

从地球磁层到外日球层及以远区域探测

宗秋刚^{1,2}, 任杰^{1,2}, 何建森^{1,2}, 王玲华^{1,2}

(1. 北京大学空间科学与技术研究所, 北京 100871; 2. 北京大学行星与空间科学研究中心, 北京 100871)

摘要: 在太阳系中, 地球、水星、木星、土星、天王星和海王星以及多颗行星的卫星, 拥有由太阳风与这些天体的内在磁场相互作用形成的磁层结构。主要根据现有的探测器得到的数据, 介绍了太阳风与星际介质的相互作用、能量中性原子分布和拾起粒子相对空间密度变情况、异常宇宙线的形成机制、日球层可能的形状变化。给出了中国太阳系边际探测计划, 设计两个相反方向的探测器, 一个向日球层鼻尖方向飞行, 对太阳系边际及其邻近空间开展全面的探测; 另一个探测器向相反方向飞行, 填补日球层尾部边界探测的空白。对日球层的空间环境的认识可为探测器的设计提供参考。

关键词: 日球层; 磁层; 太阳风; 星际介质; 能量中性原子; 拾起粒子; 异常宇宙线

中图分类号: P35

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)06-0554-06

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200063

引用格式: 宗秋刚, 任杰, 何建森, 等. 从地球磁层到外日球层及以远区域探测[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(6): 554-559.

Reference format: ZONG Q G, REN J, HE J S, et al. From Earth's magnetospheres to the outer heliosphere & beyond[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(6): 554-559.

引言

太阳风是太阳大气层外层不断地向外喷射出的超声速带电粒子流(主要是电子和质子)。太阳风存在低速(250~400 km/s)和高速(400~800 km/s)两种基本状态。太阳风速度大小跟太阳风的源区以及太阳活动周期(约11 a)有着紧密联系^[1-2]。低速太阳风起源于盔状冕流, 在太阳活动低年主要发生在黄道面附近, 在太阳活动高年向极区扩展; 高速太阳风则起源于极区的冕洞, 随着极区开放磁场的减弱而缩小^[3-5], 在向外传播的过程中, 会依次经过水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星等。其中水星、地球、木星、土星、天王星和海王星具有内在磁场, 可以跟太阳风相互作用形成行星磁层。这些磁层的大小各不相同(如图1所示), 其大小取决于内在磁场的偶极矩强度和行星轨道上的太阳风参数。

每个行星的磁层又有各自独特的特征。水星离太阳最近跟太阳风发生强耦合, 由于没有明显的电离层和大气层, 太阳风可以通过极尖区直接到达地面引起离子溅射和逃逸; 地球磁层(除了极区)可以很好地屏蔽太阳风, 避免臭氧层被破坏, 进而避免太阳紫外辐射对人类的伤害; 木星和土星磁层中, 卫星(如木

卫一和土卫二)持续提供等离子体和尘埃, 形成行星环系统; 不同于其它行星, 天王星和海王星的磁极跟地理极点之间相差很大, 分别是59°和47°。对于没有内在磁场的行星或卫星, 如火星和金星, 太阳风可以直接跟行星大气发生相互作用, 产生能量中性粒子和软X射线等。

日球层(Heliosphere)可以视为太阳的磁层, 周围是由中性气体、电离和磁化的等离子体以及尘埃等构成的星际介质(Interstellar Medium)。太阳以相对局地星际介质(Local InterStellar Medium, LISM)以约26 km/s的速度运动。包裹日球层的局地星际介质是稀薄的(0.1~0.3/cm³)和热的(约为10⁴ K), 星际磁场强度约0.14 nT^[6]。太阳风以超声速的流速向外传播, 在局地星际介质的阻挡下, 下降到亚音速并形成终止激波(Termination Shock), 同时伴有数密度、温度和压强的上升。外侧的日球层顶(Heliopause)是日球层实际的外边界, 将太阳风和星际介质分开。日球层顶和终止激波之间的区域称作内日球层鞘(Inner Heliosheath), 而日球层顶和弓激波(Bow Shock Wave)之间的区域称作外日球层鞘(Outer Heliosheath)。外日球层鞘中存在一个氢元素高密度区域, 即所谓的“氢墙”(Hydrogen Wall)。

