



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2021年度报告

(稳态 · 合肥)



中国科学院强磁场科学中心
2022年2月

目 录

一、综述及基本情况	1
装置概况	1
总体目标与学术方向	2
组织框架	2
二、研究进展与成果	2
承担项目情况	2
用户成果	2
三、设施建设、运行与改造	8
用户课题数	8
运行与开放	8
国际用户开放	9
机器研究与实验技术发展	9
维修改造项目进展	9
四、科技队伍与人才培养	9
五、合作与交流	10
科技合作与交流	10
科学传播	11
六、大事记	12

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 取得了一系列成就：成功研制了世界第二台 40T 级混合磁体（实现了大型强磁场铌三锡超导磁体技术的重大突破）、五台不同用途的高功率水冷磁体（三台性能指标创世界纪录）和系列超导磁体实验装置及其磁体支撑装备系统。磁体上搭配了输运、磁性、磁光、极低温、磁共振测试系统；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，为开展凝聚态物理、化学、材料、生物学和生命科学等多学科领域进行国际前沿探索、交叉前沿研究提供了稳态强磁场极端实验平台。截至 2021 年底，发表了高水平用户成果近 2000 篇。目前，我国稳态强磁场相关实验条件达到国际领先水平，已成为国际五大稳态强磁场实验室之一。

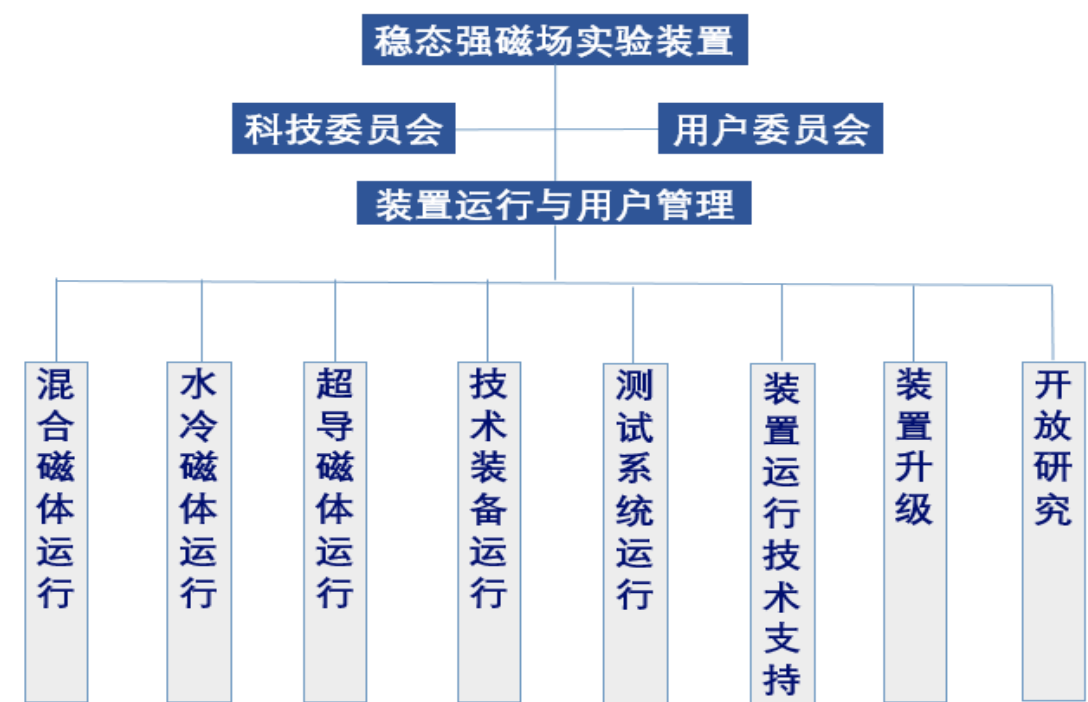
SHMFF 作为中科院合肥大科学中心核心基础，合肥综合性国家科学中心建设的关键基石，国家科技创新体系的重要组成部分，将持续为用户提供稳定、可靠、先进的实验技术支撑。



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	论文引用数	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
212	—	215	224	0	12	12	7

承担项目情况

2021 年新增项目 99 项，其中：国家重点研发计划项目 1 项、基金委项目 18 项、中科院及省市科技等项目 80 项。

用户成果

SHMFF 本年度产出文章成果共计 224 篇，其中 I 区论文 89 篇，Nature Index 期刊论文 77 篇，包括 Nature 1 篇、Nature Nanotechnology 1 篇、Nature Chemical Biology 1 篇、Nature Communications 7 篇、PRL 5 篇、PNAS 2 篇、Advanced Materials 3 篇等。代表性亮点成果如下：

