0254-6124/2021/41(2)-183–28 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIN Jun, HUANG Shanjie, LI Yan, CHONG Xiaoyu, ZHANG Shenyi, LI Mingtao, ZHANG Yiteng, ZHOU Bin, OUYANG Gaoxiang, XIANG Lei, DONG Liang, JI Haisheng, TIAN Hui, SONG Hongqiang, LIU Yu, JIN Zhenyu, FENG Jing, ZHANG Hongbo, ZHANG Xianguo, ZHANG Weijie, HUANG Min, LÜ Qunbo, DENG Lei, FU Huishan, CHENG Xin, WANG Min. In situ detection of the solar eruption: lay a finger on the Sun (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(2): 183-210. DOI:10.11728/cjss2021.02.183

太阳爆发抵近探测——“触碰计划” *

林 隽[1,2,3] 黄善杰[1,3] 李 燕[1] 种晓宇[4] 张珅毅[5,6] 李明涛[3,5]
张艺腾[5] 周 斌[5] 欧阳高翔[7] 项 磊[7] 董 亮[1] 季海生[8]
田 晖[9,10] 宋红强[11] 刘 煜[1,2,3] 金振宇[1,2,3] 冯 晶[4]
张洪波[12] 张贤国[5,6] 张伟杰[5,6] 黄 旻[7] 吕群波[7]
邓 雷[13] 符慧山[14] 程 鑫[15] 汪 敏[1]

1(中国科学院云南天文台 昆明 650216)

2(中国科学院天文大科学研究中心 北京 100012)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(昆明理工大学材料科学与工程学院 昆明 650031)

5(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

6(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

7(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

8(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

9(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

10(中国科学院太阳活动重点实验室 北京 100012)

11(山东大学空间科学研究院 威海 264209)

12(中国科学院国家天文台 北京 100012)

13(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201203)

14(北京航空航天大学空间与环境学院 北京 100191)

15(南京大学天文与空间科学学院 南京 210093)

摘 要 本文旨在介绍一项具有重大科学意义和应用价值的深空探测任务构想. 该任务将对驱动恒星大尺度爆发过程的中心结构 (即磁重联电流片) 进行抵近 (原位) 探测, 主要目的是详细研究发生在离地球最近的恒星——太阳上的大尺度磁重联过程的精细物理特征, 揭示太阳系中最为剧烈的能量释放过程 (即太阳爆发或太阳风暴) 的奥秘. 该任务的科学目标: 磁重联过程是发生在宇宙磁化等离子体中的能量转换和释放的核心过程, 其一直是太阳物理、等离子体物理、空间科学研究领域内的一个极为重要的研究课题及研究方向. 通过抵近观测可以将同样设备的分辨能力提高 5∼20 倍, 将提供在地球附近无法获得的太阳超清晰图像以及相应的物理信息, 让人类在一个前所未有

* 中国科学院先导专项 (A 类) 项目 (XDA17040507), 国家自然科学基金重点项目 (11933009), 中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDJ-SSWSLH012), 云南省 “高层次人才培养支持计划–云岭学者” 专项和云南省 “高层次人才培养支持计划–林隽科学家工作室” 专项共同资助

2021-02-12 收到原稿, 2021-02-25 收到修定稿

E-mail:jlin@ynao.ac.cn

的平台上来研究、认识和了解太阳, 从而解决太阳爆发核心驱动过程的精细物理性质与日冕加热等长期困扰太阳物理研究领域的难题.

关键词 太阳爆发, 磁重联, 实地探测, 大推力火箭, 防热隔热, 深空通信

中图分类号 P 182, P 354, V 524

In Situ Detection of the Solar Eruption: Lay a Finger on the Sun

LIN Jun[1,2,3] HUANG Shanjie[1,3] LI Yan[1] CHONG Xiaoyu[4] ZHANG Shenyi[5,6]
LI Mingtao[3,5] ZHANG Yiteng[5] ZHOU Bin[5] OUYANG Gaoxiang[7] XIANG Lei[7]
DONG Liang[1] JI Haisheng[8] TIAN Hui[9,10] SONG Hongqiang[11] LIU Yu[1,2,3]
JIN Zhenyu[1,2,3] FENG Jing[4] ZHANG Hongbo[12] ZHANG Xianguo[5,6]
ZHANG Weijie[5,6] HUANG Min[7] LÜ Qunbo[7] DENG Lei[13]
FU Huishan[14] CHENG Xin[15] WANG Min[1]

1(*Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming* 650216)

2(*Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

3(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

4(*Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650031)

5(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

6(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing* 100190)

7(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094)

8(*Purple Mountain Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008)

9(*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871)

10(*Key Laboratory of Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

11(*Institute of Space Sciences, Shandong University (Weihai), Shandong* 264209)

12(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

13(*Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201203)

14(*School of Space and Environment, Beihang University, Beijing* 100191)

15(*School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing* 210093)

Abstract This paper is to introduce a proposed deep space mission, which aims to perform in situ detection of the central structure, namely the magnetic reconnection current sheet, which drives the large scale eruption on a star. The main focus of this mission is on the fine physical characteristics of the large scale magnetic reconnection taking place on the Sun, our nearest star, revealing the secret of the most violent energy release process, also known as the solar storm, in the solar system. The scientific goal of this mission, magnetic reconnection, is a kernel process of energy conversion occurring in the magnetized plasma in the universe, and has long been a fairly important research

topic or even research area in solar physics, space science, plasma physics, and the related fields. In situ detection enhances the spatial resolution of the instruments used on the Earth 5∼20 times, will provide us extra-clear images of the Sun and the related information. We are thus able to study, to learn, and to understand the Sun on an unprecedented platform, and further resolve the long-standing puzzle in the solar community regarding the fine physical property of the kernel process driving the solar eruption, as well as that of the corona heating.

Key words Solar eruption, Magnetic reconnection, In situ measurement, High thrust rocket, Thermal protection and isolation, Telecommunications in deep space

0 引言

作为天体物理学的一个分支领域, 太阳物理学的研究对象是太阳本身及其对外表现的物理实质, 涉及 4 个方面的内容: ①太阳磁场和太阳活动周期起源, 太阳磁场演化对太阳其他表现与动力学特征的影响; ②太阳活动起源, 太阳爆发前后磁能积累、释放和高能物理过程; ③太阳活动长期变化及孟德尔极小现象; ④日冕加热机理与高速太阳风起源. 本文介绍的太阳爆发抵近探测——“触碰计划” 的科学探测数据将有望对上述第②与第④方面的研究工作产生重大推进作用.

“触碰计划” 的主要科学目标如下: ①研究分析驱动太阳爆发的中心机构的几何尺度和精细结构, 内部物理过程包括磁场位形、磁场耗散、能量转换、带电粒子加速; ②研究分析日冕物质抛射 (CME) 的几何尺寸、磁场结构、内部等离子体和温度分布特征、CME 前方激波及其所加速带电粒子的物理性质和空间分布, 实时监视对地 CME 从太阳到地球的传播全过程; ③直接测量日冕磁场; ④近距离观测极区磁场和等离子体流场.

为实现这些科学目标, 需要将探测器送至距离太阳中心 $10R_{\rm s}$ (太阳半径) 附近位置的圆形或近圆形轨道, 轨道倾角为 25°∼45°, 对太阳活动和爆发及其周围环境进行长时间、近距离、高分辨的探 (观) 测. 本文构想的任务计划分三步: 第一步, 利用临近空间浮空平台, 对太阳活动和爆发开展多波段高分辨率观测, 测试和完善浮空平台、望远镜搭载平台、望远镜之间的相互对接以及近距离设备遥控和数据传输; 第二步, 将探测器发射至地木转移轨道, 通过木星借力和电推进减速, 将探测器送至近日点距离约 $5\,R_{\rm s}$、远日点约 $125\,R_{\rm s}$、倾角大于 60° 的椭圆轨道; 第三步, 前一阶段任务完成之后, 将探测器送至半径为 $10{\sim}30\,R_{\rm s}$、倾角在 25°∼45° 范围内的圆形或近圆形轨道.

“触碰计划” 的顺利实施将会给人类提供一个对太阳大气以及发生在其中的剧烈活动现象进行前所未有的近距离探 (观) 测的机会, 并对发生在太阳上的大尺度磁重联过程进行直接实地探测. “触碰计划” 极有可能获得在地球上不可能得到的新结果和新发现, 同时其顺利实施也将对火箭推进、深空通信、防热隔热、粒子辐射保护等工程技术发展起到显著的推动作用.

1 科学背景

太阳是离人类最近、对人类影响最大的一颗恒星, 其周期性发生的日冕物质抛射 (CME) 和太阳耀斑等剧烈活动 (也称为太阳爆发或太阳风暴) 导致整个行星际空间从射电到 γ 射线整个电磁波段辐射的迅速增强, 同时抛出大量高能带电粒子和百亿吨的磁化等离子体团. 这些高能物质到达地球后与地球的磁层、电离层和中高层大气相互作用, 会导致严重的灾害性空间天气事件, 从而直接影响现代人类的宜居生存环境 (见图 1)[1−4].

太阳爆发起源于太阳大气中大尺度磁场结构失去平衡, 是太阳大气中磁场与磁场、磁场与等离子体之间相互作用的结果和外在表现. 其本质是磁场能量与其他能量之间的转换, 其根本的驱动源是光球等离子体不停的运动. 等离子体运动带动其中的磁场一起运动, 导致磁场结构扭曲、变形, 将光球等离子体的动能转换为磁能储存在日冕磁场当中, 直到日冕磁

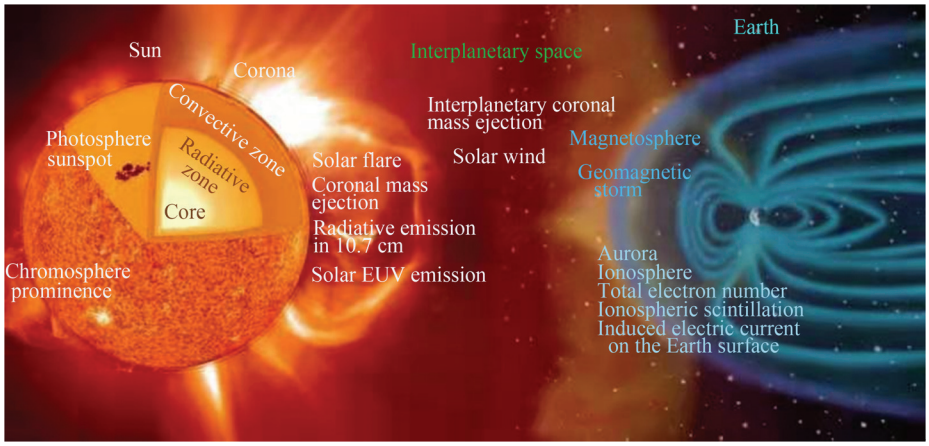

图 1 太阳与地球的相互关系以及太阳爆发对地球可能的影响

Fig. 1 Relationship between the Earth and the Sun, and the possible impact of the solar eruption on the Earth

场结构失去平衡进而产生爆发 [1,2].

由太阳爆发或太阳风暴导致的灾害性空间天气事件曾导致北美地区上百亿美元的经济损失, 也曾导致中国长达 2 h 的手机信号中断, 造成难以估计的损失. 加强对太阳活动起因和发生发展规律的研究, 预报和评估太阳爆发对地球环境造成的负面影响, 直接关系着人类社会的生存安全和未来发展 [3]. 通过研究太阳活动的规律, 对爆发活动进行尽可能准确的预报, 以便有足够的时间来应付可能发生的变故. 因此, 对太阳活动和爆发进行研究与预报已是国家的战略需求. 全球各主要的工业国都把对太阳爆发的研究和灾害性空间天气的预报放在基础研究中非常重要的位置上. 中国的《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006−2020 年)》也将 “太阳活动对地球环境和灾害的影响及其预报等” 部署为前沿科学问题中的主要研究方向之一.

由于等离子体电磁性质的复杂性, 全面揭示太阳大气中磁场与磁场、磁场与等离子体之间相互作用的物理图像、掌握其相应的物理规律需要克服数学和物理上的巨大困难. 因此, 对太阳活动和太阳爆发做出准确预报, 定量描述太阳爆发的位置、方向、时刻、强度等重要动力学特征, 对爆发的影响到达时间、在地球附近可能产生扰动的强度, 即灾害性空间天气的强度作出预报和评估是当前太阳物理学研究面临的一个重大挑战.

另外, 太阳也是唯一一颗能够进行高分辨详细观测和研究的恒星. 对太阳活动的规律和机制以及其中磁化等离子体能量释放过程的研究结果和研究方法也可以推广到其他各类天体活动现象的研究中, 对这些领域的研究起到重要的指导意义. 作为离地球最近的一颗恒星, 太阳是研究恒星和其他天体活动及其物理机制的最佳样本. 太阳还是个天然的等离子体物理实验室, 太阳物理研究可为考查发生在宇宙中其他天体和环境中的磁激变现象提供有价值的参考, 甚至可作为研究 γ 射线暴的重要借鉴 [5,6]. 因此, 开展对太阳爆发的研究, 全方位了解爆发的物理机制及其过程, 具有重要的科学意义和应用价值.

在太阳的各种活动现象中, 磁场发挥了决定性的作用. 当今太阳物理的重大成就和主要困难都与太阳磁场的观测水平及理论研究进展有关. 太阳磁场及其结构、物理本质、演化特征一直是太阳物理研究的重点课题 [7]. 驱动太阳爆发的能量事先储存在日冕磁场中, 当储存的能量接近或超过阈值后, 该结构就会失去平衡并将储存的能量迅速释放出来, 产生剧烈的爆发现象. 磁重联是这个过程能否顺利进行下去的核心要素, 而磁重联发生区域以及周围磁场和等离子体的物理性质和动力学状态则是制约磁重联发生和发展的关键条件.

磁重联是宇宙等离子体中磁场能量转化为其他能量 (动能和热能) 的一种普遍形式, 是磁场发生湮灭同时将磁能转化为等离子体动能和热能的重要过程. 在这个过程中, 方向相反的磁场相互接近, 在二者之间形成一个磁中性区或中性点. 磁中性点往往具有 X 形的结构, 因此也被称为 X 点. 在此区域中, 磁场结构原有的联结方式被破坏, 形成新的联结方式, 磁场在这里发生耗散并释放出能量. 在大尺度

的磁重联过程中, 这个磁中性区具有片状结构, 因此又称磁重联电流片或电流片 (见图 2)[7,8]. 在太阳爆发过程中形成的电流片是 “触碰计划” 的主要探测对象和研究目标 [9].

Lin 等 [10,11] 通过解析方法建立了太阳爆发理论模型 (见图 3), 首次从理论上将太阳爆发的三种主要表象: 耀斑、爆发日珥 (物质抛射在太阳附近的表现) 和 CME (物质抛射远离太阳时的表现) 通过磁重联电流片有机定量地联系起来, 明确指出磁重联过程对这几个表象动力学特征的制约作用, 预言了电流片在爆发过程中以高度动态的方式形成和发展. 随后的观测证实了这些重要的理论结果 [12−15].

在该模型的基础上, Lin 等 [15−17] 深入考查了电流片周围的磁重联特征, 包括磁重联入流、出流、电流片几何尺度、内部结构, 首先证实了磁重联入流和出流的理论预期特征和相对速度大小, 在国际上率先测量了磁重联电流片的厚度, 发现太阳爆发磁重联电流片具有远超理论预期的厚度且内部存在以等离子体团为标识的精细结构. 国内外太阳物理同行随后对 CME–耀斑电流片的几何尺寸和内部结构进行了

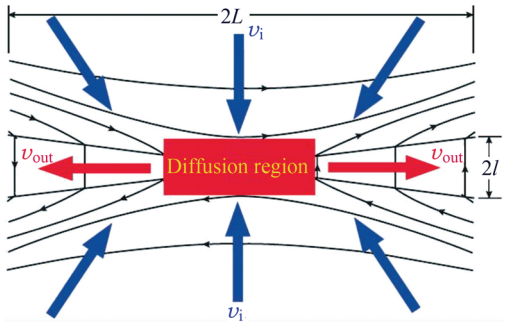

图 2　磁重联与电流片 (黑色小箭头连续曲线代表磁力线, 蓝色箭头代表将磁场和等离子体带入重联区的等离子体流, 红色箭头表示经过磁重联后的等离子体和磁场离开重联区的方向, v_i 和 v_{out} 为速度; 电流片的长度为 $2L$, 厚度为 $2l$)

Fig. 2　Schematic description of the current sheet and magnetic reconnection. Continuous curves with small arrows represent the magnetic field line (Red rectangular region in the middle is the reconnection region or the current sheet. Blue thick arrows describe the reconnection inflow with speed of v_i that brings the magnetic field and plasma into the reconnection region. The red thick arrows indicate the reconnection outflow with speed of v_{out} and its direction leaving the current sheet. The length and the thickness of the current sheet are $2L$ and $2l$)

持续的观测和理论研究. 观测结果表明, 对于可以清晰分辨出电流片的爆发事件来说, 不同的观测者、针对不同的事件、使用不同的仪器、在不同的观测波段测量得到的电流片厚度都在千公里到十万公里的量级, 并且电流片当中都有等离子体团出现 [18,19]. 这是经典磁重联理论中没有的物理图像.

