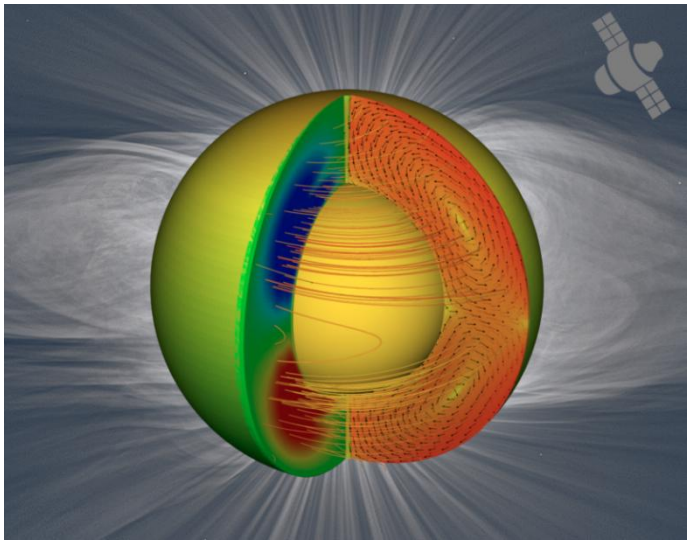
探索太阳极区

太阳最后的伟大前沿



主要作者：Dibyendu Nandy[1*]

合著者：Dipankar Banerjee、Prantika Bhowmik[2]，Allan Sacha Brun[3]，Robert H. Cameron[4]，S. E. Gibson[5]，Shravan Hanasoge[6]，Louise Harra[7]，Donald M. Hassler[8]，Rekha Jain[9]，Jie Jiang[10]，Laurène Jouve[11]，Duncan H. Mackay[12]，Sushant S. Mahajan[13]，Cristina H. Mandrini[14]，Mathew Owens[15]，Shaonwita Pal[1]，Rui F Pinto[3,11]，Chitradeep Saha[1]，Xudong Sun[16]，Durgesh Tripathi[17]，Ilya G. Usoskin[18]

[1*]印度空间科学卓越中心，印度科学教育与研究学院加尔各答分校，印度，[2]阿耶波多观测科学研究所，印度，[3]杜伦大学数学科学系，英国，[4]天体物理学系/AIM，巴黎大学及巴黎-萨克雷，法国，[5]马克斯·普朗克太阳系研究所，德国，[6]美国国家大气研究中心/高空观测站，美国，[7]塔塔基础研究所，印度，[8]达沃斯物理气象观测站/世界辐射中心，瑞士，[9]西南研究院，美国博尔德，[10]谢菲尔德大学数学与统计学院，英国，[11]北京航空航天大学空间与环境学院，中国北京，[12]IRAP，图卢兹大学，法国，[13]圣安德鲁斯大学，英国，[14]斯坦福大学W. W. Hansen实验物理实验室，美国加利福尼亚州斯坦福，[15]天文学与空间物理研究所，阿根廷布宜诺斯艾利斯，[16]雷丁大学气象学系，[17]夏威夷大学马诺阿分校天文学研究所，[18]印度天文学与天体物理学大学中心，印度，[19]奥卢大学，芬兰

提交美国国家科学院《太阳与空间物理学十年调查 2024—2033年》审议的白皮书

内容提要

尽管全球各界投入资源建设了多座太阳观测站和地面太阳观测站，太阳极区仍是一片未曾探索的领域——也是太阳观测的最后一片广阔前沿。突破这一前沿，是理解太阳活动周的关键；太阳活动周是短期至长期太阳活动的根本驱动因素，涵盖空间天气和空间气候。磁流体发电机模型及经观测证实的经验关系表明，极区磁场是决定未来太阳活动周振幅的首要因素。倾斜活动区的太阳表面演化模型显示，中高纬度的磁通量涌动支配着导致极区磁场反转与增强的动力学过程。我们对这种高纬度磁场动力学和等离子体流的理论认识及数值模型——它们是太阳黑子周期的关键组成部分——缺乏精确的观测约束；目前，由于我们位于黄道面上，观测受到严重投影效应的限制。这一局限削弱了我们观测神秘的千高斯极区磁通斑，以及定量约束高纬度极区磁场分布的能力。进而，缺少这些观测也妨碍我们理解高纬度磁场如何驱动极区喷流、羽流和快速太阳风；这些现象延伸至日球层边界，并调节太阳系内的太阳开放磁通量和宇宙射线通量。因此，准确观测太阳极区是日球物理学面临的最重大挑战。单独开展太阳极区探测任务，或将其与内日球层多视角观测相结合，都有望像其他任务概念从未做到的那样，彻底改变日球物理学领域——其影响将跨越从太阳内部到日球层的不同空间尺度。本白皮书阐述了开展太阳极区新型黄道外观测的科学依据，并主张将其与现有或未来的多视角日球层观测站相结合。

