



叩问太阳磁场的奥秘

■本报记者 甘晓

太阳是距离地球最近的恒星，仍蕴藏着诸多未解之谜。

近日，全球首台中红外波段太阳望远镜“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”（以下简称AIMS望远镜）已正式进入科学运行阶段，并迎来两位新成员。他们将作为观测员进驻平均海拔4000米的青海冷湖赛什腾山山顶，协助科学家操作这一先进仪器，共同探索太阳磁场的深层奥秘。

在国家重大科研仪器研制项目的支持下，中国科学院国家天文台研究员邓元勇于2015年带领团队启动AIMS望远镜的研制工作。该项目于2025年9月通过验收。

回望过去十余载，作为项目负责人，邓元勇感慨万千。他与团队秉持追求卓越的科学精神，依托协同创新的合作机制，在高原艰苦环境中迎难而上，攻克重重技术难关，成功突破多项关键核心技术，填补了国际上中红外太阳磁场常规观测的空白。

精益求精，追求原创突破

太阳磁场如同太阳的“生命脉搏”，是揭示太阳内部活动机制的关键。20世纪70至80年代，科学家曾认为太阳磁场的基本结构是单一的，可能由大量1000高斯以上强磁场的“磁元”组成。因此，只要把望远镜分辨率做得足够高，就能“看见”这些基本单元。

到了20世纪末，科学家发现，即使使太阳望远镜的分辨率提得再高，如同用高清相机拍照，也只能看清太阳磁场的“样子”，却无法准确知道它的“强弱”。同时，太阳上不仅有很强的磁场，还有大量非常微弱的磁场，而这些弱磁场对太阳的现象和活动同样重要。

要真正理解太阳磁场，就要“测得准”。

邓元勇团队自2005年起便开始前瞻性探索红外波段观测。传统太阳磁场望远镜主要集中于可见光，而团队则瞄准了8至14微米的中红外“大



AIMS望远镜。

马晓摄

气窗口”。在此波段，大气扰动影响更小、成像更稳定，磁场产生的效应更显著，有望实现前所未有的磁场测量精度。

面对地面中红外观测探测器敏感、背景辐射强等巨大挑战，2014年，团队正式提出研发AIMS望远镜，并获国家重大科研仪器研制项目（部门推荐）支持，于2015年启动研制。

“我们不做国际上已有、自己只能当‘老二老三’的设备，而是追求原创突破。”邓元勇的话语中透着开拓者的坚定。

令人意外的是，立项后波折却接踵而至。团队发现，一开始提出的技术方案存在明显缺陷。“最初的想法过于理想主义。”邓元勇坦言，在地面环境中实现这一方案，工程造价极高，可行性极低。

所幸，项目参与各方都对科学探索展现出充分尊重。一方面，科研团队顶住压力，开始了长达一年半的新方案论证，证明新方案更经济、性能更优；另一方面，国家自然科学基金委员

会作为项目管理方以科学、专业的精神包容并支持这一重大调整。

2016年5月，项目正式启动，比原定时间推迟了一年。

这令科研团队深切体会到，“科学探索从来不是一条直线，以初心为舵、以专业为帆，才能在波折中坚持正确方向”。

协同创新，“初光”如期而至

想要实现在中红外波段对太阳磁场进行观测，必须为AIMS望远镜找到空气干燥、大气稳定、背景辐射低的所在地。2018年，青海冷湖进入团队视野。这里空气极度干燥，冬季水汽中位值低至2.1毫米，清晨大气稳定，是红外波段观测太阳的绝佳之地。

然而，这片“天文宝地”也曾是让科研人员望而生畏的“生命禁区”。王东光曾长期值守在建设现场。她回忆起这个难忘瞬间时不禁哽咽落泪：“经过AIMS望远镜的历练，我们有了迎接任何挑战的勇气。”

“最开始车根本上不去，全靠徒步攀爬。”参与选址和建设的团队成员回忆，冷湖的艰辛远超想象：零下几十摄氏度的严寒中，厕所被冻成冰窖；每秒近30米的狂风能把活动板房吹转90度；水价高昂，用水成了奢侈的事；高原缺氧、山路险峻，车辆常因塌方受阻，“徒步6公里、攀爬近900米高差是家常便饭”。

