

特色专题

建好、用好大科学装置积极推动人类知识创新——以稳态强磁场实验装置为例

匡光力, 黄杏洁, 汪文强

摘要 深入探讨了大科学装置在推动人类知识创新进程中的核心作用, 特别聚焦于稳态强磁场实验装置 (SHMFF) 这一实例, 剖析了其在达成科学目标、驱动知识创新、促进产业升级、加强国际合作与交流以及吸引高端人才等多个维度上的显著贡献。SHMFF 通过构建高场磁体集群, 为物理、化学、材料、生物学等多学科前沿研究提供先进实验条件, 支撑用户取得系列高水平成果。其衍生技术广泛应用于高端装备制造、药物研发等领域, 有效促进区域经济发展。同时, SHMFF 坚持开放共享理念, 通过国际合作在生物、材料等领域取得多项突破, 促进知识共享。SHMFF 的成功实践验证了大科学装置对知识创新的推动作用, 也为中国优化大科学装置布局、提升设施先进性提供了重要参考。未来, 持续建设和完善大科学装置体系, 将成为推动知识创新和科技进步的重要战略支撑。

关键词 大科学装置; 知识创新; 稳态强磁场实验装置; 实验测量系统; 建制化科研; 国际合作与交流

普赖斯在《小科学·大科学》一书中深刻指出, 知识的创新发展呈现出指数增长的趋势, 就像滚雪球一样, 从缓慢的渐变发展成为雪崩式的激变, 大科学就是这场激变的结果^[1]。从历史的视角, 现代知识创新的发展主要有 2 种方式: (1) 小科学。由科学家个人或科学小组以追求科学真理为导向, 自定问题、自由探索, 经常会产生意想不到的结果, 促发思想创新^[2]。这种方式是 19 世纪知识创新的主要方式, 在现代知识创新体系中依然存在, 如自然科学基金。(2) 大科学, 是一种全新的知识生产方式^[3]。相对于小科学, 大科学具有科学目标宏大、资金和人员投入巨大且集中、多学科交叉融合等特征, 包括工程式大科学(国际空间站计划、曼哈顿工程、欧洲核子研究中心的大型粒子对撞机计划等)和分布式大科学 2 类(如人类基因组图谱研究、全球变化研究等)^[4]。这种方式是

20 世纪中叶以来知识创新发展的主要方式, 其中大科学装置作为工程式大科学的主要载体, 对于孕育前沿科学创新突破、取得重大原创成果、推动重大技术革新具有重大的战略意义。本文立足国内大科学装置的发展现状, 以稳态强磁场实验装置 (Steady High Magnetic Field Facility, SHMFF) 为典型案例, 阐述大科学装置对于知识创新发展的重要作用。

1 大科学装置对知识创新的重要作用

1.1 大科学装置的定义、分类

迄今为止, 科学界对于大科学装置的定义一直在不断更新完善。基于大科学装置的外显特征, 大科学装置是指通过较大规模投入和工程建设来完成, 建成后通过长期的稳定运行和持续的科学技术活动, 实现重要科学技术目标的大型设施^[5]。基于大科学装置的内涵, 大科学装置是指为提升探索未知世界、发现自

中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心, 合肥 230031

收稿日期: 2024-10-21; 修回日期: 2024-11-25

作者简介: 匡光力, 研究员, 研究方向为强磁场科学技术, 电子信箱: kuang_gl@ipp.ac.cn

引用格式: 匡光力, 黄杏洁, 汪文强. 建好、用好大科学装置积极推动人类知识创新[J]. 科技导报, 2025, 43(5): 26-36; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.10.01466

然规律、实现科技变革的能力,通过国家统筹布局,依托高水平创新主体建设,面向社会开放共享的大型复杂的科学研究装置或系统,是长期为高水平研究活动提供服务、具有较大国际影响力的国家公共设施^[6],具有目标大、投入多、学科广、周期长、过程复杂且具有一定的不确定性等外显特征^[7]。这些外显特征均是大科学装置的建设过程中科学、技术和工程3要素相互交织产生的结果。基于大科学装置3要素的相互影响,大科学装置本质特征有:(1)重大的创新性,大科学工程在实施过程中必然会产生重大的原创成果(包括科学创新和技术创新);(2)科学、技术和工程3要素的动态关联性,大科学装置的实施过程中伴随着科学的发现、技术的进步以及工程的完善,三者相辅相成;(3)多学科、多领域交叉融合,大科学装置是多学科的科研团队、多领域的技术研发团队以及多层次的工程实施队伍为实现共同目标的重大合作举措;(4)动态演化的过程,大科学装置不仅包含大科学装置本身,更包括项目建议、设计、立项、实施和运行维护整个过程^[8]。

按照大科学装置的建设目的及其主要用途,大科学装置可分为3类:(1)专用研究装置,为特定学科领域的重大科技目标建设的研究设施,如全超导托卡马克核聚变装置;(2)应用型公共平台,为多学科领域的基础研究、应用基础研究和应用研究服务的、具有强大支撑能力的公共实验装置,例如光源装置、稳态强磁场实验装置等;(3)公益性服务设施,主要为社会各方需求(如国家经济建设、国防安全等)提供保障,例如遥感卫星地面站、长短波授时系统等^[9]。各类大科学装置的主要功能基本一致,主要为:(1)科技创新的摇篮,大科学装置为多学科领域的前沿研究提供最有力的技术支撑,实现科学技术的重大突破;(2)产业创新发展的源动力,大科学装置的创新成果产生新技术、孕育新的经济增长点,催生新兴产业,改变相关产业链的格局;(3)国家综合科技实力的象征,大科学装置具有明确的科学目标和国家使命,常被称为“国之重器”,是国家综合科技实力的标志性“名片”;(4)高端科技人才的“磁石”,大科学装置拥有国际先进的实验条件,具有明显的“磁吸效应”,必然成为吸引国内外的高端科技人才的“磁石”^[10],也是一批又一批优秀人才的“孵化器”。