1. 面向世界科技前沿

● 首次在少层黑砷中发现了新奇量子霍尔态

重元素二维材料体系具有内禀的强自旋轨道耦合效应，在对称性破缺的情况下产生自旋和运动方向的严格锁定关系，这使得电子自旋的高速精准控制成为可能。浙江大学郑毅研究员、许祝安教授和中南大学的夏庆林教授合作，首次在黑砷二维电子态中发现了外电场连续、可逆调控的强自旋轨道耦合效应，实现了对自旋的高速精准控制；同时在全新的自旋-能谷耦合的 Rashba 物理现象中，发现了新奇的量子霍尔态。SHMFF 所属水冷磁体 WM5 的电输运测量系统为新奇量子态的确认提供了重要证据。该研究将对高效率、低能耗自旋电子器件研制提供坚实基础，对进一步加深量子霍尔现象的理解，以及依托拓扑超导器件的量子计算研究具有重要意义。该成果发表于 *Nature*。（图 1）

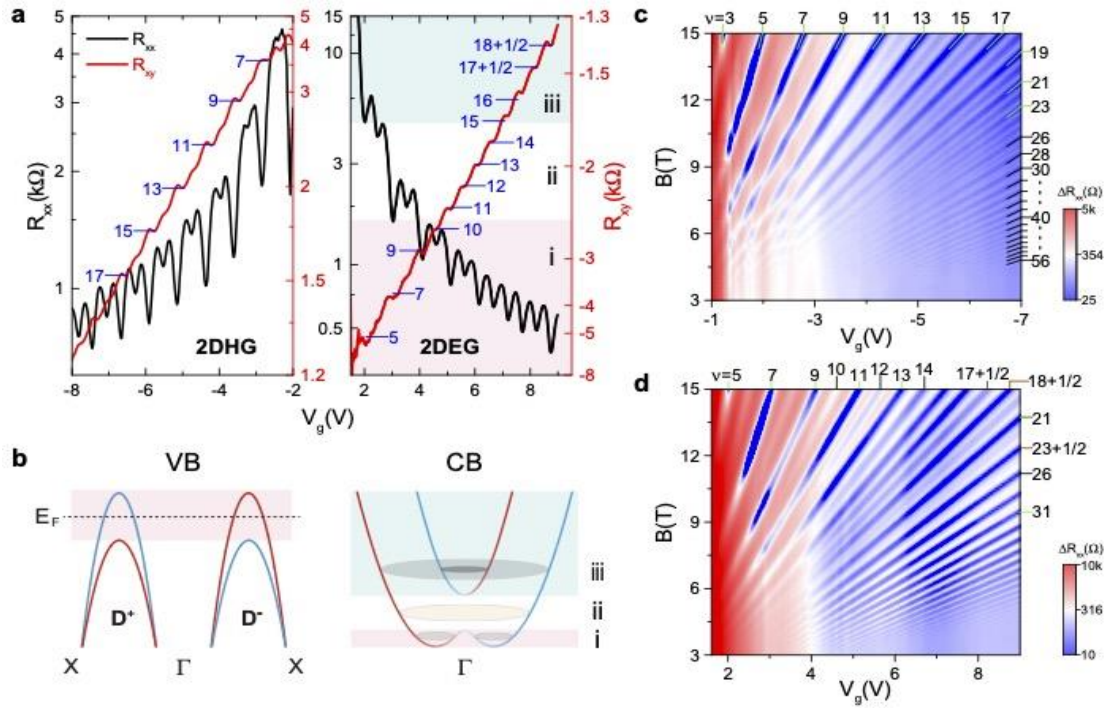


图 1 a. 黑砷二维电子态粒子-空穴不对称的反量子霍尔态；b. 空穴掺杂对应的自旋-能谷耦合 Rashba 能带和电子掺杂对应的传统 Γ -Rashba；c. 黑砷二维空穴气的反量子霍尔态栅压和磁场的变化关系；d. 黑砷二维电子气的反量子霍尔态随栅压和磁场的变化关系

