

外日球层的宽能段离子及其与湍动的耦合作用

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

(1. 北京大学地球与空间科学院, 100871, 北京; 2. 北京大学行星与空间科学研究中心, 100871, 北京)

摘要: 围绕“日球层太阳风及其与侵入星际风的作用”这个主题, 从目前认知、前沿问题、探测建议等3方面展开论述。日球层中的离子包括: 原初太阳风离子、源于星际风的拾起离子、超热离子。其中拾起离子和超热离子有来自局地星际物质侵入流的贡献。深空飞船探测到双模态遍布日球层: 日球层内边界、太阳风、行星际湍动、超热离子能谱等都存在双模态特征。前沿问题有3个方面: ①从未到达的领域, 即黄道面里的日球层尾部以及高纬的外日球层; ②曾经到达的领域, 但是没有探测的物理量, 例如外日球层中的拾起离子; ③曾经到达并探测, 但是形成机制不明, 例如超热离子的幂律谱及其双模态。针对上述前沿问题, 本文提出如下的建议: ①设计不同的飞行路径, 朝向不同的方位进行探测; ②携带宽能段的离子谱仪器包涵盖原初太阳风等离子体、拾起离子和超热离子; ③搭载高灵敏度磁强计测量外日球层的可压缩磁湍动。

关键词: 外日球层; 星际风; 粒子谱

中图分类号: P353

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)06-0574-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200064

引用格式: 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.

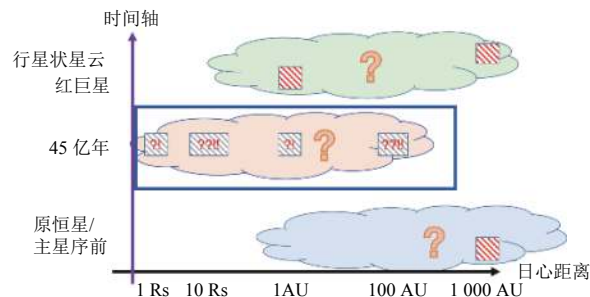
Reference format: HE J S, LIN R, CUI B, et al. Broad energy-band ions in the ourter heliosphere and their coupling with turbulence[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(6): 574-583.

引言

太阳系是目前唯一已知的孕育生命和人类文明的星系。在太阳系的四维时空坐标中, 当今太阳系的空间组成和结构及其时间演化, 是一个重要的命题(见图1)。通过探测外太阳系的小天体(没有明显的地质过程, 被认为是太阳系的活化石), 可以追溯太阳系的形成历史和早期特征^[1-5]。通过探测被太阳风所充斥的日球层的三维结构及其动态变化, 可以认识太阳风与局地星际介质的相互作用。当今的太阳系不再像太阳系的初期形成的行星星云那样稠密, 而是更接近真空状态, 尽管也充斥着太阳风等离子体、能量粒子(太阳能量粒子和宇宙线粒子)、尘埃粒子、小天体(小行星和彗星)、矮行星和行星。

早期的太阳活动(比如T-Tauri阶段, 可能比现在的太阳活动强1 000倍)所吹出的太阳风, 或许可以把原初太阳系星云的物质清扫运输到很远的地方(比如奥特云所在的距离)^[6-7]。所以太阳风的研究是一个认识太阳、日球层、太阳系及其与银河系的局地星际介质相互作用的重要方面。

人类要全面认识自身所处的太阳系, 就需要像环游地球那样, 周游太阳系开展全面的探测。在太阳系探测远景设想中, 认为需要在5个标志性的探测能力方面取得重要的突破: 宽能段的粒子探测、宽频段的电磁场测量、宽波段的光学观测、大角度的覆盖、远距离的抵达, 从而形成全向发展的探测能力雷达图(见图2)。



注: 太阳系在时空坐标系下的三大重要科学命题: 太阳系目前状态是什么(包括太阳风与星际介质相互作用到底如何)(淡红色云团及其中问号标记)、太阳系从哪儿来(太阳系的起源)(淡蓝色云团及其中问号标记)、太阳系将往何处去(太阳系的宿命)(淡绿色云团及其中问号标记)。

图1 太阳系的时空坐标系

Fig. 1 The Solar system in the space-time coordinate system

收稿日期: 2020-08-30 修回日期: 2020-10-21

基金项目: 民用航天技术预研空间科学资助项目(D020301); 国家自然科学基金资助项目(41874200)

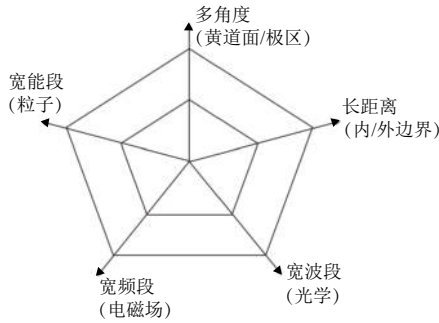


图2 5个维度的深空探测能力雷达图

Fig. 2 A radar chart illustrating five aspects of deep space exploration capabilities

在以往的探测中，每次任务相对于以往的探测任务在5个标志性的探测能力的某一（某些）方面都会有突破性，相应的也会带来科学上的发现。Ulysses飞船首次在日球层中飞跃太阳极区探测，发现高纬极区太阳风与低纬黄道面太阳风的差异^[8-12]。ACE（Advanced Composition Explorer）飞船在日地L1点晕轨道上首次实现对太阳风多种类、多价态离子进行宽能谱探测，揭示了双模态太阳风在离子冻结温度、不同第一电离势的离子丰度、超热离子能谱指数等方面的差异^[13-16]。磁层多尺度星座（Magnetospheric MultiScale, MMS）星座卫星首次实现电场矢量的测量，研究湍动和重联中的关键能量转换机制成为了可能^[17-19]。太阳与日光层探测器（Solar and Heliospheric Observatory, SOHO）飞船对太阳风源区进行宽波段的观测，发现了源区太阳风初始外流形成于色球网络结构上方的过渡区高度^[20]。“旅行者1号”（Voyager 1）“旅行者2号”（Voyager 2）飞船首次实现100 AU以远的探测，先后穿越了终止激波、内日鞘区、日球层顶等关键区域^[21-23]。

针对远距离的太阳系边缘探测深空探测任务，由于飞船服役周期长、服役数量非常有限，如何在有限的发射机会中、在载荷重量和数据传输率等限制条件下，充分考虑并发挥上述5个方面的探测能力，尤为必要。