全景概览

太阳—恒星磁活动的起源可追溯至其内部运行的磁流体动力学（MHD）发电机机制。在这一机制中，等离子体流与磁场通过复杂过程相互作用，产生大尺度磁场（Charbonneau 2020；Brun 等，2015）。由太阳发电机产生的磁活动区从太阳表面涌现（Jouve、Brun 和 Aulanier 2018），进入太阳外层大气；后续的动力学相互作用往往会引发太阳耀斑和日冕物质抛射（CME）等高能瞬变事件——从而造成严重的空间天气（Schrijver 2015）。太阳表面磁场的涌现和演化由近表面磁通输运过程调节，导致表面磁场重新分布，而这些磁场决定了大尺度太阳日冕的结构

和动力学。太阳风由此产生，并传播至整个日球层。表面磁场所调节的开放磁通量演化与湍流太阳风输运共同作用，调制开放磁通量，进而影响日球层中的宇宙射线通量；这些因素共同构成地球等太阳系行星所处的背景空间环境，而太阳磁暴则会对其造成瞬变扰动，影响空间天气。理解并预测空间天气，对于保护我们的空间资产至关重要（Schrijver 2015，Daglis 等，2021）。揭示长期太阳磁活动变化（Usoskin 2017）及其对行星磁层—大气系统的影响，对于认识太阳系及其他恒星系（系外）行星系统中的空间气候和行星宜居性具有深远意义（Nandy 等，2021）。

过去几十年间，尽管这一领域取得了诸多进展，但由此积累的知识也暴露出关键不足；其中最突出的是，我们无法通过观测对太阳极区的磁场相关动力学及其磁通量含量加以约束并全面理解——它的影响超越了太阳内部、大气层以及日球层中的各种过程（Petrie 2015）。 值得指出的是，人类从未能够常规地对任何恒星的极区磁场进行空间分辨的精确观测。太阳轨道器任务朝这个方向迈出了半步，但这还远远不够。下文将阐述一次前往太阳极区的探测任务，并聚焦于这项任务可能带来的变革性认识；我们也深知，届时或许会有如今甚至无法预料的新发现与惊喜。

太阳极区磁场与太阳黑子周期预测

尽管太阳活动周决定了严重空间天气事件的发生概率，以及行星环境的十年尺度驱动，但预测未来的活动周一直是一项重大挑战（Petrovay 2018）。对近期进展的分析表明，活动周极小期的极区磁场是预测未来太阳活动周振幅的最佳指标；基于巴布科克–莱顿机制的物理发电机模型也已趋于一致，认为第25太阳活动周的强度将弱至中等（Nandy 2021）。巴布科克–莱顿机制涉及活动区（倾斜的双极黑子对）的涌现，以及随后通过子午环流、湍流扩散和泵吸等近表面等离子体输运过程，使相反极性的磁通量衰减、散布并在大尺度上分离（Jiang et al. 2014）。解析理论表明，表面磁场是内部发电机的主要驱动因素（Cameron 和 Schüssler，2015）。尤其是，跨赤道抵消以及来自活动纬度、向中高纬度推进的磁通涌（图1d–e中可见），是决定太阳极区磁场振幅的主要因素。反过来，太阳极区磁场