● 微纳尺度下伊辛超导器件中证实了本征反常金属态的存在

北京大学王健教授研究团队联合中国石油大学邢颖副教授、中国人民大学刘易副研究员等在 *Nano Letters* 上发表了机械剥离的过渡金属硫化物 $4H$ 相 TaSe_2 超导薄片的极低温电输运实验研究。通过高频滤波对照实验，直接观测到高频噪声诱导的非本征反常金属态；随后在更低温、更高磁场下，通过对测量线路进行有效滤波后，进一步得到了本征反常金属态的可靠实验证据，并通过 SHMFF 所属水冷磁体 WM5 的电输运测量系统提供了超导上临界场的各向异性数据，绘制了包含本征和非本征反常金属态的完备相图（图 2）。该项工作证明了在易受环境影响的二维微纳超导器件中，尽管存在高频噪声诱导的非本征反常金属态，但

在更低温度下反常金属态仍然可以作为量子基态存在；同时，也揭示了在量子基态研究中对低温测量进行有效滤波的必要性。

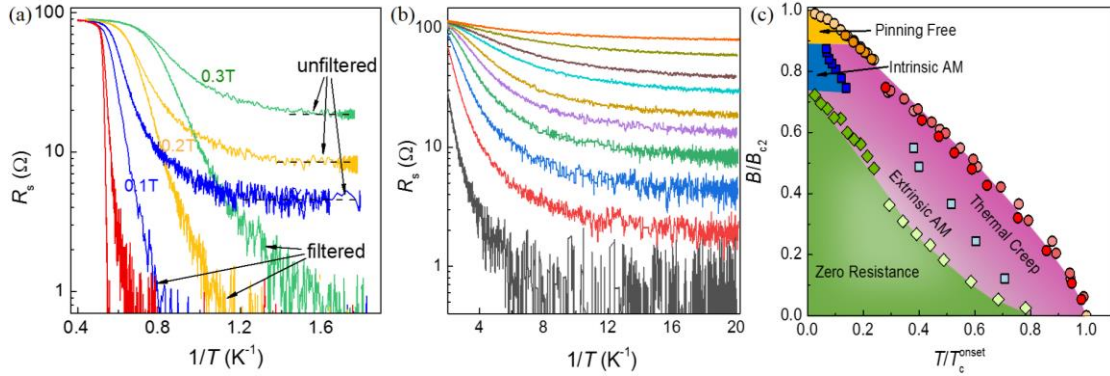


图 2 二维超导 TaSe₂ 器件的非本征 a、本征 b 反常金属态实验证据；c. 包含非本征和本征反常金属态的相图

● 笼目材料 CsV₃Sb₅ 中的非平庸拓扑电子能带证据

笼目 (kagome) 材料由于包含特殊的晶格结构而表现出许多新的物理性质，已成为研究关联拓扑材料中新物态和新现象的重要平台。近期，一类新型准二维 Kagome 体系 AV₃Sb₅ (A = K, Rb, Cs) 中发现了电荷密度波和超导电性，引起了人们的极大关注。中国人民大学雷和畅教授研究团队，利用 SHMFF 所属水冷磁体 WM5 研究了强磁场下 CsV₃Sb₅ 单晶的量子输运物性。通过对 Shubnikov-de Haas (SdH) 量子振荡的分析以及与理论计算结果比较，验证了 CsV₃Sb₅ 存在拓扑非平庸的电子结构。相关成果发表于 *Physical Review Letters*。（图 3）

