

挑战科学前沿的“时空极限”

——记国家重大科研仪器研制项目“飞秒-纳米时空分辨光学实验系统”

■本报记者 张双虎

不论是体育赛事还是科学探索,挑战极限一直是人们的梦想。在国家自然科学基金的支持下,中国科学院院士、北京大学教授龚旗煌团队长期致力于挑战科学前沿的“时空极限”研究,助力人们不断拓宽认知的边界。

“我们就是在时间和空间上追求极限。”龚旗煌告诉《中国科学报》。在国家重大科研仪器研制项目“飞秒-纳米时空分辨光学实验系统”的支持下,该团队成功研制出高时空分辨光电子成像系统。它可让人们在纳米(10^{-9} 米)量级(空间)和飞秒(10^{-14} 秒)量级(时间)上看清纳米尺度结构及其时间演化,同时具备能量和动量分辨能力。该系统将推动等离激元光学、量子材料、半导体材料等领域及其交叉学科在基础和应用研究方面的革命性发展。

从“零”起步

当前,光信息处理、光显示、光探测传感等领域的技术迭代更新,光电功能器件向超高密度、超快速度、超低功耗方向不断发展,研制基于新型材料的复合微纳器件成为一大趋势。这就要求人们弄清微米尺度下的光电超快动力学过程。然而,长期以来,我国一直缺乏在相关领域的研究积累。

“我们的目标是在时间和空间维度上,把分辨率做到极限(纳米量级和飞秒量级),并将二者结合起来,在极小的空间尺度下看清极快的变化过程,从而拓宽人们认知的边界。”龚旗煌说。

人眼能分辨出100微米大小的物体,借助光学显微镜能看到200纳米大小的物体,而电子显微镜则能让人看清0.1纳米大小的物体。有了这样一套系统,就像拥有一台10飞秒分辨率(比高速相机快1000万倍)的特殊超高速相机,同时具备电子显微镜的空间分辨能力,可以看清小于10纳米的结构。

2016年,在国家重大科研仪器研制项目的资助下,龚旗煌团队开始研制“飞秒-纳米时空分辨光学实验系统”。

项目伊始,团队面对的是一间400平方米空旷实验室的改造任务。“飞秒-纳米时空分辨光学实验系统”对实验条件要求极高,细小



飞秒-纳米时空分辨光学实验系统。
团队合影。
受访者供图

振动、微弱电磁干扰都会影响实验精度。为达到要求,团队精心测量实验室振动、电磁场分布及变化,反复讨论抗振、抗电磁干扰方案。最终,他们设计出一套主动电磁屏蔽及减少振动的方案,经精确测算后才交付施工。

对团队来说,解决实验室装修难题只是万里长征的第一步。在项目执行过程中,从系统设计到定制、搭建与优化、获取信号,到仪器安装、仪器测试,团队都需要不断摸索、反复推敲。

“这是一种全新的测量手段,从设计方案到技术实现都从未做过,因此我们要从零开始探索。”龚旗煌说。

攻坚过“坎儿”

“这个系统以前没人做过,国际上也没有经验可供借鉴,所以我们要不断尝试,很多时候都是在试错。”团队成员、北京大学教授刘运全对《中国科学报》说,“有时候觉得好像都对,但就是得不到理想信号,只能一遍遍检查、优化,钻进每个细节中反复调试,这样才能获得最优指标。”

遇到的考验多了,团队形象地将问题和考验称作“坎儿”,解决一个难题就是过一个“坎儿”。

“每个‘坎儿’都是一次挑战,每个‘坎儿’都不容易过,但要实现零的突破,就必须过无数个‘坎儿’。”团队成员、北京大学教授级高级工程师杨宏补充说。

该系统的核心模块之一是超快极紫外光电子显微镜。团队首先面临产生高通量极紫外光源这个“坎儿”。研究人员基于气体高次谐波产生技术,从理论模拟、实验验证到模块设计,紧密合作,反复优化参数,将谐波转化效率提高了两个量级以上,最终产生了满足要求的超快极紫外光源。

极紫外光源和光电子显微镜耦合难度极大,是另一个“坎儿”,涉及极紫外光在真空中传播、偏转、合束、聚焦等一系列技术难题。团队成员充分论证,提出了特制微孔极紫外闪烁体光阑方案,解决了真空差分、极紫外光监测、合束以及时间和空间重合等技术挑战,建立了紧凑、稳定的极紫外束线,最终成功研制出国内首台基于气体高次谐波的超快极紫外光电子显微镜。

