日地L5太阳探测工程概述

方　成,丁明德,陈鹏飞,李　川,程　鑫,郭　洋,戴　煜,李　臻
(南京大学 天文与空间科学学院,江苏 南京 210023)

摘　要: 南京大学联合中国气象局、上海航天技术研究院等单位共同建议的日地L5太阳探测工程——“羲和二号”,将在国际上首次发射一颗人造探测器至日地系统第5个拉格朗日点,通过精测矢量磁场、揭示三维爆发和精准预警预报,解答“活动区磁场的产生演化及其与太阳爆发的物理联系”和“太阳爆发的传播规律及其与灾害性空间天气的关系”这2个太阳物理和空间天气领域亟待解决的重大科学和应用问题。本文重点阐述“羲和二号”的科学与应用目标,简要介绍其科学载荷和初步方案。联合日地连线方向上的太阳探测,“羲和二号”的实施将开启我国太阳立体探测时代,拓展人类对太阳爆发机制的理解,为空间天气预警预报带来革命性突破。

关键词: 太阳活动; 太阳磁场; 太阳耀斑; 日冕物质抛射; 日地关系
中图分类号: P 182.2; P 171.3　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.03.002
引用格式: 方成,丁明德,陈鹏飞,等.日地L5太阳探测工程概述[J].上海航天(中英文),2024,41(3):9-16.

Overview of the Lagrange-V Solar Observatory (LAVSO)

FANG Cheng, DING Mingde, CHEN Pengfei, LI Chuan, CHENG Xin,
GUO Yang, DAI Yu, LI Zhen
(School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: The space mission of Lagrange-V solar observatory (LAVSO) proposed by Nanjing University, China Meteorological Administration, and Shanghai Academy of Spaceflight Technology, which is also dubbed as “Xihe-2”, will be the first man-made probe to be launched to the fifth Lagrange point of the solar-terrestrial system. It aims to precisely measure the vector magnetic fields, reveal the three-dimensional solar eruptions and provide accurate warning and forecasting of solar activities, and thus answer the two important scientific and application problems in the fields of solar physics and space weather, i.e., “the generation and evolution of solar magnetic fields and their connections with the solar eruptions” and “the propagation of solar eruptions and their relationships with the hazardous space weather”. In this paper, the scientific and application objectives, payloads, and preliminary plans of “Xihe-2” are overviewed. With the solar observations in the Sun-Earth direction, the implementation of “Xihe-2” will usher in the era of China’s solar stereoscopic observations, expand human’s understanding on the mechanisms of solar eruptions, and bring revolutionary breakthroughs in the research of space weather.

Key words: solar activity; solar magnetic field; solar flare; coronal mass ejection; solar-terrestrial relation

0　引言

太阳是唯一一颗可开展高空间分辨率观测和高精度偏振测量的恒星,也是唯一一颗可实现多视角立体探测的恒星。通过对太阳的观测和研究,能深入了解宇宙等离子体的运动和演化、高能粒子的加速和传播,以及天体爆发现象的物理机制等重大科学问题,在天文学领域具有广泛的指导意义。同时,太阳活动强烈地影响着行星际空间环境、地球磁场、电离层和中高层大气,对通信导航、油电输运、航空航天、深空探测等产生较大危害。因此,研

收稿日期:2024-03-31; **修回日期:**2024-04-17
基金项目:国家自然科学基金(12333009);国家国防科技工业局民用航天“十四五”技术预先研究项目(D050101)
作者简介:方　成(1938—),男,院士,教授,主要研究方向为太阳物理、地基和天基太阳探测。
通信作者:李　川(1981—),男,教授,博士,主要研究方向为太阳物理和空间天文。

究各种尺度太阳活动的规律,发展太阳活动的观测手段和预报方法,对国防和国民经济有着重要的现实意义。

人类对太阳进行科学观测和研究的历史可以追溯至1610年,伽利略利用其发明的天文望远镜对太阳黑子开展常规观测。自此,在长达几百年的时间里,人类对太阳的认识主要是基于地面望远镜在可见光波段的观测。与地面望远镜相比,太阳空间探测具有不受地球大气湍流和吸收效应的影响、不受地球电离层截止和地磁层屏蔽效应的影响且可以连续观测等优势,进而提供了最为直接有效的探测数据。自人类进入空间时代以来,国内外已发射70余颗与太阳有关的空间探测器,取得了许多开创性的科学成就,使人类对太阳内部结构、太阳大气动力学、太阳活动物理机制,以及行星际空间环境、日地关系研究有了更为深入的认识,太阳空间探测已成为推动太阳物理和空间天气研究发展的主要动力。