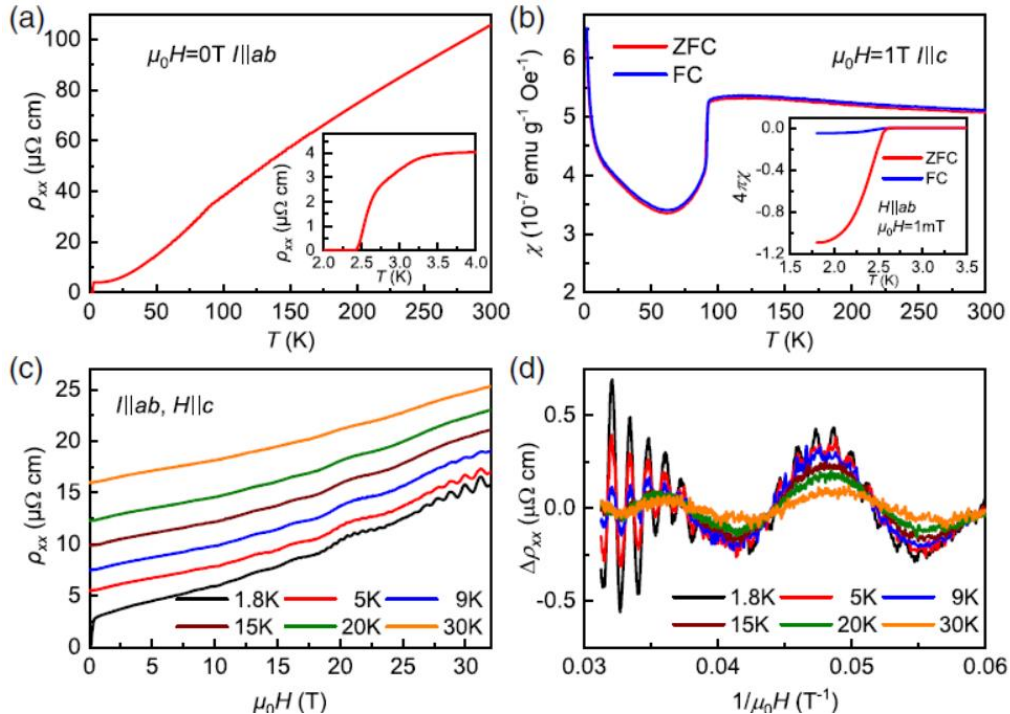


图 3 a. 电阻率与温度关系；b. 磁化率与温度关系；c. 强磁场下的磁电阻；d. 磁电阻振荡项与磁场倒数关系

2. 面向国家重大需求

● 新型“磁束子”拓扑磁结构和电操控磁拓扑的实现

拓扑荷 Q 是磁结构的重要基本参数，决定了磁结构的动力学和拓扑磁输运行为。然而在现有的拓扑磁结构家族中，它们的拓扑荷最多为整数 1。中科院强磁场科学中心杜海峰研究员、田明亮研究员等研究团队，首次理论提出并实验验证了一种具有多拓扑态新型磁结构“磁束子”，其拓扑荷可以为任意整数，并利用 SHMFF 实现了可控电流驱动磁束子运动，发现它们在电流驱动下的霍尔偏转方向与拓扑荷符号有关，并实现了电控拓扑斯格明子-磁泡转变。该工作展示了拓扑磁结构家族的丰富性，并将拓扑磁电子学研究对象从单位拓扑荷拓展到了多拓扑荷磁结构。相应研究成果发表于 *Nature Nanotechnology* 和 *Advanced Materials*。(图 4)

