



中国科学院
合肥物质科学研究院

强磁场科学中心
High Magnetic Field Laboratory



强磁场实验装置2022年度报告

(稳态 · 合肥)



中国科学院强磁场科学中心
2023年2月

目 录

一、综述及基本情况.....	2
装置概况.....	2
总体目标与学术方向.....	2
组织框架.....	3
二、研究进展与成果.....	3
承担项目情况.....	3
用户成果.....	3
三、设施建设、运行与改造.....	12
用户课题数.....	12
运行与开放.....	12
国际用户开放.....	13
机器研究与实验技术发展.....	13
维修改造项目进展.....	13
四、科技队伍与人才培养.....	14
五、合作与交流.....	14
科技合作与交流.....	14
科学传播.....	15
六、大事记.....	16

一、综述及基本情况

装置概况

稳态强磁场实验装置（Steady High Magnetic Field Facility，简称 SHMFF）是“十一五”国家重大科技基础设施建设项目，法人单位是中国科学院合肥物质科学研究院，共建单位是中国科学技术大学，各项任务依托中国科学院强磁场科学中心完成。SHMFF 于 2008 年 5 月 19 日获批开工，2010 年 10 月 28 日转入“边建设、边运行”模式，2017 年 9 月 27 日通过国家验收。

SHMFF 拥有 40T 级混合磁体一台/套、水冷磁体五台、超导磁体四台/套，配套的一系列科学实验测试系统（运输、磁性、磁光、极低温、超高压、组合显微、磁共振等），以及支撑磁体/实验测试系统运行的技术装备系统（高功率高稳定度电源、去离子水冷却、氦低温、中央控制）。SHMFF 磁体技术和综合性能国际领先，目前已成为国际五大稳态强磁场实验室之一。

SHMFF 在建设和运行中取得了诸多成就：自行研制的混合磁体产生了目前世界上可开展科学实验的最高稳态磁场、三台水冷磁体性能指标创世界纪录；建成了国际首创水冷磁体扫描隧道显微镜系统、扫描隧道-磁力-原子力组合显微镜系统；集成了国际领先的强磁场、超高压、极低温综合极端实验条件；为凝聚态物理、化学、材料、生物学和生命科学等多学科领域开展国际前沿探索、交叉前沿研究提供了稳态强磁场实验平台，截至 2022 年底，发表了高水平用户论文 2000 余篇。

SHMFF 作为中科院合肥大科学中心核心基础，合肥综合性国家科学中心建设的关键基石，国家科技创新体系的重要组成部分，将持续为用户提供稳定、可靠、先进的实验技术支撑。

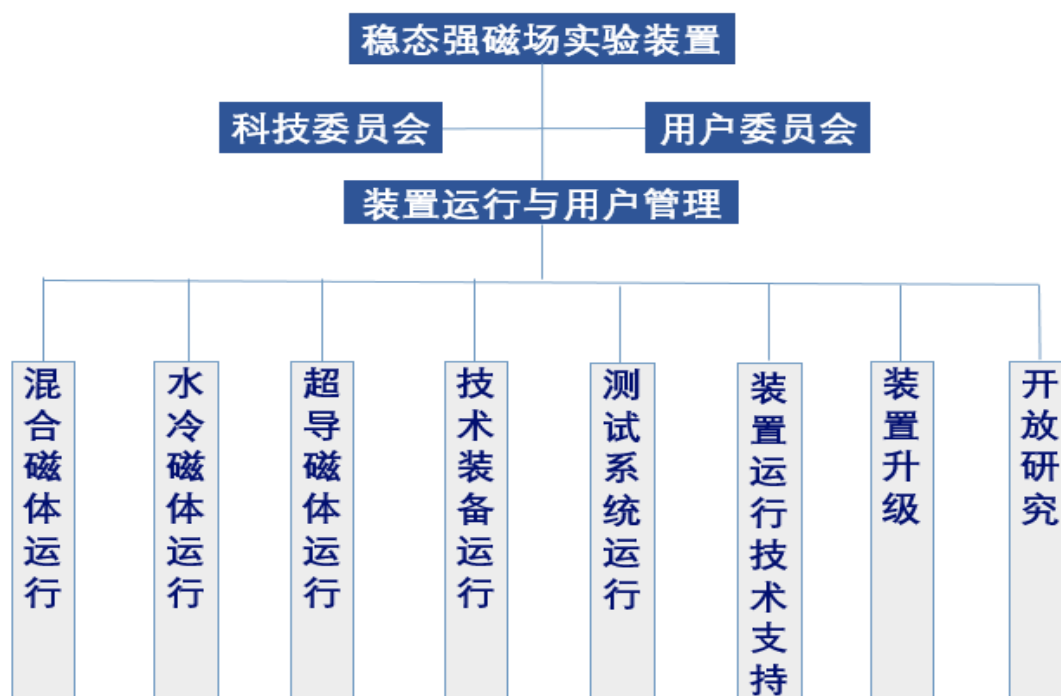


总体目标与学术方向

发展强磁场科学技术，不断提升装置实验能力；支撑国内外高端用户开展强磁场下多学科前沿研究，包括新型量子功能材料的合成与调控生长、高温超导磁

体及实用化超导材料的高场性能研究、高温超导机理、关联电子材料/拓扑超导体/低维体系的量子效应及输运研究、生物大分子在疾病中的分子机制研究、稳态磁场的生物学效应研究、肿瘤发病机理和小分子药物作用机制等；推动强磁场相关技术及科研成果的转化和应用。

组织框架



二、研究进展与成果

SCI 收录 论文数	国外发表 论文数	用户相关 论文数	获省部级 以上奖数	发明专利授权	实用新型 专利授权	软件著作 权
225	233	242	2	28(含国外授权 1 项)	9	2

承担项目情况

2022 年新增项目 92 项，其中：主持国家重点研发计划项目课题 3 项、子课题 3 项；科技部“科技创新 2030”项目子课题 1 项；JKW 项目 1 项；国家基金委项目 10 项；中科院及省市科技等项目 74 项。