中国的太阳空间探测自20世纪70年代开始论证,最早是“天文卫星1号”计划,以后又提出了“空间太阳望远镜”(Space Solar Telescope,SST)、“深空太阳天文台”(Deep-space Solar Observatory,DSO)、“太阳爆发探测小卫星”(Small Explorer for Solar Eruptions,SMESE)、“太阳爆发-近地空间环境响应卫星”(Solar Eruption-Near-Earth Environment Responser,SENEER)、“夸父-太阳风暴、极光和空间天气任务”(Kuafu Mission)、“太阳极轨望远镜探测计划”(Solar Polar Orbit Telescope,SPORT),但经历诸多曲折,直到近年来才取得重大突破[1]。2021年10月14日,我国首颗太阳探测科学技术试验卫星——“羲和号”(Chinese Hα Solar Explorer,CHASE)发射成功,拉开我国空间探日的序幕[2-3]。“羲和号”首次实现了太阳Hα波段光谱成像的空间探测,其全日面光谱成像数据综合指标达到国际最佳水平[4]。“羲和号”可以获得太阳大气从光球底部至色球高层的分布特征,为揭示太阳活动在低层大气的动力学和热力学过程提供重要观测基础。基于其科学数据,国内外学者已取得众多原创性的科研成果,特别是在国际著名天文学期刊*The Astrophysical Journal Letters*上发表的研究成果专辑。2022年10月9日,我国首颗综合性太阳探测卫星——“夸父一号”(ASO-S)发射成功,形成我国“双星探日”的格局。“夸父一号”搭载了3个科学载荷,分别针对“一磁两暴”(太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射)开展系统性的观测和研究[5-6]。目前,“夸父一号”在轨稳定运行,持续取得原创性科研成果,其中包括在国际著名太阳物理学期刊*Solar Physics*上发表卫星运行和研究成果专辑。除此之外,在太阳紫外探测领域,我国还有2021年发射的风云三号E星上搭载的X射线极紫外成像仪[7],以及2022年发射的新技术试验卫星上搭载的太阳过渡区成像仪[8]。综上所述,我国太阳空间探测正处于蓬勃发展的新时期。

1 太阳空间立体探测

尽管国内外的太阳空间探测已取得诸多突破,但在该领域中还有一些重大科学问题未得到完美解答,主要包括:太阳产生爆发并影响日地空间环境的原理,太阳活动有周期性的原因,太阳高层大气具有异常高温的原因,太阳风源自哪些区域以及如何被加速等。上述问题有待通过更具创新的探测方式和更为先进的探测技术得以解答。其中,太阳空间立体探测是国内外科学家已达成共识的解答上述问题的必由之路,即在黄道面上、太阳极区轨道和太阳抵近轨道分别部署探测器,形成对太阳和行星际空间环境的全方位立体探测系统。

美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)和欧洲空间局(European Space Agency,ESA)分别于2006年、2018年和2020年发射了日地关系天文台(Solar Terrestrial Relations Observatory,STEREO)[9]、帕克太阳探测器(Parker Solar Probe,PSP)[10]和太阳轨道器(Solar Orbiter,SolO)[11],初步实现黄道面多视角、太阳极区和抵近探测。但STEREO的2颗探测器在黄道面上相对太阳的位置处于漂移状态,无法开展定点稳定探测,对于太阳爆发研究和空间天气预警预报,具有较大的局限性;SolO偏离黄道面的轨道倾角最大约为33°,对极区的观测不够完整,在解决太阳活动周起源的问题上作用有限;PSP的近日点位置最小约为9个太阳半径,且抵达次数较为有限,同时也缺少对日面的遥感观测载荷,对解决日冕加热和磁重联问题不充分。因此,进一步开展太阳空间全方位立体探测势在必行[12-15]。

当前,国内外已有多个太阳空间立体探测任务在论证阶段,包括黄道面拉格朗日点探测[16-20]、环日

全景探测[21-22]、太阳极轨探测[23-24]和太阳抵近探测[25]。由文献[16-25]可知，在黄道面上的拉格朗日点（关键是日地 L5 点）开展太阳探测的论证最多且最充分，本文重点阐述 L5 点的太阳探测。在 L5 点部署探测器，结合日地连线观测，实现对太阳和日地空间环境的多视角探测，是未来几年国际太阳空间探测的必争之地。例如，由 ESA 主导、NASA 参与的 Vigil 任务[26]，计划于 2030 年发射一颗探测器至 L5 点，搭载光球磁场望远镜、日冕仪、日球成像仪、等离子体分析仪和磁强计，主要任务是对空间天气预警和预报。