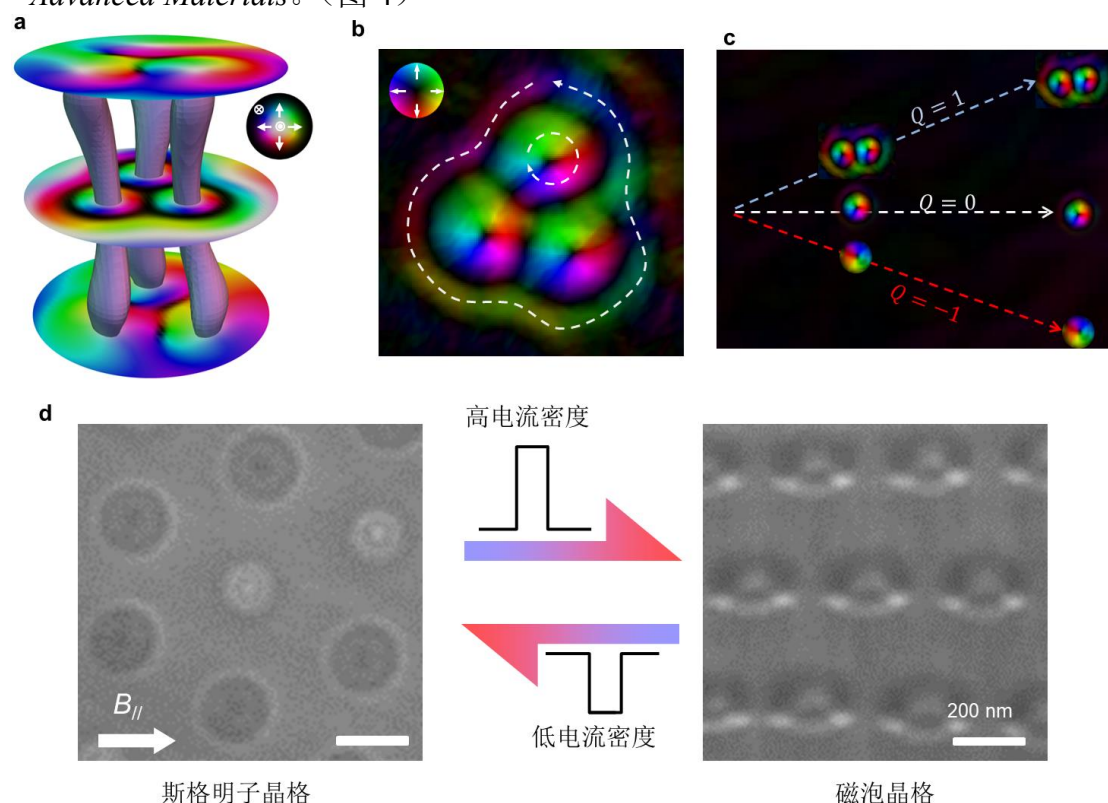


图 4 a.三维磁拓扑态“磁束子”；b.磁束子的实验观测；c.电流驱动磁结构动力学运动； d.电操控斯格明子-磁泡拓扑磁转变

● 光催化固氮反应加氢途径的调控

光催化固氮是一种替代 Haber-Bosch 合成氨工艺非常有前景的途径。深入理解催化剂精细结构如何调控光催化固氮反应的加氢路径，使反应以有利的路径进行，对于设计高效催化剂及推动实际应用是一个至关重要而又具有挑战性的难题。中国科学技术大学的熊宇杰教授、高超副教授与武晓君教授理论计算研究团队合作，以 TiO_2 为催化剂模型，揭示了掺杂 Fe 导致 TiO_2 表面氧空位局域电子结构的变化可以调控 N_2 的加氢从缔合交替加氢路径转向更为有利的缔合远端加氢路径。通过 SHMFF 实验条件证实了 Fe 掺杂可以促进氧空位的形成，为 N_2 还原反应提供了活性位点。该研究为通过理性控制反应路径实现高效光催化固氮提供了新的见解。相应研究成果发表于 *Angewandte Chemie-International Edition*。(图 5)

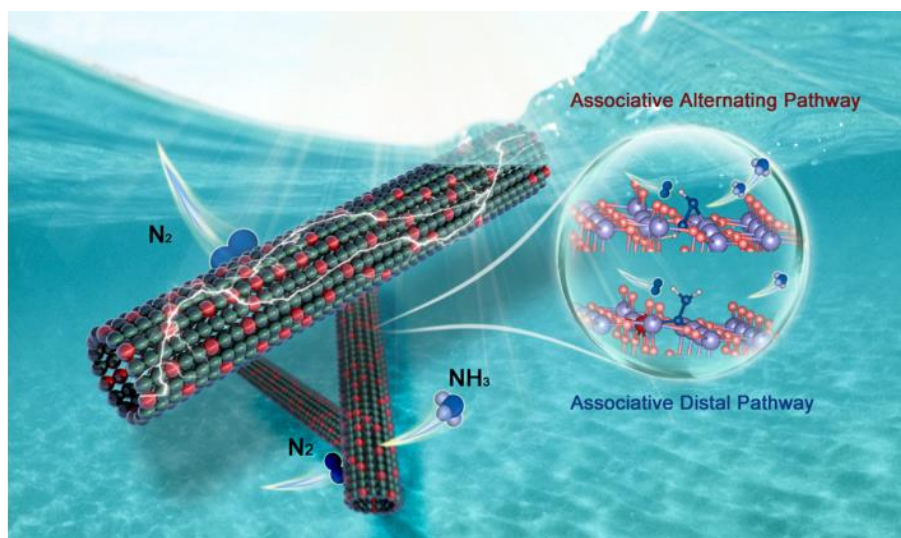


图 5 掺杂调控氧空位局域电子结构并改变光催化固氮加氢路径的示意图

3. 面向人民生命健康

● 设计出新型光控元件蛋白 cpLOV2

LOV2 是一种光控开关蛋白，由于它可提供的与效应子相互作用锁定界面相对有限，使其在光遗传学工具开发应用上成功率不高。中科院强磁场科学中心的王俊峰研究员联合德克萨斯 A&M 大学的黄韵教授和周育斌教授以及麻省大学医学院的韩刚教授研究团队，利用 SHMFF 所属超导磁体 SM3 及配套 NMR 对 LOV2 进行了优化循环排列（Circular permutation）设计，获得了能提供更多不同锁定界面的新型光遗传学工具 cpLOV2。该团队利用 cpLOV2 实现了钙离子通道的远程开启，CRISPR-Cas9 介导的基因编辑控制，基因转录的光控重编程，癌细胞自杀的激活以及光控细胞免疫疗法来诱导肿瘤细胞体内杀伤等。相应研究成果发表于 *Nature Chemical Biology*。（图 6）

