

中国科学院强磁场科学中心

High Magnetic Field Laboratory of the Chinese Academy of Sciences

稳态强磁场实验装置

2015 年度报告

中国科学院强磁场科学中心

稳态强磁场大科学工程经理部

2016 年 3 月

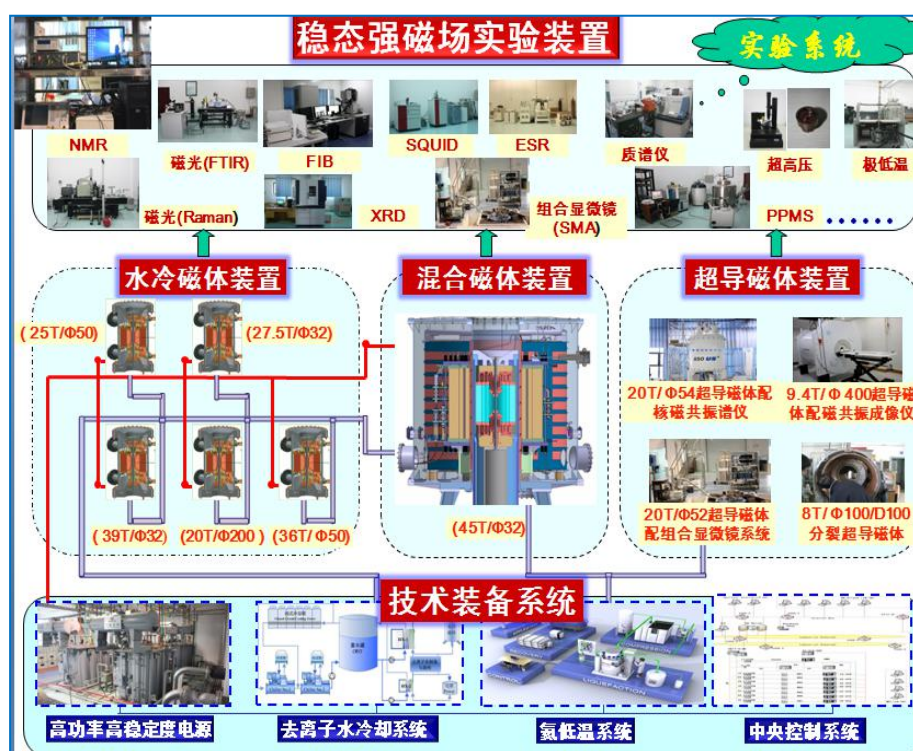
一、装置概况

装置概况

强磁场实验装置(HMFF)项目是由中国科学院和教育部联合申报并获批准的“十一五”国家重大科技基础设施建设项目。根据《国家发展改革委关于强磁场实验装置国家重大科技基础设施项目建议书的批复意见》(发改高技[2007]188号文件),强磁场实验装置采取“一个项目,两个法人,两地建设,共同管理”的建设模式—在中国科学院合肥物质科学研究院(简称合肥研究院)建设稳态强磁场实验装置(SHMFF,简称稳态强磁场);在华中科技大学建设脉冲强磁场实验装置(PHMFF)。

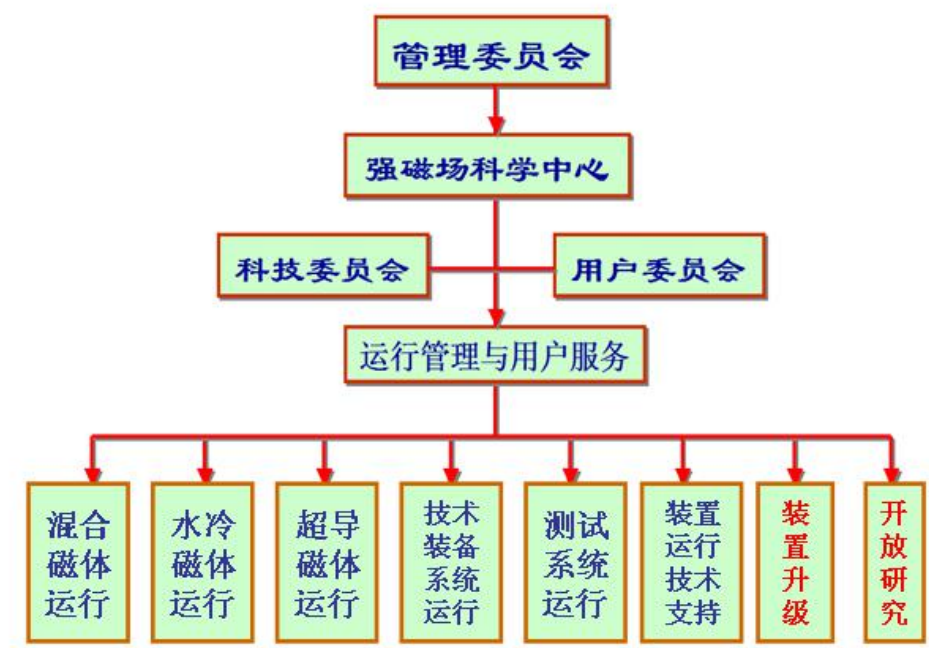
SHMFF 的法人单位是中国科学院合肥物质科学研究院,共建单位是中国科学技术大学。稳态强磁场实验装置工程经理部负责 SHMFF 建设的组织实施,各项任务以中国科学院强磁场科学中心为依托完成。

SHMFF 于 2008 年 5 月 19 日获批开工,建设目标是:建立 40T 级稳态混合磁体实验装置和系列不同用途的高功率水冷磁体、超导磁体实验装置,使我国的强磁场水平跻身于世界先进行列。建设满足上述稳态强磁场实验装置运行所需要的 20MW 高功率高稳定度电源系统、20MW 高功率去离子水冷却系统、氦低温系统和中央控制系统;建设强磁场实验装置上的输运、磁性、磁光、极低温、超高压和组合显微等科学实验测试系统,为开展凝聚态物理、化学、材料科学、地学、生物学、生命科学和微重力等学科的前沿研究提供强磁场平台。



