



太阳系边际探测研究

吴伟仁¹, 于登云², 黄江川³, 宗秋刚⁴, 王赤⁵, 于国斌¹, 赫荣伟³, 王倩¹,
康焱^{1,3*}, 孟林智⁶, 吴克⁶, 何建森⁴, 李晖⁵

1. 国家国防科技工业局探月与航天工程中心, 北京 100190

2. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048

3. 中国空间技术研究院, 北京 100094

4. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

5. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

6. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* 通信作者. E-mail: kangyan416@163.com

收稿日期: 2018–10–25; 接受日期: 2018–11–26; 网络出版日期: 2019–01–09

中国工程院咨询研究项目 (批准号: 2018–XY–64) 资助

摘要 本文在综述太阳系边际探测的发展历程和现状基础上, 基于太阳系边际探测的发展趋势, 阐释了太阳系边际探测的 4 类科学目标, 提出了我国太阳系边际探测的总体目标、阶段目标及近期探测任务设想, 给出了应重点研究和突破的 6 类关键技术, 为我国太阳系边际探测的论证与实施提供参考.

关键词 太阳系边际, 日球层, 恒星际, 探测器, 太阳风, 星际介质, 发展路线

1 引言

太阳系边际一直是国际空间科学研究的前沿领域, 对这个极远、极暗、极寒的未知区域, 目前主要有两种定义: 一是以太阳风控制范围作为依据, 太阳系边际位于日球层边缘, 距太阳约为 80~150 AU (AU 是天文单位, 1 AU 是指地球到太阳的距离, 约 1.5 亿公里), 二是以太阳引力控制范围作为依据, 太阳系边际位于奥尔特云 (Oort Cloud) 附近, 距离太阳约为 5~10 万 AU^[1,2]. 本文的太阳系边际探测, 主要是对定义一“太阳风边际”的探测, 愿景是对定义二“太阳引力边际”的探测.

在定义一中, 太阳系边际具体位于如图 1 所示的日球层顶和终止激波构成的日球层边缘区域. 日球层是指太阳风在银河系星际空间中吹出的巨大磁化等离子体“气泡”, 该“气泡”的外边界就是日球层顶, 它是太阳风和星际等离子体的交界面, 属于太阳风与星际介质间的压力平衡结构; 超声速的太阳风在接近日球层顶时开始减速, 并在其内侧形成终止激波. 终止激波是太阳系边际开始的标志^[3,4].

引用格式: 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, doi: 10.1360/N112018-00273
Wu W R, Yu D Y, Huang J C, et al. Exploring the solar system boundary (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 1–16, doi: 10.1360/N112018-00273

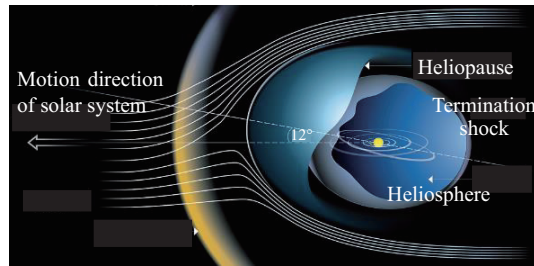


图 1 (网络版彩图) 太阳系边际基本概念

Figure 1 (Color online) Basic concepts of solar system boundary

对极远、极暗、极寒的太阳系边际进行探测,一是能够在恒星系起源与演化、太阳系外物质组成与特性、日球层太阳风动力学过程等方面获得重大科学发现;二是有利于推动星载新型高效能源与推进、超远距离深空测控通信、深空自主技术等尖端空间技术的跨越式可持续发展;三是可构建我国航天器在太阳系全域到达能力,初步具备恒星际空间探索能力,带动我国科技水平与创新能力的大幅提升;四是蕴含了重要的人文精神,代表了人类对未知领域的不断探索,是深空探测“奥林匹克”精神传承,更是中国传统文化“叩天问道”精髓的体现。

2 太阳系边际探测发展概况

2.1 发展历程和已取得成果

太阳系边际探测一直是国际空间科学研究的前沿领域,但由于其探测过程具有飞行距离远、任务周期长、探测环境未知多变、能源与动力要求高等特点,实施难度极大。国际上仅美国的前驱者 10 号和 11 号 (Pioneer 10/11)、旅行者 1 号和 2 号 (Voyager 1/2) 以及新视野号 (New Horizon) 少数几次任务在完成预定目标后,开展了星际任务拓展,继续飞向更远的太阳系边际进行了一些探测,基本情况如表 1 所示。

先驱者 10 号和 11 号 (如图 2 所示) 是美国开展的第一次日球层空间探测任务,分别于 1972 年 3 月 3 日和 1973 年 4 月 6 日发射,在完成了对主带小行星、木星和土星探测后,继续飞往更遥远的深空^[5]。由于能源限制,已分别于 2003 年 1 月 23 日和 1995 年 9 月 29 日与地面无线电通信中断,按照轨道外推,当时距太阳分别约 80 和 43 AU^[6]。

先驱者号探测任务的主要成果包括: (1) 实现了对木星、土星等外太阳系天体的首次飞越探测; (2) 训练和验证了美国深空网获取和跟踪深空无线电信号的能力; (3) 携带了先驱者镀金铝板,铝板上刻画有男人、女人的图像和表明探测器来源的符号信息,以在外星智能生物发现探测器时向其传达信息^[5,7]。

旅行者 1 号于 1977 年 9 月 5 日发射,主要任务是探测木星、土星以及土卫六^[8,9];旅行者 2 号于 1977 年 8 月 20 日发射,主要任务是探测木星、土星、天王星和冥王星,探测器示意图如图 3 所示^[10,11]。截止 2018 年 9 月,旅行者 1 号已经距离太阳约 142 AU,是距离太阳最远的探测器¹⁾。目前,它们仍与地球保持着联系,预计 2025 年左右因放射性同位素温差电源^[12] (radioisotope thermoelectric generator, RTG) 无法提供足够电能,探测器将中断与地面的联系。

1) https://en.wikipedia.org/wiki/Voyager_1.

表 1 探测任务基本情况

Table 1 Summary of the missions related to out heliospheric exploration

	Mission				
	Pioneer-10	Pioneer-11	Voyager-1	Voyager-2	New horizons
Launch time	03.03.1972	04.06.1973	09.05.1977	08.20.1977	01.19.2006
Main targets	Main Belt Asteroids, Jupiter, Saturn	Main Belt Asteroids, Jupiter, Saturn	Jupiter, Saturn, Titan	Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune	Pluto, Charon, Kuiper Belt Asteroids
Method of exploration	Flyby	Flyby	Flyby	Flyby	Flyby
Launch mass (kg)	259	259	825.5	825.5	478
Mission completion time	01.23.2003	09.30.1995	In progress	In progress	In progress
Basic information of probe platforms	Hexagonal Platform 36 cm in height, side length 76 cm; a high gain parabolic antenna that 2.74 m in diameter is assembled on top of the platform; 4 SNAP-19 RTG, Pu-238, launch power 155 W		Decahedron main platform 0.47 m in height, a high gain parabolic antenna that 3.7 m in diameter is assembled on top of the Platform; 3 hundred watts level RTG that each weight 39 kg, 24 Pu-238 fuel sphere, launch power 470 W		Approximate triangle shape platform, 0.7 m in height and 2.1 m in length, 2.7 m at the widest range; a high gain dish antenna that 2.1 m in diameter is assembled, 1 RTG, Pu-238 fuel sphere, launch power 245.7 W