日地 L5 点是日地系统的 5 个平动点之一，如图 1 所示。L5 位于地球公转轨道上游 60°，同时相对地球位于太阳自转的上游位置。在该点部署一颗探测器，结合日地连线方向上的观测，可以获得精确的太阳矢量磁场，揭示太阳活动的三维结构和演化，提前观测到即将面向地球的活动区，实时追踪对地传播的太阳爆发。有别于 Vigil 计划，本文提出的日地 L5 太阳探测工程（Lagrange-V Solar Observatory，LAVSO）——“羲和二号”（Xihe-2）主要研究太阳物理和空间科学，兼顾空间天气预警和预报。期望充分发挥我国制度优势，抓住即将到来的第 25 周太阳活动峰年窗口，启动实施“羲和二号”，使我国成为首个在日地 L5 点部署探测器的国家，在国际上引领太阳物理和空间天气研究的发展。

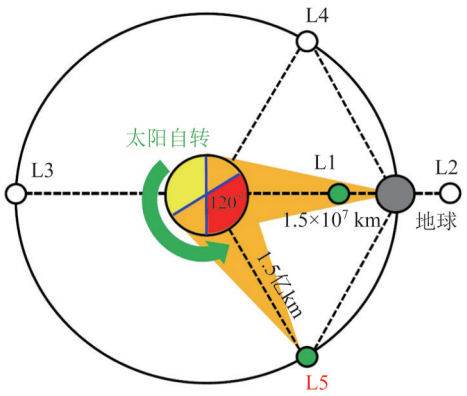


图 1　日地系统 5 个拉格朗日点在黄道面上的相对位置

Fig.1　Relative positions of the five Lagaragian points of the solar-terrestrial system in the ecliptic plane

2　日地 L5 太阳探测工程的科学和应用目标

日地 L5 太阳探测工程瞄准 2 个重大科学和应用问题，即活动区磁场的起源演化及其与太阳爆发的物理联系，以及太阳爆发的传播规律及其与灾害性空间天气的关系，如图 2 所示。通过精测矢量磁场、构建三维爆发模型和精准预警预报，实现其主要科学和应用目标：