SHMFF 磁体、系统构成图

组织框架



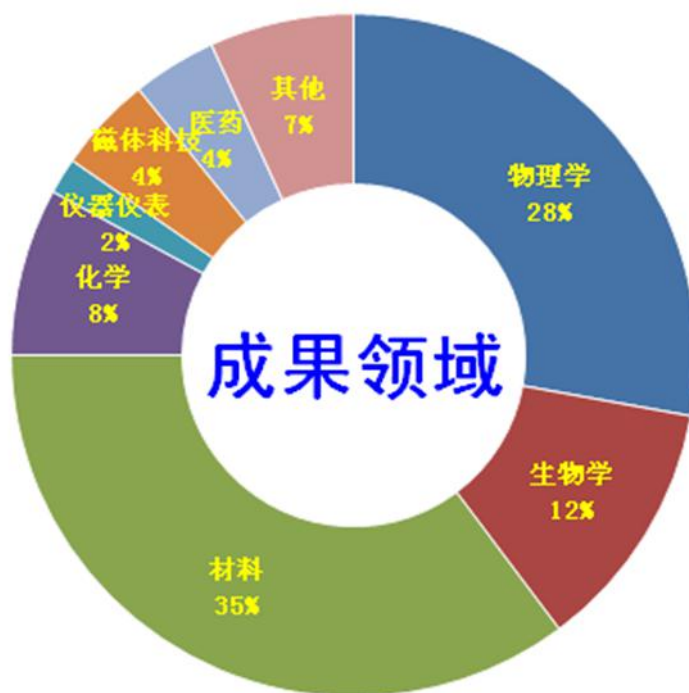
二、研究进展及成果

科技论文发表、获奖及专利统计

2015 年用户利用 SHMFF 进行实验并公开发表论文 176 篇，其中：SCI 收录论文 169 篇，EI 及其它论文 7 篇。此外，授权专利 3 项，其中发明专利 2 项，实用新型专利 1 项。软件著作权登记 5 项。

科技论文发表、获奖及专利

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
169	131	172	176	0	2	1	5



承担项目情况

强磁场中心在承担 SHMFF 的建设任务和先期试运行任务的同时，积极争取各类科研项目，在研项目包括：国家重大研究计划课题 3 项，中国科学院“个性化药物战略性先导科技专项”1 项，中国科学院科研装备研制项目 1 项，科技部 ITER 专项 1 项，中国科学院、国家外国专家局创新国际团队项目 1 项，国家自然科学基金 47 项（面上项目 17 项、青年项目 19 项、大科学装置联合基金重点支持项目 3 项，大科学装置联合基金培育项目 8 项），安徽省自然科学基金 7 项（面上项目 4 项，青年项目 3 项），合肥物质技术中心项目 5 项，合肥研究院院长基金 3 项。

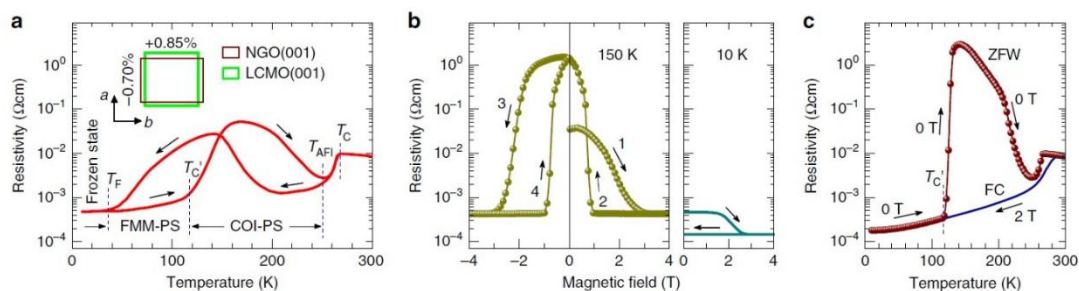
2015 年强磁场中心新增科研项目有：国家自然科学基金 22 项，安徽省自然科学基金 7 项，合肥大科学中心高端用户培育基金 4 项，合肥大科学中心技术研发项目 1 项，合肥研究院院长基金 2 项，横向项目 10 项。

SHMFF 用户科研成果

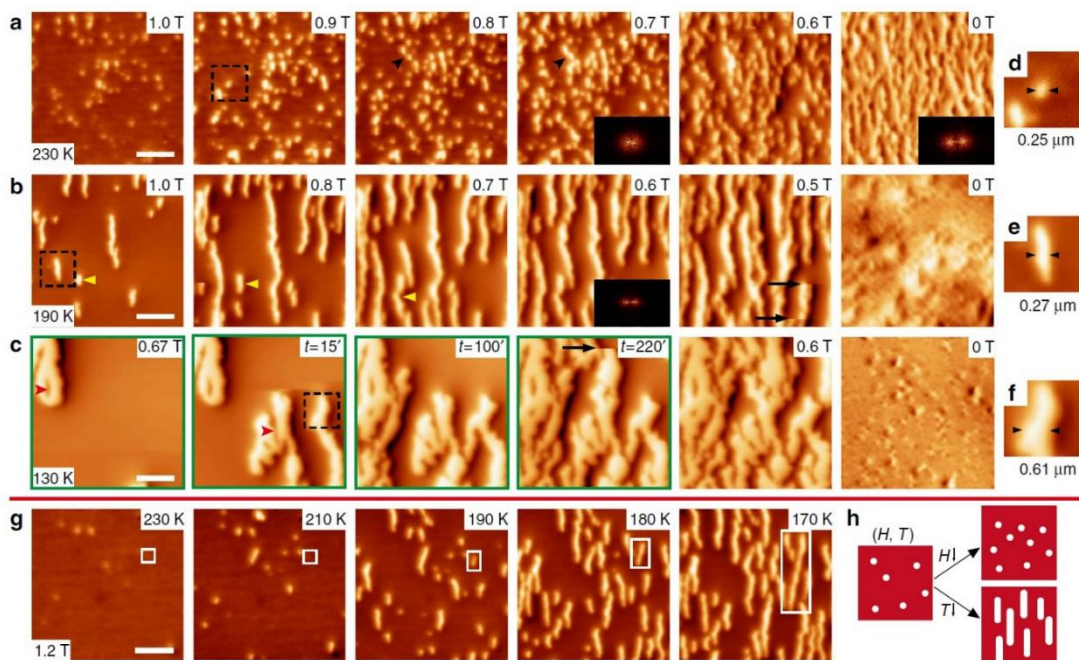
1、材料科学研究领域：

- 锰氧化物相分离实空间观测取得重要进展【Nature Communications 6:8980(2015)】

庞磁阻锰氧化物中由于不同相互作用的耦合，处于竞争状态的热力学相能够同时存在。通过对这些相在实空间的分布以及演化规律的探索，有助于理解这些相互作用在相分离中扮演的角色，因此在实空间对相分离的观测一直是该领域的热点之一。中科院强磁场中心的陆轻铀实验组与中科大吴文彬实验组利用自制的 20 T 超导磁体中的磁力显微镜，在一类受各向异性外延应力调控的相分离锰氧化物薄膜中观测到相分离从电荷有序态到重现的完整过程，发现了丰富的相分离行为。这个工作的重要性还在于从相变时相竞争的形态出发我们得以推断出相互作用的竞争关系，同时可实现对相竞争的形态进行人工调控。



