

# 稳态强磁场实验装置

尹 旭

(中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心 230031)

磁场,我们并不陌生。人类生活的地球本身就是巨大的磁体,它产生的地磁场就像一把巨大的隐形伞保护着地球上的生物,使其免遭来自太空宇宙射线的侵袭,而地球上的很多生物也会利用地磁场来辨别方向。事实上,人类从很早就开始认识磁,我国在战国时期,发明了指南针,进而开拓了人类的航海事业。到了18~19世纪,一批著名的科学家把电流和磁场联系起来,进而实现了发电以及电能与机械能之间的转换,人类开始走向了电气化。因此磁场在人类生活中普遍存在并广泛应用,而对于科学研究来说,磁场,尤其是强磁场更是一种重要的手段。

## 一、科学意义

当今社会,传统科学已经日趋完善,科学研究继续利用常规实验条件已经越来越难取得突破,因此利用极端的实验条件可以为多学科的交叉研究提供更多机遇,而强磁场就是其中一种重要的极端实验条件。

我们都知道,物质由原子组成,而原子又是由原子核及核外电子组成。原子核的自旋、核外电子的自旋和轨道运动就会产生磁矩,磁矩在磁场中会受到磁场的作用,磁场越强,这个作用力就会越大,换句话说,强磁场能够改变原子核外电子自旋、轨道有序,并改变电子能态和原子、分子间的相互作用,进而改变物质的特性,使之出现全新的物质状态,呈现新的物理学、化学现象和效应。因此,借助强磁场科学家们可以发现一些新现象、认识一些新规律。例如,科学家在强磁场条件下发现了量子霍尔效应和分数量子霍尔效应,而这两项研究也

分别获得了1985年和1998年的诺贝尔物理学奖。强磁场还是材料研究的重要手段。我们都知道材料是现代物质文明的基础,可以说谁控制了材料,谁就控制了技术。新材料的研制也可以进一步推动新技术的发展。而新材料的研制往往就要依赖于强磁场、极低温、超高压等极端实验条件。比如,目前电子器件的小型化和集成化的不断发展使得电子器件功耗持续增大,信息技术产业的耗能也逐年递增。一台高性能超级计算机年耗能等于5万吨标准煤(耗电1.5亿元),据预测,到2030年,全世界超算特别是大数据中心,耗电量将占全球总耗电量的22.3%。巨大的耗电量给人类带来的则是进一步的能源危机。因此解决电子器件的高能耗问题也是当前各国亟待解决的关键科技问题之一。超导电性、量子霍尔效应则是已知两类能实现低功耗电子传输的典型,其核心问题是揭示超导和量子霍尔效应中无耗散现象物理机制,发现新型无耗散量子现象,优化低功耗体系性能。强磁场是解决上述科学问题的不可或缺平台。强磁场还可以催生新的重大应用技术,比如电磁冶金技术、磁共振成像技术等。

鉴于强磁场在科学研究中发挥的重要作用,世界各国依托强磁场条件的科学研究也十分活跃,据统计,自1913年以来,与强磁场相关的研究成果有19项获得了诺贝尔奖,研究领域涵盖物理、化学、材料科学、生命科学等。也正是由于这些重大成果的发现,也进一步促进了强磁场的发展。

1960年,美国首先在麻省理工学院建立了世界上第一个高场磁体实验室,后又在佛罗里达州斥巨资建立了新的强磁场实验室,当时的稳态磁场目标

是40T。20世纪80年代末和90年代初,日本在筑波建立了新的强磁场实验室,稳态磁场目标也是40T。法国格勒诺布尔强磁场实验室以及荷兰的奈密根强磁场实验室同样将其目标定在了稳态磁场40T。而中国过去由于没有完善的强磁场实验条件,科学家在研究上就已经失去了很多先机,一些原创性的想法不是被搁置就是要到国外与别人合作,因此建设中国自己的强磁场实验室,为国内基础研究提供强磁场这一重要支撑条件,提升我国前沿基础科学的自主创新能力,变得迫在眉睫。

## 二、建设历程

事实上,中国的强磁场事业开始于20世纪60年代。1964年我国拟在汉中建立新技术物理中心,其中就包括了建立强磁场实验室,但因故中断。1978年中国科学院等离子体物理研究所成立,其中设立了强磁场研究室,并于1992年建成了20T的混合磁体,使我国成为当时世界上拥有20T级以上稳态磁场的七个国家之一。但是如何突破各种技术瓶颈,进一步提高磁场强度,则是一直需要解决的关键问题。

2007年国家正式批复建设国家“十一五”重大科技基础设施——稳态强磁场实验装置(英文简称:SHMFF)。由于稳态磁场和脉冲磁场在科学研究中各有需求,故以“强磁场实验装置”一个项目,同时建设稳态强磁场实验装置和脉冲强磁场实验装置。“一个项目、两个法人、两地建设”。稳态强磁场实验装置建在合肥,由中国科学院合肥物质科学研究院承担建设、中国科学技术大学参与共建;脉冲强磁场实验装置建在武汉,由华中科技大学承担建设。2007年1月,强磁场实验装置项目建议书得到国家发改委批复、同年10月可行性研究报告得到批复、11月核定强磁场实验装置初步概算。2007年11月中国科学院、教育部联合发文批复了强磁场实验装置初步设计。2008年4月,中国科学院发文成立院级非法人研究单元——中国科学院强磁场科学中心,负责稳态强磁场实验装置的建设。2008年