用户成果

SHMFF 本年度产出文章成果共计 242 篇，其中 I 区论文 95 篇，Nature Index 期刊论文 56 篇，包括 Nature Energy 1 篇、Nature Physics 2 篇、Nature Materials 1 篇、Nature Synthesis 1 篇、Nature Communications 5 篇、PRX 1 篇、PNAS 3 篇、Advanced Materials 3 篇等。代表性亮点成果如下：

● 揭示自旋-轨道-宇称耦合超导新机制

自旋-轨道-宇称耦合超导具有巨大的（超过泡利极限）并且各向异性的面内上临界磁场，为了寻找该超导，复旦大学修发贤教授团队与合作者利用 SHMFF 所属水冷磁体 WM5 研究了薄层二维超导 2M-WS₂ 的输运性质。实验结果表明，2M-WS₂ 的上临界磁场不仅超过了泡利顺磁极限，而且呈现出明显的内面各项异性。此外，在高平面内磁场下进行的隧穿谱测量表明，2M-WS₂ 超导间隙沿不同的平面内磁场方向具有各向异性磁响应，并且其持续时间远高于泡利极限。理论计算表明，2M-WS₂ 在强磁场下的反常行为源自于拓扑带反转引起的自旋-轨道-宇称耦合（SOPC）。该工作首次揭示自旋-轨道-宇称耦合超导新机制，这为探索超导性、拓扑结构和自旋-轨道-宇称耦合之间的相互作用提供了新的研究平台。相关成果发表在 *Nature Physics* 上，并同期发表 News & Views 评论。(图 1)

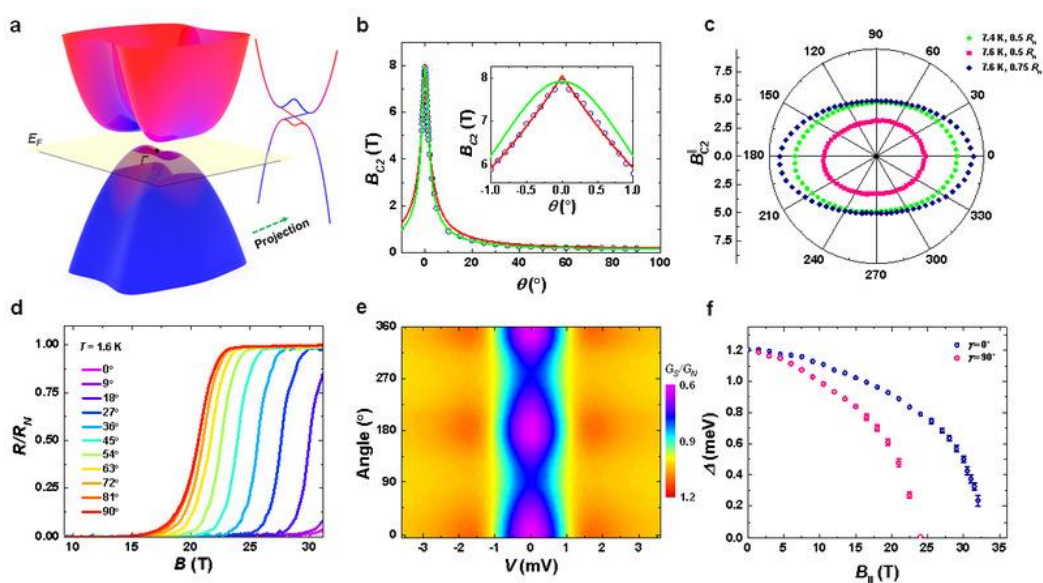


图 1. (a)薄层 2M-WS₂ 的能带示意图；(b)薄层 2M-WS₂ 中面外向面内转角的的上临界场的演化规律；(c)薄层 2M-WS₂ 中面内上临界场的二重简并属性；(d)薄层 2M-WS₂ 的归一化电阻在低温强磁场下的各向异性行为；(e)薄层 2M-WS₂ 在不同方向面内磁场（9T）下微分电导的演化；(f)薄层 2M-WS₂ 超导能隙在面内强磁场下的各向异性行为

● 首次提出离子液体插层方法调控二硒化铌超导电性

准二维层状材料具有丰富的物理效应，且物理特性紧密依赖于材料的维度及载流子浓度，因此对材料维度及载流子浓度的调控是实现新奇物理效应的重要途径。清华大学周树云教授及合作者于浦教授、段文晖院士、徐勇教授、薛其坤院士等通过在层状材料中嵌入离子液体的有机阳离子，在二硒化铌（NbSe₂）与有机阳离子形成的复合材料中实现了对材料维度及载流子浓度的双重调控，并通过 SHMFF 所属水冷磁体 WM5 证实了该复合材料可以获得比单晶体材料和单层薄膜样品更为优越的超导电性。相关成果发表在 *Nature Physics* 上，并同期发表 News & Views 评论。(图 2)

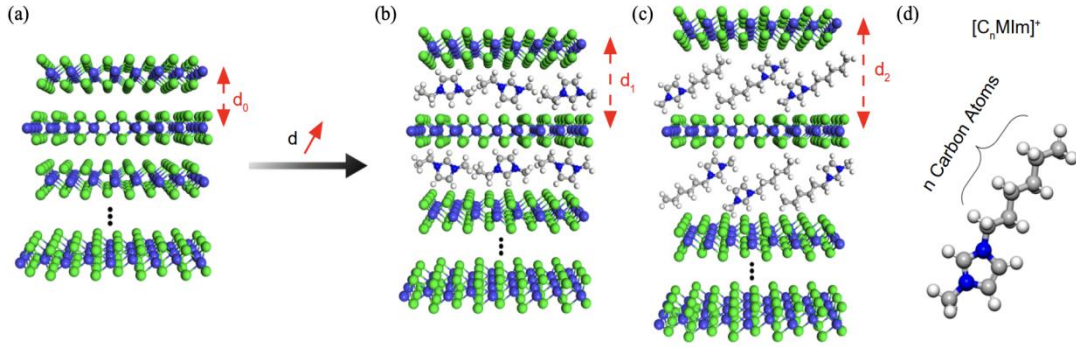


图 2. 离子液体阳离子插层调控 NbSe₂ 等层状材料维度示意图。(a) NbSe₂ 结构；(b,c)通过在 NbSe₂ 层间插入不同尺寸的有机阳离子调控层间距，从而实现材料层间距及层间耦合作用的调控；(d)有机阳离子结构示意图