1 宽能段粒子相空间密度谱

宽能段的粒子探测至关重要。不同来源的粒子具有不同的能量，不同能量的粒子也经历不同的物理过程（见图3）。源自太阳大气的太阳风等离子体属于低能粒子，能量在10 keV以下。虽然单个粒子的能量较低，但是由于相空间密度高，但是单位体积的动能和热能在能量密度中的贡献都是非常重要。尽管太阳风等离子体粒子在低能范畴，然而太阳风等离子体的整体流速却达几百千米每秒，远大于声速（在终止激波上游基本小于100 km/s），属于超声速范畴。作为一级近似，超声速的太阳风的动压和局地星际介质的热

压之间的平衡假设，决定了日球顶的日心距离乃至日球层的大小。超声速太阳风在日球层顶前需要急剧减速，从而产生了终止激波。大尺度的终止激波的存在，为粒子经过激波加速成为异常宇宙线（太阳系内持续产生的、能量最高的粒子种类）提供了必要的场所。

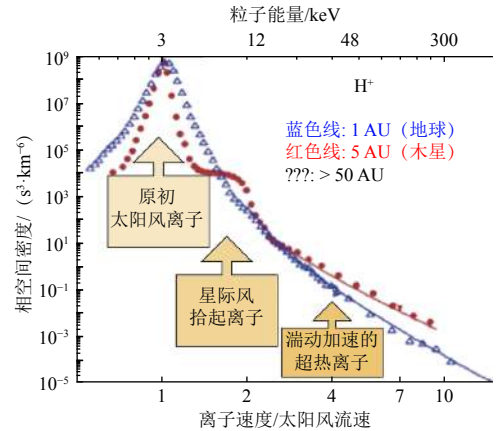


图3 宽能段的日球层离子相空间密度谱在不同日心距离处的变化^[24]
Fig. 3 The variation of the phase space density spectrum of the heliosphere ions in the wide energy range at different heliocentric distances^[24]

太阳风等离子体的速度分布在一定程度上可以用各向异性的麦氏分布来表示，存在垂直和平行温度的差异。通过探测分析垂直温度、平行温度、密度以及磁场强度随日心距离的变化，发现太阳风的膨胀不是（双）绝热膨胀的，比如质子垂直温度与磁场比值所表征的磁矩是随距离增加的，导致质子投掷角分布不像绝热机制预期的那样变得越来越趋近平行或者反平行分布^[25-28]。太阳风质子的非绝热膨胀也导致多方关系近似的状态方程中的多方指数 γ 偏离传统单原子的定压/定容比热的比值（ $-1.67 < \gamma < -1$ ）。太阳风质子的非绝热膨胀是日球层的重要物理现象，其背后的加热机制（比如湍动耗散加热）是日球层物理的关键科学问题和深空探测的重要科学目标^[29]。要解决/回答该关键问题，需要针对质子相空间密度开展高分辨率和高灵敏度的探测，获得偏离麦氏分布的扰动相空间密度的精确分布，并实施对应的场（电场和磁场）的高质量的探测，从而能有效分析场-粒子相关性耦合所导致的能量转换这一无碰撞等离子体湍动耗散的关键物理过程^[30]。

针对背景太阳风质子和氦离子的探测，根据其能量范围，采用的经典探测仪器是法拉第杯和静电分析仪。法拉第杯后端的金属电流收集板具有抗老化长寿命服役、量程大等特点，成功用于多项深空探测任务中^[31]。静电分析仪对低通量粒子具有高灵敏度探测、高角度分辨率等优点，适合探测向像风这样方向性比较好、数密度比较稀薄的无碰撞等离子体。法拉第杯和静电分析仪组合，可以优势互补，最大程度发挥探

测太阳风等离子体的能力。

拾起离子也是日球层宽能段粒子的重要组成。“拾起离子”所谓的“拾起”是指：电荷交换后的新生离子在太阳风的电磁场中，会绕着行星际磁场回旋运动，而且发生电场漂移，从而具有径向向外的速度分量，与太阳风同向运动，被太阳风拾起。拾起离子是太阳风等离子体与中性原子（中性原子可来源于侵入的星际介质流或者太阳系天体释放逃逸出来的气体）相互作用交换电荷的重要产物之一（另一产物是能量中性原子）^[32]。针对拾起离子成分的探测，能够探明星际介质的（轻）元素组成和丰度（比如H, He, O, Ar, N, Ne等元素）。

拾起效率随日心距离而增大：①在内日球层，行星际磁场方向与太阳风速度方向近似平行，不利于新生离子被拾起，拾起离子的流速和温度也远低于背景太阳风离子的流速和温度；②在外日球层，行星际磁场方向与太阳风速度方向近似垂直，新生离子容易被拾起，拾起离子的流速与背景太阳风流速相当，拾起离子的等效热速度由于与太阳风流速同数量级而明显高于背景太阳风离子热速度。随着太阳风的向外膨胀，其与中性原子发生电荷交换的次数越来越多，所产生和携带的拾起离子也越来越多，导致拾起离子对外日球层太阳风的改造也越来越明显，比如对太阳风热压的贡献比重变得非常显著^[33]。当然拾起离子与背景太阳风等离子体的混合，离不开湍动的作用。如果没有湍动，拾起离子无法在速度相空间中散射，无法有效和背景太阳风等离子体混合起来进而影响外日球层太阳风的状态。有了拾起离子及其受湍动的散射热化，才能导致太阳风的微弱减速和持续加热。

散射拾起离子的湍动可伴随背景太阳风的湍动由拾起离子自激发产生的波湍动。源自星际介质的拾起离子自从1985年被动态磁层粒子追踪探测器（Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers, AMPTE）上的超热能量离子分析仪（SUprathermaL Energy Ionic Charge Analyzer, SULEICA）首次探测到之后^[33]，其受湍动散射形成各向同性壳层分布需要多长时间（即散射效率）一直备受关注。经过Ulysses飞船上的太阳风离子成分谱仪（Solar Wind Ion Composition Spectromete, SWICS）的探测，发现拾起离子的速度分布没有预想的那样各向同性，而是仍保留各向异性的特征^[24]，说明湍动的散射效率低于预期，需要更长的散射平均自由程。湍动的散射效率取决于湍动的状态：2D结构成分所主导的湍动的散射效率低于slab波动成分所主导的湍动的散射效率^[33]。拾起离子自激发的波动主要表现为多普勒频移的离子回旋波，该波动