1.2 中国大科学装置发展现状

中国自1984年北京正负电子对撞机开始陆续开展了一系列大科学装置项目,从跟踪学习到自主研制,逐步缩小了中国与欧美发达国家的科技差距,并在某些方面实现“并跑”,甚至一定程度的“领跑”。在21世纪之前,中国大科学工程装置主要用于专用研究和公益服务,布局不均衡、内容不全面;21世纪初到党的十八大期间,中国大科学装置的建设紧跟国外已有大科学装置的发展现状,聚焦世界科技前沿,主要用于多学科领域的前沿研究,呈现均衡发展态势(其中SHMFF就是在这一时期瞄准多学科前沿研究对于强磁场这一极端条件的需求而建设的);党的十八大以来,国务院印发国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年),明确了中国未来大科学装置的重点发展方向,瞄准科技前沿研究和国家重大战略需求,均衡全面发展,服务于国家科技强国建设和可持续发展战略。

“十一五”时期以来,中国大科学装置的建设发展迅猛,无论是工程建设水平、关键技术创新,还是前沿突破性成果的产出均取得了令人瞩目的进步,为中国的科技进步、经济发展提供了重要支撑。“十一五”时期以来中国布局的大科学装置项目有57个(图1),为探索科学前沿和完成重大科技任务提供了重要支撑,推动中国多领域前沿方向的科研水平进入国际先进行列。

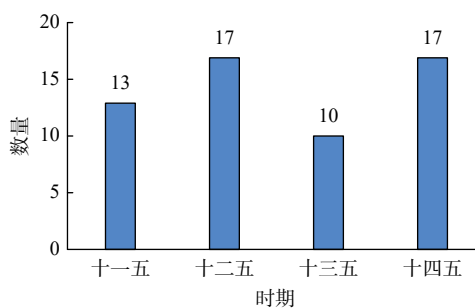


图1 中国“十一五”以来各五年计划布局建设的大科学装置数量

目前中国已经在运行的大科学装置有65个^[11],加上在建的以及准备开工的大科学装置,总数超过100个。从空间布局上,中国大科学装置分布较广,仅少数省市尚未加入大科学装置的建设或运行管理。中国科学院作为中国大科学装置建设和运行的主要

力量,目前已经建成并运行的大科学装置有23个,主要分布在13个城市,包括北京、上海、合肥、广州、武汉、兰州、昆明、深圳、青岛、东莞、临潼、河北兴隆、贵州平塘等。其中,北京有6个装置,上海有4个装置,合肥有3个装置,其余分别各拥有1个装置^[12]。

虽然中国大科学装置的建设如火如荼,而且在数量上不亚于欧美发达国家,但是布局较为分散,且装置的先进性仍有待加强,多为追赶国外已有的大科学装置。未来,瞄准国家重大需求,结合现有大科学装置的发展现状,亟须布局引领性的大科学装置。

1.3 大科学装置成为支撑知识创新发展的重要平台

时至今日,新一轮科技革命正蓄势待发,为知识的创新发展带来了千载难逢的机遇,也带来了前所未有的挑战。目前对于“新一轮科技革命究竟在哪些领域发生”“基础科学的重大突破什么时候能到来”等问题,科学界仍没有统一的答案,但全球的科学家一直认为大科学装置是打开未来科技魔盒的钥匙^[13]。大科学装置创造的极端条件(强磁场、超高压、极低温等)成为发现新现象、探索新规律、催生重大技术变革不可或缺的研究平台。

大科学装置是为探索未知世界、发现自然规律、实现技术变革提供极限研究手段的大型复杂科学实验系统,已经成为支撑重大原创成果产出、关键核心技术攻关的利器,成为人类知识创新的重要载体。

1) 在科学价值方面,大科学装置作为前沿科学研究取得重大突破的重要支撑,推动人类知识创新发展。

20世纪以来,有20多项诺贝尔物理学奖来自大科学装置的相关工作^[13];2009年的诺贝尔化学奖得主Ada Yonath,利用包括欧洲同步辐射光源(European Synchrotron Radiation Facility, ESRF)、德国国家电子同步辐射实验室(Deutsches Elektronen Synchrotron, DESY)、瑞士保罗谢勒研究所(Paul Scherrer Institute, PSI)等多种同步辐射光源设施来完成系列研究^[11];截至2023年底,位于安徽合肥的SHMFF已为包括北京大学、清华大学、美国哈佛大学、中国科学院物理研究所、德国马普所在内的国内外197家用户单位的3551项课题提供了超过60万h实验条件,用户依托该装置取得的成果发表论文2500余篇,其中Nature Index文章超过600篇,包括《Nature》8篇,《Science》

3篇,《Cell》1篇,Science/Nature子刊81篇,《PNAS》18篇,《PRL》28篇,《JACS》17篇,成为多学科前沿研究取得原创性突破成果不可或缺的研究平台。