2020年基建设工，2022年底主体建成，2023年初进入试观测，作为冷湖天文基地首个签约落地的国家级项目，团队走过了“从零建站”的艰难历程。

研制过程中的协同创新令科学家们深有感触。AIMS望远镜由中国科学院国家天文台牵头，联合中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院上海技术物理研究所（以下简称上海技物所）等单位共同推进。

“一半科学家、一半工程师”的团队结构，让科学需求与工程实现得以高效对接。“不同科研团队开展合作虽然有不少需磨合之处，但最终实现了强强联合。”邓元勇说。

其中，作为AIMS望远镜的核心部件，傅里叶光谱仪的研制难度极高。上海技物所团队几乎一次性完成任务。这是国际上首台既有超高光谱分辨率又具有成像功能的傅里叶光谱仪。其光谱分辨率指标提升至国内原有水平的156倍，为项目成功奠定了基础。

2023年7月15日，经过调试的AIMS望远镜成功接收到太阳光谱图像，“初光”如期而至。项目技术负责人、中国科学院国家天文台研究员王东光曾长期值守在建设现场。她回忆起这个难忘瞬间时不禁哽咽落泪：“经过AIMS望远镜的历练，我们有了迎接任何挑战的勇气。”

初心如磐，坚持现场验收

2025年9月，AIMS望远镜项目结题的技术验收环节在青海冷湖开展。多位专家从全国各地奔赴这片高原腹地。在现场考察过程中，评审专家

对AIMS望远镜的各项性能指标给予肯定，在评审意见中写下详尽的专业评价。其中，“技术指标达到或优于任务要求”这一结论，令邓元勇深感欣慰。

早在项目申请之初，邓元勇心中就埋下了一个“执念”——必须进行现场验收。他坚信：“这个项目从来不是一个‘需要完成的任务’，而是一个实现科学目标的工具。”

正因这份执着，团队曾经历了一段“至暗时刻”。2022年设备运抵冷湖进入关键调试阶段时，原本在低海拔测试表现良好的设备一上高原，光学性能严重下降。整整两个月，他们反复排查最困难锁问题，是低温使黏结镜片的胶体收缩而引发镜面微小变形所致。最终，通过更换耐寒胶体并重新装配，问题才得以解决。

这段经历让团队成员更能理解邓元勇的执念。他们知道，只有所有性能指标都在实际观测台址现场测试，才算真正完成了使命。

近20年来，邓元勇把最宝贵的科研生涯都献给了太阳磁场测量。自2005年获得国家自然科学基金面上项目支持，初步论证中红外观测的科学可行性，到2012年获重点项目资助、完成偏振元器件等关键技术预研，他一步一个脚印，为AIMS望远镜的研制奠定了坚实的科学理论与技术基础。

然而，挑战远未结束。12.3微米中红外波段的偏振测量技术在国内尚属空白，国际上也鲜有先例。团队不得不从零开始研发所需的光学元件。他们最终确定CdSe（硒化镉）晶体为理想的偏振光学元件，并逐步摸索出一套完整的加工工艺。“刚开始用传统工艺抛光时，表面划痕累累。”王东光说，“经过不断改进，我们终于得到了理想的偏振片。”

在此过程中，团队不仅研制出国内首台用于中红外波段的椭偏仪检测系统，还成功开发出国际最大口径的CdSe波片，为我国未来中红外偏振测量技术的发展打下坚实基础。此外，AIMS望远镜还配备了8至10微米波

段的终端成像系统，成为我国首个在该波段开展天文观测的设备。

邓元勇的执着深深感染着每一位团队成员。“累但充实”成为大家的共同感受。这种凝聚力，源自对攀登科学高峰的共同追求和使命感。“大家觉得自己做的有价值、有意义。”他说，“拿到任务后不仅会想方设法做好，还会琢磨如何做得更好，形成了一种自己‘卷’自己的氛围。”

脚步不停，探索更遥远恒星

目前，科研团队已利用AIMS望远镜积累了一批高质量、高价值的科学观测数据，有望在太阳三维大气动力学、耀斑物理等前沿方向取得重要突破。按照太阳物理领域的国际惯例，这些科学数据将免费向全球科研人员开放，以促进更广泛的科学合作与成果产出。