1）探索太阳活动区磁场的起源和演化；

2）揭示太阳爆发的三维结构和物理机制；

3）研究太阳爆发的传播规律和对地响应。

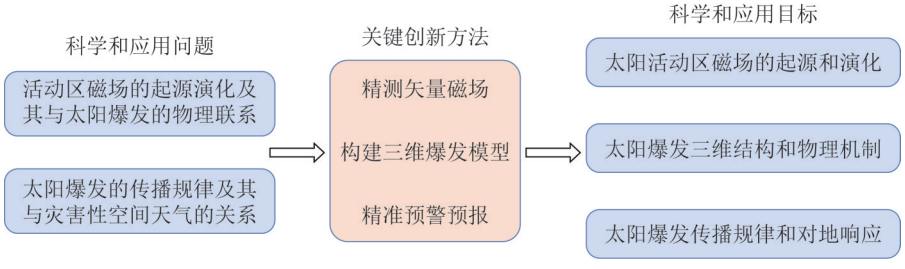


图 2　日地 L5 太阳探测工程拟解决的关键问题、采用的创新方法和要实现的科学应用目标

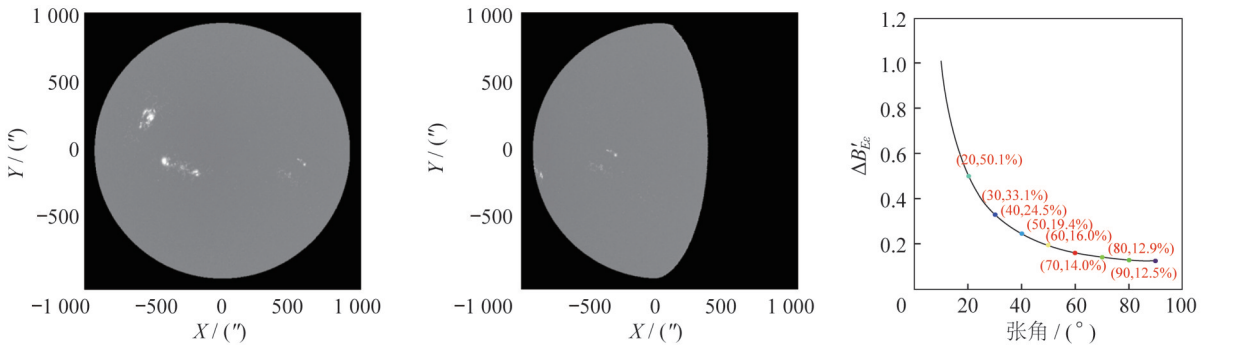
Fig.2　Scientific key questions to be solved, innovative methods to be used, and scientific application objectives to be achieved for the LAVSO

2.1　太阳活动区磁场的起源和演化

太阳从对流区到大气层均充满磁化等离子体，太阳上大多数引人注目的活动现象均与磁场有关，如黑子、谱斑、暗条/日珥、冕环、耀斑、日冕物质抛射（Coronal Mass Ejection，CME）等。由于磁场在太阳活动中具有重要作用，因此，对其进行高精度观测十分重要。当前对太阳磁场测量的基本原理主要是利用谱线的塞曼效应。但在太阳磁场的测量中，仍有 2 个暂未解决的难题：一是横向磁场测量的误差相较于视线方向（纵向）磁场的测量误差要高大约一个量级；二是横向磁场测量受限于 180°不确定性，即测量出的横场可能指向 2 个相反方向。

为克服上述难题,最有效的解决办法是在偏离日地连线的方向测量磁场。

结合日地L5点和日地连线2个不同方向的观测,通过矢量分析方法确定横场的指向,进而完全解决横场180°不确定性问题[27]。此外,在日地L5点的磁场测量能够有效地减小横场测量的误差,大幅度提高磁场观测的精度[28]。计算表明,在L5点和近地位置同时进行矢量磁场观测,可以使东西方向(平行于黄道面及太阳表面方向)的磁场分量测量精度提高为原来的6倍,如图3所示,其中$\Delta B'_{E\varepsilon}$为修正后的测量误差与单一视角测量误差的比值。



(a) 模拟L5点视角下的磁图　(b) 地球视角下的磁图　(c) 双视角下横场测量精度随张角的变化

图3　矢量磁场观测结果[28]

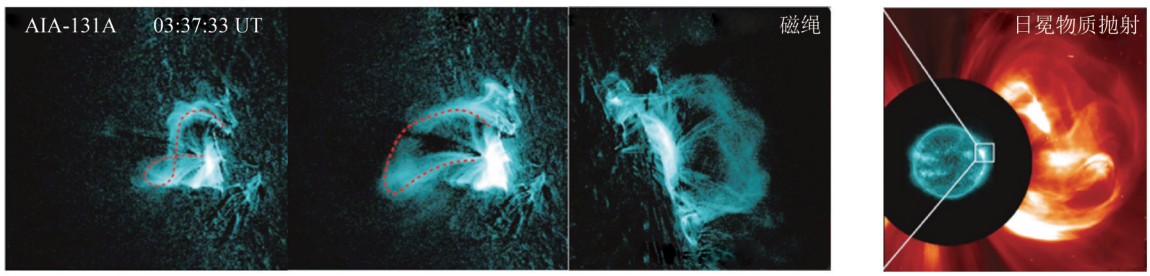
Fig.3　Observation results of the vector magnetic field[28]

在日地L5点观测太阳磁场和速度场,比近地卫星提前5 d左右观测到太阳活动区,为研究磁流浮现过程,如新生磁极的产生、剪切、汇聚和扩散等,提供必不可少的数据。另外,日地L5点可在日地连线东侧增加60°的经度观测范围,结合近地卫星,提供更大尺度上太阳光球磁场的信息,进而构造更准确的太阳大尺度磁场结构,更好地研究耀斑的爆发、CME的加速、冕洞的形态、盔状冕流和太阳风的起源等活动现象。

2.2　太阳爆发的三维结构和物理机制

当前,太阳爆发的观测大多是通过地面望远镜或日地连线上的空间望远镜来实现。单个视角的观测受到投影效应的严重影响,所观测的图像和物理量大多是在天空平面上的投影,无法获得太阳爆发的三维结构及其准确的动力学演化过程,这限制了对太阳爆发物理机制的理解。