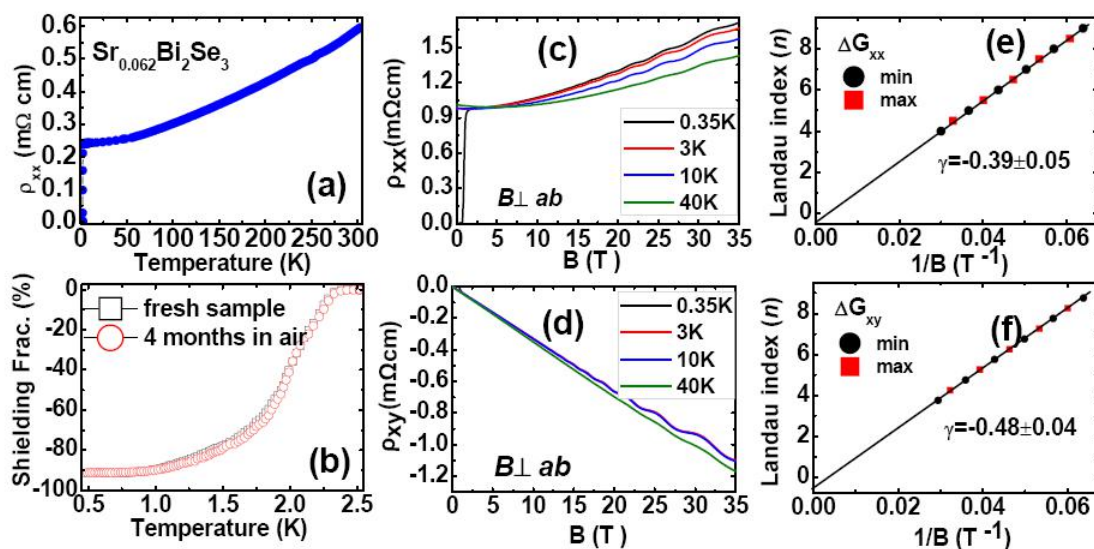
$\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{NdGaO}_3(001)$ 薄膜的输运性质



$\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{NdGaO}_3(001)$ 薄膜在不同温度下由降场导致的 COI 重现的形态及调控

- 强磁场下拓扑超导单晶体材料 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 研究 【Journal of the American Chemistry Society 137, 10512 (2015)】

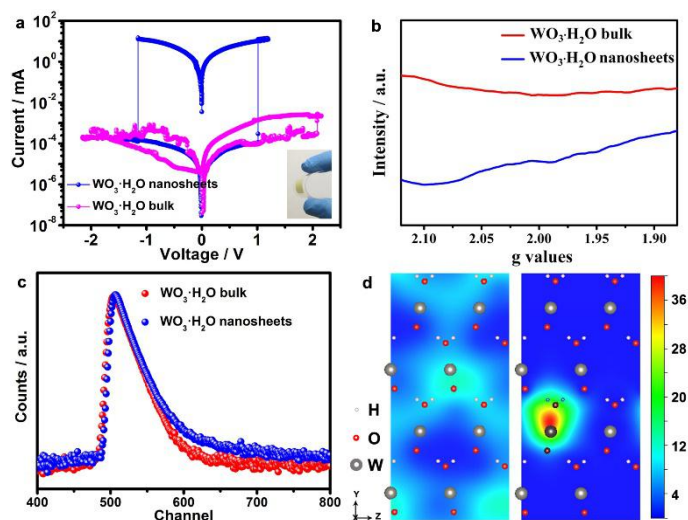
中国科学院强磁场科学中心张昌锦研究员小组利用高温熔融法，成功把碱土金属元素Sr插入到典型的拓扑绝缘体材料 Bi_2Se_3 中，获得了高质量的 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 单晶体，这种材料表现出高达91.5%的超导体比。研究人员将该材料放置于空气中长达4个月时间，发现该材料的超导性质没有发生变化，说明其在空气中十分稳定。研究人员利用SHMFF 五号水冷磁体研究发现该材料在10T到35T区间出现了周期性的Shubnikov deHaas (SDH) 量子振荡信号，这种振荡信号的出现表明单晶样品的品质很高，其内部的载流子具有高的迁移率。通过该振荡信号进行分析，给出了这个体系存在拓扑保护的表面态的证据。这些结果表明 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 单晶体是研究拓扑超导电性的理想材料。



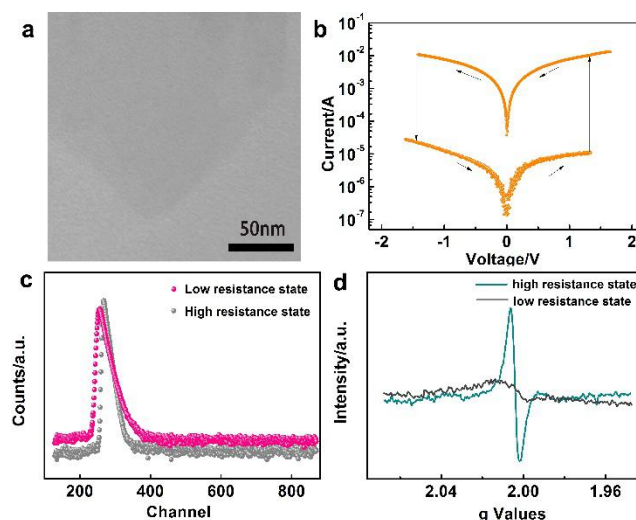
(a) $\text{Sr}_{0.062}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 单晶体的超导转变; (b) 样品的超导体积分分数; (c)和(d) 利用稳态强磁场水冷磁体装置测量得到的样品的量子振荡; (e)和(f) 通过对量子振荡数据进行分析, 得到反映拓扑表面态的证据:朗道指数和 $1/B$ 的截距接近 0.5

- 取得非易失性记忆存储研究新进展【Journal of the American Chemistry Society 137, 3102 (2015); Journal of the American Chemistry Society 137, 15043 (2015)】

中国科学技术大学谢毅院士、肖翀副研究员课题组在关于高性能柔性非易失性阻变存储器的研究中取得新进展, 设计合成出具有优异存储特性的基于超薄纳米片组装的 $\text{Cu}/\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{ITO-PET}$ 和 $\text{Au}/\text{SnO}_2/\text{ITO-PET}$ 柔性非易失性阻变存储器。通过与强磁场中心童伟研究员合作, 利用电子顺磁共振谱, 并结合正电子湮没技术, 详细研究了其阻变机理。