也证明磁强计可以间接探测拾起离子的活动^[23]。

超热离子是能量介于10 keV和1 MeV之间的离子，是太阳风等离子体离子和拾起离子能化的产物，是进一步加速成为高能异常宇宙线的种子粒子，在低能粒子和高能粒子之间起到重要的桥梁作用。超热离子如何由低能离子能化产生，产生后所形成的幂律谱的谱指数有何特征，谱指数是否普适（比如相空间密度谱随速度变化的谱指数是否在-5附近）^[15]？这些是有关超热离子的关键问题，也是探测超热离子的主要动机。针对日球层普遍存在的超热离子，湍动（特别是可压缩的湍动）被认为是低能离子能化形成超热离子的主要驱动源，湍动的磁场和电场导致离子在速度相空间中有效扩散，从而填充速度相空间中的高速区域。所以湍动场的测量是认识超热离子形成之谜的探测基础。

2 双模态的太阳风特征

太阳系边际探测能够在太阳系时空坐标系中获得对日球层的态势感知（见图4）。像“旅行者1号”和“旅行者2号”飞船那样远距离的深空旅行，通过时间换空间的方式，来获得日球层状态变量随全日心距离的变化剖面^[34]。这个日心距离剖面不是单纯某个时刻的空

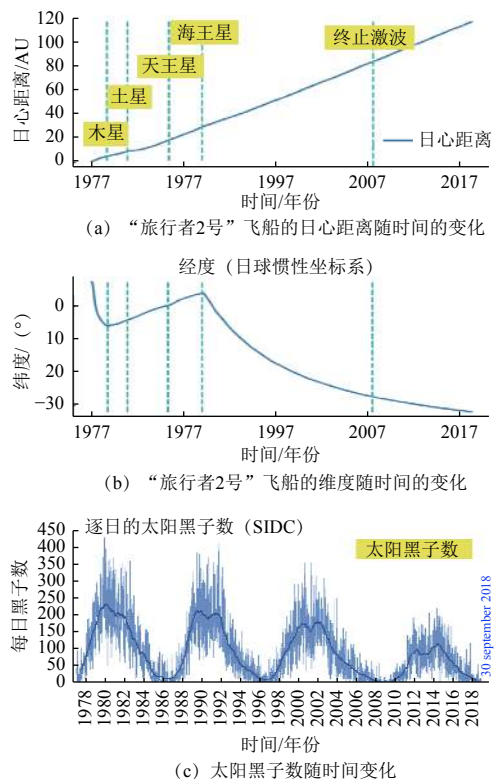


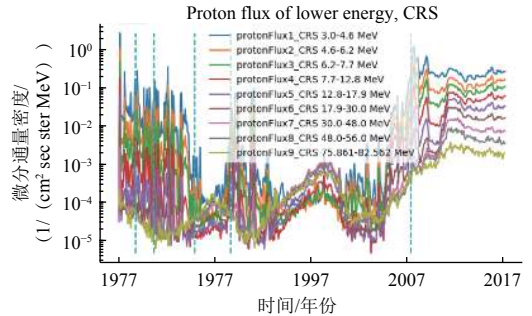
图4 “旅行者2号”飞船的日心距离、纬度随时间的变化

Fig. 4 The change of distance and latitude of Voyager 2 as well as sunspot number over time

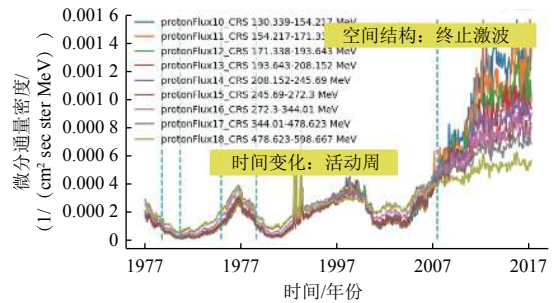
间剖面，而是记录了日球层系统对其内外边界活动变化的响应的信息，是一个时空复合条件下的状态感知（见图5）。所以面对探测数据进行解读时，必须区分出哪些是空间变化（太阳风向外膨胀），哪些是时间变化引起的（太阳活动高低年相位和太阳自转效应）。

为了实现有效的区分，离不开联合其他观测计划的支持，SOHO飞船、STEREO飞船以及我国的先进天基太阳天文台卫星（Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S）^[35]对太阳风源区全球分布的监测以及全球源区随时间变化的监测，离不开在行星际空间不同日心距离处（比如行星探测卫星）对太阳风的监测。

关于日球层太阳风的探测获得了一个非常基本但很重要的认知：双模态（bimodal states）。在源区，针对日冕辐射强度的明暗、日冕磁场的拓扑位型，可以把太阳风源区分为两大类（冕洞区、宁静区/活动区）。在行星际空间，针对太阳风的流速、数密度和温度等特征，分为高速太阳风和低速太阳风^[36]。双模态的行星际太阳风所伴随的湍动经常也是具有双模态（见图6）：高速流经常伴随强的阿尔芬性湍动，横向的扰动速度和扰动磁场具有很好的相关性，磁场强度的起伏则不是很大，Elsässer变量有主次之分，主变量



(a) CRS 载荷所探测到的较低能量的质子通量密度



(b) CRS 载荷所探测到的较高能量的质子通量密度

图 5 “旅行者1号”飞船上CRS载荷探测不同能档高能粒子的微分通量密度随飞行时间的变化

Fig. 5 Time variation of the differential flux density of energetic particles in different energy bands as detected by CRS onboard Voyager 1