近年来的观测表明,太阳爆发早期,活动区常出现暗条或热通道(磁绳)等前身结构,当其失衡时,会导致日冕物质抛射和耀斑爆发,如图4所示[29]。为了揭示日冕物质抛射和耀斑的触发机制,需要获得暗条或热通道的动力学演化信息,以判断其准确的失衡高度。目前没有偏离日地连线方向上的定点观测,无法持续获得暗条或热通道的三维结构和演化。为了突破上述限制,需在日地连线以外增加一个观测视角,形成双视角联合立体观测,日地L5点即提供了这一稳定观测位置。



(a) 磁绳结构　(b) 日冕物质抛射

图4　太阳爆发的前身热通道结构——磁绳[29]

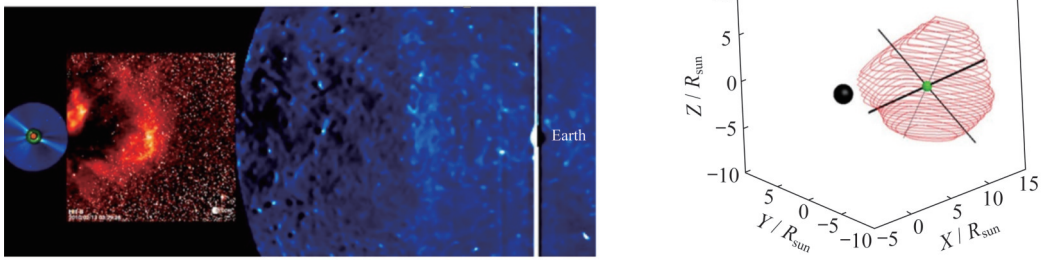
Fig.4　Magnetic flux rope: the pre-existence hot channel structure of solar eruptions[29]

以往的太阳爆发磁重联模型，一直依赖于二维标准模型。但是，观测中有许多现象无法用二维模型来解释。最近的数值模拟在三维磁重联方面取得了一定进展，但其在观测上的进展较小。目前，由于对主要能量释放过程的观测均是基于单个视角，因此，无法获得太阳爆发的三维结构及真实的动力学演化。虽然 STEREO 上搭载的极紫外成像仪可提供 2 个视角的观测信息，但是时间分辨率（约 5 min）远大于太阳爆发的动力学时标（几十秒），且由于其轨道处于漂移状态，无法稳定提供最佳视角的观测。STEREO 上没有太阳磁场测量仪器，无法提供磁流体力学数值模拟所需的观测数据；且 STEREO 上也没有太阳高能辐射探测，无法确定非热粒子辐射的方向。日地 L5 点的稳定观测，尤其是对活动区的磁场测量以及对热通道和电流片结构的极紫外成像观测，将为人们构建太阳爆发三维物理模型提供最为关键的科学数据。

2.3　太阳爆发的传播规律和对地响应

太阳爆发在行星际空间的传播是太阳物理和空间天气研究的热点领域，涉及的科学问题有：CME 在太阳大气中加速及在行星际空间传播的方式，与其相关的激波和磁云结构演化的方式，由快慢太阳风相互作用形成的共转相互作用区（Corotational Interaction Region，CIR）的时空演化特征，由太阳爆发所产生的太阳高能粒子（Solar Energetic Particles，SEPs）的加速机制、传播过程和空间分布等。但传统的单一视角的遥感观测和单一位置的原位测量无法准确刻画行星际 CME 的三维结构和动力学演化，无法准确获得 CIR 的时空演化过程，也无法准确测量 SEPs 在行星际空间的分布和传输特征。因此，观测信息的不足限制了人们对这些科学问题的理解，并使得人们难以预测这些现象导致的空间天气效应。

CME 是引起灾害性空间天气的主要因素[30]。利用 STEREO 上搭载的日冕仪，通过偏离日地连线的视角观测 CME，结合日地连线视角，并基于三角视差原理，对 CME 的结构和运动学演化进行准确的三维重构[31]，如图 5 所示。但由于轨道漂移，STEREO 的视角并不总是适合对 CME 开展立体观测。日地 L5 点位于地球公转轨道上游 60°，是持续观测 CME（尤其是对地传播的 CME）的理想位置，基于该点，首次实现 CME 从发生到抵达地球的全程进行长期、连续的多角度立体监测。



(a) STEREO观测的一次对地传播CME　　(b) 基于多视角观测的CME三维重构

图 5　CME 的结构和运动学演化的三维重构[31]

