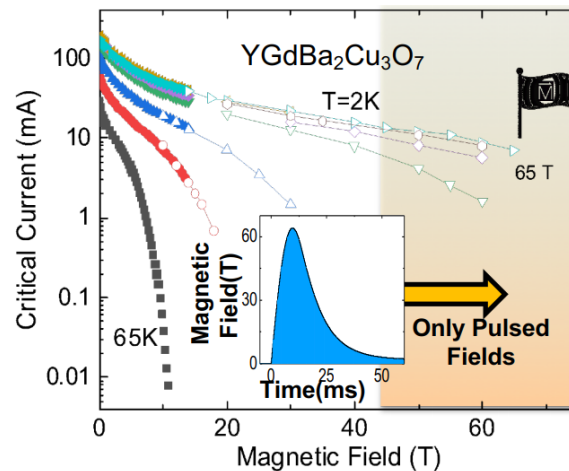


Cite: [M. Frchet, et al. Nature Phys.16, 1064–1068 \(2019\)](#)

装置：混合磁体

### ● 智能非线性运输技术拓展超导前沿研究

MagLab 科学家开发了一种新技术，用于表征超导体可以承载多大电流以及可以产生多高磁场，这是了解和利用超导材料的重要信息。此技术在 50 毫秒脉冲时间的 65 T 脉冲磁体上使用，并且可以根据材料的变化特性即时调整。



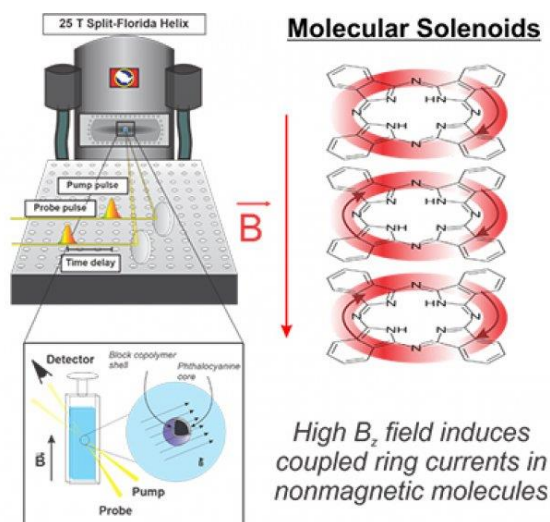
以往超导材料的运输研究如遇电压的突然变化会损坏样品，因此只能在很小的电流下进行。为解决这一问题，MagLab 的科学家开发了一种叫做 Field Programmable Gate Arrays 的技术，可在 10 纳秒时间内响应，调节样品电压，特别适用于脉冲磁场下的测量。

Cite: [\*M. Leroux, et al. Phys. Rev. Appl. 11, 054005 \(2020\)\*](#)

装置：脉冲磁体

### ● 在非磁性芳香分子中的感应电流

MagLab 用户在强磁场下使用超快光谱法，发现环流电子会影响“非磁性”芳香族发色团中电子的性质，该发色团是导致其颜色变化的主要因素。尽管单个分子的这种影响很小，但研究人员从理论上预测并实验观察到，芳香族发色团可以充当“分子螺线管”，以增强/消除环流的磁场效应，具体取决于分子间取向。

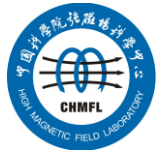


Cite: [\*B. Kudisch, et al. PNAS 117, 11289 \(2020\)\*](#)

装置：25T 分裂磁体

### ● 氙核磁共振可检测癌症代谢

新技术氙原子磁共振可通过检测葡萄糖的代谢速率来区分癌细胞和正常肝细胞，此技术可替代高辐射的 PET 扫描。



葡萄糖内的代谢转化会导致生成氘代水（HDO），因此 HDO 的产生与葡萄糖摄取密切相关。用磁共振来检测 HDO，就可以通过不同的葡萄糖消耗率来轻松区分健康肝细胞和癌性肝细胞的代谢。