5月18日,强磁场科学中心举行了隆重的奠基仪式,这也标志着稳态强磁场实验装置正式开工建设。

2010年8月,强磁场科学中心科研大楼建成,部分磁体及实验系统陆续进场完成安装调试。为了使国家重大科技基础设施尽早发挥效益,2010年10月部分已建成的磁体及实验系统投入先期试运行,稳态强磁场实验装置进入“边建设、边运行”阶段。2013年9月,第一台水冷磁体WM4正式建成,磁场强度达到27.5T,一举刷新了同类型磁体的世界纪录,这一纪录也验证了稳态强磁场实验装置水冷磁体的设计方案是可行的。在之后的几年里,另外四台水冷磁体也陆续建成,建成的五台水冷磁体中有三台创造了世界纪录。2016年11月,经过8年艰苦的努力,稳态强磁场实验装置最核心磁体,也是世界公认技术难度最高的可以产生最高稳态磁场的磁体——混合磁体正式建成,使我国成为继美国之后第二个拥有40T级以上磁体的国家。2017年9月27日,受国家发展和改革委员会委托,中国科学院在合肥组织专家对稳态强磁场实验装置进行国家验收(图1),验收专家一致认为稳态强磁场实验装置磁体技术和综合性能国际领先。稳态强磁场实验装置的建成,标志着我国高场磁体技术进入世界领先方阵!

但是强磁场团队追求创新、勇攀高峰的脚步却从未停歇,经过近6年多紧张的技术攻关,团队创新了磁体结构、研发了新型材料、优化了制造工艺,终于取得重大技术突破。2022年8月12日,混合磁体(磁体口径32毫米)产生了45.22T(图2)的稳态磁场,刷新了由美国保持了23年之久的同类型磁体的世界纪录,成为目前全球范围内可支持科学研究的最高稳态磁场。

## 三、装置构成

我国稳态强磁场实验装置包括十台/套磁体装置(四台超导磁体、五台水冷磁体以及一台混合磁体),围绕磁体装置配套的输运、磁性、磁光、极低温、组合显微等实验测试系统,以及支撑磁体/实验



图1 稳态强磁场实验装置国家验收

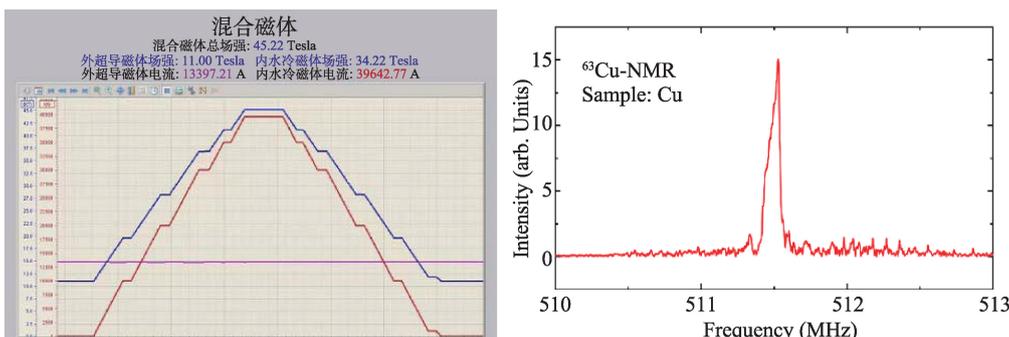


图2 稳态强磁场实验装置混合磁体产生45.22T稳态磁场

测试系统运行的高功率高稳定度电源、去离子水冷却、氦低温、中央控制四大技术装备系统(图3)。

### (一)超导磁体

超导磁体即用超导材料绕制的磁体。超导材料在一定条件下呈现出零电阻和完全抗磁的特性,不消耗电功率,因此具有稳定性高、运行成本低的优势。超导磁体目前在科学仪器、生物医学中已得到广泛的应用,并已实现商业化。稳态强磁场实验装置共有四台不同类型、不同用途的超导磁体,编号依次为SM1-SM4(表1)。

但是由于超导材料会受到临界电流和临界磁

场的限制,超导磁体很难做到很高的磁场强度。因此获得更高稳态磁场则必须依赖水冷磁体。

### (二)水冷磁体

水冷磁体又叫有阻磁体。有阻即存在电阻,在通入大电流时,则会产生巨大的热量,必须由高速流动的去离子冷却水进行冷却,因此叫水冷磁体。目前水冷磁体研制有两种结构:比特(Bitter)磁体结构和多螺旋磁体结构。稳态强磁场实验装置水冷磁体采用的是比特磁体结构,成百上千片比特片和绝缘片交替叠放,固紧后就形成一个螺线管线圈,根据不同的设计,每个磁体由3~6个线圈组成。我