在太阳活动极小期的分布（决定偶极矩）是未来太阳活动周振幅的主要贡献因素。这些动力学目前仍缺乏观测的充分约束。

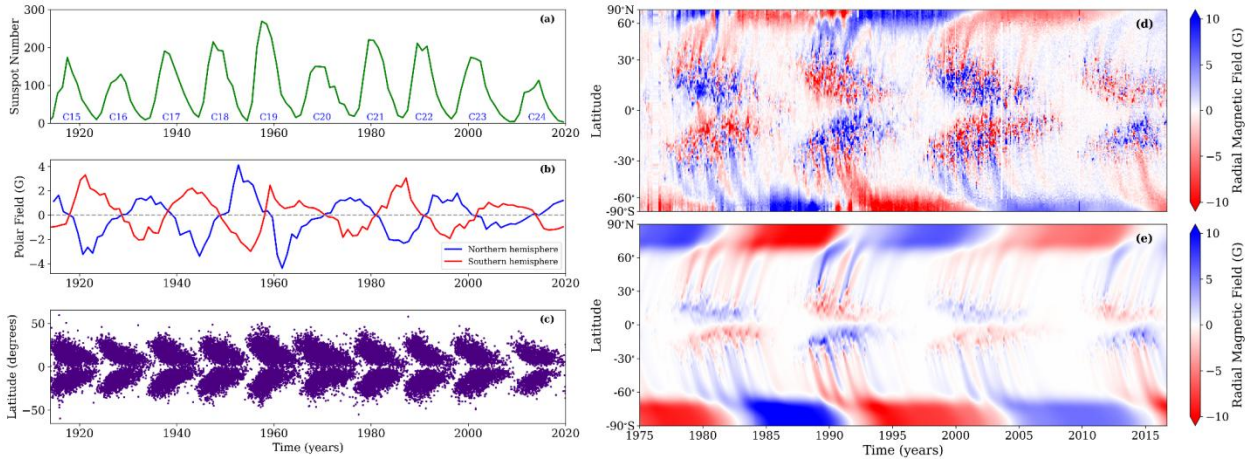


图 1：左侧：上图显示过去一个世纪观测到的太阳黑子数时间序列，中图显示根据极区光斑数据和威尔科克斯太阳天文台数据重建的半球极区磁场变化（蓝色：北半球，红色：南半球），下图为太阳蝴蝶图。右侧：上图显示太阳表面径向磁场的观测演变（根据基特峰真空望远镜（KPVT）、米歇尔逊多普勒成像仪（MDI）和日震与磁成像仪（HMI）的观测数据获取），下图则显示由数据驱动的太阳表面磁通输运模型模拟的径向磁场演变（Bhowmik 和 Nandy 2018）。左图清楚地说明，太阳黑子周期开始前的极区磁场强度决定了该周期的强度。右图揭示了从中高纬度传播而来的磁通量“舌状结构”（涌流）在太阳极区磁场反转和建立过程中的作用。

我们无法直接观测极区磁场及其相关偶极矩的变化，因此必须依赖极区光斑等替代指标，来验证预测性表面磁通量输运模型和发电机模型。更棘手的是，当前对极区磁场的观测受到严重投影效应的影响。图2简洁地展示了从能够直接观测太阳两极的位置可以观测到什么，并将其与从黄道面看到的受限视野进行了比较。

