

不同探测方向下太阳系边际科学问题的分析

李晖^{1,2}, 杨忠炜¹, 王赤^{1,2}, 郭孝城^{1,2}, 蒋文策¹, 王宇贤¹, Igor I.Baliukin³

(1. 中国科学院 国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 俄罗斯科学院 空间研究所, 莫斯科 117485)

摘要: 简要介绍了太阳系边际探测计划在日球层鼻尖和尾部等不同探测方向上沿途可探的主要科学目标、探测需求以及预期的科学产出; 综述了当前国内外的研究态势, 包括已开展或处于论证阶段的探测计划及其科学载荷配置; 针对不同探测方向, 梳理了与日球层物理、星际介质以及太阳系演化相关的若干重大科学问题; 展望了中国未来在自主开展太阳系边际探测方面的科学发展方向。

关键词: 太阳系边际; 太阳系演化; 日球层; 星际空间

中图分类号: P353.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)05-0489-14

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250031

引用格式: 李晖, 杨忠炜, 王赤, 等. 不同探测方向下太阳系边际科学问题的分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(5): 489-502.

Reference format: LI H, YANG Z W, WANG C, et al. Directional scientific objectives of the interstellar express mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(5): 489-502.

引言

太阳大气经过日冕加热后, 其物质被电离为自由带电粒子。在热压力、波粒相互作用和磁场重联等机制的驱动下^[1-2], 这些粒子不断克服太阳引力向外扩散, 形成了被称为太阳风的等离子体流^[3]。在地球轨道附近, 即日心距离约为1 AU (AU为天文单位) 处, 根据综合太阳风数据库 (OMNIdirectional solar wind database, OMNI) 数据计算得到的太阳风平均流速约为430 km/s, 质子数密度约为 7 cm^{-3} , 磁场强度约为6 nT。受太阳风控制的空间被定义为日球层 (Heliosphere)^[4]。理论研究和实测数据表明, 太阳风影响的范围可以延伸至70~120 AU, 甚至更远^[5]。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 在2020年将外日球层 (Outer Heliosphere) 定义为木星轨道以外的日球层区域, 太阳风在此开始与星际物质发生显著相互作用。这里星际物质主要包括星际拾起离子 (PickUp Ion, PUI)^[6]和能量中性原子 (Energetic Neutral Atom, ENA) 等^[7]。太阳系边际指的是外日球层的外围界面, 主要包含终止激波 (Termination Shock)、内日鞘区 (Inner Heliosheath) 和日球层顶 (Heliopause) 等关键区域^[8-9]。

其中, 终止激波是太阳风在边际附近减速到亚磁声速形成的间断面, 日球层顶是太阳风与星际介质相互作用产生的分界面。终止激波和日球层顶之间的区域称为内日鞘区, 日球层顶以外的区域称为外日鞘区 (Outer Heliosheath)。外日鞘区的尽头是日球层弓激波或弓形波 (Bow Shock/Wave), 这个边际最外层结构尚未被原位探测所证实。越过该结构后便是广袤的星际空间 (Interstellar), 如图1所示。

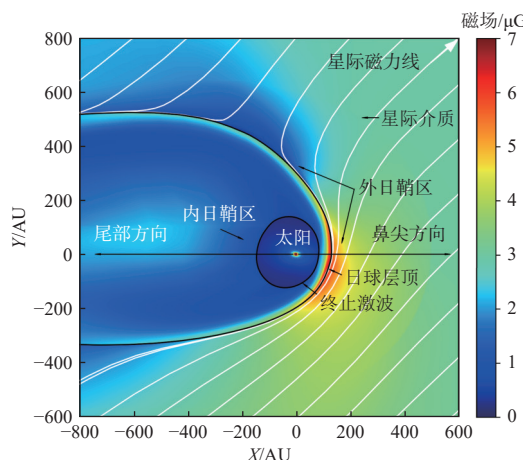


图1 星际磁场包裹的日球层

Fig. 1 The heliosphere, enveloped by interstellar magnetic field

收稿日期: 2025-05-08 修回日期: 2025-06-06

基金项目: 国防科工局民用航天预研项目 (D010202, D010301); 科技部重点研发计划项目 (2021YFA0718600)

自人类步入空间时代以来,对日球层的探索便从未停止。NASA发起的一系列深空探测任务中,最具代表性的包括:“旅行者1号”(Voyager 1)和“旅行者2号”(Voyager 2)探测器相继穿越太阳系边际进入邻近星际空间(Very Local Interstellar Medium, VLISM)^[10-13]。“星际边际探测器”(Interstellar Boundary Explorer, IBEX)与“卡西尼号”(Cassini)探测器对太阳系边际区域的能量中性原子进行了成像观测^[14-15]。“新视野号”(New Horizons)探测器在柯伊伯带任务之后,对星际拾起离子等外日球层环境要素开展了拓展探索^[16-19]。遗憾的是,“新视野号”并未携带磁强计等开展边际探测所需的关键科学载荷^[20],无法实现对边际空间环境的全面探索。即便如此,上述探测研究已经为人类打开了了解太阳系边际甚至邻近星际空间的全新窗口,也逐步推动该领域成为国际空间物理研究的热点方向,产出了一批具有重要意义的科学成果,受到广泛关注。

1 国内外研究进展

1957年,苏联成功发射了人类历史上第一颗人造卫星“斯普特尼克1号”(Sputnik 1),该事件通常被视为人类航天和空间探测时代的开端^[21]。此后,大量航天器被送入空间轨道,极大地拓展了人类对宇宙空间的认知疆域。尽管大多数探测任务仍集中在日球层内部、少数几个天文单位的范围内,但仍有部分航天器在完成原有科学目标后,延伸至更远区域,开展了对太阳系外围空间环境的初步探测。

“先驱者10号”(Pioneer 10)和“先驱者11号”(Pioneer 11)是美国执行的首批面向日球层空间的探测任务^[22]。两枚探测器分别于1972年与1973年发射,其主要任务为飞掠小行星主带及木星、土星等行星。它们在完成对上述巨行星的首次飞掠探测后,分别于2003年(约80 AU)和1995年(约43 AU)在尾部方向和准鼻尖方向与地球失联。前者由于同位素温差电源(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)衰减及通信能力下降,在任务后期观测数据大多不连续、分辨率低,且数据下载速度极慢,最终主要依赖宇宙射线计数器载荷维持科学观测。后者自1990年代初开始逐步关闭大部分科学仪器,最终仅维持最低限度的遥测与运行状态数据传输。

“旅行者1号”和“旅行者2号”分别于1977年9月和8月发射,任务目标同样为探索太阳系大型行星系统^[23]。目前两者均已越过日球层顶进入邻近星际空间。“旅行者号”圆满完成了对木星、土星、天王星和海王星等天

体的详细勘测,首次获取了大量与宇宙射线、太阳风与星际物质交互相关的原位探测数据,直接观测到了太阳系边际准鼻尖方向包含终止激波和日球层顶在内的一系列关键结构。但由于其初始科学目标并非针对太阳系边际,探测器并未配备用于专门探测星际拾起离子、宇宙尘埃、能量中性原子的科学载荷,加之任务末期能源衰减的限制,导致绝大部分载荷已关闭或将在未来两年中陆续关闭。截至2025年3月,两枚探测器的日心距离分别已达约166 AU和139 AU,仅剩磁强计和宇宙线等少数科学载荷仍在工作。因此,对太阳系边际空间环境的关键参数探测上留下了许多空白和未解之谜。

2006年1月发射的“新视野号”探测器以冥王星和柯伊伯带目标天体为主要研究对象,是当时飞行速度最快的人类探测器,以年均3.5 AU的速度朝日球层外围推进^[20,24]。截至2025年3月,其日心距离约为61 AU(约91.3亿km)。若能源运行正常,其将在未来5~8 a内穿越终止激波。它搭载的7套科学载荷包括可见光-红外成像光谱仪(Ralph)、紫外成像仪(Alice)、远程高分辨相机(Long Range Reconnaissance Imager, LORRI)、冥王星环境太阳风分析仪(Solar Wind Around Pluto, SWAP)、冥王星能量粒子谱分析仪(Pluto Energetic Particle Spectrometer Science Investigation, PEPSSI)、无线电探测仪(Radio Science Experiment, REX)和尘埃计数器(Student Dust Counter, SDC)。然而,由于缺乏磁场测量手段,且所搭载仪器多为针对柯伊伯带天体的成像类仪器,该探测器难以对日球层边际与星际环境开展全面探测。

除原位探测外,科学家也尝试利用近地轨道卫星对太阳系边际区域开展遥感观测。2008年10月,美国发射了IBEX^[25],其搭载的两台高能中性原子成像仪IBEX-Lo与IBEX-Hi的能段分别为10 eV~2 keV和300 eV~6 keV。探测器通过自转扫描,能够获取来自日球层各个方向的能量中性原子,并据此绘制太阳系边际的全天空图像,开辟了边际可视化的新方式。然而,由于探测器始终位于近地轨道,无法同时获取能量中性原子源区的磁场等空间环境关键参数。同时,能量中性原子(Energetic Neutral Atom, ENA)数据解读严重依赖模型和假设(如联合IBEX的遥感探测和磁流体模型的研究依赖ENA的传播路径、源区特性等^[26]),结果仍需通过探测器的原位测量数据来验证与补充(如利用“卡西尼号”的ENA遥感数据推测日球层形态需要联合“旅行者号”低能带电粒子探测器(Low-Energy Charged Particle Detector, LECP)载荷对能量粒子的长年原位观测数据等^[15])。