收稿日期: 2020-09-08 修回日期: 2020-10-21

基金项目: 民用航天“十三五”技术日球层边际探测重要科学问题预先研究资助项目(D020301); 国家自然科学基金资助项目(41421003, 41627805, 41904145)

目前，除了“旅行者1号”（Voyager 1）“旅行者2号”（Voyager 2）到达太阳系边际获得局地探测外，人类主要通过在内日球层中发射的探测器，测量能量中性原

子（Energetic Neutral Atoms, ENA）、拾起粒子（Pickup Ions, PUIs）和异常宇宙线（Galactic Cosmic Rays, GCRs）等研究太阳风与局地星际介质的相互作用过程。

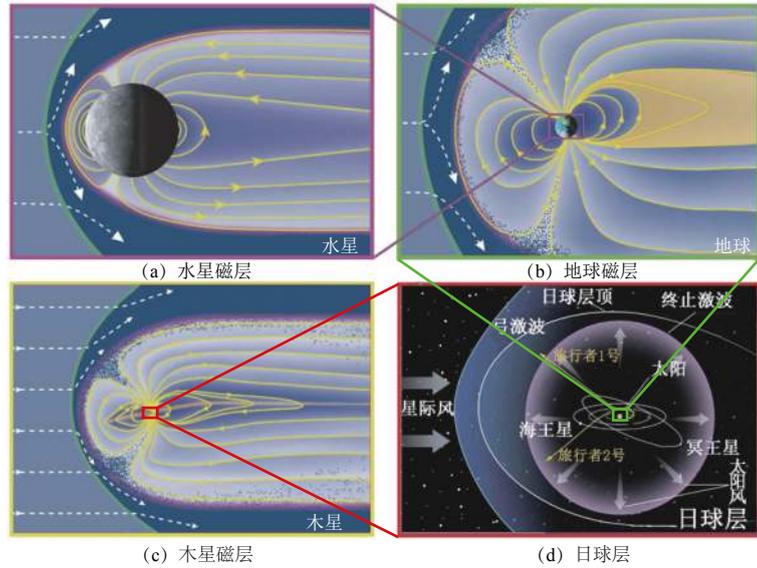


图 1 行星磁层和日球层
Fig. 1 Planetary magnetosphere and heliosphere

本文主要介绍了太阳风与局地星际介质的相互作用及其中国的太阳系边际探测计划。

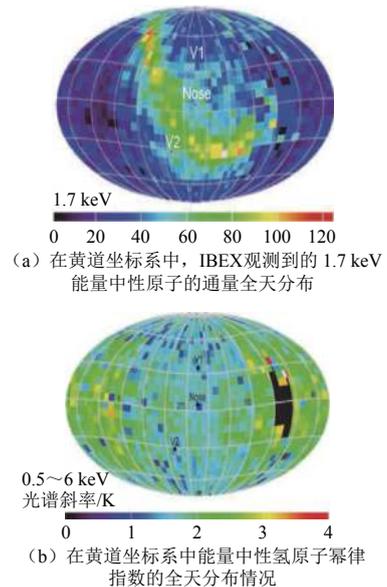
1 太阳风与局地星际介质的相互作用

1.1 能量中性原子

太阳风中的能量离子与局地星际介质中的冷中性原子之间发生电荷交换后形成ENA，ENA不受磁场和等离子体的影响，其中一部分可以进入内日球层。在飞向太阳的过程中，ENA不断被电离耗散掉，剩余的部分在太阳引力场透镜效应下，在太阳背向星际风的一侧形成ENA密度腔，并容易被地球周围的卫星探测到。IBEX卫星搭载了两个高分辨率的ENA相机：IBEX-Lo和IBEX-Hi，探测能量范围分别约为10~2 000 eV和300~6 000 eV。卫星于2008年10月19日发射升空，进入高倾角、高椭圆（15 000 × 300 000 km）、长周期（2011年6月从7 d调整到9 d）轨道；卫星每个轨道可以完成一个或两个360° × 7°扫描，每6个月可以完成一次全天成像。2009年上半年IBEX首次完成对外日球层的ENA全天成像^[7]。