2) 在产业应用方面,大科学装置为技术变革和产业升级提供强大的新质生产力。

以SHMFF为例,在建设和运行过程中形成的系列衍生技术和研究成果在高端装备、人工智能、精密测量、新材料研发以及药物研发领域具有重要的应用价值。如在实用化超导材料方面,用户依托SHMFF验证了铁基超导材料在高场领域应用的可行性,并研制出世界首台特斯拉级铁基超导高场内插线圈,极大地推动了铁基超导材料的实用化发展,并助力国内生产厂家在超导材料研发和生产方面持续取得技术突破,促进国产高品质线材的生产能力不断提升;在能源催化领域,用户依托SHMFF成功研发出一种新型取向二茂铁盐阴离子交换膜,极大地提高了阴离子交换膜燃料电池的功率输出,在可再生和清洁能源等多个领域具有应用前景;在特殊功能材料方面,SHMFF研究成果助推ThMn₁₂新型永磁材料产业化;在创新药物研发方面,用户利用SHMFF研发出多种具有广谱抗肿瘤作用的高选择性新型激酶抑制剂,其中I类创新靶向药物HYML-122已获国家药品监督管理局颁发的临床试验批件,即将完成二期临床试验;研制的新一代肝泌素产品,在药效方面好于已上市GLP1靶点相关药物,有望用于非酒精性脂肪肝炎、肥胖及糖尿病等慢性代谢性疾病治疗。这些技术成果和研究成果可以作为众多应用场景(高端仪器设备、智能产业装备、智能网联汽车、低功耗电子器件以及药物研发与改造等)的新质生产力,已经成立了10家高技术企业,年产值接近2.5亿元。此外国外系列大科学装置的经济产出也充分说明了大科学装置的产业应用价值,如英国散裂中子源在有机电子领域的研究贡献,在全球市场的价值已经超过130亿英镑^[14];英国钻石光源装置在2007—2020年为180家公司用户研发了106个产品,创立了25家企业,投入12亿英镑,产出18亿英镑。

3) 在国际合作与竞争方面,大科学装置作为大国重器,成为国际合作与交流的重要载体,同时也是国家综合科技实力的标志性“名片”。

全世界共有5个稳态强磁场实验室,分别位于中国、美国、荷兰、法国和日本,他们之间保持着广泛的

交流与合作,共同推动了全人类的稳态强磁场下科学研究与磁体技术发展;同时5个稳态强磁场实验室也在你追我赶,呈现激烈的竞争态势,力争这一领域的科技制高点。此外,事关人类共同利益和长远发展的科技领域,联合共建与合作研究越来越成为发展大科学装置的重要方式,如国际热核聚变实验堆(ITER)由中国与欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国7方攻坚。

4)在人才集聚方面,大科学装置可谓是高端科技人才的“磁石”和“孵化器”。

2017年8月,从哈佛大学归来的8位博士后王俊峰、刘青松、刘静、王文超、张欣、张钠、林文楚、任涛登上了各大媒体的头条。他们告别波士顿、扎根安徽合肥“科学岛”。让他们选择回国的原因,除了爱国之心,也因为这里有一个能让他们施展才华的舞台——“综合性能达到国际领先水平”的稳态强磁场大科学装置。同时大科学装置也是人才培养的实战场。大科学装置由于其先进性,所需要的大部分仪器设备需要自主设计研制,这不仅可以培训科研人员和企业开展世界领先的仪器、设备、技术的研发,还可以培养大量顶尖的青年科研人才和高质量的、国际水平的设备研制人才^[15]。

2 建好大科学装置是充分发挥其知识创新作用的重要条件

工欲善其事必先利其器。大科学装置作为现代科学研究的“国之重器”,是衡量一个国家科技实力和综合国力的重要标志,是实现高水平科技自立自强的重要保障,更是推动科技进步、促进知识创新不可或缺的力量。为了充分发挥其知识创新作用,建设好这些装置显得尤为重要。

2.1 建设国际领先性能的大科学装置

在现代社会,知识创新,尤其是原始创新与颠覆性创新,必须依靠基础研究。而在基础性、前沿性科学探索中,大科学装置发挥着举足轻重的策源地作用,成为基础研究工作不可或缺的重要支撑。作为探索未知世界、发现自然规律、实现技术革新的大型复杂科学研究平台,大科学装置是构筑科学前沿高地、应对经济社会发展挑战和保障国家安全的大规模基

础设施,其地位与作用日益凸显。

纵观历史,在1950年之前,用大科学装置获得诺贝尔奖的只有1项;到了20世纪70年代,利用大科学装置取得突破性成果获得诺贝尔物理学奖的比例达到诺贝尔物理学奖的40%;到了90年代,这一比例接近50%。尤其是20世纪以来,有20多项诺贝尔物理学奖都来自大科学装置相关的工作^[13]。这一数据的变化不仅反映了科学研究的进步,更凸显了大科学装置在推动科学前沿突破中的关键作用。

然而,建设国际领先性能的大科学装置并非易事。依赖从国外进口设备组装大装置虽然看似是捷径,实则暗藏隐患,无法真正达到国际领先性能的目标,甚至可能陷入技术受制于人的被动局面。因此,建设一流的大科学装置必须坚定不移地走自主研制的道路。

自主研制大科学装置,意味着在资金、人才、技术等关键资源上进行巨大投入。资金方面,需要确保持续而稳定的投入,以支持研发、制造、测试及运维等各个环节;人才方面,则需要汇聚国内外顶尖科学家、工程师和技术专家,形成一支高素质、高水平的科研团队;技术方面,更是要求不断突破,掌握关键核心技术,确保大科学装置的性能达到国际领先水平。

然而,自主研制不仅仅是对资源的巨大投入,更是一场对技术创新和突破的深刻挑战。在这个过程中,我们需要从零开始,或者基于现有技术基础进行深度创新和优化,以满足大科学装置对极限研究手段的特殊需求。这要求具备强大的研发能力,能够不断推出新技术、新材料、新工艺,并在实践中不断验证和完善。同时,还需要具备快速响应技术变革的能力,紧跟国际科技前沿,及时捕捉最新动态,将最新的科技成果转化为大科学装置的实际应用。

2.2 稳态强磁场实验装置的建设成就

“十一五”期间,国家发展和改革委员会批准建设稳态强磁场大科学装置,项目依托单位中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心承担装置建设和运行,中国科学技术大学参与共建。其建设成就充分体现了建好大科学装置对于发挥其知识创新作用的重要性。