综上所述, 那些在原始任务之后延伸执行的“拓展型”星际探测计划难以满足对太阳系边际完整科学问题的探测需求。因此, 制定一项专为面向外日球层和星际环境的深空探测任务迫在眉睫。

在规划层面, NASA《2022年战略计划》(NASA 2022 Strategic Plan) 提出了日球层研究要深入理解太阳对地球以及整个太阳系的影响范围, 直至日球层边界和星际介质; NASA《2020—2024年科学计划》

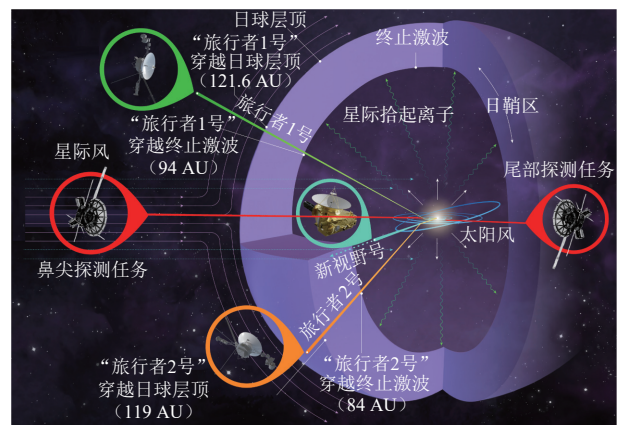
(NASA Science Plan 2020—2024) 指出日球层物理研究应覆盖从太阳一直到太阳系边缘, 在太阳风与星际介质相互作用的区域开展探测, 以全面了解日球层环境; 美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)《2024—2033年太阳与空间物理十年调查报告》

(Decadal Survey for Solar and Space Physics 2024—2033) 将“探索太阳系与星际介质的相互作用”列为关键科学目标之一, 强调了研究日球层边界和星际空间的重要性; 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发布的《远航2050》(Voyage 2050) 长期科学规划将探索日球层和星际介质作为未来几十年的重点研究方向之一, 旨在通过先进的探测器深入星际空间。此外, NRC《2023—2032年行星科学与天体生物学十年调查报告》(Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey 2023—2032) 也关注太阳系边际的日球层环境, 提出了研究柯伊伯带天体与日球层相互作用等星际探测相关课题。在探测计划推进层面, NASA的“太阳—地球探测器计划”(Solar Terrestrial Probes Program) 也包含了旨在研究太阳风与星际介质相互作用的任务, 例如其计划于2025年发射的星际测绘与加速探测器(Interstellar Mapping and Acceleration Probe, IMAP)^[27-28]。NASA正在论证和规划一项名为“星际探针”(Interstellar Probe) 的深空探测任务, 旨在比“旅行者号”更远处地进行星际探测^[29-30]。该探测器预计将在2030年代发射, 主要任务包括探索星际风、星际磁场、宇宙射线以及太阳系边际结构。为了支持太阳能无法满足需求的任务, 美方研制并选用一种被称为“次世代放射性同位素能源”(Next-generation RTG) 的新型能源系统。新一代能源不但能为星际探针探测器提供能源和载荷热源, 还计划广泛应用于深空探测、深地探测和冰巨星/卫星的深海探索等多领域科学任务, 如用于登陆器(landers)、月球和火星车(rovers)、直升机等飞行器(helicopters)、穿冰器(ice penetrating robotic vehicle)、船和冰下潜艇(boats, submarines/under ice rover)^[31]。

随着中国探月工程和深空探测的稳步推进, 相关

部门也相继启动了课题研究。2015年, 中国科学院在第三轮空间科学先导专项中率先启动了“星际快车-神梭计划”(Interstellar Express) 的初步论证工作, 国家航天局也于同期开展了太阳系边际探测的前期研究。2017年, 中国工程院在相关咨询项目中给予了支持; 2019—2025年, 国防科工局组建工程实施方案论证咨询委员会、民用航天“十三五”和“十四五”项目也对太阳系边际探测工程给予了连续资助, 推动了其预先研究的深入发展。在科学方面, 召开了第639次以“太阳系边际探测的关键前沿”为主题的香山科学会议, 以及国际空间科学研究所—北京(ISSI-Beijing)论坛, 并在美国地球物理联合会(American Geophysical Union, AGU)年会与国际空间研究委员会(COMmittee on SPace Research, COSPAR)举办的国际会议上多次发布相关科学论证与研究进展, 取得了一批科学研究和论证成果^[8,32-33]。在技术方面, 在国防科工局、科技部和国家自然科学基金委等部门的支持下, 在科学研究、数值模型、能源系统、探测器与科学载荷等方面取得了显著的迭代推进成果^[34-36]。2024年10月, 国务院新闻办公室举行新闻发布会, 中国科学院、国家航天局、中国载人航天工程办公室联合发布了《国家空间科学中长期发展规划(2024—2050年)》。其中明确将太阳系边际探测等任务列入2028—2035年期间优先部署和实施的科学探测任务。

中国未来太阳系边际探测工程(图2)计划力争在2030年前完成立项, 并于2049年前实现飞行距离达100亿km, 全面开展太阳系边际的科学探测与研究。太阳系边际探测已成为继月球、火星等天体之后, 人类探索宇宙的下一个重要窗口, 标志着科学探索正从“行星飞掠式探索”迈向“有目标地迈入星际”的战略性跨越。



注: 改自网络图片, <http://pluto.jhuapl.edu/Kuiper-Belt-and-Beyond/Heliophysics.php>。两个红圈分别标出了鼻尖和尾部任务中探测器的飞行方向, 其它色圈是“旅行者1号”“旅行者2号”和“新视野号”的参考飞行方向。

图2 太阳系边际探测工程任务三维示意图

Fig. 2 3D schematic diagram of the solar system boundary exploration mission

2 科学探测目标

2.1 鼻尖探测科学目标

日球层正鼻尖位于J2000黄道坐标系经纬度约 255° 和 $+5^\circ$ 。拟在2033年左右向正鼻尖,即“迎风区”(Upwind)方向发射一枚探测器,通过木星借力,其飞行方向与正鼻尖在经度方向上的夹角约束在 5° 以内。国际上普遍认为,在鼻尖方向星际物质与太阳系物质的相互作用和挤压最为强烈,探测器到达边界区域和进入星际空间的路径和时间最短(图3)。鼻尖探测器可以比尾部探测器后发射而先到达终止激波。若选用RTG能源,探测器可携带约100 kg科学载荷。科学论证给出的初步载荷配置有10台,分别为矢量磁力仪、波和射电分析仪、带电粒子与中性原子分析仪、尘埃分析仪、可见光相机、红外光谱仪、紫外光谱仪、太赫兹频谱仪、高能光子分析仪、被动氢钟,外加必备的载荷管理器,共计11台载荷。该探测器将沿最短路径穿越太阳风与星际介质最强相互作用区。探测器从地球出发后,沿途将边飞边探,依次穿越主带小行星区、木星系统、柯伊伯带等关键区域,实现对太阳系内外多类目标的复合探测。探测器飞行纬度贴近黄道面,有利于其沿途探测更多天体。其到达边际区域的里程碑节点为穿越日球层终止激波,随后将在终止激波下游的内日鞘区中飞行与探测,并穿越日球层顶,进入邻近星际空间。之后,探测器将在这一充满星际介质的外日鞘区继续飞行,开展对能量中性原子结构“彩带”(Ribbon)、“全球分布”(Global Distribution Framework, GDF)以及氢墙(Hydrogen wall)的首次原位探测,最终穿越由星际风冲击日球层可能形成的弓激波或弓形波。至此,探测器将穿越所有太阳系边际关键结构,进入未受太阳风扰动的广袤星际空间。

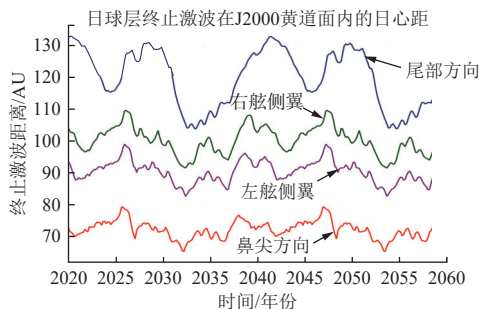


图3 太阳系边际探测工程任务实施期间,数值模型预测的不同方向终止激波的位置

Fig. 3 Positions of the termination shock in different directions predicted by numerical models during the implementation of the solar system boundary exploration mission

2.2 尾部探测科学目标

另一枚探测器将沿日球层尾部方向推进(即鼻尖的反向,J2000黄道坐标系经度约 75° 附近,轨道指向可适当放宽到 $75^\circ \pm 20^\circ$ 以内)。尾部探测器拟在2032年左右发射,同样采用木星(或木星-海王星)借力,若选用RTG作为能源,其科学载荷将与鼻尖探测器保持相同配置,预计至2049年,飞行距离将超过100亿km(约80.5 AU),其飞行方向与正尾部夹角约为 12.7° ;至2060年,飞行距离可达约120 AU,进入尾部方向的边际区域。该区域是人类迄今从未就位探索的日球层“顺风区”(Downwind)。由于太阳风动能的持续传输与星际等离子体的不断入侵,该区域预计具备更为复杂的能量交换与粒子加速机制。此外,因该方向上星际中性原子密度更高、星际离子拾起过程更加活跃、星际尘埃与微粒更为聚集。因此,搭载与鼻尖探测器相同配置的尾部探测器在该路径上边飞边探,有望首次揭示太阳系典型天体分布演化、太阳风和星际物质能量交换、日球层尾部未知结构,以及粒子输运和电磁场演化等关键问题,从而填补当前观测和理论模型在日球层非对称性、整体结构和演化机制方面的空白。

