

中国科学报

CHINA SCIENCE DAILY

总第 9049 期 2026 年 8 月 4 日 星期二 今日 4 版

中国科学院主管 中国科学报社出版

国内统一连续出版物号 CN 11-0084 代号 1-82

主办:中国科学院 中国工程院 国家自然科学基金委员会 中国科学技术协会

新浪微博 <http://weibo.com/kexuebao>



听《中国科学报》《中国科学报》官微



科学网 App



科学网官微

科学网 www.sciencenet.cn

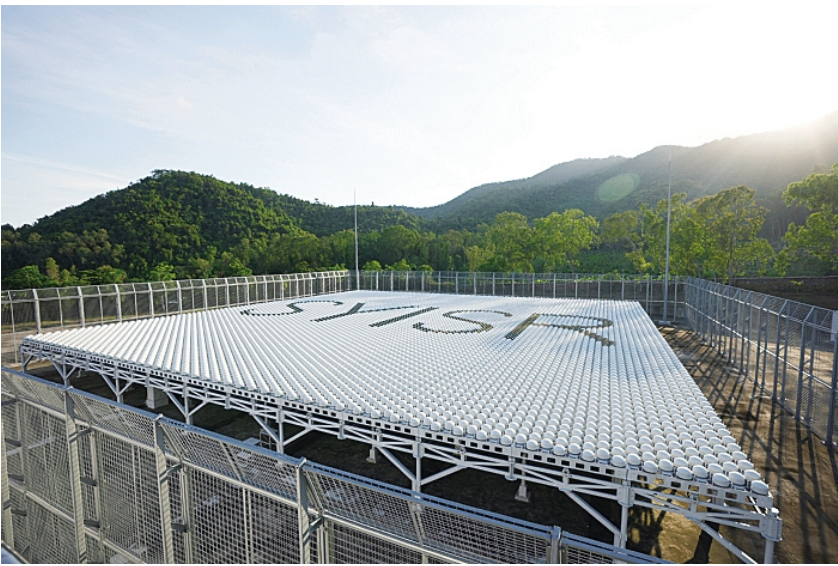
探访“子午工程”最南端：

用中国人自己的雷达，追问电离层的秘密

■本报记者 倪思洁 戚金葆 见习记者 王铎

开栏语

大科学装置是探索未知、突破前沿的“国之重器”，是支撑基础科学研究和取得原创性突破的关键科技基础设施。中国科学院一批大科学装置持续运转，成为探索科学无人区的前沿阵地。自今日起，本报开设“探访大科学装置”栏目，记者们将奔赴天南海北，直击科研现场，见证创新脉动，讲述科研人员立足这些国之重器，持续攻克前沿难题、奋力抢占科技制高点的动人故事。



三亚台站雷达阵列。

戚金葆 / 摄

海南三亚吉阳区，在远离市区和游客的地方，8320 个天线单元，每秒数百次向电离层发射电磁波。

此时，数百公里外，文昌、儋州各有 4096 个天线单元“监听”回波。它们与三亚的主阵组成了世界上现役口径最大、功率最高的数字相控阵非相干散射雷达——海南三站式非相干散射雷达系统（以下简称三站式雷达），用来“监听”高空微小电子的一举一动，预测空间天气灾害。

这套装置是国家重大科技基础设施“子午工程”布设在中国境内最南端的一部雷达。7 月 24 日，三站式雷达首席科学家乐新安及团队发表成果：利用该装置，首次在地球上空充满带电粒子的电离层中探测到电子伯恩斯坦波，由此证实了近 70 年前的理论预言。

中国自己的非相干散射雷达

10 多年前，中国科学院院士万卫星向国家自然科学基金委建议，建一台中国人自己的相控阵非相干散射雷达。如果将传统探测设备比作人耳，

那非相干散射雷达就像“监听器”，可以“监听”数百公里高空电离层中电子和离子的细微波动，灵敏度相当于在万人呐喊的体育场里听到身边蚊子的声音。

2020 年 4 月，在国家自然科学基金委的支持下，经过多年摸索，在三亚工程现场，第一块装有 32 个天线单元的子阵开始吊装。

2019 年秋天，“子午工程”二期启动。这是一个极具雄心的项目——北起漠河、南至三亚、东临上海、西达喀什，沿东经 100°+120°、北纬 40°+30°两纵两横建设 31 个台站，目标是对我国上空日地空间环境进行全链条、立体式监测。位于祖国最南边的三站式雷达，被纳入建设序列。

