

XIONG Ming, FENG Xueshang, XIA Lidong, HUANG Zhenghua, LI Bo, GAO Yanchen, LIU Weixin, SUN Mingzhe, ZHANG Hongxin, DAI Shuwu, WANG Ying. Suggestions on Scientific Objectives of Deep-space Satellite Constellation to Explore the Sun and Inner-heliosphere from an Unprecedented Stereoscopic Panorama Viewpoint (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, 43(3): 389–405. DOI:10.11728/cjss2023.03.210728081

太阳与内日球立体探测卫星计划科学目标建议*

熊 明^{1,2} 冯学尚¹ 夏利东³ 黄正化³
李 波³ 高炎琛^{1,2} 刘维新³ 孙明哲³
张红鑫⁴ 代树武⁵ 王 颖⁵

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

3(山东大学空间科学研究院 光学天文和日地空间环境山东省重点实验室 威海 264209)

4(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

5(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘 要 面向认知太阳风暴和保障航天安全的国家战略需求,中国近年来提出太阳与内日球立体探测卫星计划,拟适时部署环黄道面的拉格朗日点 L3-L4-L5 定点卫星星座和脱离黄道面的太阳极轨对偶卫星。通过该卫星计划的初步科学论证分析,建议将其科学目标凝练为太阳磁场、太阳风暴、太阳风,将其应用目标定位于日地空间天气预报,建议配置成像类、粒子类、波场类的综合科学载荷。此外,利用日地空间的三维磁流体数值模拟和计算机图形学的艺术可视化,形象地表达环黄道面卫星“对日凝视”和太阳极轨卫星“鸟瞰全景”的探测概念。中国太阳与内日球立体探测卫星计划将揭示太阳磁场的起源规律及其爆发机理、日地耦合系统的空间天气变化机理,并能够为日地空间天气三维数值建模提供观测数据驱动的初边值条件,必将极大推动空间天气的立体监测、前沿研究、精准预报的一体化进程。

关键词 日球层,太阳磁场,日冕物质抛射,太阳风,空间天气,深空探测,磁流体数值模拟

中图分类号 P353

Suggestions on Scientific Objectives of Deep-space Satellite Constellation to Explore the Sun and Inner-heliosphere from an Unprecedented Stereoscopic Panorama Viewpoint

* 国家自然科学基金项目(41874205, 42074208, 41627806)和中国航天科技集团五院自主创新项目共同资助

2021-07-28 收到原稿, 2023-02-09 收到修定稿

E-mail: mxiong@swl.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

XIONG Ming^{1,2} FENG Xueshang¹ XIA Lidong³ HUANG Zhenghua³
LI Bo³ GAO Yanchen^{1,2} LIU Weixin³ SUN Mingzhe³
ZHANG Hongxin⁴ DAI Shuwu⁵ WANG Ying⁵

1(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-terrestrial Environment,
Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209)

4(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

5(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

Abstract To meet the national strategic demands in understanding solar storms and safeguarding deep-space exploration, several solar and interplanetary mission concepts have been recently proposed in China. These mission concepts include one Sun-orbiting Lagrangian L3-L4-L5 satellite constellation in the ecliptic and twin Sun-orbiting polar satellites out of the ecliptic, aiming at an unprecedented stereoscopic view of the Sun and the inner heliosphere. For the joint multi-constellation mission, its scientific objects can be defined as solar magnetic field, solar storm, and solar wind, with its application object identified as space weather prediction. Each satellite is suggested to carry a suit of scientific instruments to measure photon emissions, particle radiation, and electromagnetic waves. Using the three-dimensional numerical magnetohydrodynamic simulation of solar-terrestrial space and the aesthetic visualization of computer graphic design, the exploration scenario of the in-ecliptic Sun-staring satellites and the out-of-ecliptic bird-view satellites is vividly presented. The potential multi-constellation mission in China is expected to be able to uncover the mysterious origin and eruption of solar magnetic field, understand the space weather chain of Sun-Earth coupling system, and provide the initial and boundary conditions for three-dimensional data-driven space weather modelling. Therefore, if being carried out successfully, such a multi-constellation mission can be a historic landmark in improving the performance of space weather monitoring, research, and service in China.

Key words Heliosphere, Solar magnetic field, Coronal mass ejection, Solar wind, Space weather, Deep-space exploration, Numerical magnetohydrodynamic simulation

0 引言

日地空间是人类继陆地、海洋、领空之外的第四疆域,其探索深刻改变了人类对自然的认知及人类自身的生产和生活方式。太阳风及其携带的行星际磁场是联系太阳与整个日球层的纽带,进而通过与星际介质相互作用来决定日球层的形状和尺寸^[1]。日地空间包括太阳大气、行星际空间、磁层、电离层等多个关键空间区域,这些区域的状态显著受控于太阳活动,表现出非常复杂的时空变化特征^[2]。日地空间不同区域之间存在极为复杂的相互作用和耦合过程。

太阳爆发活动主要通过增强的电磁辐射、高能带电粒子流、日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)的等离子体云这三种形式释放,进而传播至地球引发灾害性空间天气效应,严重威胁天基和地基的高科技技术系统的运行和可靠性^[3,4]。当前面对航天、通信、导航等高科技领域及国家安全等方面日益增长的需求,迫切需要将日地系统整体作为一个有机因果链进行深入研究,强调太阳与日球物理探测和研究服务于空间探索保障和技术社会,建立空间天气监测体系,实现常规及可靠的空间天气预报^[5]。针对太阳与日地空间的各圈层耦合研究及其数值建模,当前国际多卫

星联测的大数据时代正提供前所未有的机遇。

1 太阳与日球层探测的进展及展望

为了深入了解太阳爆发活动及其对空间天气的影响,国际上已经实施一系列卫星探测计划:日地关系天文台(Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO)、太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO)、帕克太阳探针(Parker Solar Probe, PSP)、太阳环绕器(Solar Orbiter, SolO)等。其中“国际与日共存(International Living With a Star)”愿景是一个“由应用驱动、聚焦空间天气”的有数十个国家、数十颗卫星参加的宏大计划。该计划包括已发射SDO和PSP等科学卫星,开始了多信使、全波段、全时域、高分辨、多尺度、多视角和高精度探测的时代。表1针对历史上太阳与日球探测的一些里程碑式卫星计划,列出其卫星轨道、科学载荷、科学目标,总结其已取得的部分重大科学成就。

行星际空间的天基联测能力极大地依赖于观测仪器所在的卫星平台位置,即空间多卫星的轨道布局。天基联测的理想平台位置包括太阳与地球之间引力平衡的拉格朗日L1点、L4点、L5点、水星轨道以内的近日处、日球层的高纬处。单卫星对内日球层的观测感知能力与卫星平台的轨道设计密切相关。日地连线的引力平衡点L1是众多对日观测卫星的停泊地,例如SOHO、ACE和Discovr等卫星。历史上的Ulysses卫星轨道是通过木星借力的太阳极轨,跨越太阳南北两极区,几乎垂直于黄道面,其轨道倾角高达 80° ^[34]。对于PSP和SolO的近日掠飞,极端恶劣的近日空间环境(高温、高辐射、高重力、高光压等)对这些卫星的安全防护和测控通信是严峻的技术挑战^[35,36]。如图1所示,随着PSP、SolO、STEREO、SOHO和SDO等卫星的在轨观测,初步实现对太阳大气和行星际空间的多视角监测,已显著推动日地耦合系统的科学研究。多卫星联测的大数据时代为揭示日地系统各圈层耦合之谜提供海量且纷杂的观测数据,同时也为日地空间天气的三维实时数值建模提供连续观测数据的驱动源。

随着诸多国际空间科学卫星计划的成功实施,太阳与日球物理领域持续获得蓬勃发展,但是依然存在一些悬而未决的重大科学问题。表2归纳出5项科学问题的认知不足及其对空间天气预报能力的严重

制约,梳理当前观测手段的欠缺之处,提出未来亟待弥补的深空卫星观测能力。特别地,缺乏对日地连线的长期稳定的天基“凝视”观测视角是当前国际太阳与日球层观测卫星体系的严重缺陷,显著制约日地物理的前沿探索和空间天气的预报应用。从空间天气事件中对地CME的“日冕-行星际”监测角度,L1点和地基都不是最优的观测视角。由于日冕和行星际的白光辐射归因于汤姆逊散射过程,基于L1点的白光成像视角在诊断对地CME物理参数上表现欠佳,无法监测CME沿整个日地连线的传播。行星际CME的白光影像显著依赖于观测视角,汤姆逊散射的几何效应在大的观测延展角尤为显著^[37]。脱离地球空间的STEREO和PSP等深空卫星,由于运行于黄道面内的绕日轨道,不能稳定且长期地监测整个日地空间。迄今为止,国际上没有一个长期位于L3或L4或L5点的日地空间观测卫星。如果能在日地引力平衡点L3、L4、L5以及太阳极轨部署科学卫星,并在每颗卫星配置成像类、粒子类、波场类的各类科学载荷,将首次实现对太阳与日球的三维立体全景监测系统,实现全波段、全方位、不间断地立体观测太阳磁场、瞬变扰动、太阳风流动、能量粒子辐射,有望认知突破太阳磁场演化、太阳大气爆发活动、日地空间天气变化等重大科学前沿问题,进而实现日地空间天气的实时精准预报。

2 太阳与内日球立体探测卫星计划的科学目标分析

太阳与日球立体探测卫星计划具有基础科学探索 and 空间天气应用的显著特点,建议将其应用目标定位于“观测数据驱动的日地空间天气定量数值预报”,并建议将其科学目标凝练如下。