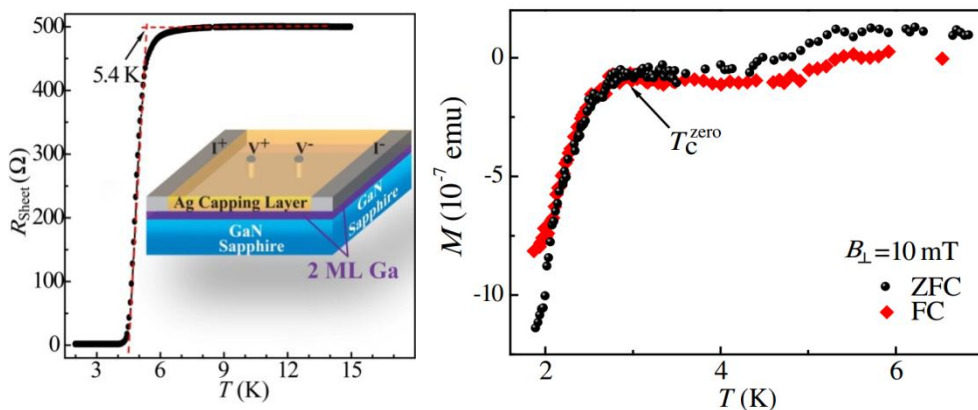
$\text{Cu}/\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{ITO-PET}$ 柔性非易失性阻变存储器性能构效关系示意图



Au/SnO₂/ITO-PET 柔性非易失性阻变存储器性能构效关系示意图

- 发现类石墨烯结构人工二维超导体【Physical Review Letters 114, 107003(2015)】

北京大学物理学院量子材料科学中心王健研究员与清华大学马旭村研究员、薛其坤院士、北京大学谢心澄院士、中科院物理所谷林研究员、中科院苏州纳米所杨辉所长、美国威斯康辛大学 Lian Li 教授、以及中科院强磁场中心田明亮研究员等人合作首次发现了一种新的二维超导相：两个原子层厚（0.556 nm）的晶体 Ga 生长在 GaN(0001)表面上，形成宏观面积的类似石墨烯或硅烯的六角蜂巢结构，是新的一种人造二维晶格，其原子结构与原子间距与所有 Ga 的体相都不同，是一种新的二维超导体。GaN 衬底上的类石墨烯结构的单晶 Ga 超导薄膜的发现，具有重要的物理意义及应用潜力。相关文章在《物理评论快报》主页以编辑推荐的形式报道。



左图：电阻随温度的变化关系显示两原子层Ga薄膜的T_c为5.4 K。插图为样品电输运测量示意图。右图：两原子层Ga薄膜超导的迈斯纳效应证据。

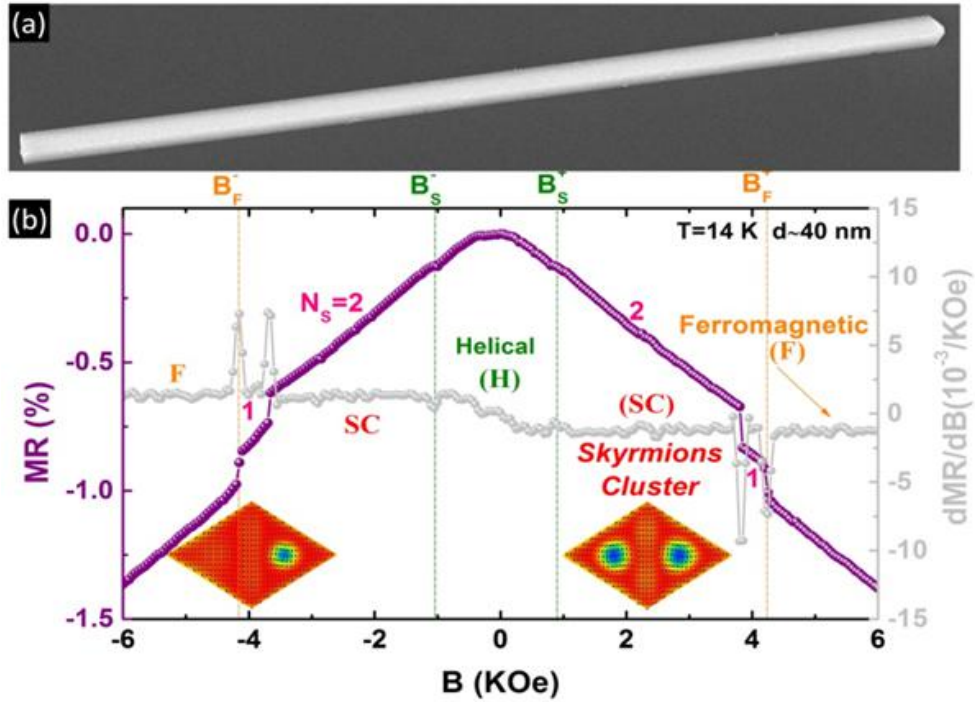
- 在 Skyrmions 研究中取得系列成果【Nature communications 6, 8504 (2015); Nature Communications 6, 7637 (2015); Physical Review B 91, 024403 (2015)】