*Cite: R. Mahar, et al. Sci. Rep. 10, 8885 (2020)*

装置：NMR

## 2. 欧洲强磁场实验室

### ● HFML-FELIX 获国家路线图资助

HFML-FELIX 获得了 1510 万欧元的资助，用于开发先进的测量手段和新的实验技术。该资助是荷兰研究委员会（NWO）《国家大型研究设施路线图》的一部分，该计划旨在鼓励建设或翻新具有国际吸引力的研究设施。该资助款主要面向四个方面：

- 1) 先进成像：为 HFML-FELIX 的最新技术如红外质谱和磁悬浮技术增加显微成像能力。（合作方：拉德堡德大学分子和材料研究所、马斯特里赫特大学）
- 2) 超快动力学：利用超高强度的自由电子激光和高场磁体建立太赫兹动力学实验平台。（合作方：拉德堡德大学分子和材料研究所、代尔夫特大学）
- 3) 独特的样本环境：建立综合多种极端条件的实验能力，即在同一个实验中集合强磁场、强辐射、超低温和超高真空等多种极端条件。（合作方：拉德堡德大学分子和材料研究所、Leiden Cryogenics B.V.公司、

阿姆斯特丹大学、荷兰基础能源研究所、格罗宁根大学、莱顿大学、特文特大学)

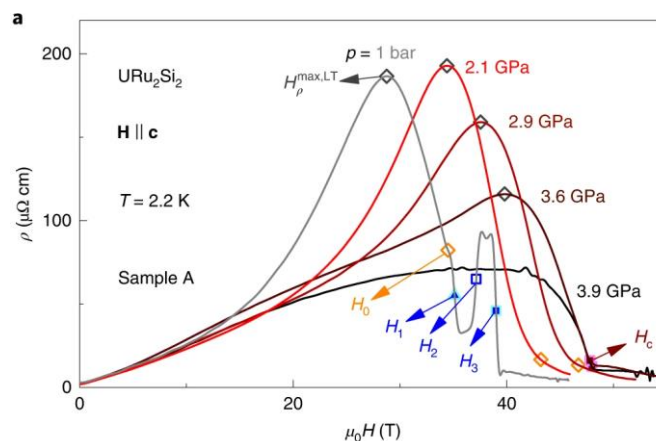
- 4) 优化磁体和激光装置的操作：从质量、灵活性和操作持续时间等方面改善整体用户体验。

### ● URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> 中的场致重入隐藏序

关联电子顺磁材料 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> 中的隐藏序 (HO) 相的神秘面纱尚未解开。解决这个问题的一种策略是在该相与相邻的磁有序相之间的微妙竞争中寻找线索。现已证明, 当加压且沿易磁化轴 c 施加磁场时, 该金属可获得稳定的长程反铁磁序。但是, 压力-磁场相图中 HO 相的完整边界至今还没有确定。在这项工作中, 在最高 60 T 的磁场和 4 GPa 的压力下测量了 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> 磁阻, 从而获取其三维磁场-压力-温度相图。结果表明不同的电子相互之间存在着微妙的竞争, 主要特征是在高压下磁场感应的自旋密度波相消失和 HO 相的产生。

