

太阳系边际探测项目的科学问题

王赤^{1,2}, 李晖^{1,2}, 郭孝城^{1,2}, 徐欣峰³

(1. 中国科学院 国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 中国科学院 国家空间科学中心 月球与深空探测总体部, 北京 100190)

摘要: 太阳系边际是保护人类家园的太阳系最外层的篱笆。尽管在1977已发射的“旅行者1号”(Voyager 1)和“旅行者2号”(Voyager 2)近年来已陆续抵达太阳系边际,但由于所携带载荷性能的限制,仍然留下一些悬而未决的重大科学问题。因此,太阳系边际乃至更远的星际空间还有待更有效的就位探测,一个专门的太阳系边际探测计划蕴含着巨大的科学价值。介绍了太阳系边际的定义和主要探测要素,总结了国内外太阳系边际探测的现状,包括已实施和正在论证的太阳系边际探测任务的科学目标、科学载荷配置,梳理了未来太阳系边际探测过程中关于日球物理、星际空间物理和太阳系演化方面的一些重大科学问题,并对我国未来太阳系边际自主探测任务科学目标的制定进行了展望。

关键词: 太阳系边界; 日球层; 星际空间; 太阳系演化

中图分类号: P353.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)06-0517-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200058

引用格式: 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, 535.

Reference format: 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, 535.

引言

太阳外层大气的温度高达 10^6 °C,所有的气体均已电离成为可自由运动的带电粒子。由于受到高温产生的压力梯度的作用,这些带电粒子能够摆脱太阳的引力而不断向外膨胀,形成太阳风。在地球轨道附近,太阳风的典型参数约为速度约450 km/s、数密度 $7/\text{cm}^3$ 、磁场强度7 nT^[1]。理论预言,太阳风可以影响到距太阳80~150 AU(太阳到地球的平均距离,约1.5亿km)的空间区域^[2]。太阳风控制的区域称为日球层,本文讨论的太阳系边际指的就是日球层边缘,一般包括日球层顶、日球层鞘和终止激波。太阳风与星际介质间的压力平衡结构被称为日球层顶,构成太阳风和星际等离子体的交界面。超声速的太阳风在接近日球层顶时开始减速,并在其内侧形成一个终止激波。日球层顶与终止激波之间的区域被称为日球层鞘^[3]。

自卫星时代以来,人类就孜孜不倦地开始了日球层探索的漫长之旅。借助美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射的一些飞船计划,人类也取得了一系列令人振奋的是

“旅行者1号”(Voyager 1)和“旅行者2号”(Voyager 2)飞船相继穿过太阳系边际进入星际空间,以及星际边界探测器(Interstellar Boundary Explorer, IBEX)和“卡西尼号”(Cassini)飞船对日球层边缘能量中性原子的成像观测,对太阳系边际乃至星际空间的探索研究正逐渐成为国际空间物理研究的前沿热点,受到高度关注。

1 国内外研究进展

自1957年人类进入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范围。尽管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,少数飞船计划还是在完成其设计任务之后,踏上了星际探索的征程。

“先驱者10号”(Pioneer 10)和“先驱者11号”(Pioneer 11)是美国开展的第一次日球层空间探测任务,分别于1972年3月和1973年4月发射升空,其设计任务是飞临主带小行星、木星和土星。实现了对木星、土星等天体的首次飞越探测之后^[4-5]，“先驱者10号”和“先驱者11号”分别于2003年1月(约80 AU)

收稿日期: 2020-08-18 修回日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41731070); 中国科学院专项资助项目(XDA15052500, QYZDJ-SSW-JSC028); 民用航天预先研究资助项目(D020301, D030202); 国家重点实验室专项资助项目

和1995年9月(约43 AU)与地面无线电通信中断。

“旅行者1号”和“旅行者2号”分别于1977年9月和1977年8月发射升空,其设计任务也是飞临太阳系的行星系统。现在他们已经穿过太阳系边际进入临近星际空间^[6-10],在位于147.5 AU和122.3 AU之遥的星际空间开始探测。“旅行者号”不仅完成了对外太阳系行星(木星、土星、天王星、海王星及其卫星等)的探测,而且为宇宙射线、太阳风与恒星际物质相互作用的研究提供了第一手就位观测数据。由于“旅行者1号”和“旅行者2号”缺乏对太阳风拾起粒子、太阳系边际的低强度磁场、宇宙尘埃和星际中性成分的探测手段,再加上因电力供应不足而关闭了一些探测设备,无法获得太阳系边际和星际空间的一些重要物理参量。