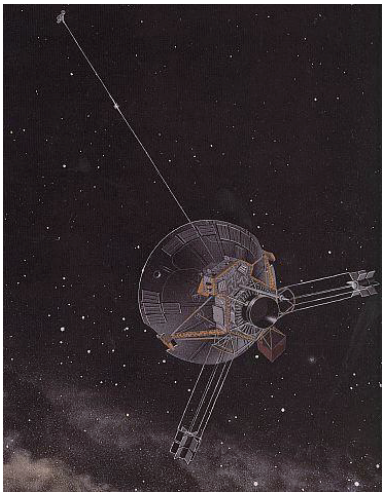


图 2 (网络版彩图) 先驱者号探测器示意图
Figure 2 (Color online) Picture of Pioneer spacecraft

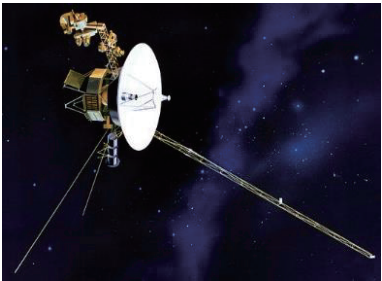


图 3 (网络版彩图) 旅行者号探测器示意图
Figure 3 (Color online) Picture of Voyager spacecraft

旅行者号探测任务主要成就包括: (1) 不仅完成了对外太阳系行星的探测, 其科学探测还为研究太阳风与恒星际物质相互作用提供了第一手参数和数据, 并为宇宙线研究提供了背景数据; (2) 旅行者 2 号利用 176 年一遇的“四星联游”窗口, 实现了一个探测器对四颗外太阳系行星的飞越 (1979 年木星、1981 年土星、1986 年天王星和 1989 年海王星); (3) 携带了特制的镀金唱片, 唱片的一面录制了世

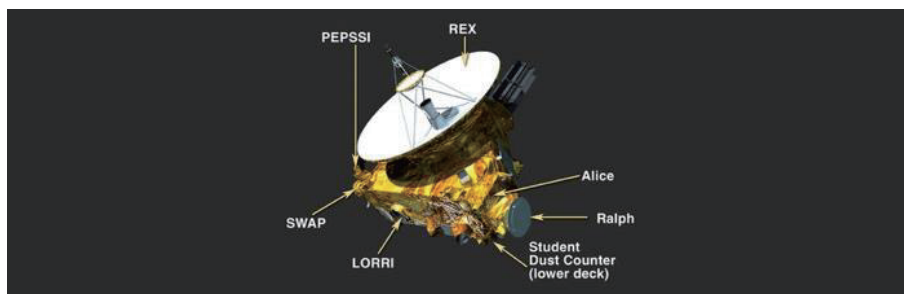


图 4 (网络版彩图) 新视野号及科学载荷配置情况

Figure 4 (Color online) Picture and scientific payloads of New Horizons spacecraft (Credits: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute)

界 60 种不同语言的问候语、35 种自然界声响和 27 首古今世界名曲, 另一面录制了 115 张反映地球人类文明的照片, 其中包括中国长城和中国家宴的照片^[13~16].

2006 年 1 月 19 日发射的新视野号是美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) “新疆域计划” 中的首个探测器, 旨在探测冥王星、冥卫一以及柯伊柏带 (Edgeworth-Kuiper belt) 天体, 搭载了 7 种科学载荷^[17], 如图 4 所示. 新视野号已于 2015 年 7 月飞越了冥王星及其卫星, 正以每年约 3.4 AU 的速度飞向柯伊柏带的 2014MU69 小天体, 预计将于 2019 年 1 月 1 日抵达, 并将于 2030 年前后飞临太阳系边际.

新视野号已取得的主要成果包括: (1) 实现了冥王星的近距离探测, 飞越高度约 1.25 万公里, 传回了冥王星的首张高清图片; (2) 发现冥王星北极存在冰冠, 主要成分为氮冰和甲烷冰; (3) 测算了冥王星的直径, 降低了此前对冥王星直径数据估算中的不确定性; (4) 揭示了冥王星的富氮大气高度^[18~20].

太阳系边际除就位探测外, 科学家还利用地球附近的卫星开展遥感探测. 2008 年 10 月 19 日, NASA 发射了质量为 107 kg 的星际边界探测器 (interstellar boundary explorer)^[21], 进入约 7000 km × 320000 km 的高偏心率地球椭圆轨道, 利用搭载的两台中性原子成像仪探测了来自日球层边缘的高能中性原子以及星际中性原子^[22, 23].

近年来, 太阳系边际探测活动又掀起了新一轮的热潮. 美国发布的《2014~2033 年日球物理路线图》把其作为高优先任务之一^[24]. NASA、欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 等均开展了新一轮的概念研究, 并积极推进类似探测任务的实施. 2015 年, NASA 支持了“太阳风层顶静电快速传输系统 (determination of the solar wind slowdown near solar maximum)”的概念研究^[25], 计划利用电动帆技术使探测器在 10 年之内抵达太阳系边际以及更远的恒星际空间开展探测. 2018 年, NASA 经多年的论证和关键技术研究, 提出利用 RTG 等技术, 借助木星和太阳的引力加速, 目标是使探测器在 50 年内到达 1000 AU.

我国月球和深空探测工程的顺利实施以来, 相关部门也开展了研究工作. 2015 年, 中国国家航天局启动太阳系边际探测计划的前期预先研究项目, 中国空间技术研究院、北京大学及中国科学院国家空间科学中心联合参与开展; 中国科学院空间科学战略性先导科技专项“空间科学预先研究项目”启动了“星际快车——‘神梭’探测计划初步方案研究”. 2017 年, 中国工程院在咨询研究项目中支持了相关课题研究.

2.2 发展趋势

通过以上分析可以看出, 太阳系边际探测活动有如下发展趋势.