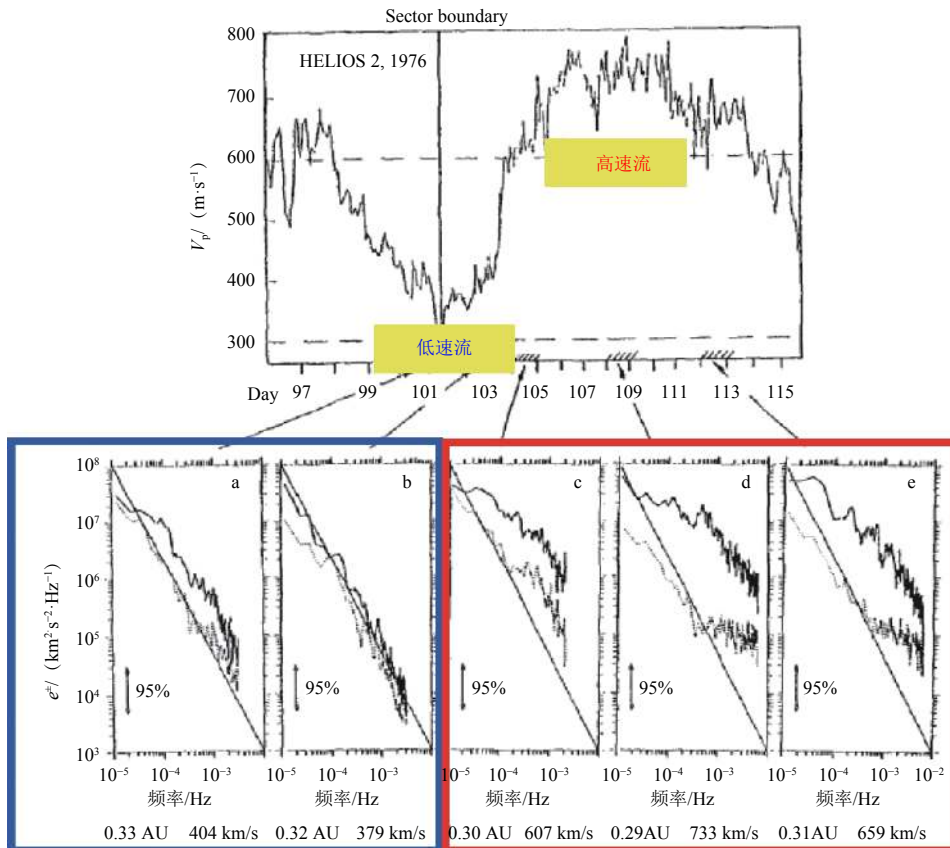


图 6 日球层太阳风及其湍动的双模态

Fig. 6 The dual modes of the solar wind and its turbulence in the heliosphere

的功率谱具有明显的三段谱的特征(即含能区、惯性区、耗散区),次变量的功率谱在低频段没有呈现出明显的含能区-惯性区的拐点特征,可能说明主变量对次变量的串级乃至功率谱轮廓的影响很大;低速流伴随可压缩性的湍动,湍动里不时表现出压力平衡结构的特征,即相邻区域的总压力(热压+磁压)基本相等^[37]。

高低速流及其伴随湍动的双模态,说明太阳风起源的多样性与复杂性,无法用以前的一维流管中阿尔芬波驱动太阳风的模型来简单地统一解释,需要拓展到三维模型中,而且需要自洽考虑太阳风等离子体热力学演化和波湍动演化相互耦合的过程。无独有偶,超热离子的能谱也具有双模态的特征:高速流中的超热离子能谱偏软(较少的离子被能化),而低速流中的超热离子能谱则相对较硬(更多的离子被能化)(见图7)^[38]。所以超热离子能谱没有出现有些学者预期的幂律谱指数唯一性的特征。究其原因,高低速流的超热离子能谱的双模态可能源于湍动的双模态,即低速流中的可压缩湍动(相对于高速流中的不可压湍动)对于离子能化形成超热离子更为有效。似乎高速流中的阿尔芬性不可压湍动的串级耗散,只对太阳风等离子体的热离子有明显的加热效应,而对进一步能化成超热离子则显得有些“无能为力”。搞清楚湍动与不同能量粒子之间的能化关系,是构建日球层物理的基石之一。

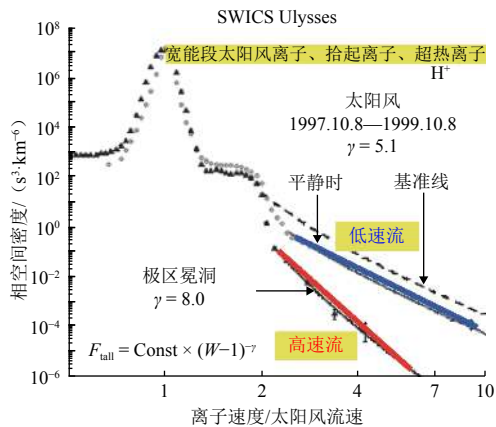


图7 宽能段离子的相空间密度谱在低速流和高速流中的差异

Fig. 7 Difference between the phase space density spectra of the wide-energy-band ions in the low-speed and high-speed flows

双模态的太阳风及其湍动在外日球层中是如何演化的?由于相邻的共转相互作用区边界上前向激波和后向激波相互碰撞而渗透到对方区域中,导致前向激波不仅压缩本CIR(Co-rotating Interaction Region)前面的低速流区,而且侵入前面的CIR去压缩其中的高速流区,后向激波不仅压缩本CIR后面的低速流区,而且侵入后面的CIR去压缩其中的低速流区。双模态

的太阳风及其湍动是否随着不同CIR的融合(产生Merged Interaction Region, MIR)而导致界限模糊,目前还缺乏专门的定量研究^[34]。双模态的太阳风及其湍动对终止激波及其下游日鞘层的影响是否也有差别?由于超热离子是加速形成异常宇宙线的种子粒子,超热离子在高速流和低速流中的能谱又不一样,这是否意味着低速流中的超热离子对形成异常宇宙线的贡献更大?这些问题都是需要通过探测外日球层来实现。

3 三维日球层结构、拾起离子产生与演化、湍动与超热离子形成

对比理想的探测能力雷达图和现实中的探测成就,发现有几个可以取得突破的地方。大角度的覆盖和远距离的抵达,这两个条件目前没有同时满足。“旅行者1号”和“旅行者2号”飞船都是飞向日球层顶鼻尖方位附近,没有原位探测去验证。

IBEX卫星在地球轨道上测绘了全天空的能量中性原子通量分布,发现了不曾预期的一个近乎封闭的狭窄的条带状结构(“IBEX-ribbon”)^[20]。条带状的能量中性原子被认为是来自日球层顶附近区域,其分布走向被推测是受局地星际磁场所控制。IBEX-ribbon一经发现,被之前笃定的半开放的日球层顶结构开始怀疑。在之前认为的结构中,日球层顶位型就类似地球的磁层顶位型,太阳风在尾巴方位与局地星际介质混合起来,而不像在鼻尖方位那样与局地星际介质有明显的界线。

关于日球层顶几何位型的猜想,日球层物理的开创者之一尤金·帕克(Eugene Parker)曾经做过两头极端的推测:如果局地星际介质的动压远大于局地星际介质的磁压,就好比超阿尔芬速的太阳风的动压远大于太阳风的磁压,这时日球层顶会是一个半开放的结构;反之,如果局地星际介质的动压远小于其磁压,则日球层会因为类似抗磁效应那样把局地星际磁场排除在外,而形成一个封闭的准球状结构^[1]。基于IBEX的能量中性原子的遥感测绘结果,开始猜测日球层顶是否处于Parker猜想的两头极端的中间状态,即尾巴方位既不是严格封闭,但也不是完全开放的。如果认为背景太阳风和拾起离子之间没有通过自激发或背景湍动有效地混合起来,而把背景太阳风和拾起离子作为两个独立的成分来建模,辅以适当的局地星际介质条件,会得到比较新奇的日球层形状,形似瘪掉的羊角面包状^[5](见图8)。要解决上述疑问,就要弄清楚日球层的三维形状,需要对日球层尾部和极区方位开展原位探测。