*Cite: W. Knafo, et al. Nature Phys. 16, 942–948 (2020)*

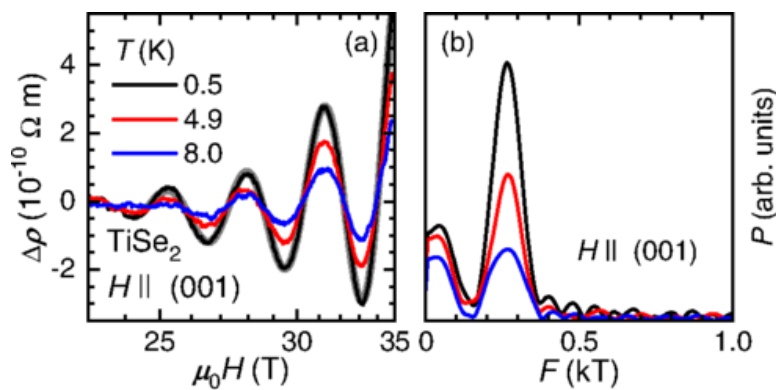
装置：脉冲磁体



### ● TiSe<sub>2</sub> 自旋密度波态中的费米面重构



来自英国的用户研究了  $\text{TiSe}_2$  电荷密度波 (CDW) 相变前后载流子浓度和迁移率的演变。利用荷兰强磁场实验室 35T 水冷磁体上的  $^3\text{He}$  转角样品杆进行的量子振荡和磁输运测量结果表明, 在低温下, 电学性质由电子口袋主导, 而在室温下, 空穴口袋也有很大贡献。通过双带分析和科勒分析获得了一个突变的费米面重构以及电子和空穴迁移率的最小值。迁移率的最小值与软化的 CDW 模散射有关。由于载流子浓度和动力学受 CDW 和相关波色模的控制, 因此  $\text{TiSe}_2$  可作为原型系统来研究 CDW 相变下的费米面重构。



Cite: [P. Knowles, et al. Phys. Rev. Lett. 124, 167602 \(2020\)](#)

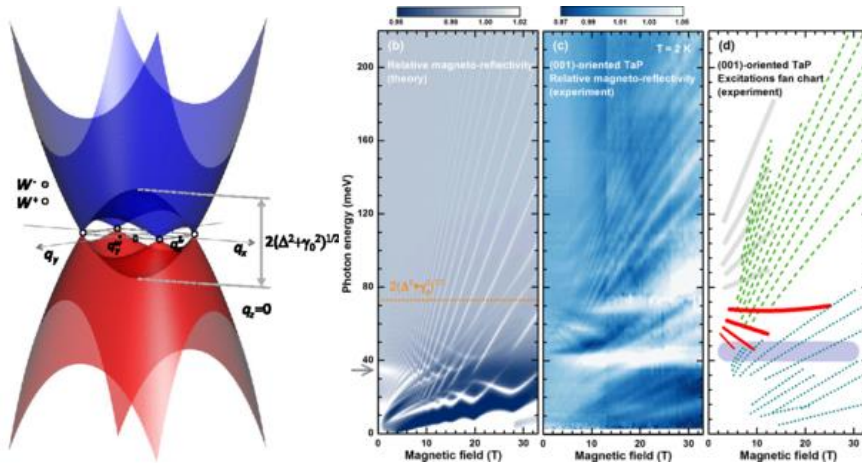
装置：水冷磁体

### ● 用磁光研究 Weyl 半金属的能带结构

单磷族的三维 Weyl 半金属 ( $\text{TaAs}$ ,  $\text{NbAs}$ ,  $\text{TaP}$  和  $\text{NbP}$ ) 是锥形能带材料的代表。这些材料中 Weyl 锥体出现四次对称, 这是由于在自旋轨道相互作用下布里渊区的特定位置出现了能带反转。这也会导致能带的局部极值, 以及如图所示的两种鞍点。

最近来自法德的研究人员广泛合作, 在理论建模的支持下对  $\text{TaP}$  进行了高场实验。结果表明, 其能带结构的特定特征可以通过磁光来追踪。最值得注意的是