在“子午工程”二期的支持下，三亚非相干散射雷达迎来了二期工程：三亚主站规模得以扩大 1 倍，儋州和文昌也新建了两个接收站，雷达的性能指标得到大幅度提升。

2019 年秋天，王永辉从中国地质大学（北京）毕业后，保送成为万卫星的硕士研究生。由于万卫星患病，他入学后由乐新安指导。2022 年夏天，

他放弃了科技企业的录用通知，决定继续读博，挑战难度更大的等离子体线研究。当时，国际上能看到它的雷达屈指可数。但王永辉知道，三站式雷达一旦建成，将成为开展这项研究的“利器”。

之后每年，王永辉经常待在三亚台站。白天，参与雷达现场调试；晚上，写程序处理数据。在一次次实验和试错中，他逐渐熟悉了雷达从观测设计到信号处理的完整流程。

从王永辉身上，乐新安看到了一股韧劲：“这是一个有价值但不容易发文章的课题，但他就盯着这一件事。”

证实近 70 年前的预言

2023 年，三站式雷达建成并通过总体验收。同年 9 月，研究人员观测到地球电离层中自然激发的电子伯恩斯坦波，并获得了这种波随高度变化的精细谱结构。

在非相干散射雷达的回波频谱中，电离层中电子的集体运动会产生一种特征谱线——等离子体线。在磁场的约束下，电子会一边绕着磁力线“转圈”，

一边产生特定频率的静电振荡。

1958 年，物理学家伯恩斯坦从理论上推导出在有磁场的等离子体中，当电子的纵向振荡沿垂直于磁场的方向传播时，电子的集体振荡会与回旋运动相互作用，在电子回旋频率的各个整数倍附近形成一系列共振谐波。这种具有特殊谐波结构的静电波，后来被称为电子伯恩斯坦波。在非相干散射雷达的回波频谱中，它表现为等离子体线在这些频率附近发生分裂，并出现精细的谱线间隙。

但几十年来，在地球电离层区域，它的完整结构只存在于物理学家近 70 年前预言的公式里。

作为论文第一作者，王永辉介绍，完成这样的观测需要同时满足 3 个条件。首先，等离子体线回波十分微弱，雷达必须具有足够高的灵敏度；其次，雷达波束能够指向接近垂直地磁场的方向；最后，接收机要有足够的带宽，才能记录完整的谱线结构。这 3 个条件缺一不可。

三站式雷达做到了。它依托海南低纬的区位优势，实现了近乎垂直地磁场的观测。凭借高雷达增益和宽带接收机，王永辉设计的特殊实验模式捕捉到了 100 至 1000 公里范围内的高达 7 阶的等离子体线分裂结构，与理论预测相吻合。

这项成果不仅验证了理论预测，也为诊断电离层参数提供了新途径。乐新安介绍，这些谱线的频率结构可以当作一把“标尺”，据此反演电子密度及垂直于地磁场方向的电子温度，而这些参数在近乎垂直地磁场的观测条件下，往往难以通过传统方法获得。

如今，成果正式刊发，王永辉即将拿到博士学位，但他说“这还只是个起点”。三站式雷达的运行寿命很长，他计划继续从事非相干散射相关的科学研究，把雷达的作用发挥到极致。

（下转第 2 版）

探访大科学装置

连接基因与药物筛选体系 赋能虚拟细胞构建

本报讯（记者王昊昊 通讯员赵赫）中南大学教授李敏团队联合腾讯生命科学实验室研究员姚建华团队，提出统一的细胞扰动建模框架 UniPert-G2C2P，从分子表征到表型建模两个层面连接遗传与化学扰动筛选，为虚拟细胞构建提供了新的计算方法。相关成果近日在线发表于《细胞》。

近年来，构建能够理解并预测生命系统行为的“虚拟细胞”，已成为人工智能（AI）与生命科学交叉融合的重要前沿方向。虚拟细胞需整合多尺度、多模

态生物信息，模拟细胞在不同分子干预下的响应。

研究团队提出 UniPert-G2C2P 框架。UniPert 首先通过融合大分子蛋白质和小分子化合物的多模态分子信息，并结合对比学习、图神经网络、序列比对等技术，构建连接遗传扰动与化学扰动因子的统一表征空间，学习不同类型分子干预之间潜在的生物学关联。在此基础上，G2C2P 进一步利用大规模基因扰动数据进行预训练，学习遗传扰动中蕴含的生物学知识，并通过化学扰动数据微调进行跨域扰

动迁移学习，从而实现高效的细胞特异性药物筛选表型建模。

研究团队在多个大规模双域细胞扰动数据集上对该框架进行了系统评估。结果显示，UniPert-G2C2P 能够实现遗传扰动与化学扰动之间的有效知识迁移，在未见小分子条件下准确预测细胞表型响应，并保持对不同细胞背景下异质性响应模式的刻画能力，同时降低化学扰动建模对大规模实验数据的需求。进一步分析表明，该框架学习的扰动因子和表型联合表征空间