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。目前,“新视野号”现在距离太阳约45.9 AU,正以每年3.5 AU的速度飞向冥王星,预计将于2038年飞临日球层边缘。“新视野号”搭载了7种科学仪器:可见光和红外成像/光谱仪、紫外成像光谱仪、远程勘测成像仪、太阳风和等离子体光谱仪、高能粒子谱仪、尘埃计数器和无线电科学设备^[11]。由于携带的大多都是一些成像设备,并且缺少磁场探测手段,“新视野号”不适合专门的太阳系边际和星际空间环境探测。

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,NASA发射了星际边界探测器IBEX,利用搭载的两台高能中性原子成像仪,IBEX-Hi和IBEX-Lo探测来自太阳系边际的高能中性原子以及星际中性原子,从而绘制太阳系边际的完整影像^[12-13]。同样地,由于轨道设计以及有效载荷配置的限制,IBEX无法对外日球层和星际空间进行综合性就位探测。

当然,经过星际任务扩展的飞船计划存在自身的局限性。迫切需要一个专门设计的外日球层和恒星际飞船计划,从而对太阳系边际和星际空间环境有一个更加全面和正确的认识。美国发布的《2014—2033年日球物理路线图》把太阳系边际探测作为高优先任务之一^[14]。NASA、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)也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。2009年,Wimmer-Schweingruber等提出了一个联合了17个国家的国际合作项目——星际日球层顶探针/日球层边界探索计划(Interstellar Heliopause Probe/Heliospheric Boundary Explorer, IHP/HEX)^[15],计划利用太阳帆连同引力辅助推进技术,使得卫星在25年内到达日球层边缘。2019年,McNutt等进一步深化了星际探针(Interstellar Probe)的卫星概念,并提出了近期的实施步骤和技术要求^[16]。

我国月球和深空探测工程顺利实施以来,相关部门也开展了研究工作。2015年,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(第三批)启动了“星际快车(Interstellar Express)——‘神梭’探测计划初步方案研究”;中国国家航天局也启动了太阳系边际探测计划的前期预先研究项目。2017年,中国工程院在咨询研究项目中支持了相关课题研究。2019年,民用航天“十三五”技术预先研究第三批项目也支持了“外日球层空间探测系统关键技术研究”。

我国科学家们也借助各种平台,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,并围绕科学目标论证与有效载荷研制等方面积极开展国际合作。2018年10月,以“太阳系边际探测的前沿关键问题”为主题的第639次香山科学会议学术讨论会在北京成功召开。2019年11月,以“外日球层和临近星际空间探测”为主题的ISSI-BJ国际论坛在北京成功召开。

总的来说,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。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^[17]。

2 前沿科学问题

尽管现有的飞船计划极大地拓展了人类对太阳系天体、外日球层、太阳系边际的认识,仍有一些科学谜团和奥秘有待解开。

2.1 日球层动力学和结构特性

1) 太阳风在日球空间的减速与加热

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。“旅行者号”的观测数据证实太阳风在外日球空间传播过程中会不断的减速,并且其温度的衰减要慢于绝热过程的温度变化,观测结果如图1所示,暗示其中发生着加热过程。目前,阿尔芬湍动的非线性串级过程以及太阳风对中性粒子的拾起过程被认为是引起加热的主要原因。通过对拾起离子的径向分布和效应的深入观测和研究,对理解太阳风的动力学演化非常重要。

2) 异常宇宙线的起源和加速机制

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1号”和“旅行者2号”的观测并没有找到类似的证据。观测显示,异常宇宙线的强度在鞘区中还不断增加,如图2所示。当“旅行者1号”穿越日球层顶以后,异常宇宙线则突然消失,这表明鞘区是异常宇宙的源区。数值模拟虽然对于理解异常宇宙线的产生机制有所助益,但具体情况仍期待观测证实。为确认异常宇宙线的产生机制和具