(1) 太阳系边际是未来深空探测的重要方向之一, 将是继月球、火星及系内其他天体之后, 人类认识宇宙的新窗口。

探索未知、不断拓展人类活动疆域一直是人类文明发展和不断进步的原动力, 探测更深、更远、更广阔的深空已是人类航天活动的重点方向。深空探测遵循由近及远的发展规律, 经历了由月球探测, 到近地行星探测, 到系内其他天体探测, 到系外恒星际空间探测的发展过程^[11]。

自进入太空以来, 专家和学者就不断尝试提出新的概念、采用新的技术以尽快飞出太阳系, 进入恒星际空间^[13]。太阳系边际及其附近区域是距离人类最近的邻近恒星际区域, 是人类开始恒星际探测的第一步。美国已经有 5 次任务的探测器达到太阳系逃逸速度, 并不同程度对太阳系边际进行了探测^[10, 17]。近年来, 美国和欧洲的航天机构已提出了多个太阳系边际和恒星际空间探测计划。

未来随着航天技术的不断发展, 人类迈向太阳系边际并开展恒星际旅行, 不断拓展发现疆域, 是必然趋势。太阳系边际探测作为探索恒星起源, 引领恒星际空间探测发展的先驱任务, 已经成为世界航天强国争相发展的新领域、新方向。

(2) 科学驱动是太阳系边际探测的源动力, 将实现从行星飞掠之后的“自由探索”到进军星际空间的“有的放矢”转变。

早期美国 NASA 的探测计划, 如先驱者 10 号和 11 号、旅行者 1 号和 2 号、新视野号等, 其主要的设计目标是飞掠太阳系内的一些行星。在完成既定任务后, 进行了星际任务扩展, 从而对太阳系边际进行了自由式的探索, 并不是一个明确针对太阳系边际的任务规划, 而且无论探测器平台的自身能力, 还是所携带科学载荷的探测手段和精度也未满足相应的探测要求。

现阶段, 国际上对星际空间探测的概念研究强调的是针对关键未知区域开展有的放矢的专门探测和综合性探测^[21~24, 26~31]。比如, 旅行者 1 号和 2 号分别从太阳系边际的中心原子“彩带”区的南北边界“擦肩而过”, 而新规划的任务重点考虑从“彩带”中心, 也就是“鼻尖”区穿越探测; 另外, 日球层尾部也是一个非常引人注目的未知关键区域; 此外, 在任务飞行途中, 还会经过一系列“神秘地带”, 如行星际尘云带、柯伊伯带等。如何最优化设计飞船的轨道, 统筹配置其科学载荷, 以期实现科学产出的最大化, 也是现阶段研究的重点。

(3) 先进技术的突破与成熟应用是太阳系边际探测的工程基础, 并带动一批深空探测共性核心技术“台阶式”提升。

太阳系边际探测是一项极具创新和挑战的系统工程, 是当前最困难的深空探测任务之一。由于飞行距离远导致任务周期可长达数十年, 为尽快抵达目标天域开展科学探测, 探测器需以尽可能快的速度飞行, 同时也要为应对极暗条件下的供电、极寒条件下的热控和极远距离下的遥测提供支持。

太阳系边际探测涉及多个尖端领域的大量技术难题, 需要攻克适应极端环境条件的材料、仪器仪表、电子元器件等基础性技术, 还需突破新型高效能源与推进技术、超远距离深空测控通信技术等一系列尖端空间技术, 解决深空多动力模型轨道拼接、探测小天体轨道扰动大、强磁辐射环境防护、拾起粒子产生机理及探测形式等前沿技术, 牵引带动我国航天研发能力进一步向高端挺进, 引导国内优质创新资源向空间探索战略前沿集聚, 有效突破和掌握深空探测共性核心技术, 实现我国航天能力的跨越式发展。

(4) 太阳系边际探测是国际大科学工程的重要平台之一, 国际合作是“好、快、省”地实施探测活动的重要手段。

太阳系边际探测是一个持续而宏大的科学任务, 是人类在空间探索中面临的共同机遇, 可有效吸引各国优势技术资源和科学资源, 聚集国际科学家团队和高端科学人才, 形成一个具有重大国际影响力的国际大科学工程, 实现丰富科学目标、完善任务规划、合作科学载荷, 确保科学目标先进性、载荷

配置合理性和科学成果最大化。

借助各种平台,开展由中国发起,美、欧、俄等国广泛参与的国际日球层探测会议,深化论证科学目标和任务的顶层设计;围绕科学目标论证与有效载荷研制、探测器超远距离测控通信、同位素能源等方面积极开展国际合作,有效降低技术难度,节约任务经费。通过国际合作,培养和造就一批国际同行认可的领军科学家和学术骨干,形成具有国际水平的工程管理团队和良好机制,打造深空探测领域新的高端技术试验和协同创新平台。

3 太阳系边际探测科学目标

3.1 到达 100 AU 左右的太阳系边际

3.1.1 星际中性原子、星际尘埃等侵入物质的空间分布特性探测

太阳风的拾起过程。太阳风等离子体与星际中性原子发生电荷交换,中性原子失去电子被太阳风磁场裹挟着前进并与原太阳风相互作用,称为拾起过程。观测表明:太阳风在外日球空间传播过程中会不断地减速,并且伴随着局地加热过程^[25,32]。目前,太阳风的拾起过程则被认为是引起加热的主要原因之一。通过对拾起离子的径向分布和效应的深入观测和研究,对于理解太阳风的动力学演化非常重要。

银河宇宙线的日球层调制。银河宇宙线在日球层内的调制和扩散分布对于广义上的空间天气效应非常重要。目前主要是通过数值模拟来了解相关过程。最近地面观测表明极高能银河宇宙线进入日球层的全空间分布强度并不均匀^[33~35]。通过银河宇宙线和异常宇宙线各向异性的就位观测,可有效揭示日球层可能的调制及作用大小,从而有助于开展宇宙线粒子数据反演理论和方法研究。

中性原子和尘埃的太阳引力聚焦。星际介质中的中性原子和宇宙尘埃可以不受太阳磁场的影响,进入到日球层空间,并在太阳引力的作用下在尾部发生聚集。通过对日球层尾部的探测,可以了解中性原子和尘埃的引力聚焦分布,考察其对太阳风动力学过程的影响。

3.1.2 冰巨星及其卫星系统、半人马族天体、柯伊伯带天体、矮行星等天体探测

冰巨星及其卫星系统的特性。海卫一的状态十分特殊:质量稍小于冥王星;绕海王星公转方向是逆行的,自转轴与黄道面夹角几乎平行;太阳系内具有火山现象的4个天体之一。通过近距离的飞掠探测和释放穿刺探测器,将有效增加人类对它的认知。

半人马族小行星。半人马族小行星是一类非常有趣的太阳系小天体,理论分析认为具有冰环和牧羊卫星。通过近距离观测,能够有效回答起源、物理性质、轨道特性、喷气成分及损失速度等问题。

柯伊伯带天体。柯伊伯带天体几乎是太阳系最早形成时所留下的遗迹,保留了太阳系最早的信息,有着非常巨大的研究价值。创神星(Quaoar)是最令人感兴趣的柯伊伯带天体之一,非常适合作为太阳系边际探测过程中“边走边探”的任务。一些关键科学问题包括:物理特性及三维形态、甲烷斑块的深度和覆盖率等,火山口的成像、岩浆柱的光谱分析等。

行星际尘云之谜。行星际尘云更能代表太阳星云的初始丰度和同位素特征,有助于揭示生命诞生的秘密和太阳系形成最初线索。早期的探测不能覆盖行星际尘云在整个内太阳系的核心区域,通过对其径向分布的连续观测,可以解释一些关键的科学问题,如:来源问题、产生机制、成分及分布、地外行星系统的异同等。

3.1.3 太阳系边际的结构和特性

终止激波特性. 依据现有理论, 超声速太阳风在通过终止激波后将变为亚声速, 而旅行者 2 号的实际观测表明: 终止激波的下游仍是超声速的, 等离子体温度比理论预期值低 10 倍以上^[36,37]. 通过对拾起离子的就位探测, 能够揭示终止激波的真实特性.