在经典磁重联理论中, 磁重联发生在一个稳态环境中, 耗散区域由离子或电子惯性尺度 (即 d_i 或 d_e) 决定, 磁重联类型也是单一的 (见图 2), 也就是说, 经典磁重联理论所针对的电流片整体几何尺度几乎没有变化. 同时, 经典理论一般把不同类型的磁重联过程分开研究. 实践证明, 在地面实验室甚至是地球磁层、磁尾中发生的磁重联过程都可以在经典理论框架内来研究和描述, 即磁重联发生在 d_i 或 d_e 的尺度上 [8]. 最新的地球磁层多尺度 (MMS) 任务观测资料表明, 磁层顶和磁鞘中的磁重联区域也存在众多小尺度结构, 其大小在 $0.1d_i$~$3d_i$ 之间 [20]. 尽管磁重联过程仍然发生 d_i 的尺度内, 但是这说明在地磁环境中的磁重联过程也具有湍流的性质.

太阳爆发过程或其他天体物理环境中发生的磁激变现象涉及大尺度的磁重联过程与实验室和地磁环境中小尺度的重联情况有很大的不同. Shen 等 [21] 对双带耀斑电流片中磁重联过程的研究表明, 大尺度电流片的内部结构和其中发生的过程都表现出明显各向异性的湍流特征. Ni 等 [22,23] 的模拟结果表明, 发生在色球低温非完全电离等离子体中的磁重联过程也表现出明显的湍流特征, 且对色球甚至是温度极小区的局部加热发挥了及其重要的作用 [24].

根据目前已有的观测数据, 测量到的电流片长度可超过 $20\,R_s$, 相当于 1.4×10^7 km. Lin 等 [15] 注意到太阳爆发过程中产生的电流片长度远大于地面实验室甚至是地球周边环境的尺度 (见图 4[16,17]), 爆发剧烈程度也是地面实验室和地球周围环境中发生的爆发现象无法比拟的. 日冕中的 d_i 仅有 100 m 的量级, d_e 则更小. 从感性认识和理性认识的角度, 都可以得出这样的结论: 一个发生在 100 m 范围内的能量释放不可能驱动一个尺度有上千万公里的爆发过程. 另外, CME–耀斑电流片是在爆发过程中形成的, 在爆发发生之前是不存在的. 特别是在爆发过程的初期, 电流片的长度以超过 $100\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 的速度增加 [11,25,26]. Lin 等 [18,19] 指出, 这是一个高度动态的过程, 不能用稳态的图像描述, 也不能用针对稳态系

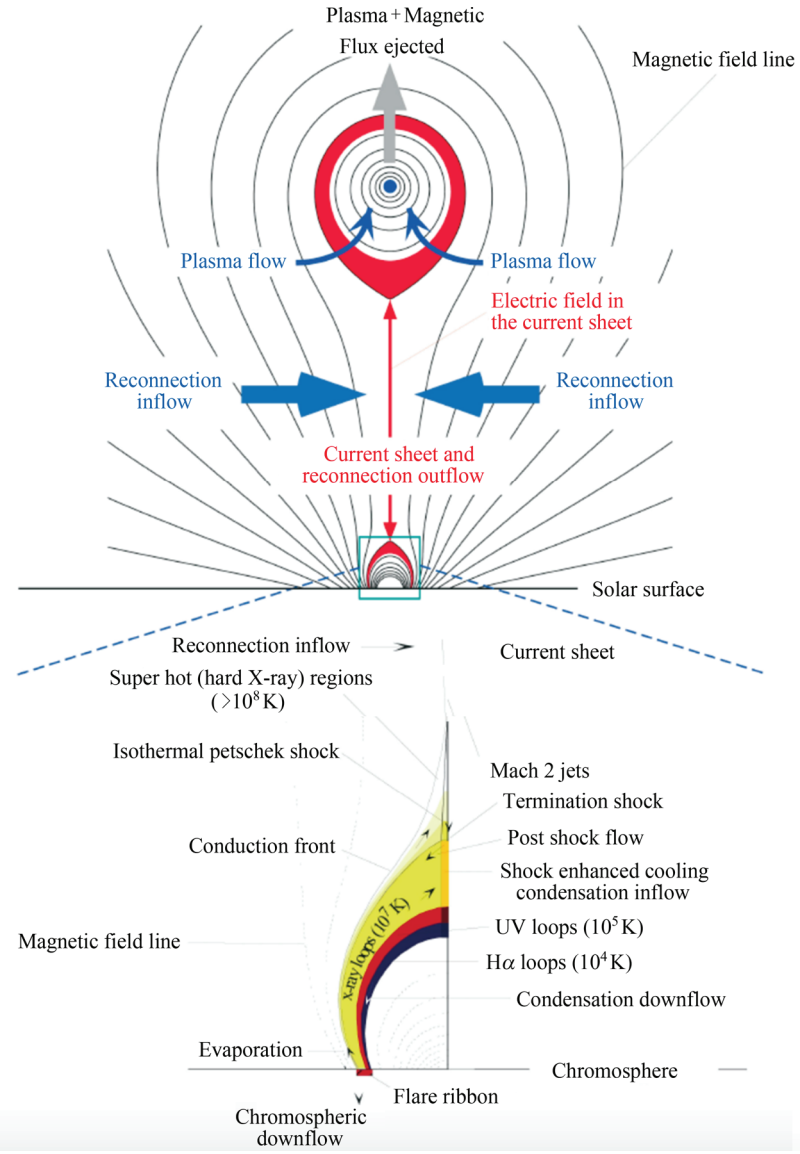

图 3 在爆发过程中形成的包含 CME、耀斑和电流片的磁场结构 (爆发初始阶段, 磁结构失去平衡使得闭合磁结构中的磁力线被剧烈拉伸而形成一个 Kopp-Pneuman 位形. 电流片既是能量转换的区域, 又是连接 CME 和耀斑的中介. 取自文献 [14] 或 [15])

Fig. 3 Schematic diagram of a disrupted magnetic configuration including CME, flare, and current sheet formed in an eruptive process (The eruption starts with the loss of equilibrium in the coronal magnetic field, which leads to the several stretching of the closed magnetic structure developing to a Kopp-Pneuman-like configuration. The current sheet is not only the region where the magnetic fields of opposite polarity annihilate each other, but also an essential intermedium connecting the solar flare to CME. From references [14] or [15])

统的方法来考查. 仅这一点, 就完全突破了经典磁重联理论的框架.

除上述观测研究之外, Lin 等 [27−33] 开展的理论研究和数值模拟均证明具有超大厚度 CME–耀斑电流片在太阳爆发过程中出现, 其中包含有尺度不一的等离子体团. 研究表明, 线性撕裂模不稳定性发生时的电流片长宽比阈值是 2π[34]; 而电流片的长宽比超过 50 甚至 100 之后, 非线性撕裂模不稳定性将会发展起来 [28,35−39], 这导致电流片中出现湍流并充满各种尺度远小于电流片初始尺度的等离子体团 (也称

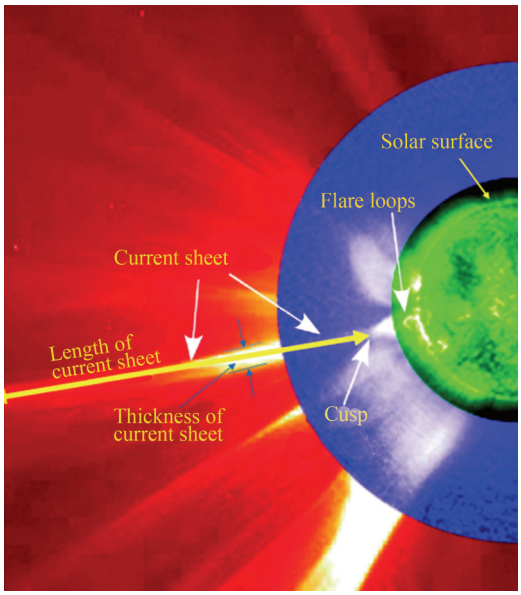

图 4　在不同波段观测到的一个大爆发留下的耀斑环与电流片的合成图 (爆发产生的 CME 已经从左边离开视场. 绿色部分是星载仪器在 195 Å波段上观测到的图像, 蓝色部分是地面白光日冕仪观测到的图像, 红色部分是星载白光日冕仪观测到的图像. 电流片厚度直接测量结果为 6.4×10^4 km)

Fig. 4　Composite of images of the flare loop and the current sheet left by a major eruption observed in different wavelengths (The CME has left the field of view leftward. The green image displays the solar disk observed in EIT/SOHO in 195 Å. The blue image shows the manifestation of the corresponding corona observed by MLSO MK4, and the red one is the coronal image observed by SOHO/LASCO/C2. Direct measurement gives the thickness of the current sheet up to 6.4×10^4 km)

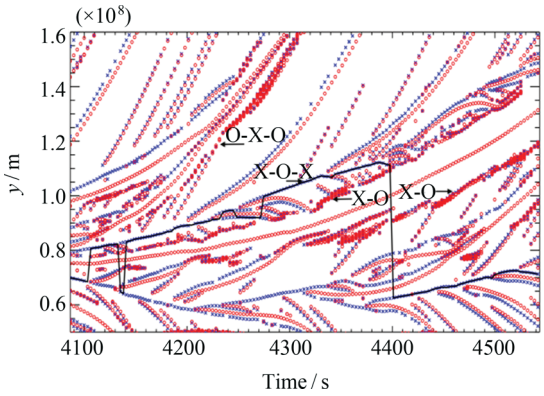

图 5　CME/耀斑电流片中不同时刻出现的 X 点和 O 点的分布状态和运动特征

Fig. 5　Time-variations of X and O point locations in the CME/flare current sheet

为磁岛). 图 5[32] 给出数值模拟得到的 CME/耀斑电流片中, X 型和 O 型磁中性点 (即等离子体团或磁岛) 出现位置随时间的变化. 众多的磁中性点表明大尺度电流片中包含非常复杂的结构, 相应的磁重联过程也远比经典磁重联理论描述的图像复杂.

Savage 等 [40] 首次同时观测到了 CME/耀斑电流片中流向太阳和远离太阳的等离子体团. Forbes 等 [41] 从理论上探讨了磁重联外流在主 X 点附近的运动特征, 并与 Mei 等 [29] 的数值实验结果和 Savage 等 [40] 的观测结果进行了对比, 发现数值模拟得到的等离子体团在离开主 X 点的过程中表现出加速的趋势, 而 Savage 等 [40] 的观测结果则表明等离子体团大致匀速地离开主 X 点. Forbes 等 [41] 认为, 二者的不一致是因为 Mei 等 [29] 的模拟中使用了在空间均匀分布的电阻率, 导致经典磁重联理论框架中的纯电阻耗散区过长. Lee 等 [42] 的观测结果表明, 电流片中加速运动的等离子体团是存在的. 除了等离子体团表现出复杂的运动特征之外, 大尺度电流片还允许多种磁重联过程在其中同时发生, 例如等离子体团之间的相互作用引起二级磁重联过程的产生, 这对提高磁重联过程的整体速率和带电粒子加速具有特殊的意义 [27−33,43−45].

受观 (探) 测水平和手段的限制, 上述结果和结论都是在遥感观测、理论研究和数值实验的框架内得到的. 为了最终证实这些结果和结论, 还需要对电流片进行实地直接探测. 利用多角度的探测器抵近探测数据和遥感观测数据, 完成大尺度电流片和磁重联研究体系的最后一个环节, 将获得对磁重联过程全新的理论认知, 促进中国科学家主导一批成体系的科学发现. 除了可以在大尺度磁重联研究领域取得重大突破之外, 还可以其他领域取得长足的进步.

2　太阳空间探测的国内外现状及发展趋势

据统计, 自 20 世纪 50 年代末第一颗人造卫星上天以来, 世界主要空间大国共发射与太阳观测有关的卫星 70 余颗. 近代太阳物理的许多开拓性重大成就大都来自这些卫星的观测结果. 例如对日冕结构、磁重联、太阳内部结构的认识等. 空间卫星探测是推动当代太阳物理学发展的主要动力.

2012 年美国发布 “太阳与空间物理十年规划”, 该规划在太阳和日球物理领域方面提出了 4 个目标: 确定太阳如何产生贯穿整个日球的准周期性变化磁场; 确定太阳磁场机制如何产生太阳大气动力学; 确定磁能如何存储和快速释放; 探索太阳与局地星际介质的相互作用及对地球的保护. 这 4 个目标基本反映了国际太阳物理发展的趋势.

2.1 国内现状与发展趋势

中国早在 20 世纪 70 年代东方红卫星发射不久, 就提出并实施中国第一颗太阳探测卫星计划天文一号. 之后, 由于国家政策调整, 卫星计划中止. 20 世纪 90 年代, 中国开展了 921-2 空间天文分系统包括超软 X 射线探测器、硬 X 射线探测器和 γ 射线探测器的研制, 并于 2001 年初搭载神舟二号探测器发射升空, 成功观测到数十个太阳 γ 射线耀斑和数百个太阳 X 射线耀斑. 风云二号气象卫星开展的 X 射线耀斑业务观测自 1997 年开始一直持续至今. 但时至今日, 作为空间技术大国, 中国尚没有发射过一颗太阳探测专用卫星, 在空间太阳天文台的运行和管理方面基本上是空白.

中国国家航天局在 2007 年初向全世界发布了 “十一五” 空间科学规划, 提出要在 “ 十一五” 期间实现 6 大发展目标, 其中 3 大目标与太阳探测有关: ①中法合作太阳爆发探测小卫星 (SMESE) 计划; ②进一步深化空间太阳望远镜 (SST) 的关键技术研究, 开展夸父 (KUAFU) 计划的背景项目预先研究, 凝练科学目标, 突破关键技术; ③开展空间科学相关领域的关键技术和科学研究. 但这些目标最后均未实现.

2008 年 11 月, 中国科学院发布 “中国空间科学项目中长期发展规划 (2010−2025)”, 提出 16 个空间科学计划, 其中太阳显微计划和太阳全景计划属于太阳物理范畴, 另外隶属空间物理的日地联系计划也与太阳物理直接有关. 在 2012 年初发布的 “空间科学项目发展规划深化研究报告” 中, 对 2008 年的报告进行了补充和修订, 在空间太阳探测方面, 明确建议 “十三五” 实施的项目包括深空太阳天文台 (DSO) 和先进天基太阳天文台 (ASO-S). 目前, ASO-S 已进入工程实施阶段, 而有关 2021−2035 年的发展规划也正在征集意见的过程中 [46].

2.2 国际现状与发展趋势

围绕太阳物理的核心科学问题, 国际上近年来发射了一系列太阳探测卫星, 其中 Parker 太阳探针 (PSP) 和太阳轨道飞行器 (SO) 围绕太阳运行, 应该被称为人造行星. Gan 等 [46] 回顾了 2000 年以后发射的太阳探测器以及已经明确列入发射计划的未来太阳探测卫星, 包括卫星名称、发射和结束科学寿命的时间、主要任务、载荷情况以及卫星所属国家. 这些太阳探测卫星中, 以美国的最多, 欧洲、俄罗斯并列第二, 中国、法国、日本和印度位居第三. 这些卫星绝大多数都是绕地球轨道运动的人造卫星, 而太阳动力学天文台 (SDO)、日地关系天文台 (STEREO) 双星、PSP 和 SO 则属于人造行星. 由于文章篇幅有限, 这里仅对 PSP 和 SO 简要介绍. 一方面因为 PSP 和 SO 刚发射升空不久, 很多内容属于前沿范畴; 另一方面因为我们目前所推动的太阳抵近探测计划 [9] 对 PSP 和 SO 有明显延伸性.

2018 年 8 月 12 日美国东部时间 03:31, 北京时间 8 月 13 日 15:31, 策划、规划、论证了整整 60 年之久、耗资 15 亿美元的 PSP 在 Florida Caraveral 肯尼迪航天中心发射升空, 目的是对日冕和太阳风进行近距离探测 [9]. 探测器将经过 7 次金星借力, 最终漂移到近日点 0.046 AU、远日点 0.73 AU、倾角 3.4°、运动周期 88 天的椭圆轨道上, 对太阳风和日冕中的物理参数开展多层次、多方位的探 (观) 测, 近距离了解和认识太阳最外层大气以及其中发生的重要物理过程, 同时也开展对太阳爆发的观测和近距离探测. PSP 的主要目标是研究太阳风起源和动力学特征 [47], 确定日冕磁场结构和动力学性质, 理解日冕如何被加热、太阳风如何被加速, 认识高能粒子加速的物理过程及其分布的演化.

自成功发射以来, PSP 已经 6 次掠过近日点, 每一次都比前一次更靠近太阳. 在远离太阳的过程中, PSP 将观测数据发回地球. 到目前为止, 利用接收到的 PSP 发回的数据, 已有百余篇科研论文发表, 其中包括在 *Nature* 上发表的 4 篇文章 [48−51], 获得了多项仅依据在地球轨道附近的探测资料无法获得的重大发现.