的是，能带反转是一系列能级间激发的原因。随着磁场的增加，该能量降低。

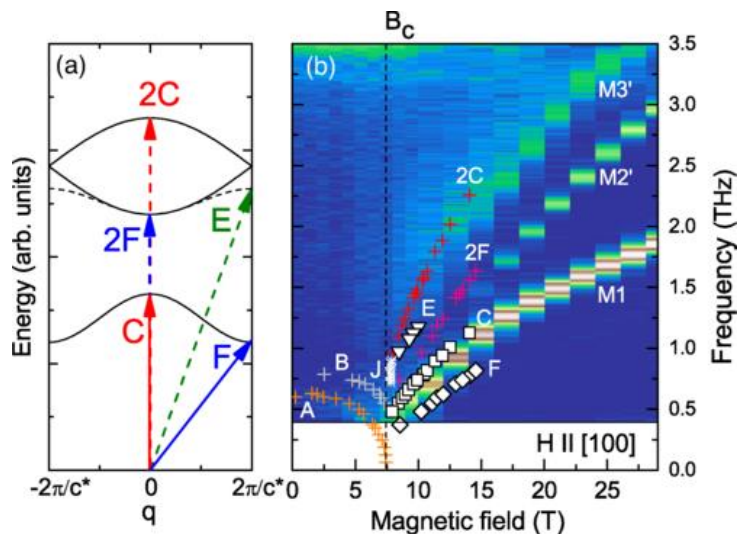


Cite: *S. Polatkan, et al. Phys. Rev. Lett. 124, 176402 (2020)*

装置：水冷磁体

●  **$\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> 高场相的磁激发**

德国强磁场实验室的研究人员在脉冲磁体上对  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> 的高质量面内取向单晶进行了全面的电子自旋共振 ( ESR ) 研究，重点是其高场自旋动力学。将该数据与最新的非弹性中子和拉曼散射数据相结合，可以确定观察到大部分激发。最重要的是获得了确凿的证据，表明低温高场 ESR 响应主要由单粒子和双粒子过程控制，其元激发为磁振子。



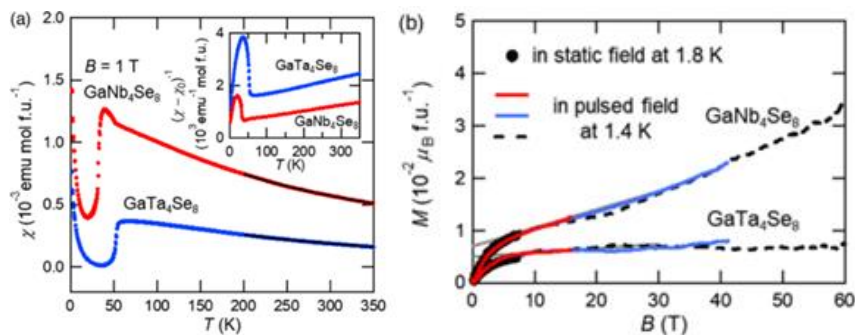
Cite: [A. N. Ponomaryov, et al. Phys. Rev. Lett. 125, 037202 \(2020\)](#)

装置：脉冲磁体

### 3. 日本强磁场实验室

#### ● $\text{GaM}_4\text{Se}_8$ (M=Nb, Ta)的非磁基态和四级相

研究了立方尖晶石硒化物  $\text{GaM}_4\text{Se}_8$  的结构和磁性，这可能是一种  $J_{\text{eff}} = 3/2$  Mott 绝缘体。有效磁矩的减小表明存在相当大的自旋-轨道耦合。 $\text{GaNb}_4\text{Se}_8$  和  $\text{GaTa}_4\text{Se}_8$  分别由正交相和四方相转变为非磁基态，它们至少能抵抗 60 T 磁场。在  $\text{GaNb}_4\text{Se}_8$  的磁性转变之前观察到立方相转变，表明存在理论预言的四极有序相。



