

太阳极轨天文台

邓元勇^{1,9*}, 周桂萍^{1,9*}, 代树武³, 王颖³, 冯学尚⁴, 何建森⁵, 姜杰⁶, 田晖⁵, 杨尚斌^{1,9}, 侯俊峰^{1,9}, 颜毅华^{4,9}, 甘为群⁷, 白先勇^{1,9}, 李乐平^{1,9}, 夏利东⁸, 黎辉⁷, 苏杨⁷, 熊明⁴, 张也弛³, 朱成林³, 林佳本^{1,9}, 章海鹰¹⁰, 陈波¹¹, 何玲平¹¹, 封莉⁷, 张红鑫¹¹, 孙明哲⁸, 张爱兵^{4,9}, 陈林杰^{4,9}, 谭宝林^{1,9}, 张哲⁷, 杨建峰¹², 杨孟飞², 汪景琇^{1,9}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;
2. 中国空间技术研究院, 北京 100094;
3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
4. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;
5. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
6. 北京航空航天大学空间与环境学院, 北京 102206;
7. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;
8. 山东大学(威海)空间科学与物理学院, 威海 264209;
9. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;
10. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 南京 210042;
11. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
12. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119

* 联系人, E-mail: dyy@nao.cas.cn; gpzhou@nao.cas.cn

太阳是唯一可实现精细观测, 即高时空光谱分辨率、高偏振测量精度观测的恒星, 日地系统又是目前所知唯一具有智慧生命的恒星-行星系统. 太阳物理不仅是天文学中不可取代的基础学科, 也是关乎人类自身生存发展, 并可为探索宇宙其他生命系统提供引导的前沿交叉学科. 迄今为止, 人类对太阳的观测几乎覆盖全电磁波段, 但均局限在黄道面附近, 从未实现对极区的直接光谱和成像观测. 在黄道面斜视太阳极区, 由于投影效应造成不同极性磁场被挤压在一起而相互抵消, 同时太阳的临边昏暗效应降低了偏振观测灵敏度, 因此太阳的两极至今仍然是一个关键的未知区域. 作为太阳整体磁场的重要组成部分, 极区磁场和磁活动是主导太阳活动周起源的两大循环分量之一、高速太阳风的主要生产来源, 以及决定太阳系空间环境的重要因素, 长期以来一直是人类梦寐以求的科学探测目标.

太阳磁活动周起源是太阳物理中的主要谜团之一. 太阳磁场演化及其驱动磁活动是太阳系行星系统、行星际空间、太阳系及其与星际边界环境的重要决定因素, 而极区磁场及其动力学过程是表征太阳内部发电机和决定外部日球层磁场分布演化的关键^[1]. 《科学》杂志(*Science*)把太阳磁活动周的起源作为全世界最前沿的125个科学问题之一^[2]. 1955年, Babcock父子^[3]发现太阳的南北极区存在极性相反的弱磁场. 随着太阳黑子活动周期性演化^[4], 太阳南北极磁场极



邓元勇 中国科学院国家天文台研究员, 怀柔观测基地主任. 主要从事太阳物理研究和天文仪器的研制工作.



周桂萍 中国科学院国家天文台研究员, 太阳磁活动研究团组首席科学家. 主要从事太阳物理中日冕物质抛射源区和初发、小尺度磁场活动以及类太阳恒星活动等研究.

性平均每11年反转一次; 其极性反转过程相对缓慢, 呈现不连贯、南北不对称特征^[5]. 随后的研究发现极区具有强磁场

(图1),即使在严重投影效应影响下,极区仍被观测到强磁场结构,甚至达到千高斯量级的强度^[6-8]。太阳极区也呈现多种小尺度活动,诸如喷流、冕雨以及亮点结构等^[9]。极区小尺度磁流浮现,可能还标志着局地发电机过程^[10]。但严格地说,迄今为止,由于缺少极区磁场、速度场的正面常规成像观测,我们对太阳极区的磁场拓扑结构和动力学过程知之甚少,无法观测诊断极区在诸多科学问题如太阳周起源中的重要作用。因此,为了揭示太阳磁周期的成因,亟需对太阳高纬和极区的直接成像进行探测。

太阳系是目前唯一所知的宇宙空间生命孕育的摇篮。太阳风,尤其是高速太阳风,是联系太阳和太阳系行星系统的一个重要媒介,也对太阳系边界形成起主导作用。太阳风有效遮挡银河系高能宇宙射线,保护地球臭氧层,对促成地球上生命体的形成、防止生命体基因的损伤和变异等有重大意义。普遍认为,极区冕洞开放磁场是持续稳定高速太阳风的主要源区,冕洞面积和太阳风速度表现为线性关系^[11];而有研究认为,极区磁场通量可能只有1/3成为开放场(图2)^[8]。极区直接成像观测的缺失导致高速太阳风的起源成谜。高纬和极区上方的遥感和原位监测,结合对极区磁场分布、活动

规律和日冕结构等独特的观测视角,有望直接追踪高速太阳风的源头。对高速太阳风的研究不仅能推动太阳物理、日地空间环境和其他行星空间环境领域的研究,还有助于推动恒星物理基础研究获得进展。

极区成像和光谱观测的实现,结合黄道面附近的监测^[12],将使创建数据驱动的全地球磁流体力学模型成为可能,可为理解日球层整体结构、研究日球空间天气和气候学奠定基础。太阳活动周驱动日球层的结构和动力学过程是日地空间和太阳系空间天气与空间气候的主要驱动因素。研究太阳,不仅对认识恒星的结构和演化具有普遍意义,还对认识地外行星的宜居性具有极为重要的参考价值。美国国家科学院近期10年规划(2023~2032年)的三大科学主题之首就是理解恒星及其周围相关联的世界,理解生命的宜居性^[13]。太阳作为一颗恒星的研究,可进一步探索太阳系外天体和行星际空间如何相互作用,如何形成生命宜居的环境,如何寻找人类的宇宙邻居?

人类探索太阳极区的序幕早已开启。欧洲空间局(European Space Agency, ESA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于40多年前就