对此，科研团队建议，为进一步释放这一先进科研设施的潜力，国家自然科学基金委员会可设立专门的指南方向，鼓励科研人员围绕AIMS望远镜开展原创性研究；同时，也可支持项目团队牵头组织国内优势力量，开展多学科协同的联合攻关，让该仪器的科学产出效能最大化。

面向未来，科研团队已开始谋划新的科学目标。“如果能成功，想想都激动！”这是邓元勇近期与同行交流新构想时收获的反馈。让他们激动的是，目光将从太阳延伸至更遥远的恒星，进而实现恒星磁场的直接测量。

目前，恒星磁场尚无法通过直接手段获取，只能依赖间接推演。而科研团队正探索将AIMS望远镜在中红外偏振测量方面的核心技术拓展应用于恒星观测，迈出直接探测恒星磁场的关键一步。

他们深知，这个探索性的目标极具挑战性。“与太阳磁场相比，恒星磁场极其微弱，观测难度完全不在一个量级。”邓元勇表示，对科研团队而言，科学探索的魅力恰恰在于直面未知、勇于突破边界，在看似不可能之处寻找可能。

检测芯片里看不见的“定时炸弹”

■本报记者 沈春蕾

在一个队列方阵中，如果突然缺了一个人，就会出现空位。这样的“空位”一旦发生在第三代半导体（宽禁带半导体）材料里就是点缺陷，虽然这样的缺陷小到肉眼看不见，却能直接影响芯片的性能。

除了“空位”，宽禁带半导体的点缺陷还包括间隙原子和杂质缺陷等。这些缺陷好比队列里突然多了一个，会成为芯片里的“定时炸弹”。一直以来，揭示半导体内单体点缺陷的光电性质是一个世界级难题。这一难题还限制了检测和分析半导体材料及器件缺陷工具的研制进程。

2025年6月，国家重大科研仪器研制项目（部门推荐）“宽禁带半导体点缺陷的单体光电特性表征仪器系统”（以下简称项目）顺利结题验收。评定专家组一致认为，“项目在多项核心技术上取得了突破”。

中国科学院院长春光学精密机械与物理研究所（以下简称长春光机所）研究员申德振是项目的负责人。日前，他在接受《中国科学报》采访时表示：“从前期准备到项目验收，我们团队付出了10年的努力，接下来我们将推动这套仪器在电子信息和新能源等领域落地应用。”

申报过程并不顺利

2011年，长春光机所牵头承担“973”项目“Ⅱ族氧化物半导体光电子器件的基础研究”，主要研究目标是解决氧化锌P型掺杂的国际共性难题。

申德振是“973”项目首席科学家。他告诉记者：“当年，我们团队在国际上首次提出可以克服自补偿效应的复合掺杂新理论，相关研究成果发表于《物理评论快报》，获得了全球专家的高度认可。”

当时的研究虽然从理论上取得了突破，但随着宽禁带半导体缺陷精准调控技术以及纳米集成电路制程等即

将进入纳米尺寸，未来即便是半导体内的单体缺陷，也会对超小尺寸的单器件产生重要的影响。

于是，申德振带领团队准备申请国家重大科研仪器研制项目，希望从近表面的点缺陷入手，研究半导体内单体点缺陷性质。

然而，申报过程并不顺利。申德振还记得他们从2015年开始准备项目的申报，最终专家组对团队提出的项目科学意义表示了认可，但在技术路线方面存在质疑。

“2016年我们又在专家意见基础上继续凝练，再次申请还是以失败告终，但这一次专家组的认可度提高了很多，也提升了我们对项目申报的信心。”申德振说，“2017年，我们终于得到了评审专家的认可，项目得以批准通过。”

谈及为什么要研制这套仪器，申德振指出，当时我国半导体点缺陷全表征领域的核心困境是设备与核心部件依赖进口、表征技术体系不完整、工业应用与基础研究脱节，整体技术较国际领先水平相差10到20年，高端应用环节的差距甚至达二三十年。