异常宇宙线的起源和加速机制之谜. 终止激波在很长一段时间内都被认为是异常宇宙线获得加速的源区. 然而, 旅行者号的观测显示: 异常宇宙线的强度在鞘区中还在不断增加^[38], 却在日球层顶之外突然消失, 表明鞘区可能是异常宇宙线的源区. 为确认异常宇宙线的产生机制和具体源区, 还需要进一步的就位观测.

3.1.4 河外背景光之谜

黄道尘云散射太阳光形成黄道光, 会严重干扰近日空间的河外背景光探测. 随着探测器逐渐远离太阳, 黄道光的强度会迅速衰减^[39~41]. 太阳系边际探测任务为观测河外星系背景光提供了非常好的良机, 对其强度、光谱以及空间特性的观测, 对于理解宇宙的起源和演化大有裨益.

3.2 到达 200 AU 左右, 进入邻近恒星际空间

3.2.1 邻近恒星际空间环境探测

星际介质. 利用一些遥测反演的方法, 已发现日球层边际的星际 H, He 和 O 的丰度分布并不重合^[42]; 不同环境下的 Ne/O 比也不相同^[43]. 迄今为止, 人类还没有对星际介质进行过就位探测, 其真实的特性 (如丰度、同位素比例、离化率、尘埃/气体比例、加热机制等) 还有待专门的探测任务来获得.

星际磁场. 目前, 对星际磁场的就位探测还相当缺乏, 旅行者号的磁场探测误差与观测量相当, 得到的一些探测结果还存在很大的不确定性^[44], 需要更高精度的就位探测以获得其方向、强度、变化特性以及湍动特征等.

星际风和星际尘云. 结合前期的一些卫星观测, 我们推断星际风方向会逐年变化^[45], 这也预示着星际环境的不断变化, 但其速度、方向以及变化特性还有待进一步的就位探测予以确定. 星际空间充满了星际尘云, 其成分、丰度、密度、温度等亟待就位观测来揭开其神秘面纱.

3.2.2 太阳风与星际介质相互作用规律

目前, 人们对于太阳风与地球磁层的相互作用较为了解, 有大量的观测和数值模拟研究予以阐述, 但对太阳风与星际介质的相互作用还知之甚少.

日球层尾区. 传统理论认为, 日球层的整体结构类似于地球磁层的水滴状. IBEX 的遥测结果也表明日球层尾部可以延伸至很长的空间^[46]. 然而旅行者号和卡西尼号的观测结果表明日球层可能更圆^[47]. 目前人类的探测器还从未到达过日球层尾区, 通过就位探测可确定日球层尾部构造, 并通过比较恒星学的方式了解太阳的演化阶段.

弓激波. 传统理论认为, 太阳风与星际介质相互作用会形成类似于地球磁层外的弓激波结构. 最近旅行者号的一些观测结果表明: 日球层外部的流动并非超声速的, 也许只有波动结构, 形成不了激波结构^[48]. 通过日球层 Nose 区的就位观测, 可以确认弓激波的存在性, 进一步了解日球层与星际介质的相关作用.

星际中性 H 原子对日球层结构的影响. 数值模拟研究表明, 星际介质的电离率对日球层结构有非常大的影响, 其位置随中性氢密度而变化^[49]. 更深入的就位观测有助于理解该过程.

中性原子墙. 传统理论认为, 在日球层顶外会堆积形成一个中性原子墙^[50, 51], 但目前对此还缺乏就位探测, 对其形成机制、厚度及空间分布、成分、密度及温度剖面、各向同性还是异性、太阳活动有无影响还知之甚少^[52].

3.3 到达 1000 AU 的太阳引力透镜焦点区域

奥尔特云. 从奥尔特云的概念提出以来, 一直停留在假说阶段, 没有得到观测认证. 迄今为止还没有人类的探测器抵达如此远的地方, 也没有足够强大的望远镜能直接观测到它的存在. 一些假说还有待证实: 奥尔特云的起源和结构; 长周期彗星的发源地; 地球上生物灭种与奥尔特云的关系等.

技术验证. 飞抵太阳引力透镜焦点区域开展包括广义相对论验证、太阳引力透镜效应观测等.

4 我国太阳系边际探测设想

探月工程和首次火星探测任务突破的深空探测器研制技术, 建成的深空测控网, 以及长征五号大推力运载火箭成功首飞, 标志着我国具备了实施太阳系边际探测的基本条件. 在国际首次实施专门的太阳系探测任务, 抵达太阳系边际开展综合性就位探测, 能够获取丰富的原创性科学成果, 推动我国深空探测从系内天体探测向恒星际空间探测的重大能力跨越.

4.1 太阳系边际探测总体目标

围绕太阳系及行星的起源与演化、太阳系边际及邻近星际空间特性、行星天体物理等空间科学重大问题, 以建立我国太阳系全域到达并具备恒星际空间探索能力为目标, 遵循由易到难、由近及远的发展规律, 有序开展太阳系边际探测, 争取重大科学发现和基本理论研究的突破. 具体阶段目标如图 5 所示 (背景图来源于 Keck Institute for Space Studies), 包括:

近期目标 (100 AU 左右). 2049 年前后, 实现日球层大尺度三维结构特性及邻近恒星际空间的物质特性探测, 认知太阳风暴在行星际空间的传播和演化; 探测外太阳系典型天体, 研究太阳系起源与演化.

远期目标 (挑战 1000 AU 级). 到 21 世纪末, 突破 1000 AU 飞行技术, 飞抵太阳引力透镜焦点区域附近, 开展引力透镜效应观测等探索工作.

此外, 突破万个天文单位飞行技术, 对 5~10 万 AU 的太阳系引力边际, 开展恒星际探测并取得重大科学发现, 是太阳系边际探测未来发展的愿景目标.

4.2 近期太阳系边际探测任务设想

基于现有科学认知程度、航天技术发展水平和国家经济能力, 瞄准我国 21 世纪中叶全面建成航天强国的战略目标, 重点围绕太阳系边际探测的近期目标, 开展探测任务设想, 提出了 3 次任务设想 (分别沿日球层的 3 个方向).

其中, 第 1 次和第 2 次任务在工程上同型设计、同期发射; 在科学上相互配合、互为补充, 构建双探测器组合、多目标探测模式, 从而实现科学成果最大化, 在有限经费条件下, 整体上提高探测任务的综合效能.