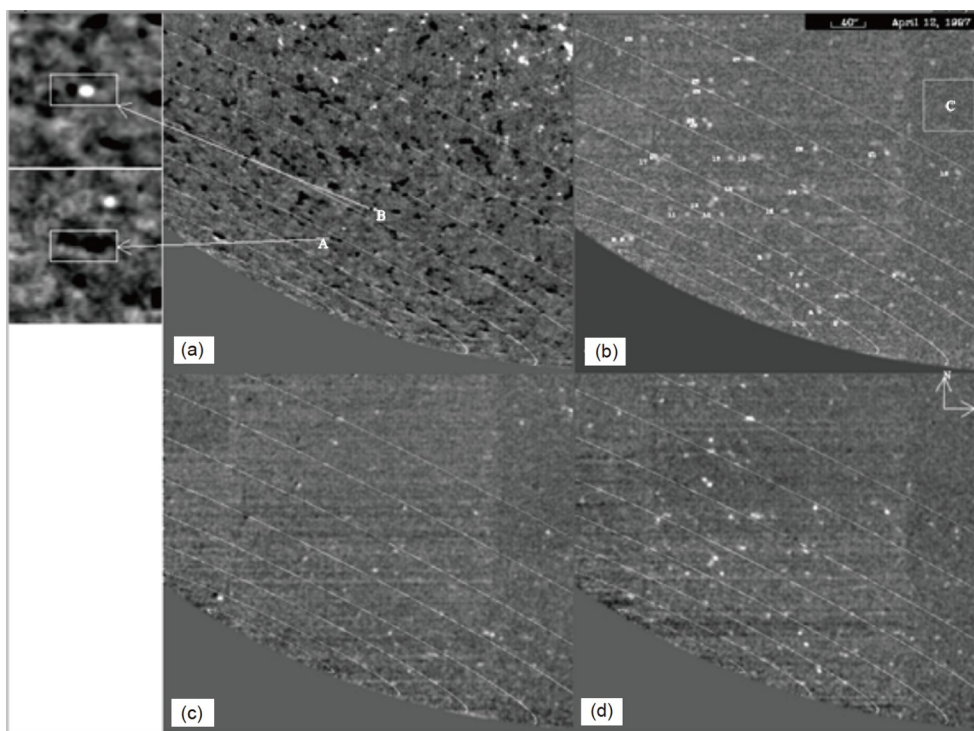


图1 太阳南极区偏振成像观测^[6]。纵向磁图(a)、横场强度(b)、线偏振的Q(c)和U(d)分量分布,视场为 $8.0' \times 7.0'$ 。斜线为日球坐标系中纬度线,间隔为 5° 。图(a)中“A”表示由投影效应导致的赝偶极磁结构,“B”处为真实偶极结构。图(b)中有28个具有强横场信号的磁元,区域“C”中平均横场强度被定为噪声标准。从图(c)和(d)可看到由仪器中湍动现象造成的周期性低噪声信号

Figure 1 The south polar region of the Sun observed by polarization imaging^[6]. The distributions of longitudinal magnetogram (a), transverse intensity (b), components of Q (c) and U (d) of linear polarization in the field of view of $8.0' \times 7.0'$, respectively. The slashes indicate the latitudes with an interval of 5° in the heliospheric coordinate system. The region “A” in (a) represents a pseudo magnetic dipole caused by the projection effect, and “B” denotes a real magnetic dipole. In (b), there are 28 magnetic elements with strong transverse field intensity. The average transverse intensity in the region “C” is calculated as the standard noise. In (c) and (d), periodic low noise signals can be seen owing to the turbulent activity from the instrument

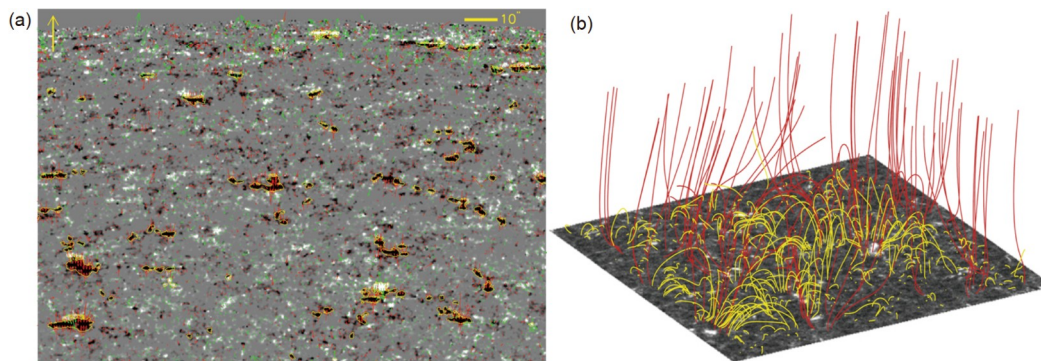


图2 太阳极区磁场^[8]. (a) Hinode观测的太阳极区纵向磁场叠加横场分布, 红绿箭头表示横场方向, 长度表示大小; (b) 线性无力场外推的极区磁结构叠加在纵向磁图上, 黄色和红色磁力线分别表示闭合和开放磁场结构

Figure 2 Magnetic fields in a solar polar region^[8]. (a) Magnetic distributions in a solar polar region observed by Hinode. It is a longitudinal magnetogram overlaid by the corresponding transverse intensity with red and green arrows indicating local directions, and lengths denoting magnitudes. (b) A solar polar region is covered by closed field (yellow) and open field (red) structures extrapolated by the linear force-free method

提出了太阳极轨计划^[14]. ESA于1990年发射的尤利西斯飞船(Ulysses, 1990~2009年), 是人类迄今为止实现的唯一一颗太阳极轨探测器, 其借助飞越木星来实现飞行轨道与黄道面成 80° 的高倾角, 距离太阳极区最近约1.34天文单位(日地距离, AU)^[15]. 其上携带的原位探测器能够测量太阳极区上方行星际太阳风粒子和磁场变化. 遗憾的是, 其没有携带成像探测设备. Ulysses飞船开创性探测到太阳极区和赤道地区的不同太阳风粒子与磁场环境. 2020年, 欧洲空间局成功发射太阳轨道飞行器(solar orbiter mission, SoLO)^[16], 携带10台探测器, 既可以直接探测太阳风, 也可以直接对太阳风的来源进行成像. 它在4.5年的常规任务阶段, 能实现偏离黄道面 25° 的探测, 在之后3.5年的延展任务阶段, 能实现偏离黄道面最多 34° 的探测, 但仅能持续数天. 因此, SoLO卫星终究还是仅能实现对太阳极区的斜视.

太阳极轨探测也是国内天文与空间科学数十年来一直努力推动的重大科学项目之一. 中国科学院国家空间科学中心在2004年前后提出的太阳极轨探测计划(Solar Polar Orbit Telescope, SPORT)^[17], 入选了中国科学院空间科学战略性先导科技专项的第一批空间科学背景型号项目. 它的飞行轨道采用类似于Ulysses飞船的大椭圆轨道, 轨道周期较长. 中国科学院国家天文台于2011年前后在《月球与深空探测》中也提出了太阳极轨探测项目^[18], 之后在中国科学院战略性先导科技专项的支持下, 完成了概念研究和预先研究; 同时, 在中国空间技术研究院自主创新项目、中国科学院科学培育项目等基金支持下完成了太阳极轨探测的科学目标凝练、任务分解、卫星工程方案初步设计、飞行器方案设计与优化、关键技术攻关、有效载荷方案设计等工作.