科学目标 1: 发现太阳全球整体磁场活动规律、太阳活动区磁拓扑结构及其爆发机制、太阳磁活动周起源以及这三者之间跨时空尺度的物理关联

太阳磁活动是理解太阳爆发现象和太阳活动周的物理基础。黑子是太阳内部的磁流管浮现至光球层所形成的局部上千高斯的强磁场区。太阳活动区是由多个相邻黑子所构成的一个黑子群,其生命周期包括浮现、发展、衰减、消失过程,在日面上的存在时间从不足一天到几个月不等。由于观测视线的投影效应,通常只有日面中心附近光球磁场的正视测量才

表 1 历史上太阳与日球探测的里程碑式卫星计划
Table 1 A list of historic satellite missions characterized as milestones in exploring the Sun and heliosphere

卫星名称	国家及地区	运行周期	卫星轨道	科学目标	科学仪器载荷	部分重大科学成就
SOHO	欧洲、美国	1995年至今	日地连线L1点	研究太阳的结构、化学成分、太阳内部的动力学、太阳外部大气的结构(密度、温度、速度等参数)及其动力学、太阳风及其与太阳大气的关系	日冕诊断光谱仪CDS、电荷、元素和同位素分析系统CELIAS、超热能量粒子综合分析仪COSTEP、极紫外望远镜EIT、广角分光日冕仪LASCO、麦克逊多普勒日冕成像仪MIDI、太阳紫外辐射光谱仪SUMER、太阳风各向异性探测器SWAN、紫外日冕光谱仪UVCS、太阳全球低频振荡仪GOLF、太阳辐射变化及引力扰动探测仪VIRGO、荷电成分及同位素分析仪CELIAS、高能核及电子分析仪ERNE	被公认为是现代太阳物理学的基石:首次发现太阳对流层和辐射层之间的旋切过渡层Tachocline,显著提升太阳活动周的磁场演化认知水平 ^[6] ;首次可靠证实太阳内部结构的标准模型,首次发现太阳中微子亏损的根源在于基本粒子自身 ^[7] ;首次发现太阳低层大气的磁层网络组织以及中小尺度的磁场变化以及磁重联现象,显著提升日冕加热的科学认知水平 ^[8] ;首次拍摄太阳耀斑和CME等太阳大气爆发活动在不同日心高度的完整动力学演化过程,首次连续追踪30 $R_{\odot}$ 以内的CME传播过程并拍摄上万个CME事件的白光精细影像,首次实现空间天气太阳源头的日常实时监测 ^[9,10] ;首次发现太阳风高速起源于色球网络组织的边缘 ^[11] ,在4 $R_{\odot}$ 径向距离内完成主加速过程,具有高达几十的动理学温度各向异性值,并且重离子获得优势的加速和加热 ^[12] ;首次发现太阳大气龙卷风、极紫外EIT波动、日震波、黑子下方的速度对流场、过渡区爆发式暂现事件等现象 ^[13-15] ;史上最成功的彗星猎手,已发现4000余彗星,超过已知彗星数目的一半 ^[16]
STEREO	美国	2006年至今	黄道面内1 AU日心距的近圆轨道,每年偏离地球 22°的经向漂移(A和B双星分别前导和尾随地球)	研究CME触发机制及其在日球层中的传播特点;研究能量粒子在低日冕和行星际介质中的加速机制;研究太阳磁场中的三维结构及其时间演化,研究局地太阳风的等离子体和磁场结构	日地关联日冕和日球层探测仪SECCHI、粒子和日冕物质抛射原位测量仪IMPACT、等离子体和超热离子成分PLASTIC、射电暴探测仪WAVES	首次实现偏离日地连线的对日成像观测,首次实现针对太阳与日球的双视角联合成像,对冕环和CME等结构开展三维重构 ^[19] ;首次捕捉到地球轨道附近行星际CME的白光微弱辐射影像,首次连续追踪CME沿日地连线的完整传播过程 ^[20]
Ulysses	美国、欧洲	1990—2009年	木星借力的绕日大椭圆轨道,相对于黄道面的轨道倾角达80°	研究行星际磁场和太阳风的全球三维特征,研究太阳风的起源、太阳耀斑中的能量粒子加速、研究银河宇宙线以及星际尘埃性质与日球层纬度的关系	磁强计VHM/FGM、太阳风等离子体测量仪SWOOPS、太阳风离子成分谱仪SWICS、射电波和等离子体波探测仪URAP、能量粒子分析器EPAC、星际中性气体探测器GAS、日球层低能频谱、成分和各向异性探测仪HISCALE、宇宙线和太阳粒子探测器COSPIN、伽马射线暴探测器GRB、宇宙尘埃探测器DUST	首次飞越太阳南北两极,首次发现太阳两极的磁极强度和温度有显著的差异 ^[21] ;首次绘制太阳活动周尺度上太阳风高速流及低速流的速度、温度、磁场等参数的纬向分布,首次发现行星际磁极性质在每11年尺度上发生倒转 ^[22] ;发现从深空进入太阳系的尘埃比预期值高30倍,发现太阳极区磁场强度比预期值更弱,发现1990—2009年探测任务期间的太阳风持续减弱 ^[23]

续表 1

卫星名称	国家及地区	运行周期	卫星轨道	科学目标	科学仪器载荷	部分重大科学成就
SDO	美国	2010年至今	西经102°附近, 倾斜28°的地球同步轨道, 高度35800 km	研究太阳磁场的发电机起源及其结构演化, 研究太阳磁场能量的转移和释放方式, 研究太阳磁活动导致日球层的太阳风、能量粒子、太阳辐射等变化响应, 以提升空间天气的预报能力	日震与磁成像仪HMI, 极紫外线变化实验仪EVE, 大气成像组件AIA	首次开启太阳全日面、多波段、高时空分辨率成像观测新纪元, 首次高清记录太阳黑子、CME、太阳耀斑、太阳龙卷风、太阳极紫外EIT波动、日冕暗化、极区冕洞、冕环、冕羽等多尺度现象的完整丰富细节 ^[24] ; 首次开启太阳观测的大数据时代, 首次实现每日1.5 TB量级的观测数据量的星地传输, 开辟太阳物理机器学习 and 人工智能等新学科方向 ^[25] ; 首次发现太阳内部多层子午环流、太阳耀斑的极紫外延迟相、太阳自发电磁场重联 ^[26,27]
PSP	美国	2018年至今	黄道面内绕日的大椭圆轨道, 实现24次的近日点飞行, 利用7次金星借力而逐步将近日点缩短至 9.86 $R_{\odot}$	追踪加热日冕与加速太阳风的能量流动, 确定太阳风源头等离子体与磁场的结构, 探索能量粒子的加速和传输机制	电磁场探测仪FIELDS, 宽视场成像仪WISPR, 太阳风电子、 α 粒子和质子探测器SWEPAP, 太阳综合科学仪器IS $\odot$ IS	首次深入太阳大气层进行就位测量的卫星; 首次发现在30 $R_{\odot}$ 处远高于Weber-Davis太阳风角动量模型预测值的切向太阳风速度 ^[28] ; 发现来自赤道冕洞的太阳风低速流, 太阳风中磁场的弯折、阿尔芬速度尖峰结构、太阳附近的能量粒子辐射环境等现象 ^[29,30] ; 证实近日常尘区的存在 ^[31]
Solar Orbiter	欧洲、美国	2020年至今	黄道面内绕日的大椭圆轨道, 利用多次金星借力, 实现相对于黄道面的轨道倾角大于33°, 且最终近日点缩短至0.28 AU	研究太阳风的驱动源与日冕磁场的起源、太阳瞬变活动驱动的日球层变化、太阳爆发产生的日球层能量粒子辐射、太阳磁场发电机的运作及其对太阳与日球层两者关联的驱动方式	太阳风分析仪SWA, 磁强计MAG, 射电暴和等离子体波探测仪RPW, 能量粒子探测器EPD, 全日面极紫外成像仪EUI, 日冕仪METIS, 偏振和日震成像仪PHI, 日球仪SoloHI, 极紫外光谱成像仪SPICE, X射线谱仪STIX	2021年11月开启常规科学观测; 首次捕捉到有史以来在单张图像中观测到的最大日珥喷发, 延伸至行星际空间达到数百英里尺度 ^[32] ; 高清拍摄宁静太阳的众多小尺度活动现象, 例如小而明亮的“篝火”微耀斑 ^[33]

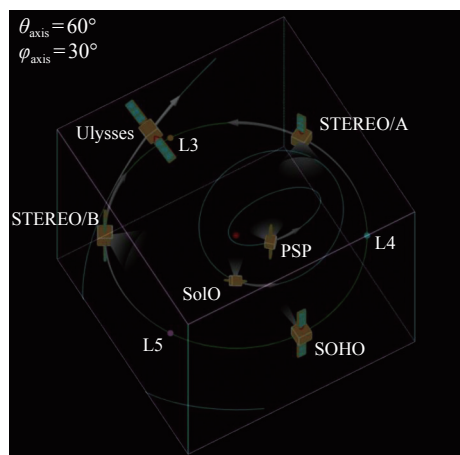


图1 历史上太阳与日球探测任务的若干卫星轨道 (SOHO, Ulysses, STEREO A&B, PSP 和 SolO) 及其对应的望远镜成像视场。SOHO 位于日地引力平衡点 L1, 其余 L3, L4, L5 点标注在黄道面内的 1 AU 圆轨道上

Fig. 1 Some Sun-orbiting satellite trajectories used in the historic solar and heliospheric exploration missions such as SOHO, Ulysses, STEREO A&B, PSP, and SolO. The fields of view of imaging cameras onboard these satellites are also illustrated. SOHO is located at Lagrangian point L1, with other L3, L4, and L5 points annotated at the Sun-centered circular orbit within the ecliptic plane at 1 AU