类似的“坎儿”还有很多,团队成员养成了细心的工作习惯和严谨、细致、求真的科学精神。他们一致认为,实现极限时空分辨,一定要坚持、再坚持一下,细致、再细致一点儿。

越“坎儿”无数次后,研究人员总结出一些有趣的现象——很多重要突破都是在深夜或周

末取得的。因此,在技术攻关的关键节点,团队成员坚持利用周末或节假日继续做实验。

“有时候太累了,我们宁可周五休息半天,也要在周末打起精神加油干。”杨宏说。

这个神奇的“周末成果”规律主要是因为这些精密科学仪器最怕各种细微扰动。北京大学物理楼离地铁4号线很近,夜深人静地铁停止了运行,此时正是研究人员进行实验的黄金时段。要验证一些“极限数据”“极限指标”时,研究人员经常选择半夜开工。

挺进“第一梯队”

“飞秒-纳米时空分辨光学实验系统”能看清材料的表面形貌,实时观测电子的动力学过程,因此是半导体材料、表面物理等领域一个新的研究手段。该系统能揭示激发态载流子与光子、声子、缺陷等相互作用的过程,可实现飞秒等离激元场的时空演化成像、拓扑缺陷的时空表征、微纳等离激元器件的功能表征及操控、金属-半导体和二维材料中热载流子的动力学特性等研究。

团队研制出国内首台基于气体高次谐波

《中国科学报》:该仪器目前在国际上处于什么水平?下一步,团队的研究重点或该领域的发展方向是什么?

龚旗煌:这是世界上最先进的极限时空分辨实验系统之一,国际上仅有少数几个国家在研制相关设备。这是目前国内唯一一套系统,其部分指标已经达到了国际领先水平。

下一步,我们将继续专注于基础研究,为前沿探索、为人们拓宽知识边界提供支撑。比如,在特殊二维材料、纳米材料新物态或新变化过程中,让人们在新的视野下重新认识物质的变化,拓展对材料、凝聚态、物理、光学等的认识。在应用方面,我们为一些小尺度器件,比如芯片检测、诊断,高精尖科学器件检测、性能表征等提供支持。

《中国科学报》:从事科学研究,尤其是尖端科学仪器研究,需要具备哪些品质?

的超快极紫外光发射电子显微镜,并对空间、能量和时间分辨进行了表征,性能指标达到了国际领先水平。极紫外光发射电子显微镜的成功研制,为介观光子器件和微纳尺度下超快光物理研究提供了先进平台,也为人类探索未知物质世界、发现新科学规律、实现技术变革提供了有力的研究工具。

目前,“飞秒-纳米时空分辨光学实验系统”兼具纳米-飞秒极端时空分辨功能,已在相关学科研究领域展现出强大能力。借助该系统,他们在等离激元金属纳米结构、半导体异质结构、钙钛矿材料等多种体系的载流子动力学,以及冰单晶微纳光纤光学表征等领域已取得一批重要研究成果。在项目研制期间,团队在《科学》《自然》等期刊发表论文160余篇;围绕项目研制过程、重要技术难点及突破,申请专利25项,其中20项专利已获授权。

“我们已经进入该领域的第一梯队。”龚旗煌说,“经过这几年磨炼,团队有了很好的技术积累,利用该系统取得了一流成果。项目组正不断对其性能进行提升,完善仪器管理,并对国内外用户开放,提高大型仪器使用效率,服务科技创新和社会需求。”

龚旗煌:这套系统从方案、路径到工艺都需要我们研究人员自己去探索。因此,一是要耐得住寂寞,能承受长时间不出成果,甚至根本没有结果的压力;二是要有吃苦精神,做这样一个系统很累、很辛苦,实验关键期加班加点,连轴转的情况很常见;三是必须有创新精神,前人没做过,要相信自己;四是研制大型科研设施,没有人可以包打天下,因此不但要有很高的个人素质,还需要有非常好的合作精神,协同攻关完成任务。

《中国科学报》:科学基金对该项目起到了怎样的作用?