另外, 国际上还有一些规划中的太阳极区探测项目. 美国国家科学院2013年出版的*Solar and Space Physics: A Science for a Technological Society*规划中为NASA的项目规划建议了太阳极轨探测项目(Solar Polar Imager, SPI), 将以太

阳帆技术实现对太阳极区的探测. 在NASA的*Heliophysics Science and Technology Roadmap for 2014–2033*中, 也将SPI(考虑与欧洲合作, 也称为POLARIS, POLAR Investigation of the Sun)作为太阳极区探测项目. 直到2019年以后, Solaris作为POLARIS的探路者才获得NASA资金支持. Solaris卫星的飞行轨道将偏离黄道面 75° , 轨道半径约为1 AU, 且具有较低的椭圆偏心率(<0.2), 在每个轨道周期内, 能在高纬度区域持续观测一个月. 另外, 多名科学家联合提议的4 π 项目, 期待开展太阳全景探测, 其中3颗卫星在黄道面内观测, 1颗卫星为太阳极区探测, 但目前也只是处于概念阶段^[19].

太阳高倾角极轨计划的全新观测视角, 将极大推动我们对太阳和日球层的理解, 结合其他在轨太阳、日球层、磁层和电离层的观测设备, 将为日地物理学带来重大的突破机遇. 英国太阳物理学家Harra等人^[20]在欧洲空间局空间科学白皮书中详细阐述了太阳极区探索的重要性, 但至今国际上还没有在研的高纬极区探测规划. 此外, 极区卫星的发射可为中国的深空探测积累发射高技术水平轨道器的丰富经验, 满足国家战略需求, 同时使中国太阳物理和空间科学走在国际前列.

1 极轨探测的科学意义

1.1 首次正面成像观测太阳极区, 回答太阳活动周起源研究中的关键科学问题

太阳极区一直是黄道面轨道器监测的盲区, 正面观测将解决发展发电机理论的关键科学问题, 回答磁场如何由发电机过程产生, 并揭示其周期性变化的物理成因. 太阳高纬极区是太阳磁周期循环的关键环节, 极区磁场反转是22年太阳磁周期的重要特征. 太阳磁通量演化随纬度和自转速度变化, 具有复杂的动力学过程. 譬如, 一方面, 磁通量与旋转湍动对流区相互作用, 驱动磁通量汇聚, 并通过磁浮力形成太阳表

面活动区;另一方面,磁通量会被向极子午流拖曳到极区,并受到太阳自转的影响等;同时,磁通量原则上也不能无限制地在极区积累,应该有返回太阳赤道的内部回流,但迄今为止,对太阳内部的子午环流仍无清晰的物理图像^[21]。此外,我们对极向场的理解是否正确,极区磁场分布、强度如何,高纬径向环流、极区对流和极区涡旋是否存在等,目前仍然未知,这些都是理解太阳发电机原理必须回答的关键科学问题。太阳高纬极区轨道器能够成功监测太阳极区甚至背面的磁浮现,探测极区超强向极流动、汇聚和自转运动,诊断自转如何影响对流,极区磁浮现为何对复杂磁场结构有较好的预见性等,有望揭开太阳发电机过程的科学奥秘。

太阳极区和高纬监测将极大推动日震学发展,获得对太阳内部结构和太阳磁场性质的深入理解。日震学基于声波^[22],揭示发电机模型中关键因素太阳内部大尺度经圈环流和较差自转^[23,24]。这些流动的演化时间尺度非常长,并且随太阳周变化,对太阳大尺度磁场结构和动力学过程有很重要的探针作用。太阳极区的高纬速度场精确测量,使运用日震学诊断太阳极区内部动力学过程成为可能,由此得以诊断磁场反转、新太阳周开始和高速太阳风起源的物理机制等。结合中低纬磁场观测,日震学基于全球速度场的诊断,有望彻底改变对太阳对流区结构和动力学过程、发电机机制的理解。极区的长时间观测也将极大推动对大尺度波动(如罗斯贝波)和对流能量传输等的研究,获得对太阳能流传输机理的深刻理解。

1.2 从极区特有的视角优势,直接监测高速太阳风的源区,凝视日冕物质抛射的传播演化

高纬监测高速太阳风的初发、快速膨胀和空间分布等特征,能够揭示太阳风的起源和传播过程。在太阳活动极小期,高速太阳风起源于较大的极区冕洞,并随着向外传播不断膨胀^[25];而慢速太阳风则更多地局限在赤道面附近。Ulysses飞船对极区太阳风等离子体、电磁场和成分进行原位测量,结果表明,在南北高纬地区普遍存在快速、相对均匀的太阳风^[26],而变化更大的“慢”太阳风则来自低纬冕流带。在太阳高纬对太阳风进行源区的遥测和局地直接测量,可避免与任何冕流或来自冕流带的慢速太阳风相互作用而受到影响,准确理解高速太阳风的起源、膨胀和传输;结合极区其他日冕观察特征,如极区冕羽和冕洞喷流,有望获得太阳风起源、分布和驱动机制研究的重要突破。高纬轨道器能直接监测太阳风源区^[27],由此诊断高速太阳风相对于极区冕洞位置/大小/边缘演化而变化的空间特征分布,揭示太阳风起源位置、产生和传播机理(图3)^[28]。

另外,普遍认为太阳高能粒子由不同过程产生,如来自太阳耀斑直接释放、与日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)或共转相互作用区(corotating interaction region, CIR)相关行星际激波等,对这些粒子如何通过日球层传输的理解仍

然不成熟。极轨卫星将在高纬区域监测太阳磁结构演化,结合黄道面观测,从全球角度监测高速太阳风空间结构以及高能粒子起源和传输的动力学过程,可为高能粒子传输理论提供新的物理解释。

从高纬监测太阳风瞬变结构CME,构筑空间天气云图,将有力推动空间天气预报发展。作为灾害性空间天气的主要驱动源,CME是太阳上大尺度热等离子体团的喷发,在日球层空间传播,并通过其前端激波加速高能粒子。如何规避其所造成的损失是人类高科技时代所面临的重大前沿课题。目前CME是通过来自黄道面的日冕仪,基于日冕中自由电子对光球辐射的汤姆森散射进行探测。研究表明,CME在太阳周中会随纬度变化,但在行星际传播常偏向赤道,于赤道冕流带附近集中。因此,位于黄道面的日冕仪探测CME,会遭遇严重的投影效应,还可能遗漏一定的事件。位于高纬和极区的日冕仪很大程度规避了投影效应,有望高效探测到几乎所有的CME,尤其是对地CME;同时还将对背景太阳风中CME传播进行成像,研究其在行星际空间的相互作用。

CME传播过程中,其径向范围、膨胀速度和磁场等可能发生变化,进而影响其地磁效应等。同一日面源区可能连续发生多个CME(同源和感应爆发)^[29,30],多个相近CME传播中的相互作用不可避免,包含许多复杂物理过程——动量交换、磁重联和激波等。极区的有利位置可长时间连续跟踪CIR及相关激波和CME的形成与演化过程。揭示这些相互作用随时间和距离的演化,可提供太阳风、CME和CIR等结构的全球演化及其与周围行星相互作用的监测。这些相互作用区域的磁场结构,由于太阳自转被拖拽扭曲,极区观测将更好地监测行星际空间CME-CME和CME-CIR的相互作用及其发生位置以及如何传播演化。这些将为发展空间天气预报模式提供重要的输入参数,推动实现精准预报太阳风暴到达地球的时间、强度及可能引起的空间天气效应等。