2.3 侧翼与准鼻尖探测科学目标

科学在牵引探测工程中必须兼顾发射窗口与工程可实现性。若发射时间略晚于预期的2032—2035年,木星相位将发生变化,探测器借力后到达的太阳系边际位置也将出现一定程度的偏移。作为正鼻尖任务的备选或轨道微调版本,该探测器的科学目标与正鼻尖方案基本一致。略晚发射的探测器轨道将向日球层左舷方向偏移,以经度落在J2000黄道坐标系 $255^\circ \sim 275^\circ$ 之间,既能穿越侧翼与准鼻尖又能贴近黄道面为最优轨道配置。

通过这种“双航向-双探针”配置,一方面可实现对太阳系边际不同方向的原位物理量与结构演变图像的同步获取,另一方面也有助于构建首个太阳系日球层三维全貌图。这对未来建立精准的全球性数值模拟模型、深入理解太阳系日球层及其它恒星系统具有不可替代的参考价值。太阳系边际探测工程将推动中国在新能源、新材料、星上智能、数值模拟等前沿技术领域的发展,使中国在国际深空探测格局中抢占理论引领与数据先发的制高点。

3 前沿科学问题

尽管已有的观测数据和理论模型显著推进了人类对太阳系边际、外日球层及其相关现象的理解,但仍

存在诸多关键科学未知亟待揭示, 特别是在外日球层的动力学过程、边际结构的耗散机制、星际介质的物理属性, 以及太阳风与星际介质之间的相互作用与耦合调制机理等方面。

3.1 日球层动力学与结构特性

3.1.1 拾起离子调制下的外日球层太阳风特性

当太阳风等离子体与侵入日球层的一部分星际中性原子发生电荷交换时, 中性粒子失去电子带正电后, 被太阳风磁场捕获并随之运动, 与原始太阳风相互作用后共同向外传播, 这个过程称为“拾起过程”^[6,37-38], 由中性原子电荷交换生成的新生离子称为拾起离子。

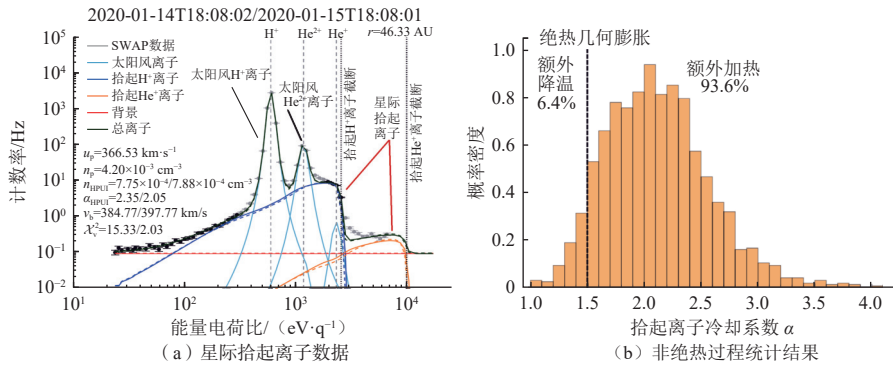


图 4 “新视野号”在外日球层实测的星际拾起离子数据及其非绝热过程统计结果^[17]

Fig. 4 Interstellar pickup ion data measured by New Horizons in outer heliosphere and statistical results of its non-adiabatic processes^[17]

分析拾起离子的空间分布、速度分布与能量转化过程, 对于理解外日球层中太阳风湍动和粒子耗散过程^[43-44]、太阳活动和星际介质耦合调制下的边际结构演化^[26,28]、彩带和氢墙等边际关键结构的产生机理和物理特性^[45-46], 以及邻近星际空间中AU量级宽度激波的成因^[47]等均具有重要科学意义。

3.1.2 日球层终止激波的物理特性

终止激波是探测器在外日球层首先可观测到的太阳系边际里程碑结构。2004年, “旅行者1号”在日心距约94 AU处穿越终止激波, 该成果于2005年被《科学》专栏报道, 这是人类探测器首次穿越边际结构^[48-51]。遗憾的是, 该探测器的等离子体载荷未能提供有效数据。2007年, “旅行者2号”在距太阳约84 AU处穿越终止激波, 获取了磁场、宇宙线、等离子体和波动等宝贵数据(图5)。人类对该边际结构最全面的认知主要建立于此次穿越所获得的数据之上, 该成果于2008年被《自然》专栏报道^[44,52-57]。“旅行者2号”也带来了诸多未解之谜: 激波下游等离子体似乎仍以超音速流动, 这与传统激波理论相悖。科学家们运用多流体理论、混合模拟(Hybrid Simulation)和全粒子模拟(Full PIC Simulation)等方法研究了星际拾起离子对终止激

波耗散的调制耦合作用^[44,58-64]。结果表明, 在完整考虑所有离子成分条件下, 绝大多数上游能量可能被转换为尚未探明的拾起离子能量。但目前尚无直接观测证据。这些反常现象表明, 终止激波的能量耗散机制可能极为特殊, 亟待借助专门的拾起离子探测设备进行深入研究与解析。

日球层中除了这些外源星际拾起离子外, 还有行星冕粒子与太阳风发生电荷交换产生的内源拾起离子^[39]。这些拾起离子亦能对当地的湍动和波动产生影响, 并最终从行星逃逸后融入外日球层拾起离子群体。这些内源拾起离子可源自火星^[40]和金星^[41]等有粒子逃逸的星球和彗星等。“旅行者2号”的观测结果表明, 太阳风在外日球层传播并几何膨胀的过程中, 离子并不是经历预想中的绝热冷却过程, 大部分离子受到了额外加热(图4)^[17]。目前学界普遍认为, 引发加热的主要机制包括行星际激波等压缩结构的加热、湍流加热以及波粒相互作用加热等^[18,42]。

宇宙线有两种主要成分: 异常宇宙线(Anomalous Cosmic Rays, ACR)和银河宇宙线(Galactic Cosmic Rays, GCR)^[65]。长期以来, 终止激波被视为ACR加速的主要源区^[66-67]。但“旅行者号”的观测数据显示, 异常宇宙线在内日鞘区(即终止激波的下游)仍在持续增强, 并在探测器穿越日球层顶后骤然减弱, 这暗示除了终止激波外, 内日鞘区可能也是异常宇宙线的重要加速源区^[68]。近年的理论研究、数值模拟和观测数据都表明, 内日鞘区存在湍动与重联混合结构, 但这些结构对ACR的形成和进一步加速的贡献程度, 目前尚缺乏直接观测证据, 仍需要依赖高精度、全要素的原位探测加以揭示其背后的物理机制。对于银河宇宙线则截然相反, 探测器在穿越日球层顶后GCR骤然增强, 这验证了日球层对宇宙高能粒子的屏蔽效应。然

3.1.3 太阳系边际的宇宙线调制与异常宇宙线起源

宇宙线有两种主要成分: 异常宇宙线(Anomalous Cosmic Rays, ACR)和银河宇宙线(Galactic Cosmic Rays, GCR)^[65]。长期以来, 终止激波被视为ACR加速的主要源区^[66-67]。但“旅行者号”的观测数据显示, 异常宇宙线在内日鞘区(即终止激波的下游)仍在持续增强, 并在探测器穿越日球层顶后骤然减弱, 这暗示除了终止激波外, 内日鞘区可能也是异常宇宙线的重要加速源区^[68]。近年的理论研究、数值模拟和观测数据都表明, 内日鞘区存在湍动与重联混合结构, 但这些结构对ACR的形成和进一步加速的贡献程度, 目前尚缺乏直接观测证据, 仍需要依赖高精度、全要素的原位探测加以揭示其背后的物理机制。对于银河宇宙线则截然相反, 探测器在穿越日球层顶后GCR骤然增强, 这验证了日球层对宇宙高能粒子的屏蔽效应。然

