

开启星际探测新征程

王赤

中国科学院国家空间科学中心,北京 100190

摘要 介绍了太阳系边界3种定义(即以行星轨道为界、日球层顶为界和太阳引力范围为界)的内涵,阐述了行星际空间和星际空间的区别,探讨了太阳系边际探测的科学目标和关键科学问题,其中包括4个探测任务,即无人区探索、日球层全貌、大行星掠影及太阳系考古。

关键词 太阳系边界;星际空间;深空探测

2018年12月,美国国家航空航天局(NASA)正式宣布1977年8月发射的旅行者2号飞船^[1]在119 AU(AU为天文单位,1 AU为日地平均距离,即 1.5×10^8 km)处飞越日球层顶,进入星际空间。在人类探索浩瀚宇宙的征程中,这是人造航天器第2次进入星际空间,而历史的创造者正是旅行者2号的“孪生兄弟”——旅行者1号,它已于2012年8月率先进入星际空间,树立了人类航天史新的里程碑,由此开启了星际探测的新篇章。图1^[1]显示了旅行者1号和旅

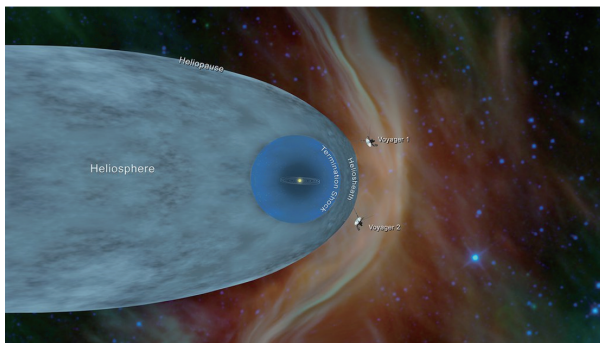


图1 旅行者1和2号进入星际空间示意

行者2号在日球层顶之外的大致位置,远远超过冥王星的轨道(冥王星轨道最远为49 AU)。

进入新世纪,中国的深空探测取得了一系列令人瞩目的成就。2020年12月,嫦娥五号返回器携带月球样品安全着陆,标志着中国探月工程“绕、落、回”规划如期完成。2020年7月,天问一号成功发射,开启了中国行星探测的新纪元。星空浩瀚无比,探索永无止境,接下来中国还要勇闯太阳系边际探测的“无人区”。2020年12月25日,中国国家航天局召开了太阳系边际探测工程立项综合论证启动会,拟在新中国成立100周年之际(2049年),实现让中国的航天器飞抵80~100 AU的深空,对极远、极暗、极寒的未知区域开展科学探测,从而将在人类认识宇宙的历史树立新的丰碑。

那太阳系的边界在什么地方?什么是太阳系边际?行星际空间和星际空间的区别是什么?为什么要探索太阳系边际?本文将揭开这些问题的答案。

收稿日期:2021-02-23;修回日期:2021-04-27

作者简介:王赤,院士,研究方向为空间物理与空间天气,电子信箱:cw@spaceweather.ac.cn

引用格式:王赤. 开启星际探测新征程[J]. 科技导报, 2021, 39(11): 16-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.11.002

1 太阳系边界

太阳系包括太阳、8大行星、近500个卫星和至少120万个小行星,还有矮行星、彗星以及行星际介质等(图2)^[2]。太阳作为一颗恒星,其质量大约占整个太阳系的99.86%,处于绝对的中心位置,包括8大行星在内的其他所有天体都围绕它旋转。