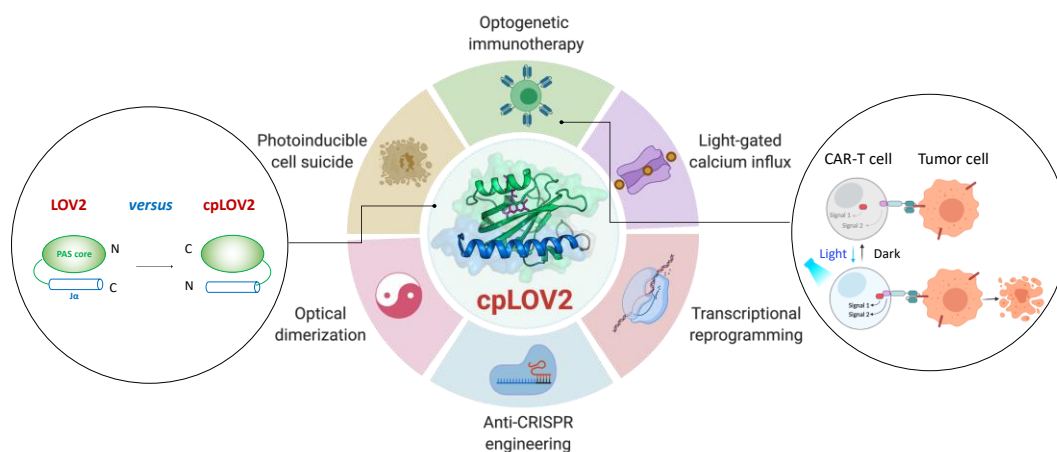


图 6 cpLOV2 改造设计及其光遗传学应用拓展

● 新型端粒 G-四链体的结构解析为肿瘤治疗提供新靶点

端粒作为“生命的时钟”，与生物体的寿命、干细胞的自我更新、癌细胞的无限增殖等都息息相关。因此，作为端粒序列形成的重要二级结构，G-四链体结构受到了广泛关注。依托 SHMFF 所属超导磁体 SM3 及配套 NMR，中科院强磁场

科学中心张钠研究团队对端粒 DNA 序列形成的 G-四链体二级结构进行了深入研究，发现了一些新的 G-四链体构型，增加了 G-四链体构型的多样性，为抗癌药物的开发提供了新的靶点。另外，序列 d(GTTAGG)自组装形成了不对称的三聚 G-四链体（图 7(A)(B)），并且其组装和去组装始终处于动态变化之中。序列 d(GGGTTAGGGTTAGGGT)与 d(TAGGGT)自组装形成了两个呈准镜面对称的 G-四链体混合物，有趣的是，小分子 ThT 能够差异区分这两个结构高度近似的结构（图 7(C)）。相应成果均发表于 *Nucleic Acids Research*。