总而言之，能够从黄道面上方或下方至少60度处对磁场成像的极区探测任务，可带来关于高纬度磁场动力学的突破性信息，并约束极区磁场

前所未有的分布，从而验证磁场演化模型，并准确预测太阳黑子周期。

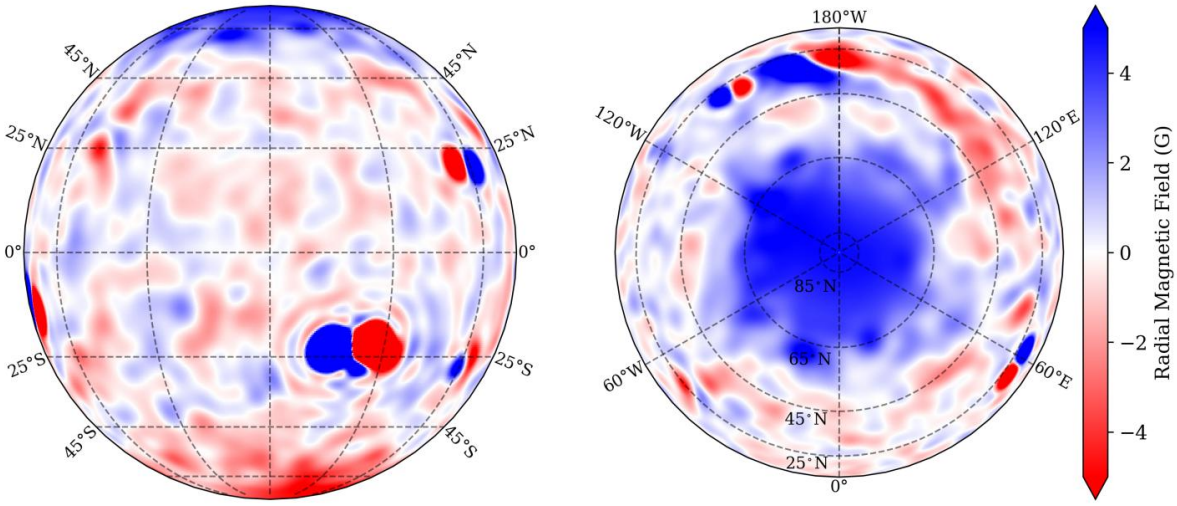


图2：左：太阳表面磁场演化模型所呈现的磁场表面分布快照，视角接近黄道面（未考虑太阳倾角）。右：从太阳北极上方观察的对应视角，展现了低纬度视角所遗漏的极冠细节。能够航行至黄道面上方（或下方）至少60度的任务，将揭示这些细节，约束高纬度动力学，并准确测量两极的等离子体流和磁场分布；这些因素决定太阳活动，并驱动快速太阳风。

高纬度太阳等离子体流的约束

在近表层的高β等离子体区域以及对流区内，等离子体流驱动磁场动力学。在极区，这些流动仍缺乏充分约束；高纬度测量表面速度场有望弥补这一不足（Löptien等，2015）。尤其是，多普勒图数据将使我们能够运用日震学方法（Christensen-Dalsgaard，2002；Gizon和Birch，2005）推断太阳内部结构和动力学。子午环流–在决定大尺度太阳发电机作用和磁性的时间尺度与振幅方面发挥着关键作用（Rempel 2006；Hanasoge，2022），但其在极区的情况仍缺乏充分约束。通过对不受投影效应影响的观测应用磁特征追踪技术（Mahajan等，2021），有望大幅改进极冠附近的流动测量，包括测定子午环流延伸至极区的范围。将此类高纬度观测与日震与磁成像仪（HMI）等现有天文台的数据结合使用，可对极区经向流做出明确约束。此类

这些测量使人们有可能以更高的保真度，对更深层的等离子体流进行（立体）日震成像；人们认为，子午流的深层分量在太阳黑子的赤道向传播和出现纬度方面发挥着关键作用（Nandy和Choudhuri，2002年），但其结构和变化仍未得到充分约束。太阳内部自转测量——这是日震学最重大的成功之一——在极区附近噪声很大。

高纬度流、极区涡旋及其伴随的弱自转，以及太阳表层以下自转可能存在显著变化的迹象，都是极区观测能够解决的重要问题；这些关于极区自转和子午环流的新约束，可为维持太阳发电机作用的流场与磁场之间的相互作用提供有力约束。

揭开千高斯极区磁通斑之谜

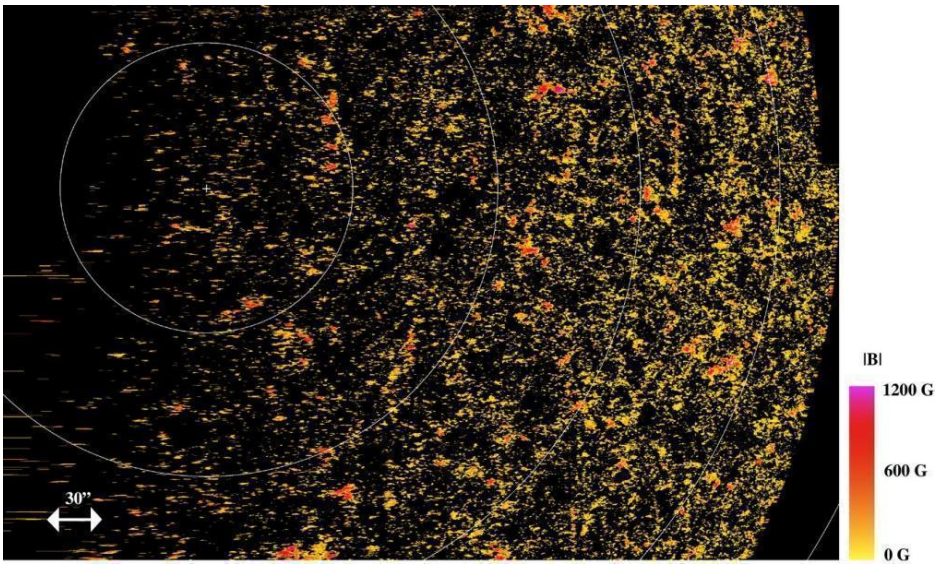


图3：日出号太阳光学望远镜于2007年9月25日拍摄的太阳北极附近单极性千高斯磁通斑块观测图（据Ito等，2010年）。视场覆盖北极冠20度的范围。

日出号太阳光学望远镜（SOT）的观测揭示，太阳高纬度区域存在强烈的小尺度千高斯磁通斑块，它们常与大尺度极冠共存，且极性相同（Tsuneta等，2008年；Ito等，2010年；图3中的红色区域）。极区的这些单极性磁通斑块似乎不同于宁静太阳中的小尺度混合极性磁通斑块；研究者认为，它们能够维持太阳日冕中的开放磁力线，从而为快速太阳风提供能量。这些单极性