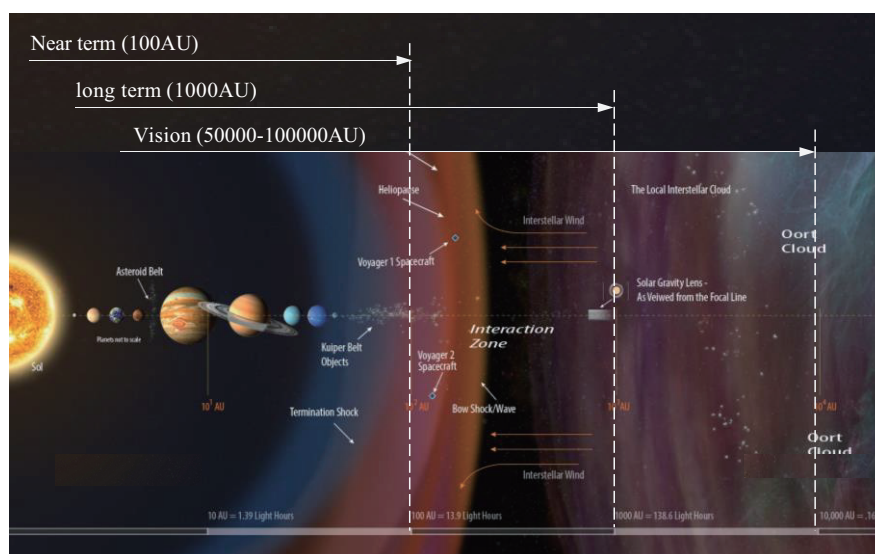


图 5 (网络版彩图)(网络版彩图) 太阳系边际探测阶段目标

Figure 5 (Color online) Phased goals of a mission of exploring the solar system boundary

第 1 次任务: 日球层鼻尖正向探测 (2024 年前后发射).

黄道面附近日球层鼻尖方向探测的目标天域为银河系中央方位, 即日球层探测典型区域. 飞往鼻尖方向的探测虽然与旅行者 1 号和 2 号的飞行区域一致, 但旅行者 1 号和 2 号的最初设计目标只是为探测木星和土星, 针对日球层和星际空间探测配置的科学载荷有限. 我国可对太阳系边际及其邻近恒星际空间开展更全面的综合性探测, 揭示太阳风和星际风的相互作用、异常宇宙线的产生机制等科学空白.

考虑到天体运动规律和相对位置, 可 2024 年前后实施本次探测, 在飞抵太阳系边际的途中, 边飞边探, 途中择机开展天王星、半人马族小天体等多目标探测, 提高探测任务的“性价比”.

该探测任务拟采用基于同位素能源的探测器系统. 按照推进方式和运载火箭选型的不同, 初步分析形成了以下两种探测器方案.

方案设想一: 探测器基于嫦娥三号探测器构型, 经适应性改进, 采用双模式化学推进系统, 采用 CZ-3B 运载火箭发射. 发射质量约 3300 kg, 其中干重约 910 kg; 双模式推进系统没有混合比的损失, 能够节省出数十公斤重量分配给干重, 提高任务整体效益.

方案设想二: 探测器配备离子电推进系统和太阳翼, 采用 CZ-5 运载火箭发射. 发射质量约为 800 kg; 离子电推进系统工作功率需适应 0.5~5 kW, 推力 20~200 mN, 比冲 2580~4000 s, 寿命 ≥ 20000 h. 探测器同时配备太阳翼, 在木星借力前使用太阳翼为电推进系统供电.

上述两种方案的探测器基本参数如表 2 所示, 主构型如图 6 所示, 二者除推进系统外, 其余部分的设计是基本一致.

第 2 次任务: 日球层鼻尖反向探测 (2024 年前后发射).

黄道面附近日球层鼻尖反方向探测的目标天域为背离银河系中央方位, 即飞往日球层尾部. 国际上仅先驱者 10 号朝鼻尖反方向飞行过, 但在飞到约 80 AU 后与地面无线电通信中断, 专门针对鼻尖反方向日球层尾部区域的探测还是国际空白. 我国开展的鼻尖反方向探测可首次对该区域开展探测, 预期会有更多新进展.

表 2 探测器基本参数
Table 2 Summary of the spacecraft parameters

Number	Item	Spacecraft with RTG		Spacecraft with 10 kW-level nuclear power
1	Flight direction	Nose and the opposite		Perpendicular to the Ecliptic
2	Life	≥ 30 years		≥ 35 years
3	Speed	≥ 4 AU/year		≥ 6 AU/year
4	Flight distance	≥ 100 AU		≥ 200 AU
5	Launch mass	≥ 3300 kg	≥ 800 kg	≥ 2800 kg
6	Launch C3	≥ 20 km ² /s ²	≥ 77 km ² /s ²	≥ 30 km ² /s ²
7	Propulsion system	Dual-mode chemical propulsion system	Monopropellant propulsion + electric propulsion	Monopropellant propulsion
8	Power system	Power output when arriving at solar system margin ≥ 200 W		Output of power system $\nless 10$ kWe, power output of electric propulsion system ≥ 1 kW. Propulsion system stops working 3 years after launch.
9	TT&C system	Uplink ≥ 20 bps@100 AU (35 m ground antenna) Downlink ≥ 160 bps@100 AU (66 m ground antenna)		Uplink ≥ 10 bps@200 AU (35 m ground antenna) Downlink ≥ 200 bps@200 AU (80 m ground antenna)
10	Payload	≥ 50 kg		≥ 100 kg

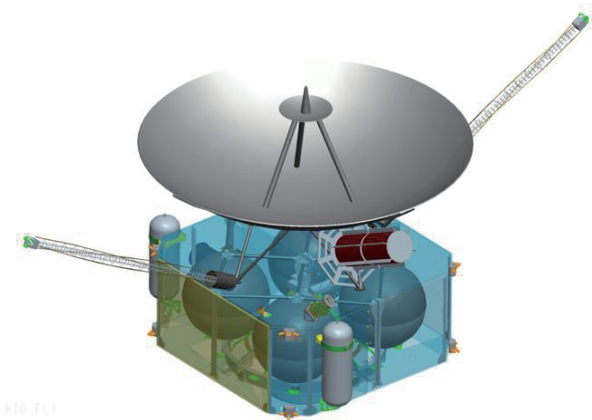


图 6 (网络版彩图) 基于同位素能源的探测器示意图
Figure 6 (Color online) Schematic diagram of the spacecraft based on RTG

第 3 次任务: 日球层极区探测 (2030 年前后发射).
在前两次任务基础上, 采用新型运载技术、电推进等技术, 基于核反应堆电源或新型同位素电源, 实现 6 AU/年以上的飞行速度. 待上述技术达到一定成熟度后, 实施此次任务, 实现日球层极区就位探测及恒星际物质特性探测, 开展宇宙线在日球层的全日球循环机理、日球层的外部宇宙物质作用机理等研究.