1) SHMFF建设背景与历程。

作为现代知识创新最重要的极端条件之一,稳态

强磁场对于催生原创科学突破具有举足轻重的作用。因此,世界科技强国如美国、法国、荷兰、日本等,始终高度重视强磁场实验室的建设与发展。然而,在2007年之前,中国没有自己的稳态强磁场实验条件,严重限制了中国稳态强磁场条件下多学科前沿研究的创新发展。作为支撑多学科前沿探索与发展、助力重大科技攻关的关键性公共实验平台,SHMFF自2008年5月开工建设,2010年实现“边建设、边运行”模式,2017年9月27日通过国家验收。验收意见认为:建成的水冷磁体中有3台磁体的性能指标创世界纪录,强磁场水冷磁体技术达到世界领先水平。实现了大型强磁场铌三锡超导磁体技术的重大突破,达到国际一流水平。建成了40 T稳态混合磁体,磁场强度世界第二。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,建成了强磁场下低温超高压系统,使得中国稳态强磁场相关实验条件达到国际领先水平。专家组一致认为:稳态强磁场装置磁体技术和综合性能达到国际领先水平^[16]。全面掌握高场磁体核心技术,产生尽可能高的磁场,为中国基础学科提供最好的实验条件,成为SHMFF在装置验收后所要面对的首要科学目标。

2) 突破一批关键核心技术。

SHMFF是党的十八大以来建成的国家大科学装置之一。在初建之际,强磁场科学技术研究团队(以下简称“团队”)就展现出了前瞻的视野和非凡的远见。他们深入调研了全球范围内的稳态强磁场装置,并以此为基础,秉持着“追求卓越性能、确保使用便捷、力争国际领先水平”的核心理念,着手进行设计与建设,经过近10年的艰苦奋斗与不懈努力,最终建成了3类10台技术和综合性能均处于国际领先地位的磁体及6类20余种强磁场下实验表征系统,同时耦合极低温、超高压等极端实验条件,为揭示材料、物理、化学、生物等多学科前沿领域的自然规律,实现特殊功能材料制备和创新药物研发等技术变革提供了重要的极限实验条件。

尽管起步较晚,中国在稳态强磁场领域的发展却展现出了惊人的速度。不到10年的时间,中国SHMFF就成功研制出了10台磁体,包括世界第2台40 T级的混合磁体、5台具有国际先进水平的水冷磁

体和4台超导磁体。其中,3台水冷磁体分别以32 mm、50 mm、200 mm的磁体孔径创造了3项稳态磁场的世界纪录,彰显了中国在强磁场技术领域的实力。根据目前的技术手段,由内“水冷磁体”和外“超导磁体”组合而成混合磁体是能够产生最高稳态磁场的磁体装置,其技术难度也是最高的。2016年,团队自主研发成功中心磁场强度达40 T的混合磁体,使中国成为世界第2个拥有40特斯拉级稳态磁场的国家。自此以后,团队矢志不渝地追求科技创新、勇攀科技高峰。2017年底,团队将混合磁体磁场强度提高至42.9 T,而到2019年更是进一步突破至43.9 T。在合肥综合性国家科学中心预研项目的支持下,团队从导体构型到线圈结构再到磁体稳定性以及加工工艺进行了全链条的创新攻关和深度优化,取得了重大技术突破。在2022年8月12日,SHMFF混合磁体(图2)在26.9 MW的电源功率下,稳定地产生45.22 T的稳态强磁场,刷新了同类型磁体保持了23年的世界纪录,标志着中国在强磁场领域达到国际领先水平,成为世界可开展科学研究的最高稳态磁体。此外,在磁体技术创新攻关的同时,团队升级了水冷磁体技术装备系统,包括大功率高稳定度直流电源系统的供电能力、去离子水冷却系统冷却能力、中央控制系统的控制保护能力。在2024年9月22日,团队最新研制的磁体孔径为32 mm的水冷磁体(图3),成功产生了42.02 T的稳态磁场,打破了由美国国家强磁场实验室于2017年创造的水冷磁体41.4 T的世界纪录,成为国际强磁场水冷磁体技术发展新的里程碑,助力中国稳态强磁场技术发展实现“大满贯”,为科学家们开展物质科学研究提供了更好的极端实验条件。



图2 稳态强磁场实验装置混合磁体



图3 产生 42.02 T 稳态磁场的水冷磁体

这些技术成就不仅极大地提升了中国在强磁场科技领域的影响力和竞争力,也使中国的稳态强磁场技术和科学实验条件达到了国际领先水平。这些工程技术成果为物质科学研究和知识创新提供了强有力的支撑,为中国的科技进步和创新发展注入了新的动力。

3) 产出一系列高水平成果。

自 2010 年起,SHMFF 便开启了边建设、边运行的独特模式。在此期间,国内外高校、科研院所和企业的数千名科学家和工程师充分利用该装置,深入开展了前沿科学研究和技术攻关,在新奇量子效应、超导机理、新材料探索、催化机制、重大疾病病理以及创新药物研发等方面均取得进展。正是这些优秀的研究成果,使得 SHMFF 在众多同类装置中脱颖而出,其产出的重大科研成果跻身世界顶尖行列。截至 2023 年底,SHMFF 已经运行超过 60 万个机时,为国内外 197 家用户单位提供了实验条件,包括清华大学、北京大学、中国科技大学、中国人民大学、浙江大学、南京大学、复旦大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、中国科学院物理研究所、中国科学院高能物理研究所、中国科学院电工研究所、中国科学院半导体研究所,美国纽约州立大学、美国肯塔基大学、新加坡国立大学、德国马克思·普朗克学会等,还有一些国内的知名上市公司,如西部超导材料科技股份有限公司、维亚生物科技(上海)有限公司、国家海洋局所属企业等,均取得了预期的实验目标,助力企业实现技术创新。

通过 SHMFF,科学家得以在更广阔的领域和更深的层次上开展前沿探索,在物理、化学、材料、生物

医药、工程技术等多学科前沿探索中开展研究,发表论文 2500 篇,取得了众多具有重大意义的原创成果,如率先在拓扑半金属砷化镓片中观测到了新型三维量子霍尔效应的直接证据,迈出了量子霍尔效应从二维到三维的关键一步;揭示日光照射改善人类情绪、学习和记忆的分子及神经环路机制,为了解大脑工作机制以及探索相关疾病发生机制奠定了基础。