斯格明子 (Skyrmion:S) 是近几年才发现的新型拓扑纳米磁结构，在低能耗高密度磁存储器件方面因具有潜在的应用价值而备受关注。

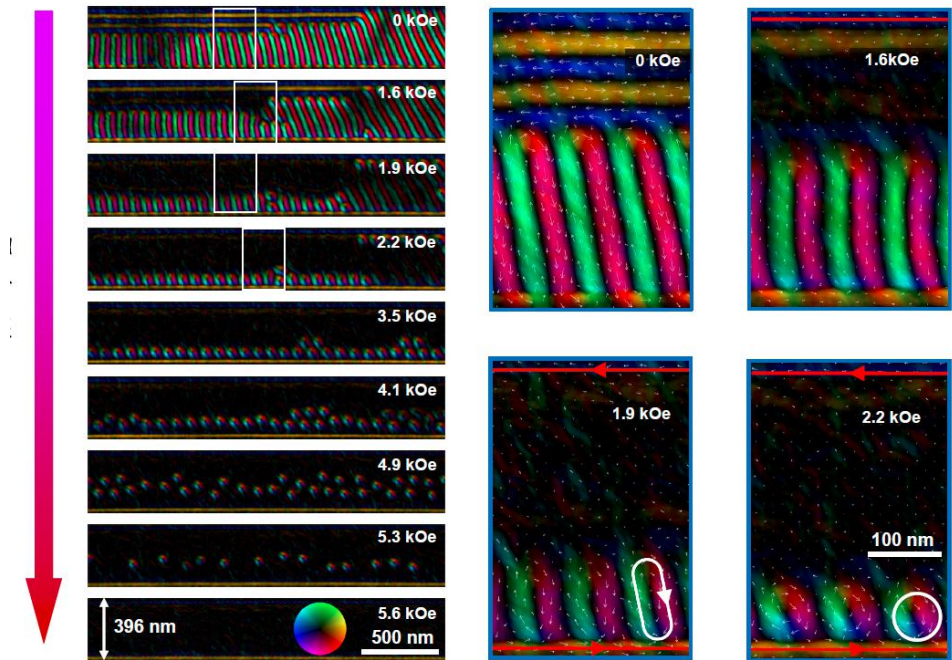
针对此项工作强磁场中心田明亮研究组与美国霍普金斯大学臧佳栋博士、威

斯康星大学麦迪逊分校金松教授、复旦大学车仁超研究组进行了合作，取得了系列研究成果：成功实现单个 S 的电探测、观察到一维纳米条带中的 S 链、发现具有 S 相的螺旋磁有序 MnSi 体系在相变临界点的临界行为是三重临界行为。

此系列研究工作分别利用了稳态强磁场 SQUID、PPMS、XRD 等测量设备。相关的实验结果为以后磁 S 材料的潜在应用打下了一个很好的基础，为了解纳米尺度下 S 相特性及未来制备微、纳 S 基自旋电子学器件有着重要的指导意义。



单个 Skyrmions 的产生或者湮灭对应磁阻的跳跃：(a)：高质量单晶 MnSi 纳米线的扫描电子显微镜形貌图；(b)：单根纳米线的磁电阻以及相应的磁结构

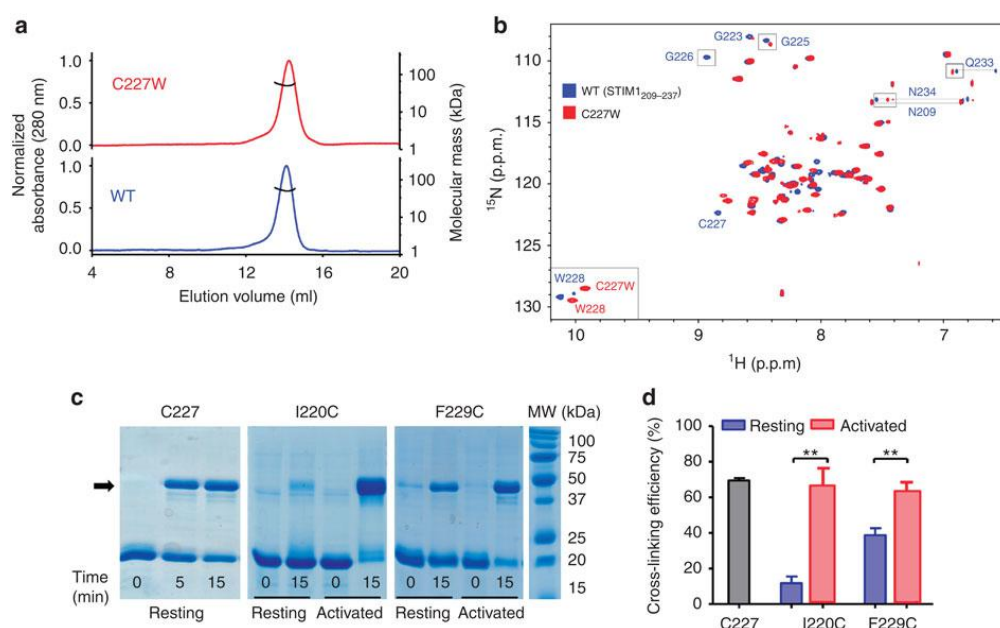


396 纳米宽的纳米条带中磁场驱动的单 s 链的形成及其运动

2、生命科学研究领域:

● STIM1 构象变化促进钙离子信号由内向外转导【Nature Communications 6,7826 (2015)】

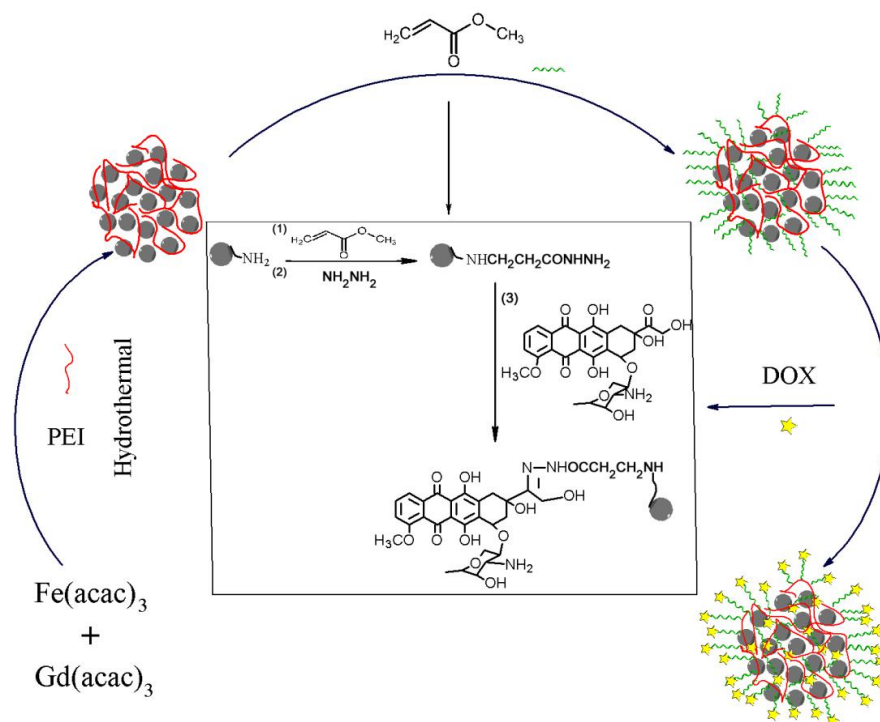
中科院强磁场科学中心王俊峰课题组与德州农工大学周育斌课题组、北京师范大学王友军课题组合作在 STIM1 蛋白的研究中取得进展。在该项研究中, 研究人员利用核磁共振手段, 得到 STIM1 蛋白跨膜区的一个功能获得性 (gain-of-function) 突变, 并围绕该突变进行了一系列生化和细胞研究。研究结果揭示, 由于跨膜区的局部重排, 而并不是跨膜区多聚状态的改变, 促使 STIM1 胞内区域出现构象变化。此外, 研究人员还鉴定了稳定 STIM1 自抑制构象的关键性残基区域。该项研究工作提出了新的信号由内向外传导的分子机制, 强调了跨膜区构象变化在信号传导过程中起到了至关重要的作用。