● 首次在准一维金属三硒化钽中观测到大动量激子

物理学家认为激子可以作为一种信息传递媒介，目前相对稳定的激子只在半导体中存在。几乎所有实验发现的激子群速度非常有限，大大限制了其传递的效率。香港城市大学马均章教授与瑞士保罗谢勒研究所 Markus Müller、Ming Shi 团队合作，结合 SHMFF 所属水冷磁体 WM5 及角分辨光电子能谱首次观测到了准一维金属三硒化物 TaSe₃ 中的多模式激子态。该工作不仅首次提出金属在特定结构下可以存在稳定的激子态，而且给出定量理论模型。该研究扩展了激子态的存在范围，进一步促进了激子态将来在新型器件中的应用。相关成果发表在 *Nature Materials* 上。(图 3)

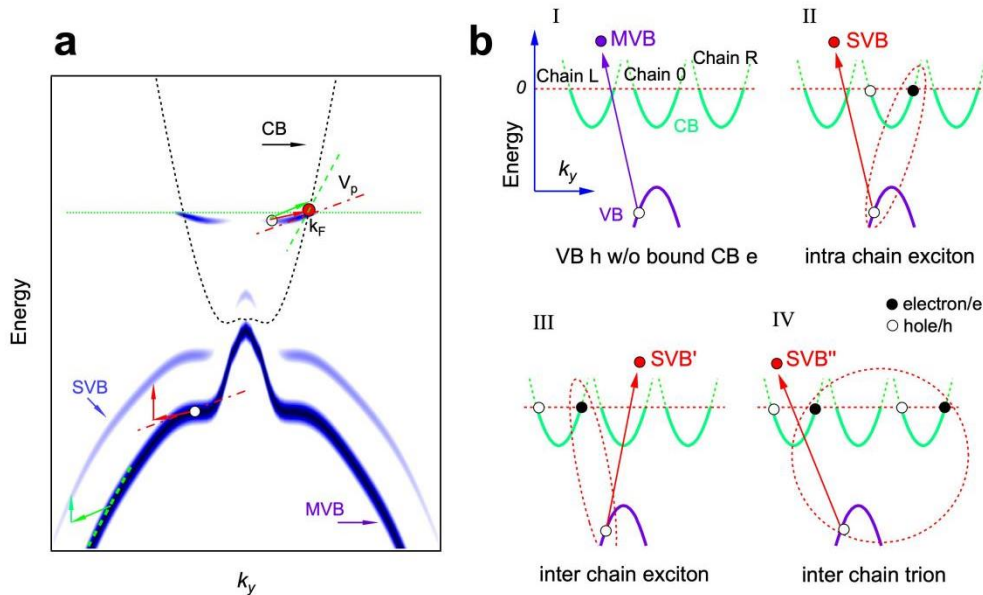


图 3. 一维金属中形成稳定、大动量、多激子模式的激子理论模型

● 发现了铋氧化物超晶格中非单调反常霍尔效应现象

中度关联电子体系中关联与拓扑会有何相互作用，以及会带来何种衍生现象是当前国际研究前沿。中科院强磁场中心低功耗量子材料研究团队郝林研究员与

美国田纳西大学 Jian Liu 教授等人合作，依托 SHMFF 所属水冷磁体 WM5 发现了铌氧化物超晶格中由电子关联和电子拓扑相互作用诱导出非单调反常霍尔效应现象，证明此单带体系中霍尔电导随温度变化的非单调关系其本质是反铁磁序和载流子退局域化的自我竞争效应。该研究为构筑中度关联电子体系相关理论提供了新的实验基础。相关成果发表在 *Physical Review X* 上。(图 4)

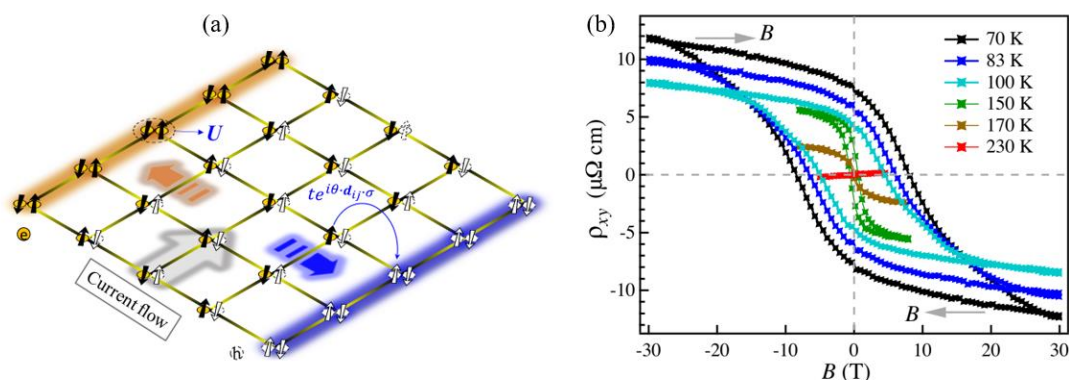


图 4. (a) 中度关联电子体系中反常霍尔效应示意图；(b) 不同温度下反常霍尔效应的磁场依赖关系

● 线性正磁电阻的贝利曲率模型与实验验证

在拓扑材料中广泛地观测到了大的线性正磁电阻现象，而关于线性正磁电阻的解释众说纷纭，特别是贝利曲率与线性正磁电阻的关联机制一直缺乏实验证据。中科院物理所刘恩克研究员团队生长并研究了磁性外尔半金属 CoS_2 的高质量单晶，观测到了磁性拓扑材料中最大的线性正磁电阻现象。通过 SHMFF 的高场极低温物性测量系统发现，其线性正磁电阻到 32T 时仍未有饱和迹象。基于三维外尔模型，他们建立了拓扑材料中贝利曲率主导的线性正磁电阻的物理模型，并通过实验数据拟合提供了实验证据。本研究将拓扑材料的线性正磁电阻与贝利曲率关联起来，可用于寻找和设计大线性正磁电阻材料，为强磁场探测技术提供核心传感材料。相关成果发表在 *Proceedings of the National Academy of Sciences* 上。(图 5)