4) 催生一批新成果和新应用。

SHMFF 积极发挥大科学装置“沿途下蛋”机制,强磁场科学中心依托装置衍生多项具有广泛应用前景的科技成果,并成功转化为现实生产力,为经济社会发展作出了积极贡献。例如:(1) 扫描隧道显微成像技术。陆轻铀团队依托 SHMFF,成功研制国际首创的水冷磁体和混合磁体扫描隧道显微镜(STM),该技术在极端狭缝空间内,即便面对强烈震动,仍能在高达 27 及 30.1 T 的超强磁场中,精准捕获原子级图像,开创了国际研究新纪元。这一技术为在超高磁场下对凝聚态物质的新奇量子性质进行原子尺度的成像及谱学研究奠定了坚实的基础,具有广泛的应用前景。(2) 国家 I 类创新靶向药物研制。依托 SHMFF,刘青松团队在抗癌药物的研制方面取得了突破性进展。他们运用核磁共振波谱学等手段解析了药物的溶液结构,进而使用蛋白质工程等手段对药物进行改造和优化,最终获得了具有更高生物活性和稳定性的抗癌药物。这些药物的成功研制不仅为癌症患者提供新的治疗选择,也推动国家 I 类创新靶向药物的研发进程。(3) 非酒精性脂肪肝及糖尿病的治疗药物研发。王俊峰团队依托 SHMFF,开展与重大疾病相关生物大分子结构生物学及应用研究,最新研制的新一代肝胰岛素产品,其热稳定性和体内半衰期都得到了极大的提高,可实现常规保存和一周给药一次,在药效方面好于已上市 GLP1 靶点相关药物,有望在完成临床转化后用于非酒精性脂肪肝、肥胖及糖尿病等慢性代谢性疾病治疗。

上述技术突破和科技成果的取得不仅体现了 SHMFF 在物质科学研究领域的强大实力,也展示了其在知识创新方面的巨大潜力。这些科技成果的成功转化和应用不仅推动了相关产业的发展和升级,也为经济社会发展注入了新的动力。

3 用好大科学装置是推动知识创新的坚实保障

建设好性能国际领先的大科学装置, 抢占科技制高点, 成为原创性、引领性科技成果的策源地, 是推动现代大科学知识创新体系的关键。同时, 运行好、使用好这些大科学装置, 充分发挥大科学装置的时代使命是推动知识创新发展、支撑新一轮科技革命的坚实保障。

中国重大科技基础设施不断推进开放共享, 吸引了大批高水平用户开展科研工作, 但在公共实验平台类的设施上发现, 科研用户自发申请使用设施, 围绕国家紧迫的战略需求, 开展定向性科学问题牵引的建制化研究不多, 从而制约了依托设施开展高水平科学研究、产出重大原创成果、解决关键核心技术问题的能力^[17], 因此应充分聚焦世界科技前沿和国家重大战略需求开展建制化的科研攻关。

3.1 围绕大科学装置的科学目标搭建配套实验测量系统

作为打开未来科技魔盒的钥匙, 大科学装置除了需要创造极端实验条件, 还需瞄准科学目标搭建配套的实验测量系统。SHMFF 在设计之初就瞄准了量子物理、高温超导、脑科学等世界前沿科学问题建设了电输运、磁共振、磁性、探针显微、光谱学和材料合成 6 类 20 余种稳态强磁场实验环境的先进测量系统, 分别为极低温强磁场输运测试系统、综合极端物性测量系统、高场磁扭矩—热电效应测量系统、高场振动样品磁强计、35 T 磁致伸缩测量系统、材料物性测量系统 PPMS、磁性测试系统 MPMS、850 MHz 液体核磁共振波谱仪、凝聚态核磁共振系统、连续波多频高场电子磁共振系统、连续波 X-band 电子顺磁共振系统、超快磁光系统、变温 X 射线衍射仪、激光共聚焦拉曼光谱仪、傅里叶变换红外光谱测量系统、高场磁共振成像系统、35 T/45.22 T 高场 STM/MFM 系统、35 T/45.22 T 溶液 STM 系统、STM-MFM-AFM 组合显微测试系统、12 T 中可旋转 MFM 系统、12 T 干式超导磁体 STM/MFM 系统、磁场下材料合成系统、强磁场高压釜高通量反应系统^[18], 支持用户依托稳态强磁场大科学装置在新奇量子效应、超导机理、新材料探索、催化机制、重大疾病病理及药物研发等方面取得系列重要原创成果, 推动人类知识创新发展。如:

(1) 在材料研究领域, 浙江大学郑毅团队利用 SHMFF 的极低温强磁场输运测试系统对新型二维半导体材料薄层黑砷开展研究, 首次在黑砷中实现了对自旋的高速精准控制, 并发现了新奇的量子霍尔态, 该工作发表于《Nature》, 并入选《半导体学报》发布的 2021 年度“中国半导体十大研究进展”; (2) 在生命健康领域, 中国科学院大学熊伟团队利用 SHMFF 的高场磁共振成像系统揭示出日光照射改善学习记忆的分子及神经环路机制, 成果发表在《Cell》, 并入选 2018 年度“中国生命科学十大进展”。

同时, 结合国内众多用户的需求, 聚焦国家重大需求, 瞄准高温超导机理及实用性高温超导材料应用研究、低功耗量子材料研究、癌症及神经退行性疾病的发病机理研究及药物研发等瓶颈问题, 优化升级现有 SHMFF 实验系统以及新建实验系统, 包括: 高场万安级大电流超导测试平台、极低温比热测量系统、高场稀释制冷系统、高场动态磁电耦合系数测量系统、强磁场大视场光学成像系统等, 满足用户的现实需求。如中国科学院电工研究所马衍伟团队利用 SHMFF 高场万安级大电流超导测试平台在国际上首次验证了铁基超导材料在高场领域应用的可行性, 入选 IEEE 超导学会 2019 年亮点工作。