Fig.5　Three-dimensional reconstruction of the structural and kinematic evolution of CME[31]

当源于冕洞的高速太阳风追赶上前方的低速太阳风时，交界处的等离子体被压缩后形成一个压缩区。该压缩区的结构相对稳定，并随太阳一起旋转扫过地球，被称为 CIR，是中小型地磁暴的驱动源。通过日地 L5 点与近地卫星对同一 CIR 的相继观测，可追踪其内部结构的演变。此外，日地 L5 点位置的探测器能提前 3～5 d 测量到即将到达地球的 CIR，因此，可将该 CIR 的结构信息提前传递至空间天气预报系统，如该 CIR 压缩区中的太阳风密度和速度、磁场强度、方向等关键参数。根据上述参数，评估 CIR 对地磁活动的影响方式与影响程度，建立更精确的空间天气预报模型。

太阳爆发时释放的高能粒子称为 SEPs，涵盖从几千电子伏特到几十吉电子伏特的能量范围，包括质子、电子和重离子，SEPs 是引发灾难性空间天气

事件的关键因素。对于SEPs的加速源区,单点的太阳爆发遥感观测和行星际粒子原位测量无法确定非热粒子辐射位置,也无法追踪SEPs的释放区域。日地L5点结合其他位置的探测,可以获得非热辐射源区、粒子释放时间、投掷角分布和能谱等重要信息,进而明确SEPs的加速源区。此外,SEPs流量曲线在较大程度上取决于观测者与CME及其驱动激波的相对位置。对于严重影响地球的对地CME事件,SEPs在其驱动激波的鼻部区域加速,沿帕克螺旋线传播后,正好到达日地L5点。因此,在L5点开展SEPs原位测量,对诊断这类CME事件的激波特性及粒子加速规律至关重要。

3 日地L5太阳探测工程的科学载荷

为了实现日地L5太阳探测工程的科学目标,并解答与此相关的关键科学问题,需要在光球矢量磁场和速度场、太阳极紫外成像、日冕和日球层成像、硬X和伽马射线能谱、原位等离子体和磁场等方面开展高精度探测,见表1。由此可梳理出日地L5太阳探测工程需要搭载的关键科学载荷及其技术指标,见表2。

表1 科学目标、科学问题及对应的探测要素

Tab.1 Scientific objectives, scientific questions, and the corresponding detection elements

科学目标	科学问题	探测要素				
		光球磁场和速度场	太阳极紫外成像	日冕和日球层成像	高能辐射能谱	等离子体原位测量
太阳活动区磁场的起源和演化	如何获得高精度磁场	√	—	—	—	—
	活动区怎样形成和演	√	√	—	—	—
	活动区磁场如何与大尺度磁场耦合	√	√	√	—	—
太阳爆发的三维结构和物理机制	太阳爆发的前身结构是什么	√	√	—	√	—
	太阳爆发如何释放能量	√	√	√	√	—
	太阳爆发如何加速非热粒子	√	√	√	√	√
太阳爆发的传播规律和对地响应	日冕物质抛射在太阳风中加速及传播的方式	—	√	√	—	√
	共转相互作用区在行星际空间演化的方式	—	—	√	—	√
	太阳高能粒子在行星际空间中加速及传播的方式	—	√	√	√	√

表2 科学载荷及其技术指标

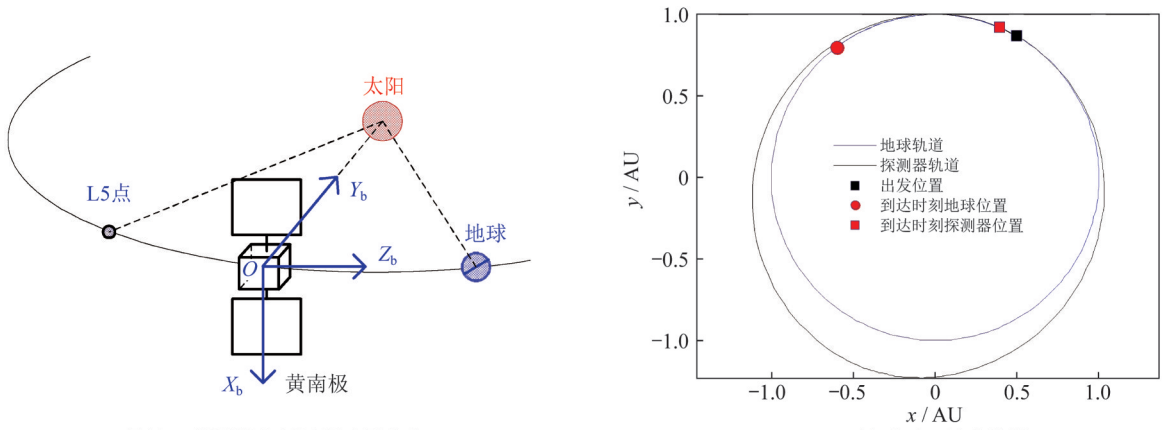
Tab.2 Scientific payloads and their technical parameters