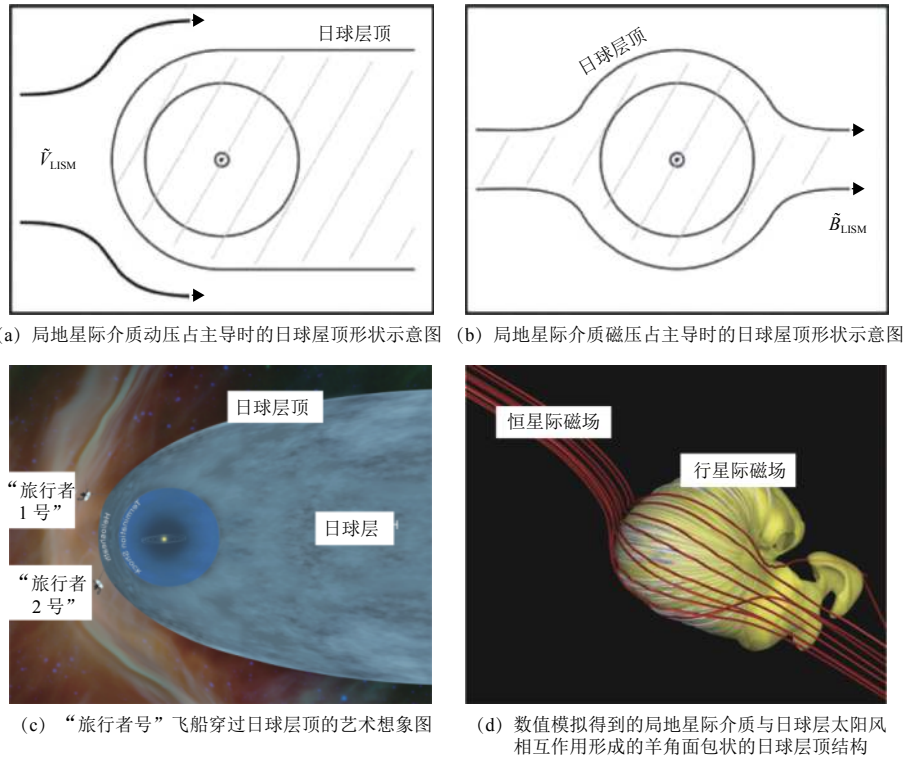


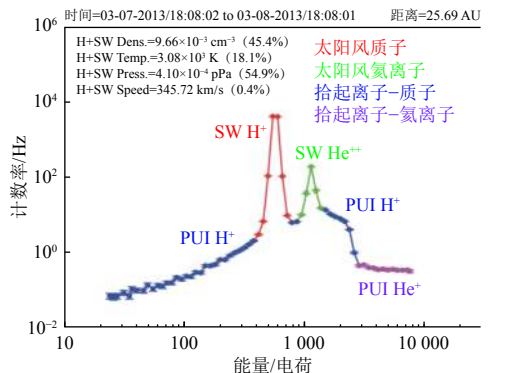
图 8 日球层的可能不同形状及其对应的不同的局地星际介质状态
 Fig. 8 Possible different shapes of heliosphere and their corresponding different states of local instellar

拾起离子作为外日球层太阳风热压的重要贡献来源，尚未被系统探测过。因为拾起离子的存在所导致的热压增强、声速增大是否会对终止激波的强度有明显减弱？拾起离子相对于背景太阳风的等离子体离子是否更容易在终止激波处受到明显加速，从而形成异常宇宙线？这些疑问都是“旅行者号”飞船越过终止激波后留下来的重要问题。拾起离子越过终止激波之后，在日球层鞘区乃至日球层顶附近，与侵入的星际介质流发生电荷交换所产生的能量中性原子对IBEX-ribbon的观测贡献多少？

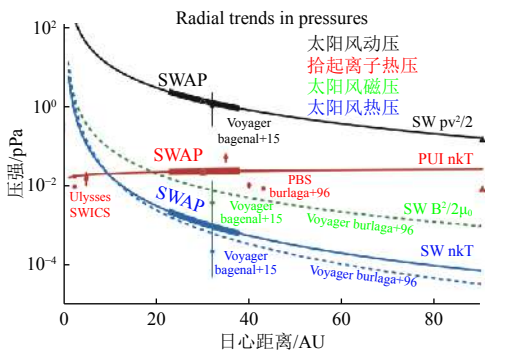
拾起离子探测器在设计视场时要充分考虑到拾起离子的初始动量方向，即星际介质来流方向，可以尽可能多地探测被完全拾起前的低能的新生离子。未来要想准确解释拾起离子的探测结果，需要开始对拾起离子的动力学行为（包括局地行为和全局行为）开展相应的理论研究，并对以往的拾起离子探测进行全过程的数据分析。经典的拾起离子速度分布模型（V&S模型）假设拾起离子产生后受湍动作用在太阳风参考系中快速散射形成各向同性的鞘状结构。基于该假设得到的拾起离子速度分布模型能用来拟合相当一部分的探测数据，说明湍动的散射效率可能确实比较高，但也有一部分探测的速度分布偏离模型拟合，出现偏差的物理原因仍待研究。目前关于外日球层中

拾起离子的理论，预测其数密度随径向距离是 r^{-1} 衰减。“新视野号”（New Horizons）飞船在20~40 AU附近的探测表明，拾起离子数密度的径向衰减速度可能比理论预测要慢一些（比如 $r^{-0.6}$ ）。

利用现有的片段数据，辅以幂函数的径向距离变化进行拟合并外推到终止激波上游（假设为90 AU），得到的推论：拾起离子数密度/背景太阳风数密度比值从30 AU实测的0.038上升到90 AU外推预测的0.14；拾起质子温度/背景太阳风质子温度的比值从30 AU实测的510倍上升到90 AU外推预测的2400倍；相应的拾起质子热压/背景太阳风质子热压的比值从30 AU实测的19倍上升到90 AU外推预测的350倍；拾起离子的热压在20 AU附近开始超过太阳风的磁压（见图9）。这些推论让研究者看到拾起离子在外日球层中的显著作用和不可替代的角色地位。虽然目前利用“新视野号”，获得了外日球层部分日心距离范围的拾起离子的数据，但是拾起离子的实测数据在终止激波前后仍然缺失，特别是日球层尾部和极区方位没有深空航天器到达。目前“新视野号”上的SWAP载荷（静电分析仪）的能量上限不到8 keV/q，无法探测完整的He拾起离子的速度分布，在今后的拾起离子载荷研制中，应扩大能量上限，从而涵盖He拾起离子的速度分布。