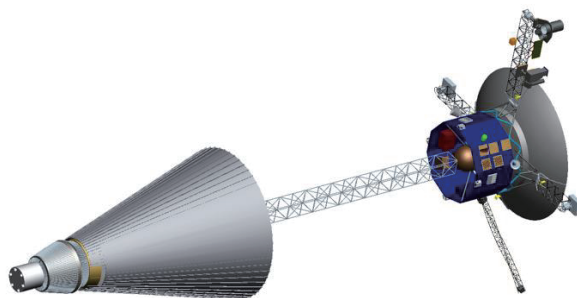


图 7 (网络版彩图) 核反应堆探测器主构型示意图

Figure 7 (Color online) Schematic diagram of the spacecraft based on nuclear reactor

其中, 基于 10 kWe 级核反应堆电源的探测器系统哑铃型构型如图 7 所示, 一端是核反应堆电源, 另一端是探测器, 两端通过可展开桁架结构连接。

5 关键技术

太阳系边际探测的开展依赖于航天技术的进步和国家综合实力的提高。相对于月球、火星、木星等系内天体探测, 太阳系边际探测将面临距离更遥远、飞行时间更长、数传速率更低、深空环境更复杂等一系列难题需要突破。

5.1 行星际轨道设计与优化技术

太阳系边际探测需要在较短时间内飞行至 100 AU 以远的距离、飞行时间长、飞行距离远, 深空中繁多而各异的目标天体、多源而复杂的力场环境、丰富的运动机理, 包括平动点应用、借力飞行等^[11], 赋予了行星际轨道设计与优化技术的新内涵。

在太阳系边际探测任务中, 轨道设计与科学目标的耦合性强, 需综合考虑科学目标的需求和轨道实现的难度, 通过迭代和优化, 在确保可达性的基础上, 尽可能提高任务的科学价值。需综合考虑多种行星借力序列及化学推进、电推进等不同推进方式, 通过复杂序列多目标探测任务轨道设计研究, 突破低能量转移、多动力模型轨道拼接、短周期的复杂序列多目标探测轨道优化设计技术^[53], 实现对木星、小行星、谷神星等多个目标、多个天体的借力飞行或抵近观测。

5.2 新型能源与推进技术

核能源具有不依赖太阳、能量自主产生、能量密度高、寿命长等优点, 是解决未来太阳系边际探测能源问题的一个基本途径。基于技术成熟度等方面考量, 当前应以 RTG 为应用研究重点, 兼顾探索核裂变反应堆电源的应用研究。

RTG 在 20 世纪经过多次飞行验证, 技术成熟度高、安全性好, 输出电功率为 5 We~1 kWe, 在轨工作寿命最长到达 41 年 (旅行者, 设计寿命 25 年)。按照 2024 年前后发射, 2049 年探测器抵达太阳系边际电功率需求 200 W, 后续需重点围绕同位素电源热电转化效率和年衰减率开展技术攻关, 并优化探测器功率需求, 降低 Pu-238 核源需求量。

空间核反应堆电源较之同位素电源, 优点是功率大、比功率高和价格便宜, 可极大提升探测器的推进、数传、科学探测方面的能力, 当前存在主要问题是成熟度低。拟采用热管快堆 + 温差发电的

技术途径,开展 10 kWe 级空间堆的研制工作,未来需重点突破总装集成、涉核地面试验和在轨飞行验证。

太阳帆推进、电帆推进等是未来先进推进技术的新领域,但由于材料与结构、展开与维持技术、结构姿态和轨道耦合技术等关键技术难度大,目前主要集中在理论建模和地面试验阶段,仅 2010 年日本“伊卡洛斯 (Ikaros)”太阳帆航天器成功发射。

5.3 超远距离深空测控通信技术

深空测控通信系统是天地信息交互的手段,也是探测器正常运行、充分发挥其应用效能、高效回传探测数据不可或缺的重要保证^[11]。

通过探月工程和首次火星探测任务,我国已基本建成了深空测控网,地面 66 m 和 35 m 深空站均已具备使用条件,星载深空应答机、高灵敏通信技术、高效编码等技术已基本突破。

针对太阳系边际探测 100 AU (150 亿公里) 以远的超远测控通信,需要分析采用 Ka 频段下行或 X/Ka 双频段下行、高效信道编译方式 (如 LDPC)、降低地面接收系统噪声等方法,突破大口径地面天线组阵、超远距离极弱信号捕获与跟踪、高灵敏度极底码率接收与解调、具有先验知识的数据信息智能提取及高效压缩编码等关键技术,实现超远距离测控通信系统星地相聚 100 AU 以远的低电平低码速率信号捕获灵敏度不小于 -157 dBm、双频高增益大天线增益不小于 46 dB (X 频段)/59 dB (Ka 频段),提升整体测控能力和水平,达到国际先进。

5.4 深空自主技术

太阳系边际探测距离远、探测目标远、任务周期长、所处环境动态多变、与地面通信存在较大时延,利用地面测控站进行探测器的遥测和遥控已经很难满足探测器操作控制的实时性和安全性要求^[6]。深空探测器自主技术即通过在探测器上构建一套空间范围广泛、精度高、自主性强、系统简单的智能自主管理系统,实现长时间无人参与情况下的自主安全运行,并根据飞行阶段和周期环境,自动开展工程任务与科学任务的调度规划、命令执行、器上状态监测与故障时的系统重构,提高自主控制能力、自主故障应对能力和自主科学任务操作能力,减少对深空测控网的依赖,保持长期稳定运行,提高科学回报。为了实现太阳系边际探测在轨自主运行和管理,必须突破自主任务规划、自主导航、自主控制、自主故障处理、自主修复、自主功能重组等关键技术^[11]。

5.5 高可靠长寿命技术

太阳系边际探测首次任务按 2024 年发射,2049 年抵达 100 AU,在轨运行超过 25 年,远远超过目前地球同步轨道卫星 15 年、遥感卫星 8 年的在轨使用寿命指标,我国尚无工作 25 年以上的长寿命卫星/探测器的工程研制经验。需要在新型高稳定性功能非金属材料研究、关键单机加固与地面摸底、系统级自主管理与故障诊断、面向超长寿命元器件筛选技术、超长任务周期寿命评估与保证研究等多个层次开展技术攻关,突破超长寿命探测器研制技术和在轨试验。

5.6 新型科学载荷技术

科学载荷是直接执行特定航天器任务的仪器设备,直接关系科学探测成果的获取和传输。太阳系边际探测的特点和探测目标的多样性对科学载荷的功能、精度、探测范围、高灵敏度、轻小型化等提出了新的要求。

根据探测对象的不同, 行星际探测的科学载荷一般可分为 3 大类: 粒子探测载荷 (等离子体、高能带电粒子、中性原子和尘埃粒子)、磁场探测载荷和光学载荷 (可见、紫外和红外). 粒子探测载荷和光学载荷在先驱者号、旅行者号和新视野号上均有配置^{[54][2]3)}, 磁场探测载荷在先驱者号、旅行者号上也都有配置.

国内相关载荷研制现状: 等离子体、高能带电粒子、磁场和光学载荷均有较好的研制基础, 具有在轨成功飞行经历; 中性原子探测载荷已经完成关键技术攻关和地面试验验证; 尘埃粒子探测载荷尚处于起步阶段.

太阳系边际探测不同于我国以往的空间探测项目, 其特殊性对载荷提出了更高的要求, 有 3 类关键技术需要进行攻关: 大动态范围探测技术、小型化和低功耗技术、数据处理和压缩技术.

在行星际穿越过程中载荷探测对象的特征参数分布在很宽的范围内 (如太阳风离子和拾起离子的通量最大约有 10^7 量级的差别), 这就要求载荷必须能够实现被测参数大动态范围的探测. 因此大动态范围探测技术是载荷的一项关键技术.