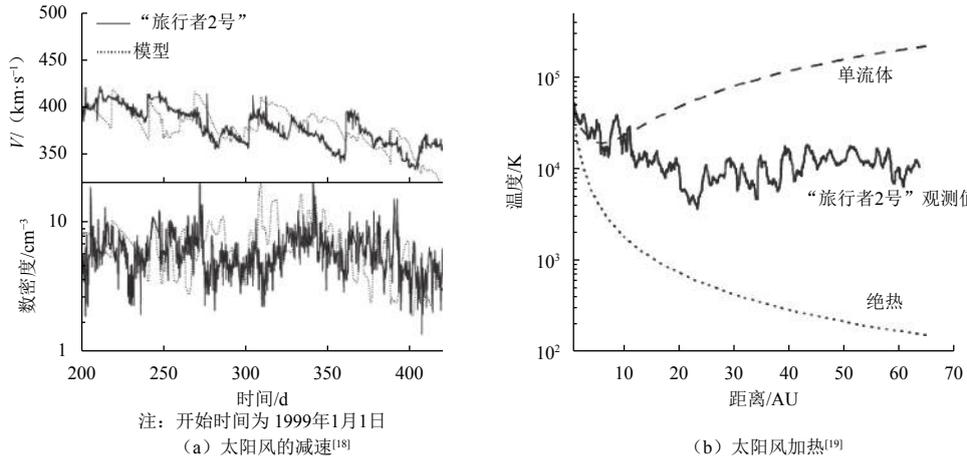


图 1 “旅行者2号”太阳风观测结果
Fig. 1 Solar wind observations of Voyager 2

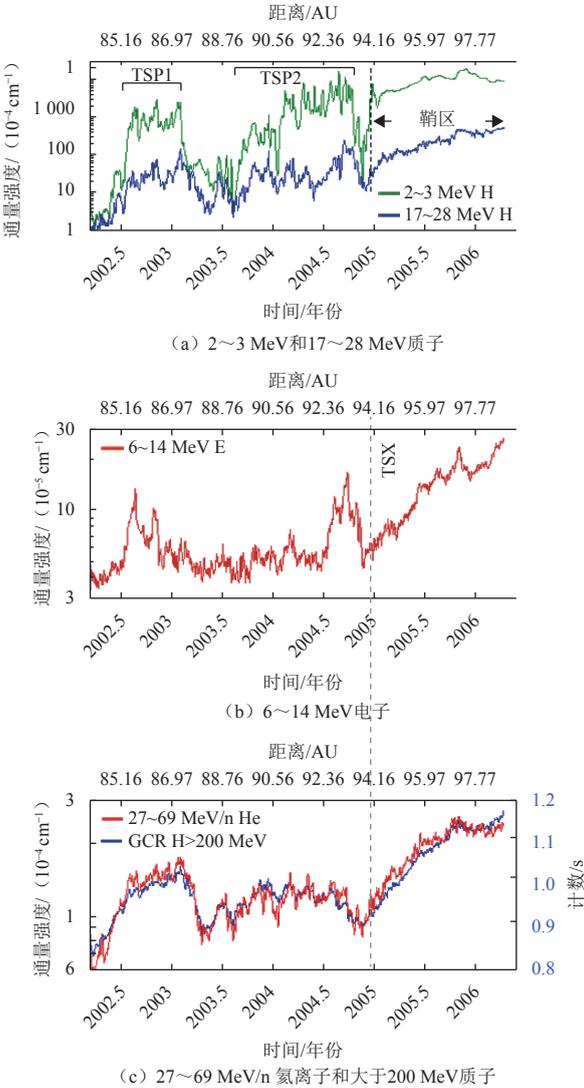


图 2 “旅行者1号”在鞘区观测到异常宇宙线^[20]

Fig. 2 The gradual increase of anomalous cosmic rays observed by Voyager 1 in the heliosheath^[20]

体源区，还需要进一步的就位观测。

3) 终止激波特性

2007年8月，“旅行者2号”在距离太阳约84 AU处对终止激波进行了就位直接观测。通过对探测数据的详细分析发现：①一般而言，激波会将超声速的流体变为亚声速，而终止激波的下游仍是超声速的；②穿越终止激波后，80%~90%的上游能量转化成拾起离子（Pickup ions）的能量并且没有被“旅行者2号”探测到，下游等离子体温度不及理论预期值的1/10，如图3