磁通斑块对极冠的整体磁通量含量有显著贡献，因此可能参与发电机机制，将极向磁场分量转化为下一太阳活动周的环向磁场分量。这些强烈的磁通集中区也与太阳开放磁通量问题有关（Linker 等人，2017年；Wang 等人，2022年），即预期的开放磁通量与观测到的开放磁通量不符。极区千高斯磁通斑块的起源、它们的磁通量含量在太阳活动周中的演化，以及它们与导致极区磁场增强和反转的磁场高纬传播之间的关系，目前仍未得到充分理解。

在太阳活动周不同阶段开展高纬观测，测量磁场和流动，对于揭开这些极区千高斯磁通斑块起源之谜至关重要；结合对太阳风的原位特性测量–，还可确定它们是否是极区快速太阳风的起源基础。

极区大气动力学：喷流、羽流与风

太阳两极通常具有日冕洞、开放的太阳磁力线、强烈的千高斯磁通管、极区羽流和喷流（Hanaoka 等人，2018年），有时还会出现伪流线。极区普遍存在的开放日冕磁力线，是阿尔芬波（湍流耗散）介导太阳风加速的理想通道（Hassler 等人，1999年；Krishna Prasad、Banerjee 和 Gupta，2011年；Morton、Tomczyk 和 Pinto，2015年）。太阳活动周不同阶段及极小期的太阳极区磁场强度，会影响开放和闭合磁力线的边界以及大尺度流线的倾斜度（Dash 等人，2019年）。近期研究结果暗示，日冕洞中的互换重联可能为太阳风提供动力；然而，要证实这一点，需要测量极区磁场（Tripathi、Nived 和 Solanki，2021年；Upendran 和 Tripathi，2022年）。所有这些极区现象都参与了快速太阳风的加速和整体结构形成，并在日球层和近地空间天气中留下印记（Cranmer、Gibson 和 Riley，2017年）。

通过一项旨在多次飞越太阳极区的黄道面外空间任务概念，充分约束太阳活动周期间极区磁场的分布及瞬变现象——将提升我们评估和预测全球太阳风大尺度结构及其对日球层和空间天气影响的能力，并凸显贯穿太阳内部直至日球层最远端的磁连接。

总结与建议

美国国家航空航天局计划：要开展此处提出的新颖科学研究，需要实施空间任务；根据计划采用单视角还是多视角任务概念，任务规模可为中型至大型。我们认为，采取审慎的做法是先开展一项概念验证性质的单视角任务，以较短的筹备周期，在下一次太阳活动极小期前的高纬度动力学阶段（即2026—2032年）从黄道面以上至少60度的位置，对极区和太阳大气的磁场进行成像；任务名义寿命为5至10年（例如 Hassler 等人于2022年撰写的白皮书）。与此同时，在积累了该任务的经验后，可进一步探索多视角任务概念，以约束内日球层中的太阳活动和原位空间环境。

美国国家科学基金会计划：对现有地面和空间观测开展理论研究、数值模拟和数据分析，直接促进对涵盖太阳内部、太阳大气以及太阳系行星空间环境的物理过程进行整体性理解，并着眼于确立因果关系；这些都是做好全体科研群体准备、确保未来空间任务最终成功的必要要素。我们认为，由美国国家科学基金会支持的中等规模研究基础设施与创新计划，对于补充任何美国国家航空航天局空间任务都至关重要。具体而言，我们建议支持大型团队或中心，汇聚并整合美国及全球的专业力量，开发理论、建模和数据分析工具，从而补充并推动实现本白皮书所设想的、位于黄道面外且具备多视角观测能力的空间任务所带来的变革性科学成果。

日球层的全球协同多视角观测：我们注意到，现有任务（如帕克太阳探测器、太阳轨道飞行器、太阳动力学观测台、ACE、WIND、DSCOVR）以及即将开展的任务（如中国国家航天局先进太阳天文台、印度空间研究组织的 Aditya-L1 和欧洲空间局的 Vigil）有望与新型太阳极区探测任务相结合，实现全球协同观测。我们建议充分利用这一机遇，建立各任务团队间的数据交换机制，并借助跨国建模和数据分析专长。这种协同可能推动更宏大的多机构国际计划，通过部署多艘航天器覆盖日球层的整个 4π 球面度（例如，Raouafi 等人 2022 年的白皮书），开展日球物理学的全系统探索；这类计划对任何单一国家而言都可能费用高昂。这应当成为全人类的终极目标：共同理解我们共享和利用的太空，并以此指导我们探索地球之外的其他世界。