是可靠的, 日面边缘磁场的斜视测量具有极大的纵场误差和很粗的日面经纬分辨率。如图 2 所示, 如果仅凭 L1 点的 SOHO/MDI 磁像仪视角, 则瞬时磁场成像的圆锥视场只能覆盖子午面附近的部分日面。只能借助太阳的 27 天自转周期, 利用时间来换取空间的逐日磁图拼接校准, 才能生成全日面磁场概图和全日面极紫外概图的数据。但如果在环黄道面的 L3, L4, L5 点都部署 MDI 类的空间磁像仪, 则在任意瞬时都能形成全周向的太阳实时磁图。基于 L3 点对太阳背面进行不间断的日常监测, 可弥补太阳背面的当前观测盲区。比对基于 L1, L4, L5 点的日面磁场成像视场, 可发现经度相邻的成像视场有部分重叠。利用该重叠视场的太阳活动区联合测量, 可消除单视角测量的投影效应, 能解决太阳磁场测量中横场方向的 180° 不确定性问题^[38], 从而实现太阳光球层矢量磁场长期稳定的立体测量。此外, 如果还存在太阳极轨视角的太阳极区磁场成像, 则在该瞬时黄道星和极轨星的联测视场能完整覆盖太阳全球面, 实时准确地监测

太阳全球磁场活动。太阳磁场在不同尺度、不同位置 and 不同大气层具有总体的、复杂的拓扑连接性^[39]。

太阳光球磁通的水平输运、较差自转、黑子浮现、高纬磁场是理解太阳活动 11 周年调制的重要物理要素^[40]。太阳极区的极性反转是理解太阳活动周机理的核心问题。新浮现的黑子磁通提供下一个太阳活动周的极向磁通, 预示下一个太阳活动周的强度。在同一个太阳活动周内, 太阳南半球和北半球活动区磁场前导后随极性的顺序正好相反。光球大尺度的水平流场和耗散控制光球磁通的分布、对消、合并、重组。特别地, 依赖于磁场、向着活动区纬度带的汇聚入流被认为是太阳活动周演化的非线性反馈因子。单极型磁通从衰减相的活动区向太阳高纬迁移。该磁通迁移是多次间歇的冲浪式, 表现为南北半球不对称。极区磁场极性转换通常在几个月内即可完成, 但太阳南极和北极的极性转换并不同步, 有的活动周会相差一年多的时间。太阳表面磁元的源、汇、输运等活动有着长于 11 年的影响跨度, 从而能使相邻太阳活动周能有显著不同的活跃水平。此外, 如果基于太阳极轨视角的极区磁场和多普勒速度场测量, 将填补目前的太阳磁场探测盲区, 将首次可靠探测太阳极区的较差自转和子午环流。同时性且全球性的日震学速度场测量才能精确诊断太阳内部结构, 例如太阳长周期的扭转震荡^[41]。基于太阳立体多视角探测的日震学反演能精确推断太阳内部的结构和流动, 能揭示太阳对流区的经向环流, 从而解密太阳磁活动周期的起源^[26,42]。如果要揭示太阳磁活动周的起源, 就必须标定不同太阳纬度的平均场时序, 描述向极区冲浪式磁通迁移时必须充分考虑活动区黑子的倾斜、活动区总磁通、子午环流等综合物理因素。

日冕磁场扎根于光球层, 而光球层之下的对流层时刻存在子午环流的圈层对流。该机械对流运动通过对磁力线足点的晃动、拖曳、扭绞效应, 改变光球表面磁通分布和日冕三维磁场位形。日冕等离子体的多波段辐射特征结构显著依赖于太阳光球磁场的极性分布, 大致反映了日冕磁场的空间分布位形。在活动区内的强磁场区, 冕环横跨在光球磁场极性反转线的上方。不同活动区之间的相反极性也可以通过磁力线连接, 形成横跨宁静区的大尺度冕环。暗条 (日珥) 是悬浮在高温稀薄日冕大气中由低温高密度等离子体和相应支撑的磁场结构组成。暗条具有明显的手征性, 在太阳北半球具有负螺度, 而在南半球

表 2 太阳与日球物理领域悬而未决的重大科学问题及其对空间天气预报能力的严重制约、当前观测手段的欠缺以及未来的应对措施
Table 2 Major outstanding science problems in the field of solar and heliospheric physics, humankind's insufficient understanding of these problems resulting in serious limitation in space weather prediction capability, and current lack of observation methods and future remedies in monitoring the Sun

悬而未决的重大科学问题	科学认知不足的具体证据	空间天气预报能力的不足	当前对日观测手段的欠缺	亟待弥补的深空卫星观测能力
太阳活动区的三维复杂磁拓扑演化及其爆发机制	日冕磁绳的形成和爆发过程; 多个活动区之间的磁拓扑连接和交感爆发途径	对于复杂活动区的耀斑爆发, 基本无预报能力, 无法预报其发生时间和爆发强度	太阳磁场测量存在横场方向的180°不确定性; 缺乏单个太阳活动区从磁浮现至消亡的连续正视图观测	单个太阳活动区的多视角立体监测; 经度方向的多个视角拼接形成全周向视场, 持续接力而连续覆盖随太阳自转的太阳能活动区目标。期望3颗黄道星, 经向间隔120°, 每星都可提供至少arcsec及10 min量级分辨率的全日面太阳磁图
背景太阳风及其携带行星际磁场的三维大尺度空间结构及其时变演化规律	日球层电流片、日球层等离于体片、共转流相互作用区的三维立体结构; 行星际磁力线的三维位形及其日面开放场起源	仅能大致预报日地L1点处的背景太阳风和行星际磁场的日平均变化	仅有太阳自转卡灵顿周尺度的全日面综合磁场概图, 存在时空维度的插值光滑效应, 并且缺失太阳两极的磁场观测; 仅有地球固定视角和STEREO漂移视角的全日面极紫外观测和白光日冕观测; 缺少太阳极轨视角的遥感成像, 无法直接解析经度方向的结构信息	太阳南北两极的光球磁场测量和开放磁场监测; 太阳光球磁场测量的全球面覆盖, 实时追踪光球磁场中性线的动态变化; 低纬度全周向甚至全球面的全日面极紫外和白光日冕辐射监测。期望3颗黄道星和2颗太阳极轨星都可提供至少 arcsec 及10 min量级分辨率的全日面太阳磁图、至少arcsec及 min 量级分辨率的全日面多波段极紫外辐射图、至少10 arcsec及10 min量级分辨率的白光日冕图、至少 arcmin 及 30 min量级分辨率的白光日球图、磁强计、太阳风等离子体探测仪
日冕物质抛射CME的三维传播规律及其磁流特征	背景太阳风结构对CME传播的调控作用; CME携带动量、能量、总磁通、南向磁通的变化过程	对于CME传播至地球的到达时间, 统计平均的预报误差约为12 h; 无法预报CME南向磁通; 无法判断CME可能发生加减速和偏转的运动学传播轨迹	仅有地球固定视角和STEREO漂移视角的全日面极紫外观测、白光日冕观测、白光日球观测; 缺少太阳极轨视角的遥感成像, 无法直接解析经度方向的结构信息	环黄道面的多视角联合观测, 监测全日面极紫外辐射、白光日冕和日球辐射。期望3颗黄道星和1颗太阳极轨星, 每星都可提供至少 arcsec 及 min 量级分辨率的全日面多波段极紫外辐射图、至少10 arcsec及10 min量级分辨率的白光日冕图、至少 arcmin 及 30 min量级分辨率的白光日球图、磁强计、太阳风等离子体探测仪
太阳高能粒子SEP在低日冕的加速机理和行星际三维传播规律	SEP在低日冕的加速区域和加速效率; SEP在行星际传播时横越磁力线扩散的蓄水池效应	局限于黄道面内的二维SEP传播预报, 且以经验和统计分析为主	缺乏L5点的粒子探测, 不能提前预警对地CME产生的SEP事件	L5点的能量粒子监测, 低日冕的激波监测。期望1颗黄道星, 位于L5点, 提供至少10 arcsec及10 min量级分辨率的白光日冕图、多能段的高能粒子探测器
太阳磁活动周的演化规律	太阳极区磁场的极性反转; 极区磁场的双极磁浮现和可能的局地发电机过程; 较差自转和子午环流对光球磁通的大尺度输运效应	仍处于尝试探索阶段, 预报误差过大, 甚至不同方法的预报结果互相矛盾	仅有地球视角的太阳磁场测量, 太阳背面和太阳两极是探测盲区	太阳全球面(特别是太阳极区)的磁场和速度场成像。期望3颗黄道星和2颗太阳极轨星, 每星都可提供至少arcsec及10 min量级分辨率的全日面太阳磁图(其中速度场的时间分辨率率为 min 量级)

