中国科学报

CHINA SCIENCE DAILY

总第 9103 期　2026 年 10 月 27 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

听《中国科学报》　《中国科学报》官微　科学网 App　科学网官微

新浪微博 http://weibo.com/kexuebao　　科学网 www.sciencenet.cn

用一粒“微尘”，把原子核做成“钟摆”

■本报记者 陈彬

打开手机导航，输入目的地，一条最优路线便呈现在眼前。很少有人会意识到，这看似平常的操作，本质上是一场对时间的精密测量。

卫星导航的核心原理并不复杂。卫星向终端发射信号，终端通过测算信号传播时间，乘以光速，便能得出卫星与终端间的距离，再结合多颗卫星的数据完成定位。

“距离测量被转化为时间测量，这样的操作并不少见。”在近日接受《中国科学报》采访时，清华大学物理系副教授丁世谦介绍说，由于目前人类对时间的测量精度远高于对其他物理量的测量精度，所以长度、电压等诸多基本物理量的计量都以时间为基准进行定义。这意味着计时精度每推进一步，科学技术边界便向外拓展一分。因此，人类一直都在探寻更精确的时间测量手段。

如今，该领域迎来一项突破。丁世谦团队利用自主研制的 148 纳米连续波真空紫外激光，以及与合作单位共同研制的掺钍 −229 氟化钙晶体，实现核光钟运行。相关成果近日在线发表于《自然》。

“这意味着人类计时的‘钟摆’第一次从原子外层的电子深入到了中心的原子核。”丁世谦说。

从电子到原子核

想了解清楚什么是“核光钟”，要从原子钟说起。

如今，原子钟被广泛应用于卫星导航等领域，其基本原理是依靠原子最外层电子在不同能级间跃迁时发出的微波进行计时。电子就像一个永远匀速摆动的小钟摆，一秒钟摆动几十亿次，数它摆动了多少次，就能知道过了多长时间。

“这类钟技术成熟、结构牢固，但精度有‘天花板’，大约几百万年会有 1 秒的误差。”丁世谦说，在此基础上，如果将微波替换为频率高出数万倍的光学信号，其精度便可提升至几千亿年不差 1 秒，这就是目前人类最精确的计时工具——原子光钟。然而，它存在一个难以克服的问题。由于电子处于原子最外层，极易受到温度、磁场、震动等外界环境的干扰，因此高精度原子光钟至今仍局限于实验室环境。

核光钟的构想正是为突破这一瓶颈而生。它不再以原子外层电子的跃迁为频率参考，转而利用原子核内部的能级跃迁。

丁世谦介绍说，原子核内部同样存在由质子和中子组成的能量层级，核子也会在不同层级之间跃迁，即所谓“原子核跃迁”。但由于原子核处于原子中心位置，其尺度远小于原子，质量又远大于电子，所以外界扰动对原子核跃迁的影响小得多。相应的，其跃迁频率也稳定得多。“这样一来，核光钟的精度更高。”

不过，要造出高精度的核光钟并不容易，其中一个难点便是找到合适的原子核。

唯一的“候选者”

不同于电子的单一性，目前人类已知的原子核有 20 余万种，但其中绝大多数内部的激发态跃迁能量在万电子伏特以上。

“这意味着要想通过激光输入能量的方式实现原子核跃迁，单光子激光的能量需求非常大，对应的波长要小于 0.1 纳米。现阶段，人类无法制备这类激光器。”丁世谦说。

然而，钍 −229 是个例外。作为放射性核素，该元素实现原子核跃迁所需的能量只有 8.4 电子伏特，人类只要通过波长为 148 纳米的真空紫外光照射便可以实现这一能量输入。但是 148 纳米属于真空紫外波段，会被空气强烈吸收，因此必须在真空环境中传播。更关键的是，核光钟需要的是持续稳定的连续波激光照射，而非目前比较普遍的脉冲激光。

多年来，国际上始终无人能制备出 148 纳米连续波真空紫外激光。直到 2022 年，丁世谦团队提出连续波激光方案并启动攻关。今年 2 月，团队在国际上首次研制出 148 纳米连续波真空紫外激光。相关成果发表于《自然》。阻碍核光钟研发的一个关键性难题被破解。