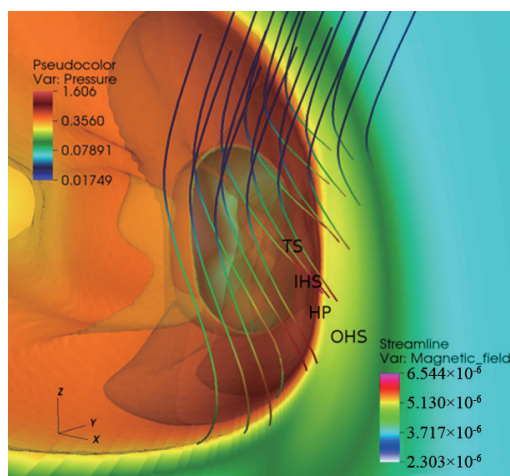
图2 太阳系示意

太阳系的边界在哪里?这个问题的答案不唯一,完全取决于选择的定义方式。比较常见的定义方式有以下3种。

第1种定义是以行星轨道为界。按照这种定义,人类眼中的太阳系边界是随着认知水平而变化的。自17世纪哥白尼提出日心说,人们逐渐意识到行星围绕太阳转,地球不过是其中很普通的一颗行星。在很长一段时间内,土星是人们能观测到的最远的行星(约为9.6 AU),也代表着太阳系的边界。18世纪,天文学家赫歇尔发现了太阳系的第7大行星天王星(~19.2 AU),将太阳系的范围扩大了1倍。随后,海王星、冥王星先后被发现,太阳系边界延伸到了冥王星的轨道处。2006年,国际天文学联合会根据新的“行星”定义,将冥王星“踢出”行星家族。目前为止,海王星是距离太阳最远的行星,它运行在距离太阳30 AU的轨道上。然而,充满好奇心和探索精神的科学家不满足于太阳系只有8大行星,还在不断寻找太阳系的第9大行星。2016年,美国科学家根据柯伊伯带6颗天体运行轨道的异常,推测出太阳系可能存在第9大行星。如果这一推测能得到后续观测的证实,太阳系的边界

将再次予以改变。

第2种定义是以日球层顶为界。2013年秋季,世界各大媒体争相发布重大新闻:“旅行者1号飞出了太阳系。”这里太阳系的含义指的是日球层顶以内的空间。日球层简言之是太阳风影响占主导的空间。太阳外层大气的温度高达百万摄氏度,所有的气体均已电离成可自由运动的带电粒子(即等离子体)。由于受到高温产生的压力梯度的作用,这些等离子体能够摆脱太阳引力而不断向外膨胀,形成太阳风。太阳风速度很快,是超声速流动,在地球轨道附近平均速度高达450 km/s。恒星之间并非空无一物,而是充满了低温的星际介质。当太阳风与星际介质相遇时,会将其向外推开,自身也逐渐减速,其结果就是太阳风向外吹出一个巨大的“气泡”,这个“气泡”就是太阳风发生作用的最大范围,也就是日球层(日球空间)。太阳风减速的不同阶段形成了清晰的日球层边界结构。首先,太阳风通过终止激波从超声速变成亚声速,从而形成终止激波;其次,太阳风和星际介质“两军对垒”进一步减速,形成日球层顶。图3是日球层的数值模拟结果,从太阳往外看,由里到外的两个间断依次为终止激波(termination shock, TS)和日球层顶(heliopause, HP),其间为内日球层鞘区(inner heliosheath, IHS)。外面是否存在日球弓激波还是一



TS:终止激波;IHS:内日球层鞘区;HP:日球层顶;
OHS:外日球层鞘区

图3 星际磁场包络的外日球层模拟结构
(日球层弓激波未显示;太阳在图中心)

个谜,这主要取决于介质的性质。终止激波类似于一个球壳,其位置距离太阳约在 80 AU 处。日球层顶的三维形状还未知,而其在太阳系运动方向上的位置距离太阳的日球层顶约在 120 AU 处。因为太阳风是动态变化的,因而日球层的边界也是动态变化的,其变化幅度据估计达 10 AU^[3]。

美国科学家在《天体物理学报》发表的论文中提出了太阳系边际的概念(edge of the solar system)^[4]。如果定义太阳系尺度为太阳风所到达的区域即日球层,那么终止激波以远的包括内日球层鞘区、日球层顶、外日球层鞘区等在内的太阳系边缘区域就属于太阳系边际。