2020 年 2 月 9 日美国东部时间 23:03, 北京时间 2 月 10 日 12:03, 美国和欧洲联合研制的 SO 成功发射升空, 将以遥感与原位探测相结合的方式对太阳进行观 (探) 测, 并将与 PSP 联合对太阳进行全方位的观测和探测 [52]. SO 计划经过 8 次金星借力、1 次地球借力之后, 进入倾角 25°、近日点 0.28 AU、远日

点 0.9 AU、绕转周期为 168 天的椭圆、倾斜轨道.

SO 任务的科学目标有 4 个, 第一个目标仍然是瞄准太阳风的源头, 第二个目标是磁化等离子体抛射即 CME 的物理机制, 第三个目标是 CME 的演化及其与周围太阳风的相互作用, 第四个目标是太阳高能粒子的来源、加速和传播过程. 与 PSP 的科学目标或针对的问题相比较, SO 更侧重于太阳磁场与等离子体的表现, 二者的科学目标有一定程度的重叠, 但更多的是互补. PSP 的轨道倾角很小, 主要探测黄道面上的物理过程; 而 SO 的轨道倾角较大, 其科学目标中包含着对太阳极区磁场和等离子体结构的观测. 另外, SO 对黄道面观测数据的补充可以弥补 PSP 留下的数据空挡, 将二者获得的信息结合起来, 就可以得到太阳大气和磁场结构的三维图像.

除太阳风之外, PSP 和 SO 的主要关注点集中在大尺度的磁场、等离子体结构及其演化、太阳爆发过程的宏观表现以及对周围环境的影响上. SO 对于高能粒子的关注集中在 CME 驱动的激波对这些粒子的加速以及激波本身的起始位置、物理特性和几何结构等, 在穿过 CME 及其所驱动的激波时, 实地探测 CME 和激波的内部结构与物理性质, 并获取激波对带电粒子加速过程的精细物理信息. 然而, PSP 在近日点逗留的时间太短, 难以保证会有机遇穿过 CME 和激波; SO 的近日点与太阳的距离超过 60 $R_{\rm s}$, 即使能够遇到 CME 和激波, 经过这么长距离的传播, 二者此时的性质与位于太阳附近时相比已经发生了很大的变化. PSP 最新的观测结果表明, 在离开太阳之后, 无论是高能粒子还是磁场结构, 都会因为与行星际空间中已有磁场、粒子、等离子体的相互作用而迅速失去最初携带的物理信息 [48−51].

2.3 启示与思考

综上所述, 与欧美相比, 中国空间科学卫星处于明显滞后的位置, 甚至有可能落后于印度. 迄今, 中国只有屈指可数的几颗用于夜天文观测研究的卫星, 还没有用于太阳观测研究的卫星. 中国国家航天局在 2007 年提出要在 “十一五” 期间实现 6 大发展目标, 其中 3 大目标与太阳探测有关. 但是由于各方面的原因, 这些涉及太阳观测的规划从卫星层面上看都没有实现. 2008 年 11 月, 中国科学院提出 16 个空间科学计划, 其中两个属于太阳物理范畴. 2012 年对上述计划进行了补充和修订, 明确建议 “十三五” 实施的太阳探测项目包括深空太阳天文台 (DSO) 和先进天基太阳天文台 (ASO-S). ASO-S 目前已经入工程实施阶段, 计划于 2022 年前后发射升空.

与国内空间天文目前已有 4 个立项和成功发射的项目相比, 太阳空间探测项目只有一个 ASO-S, 而 ASO-S 属于传统的地球轨道卫星, 缺乏实现太阳抵近探测科学目标的技术手段. 此外, PSP 和 OS 所关注的目标主要在于太阳风的物质组成和物理特征、太阳爆发及其对周边环境包括对太阳风背景的影响、高能粒子的来源及其在行星际空间中的传播. 二者均未对太阳爆发核心驱动结构内部物理过程进行直接探测. 因此, 无论从中国国内学科平衡发展的角度来看, 还是从太阳物理研究课题互补的角度来看, 本文所介绍的抵近探测任务亟待向前推进并获得立项.

另外, 中国在理论基础方面也占据着独特的优势. 太阳抵近探测的主要科学目标与已有的太阳爆发理论模型——Lin-Forbes 模型 [10,11] 以及在此基础上开展的一系列原创性工作和取得的成果密切相关. 该模型首先定量解决了太阳爆发基本物理过程和动力学表现与磁场能量释放物理机制之间本质联系的问题, 针对主导磁场能量释放的关键区域即磁重联电流片的遥感观测和数值模拟的研究也在持续进行中, 并取得了有望改写已有经典理论的结果. 因此, 对有关问题物理本质的深刻理解, 有助于熟练运用理论结果、掌握项目推进的大方向, 并保证抵近探测任务的科学目标及相应研究成果在国际上处于前沿位置.

更重要的是, 中国太阳物理学研究成果在国际上所处地位与现有太阳物理观测设备和技术水平之间严重失衡. 一方面, 经过多年的努力, 中国太阳物理研究成果在国际上名列前茅, 无论是研究成果数量还是成果被引用数量都位居世界第二; 另一方面, 这些成果绝大多数都得益于国际太阳物理界观测数据的开放政策, 都是利用国外、特别是美国的空间和地面观测资料获得的, 利用自主研制设备获得的资料开展研究、发表的文章只占极少的部分, 并且目前尚无自主研发的空间观测设备. 如今中国综合国力已经跻身世界第二, 让目前这种缺乏原创性科学实验 (观测) 数据的局面持续下去与中国在国际上的实际地位非常不符. 目前无论从科研基础、技术水平, 还是从经济实力、航天能力等方面来看, 中国距离具备开展太阳抵近探测的能力已经不远, 应该紧跟基础研究的步伐, 早做布局, 尽快跨入国际空间太阳物理领域的先进行列.

3 拟解决的关键科学问题

抵近探测可以在一个前所未有的近距离上对太阳及其活动现象进行观 (探) 测, 将为人类提供从未获得过的观 (探) 测资料, 从而获取有关太阳及太阳活动的最新知识. 利用 PSP 目前所获得的观 (探) 测资料, 已经发现了很多未在地球附近观 (探) 测到过的现象. 下面将从 4 个方面来阐述抵近探测可能解决的关键科学问题.

3.1 大尺度电流片内部结构及物理过程

在经典磁重联的理论框架中, 未考虑大尺度、包含多种精细结构在内的电流片, 这类电流片被注意到源于对太阳爆发过程中形成的电流片厚度的直接测量. 理论分析和数值实验可以自洽地解释在电流片具有异乎寻常的厚度的情况下, 磁重联过程仍然能以足够高的速率进行, 以保证支持太阳爆发所需要的快速磁场耗散和相应的能量转换: 众多的小尺度结构极大地提高了磁场耗散的速率, 这些小尺度结构所产生的压力足以支撑磁重联内流的压力, 使得电流片能够在保证磁重联速率的情况下拥有足够大的厚度.

受观测技术和探测手段的限制, 已有的理论和数值实验结果尚未得到直接探测结果的证实. 在实验室中, 可以通过探针探测磁重联区域内的等离子体分布和磁场结构, 获得磁重联区域的几何尺度、揭示磁重联的精细物理过程. 对于地球磁层和磁尾中的磁重联过程, 也可以通过发射传统的地球轨道卫星获取探测数据. 另一方面, 尽管太阳是距离地球最近的恒星, 然而与地球之间存在 1.5×10^8 km 的距离. 迄今只有 PSP 到达了非常靠近太阳的位置, 但是还没有机会穿过电流片获取其中的重要参数. 另外, PSP 的轨道倾角不大, 探测范围主要局限在赤道面附近, 对离开赤道面较远的活动和爆发, 其探测效果有待进一步评估 [9]. “触碰计划” 建议的飞行轨道允许探测器在较大的纬度范围内运动, 穿过 CME、甚至是电流片的概率大幅增加.

如前所述, 除太阳风之外, PSP 和 SO 的主要关注点集中在大尺度的磁场、等离子体结构及其演化、太阳爆发过程的宏观表现以及对周围环境的影响, 而驱动太阳爆发的中心能量释放区域——磁重联电流片则不在 PSP 和 SO 的探测目标范围之内. 当然, 也不排除它们探测到电流片的可能性. 太阳爆发过程中, 90% 以上的能量转换由发生在电流片中的磁重联过程来完成, 涉及到复杂的磁场–磁场、磁场–等离子体之间的相互作用, 而且电流片也是加速带电粒子的一个重要区域. 因此, 对电流片进行直接的实地探测对于全面掌握磁重联过程的精细物理性质具有非常重要的意义. 受投影效应的影响, 遥感观测在这个问题上无法替代实地探测.

磁重联电流片本身的几何结构、物理性质以及其中发生的物理过程对整个爆发事件的能量释放特点、剧烈程度、演化表现、对周围环境的影响具有决定性的影响. 研究爆发过程的观测特征、了解其背后的物理本质, 必须同时探索电流片的几何尺度、内部精细结构以及其中所发生的精细物理过程. 在二维框架中开展的研究已经对磁重联过程给出了上述重要的结论, 但是三维磁重联过程目前仍然是一个难以破解的大问题. 在太阳爆发过程中, 闭合磁结构的拉伸导致电流片的形成. 因此, 在局部的区域中会表现出二维或准二维的特点 [30]. 上述二维磁重联过程所表现出来的特征和相应的结果仍然适用, 仍然能够被观测所证实 [14,15,27,28,53]. 这里准二维的含义是电流片中存在一个与感应电场平行的磁场分量. 这个分量不参与重联, 但是对重联过程有影响.

另外, 大尺度电流片最常见、最重要的一个特征是其中包含不同尺度的等离子体结构和相应的物理过程. 长电流片中发生的撕裂模不稳定性会在其中产生无数的磁岛或等离子体团 [34], 理论研究没有进一步指出这些磁岛形成之后会如何演化. 数值模拟表明, 在线性撕裂模不稳定性所要求的长宽比临界值 2π 附近, 撕裂模不稳定性实际上还不能顺利发展起来, 长宽比必须超过 50 之后, 电流片中才会有撕裂模的迹象出现 [36−39]. 大尺度电流片中各种尺度的等离子体结构是撕裂模不稳定性引发的湍流的具体表现. 数值实验进一步表明, 撕裂模发生之后, 电流片中的等离子体结构有从大到小演化的正常级联过程, 也有小尺度结构合并成大尺度结构的逆级联过程 [27,53], 还有由于这些结构和磁重联外流在电流片中运动可能导致的快、慢模激波 [28,38,39]. 此外, 在逆级联过程发生的时候, 还会有更小尺度的等离子体团出现在小尺度结构合并区. 然而, 由于数值模拟和遥感观测都存在空间分辨率的问题, 目前尚不能确定实际磁重联电流片中最小结构的具体尺寸.

因此, 在抵近探测还未实现的情况下, 以下问题可以构成数值模拟的科学目标, 但最终解决必须依赖

实地探测.

(1) 电流片中的引导场在磁重联过程中起什么作用? 这个磁场分量在磁重联过程中不发生变化, 但是会影响磁重联的进程. 数值实验表明, 过强的引导场在一定程度上会抑制磁重联内流速度, 从而影响磁重联速率. 但是, 在太阳爆发这样的大尺度磁重联过程中, 引导场是否发生变化及其对磁重联过程的影响都是未知数.

(2) 在二维模拟中出现的磁岛或者等离子体团在三维空间里的特征是什么? 已有的观测结果均是三维现象在二维平面上的投影, 因此可以在一定程度上用二维的理论研究和数值实验结果来解释, 但是对其中物理过程完整物理图像的理解存在明显的盲区. 虽然目前开展的一些三维数值实验可以帮助人类对其有所了解, 然而实验与真实发生的现象和过程仍然有明显的区别.

(3) 引导场在磁岛的形成过程和观测表现上起什么作用? 这一问题是前面两个问题的自然延伸.

(4) Mei 等 [29] 给出的电流片位形和内部结构在多大程度上与实际情况一致? Mei 等 [29] 首次给出了在太阳爆发过程中形成的电流片三维构形, 也展示了其中的一些精细结构, 这些结构与二维模拟展示的结构基本一致. 但是, 由于计算格点分辨率偏低, 有些三维结构的细节不能完全展示出来, 特别是那些二维模拟中出现的磁岛结构、慢模激波结构, 以及这些结构的演化规律和可能的观测表现等.

(5) 具有三维结构的电流片中是否会发生类似于二维电流片的各种等离子体不稳定性? 二者有何异同? 三维电流片中的等离子体不稳定性和相应的湍流结构以及这些结构之间的相互作用具有什么样的观测表现?

(6) 大尺度磁重联电流片内存在的最小结构有多大? 这个问题涉及到磁化等离子体湍流过程的级联和耗散, 该尺寸是湍流理论中一个非常重要的参数. 理论研究表明, 湍流中的级联过程将有序的能量从大尺度结构转移到小尺度结构. 当承载这些能量的小尺度结构小到 Kolmogorov 耗散尺度以下的时候, 耗散过程开始发挥作用, 将有序的能量转换为无序的能量即热能, 原有的结构消失, 并释放出热能. 因此, Kolmogorov 耗散尺度是等离子体中可以存在的最小结构的尺度. 由于数值耗散的存在, MHD 计算无法模拟这个尺度的结构, 而现有的观测手段因为受到仪器分辨率的限制也无法分辨在这个尺度上的结构.

上述问题的解决, 有助于全面深入地认识和理解太阳爆发的本质和驱动太阳爆发的物理因素, 还将为已有的经典磁重联理论提供全新和丰富的补充内容, 推动等离子体物理研究在相关领域的发展.

3.2 太阳高能带电粒子

太阳爆发过程中有两个带电粒子加速区域, 一个是 CME–耀斑电流片, 另外一个是 CME 驱动的快模激波 [4]. 前者加速效率非常高 ($> 10\%$), 可以在很短的时间 ($< 2\,\mathrm{h}$) 内将各种带电粒子加速到很高的速度, 属于脉冲式的加速; 后者加速效率低 ($< 1\%$), 加速时标长 ($> 10\,\mathrm{h}$), 也称为渐进式的加速. 被磁重联加速的高能粒子既有朝向太阳运动的部分, 也有远离太阳运动的部分; 而被激波加速的高能粒子随激波一起远离太阳, 因此朝向太阳运动的概率非常低. 从射电 Ⅱ 型暴和 Ⅲ 型暴观测资料获得的信息表明, 由激波加速的高能粒子成分比较简单, 主要是质子和电子, 有时候也包含丰度很高的 ^{3}He 离子, 但这些高能粒子都是远离太阳而去的 [54,55].

朝向太阳运动的高能粒子与低层大气 (色球, 甚至是光球) 稠密等离子体相互作用而产生韧致辐射. 韧致辐射是太阳爆发过程中硬 X 射线、甚至 γ 射线的产生机制. 在产生高能辐射的同时, 这些高能粒子的动能转换成周围等离子体的热能, 成为人类在远紫外到可见光波段都能够观测到的太阳耀斑.

在这些高能粒子中, 电子和质子质量比较小, 二者与稠密等离子体相互作用的韧致辐射一般产生 $20\,\mathrm{keV}$ 以上、$1\,\mathrm{MeV}$ 以下的硬 X 射线. 韧致辐射也是产生传统光学耀斑的主要能量来源. 而高能粒子中的 α 粒子、^{3}He 离子及其他重元素 (Fe, Mg, Ne, Si, C, O 等) 由于惯性大、能量高, 与稠密等离子体的相互作用可以引发核反应而产生 γ 射线 (见图 6[9]). 通过研究核反应谱线的宽度, 可以推测出有哪些重离子被加速. 粒子的质量越大, 则惯性越大, 多普勒效应也越明显. Fe 等重元素导致的 γ 射线辐射的谱线宽度可达 α 粒子等轻元素导致的辐射谱线宽度的 10 倍左右. 因此, 根据谱线宽度就可以判断是否有重离子被加速.

除了上述通过研究 γ 射线辐射来间接判断是否有重离子被加速外, 另一个研究重离子加速过程的手段是直接探测重离子的成分、能量、电离度等重要参数. 但是在地球附近探测到的高能粒子可能是经历

了两种加速过程之后的高能粒子, 这些高能粒子也可能在传播的过程中与周围环境发生相互作用而失去了原有的加速信息 [1−4].

与前一种可能性有关的例子是 Cane 等 [56] 研究的事件. 在他们所研究的 29 个强太阳高能粒子事件中, 有 4 个事件的粒子流量随时间的变化呈现出明显的双峰结构. 前一个峰值出现的时刻与探测到的 Fe/O 含量比明显增加的时刻相同, 而后一个峰值出现的时刻则对应着低 Fe/O 含量比被探测到的时刻. Cane 等认为前一个峰值对应的是从耀斑加速区出来的高能粒子, 而后一个峰值则是 CME 加速的结果. 后一种可能性最近被 PSP 的探测结果所证实: 在太阳附近探测到了很多爆发事件和高能粒子, 包括很多重离子, 但这些类型的爆发和重离子过去未在地球附近被探测到 [48]. 因此, 在太阳附近对太阳高能粒子进行就地探测, 将可靠地获得高能粒子加速源区和加速过程的物理特征和相应细节.