1.3 实现太阳极区磁场和速度场测量,创建准确的日球层三维数值模型,理解日球层整体结构

包含极区的太阳全球磁场速度场监测将为研究日冕和日球层的三维结构及其如何受到太阳活动的影响等提供前所未有的机会,并由此开启太阳系空间天气学研究。太阳磁场演化及其驱动的磁活动不仅是日地空间天气变化的主要原因,同样也主导着其他行星际空间乃至整个日球空间的天气变化。日地空间天气因为威胁人类日益依赖的高技术系统而被重点关注研究,而探索日球空间天气对理解太阳系空间是否存在其他形式的生命、地球存在生命的机制及其他行星上生命的可能性等都有重要的意义。但长期以来,极区磁场和速度场正面测量的缺失严重阻碍了创建准确的数据驱动的全日球数值模型,限制了对日球空间天气的研究、对日球与星际介质相互作用的理解,以及对太阳系生命存在机制的探索等。

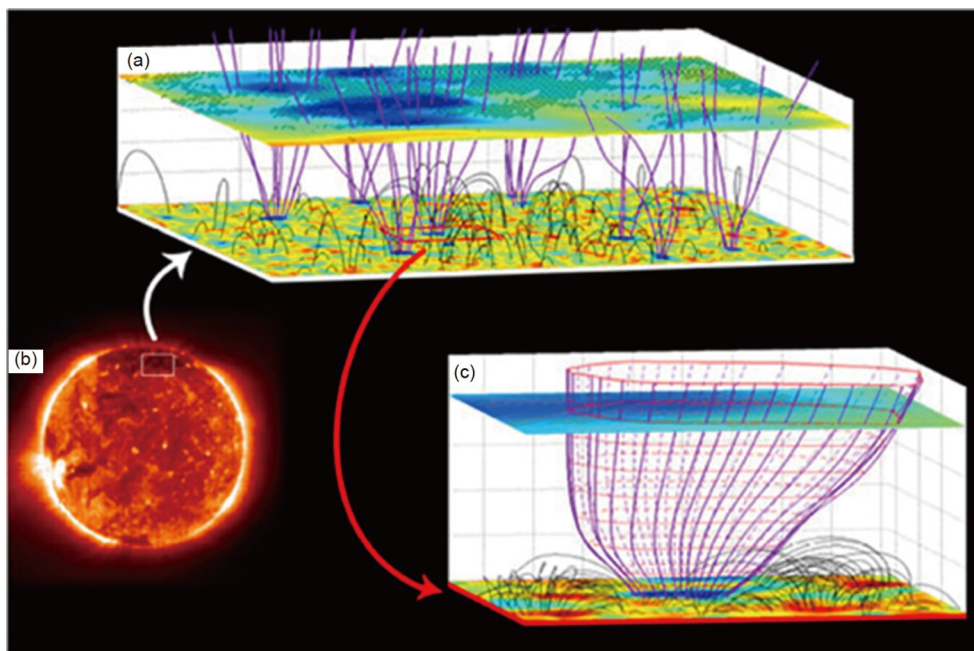


图3 太阳风的起源^[28]. (a) 紫外19.5 nm波段观测的太阳, 其中白色方框表示研究的冕洞区域; (b) 外推的冕洞中三维磁场结构; (c) 开放磁场形成的漏斗状磁结构与周围双极磁场结构. 闭合磁场和漏斗开放磁场的磁重联为原初太阳风注入物质和能量
Figure 3 The origin of solar winds^[28]. (a) The Sun observed in the ultraviolet band at 19.5 nm, in which the studied coronal hole is marked by a white box. (b) 3D magnetic structures in the coronal hole. (c) The funnel-like magnetic structure formed by open magnetic fields surrounded by magnetic bipolar structures. Magnetic reconnections are suggested to occur between the closed magnetic fields and the open fields of the funnel to provide material and energy for the original solar winds

太阳风及其瞬变结构作为太阳系空间天气整体变化的重要纽带, 其发生、发展、在行星际的传播演化和行星际效应, 是建立准确的三维日球数值模型的重要参考和初边界条件. 极轨卫星携带磁像仪, 将首次直接探测高纬和极区太阳风源区的磁场与速度场, 结合黄道面视角的观测, 为建立准确的日球三维理论模型提供重要的全球磁场速度场演化观测约束. 同时, EUV成像仪和光谱仪、日冕仪和日球成像仪协同工作, 可以对高速太阳风的起源和传播进行有效诊断; 从极区顶层角度, 连续跟踪黄道面附近太阳风瞬变传播结构形成演变和相关激波的产生发展, 以及CIR和其他太阳风流之间的相互作用等, 勾画它们在日冕中的完整演化途径, 为创建日球空间三维结构模型提供太阳风和CIR在日冕和内日球层空间传播演化的初边界条件. 结合粒子和原位监测仪器, 将对局部等离子体进行测量, 不断修正模型, 由此理解日球层整体结构.

极区上方探测结合黄道面多角度观测, 可探索太阳和日球层之间的关键边界, 诊断其在调节太阳风等离子体输出中的作用, 理解日球层大尺度结构及其中的物理过程. 这些涵盖极区的全球磁场速度场监测, 可为理论分析太阳和日球动力学过程提供磁场约束边界, 为发展数值驱动の日球数值模型提供重要的初边界输入参数. 通过不断比较和改进模拟结果, 有望极大发展当前的太阳风MHD模型、CME行星际空

间传播模型和太阳大气全球模拟(图4)^[31], 确保模型输出准确性, 最终创建准确的日球层三维数值模型, 从而为空间天气和空间气候研究与预报提供基本条件.

2 极轨探测的核心科学目标

太阳极轨探测将首次填补太阳全球磁场速度场观测最重要的空白, 获取全球磁场和速度场的完整分布. 太阳极轨探测核心科学目标可概括为“揭示两个起源, 创建一个模型”: 为解决太阳活动周起源的世纪难题提供决定性的观测; 将突破中低纬观测受到高速太阳风传播与低速冕流相互作用的影响, 破解“原始”高速太阳风的起源、机制和效应之谜, 并为准确预报日地灾害性空间天气提供“云图”; 将为创建自治的日球数值模型提供必要、完整、自治的初边界条件, 理解日球层整体结构.

2.1 揭示太阳磁活动周的起源

太阳磁活动周起源是当代天体物理学的一个主要未解之谜. 目前的努力主要是基于太阳发电机理论和数值模拟, 对太阳和恒星磁活动机制进行溯源. 依据太阳发电机理论^[32], 极区磁场表征太阳总体偶极磁场, 对应太阳极向磁场. 太阳较差自转作用于极向场形成环向场, 进而产生以太阳黑子为标志的活动区磁场; 而活动区后随极性磁场的磁通量向

极区扩散, 导致极区磁场极性反转. 由此循环往复, 形成了太阳磁活动周(图5)^[33]. 目前磁蝴蝶图中展示的极区磁通量分布(如图5(a)中展示的太阳南北两极), 很大程度依赖太阳表面磁通量转移模型的理论外推; 极区磁场的强度测量目前受到观测投影效应严重影响. 研究表明, 太阳周极小相的极区磁场和下一个太阳活动周的强度有很好的相关性, 被证明可能是最有效的太阳活动周预报先兆因子^[34]. 因此, 太阳极区的磁场和流场特征是揭示太阳内部结构、动力学, 从而理解太阳磁活动周起源的关键, 是发电机理论的物理链条和观测拼图中最重要的、目前仍然空白的区域.