第 3 种定义是以太阳引力范围为界。更多的天文学家根据太阳的万有引力来定义太阳系边界,即如果一个天体主要受到太阳引力作用而围绕太阳运动,那么它就属于太阳系天体。按照这个标准,太阳系 8 大行星、日球层以及遥远的小行星与彗星都在太阳系范围之内。科学家推测距离太阳 5 万~10 万 AU 处可能存在一个长周期彗星的“大仓库”——奥尔特云(图 4)^[5],它在外围包裹着太阳系。根据万有引力定律,可把受太阳引力束缚的天体作日心圆周运动的最远边缘定义为太阳系边界。如果奥尔特云真实存在,它的外边缘无疑就是太阳系的边界了。

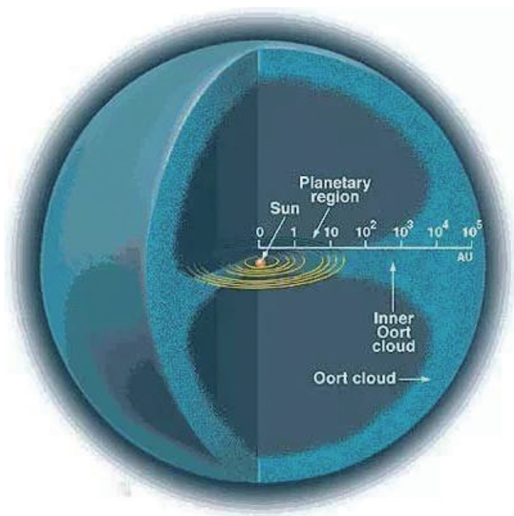


图 4 奥尔特云示意

2 行星际空间和星际空间

顾名思义,行星际空间就是太阳系行星之间的空间,这个空间并非完全的真空,到处都充满着太阳风粒子和行星际磁场、宇宙线(包括电离的原子核和各种次原子粒子)以及宇宙尘埃、小流星体等。太阳表面不断向外喷发着高速太阳风,太阳风裹挟着太阳的磁场吹向地球时,会对地球的内禀磁场产生作用,仿佛要把地球磁场从地球上吹走似的。尽管如此,地球磁场仍有效地阻止了太阳风长驱直入。在地球磁场的反抗下,太阳风最终只能绕过地球磁场,继续向前运动,从而形成了一个被太阳风包围的、彗星状的地球磁场区域,这就是磁层。在日地连线向阳的一侧,磁层顶距地心约为 10 个地球半径。当太阳风压增强时,磁层顶会被压缩为 6~7 个地球半径。在日地连线背阳的一侧,磁层形成一个圆柱状的长尾,即磁尾,圆柱半径约等于 20 个地球半径,其长度至少等于几百个地球半径。如果遥远看去,磁层好像彗星一样。在磁层顶外还存在磁鞘和弓激波(图 5)。磁层顶是地球空间和行星际空间的分界面,磁层顶以内属于地球空间,物质主要源于地球,是地球大气的一部分。离开地球磁层顶就进入到了行星际空间,其物质主要来源于太阳风和宇宙。

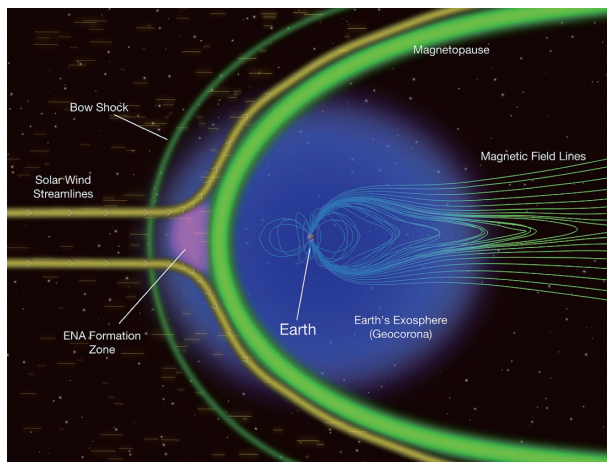


图 5 地球空间和行星际空间示意(图片来源:NASA)