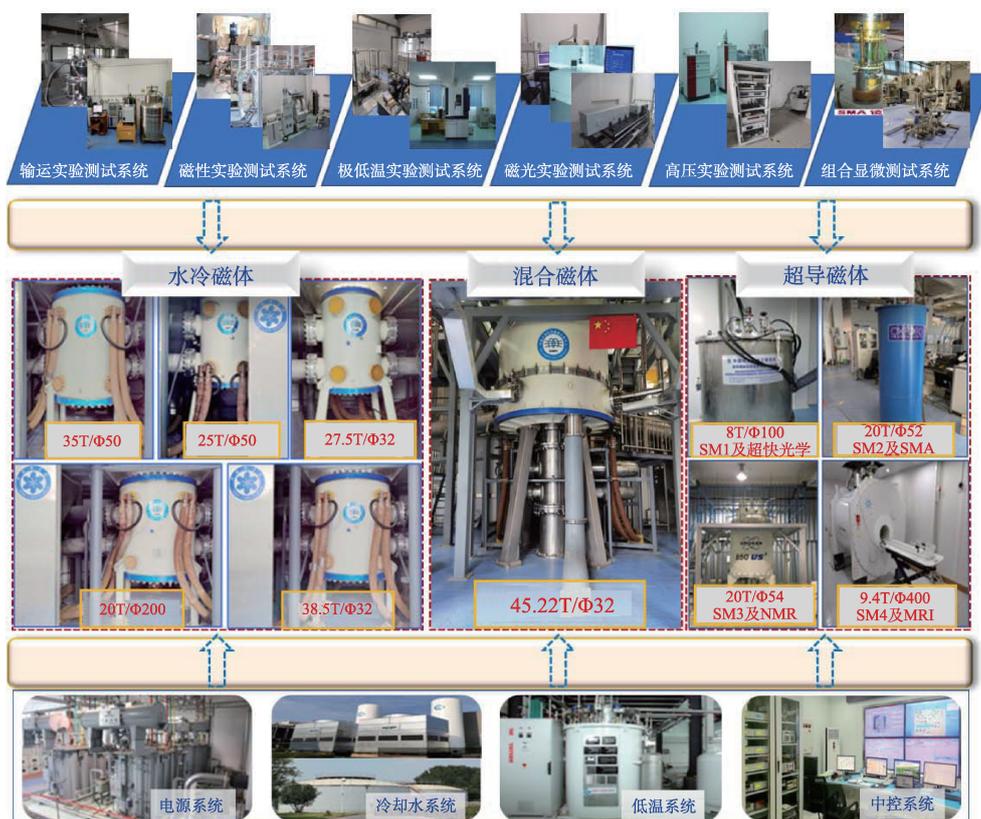


图3 稳态强磁场实验装置构成图

表 1

磁体名称	参数		应用领域
	室温孔径	磁场强度	
SM1	垂直 100 mm; 水平 100 mm	8~10 T	磁场下的材料合成、化学反应、电化学以及生物学的磁场效应
SM2	52 mm	18~20 T	磁场影响下的各种相变、量子态与结构变化、磁畴与超导 Vortex 行为、电子强关联效应研究
SM3	54 mm	20 T	生物大分子的三维结构、分子动力学的测试和分析、生物大分子与小分子相互作用分析以及高通量药物筛选和药理学研究、生物代谢组学测试和分析
SM4	400 mm	9.4 T	高场磁共振成像、磁共振造影剂与分子影像、模型动物与神经环路、神经与退行性疾病

们知道,磁场由螺旋电流产生,单位体积内电流越强,则磁场强度越高,因此通入大电流时产生的热量若未被有效带走可轻易将磁体烧毁;同时磁场与电流的相互作用会使磁体承受高达几千吨的强大电磁力,对磁体的材料与结构是巨大的考验。稳态强磁场实验装置水冷磁体研制团队提出了Bitter片长孔冷却概念,极大增强了冷却效率,使应力分布更均匀,同时提出分布式结构设计思路,通过独特组装方式,使电流密度趋于理想分布。这种设计新

思路、装配新工艺不仅将导体材料的强度用到了极致,又实现了最佳冷却效果。

稳态强磁场实验装置共有五台水冷磁体,编号依次为WM1-WM5,这五台水冷磁体具有不同的口径及用途(表2)。

### (三)混合磁体

混合磁体是稳态强磁场实验装置最核心的磁体,也是国际上公认的研制技术难度最高的磁体。

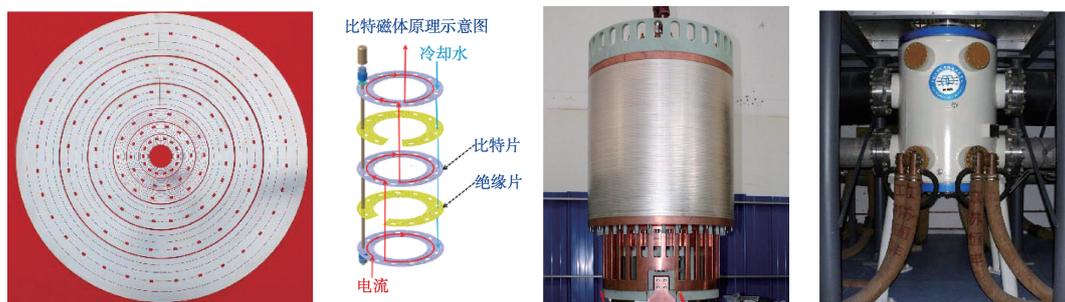


图4 水冷磁体比特片、装配、线圈及磁体

表2

磁体名称	参数		应用领域
	室温孔径	磁场强度	
WM1	32 mm	38.5 T	凝聚态物理、材料物理等领域,如拓扑绝缘体、非常规超导、新型功能材料、量子调控
WM2	50 mm	25 T	NMR、EMR 等研究
WM3	200 mm	20 T	强磁场下的材料制备/化学合成、超导强电应用研究
WM4	32 mm	27.5 T	材料制备与生物磁效应研究
WM5	50 mm	35 T	高场下材料的磁光、高压输运及磁性质