涉及到 CME 激波加速的另外一个没有解决的问题是所谓的种子粒子问题. 并不是任何带电粒子都能够有效地被激波加速, 能够被加速的粒子需要有一个初速度, 该粒子能够与激波一起运动一段时间, 之后才能够被激波捕捉到并加速. 这样的粒子被称作种子粒子. 令人不解的问题是种子粒子是从哪里来的. 一种看法是前面发生的耀斑把高能粒子抛入行星际空间, 一部分离开了太阳, 留下一部分成为种子粒子; 另一种理论是在耀斑区即磁重联区, 被加速的粒子顺着磁力线进入 CME 前的激波, 然后被激波进一步加速 [57]. 前一种解释遇到的困难是这些种子粒子为什么还会在太阳周围逗留而没有离开, 后一种解释遇到的问题是磁重联区域周围的磁场与激波周围的磁场之间没有连接, 在磁重联区被加速的带电粒子如何进入激波加速区, 这些问题构成了 “触碰计划” 抵近探测非常好的科学目标.

3.3 CME 驱动的快模激波

“触碰计划” 抵近探测的第三个科学目标是 CME 驱动的快模激波本身. 由快速 CME 驱动的快模激波是高速带电粒子的一个加速器, 对灾害性空间天气具有重要贡献的高能粒子有很大一部分是被这样的激波所加速. 在太阳附近运行的探测器完全有可能穿过 CME 及其前方的快模激波 (见图 7), 因此有机会同时探测被激波加速的高能粒子和激波本身. 观测与理论均指出, 强度较高的太阳爆发过程总是会产生 CME 驱动的快模激波. 快模激波能够加速带电粒子, 且是太阳爆发过程中缓变高能粒子成分的产生区域. 尽管快模激波对粒子加速的效率很低 ($< 1\%$), 但是由于激波可以在行星际空间长时间传播, 因此最后的积累效应很明显.

目前直接观测和研究 CME 激波并不容易. 首先, 利用成像手段观测激波时, 其效果取决于探测设备接收到的辐射总量, 而辐射总量又正比于辐射等离子体密度的平方. 与周围其他密度或者密度变化较大的结构相比, 因为激波压缩而引起的等离子体密度变化

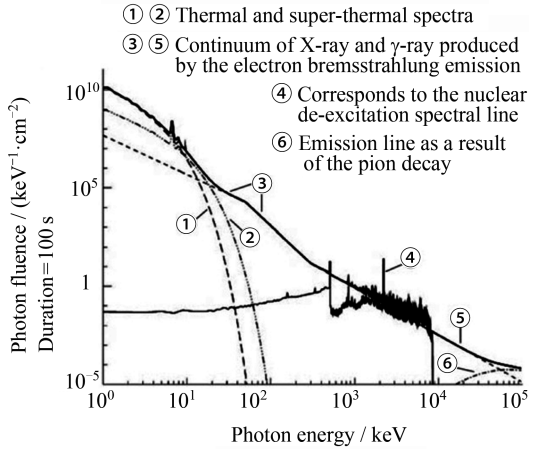

图 6 一个大耀斑产生的能量从 1 keV 到 100 MeV 的 X 射线和 γ 射线谱

Fig. 6 Spectra of X-ray and γ-ray of energy from 1 keV to 100 MeV produced by a major flare

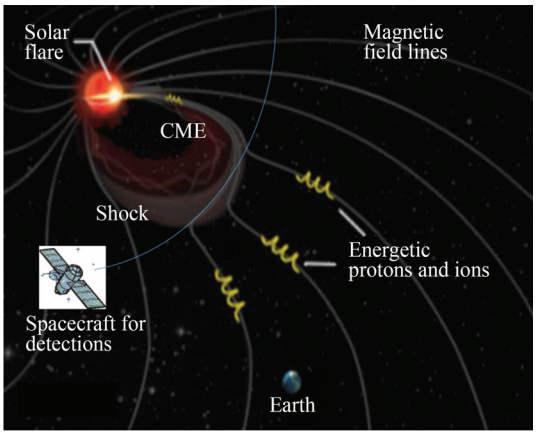

图 7 太阳爆发过程的各种产物以及可能的进行抵近探测的飞船轨道

Fig. 7 Various products of the solar eruption and the possible orbit of the spacecraft for the in situ measurements

并不明显 (最大变化为 4 倍, 一般在 1.5~2.5 之间). 因此, 直接从各个波段的单色像辨认 CME 激波并不容易. 其次, 尽管射电观测可以帮助直接判断 CME 激波的产生和传播 (射电 Ⅱ 型暴), 而且利用射电资料分析和研究 CME 激波的工作开展得最多, 但是因为缺乏空间定位功能, 而且通过射电Ⅱ型暴信息研究其空间传播过程依赖于日冕密度分布模型, 所以很难从中直接获得激波的动力学和物理参数空间分布信息. 迄今为止, 只有 Ma 等 [58] 结合单色像和射电观测资料, 成功对 CME 激波的图像和物理性质进行了分析和研究.

如果加上光谱诊断手段, 就可以得到 CME 和激波的热力学性质、运动状态、内部等离子体成分及分布的信息 [59]. 然后, 根据激波前后的跃变条件, 包括磁场的旋转角度, 就可以证实观测到的间断面是否为快模激波, 并估算出激波周围的磁场强度. 但是, CME 激波的光谱特征多集中在远紫外波段, 需要进行空间观测. 目前已有的 CME 激波光谱诊断工作都是利用 SOHO/UVCS 的观测资料开展的. 一般是结合 SOHO/LASCO 的观测资料, 在确定 CME 激波空间位置的同时对其进行光谱诊断, 提取其中的物理信息和元素成分信息.

快模激波会压缩其周围的等离子体, 所以激波前后的等离子体会被明显加热. 观测表明 [58], CME 前的快模激波在 193 Å和 211 Å两个波段上表现明显. 谱线 193 Å和 211 Å分别是 Fe XII 和 Fe XIV 离子产生的, 其辐射的极大温度分别为 1.58×10^6 K 与 2.00×10^6 K. 对多个波段上获得资料的综合研究表明, 快模激波过后, 等离子体的温度被加热到了 2.80×10^6 K. 另外, O VI 的双线和 Lyα 线都可以用来对激波进行直接的运动学温度诊断. Mancuso 等 [60] 利用 UVCS 资料, 在 CME 激波前后观测到了异常展宽的 O VI 双线, 由此推导出超高的 10^8 K 的离子温度和 10^7 K 的电子温度. 利用 UV 和白光资料, Bemporad 等 [61] 通过激波跃变条件, 得到了 CME 激波前后的磁场强度分别为 0.019 G 和 0.037 G*, 磁场在激波前后与激波面的夹角从 23° 旋转成为 15°, 定量地证实了 CME 驱动的激波是快模激波.

理论与观测均表明, CME 激波向外膨胀的速度很快 [60−63], 在离开 $10\,R_\mathrm{s}$ 的位置上, 可以展开到很大的空间范围内 (110°). 这一方面让卫星穿越激波的概率增大, 另一方面其中的物质密度下降又给实地探测增加了难度, 对探测器提出了更高的要求. “触碰计划” 的实施能为人类提供一个直接探测 CME 激波的机会, 也让人类能够利用一个探测器既能探测高能粒子, 对爆发过程中的两个带电粒子加速区域进行直接的探测.

3.4 日冕磁场直接测量与日冕加热

利用探测器接近太阳的机会可以直接获得日冕磁场信息, 实现对日冕磁场的直接测量. 利用日冕磁场第一手信息, 结合抵近探测的其他高分辨率观测数据, 有望解决困扰太阳物理学家长达一个世纪的难题——日冕加热. 目前主流的日冕加热机制有两种: 纳耀斑加热和磁流体波加热. 纳耀斑是尺度和释放能量比正常耀斑低若干个数量级的微小尺度耀斑. Parker[64] 认为日冕中存在数量众多的纳耀斑 [65,66], 其释放的能量加热了日冕. 而另一部分学者认为, 太阳大气中的磁流体动力学波尤其是阿尔芬波的耗散将能量沉积在太阳高层大气中, 导致了日冕温度的反常升高 [67−69]. 由于观测数据的分辨率不够高, 人类长期以来没有观测到日冕加热的直接证据, 如单个纳耀斑事件或磁流体动力学波的耗散过程.

利用探空火箭 Hi-C 获得的数据, Cirtain 等 [63] 发现日冕中存在适合纳耀斑产生的磁场缠绕编织的结构 (Magnetic Braiding). 此类结构中极易产生大量小尺度磁重联, 即纳耀斑事件. 但是他们的数据波段单一、时间跨度太短 (仅有几分钟), 不足以全面、系统地研究纳耀斑的具体加热过程和加热程度, 因而也就无法定量研究纳耀斑对日冕加热的贡献, 难以对加热机制做出判断. 利用 IRIS 的观测数据, Testa 等 [71] 和 Tian 等 [72] 发现太阳过渡区中存在一些小尺度的增亮事件, 这些小尺度的能量释放事件可能是纳耀斑的直接观测证据. 然而, 由于 IRIS 卫星无法探测温度为 10^5 K 以上的太阳大气, 因此这些可能的纳耀斑事件到底将太阳大气加热到了多少度尚未可知, 从而也无法定量研究纳耀斑对日冕加热的贡献. 另外, IRIS 观测数据的空间分辨率有限, 而且还受投影效应的影响, 无法考查加热尺度在 250 km 范围内的三维空间分布 [9].

PSP 有望直接获得距离太阳表面 $9\,R_\mathrm{s}$ 的位置附近的磁场信息. 但是 PSP 的轨道倾角只有 3.4°, 因此得到的主要是太阳赤道附近的磁场信息, 高纬度的磁

*1 G = 10^{-4} T

场信息难以得到. SO 的轨道倾角较大, 但是 SO 的近日点为 $60\,R_{\rm s}$, 无法对日冕磁场进行实地探测. 抵近探测任务 “触碰计划” 的探测器将沿着倾角较大的轨道运行, 可对不同纬度上的日冕磁场进行直接探测. 结合 PSP 的探测结果, 将可以得到更加完整的近日空间日冕磁场的真实信息.

如果 “触碰计划” 探测器上搭载远紫外光谱成像仪, 空间分辨达到 200 km, 将可以开展有史以来最高分辨率的日冕和过渡区光谱观测, 也将是最高分辨率的日冕成像观测; 其持续的高分辨率单色成像观测将获得大量纳耀斑数据, 相应的高分辨率光谱观测还将使定量研究单个纳耀斑事件的加热成为可能, 从而能够评估纳耀斑对日冕加热的贡献. 这将极大改善研究太阳爆发触发机制、日冕加热、太阳风加速的数据资源, 构造较为完整的理论模型和完善的数值模拟程序, 最终建立更加可靠的太阳活动物理预报模型.

4 有效载荷配置

“触碰计划” 抵近探测任务的最低目标是探测太阳附近的电磁场和高能粒子, 最高目标是近距离观测日冕中的磁场和等离子体结构. 为实现抵近探测任务的最低目标和最高目标, 初步考虑的有效载荷包括以下设备: ①电磁场探测仪, 用于探测电磁场强度与电流密度及其方向; ②高能粒子探测仪, 用于探测在 CME–耀斑电流片中和 CME 驱动的激波上加速的电子、质子、α 粒子、氦–3、氘–2 及其他重离子; ③低频射电频谱仪, 用于探测 0.1∼20 MHz 范围内的 Ⅱ 型和 Ⅲ 型射电暴, 在射电波段补充电流片和 CME 激波的信息; ④远紫外成像光谱仪, 用于观测和监视过渡区的高温 ($> 10^5$ K) 成分以及 CME 激波, 特征谱线包括 FeXⅫ λ193, Fe XⅣλ211, 以及 170∼211 Å, 246∼292 Å两个波段内的谱线; ⑤远紫外日冕光谱仪, 用于观测电流片和 CME 中的高温 (3×10^6∼3×10^7 K) 等离子体成分, 特征谱线有包括 [Fe XⅧ] λ 974, [Ca XⅣ] λ 943, Fe XXIλ 1354; ⑥白光日冕仪, 用于监测大尺度日冕磁场结构、CME、电流片, 并帮助其他仪器进行观测目标的空间定位.

考虑到现有火箭运载能力和具体科学目标优先级别不同, 这些设备的重要性也存在差别. 在这些设备中, 最重要的是电磁场探测仪和粒子探测仪. 这两个设备的特点是结构相对简单、质量较轻, 易于送入太空. 另外, 电磁场探测仪和粒子探测仪以电流片周围的电磁场结构、等离子体分布、CME 激波的内部结构以及其中和周围的高能粒子为探测对象, 观测数据内容简单、容易处理, 属于 “触碰计划” 所要实现的最低目标. 本着先易后难的原则, 这两台有效载荷将作为太阳抵近探测 “触碰计划” 第一梯队的载荷列入优先考虑的设备; 在平台空间允许的情况下, 考虑将一台光学或红外日冕仪纳入第一梯队的设备.

电磁场探测仪的重要性在于被用于探测电磁场、特别是电流片周围的电磁场强度和分布特征. 电磁场分布特征的重要性甚至超过了其强度, 因为根据电磁场的分布可以推算出电流片的厚度, 以此检验对大尺度磁重联电流片几何结构和物理性质的几何判断, 最终结果有可能全面改写经典磁重联理论 [18,19]. 电磁场探测仪的另外一个用途是探测日冕磁场. 在没有爆发活动的时候, 该仪器可以直接获得日冕矢量磁场的有关信息, 彻底绕开遥感观测难以直接获得日冕磁场的障碍, 为最终解决日冕加热问题提供最直接的观 (探) 测资料.

粒子探测仪用于探测和收集电流片中、CME 激波中以及周围的带电粒子. 电流片是磁重联发生的区域, 其中的磁场耗散和能量转换导致等离子体加热和带电粒子加速, 因此电流片中应该充满高温等离子体和高能带电粒子. 这些被加热和被加速的粒子也会部分进入 CME 外层, 因此在 CME 中也可能会探测到这些粒子. 此外, CME 激波也能够加热等离子体和加速带电粒子. 在这些带电粒子中, 热粒子包括 Fe XⅧ, Ca XⅣ, Fe XXI, Si XⅫ 等磁重联和电流片的标识离子, 以及 Fe XⅫ 和 Fe XⅣ 等激波标识离子; 非热粒子包括高能电子、质子、^{2}D 离子、^{3}He 离子、α 粒子以及其他的重离子 (Fe, Mg, Ne, Si, C, O 等). 通过研究这些高能粒子的能谱, 可以还原出高能粒子的加速过程、主要加速特征, 并进一步认识和了解其加速的物理本质.

在探测器平台空间允许的情况下, 可以增加远紫外成像光谱仪和低频射电频谱仪. 前者提供高分辨率的远紫外图像与光谱, 可为研究日冕加热机制提供高质量的观测资料; 而后者提供高频谱分辨率的射电频谱图, 可为同时研究带电粒子的加速机制、加速过程以及加速结果提供第一手资料. 这是抵近探测 “触碰计划” 的中等目标.

最后, 在探测器平台上的空间足够大、运载火箭

运力足够强的情况下, 考虑将远紫外日冕光谱仪搭载到探测器上, 获取研究电流片和 CME 精细结构的光学资料, 进一步提高对这两个重要目标的研究质量与产出. 将 6 台设备一起送到距离日心 10 R_s 的圆形或近圆形轨道上, 以实地探测与遥感观测相结合的方式实现对太阳和太阳爆发进行前所未有的多角度、多层次、多目标、高分辨的研究, 是抵近探测 “触碰计划” 的最高目标.

4.1　电磁场探测仪

理论研究和观测表明, 典型爆发过程中的磁重联感应电场的极大值一般在 1 V·cm^{-1} 的量级 [11,73]. 在其他情况和环境中, 电场及其扰动的实际空间探测结果一般最大能够达到 0.01 V·cm^{-1} 量级. 日冕磁场强度一般在若干高斯的量级, Yang 等 [74] 最新的研究结果表明, 低层日冕中的磁场强度在 1~4 G 范围内. 而 Ko 等 [14] 的研究结果则表明, 在距离太阳表面 0.5 R_s 的磁重联电流片附近, 磁场强度在 0.5~1 G 范围内. 根据这些结果, 可以确定电磁场探测仪的探测指标 (见表 1).

为了保证探测数据满足科学研究的需求, 必须对探测器进行相应的标定. 目前, 一般采用三种传感器对直流 (DC) 和频率达 1 MHz 的交变电磁场进行综合探测, 包括直流以及极低频的磁通门传感器、低频的搜索线圈传感器以及从直流到 1 MHz 覆盖的电探针传感器. 磁场通过磁通门传感器和搜索线圈传感器探测, 电场通过电探针传感器探测.

磁通门磁强计由三轴磁通门传感器和电子线路组成, 其利用次级线圈中二次谐波正比于外场的原理来探测磁场. 传感器由绕在磁芯上的初级绕组和包围磁芯的次级线圈组成. 在初级绕组激励电流脉冲作用下, 每个周期磁芯被饱和激励两次. 图 8 展示磁芯的磁滞回线和次级线圈中的磁感应电动势. 图 8(a) 表示磁芯的磁滞回线. 图 8(b) 表示激励电流在磁芯中产生的磁场 H, 虚线表示在有外磁场的情况下磁芯中的总磁场. 磁芯中的磁感应强度 B 因总磁场过强而达到饱和, 图 8(c) 中虚线表示外磁场正方向的磁场饱和时间更长. 图 8(d) 和图 8(e) 表示次级线圈中的感应电动势及其 Fourier 分析结果. 图 8(e) 中虚线代表二次谐波分量, 其幅度正比于外磁场的大小.