(a) “新视野号”飞船上 SWAP 载荷测量到的离子计数率随单位电荷能量的变化剖面



(b) 根据“新视野号”和“旅行者号”飞船探测, 以及模型假设, 所画出的不同压强随日心距离的变化以及相互之间大小

图9 “新视野号”飞船上SWAP载荷测量到的离子计数率随单位电荷能量的变化剖面和根据“新视野号”和“旅行者号”飞船探测, 以及模型假设, 所画出的不同压强随日心距离的变化以及相互之间大小随单位电荷能量的变化剖面

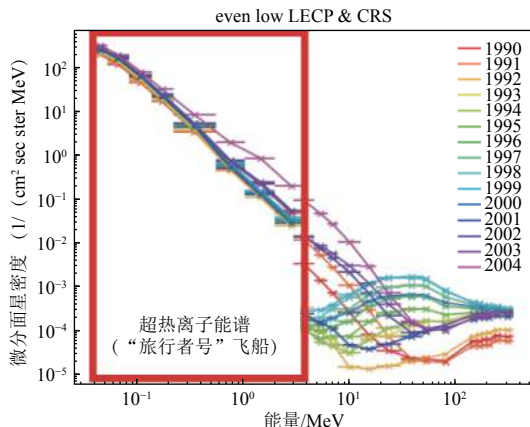
Fig. 9 Profile of ion count rate versus energy per charge measured by SWIP payload onboard New Horizons spacecraft, consisting of solar wind protons, solar wind helium ions, pickup protons and pickup helium ions and changes of different pressures with the heliocentric distance, according to the measurements from New Horizons and Voyager, as well as the model prediction

在外日球层, 根据拾起过程的物理图像, 拾起离子的速度分布很广, 速度的下限可以低至局地星际介

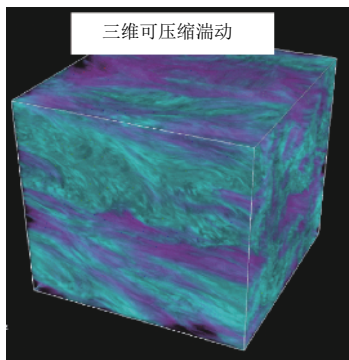
质流的流速达到20多km/s (对应能量为几个eV), 速度的上限可以高至两倍的太阳风流速达到上千千米每秒 (对应能量为10 keV量级)。所以未来的探测任务, 如果要想完整探测拾起离子的能谱轮廓, 需要涵盖的能量需从几个eV到几十个keV。拾起离子的探测和背景太阳风离子的探测可以整合在一个仪器上, 实现静电分析+飞行时间质谱分析的技术。仪器设置不同的开口, 其中窄的和宽的开口分别接收太阳风离子和拾起离子, 开口之后是静电偏置双层曲面用于选择不同单位电荷能量的离子, 再之后分别是无场飞行路径和符合探头部分。

超热离子是如何能化(加速)形成的, 这个问题不同的学者提出了不同的理论机制, 没有一个公认的答案。日球层中广泛存在CIR和MIR所伴随的激波被认为是加速离子的有效场所。因此, 有人提出扩散激波加速机制是超热离子幂律谱的形成原因(见图10)。但是扩散激波加速机制所形成幂律谱的指数是可变的, 随激波强度(压缩比)而变化, 这与在压缩区里观测到的幂律谱指数比较稳定的情况不太一致。也有人提出随机加速机制, 但是该机制一般给出的是指数函数的能谱形式。多个磁岛之间的磁重联也能够加速离子, 但是日球层太阳风中(包括激波下游鞘区)磁重联不是很常见, 所以磁重联加速可能不适用于解释超热离子幂律谱的形成机理。

从上述几个机制讨论中, 可以看到湍动都是起着非常重要的作用: 激波上下游的湍动导致离子多次穿越激波发生扩散激波加速; 湍动场导致场与粒子之间能量交换的随机性从而产生随机加速; 湍动串级的间歇性可能有利于相干性结构如磁岛的形成, 为磁岛间磁重联创造条件。前面这些机制没有考虑能化离子对湍动场的反馈作用, 对更高能量的离子而言, 这种忽



(a) 超热离子和能量离子能谱



(b) 三维可压缩湍动的磁流体力学模拟结果

图10 “旅行者号”飞船在不同年份对超热离子和能量粒子(宇宙线)的测量能谱和三维磁流体可压缩湍动的模拟结果显示多尺度的压力平衡结构
Fig. 10 The energy spectra of super-thermal ions and energetic ions measured by Voyager spacecraft in different years and the simulation results of 3D MHD compressible turbulence showing multi-scale pressure-balanced structures

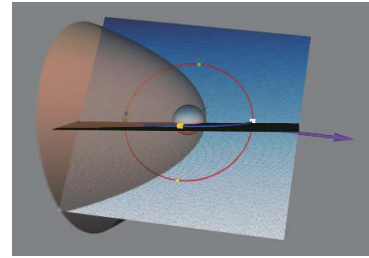
略是合理的，但是超热离子由于其对整体的数密度和热压贡献不能忽略，所以会反过来影响湍动场的可压缩性，比如原来是压缩的场会受到能化的超热离子增加而变成膨胀的场。一方面，超热离子中能量较低的离子接着参与局部的膨胀-压缩的循环，而能量较高的离子则有机会在空间中扩散开来；另一方面，能量较高的离子又是由能量较低的离子压缩能化后所形成的。综合这两方面的行为，有学者提出“泵加速”（pump acceleration）机制，可压缩湍动场的压缩-膨胀过程类似一个泵的运行，把部分离子能化到更高能量而且有扩散自由的状态。场和粒子的相互耦合作用（包括粒子对场的反馈作用），这是空间等离子体湍动物理研究的重要领域，目前在低能部分已经找到充实的场-粒子相互作用的证据，并得到了湍动的耗散率谱。然而要在超热离子能段，研究场-粒子耦合作用以及其中可能存在的泵加速机理（包括理论研究、探测设计和观测分析）。