围绕这一科学目标, 需要极区磁场和速度场的直接成像观测, 回答太阳发电机理论中最关键的物理问题, 包括极区磁场的内禀属性和极性反转的物理机制, 活动区磁通量向极

运输的详细物理图像; 实现准确可靠的极区日震学诊断, 探索太阳表面和内部动力学结构(包含对流、涡旋、高纬经圈环流, 及流场和磁场的相互作用等), 揭示驱动太阳磁活动周的物理过程.

2.2 揭示高速太阳风的起源

在太阳活动低年, 高速太阳风主要来源于太阳极区冕洞, 它决定了日球空间的物理环境, 是理解日地联系和空间环境扰动、理解地球宜居性的基础. 高速太阳风的起源问题蕴含着广泛宇宙磁化等离子体系统中的两个基本物理问题: 磁重联和等离子体湍动的能量转换过程. 如图6所示^[35], 日冕中的磁重联和等离子体湍动是空间科学中重要的前沿和热点问题. 研究太阳极区的高速物质流起源, 将为认知宇宙中普遍

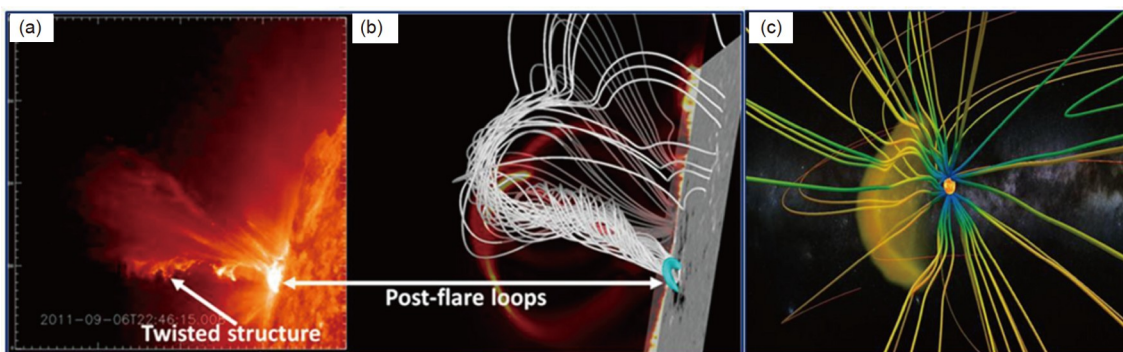


图4 国内自主研发的太阳爆发模型再现观测的太阳爆发在日地空间的传播过程^[31]. (a) 观测的太阳爆发; (b) 模拟的太阳风暴初发过程; (c) 模拟的太阳风暴在日地空间传播演化.

Figure 4 The propagating process of solar eruptions simulated by the model that is independently developed in China^[31]. (a) A solar eruption in observations; (b) simulated initiation of a solar storm; (c) the simulation of a solar storm evolving in the solar-terrestrial space

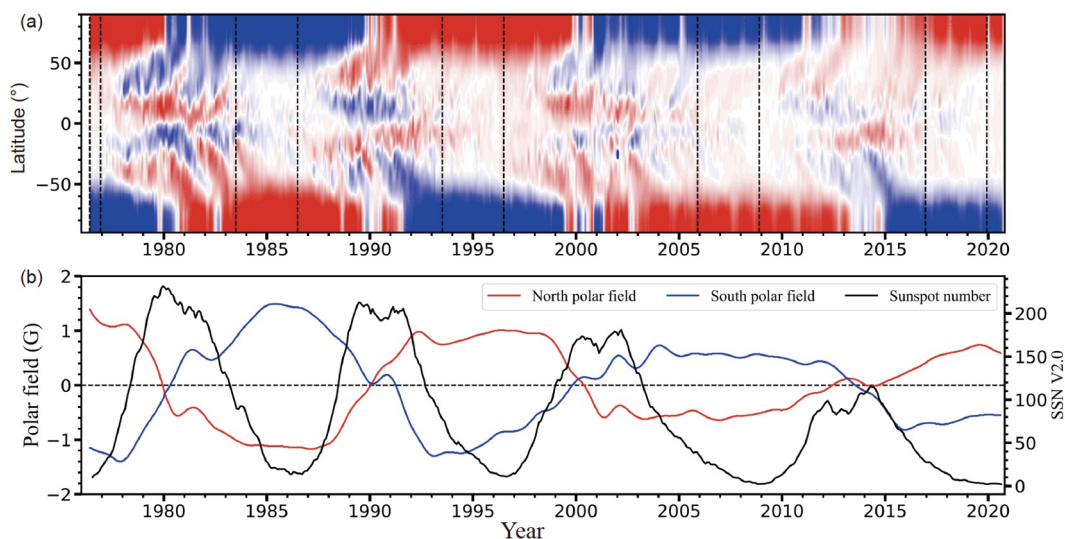


图5 1976年以来太阳表面磁场演化^[33]. (a) 磁场演化磁蝴蝶图; (b) 太阳黑子数(黑线)和南(红线)北(蓝线)极区磁场强度随时间的演化

Figure 5 Surface magnetic field evolutions of the Sun since 1976^[33]. (a) The butterfly diagram of magnetic evolutions; (b) the time evolutions of sunspot number (black line), and that of the magnetic intensity in the south (red line) and the north (blue line) poles