磁通门磁强计的标定分为实验室标定和在轨标定. 根据磁通门磁强计的测量原理, 实验室标定包括: 模量转换系数、零点偏置、温度曲线、非正交度、量程、非线性度、单频点噪声、RMS 分辨率、时漂等. 其中前四项参数是测量校正参数, 用于将磁强计输出的电压值转换为磁场值并校正; 后五项参数为性能评估参数, 用于评估磁强计的测量性能. 在轨标定是指磁强计在轨运行期间利用卫星的机动旋转或者空间磁场的波动, 开展磁场数据标定. 其主要原理是基于某些已知的变化, 例如卫星机动、特定磁场波模或磁场模型, 校正磁场测量中的偏差. 常见的标定方法有: 卫星旋转机动标定、阿尔芬波标定、镜模波标定等.

磁强计标定的困难在于测量零点存在时间漂移, 所以其磁场测量为相对测量. 造成零点时间漂移的原因包括: 温度漂移、仪器时间漂移、平台磁干扰偏移等. 这些因素的存在致使磁通门磁强计在轨运行期间需要持续开展在轨定标, 以满足磁场测量精度的要

表 1　电磁场探测仪的指标要求

Table 1　Parameters for the magneto-electrometer

目标物理量	仪器性能	探测要求
磁场	量程/G	±0.655 36, ±0.163 84, ±0.040 96, ±0.010 24
	噪声	$\leqslant 3\times10^{-7}$ G·Hz$^{-1/2}$@1 Hz
	数字分辨率/bit	24
	正交度/(°)	优于 0.005
	采样率/Hz	50
电场	量程/(V·m^{-1})	±10
	采样分辨率/(mV·m^{-1})	1
电磁场波动	磁场波动带宽/kHz	DC, 约 20
	电场波动带宽/MHz	DC, 约 1
	磁场波动探测噪声	0.01 pT·Hz$^{-1/2}$@1 kHz
	电场波动探测噪声	平均 0.2μV·m^{-1}·Hz$^{-1/2}$@ 1 Hz~1 MHz

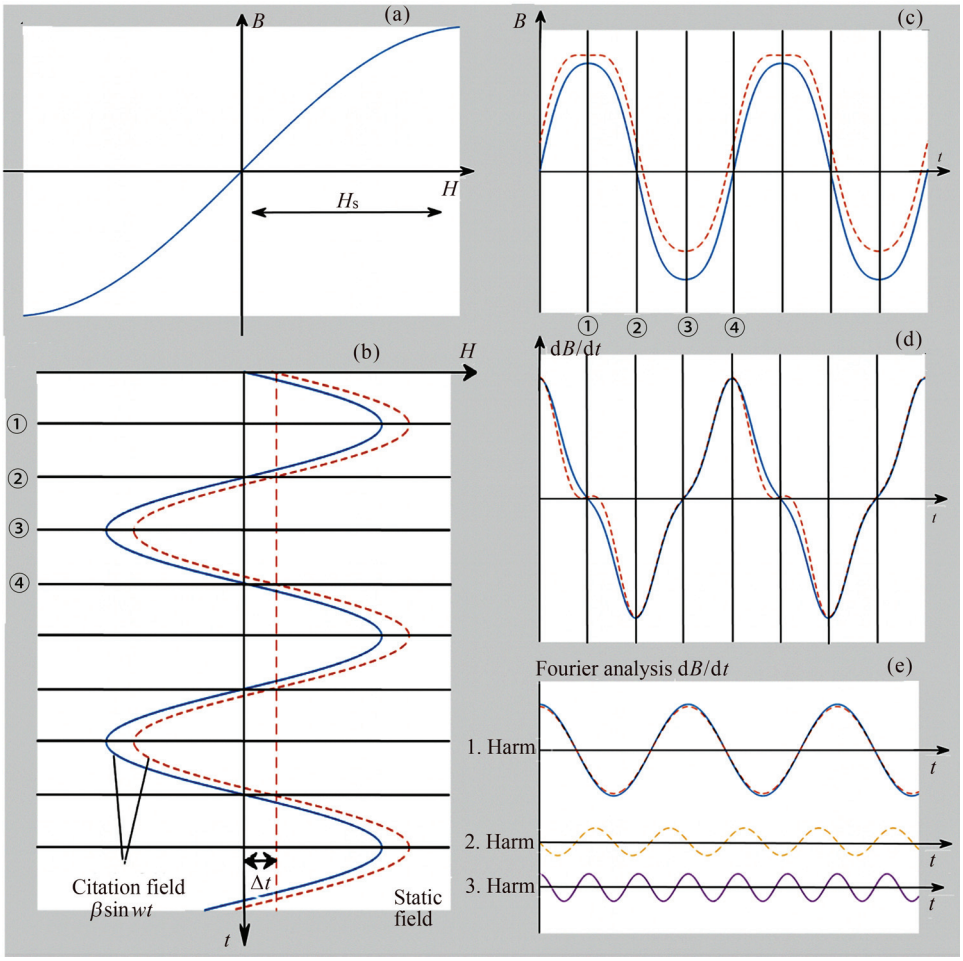

图 8 磁芯中的磁场强度和次级线圈中的感应电动势

Fig. 8 Strength of the magnetic field in the core and the induced electromotive force in the secondary coil

求. 此外, 矢量磁场测量存在非正交偏差, 该误差与磁场强度成正比. 因此, 在磁场较强 (> 0.5 G) 的情况下, 该误差相对较大 (约 10^{-5} G).

通常用于测量太阳风的磁强计的最重要的定标对象是磁场直流偏置的定标, 即零点的定标. 主流的在轨定标方法包括阿尔芬波定标法与卫星旋转定标方法. 其中: 阿尔芬波定标是利用外部磁场旋转而磁场强度不变的原理, 确定磁强计的零点; 而卫星旋转定标则是利用外部磁场稳定、卫星旋转的方式同样达到磁场方向在磁强计测量坐标系内的变化, 从而实现其零点的定标.

上述定标方法在多个测量太阳风磁场的卫星上获得了应用并在持续改进. 根据 Farrell 等 [75] 的方法, "触碰计划" 项目组张艺腾团队利用 ACE 卫星数据, 对磁强计在轨定标的方法进行了仿真重建, 获得了 0.08 和 0.13 nT 的仿真定标精度. 针对太阳抵近探测 "触碰计划", 如果结合上述两种定标方法, 在特定时间进行卫星旋转机动定标, 其余时间利用数据搜索阿尔芬波定标, 将有望获得较为理想的定标结果.

电场仪的标定困难有两个. 一是在实验室很难重建标准的等离子体电场环境; 二是在轨运行期间很难获得已知的稳定电场环境. 尽管如此, "触碰计划" 仍然要对电场仪进行实验室和在轨标定.

在电场仪的实验室标定中, 通常做法是通过开展部分环节的仪器测试标定替代整体的仪器标定, 具体包括: ①施加等离子体环境中获得电压的等效电压, 测量电场仪内部对电压的响应, 并获得部分仪器参数; ②在与空间等离子体环境不同的非标准等离子体环境中, 进行仪器响应测试, 但此部分测试的参数无法在空间中使用, 仅用于检验电场仪的工作状态.

在电场仪的在轨标定中, 由于在探测器飞行期间很难获得已知的稳定电场环境, 所以目前尚没有规范的在轨定标技术. 通常情况下, 近地轨道上的电场仪在轨标定可利用稳定太阳风中的对流电场, 对电场仪数据进行标定. 但是如何对太阳附近的电场仪进行在轨标定还未见相关报道. 在 “触碰计划” 推进过程中, 项目组研究团队将对该问题进行深入研究.

4.2 高能粒子探测仪

高能带电粒子探测仪用于探测在电流片中和 CME 驱动的激波上被加速的电子、质子、α 粒子、氦–3、氘–2 以及其他重离子, 也用于探测电流片和 CME 泡中的等离子体粒子. 根据科学目标需求, 可以确定带电粒子探测仪的探测指标 (见表 2).

在使用上述仪器对带电粒子进行探测之前, 也需要对中高能粒子探测器得到的数据进行标定与反演, 目的在于将探测器对粒子的计数转换为粒子的能谱信息, 也就是探测到的粒子个数随其能量的分布或者是粒子在各个能量段上的微分方向强度. 探测器得到的直接探测量是粒子计数率 N (s^{-1}), 为了方便数据的比对, 需要将数据进行归一化处理. 将计数率除以仪器的几何因子 G, 得到探测器微分方向通量强度

$$M = N/G. \tag{1}$$

这里, M 的单位为 ($\mathrm{cm}^2{\cdot}\mathrm{s}^{-1}{\cdot}\mathrm{sr}^{-1}$), G ($\mathrm{cm}^2{\cdot}\mathrm{sr}$) 为描述仪器自身性能的参数, 表征探测器接收和记录粒子能力. 计算探测器的几何因子时, 不仅要考虑探测器的实际结构, 还必须要考虑粒子在传输过程中与周围等离子体相互作用的物理过程, 特别是粒子之间的相互干扰. Zhang 等 [76] 改进了几何因子计算方法, 考虑了上述因素的影响.

探测器直接得到的是不同能量段的粒子数 N, 但是它与能谱 f 之间存在必然的联系, 因此可以将 N 写成 f 的函数形式: $N = F(f)$. 定义探测器的响应函数:

$$A = \iint \epsilon(x, y, \theta, \varphi, E_{\mathrm{d}}, E_{\mathrm{b}}) \mathrm{d}S \mathrm{d}\Omega. \tag{2}$$

表 2 粒子探测仪的性能指标

Table 2 Parameters for particle detectors

	设备	性能指标
等离子体探测器	离子探头	能量范围: 0.009 keV/Q~40 keV / Q 能量分辨率: 8.0% 探测视场: $> 180^\circ \times 90^\circ$ 质量数范围: 1~75 amu 质量分辨率 ($M/\Delta M$): > 10.2 @H^+
	电子探头	能量范围: 9 eV~40 keV 能量分辨率: 8.0% 探测视场: $360^\circ \times 90^\circ$
中高能带电粒子探测器	中能粒子探头	电子能量: 20~400 keV 质子能量: 20 keV~2 MeV 重离子能量: 40 keV / n ~1.5 MeV / n 离子种类: ^{3}He/^{4}He, CNO, Ne, Mg, Si, Fe 角分布: 9 个方向
	高能粒子探头	电子能量: 0.1~15 MeV 质子能量: 2~300 MeV 重离子能量: 8~400 MeV / n 粒子种类: 可区分质子、电子、He-Fe 等重离子 测量方向: 2 个垂直或者前后向探头
	离子电荷态探头	离子能量: 0.2~5.4 MeV /n (根据粒子种类而变) 离子种类: H, He, O, Si, Fe 电荷态分辨率: $\Delta Q/Q = 0.11$, $E < 1$ MeV / Q; $\Delta Q/Q = 0.32$, $E < 3$ MeV / Q

其中: ϵ 是能量为 $E_{\rm b}$ 的入射粒子从辐射源的位置 (x,y) 上射出, 以角度 θ 和 φ 入射到探测器上时, 探测器给出能量响应为 $E_{\rm b}$ 的概率; S 为入射平面源的面积; θ 和 φ 为入射粒子在探测器上的天顶角和方位角; Ω 为入射源对探测器所张立体角. 利用式 (2), 已知探测器的几何形状, 通过蒙特卡洛模拟的方法可以得到响应函数 A.

根据式 (2) 可知, 探测器在某个能量段 i 上获得的粒子数 N_i 是多个能量段上的粒子综合效应的集体表现, 也就是说:

$$N_i=\sum_{j=1}^{n}a_{ij}f_j,\quad i=1,2,\cdots,m. \tag{3}$$

其中: n 是对 N_i 有贡献的所有能量段的总数; m 为实际观测进行的采样数; f_j 为第 j 个能段上的粒子数, 也就是能谱大小; a_{ij} 为通过蒙特卡洛模拟得到的离散化的探测器响应函数, 即 j 能段上的粒子在探测器 i 能段上有所表现的概率. 根据探测器收集到的探测样本 N_i, 可以利用最小二乘法或最大似然法等数值方法得到粒子能谱 f_i.

通过选用国际上通用的或被广泛认可的观测结果 (模型) 作为标准, 与实际探测数据进行比对, 验证数据的有效性、可用性, 从而完成对上述粒子探测数据的标定. 考虑到空间环境变化的复杂性, 找到两类数据在时空上的完全重合比较困难. 因此, 要合理选取比对数据, 并考虑对所选取数据在可允许单位尺度的平均计算. 对于缺乏可进行交叉定标的国际通用或被广泛认可的观测结果 (模型), 除可根据现有对空间环境的认识、理论对探测数据进行检验标校外, 也可利用中国国内各系列卫星同类或类似探测仪器的探测数据进行比对验证.

4.3 低频射电频谱仪

频率在 20 MHz 以上的太阳爆发过程中产生的射电暴信号可以在地面上探测到, 因此射电信号的空间探测主要针对频率低于 20 MHz 的辐射. 抵近探测任务 “触碰计划” 主要针对频率在 0.1~20 MHz 之间的射电信号, 相应频谱仪的探测指标列于表 3.

射电信号的反演和标定相对简单. 射电 Ⅱ 型暴和射电 Ⅲ 型暴的动态频谱图具有足够的信息可以揭示高能粒子和 CME 激波在日冕和行星际空间的运动过程, 将低频射电频谱仪接收到的信号直接进行 Fourier 变换, 得到动态频谱图即可. 考虑到星载设备受有效载荷的限制, 可以将观测数据传到地面之后再做后续处理. 信号强度的绝对定标比较困难. 地面或者近地轨道上的射电信号绝对定标一般使用银河系背景或者是地球极区千米波射电辐射流量来校对, 但是这两个信号很弱, 定标所用设备比较复杂而笨重, 抵近探测无法使用这两个方法. 因此暂时无法对射电信号强度进行绝对定标.

4.4 远紫外光谱成像仪

远紫外成像光谱仪用于对过渡区的高温 ($>10^5$ K) 成分进行高分辨率监测, 然后结合其他设备的观测资料, 研究纳耀斑对日冕加热的贡献. 该设备包括光谱观测仪和成像观测仪, 具体功能和探测指标列于表 4.

4.5 远紫外日冕光谱仪

远紫外日冕光谱仪用于针对电流片、 CME 泡、CME 激波的等离子体诊断, 辨别证认这些结构中的精细结构以及加热过程. 根据这些科学目标, 仪器探测指标列于表 5.

表 3 低频射电频谱仪性能和探测指标

Table 3 Parameters for the low-frequency radio spectrometer

主要功能	性能指标
(1) 100 kHz~20 MHz 的频率信号采集	(1) 采样频率、位宽、动态范围 三路信号输入, 采用三路 ADC 采样, 每路 ADC 指标要求: 采样率 Fs: 50 MHz 无杂散动态范围 SFDR: 89 dBc 信噪比 SNR: 72 dBfs 有效采样位数 ENOB: 11.6 bit
(2) 数字滤波, 杂散去干扰	
(3) 频率分析, 数据存储	
(4) 和主机通信: 接收命令字、上传数据	
(5) 系统自检	(2) 频率分辨率和分析时间 频率分辨率: 6.1 kHz 时间分辨率: 10 ms
(6) 电源浪涌, 电磁兼容	

4.6 光学与红外光谱成像日冕仪

抵近探测任务使用的光学与红外光谱日冕仪是一台普通的大视场望远镜. 由于不直接对准太阳观测, 太空中没有大气散射, 所以不需要挡板. 这台望远镜可在防热板后从旁边观测日冕、CME、电流片, 观测数据不仅可以帮助光谱仪、电磁场探测仪和高能粒子探测仪对观测目标进行空间定位, 而且可以采集白光、红外波段日冕特征结构内的光谱及其图像.

5 任务总体设计

实施太阳抵近探测任务 “触碰计划” 的难度将超过以往任何深空探测任务. “触碰计划” 的实施涉及到多项关键技术攻关, 存在多个技术难题.

第一, 是对运载火箭技术和推进系统能力的挑战. “触碰计划” 拟利用大推力火箭把探测器、有效载荷、推进系统和燃料送入相应轨道; 然后借助推进系统降低探测器速度, 释放出探测器的轨道额外能量. 这一过程蕴含着对现有技术的巨大挑战和超高的工程实施难度. 国际上类似探测计划都采用电推进技术, 而国内的电推进技术还有很大的发展空间. 在目前和可以预见的将来, 我国的大推力火箭还有进一步发展的空间. 近期获悉长征九号运载火箭的研发已经获得国家立项, 这对 “触碰计划” 的推进是一个利好消息.

第二, 对探测设备采取有效的热防护措施是实现太阳抵近探测的重要保证. 一般来说, 热防护系统是探测器中最大的系统, 特别是对抵近探测这样的任务. 但是, 为了降低发射成本, 又要尽可能地降低该系统重量、减小其尺寸, 这就对热防护系统的生产材料以及如何将这些材料组合为有效的热防护系统的工艺提出了极高的要求.