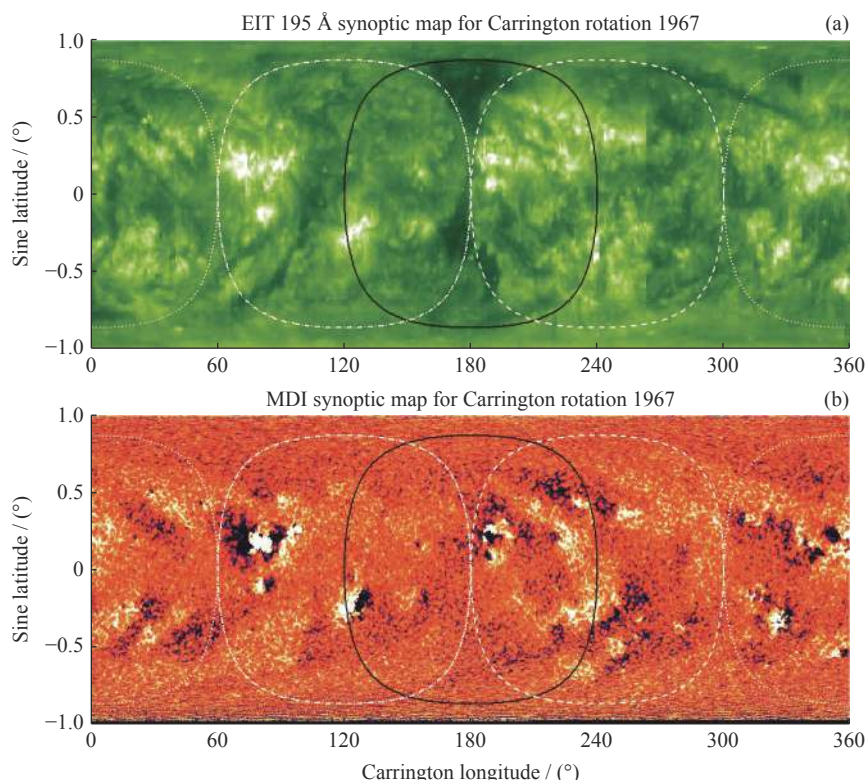


图2 SOHO 卫星在太阳卡灵顿周 1967 观测的全日面 EIT 极紫外概图 (a) 和 MDI 磁场概图 (b)。以 L1 点和太阳连线为轴, 60° 张角的圆锥视场在日面的投影用黑实线表示。相应地, 白点线、白虚线、白点划线分别表示 L3, L4, L5 点卫星成像视场在日面的投影

Fig. 2 Full-disk synoptic maps of EUV emission (a) and magnetogram (b) during the solar Carrington rotation period 1967, observed by EIT and MDI instruments onboard SOHO respectively. Supposing a hypothetic camera with its Field of View (FOV) subtended by an angle of 60° around the Sun-L1 line, the FOV projection on the solar map is denoted as one black solid line. Accordingly, the projections of FOVs from cameras at points L3, L4, and L5 are respectively plotted as white-dotted, white-dashed, and white dashed-dotted lines

具有正螺度。冕流结构作为宁静日冕中最明显的大尺度亮度结构,其日面底部包含有单个或多个靠拢的磁环系统,其腔内可能含有强剪切的核心磁场或磁通量绳结构,常可存在几天甚至超过一个太阳自转周。

太阳耀斑和 CME 等太阳大气爆发活动源自日冕磁能释放。当前,常规可靠的太阳大气磁场测量仅限于光球层,只能依赖光球磁场外推来计算日冕磁场,进而分析日冕中拓扑结构及其对应的物理参数变化。磁浮现、磁对消、磁旋转、磁剪切、磁运动等光球表面磁活动作为边界驱动条件,将新增的磁能、磁螺度等向上输运至日冕,导致太阳大气的磁能储存。具有高扭转量(twist)和低绞拧量(writhe)的磁通量管通过理想运动转变为低扭转量和高绞拧量的通量管^[43]。当磁绳内部磁力线的螺绕超过一定程度时,磁绳会发生旋转运动并抬升,表现为暗条的旋转爆

发^[44]。太阳大气爆发活动通常涉及磁场的奇点、拓扑分隔面、分隔线或准分隔面等奇异的磁拓扑结构,表现为磁通量的浮现和对消、强烈的横场剪切、相反极性磁场的挤压和相互作用以及磁场螺度和电流螺度的变化等多样的演化形态。例如,耀斑通常发生于活动区光球磁场的中性线上方,伴随等离子体团的抛射过程,并引发快速磁重联过程,在其下方新生成跨越中性线的环状磁力线;CME 起源于光球层小尺度的复杂磁活动,最终形成于日冕中大尺度的磁场拓扑结构的突然改变和磁能释放,表现从低日冕到行星际空间的大尺度物质和磁通量的抛射过程,同时日面爆发源区在极紫外波段有明显的暗化和波动现象。

科学目标 2: 揭示太阳风暴的三维磁流结构及其在日地空间的传播和演化过程

CME 是灾害性空间天气事件最主要的驱动源,

能在行星际空间乃至地球空间造成剧烈扰动,包括引起各类波动、造成磁场堆积、产生高通量的能量粒子、激发射电暴、形成太阳高能粒子事件、引起地磁暴等一系列现象。CME 白光成像特征有前方的亮鞘区、内部的暗腔、丝状结构、尾随的尖点^[20]。CME 就位观测特征有双向超热电子流、氦离子丰度增加、强磁场、低的质子温度、低质子 β 值(质子热压与磁压的比值)、不寻常的电离状态等。磁云作为行星际 CME 极其重要的子集,表现为绕中心轴缠绕的磁通量绳结构,被认为日冕磁绳爆发而逃逸至行星际空间的对应体^[45]。行星际磁绳内圈可以缠得比外圈更紧,并且磁绳的总缠绕度的上限由 2 倍的纵横比(2 倍磁绳的轴长和半径的比值)决定^[46]。观测结果统计表明,在 1 AU 处磁云的直径大约 0.28 AU,持续时间大约 25 h。磁云被广泛认为是中等以上地磁暴的主要行星际起源,因为其携带大的南向磁场分量。

CME 日地空间传播的白光影像的形态学表现显著依赖于天基白光日冕仪和日球仪的观测视角。白光遥感信号接收到的是沿视线方向的积分效应,涉及电子密度的加权。该权重因子取决于光源、散射体、接收者之间的相对几何位置,即由白光的汤姆逊散射球决定^[37]。基于 L1 点的 SOHO / LASCO 日冕仪仅能直接测量天空平面内边缘 CME 的运动速度,对地 CME 初始抛射速度及其方位的测量误差严重限制当前灾害性空间天气数值预报水平。如图 3 所示,以行星际磁云正对地球的传播为例,基于黄道面 L4 点和 L5 点以及太阳极轨的天基白光日球仪通过“侧视”日地连线,从而有效消除汤姆逊散射的内禀观测效应,因此能清晰地连续捕捉该磁云日地传播的白光辐射影像。基于 L4 和 L5 点卫星所观测的双视角成像,利用三角剖分法^[47]、几何球面相切法^[48]、相关性重构法^[49]等白光影像分析方法,可反演每次成像时间点所对应的 CME 的位置,从而实时跟踪对地 CME 的扰动传播阵面。而脱离黄道面的太阳极轨成像视角能清晰连续地捕捉黄道面附近 CME 运动的白光辐射像,并直接观测分辨行星际 CME 影像在经度方向的结构特征。基于太阳极轨的观测视角,不仅可以为日地空间天气建模提供太阳风暴的初始参数输入,而且还可以为数值预报结果提供黄道面内扰动传播的成像观测检验^[50,51]。

太阳高能粒子 SEP (Solar Energetic Particle,

SEP) 分为脉冲型和渐进型两类,其分别归因于太阳耀斑和 CME。脉冲 SEP 事件是太阳耀斑过程中通过磁场重联加速粒子形成,脉冲强度小,发生频率高,持续时间一般为几小时。渐进 SEP 事件是由快速 CME 驱动的激波加速粒子形成的。CME 激波加速能产生高达数十 MeV/n 甚至 GeV/n 量级的持续数天的 SEP,且这些 SEP 在行星际传播时会发生横越磁力线扩散的蓄水池效应。SEP 事件强度取决于激波强度、激波形状、激波加速效率、种子粒子分布等综合因素。此外,由于行星际磁场的螺线形态,在 L5 点部署的能量粒子探测器可提前观测到朝向地球爆发 CME 事件产生的高能粒子,从而提前预警 SEP 事件^[52]。综合利用黄道面 L3 点、L4 点、L5 点卫星和太阳极轨卫星的多点就位测量,可以揭示高能粒子在日冕和日球层的加速、传输、分布。

CME 在行星际空间传播过程中受自身演化、背景磁场和太阳风的影响,同时也受在传播途中所遭遇的激波和其他 CME 等行星际瞬变空间结构的影响。关于到达地球的 CME,其日面源区呈现明显东西不对称性的现象^[53,54]。快 CME 事件的日地传播过程可分为三相:脉冲加速相、急剧减速相、近常速传播相。其中,急剧减速相表明 CME 能量可以耗散在行星际空间。慢 CME 事件的日地传播过程仅表现为二相,即缓慢加速相以及近常速传播相。根据不同速度事件之间的比较,CME 速度越大,加速和减速越快,加速和减速的距离越短^[55]。此外,行星际 CME 在传播中会向日球层电流片方向偏转和会聚,该电流片阻碍行星际扰动的跨越传播^[56]。多个续发的 CME 很有可能发生相互碰撞,从而形成更复杂的行星际扰动结构(例如复合流^[57]、多重磁云^[58]、激波穿越磁云^[59])。行星际复合结构的动力学响应和后随地磁效应显著受控于多个 CME 之间的碰撞过程^[60,61]。超级太阳风暴事件本质上归因于完美风暴的假说^[62]。完美风暴是指多种条件汇聚在一起使得事件强度大大增加。CME 的初始抛射速度、与周围背景太阳风介质的相互作用、传播轨迹、到达时间是空间天气预报的关键要素。太阳风暴的行星际过程具有重要的桥梁和纽带作用,把空间天气变化源头的输出信息——“因”与地球空间系统的空间天气最终的响应变化——“果”连接起来。如图 3 所示,太阳大气以及内日球层的多视角稳定监测系统能够无缝且常态化监测太阳风暴的