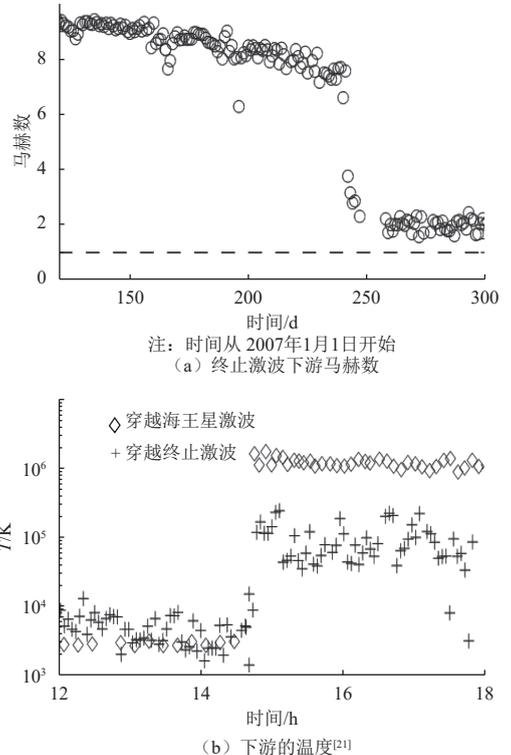


图 3 “旅行者2号”终止激波特性

Fig. 3 The characteristic of Voyager 2 termination shock

所示。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。

4) 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^[22]，然而“旅行者号”和“卡西尼号”的观测结果（如图4所示）表明日球层可能更圆^[23]。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。

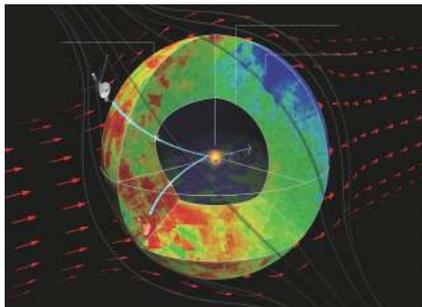
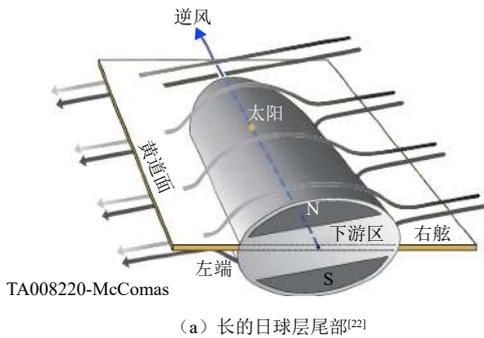


图4 日球层整体结构
Fig. 4 The whole structure of heliosphere

5) 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是超声速的，所以推测也许只有波动结构，形成不了激波结构^[24]，日球层外可能的结构如图5所示。通过日球层鼻尖（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。

6) 日球层边界的动态变化与不稳定性

随着外日球层数值模式的逐步完善，外日球层间断面结构的预测和分析取得了重要进展。日球层边缘距离太阳约为80~150 AU，受太阳风动压的调制^[2]，其中日球层顶和终止激波对长周期（11 a）和短周期（180 d）的太阳风动压变化均存在明显响应^[25]，如

图6所示。此外，学者也逐渐认识到Rayleigh-Taylor（RT）和K^[24]elvin-Helmholtz（KH）不稳定性分别在日球层边界的鼻尖区^[26-27]和侧翼区^[2, 25, 28-29]更容易发生，并显著影响日球层边界的特性。由于日球层边界附近存在复杂的电荷交换过程，同时太阳风条件也不停的变化，日球层边界的动态变化特性和相应的RT和KH不稳定性发展会变得十分复杂。

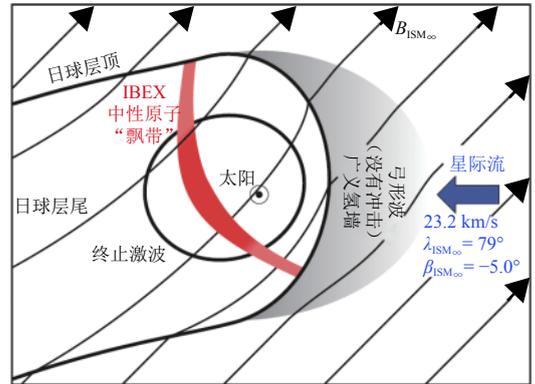
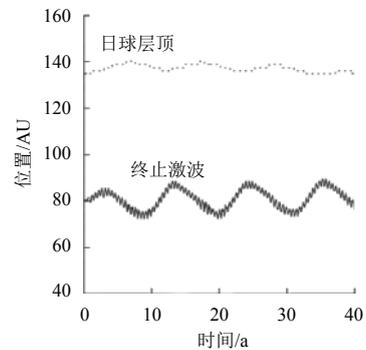


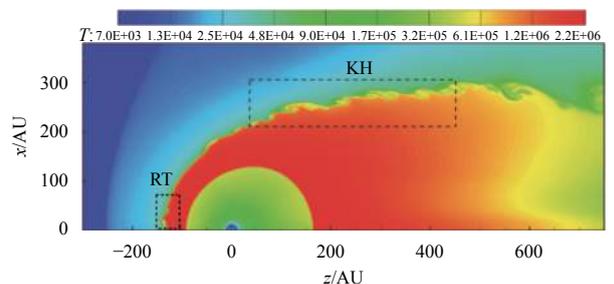
图5 日球层外可能没有弓激波结构^[24]
Fig. 5 Bow shock may not exist outside of the heliosphere^[24]