围绕大科学装置建设的一系列先进的实验测量系统, 实现了稳态强磁场大科学装置的“如虎添翼”, 极大地促进了原创性重大成果的持续涌现, 不断助力知识创新发展。

3.2 聚焦国家战略需求, 组织科研用户开展建制化科研攻关, 促进系统性知识创新

新时期, 大科学装置的时代使命不仅是解决世界科技前沿的重大科学问题, 更要聚焦解决国家重大战略需求的瓶颈, 这也是大科学的时代内涵。解决国家重大战略需求的瓶颈问题不仅仅要依托性能领先的大科学装置, 更需要集聚高水平的科研团队遵循目标导向开展建制化科研攻关, 促进系统性知识创新。

为充分发挥中国大科学装置的优势、凝聚全国相关科技力量协同攻关、促进重大成果产出, 各级主管部门均针对大科学装置的建制化科研攻关设立相应科研项目, 如大科学装置前沿研究重点专项、大科学装置联合基金等。

大科学装置前沿研究重点专项主要支持基于中

国在物质结构研究领域的 2 类大科学装置开展前沿研究: 一是粒子物理、核物理、聚变物理和天文学等领域的专用大科学装置, 支持开展探索物质世界的结构及其相互作用规律等的重大前沿研究; 二是为多学科交叉前沿的物质结构研究提供先进研究手段的平台型装置, 如光源装置、中子源装置和稳态强磁场装置等, 支持先进实验技术、实验方法的研究和实现, 提升对相关领域前沿研究的支撑能力^[19]。全国科研工作者每年均可以根据申报指南联合相关领域的科研团队和装置团队申报大科学装置前沿研究重点专项, 开展专项攻关, 提升大科学装置对知识创新、技术变革的支撑能力。

大科学装置联合基金由国家自然科学基金委员会和中国科学院于 2009 年初设立, 充分发挥国家自然科学基金遴选与管理的优势, 更好地集聚全国科研力量, 充分发挥中国科学院承建的大科学装置的综合平台效能, 开展多学科前沿交叉研究, 加强中国基础科学自主创新能力和源头创新能力, 更好地服务于国家战略需求^[20]。大科学装置联合基金的设立助力实现科学前沿突破、解决国家重大战略需求的重要技术问题。如在大科学装置联合基金资助下, 北京谱仪 III 合作组发现了至少含有 4 个夸克的新型强子态 $Z_c(3900)$, 为寻找和研究新型强子态开启了一扇大门^[21]; 中国科学院近代物理研究所刘杰团队利用兰州重离子加速器装置发展、制定了航天电子元器件抗辐射加固评价检测方法, 为宇航元器件的筛选检测、航天产品设计制造等提供了有力的科学技术支撑^[20]; 依托 SHMFF, 强磁场科学中心田明亮团队发现了一类三重简并拓扑半金属材料——三角结构的 $PtBi_2$, 对促进认识电子拓扑物态, 发现新奇物理现象, 开发新型电子器件以及深入理解基本粒子性质具有重要的意义^[22]; 强磁场科学中心王俊峰团队联合国外研究机构利用稳态强磁场实验装置设计出新型光控元件蛋白 cpLOV2, 拓展了 LOV2 系列蛋白在光遗传学工程中的应用^[23]。并且大科学装置联合基金极大地推动了大科学装置的开放共享。2012—2019 年 32 个高校和科研院所的科研团队依托 SHMFF 共获得大科学装置联合基金项目 104 项。大量的用户在大科学装置联合基金的支持下利用 SHMFF 开展系统性的科研攻关, 使得 SHMFF 的科技效益得到充分发挥。

此外, 中国科学院作为中国承建和运行大科学装置的主要部门, 面向国家重大需求, 依托大科学装置凝聚高水平的科研团队, 推进建制化科研团队计划和稳定支持基础研究领域青年团队计划。依托 SHMFF, 中国科学院瞄准面向信息领域对低功耗器件的国家战略需求, 组建低功耗量子材料建制化科研团队, 稳定支持基础研究领域青年团队计划“宽温区、室温磁斯格明子材料与原型功能器件”项目。

依托大科学装置的系列举措, 凝聚了中国高水平的科研攻关团队, 瞄准国家重大战略需求中的瓶颈问题开展建制化的科研攻关, 充分发挥了大科学装置在新时期的时代使命, 促进了系统性的知识创新。

4 利用大科学装置促进国际科学研究合作和学术交流

大科学装置作为人类探索自然规律、实现技术变革的重要工具, 对于促进国际科学研究合作和学术交流具有显著作用。它们不仅促进了全球范围内的知识共享, 还加速了新思想、新技术和新方法的产生与应用。

1) 提供合作平台, 推动知识创新。

大科学装置往往涉及多学科、多领域的交叉研究, 这为国际科研合作提供了天然的平台。各国科学家可以围绕共同的研究目标, 利用大科学装置开展联合研究, 共同解决科学难题。国际科学研究合作有助于各国科学家碰撞出新的思想火花, 推动知识创新和技术进步。大科学装置作为前沿科技的重要载体, 为科学研究国际合作提供了有力的支撑。

SHMFF 自 2017 年正式向全球开放以来, 已经收到了来自多个国家的申请, 并成功批准了部分国家的申请。这一举措为世界注入了中国力量和中国贡献, 充分展示了中国科学家与国际科学界携手合作的理念。通过 SHMFF, 多个国际合作团队在动物磁感应、生物导航、二维层状单晶超导体等领域取得了重大突破, 揭示了新的科学原理, 为未来的研究指明了方向。在生命科学领域, 强磁场科学中心依托 SHMFF 成立国际磁生物学前沿研究中心, 成员包括来自中国、美国、英国、法国、俄罗斯、捷克、巴西 7 个国家的 18 位科学家, 汇聚了国际磁生物学研究的顶级团队,