一个问题解决了，另一个更为严峻的挑战冒了出来。

钍 −229 的半衰期相较于地球 45 亿年的历史并不算长，地球上已经不存在其天然矿藏，只能通过核反应堆少量生产，而我国相关核素获取渠道受到国外严格限制。这导致整个项目中，团队可支配的钍 −229 仅有 1.4 微克。

研制核光钟，需要把这点比一粒细尘还轻的钍 −229 掺杂进氟化钙晶体里，让晶体中布满钍 −229 原子核。由于原料太少，团队没有任何试错空间。

最终，在多方协同下，团队联合中国科学院上海光学精密机械研究所、上海硅酸盐研究所、上海应用物理研究所等单位，一次性生长出毫米尺度的高质量掺钍氟化钙晶体，单次生长所用核素仅为欧洲团队的约 1/200。

有了激光和晶体，团队进一步开展了核跃迁精密光谱测量。

“当 148 纳米激光照射晶体时，若激光频率与钍 −229 原子核的跃迁频率吻合，原子核便会吸收部分光子，从而导致光谱产生变化，但这一吸收信号极其微弱，仅为万分之一量级。”丁世谦说，为此，团队开发了快速核跃迁频率读取技术，成功将极弱信号从噪声中提取出来。

提取信号的最终目的是把激光频率牢牢锁定在原子核的跃迁频率上。丁世谦表示，现实环境中，温度变化、机械震动乃至供电电流的波动，都会造成 148 纳米激光的频率发生偏移，导致钍 −229 原子核对光子的吸收减少。凭借快速核跃迁频率读取技术，这一变化会被相关设备迅速捕捉，并据此实时反馈修正激光的频率，使其始终稳定在钍 −229 核跃迁上。

“在这种状态下，钍 −229 原子核不再只是被激光探测的对象，而成为稳定激光频率的高精度量子参考。我们只要对校准后的激光频率进行测量，便可以实现对时间的精准计算。”丁世谦说，“这就是核光钟。”

不仅仅是计时器

核光钟的实现，不只代表着人类获得了一台更精确的计时器。丁世谦告诉《中国科学报》，在应用层面，未来如果能在现有固体平台基础上，完成核光钟的工程化和小型化，便有望为卫星导航、深空探测和国防安全等场景提供新一代高精度时间频率基准。

“当前，我们的装置尺寸约为 1.5 米宽、3 米长，仍处于原理验证阶段，而且 148 纳米激光目前也无法在空气中传播。这意味着我们距离实际部署仍有较长的路要走。”丁世谦说。

值得一提的是，在基础科学层面，由于钍 −229 核跃迁对基本常数变化等新物理效应的灵敏度较高，因此核光钟可为检验基本物理规律提供前所未有的精密探测平台。

此外，核光钟的实现更意味着“人类的量子操控能力首次深入到原子核尺度”。丁世谦表示，后续团队将探索把钍 −229 原子核引入离子阱平台，将现有量子计算相关技术复用至原子核跃迁的相干操控，有望催生“核量子光学”这一全新学科方向。

“我们希望借助这项技术在人类探索微观世界的版图上，撬开一道新的‘门缝’。”丁世谦说。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1038/s41586-026-11122-1*

“分子锁定”新策略有望破解有机光伏“三角难题”

本报讯（记者张楠 通讯员黄莎莎）中国科学院宁波材料技术与工程研究所研究员葛子义、刘权团队提出一种“分子锁定”新策略，给有机太阳能电池的透明电极与界面修饰分子之间加上“化学锁扣”，同步提升器件效率和长期稳定性。基于该策略，15.6 平方厘米孔径面积有机太阳能组件的有效面积效率超过 18.8%。相关成果近日发表于《焦耳》。

有机太阳能电池可以像报纸一样印出来，具有柔性、轻质、低成本和大面积制造的潜力，实验室小面积单结器件光电转换效率已超过 20%。但从实验室小电池走向商业化组件，仍有一个关键瓶颈——商用透明导电电极铟锡氧化物 ITO 与超薄界面修饰材料膦酸自组装单分子层（SAM）之间的界面不够稳定。