7) 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^[30]，如图7所示，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



(a) 日球层顶和终止激波位置的长期（11 a）和短期（180 d）变化^[25]



(b) 日球层顶不稳定性数值模拟^[29]

图6 外日球层间断面结构
Fig. 6 Discontinuous surface structure of the outer heliosphere

温度剖面、各项同性还是异性、太阳活动有无影响还所知甚少。

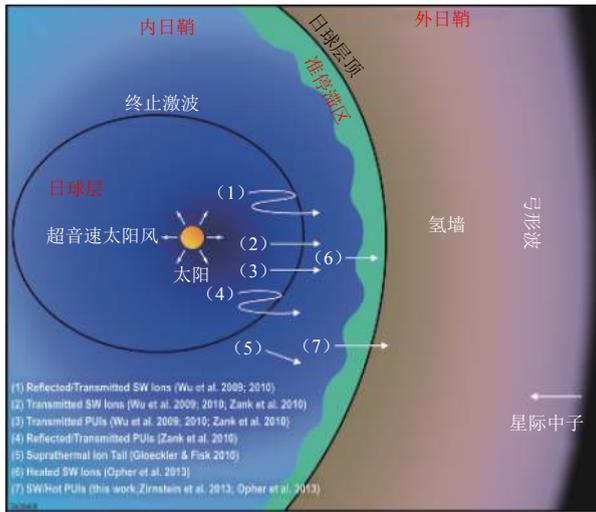


图 7 中性原子墙的形成机制及分布^[25]

Fig. 7 The formation mechanism and distribution of the hydrogen wall^[25]

8) 能量中性原子“飘带”(ribbon)

来自太阳系边际甚至星际空间的中性原子由于不受磁场直接作用，在未与等离子体离子电荷交换的情况下能够直接进入内日球层并被观测到。比如地球轨道附近的IBEX能够对keV级别的能量中性原子进行

全空间成像^[31]，结果如图8所示。观测表明能段在1 keV左右的能量中性原子在全空间存在一明亮飘带状(ribbon)分布结构，该结构未被之前的理论所预测^[12]，其源区的具体位置尚有争议。目前的主流观点认为，往外径向运动的太阳风离子在与星际中性原子电荷交换后成为原子运动出日球层顶，进入外日球层鞘区后与星际等离子体离子电荷交换形成星际拾起离子，之后再次与星际中性原子电荷交换，其中部分生成的能量中性原子返回日球层内部并在地球轨道附近被IBEX所观测^[32]。理论上在星际空间产生的星际拾起离子在重新电荷交换形成能量中性原子之前存在一定的问题，在速度相空间上可能无法形成稳定结构^[33]。因此对能量中性原子形成的ribbon结构和来源的解释有待观测上的进一步深入验证。

2.2 临近星际空间环境特性

1) 星际介质特性

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，且不同环境下的Ne/O比也不相同，具体如图9所示。迄今为止，人类还没有过对星际介质进行就位探测，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。

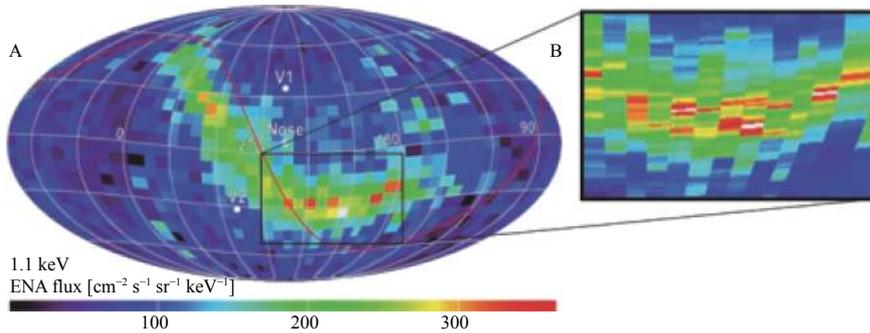


图 8 IBEX观测到的1.1 keV能量中性原子的全天分布，图中可见明亮的飘带结构

Fig. 8 The all-sky distribution of 1.1 keV energetic neutral atoms observed by IBEX showing the existence of a bright ribbon