聚焦磁效应、磁感应和磁技术 3 大方向, 面向世界科技前沿和人民生命健康, 探索磁生物学的未知领域。在国际磁生物学前沿研究中心等的支持下, 强磁场科学中心磁生物学研究团队与英国牛津大学、德国奥登堡大学组成国际合作研究团队, 在动物磁感应和生物导航领域取得重大突破, 揭示了迁徙鸟类对地磁场感知的量子生物学原理, 为未来动物磁感应和生物导航研究指明了方向。该工作 2021 年发表于《Nature》^[24], 也是该国际合作团队长期合作项目的第一个阶段性成果。在材料科学领域, SHMFF 用户单位复旦大学、强磁场科学中心和中国科学院上海硅酸盐研究所、香港科技大学、英国曼彻斯特大学组成国际合作团队, 利用 SHMFF 水冷磁体在薄层二维层状单晶超导体 2M-WS₂ 中揭示了自旋—轨道—宇称耦合的超导新机制, 为深入理解二维层状单晶超导体的超导行为提供了新的视角和平台, 具有重要的科学意义和应用价值。该工作 2022 年发表于期刊《Nature Physics》^[25], 并同期发表于“News & Views”评论^[26]。此外, SHMFF 用户单位清华大学、美国西北大学联合团队通过关联氧化物的原子精度操控, 创新设计和制备出一种全新氧化物材料 Ca₃Co₃O₈, 依托 SHMFF 证实了该材料的本征铁磁极化金属特性。这一成果为电、磁关联物性的探索提供了理想材料平台, 并拓展了新型量子物态的研究思路。该工作 2024 年发表于期刊《Nature Materials》^[27]。

近期, 国际合作团队还利用综合极端条件实验装置在镍基高温超导研究中取得了重要进展, 成功制备出单相性良好的具有双镍氧层结构的钙钛矿材料多晶样品, 并在该样品中同时观测到零电阻和完全抗磁性。通过大科学装置提供的极端实验条件, 各国科学家共同探索了高温超导的奥秘。

2) 共享资源与技术, 提高资源利用效率。

大科学装置的建设和运行往往需要巨额的资金和技术支持。通过国际合作, 可以共享资源和技术, 降低建设和运行成本, 提高资源利用效率。重大科技基础设施一直是国际科技合作的重点领域, 世界上很多设施本身就是国际大科学计划和大科学工程的产物^[28-29]。基于超导重离子加速器的离子对撞机装置项目由俄罗斯杜布纳联合核子研究所牵头, 共有 18 个

成员国、6 个官方合作伙伴参与。美国国家科学基金会大型研究设施建设计划设立以来, 支持的 28 个大科学项目都涉及程度不等的国际合作, 不少是全球选点, 共同设计、投资、建设和运行的深度合作^[10]。通过与国际先进技术的交流与合作, 可以借鉴国际先进经验和技术成果, 分担成本、降低风险, 推动中国大科学装置建设不断取得新的突破和进展。中国的设施建设也是如此, 一些关键技术从国外引进或国内外合作研发, 不少关键器件从国外进口, 一些本土项目获得国际参与与贡献^[17]。虽然要坚持自主研制的道路, 但并不意味着要闭关锁国、孤立无援。相反, 应该积极加强与国际先进技术的交流与合作, SHMFF 在建设期间曾与美国、法国、荷兰等国家的强磁场实验室进行深入的技术交流和合作, 借鉴国际先进经验和技术成果, 提升中国在大科学装置建设领域的国际竞争力。

3) 促进学术交流与人才流动。

大科学装置不仅是科研合作的平台, 也是举办国际学术会议和研讨会的理想场所。这些学术活动为科学家提供了交流思想、分享研究成果的平台, 有助于推动学术研究的深入发展。强磁场科学中心与全球多个国家和地区的科研机构建立了合作关系, 共同开展前沿科学研究。

强磁场科学中心充分发挥 SHMFF 的平台作用, 通过举办国际咨询委员会会议、国际磁科学会议、材料磁光研讨会等学术会议和研讨会, 进一步提升中国科学家的专业素养和技术水平; 以高端学术论坛为媒介, 邀请国际知名科学家来华进行学术讲座, 促进国际同行间思想交流与碰撞, 激发出创新灵感的火花; 同时, 还组织本土科学家参加国际磁体技术大会等国际会议, 在世界舞台分享中国在磁体技术上的最新研究成果和科研进展。通过“请进来”与“走出去”的双向互动模式, 强磁场科学中心不仅加速了知识的创新与技术的飞跃, 还极大地提高了科研资源的利用效率, 促进了人才的跨国流动与科学研究的全球化进程。这一系列的举措, 无疑为中国乃至全球的科研事业注入了新的活力与动力。

5 结论

大科学装置不仅是衡量国家科技实力的重要标

尺,更是推动科学前沿取得突破性进展、解决经济社会发展 and 国家安全领域重大科技难题的关键利器。通过 SHMFF 的典型案列,充分彰显了大型科学装置在达成科学目标、激发知识创新、驱动产业升级、促进国际合作与交流等方面的不可替代作用,深刻揭示了建设、运行及高效利用国际领先性能大科学装置的重要性与紧迫性。尽管中国在大科学装置建设领域已取得一定成绩,但在设施的布局优化与性能先进性方面,仍存有较大的提升空间,亟待我们持续努力,以更好地发挥这些国之重器在推动科技进步与创新发展中的核心作用。

参考文献 (References)