第三, 日地距离为 1.5×10^8 km. “触碰计划” 探测器运行期间, 始终都需要有一个功能强大、稳定可靠、反应迅速的测控系统, 而中国目前的测控系统尚未达到实现抵近探测的要求.

第四, 太阳附近存在大量行星际尘埃, 甚至是小块岩石. 需要认真论证采用什么样的技术和防护措施, 可以将尘埃对探测器的影响降到最低, 同时尽量避开与小岩石的相撞, 即使撞上, 探测器也不会立刻失效. 而我国目前在这方面的研究基础几乎是空白.

上述困难和挑战决定了太阳抵近探测任务 “触碰计划” 必须分阶段、分步骤进行, 初步考虑大致分为三个阶段. 第一阶段开展地面实验和浮空平台观测实验, 完成上述科学目标的深化论证, 同时开展南极浮空平台太阳观测实验, 为将来深空探测培养科技人员、积累工程技术经验, 包括验证探测器的设计方案、考察各设备的配置对低温低压环境的适应性. 在南极开展临空观测, 与地面观测和空间观测相比有如下优势: 一是长时间持续不间断的观测; 二是极好的大气视宁度, 使得望远镜性能达到衍射分辨率极限, 而且不受天气变化的影响; 三是能够以远低于空间观测的成本而获得与空间观测质量相近的数据, 经济实惠 (见图 9).

表 4 远紫外成像光谱仪探测指标

Table 4 Parameters for the EUV filtergram imager

光谱仪	单色像成像仪
选择如下两个波段中合适的谱线: 170~211 Å 246~292 Å	在 304 Å, 171 Å, 211 Å, 94 Å, 131 Å 五个波段上工作, 透过带宽 10~30 Å (如果可能的话, 在 5~10 Å之间更好)

表 5 远紫外日冕光谱仪探测指标

Table 5 Parameters for the EUV coronal spectrometer

探测目标	温度范围/K	谱线
电流片外部等离子体诊断	10^4~10^5	Lyα λ 1216, O VIλ1032
电流片内部等离子体诊断	3×10^6~10^7	[Fe XVIII] λ974, [Ca XIV] λ944, Fe XXIλ1354
激波等离子体诊断	10^6 ~2×10^6	Fe XIIλ194, Fe XIVλ211

注 太阳光谱学中带有方括号的谱线为日冕禁线, 其只在日冕的稀薄环境中因原子或离子的电四极跃迁或者磁偶极跃迁产生.

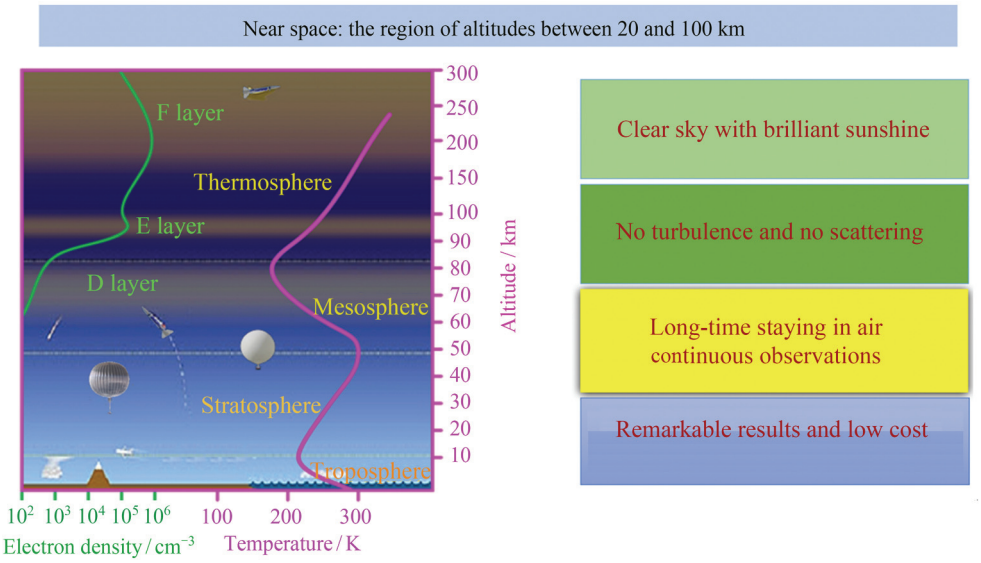

图 9 临近空间的定义以及在临近空间观测太阳的优势

Fig. 9 Definition of the near space and the advantage in observing the Sun in the near space

直接开展近日、近圆轨道上的抵近探测难度很大, 无法一步到位. 因此, 必须立足现有条件, 在第二阶段的任务中, 以大倾角、大椭圆轨道的方式开展中间过程的实验和验证. 使用长征五号运载火箭加上面级推进技术, 通过木星借力和电推进, 将探测器送入一个倾斜 (与黄道面交角大于 60°) 的大椭圆轨道, 远日点在约 125 R_s 附近, 近日点在 5 R_s 附近. 在探测器非常靠近太阳的距离上: 一方面可以进行相应的科学观测、获取科研数据, 为抵近探测储备科学目标; 其次, 由于探测器轨道具有较大的倾角, 还可以在近距离上对太阳极区的磁场和等离子体状态进行探测, 从而填补极区磁场和等离子体信息的空白; 第三方面, 可以对电推进技术、仪器保温防护、深空通信测控、探测器姿态控制等重要技术进行检验, 还可以在太阳附近释放小探测器, 进行新型推进减速实验, 为下一阶段的抵近探测任务储备技术力量.

在任务的第三阶段, 迈向终极科学目标. 在上述关键技术得到验证、主要问题得到解决的基础上, 开展真正意义上的太阳爆发抵近探测. 期望将探测器的轨道逐渐调节至半径为 10~20 R_s 的近圆形轨道, 轨道倾角 45° 左右. 这有利于遇到并穿过 CME 及其后面的磁重联电流片, 对电流片和 CME 等离子体性质、磁场结构进行实地 (原位) 探测, 也可对其他类型的太阳活动实现近距离观测, 还可实现对日冕磁场的直接探测, 帮助解决长期困惑太阳物理学界的日冕加热难题. 一个口径为 10 cm 的望远镜, 在抵近探测的轨道上, 可以发挥地面上 2 m 左右口径望远镜的功能, 而且不受地球大气的干扰.

5.1 第一阶段任务规划

第一阶段的任务是在南极的浮空平台上搭载一到两套太阳观测设备, 在临近空间开展太阳爆发活动的观测研究 (见图 9). 其中一套设备是白光日冕仪, 另一套设备是全日面磁场和日震探测仪. 这两套仪器可充分利用在南极开展临空观测的优势, 相辅相成, 观测数据将有助于促进对太阳从内部对流层的磁场产生区域到外部大气磁能释放区域的整个物理链条的理解.

白光日冕仪用于观测日冕磁场结构和等离子体特性, 并长时间、连续监测太阳外层大气物理性质和演化特征. 驱动太阳爆发的能量来自于太阳大气的最底层——光球, 而太阳爆发起始于太阳大气的最外层——日冕. 因此, 研究太阳大气中通过日冕磁结构的变化而进行的能量转化和传输过程, 结合地面与空间观测资料, 考查驱动太阳爆发的能量从光球、通过色球、最终进入日冕的通道, 研究太阳爆发的触发机制, 从而建立太阳爆发预警预报的物理模型.

全日面磁场和日震探测仪用于测量光球层的磁场分布和演化以及多普勒速度变化. 磁场是太阳爆发活动最关键的物理量, 南极极好的视宁度使得全日面磁场仪不仅有望获得活动区高空间分辨率和高时

间分辨率的磁图, 追踪活动区长达十几天的整个生命历程的演化, 并能够探测宁静区磁场和对流的相互作用, 回答有关小尺度磁场的特征和本质的问题. 日震探测仪通过测量太阳光球层的辐射强度和多普勒速度的变化来接收太阳内部信息, 并进一步探测太阳内部的结构和发生的物理过程. 这是目前研究太阳内部结构和物理性质的常用设备.

5.2　第二阶段任务规划

第二阶段的任务是利用木星借力和电推进减速技术, 将探测器送入一个倾斜 (与黄道面交角超过 45°) 的椭圆轨道上, 远日点在 125 R_s 附近, 近日点在 5 R_s (见图 10). 当探测器非常靠近太阳时, 可以获得日冕磁场和等离子体速度场的实地探测资料, 包括极区磁场和等离子体速度场资料; 在遇到 CME 爆发时, 可直接进入 CME、甚至是电流片内部进行探测, 获得有关 CME 和电流片本身物理性质的重要信息, 直接探测高能带电粒子的源区和产生高能带电粒子的物理过程, 为最终开展的抵近探测储备科学目标. 在这项实验开展的过程中, 可同时对仪器保温防护、深空通信、探测器姿态等重要技术进行检验, 还可以在太阳附近释放小探测器, 进行太阳帆减速实验, 为最终的太阳抵近探测储备技术力量.

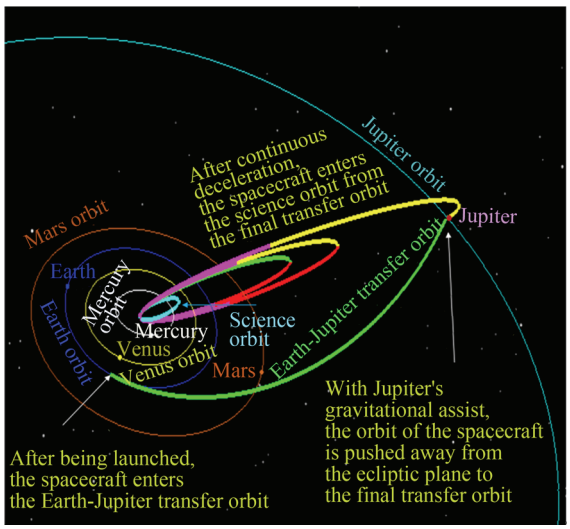

图 10　抵近探测第一阶段任务探测器飞行路线. 探测器从地球发射, 经过地木转移轨道向木星靠拢; 通过木星借力, 将飞船轨道推离黄道面, 进入大倾角绕日轨道; 利用电推进减速过程, 逐渐降低轨道远日点高度, 最终进入倾角在 45° 以上, 近日点在 5 R_s 附近, 远日点在 125 R_s 附近的轨道

Fig. 10　Description of the spacecraft path in the first phase of the mission. The spacecraft will be launched from the earth and approach closer to Jupiter through the earth-wood transfer orbit. With Jupiter gravity assist, the probe will leave sun ecliptic and enter into a large inclination orbit around the sun. The electric propulsion will be used to gradually reduce the apogee height during the deceleration process. Finally, the probe will enter a scientific mission orbit with an inclination of more than 45°, an apogee of 125 R_s and a perigee of 5 R_s

5.3　第三阶段任务规划

第三阶段, 在上述关键技术得到验证的基础上, 开展真正意义上的太阳爆发抵近探测. 将探测器发射至半径为 10~20 R_s 的近圆形轨道上, 轨道倾角在 20°~30° 之间. 这有利于飞船或探测器遇到并穿过 CME 及其后面的磁重联电流片 (见图 11), 对电流片和 CME 中的等离子体性质、磁场结构进行就地 (原位) 探测, 并可实现对日冕磁场的直接探测, 帮助解决长期困惑太阳物理学界的日冕加热难题. 此外, 也可实现对其他类型的太阳活动的近距离观测. 一个口径为 10 cm 的望远镜, 在抵近探测的轨道上, 可以发挥地面上 2 m 以上口径望远镜的功能.

6　关键技术

实施太阳抵近探测任务对多个领域的关键技术研发提出了前所未有的高要求. 这些关键技术包括: 大推力火箭技术, 长寿命高比冲电推进技术, 高温热控涂层技术, 轻质隔热材料技术, 强辐射太阳电池及其防护技术, 深空通信测控及数据传输技术, 探测器防撞及保护技术.

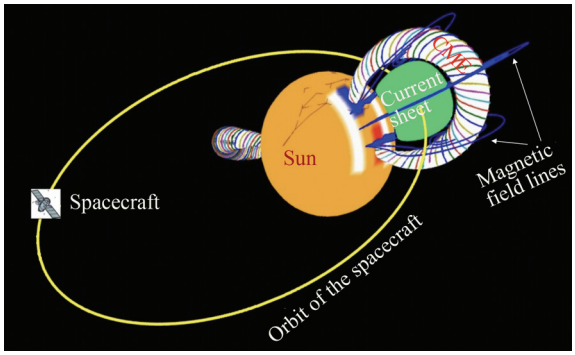

图 11　太阳、太阳爆发磁场结构及探测器轨道相互位置

Fig. 11　Locations of the Sun, the disruptive magnetic configuration, and the spacecraft orbit

6.1 大推力火箭技术

在抵近太阳的过程中必须降低探测器速度, 所需能量远远超过从地球抵达火星所需能量. 即使采用目前世界上最强大的运载火箭加上面级, 航天器也无法直接从地球接近太阳. 探测器必须主动释放出额外的轨道能量, 即跟随地球自转与公转所具有的能量. 这其中蕴含着巨大的航天技术挑战和工程实施难度.

太阳巨大的引力场控制着大约 12 万个天文单位 (AU) 范围以内的所有天体, 这使得前往太阳进行抵近探测是一件非常困难的事情. 根据 NASA 的数据, 到达太阳需要的能量是到达火星所需能量的 55 倍. 由于地球本身围绕太阳公转的巨大速度, 发射航天器必须克服地球公转产生的速度, 并将航天器的速度在接近太阳的时候降低到 23.7 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$. 而地球公转速度为 30.0 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$, 因此需要有足够的能量来抵消一部分地球公转速度.

PSP 的有效载荷重量为 780 kg, 发射采用目前世界上最强大的 Delta Ⅳ 重型火箭. 但即使是这样强大的重型火箭也无法做到一步到位. 因此 NASA 为发射提供了一个弹跳阶段, 即在主要的三级助推器完成使命、进入第二阶段升空后, 点燃上面级太空火箭发动机. 之后航天器将飞越金星进行引力借力, 在飞向太阳的过程中不断降低近日点速度.

Delta IV 火箭是美国现役并已执行深空任务的最大型运载火箭, 也是国际上具有最大推力的火箭, 直径为 5 m, 高 77.2 m, 自重 7.33×10^5 kg (见图 12). 第一级由三个公共核心助推器组成, 最高发射 C_3 为 154 $\mathrm{km^2\cdot s^{-2}}$, 可将最多 2.879×10^4 kg 的有效载荷送入低地轨道, 或者将 1.1×10^4 kg 有效载荷送入地球同步轨道, 或者将 11 kg 重有效载荷送上月球, 或者将 8.8×10^3 kg 有效载荷送入火星轨道. SO 使用大推力的 Alta-V-411 型火箭发射, 推力不及 Delta Ⅳ 的 1/7. 探测器平台包括探测仪器净重 209 kg, 发射时重量 1800 kg. 不算火箭自身的重量, 探测器自带的推进剂占其总重量的 88.4%. 中国刚实验成功的最强推力火箭——长征五号直径 5 m, 可将 2.3×10^4 kg 有效载荷送入近地轨道, 或者将 1.3×10^4 kg 有效载荷送到地球同步轨道. 其推力稍强于 Alta-V-411 型火箭, 但只及 Delta-Ⅳ 的 1/7 强, 仅能够将毛重为 100 kg 的载荷送入 PSP 的轨道. 从目前的情况来看, 中国能与 Delta-Ⅳ 媲美的长征九号火箭研制周期估计为 10 年, 前不久刚刚获得国家立项.

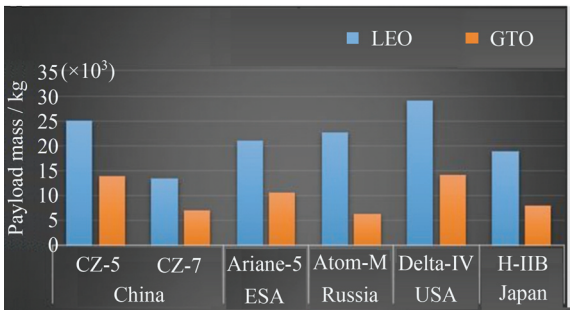

图 12 各国大推力火箭对比

Fig. 12 Comparisons of rocket power of major countries

6.2 长寿命高比冲电推进技术

对于抵近探测这一类深空探测任务, 必须使用电推进技术对航天器进行减速. 使用化学推进技术需要携带大量的推进剂, 现阶段任何火箭都无法携带足够的化学推进剂将载荷送入预定轨道. 国外类似探测计划都无一例外地采用了电推进技术. 太阳抵近探测任务也拟采用电推进持续减速, 经过 7.6 年进入到太阳任务轨道, 将绕日轨道周期从 4.7 年, 缩短到 2.1 年和 1.3 年, 预估消耗电推进燃料 120 kg. 在长达近 10 年的太空飞行中, 如果完全携带传统化学推进, 那么所需要携带的推进剂重量远远超过了采用现阶段任何运载火箭能够承受的范围, 电推进减速是唯一选择. 近年来, 中国开展了电推进技术的研究和应用, 已经取得了一定的进展并在相关任务中得到了应用. 目前, 中国国内正在立项的太阳系小行星探测任务中采用的电推进器累计工作时间最少为 6000 h. 而执行太阳抵近探测任务需要通过长时间连续电推进减速, 累积工作时间会长达数年, 这对电推进技术的研发是一个巨大的挑战. 最近, 中国更先进的、以热核方式作为能源输入的电推进系统的研究刚刚立项, 抵近探测任务可望借鉴该研究的经验和成果.