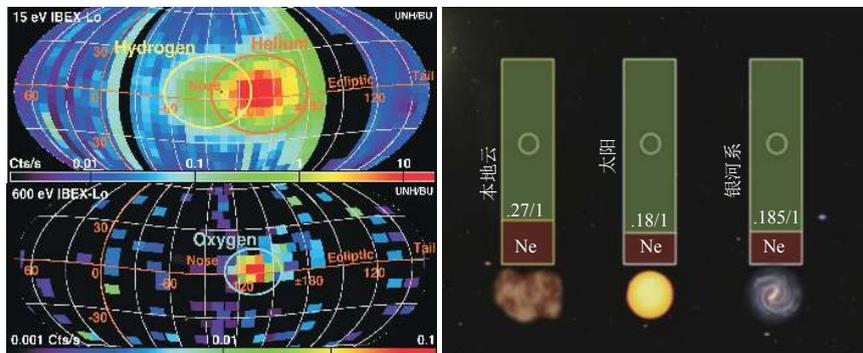
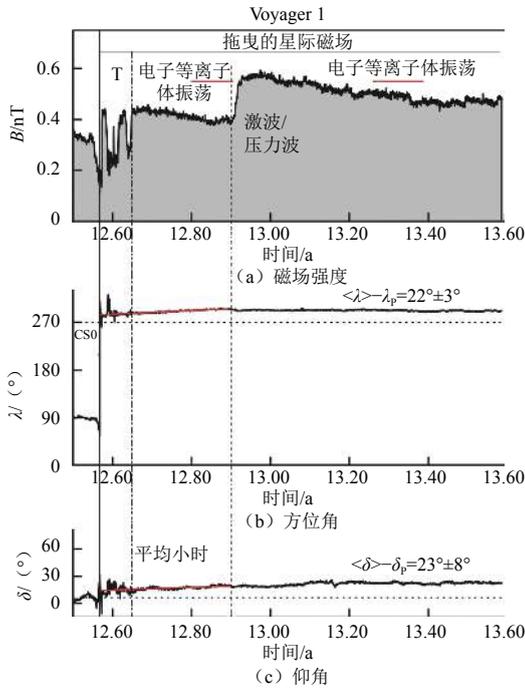


图 9 星际介质性质特性

Fig. 9 Characteristics of the interstellar neutrals

2) 星际磁场

目前,“旅行者2号”已经进入星际空间,对星际磁场也取得了一些就位探测,如图10所示。然而,“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,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。



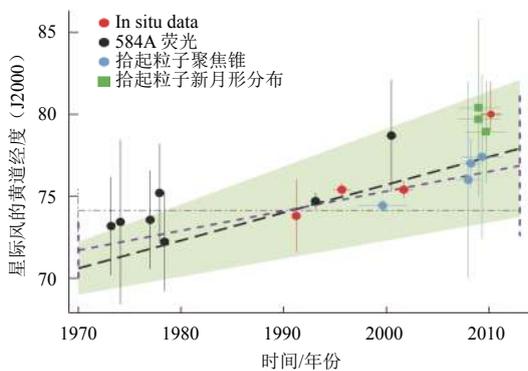
注: 2000年观测数据

图 10 星际介质磁场特性^[34]

Fig. 10 The profiles of interstellar magnetic field^[34]

3) 星际风和星际尘云

结合前期的一些卫星观测,推断星际风方向会逐年变化^[35],如图11所示,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就



(a) 星际风方向变化^[35]

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。

2.3 太阳系天体

1) 冰巨星及其卫星系统的特性

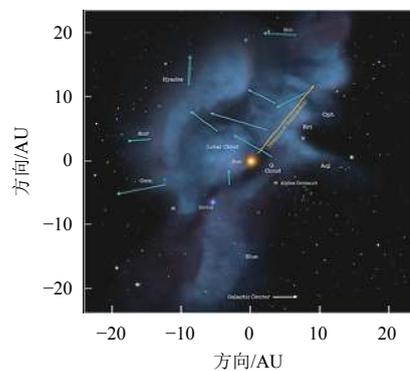
自1984年“旅行者号”发现海王星的环系统以来,其结构和来源一直有很多未解之谜,急需新的近距离观察。此外,海卫一(Triton)的状态也十分特殊,这个质量稍小于冥王星的巨大逆行公转卫星,其体积及表面成分都和冥王星相似,自转轴与黄道面夹角几乎平行,所以来源很可能同属于在海王星轨道外物体的矮行星。海卫一还是太阳系内具有冰火山现象的4个天体之一。通过近距离的飞掠探测和释放穿刺探测器,对海王星及其卫星进行原位探测将首次获得大气剖面上成分、同位素变化特征、大气运动过程等信息,为研究太阳系形成演化、冰巨星的成因、冰巨星大气过程、行星宜居性等重要科学问题提供依据。