行星际探测项目对载荷的重量和功耗均有较大的限制, 这就要求载荷必须实现小型化和低功耗, 尽量节约能源. 因此在满足性能指标的前提下实现载荷的小型化和低功耗设计是载荷的另一项关键技术.

由于行星际探测时数传传输距离遥远, 科学数据下行带宽有限, 而一般科学探测载荷的数据量又比较大, 这就要求载荷探测的科学数据必须在轨进行最大限度的处理和压缩, 从而降低数据率. 因此数据处理和压缩技术是载荷的第 3 项关键技术.

6 结束语

对极暗、极寒、极远的太阳系边际开展探测和科学研究, 是国际航天与空间科学研究的前沿热点领域. 在科学上有效推动太阳系起源和演化、太阳系三维空间环境与动力学过程等方面的研究, 相关成果能够对空间等离子体物理、广义相对论等科学理论的完善与修正提供依据; 在工程上有效牵引空间核动力、超远距离深空测控通信、深空自主技术等尖端技术的跨越式发展, 有效构建我国太阳系全域到达能力, 并初步具备恒星系空间探索的能力.

受探测器飞行速度的制约, 抵达太阳系边际需要 25~30 年的时间, 考虑到天体间相对位置的不断变化对发射窗口的约束, 建议 2024 年前后实施首次任务发射, 实现中国探测器在 2049 年前后抵达 100 AU 太阳系边际开展科学探测.

实施过程中, 坚持“人类命运共同体”的发展理念, 积极推进太阳系边际探测国际大科学工程, 提升我国深空探测工程的国际影响力, 构建全球深空探索新格局, 为 21 世纪中叶全面建成航天强国提供有力支撑, 为建国一百周年献礼.

参考文献

- 1 Encrenaz T, Bibring J P, Blanc M, et al. The Solar System. 3rd ed. Berlin: Springer, 2004
- 2 Wang C, Belcher J W. Numerical investigation of hydrodynamic instabilities of the heliopause. J Geophys Res, 1998, 103: 247–256
- 3 Zank G P, Heerikhuisen J, Wood B E, et al. Heliospheric structure: the bow wave and the hydrogen wall. Astrophys J, 2013, 763: 20

2) https://en.wikipedia.org/wiki/Voyager_program#Scientific_instruments.

3) https://en.wikipedia.org/wiki/Pioneer_10#Scientific_instruments/.

- 4 Izmodenov V V, Kallenbach R. The Physics of the Heliospheric Boundaries. ISSI Scientific Report SR-005. 2015
- 5 Hall C F. Pioneer 10. *Science*, 1974, 183: 301–302
- 6 Smith E J, Davis L, Jones D E, et al. Jupiter's magnetic field, magnetosphere, and interaction with the solar wind - Pioneer 11. *Science*, 1975, 188: 451–455
- 7 Dyal P, Fimmel R O. Exploring beyond the planets — the Pioneer 10 and 11 missions. *J Brit Interpla Soc*, 1984, 37
- 8 Decker R B, Krimigis S M, Roelof E C, et al. Voyager 1 in the foreshock, termination shock, and heliosheath. *Science*, 2005, 309: 2020–2024
- 9 Stone E C, Cummings A C, McDonald F B, et al. Voyager 1 explores the termination shock region and the heliosheath beyond. *Science*, 2005, 309: 2017–2020
- 10 Burlaga L F, Ness N F, Acuña M H, et al. Observations of the heliosheath and solar wind near the termination shock by Voyager 2. *Astrophys J*, 2009, 692: 1125–1130
- 11 Wu W R, Yu D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies. *J Deep Space Explor*, 2014, 1: 5–17 [吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术. *深空探测学报*, 2014, 1: 5–17]
- 12 Wu W R, Wang Q, Ren B G, et al. Application of RHU/RTG in space missions. *Spacecraft Eng*, 2013, 22: 1–6 [吴伟仁, 王倩, 任宝国, 等. 放射性同位素热源/电源在航天任务中的应用. *航天器工程*, 2013, 22: 1–6]
- 13 Smith B A, Soderblom L A, Beebe R, et al. The Galilean satellites and Jupiter: Voyager 2 imaging science results. *Science*, 1979, 206: 927–950
- 14 Smith B A, Soderblom L, Batson R, et al. A new look at the Saturn system: the Voyager 2 images. *Science*, 1982, 215: 504–537
- 15 Smith B A, Soderblom L A, Beebe R, et al. Voyager 2 in the Uranian system: imaging science results. *Science*, 1986, 233: 43–64
- 16 Smith B A, Soderblom L A, Banfield D, et al. Voyager 2 at Neptune: imaging science results. *Science*, 1989, 246: 1422–1449
- 17 Fountain G H, Kusnierkiewicz D Y, Hersman C B, et al. The New Horizons spacecraft. *Space Sci Rev*, 2008, 140: 23–47
- 18 Stern S A, Bagenal F, Ennico K, et al. The Pluto system: initial results from its exploration by New Horizons. *Science*, 2015, 350: aad1815
- 19 Moore J M, McKinnon W B, Spencer J R, et al. The geology of Pluto and Charon through the eyes of New Horizons. *Science*, 2016, 351: 1284–1293
- 20 Sicardy B, Talbot J, Meza E, et al. Pluto's atmosphere from the 2015 June 29 ground-based stellar occultation at the time of the New Horizons flyby. *Astrophys J*, 2016, 819: L38
- 21 Schwadron N A, McComas D J. The interstellar boundary explorer (IBEX): half a year to Launch. *Space Sci Rev*, 2007, 176: 101–113
- 22 McComas D J, Allegrini F, Bochsler P, et al. Global observations of the interstellar interaction from the interstellar boundary explorer (IBEX). *Science*, 2009, 326: 959–962
- 23 McComas D J, Zirnstein E J, Bzowski M, et al. Seven years of imaging the global heliosphere with IBEX. *Astrophys J Suppl Ser*, 2017, 229: 41
- 24 National Aeronautics and Space Administration. Our Dynamic Space Environment: Heliophysics Science and Technology Roadmap for 2014-2033. 2014. https://explorers.larc.nasa.gov/HPSMEX/MO/pdf_files/2014_HelioRoadmap_Final.Reduced.0.pdf
- 25 Wang C, Richardson J D. Determination of the solar wind slowdown near solar maximum. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1058
- 26 Mewaldt R A, Liewer P C. An interstellar probe mission to the boundaries of the heliosphere and nearby interstellar space. In: *Proceedings of AIAA Space 2000 Conference and Exposition*, Long Beach, 2000
- 27 Liewer P C, Mewaldt R A, Ayon J A, et al. NASA's interstellar probe mission. In: *Proceedings of Space Technology and Applications International Forum (STAIF)-2000*, Albuquerque, 2000
- 28 Jr McNutt R L, Andrews G B, McAdams J, et al. A realistic interstellar explorer. In: *Proceedings of AIP Conference*, 2000. 504: 917
- 29 Jr McNutt R L, Gold R E, Krimigis T, et al. Innovative interstellar explorer. In: *Proceedings of the IGPP 5th Annual International Astrophysics Conference*, Oahu, 2006