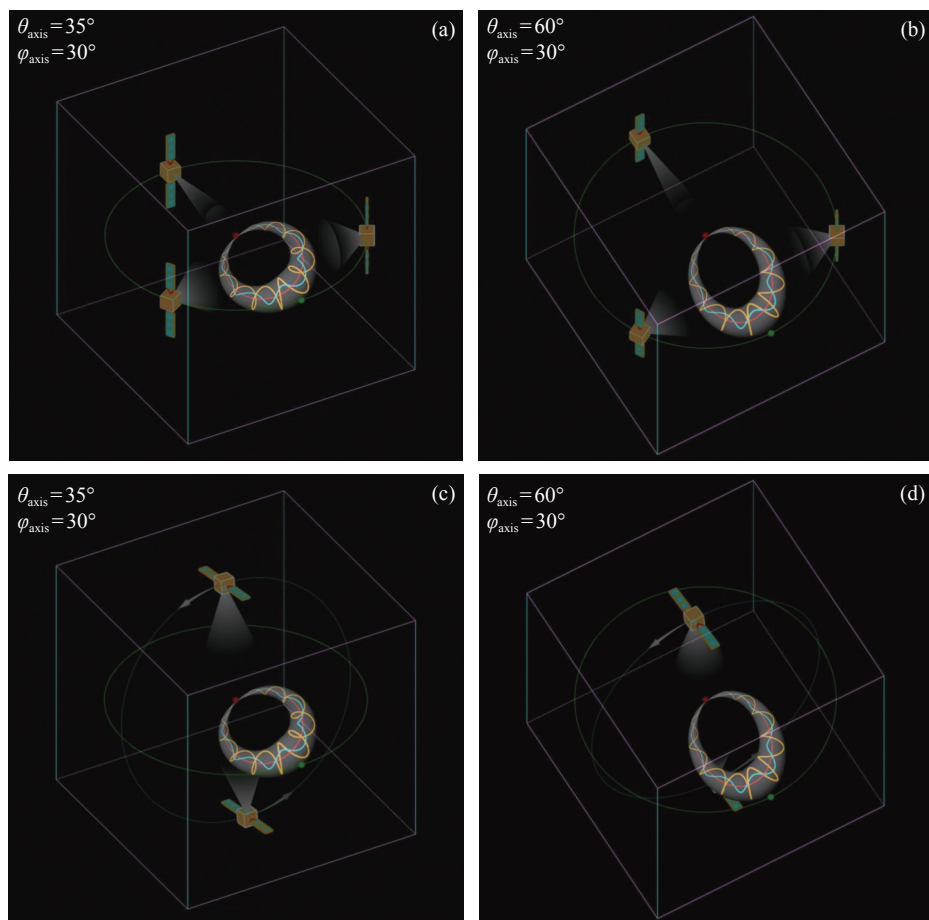


图3 黄道面 L3-L4-L5 星座和太阳极轨对偶双星对行星磁云（磁通量绳）的成像观测结果。（a）（c）和（b）（d）分别表示日球层中纬和高纬的显示视角。红点和绿点分别表示太阳与地球位置。

绿线表示黄道面内的 1 AU 圆轨道，灰黑线表示太阳极轨

Fig. 3 Stereoscopic imaging effect of interplanetary magnetic cloud (also called as magnetic flux rope) observation from a L3-L4-L5 satellite constellation in the ecliptic and twin satellites along a solar polar orbit. The viewing angles from intermediate and high latitudes of the heliosphere are respectively shown in panels (a)(c) and (b)(d). Here, the red dot, green dot, green line, and dark gray line are used to denote the Sun, Earth, ecliptic orbit, and polar orbit, respectively

先兆、初发、传播、演化等全链条物理过程。

科学目标 3: 解密太阳风的日面起源、内冕加速、行星际三维大尺度空间结构

太阳风是由太阳大气持续向行星际空间发出的超音速磁化等离子体流，充满整个日球层，包裹地球磁层并影响其空间环境变化。太阳风等离子体流主要由电子和质子构成，也包括少量氦核及微量重离子成分。根据 1 AU 处的太阳风就位测量结果，太阳风可归类为高速流和低速流。高速流来自冕洞，被认为是起源于日冕漏斗状开放磁结构，其日面投影对应于色球网络组织^[11]。延伸至赤道附近的大冕洞是地球

轨道附近重现性高速流的源头。冕羽是冕洞内最显著的特征结构之一，表现为扎根在日冕底部一直延伸到高日冕的射线状结构，其位形与冕洞开放磁力线一致。极羽和极羽间隙被认为是太阳风高速流的两种重要潜在管道。要认识冕羽与太阳风起源的关联程度，冕洞中冕羽的填充率是其中的关键要素之一。由于受限于日冕辐射光学薄效应导致的投影重叠，单视角成像观测很难确切获得冕洞（尤其是极区冕洞）中的冕羽填充率^[63]。低速流主要来自冕流及其附近区域、太阳中低纬的活动区边缘、小的瞬时冕洞^[64]，其太阳风参数的变化程度较大。根据 SOHO/UVCS 光

谱观测, 低速流太阳风中的元素丰度与冕流边缘部位的量值一致。根据 HINODE/XRT 成像观测, 低速太阳风源区对应于太阳活动区边缘辐射暗区中的一些亮结构^[65]。行星际太阳风速度、磁场强度、电流片倾角等物理参数都与太阳活动周有关, 存在周期性变化。在太阳活动极小期, 日球层太阳风呈现“高速流-低速流”双态结构。在太阳活动极大期, 绝大部分日球层都被来自活动区的低速流所填充。

太阳风的能量来源和具体的供能机制是揭示太阳风本质的物理基础。太阳风必须有持续不断的能量供应, 以维持高温、超音速、无碰撞的等离子体流。太阳风离子表现出强烈的动理学温度的各向异性, 少数离子被优势地加速和加热。太阳风的流动被认为是太阳表面磁场开放区日冕物质和能量注入的自然后果。一方面, 亚光球层次的对流运动可将机械能以磁流体力学波动注入开放磁流管中并通过湍动耗散等机制将其中物质加热到日冕温度, 形成向外压强梯度而自然地提供太阳风的起始加速; 另一方面, 对流导致光球表面的随机运动可引起太阳高层大气中闭合磁场结构与开放场结构的磁重联, 使其中的热等离子体被释放到开放磁流管中, 并在此过程中利用释放的磁能获得初步加速, 进而形成初始太阳风。

行星际空间沉浸在超音速太阳风流中, 其全球大尺度背景结构包括高速流、低速流、共转流相互作用区 (Corotating Interaction Region, CIR)、日球层电流片、日球层等离子体片、螺旋形行星际磁场等。当前, 缺乏太阳极轨视角的极区磁场观测, 仅能依赖光球磁通运输模型等数据同化措施来间接推断极区磁场分布, 进而利用日冕磁场外推模型来估算太阳开放磁通量。但该太阳开放磁通量的模型估算值显著低于行星际磁场的就地测量值, 即为“太阳开放磁通量之谜”^[66]。太阳极区附近的磁通量输运和太阳风起源都显著影响日球层高纬度行星际磁场的拓扑形态^[67]。此外, CIR 源于太阳风高速流对低速流的追赶和挤压, 其压缩效应能增强行星际的南向磁场分量。在 CIR 内及其附近观测到量级为几 keV 至几 MeV 的高能粒子, 最高可能达到 10 MeV 量级。CIR 随太阳自转, 不但是 27 天重现性的中等地磁暴的行星际起源, 而且是日球层中一个持续有效的高能粒子源。L3-L4-L5 多点卫星的就位观测能获得环黄道面不同经度位置上太阳风等离子体和行星际磁场参数。图 4

给出黄道面 L3-L4-L5 星座对共转流相互作用区 CIR 的立体成像效果^[68]。考虑到 CIR 随太阳自转以及 L5 点相对地球的经度差异, L5 点卫星的粒子探测器通过局地测量太阳风磁场、等离子体、高能粒子, 能早于地球几天探测到 CIR, 从而提前几天预报 CIR 扫过地球的物理状态。此外, 太阳极轨成像卫星通过“鸟瞰全景”方式来监视内日球层的中低纬度区域, 能分辨背景太阳风和 CME 瞬态扰动的经度结构^[50,51]。

3 科学载荷配置建议

针对太阳与内日球立体探测卫星计划的科学目标, 表 3 给出其对应的探测区域和科学载荷配置。这些遥感成像和就位测量的仪器可归纳为成像类、粒子类、波场类载荷。遥感探测能覆盖大天区, 但其是积分量; 就位探测能以高时间分辨率作磁场、流场、等离子体成分的局地采样, 但其是单颗卫星, 无空间分辨率。不同观测方法获得的信息是不同的, 其之间能相互补充。以行星际 CME 的探测为例, 遥感成像能追踪其大尺度等离子体团的行星际运动, 就位探测能从其局地剖面中认证磁流结构的物理特性。基于 STEREO 卫星遥感成像和就位探测量的联合分析, 证实日冕磁通量绳逃逸至行星际空间的产物是磁云^[20]。因此, 只有综合利用多视角遥感和多点就位测量, 才能实现太阳与日球层的全方位、多波段、多要素探测。

根据科学目标的载荷配置, 论证每台载荷的技术设计方案、工作状态模式、功耗和数据传输需求。表 4 初步给出每台载荷的视场范围、视角分辨率、测量灵敏度、时间分辨率等技术参数, 确保这批载荷组合能够支撑该卫星计划的科学目标。表 4 所列载荷名称和技术参数可按需适当调整, 例如极紫外成像仪的工作波段可增加 304Å 和 171Å, 太阳遥感仪器可增加 X 射线能谱仪和成像仪、极紫外狭缝光谱仪, 行星际就位测量仪器可增加中性原子成像仪、低频电磁波探测器、低能电子探测器等。科学载荷的最终遴选及其技术指标确定必须充分考虑卫星平台、火箭运力、卫星能源、深空数传等工程现实约束。以中国第一个科学实验卫星“地球空间双星探测计划”^[69](赤道星 2003 年和极轨星 2004 年)以及第一个太阳观测卫星“先进天基太阳天文台”^[70](2022 年)为里程碑标志, 中国已掌握磁像仪、极紫外成像仪、日冕仪、磁强计、