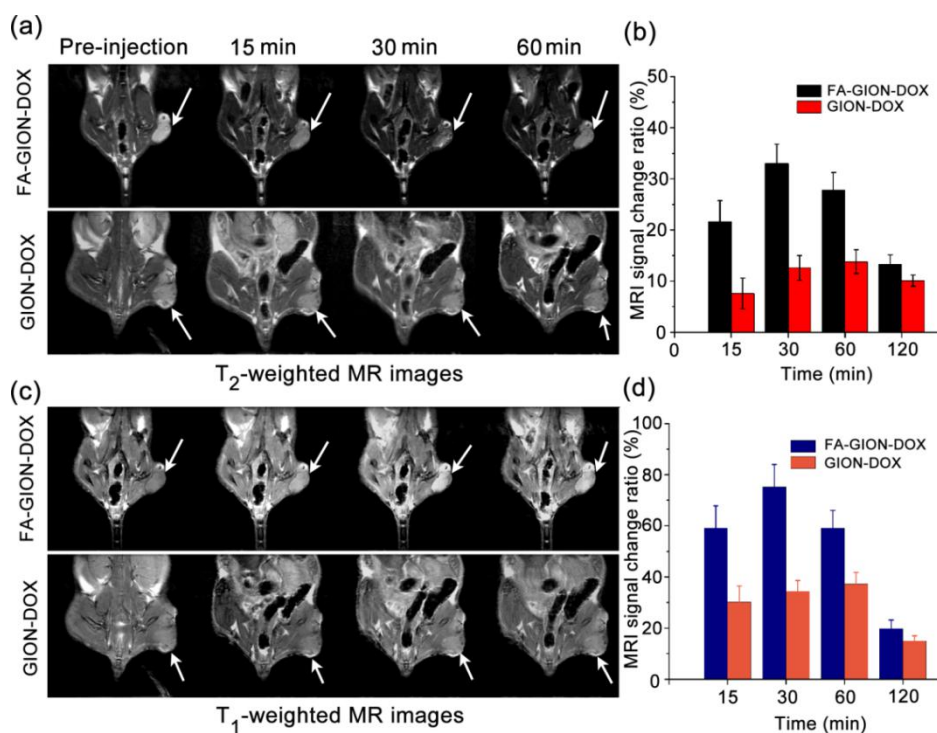
STIM1 跨膜区被激活后的结构变化: a 野生型 (蓝色) 和 C227W 突变体 (红色) TM-CC1 的分子量测定 b 野生型 (蓝色) 和 C227W 突变体 (红色) 组装到 bicelle 后的 HSQC 光谱叠加 c 二硫键交联结合非还原 SDS-PAGE 揭示了蛋白的二聚体性质 d STIM1-TM 单半胱氨酸突变体交联效率的 bar 图

● 药物载体与MR造影剂研究取得重要进展【Advanced Functional Materials 25, 6101-6111(2015)】

一些研究表明, 肿瘤细胞周围环境呈现弱酸性。技术生物所生物能源与材料研究室吴正岩研究员课题组与强磁场中心钟凯研究员课题组合作, 利用稳态强磁场装置之一的9.4T/400mm大孔径动物磁共振成像系统, 瞄准现阶段肿瘤治疗中的部分难题, 开发了一种对pH敏感的药物释放系统, 并将T₁-T₂双模磁共振成像模式引入此系统中。研究人员制备了纳米尺寸的Gd/Fe₃O₄掺杂的双模磁共振造影剂, 并对此造影剂进行了接入叶酸 (folic acid, FA) 有机功能化修饰, 利用对pH敏感的化学键负载化疗药物阿霉素 (doxorubicin, DOX)。当载药的纳米粒子 (FA-GION-DOX) 在FA受体介导入肿瘤细胞的酸性核内体和溶酶体后, 负载化疗药物的化学键断开, 阿霉素逐渐释放出来杀死肿瘤细胞。动物实验证明, 该体系拥有良好的肿瘤生长抑制效应和磁共振成像造影增强效果, 为可视化监测肿瘤的治疗提供可能。