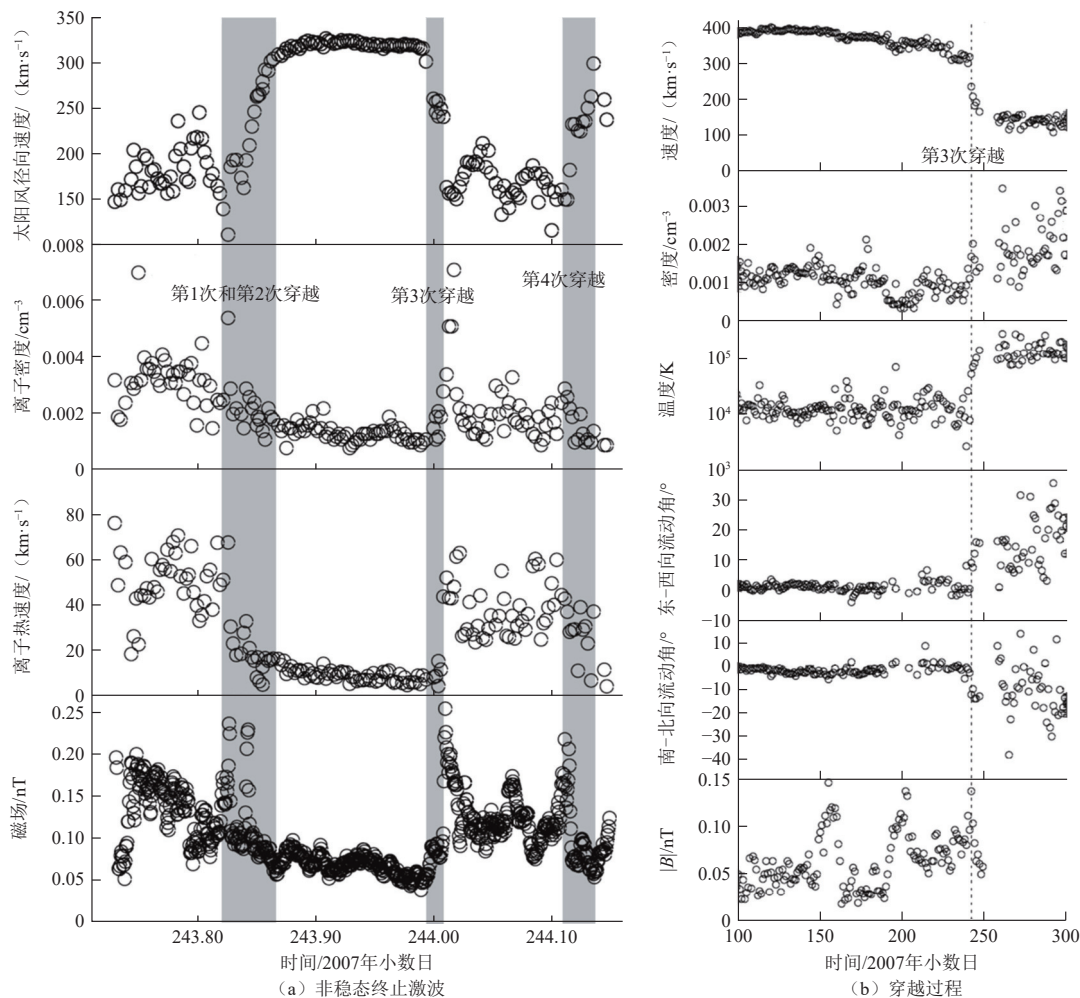


图5 “旅行者2号”观测到非稳态终止激波, 以及其中教科书式的一次穿越过程^[44]

Fig. 5 Voyager 2 observations of a nonstationary termination shock and a textbook example of a single crossing event^[44]

而, 日球层顶并非泾渭分明的分界线, “旅行者号”的观测还发现, 部分银河宇宙线可穿透日球层顶进入日球层内部^[69], 目前对于这些高能粒子的跨边界传播等过程仍缺乏系统性认识。“旅行者1号”和“旅行者2号”在日球层顶附近探测到的宇宙线变化如图6所示。

3.1.4 日球层全貌和尾部未知结构

目前人类对日球层全貌形态尚无定论, 空间天文望远镜对其它恒星的观测表明, 太阳的日球层的结构形态具有多种可能性^[15,70-72]。例如: “彗星状”形态, 早期研究认为日球层类似彗星或地球磁层, 具有一个朝运动方向的鼻尖和一个向后拖曳的长尾; “气泡状”形态, 依据IBEX和卡西尼的数据, 科学家推测日球层可能呈现球形或椭球形气泡形状, 他们的模型强调了星际磁场对日球层的调制作用, 使其更趋对称; “羊角面包”形态, 有多组分磁流体模型在考虑星际拾起离子效应后, 得出南北两极呈羊角面包状扩展的结构形态, 但该结构尚未被观测所证实。由于现有探测器均朝准

鼻尖方向飞行, 尾部区域究竟是逐渐稀薄散逸, 还是卷曲闭合, 仍有待研究。尾区对宇宙线的调制与屏蔽效应亦尚不清楚。目前, 仅IBEX实现了对全天空能量中性原子的成像, 观测结果似乎暗示尾部区域呈现四叶草瓣形态^[73]。理论预测日球层尾部可能的形态如图7所示。

3.1.5 鼻尖外部的弓激波是否存在

传统理论认为, 太阳在银河系中以超音速运动, 其前方应形成一个弓激波^[74]。然而, 观测数据却可能表明实际情况与早期的理论预测存在差异^[75]。一方面, IBEX遥感数据表明, 太阳相相对于周围邻近星际介质的运动速度约23.2 km/s (根据IBEX对侵入日球层的中性原子宏观速度推测), 低于理论预估的25 km/s; 另一方面, “旅行者号”观测到星际介质中磁场较强, 平均约0.5 nT。结合模型预估的星际空间等离子体数密度 (约0.07 cm⁻³), 可以推算出邻近星际介质的阿尔芬马赫数和磁声马赫数均小于1。因此, 部分科学家认

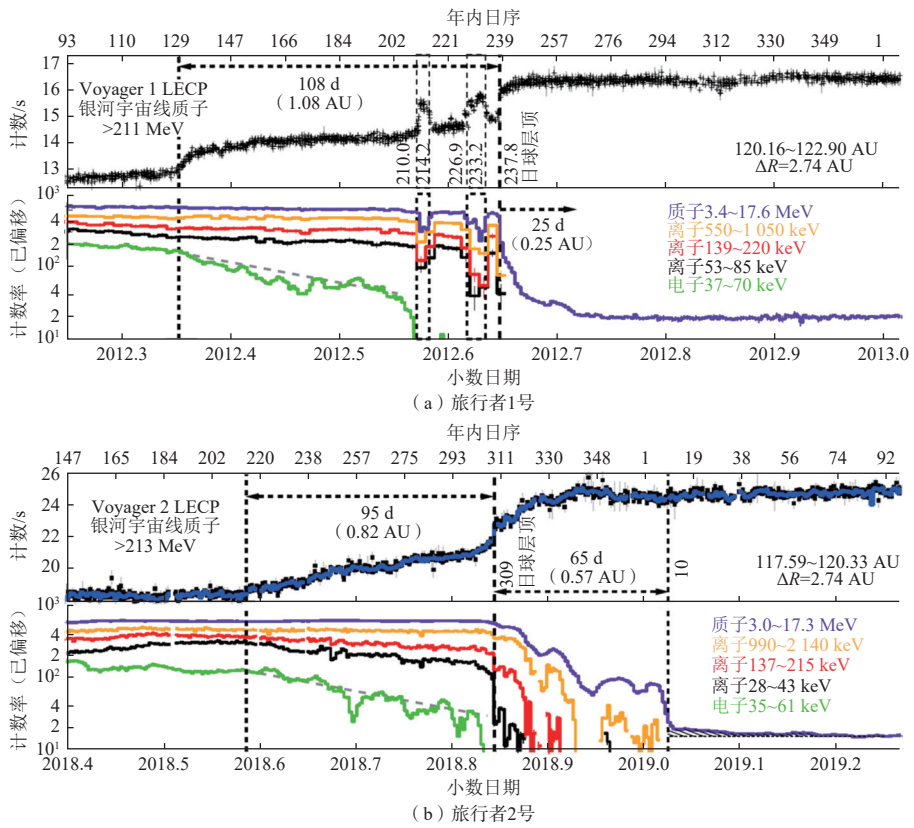
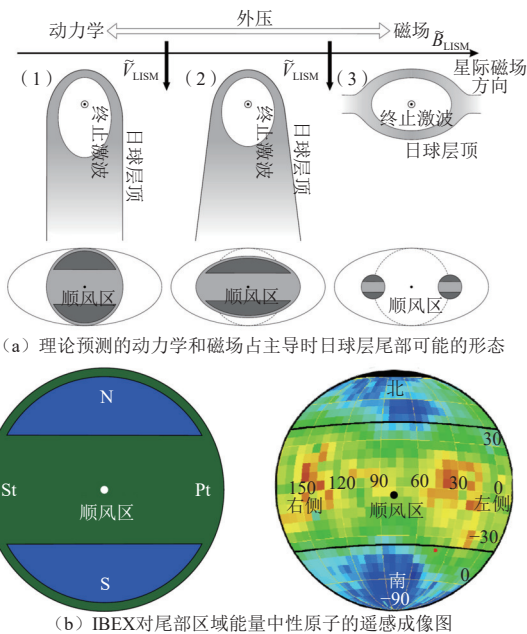


图 6 “旅行者1号”和“旅行者2号”在日球层顶附近探测到的宇宙线变化^[68]
 Fig. 6 Cosmic ray variations detected by Voyager 1 and Voyager 2 near the heliopause^[68]



注: 往左和往右分别是动力学和磁场占主导的极端情况。
 图 7 理论预测日球层尾部可能的形态以及 IBEX 对尾部区域能量中性原子的遥感成像图^[73]

Fig. 7 Theoretically predicted possible structures of the heliospheric tail and IBEX Remote sensing images of energetic neutral atoms from the tail region^[73]
 为, 日球层外部可能存在的是一种较为平缓的弓形波, 而非弓激波。尽管如此, 仍有科学家指出, 所测磁