在黄道经纬坐标（ecliptic coordinates）中，全天成像结果显示，以经度221°和纬度39°为中心出现一条能量范围为0.2~6 keV、宽度约20°、长度超过300°的ENA发射带；发射带内ENA通量比周围高2~3个数量级，并且最明显的条带出现在1 keV附近^[8]。这条日球层鞘中的ENA发射带是以往的内日球层动力学理论和模

型没有预料到的，对于重新理解日球层和局地星际介质有着重大意义。ENA发射带内通量显著高于周围，但是其幂律指数并没有表现出类似的差别。ENA全天成像显示，幂律指数在全天范围内变化比较大，特别是相比于赤道处，极区的幂律指数更小，这可能跟太阳风速度随纬度增加而增大有关，观测结果如图2所示。



注：图2中还标出了Voyager 1（V1）、Voyager 2（V2）、以及日球层鼻尖的位置，分别是（35°，255°）、（-32°，289°）、（5°，255°）

图 2 IBEX观测结果^[9]

Fig. 2 IBEX all-sky maps of the measured ENA fluxes^[9]

以前,通过反向散射的太阳Ly α 辐射^[10]和拾起粒子来间接测量星际中性原子。最近Bochsler等^[11]利用IBEX卫星观测发现,局地星际介质中氦原子和氧原子丰度之比(Ne/O)约为 0.27 ± 0.10 ,在误差范围内跟以往利用拾起粒子数据获得比值(0.38)相近;但是明显高于太阳系内Ne/O丰度之比(0.18)^[12]。这意味着太阳形成于银河系中氧元素更丰富的区域或者是在太阳系之外的尘埃或冰晶中含有丰富的氧元素,只是不能自由地进入日球层而被观测到。

星际中性原子(H、He、O等)包含两种成分:原始成分(Primary Population或Unmodified Population)和次级成分(Secondary Population)。原始成分反映的是局地星际介质未扰动特性,而次级成分反映的是外日球层鞘的离子成分。相比于原始成分,次级成分速度更慢、温度更高并且其流动方向更容易受太阳的引力透镜效应影响而发生偏转^[13],结果如图3所示。

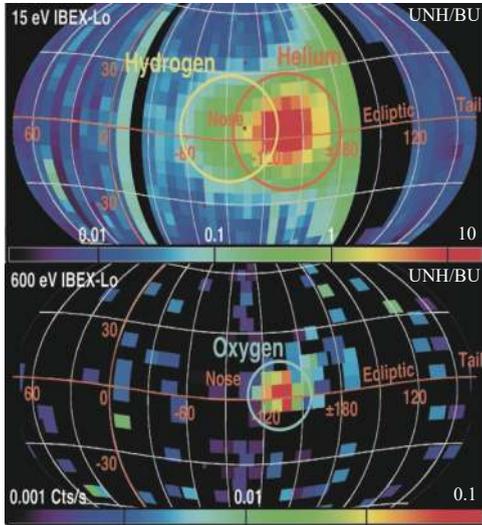


图3 IBEX-Lo观测到的次级星际中性原子(H、He和O)计数率的全球分布

Fig. 3 IBEX-Lo all-sky count-rate maps of secondary interstellar neutral atoms (Proton, Helium and Oxygen)

利用2009—2011期间IBEX在冬春季对次级成分(氦和氧)的探测,经分析发现次级He和次级O主要分布在 $160^\circ \sim 210^\circ$ 经度范围内,且其峰值在经度上分别偏离原始成分的峰值 $14^\circ \sim 34^\circ$ 和 $38^\circ \sim 43^\circ$ ^[14]。这些结果表明次级成分的整体速度(相对于太阳)比原始成分的要小,并且右舷侧的外日球层鞘厚度要大于左舷侧。