针对这一难题，团队提出基于配体交换反应的“分子锁定”策略。他们先在商用 ITO 表面真空镀上一层含铟和氯的中间层 $InCl_x$，经过紫外臭氧处理，形成 ITO−Cl 界面，再通过热退火触发 SAM 与 $InCl_x$ 配体交换化学反应，氯离子作为“牺牲离去基团”，与膦酸基团释放的氢结合成氯化氢挥发掉，驱动形成牢固的铟－氧－磷三点配位网络。原本松散、不亲和的 ITO−SAM 界面被改造成密集的“锚定模板”，让修饰分子近乎完整地铺成单层。

多种测试和分子模拟表明，该中间层能抑制 SAM 团聚，让覆盖更均匀，改善电极能级匹配并增强耐溶剂冲洗和热老化能力。该方法在多种膦酸类 SAM 材料中具有通用性。

基于这一“分子锁定”界面，实验室小面积有机太阳能电池效率达到 20.4%，平均效率 19.9%。在稳定性方面，封装小器件于最大功率点连续工作 2000 小时后仍保持超过 85%初始效率；组件在连续光照 600 小时后保持超过 95%初始效率；75℃热老化 1000 小时后保持超过 90%初始效率。这说明“分子锁扣”带来的不是某一个点的改善，而是效率、稳定性、面积三个维度同时向前推进。

该研究为高效、稳定、可规模化有机光伏组件提供了通用界面平台，有望破解有机光伏“效率、稳定性、可扩展性”难以兼得的“三角难题”。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1016/j.joule.2026.102709*

城市水安全治理需有高精度感知“慧眼”

■岳清瑞

水既是生命的保障，也是经济的支撑，更是生态调节的重要方面。但水同时会给城市带来安全风险。

我主要从事城市安全研究。近年来，城市水安全问题让我们十分关切。城市供排水系统是城市“巨系统”中关键的子系统之一，水安全出问题，会使城市功能受到巨大影响，甚至导致城市瘫痪。而城市水安全的治理与风险管控，离不开高精度感知的“慧眼”。

城市水安全挑战重重

当下，城市水安全治理面临多重挑战。

第一重挑战是气候变化。根据统计数据，中等温室气体排放情景下，城市极端降水概率提高约 32%，高排放情景下提高约 55%。当下我国城市已经接近高排放场景，可以说，目前所遇到的城市洪涝、城市干旱都与气候变化密切相关。

第二重挑战是全球水循环波动加剧，洪旱风险并存。统计表明，城市中 3 个月尺度的干湿急转与 20 世纪中叶相比增加了 30%至 60%。

第三重挑战是快速城市化放大了暴雨的城市效应。从自然和低开发场景变为高密度城市，不透水面增多，使洪涝风险由过去单纯的气候外部驱动，转变为与城市下垫面、排水网络的内部变化共同促成。上游来水、局地暴雨、下游顶托和排水能力四类因素同步作用，加大了城市极端洪涝等水安全风险。

应对这些城市水安全挑战，需从城市巨系统的角度入手，从载体层、主体层和支撑层出发，考量物质流、能量流、信息流、价值流和风险流。例如，城市水存在两种循环——自然水循环与人工水循环。对于二者之间的交互耦合机制，现有研究仍存在不足，有待进一步加强。此外，以城市洪涝为例，认识城市洪涝的关键，不只聚焦于极端气象带来的水越来越多，更要关注城市系统整体状况可能发生的临界转变。

认识并了解这些挑战，是开展水安全监测的前提。

高精度“慧眼”监测

从城市系统整体视角出发，过去面向城市水风险，针对水流以及构筑物应力、应变、形变加速度等要素的常规监测手段还很不足。此外，城市面积往往有上百平方公里，甚至上万平方公里，唯有广域监测手段才能精准感知并预警城市水风险。

卫星恰好具备这样的广域能力。运用卫星遥感、干涉雷达（InSAR）开展精准监测，可以综合构建天－空－地协同的监测预警体系。

我们希望，用于建筑和基础设施的安全监测，总体精度不低于 2 毫米、重点部位达到 1 毫米以内；单幅影像不小于 1000 平方公里；卫星重轨周期达到小时级。

对于房屋倒塌、体育馆垮塌事件来说，如果具备上述精度，可以提前数天观测到至少是毫米级的变形，从而实现预警；对于高速公路塌方、山体滑坡等重大事故，基于天－空－地协同监测方案，可以做到提前 10 小时以上乃至两天以上监测。