与之类似,星际空间指的是恒星与恒星之间的空间。星际空间并非绝对的真空,同样存在着中性

粒子、带电粒子(等离子体)、宇宙尘埃和磁场、电场。星际空间的物质更加稀薄,平均而言,每立方厘米的星际空间仅有0.1~1个原子。星际空间极其广袤,人类至今也仅知道其中非常小的一部分,甚至谈不上九牛一毛。日球层顶以内的日球空间,物质主要来源于太阳,日球层顶外的物质主要来源于宇宙(星际介质),因而日球层顶是日球空间和星际空间的分界面,穿越日球层顶就进入到了星际空间。NASA的旅行者1号已确认于2012年8月飞出日球空间,正式进入到了星际空间。

3 探索星际空间新征程

自1957年人类开启空间探测新纪元以来,大量航天器进入空间轨道,极大地拓展了人类对空间的认知。绝大多数卫星计划都是集中于几个AU以内的内日球层探测,只有少数飞船计划(如1977年发射的旅行者1、2号)完成其行星探索任务之后,踏上了星际探索的征程。2006年1月,新视野号(New Horizons)发射升空,旨在对冥王星、冥卫一等柯伊伯带天体进行探测,预计将于2038年飞临日球层边缘。然而这些计划都不是专门针对太阳边际开展探测的计划,其轨道设计、载荷配置都有很大的局限性。旅行者1号的运行方向是 34°N ,而旅行者2号运行方向是 26°S ,没有穿越太阳风与星际介质相互作用最显著的区域,即没有迎着星际风方向的日球层鼻尖区。顺着星际风方向的日球层尾至今仍是探测的空白地带。在科学探测方面,缺乏太阳系边际和星际空间的关键空间环境参数的探测,如太阳风拾起粒子、太阳系边际的低强度磁场、宇宙尘埃和星际中性成分等。

继1970年成功发射“东方红一号”卫星之后,中国在月球与深空探测方面取得了重大进展。探月工程2020年完成了“绕、落、回”三步走的目标,“天问一号”作为中国第1个行星探测任务,标志着中国航天器脱离地球空间,进入到行星际空间。2020年12月17日,中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在祝贺嫦娥五号任务取得圆满成功的贺电中指出“人类探索太空的步伐永无止

境”,并提出更高的要求:“希望你们大力弘扬追逐梦想、勇于探索、协同攻坚、合作共赢的探月精神,一步一个脚印开启星际探测新征程。”站在历史新的起点,中国正在论证太阳风边际探测工程^[6],中国航天器将从日球层鼻尖和尾部两个方向冲出行星际空间(图6),勇闯“无人区”,迈向星际空间,这将是成为中国成为航天强国的标志性工程之一。

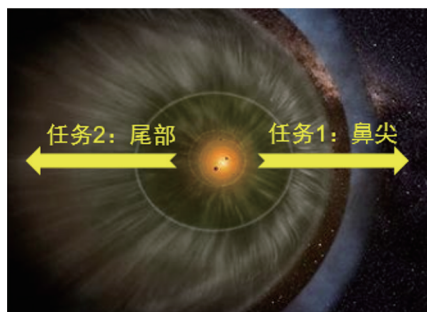


图6 中国太阳系边际探测任务示意

为何要发射航天器去太阳系边际?人类对太阳系的认识还存在许多不解之谜,距离太阳80~150 AU的太阳系边际是极其遥远、极其寒冷、极其黑暗、神秘未知的地方,同时对太阳系内的天体也留着很多探测空白。太阳系边际探测有4个方面的探测任务。一是“无人区探索”。日球层鼻尖方向和尾部都是人类航天器从未涉足的区域,人类对地球家园的深空环境还知之甚少。太阳风和星际介质“两军对垒”形成的日球层顶,是保护人类地球家园及太阳系其他成员免遭银河宇宙射线潜在危害的第一道“防线”,这道防线的物理特征还有待探查。进入星际空间后,人类航天器将首次同步开展星际介质的场和粒子观测,精确获取邻近星际介质的特性和分布特征。二是“日球层全貌”。太阳风在日球层的传播和演化、太阳风和星际风的相互作用、异常宇宙线的产生机制等众多科学问题还没有统一认识。日球层三维大尺度结构是“泡状”还是“水滴形”、边际是如何运动和动态演化以及日球弓激波是否真实存在等系列问题都有待人们去解密。三是“大行星掠影”。无论是前往日球层的鼻尖区探测,还是到日球层尾部开展探索,都需要借助太阳系大行星的引力“弹弓效应”,如木星、土星或海王星等。因此,可以“边走边看”,探访太阳系内的