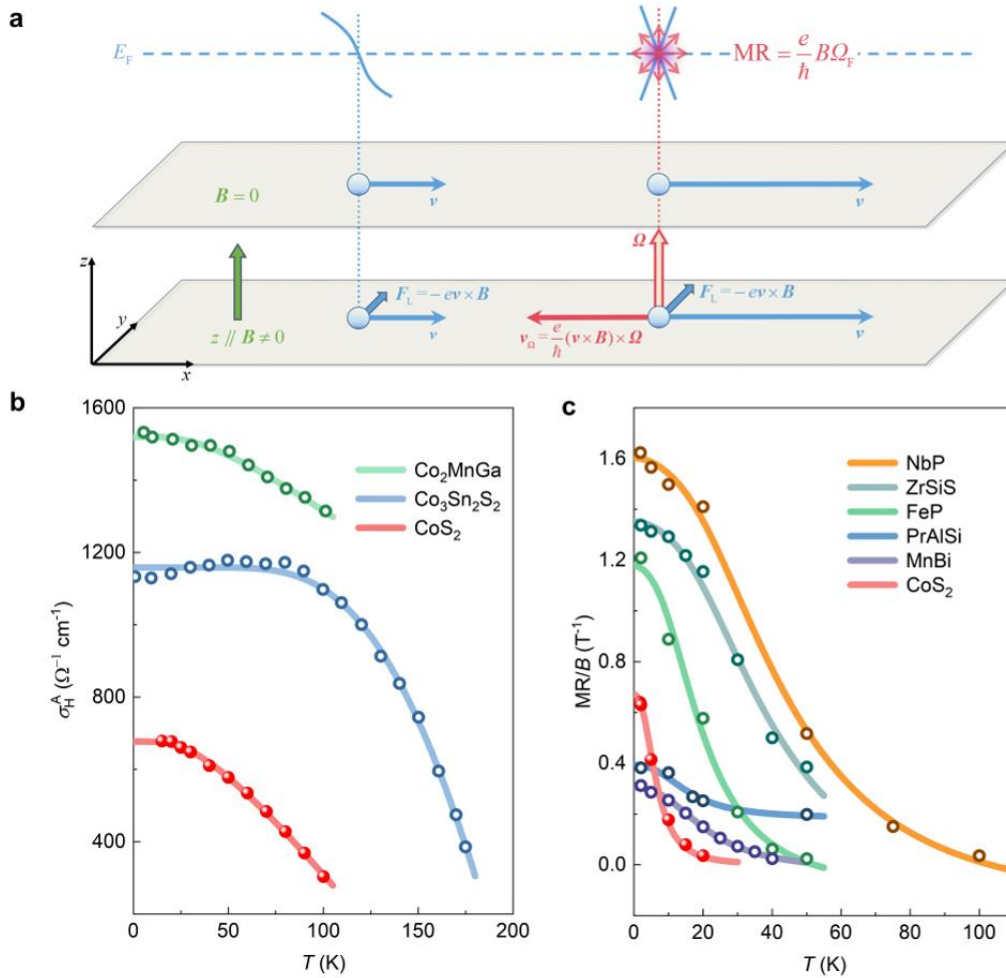


图 5. (a) 贝利曲率主导线性正磁电阻物理图像；实验数据 ((b) 反常霍尔电导；(c) 磁电阻随磁场变化的斜率) 与理论方程的拟合

● 强磁场取向阴离子交换膜助力燃料电池

阴离子交换膜燃料电池 (AEMFC) 有望使用非贵金属催化剂以及在碱性条件下更强的氧化还原活性，从而取代昂贵的质子交换膜燃料电池 (PEMFC)。阴离子交换膜 (AEM) 作为阴离子交换膜燃料电池的核心元件，其设计对于 AEMFC 功率输出和性能稳定性至关重要。天津大学尹燕教授团队借助 SHMFF 所属超导磁体 SM1 在强磁场下成功研发出一种新型取向二茂铁盐阴离子交换膜。该阴离子交换膜具有在膜的透过面 (TP) 方向取向排列的离子传输通道，极大地提高了阴离子交换膜燃料电池的功率输出。该研究工作中开发的材料在可再生和清洁能源等多个领域具有应用前景。相关成果发表在 *Nature Energy* 上。(图 6)