参考资料

Bhowmik, P. 和 Nandy, D. 2018年, 《自然·通讯》9, 5209https://doi.org/10.1038/s41467-018-07690-0Brun, A.S. 等 2015年, 《空间科学评论》196, 303https://doi.org/10.1007/s11214-014-0117-8Cameron, R. 和 Schüssler, M. 2015年, 《科学》347, 1333https://doi.org/10.1126/science.1261470Charbonneau, P. 2020年, 《太阳物理学生活评论》17, 4https://doi.org/10.1007/s41116-020-00025-6Christensen-Dalsgaard, J. 2002年, 《现代物理学评论》74, 1073https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.1073Cranmer, S.R.、Gibson, S.E. 和 Riley, P. 2017年, 《空间科学评论》212, 1345https://doi.org/10.1007/s11214-017-0416-yDaglis, I.A. 等 2021年, 《地球物理年刊》39, 1013https://doi.org/10.5194/angeo-39-1013-2021Dash, S. 等 2019年, 《天体物理学杂志》890, 37https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab6a91Gizon, L. 和 Birch, A. C. 2005年, 《太阳物理学生活评论》2, 6https://doi.org/10.12942/lrsp-2005-6Hanaoka, Y. 等 2018年, 《天体物理学杂志》860, 142https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac49bHanasoge, S. M. 2022年, 《太阳物理学生活评论》19, 3https://doi.org/10.1007/s41116-022-00034-7Hassler, D.M. 等 1999年, 《科学》283, 5403https://doi.org/10.1126/science.283.5403.810Hassler, D.M. 等 2022年, 关于Solaris任务的白皮书SSP十年调查 2024—2033年, 美国国家科学院Ito, H. 等 2010年, 《天体物理学杂志》719, 131https://doi.org/10.1088/0004-637X/719/1/131Jiang, J. 等 2014年, 《空间科学评论》186, 491https://doi.org/10.1007/s11214-014-0083-1Jouve, L、Brun, A.S.、Aulanier, G. 2018年, 《天体物理学杂志》857, 83https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab5b6Krishna Prasad, S.、Banerjee, D. 和 Gupta, G. 2011年, 《天文学与天体物理学》528, 4https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016405Linker, J.A. 等 2017年, 《天体物理学杂志》848, 70https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8a70Löptien, B. 等 2015年, 《空间科学评论》196, 251https://doi.org/10.1007/s11214-014-0065-3

Mahajan, S.S. 等，2021年，《天体物理学杂志》，917，100https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0a80Morton, R.、Tomczyk, S. 和 Pinto, R.，2015年，《自然·通讯》6，7813https://doi.org/10.1038/ncomms8813Nandy, D.，2021年，《太阳物理学》，296，54https://doi.org/10.1007/s11207-021-01797-2Nandy, D. 等，2021年，《地球与行星科学进展》，8，1https://doi.org/10.1186/s40645-021-00430-xNandy, D. 和 Choudhuri, A.R.，2002年，《科学》296，1671https://doi.org/10.1126/science.1070955Petrie, G.J.D.，2015年，《太阳物理学生活评论》，12，5https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-5Petrovay, K.，2020年，《太阳物理学生活评论》，17，2 https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z Raouafi, N.E. 等，2022年，关于萤火虫任务的白皮书SSP十年调查 2024—2033年，美国国家科学院 Rempel, M.，2006年，《天体物理学杂志》，647，662 https://doi.org/10.1086/498440 Schrijver, C.J. 等，2015年，《空间研究进展》，55，2745 https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023 Tripathi, D.、Nived, V. N. 和 Solanki, S. K.，2021年，《天体物理学杂志》，908，28 https://doi.org/10.3847/1538-4357/abcc6b Tsuneta, S. 等，2008年，《天体物理学杂志》，668，1374 https://doi.org/10.1086/592226 Upendran, V. 和 Tripathi, D.，2022年，《天体物理学杂志》，926，138 https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac3d88 Usoskin, I.G.，2017年，《太阳物理学生活评论》，14，3 https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9 Wang, Y.-M. 等，2022年，《天体物理学杂志》，926，113 https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4491