4 日球层探测

日球层作为一个宜居性的星球层（habitable astrosphere），认识日球层的现状乃至其过去与未来，都将为人类在茫茫银河系和宇宙中探索宜居性星球层提供重要的参考线索。如同认识地球空间环境那样，要对不同方位的磁层进行原位探测，磁层顶鼻尖、侧翼边界层、磁尾等一个都不能落，这样才能认清地球空间环境的全貌，摸清地球空间受太阳风影响动态演化的机理。

日球层顶，作为从一个空间（行星际）跨越到另

一个空间（恒星际空间）的分水岭（见图11），能够从不同的方位穿过它，都将是人类探索茫茫宇宙空间的壮举，也会带领领略日球层顶不同方位（鼻尖、尾部、极区）的特色与差异。关键探测要素（特别是拾起离子）的缺位，已经成为恒星际空间探路者（“旅行者1号”和“旅行者2号”飞船）永远的遗憾，但也为后来者继续探秘外日球层太阳风与侵入星际风的相互作用机理与效应提供了继续前行的动力。



注：日球层结构包括日图球层顶（棕色面）、终止激波（红蓝渐变球面）、黄道面（近似平行于视线方向的平面）、银道面（蓝-白渐变面）、银心方向（紫色箭头）。

图 11 日球层结构示意图

Fig. 11 The schematic diagram shows the structure of the heliosphere

在浩瀚的日球层空间这个舞台上，离子作为主角之一，会不停地变换角色，比如从拾起离子膨胀冷却下来与背景太阳风离子混合，拾起离子被可压缩湍动能化形成超热离子，超热离子在终止激波处进一步加速形成异常宇宙线。要追踪离子在不同角色之间的串位，需要在宽能段范围里（比如携带一套宽能段离子能谱仪：可包括法拉第杯、静电分析仪、和固体半导体探测器等）测量它们（见表1）。

表 1 针对外日球层太阳风与侵入星际介质流的宽能段粒子测量的建议探测载荷和方案

Table 1 Possible payloads and schemes suggested for the measurement of wide-energy-band ions in the outer heliosphere and the intrusive interstellar medium flow

载荷	能量范围	探测对象	可选方案
太阳风法拉第杯	10 eV~12 keV	原初太阳风离子 (H ⁺ , He ⁺)	法拉第杯 (FC)
太阳风静电分析仪	100 eV~20 keV	原初太阳风离子；部分星际风拾起离子 (H ⁺ , He ⁺)	静电分析仪 (ESA)
拾起离子质谱仪	5 eV~80 keV	星际风拾起离子 (H ⁺ , He ⁺ , N ⁺ , O ⁺)；部分超热离子	静电分析仪 (ESA) + 飞行时间技术 (TOF) + 固态半导体 (SSD)
超热离子谱仪	30 keV~5 MeV	湍动加速的超热离子	(双层) 固态半导体 SSD

“新视野号”航天器作为外日球层探测任务因为没有携带磁强计，所以无法真正开展与“场-粒子耦合作用”这一基本物理过程有关的“超热离子受可压缩湍动能化加速形成”的前沿课题。因此“探测行星际乃至恒星际中微弱的磁场及其湍动”应该成为未来太阳系边际探测任务设计中所面对的众多探测要素中的必选项。专门针对太阳系边际开展抵达探测的设想，是驱动深

空探测能力迈上新台阶的重要源泉，也被认为将是我国建设航天强国的重要标志^[39]。

5 结束语

本文围绕外日球层太阳风及其与侵入星际风的作用从目前认知、前沿问题、探测建议等3个方面展开论述，目前认知是基于当前的探测能力和探测结果，关

于太阳风和星际风相互作用的理想探测模式要求能够同时探测相互作用前后的所有种类粒子。这些粒子的能量分布范围很宽,形成宽能段的粒子能谱。对离子而言,在3个不同的能段包括三种不同的粒子:原初太阳风离子的麦氏能谱、星际风拾起离子的能谱平台和能谱截断、超热离子的幂律能谱。拾起离子和超热离子的能谱有来自局地星际介质侵入流的贡献。

给出了面临的前沿问题有3个方面:①从未到达的领域,即黄道面日球层尾部的外日球层太阳风以及高纬外日球层太阳风从没有被探测过,其与日球层鼻尖方位的太阳风差异如何不得而知;②曾经到达的领域,但是没有探测的物理量,例如外日球层太阳风中的拾起离子;③曾经到达并探测,但是形成机制不明,超热离子的幂律谱及其双模态。

要回答前沿问题,通过探讨尝试给出建议:①设计不同的飞行路径,朝向不同的方位进行探测;②携带覆盖宽能段的离子谱仪器包涵盖原初太阳风等离子体、拾起离子和超热离子3个能段;③搭载高灵敏度磁强计测量弱磁场的可压缩湍动。

致 谢

本文撰写受到北京大学、中国科学院国家空间科学中心、探月与航天工程中心、北京空间飞行器总体设计部等多家单位的老师们的帮助,在此对涂传诒、王赤、李晖、郭孝城、吴伟仁、王倩、庞涪川、康炎、黄江川、孟林智等专家表示感谢!