探测要素	载荷需求	仪器指标要求
光球磁场和速度场	矢量磁像仪	谱线6 173.34 Å、视场34′×34′、光谱分辨率优于60 mÅ、偏振测量精度优于10^{-3}、空间分辨率1″、时间分辨率0.5~2.0 h
太阳极紫外成像	极紫外成像仪	波段:174 Å和131 Å、偏置视场54′×54′、空间分辨率优于2″、时间分辨率20 s
日冕和日球层成像	日冕和日球层成像包	日冕仪视场:1.3~15.0 Rs、日球成像仪视场>59°,杂散光抑制水平5×10−11 B0@15 Rs,日冕仪时间分辨率5~20 min、日球成像仪时间分辨率60~120 min,空间分辨率3.7″~70.0″
硬X和伽马射线能谱	高能辐射谱仪	能段:10~200 keV(能谱)、100~20 MeV(能谱)、10~100 MeV;能谱分辨率:5%@59.5 keV,4.8%@662 keV;时间分辨率:0.1~ 4.0 s
等离子体原位测量	原位探测包	能量粒子分析仪:5~500 MeV(质子)、20 ~10MeV(电子)、8~40 MeV(重离子),能量分辨率<15@200 keV;太阳风离子分析仪:0.03~30.00 keV、能量分辨率<6%;矢量磁强计:量程±128 nT、灵敏度0.01 nT/$Hz^{1/2}$

4 日地L5太阳探测工程的初步方案

日地L5太阳探测工程是一次典型的具有深空飞行特征的空间任务,且具有对日超精超稳指向控制的要求。因此,探测器平台将充分继承“羲和号”的太阳双超卫星平台,实现超高指向精度和超高稳定度对日观测。探测器发射质量约1 700 kg(其中有效载荷约为240 kg),拟采用CZ-3C运载火箭从西昌卫星发射中心实施发射,发射窗口在每年11月中旬至次年7月底。如图6所示,探测器自发射后,约需480 d转移飞行进入日地L5点晕状轨道,在轨运

行寿命大于5年。拟采用测控数传一体化星地通信方案，通过现有深空站实现科学数据接收，每天下传数据量不小于230 Gb。由科学与应用系统完成载荷数据的科学定标，生成面向行业科学研究与业务应用的数据产品，并按照国际惯例进行数据共享。



(a) 日地L5探测器飞行过程对日定向　　(b) 地球至L5转移轨道

图 6　日地 L5 探测器飞行方案

Fig.6　Flight scheme for LAVSO

5　结束语

日地L5太阳探测工程——“羲和二号”是我国太阳空间立体探测系统的重要一环，其关键技术已取得突破性进展，工程可实施性较强。该工程是国际上首次将人造探测器部署于日地L5点，拓展了对太阳系未知领域的探索，从日地连线以外对太阳开展长期稳定的观测。通过精密观测矢量磁场、构建三维爆发和精准预警预报的创新方法，探索太阳活动区磁场的起源和演化，揭示太阳爆发的三维结构和物理机制，解密太阳爆发的传播规律和对地响应，为实现准确的空间天气预警和预报技术提供关键数据和理论基础。“羲和二号”的实施，将成为中国航天推动空间科学、空间技术和空间应用全面发展的又一重大实践，将催生一批具有世界级影响力的原创性科学成果，彰显中国在推进人类文明进步和事业永续发展上的大国担当。

参考文献

[1] 甘为群，常进，马宇倩．中国空间太阳物理40年[J]．空间科学学报，2021，41(1)：76-83.

[2] FANG C，DING M D，LI C，et al. Special Topic：The Chinese Hα Solar Explorer—CHASE mission [J]. Sci China-Phys Mech Astron，2022，65(8)：289601.