1.2 拾起粒子

拾起粒子是遥测太阳风与局地星际介质相互作用的一个重要手段。局地星际介质中的中性成分不受等离子体和磁场的影响,可以持续不断地进入日球层。其中一部分跟堆积在日球层顶外的离子发生电荷交换,还有一部分穿过终止激波后被太阳风电离形成拾起粒子。在距离太阳 $1.4 \sim 4.5$ AU范围内,拾起粒子中 H^+/He^+ 之比随着到太阳的距离减小而逐渐增加,表明来自局地星际介质的He原子比H原子因太阳紫外线电离引起的损失率更低,更容易深入日球层中。而要准确地测量星际拾起粒子,就必须要将其跟太阳风离子和来自太阳系的拾起粒子区分开来,一个最可靠的方式是利用粒子的速度分布来区分。

如图4所示,Ulysses/SWICS探测到的 H^+ 包含3种来源,(a)图中在 $W=1$ 附近的太阳风、两侧的星际拾起粒子和内源拾起粒子;由于太阳风中不含一价氧离子($W=1$ 处没有相空间密度的峰值),探测到的 O^+ 只有星际拾起粒子和内源拾起粒子,如图(b)所示。在行星的弓激波处,太阳风的能量主要转化成离子的热能;而在终止激波处,太阳风的能量有大约80%转变成拾起粒子的能量^[15]。被加热后形成超热离子,其热压在内日球层鞘内占据主导。对拾起粒子的测量不仅揭示了太阳风和局地星际介质作用区的过滤效应,帮助确定局地星际介质中元素的丰度^[16];还可以遥测星际磁场^[17]、确定粒子源区(星际或日球层内)^[18]以及异常宇宙线来源等。

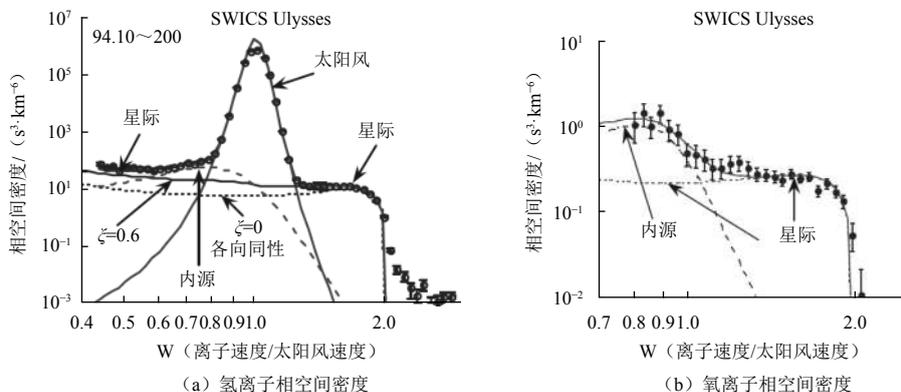


图4 Ulysses/SWICS在3个AU处探测到的氢离子和氧离子的相空间密度随 W (离子速度与太阳风速度之比)的变化情况^[18]

Fig. 4 Phase space density of Proton and Oxygen ions versus W (the ratio of the ion speed to the solar wind speed)^[18]

1.3 异常宇宙线

银河宇宙线包含电子、质子、氦离子和其它重离子 (HZE Ions) 等, 能量范围覆盖非常广泛 (既能低至 keV/n 以下, 又能高到 TeV/n 以上), 但微分通量主要集中在 MeV/n ~ GeV/n 之间。进入日球层的银河宇宙线受到太阳风的影响, 存在准 11 a 的周期性调制, 其通量水平跟太阳活动呈反相关关系。20 世纪 70 年代发现, 小于 200 MeV/n 的多种粒子的能谱并没有像银河宇宙线那样随着能量的减小而单调减小, 偏离银河宇宙线能谱的这一部分被称作异常宇宙线。

Fisk 等^[19-20]提出了一个被广泛接受的异常宇宙线形成模型, 即星际中性原子进入日球层后被电离成为拾起粒子, 拾起粒子在太阳风作用下获得初步加速并被携带到终止激波处, 经过对流和扩散获得进一步加速。“旅行者 1 号”“旅行者 2 号”经过终止激波时的一个重大发现是, 没有像预期的那样观测到异常宇宙线强度的峰值 (见图 5)。此后, 异常宇宙线的加速机制和源区再次成为讨论的焦点。一种观点认为异常宇宙线

