卷首语

守望空间环境,赓续人类文明



王赤

中国科学院院士

现任中国科学院国家空间科学中心主任,子午工程二期总指挥、IMCP计划首席科学家、中欧联合“微笑计划”卫星中方首席科学家。

1957年苏联成功发射第一个人造卫星,标志着人类进入空间时代。继陆地、海洋和大气之后,日地空间成为与人类生存和发展息息相关的第四环境。

20世纪90年代以来,随着人类越来越依赖于空间高技术系统,类比地球天气的概念,空间物理界提出了“空间天气”概念,特指太阳活动引发的近地空间环境短时剧变现象,表现为地磁暴、极光等现象。它不仅干扰航天器运行与通信导航,更危及电力系统等地面基础设施,危害人类生活或健康,关乎载人航天与空间探索的成败。

灾害性空间天气已成为现代科技系统的“隐形杀手”。得益于新媒体的传播,这一现象日益为各界和社会所熟悉。早在1859年9月(清朝咸丰九年),人类就记录了“卡林顿事件”。这是人类有仪器记录以来最强的地磁暴,它使得北美和欧洲电报系统瘫痪、极光蔓延至热带纬度。彼时,中国河北《栾城县志》亦载:“秋八月癸卯夜,赤气起于西北,亘于东北,平明始灭”。

当今社会,空间环境影响如影随行。1989年3月的G5级(峰值K_p=9)地磁暴重创魁北克电网,令600万人深陷9小时寒夜,美国新泽西州一座核电站的巨型升压变压器永久损坏。2022年2月的一次普通的G1级地磁暴(K_p=5)竟导致美国太空探索公司(SpaceX)发射至初始极低轨道(210 km)的49颗星链卫星中的80%因大气阻力过大而提前陨落。进入21世纪,随着自动驾驶、低轨星座的发展,空间天气已从“小众威胁”演变为关乎国计民生的系统性风险。

空间环境更是当代科学研究“四极”——向极宏观拓展、向极微观深入、向极端条件迈进、向极综合交叉发力——交汇的天然实验室。太空时代前夕,赫斯(Victor F. Hess)因发现宇宙线实证“太空并非虚空”,阿普尔顿(Edward V. Appleton)因证实电离层F层划定了地球的电磁边界,二人分别于1936年和1947年获得诺贝尔物理学奖。而将空间电动力学构建为可计算的物理体系的,是1970年诺贝尔物理学奖得主阿尔文(H. Alfvén),他创立的磁流体力学(magneto-hydrodynamics, MHD)深刻揭示:日地空间绝非一幅静态平衡的图景,而是一片宏观框架虽立、但非线性串级过程亟待揭示的科学疆域。

空间环境更是当代科学研究“四极”——向极宏观拓展、向极微观深入、向极端条件迈进、向极综合交叉发力——交汇的天然实验室。

实际上,认知空间环境的挑战正源于其时空尺度的极端跨度与多要素耦合的复杂性:时间上横跨太阳耀斑分秒级爆发、磁层亚暴小时级释能,到太阳活动周的11年的长周期调制;空间上纵贯数千万千米级的日冕物质抛射(coronal mass ejection,CME)/太阳风结构,穿透数万千米级的磁层顶(~10R_E),直抵无碰撞等离子体中百千米级的离子惯

中国科学院国家空间科学中心,
北京 100190

性长度(d_i)尺度。此外,空间环境还串联起了日冕-行星际-地球磁层(完全电离)、电离层(部分电离)、热层/中高层大气(中性为主)和岩石圈的耦合。上述科学挑战,使日地系统的物理建模与空间天气预报至今仍是空间科学和国家太空安全亟待突破的制高点。

面对空间环境科学未知和空间发展应用需求双重驱动的挑战,中国科学家凭借敏锐的科学洞察,创新性提出利用空间环境扰动沿地球经线(即子午线)从极区向中低纬传播的特性布设系列台站,借助地球自转对空间环境实现了"CT式"全天扫描。至2025年3月,建成了首个网络式国家重大科技基础设施——空间环境地基综合监测网(子午工程)。子午工程通过一期和二期的建设,形成了沿东经100°和120°、北纬30°和40°两纵两横式布局的31个台站、282台设备的综合监测体系,其提供的多要素、长时序、全覆盖地基监测数据,为构建"物理约束+AI赋能"的新一代空间天气数智大模型提供了不可替代的数据底座;其"一链三网四聚焦"的基本架构,具备对日地空间进行端对端的连续监测和对地球空间环境的多圈层立体探测研究能力,成为国际上覆盖范围最广、监测要素最全、综合能力最强的空间环境地基综合监测网。这项由中国科学家提出并建成的空间环境监测体系,其部署规模之大、监测能力之强实现了中国在该领域从落后到领跑世界的历史性跨越。

子午工程是高水平科技自立自强的新时代样本。子午工程二期的关键技术国产化率达90%,多项大型监测设施性能全球领先。包括但不限于全球规模最大的稻城亚丁圆环阵太阳射电成像望远镜、信号灵敏度是同类设备的100~200倍的国际首台全季节观测阵列式大口径激光雷达、全球探测能力最强的三亚相控阵三站式非相干散射雷达、太阳风三维结构反演能力国际领先的行星际闪烁射电望远镜等。它们既为子午工程高质量运行和发展奠定了重要基础,也为强化建制化基础研究、持续取得原创突破创造了先机。科研团队发现并命名的"太空台风"入选《自然》杂志的研究亮点;首次发现并命名的一种新型太阳射电暴频谱精细结构"珠状条链"入选《中国科学》杂志的研究亮点;首次清晰刻画的2024年5月特大地磁暴期间从磁层能量注入、热层成分变化到电离层极端响应的完整因果链条发表于《国家科学评论》。这些成果,聚焦子午工程监测传输过程、揭示区域特征、研究圈层耦合3大科学目标,凸显了中国科研团队"勇闯无人区"的自信,有望引领太阳活动-日地传输-对地影响的全过程研究。

空间天气是全球性现象,是全人类面临的共同挑战。当前,中国正在牵头发起国际子午圈大科学计划(International Meridian Circle Program,IMCP计划),以子午工程为基础,建立地球唯一、陆地最完整的东经120°+西经60°子午圈,增设东经30°欧非链填补非洲区域空白,旨在"构建日地系统全球监测链,解码空间天气过程与规律"。IMCP计划通过开展创新研究、组织协同监测、推进数据共享和构建合作平台,未来有望吸纳逾200个机构/团队及国际组织参与,汇聚全球超5000名科学家协作,为"合理开发和利用空间资源,保护空间环境,推动航天事业造福全人类"提供中国方案。

适逢"十五五"开局之年,子午工程与IMCP计划正成为构建自主可控、天地一体化空间天气监测、研究、预报和保障体系的核心基石。它们与中国天基力量互为支撑、协同发力——从"羲和号"太阳Hα光谱探测与双超平台科学技术试验卫星、"夸父一号"先进天基太阳天文台(ASO-S)、澳门科学一号卫星、中欧联合"微笑计划"太阳风—磁层相互作用全景成像卫星(SMILE)等科学卫星,到风云系列在轨业务卫星(FY-2G/H, FY-3D/E/F/G/H, FY-4A/B/C)等搭载的空间天气专用载荷与监测包,天地协同共同织就覆盖太阳、行星际、磁层与电离层的观测网络。

应对空间天气挑战,从探索未知、保障安全,到赋能经济、赓续文明,我们任重道远,行则将至。