- [1] 普赖斯D. 小科学·大科学[M]. 世界科学社, 1982.
- [2] 申丹娜. 大科学与小科学的争论评述[J]. 科学技术与辩证法, 2009, 26(1): 101-107.
- [3] 李建明, 曾华锋. “大科学工程”的语义结构分析[J]. 科学学研究, 2011, 29(11): 1607-1612.
- [4] 国际科技合作政策与战略研究课题组. 国际科技合作政策与战略[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] 韩文艳, 熊永兰, 张志强. 中国大科学装置建设现状、问题与路径研究[J]. 中国西部, 2018(6): 51-60.
- [6] 严涛. 中国工程院院士赵振堂: 大科学装置是科研的“航空母舰”[N]. 中国科学报, 2023-11-24(1).
- [7] 王续琨, 张春博. 试论大科学工程的基本特征和社会功能[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2017, 19(4): 1-8.
- [8] 匡光力, 汪文强. 聚焦我国大科学工程发展问题的管理建议[J]. 科学与社会, 2021, 11(1): 1-11.
- [9] 王贻芳. 建设国际领先的大科学装置奠定科技强国的基础[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(5): 483-487.
- [10] 西桂权, 付宏, 刘光宇. 中国大科学装置发展现状及国外经验借鉴[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 6-15.
- [11] 徐旻昕, 王茜, 刘秋芸. 国之重器: 我国大科学装置发展现状探析[J]. 华东科技, 2020(2): 58-65.
- [12] 北京科学学研究中心. 大科学装置等重大基础设施对国家创新体系建设的重要作用[J]. 科技智囊, 2018(1): 70-85.
- [13] 白春礼. 大科学装置就是国之重器[N]. 学习时报, 2021-11-10(6).
- [14] 中国科学院文献情报中心空间光电与重大科技基础设施团队, 中国科学院成都文献情报中心数据计算平台团队, 李泽霞, 等. 趋势观察: 国际重大科技基础设施布局特点及发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(4): 514-516.
- [15] 国之重器奠定创新未来: 十八大以来我国大科学装置成就综述[J]. 科技传播, 2017, 9(18): 14-15.
- [16] 中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心官网. 稳态强磁场实验装置磁体技术和综合性能达到国际领先水平[EB/OL]. (2017-06-22) [2024-11-25]. http://www.hmfl.cas.cn/nxwzx/jqyw/202101/t20210128_6208-42.html.
- [17] 王贻芳. 中国重大科技基础设施的现状和未来发展[J]. 科技导报, 2023, 41(4): 5-13.
- [18] 中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心. 科学实验测试系统[EB/OL]. (2023-06-14) [2024-11-25]. http://www.hmfl.cas.cn/qccsyzz/sytj/kxsyxsxt/202306/t20-230614_744370.html.
- [19] 中华人民共和国科学技术部. “大科学装置前沿研究”重点专项指南解读[EB/OL]. (2016-02-19) [2024-11-25]. https://www.most.gov.cn/ztzl/shzyczjkjhlglg/zdyfzxjd/201602/t20160219_124167.html.
- [20] 李会红, 卢宇, 曾钢. 大科学装置科学研究联合基金十年资助管理工作综述[J]. 中国科学基金, 2019, 33(4): 367-374.
- [21] 刘智青, 苑长征. BES III 实验发现奇特强子态Zc(3900)[J]. 现代物理知识, 2013, 25(3): 22-26.
- [22] Gao W S, Zhu X D, Zheng F W, et al. A possible candidate for triply degenerate point fermions in trigonal layered PtBi₂[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3249.
- [23] He L, Tan P, Zhu L, et al. Circularly permuted LOV2 as a modular photoswitch for optogenetic engineering[J]. Nature Chemical Biology, 2021, 17(8): 915-923.
- [24] Xu J J, Jarocha L E, Zollitsch T, et al. Magnetic sensitivity of cryptochrome 4 from a migratory songbird[J]. Nature, 2021, 594(7864): 535-540.
- [25] Zhang E Z, Xie Y M, Fang Y Q, et al. Spin-orbit-parity coupled superconductivity in atomically thin 2M-WS₂[J]. Nature Physics, 2023, 19(1): 106-113.
- [26] Falson J. A highly anisotropic polymorph[J]. Nature Physics, 2023, 19: 19-20.
- [27] Zhang J B, Shen S C, Puggioni D, et al. A correlated ferromagnetic polar metal by design[J]. Nature Materials, 2024, 23(7): 912-919.
- [28] 王贻芳, 白云翔. 发展国家重大科技基础设施引领国际科技创新[J]. 管理世界, 2020, 36(5): 172-188.
- [29] 中国科学院重大科技基础设施战略研究组, 张闯, 阎永廉, 等. 新时代奋勇攀登谱新章: 新形势、新要求下的重大科技基础设施发展思路[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(增刊 2): 3-7.

Build and effectively utilize large-scale scientific facilities to promote innovations of human knowledge: Taking the steady high magnetic field facility as an example

KUANG Guangli, HUANG Xingjie, WANG Wenqiang

High Magnetic Field Laboratory of Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract This article takes a deep dive into the pivotal role of large-scale scientific facilities in innovations of human knowledge, focusing on the steady high magnetic field facility (SHMFF) as an example. Significant contributions are investigated including achieving scientific goals, driving knowledge innovations, promoting industrial upgrading, enhancing international cooperation and exchanges, and attracting top-level talents. SHMFF has established a high-field magnet cluster, providing advanced experimental conditions for cutting-edge research in multiple disciplines such as physics, chemistry, materials science, and biology. This enables researchers to conduct a series of high-standard experimental studies and achieve a series of high-level scientific outcomes. Its derived technologies have been widely applied in fields such as high-end equipment manufacturing and pharmaceutical research, effectively promoting regional economic development. Meanwhile, adhering to the concept of open sharing, SHMFF has achieved multiple breakthroughs in the fields of biology and materials through international cooperation, facilitating the exchange and sharing of knowledge. The successful practice of SHMFF demonstrates the pivotal role of large-scale scientific facilities in driving knowledge innovation and offers valuable insights for optimizing the layout of such facilities and enhancing their technological sophistication in China. In the future, the continued construction and improvement of large-scale scientific facilities systems will serve as a crucial strategic foundation for advancing knowledge innovation and scientific progress.

Keywords large-scale scientific facilities; knowledge innovations; steady high magnetic field facility; experimental measurement systems; institutionalized scientific research; international cooperation and exchanges ●



(责任编辑 赵庆圆)