2) 半人马族小行星

1992年发现第一个海王星外物体(Trans-Neptunian Objects, TNOs)之后,对太阳系的来源和演化有了革命性的认识。半人马族小行星是一类非常有趣的太阳系小天体,这些在外太阳系的小物体是45亿年前太阳系形成时留下来的最原始建构模块,也是宇宙中的外星系统必有冰质小星体系统,其起源、物理性质、轨道特性、喷气的成分及损失速度等都是非常值得研究的问题。理论分析认为半人马族小行星具有冰环和牧羊卫星^[35],通过近距离观测,能够进一步了解其特性并促进对于太阳系小天体形成和演化的认识。

3) 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。目前大部分天文学家都相信柯伊伯带是短周期彗星的诞生地,或许地球



(b) 日球层附近星云的运动方向

图 11 日球层附近的星云

Fig. 11 The variation of the directions of the interstellar wind

上的水和生命起源与这些天体有密切的关联, 因而有着非常重要的研究价值。在众多的柯依伯带天体中, 创神星(Quaoar)是最令人感兴趣的天体之一, 一方面其轨道的黄道交角只有 8° ; 另一方面与日球层顶的Nose区和中性原子“Ribbon”区域位于一条直线上, 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, 冰火山口的成像、羽状喷出物的光谱分析等。

4) 行星际尘云之谜

行星际尘云是太阳系最原始的考古样品, 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。现有的一些零星探测不能覆盖行星际尘云在整个内太阳系的核心区域, 值得进一步的深入系统研究相关的一些科学问题, 如: 来源问题(小行星、柯伊伯带天体、彗星等的活动和碰撞, 行星际物质); 产生机制(连续碰撞级联, 彗星的物质蒸发?); 成分、丰度及分布; 与地外行星系统的差异。

2.4 其它

虽然爱因斯坦的广义相对论已经成为描述引力的标准模型并通过了太阳系的实验检验, 但其有效性还有待更多的实验来验证。针对太阳系边际探测任务, 可以利用多波段无线电通讯系统, 开展以多普勒跟踪以及测距观测为基础的引力实验^[36]。

3 结束语

目前, 国际太阳系探测呈现出“更近、更远”两极发展趋势, 一是不断逼近太阳, 开展太阳大气的就地探测; 二是朝着远离太阳的未知空间开疆拓土。结合我国航天国情, 实施至建国100周年、飞至距太阳100 AU(天文单位, $1 \text{ AU} = 1.5 \text{ 亿 km}$)以远的太阳系边际探测任务, 将在科学上揭示太阳系边际结构、星际介质的特性以及二者的相互作用规律, 探索太阳系天体的起源和演化; 在工程技术上推动空间核动力、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, 构建我国太阳系全域乃至临近恒星际空间的到达能力, 为2050年建成世界航天强国的迈出重要一步。

受深空推进技术的制约, 太阳系边际探测计划的实施一般需要25~30 a的时间。考虑到发射窗口的约束条件, 建议国家尽快立项实施。

参 考 文 献

[1] KIVELSON M G, RUSSELL C T. Introduction to space physics[M].

Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.