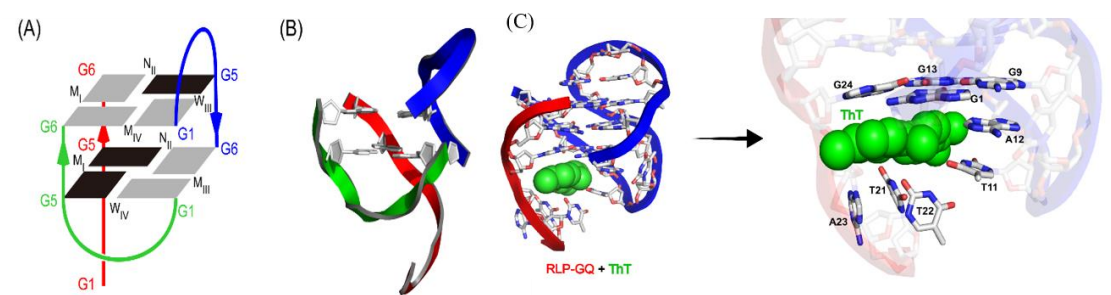


图 7 (A) (B) DNA 序列 d(GTTAGG)形成的 G-四链体；(C) ThT 与 RLP 型 G-四链体结合的全原子三维结构

4、面向经济主战场

● 研发了高效修复损伤皮肤的纳米级硼酸盐生物活性玻璃

中科院强磁场科学中心王俊峰研究团队借助 SHMFF 所属超导磁体 SM3 及配套 NMR，创新性地采用流动相对熔融法制备微米级硼酸盐生物玻璃进行体外预处理，最终得到纳米级（~50 nm），表面覆盖非晶态 HCA（Hydroxy- Carbonated Apatite）层的 Nano-HCA@BG。相比 45S5[®]，Hydroxyapatite 和微米级的硼酸盐生物玻璃，nano-HCA@BG 缓释的 B，Ca 等元素不仅有效加速伤口处细胞的迁移和上调了伤口处的血管相关生长因子的表达，而且玻璃表面的非晶态 HCA 层不仅降低了玻璃的快速释放，还加速了伤口处胶原蛋白的沉积促进伤口的愈合。该成果有望与企业开展联合研究，在 2-3 年内完成临床前实验。相关成果发表于 *Chemical Engineering Journal*。（图 8）

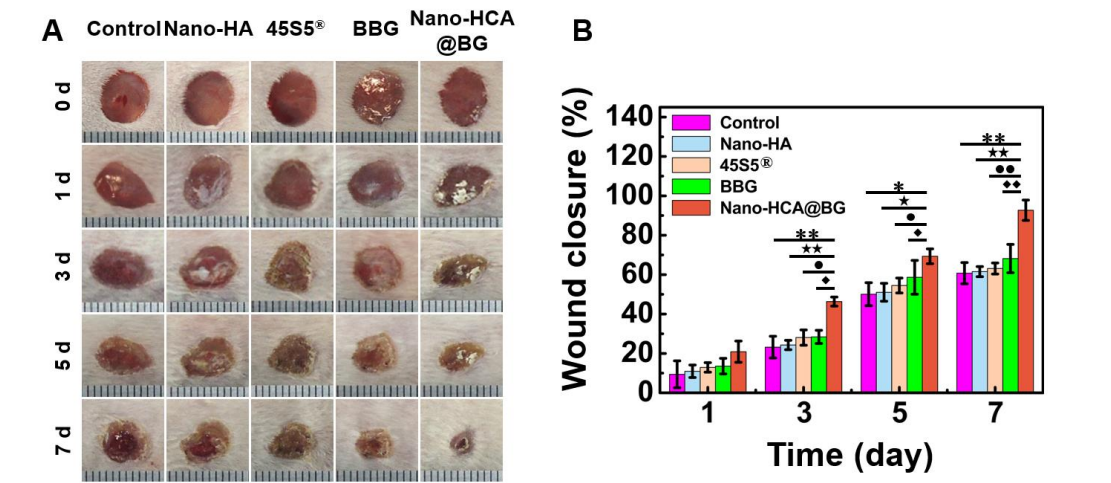


图 8 小鼠皮肤缺损模型的创面愈合过程；A. 不同对照组与 Nano-HCA@BG 的第 0、1、3、5、7 天小鼠皮肤伤口愈合图像（照片中标尺的单位尺度为 1mm）；B.对应的小鼠伤口愈合率的统计结果

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	51407	1236	50171	738	452	23	300	物理：40 %； 化学：22%； 材料与工程：19%； 生物医药：18%； 其他：1%

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	300	188	108	4	133	162	0	0	5

运行与开放

2021 年度开展课题 300 项，为 64 家用户单位提供了实验条件。2021 年度计划运行总机时 49009 小时，实际运行总机时 51407 小时，完成了运行计划、实现了年度科学实验目标。

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	8228	2700
实际运行机时	1567	8293	2694
完成率	104.4%	100.8%	99.8%

表：未纳入考核的磁体及实验系统

	SM1 及超快光学	SM2	PPMS	低温输运	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	2968	6552	6600	880	7440	1200	900	790	1135	2100	940	4096	980
实际运行机时	3040	6984	7368	800	7704	1585	930	793	1097	2280	1100	4128	1044
完成率	102.4%	106.6%	111.6%	90.9%	103.5%	132.1%	103.3%	100.4%	96.7%	108.6%	117.0%	100.8%	106.5%

国际用户开放

2021 年度共为包括美国凯斯西储大学、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 3207 小时机时服务。

机器研究与实验技术发展

- 水冷磁体 WM3 在 $\Phi 200$ mm 室温孔径下产生了 20 T 磁场，刷新了同室温孔径磁体的世界纪录。
- 拓展了混合磁体功能，可提供场强 25 T/ $\Phi 148$ mm 大口径高背景场实验条件。
- STM 实现了微秒级超快原子分辨成像(400 $\mu\text{s}/\text{frame}$)，MFM 实现磁各向异性测量。
- 超导磁体 SM1 及超快光学系统的磁光克尔信号测量精度提高到 0.05 mrad 以下。
- 高场电子磁共振实现了超宽频(50-690 GHz)测量。
- 强磁场-极低温-超高压综合极端测量系统的温度和压力分别拓展至 300 mK 和 100 GPa。
- SM4 及配套 MRI 将活体猕猴脑磁共振成像分辨率提升至 100 微米并实现了活体小鼠脑 31P 磁共振信号采集。