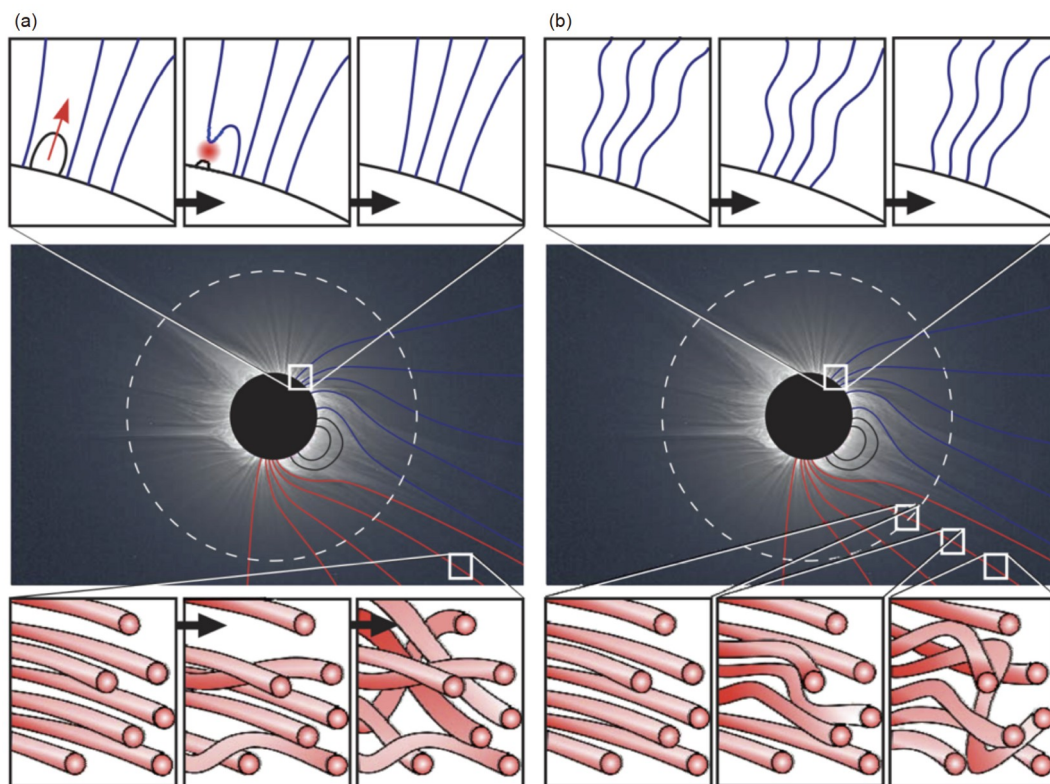


图6 (网络版彩色)太阳风起源的两种驱动机制:磁重联(a)和波湍动(b),及其对日球层磁场线扭结的影响^[35]。上行表示日冕中两类能量转换过程,中行为日冕结构示意图,下行展示外日冕中日球磁力线相应的扰动

Figure 6 (Color online) Two driving mechanisms for the origin of the solar wind: Magnetic reconnection (a) and wave turbulence (b), and their effects on the kinks of magnetic field lines in the heliosphere^[35]. The top row shows two types of energy conversions in the corona. A schematic diagram for corona structures is illustrated in the middle row. In the bottom panels, corresponding disturbance appears on the heliospheric magnetic field lines in the outer corona

存在的原恒星两极高速喷流现象奠定理论基础。极区高速太阳风的起源问题包括源区定位问题、起源机制问题和起源效应问题。

围绕这一科学目标,需要极轨光谱和成像观测,直接监测“原初”高速太阳风的源区磁场、流场和辐射特征。结合原位场和粒子探测,揭示高速太阳风起源、传播和演化,及其对日球层磁场拓扑形态和能量粒子的塑造作用。极轨将从顶层俯瞰集中在黄道面附近太阳风瞬变分量,即日冕物质抛射的初发、传播、相互作用和拓扑演化,以及和周围磁结构的相互作用等,获取拓扑结构和动力学总体演化图像,构建日地空间天气“云图”,实现灾害性空间天气的精准预报。

2.3 理解日球层整体结构

日球空间包涵诸多物理过程(辐射、对流和磁流体动力学等),覆盖广阔时空尺度复杂的系统行为^[36]。以包含太阳两极的实时观测数据为初边界条件,创建精确的数据驱动の日球空间天气数值模型,有望自洽描述“太阳大气-行星际空间-行星空间”各圈层的动力学耦合过程。基于准确的全日球数

值模型,研究日球空间天气和气候,将为理解和探索太阳系生命起源及寻找地外生命提供导向。

围绕这一科学目标,需要极轨多波段的探测,为发展太阳风磁流体学模型及日冕物质抛射行星际空间传播模型提供完整、自洽的初边界条件;并通过不断比较和改进模拟结果,提高模型输出准确性,最终创建自洽的数据驱动的全日球空间数值模型,奠定理解太阳系空间天气发展和演化的基础,进而开启太阳系空间天气的研究,揭示磁场驱动日球空间天气效应的物理机制。

3 探测方案及科学载荷配置

3.1 探测方案

太阳极轨探测计划针对科学目标,通过系统优化,设计了一种具有高成熟度、高倾角、高探测效率、高重访率、高承载能力、高数据速率、工程可实现性好的实施方案;拟利用高轨道倾角($\geq 80^\circ$)、小椭圆率的太阳极轨飞行器,首次实现对太阳极区的正面成像观测。飞行器经过行星际飞行进

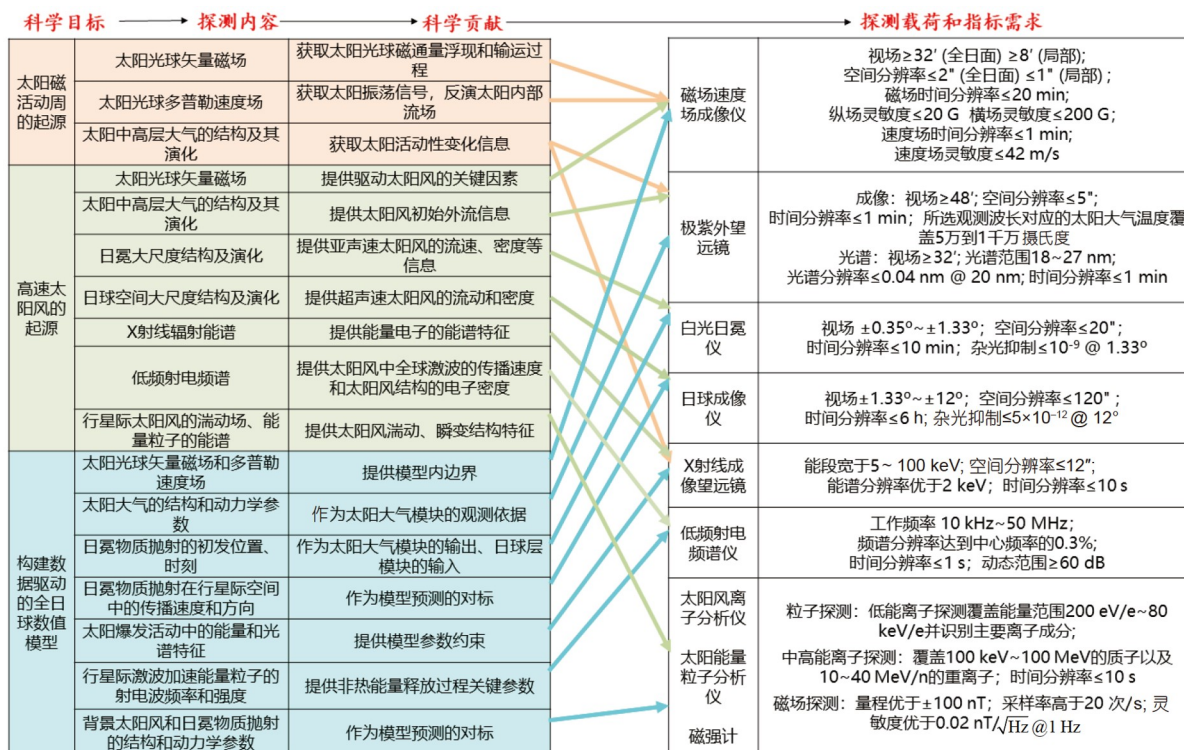


图 7 (网络版彩色) 太阳极轨飞行器的科学目标和初步的载荷配置

Figure 7 (Color online) Scientific objectives and preliminary configurations of payloads on the Solar Polar-orbit Observatory