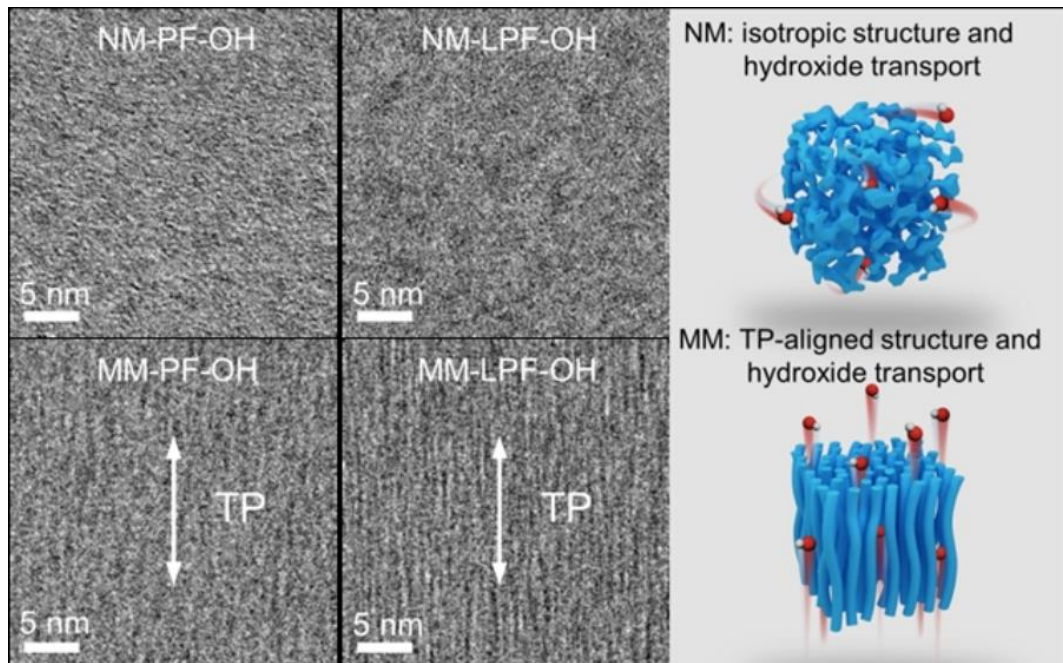


图 6. 磁铸膜(MM)和非磁铸膜(NM)微观结构的 TEM 影像和示意图解

● 构筑新型二维磁性同质偏置器件

二维范德瓦尔斯磁性材料，为基础磁性研究和低维磁性器件开发提供了极佳的平台。但弱的层间耦合作用，极大限制了应用。中科院强磁场中心盛志高研究员团队与中国科学技术大学张振宇教授等人合作，发现通过单轴压力技术，可以将具有铁磁基态的二维铁锗碲（ Fe_3GeTe_2 ）材料诱导成为具有铁磁-反铁磁共存的材料同质、磁性异质结构，且发现该结构具有实用级的交换偏置效应。研究团队借助 SHMFF 所属的超导磁体 SM1 及磁光 Kerr (MOKE)、二次谐波 (SHG) 技术，结合高分辨透射电子显微镜与第一性原理计算，充分证实了压力诱导的相变及其交换偏置的起源。这一研究结果不仅为交换偏置效应机理的研究提供了新思路，还为设计和开发高性能二维磁性器件开辟了一条新的途径，有望作为二维电子技术与装备的核心磁性元器件。相关成果发表在 *Advanced Materials* 上。(图 7)

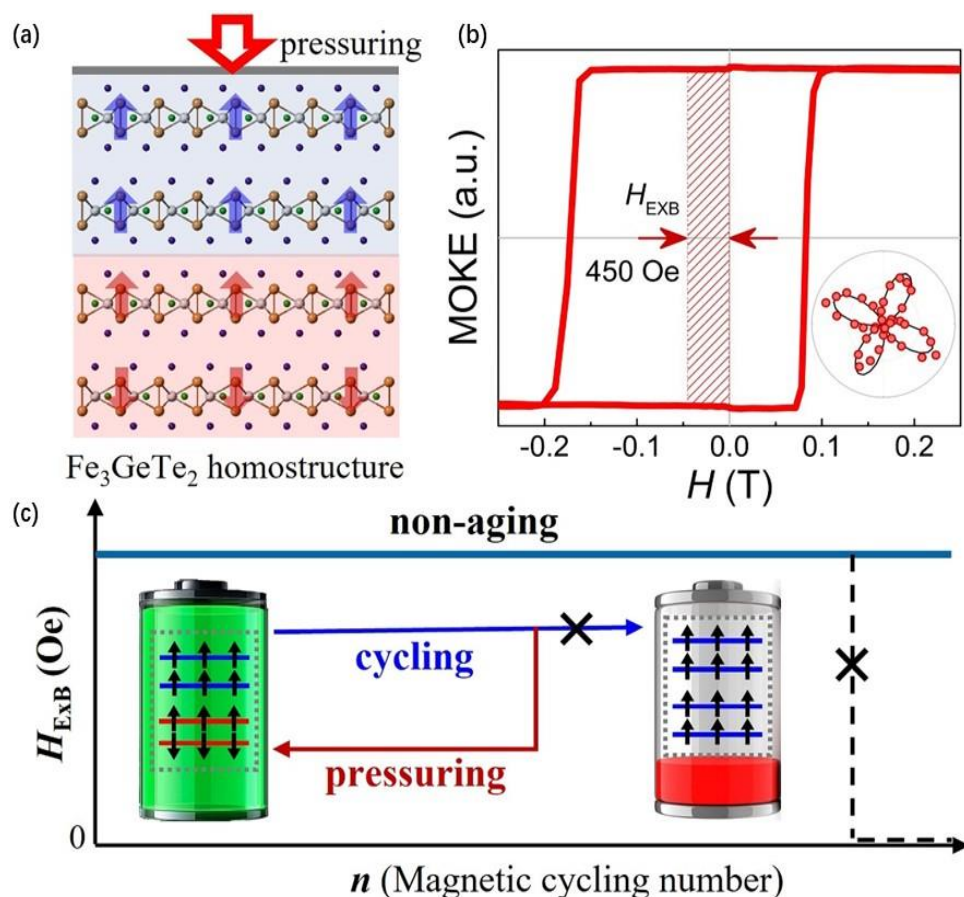


图 7. (a)单轴加压处理后诱导 FGT 磁转变的示意图；(b)加压后 FGT 的磁光现象；(c) FGT 无老化、可延长、可恢复的交换偏置效应示意图

● 一种基于铁基催化剂交叉耦合催化反应的选择性合成 C-糖苷的新方法

立体化学定义的C-糖苷因其出色的生物活性而受到重视。开发一种基于非贵金属催化剂的C-糖苷合成方法仍然具有挑战性。新加坡国立大学Ming Joo Koh副教授、南开大学陈弓教授与中科院强磁场中心田长麟教授团队合作，通过铁基催化剂促进糖基自由基的生成，在一系列底物基础上成功合成了不同的烯基、炔基或芳族异聚基官能化的C-糖苷产品家族。通过机械控制方法和SHMFF的电子顺磁共振谱仪实验条件，证实了催化反应的路径是通过Mn还原形成的低价铁络合物实现的。该方法可用于立体选择性合成多种具备不同功能的C-糖苷以及与疾病治疗相关的类似产物。相关成果发表在 *Nature Synthesis* 上。(图8)