需要指出的是，InSAR 作为解决这些问题的强有力技术，虽已应用多年，但过去大多止于信号解算理论，数据未经验证或无法验证。因此，我们将攻关重点放在精度标定、数据融合与数据的可验证性上，先后开发自主解译软件，构建雷达信号特征与房屋结构先验知识紧耦合的架构，研发面向天地协同精度提升的地面增强材料和装备。在标定验证场，我们已实现天－地协同验证：多层建筑精度可达 0.4 毫米，超高层建筑可达 1.7 毫米。

就监测效率来说，相关技术过去主要依赖欧洲卫星，近年来国内商业航天发展迅速，有望在 3 至 5 年内拥有百颗以上小卫星，但也不能忽视对卫星质量的提升，同时开展多元跨数据融合。在未来，我们有望建立全球首个小时级的城市安全监测星座体系，可覆盖全国 99%以上的国土面积，也可以面向其他国家提供服务。

目前，我们团队已针对房屋、桥梁、道路、堤坝等六类建筑建立表征关系并编制标准；在广州完成约 7000 平方公里的房屋筛查，并从单一场景拓展到多重外部风险源监测，在北京、深圳等地开展应用。

高精度的感知监测能力犹如城市水安全的“慧眼”。“慧眼”和研判预警的“大脑”以及应急处置的“巧手”三者协同配合，才能推动我国城市水安全保障走向成熟。

（作者系中国工程院院士、北京科技大学城镇化与城市安全研究院院长。本报见习记者赵婉婷根据其在第五届水安全与可持续发展国际会议上的发言整理）

法国报告首例人类感染沙蒙达病毒病例

寰球眼

本报讯 近日，法国卫生部门发布公报称，该国发现全球首例有正式记录的沙蒙达病毒人类感染病例，患者已于本月初死亡。早在今年 7 月，欧洲就首次发现了牲畜中暴发沙蒙达病毒疫情。

据《自然》报道，上周发表在《欧洲监测》的一份病例报告显示，这名 60 多岁的男子于 10 月 9 日去世，此前 16 天他开始出现包括视力丧失、意识模糊在内的神经系统症状。该男子居住在法国奥弗涅－罗讷－阿尔卑斯大区的农村。该地区曾发现牛群感染沙蒙达病毒。报告称，他很可能是被蠓叮咬后感染的。报告作者表示，这名男子还可能通过食用受污染的食物、输血或者器官移植感染了该病毒，不过后两个途径的可能性较小。传染病研究人员表示，人们目前对这种病毒及其对人体的影响知之甚少。

澳大利亚昆士兰大学的传染病研究员 Krispin Hajkowicz 表示，沙蒙达病毒属于正布尼亚病毒属，通过蚊子和蠓传播，已知会感染牛和鹿等动物。Hajkowicz 说，目前尚无针对正布尼亚病毒的疫苗或抗病毒治疗方法。

澳大利亚昆士兰医学研究院的病毒学家 Daniel Rawle 表示，在人类身上检测到的正布尼亚病毒数量正在增加。气候变化以及野生动物、家畜与人类之间更频繁的接触，是导致人类感染风险增加的部分原因。另一个原因是免疫功能低下的人日益增多。这类人感染病毒的风险更高、更可能出现危及生命的症状。

此次被感染的法国男子患有白血病，免疫功能严重低下，在出现症状后不久便癫痫发作并陷入昏迷，需要插管和机械通气。在接受抗生素、抗病毒药物和大剂量皮质类固醇治疗后，症状未能改善。研究人员表示，该男子免疫功能低下可能是导致其病情严重的原因之一。免疫系统受抑制可能使病毒在体内持续存在，这意味着病毒更有机会穿过血脑屏障，感染大脑并引发致命炎症。该男子的脑、肝、脾尸检样本病毒载量都很高。