的加速可能发生在终止激波的侧面或尾部而不是鼻尖区^[15]还有一种观测认为在内日球层鞘处的磁通量绳中, 带电粒子通过费米加速和重联电场加速形成异常宇宙线^[6]。

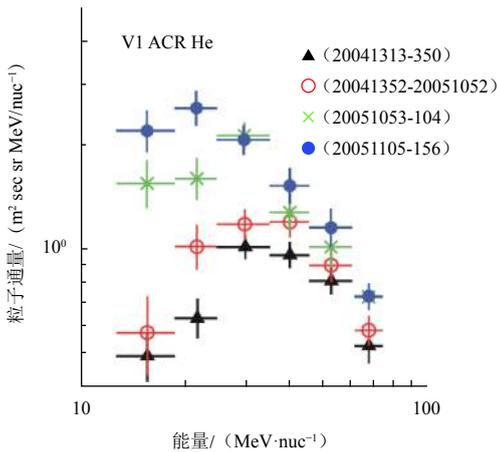
1.4 日球层形状的变化

20 世纪 60 年代提出了日球层两种可能的形状: 彗星状 (Comet-type) 和气泡状 (Bubble-type)。在非磁化星际介质作用下, 日球层会像彗星一样拖着长长的尾巴, 类似胀满的风袋; 而当星际磁场引起的压力占主导时, 就会形成更对称的气泡状^[3]。尽管以前的模拟大都支持彗星状の日球层形状, 但是由于缺乏充分的原位测量证据, 一直没有定论。通过 IBEX 和 Cassini 卫星的 ENA 成像以及 Voyager 的原位观测^[21], 认为日球层更有可能是气泡状。也有模拟研究显示, 日球层可能没有尾巴, 但是呈喷射状 (Jet-type), 有两个或多个尾瓣^[16], 日球层可能的形态如图 6 所示。

北纬 34° 处的 Voyager 1, 从距离太阳 85 AU 处进入前兆激波, 并于 2004 年 12 月在 94 AU 处穿过终止激波; 在南纬 26° 处的 Voyager 2, 从距离太阳 75 AU 处进入前兆激波, 并于 2007 年 8 月在 84 AU 处穿过终止激波。上述结果表明终止激波的结构可能存在南北不对称性, 南北压力差的不对称性可能来自星际磁场、终止激波的瞬态运动或太阳风动压^[22]。星际磁场可以通过导致终止激波和日球层顶的扭曲引起这种不对称^[9]。对星际 H 和 He 流向的研究^[23-24], 以及对日球层射电辐射的观测, 发现星际磁场方向跟星际介质的流向存在 60° 角度差, 也可能造成日球层的南半球比北半球更靠里^[9]。

2 太阳系边际探测计划

目前, 人类进行的太阳系边际探测任务屈指可数, 主要有“先驱者 10 号” (Pioneer 10)、“先驱者 11 号” (Pioneer 11)、“旅行者 1 号”“旅行者 2 号”和“新视野号” (New Horizon) 等。“先驱者 10 号”“先驱者 11 号”分别到达距离太阳约 80 AU 和 43 AU 处后无线电通讯中断; 截至 2020 年 9 月“旅行者 1 号”“旅行者 2 号”已



注: 在上游[Δ (2004/313-350)]和下游[○ (2004/352-2005/052)、x (2005/053-104)、● (2005/105-156)]观测到的异常宇宙线氦离子能谱。在终止激波处, 异常宇宙线氦离子通量没有出现峰值, 反而在日球层鞘中低能部分通量迅速增加^[6]。

图 5 Voyager 1 经过终止激波时观测到异常宇宙线氦离子能谱变化情况
Fig. 5 Helium spectra of ACR around termination shock observed by Voyager 1