场较强可能是由于星际磁场包裹着日球层顶。部分数值模型显示, 在特定的弯曲压缩几何结构下, 局部磁场强度会被显著增强。此外, 当前探测器所处的位置可能位于弓激波的下游区域, 在该区域呈现亚磁声状态也属合理。一些科学家在考虑星际抬起离子的多流体框架下, 推测可能存在马赫数很低的慢弓激波^[76]。是否存在真正意义上的弓激波, 仍需未来探测器穿越该结构后才能得以证实(图8)。

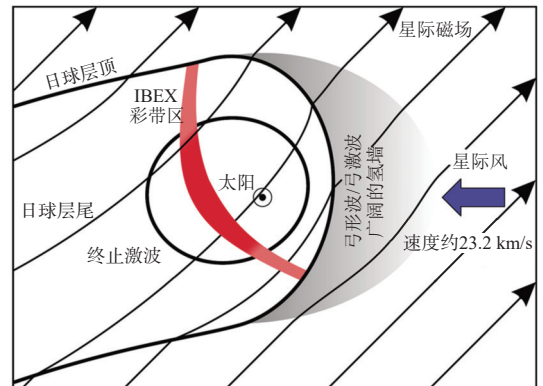


图 8 日球层弓激波或弓形波的存在性问题至今仍然悬而未决^[75]
 Fig. 8 Existence of a heliospheric bow shock or bow wave remains an unsettled question^[75]

3.1.6 边际区域的动态变化与不稳定过程

随着数值模型的日益精细,科学家已经能够更精细地刻画并重现“旅行者号”对太阳系边际结构的多次穿越过程。早先普遍认为,日球层是一个较为稳态的巨大结构,探测器仅需一次便可穿越。然而,从终止激波到日球层顶,无论是磁场、等离子体、还是宇宙线数据均表明,边际结构可能存在动态演化和往复摆动,其自身在动理学尺度上还呈现出重构和涟漪等非稳态特性^[26,52,62]。典型代表事件之一是,“旅行者2号”在一天内多次穿越终止激波,共记录了至少4次穿越(称为TS1-4)^[44];此外,“旅行者1号”在日球层顶附近经历了几次银河宇宙线峰值后,才观测到其单调递增的趋势,这一现象暗示日球层顶的穿越可能伴随了动态太阳风和星际介质相互作用造成的涟漪和Rayleigh-Taylor效应等剧烈动态过程^[77-78]。“旅行者1号”和“旅行者2号”实测的终止激波位于84~94 AU之间,日球层顶则约在120 AU处^[10-11,79]。IBEX中性原子成像反演和数值模拟表明,这些边际结构的位置会随太阳风活动高低年发生周期性的变化。基于日球层数值模型^[79],我们预测当太阳系边际探测器飞抵鼻尖和尾部方向的边际区域时,终止激波位置分别位于日心距约65 AU和105 AU处。基于日球层数值模型,科学家们还预测若终止激波上游存在前兆结构^[80],则“新视野号”可能会在到达激波前大约 1 ± 0.7 AU的位置开始观测到前兆回流离子^[81]。除鼻尖和尾部外,准鼻尖的侧翼方向可能会观测到内外日鞘区物质剪切产生的Kelvin-Helmholtz波等结构^[82]。基于模型反演得到的日球层顶涟漪结构如图9所示。

3.1.7 中性原子墙/氢墙的形成机制

中性原子墙/氢墙是指在日球层顶的外部,由星际

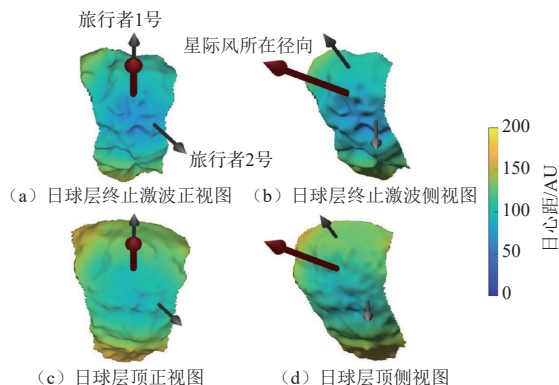


图9 联合有限原位探测和遥感数据,基于模型反演得到的日球层顶涟漪结构^[26]

Fig. 9 Ripple structure of the heliopause derived from model inversion combining limited in-situ and remote sensing data^[26]

中性氢原子与减速加速的星际等离子体之间发生电荷交换后形成的中性氢原子堆积区域。该结构最早于1993年在理论模型研究中提出^[74],并被认为是太阳系与星际介质相互作用的重要标志之一。氢墙可能对进入太阳系的高能粒子(如银河宇宙线)产生一定的屏蔽作用,从而会影响其传播路径和强度。由于该结构的存在,此区域的紫外辐射(尤其是Lyman- α 线)增强,成为探测日球层边界的一种重要手段^[46]。“旅行者号”在穿越日球层顶时,观测到等离子体密度和磁场强度的明显变化,与1993年的理论预计相符,间接支持了氢墙的存在^[83]。IBEX通过探测能量中性原子绘制了日球层边界的遥感全景图,亦暗示了氢墙的存在^[84]。此外,“新视野号”紫外线光谱仪探测到来自日球层边界的紫外线增强信号,被视为氢墙的另一项间接证据^[46]。未来若有太阳系边际探测器能够直接穿越该结构,将有望首次获得关于氢墙的首次直接观测证据(图10)。

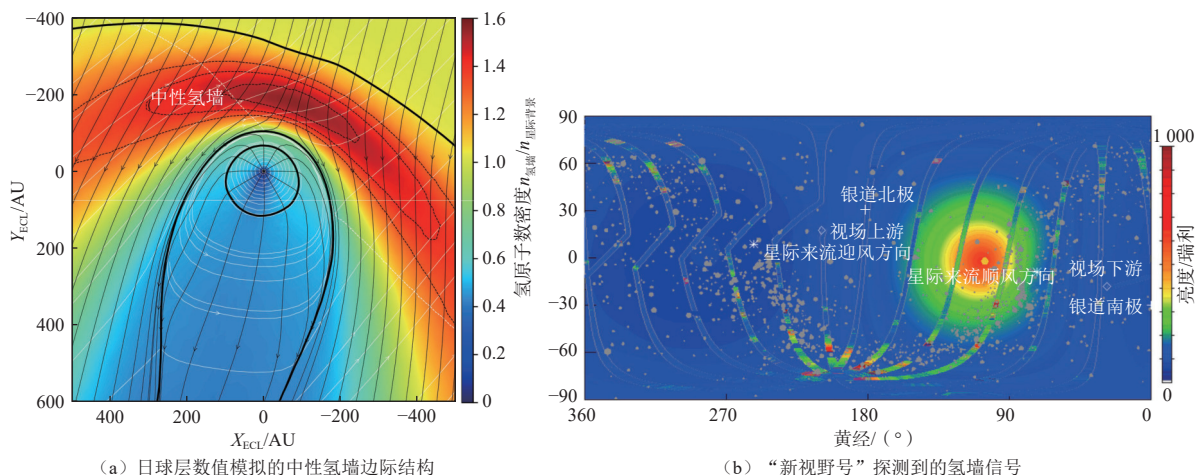


图10 日球层数值模拟的中性氢墙边际结构^[79]和“新视野号”探测到的氢墙信号^[46]

Fig. 10 Numerical simulation of heliospheric hydrogen wall structure^[79] and hydrogen wall signal detected by New Horizons^[46]

3.1.8 能量中性原子带状结构“彩带区”

源自日球层边缘和外日鞘区的能量中性原子ENA由于不受磁场直接控制, 可在未发生电荷交换之前传进内日球层, 并可能被IBEX、“鹊桥二号”和即将发射的IMAP等配置能量中性原子成像仪的探测器观测到。IBEX探测到一条能量约为1 keV的带状中性原子分布结构, 因此被命名为“彩带”(Ribbon)^[45](图11)。该结构在当时的理论中未曾被预言, 其起源位置至今仍存在广泛争议。IBEX的长年观测数据表明, 彩带强弱和分布特性随太阳活动高低年变化^[85]。一种观点认为, 太阳风离子经与星际中性原子发生初次电荷交换后生成拾起离子, 这些离子再与其它星际中性粒子发生二次电荷交换, 从而形成能量中性原子, 部分粒子进入内日球层并被IBEX探测到。然而, 该类理论通常要求离子在速度空间中形成长期稳定的环状分布^[86], 这一假设能否在邻近星际空间条件下成立仍存在理论上的不确定性, 有待更多观测数据加以验证。相比全天空相对均匀分布的GDF, 彩带结构具有分布狭窄、亮度集中、与局地星际磁场方向正交、变化响应滞后于太阳风强度起伏等显著特征。若鼻尖探测器能够穿越彩带区, 将有望获取其空间分布和速度分布等关键信息, 有助于进一步揭示彩带区的成因和物理特性。