它是由外围的高场超导磁体和内插的水冷磁体组合而成。SHMFF混合磁体外超导磁体低温口径高达920 mm,需要产生11T磁场,如此大型的高场超导磁体,此前国际上并无成功的先例,而我国也从未研制过如此大型的Nb<sub>3</sub>Sn超导磁体,所有技术无从借鉴,需要自力更生,自主研发。研制团队从模型导体、模型接头到模型线圈等一系列的技术预研开始,解决一系列关键核心问题,如:不同线圈Nb<sub>3</sub>Sn比例、空隙率、扭矩、导体结构做不同优化,降低了电磁压力,解决了超导性能退化问题;对超导磁体结构优化设计,最大限度发挥了Nb<sub>3</sub>Sn的超导

特性,实现了超导磁体载流能力和磁场强度的最大化;优化超导磁体的热处理工艺,解决了温度不均匀和局部滞后问题,保证了超导磁体的高临界电流性能。最终成功研制出低温口径920 mm、磁场强度11T的大型Nb<sub>3</sub>Sn超导磁体,并与34.22T的内水冷磁体组合而成45.22T的混合磁体,成为目前国际上可支持科学实验的最高稳态磁场。

#### (四)科学实验测试系统

强磁场是一种极端的条件,科学家要利用这一极端条件开展科学研究,则必须搭配实验测试系

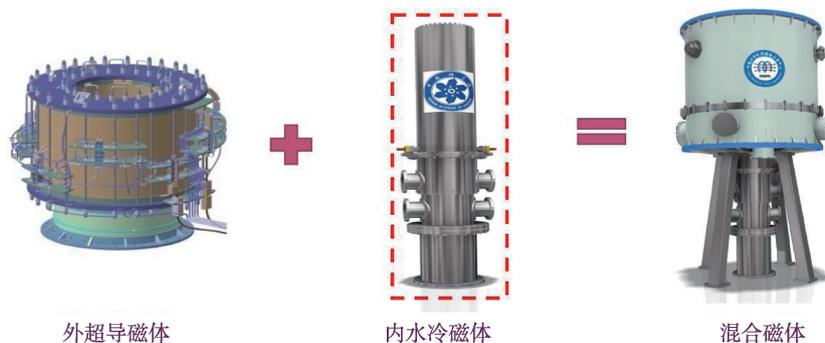


图5 SHMFF混合磁体构成模拟图

统。由于混合磁体/水冷磁体口径小、震动大、电磁干扰强,对实验系统的研制提出更高的要求。研制团队系统规划、攻克关键技术,针对不同科学目标,建立了系列先进的强磁场实验测量系统,如国际首创的水冷磁体扫描隧道显微镜、扫描隧道(STM)-磁力(MFM)-原子力(AFM)组合显微系统(SMA),强磁场下低温、超高压综合极端实验系统等,使得我国稳态强磁场相关实验条件达到国际领先水平。

SHMFF自投入运行以来,一直致力于实验技术的发展以不断满足用户需求,到目前为止,已建立起电磁输运测量、谱测量、成像测量、材料合成在内的24个实验系统,有力支撑了我国物理、化学、材料、生命医药等诸多学科交叉前沿研究。

#### 四、成果扫描

稳态强磁场实验装置自2020年投入先期试运行至今,已经累计运行超59万小时,为清华大学、北京大学、中国科学技术大学,中国科学院物理所、高

能物理所等在内的185家用户单位,3200余项用户课题提供了实验条件,发表论文近2400篇,其中:*Nature* 8篇、*Science* 3篇、*Cell* 1篇、*Science Advance* 8篇、*Nature*子刊73篇等,助力用户在物理、材料、化学、生物医药等领域取得进展。例如:

#### ►首次在少层黑砷中发现了新奇量子霍尔态

浙江大学和中南大学用户,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。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积极意义。相应研究成果以“Rashba Valleys and Quantum Hall States in Few-Layer Black Arsenic”为题发表于*Nature* 593(7857),56-60(2021)。