参 考 文 献

- [1] BURCH J L, MOORE T E, TORBERT R B, et al. Magnetospheric multiscale overview and science objectives[J]. *Space Science Reviews*, 2016, 199(1-4): 5-21.
- [2] BURLAGA L F, NESS N F. Merged interaction regions observed by Voyagers 1 and 2 during 1998[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, 105(A3): 5141-5148.
- [3] DRAKE J F, SWISDAK M, FERMO R. The power-law spectra of energetic particles during multi-island magnetic reconnection[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, 763(1): 1-5.
- [4] FAHR H J, SCHERER K. Diamagnetic solar wind ions changing the MHD conditions at the heliospheric termination shock[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110(A2): 1-5.
- [5] FISK L A, GLOECKLER G. Acceleration of suprathermal tails in the solar wind[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 686(2): 1466-1473.
- [6] FISK L A, GLOECKLER G. The case for a common spectrum of particles accelerated in the heliosphere: observations and theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(11): 8733-8749.
- [7] GAN W Q, ZHU C, DENG Y Y, et al. Advanced Space-based Solar Observatory(ASO-S): an overview[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 1-9.
- [8] GLOECKLER G. Ubiquitous suprathermal tails on the solar wind and pickup ion distributions[C]//Solar Wind Ten: Proceedings of the Tenth International Solar Wind Conference. [S. l.]: American Institute of Physics, 2003.
- [9] GLOECKLER G, SCHWADRON N A, FISK L A, et al. Weak pitch angle scattering of few MV rigidity ions from measurements of anisotropies in the distribution function of interstellar pickup H⁺[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(19): 2665-2668.
- [10] HE J S, ZHU X, VERSCHAREN D, et al. Spectra of diffusion, dispersion, and dissipation for kinetic alfvénic and compressive turbulence: comparison between kinetic theory and measurements from MMS[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 898(1): 43.
- [11] INTRILIGATOR D S, SISCOE G L, MILLER W D. Interstellar pickup H⁺ ions at 8.3 AU: Pioneer 10 plasma and magnetic field analyses[J]. *Geophysical research letters*, 1996, 23(16): 2181-2184.
- [12] KALLENBACH R, GEISS J, GLOECKLER G, et al. Pick-up ion measurements in the heliosphere—a review[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2000, 274(1-2): 97-114.
- [13] KASPER J C, ABIAD R, AUSTIN G, et al. Solar wind electrons alphas and protons(SWEAP) investigation: design of the solar wind and coronal plasma instrument suite for solar probe plus[J]. *Space Science Reviews*, 2016, 204(1-4): 131-186.
- [14] KÖÖP L, HECK P R, BUSEMANN H, et al. High early solar activity inferred from helium and neon excesses in the oldest meteorite inclusions[J]. *Nature Astronomy*, 2018, 2(9): 709-713.
- [15] LEE M A, FAHR H J, KUCHAREK H, et al. Physical processes in the outer heliosphere[J]. *Space Science Reviews*, 2009, 146(1-4): 275-294.
- [16] LEWIS J. Physics and chemistry of the solar system[M]. San Diego: Academic Press, 2012.
- [17] LIVADIOTIS G, MCCOMAS D J, SCHWADRON N A, et al. Pressure of the proton plasma in the inner heliosheath[J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 762(2): 134.
- [18] MARSCH E, MHLHÄUSER K H, SCHWENN R, et al. Solar wind protons: Three - dimensional velocity distributions and derived plasma parameters measured between 0.3 and 1 AU[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1982, 87(A1): 52-72.
- [19] MCCOMAS D J, BAME S J, BARRACLOUGH B. L, et al. Ulysses' return to the slow solar wind[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(1): 1-4.
- [20] 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.
- [21] MCCOMAS D J, ZIRNSTEIN E J, BZOWSKI M, et al. Interstellar pickup ion observations to 38 AU[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 233(1): 1-14.
- [22] MCCOMAS D J, CHRISTIAN E R, SCHWADRON N A, et al. Interstellar mapping and acceleration probe(IMAP): a new NASA mission[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(8): 1-54.
- [23] 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.
- [24] SUESS S T. The heliopause[J]. *Reviews of Geophysics*, 1990, 28(1): 97-115.
- [25] PARKER E N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields[J]. *The Astrophysical Journal*, 1958, 128: 664-676.
- [26] PARKER E N. The Stellar-Wind Regions[J]. *The Astrophysical Journal*, 1961, 134: 20-27.
- [27] 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.

- [28] 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.
- [29] STONE E C, FRANSEN A M, MEWALDT R A, et al. The advanced composition explorer[J]. *Space Science Reviews*, 1998, 86(1-4): 1-22.
- [30] 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.
- [31] STONE E C, CUMMINGS A C, MCDONALD F B, et al. Voyager 1 observes low-energy galactic cosmic rays in a region depleted of heliospheric ions[J]. *Science*, 2013, 341(6142): 150-153.
- [32] TU C Y, MARSCH E. MHD structures, waves and turbulence in the solar wind: Observations and theories[J]. *Space Science Reviews*, 1995, 73(1-2): 1-210.
- [33] TU C Y, ZHOU C, MARSCH E, et al. Solar wind origin in coronal funnels[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 519-523.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] YAO S, HE J S, MARSCH E, et al. Multi-scale anti-correlation between electron density and magnetic field strength in the solar wind[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 728(2): 1-6.
- [37] ZANK G P, MATTHAEUS W H, BIEBER J W, et al. The radial and latitudinal dependence of the cosmic ray diffusion tensor in the heliosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, 103(A2): 2085-2097.
- [38] ZHAO L, ZURBUCHEN T H, FISK L A. Global distribution of the solar wind during solar cycle 23: ACE observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(14): 1-4.
- [39] 吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究[J]. *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 Informations*, 2019, 49(1): 1-16.

作者简介:

何建森(1981-), 男, 研究员, 主要研究方向: 空间等离子体湍流、空间等离子体磁重联、太阳风的起源与演化。

通讯地址: 北京大学物理楼北楼429室(100871)

E-mail: jshept@pku.edu.cn

Broad Energy-Band Ions in the Outer Heliosphere and Their Coupling with Turbulence

HE Jiansen^{1,2}, LIN Rong^{1,2}, CUI Bo^{1,2}, WANG Linghua^{1,2}, ZONG Qiugang^{1,2}

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

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

Abstract: This paper focuses on the theme of “solar wind in the heliosphere and its interaction with the invading interstellar wind”, and discusses it from three aspects: current cognition, frontier problems, and exploration suggestions. The ions in the heliosphere include primary solar wind ions, pick-up ions converted partially from interstellar wind, and super-thermal ions. Among them, pick-up ions and super-thermal ions have their contribution from the local interstellar medium flow. The deep-space spacecraft have detected the prevalence of two modes in the heliosphere: the inner boundary of the heliosphere, the solar wind, the interplanetary turbulence, and the energy spectrum of the super-thermal ions. There are three types of cutting-edge issues: ① the territory never reached, that is, the tail of the heliosphere in the ecliptic plane and the outer heliosphere at high latitudes; ② the territory that has been reached, but some key variables have not been detected, such as the picked-up ions in the outer heliosphere; ③ the territory and variables that have been reached and detected, but the formation mechanism is unknown, such as the power-law spectrum and dual-mode of the super-thermal ions. To address these problems, we put forward the following suggestions: ① to design different flight paths and detect in different directions; ② to carry ion spectra instruments with wide energy band, covering the primary solar wind plasma, the pick-up ions, and the super-thermal ions; ③ to carry high sensitivity magnetometer to measure the compressible magnetic turbulence in the outer heliosphere.

Keywords: outer heliosphere; interstellar wind; particle spectrum

Highlights:

- This paper points out that the broad energy-band ion spectrum and its coupling with the turbulence is one of the key windows to understand the interaction process between the heliosphere and the local interstellar medium.
- This work provides a brief review of the current cognition of the heliosphere, summarizes three related cutting-edge issues, and proposes the corresponding exploration suggestions for the future program.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]