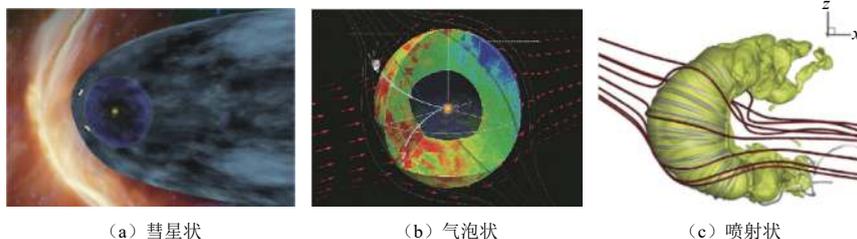


图 6 日球层几种可能的形态

Fig. 6 Several possible shapes of heliosphere

分别到达距离太阳150 AU和124 AU处, 预计2025年左右将因能源限制中断与地面的联系; “新视野号”于2019年初掠过冥王星, 目前已到达距离太阳48 AU处^[25], 并将于2030年前后到达太阳系边际。上述原位探测连同内日球层中的遥感探测, 使得人类对日球层有了崭新的认识。

现阶段计划中的星际探测将瞄准关键未知区域, 其中就包括中国航天局提出的太阳系边际探测计划。在太阳系边际探测计划中, 一个探测器向日球层鼻尖方向飞行, 飞行方向跟“旅行者1号”“旅行者2号”类似, 但是将通过搭载更丰富的载荷, 对太阳系边际及其邻近星际空间开展更加全面的探测; 在飞抵太阳系边际的旅途中还可以择机对木星、土星、半人马小天体等进行探测。

另一个探测器向相反方向运动, 填补对日球层尾部边界探测的空白。在前两次任务的基础上, 还可以实施日球层极区的原位探测。太阳系边际探测计划的主要科学目标包括: ①量化太阳风离子和局地星际介质中性粒子的相互作用; ②测量鼻尖和尾部终止激波的位置和形状; ③检查尾部日球层鞘内是否存在异常宇宙线以及日球层边界是否闭合; ④原位测量外太阳系中的银河宇宙线和星际介质湍动; ⑤探索海王星神秘的超声速喷流及其卫星Triton的逆行轨道; ⑥飞掠柯伊伯带寻找太阳系形成的原始信息等。

3 结束语

日球层是人类认识宇宙的窗口, 对日球层的探索可以帮助人类认识恒星系统的形成、演化以及宜居性等。目前, 通过探测能量中性原子、拾起粒子、异常宇宙线和射电波等来研究太阳风与星际介质的相互作用, 特别是Voyager 1于2004年12月经过终止激波以来, 对外日球层的探索成为日球层物理学研究的最前沿。未来可期的太阳系边际探测计划, 将因其独特的轨道设计和完备的科学载荷, 引领人类进入全面探测日球层和星际介质的新时代。

参 考 文 献

- BERTAUX J L, BLAMONT J E. Evidence for a source of an extraterrestrial hydrogen lyman-alpha emission[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1971, 11: 200-217.
- BOCHSLER P, PETERSEN L, MOBIUS E, et al. Estimation of the neon/oxygen abundance ratio at the heliospheric termination shock and in the local interstellar medium from ibex observations[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2012, 198(2): 1-5.
- 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*, 2006, 1(5): 0115.
- FICHTNER H. Anomalous cosmic rays: messengers from the outer heliosphere[J]. *Space Science Reviews*, 2001, 95: 639-754.
- FISK L A, KOZLOVSKY B, RAMATY R. An interpretation of the observed oxygen and nitrogen enhancements in low-energy cosmic rays[J]. *The Astrophysical Journal*, 1974, 190: L35-L37.
- FUNSTEN H O, ALLEGRINI F, CREW G B, et al. Structures and spectral variations of the outer heliosphere in ibex energetic neutral atom maps[J]. *Science*, 2009, 326(5955): 964-966.
- FUSELIER S A, ALLEGRINI F, FUNSTEN H O, et al. Width and variation of the ENA flux ribbon observed by the interstellar boundary explorer[J]. *Science*, 2009, 326(5955): 962-964.
- GLOECKLER G, FISK L A. Johannes Geiss' investigations of solar, heliospheric and interstellar matter[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 130: 489-513.
- GLOECKLER G, GEISS J. Interstellar and inner source pickup ions observed with SWICS on ULYSSES[J]. *Space Science Reviews*, 1998, 86: 127-159.
- IZMODENOV V, MALAMA Y, GLOECKLER G, et al. Filtration of interstellar H, O, N atoms through the heliospheric interface: inferences on local interstellar abundances of the elements[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 414(3): L29-L32.
- LALLEMENT R, QUÉMERAIS E, BERTAUX J L, et al. Deflection of the interstellar neutral hydrogen flow across the heliospheric interface[J]. *Science*, 2005, 307(5714): 1447-1449.
- LANGNER U W, POTGIETER M S. Possible explanations of anomalous spectra observed with Voyager 1 crossing the solar wind termination shock[C]//Physics of the Inner Heliosheath. Honolulu, HI: API, 2006.
- 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.
- MCCOMAS D J, ALLEGRINI F, BOCHSLER P, et al. IBEX—interstellar boundary explorer[J]. *Space Science Reviews*, 2009, 146: 11.
- MCCOMAS D J, EBERT R W, ELLIOTT H A, et al. Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole Sun[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(18): 1-5.
- MCCOMAS D J, SCHWADRON N A. An explanation of the Voyager paradox: particle acceleration at a blunt termination shock[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(4): 1-5.
- OPHER M. Magnetized jets driven by the Sun: the structure of the heliosphere revisited[C]//APS Division of Plasma Physics Meeting. [S.l.]: API, 2015.
- PARK J, KUCHARAK H, MÖBIUS E G, et al. IBEX observations of secondary interstellar helium and oxygen distributions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 833(2): 1-19.
- PARKER E N. The stellar-wind regions[J]. *The Astrophysical Journal*, 1961, 134: 20.
- PESESSE M E, JOKIPII J R, EICHLER D. Cosmic ray drift, shock wave acceleration, and the anomalous component of cosmic rays[J]. *The Astrophysical Journal*, 1981, 246(2): L85-L88.
- 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: 63-66.