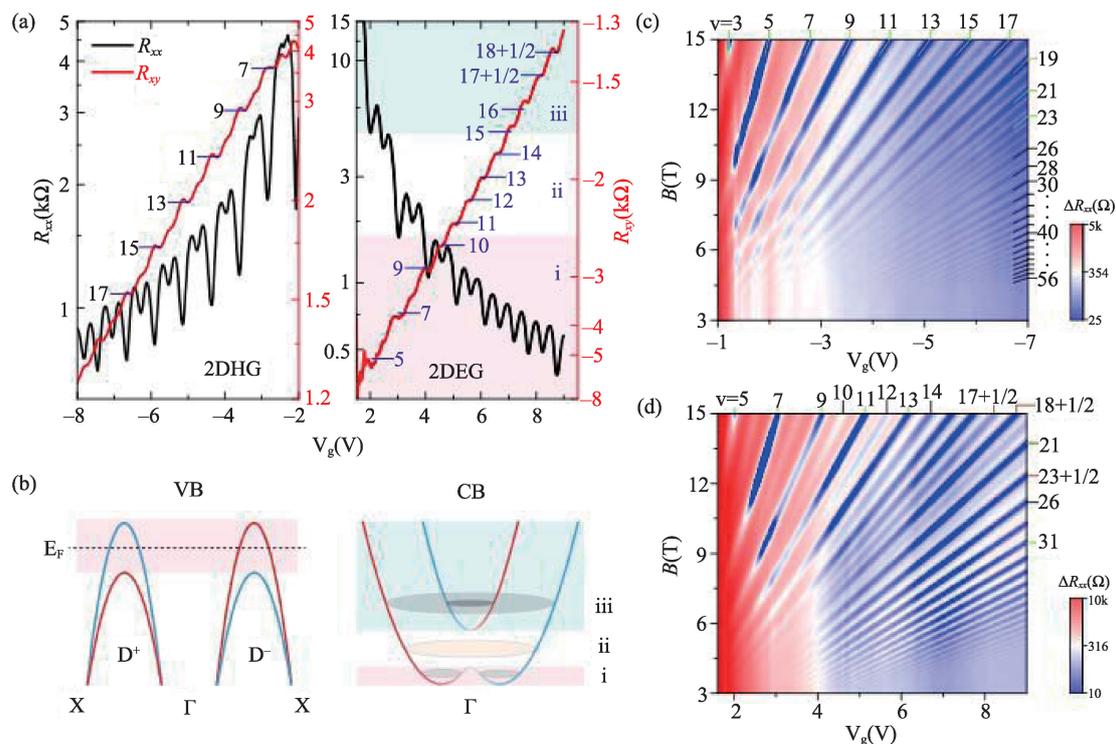


图6 (a) 黑砷二维电子态粒子-空穴不对称的反量子霍尔态;(b) 空穴掺杂对应的自旋-能谷耦合 Rashba 能带和电子掺杂对应的传统 G-Rashba; (c) 黑砷二维空穴气的反量子霍尔态随栅压和磁场的变化关系; (d) 黑砷二维电子气的反量子霍尔态随栅压和磁场的变化关系