大行星,通过近距离的就位和遥感观测,了解其全貌,深入理解太阳风与行星系统的相互作用。此外,太阳系是否存在“第9大行星”的难题也有望取得突破。四是“太阳系考古”。行星际尘云更能代表太阳星云的初始丰度和同位素特征,提供生命诞生的秘密和太阳系形成的最初线索。半人马小行星、矮行星等柯伊伯带小天体一般认为由太阳系形成初期非常原始的物质组成。木星、冰巨星保留了太阳系形成初期的气体,包含了原恒星云的状态条件和行星形成的位置信息。太阳系边际探测任务可以实现对太阳系天体和行星际尘云的全谱探测,将为人类徐徐展开一幅太阳系形成和演化的画卷。

当然,实现太阳系边际探测也绝非易事,超远距离、多探测目标、极端恶劣环境对航天技术提出了非常高的要求。为了实现上述4个方面的科学探测任务,需要突破六大关键技术,包括行星际轨道设计与优化技术、新型能源与推进技术、超远距离深空测控通信技术、深空自控、高可靠长寿命技术及新型科学载荷技术等^[6]。探测太阳系边际将构建中国航天器在太阳系全域的到达能力,使中国初步具备星际空间探索能力,将大幅带动中国科技水平与创新能力的提升。

4 结论

人类从来就没有停止过探索的步伐。继陆、

海、空、天之后,深空日益成为探索宇宙奥秘、和平利用太空的“第五疆域”。开启星际探测新征程,勇闯极远、极暗、极寒的未知区域,将为人类认识太阳系和宇宙打开一扇新窗口。作为空间科学研究的前沿领域,太阳系边际探测也逐渐成为国际空间探测的热点。中国发起的太阳系边际探测工程,不仅是建设航天强国的标志性工程之一,也是中国对构建太阳系知识体系的重要贡献。

参考文献 (References)

- [1] NASA/JPL-Caltech. NASA's Voyager 2 probe enters interstellar space[EB/OL]. (2018-12-10) [2020-02-10]. <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7301>.
- [2] 太阳系[EB/OL]. [2021-02-22]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E7%B3%BB/173281>.
- [3] Wang C, Belcher J W. The heliospheric boundary response to large scale solar wind fluctuations: A gasdynamic model with pickup ions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, 104(A1): 549-556.
- [4] Opher M, Liewer P C, Gombosi T I, et al. Probing the edge of the solar system: Formation of an unstable jet-sheet[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2003, 591: 61-65.
- [5] Williams M. What is the Oort Cloud?[EB/OL]. [2015-8-10]. <https://www.universetoday.com/32522/oort-cloud/>.
- [6] 吴伟仁, 于登云, 黄江川. 太阳系边际探测研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(1): 1-16.

To start a new journey of interstellar exploration

WANG Chi

National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract This paper summarizes three definitions of the solar system boundary, i.e., planetary orbit boundary, heliospheric boundary and solar gravitational boundary, presents the difference between interplanetary space and interstellar space, and discusses the scientific objectives and key scientific problems of the solar system boundary exploration, which includes four missions, namely, exploration of no man's land, panoramic view of the heliosphere, sweeping of major planets, and archaeology of the solar system.

Keywords solar system boundary; interstellar space; deep-space exploration ●



(责任编辑 王丽娜)