入太阳极轨轨道, 轨道倾角 $\geq 80^\circ$, 轨道周期约 1 年, 近日点达 0.9 AU, 远日点至 1.15 AU。飞行器预计运行 15 年, 将覆盖一个完整太阳活动周的极大年和极小年。运行期间, 飞行器将飞越太阳极区 15 次, 观测太阳纬度 30° 以上区域总时间约 6.6 年, 观测太阳纬度 45° 以上区域总时间约 4.8 年。

太阳极轨飞行器拟采取三轴稳定对日定向, 姿态指向精度优于 $21''$, 承载有效载荷达 200 kg 以上, 有效载荷功率不低于 300 W, 科学探测数据下行最大速率为 5 Mbit/s; 飞行器系统拟采用成熟的嫦娥系列探测器和天问系列探测器的相关技术。

3.2 载荷配置方案

依据上述科学目标, 我们继承了中国科学院空间科学战略性先导科技专项“先进天基太阳天文台(ASO-S)”^[37]、风云系列、嫦娥四号、天问一号等空间卫星的关键技术和方案设计, 提出如下初步载荷配置方案(图7)。首先, 需要测量太阳全日面, 尤其是极区的矢量磁场和多普勒速度场, 其测量结果适用于几乎所有科学目标的相关研究。其次, 研究太阳风起源和灾害性空间天气事件预报, 需要对太阳进行极紫外波

段、X射线波段以及射电波段的观测, 并结合白光日冕仪和日球成像仪的观测。此外, 飞行器还配置了一个原位探测载荷包, 内含太阳风离子分析仪、太阳能量粒子分析仪和磁强计, 对太阳风等离子体、行星际磁场和高能粒子开展原位探测。

4 总结

探测太阳极区及其对内日球层的影响, 是人类最伟大的征程之一。科技的发展将使航天器前所未有地携带先进的仪器设备飞越太阳两极。太阳极轨探测计划的顺利实施, 将在人类历史上首次实现对太阳极区的正面观测, 是人类太空探索的又一座里程碑。极区的直接观测和研究可为太阳物理领域的进步提供独特的机会, 推动人类在认识太阳磁活动周起源、高速太阳风起源, 以及构建全日球数值模型、理解日球层整体结构 3 个方面的巨大飞跃。同时, 极轨探测将为精确预报空间天气的应用需求提供坚实的科学基础, 为我国轨道器的高水平发射积累宝贵经验, 使我国在太阳物理、空间物理、日球物理等领域, 对类太阳恒星和生命宜居性的理解以及空间天气物理预报等多方面引领国际前沿。

致谢 感谢国家重点研发计划(2022YFF0503800)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB41000000)、国家自然科学基金(11873059)、中国科学院前沿科学重点研究项目(ZDBS-LY-SLH013)、云南省汪景琇院士工作站(202005AF150025)和国家重点研发计划(2021YFA1600500)资助。感谢国家“月球与深空探测”规划项目(2011年)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA150072, XDA15010700, XDA15320102, XDA04061002, XDA04075900)和中国科学院空间科学创新研究院项目(E0312101)的前期支持。

推荐阅读文献

- 1 Cameron R, Schüssler M. The crucial role of surface magnetic fields for the solar dynamo. *Science*, 2015, 347: 1333–1335
- 2 Kennedy D. 125. *Science*, 2005, 309: 19
- 3 Babcock H W, Babcock H D. The Sun's magnetic field, 1952–1954. *Astrophys J*, 1955, 121: 349
- 4 Schwabe H. Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843. Von Herrn Hofrath Schwabe in Dessau. *Astron Nachrichten*, 1844, 21: 233
- 5 Sun X, Hoeksema J T, Liu Y, et al. On polar magnetic field reversal and surface flux transport during solar cycle 24. *Astrophys J*, 2015, 798: 114
- 6 Deng Y, Wang J, Ai G. Vector magnetic field in solar polar region. *Sci China Ser A-Math*, 1999, 42: 1096–1102
- 7 Tsuneta S, Ichimoto K, Katsukawa Y, et al. The magnetic landscape of the Sun's polar region. *Astrophys J*, 2008, 688: 1374–1381
- 8 Jin C, Wang J. Vector magnetic fields of a solar polar region. *Astrophys J*, 2011, 732: 4
- 9 Certain J W, Golub L, Lundquist L, et al. Evidence for Alfvén waves in solar X-ray jets. *Science*, 2007, 318: 1580–1582
- 10 Jin C, Zhou G, Zhang Y, et al. The bipolar magnetic emergence in the solar polar region. *Astrophys J Lett*, 2020, 889: L26
- 11 Broussard R M, Sheeley Jr N R, Tousey R, et al. A survey of coronal holes and their solar wind associations throughout sunspot cycle 20. *Sol Phys*, 1978, 56: 161–183
- 12 Wang Y M, Ji H S, Wang Y M, et al. Concept of the solar ring mission: An overview. *Sci China Technol Sci*, 2020, 63: 1699–1713
- 13 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s. 2021
- 14 Wenzel K P, Marsden R G, Battrick B. The International Solar Polar Mission. Its Scientific Investigations. ESA Special Publication, 1983. 1050
- 15 Wenzel K P, Marsden R G, Page D E, et al. The ULYSSES mission. *Astrophys J Suppl Ser*, 1992, 92: 207
- 16 Müller D, Marsden R G, St Cyr O C, et al. Solar orbiter—Exploring the Sun-heliopause connection. *Sol Phys*, 2013, 285: 25–70
- 17 Xiong M, Liu Y, Liu H, et al. Overview of the Solar Polar Orbit Telescope Project for space weather mission. *Chin J Space Sci*, 2016, 36: 245–266
- 18 General Department of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences. Lunar and Deep Space Exploration (in Chinese). Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2011 [中国科学院月球与深空探测总体部. 月球与深空探测. 广州: 广东科技出版社, 2011]
- 19 Sekii T, Appourchaux T, Fleck B, et al. Future mission concepts for helioseismology. *Space Sci Rev*, 2015, 196: 285–302
- 20 Harra L, Andretta V, Appourchaux T, et al. A journey of exploration to the polar regions of a star: Probing the solar poles and the heliosphere from high helio-latitude. *Exp Astron*, 2021, doi: 10.1007/s10686-021-09769-x
- 21 Choudhuri A R. The meridional circulation of the Sun: Observations, theory and connections with the solar dynamo. *Sci China Phys Mech Astron*, 2021, 64: 1–27
- 22 Howe R, Christensen-Dalsgaard J, Hill F, et al. Dynamic variations at the base of the solar convection zone. *Science*, 2000, 287: 2456–2460
- 23 Thompson M J, Christensen-Dalsgaard J, Miesch M S, et al. The internal rotation of the Sun. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2003, 41: 599–643
- 24 Gizon L, Birch A C, Spruit H C. Local helioseismology: Three-dimensional imaging of the solar interior. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2010, 48: 289–338
- 25 Wang Y M, Sheeley J N R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion. *Astrophys J*, 1990, 355: 726–732
- 26 McComas D J, Bame S J, Barraclough B L, et al. Ulysses' return to the slow solar wind. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1–4
- 27 Cranmer S R, van Ballegoijen A A. On the generation, propagation, and reflection of Alfvén waves from the solar photosphere to the distant heliosphere. *Astrophys J Suppl S*, 2005, 156: 265–293
- 28 Tu C Y, Zhou C, Marsch E, et al. Solar wind origin in coronal funnels. *Science*, 2015, 308: 519–523
- 29 Zhou G P, Tan C M, Su Y N, et al. Multiple magnetic reconnections driven by a large-scale magnetic flux rope. *Astrophys J*, 2019, 873: 23
- 30 Zhou G, Gao G, Wang J, et al. Magnetic reconnection invoked by sweeping of the CME-driven fast-mode shock. *Astrophys J*, 2020, 905: 150
- 31 Feng X. Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Corona and Heliosphere. Berlin: Springer, 2019
- 32 Jiang J, Hathaway D H, Cameron R H, et al. Magnetic flux transport at the solar surface. *Space Sci Rev*, 2014, 186: 491–523
- 33 Guo W, Jiang J, Wang J X. A dynamo-based prediction of solar cycle 25. *Sol Phys*, 2021, 296: 136