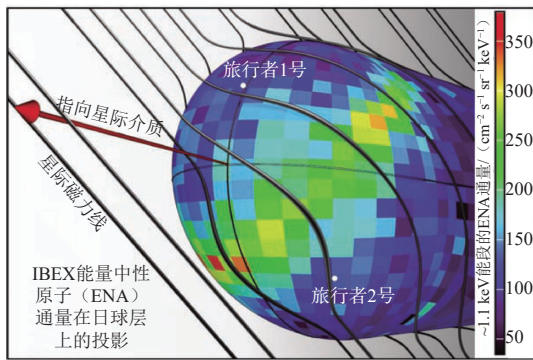


图 11 IBEX的能量中性原子全天空成像呈现的彩带状结构^[45]

Fig. 11 Ribbon-like structure revealed in the all-sky imaging of energetic neutral atoms by IBEX^[45]

3.2 邻近星际空间环境特性

3.2.1 星际物质基本属性

通过多种遥感反演技术, 研究者发现, 日球层边缘附近的星际氢(H)、氦(He)和氧(O)等元素的分布存在差异, 且在不同星际条件下, Ne/O的丰度比也表现出显著变化。然而, 迄今为止, 科学界尚未完成对星际物质的系统性原位探测, 其化学构成、同位素比例、电离程度、尘埃与气体的质量比等关键参数仍属未知, 亟待专项探测任务予以补充和解决。此外, 在外日鞘区邻近星际介质中, 是否存在彩带模型

所预测的环状速度分布离子, 也仍有待原位观测予以验证。

3.2.2 星际磁场特征

“旅行者号”已进入邻近星际空间, 并对该区域的磁场进行了原位测量^[87]。穿越日球层顶后, 探测器测得磁场强度跃升至约0.5 nT, 但磁场的方位角和俯仰角均未发生显著变化。有研究认为, 星际磁场在该区域被压缩并“缠绕”于日球层顶周围, 这种现象进一步证实了日球层与星际介质之间存在复杂的相互作用过程。此外, “旅行者号”的最高分辨磁场数据尚未对外公开, 因此基于自主获取的数据开展跨尺度物理过程的分析尤为关键。综合来看, 未来亟需更加高精度的探测手段, 以精确测定星际磁场的方向、强度、时空演化趋势及其湍动特征, 从而全面揭示太阳系边缘区域的磁场结构与动力学机制。

3.2.3 星际风与尘云环境

依据观测数据, 研究者推测, 在过去几十年中星际风的方向可能在发生缓慢变化。这一趋势表明, 太阳所处的星际环境具有一定的动态特性。但其具体速度、流向及变化规律仍有待通过长期、稳定的原位监测得加以确认。同时, 星际空间中广泛分布着细小的尘云, 其成分构成、质量浓度、温度特征等同样尚未明确揭示, 后续探测任务亟需在获取这些基本物理信息方面作出突破。近期有研究根据HI4PI的巡天数据提出, 约200~300万年前, 太阳系可能穿越了天猫(Lynx)星座稠密的星际云带, 导致当时日球层大小被压缩至仅约0.22 AU, 使地球暴露于密度高达3000 cm⁻³的稠密星际云和银河宇宙射线的强烈辐射中。当时, 地球正处于上新世(Pliocene)晚期向更新世(Pleistocene)早期过渡的时期, 这是第四纪冰期循环的开端阶段, 地球气候与生命演化发生了关键变化。该结论与地质记录中检测到的放射性同位素(⁶⁰Fe和²⁴⁴Pu)异常沉积证据相一致^[88]。

3.3 太阳系天体相关科学问题

3.3.1 半人马小天体的演化线索

半人马族天体是指轨道位于木星与海王星之间、轨道动力学上具有不稳定性的小型太阳系天体, 其轨道通常穿越或接近巨行星轨道, 呈现出类小行星和类彗星的双重特性。它们可能源自柯伊伯带或更远的区域, 在受到行星引力扰动后迁移至当前轨道位置。这些天体通常由冰和岩石组成, 部分在接近太阳时显示彗发活动。根据轨道特性和活动表现, 半人马天体可分为活跃型(如呈现彗发现象)和非活跃型。当前尚存在多个未解之谜, 包括其轨道的长期演化路径、活

跃机制的触发条件、是否存在环系结构, 以及其在太阳系形成和演化过程中的具体角色。

3.3.2 柯伊伯带目标天体的深度研究

柯伊伯带天体(Kuiper Belt Objects, KBOs)是指位于海王星轨道之外、距离太阳约30~55 AU之间的冰质小天体群体, 被认为是太阳系形成早期遗留下的原始物质。自1992年发现首个KBO(15760 Albion)以来, 科学家已识别出数千个此类天体, 其中包括冥王星(Pluto)、妊神星(Haumea)、阋神星(Eris)等被归类为矮行星的代表性成员。根据轨道特性, KBOs可分为经典柯伊伯带天体(Cubewanos)、与海王星存在轨道共振的冥族天体(Plutinos)以及散布盘天体(Scattered Disk Objects)。这些天体主要由水冰、甲烷和氨等挥发性物质组成, 其轨道形态多样, 部分天体具有高偏心率和轨道倾角。近期观测表明, 柯伊伯带可能延伸至70 AU, 甚至延伸至邻近星际空间及更远的区域, 暗示太阳系边界范围可能比先前认知更为广阔。然而, 关于KBOs的起源、演化路径、物理特性, 及其在太阳系形成过程中的贡献, 仍存在诸多未解之谜。

3.3.3 行星际尘埃云的分布与成因

行星际尘埃云(Interplanetary Dust Cloud), 又称黄道尘埃云, 是指分布在太阳系内行星轨道之间的微小尘埃颗粒群体, 其主要来源包括彗星活动、小行星碰撞、柯伊伯带天体碎裂以及星际介质的尘埃颗粒。它作为太阳系的“考古遗迹”, 承载了关于太阳星云原始成分与同位素比例的重要线索, 对理解生命形成和早期行星演化至关重要。这些尘埃粒子在太阳光的散射作用下形成可见的黄道光现象。根据来源及轨道特性, 行星际尘埃可分为彗星源尘埃、小行星源尘埃和星际尘埃, 其物理特性包括: 粒径范围广(从纳米级到毫米级)、组成复杂(含有硅酸盐、碳质物质等)、轨道分布多样(包括共振尘埃环、尘埃带等结构), 并在太阳辐射压力、太阳风以及行星引力等多种因素的共同作用下, 表现出复杂的动力学行为。目前尚待解决的问题包括尘埃云的三维结构、尘埃粒子的生命周期、尘埃对地球气候的影响, 以及其在太阳系形成和演化中的具体作用等。

3.4 空间天文科学试验

尽管爱因斯坦提出的广义相对论目前已作为现代引力理论的标准框架, 并在太阳系范围内通过了诸多实验检验, 但其适用性在极限条件下是否仍然成立, 还需通过更多实验手段加以实践验证。太阳系边际探测任务将为此提供一个独特的平台。具体而言, 若搭

载波和射电分析仪、高能光子分析仪、原子氢钟等空间天文载荷, 可结合多普勒测速与精确测距技术, 可在飞行器远离太阳系的过程中开展高精度引力场实验, 验证引力常数变化性、光速不变性及其他基本物理规律是否在长距离与弱场极限下依然成立。这类实验不仅可增强我们对时空本质的理解, 也有望揭示更高维度或新物理规律存在的可能性。

4 结束语

当前, 全球太阳系探测任务呈现出“三极推进”的趋势: 一方面, 朝太阳开展抵近探测, 观测日冕及近日空间环境; 另一方面, 朝太阳极区开展轨道探测, 对太阳冕洞和极区空间环境开展成像和原位探测; 还有就是, 延伸至太阳系边际甚至以远未知区域的星际探测, 探索日球层与星际介质相互作用的前沿地带。结合中国航天技术发展战略, 提出在2035年建成科学强国前实施发射, 并于建国百年之际实现一次飞行距离超过百亿km的深空探测任务, 具有重大意义。因为该任务不仅将揭示日球层边际结构、星际介质的本征属性及其耦合机制, 还将推动中国在太阳系起源与演化等前沿领域取得系统性科学突破。

在技术层面, 太阳系边际探测任务将带动多个关键前沿领域的跨越式发展, 包括空间核能源系统、平台载荷抗辐照技术、超长寿命载荷技术、星上智能观测技术、远距离测控通信技术、深空自主导航与管理、太阳系全域到达能力等, 为未来迈向邻近恒星际空间积蓄核心能力。这将标志着中国从“深空探测参与者”迈向“太阳系全域覆盖者”的战略跃升, 为全面建成世界航天强国的宏伟目标打下坚实基础。

受限于当前深空推进能力的技术瓶颈, 太阳系边缘探测计划的完整实施周期通常在25~30 a之间。同时, 由于特定的轨道窗口和天文条件的限制, 该类任务机不可失。因此, 建议国家从战略高度上尽快部署立项, 启动系统性前期论证工作, 为后续工程任务打下坚实的科学、技术与国际合作基础。

参考文献

- [1] RAOUAFI N E, MATTEINI L, SQUIRE J, et al. , Parker Solar Probe: Four Years of Discoveries at Solar Cycle Minimum[J]. *Space Science Reviews*, 2023, 219(1): 1-140
- [2] 王水, 陆全明. 无碰撞磁场重联[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 286-294.
- [3] PARKER E N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields [J]. *The Astrophysical Journal*, 1958, 128: 664-676.
- [4] 涂传诒, 宗秋刚, 何建森, 等. 日地空间物理学(第二版)上册| 日球层物理[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 112-118.