6.3 耐强辐射的高温热控涂层技术

太阳抵近探测任务 “触碰计划” 所面临的另一个关键问题就是在太阳附近轨道上运行的航天器的温控. 航天器以及探测器在太阳附近轨道上所受到的太阳辐射强度可达地球附近辐射强度的 3000 倍以上 (根据近日点位置而定), 要承受强度极高 (可达 $\mathrm{MW\cdot m^{-2}}$ 量级) 的辐射加热效应. 另外, 太阳风连续吹出的高能粒子和太阳爆发过程中抛射出来的高温等离子体、磁场、高能粒子也会对探测器造成撞

击破坏、动能加热和磁场环境的额外干扰; 而在探测器背向太阳的一面, 会遭受辐射等效温度为 2.7 K 的宇宙背景辐射引起的强辐射制冷效应. 因此, 为保证仪器正常工作, 必须采取必要的措施为仪器保温. 航天器上各个设备需要不同的工作环境和工作温度.

根据探测环境的特点和探测设备的工作需求, 除太阳能电池板、探头、探针之外, 大部分设备需置于防护罩阴影之内. 空间等离子体密度很小, 热传导很弱, 太阳的能量主要以辐射的形式向外传播. 防护罩、太阳能电池板、探头、探针等被照面需要具备承受超强太阳辐射, 用于耐高温、抵抗高能带电粒子和星际尘埃的长期侵袭的热控涂层的性能在很大程度上决定着抵近探测的成败. 被照面热控涂层的核心挑战在于降低涂层的吸收发射比值、提高涂层热阻、增强韧性和抗腐蚀能力共 4 个方面.

(1) 为减弱太阳辐射的加热效应, 被照表面的热控涂层应具备太阳辐射反射率高、吸收率小、自身热辐射峰值波长附近发射率高的光学特性, 以尽可能减少吸收的太阳辐射并尽可能提高膜层的辐射散热能力. 热控涂层的辐射吸收率 α_s 和热发射率 ε 的比值 α_s/ε 是决定太阳辐照下涂层温度的关键因素, 比值越低, 平衡温度越低. 目前航天领域热控涂层 α_s/ε 比值可小于 0.1. 例如铝膜/氧化硅组成的二次表面镜 (OSR) 热控涂层, 抗高温涂层的 α_s/ε 比值还很不理想, 目前耐摄氏 1400°C 高温的热控涂层的 α_s/ε 比值不低于 0.5.

(2) 被照面的热控涂层材料必须有非常强的热阻性, 要阻挡 95% 以上的热量从表面层进入到更深的基底层. 基于氧化铝陶瓷/稀土钽酸盐过渡层/铱金属膜层和基于稀土钽酸盐/碳化钽/碳化铪的涂层设计 (见图 13), 碳化钽和碳化铪具有熔点高 (均超过 3750°C)、硬度高、抗冲击性能好、化学稳定性好等优点, 可结合过渡层作为耐高温陶瓷涂层镀在热防护罩的 C/C 复合基底上. 同时, 白色稀土钽酸盐对太阳辐射有极强的反射作用, 以稀土钽酸盐作为高温碳化物涂层的封顶涂层具有作为抵近探测器迎日涂层的可能性, 可以解决目前热控涂层高温下热导率过高的问题. 但需要从理论上澄清新型热控涂层材料低热导的本质, 开发具有极低热导率和低热应力的新型涂层体系, 从而大幅度提高涂层降温梯度.

(3) 攻克目前高温热控涂层普遍存在的高温相稳定性差、断裂韧性低的难题. 从理论上阐明新型热控涂层材料增韧的作用机理, 研发具有高断裂韧性的新型涂层体系, 提高涂层抗热应力和热震能力, 延长使用寿命. 此外, 热控涂层材料也不能包含受热时会挥发的物质.

(4) 突破热控涂层腐蚀加速失效的瓶颈. 从热/动力学上分析涂层抗腐蚀的本质, 研发抗腐蚀的新型涂层体系, 设计合适的高温合金黏结层, 延长涂层的使用寿命, 全面建立新型涂层的喷涂工艺成套技术体系.

6.4　轻质隔热材料技术

设备总质量决定了能否利用现有火箭发射太阳探测器到近日轨道. 为保证 “触碰计划” 项目可行性, 尽可能多地携带有效载荷, 并尽可能地降低热防护系统质量, 需要为抵近探测器研发耐超高温轻质 (密度低) 碳复合材料和新型碳化物泡沫材料, 包括基于碳化硅、碳化铪、碳化钽阻热材料以及基于上述材料对碳/碳复合材和碳泡沫的改进.

上述耐高温、高热阻、高韧性的热控涂层和轻质隔热材料研发能够推动高超音速飞行器发动机及其外表面热防护的进一步发展, 主要应用对象包括高超音速导弹、火箭、超燃冲压发动机等. 高超声速飞行器在长时间的临近空间高超声速飞行和高超声速再入过程中, 面临的热环境非常恶劣, 飞行器的表面温度非常高. 高超声速飞行器飞行时, 由于激波和粘性的作用, 其周围空气温度急剧升高, 形成剧烈的气动加热环境, 一般飞行器结构无法承受. 尤其是飞行器前缘驻点的温度高达上千度, 例如美国 PLS 小型航

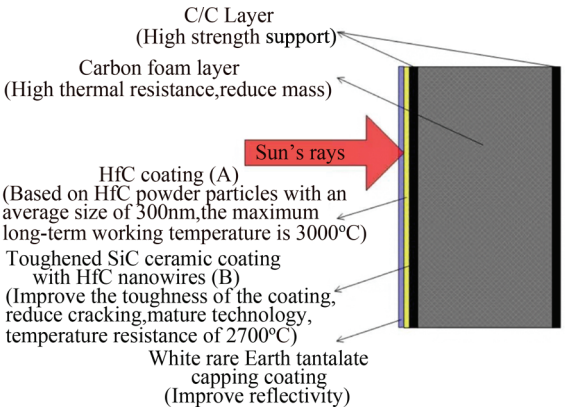

图 13　稀土钽酸盐/超高温碳化物复合涂层设计

Fig. 13　Schematic illustration of composite coatings based on the ultra-high temperature carbide and tantalates of the rare Earth

天飞机头锥驻点温度可达 1810°C, 其他部位外表面温度约为 1300°C, 远远超过常规结构金属材料的熔点. 太阳抵近探测所面临的超高温环境尽管与地球大气中超高速运动物体有所不同, 但对隔热材料的耐高温、低密度的要求是一致的.

6.5 强太阳辐照下的太阳能电池发电及其热防护技术

太阳能电池是保证星上设备正常运行的能量来源, 其数量越多, 电量供应就越充足, 但是对应质量、体积也越大. 需要整体考虑科学目标的需求, 平衡提高电量供应和减小太阳能电池使用量之间的关系. 聚光型太阳能发电是一种太阳电池, 其工作于强太阳辐射下, 单位电池板面积的有效输出功率大幅增加并且发电成本低. 但是随着太阳辐照强度的增加, 电池片的温度控制和散热问题成为聚光型太阳能发电领域的一大瓶颈.

抵近探测器的太阳能电池板需要长期面对强度达到太阳常数上千倍的太阳辐照, 本质上是一种天然的聚光性太阳能电池发电应用场景. 为抵近探测项目开发的太阳能电池板热控涂层, 不仅具备太阳辐射反射高、吸收率小、自身热辐射峰值波长附近发射率高的光学特性, 还具有合适的透光率, 供电池板发电. 太阳能电池板具有很高的辐射散热能力, 可防止电池片被高温损伤, 还具有高效率的发电能力, 有助于推动聚光型太阳能电池发电领域的进步. 目前中国太阳能电池板热控涂层设计是基于成熟的现有涂层工艺, 经过严格的数值仿真模拟, 并获得了国家发明专利.

6.6 深空测控和数据传输技术

日地距离为 1.5×10^8 km, 从探测器发射、轨道漂移, 一直到正式入轨、开始观测、数据传输, 都需要有一个功能强大、稳定可靠、反应迅速的测控系统. 以 PSP 为例, 该探测器和地面之间的航天器操作命令、航天器遥测、科学观测序列和仪器测量数据的传输是通过位于美国马里兰州的戈达德空间飞行中心, 澳大利亚堪培拉和西班牙马德里的 NASA 深空网络 (DSN) 进行的. 除了数据传输外, 太阳探测器的导航将依赖于通过 DSN 对航天器进行定时和定点跟踪. 美国 DSN 在地球表面上构成很好的空间几何观测构型, 能确保在地球自转条件下有一个测控站处于探测器的可视范围.

由于中国国土面积和国际地缘政治的因素, 目前无法建成类似 DSN 的深空探测网. 但随着中国在月球和深空探测领域的不断深入, 逐步建立的测控、数传系统已可以满足火星探测和规划的小行星探测任务的需求. 为确保太阳爆发抵近探测任务的顺利实施, 除应适当提高中国深空探测网的能力和水平, 还可采取国际联网的方式.

由于太阳抵近探测任务的独特操作环境, 为保持与航天器的充分通信, 必须考虑多因素影响的通信链路维持. 首先, 整个太阳系内部的高度椭圆形太阳轨道会导致频繁的太阳交汇, 有时会延长周期. 其次, 除了太阳本身辐射会淹没通信信号, 太阳、地球和航天器之间的空间相对位置会形成遮挡导致的通信中断之外, 航天器的热防护系统 (TPS) 有时也会导致额外的中断. 由于太阳辐射的热量极高, 因此必须保护航天器通信总线免受太阳直射的辐射以防止过热. 当航天器与太阳的距离小于 0.7 AU 时, 航天器必须以 TPS 指向太阳的方向定向, 其飞控系统能够在极端条件下实现 TPS 高精度对日, 以使航天器总线和包括天线的组件位于 TPS 的后面, 并在 TPS 本影内部得到保护. 由于天线位于 TPS 的后面, 因此某些无线传输受到 TPS 的阻碍. 当 PSP 与地球的连线接近与太阳的连线并且二者都在围绕 TPS 的中心锥角内时, TPS 会阻挡从航天器天线到地球的视线, 从而阻止地球与航天器之间的通信. 在极端的太阳辐射条件下, TPS 必须始终指向太阳. 严格的指向要求给 TPS 与地球的通信带来了几何挑战, 导致通信可用性和带宽受到严重限制.

6.7 探测器防撞技术

在黄道面附近分布着大量的行星际尘埃, 甚至是小块的岩石. 这些尘埃或岩石大小各异、成分不同、运动速度在 200~300 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 之间. 尘埃颗粒的大小一般在几个 μm 到 100 μm 之间, 质量在 0.01 ng 到 10 ng 之间, 而岩石碎块有几厘米大小, 质量未知. 尘埃粒子的成分包括石英, 橄榄石, 辉石, 黑曜石, 球粒陨石等, 其空间密度为 2~20 $\mathrm{km^{-3}}$. 在地球轨道之内的尘埃主要来自各种长周期和短周期的彗星、小行星, 星际尘埃占了一小部分.

太阳附近的尘埃和岩石碎块则主要是来自掠日彗星 [77] (近日点在 3.45 R_s 之内), 是这些彗星在太阳附近因受太阳潮汐力、太阳风、辐射的影响而破裂留下的碎片. Raymond 等 [78] 在距离太阳中心 6.8 R_s 的地方观测到一个直径为 6.7 m 的掠日彗

星以 $20\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 的速率损失其质量. 对行星际尘埃的近红外光谱观测表明, 在距离太阳 $3.8\,R_\mathrm{s}$ 的位置附近, 尘埃的热辐射与温度为 1300 K 的橄榄石的辐射强度分布类似, 而这些橄榄石的大小在 $100\,\mu\mathrm{m}$ 左右 [79]. 这说明在太阳附近, 除了高温辐射、高能粒子之外, 还有高温尘埃和小块岩石存在. 而且, 与外层太阳系当中的尘埃和碎石块相比, 太阳附近的尘埃和碎石块密度和速度都更高. Bemporad 等 [80] 发现掠日彗星的彗尾中包含有随时间呈指数衰减的中性氢的 Lyα 信号, 也包含有不随时间变化的分量叠加在衰减的信号上. 前者被认为与彗星中水的喷出有关, 是日冕中的质子与水分子光致分解后的原子相互作用的结果; 而后者则是辉石尘埃颗粒升华所致, 这种升华的终极产物就是通过电荷交换过程而中性化的日冕质子 (也就是氢原子). 由此可进一步估算出辉石颗粒的密度为 $6.24\times10^5\,\mathrm{km^{-3}}$.

另外, 甚至还需要考虑掠日彗星对 “触碰计划” 探测器的威胁. 根据定义, 近日点在距离日心 1.3∼3.45 R_s 的彗星被称为掠日彗星. 假定掠日彗星均匀地分布在黄道面两侧各 60° 的范围内, 那么掠日彗星将出现在内半径为 $1.3\,R_\mathrm{s}$、外半径为 $3.45\,R_\mathrm{s}$、极角在 30°∼150° 范围的球壳内. 这个球壳的体积是 $4.75\times10^{19}\,\mathrm{km^3}$. 根据统计, SOHO/LASCO 在 20 年内共观测到 3000 余颗掠日彗星 [81], (由于 SOHO 一直对着太阳, 可以认为这些就是所有的掠日彗星), 每年平均 150 颗; SOHO/UVCS 一共观测到 12 颗掠日彗星 [82]. 尽管每年在给定位置附近每立方公里的范围内出现一颗掠日彗星的概率不高, 但是自身具有很高速度的探测器与彗星相撞导致的损坏有可能是毁灭性的.

为免受尘埃和岩石碎片的撞击, 需要对探测器进行必要的自身保护. 除了通过特制材料进行包裹, 还要进行特殊结构和特种材料的技术攻关, 最好能够具备防撞预警和相应的避让功能. 中国国内在这方面的研究基础几乎是空白, 需要联合相关单位进行技术攻关, 确保抵近太阳探测器安全运行.

7 展望与总结

本文介绍了一个近距离接触恒星以及驱动恒星大尺度剧烈磁活动和能量释放的中心结构的任务构想. 该任务的顺利实施将会给人类提供一个直接探测太阳大气、直接感知太阳磁激变过程核心能量释放区域的机会.

首先介绍了近 20 年来国际空间太阳物理的发展, 梳理了主要国家所发射的一系列旨在探索研究太阳爆发活动的科学卫星. 分析发现, 中国在这个领域明显落后于西方工业国家, 甚至有可能落在印度后面. 因此, 亟待在空间观测层面推动中国太阳物理研究发展. 另一方面, 回顾了科学目标的来源, 指出 CME 耀斑大尺度电流片是由 Lin-Forbes 模型 [10,11] 首先预言并随后被观测所证实的一个重要结构 [11−16]; 而 Ko 等 [14] 和 Lin 等 [15−17] 对其周围等离子体运动特征、几何尺寸和内部结构的深入研究则表明, CME 耀斑电流片还具有远超出经典理论预期的厚度, 数值模拟结果揭示了等离子体不稳定性和由此导致的湍流现象是电流片具有超大厚度的起因 [18,22,23,27−29]. 为了最终完全证实这些结果, 对 CME–耀斑电流片进行直接的实地探测是唯一可行的方法. 而且, 在抵近探测获得的科学数据支持下开展研究, 必然会促进中国科学家主导一批成体系的科学发现和新的理论认知产生.

目前, 欧美已经先后发射了 PSP 与 SO 两个探测器, 旨在抵近探测太阳风起源、日冕磁场结构和等离子体分布、高能粒子来源和传播, 但 CME–耀斑电流片不在二者探测范围之内, 而 “触碰计划” 将填补这个空白.

本文讨论了实施太阳抵近探测任务 “触碰计划” 将会遇到的困难与挑战, 以及克服这些困难、应对这些挑战对各相关领域的技术研发提出的高标准要求. 首先, 太阳巨大的引力使得任何接近太阳而又不被太阳吞噬的尝试变得异常困难. 运载火箭将探测器送入太空的同时, 探测器还要携带大量的助推燃料, 用于探测器变轨以及在漂移轨道上减速, 直至其以正确的速度和姿态进入最终的科学轨道. 这既需要大推力运载火箭, 也为长寿命、高比冲电推进技术提出了极高的要求. 其次, 探测器到达太阳附近之后, 还需要有超强的抗辐射、隔热、保温技术以及有效的防撞措施, 从而一方面保证探测器平台上的科学仪器不受太阳的高温炙烤, 另一方面保证这些仪器在背向太阳的一面不会在接近绝对零度的环境中被冻坏, 同时还要避免这些设备与太阳附近的行星际尘埃与岩石碎片的撞击. 第三, $1.5\times10^8\,\mathrm{km}$ 的日地距离需要大功率的通信设备, 还需要建立全球测控网络. 从而尽可能地

保证星地间的通信畅通, 地面的指令能够顺利送达探测器, 探测器上的信息包括观测数据能够及时送回地面. 除了距离遥远带来的通信困难之外, 太阳也是一个巨大的辐射源, 会对正常通信造成严重干扰. 此外, 探测器面向太阳的防热挡板也会对信号传输造成一定程度的遮挡.

