

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，即使把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，是中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”。2019 年 7 月，团队正式决定将 AIMS 望远镜落户冷湖赛什腾山，而那时的山上连一条像样的路都没有。

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人，会成为芯片里的“定时炸弹”。一直以来，揭示半导体内单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氯化镓 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

（STM）/针尖增强（TERS）的针尖研制思路，而是从材料选择、几何结构到等离激元响应进行了系统重构，确保针尖制备过程稳定且可重复。

在信号采集方面，考虑到单体点缺陷本身信号极其微弱，申德振带领团队采用了多物理通道协同增强策略，将单体点缺陷拉曼、深能级瞬态谱和发射光谱有机整合，显著提升了信噪比与判据可靠性。

另外，针对半导体材料中的点缺陷、布里渊区边界效应及等离激元高效量子耦合等难题，团队开展了一系列攻关。

“有一次，团队连续数周昼夜调试系统，只为稳定获取一个‘理论上存在、实验上极不稳定’的缺陷振动模信号。”申德振回忆道，最终，当那条清晰、可重复的谱线第一次出现时，大家突然意识到，这不是一条简单谱线，而是一个技术上的巨大进步。

项目由长春光机所牵头，中国科学院微电子研究所、中国科学院物理研究所、南昌大学等合作单位共同完成。

“项目的顺利完成离不开兄弟单位从多个维度的协助。”申德振表示，大家先充分论证各个环节，再论证整体方案，各单位通过保障资源协同机制，实现了技术标准统一、资源高效整合。

作为项目负责人和首席科学家，申德振在该项目实施过程中始终强调“自主知识产权”。

申德振指出：“在半导体缺陷极限精准表征领域推进自主知识产权研发、实现核心技术国产化时，必须承认我们首先是站在了‘巨人’的肩膀上，利用国际已有的前沿技术，以需求牵引为前提，平衡‘借鉴’与‘独创’。”

团队上下均意识到，只有充分借鉴“已知原理与成熟架构”，才能进一步独创并锚定“原子级、原位和跨尺度”等极限场景与底层机理，实现知识产权闭环和技术迭代，最终形成长期

“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 年基建开工，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。

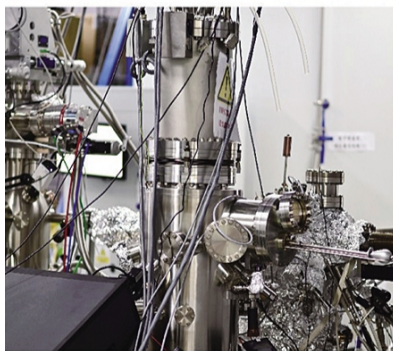
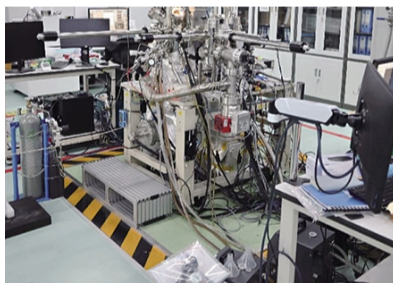
“一半科学家、一半工程师”的团队结构，让科学需求与工程实现得以高效对接。“不同科研团队开展合作虽然有不少需磨合之处，但最终实现了强强联合。”邓元勇说。

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。

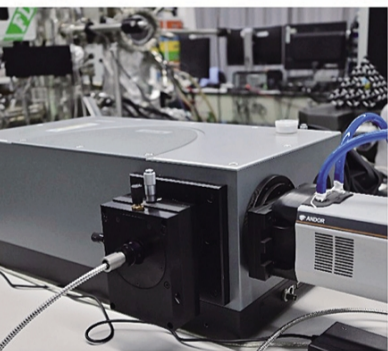
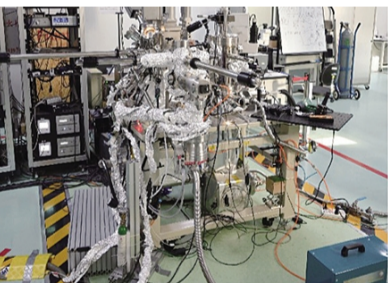
2023 年 7 月 15 日，经过装调的 AIMS 望远镜成功接收到太阳光谱图像，“初光”如期而至。项目技术负责人、中国科学院国家天文台研究员王东光曾长期值守在建设现场。她回忆起这个难忘瞬间时不禁哽咽落泪：“经过 AIMS 望远镜的历练，我们有了迎接任何挑战的勇气。”

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



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。



受访者供图

的“跟跑到并跑再到领跑”的渐进式突破路径。

知其然知其所以然

项目的顺利验收，意味着该仪器成功实现半导体表面下点缺陷单原子级分辨的拉曼光谱成像与测量，有望促进我国半导体点缺陷测试分析技术的发展。

该仪器系统可以对碳化硅、氮化镓等功率芯片缺陷进行扫描检测，反馈工艺改进的迭代将有助于核心芯片的良率提升。同时，该仪器还可以对量子芯片单原子缺陷控制、硅光芯片异质集成界面缺陷等进行检测与溯源。通过对固态电池电解质、电极界面缺陷进行精准表征，以及光伏器件载流子复合中心的精准定位，该仪器能够从材料底层逻辑层面助力新能源产业发展。

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，他们反复排查最终锁定问题，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调，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与理论基础。

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（碲化镉）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精密检测系统，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。“大家觉得自己做的事有价值、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。

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产线的转化瓶颈。

申德振举了一个例子：“对于半导体内单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，开展氧化镓高压大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借助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。