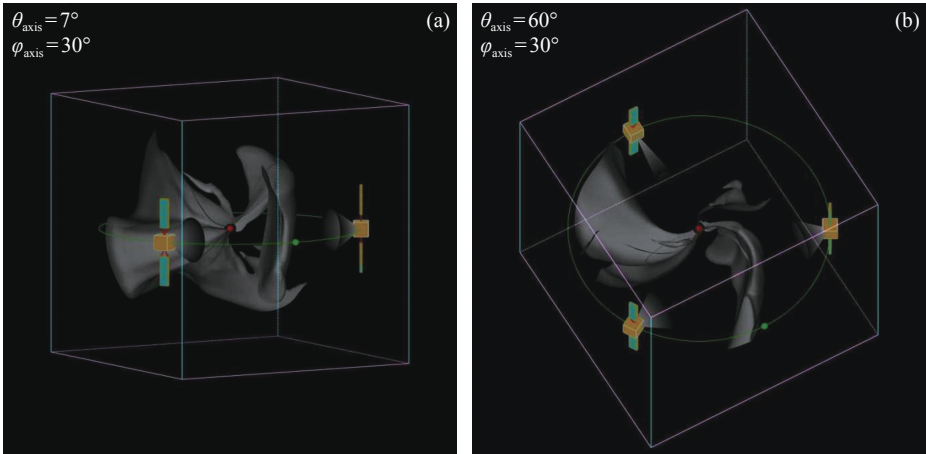


图 4 黄道面 L3-L4-L5 星座对共转流相互作用区 (CIR) 的立体成像效果。(a) 和 (b) 分别表示日球层赤道和高纬的显示视角。CIR 三维密度分布数据来自观测数据驱动的内日球磁流体数值模拟

Fig. 4 Stereoscopic imaging effect of Corotating Interaction Region (CIR) observation from a L3-L4-L5 satellite constellation in the ecliptic. The viewing angles from ecliptic and high latitudes of the heliosphere are respectively shown in panels (a) and (b). Here, the three-dimensional density distribution data of CIRs is generated from a data-driven numerical magnetohydrodynamic simulation of the inner heliosphere

表 3 太阳与内日球立体探测卫星计划的科学目标及载荷配置的对应关系

Table 3 Scientific objectives and payload configuration of satellite constellation mission to explore the Sun and the inner heliosphere in three dimensions

科学目标	探测区域	科学载荷
发现太阳全球整体磁场活动规律、太阳活动区磁拓扑结构及其爆发机制、太阳磁活动周起源以及这三者之间跨时空尺度的物理关联	太阳内部结构和太阳低层大气(光球、色球、过渡区、内冕)	遥感成像(磁像仪、极紫外多波段成像仪、日冕仪)
揭示太阳风暴的三维磁流结构及其在日地空间的传播和演化过程	太阳中高日冕、行星际空间	遥感成像(日冕仪、日球仪、射电暴频谱仪); 就位测量(太阳风等离子体探测器、磁强计、高能离子探测器、高能重离子成分探测器)
解密太阳风的日面起源、内冕加速、行星际三维大尺度空间结构	完整太阳大气、行星际空间	遥感成像(磁像仪、极紫外多波段成像仪、日冕仪、日球仪); 就位测量(太阳风等离子体探测器、磁强计)

等离子体探测器、高能粒子探测器等天基载荷核心技术,具备高等级的载荷技术成熟度,完全能够研发表 4 所列的科学观测载荷。

4 日地空间天气的数值预报

太阳风暴数值模拟为日地空间物理研究提供虚拟可控的仿真实验室,用于研究太阳爆发活动和行星际扰动传播,并为空间天气数值预报提供定量分析工具。当前,空间天气预报处于从经验定性的雏形阶段向定量可靠的成熟阶段转换的关键时期,与实际需求

还有较大差距。当前,迫切需要发展观测数据驱动的日地空间天气精准建模,建立基于物理的日地系统连锁变化过程的集成模式框架,突破日地空间天气的数值预报瓶颈。

观测数据驱动的日地空间天气数值磁流体模拟不仅能揭示太阳风暴在“日冕发生-行星际空间传播-地球空间响应”全链路的动力学过程,而且能预测太阳风暴抵达地球的时间、强度及其引发的空间天气效应。基于磁流体方程的太阳风暴数值研究已经从初期定性的原理性理论研究过渡到对具体事件的系统性定量研究和数值试预报阶段。中国的 SIP-CESE

表 4 太阳与内日球立体探测卫星计划的科学载荷关键技术参数
Table 4 Key technological parameters of scientific payloads accommodated by a satellite constellation mission to explore the Sun and the inner heliosphere in three dimensions

	科学载荷名称	关键技术参数
谱像遥感 探测载荷	全日面磁场和速度场成像仪	视场: 33' 分辨率: 2'' pixel ⁻¹ 工作波长: 5324 Å 磁场精度: 纵场5 Gauss, 横场150 Gauss, 时间分辨率 10 min 速度精度: 灵敏度20 m·s ⁻¹ , 时间分辨率1 min
	全日面极紫外成像仪	视场: 45' 分辨率: 1.5'' pixel ⁻¹ 时间分辨率: 3 min 工作波段: 1216 Å, 131 Å
	白光日冕仪	视场: 1.5~30 R _s 分辨率: 15'' pixel ⁻¹ 时间分辨率: 10 min 带宽: 650~750 nm 杂散光抑制能力: 10 ⁻¹² B _⊙
	白光日球仪	视场: 30~215 R _s 分辨率: 1.2' pixel ⁻¹ 时间分辨率: 30 min 带宽: 630~730 nm 杂散光抑制能力: 10 ⁻¹⁴ B _⊙
粒子就位 探测载荷	太阳风等离子体探测器	视场: 6.7° × 180°扇面 极角分辨: 6° 方位角分辨: 15° 时间分辨率: 1 min 能段: 0.05~20 keV
	磁强计	量程范围: ± 256 nT 噪声水平: < 0.01 nT·Hz ^{-1/2} @ 1 Hz 时间分辨率: 0.1 s
	高能粒子探测器	视场: 40° 质子能段: 4~400 MeV 电子能段: 0.1~2 MeV 时间分辨率: 10 s
	高能重离子成分探测器	视场: 40° 元素范围: 2 < Z < 26 能量: 8~100 MeV/n 时间分辨率: 10 s
	太阳射电暴探测器	频率: 10 kHz~16 MHz 灵敏度: 5 nV·Hz ^{-1/2} 动态范围: 120 dB 时间分辨率: 1 s

模式利用太阳与行星际的多卫星观测,以太阳光球磁场等连续观测作为时变模式的连续驱动边界条件,重构太阳活动区的非势性的三维磁场位形,把对太阳风加速加热机制研究的新成果融入三维太阳风背景模式研究中,再现冕流和冕洞等日冕全球结构及其演化趋势,使之可以呈现数月至数年变化且接近物理实际的太阳风背景,具有真实重现太阳风大尺度结构和太阳爆发事件在日球层的传播和演化过程的能力,所得

到 1 AU 处的太阳风密度、速度和磁场结构等参数变化特征基本符合实际卫星就位观测^[71,72]。

5 总结与展望

当前国际上,太阳与日球层的空间探测及科学研究正处于蓬勃发展的黄金时代。随着 STEREO, SDO, PSP, SoI/O, ASO-S 等卫星的在轨观测服役,日

冕和日球层联系偏振计(Polarimeter to UNify the Corona and Heliosphere, PUNCH)四颗微卫星星座^[73]、太阳风磁层相互作用全景成像卫星 Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer(SMILE)^[74]等卫星也即将发射升空,预期必将突破太阳物理学和空间物理学领域的重大科学前沿,极大地促进人类对太阳、日地空间、行星空间乃至整个日球层的深刻认知。根据中国深空探测蓝图战略规划,除了已经工程立项的 ASO-S 和 SMILE 卫星计划,中国正在积极推动行星际 L5 观测台^[75]、环日全景探测^[76]、太阳立体探测^[77]、太阳抵近探测^[78]、太阳极轨天文台^[79]、空间天气极紫外探冕^[80]等卫星计划。中国太阳物理和空间物理研究正与探测工程项目深度融合,在引领学科发展潮流中探索,在服务国家战略需求中前行^[81]。

中国近年来提出的太阳立体探测计划拟适时部署环黄道面的拉格朗日点 L3-L4-L5 定点卫星星座和脱离黄道面的太阳极轨对偶卫星,组网形成太阳内部结构、太阳大气以及内日球层的立体监测系统,有望在“与日共存”日球层卫星协同观测网的国际合作框架中起不可替代的引领和主导作用。建议将太阳立体探测卫星计划的科学目标定位于太阳磁场、太阳风暴、太阳风,将应用目标定位于观测数据驱动的日地空间天气数值预报,配置成像类、粒子类、波场类的综合科学载荷。科学目标与载荷配置的深化论证是该太阳立体探测计划开展的前提。表 5 给出多卫星组网的分级配置及其对应的监测功能。建议太阳立体探测计划项目的后续推动中,综合考虑科学目标的先进性和卫星工程实现的可行性,采用多次卫星发射的逐步组网步骤,充分保障载荷观测数据的科学应用系统。