- [5] ZANK G P. Faltering steps into the galaxy: the boundary regions of the heliosphere[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2015, 53(1): 449-500.
- [6] VASYLIUNAS V M, SISCOE G L. On the flux and the energy spectrum of interstellar ions in the solar system[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81(7): 1247-1252.
- [7] MCCOMAS D J, BZOWSKI M, DAYEH M A, et al. Solar cycle of imaging the global heliosphere: Interstellar Boundary Explorer (IBEX) observations from 2009-2019[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2020, 248(2): 26. <https://collaborate.princeton.edu/en/publications/solar-cycle-of-imaging-the-global-heliosphere-interstellar-boundary/>.
- [8] 王赤, 李晖, 郭孝城, 等. 太阳系边际探测项目的科学问题[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 517-524.
- WANG C, LI H, GUO X C, et al. Scientific objectives for the exploration of the boundary of solar system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 517-524.
- [9] 王赤, 李晖, 杨忠炜, 等. 面向未来的宇航科技—外日球层与星际空间的环境特性及其相互作用[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2023: 33-45.
- [10] RICHARDSON J D, BELCHER J W, GARCIA-GALINDO P, et al. Voyager 2 plasma observations of the heliopause and interstellar medium[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(11): 1019-1023.
- [11] BURLAGA L F, NESS N F, BERDICHEVSKY D B, et al. Magnetic field and particle measurements made by Voyager 2 at and near the heliopause[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(11): 1007-1012.
- [12] GURNETT D A, KURTH W S. Plasma densities near and beyond the heliopause from the Voyager 1 and 2 plasma wave instruments[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(11): 1024-1028.
- [13] STONE E C, CUMMINGS A C, HEIKKILA B C, et al. Cosmic ray measurements from Voyager 2 as it crossed into interstellar space[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(11): 1013-1018.
- [14] MCCOMAS D J, ZIRNSTEIN E J, BZOWSKI M, et al. Seven years of imaging the global heliosphere with IBEX[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 229(2): 41. <https://beta.iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/aa66d8>.
- [15] DIALYNAS K, KRIMIGIS S M, MITCHELL D G, et al. The bubble-like shape of the heliosphere observed by Voyager and Cassini[J/OL]. *Nature Astronomy*, 2017, 1(5): 0115. <https://www.nature.com/articles/s41550-017-0115>.
- [16] MCCOMAS D J, ZIRNSTEIN E J, BZOWSKI M, et al. Interstellar pickup ion observations to 38 AU[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 233(1): 8. <https://arxiv.org/abs/1710.05194>.
- [17] MCCOMAS D J, SWACZYNA P, SZALAY J R, et al. Interstellar pickup ion observations halfway to the termination shock[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, 254(1): 19. [extension://ngbkcgblmglgldjfcnhaijceaccgfi/https://spacephysics.princeton.edu/sites/g/files/toruqf1376/files/media/21_mccomas_a.pdf](https://ngbkcgblmglgldjfcnhaijceaccgfi/https://spacephysics.princeton.edu/sites/g/files/toruqf1376/files/media/21_mccomas_a.pdf).
- [18] MCCOMAS D J, SHRESTHA B L, SWACZYNA P, et al. First high-resolution observations of interstellar pickup ion mediated shocks in the outer heliosphere[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2022, 934(2): 147. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac7956>.
- [19] MCCOMAS D J, SHRESTHA B L, LIVADIOTIS G, et al. Interstellar Pickup Ion Observations to 60 au[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, 980(1): 154.
- [20] STERN S A, SPENCER J R. New Horizons: the first reconnaissance mission to bodies in the Kuiper Belt[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2003, 92(1-4): 477-482.
- [21] KUZNETSOV V D, SINELNIKOV V M, ALPERT S N. Yakov Alpert: Sputnik-1 and the first satellite ionospheric experiment[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(12): 2833-2839.
- [22] HALL C F. The Pioneer 10/11 program: from 1969 to 1994[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1983, 32(5): 414-416.
- [23] STONE E C, VOGT R E, MCDONALD F B, et al. Cosmic ray investigation for the Voyager missions; energetic particle studies in the outer heliosphere—and beyond[J]. *Space Science Reviews*, 1977, 21(3): 355-376.
- [24] FOUNTAIN G H, KUSNIERKIEWICZ D Y, HERSMAN C B, et al. The New Horizons spacecraft[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 140(1-4): 23-47.
- [25] MCCOMAS D J. ENA imaging of the inner heliosheath—preparing for the Interstellar Boundary Explorer (IBEX)[J]. *Space Science Reviews*, 2009, 143(1-2): 125-138.
- [26] ZIRNSTEIN E J, SHRESTHA B L, MCCOMAS D J, et al. Oblique and rippled heliosphere structures from the Interstellar Boundary Explorer[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6(12): 1398-1413.
- [27] MCCOMAS D J, CHRISTIAN E R, SCHWADRON N A, et al. Interstellar Mapping and Acceleration Probe (IMAP): a new NASA mission[J/OL]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(8): 116. <https://science.nasa.gov/mission/imap/>.
- [28] ZIRNSTEIN E J, HEERIKHUISEN J, MCCOMAS D J, et al. Viewing Global Changes in the Heliosheath with IMAP's Energetic Neutral Atom Imagers[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2025, 985(2): 188. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/adceb4>.
- [29] MCNUTT JR R L, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, GRUNTMAN M, et al. Interstellar probe - destination: universe![J]. *Acta Astronautica*, 2022, 196: 13-28.
- [30] BRANDT P C, PROVORNIKOVA E, BALE S D, et al. Future exploration of the outer heliosphere and very local interstellar medium by interstellar probe[J/OL]. *Space science reviews*, 2023, 219(2): 18. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-022-00943-x>.
- [31] BAIRSTOW B, LEE Y H, OXNEVAD K. Mission analysis for next-generation RTG study[C]//Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2018: 1-19.
- [32] 何建森, 林荣, 崔博, 等. 外日球层的宽能段离子及其与湍动的耦合作用[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 574-583.
- HE J S, LIN R, CUI B, et al. Broad energy-band ions in the outer heliosphere and their coupling with turbulence[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 574-583.
- [33] 吴伟仁, 王赤, 刘洋, 等. 深空探测的前沿科学问题[J]. *科学通报*, 2023, 68(6): 606-627.
- WU W R, WANG C, LIU Y, et al. Frontier scientific questions in deep space exploration [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68: 606-627.
- [34] 吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 1-16.
- WU W R, YU D Y, HUANG J C, et al. Exploring the solar system boundary [J]. *Science China-Information Sciences*, 2019, 49: 1-16.
- [35] 张爱兵, 李晖, 孔令高, 等. 太阳系边际探测任务的科学载荷配置研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 545-553.
- ZHANG A B, LI H, KONG L G, et al. Scientific payloads proposal for Chinese Solar system boundary exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 545-553.