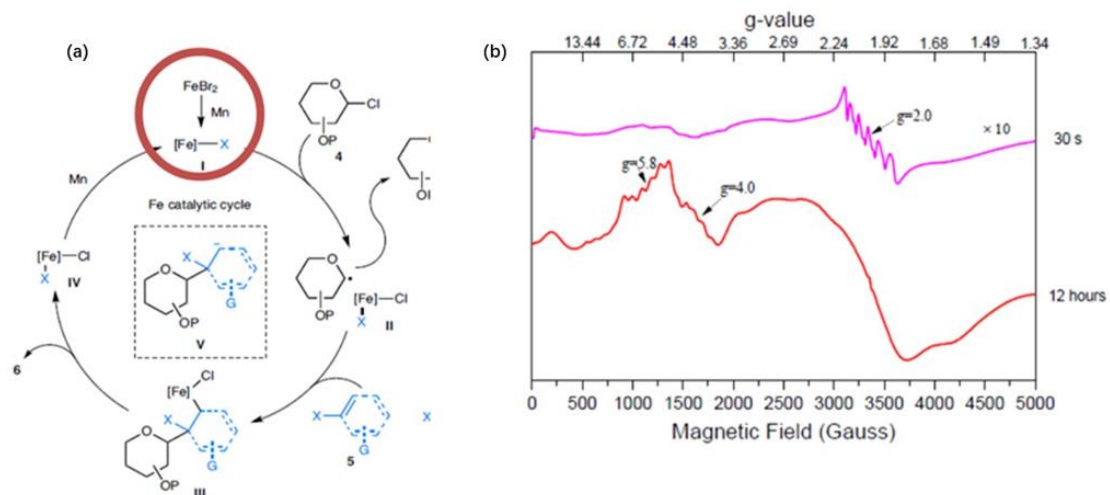


图 8. (a)生成 C-糖苷的交叉耦合催化反应机理示意图；(b)Mn(II)离子的产生机理与 Fe(II) 的还原反应存在关联

● 顺铂前药在生理条件下的活化机制

顺铂是临床应用最为广泛的抗癌药物，但具有明显的毒副作用和耐药性。顺铂的四价铂前药能克服传统铂类药物的缺陷受到广泛研究，然而在生理条件下阐明前药的还原过程仍然是一个挑战。中国科学技术大学刘扬中教授、唐丽琴教授和意大利巴里大学 Giovanni Natile 教授合作，设计合成 ^{19}F 标记的 Pt(IV) 前药，开发了 ^{19}F 核磁共振研究顺铂前药活化与代谢的新方法。核磁共振是一种非侵入性的分析方法，能够在原子水平提供生物分子在生理条件下发生的动态生化过程的信息。作者依托 SHMFF 所属超导磁体 SM3 及配套 NMR 系统，通过 ^{19}F NMR 研究其在不同细胞环境中活化过程的差异、小鼠血液以及活体动物体内的还原与代谢，阐明了前药的活化过程。研究结果显示， ^{19}F NMR 可能作为一种普遍的方法应用于研究生理环境中前药的活化与代谢过程。相关成果发表在 *Angewandte Chemie-International Edition* 上。(图 9)