维修改造项目进展

2021 年度“SHMFF 去离子水冷却系统维修改造”项目通过验收，改造后系统运行稳定，蓄冷能力和提纯能力成倍增加，使得水冷磁体的运行时间以及利用率大幅提高。

目前在研四项维修改造项目进展顺利，均已完成 2021 年度计划。其中：

“HWM11 与 WM3 水冷磁体维修改造”项目，完成了 HWM11 及 WM3 水冷磁体线圈研制任务和工艺自测试，等待项目验收。

“35 T 水冷磁体联合干式磁体原位原子成像平台”项目，完成 STM、MFM 研制，并进行了 30 T 以上测试；氦液化系统通过了现场安装和验收。

“9.4T 磁共振成像系统维修改造”项目，进行了梯度线圈系统改造，提升了稳定性和梯度场的强度；完成射频系统中 PET/MRI 猴脑线圈、高灵敏度多核射频线圈和兼容 9.4T MRI 的 PET 研制。

“强磁场-低温综合物性测试系统性能提升”项目，确定了稀释制冷机设计方案，已与牛津仪器（英国）签订采购合同；完成部分强磁场-极低温测试系统的先期测试。

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。2021 年新增优青 2 人，优青（海外）1 人，百人计划 1 人，万人计划 1 人。目前中心拥有高级职称人员 107 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 2 人, 万人计划 2 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		
196	105	79	12	107	72	17	32	17	296	26	1

*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

2021 年中科院强磁场科学中心的国际合作以通讯形式开展, 国内的交流合作以线下和通讯形式同时开展, 共举办了 11 场学术会议、学术报告 30 次 (其中, 强磁场科学论坛 9 次、青年论坛 16 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 17-18 日和 6 月 29-30 日分别召开了 “强磁场下输运特性”和“强磁场下实空间高分辨成像”用户交流会。



6 月 27-29 日, 主办了“第三届氦低温工程青年论坛”。

10 月 21-23 日, 承办了第九届“趋磁细菌研究及其应用”国际研讨会。



11 月 26-27 日, 召开 SHMFF 科技委员会/用户委员会会议。

科学传播

SHMFF 宣传、科普工作成效显著, 2021 年度两次登上央视《新闻联播》, 多篇稿件发表于央视、人民日报、新华社、科技日报等主流媒体; 参与了“公众科学日”和“全国科普日”等多项科普活动, 举办了“探秘强磁场”科普云直播; 组织人员参加中科院 2021 年科普讲解大赛; 2021 年度共接待参观 130 余次、共计 3000 余人。这些活动的开展, 普及了相关科学知识、弘扬了科学文化、塑造了科学精神。



两次登上央视新闻



大学生科普活动



全国政协副主席、中国人民解放军军事科学院院长、科技部副部长、中国科协党组书记考察调研 SHMFF



中科院副院长、安徽省委书记、安徽省省长调研 SHMFF

六、大事记

- 3月20日 安徽省省长王清宪调研 SHMFF
- 3月23日 中国科学院副院长张亚平调研 SHMFF
- 3月29日 全国政协副主席高云龙考察调研 SHMFF
- 4月17-18日 “强磁场下输运特性”用户交流会
- 4月27日 科技部副部长徐南平调研 SHMFF
- 4月27日 SHMFF 研制团队被授予 2021 年“全国工人先锋号”
- 5月13日 中国科学院副院长、党组副书记阴和俊调研 SHMFF
- 5月13日 “SHMFF 去离子水冷却系统维修改造”项目验收会
- 6月16日 中国人民解放军军事科学院院长杨学军上将调研 SHMFF
- 6月27-29日 “第三届氦低温工程青年论坛”（主办）
- 6月29-30日 “强磁场下实空间高分辨成像”用户交流会
- 9月24日 国家发改委创新驱动发展中心领导调研 SHMFF
- 10月21日 中国科协党组书记张玉卓调研 SHMFF
- 10月21-23日 第九届“趋磁细菌研究及其应用”国际研讨会（承办）
- 11月13日 安徽省委书记郑栅洁调研 SHMFF
- 11月26-27日 SHMFF 科技委员会/用户委员会会议