- [36] 朱安文,刘飞标,杜辉,等.核动力深空探测器现状及发展研究[J].*深空探测学报(中英文)*,2017,4(5):405-416.
ZHU A W, LIU F B, DU H, et al. Current status and development for deep space nuclear power explorer[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(5): 405-416.
- [37] ISENBERG P A. Interstellar pickup ions: not just theory anymore[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(S1): 623-627.
- [38] GLOECKLER G, GEISS J. Interstellar and inner source pickup ions observed with SWICS on Ulysses[J]. *Space Science Reviews*, 1998, 86(1): 127-159.
- [39] LI H, JIANG W, YANG Z, et al. Pickup ion modulation on plateau-like turbulence in the Martian magnetosheath[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2024, 967(1): 76. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad3d49>.
- [40] WANG L, HUANG C, DU A, et al. Kelvin-Helmholtz instability at Mars: in situ observations and kinetic simulations[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 947(1): 51. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/acc655>.
- [41] LU Q M, SHAN L C, ZHANG T L, et al. The role of pickup ions on the structure of the venusian bow shock and its implications for the termination shock[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2013, 773(L24): 1. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/773/2/L24>.
- [42] SHRESTHA B L, MCCOMAS D J, ZIRNSTEIN E J, et al. High-resolution observations of pickup ion mediated shocks to 60 AU[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2025, 984(1): 11. <https://arxiv.org/abs/2503.10455>.
- [43] LEE K H, LEE L C. Interstellar turbulence spectrum from in situ observations of Voyager 1[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(2): 154-159.
- [44] RICHARDSON J D, KASPER J C, WANG C, et al. Cool heliosheath plasma and deceleration of the upstream solar wind at the termination shock[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 63-66.
- [45] MCCOMAS D J, ALLEGRINI F, BOCHSLER P, et al. Global observations of the interstellar interaction from the interstellar boundary explorer (IBEX)[J]. *Science*, 2009, 326(5955): 959.
- [46] GLADSTONE G R, PRYOR W R, STERN S A, et al. The Lyman- α sky background as observed by New Horizons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(16): 8022-8028.
- [47] MOSTAFAVI P, ZANK G P. The structure of shocks in the very local interstellar medium[J/OL]. *Astrophysical Journal Letters*, 2018, 854(1): L15. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aaab54/meta>.
- [48] BURLAGA L F, NESS N F, ACUNA M H, et al. Crossing the termination shock into the heliosheath: Magnetic fields[J]. *Science*, 2005, 309(5743): 2027-2029.
- [49] STONE E C, CUMMINGS A C, MCDONALD F B, et al. Voyager 1 explores the termination shock region and the heliosheath beyond[J]. *Science*, 2005, 309(5743): 2017-2020.
- [50] DECKER R B, KRIMIGIS S M, ROELOF E C, et al. Voyager 1 in the foreshock, termination shock, and heliosheath[J]. *Science*, 2005, 309(5743): 2020-2024.
- [51] GURNETT D A, KURTH W S. Electron plasma oscillations upstream of the solar wind termination shock[J]. *Science*, 2005, 309(5743): 2025-2027.
- [52] BURLAGA L F, NESS N F, ACUÑA M H, et al. Magnetic fields at the solar wind termination shock[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 75-77.
- [53] DECKER R B, KRIMIGIS S M, ROELOF E C, et al. Mediation of the solar wind termination shock by non-thermal ions[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 67-70.
- [54] WANG L, LIN R P, LARSON D E, et al. Domination of heliosheath pressure by shock-accelerated pickup ions from observations of neutral atoms[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 81-83.
- [55] GURNETT D A, KURTH W S. Intense plasma waves at and near the solar wind termination shock[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 78-80.
- [56] JOKIPII J R. A shock for Voyager 2[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 38-39.
- [57] STONE E C, CUMMINGS A C, MCDONALD F B, et al. An asymmetric solar wind termination shock[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 71-74.
- [58] WU P, WINSKE D, GARY S P, et al. Energy dissipation and ion heating at the heliospheric termination shock[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, 114(A8): JA014240. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009JA014240>.
- [59] OKA M, ZANK G P, BURROWS R H, et al. Energy dissipation at the termination shock: 1D PIC simulation[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1366(1): 53-59.
- [60] ZANK G P, BURROWS R, OKA M, et al. Micro-structure of the heliospheric termination shock[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1183(1): 156-166.
- [61] YANG Z, HAN D, YANG H, et al. Contributions to the cross shock electric field at supercritical perpendicular shocks: impact of the pickup ions[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2012, 341: 241-250.
- [62] YANG Z, LIU Y D, RICHARDSON J D, et al. Impact of pickup ions on the shock front nonstationarity and energy dissipation of the heliospheric termination shock: two-dimensional full particle simulations and comparison with Voyager 2 observations[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 809(1): 28. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/809/1/28>.
- [63] KUMAR R, ZIRNSTEIN E J, SPITKOVSKY A. Energy distribution of pickup ions at the solar wind termination shock[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 860(2): 156. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aabf96>.
- [64] MATSUKIYO S, MATSUMOTO Y. Injection process of pickup ion acceleration at an oblique heliospheric termination shock[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 970(2): L37. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ad5d73/pdf>.
- [65] LEE M A. The termination shock of the solar wind[J]. *Space Science Reviews*, 1996, 78(1): 109-116.
- [66] LEE M A, SHAPIRO V D, SAGDEEV R Z. Pickup ion energization by shock surfing[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, 101(A3): 4777-4789.
- [67] ZANK G P, PAULS H L, CAIRNS I H, et al. Interstellar pickup ions and quasi-perpendicular shocks: Implications for the termination shock and interplanetary shocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, 101(A1): 457-477.
- [68] KRIMIGIS S M, DECKER R B, ROELOF E C, et al. Energetic charged particle measurements from Voyager 2 at the heliopause and beyond[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(11): 997-1006.
- [69] GUO X, ZENG Y, WANG C. Effects of magnetic boundary layer on galactic cosmic rays during the heliopause crossing for Voyager 2[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2025, 985(2): 246. extension://ngbckglblmglgldjfcnhaijceaccgfi/https://inspirehep.net/files/955e1241

- 0a848134be9f71e0bd2ae6ff.
- [70] OPPER M, LOEB A, DRAKE J, et al. A small and round heliosphere suggested by magnetohydrodynamic modelling of pick-up ions[J]. *Nature Astronomy*, 2020, 4(7): 675-683.
- [71] KORNBLEUTH M, OPPER M, BALIUKIN I, et al. The development of a split-tail heliosphere and the role of non-ideal processes: a comparison of the BU and Moscow models[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 923(2): 179. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac2fa6>.
- [72] KLEIMANN J, DIALYNAS K, FRATERNALE F, et al. The structure of the large-scale heliosphere as seen by current models[J/OL]. *Space science reviews*, 2022, 218(4): 36. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35664863/>.
- [73] MCCOMAS D J, DAYEH M A, FUNSTEN H O, et al. The heliotal revealed by the Interstellar Boundary Explorer[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 771(2): 77. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/771/2/77>.
- [74] BARANOV V B, MALAMA Y G. Model of the solar wind interaction with the local interstellar medium: numerical solution of self-consistent problem[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(A9): 15157-15163.
- [75] MCCOMAS D J, ALEXASHOV D, BZOWSKI M, et al. The heliosphere's interstellar interaction: no bow shock[J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1291-1293.
- [76] ZIEGER B, OPPER M, SCHWADRON N A, et al. A slow bow shock ahead of the heliosphere[J]. *Geophysical research letters*, 2013, 40(12): 2923-2928.
- [77] FLORINSKI V, ZANK G P, POGORELOV N V. Heliopause stability in the presence of neutral atoms: Rayleigh-Taylor dispersion analysis and axisymmetric MHD simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110(A7): 010879. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JA010879>.
- [78] OPPER M, DRAKE J F, ZANK G, et al. A turbulent heliosheath driven by the Rayleigh-Taylor instability[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 922(2): 181. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac2d2e>.
- [79] IZMODENOV V V, ALEXASHOV D B. Three-dimensional kinetic-MHD model of the global heliosphere with the heliopause-surface fitting[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, 220(2): 32. extension://ngbkcgblmglgldjfcnhaijeecaccgfi/https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0067-0049/220/2/32/pdf.
- [80] POWELL E, OPPER M, BAIR E, et al. Termination shock particle streaming upstream at New Horizons[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 978(1): L11. extension://ngbkcgblmglgldjfcnhaijeecaccgfi/https://research.ssl.berkeley.edu/~poppe/papers/Powell_et_al_2025.pdf.
- [81] JOKIPII J R, GIACALONE J, KOTA J. Transverse streaming anisotropies of charged particles accelerated at the solar wind termination shock[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2004, 611(2): L141. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/423993>.
- [82] MILLER J A, FIELDS B D. Heliospheric compression due to recent nearby supernova explosions[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2022, 934(1): 32. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac77f1>.
- [83] GURNETT D A, KURTH W S, BURLAGA L F, et al. In situ observations of interstellar plasma with Voyager 1[J]. *Science*, 2013, 341(6153): 1489-1492.
- [84] FICHTNER H, SCHERER K, EFFENBERGER F, et al. The IBEX ribbon as a signature of the inhomogeneity of the local interstellar medium[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, 561: A74. https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2014/01/aa22064-13/F3.html.
- [85] MCCOMAS D J, ALIMAGANBETOV M, BEESLEY L J, et al. Fourteen years of energetic neutral atom observations from IBEX[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2024 Jan 17;270(2): 17. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/ad0a69>.
- [86] LIU K, MÖBIUS E, GARY S P, et al. Pickup proton instabilities and scattering in the distant solar wind and the outer heliosheath: hybrid simulations[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, 117(A10): A10102. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JA017969>.
- [87] BURLAGA L F, PARK J, BERDICHEVSKY D B, et al. The solar magnetic hump, heliopause, and the very local interstellar medium[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 971(1): L17. extension://ngbkcgblmglgldjfcnhaijeecaccgfi/https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ad6397/pdf.
- [88] OPPER M, LOEB A, PEEK J E G. A possible direct exposure of the Earth to the cold dense interstellar medium 2-3 Myr ago[J]. *Nature Astronomy*, 2024, 8(8): 983-990.

作者简介:

李晖(1985-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:日球层物理,空间天气。**本文通信作者。**

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号中国科学院国家空间科学中心(100190)

电话:13426409746

E-mail: hli@swl.ac.cn

王赤(1967-),男,中国科学院院士,研究员,主要研究方向:日球层物理、磁层物理。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号中国科学院国家空间科学中心(100190)

电话:(010)62582763

E-mail: cw@swl.ac.cn

Directional Scientific Objectives of the Interstellar Express Mission

LI Hui^{1,2}, YANG Zhongwei¹, WANG Chi^{1,2}, GUO Xiaocheng^{1,2},
JIANG Wence¹, WANG Yuxian¹, BALIUKIN Igor I.³

(1. State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Space Research Institute of the RAS (IKI RAS), Moscow 117485, Russia)

Abstract: In this paper, the main scientific objectives, observational requirements, and expected scientific returns of boundary exploration missions in different directions, such as the heliospheric nose and tail, were briefly introduced; the current research status at home and abroad was reviewed, including ongoing and proposed missions and their scientific payload configurations; several major scientific questions related to heliospheric physics, the interstellar medium, and solar system evolution in different directions were summarized. Finally prospects for China's future scientific development in independent boundary exploration were presented.

Keywords: edge of the solar system; solar system evolution; heliosphere; interstellar space

Highlights:

- An analysis and summary of the current international and domestic progress on missions targeting the solar system boundary.
- Key scientific questions and observational requirements are outlined separately for the nose/upwind and tail/downwind directions.
- A prospective outlook on China's first mission to the solar system boundary and the associated scientific objectives and payloads.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]