龚旗煌:在国家自然科学基金的长期稳定资助下,这支队伍得到了很好的锻炼,有了很好的积累。我们不但取得了一批前沿成果,也培养了一批后备力量。

十年磨一剑“黑障”破天光

——记国家重大科研仪器研制项目“临近空间高速目标等离子体电磁科学实验研究装置”

■本报实习生 卜金婷 记者 李晨阳

“载人飞船就像被包裹在一个火球里,周围一片火光,时不时会听到一些噼里啪啦的声音……很无助,但唯一能做的只有等待。”

这是航天员在描述载人飞船再入过程,特别是进入“黑障”时的真实感受。所谓黑障,是指航天器再入大气层时会遇到几分钟的通信中断。在这段时间里,航天器与地面控制中心无法取得联系。

“无论是对航天员还是对地面指挥台的工作人员来说,这都是一段非常难熬的时间。”中国科学院院士、西安电子科技大学空间科学与技术学院院长包为民告诉《中国科学报》,“我们希望能在这个阶段和航天员保持联系,知道他们的生理状态、航天器的实时飞行状态等。这对航天事业非常重要,但目前国际上还没有解决这个问题。”

包为民团队在黑障相关领域开展了近10年研究,取得了许多关键性突破。特别在国家重大科研仪器研制项目的支持下,设计研制出“临近空间高速目标等离子体电磁科学实验研究装置”。团队利用该装置开展了黑障地面复现实验、等离子体包裹目标的雷达散射截面测量/合成孔径雷达成像、电磁波/信号在不同等离子体状态下的传输特性实验,验证了等离子体鞘套下在线诊断、黑障抑制、新体制通信等关键技术,填补了在地面模拟等离子体鞘套环境开展电磁实验研究装置的国内空白。

“黑障”何时不黑?剑指百年难题

黑障是航天领域面临的一大难题。在人类历史上,很多重大航天事故都发生在重返大气层阶段,而在这个阶段,航天器与地面通信失联加剧了风险的不可控性。

当航天器穿越临近空间时,航天器头部的空气会被剧烈压缩,达到几千乃至上万摄氏度。高温使空气电离,形成一层包裹于航天器表面的等离子体,称之为等离子体鞘套。这个鞘套就像金属网一样把航天器整个包裹起来,隔绝了航天器和外界的通信,导致航天器无法及时将信息传输到地面控制中心。

“如今人类航天活动越来越频繁,但黑障依旧是航天领域的一块心病,我们希望彻底解决这个问题。”包为民告诉《中国科学报》。

研究发现,不仅在通信领域,雷达探测领域也面临等离子体鞘套引起目标探测失败的困扰。解决这一问题,不仅需要在地面深挖等离子

鞘套与电磁波/电磁信号的相互作用机理,揭示等离子体鞘套引发的不同电磁效应,而且迫切需要在地面模拟等离子体特征并支撑电磁实验的研究装置。

为此,包为民团队联合浙江大学、中科院合肥物质科学研究院、哈尔滨工业大学、空军工程大学、北京遥测技术研究所等高校和科研单位攻坚克难,从2017年到2022年,成功研制出国内首台高速目标等离子体电磁科学实验专用研究装置。这台装置由三大系统组成,包括高速目标等离子体产生与调控系统、诊断系统和电磁测量系统。

团队成员、西安电子科技大学副教授刘东林介绍,产生与调控系统主要模拟产生等离子体鞘套的电子密度和碰撞频率等关键参数,以及等离子体鞘套准稳态、宏观动态、微观结构等3种典型特征;诊断系统主要实现对等离子体参数的高精度、高分辨诊断;电磁测量系统实现对等离子体鞘套环境下(高温和强干扰)信号空时频极化多维特征的一体化测量。

“如果黑障这个问题解决了,将来航天器的健康状态就能实时监控和控制,航天器就会变得更加安全。”包为民说,“这对我国航天事业,甚至对未来交通出行等与每个人息息相关的领域,都会产生颠覆性影响。”

明知山有虎,偏向虎山行

“只许成功,不许失败。”这是该重大科研仪器研制项目研究者在立项时许下的诺言。尽管面临重重挑战,但他们从一开始就做好了“啃硬骨头”的打算。

该实验装置的关键是模拟产生具有等离子体参数范围(电子密度从 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 至 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,跨4个数量级;碰撞频率从50MHz至50GHz,跨3个数量级)、非均匀(飞行器通信窗口位置等离子体鞘套的梯度分布)和高动态参数特征(等离子体参数随时间的涨落变化)的动态等离子体。研究团队采用感应加热的方式将空气加热到上万摄氏度,电离形成等离子体,同时设计出不同线型的耐高温喷管,将等离子体喷射到低气压腔体环境中,突破了等离子体多参数耦合匹配优化的关键技术,提出了集感应耦合、流动剪切、频率可变辉光放电于一体的等离子体动态特征模拟新方法,创新性实现了等离子体的涡旋结构模拟和动态频率调控。