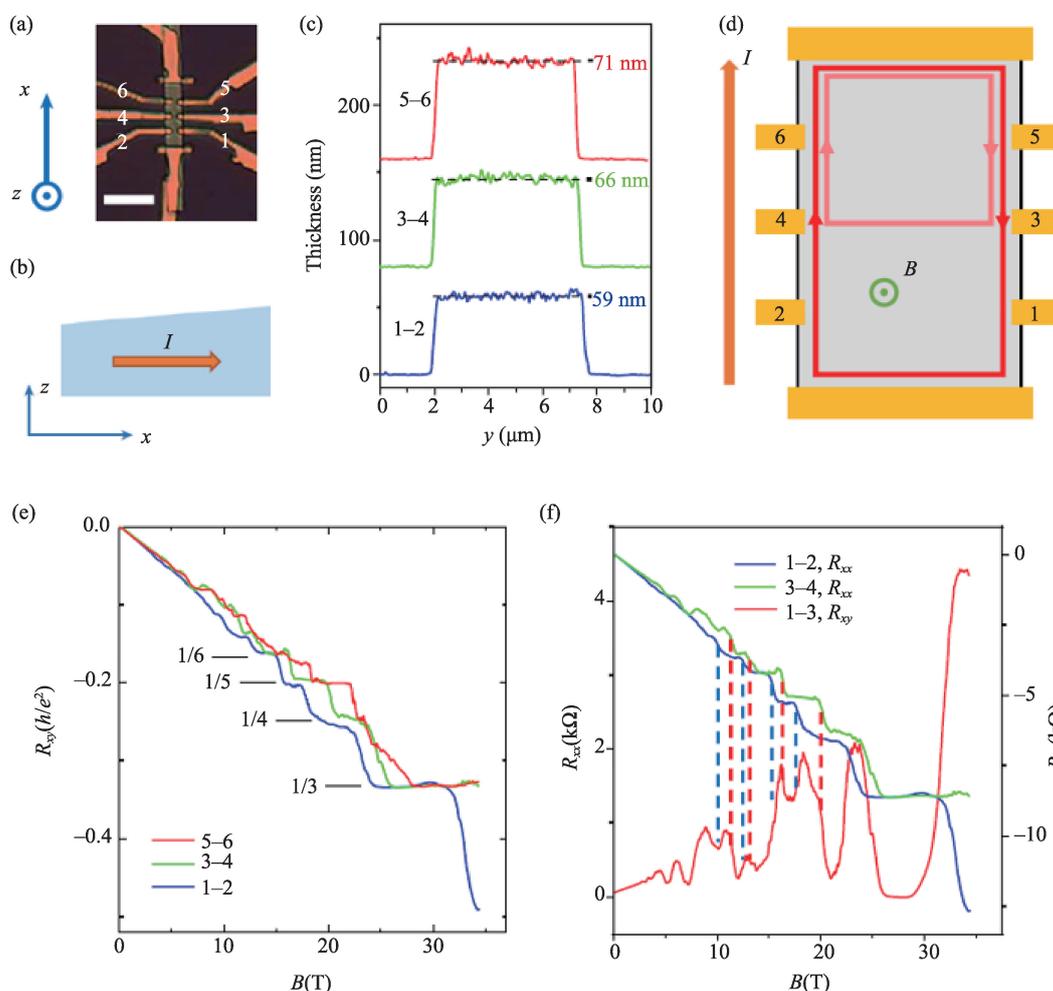


图7 Cd<sub>3</sub>As<sub>2</sub>强磁场下的量子霍尔效应

### ►揭示基于外尔轨道的三维量子霍尔效应

科学家们对量子霍尔效应的研究一直停留于二维体系,从未涉足三维领域。复旦大学用户首先在该领域实现重大突破,在拓扑半金属砷化镉纳米片中观测到由外尔轨道形成的新型三维量子霍尔效应的直接证据,迈出了从二维到三维的关键一步。相关研究成果发表于期刊*Nature* 565,331 - 336 (2019)。

### ►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。天津大学用户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* 7, 329-339 (2022)上。

### ►揭示参与日光照射改善学习记忆的脑内谷氨酸合成新通路及相关神经环路机制

中国科学技术大学用户通过单细胞质谱、光遗传、分子生物学、电生理及动物行为学等技术方法,揭示了一条脑内谷氨酸合成新通路及其参与日光照射改善学习记忆的分子及神经环路机制。