FA-GION-DOX合成过程示意图



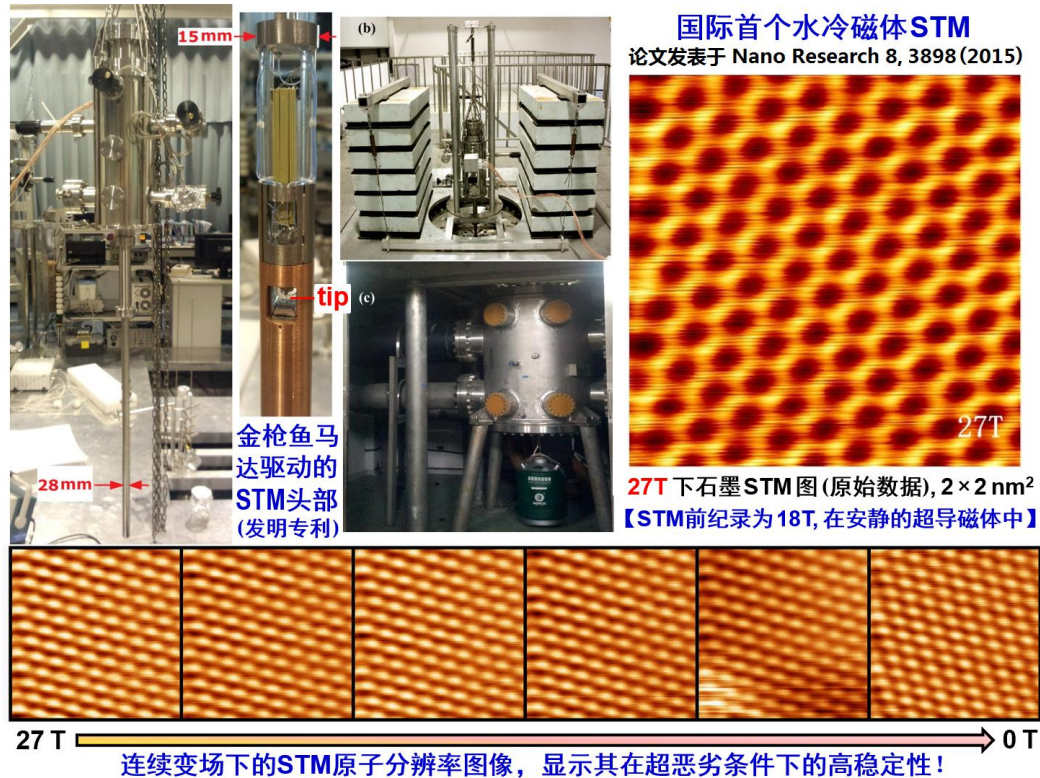
T_1 - T_2 双模态MRI监测肿瘤内FA-GION-DOX的输送情况

3、仪器研究：

- 实现首个水冷磁体原子分辨率扫描隧道显微镜【Nano Research 8(12): 3898-3904(2015)】

强磁场科学中心陆轻铀研究组首次在 10 兆瓦水冷磁体中实现了 27 T 强磁场环境下的 STM 原子分辨率成像，得到的石墨样品的原始成像数据显示出清晰的

原子分辨率电子态周期结构。该水冷磁体的室温口径为 32mm，能够产生的最高磁场为 27.6 T。这一工作也为在 45T 混合磁体中实现 STM 原子分辨率成像奠定了基础。



左上图：首个水冷磁体原子分辨率扫描隧道显微镜（STM）的实物照片；中心图：强磁场科学中心编号为 WM4 的水冷磁体的实物照片；右上：在 WM4 中测得的 27T 强磁场中的石墨 STM 原子分辨率图像；下图：在 WM4 中测得的变场条件下的石墨 STM 原子分辨率图像系列。所有的 STM 成像数据均为未加工的原始数据。

三、装置建设、运行与改造

装置建设情况

1、总体进展

目前，SHMFF 处于“边建设、边运行”和工程建设收官阶段，场强最高的混合磁体已完成了绕制、热处理、VPI 所有工艺环节，所有零配件全部加工到位，正在进行总装。该磁体建成后 SHMFF 将竣工验收。其余已建成的磁体装置和科学实验测试系统从 2010 年起，陆续投入了先期试运行并对用户开放。

2、取得了若干重大突破：

- 水冷磁体创三项世界纪录（水冷磁体 WM4 获得了 27.5 T 的磁场，刷新了单台水冷磁体在 10 MW 功率下达到的最高场强的世界纪录；水冷磁体 WM5 在输入电流 36820 A 的条件下，获得 35 T 稳态强磁场，是 50 mm 室温孔径下的最高场强；水冷磁体 WM1，在输入电流 37960 A 时，获得 38.5T 的磁场强度，此前国际上在同等大小孔径的水冷磁体上的最高磁场强度为 37.5 T，该磁体创造了 32mm 孔径磁场强度最高的世界记录）；
- 建成了国际上首个扫描隧道显微镜-磁力显微镜-原子力显微镜三种显微

镜合一的组合显微镜，该系统安装在 20T 超导磁体上，对材料进行表征研究；在水冷磁体 27T 场强下实现 STM 成像。

- 建成了亚太地区首个一体化的 9.4T、400mm 口径高场磁共振成像-动物实验室研究平台，是国内首个达到万级清洁标准的磁共振成像实验室。

在中科院条件保障与财务局组织的十二五期间“135”重大突破专项验收中，“突破高场水冷磁体和混合磁体技术，建立世界先进水平的稳态强磁场装置”验收结果为“院优秀”。

SHMFF 磁体参数表

磁体名称	编号	磁场强度/T	孔径/mm	电源功率/MW	目前状态
超导磁体	SM1	8-10T	100	-	维修
	SM2	20	52	-	开放共享
	SM3	20	54	-	开放共享
	SM4	9.4	400	-	开放共享
水冷磁体	WM1	38.5	32	25.2	开放共享
	WM2	25	50	15	开放共享
	WM3	19.5	200	20	开放共享
	WM4	27.5	32	10	开放共享
	WM5	35	50	24	开放共享
混合磁体	HM1	45	32	28	在建
内水冷 34T					
外超导 11T					

SHMFF 运行情况

先期投入试运行的磁体和实验系统，2015 年度运行状况良好。2015 年实际运行总机时 50793 小时，其中有效机时 47686 小时，完成了 2015 年度运行计划（2015 年计划运行总机时 46646 小时，其中有效机时 40905 小时）。

2015 年度用户围绕新型量子功能材料的合成与强磁场调控生长，非常规超导机理、关联电子功能材料量子态表征和多维度调控、与重大疾病相关的生物学/药理学等方面开展了基础性研究。共接收了包括清华大学、北京大学、浙江大学、复旦大学、南京大学、中科院高能物理研究所、中科院物理研究所、上海硅酸盐研究所、广州生物医药与健康研究院、上海有机化学研究所、德国马格德堡大学、美国杜兰大学、美国印第安纳大学等 44 家单位在内的 339 份实验课题申请，通过审核并完成了 316 份实验课题，发表论文 176 篇，实现了 SHMFF 2015 年度科学实验目标。

在机器研究方面，继水冷磁体 WM1、WM4 和 WM5 创三项纪录后，本年度 WM3 在输入电流 39500 A 时，获得 19.55T 的磁场强度，这也是目前国际上同等孔径水冷磁体所能产生的最高场强。

SHMFF 用户及课题统计表（2015 年度）

设施	用户	院内	院外	其中
----	----	----	----	----

	总数		国内	国外	大学	研究所	政府机构	企业	军工	其他
用户单位	44	16	24	4	25	16	0	1	0	2
申请课题数	339	277	58	4	126	209	1	1	0	2
完成课题数	316	262	50	4	107	206	0	1	0	2
实验人数	340	226	110	4	110	227	0	1	0	2

各磁体及实验系统 2015 年运行机时

主体/系统名称	计划运行时间（小时）		实际运行时间（小时）		维修时间 （小时）	故障时间 （小时）
	有效机时	机器研究	有效机时	机器研究		
水冷磁体 WM1						
水冷磁体 WM2	750	45	630	114	0	0
水冷磁体 WM3						
水冷磁体 WM4						
超导磁体 SM1	592	0	0	0	0	0
超导磁体 SM2	5256	1296	6096	672	0	0
超导磁体 SM3	7536	912	7488	731	336	216
超导磁体 SM4	1764	648	2197	240	256	
多功能物性测试系统 (PPMS)	6624	240	8208	168	160	200
超导量子干涉仪 (MPMS)	6840	240	8052	0	0	0
拉曼光谱仪(Raman)	1616	152	1604	152	48	0
红外光谱仪(FTIR)	1696	376	1620	320	24	24
低温输运测试系统	1360	344	1888	0	0	0
电子自旋共振谱仪 (ESR)	1100	100	1237	120	16	0
X 射线衍射仪(XRD)	1500	100	1292	163	98	50
组合显微测试系统 (SMA)	3056	1040	4064	448	0	0
高场极低温输运测试系统	1200	240	2352	24	0	0