- [2] WANG C, BELCHER J W. Numerical investigation of hydrodynamic instabilities of the heliopause[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(A1): 247-256.
- [3] IZMODENOV V V, KALLENBACH R. The physics of the heliospheric boundaries[R]. Switzerland: International Space Science Institute, 2015
- [4] HALL C F. Pioneer 10[J]. *Science*, 1974, 183(4122): 301-302.
- [5] SMITH E J, DAVIS L, JONES D E, et al. Jupiter's magnetic field, magnetosphere, and interaction with the solar wind -Pioneer 11[J]. *Science*, 1975, 188(4187): 451-455.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] LI H, WANG C, RICHARDSON J D. Properties of the termination shock observed by Voyager 2[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19): 1-4.
- [9] RICHARDSON J D, KASPER J C, WANG C, et al. Voyager 2 plasma observations near the termination shock[J]. *Nature*, 2008, 454(78): 75-77.
- [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): 1019-1023.
- [11] FOUNTAIN G H, KUSNIERKIEWICZ D Y, HERSMAN C B, et al. The new horizons spacecraft[J]. *Space Science Review*, 2008, 140: 23-47.
- [12] 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): 959-962.
- [13] MCCOMAS D J, ZIRNSTEIN E J, BZOWSKI M, et al. Seven years of imaging the global heliosphere with IBEX[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 229(41): 1-32.
- [14] National Aeronautics and Space Administration. Our dynamic space environment: heliophysics science and technology roadmap for 2014—2033[EB/OL]. (2020-08-18) [https://explorers.larc.nasa.gov/HPSMEX/MO/pdf/files/2014 HelioRoadmap_Final Reduced 0.pdf](https://explorers.larc.nasa.gov/HPSMEX/MO/pdf/files/2014%20HelioRoadmap_Final%20Reduced_0.pdf).
- [15] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, MANUTT R, SCHWADRON N A, et al. Interstellar heliospheric probe/heliospheric boundary explorer mission—a mission to the outermost boundaries of the solar system[J]. *Experimental Astronomy*, 2009(24): 9-46.
- [16] MCNUTT L R, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, GRUNTMAN M A, et al. Near-term interstellar probe: first step[J]. *Acta Astronautica*, 2019(162): 284-299.
- [17] 吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(1): 1-16.
- WU W R, YU D Y, HUANG J C, et al. Exploring the solar system boundary[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2019, 49(1): 1-16.
- [18] WANG C, RICHARDSON J D. Determination of the solar wind slowdown near solar maximum[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(A2): 1058.
- [19] WANG C, RICHARDSON J D. Energy partition between solar wind protons and pickup ions in the distant heliosphere: a three-fluid

- approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, 106(A12): 29401-29407.
- [20] MCDONALD F B, WEBBER W R, STONE E C, et al. Voyager observations of galactic and anomalous cosmic rays in the heliosheath[C]//5th Annual International Astrophysics Conference: Physics of the Inner Heliosheath - Voyager Observations, Theory, and Future Prospects. Oahu, Hawaii, USA: AIP, 2006
- [21] 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.
- [22] MCCOMAS D J, DAYEH M A, FUNSTEN H O, et al. The heliopause revealed by the interstellar boundary explorer[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 771(2): 1-9.
- [23] DIALYNAS K, KRIMIGIS S M, MITCHELL D G, et al. The bubble-like shape of the heliosphere observed by Voyager and Cassini[J]. *Nature Astronomy*, 2017(1): 0115.
- [24] MCCOMAS D J, ALEXASHOV D, BZOWSKI M, et al. The heliosphere's interstellar interaction: no bow shock[J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1291-1293.
- [25] 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*, 1999, 104(A1): 549-556.
- [26] LIEWER P C, KARMESIN S R, BRACKBILL J U. Hydrodynamic instability of the heliopause driven by plasma-neutral charge-exchange interactions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(A1): 17119-17128.
- [27] BOROVNIKOV S N, POGORELOV N V. VOYAGER 1 near the heliopause[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2014, 783(1): 1-6.
- [28] IZMODENOV V V, ALEXASHOV D B. Three-dimensional kinetic-MHD model of the global heliosphere with the heliopause-surface fitting[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, 220(2): 1-14.
- [29] BOROVNIKOV S N, POGORELOV N V, ZANK G P, et al. , Consequences of the heliopause instability caused by charge exchange[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 682(2): 1404-1415.
- [30] 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[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 780(1): 1-11.
- [31] MCCOMAS D J, ALLEGRINI F, BOCHSLER P, et al. IBEX-interstellar boundary explorer[J]. *Space Science Review*, 2009, 146: 11-33.
- [32] HEERIKHUISEN J, POGORELOV N V, ZANK G P, et al. Pick-up ions in the outer heliosheath: a possible mechanism for the interstellar boundary explorer ribbon[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, 708: L126-L130.
- [33] FLORINSKI V, ZANK G P, HEERIKHUISEN J, et al. Stability of a pickup ion ring-beam population in the outer heliosheath: implications for the ibex ribbon[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 719(2): 1097-1103.
- [34] BURLAGA L F, NESS N F. Voyager 1 observations of the interstellar magnetic field and the transition from the heliosheath[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 784(2): 1-14.
- [35] FRISCH P C, BZOWSKI M, LIVADIOTIS G, et al. Decades-long changes of the interstellar wind through our solar system[J]. *Science*, 2013, 341(6150): 1080-1082.
- [36] 邓雪梅, 谢懿. 高精度相对论验证的现状与趋势: 太阳系实验[J]. *天文学进展*, 2014, 32(2): 122-127.
- DENG X M, XIE Y. The status and trends of testing relativity in highly accurate level: tests in the solar system[J]. *Progress in Astronomy*, 2014, 32(2): 122-127.

作者简介:

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。

通讯地址: 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

(下转第535页)