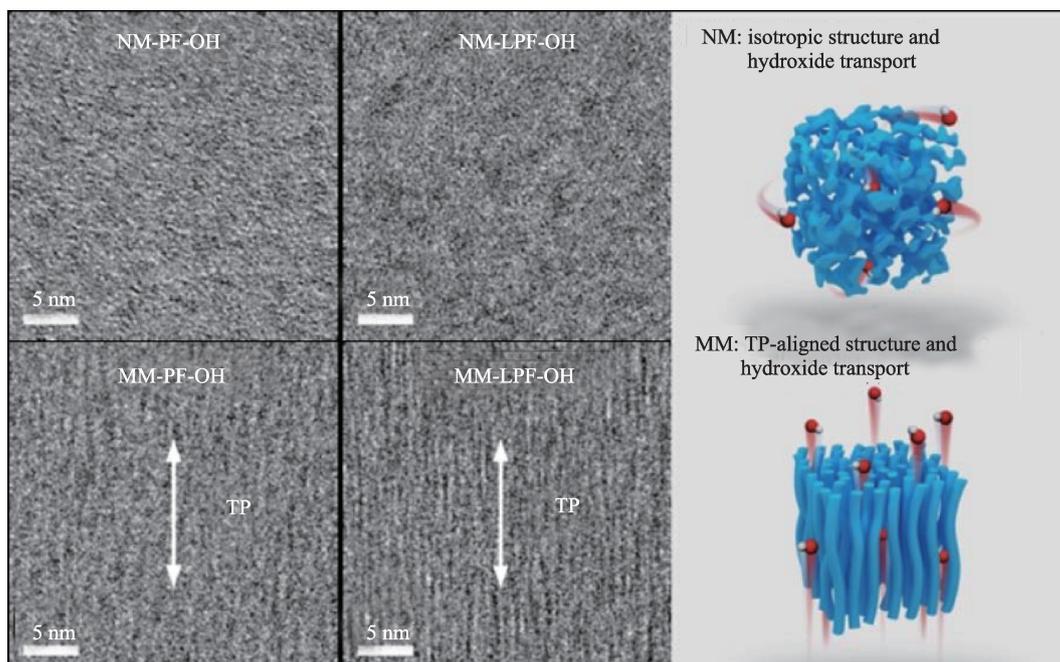


图8 磁铸膜(MM)和非磁铸膜(NM)微观结构的TEM影像和示意图解

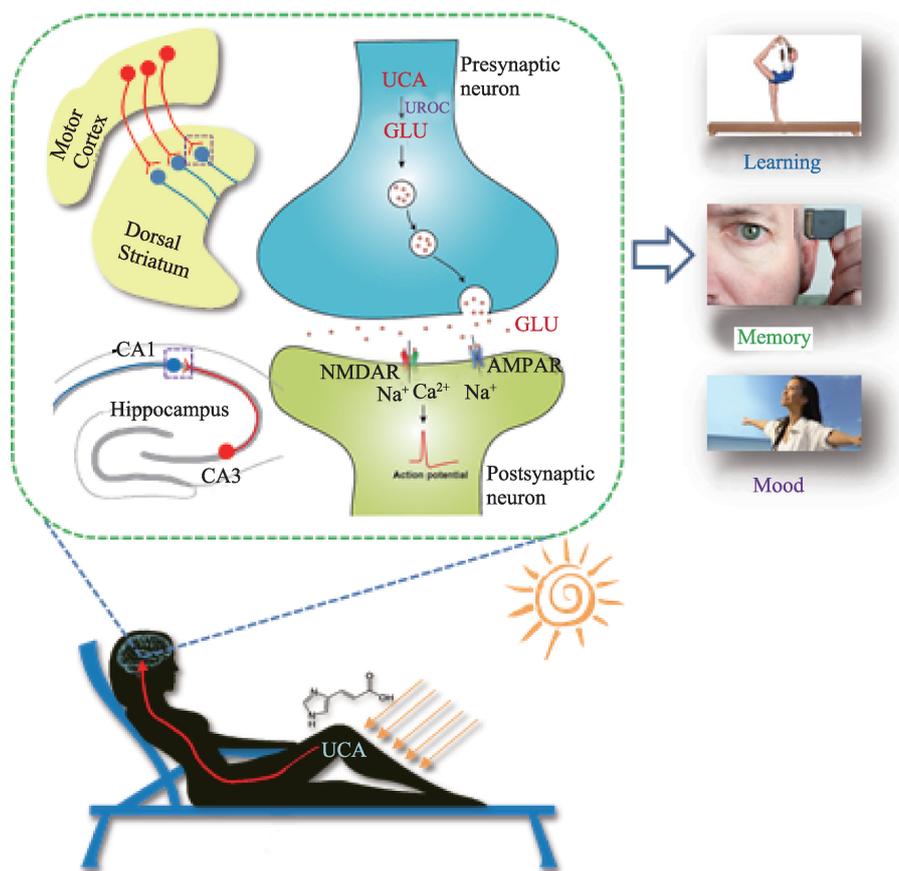


图9 日光照射改善人类情绪、学习和记忆的分子及神经环路机制

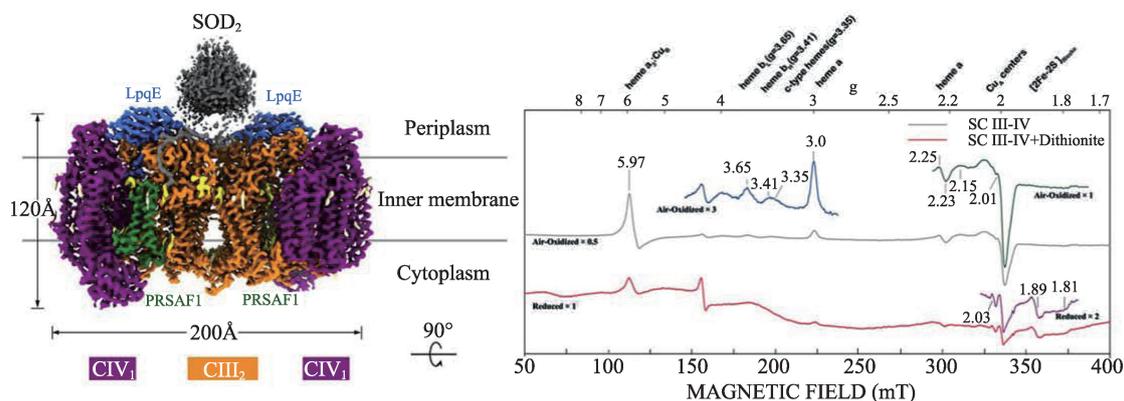


图 10 III<sub>2</sub>IV<sub>2</sub>SOD<sub>2</sub>的冷冻电镜结构以及应用低温电子自旋共振方法检测复合物中的各个金属中心的氧化还原状态