抵近探测任务 "触碰计划" 的实施必然会对相应的技术研发和产业发展产生明显的牵引效应. 首先, 抵近探测太阳必须降低探测器速度, 所需能量是从地球抵达火星所需能量的 55 倍. 这一减速和抵日过程实际上蕴含着巨大技术挑战和工程实施难度. 因此, 实现太阳抵近探测也将推动中国运载火箭技术、变轨技术以及其他相关技术的跨越式发展. 长征九号运载火箭研发前不久已经获得国家立项, 增添了成功推进 "触碰计划" 的信心; 同时, 中国国内有关单位也已经开始进行太阳系边界探测的论证和研究, 以热核方式作为能源输入的电推进系统研究刚刚立项, 其研究成果和经验值得借鉴. 其次, 太阳附近的极端恶劣环境在地球上难以模拟和实现, 保证探测器在这样的条件下正常工作, 所要采取的保护措施是空前的, 而能够经受住太阳附近严苛环境考验的保护技术, 对现有的任何防护技术而言都是一个跨越式的发展. 第三, 跨越 1.5×10^8 km 的通信与数据传输需要一个功能强大、稳定可靠、反应迅速的测控系统. 我国现有的测控系统与这个水平还有一定的差距. 因此, 本项目顺利实施也可以牵引中国深空测控系统水平跨越式的提高. 为天问一号探测器服务的测控和数传系统已经建立, 经适应性改造之后可用于 "触碰计划" 的测控与数传. 第四, 行星际空间、特别是黄道面附近存在大量的行星际尘埃和岩石颗粒, 如何防止或避开探测器与这些尘埃颗粒碰撞后对前者造成的损害是一个重大课题, 中国国内在这方面的研究基础几乎是空白, 需要联合相关单位进行技术攻关, 获得在该领域关键技术零的突破.

参考文献

[1] LIN J, SOON W, BALIUNAS S. The eruptive process in the solar atmosphere and the related theories [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2002, **47**(21): 1601-1612 (林隽, SOON W, BALIUNAS S. 太阳大气中的爆发过程及其理论 [J]. 科学通报, 2002, **47**(21): 1601-1612)

[2] LIN J, SOON W, BALIUNAS S L. Theories of solar eruptions: a review [J]. *New Astron. Rev.*, 2003, **47**(2): 53-84

[3] FANG C. Space weather comes into our life [J]. *Chin. J. Nat.*, 2006, **28**(4): 194-198

[4] REAMES D V. Solar energetic particles lecture notes in physics [J]. *Springer Int. Publ. AG*, 2017, **932**: DOI: 10.1007/978-3-319-50871-9_5

[5] YUAN F, LIN J, WU K, *et al.* A magnetohydrodynamical model for the formation of episodic jets [J]. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, 2009, **395**: 2183-2188

[6] MENG Y, LIN J, ZHANG L, *et al.* An MHD model for magnetar giant flares [J]. *Astrophys. J.*, 2014, **785**: 62

[7] PRIEST E R. MHD of the Sun [M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2014

[8] PRIEST E R, FORBES G. Magnetic Reconnection [M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2000

[9] LIN J, WANG M, TIAN H, *et al.* In situ measurements of the solar eruption [J]. *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.*, 2019, **49**(5): 059607

[10] LIN J, FORBES T G. Effects of reconnection on the coronal mass ejection process [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 2375-2392

[11] LIN J. Energetics and propagation of coronal mass ejections in different plasma environments [J]. *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 2002, **2**: 539-556

[12] CIARAVELLA A, RAYMOND J C, LIN J, *et al.* Elemental abundances and post-coronal mass ejection current sheet in a very hot active region [J]. *Astrophys. J.*, 2002, **575**: 1116-1130

[13] WEBB D F, BURKEPILE J, FORBES T G, *et al.* Observational evidence of new current sheets trailing coronal mass ejections [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A12): 1440

[14] KO Y K, RAYMOND J C, LIN J, *et al.* Dynamical and physical properties of a post-coronal mass ejection current sheet [J]. *Astrophys. J.*, 2003, **594**: 1068-1084

[15] LIN J, KO Y K, SUI L, *et al.* Direct observations of the magnetic reconnection site of an eruption on 2003 November 18 [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **622**: 1251-1264

[16] LIN J, LI J, FORBES T G, *et al.* Features and properties of coronal mass ejection/flare current sheets [J]. *Astrophys. J.*, 2007, **658**: 123-126

[17] LIN J, LI J, KO Y K, *et al.* Investigation of thickness and electrical resistivity of the current sheets in solar eruptions [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **693**: 1666-1677

[18] LIN J, MURPHY N A, SHEN C C, *et al.* Review on current sheets in CME development: theories and observations [J]. *Space Sci. Rev.*, 2015, **194**: 237-302

[19] LIN J, NI L. Large-scale current sheets in flares and CMEs [J]. *Geophys. Monograph Ser.*, 2018, **235**: 239-255

[20] WANG S M, WANG R S, LU Q M, *et al.* Direct evidence of secondary reconnection inside filamentary currents of magnetic flux ropes during magnetic reconnection [J]. *Nat. Comm.*, 2020, **11**: 3964

[21] SHEN C C, LIN J, MUROHY N A, *et al.* Statistical and spectral properties of magnetic islands in reconnecting

current sheets during two-ribbon flares [J]. *Phys. Plasma*, 2013, **20**: 072114

[22] NI L, LIN J, MEI Z X, *et al*. Numerical experiments on the detailed energy conversion and spectrum studies in a corona current sheet [J]. *Astrophys. J.*, 2015, **812**: 92

[23] NI L, LIN J, ROUSSEV I I, *et al*. Heating mechanisms in the low solar atmosphere through magnetic reconnection in current sheets [J]. *Astrophys. J.*, 2016, **832**: 195

[24] NI L, JI H T, MURPHY N A, *et al*. Magnetic reconnection in partially ionized plasmas [J]. *Proceed. Royal Soc. A*, 2020, **476**: 20190687

[25] FORBES T G, LIN J. What can we learn about reconnection from coronal mass ejections [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2000, **62**: 1499-1507

[26] WEBB D F, VOURLIDAS A. LASCO white-Light observations of eruptive current sheets trailing CMEs [J]. *Sol. Phys.*, 2016, **291**(12): 3725-3749

[27] SHEN C C, LIN J, MURPHY N A. Numerical experiments on fine structure within reconnecting current sheets in solar flares [J]. *Astrophys. J.*, 2011, **737**(1): 14

[28] MEI Z X, SHEN C C, WU N, *et al*. Numerical experiments on magnetic reconnection in solar flare and coronal mass ejection current sheets [J]. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, 2012, **425**: 2824-2839

[29] MEI Z X, KEPPENS R, ROUSSEV I I, *et al*. Magnetic reconnection during eruptive magnetic flux ropes [J]. *Astron. Astrophys.*, 2017, **604**: 7

[30] MEI Z X, KEPPENS R, ROUSSEV I I, *et al*. Parametric study on kink instabilities of twisted magnetic flux ropes in the solar atmosphere [J]. *Astron. Astrophys.*, 2017, **609**: A2

[31] SHEN C C, KONG X L, GUO F, *et al*. The dynamical behavior of reconnection-driven termination shocks in solar flares: magnetohydrodynamic simulations [J]. *Astrophys. J.*, 2018, **869**(2): 116

[32] YE J, SHEN C C, RAYMOND J C, *et al*. Numerical study of the cascading energy conversion of the reconnection current sheet in solar eruptions [J]. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, 2019, **482**: 588

[33] YE J, CAI Q W, SHEN C C, *et al*. The role of turbulence for heating plasmas in eruptive solar flares [J]. *Astrophys. J.*, 2020, **897**: 64

[34] FURTH H P. Prevalent instability of nonthermal plasmas [J]. *Phys. Fluids*, 1963, **6**: 48-57

[35] LOUREIRO N F, SCHEKOCHIHINA A, COWLEY S C. Instability of current sheets and formation of plasmoid chains [J]. *Phys. Plasma*, 2007, **14**: 100703

[36] NI L, GERMASCHEWSKI K, HUANG Y M, *et al*. Linear plasmoid instability of thin current sheets with shear flow [J]. *Phys. Plasmas*, 2010, **17**: 052109

[37] NI L, ZIEGLER U, HUANG Y M, *et al*. Effects of plasma β on the plasmoid instability [J]. *Phys. Plasmas*, 2012, **19**: 072902

[38] NI L, LIN J, MURPHHY N A, *et al*. Effects of the nonuniform initial environment and the guide field on the plasmoid instability [J]. *Phys. Plasmas*, 2013, **20**: 061206

[39] NI L, LUKIN V, MURPHY N A, *et al*. Magnetic reconnection in strongly magnetized regions of the low solar chromosphere [J]. *Astrophys. J.*, 2018, **852**: 95

[40] SAVAGE S L, MCKENZIE D E, REEVES K K, *et al*. Reconnection outflows and current sheet observed with Hinode/XRT in the 2008 April 9 "Cartwheel CME" flare [J]. *Astrophys. J.*, 2010, **722**: 329

[41] FORBES T G, SEATON D B, REEVES K K. Reconnection in the post-impulsive phase of solar flares [J]. *Astrophys. J.*, 2018, **858**: 70

[42] LEE J K, CHO K S, LEE K S, *et al*. Formation of post-CME blobs observed by LASCO-C2 and K-Cor on 2017 September 10 [J]. *Astrophys. J.*, 2020, **892**: 129

[43] LI Y, LIN J. Acceleration of electrons and protons in reconnecting current sheets including single or multiple X-points [J]. *Sol. Phys.*, 2012, **279**(1): 91-113

[44] LI Y, WINTER H D, MURPHY N A, *et al*. The dependence of particle acceleration on initial locations in reconnecting current sheets [J]. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 2013, **65**: 101

[45] LI Y, WU N, LIN J. Charged-particle acceleration in a reconnecting current sheet including multiple magnetic islands and a nonuniform background magnetic field [J]. *Astron. Astrophys.*, 2017, **605**: 120

[46] GAN W Q, YAN Y H, HUANG Y. Prospect for space solar physics in 2016—2030 [J]. *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.*, 2019, **49**(5): 059602

[47] 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 Sci. Rev.*, 2016, **204**: 7-48

[48] MCCOMAS D J, CHRISTIAN E R, COHEN C M S, *et al*. Probing the energetic particle environment near the sun [J]. *Nature*, 2019, **576**: 223-227

[49] 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**: 228-231

[50] 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**: 232-236

[51] 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**: 237-242

[52] HOWARD R A, VOURLIDAS A, COLANINNO R C, *et al*. The solar orbiter heliospheric imager (SoloHI) [J]. *Astron. Astrophys.*, 2020, **642**: 13

[53] BÁRTA M, BÜCHNER J, KARLIK ' Y M, *et al*. Spontaneous current-layer fragmentation and cascading reconnection in solar flares. I. Model and analysis [J]. *Astrophys. J.*, 2011, **737**(1): 24

[54] MANN G, KLASSEN A, AURASS H, *et al*. Formation

and development of shock waves in the solar corona and the near-Sun interplanetary space [J]. *Astron. Astrophys.*, 2003, **400**: 329

[55] ZLOTNIK E Y, KLASSEN A, KLEIN K L, *et al.* Third harmonic plasma emission in solar type II radio bursts [J]. *Astron. Astrophys.*, 1998, **331**(3): 1087-1098

[56] CANE H V. Two components in major solar particle events [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(12): 8017

[57] LI G, ZANK G P. Mixed particle acceleration at CME-driven shocks and flares [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: 02101

[58] MA S L, RAYMOND J C, GOLUB L, *et al.* Observations and interpretation of a low coronal shock wave observed in the EUV by the SDO/AIA [J]. *Astrophys. J.*, 2011, **738**: 160

[59] KOHL J L, GIANCARLO N, STEVEN R C, *et al.* Ultraviolet spectroscopy of the extended solar corona [J]. *Astron. Astrophys. Rev.*, 2006, **13**: 31

[60] MANCUSO S, RAYMOND J C, KOHL J, *et al.* UVCS/SOHO observations of a CME-driven shock: Consequences on ion heating mechanisms behind a coronal shock [J]. *Astron. Astrophys.*, 2002, **383**: 267-274

[61] BEMPORAD A, MANCUSO S. First complete determination of plasma physical parameters across a coronal mass ejection-driven shock [J]. *Astrophys. J.*, 2010, **720**: 130-143

[62] WANG H J, SHEN C C, LIN J. Numerical experiments of wave-like phenomena caused by the disruption of an unstable magnetic configuration [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **700**: 1716

[63] WANG H J, LIU S Q, GONG J C, *et al.* Contribution of velocity vortices and fast shock reflection and refraction to the formation of EUV waves in solar eruptions [J]. *Astrophys. J.*, 2015, **805**: 114

[64] PARKER E N. Nanoflares and the solar X-ray corona [J]. *Astrophys. J.*, 1988, **330**: 474-479

[65] RAPPAZZO A F, VELLI M, EINAUDI G, *et al.* Nonlinear dynamics of the Parker scenario for coronal heating [J]. *Astrophys. J.*, 2008, **677**: 1348-1366

[66] BRADSHAW S J, KLIMCHUK J A. Chromospheric nanoflares as a source of coronal plasma. II. repeating nanoflares [J]. *Astrophys. J.*, 2015, **811**: 129

[67] CRANMER S R, VAN BALLEGOOIJEN A A, EDGAR R J. Self-consistent coronal heating and solar wind acceleration from anisotropic magnetohydrodynamic turbulence [J]. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 2007, **171**: 520-551

[68] ASGARI-TARGHI M, VAN BALLEGOOIJEN A A, CRANMER S R, *et al.* The spatial and temporal dependence of coronal heating by Alfvén wave turbulence [J]. *Astrophys. J.*, 2013, **773**: 111

[69] VAN BALLEGOOIJEN A A, ASGARI-TARGHI M, VOSS A. The heating of solar coronal loops by Alfvén wave turbulence [J]. *Astrophys. J.*, 2017, **849**: 46

[70] CIRTAIN J W, GOLUB L, WINGEBARGER A, *et al.* Energy release in the solar corona from spatially resolved magnetic braids [J]. *Nature*, 2013, **493**: 501-503

[71] TESTA P, DE PONTIEU B, ALLRED J, *et al.* Evidence of nonthermal particles in coronal loops heated impulsively by nanoflares [J]. *Science*, 2014, **346**: 1255724

[72] TIAN H, LI G, REEVES K K, *et al.* Imaging and spectroscopic observations of magnetic reconnection and chromospheric evaporation in a solar flare [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2014, **797**(2): 14

[73] QIU J, WANG H M, CHENG C Z, *et al.* Magnetic reconnection and mass acceleration in flare-coronal mass ejection events [J]. *Astrophys. J.*, 2004, **604**(2): 900

[74] YANG Z H, BETHGE C, TIAN H, *et al.* Global maps of the magnetic field in the solar corona [J]. *Science*, 2020, **369**: 694-697

[75] FARRELL W M, THOMPSON R F, LEPPING R P, *et al.* A method of calibrating magnetometers on a spinning spacecraft [J]. *IEEE T rans. Magn.*, 1995, **31**(2): 966-972

[76] ZHANG S Y, ZHANG X G, WANG C Q, *et al.* The geometric factor of high energy protons detector on FY-3 satellite [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2014, **57**: 2558-2566 (张珅毅, 张贤国, 王春琴, 等. 风云三号卫星空间高能质子探测器的几何因子计算 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **57**: 2479-2486)

[77] MANN I, KIMURA H, BIESECKER D A, *et al.* Dust near the sun [J]. *Space Sci. Rev.*, 2004, **110**: 269

[78] RAYMOND J C, FINESCHI S, SMITH P L, *et al.* Solar wind at 6.8 solar radii from UVCS observation of comet C/1996Y1 [J]. *Astrophys. J.*, 1998, **508**: 410

[79] MIZUTANI K, MAIHARA T, HIROMOTO N, *et al.* Near-infrared observation of the circumsolar dust emission during the 1983 solar eclipse [J]. *Nature*, 1984, **312**(5990): 134-136

[80] BEMPORAD A, POLETTO G, RAYMOND J, *et al.* UVCS observation of sungrazer C/2001 C2: possible comet fragmentation and plasma-dust interactions [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **620**(1): 523-536

[81] BEMPORAD A, GIORDANO S, RAYMOND J C, *et al.* Study of sungrazing comets with space-based coronagraphs: new possibilities offered by METIS on board Solar Orbiter [J]. *Adv. Space Res.*, 2015, **56**(10): 2288-2297

[82] BEMPORAD A, POLETTO G, RAYMOND J, *et al.* A review of SOHO/UVCS observations of sungrazing comets [J]. *Planet. Space Sci.*, 2007, **55**(9): 1021-1030