当前,中国已提出多个黄道面探测卫星星座计划概念。这些环日星座的卫星轨道设计存在显著的差异。除了本文所提的日地系统引力平衡 L3-L4-L5 点

卫星星座,还有从日地 L5/L4 点卫星概念演变而来的环日全景探测计划^[76]。环日全景探测任务是由远地星、侧向星、近地星组成的太阳环,其星地通信距离有所缩短,其远地星无日凌。该三颗星都围绕太阳运行,彼此将相隔 120° 的经度,能与地球间歇组成 30° 相位角,入轨后对地和对日的卫星指向固定,并配有相同的科学载荷,从而实现太阳与日地空间的全周向全景监测。

由于首颗太阳极轨卫星 Ulysses(在轨服役期 1990—2009 年)仅携带就位观测载荷^[34],国内外早已谋划并尝试推动的多项太阳极轨成像卫星概念和计划^[82],例如 POLAR Investigation of the Sun (POLARIS)^[83]、Solar Polar ORbit Telescope (SPORT)^[84,85]、太阳极轨天文台^[79]。如果国内外的某个太阳极轨成像望远镜卫星计划能够在未来真正工程实施,那么脱离黄道面的太阳极轨成像视角将能够首次直接“俯视”太阳高纬地区和行星际低纬黄道面,首次填补太阳南北两极区的遥感成像盲区。

未来潜在的环日黄道面视角和太阳极轨视角的联合将能够覆盖太阳球面的任意经纬度区域,对太阳与内日球层形成前所未有的全方位、多波段、多要素的立体观测。中国太阳与内日球立体探测卫星计划的规模宏大,建议采用由易到难的分步实施策略。该宏大卫星计划的成功实施必将能揭示太阳磁场的起源规律及其爆发机理、日地耦合系统的空间天气变化机理,并能为日地空间天气三维数值建模提供观测数据驱动的初边值条件,从而极大推动中国空间天气的立体监测、前沿研究、精准预报的一体化进程,必将引领国际空间科学发展和带动中国空间技术创新。

致谢 本文艺术插图使用国家子午工程行星际闪烁射电望远镜数据处理软件的三维可视化模块。观测数据来自欧美合作研制 SOHO 卫星的 MDI 磁像仪和 EIT 极紫外成像仪。

表 5 太阳与内日球立体探测的卫星星座构成及其监测功能实现

Table 5 Constituent satellites and their corresponding observation capability of satellite constellation mission to explore the Sun and the inner heliosphere in three dimensions

卫星组网	卫星组成	监测功能
最简配置	L5点卫星	日地连线
简化配置	L4, L5点卫星	太阳与内日球的中低纬区域(除背面的经度范围)
完整配置	L3, L4, L5点卫星	太阳与内日球的中低纬区域(全周向的经度范围)
拓展配置	L3, L4, L5点卫星; 太阳极轨的单星或双星	太阳与内日球的全三维空间(无盲区)

参考文献

- [1] BALOGH A, LANZERO L, SUESS S T. The Heliosphere Through the Solar Activity Cycle[M]. Berlin: Springer, 2010
- [2] Committee on a Decadal Strategy for Solar and Space Physics, Space Studies Board, Aeronautics and Space Engineering Board, *et al.* Solar and Space Physics: A Science for a Technological Society[M]. Washington: The National Academies Press, 2013
- [3] WEI Fengsi. Space weather[J]. *Progress in Geophysics*, 1999, **14**(S1): 1-7 (魏奉思. 空间天气学[J]. *地球物理学进展*, 1999, **14**(S1): 1-7)
- [4] WANG Jingxiu, JI Haisheng. Recent advances in solar storm studies in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, **56**(7): 1091-1117 (汪景琇, 季海生. 空间天气驱动源——太阳风暴研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, **56**(7): 1091-1117)
- [5] National Science and Technology Council. National Space Weather Strategy: Space Weather Operations, Research, and Mitigation (SWORM) Task Force[M]. Washington: Executive Office of the President of the United States, 2015
- [6] THOMPSON M J, TOOMRE J, ANDERSON E R, *et al.* Differential rotation and dynamics of the solar interior[J]. *Science*, 1996, **272**(5266): 1300-1305
- [7] TURCK-CHIEZE S, COUVIDAT S. Solar neutrinos, helioseismology and the solar internal dynamics[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2011, **74**(8): 086901
- [8] SCHRIJVER C J, TITLE A M, VAN BALLEGOOIJEN A A, *et al.* Sustaining the quiet photospheric network: the balance of flux emergence, fragmentation, merging, and cancellation[J]. *The Astrophysical Journal*, 1997, **487**(1): 424-436
- [9] YASHIRO S, GOPALSWAMY N, MICHALEK G, *et al.* A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A7): A07105
- [10] TSURUTANI B T, JUDGE D L, GUARNIERI F L, *et al.* The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: comparison to other Halloween events and the bastille day event[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(3): L03S09
- [11] TU C Y, ZHOU C, MARSCH E, *et al.* Solar wind origin in coronal funnels[J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 519-523
- [12] KOHL J L, NOCI G, ANTONUCCI E, *et al.* UVCS/SOHO empirical determinations of anisotropic velocity distributions in the solar corona[J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, **501**(1): L127-L131
- [13] THOMPSON B J, PLUNKETT S P, GURMAN J B, *et al.* SOHO/EIT observations of an Earth-directed coronal mass ejection on May 12, 1997[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(14): 2465-2468
- [14] KOSOVICHEV A G, ZHARKOVA V V. X-ray flare sparks quake inside sun[J]. *Nature*, 1998, **393**(6683): 317-318
- [15] PIKE C D, MASON H E. Rotating transition region features observed with the SOHO coronal diagnostic spectrometer[J]. *Solar Physics*, 1998, **182**(2): 333-348
- [16] ZHAO J W, KOSOVICHEV A G, DUVALL T L JR. Investigation of mass flows beneath a sunspot by time-distance helioseismology[J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, **557**(1): 384-388
- [17] TERIACA L, BANERJEE D, FALCHI A, *et al.* Transition region small-scale dynamics as seen by SUMER on SOHO[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, **427**(3): 1065-1074
- [18] BIESECKER D A, LAMY P, ST CYR O C, *et al.* Sun-grazing comets discovered with the SOHO/LASCO coronagraphs 1996-1998[J]. *Icarus*, 2002, **157**(2): 323-348
- [19] HARRISON R A, DAVIS C J, EYLES C J, *et al.* First imaging of coronal mass ejections in the heliosphere viewed from outside the Sun - Earth line[J]. *Solar Physics*, 2008, **247**(1): 171-193
- [20] DEFOREST C E, HOWARD T A, TAPPIN S J. Observations of detailed structure in the solar wind at 1 AU with STEREO/HI-2[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, **738**(1): 103
- [21] MCCOMAS D J, BARRACLOUGH B L, FUNSTEN H O, *et al.* Solar wind observations over Ulysses' first full polar orbit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A5): 10419-10433
- [22] MCCOMAS D J, ELLIOTT H A, SCHWADRON N A, *et al.* The three-dimensional solar wind around solar maximum[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(10): 1517
- [23] MCCOMAS D J, EBERT R W, ELLIOTT H A, *et al.* Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole sun[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(18): L18103
- [24] LIU W, OFMAN L. Advances in observing various coronal EUV waves in the SDO era and their seismological applications (invited review)[J]. *Solar Physics* 2014, **289**(9): 3233-3277
- [25] BOBRA M G, COUVIDAT S. Solar flare prediction using SDO/HMI vector magnetic field data with a machine-learning algorithm[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **798**(2): 135
- [26] ZHAO J W, BOGART R S, KOSOVICHEV A G, *et al.* Detection of equatorward meridional flow and evidence of double-cell meridional circulation inside the Sun[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **774**(2): L29
- [27] WOODS T N, HOCK R, EPARVIER F, *et al.* New solar extreme-ultraviolet irradiance observations during flares[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, **739**(2): 59
- [28] KASPER J C, BALE S D, BELCHER J W, *et al.* Alfvénic velocity spikes and rotational flows in the near-sun solar wind[J]. *Nature*, 2019, **576**(7786): 228-231
- [29] BALE S D, BADMAN S T, BONNELL J W, *et al.* Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole[J]. *Nature*, 2019, **576**(7786): 237-242