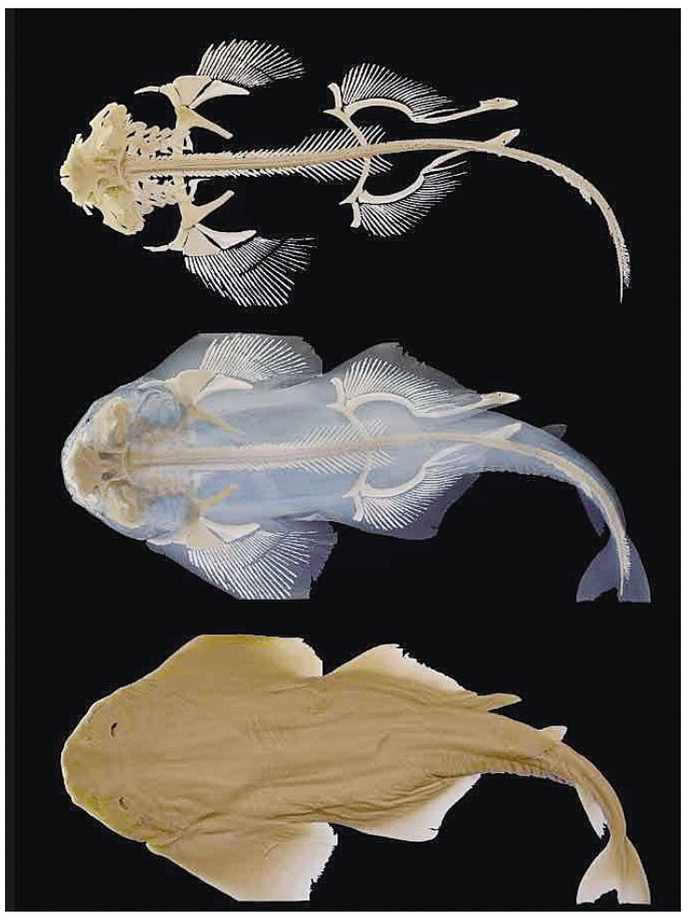
常规血液检测无法检测出沙蒙达病毒，临床医生必须对样本中的所有 RNA 和 DNA 进行测序。该病毒在该男子的脑脊液中被检出，其基因组与从动物体内分离出的沙蒙达病毒基因组高度匹配。该男子的病毒有 5 处基因变异，这些变异在其他动物序列中均未发现，目前尚不清楚这些突变是否会增强该病毒对人类的传染性。尽管目前尚未记录到这些病毒有人传人迹象，但 2024 年巴西暴发正布尼亚病毒（奥罗普切病毒）疫情期间，曾有病毒在孕妇与胎儿之间传播的报道。　**（文乐乐）**

相关论文信息：*https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2026.31.42.2600883*

今年 7 月，欧洲首次发现牛群中暴发了沙蒙达病毒疫情。

图片来源：Charly Triballeau

给鲨鱼做一份『三维说明书』



鲨鱼是现生有颌脊椎动物中形态与生态高度多样化的类群，其头部、颌部、鳍和躯干结构随生态生活方式发生显著分化，为研究脊椎动物摄食、运动和环境适应机制提供了重要材料。

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员卢静团队正式发布“数字鲨鱼图谱”，通过建立一套覆盖现生鲨鱼主要演化支系、基于 CT 扫描与三维解剖重建的开放共享三维解剖数据集，为鲨鱼比较解剖、功能形态学、生物力学、演化发育以及仿生学研究提供系统的三维解剖数据资源。相关研究成果近日发表于《科学数据》。

研究团队基于 X 射线计算机断层扫描数据，对现生鲨鱼开展了系统的三维解剖重建，通过大规模人工精细分割和标准化解剖标注，建立了开放获取的“数字鲨鱼图谱”。该数据集收录了 117 件鲨鱼标本，涵盖 72 个物种、25 个科，覆盖现生鲨鱼全部 9 个目。其中，115 件标本完成了全身三维重建，2 件完成了头部三维重建，为鲨鱼跨类群形态比较、演化及功能形态学研究提供了系统的数字解剖资源。图为可视化扁鲨三维数字解剖模型。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1038/s41597-026-08418-2*

本报见习记者蒲雅杰报道

研究团队供图