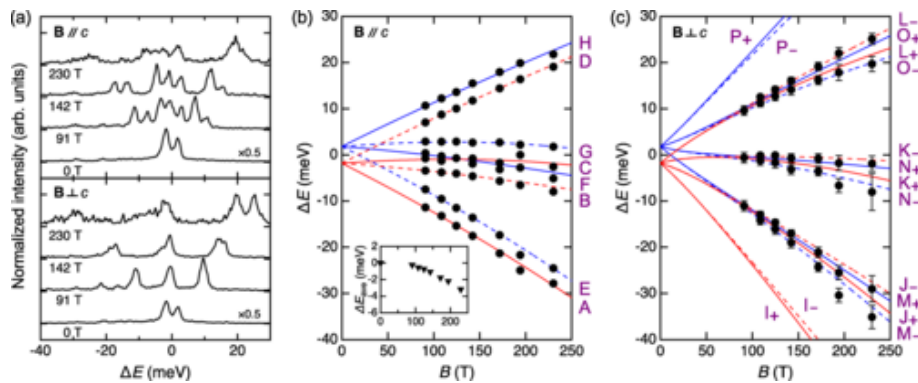
Cite: [H. Ishikawa, et al. Phys. Rev. Lett. 124, 227202 \(2020\)](#)

装置：脉冲磁体

#### ● 红宝石在超高磁场下的 Paschen-Back 效应

东京大学兆高斯实验室通过磁光致发光测量，在高达 230 T 的超高磁场中研究了红宝石 R 线的塞曼光谱。观察到的塞曼模式表现出高于 100 T 的非线性行为，这证明了先前报道的  $B \perp c$  几何的 Paschen-Back 效应的分解。采用了晶

体场多重态理论，包括立方晶体场，三角晶体场，自旋轨道相互作用和塞曼相互作用，发现 R 线的非线性分裂是由于  ${}^2E$  和  ${}^2T_1$  态之间的杂化，这导致了塞曼能级随轨道角动量的量子化。结果表明，在红宝石中实现各晶体场之间的精细能量平衡为观察极高场 Paschen-Back 效应提供了独特的机会。



Cite: *M. Gen, et al. Phys. Rev. Research 2, 033257 (2020)*

装置：破坏式脉冲磁体

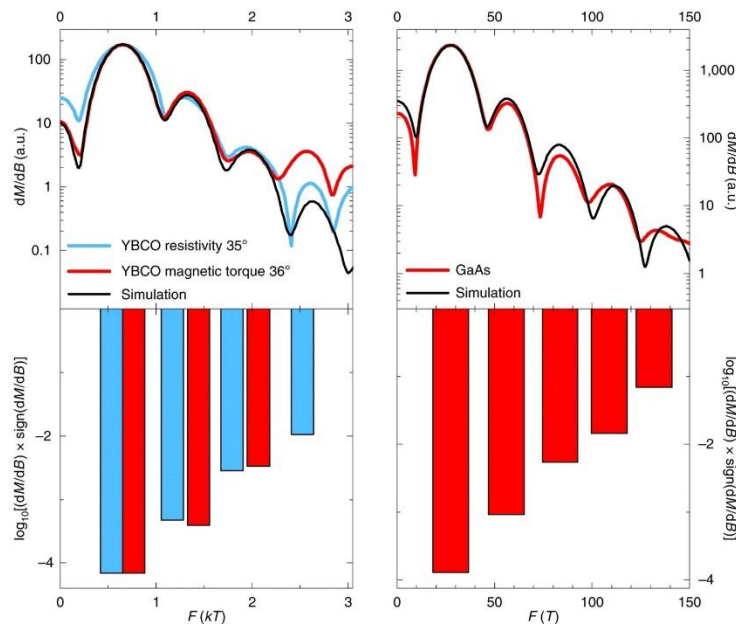
## 4. 武汉脉冲强磁场科学中心

### ● 用户英国剑桥大学团队在高温超导研究中取得新进展

了解赅能隙中缺失的反节点电子激发，对于揭示欠掺杂铜基高温超导体的物理特性至关重要。然而，迄今为止进行的大多数高温实验，都无法辨别反节点状态是由于其高温衰减而变得不可观察，还是由于打开能隙而消失。为了分辨这两种情况，该研究利用 PDO 技术（一种近邻非接触电阻测量方法）在具有更低杂质的新样品中开展量子振荡研究，检查在掺杂不足的铜基中仅占据了布里渊区的 2% 的小费米面口袋是否孤立地存在于大多数跨越反节点的完全间隙的状态密度中，或者是否在热力学上与无能隙的反节点态发生耦合。研究发现，