四、科技队伍与人才培养

中国科学院强磁场科学中心十分重视人才培养工作，通过引进国外杰出人才，培养优秀青年人才及招聘合肥研究院和强磁场中心特聘研究员等方式吸引紧

缺性骨干人才等措施提供人才保障。

截止 2015 年年底，中国科学院强磁场科学中心共有在职人员 178 人。其中，中国科学院院士 2 人，研究员 36 人，副研究员 40 人，中级 47 人，初级及以下 35 人，博士后在站 12 人，合肥研究院特聘研究员 2 人，外聘专家 1 人，中心特聘研究员 3 人。

2015 年中国科学院强磁场科学中心新增的人才项目有：1 人入选中组部第十一批“青年千人计划”，1 人入选中青年科技创新领军人才，1 人入选 2014 年“万人计划”青年拔尖人才，1 人入选 2015 年度关键技术人才，1 人入选中科院青促会会员，3 人入选中科院特聘研究员核心，5 人入选中科院特聘研究员骨干，1 人获中科院青年科学家奖，2015 年度国家公派出国留学项目获批 2 项，中国科学院王宽诚教育基金国际会议项目获批 1 项。创新国际团队-强磁场下材料物理与生命科学前沿问题研究团队项目正式启动。

中国科学院强磁场科学中心目前在读研究生 124 名，其中博士研究生 59 人，硕士研究生 65 人，毕业博士 15 人，毕业硕士 9 人。

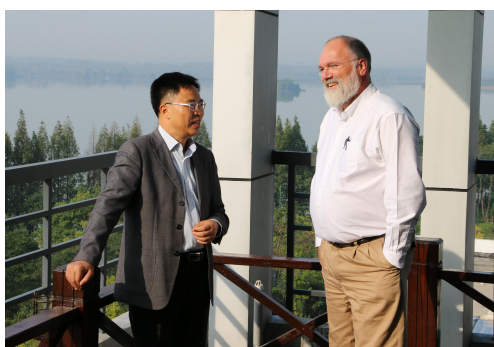
设施 人员 总数	按岗位分			按职称分			学生			在站 博士后
	运行维 护人员	实验研 究人员	其他	高级 职称 人数	中级职 称人数	其他	毕 业 博 士	毕 业 硕 士	在 读 研 究 生	
178	79	76	23	84	59	35	15	9	124	12

五、合作与交流

2015 年中心共接待海外专家 40 余人；中心科研人员出国参加学术会议 9 人，开展合作研究 4 人。

强磁场中心参加第 24 届国际磁体技术大会并作大会特邀报告；全球强磁场论坛成立，中科院强磁场中心是理事单位；“强磁场下的基础科学问题”跨学部学科发展战略研究项目启动；“强磁场下材料物理与生命科学前沿问题”创新国际团队项目正式启动；参与筹备第 536 次香山科学会议 “强磁场下的科学问题”讨论会；举办了合肥磁性斯格明子专题国际研讨会、国际精准医疗研讨会暨中科院强磁场科学中心磁共振生命科学部 2015 学术年会；开办“强磁场科学论坛”系列学术讲座。国内外学术交流与合作得到进一步加强。

稳态强磁场首席专家高秉钧研究员在第 24 届国际磁体技术大会上（The 24th International Conference on Magnet Technology, 韩国首尔, 2015 年 10 月 19-23 日）作大会特邀报告，介绍稳态强磁场工程建设及水冷磁体研制情况，与会的国际同行对我们的进展特别是三台水冷磁体在性能指标上创造了世界纪录给予极大关注；美国国家强磁场实验室主任 Gregory Boebinger、副主任 Mark Bird，荷兰国家强磁场磁体实验室首席工程师 Jos Perenboom 在此次会议前后到强磁场中心访问；法国国家强磁场实验室磁体负责人 Francois Debray 计划在 2016 年来访。



高秉钧参加 MT24 作大会报告及前后两国外强磁场实验室人员到访



全球强磁场论坛（Global High Magnetic Field Forum, HiFF）签署成立，强磁场中心为理事单位



强磁场中心举办磁性斯格明子专题国际研讨会



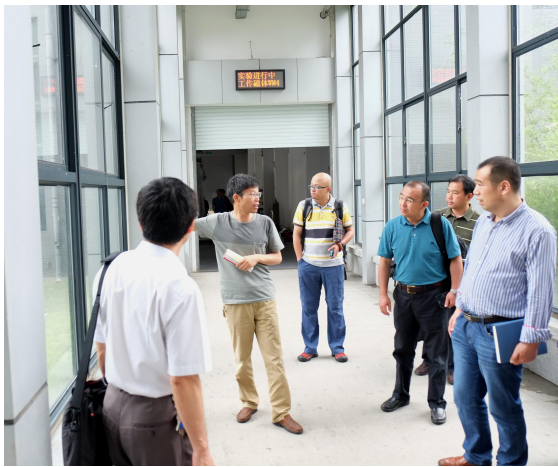
强磁场中心举办国际精准医疗研讨会暨中科院强磁场科学中心磁共振生命科学部 2015 学术年会

六、大事记

- 5月18日，中科院副院长王恩哥到强磁场科学中心考察指导。



- 6月2日，中科院重大任务局副局长于英杰到强磁场中心调研。



- 6月15日，省委常委、市委书记吴存荣到强磁场中心调研。



- 7月24日，安徽省科技厅厅长兰玉杰到强磁场中心参观。



- 10月19日至10月23日，高秉钧研究员在MT24上作大会邀请报告。
- 11月15日，200毫米口径水冷磁体WM3产生最大磁场强度19.55T，是此孔径下所能产生的最大磁场强度。

七、中国科学院强磁场科学中心通讯录

单位地址：安徽省合肥市1110信箱，中国科学院强磁场科学中心

邮编：230031

电话：0551-65592855, 0551-65592290

传真：0551-65591149

网址：<http://www.hmfl.cas.cn>

联系人：邱宁（E-mail: qiun@ipp.ac.cn）

左萍(E-mail: loux@hmfl.ac.cn)