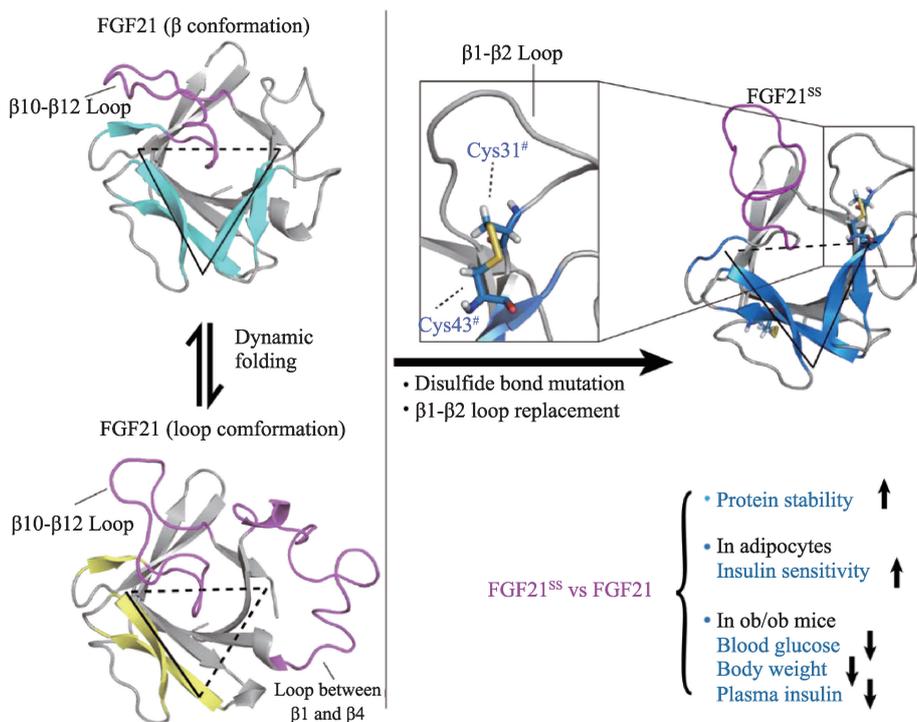


图 11 FGF21 结构动态性以及 FGF21<sup>SS</sup> 蛋白质工程改造示意图

因此该通路的发现对于了解大脑工作机制以及探索相关疾病发生机制都将起到非常重要的作用。该研究成果发表在期刊 *Cell* (173, 1716(2018)) 上。

### ► 破解分枝杆菌能量代谢奥秘, 助力抗结核新药研发

南开大学用户首次报道了耻垢分枝杆菌呼吸

链超级复合物 III<sub>2</sub>IV<sub>2</sub>SOD<sub>2</sub> 原子分辨率结构, 并联合 SHMFF 低温电子自旋共振设备揭示了生命体内一种新的醌氧化与氧还原相偶联的电子传递机制, 为抗击耐药结核的新药研发奠定了重要基础。相关研究成果以研究长文的形式发表于期刊 *Science* (aat8923 (2018)) 上。

### ►新型高效糖尿病治疗潜在药物开发

中国科学院强磁场科学中心用户在对糖尿病候选药物 FGF21 进行改造后制成 FGF21<sup>SS</sup>, 糖尿病小鼠实验结果表明 FGF21<sup>SS</sup> 表现出更加优异的降血糖、减体重效果, 具有良好的成药性, 有望在完成临床转化后用于糖尿病、肥胖和非酒精性脂肪肝等慢性代谢性疾病治疗。相关研究成果发表于国际期刊 EMBO reports, 并已申请国家发明专利和国际专利保护, 目前已与多家企业达成协议共同推进临床试验和产业化工作。

## 五、未来发展

强磁场是科学与技术的宝藏。国家“十一五”重大科技基础设施稳态强磁场实验装置有力支撑了我国量子材料、生命医药等诸多学科发展。但新

型电子材料与器件、重大疾病防治等国家重大需求中的瓶颈问题的解决亟需新一代的强磁场装置。

强磁场科学中心已经在谋划下一代稳态强磁场装置——强光磁集成实验设施, 将建设以 55 T 混合磁体、36 T 高均匀度超导磁体为代表的具有大幅领先世界水平的系列磁体装置, 搭配以太赫兹/红外自由电子激光为主要探测手段的、具有空间、时间、能量分辨能力的稳态强磁场下先进科学实验测量系统。该设施已在合肥综合性国家科学中心的规划布局下围绕高温超导磁体技术、新型水冷磁体技术、光/磁集成技术等开始预研工作, 相关预研工作进展顺利。

强光磁集成实验设施的建设, 将为解决新型电子材料与器件、高温超导材料、重大疾病防治、药物研发等国家重大需求中的关键核心问题提供有力支撑。

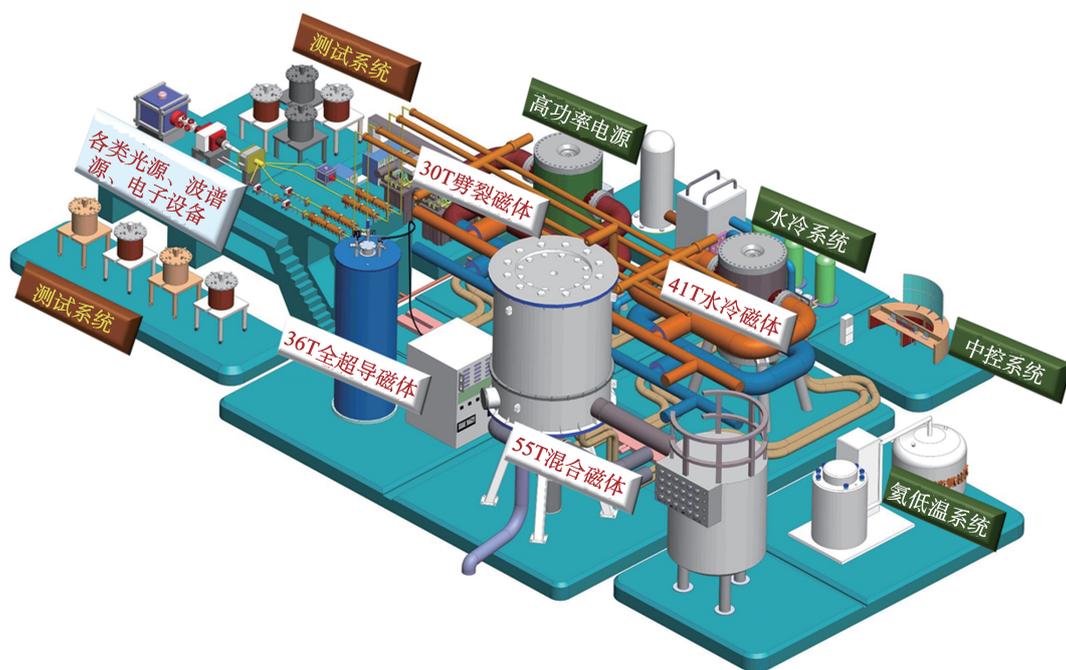


图 12 强光磁集成实验设施