- [22] 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.
- [23] STONE E C, CUMMINGS A C, MCDONALD F B, et al. An asymmetric solar wind termination shock[J]. *Nature*, 2008, 454: 71-74.
- [24] TOKUMARU M, KOJIMA M, FUJIKI K I. Solar cycle evolution of the solar wind speed distribution from 1985 to 2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(A4): 1-13.
- [25] ZIRNSTEIN E J, MCCOMAS D J, SCHWADRON N A, et al. Strong scattering of \sim keV pickup ions in the local interstellar magnetic field draped around our heliosphere: implications for the ibex ribbon's source and IMAP[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 876(2): 1-14.

作者简介:

宗秋刚(1965-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:磁层物理、空间天气学和空间探测。

通讯地址:北京市海淀区北京大学物理大楼(100871)

电话:(010)62767422

E-mail: qgzong@pku.edu.cn

From Earth's Magnetospheres to the Outer Heliosphere & Beyond

ZONG Qiugang^{1,2}, REN Jie^{1,2}, HE Jiansen^{1,2}, WANG Linghua^{1,2}

(1. School of Space and Earth Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Research Center of Planetary and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In the Solar system, there are many astronomical objects owning the magnetosphere structure generated by the interaction between their intrinsic magnetic field and Solar wind, including Mercury, Earth, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune and some of their satellites. Heliosphere is the Sun's magnetosphere, which is filled with Solar wind and surrounded by the interstellar medium. According to the data obtained by the existing detectors, the interaction between the Solar wind and the interstellar medium, the distribution of energy neutral atoms and the relative spatial density changes of picked-up particles, the formation mechanism of abnormal cosmic rays, and possible changes in the shape of the heliosphere are introduced. The marginal exploration plan of China's Solar system exploration mission is given. Two detectors in opposite directions are designed. One will fly towards the nose tip of the heliosphere to conduct comprehensive exploration of the marginal Solar system and its adjacent space; and the other will fly in the opposite direction to fill the gap at the tail boundary of the spherical layer. The knowledge of the space environment of the heliosphere can provide reference for the design of the probe.

Keywords: heliosphere; magnetosphere; Solar wind; interstellar medium; energetic neural ions; pickup ions; anomalous cosmic rays

Highlights:

- The physical processes and spacecraft missions related to heliosphere are reviewed.
- The recent progresses and major questions in the heliophysics are illustrated in terms of energetic neutral ions, pickup ions and anomalous cosmic rays.
- The Interstellar Heliospheric Probes and its main scientific objectives are outlined.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]