[3] LI C，FANG C，LI Z，et al. The Chinese Hα Solar Explorer (CHASE) mission：An overview [J]. Sci China-Phys Mech Astron，2022，65(8)：289602.

[4] QIU Y，RAO S H，LI C，et al. Calibration procedures for the CHASE/HIS science data [J]. Sci China-Phys Mech Astron，2022，65(8)：289603.

[5] GAN W Q，ZHU C，DENG Y Y，et al. Advanced space-based solar observatory (ASO-S)：An overview [J]. Res Astron Astrophys，2019，19(11)：156.

[6] GAN W Q，ZHU C，DENG Y Y，et al. The Advanced space-based solar observatory (ASO-S) [J]. Sol Phys，2023(298)：68.

[7] CHEN B，DING G X，HE L P. Solar X-ray and extreme ultraviolet imager (X-EUVI) loaded onto China’s Fengyun-3E Satellite [J]. Light：Advanced Manufacturing，2022(11)：29.

[8] BAI X Y，TIAN H，DENG Y Y，et al. The solar upper transition region imager (SUTRI) onboard the SATech-01 Satellite [J]. Research in Astronomy Astrophysics，2023(23)：065014.

[9] KAISER M L，KUCERA T A，DAVILA J M，et al. The STEREO mission：an introduction [J]. Space Science Review，2008，136(1-4)：5-16.

[10] 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 Review，2016，204(1)：7-48.

[11] MULLER D，ST CYR O C，ZOUGANELIS I，et al. The Solar Orbiter mission：Science overview [J]. A&A，2020，642：A1.

[12] 甘为群,颜毅华,黄宇.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):2-15.

[13] 张伟,陈鹏飞.空间太阳探测技术的发展现状与展望[J].前瞻科技,2022,1(1):28-37.

[14] 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.

[15] 颜毅华,邓元勇,甘为群,等.空间太阳物理学科发展战略研究[J].空间科学学报,2023,43(2):199-211.

[16] GOPALSWAMY N,DAVILA J M,ST CYR O C,et al. Earth-affecting solar causes observatory (EASCO): a potential international living with a star mission from Sun-Earth L5[J].Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,2011(73):658.

[17] VOURLIDAS A. Mission to the Sun-Earth L5 Lagrangian point:an optimal platform for space weather research[J].Space Weather,2015(13):197.

[18] 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.

[19] HAPGOOD M.L1 L5 together:report of workshop on future missions to monitor space weather on the sun and in the solar wind using both the L1 and L5 Lagrange points as valuable viewpoints [J]. Space Weather, 2017(15):654.

[20] BEMPORAD A.Possible advantages of a twin spacecraft heliospheric mission at the sun-earth Lagrangian point L4 and L5[J].Front Astron Space Science,2021(8):627576.

[21] 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): 1146.

[22] CASPI A,SEATON D B,CASINI R,et al.COMPLETE: a flagship mission for complete understanding of 3D coronal magnetic energy release[J].Bulletin of the AAS, 2023(55):3.

[23] SEKII T, APPOURCHAUX T, BERNHARD F, TURCK-CHIEZE S. Future mission concepts for helioseismology[J].Space Science Review,2015(196):285.

[24] 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.

[25] 林隽,汪敏,田晖,等.太阳爆发的抵近探测[J].中国科学(物理学 力学 天文学),2019,49(5):059607.

[26] MASSIMO P, JUHA-PEKKA L. Vigil: ESA space weather mission in L5[C]//44th COSPAR Scientific Assembly. New York, USA: NASA/ADS, 2022: 2022cosp...44.3544P .

[27] 季海生,汪毓明,汪景琇.太阳的立体观测[J].中国科学(物理学 力学 天文学),2019,49(5):059605.

[28] 曾柏宇,郭洋,李川,等.利用立体观测降低太阳磁场测量误差[J/OL].天文学报,2024.(2024-02-01)[2024-03-07] doi:10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.05.010.

[29] CHENG X,GUO Y,DING M D.Origin and structures of solar eruptions i: magnetic flux rope [J]. Science China Earth Sciences,2017(60):1383.

[30] CHEN P F.Coronal mass ejections:models and their observational basis [J]. Living Rev. Sol. Phys, 2011(8):92.

[31] FENG L,INHESTER B,WEI Y,et al.Morphological evolution of a three-dimensional coronal mass ejection cloud reconstructed from three viewpoints [J]. The Astrophysical Journal,2012,751(1):18.