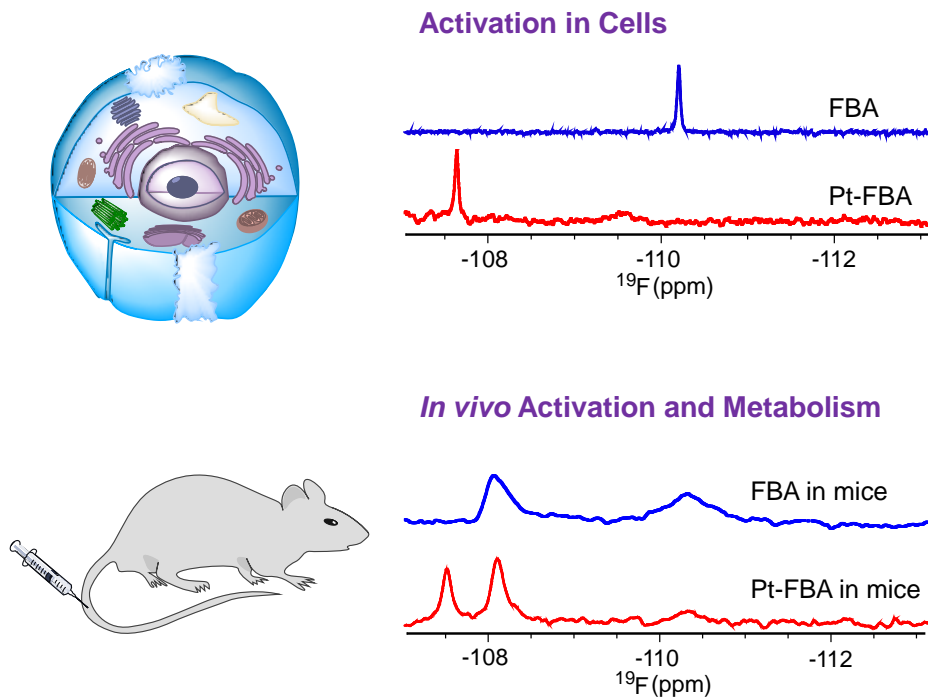


图 9. ^{19}F 核磁共振分析顺铂前药在细胞环境和活体动物体内的活化过程

- **从磁导航到磁靶向：效仿趋磁细菌，构建具有高效肿瘤组织穿透性的类磁小体结构**

抗肿瘤药物的靶向递送可以有效提高药物的疗效，降低药物的毒性。由于复杂肿瘤组织环境产生的隙流体压力增加以及组织中的致密细胞外基质的限制，目前的纳米药物平均肿瘤靶向效率均低于 1%，构成了肿瘤治疗中的瓶颈之一。中科院强磁场中心王俊峰研究员团队，在研究自然界趋磁细菌生物矿化机制的基础上，效仿趋磁细菌磁小体特殊性质，仿生合成具有高效磁靶向及肿瘤组织穿透性的软铁磁性类磁小体结构纳米材料。依托 SHMFF 所属超导磁体 SM3 及配套 NMR 系统，利用 MRI 在动物层面验证了类磁小体在肿瘤组织穿透性和磁靶向性方面性能提高了一个数量级。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。相关成果发表在 *Proceedings of the National Academy of Sciences* 上。(图 10)

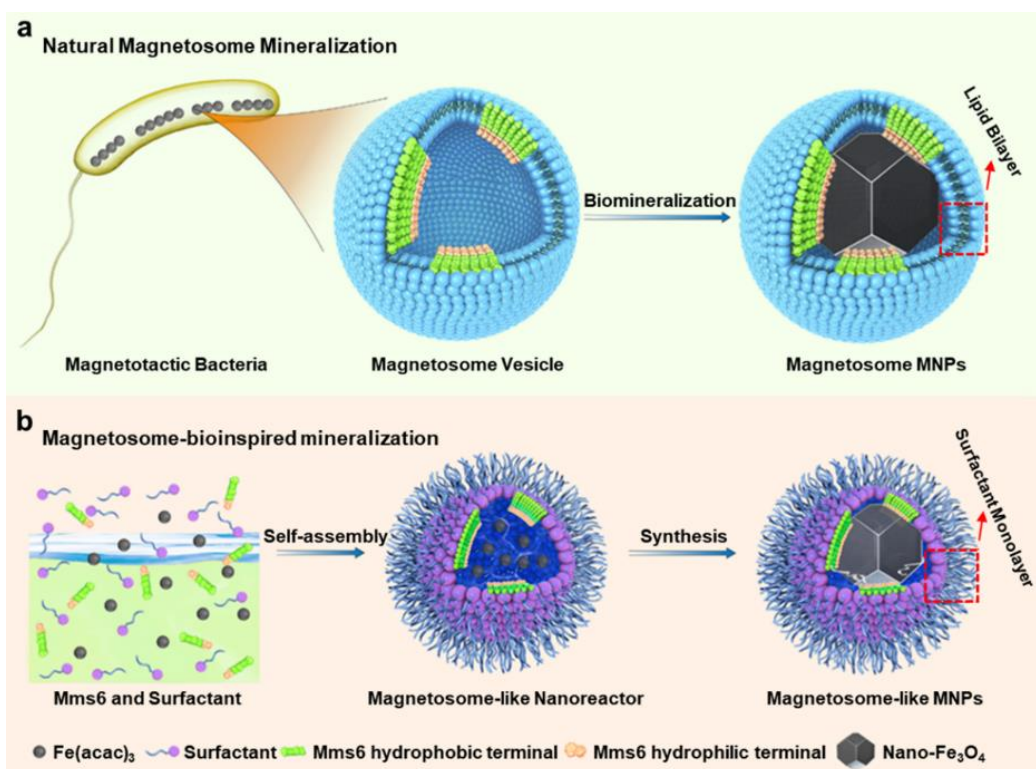


图 10. 模拟趋磁细菌生物矿化过程基于生物矿化调控蛋白 Mms6 构建的反向微囊纳米反应器

三、设施建设、运行与改造

设施名称	设施运行总机时	机器研究机时	用户实验机时	停机检修机时	故障机时	实验站(终端)数	用户完成实验课题数	用户实验涉及领域及比例
稳态强磁场实验装置	50737	725	50065	669	193	23	277	物理: 29%; 化学: 17%; 材料与工程: 38%; 生物医药: 16%

用户课题数

设施	用户课题总数	院内	院外		其中				
			国内	国外	大学	研究所	政府机构	企业	其他
稳态强磁场实验装置	277	173	100	4	127	145	0	1	4

运行与开放

2022 年度开展课题 277 项，为 67 家用户单位提供了实验条件。2022 年度计划运行总机时 48880 小时，实际运行总机时 50737 小时，完成了运行计划。

表：纳入考核的磁体及实验系统

	HW/WM	SM3 及 NMR	SM4 及 MRI
计划运行机时	1500	8232	2600
实际运行机时	2070	8294	2602
完成率	138%	101%	100%

表：未纳入考核的磁体及实验系统

	SM1 及超快光学	SM2	PPMS	低温运输	MPMS	ESR	拉曼	红外	XRD	极低温	超高压	SMA	25T 核磁共振
计划运行机时	2900	6552	6600	880	7440	1200	850	800	1130	2100	1000	4096	1000
实际运行机时	2962	7008	6096	810	7728	1316	850	794	1155	2560	1107	4336	1050
完成率	102%	107%	92%	92%	104%	110%	100%	99%	102%	122%	111%	106%	105%

国际用户开放

2022 年度共为包括美国德州农工大学、科罗拉多大学和韩国首尔大学等用户单位的 4 个课题提供了 1434 个机时服务。

机器研究与实验技术发展

- 混合磁体：提出了新型线圈设计理念，采用了动态压紧、模块组合绝缘、激光加工等新技术和新工艺，提高了线圈的力学稳定性，在 26.9MW 功率下产生了 45.22T 的稳态磁场，是目前世界上可开展科学实验最高的稳态磁场。
- 超导磁体 SM3 及配套 NMR 系统：完成 850MHz 下生物大分子弛豫扩散测试方法的开发，用于检测大分子微秒到毫秒量级的分子动力学性质。
- 电子自旋共振波谱仪系统：基于 easyspin（ESR 谱图模拟和拟合软件）编写了图形界面程序 LV_EasySpin ver1.1 版；升级了氙灯，将紫外从 320nm 拓展到 200nm。
- 超高压物性测量系统：可达到高压下磁化率 5GPa；金刚石对顶砧磁阻测量 60GPa 以及小样品霍尔系数测量 60GPa。