- 30 Gruntman M, McNutt R L, Jr Gold R E, et al. Innovative interstellar explorer. In: Proceedings of the 55th International Astronautical Congress, Vancouver, 2004
- 31 Wimmer-Schweingruber R F, McNutt R, Schwadron N A, et al. Interstellar heliospheric probe/heliospheric boundary explorer mission-a mission to the outermost boundaries of the solar system. *Exp Astron*, 2009, 24: 9–46
- 32 Wang C, Richardson J D, Burlaga L. Propagation of the Bastille Day 2000 CME shock in the outer heliosphere. *Sol Phys*, 2001, 204: 413–423
- 33 Desiati P, Lazarian A. Anisotropy of tev cosmic rays and outer heliospheric boundaries. *Astrophys J*, 2013, 762: 44
- 34 Caballero-Lopez R A, Moraal H, McDonald F B. The modulation of galactic cosmic-ray electrons in the heliosheath. *Astrophys J*, 2010, 725: 121–127
- 35 Florinski V, Ferreira S E S, Pogorelov N V. Galactic cosmic rays in the outer heliosphere: theory and models. *Space Sci Rev*, 2013, 176: 147–163
- 36 Richardson J D, Kasper J C, Wang C, et al. Cool heliosheath plasma and deceleration of the upstream solar wind at the termination shock. *Nature*, 2008, 454: 63–66
- 37 Li H, Wang C, Richardson J D. Properties of the termination shock observed by Voyager 2. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L19107
- 38 Cummings A C, Stone E C, McDonald F B, et al. Anomalous cosmic rays in the heliosheath. In: Proceeding of AIP Conference, 2008. 1039: 343–348
- 39 Hanner M S, Weinberg J L, DeShields L M, et al. Zodiacal light and the asteroid belt: the view from pioneer 10. *J Geophys Res*, 1974, 79: 3671–3675
- 40 Hauser M G, Dwek E. The cosmic infrared background: measurements and implications. 2001. ArXiv: astro-ph/0105539
- 41 Primack J R, Gilmore R C, Somerville R S. Diffuse extragalactic background radiation. 2008. ArXiv: 0811.3230
- 42 Mobius E, Bochsler P, Bzowski M, et al. Direct observations of interstellar H, He, and O by the interstellar boundary explorer. *Science*, 2009, 326: 969–971
- 43 Bochsler P, Petersen L, Möbius E, et al. Estimation of the Neon/Oxygen abundance ratio at the heliospheric termination shock and in the local interstellar medium from IBEX observations. *Astrophys J Suppl Ser*, 2012, 198: 13
- 44 Burlaga L F, Ness N F. Observations of the interstellar magnetic field in the outer heliosheath: Voyager 1. *Astrophys J*, 2016, 829: 134
- 45 Frisch P C, Bzowski M, Livadiotis G, et al. Decades-long changes of the interstellar wind through our Solar system. *Science*, 2013, 341: 1080–1082
- 46 McComas D J, Daye M A, Funsten H O, et al. The heliotail revealed by the interstellar boundary explorer. *Astrophys J*, 2013, 771: 77
- 47 Dialynas K, Krimigis S M, Mitchell D G, et al. The bubble-like shape of the heliosphere observed by Voyager and Cassini. *Nat astron*, 2017, 1: 0115
- 48 McComas D J, Alexashov D, Bzowski M, et al. The heliosphere's interstellar interaction: no bow shock. *Science*, 2012, 336: 1291–1293
- 49 Izmodenov V V, Alexashov D B. A model for the tail region of the heliospheric interface. *Astron Lett*, 2003, 29: 58–63
- 50 Linsky J L, Wood B E. The alpha centauri line of sight: D/H ratio, physical properties of local interstellar gas, and measurement of heated hydrogen (The 'Hydrogen Wall') near the heliopause. *Astrophys J*, 1996, 463: 254–270
- 51 Gayley K G, Zank G P, Pauls H L, et al. One- versus two-shock heliosphere: constraining models with goddard high resolution spectrograph Ly α spectra toward α centauri. *Astrophys J*, 1997, 487: 259–270
- 52 Desai M I, Allegrini F A, Bzowski M, et al. Energetic neutral atoms measured by the interstellar boundary explorer (IBEX): evidence for multiple heliosheath populations. *Astrophys J*, 2014, 780: 98
- 53 Cui P Y, Qiao D, Cui G T. Orbit Design and Optimization for Deep Space Exploration. Beijing: Science Press, 2013 [崔平远, 乔栋, 崔洁涛. 深空探测轨道设计与优化. 北京: 科学出版社, 2013]
- 54 Ji J H, Jiang Y, Wang S. New Horizons spacecraft successful flew by Pluto and its moons. *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 2349–2354 [季江徽, 蒋云, 王素. “新视野”号成功飞掠冥王星及其卫星系统. 科学通报, 2015, 60: 2349–2354]

Exploring the solar system boundary

Weiren WU¹, Dengyun YU², Jiangchuan HUANG³, Qiugang ZONG⁴, Chi WANG⁵, Guobin YU¹, Rongwei HE³, Qian WANG¹, Yan KANG^{1,3*}, Linzhi MENG⁶, Ke WU⁶, Jiansen HE⁴ & Hui LI⁵

1. *Lunar Exploration and Aerospace Engineering Center, State Administration of Science. Technology and Industry for National Defense, Beijing 100190, China;*

2. *China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;*

3. *China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;*

4. *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;*

5. *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

6. *Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China*

* Corresponding author. E-mail: kangyan416@163.com

Abstract This paper reviews the worldwide development course and current status of heliospheric boundary exploration. On the basis of the development trends revealed recently, we illustrate the four categories of scientific objectives of the solar system boundary exploration and propose some formulations for the overall objectives, phased goals, and short-term missions of China's explorations of the solar system boundary in the future. Additionally, we summarize six types of key techniques that may help make breakthroughs in the field. This study provides preliminary results for further demonstration and implementation of such a mission.

Keywords Solar system boundary, heliosphere, interstellar space, spacecraft, solar wind, interstellar medium, development roadmap



Weiren WU is a member of the Chinese Academy of Engineering and the International Academy of Astronautics, and the chief designer of the Chinese Lunar Exploration Project. His research interests include telemetry track and command(TT&C) and deep space exploration engineering system design.



Jiangchuan HUANG participated in the first generation of applied satellite research and development in the China Academy of Space Technology. His research interests include guidance navigation and control(GNC) and deep space probe system design.



Qiugang ZONG is a professor of space physics, Peking University. He received his Ph.D. in 1999 (Germany). He has been awarded the 2018 Vikram Sarabhai Gold Medal by the International Committee on Space Research. His research interests include space physics and solar system exploration.



Chi WANG received his Ph.D. degree in physics from the Massachusetts Institute of Technology, USA, in 1998. Currently, he is a senior researcher at the National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences. His research interests include the data analysis and numerical simulation of (1) heliospheric solar wind structures, (2) propagation and evolution of interplanetary disturbances, and (3) interaction of solar wind with the Earth's magnetosphere.