与小费米口袋相关的量子振荡表现出一个孤立的二维费米面口袋的锯齿波形特征，由此表明反节点态被遍布整个布里渊区的硬能隙所破坏，这对能隙区域中几乎整个布里渊区的准粒子消失的潜在成因进行了有力的限制。

中心用户英国剑桥大学 Suchitra E. Sebastian 教授团队借助脉冲强磁场设施的 60T 强磁场和低温实验条件，利用 PDO 技术测量了 YBCO 铜基超导体的非接触电阻，得到了 YBCO 中的量子振荡和费米面的信息，为揭示铜基超导体中小费米口袋相关的量子振荡具有一个孤立的二维费米面口袋特征提供了实验依据。



*Cite: M. Hartstein, et al. Nature Phys. 16, 841–847 (2020)*

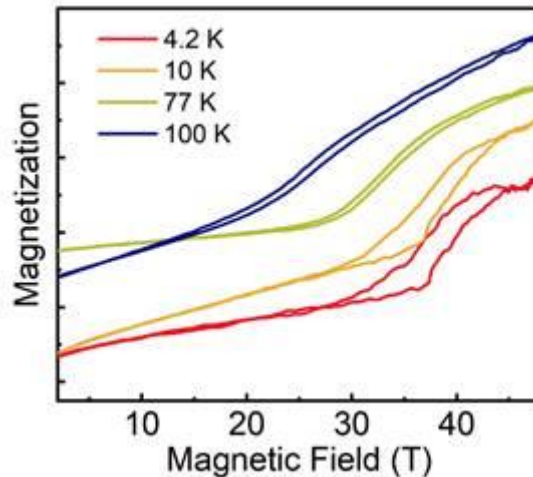
装置：脉冲磁体

## ● 二维 $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 磁性调控

近年来，二维磁性材料因在自旋电子学和磁存储等方面具有重要应用前景受到广泛关注。已发现的本征二维铁磁性体临界温度普遍非常低，因此，如何提高现有二维磁性材料的居里温度对其在磁存储器件中的应用十分关键。相比

于外场调控，铁磁/反铁磁界面近邻效应调控是一种无需额外能耗的有效调控方式。

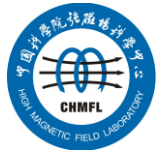
该工作系统研究了机械剥离的二维  $\text{FePS}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  晶体及其异质结的磁学性能。结果显示，双层反铁磁/铁磁异质结和三层反铁磁/铁磁/反铁磁异质结由于近邻耦合效应表现出交换偏置现象，其矫顽场相较于纯的  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  增强一倍以上，居里温度提高了 30K 左右。该研究表明，铁磁/反铁磁近邻耦合效应可以有效调控二维材料的磁性，为未来研制基于二维磁性材料的室温自旋电子学器件提供了一种新的方向。



该项研究的实验基于国家脉冲强磁场科学中心的低温显微磁光克尔测量装置和脉冲强磁场磁特性测量装置完成。其中，利用磁特性测量装置获取了  $\text{FePS}_3$  晶体的磁相变特性数据，为建立  $\text{FePS}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  界面耦合模型提供了有力的实验支撑。

*Cite: L. Zhang, et al. Adv. Mater. 32, 2002032 (2020)*

装置：脉冲磁体



## 5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场中心在“磁力刀”抑制肿瘤生长领域取得新进展
- 强磁场科学中心在手性磁孤子研究中取得进展
- 强磁场中心盛志高研究团队发明极化二极管
- 强磁场中心在高压下的新物态研究方面取得新进展
- 强磁场中心张发培课题组在有机半导体磁诱导生长和性能研究方面取得新进展
- 强磁场中心成功研制首个高场磁体中可旋转磁力显微镜
- 强磁场科学中心举行强光磁预研项目课题任务书签订仪式

详见：<http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>