维修改造项目进展

2022 年度“HWM11 与 WM3 水冷磁体维修改造”项目通过验收。HWM11 与 WM3 的磁场水平均获提高：HWM11 内插水冷磁体提升至 32T，WM3 水冷磁体提升至 20T。

“35 T 水冷磁体联合干式磁体原位原子成像平台”项目：研发了国际首个混合磁体超恶劣条件 STM，验证了镜体的稳定性；完成 WM2 中低温高场 STM 及 MFM 的调试；极低温强磁场 STM 的液氦闭路循环系统已可稳定运行。

“9.4T 磁共振成像系统维修改造”项目：完成了梯度系统和射频系统的关键硬件改造、8 通道并行采集系统的建立，DNP 系统设计以及加工制造，PET-MRI 系统环境改造。

“强磁场-低温综合物性测试系统性能提升”项目：在牛津仪器（英国）开始加工稀释制冷机；已完成强磁场-极低温物性测试系统先期调试。

四、科技队伍与人才培养

中科院强磁场科学中心注重依托 SHMFF 的人才引进与培养。2022 年新增百人计划 2 人，万人计划 1 人。目前中心拥有高级职称人员 112 人(含双聘研究员)，其中院士 1 人，杰青 3 人，优青 4 人，优青（海外）1 人，百人计划 20 人，青年千人 1 人，万人计划 3 人。

设施 人员 总数	按岗位分			按职称分			学生			在 站 博 士 后	引 进 人 才 *
	运行 维护 人员	实验 研究 人员	其 他	高级 职称 人数	中级 职称 人数	其 他	毕 业 博 士	毕 业 硕 士	在 读 研 究 生		
198	109	84	5	112	74	12	19	18	333	30	2

*指通过“百人计划”、“千人计划”等引进的人才。

五、合作与交流

科技合作与交流

2022 年中科院强磁场科学中心国内外交流合作以线上线下相结合形式开展，共举办了 7 场学术会议、学术报告 23 次。学术活动的开展加强了用户之间的交流，吸引了潜在用户，促进了 SHMFF 的开放共享，更好地发挥了国家重大科技基础设施的作用。



4月29日，召开“低功耗量子材料建制化科研平台”学术委员会第一次会议。

5月27日，召开SHMFF用户委员会会议。



7月17日，举办SHMFF“高场磁共振成像”用户专题交流会。



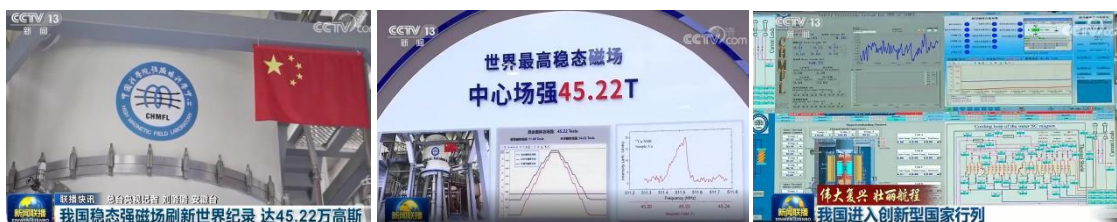
11月25日—28日，联合主办首届“全国磁生物学与磁医学大会”。

科学传播

SHMFF 注重弘扬科学文化、传播科学精神，积极开展设施宣传、公众科普、

青少年科学素质培养等活动，成效显著。

2022 年度 SHMFF 三次登上央视《新闻联播》，多次获得国家级、省级主流媒体报道，如人民日报、新华社、央视、光明日报、科技日报、中国科学报、安徽卫视等；“稳态强磁场刷新世界纪录”和“稳态强磁场实验装置实现重大突破”分别入选科技日报社主办、部分两院院士与媒体人士共同评选的“2022 年国内十大科技新闻”和中国科学院与中国工程院主办、两院院士评选的“2022 年中国十大科技进展新闻”。参与中科院公众科学日、全国科普日、第九届科学岛优秀大学生夏令营等重要活动；发表科普文章、制作科普视频、参加科普讲解大赛。2022 年度接待参观 90 余次，共计 2000 余人。



三次登上央视《新闻联播》



大学生科普活动



中共中央政治局委员、全国政协副主席、工信部副部长/国家航天局局长、安徽省政协主席调研 SHMFF

六、大事记

- 2月17日 安徽省政协主席唐良智调研 SHMFF
- 2月25日 工业和信息化部副部长、国家航天局局长张克俭调研 SHMFF
- 4月29日 “低功耗量子材料建制化科研平台”学术委员会第一次会议
- 5月27日 2022年度 SHMFF 用户委员会会议

- 6月9日 全国政协副主席卢展工调研 SHMFF
 - 6月12日 中共中央政治局委员黄坤明调研 SHMFF
 - 7月17日 2022年度“高场磁共振成像”用户专题交流会
 - 8月12日 SHMFF混合磁体产生45.22T稳态磁场，刷新了同类型磁体世界纪录
 - 10月31日 “HWM11与WM3水冷磁体维修改造项目”通过验收
 - 11月3日 SHMFF入选由国家文物局主编的《见证新时代》一书
 - 11月25-28日 首届“全国磁生物学与磁医学大会”（主办单位之一）
 - 12月25日 “稳态强磁场刷新世界纪录”入选了科技日报社主办、部分两院院士和媒体人士共同评选的“2022年国内十大科技新闻”
- *2023年1月12日“稳态强磁场实验装置实现重大突破”入选了中国科学院与中国工程院主办、两院院士评选的“2022年中国十大科技进展新闻”