- [30] MCCOMAS D J, CHRISTIAN E R, COHEN C M S, *et al.* Probing the energetic particle environment near the Sun[J]. *Nature*, 2019, **576**(7786): 223-227
- [31] HOWARD R A, VOURLIDAS A, BOTHMER V, *et al.* Near-Sun observations of an F-corona decrease and K-corona fine structure[J]. *Nature*, 2019, **576**(7786): 232-236
- [32] MIERLA M, ZHUKOV A N, BERGHMANS D, *et al.* Prominence eruption observed in He II 304 Å up to $>6 R_{\odot}$ by EU/FSI aboard solar orbiter[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, **662**: L5
- [33] BERGHMANS D, AUCHÈRE F, LONG D M, *et al.* Extreme-UV quiet sun brightenings observed by the solar orbiter/EUI[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **656**: L4
- [34] WENZEL K P, MARSDEN R G, PAGE D E, *et al.* The Ulysses mission[J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 1992, **92**(2/JAN): 207
- [35] FOX N J, VELLI M C, BALE S D, *et al.* The solar probe plus mission: humanity's first visit to our star[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **204**(1/2/3/4): 7-48
- [36] MÜLLER D, MARSDEN R G, ST CYR O C, *et al.* Solar orbiter: exploring the sun-heliosphere connection[J]. *Solar Physics*, 2013, **285**(1/2): 25-70
- [37] XIONG M, DAVIES J A, BISI M M, *et al.* Effects of Thomson-scattering geometry on white-light imaging of an interplanetary shock: synthetic observations from forward magnetohydrodynamic modelling[J]. *Solar Physics*, 2013, **285**(1/2): 369-389
- [38] ZHOU Ruyun, WANG Yuming, SU Yingna, *et al.* Using observations of solar vector magnetic field from dual view points to remove the 180° ambiguity[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2021, **62**(4): 41 (周茹芸, 汪毓明, 宿英娜, 等. 利用双视角改正太阳矢量磁场观测中的180°不确定性[J]. *天文学报*, 2021, **62**(4): 41)
- [39] ZHOU G P, WANG J X, WANG Y M, *et al.* Quasi-simultaneous flux emergence in the events of October-November 2003[J]. *Solar Physics*, 2007, **244**(1/2): 13-24
- [40] CAMERON R, SCHÜSSLER M. The crucial role of surface magnetic fields for the solar dynamo[J]. *Science*, 2015, **347**(6228): 1333-1335
- [41] GIZON L, CAMERON R H, BEKKI Y, *et al.* Solar inertial modes: observations, identification, and diagnostic promise[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **652**: L6
- [42] GIZON L, CAMERON R H, POURABDIAN M, *et al.* Meridional flow in the Sun's convection zone is a single cell in each hemisphere[J]. *Science*, 2020, **368**(6498): 1469-1472
- [43] PRIEST E R, LONGCOPE D W. The creation of twist by reconnection of flux tubes[J]. *Solar Physics*, 2020, **295**(3): 48
- [44] TÖRÖK T, KLIEM B. Confined and ejective eruptions of kink-unstable flux ropes[J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, **630**(1): L97-L100
- [45] BURLAGA L, SITTLE E, MARIANI F, SCHWENN R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A8): 6673-6684
- [46] WANG Y M, ZHUANG B, HU Q, *et al.* On the twists of interplanetary magnetic flux ropes observed at 1 AU[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(10): 9316-9339
- [47] LIU Y, DAVIES J A, LUHMANN J G, *et al.* Geometric triangulation of imaging observations to track coronal mass ejections continuously out to 1 AU[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, **710**(1): L82-L87
- [48] LUGAZ N, HERNANDEZ-CHARPAK J N, ROUSSEV I I, *et al.* Determining the azimuthal properties of coronal mass ejections from multi-spacecraft remote-sensing observations with STEREO SECCHI[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, **715**(1): 493-499
- [49] LYU S Y, WANG Y M, LI X L, *et al.* Three-dimensional reconstruction of coronal mass ejections by the correlation-aided reconstruction technique through different stereoscopic angles of the solar terrestrial relations observatory twin spacecraft[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **909**(2): 182
- [50] XIONG M, DAVIES J A, HARRISON R A, *et al.* Prospective out-of-ecliptic white-light imaging of coronal mass ejections traveling through the corona and heliosphere[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **852**(2): 111
- [51] XIONG M, DAVIES J A, FENG X S, *et al.* Prospective white-light imaging and in situ measurements of quiescent large-scale solar-wind streams from the Parker Solar Probe and Solar Orbiter[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **868**(2): 137
- [52] BEMPORAD A. Possible advantages of a twin spacecraft heliospheric mission at the Sun-Earth Lagrangian points L4 and L5[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2021, **8**: 627576
- [53] WANG Y M, YE P Z, WANG S, *et al.* A statistical study on the geoeffectiveness of Earth-directed coronal mass ejections from March 1997 to December 2000[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A11): 1340
- [54] ZHANG J, DERE K P, HOWARD R A, *et al.* Identification of solar sources of major geomagnetic storms between 1996 and 2000[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, **582**(1): 520-533
- [55] LIU Y D, HU H D, WANG C, *et al.* On sun-to-Earth propagation of coronal mass ejections: II. Slow events and comparison with others[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **222**(2): 23
- [56] WEI F S, DRYER M. Propagation of solar flare-associated interplanetary shock waves in the heliospheric meridional plane[J]. *Solar Physics*, 1991, **132**(2): 373-394
- [57] BURLAGA L F, BEHANNON K W, KLEIN L W. Compound streams, magnetic clouds, and major geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, **92**(A6): 5725
- [58] WANG Y M, YE P Z, WANG S. Multiple magnetic clouds: several examples during March-April 2001[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A10): 1370
- [59] WANG Y M, YE P Z, WANG S, *et al.* An interplanetary

- cause of large geomagnetic storms: fast forward shock overtaking preceding magnetic cloud[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(13): 1700
- [60] XIONG M, ZHENG H N, WANG Y M, *et al.* Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between interplanetary strong shock and magnetic cloud and its consequent geoeffectiveness[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A8): A08105
- [61] XIONG M, ZHENG H N, WU S T, *et al.* Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between two interplanetary magnetic clouds and its consequent geoeffectiveness[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A11): A11103
- [62] LIU Y D, ZHAO X W, HU H D, *et al.* A comparative study of 2017 July and 2012 July complex eruptions: are solar superstorms “perfect storms” in nature[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, **241**(2): 15
- [63] HUANG Z H, ZHANG Q H, XIA L D, *et al.* Population of bright plume threads in solar polar coronal holes[J]. *Solar Physics*, 2021, **296**(1): 22
- [64] HE Jiansen, TU Chuanyi. Heating and acceleration of solar wind[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, **43**(6): 990-1001 (何建森, 涂传治. 太阳风的加热与加速[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, **43**(6): 990-1001)
- [65] SAKAO T, KANO R, NARUKAGE N, *et al.* Continuous plasma outflows from the edge of a solar active region as a possible source of solar wind[J]. *Science*, 2007, **318**(5856): 1585-1588
- [66] LINKER J A, CAPLAN R M, DOWNS C, *et al.* The open flux problem[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **848**(1): 70
- [67] FISK L A, SCHWADRON N A. The behavior of the open magnetic field of the sun[J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, **560**(1): 425-438
- [68] XIONG M, DAVIES J A, LI B, *et al.* Prospective out-of-ecliptic white-light imaging of interplanetary corotating interaction regions at solar maximum[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **844**: 76
- [69] LIU Zhenxing. Geospace double star exploration project[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, **44**(4): 573-580 (刘振兴. 地球空间双星探测计划[J]. *地球物理学报*, 2001, **44**(4): 573-580)
- [70] GAN Weiqun, YAN Yihua, HUANG Yu, *et al.* Prospect for space solar physics in 2016–2030[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, **49**(5): 059602 (甘为群, 颜毅华, 黄宇, 等. 2016—2030年我国空间太阳物理发展的若干思考[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, **49**(5): 059602)
- [71] FENG X S. Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Corona and Heliosphere[M]. Singapore: Springer, 2020
- [72] LI H C, FENG X S. CESE-HLL magnetic field-driven modeling of the background solar wind during year 2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(6): 4488-4509
- [73] DEFOREST C, KILLOUGH R, GIBSON S, *et al.* Polari-meter to UNify the Corona and Heliosphere (PUNCH): Science, Status, and Path to Flight[C]// 2022 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2022: 1-11
- [74] WANG C, BRANDUARDI-RAYMOND G. Progress of solar wind magnetosphere ionosphere link explorer (SMILE) mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(5): 657-661
- [75] LAVRAUD B, LIU Y, SEGURA K, *et al.* A small mission concept to the Sun-Earth Lagrangian L5 point for innovative solar, heliospheric and space weather science[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, **146**: 171-185
- [76] WANG Y M, BAI X Y, CHEN C Y, *et al.* Solar ring mission: building a panorama of the Sun and inner-heliosphere[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **71**(1): 1146-1164
- [77] YANG Mengfei, WANG Jingxiu, WANG Chi, *et al.* Envisioning the solar stereo exploration mission[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, **68**(8): 859-871 (杨孟飞, 汪景琇, 王赤, 等. 太阳立体探测任务设想[J]. *科学通报*, 2023, **68**(8): 859-871)
- [78] LIN Jun, HUANG Shanjie, LI Yan, *et al.* In situ detection of the solar eruption: lay a finger on the sun[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(2): 183-210 (林隽, 黄善杰, 李燕, 等. 太阳爆发抵近探测——“触碰计划”[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(2): 183-210)
- [79] DENG Yuanyong, ZHOU Guiping, DAI Shuwu, *et al.* Solar polar-orbit observatory[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, **68**(4): 298-308 (邓元勇, 周桂萍, 代树武, 等. 太阳极轨天文台[J]. *科学通报*, 2023, **68**(4): 298-308)
- [80] TIAN Hui, BAI Xianyong, DENG Yuanyong, *et al.* Scientific objectives and preliminary plans for EUV and X-ray observations of late-type stars[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022, **52**(11): 119511 (田晖, 白先勇, 邓元勇, 等. 晚型恒星极紫外和X射线探测的科学目标与初步方案[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2022, **52**(11): 119511)
- [81] FU Suiyan, XU Jiyao, WEI Yong, *et al.* Seventy years of space physics research in China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, **49**(10): 1641-1658 (傅绥燕, 徐寄遥, 魏勇, 等. 探索中前行——中国空间物理研究70年[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, **49**(10): 1641-1658)
- [82] 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[J]. *Experimental Astronomy*, 2022, **54**(2/3): 157-183
- [83] APPOURCHAUX T, LIEWER P, WATT M, *et al.* POLAR investigation of the sun POLARIS[J]. *Experimental Astronomy*, 2009, **23**(3): 1079-1117
- [84] WU J, SUN W Y, ZHENG J H, *et al.* Imaging interplanetary CMEs at radio frequency from solar polar orbit[J]. *Advances in Space Research*, 2011, **48**(5): 943-954
- [85] XIONG M, LIU Y, LIU H, *et al.* Overview of the solar polar orbit telescope project for space weather mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, **36**(3): 245-266