能够支持药物作用机制解析和潜在靶点关联发现。

该研究突破了传统遗传筛选与化学筛选相对独立的数据分析模式，建立了从多模态分子表征到跨域表型迁移的统一细胞扰动建模框架，为整合不同类型分子干预信息、构建具有预测能力的虚拟细胞提供了新的计算范式，并为全球虚拟细胞研究提供了新的计算方法和开放资源。

相关信息：
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2026.06.005>

欧洲火灾正在打破纪录



本报 在前所未有的热浪助推下，肆虐法国与西班牙的大规模野火频频刷新纪录，而野火季（通常从 3 月持续至 10 月底）还有数月才会结束。

西班牙奥维耶多大学的 Cristina Santín 表示：“我们一直在向社会预警这类灾难终将迎来，规模更大、破坏性更强、风险更高的野火会不断出现。如今预言已成现实。”

据《自然》报道，卫星数据显示，截至 7 月 29 日，法国已有 9.1 万公顷土地被大火吞噬，打破往年火情纪录，此前

完整野火季的过火面积最高仅 6.6 万公顷。西班牙过火面积已超 20 万公顷，远高于同期平均水平，马德里附近爆发的火情成为该国历史上单场规模最大的野火。

野火已导致几十万人紧急疏散。西班牙与英国的部长们于 7 月 29 日联合发表声明：“今夏一系列野火证明，气候变化已然成为欧洲面临的国家安全危机，正威胁我们现有的生活方式。”

科学家表示，本轮大火或许标志着南欧火情模式迎来转变：历经数十年相对平稳期后，该地区的火灾特征正逐步趋近美国加利福尼亚州这类极易爆发大火的地区。近日发表于《科学报告》的一项研究显示，法国、西班牙部分地区易诱发火情的高温干旱天气强度，在过去 10 年间相比 1981 年至 2010 年提升

达 50%。西班牙与葡萄牙部分地区以往每年极端易燃天气不足 10 天，如今最长可达 25 天。

研究人员称，今年以及过去几年欧洲频发严重野火意味着，火灾风险攀升正成为事实。现在，法国消防员正奋力对抗巨大的火积雨云，这种云会催生变幻莫测的局地极端天气，是该国境内首次出现的此类现象。与此同时，新一轮热浪正在酝酿形成。

荷兰格罗宁根大学的 Raúl Cordero 带领团队梳理了葡萄牙、西班牙、法国、意大利、希腊自上世纪 80 年代以来的过火面积与起火记录，以此研究南欧火灾风险变化趋势。

研究发现，2016 至 2025 年间，上述区域的野火活跃度显著低于 1981 至 2010 年。每个国家起火数量降幅至少达

40%。除葡萄牙 2017 年爆发特大火灾外，各国过火面积同样下降。

值得关注的是，极易引发火灾的高温、干燥、大风等气象条件却呈现完全相反的增长趋势。Cordero 指出，人为气候变化造成气温上升，是易燃气象条件增多的核心诱因。“一旦热浪来袭，极端火灾气象条件也会随之出现。”

今年 5 月以来欧洲接连遭遇多轮热浪，植被持续干旱，极易引燃。已有研究预测，本世纪气温持续上升将大幅推高欧洲火灾风险。Santín 评价：“这是难以逆转的长期趋势。”

Cordero 解释，过去 30 年间野火发生频次与火灾潜在风险出现差异，主要归功于高效的灭火防控工作。然而，极端天气不断加剧，火灾气象条件突破消防承载能力只是时间问题。（王方）

我国首次依托水上通信渠道推送北极航道海冰预报

据新华社电 8 月 1 日，交通运输部北海航海保障中心正式对外播发北极航道海冰预报信息。这是我国首次依托水上通信渠道推送北极航道海冰预报，标志着我国北极海上信息服务实现从实况播报到动态预报的跨越式发展。此举进一步健全北极航行信息保障体系，为极地航运高质量发展提供有力支撑。

2024 年 7 月 1 日，交通运输部北海航海保障中心首次开通北极航线海上安全信息播发业务，该业务由天津海岸电台通过中高频单边带无线电电话播发，内容包括北极航线重点海域的海冰实况监测和气象预报信息。

该业务开通两年来，经过“雪龙 2”号等极地船舶实船测试验证，在白令海峡、挪威海等东西航道核心区域，信息信号接收稳定、传输可靠，有效保障过往船舶航行安全。

立足两年业务运行积累，结合航

运企业实际需求，交通运输部北海航海保障中心天津通信中心联合天津市气象服务中心开展技术攻关，整合海洋、气象、水文多源观测数据，优化算法模型，研发形成这套自主可控的北极融合冰情预报成果。

交通运输部北海航海保障中心天津通信中心高级工程师樊霞介绍，本次上线的北极航道海冰预报，覆盖东西伯利亚海、拉普捷夫海、喀拉海、巴伦支海四大北极核心海域，以及白令海峡、德米特里拉普捷夫海峡、维利基茨基海峡、喀拉海峡 4 个通航海峡。