项目首次在地面上实现了从L到Ka频段黑



临近空间高速目标等离子体电磁科学实验研究装置。



团队合影。
受访者供图

障现象的复现、等离子体包裹目标的RCS测量和SAR成像,提出了低频电磁波和动态自适应的抗黑障通信新方法,并得到了地面实验验证。

团队在研制过程中一边建设一边开展了多方面基础和应用研究,包括缩短Ka频段(30GHz)黑障时间,研制出新型抗黑障一体化低频通信系统等。

记得装置第一次点火的时候,团队骨干成员已对冷却、真空、电路等进行了几天的完整测试,主控人员依次发出“主回路启动”“加热启动”“通入氩气”“增加电压”等指令。看着发生器内慢慢发出了亮光,突然一下子变成了梭子形状,在真空腔体内出现了亮晶晶的长长火炬,团队人员激动地叫了起来:“成功了!成功了!”

“这一次点火成功的背后,是团队多年的辛勤努力。如何在等离子体环境下开展电磁实验,则是研究人员面临的又一个关键问题。在等离子体产生的腔体内,既要开展信号通信研究又要进行目标散射研究,同时等离子体达到几千摄氏度高温,这对电磁测量提出了极大挑战。

为了解决上述问题,研究团队从降温和低气压热传导出发,根据水冷和增加传导距离(腔体直径),设计了一个直径7米、长3米,具有高效冷却结构和合理热传导时延的大型真空腔室。这个实验装置不仅在科学设计上颇具难度,就连最基本的运输过程都十分棘手。

到,做一件大事需要各方面同心协力。”

项目顺利结题离不开国家自然科学基金的支持和帮助。“国家自然科学基金委员会对这类重大项目设立了专家咨询组。他们不仅在技术方面,而且在财务和管理方面,都给了我们团队很大的帮助。”包为民说。

硕果累累,在创新与协同中培育人才

在项目研制过程中,一批青年人才迅速成长为中流砥柱。

刘东林在28岁时加入项目,如今已经35岁。一名科研人员成长的关键岁月,他都是在这个项目中走过的。

“作为一名年轻科研人员,我有幸亲身参与如此大的项目,获益匪浅。从最初的论证到开展研究,再到最后项目完成,我的科研能力有了很大提升。与各课题老师的协作交流,让我收获了很多。”刘东林表示,前辈们的创新、协同、奉献等精神深深鼓舞着他。

谈及在该项目中的感悟,团队成员、西安电子科技大学教授李小平说:“第一是创新,我们的方案设计、研制思路、实现技术和成果在国内都是独一无二的;第二是交叉,该项目涉及多学科交叉融合,这对我们的知识结构是一个极大锻炼;第三是协同,多个优秀团队相互协作、密切配合,才实现了共同目标。”

“这真正体现了航天系统中广为人知的‘四共同’原则,即‘有问题共同商量,有困难共同克服,有成果共同分享,有风险共同承担’。”包为民说,“我们要把这些原则融入整个科研过程,并传承下去。”

《中国科学报》:当下科学基金深化改革强调“科研范式变革”,您对此有什么思考和作为?

包为民:我们团队在国家自然科学基金委员会论证立项了“多物理场高效飞行科学基础与调控机理”重大研究计划,以跨域高效智能飞行器为背景,在研究范式方面也做了一些布局,开展智能技术与系统工程融合的范式,实现了技术创新,为进出太空、开发及利用太空资源提供了核心保障。该计划具有典型的学科交叉特色,也是科研范式改革

在航天领域的一种新探索。

《中国科学报》:接下来,团队的研究规划是什么?

包为民:基于这个装置,我们可以开展许多以前想做但没条件做的实验研究,如开展理论创新与实验验证;也可以设计更多新实验,发现新的实验现象,总结出新的科学规律;促进新技术不断改进优化。未来,团队将对装置做进一步拓展、提升,扩展到电磁热交义领域方面的理论与实验研究,形成跨领域核心竞争力。