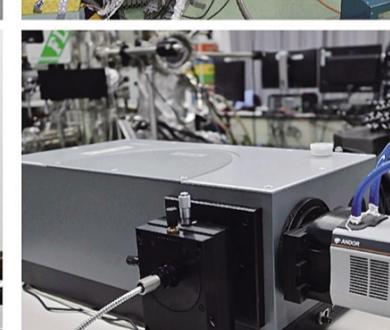
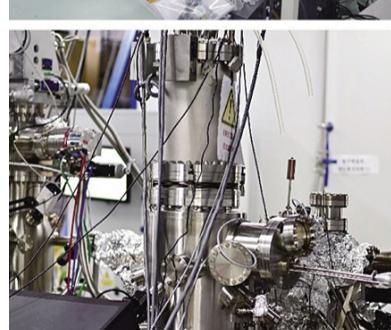
随着半导体器件特征尺寸即将步入亚10纳米级阶段，我国和全球都缺乏对半导体内点缺陷，如空间位置、电子能级、振动能级等进行有效高分辨率表征的仪器系统。

为此，申德振团队瞄准了这个虽然小但非常重要的方向，希望针对半导体内单体点缺陷精准表征，做出一套具有自主知识产权的仪器系统。

平衡“借鉴”与“独创”

项目启动之初，多位专家提出，实施过程中应重点关注针尖加工及微弱信号收集的难度，做好风险防控。

在针尖加工方面，申德振带领团队没有简单沿用传统超高真空低温



宽禁带半导体点缺陷的单体光电特性表征仪器系统核心部件。

解决理论到工程化瓶颈

在仪器研制中，“稳定性、可靠性、实用性”被反复提及。申德振解释道，要实现“稳定性、可靠性、实用性”，需从硬件冗余与校准、软件算法闭环、环境与流程控制三方面系统落地。

实际上，“理论可行但工程化遇阻”是常态。对此，团队的解决路径是机理拆解到问题定位，再到分层优化，最后进行验证闭环，通过软硬件协同与迭代测试打通从实验室到生产线的转化瓶颈。

申德振举了一个例子：“对于半导体内单体点缺陷信号检测技术，我们从样品精准制备、高效激发到信号接收都做到了极致，实现了通常被认为不可能的表征效果。”

目前，申德振正带领团队依托姑苏实验室的工程化平台，开展氧化镓高压高功率器件的重大应用研究，并针对纳米集成电路芯片精准解析进行研发，这是一项面向未来重大新兴产业的核心技术研发。

对于打通“成果转化最初一公里”，申德振谈到，他们的设计路线首先是通过姑苏实验室的平台赋能，解决理论到工程化瓶颈，然后利用人工智能（AI）进行概念验证，使用AI驱动缺陷智能识别与高通量检测，建设概念验证中心加速样机迭代，同时加强产学研协同，让更核心的前沿科学仪器等核心部件国产化，逐渐形成科学—技术—工程的快速发展模式，不断推动我国战略科技与未来战略性新兴产业技术进步。

“国家重大科研仪器研制项目的申报竞争非常激烈，但大多偏前端科研，仪器能落地产业化的很少，从实验室走向市场的阶段，依然需要政策和资金的支持。”申德振表示，未来重大科研仪器的研制将围绕AI与仪器深度融合、软硬协同闭环，实现高通量、原位智能表征、工程化快速转化，逐一突破工业体系里多项“卡脖子”技术。

此前的研究在半导体表面，对单原子和单键级进行精准解析，难以解决半导体内单体缺陷表征的难题。”

申德振报告《中国科学报》，“我们不仅优化了前人的技术，还通过结合硬件和软件控制光场、对半导体表面等离子体基元的精准耦合，成功实现对半导体内单体缺陷的精准探测。”

半导体材料表征具有普适性，团队研发的技术还可以拓展到第三代半导体材料与器件单体缺陷表征和控制的研发。比如，该技术可以实现碳化硅中碳杂质、氮化镓中氮空位等空位复合体等表面下点缺陷的单键级识别，区分不同缺陷构型的拉曼指纹。“这就可以解决传统表征‘知其然不知其所然’的瓶颈。”申德振说。

团队通过原创技术与标准、专利、设备的协同开发，有望显著提升我国在该领域的国际话语权。