预报内容涵盖海冰厚度、海冰面积、海冰流速等重要参数，采用 3 小时高时间分辨率、10 公里高精度空间分辨率标准，每 24 小时完成一次更新，能够为极地航行船舶提供提前预判、科学规划航线的关键数据支撑，有效规避航行风险。（周润健）

以匠心突破封锁，他们稳稳守护北京时间

■本报记者 李媛



国家授时中心光抽运小铯钟研发团队。国家授时中心供图

时间是保障经济社会平稳有序运行的底层基石。坐落于西安临潼的中国科学院国家授时中心（以下简称国家授时中心）承担着我国国家标准时间（北京时间）的产生、保持和传播任务，而原子钟则是产生国家标准时间的核心装备。

国家授时中心光抽运小铯钟研发团队历经多年持续攻关，实现了小铯钟国产化，构成了国家标准时间自主化的关键一环。2025 年，国家标准时间的主要性能及其对国际标准时间的贡献权重均进入国际前列。近日，这个团队荣获中国科学院第七届“科苑工匠”称号。

破局：从零起步，打破国外技术垄断

小铯钟是基于铯原子束量子跃迁构建的一级频率标准，能够实时提供标准时间和标准频率信号，具备长期自主守时能力，即使连续运行数万年，误差也不足 1 秒。

由于涉及多学科交叉、研制技术复杂、工艺门槛高，美国长期独家把持着全球小铯钟的技术与市场。

彼时，我国基础材料、制造工艺与底层原子钟理论研究均存在明显短板，小铯钟核心部件电子倍增器无法自主研发。国家标准时间产生系统等多个国家重大基础设施，只能采购美国产品，严重受制于人。贸易摩擦后，美国政府以产品“出口威胁美国国家安全”为由，对我国彻底禁售磁选态小铯钟，对其西方伙伴国家也施行出口管控。

这种“卡脖子”的困境，是国家授时中心主任、首席科学家张首刚创建小铯钟团队时就预见的情况。2009 年，国家授时中心正式启动激光抽运铯束原子钟（以下简称光抽运小铯钟）自主研发工作。那时他经常说，自主研发小铯钟，不是“要不要”的选择，而是“必须走”的道路。

“项目起步阶段，专业人才匮乏、科研经费紧张，攻关之路异常艰难。”张首刚对《中国科学报》说，他带领团队反复计算论证，结合技术摸底和学科发展趋势，提出了采用原子量子态激光

制备与量子跃迁激光探测方案，研发光抽运小铯钟，这不仅绕开了美国磁选态小铯钟的专利壁垒，也为国产小铯钟技术的可持续发展指明了方向。

这意味着，团队必须攻克半导体激光器自动稳频和长期自主可靠运行两大难题。这是整个研发过程中最耗时、最棘手的瓶颈。

2010 年刚过完春节，还在其他课题组的国家授时中心正高级工程师李孝峰被找来帮忙处理弱信号噪声大的问题。后来他就留下来牵头激光器电路研发重任，5 年间几乎全身心扑在项目上。

画电路板、调试控制程序、优化运算算法，一遍遍试验，一次次迭代打磨。李孝峰坦言，最紧张的时候，吃饭睡觉都在琢磨研发中的问题，有时候躺在床上，脑子里也在排查可能出现的差错。

“就像爬一座百米高的山，不可能一下子蹦上去，只能一厘米一厘米往上挪，有时候还会倒退。”李孝峰这样形容当年的研发历程。

但再难李孝峰也不曾想过放弃，他每天想得最多的就是怎么把阶段性问题解决了，“这项工作关乎国家需求，没有退路，必须做成”。

历经无数次试验，张首刚带领团队攻克了一个又一个技术瓶颈，成功自研基于铯原子饱和吸收谱的半导体自动稳频激光器，解决了原子量子态制备和量子跃迁探测难题。这项成果荣获第二十三届中国专利金奖，也为光抽运小铯钟工程化奠定了基础。

依托这项核心专利技术，2016 年，团队联合国内时频领域龙头企业成都天奥电子股份有限公司、中国电子科技集团公司第十二研究所，成功研制出国际首款光抽运小铯钟产品，核心指标全面超越美国禁运的磁选态小铯钟。（下转第 2 版）



8 月 2 日，7000 车位双燃料汽车运输船“洁净之星”轮从山东烟台港老港区起航。

该船由中集来福士为希腊建造，配备液化天然气（LNG）动力系统，同时采用“氨预留”设计，后期可升级为氨燃料动力系统，并满足国际海事组织最新的新能源汽车海运安全标准，获得挪威船级社“氨预留”和“电动汽车装载”双认证。

图片来源：视觉中国