- 34 Jiang J, Wang J X, Jiao Q R, et al. Predictability of the solar cycle over one cycle. *Astrophys J*, 2018, 863: 159
- 35 Owens M J, Forsyth R J. The heliospheric magnetic field. *Living Rev Sol Phys*, 2013, 10: 5
- 36 Tu C Y, Zong Q G, He J S, et al. Solar-terrestrial Space Physics Volume 1: Heliospheric Physics (in Chinese). 2nd ed. Beijing: Science Press, 2020
[涂传诒, 宗秋刚, 何建森, 等. 日地空间物理学上册: 日球层物理. 第二版. 北京: 科学出版社, 2020]
- 37 Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. Advanced space-based solar observatory (ASO-S): An overview. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 156

Summary for “太阳极轨天文台”

Solar Polar-orbit Observatory

Yuanyong Deng^{1,9*}, Guiping Zhou^{1,9*}, Shuwu Dai³, Ying Wang³, Xueshang Feng⁴, Jiansen He⁵, Jie Jiang⁶, Hui Tian⁵, Shangbin Yang^{1,9}, Junfeng Hou^{1,9}, Yihua Yan^{4,9}, Weiqun Gan⁷, Xianyong Bai^{1,9}, Leping Li^{1,9}, Lidong Xia⁸, Hui Li⁷, Yang Su⁷, Ming Xiong⁴, Yechi Zhang³, Chenglin Zhu³, Jiaben Lin^{1,9}, Haiying Zhang¹⁰, Bo Chen¹¹, Lingping He¹¹, Li Feng⁷, Hongxin Zhang¹¹, Mingzhe Sun⁸, Aibing Zhang⁴, Linjie Chen^{4,9}, Baolin Tan^{1,9}, Zhe Zhang⁷, Jianfeng Yang¹², Mengfei Yang² & Jingxiu Wang^{1,9}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

³ Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

⁴ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁵ School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China;

⁶ School of Space and Environment, Beihang University, Beijing 102206, China;

⁷ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China;

⁸ School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264209, China;

⁹ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

¹⁰ Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

¹¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

¹² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China

* Corresponding authors, E-mail: dyy@nao.cas.cn; gpzhou@nao.cas.cn

Solar magnetic fields and related solar magnetic activities dominate the heliospheric environments from the near-Earth space, to the interplanetary space, and up to the interstellar boundary. The polar magnetic fields of the Sun and its dynamic processes are especially vital in the aspects of manifesting the internal dynamo of the Sun, and shaping magnetic fields in the heliosphere. But so far, almost all the solar satellites have been limited in the vicinity of the ecliptic plane. Due to the serious projection effect, the polar regions remain as the least-known mysterious territory of the Sun. The spacecraft of “Solar Polar-orbit Observatory (SPO)” has been designed to directly image the solar polar regions in an unprecedented way by traveling in a large solar inclination angle ($\geq 80^\circ$) and a small ellipticity. Based on multi-band remote-sensing and *in-situ* measurements, the SPO will make breakthrough on the following top-level scientific objectives: (1) Provide decisive observations for solving the problem of the century—How the solar magnetic activity cycle originates that shapes the living environment of human beings; (2) provide direct observational supports for unveiling the origin, mechanism, and effect of the “primitive” high-speed solar wind that connects the Sun and celestial bodies in the solar system; (3) provide the necessary, complete, and self-consistent initial and boundary conditions for creating a data-driven global heliospheric numerical model that serves as the foundation for space weather prediction.

To achieve these scientific objectives, the SPO will be equipped with six remote-sensing instruments and one *in-situ* instrument package. The remote-sensing instruments are Magnetic and Helioseismic Imager (MHI; FOV: 34' (full disk)/17' (high resolution); pixel resolution: 1"/0.5"; sensitivity: 10 G (longitudinal), 200 G (transverse); cadence: 15 min; sensitivity of Doppler velocity: 30 m/s; Cadence: 1 min), Extreme Ultraviolet Solar Telescope (EUST; FOV: 51'; spatial resolution: 3.5"; imaging band: 19.3, 17.1, 13.1 and 30.4 nm; cadence: 1 min), Visible-light Coronagraph (VISCO; FOV: 0.69°–2.67° annular; pixel resolution: 4.8"; wave band: 700±40 nm; cadence: 2 min), Very Large Angle Coronagraph (VLACOR; FOV: 2.67°–24° annular; pixel resolution: 45"; wave band: 600–750 nm; cadence: 10 min (white light), 60 min (polarization)), X-ray Imaging Telescope (XIT; FOV: 48'; angular resolution: 10"; energy range: Energy spectrum 0.5–10 keV; spectral resolution: 1 keV@6 keV; time resolution: 5 s (common), 1 s (burst)), and Low Frequency Radio Spectrometer (LFRS; frequency range: 10 kHz–2.0 MHz and 1.0–50 MHz; spectral resolution: ≤ 5 kHz@2.0 MHz and ≤ 0.1 MHz@50 MHz; time resolution: 1 s; dynamic range: >72 dB). The *in-situ* instrument package includes Solar Wind Ion Analyzer (SWIA), Solar Energetic Particles Analyzer (SEPA), and Magnetometer (MAG).

solar polar magnetic fields, solar magnetic activity cycle, solar wind, coronal mass ejection, data-driven global heliospheric numerical model, heliospheric space weather and climate

doi: [10.1360/TB-2022-0674](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0674)