

太阳系边缘的能量粒子探测

王玲华^{1,2}, 宗秋刚^{1,2}, 任杰^{1,2}

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

摘要: 太阳系能量粒子的起源、加速及传播一直是物理学和空间物理学的重要前沿课题。太阳系边缘探测将为研究这一前沿课题提供至关重要的信息。在太阳系边缘区域, 源自太阳系的能量粒子主要分为两类: 太阳风超热粒子和能量中性原子(Energetic Neutral Atoms, ENA)。这些能量粒子对太阳系边缘的形态和动力学过程会有很强的调制作用。但是, 现在仍然缺乏对太阳风超热粒子的高精度就位探测和对太阳系边缘的高精度ENA成像这些关键观测手段。基于STEREO卫星上的STE仪器对太阳风超热粒子的高精度探测和对地球磁层的高精度ENA探测, 建议采用低能量阈值的新一代半导体探测器, 结合已成熟的调制狭缝成像系统, 实现对太阳系边缘(和顺访行星的磁层)的高精度ENA成像和对太阳风超热粒子的高精度就位探测。这些高精度观测将会为认识太阳系与星际介质之间相互作用的动力学演化和太阳系能量粒子的起源、加速及传播这些前沿课题提供关键信息。

关键词: 能量粒子; 太阳系边缘; 空间粒子探测

中图分类号: P35

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)06-0567-07

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200061

引用格式: 王玲华, 宗秋刚, 任杰. 太阳系边缘的能量粒子探测[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(6): 567-573.

Reference format: WANG L H, ZONG Q G, REN J. Detection of energetic particles in the outer heliosphere and its boundaries[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(6): 567-573.

引言

银河系中的星际介质(大多是中性气体)以约26 km/s的速度相对于太阳流动^[1], 也称为星际介质风。日球层可看作是由太阳风在星际介质的空间中吹出的巨大气泡。20世纪Baranov等提出的太阳风模型^[2-4], 预期是由太阳风与星际介质的相互作用所形成的日球层(太阳系)边界区域可能是一个双激波结构(见图1), 并认为在终端激波处, 上游的太阳风动能将大部分转化为下游等离子体的热能。

然而, 最近的卫星观测结果显示大部分的太阳风动能转换成拾起粒子或其它能量粒子的能量而不是用于加热冷等离子体, 这与上述理论模型的预期并不符合。例如, “旅行者1号”(Voyager 1)和“旅行者2号”(Voyager 2)飞船在日球层(太阳系)边界区域附近的就位探测^[5-6]和星际边界探索者(Interstellar Boundary EXplorer, IBEX)飞船在地球轨道附近利用能量中性原子对日球层边界区域的遥测^[7]均显示, 在日球层边界区域的动力学平衡和能量转换过程中, 能量粒子很可

能起着支配性或至关重要的作用。

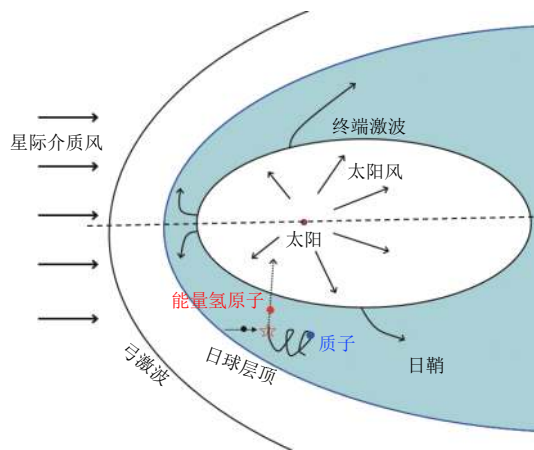


图1 日球层的双激波结构的示意图

Fig. 1 Illustration of the heliosphere

在太阳系边缘中, 源自太阳系的能量粒子主要分为两类: 太阳风超热粒子和能量中性原子。这些能量粒子对太阳系边缘的形态和动力学过程会有很强的调制作用。但是“旅行者号”飞船并没有携带观测能量粒

收稿日期: 2020-08-30 修回日期: 2020-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41774183, 41861134033, 41421003); 民用航天“十三五”技术预先研究日球层边缘探测重要科学问题资助项目(D020301)

子的探测器, 这些关键观测数据的缺失限制了对日球层太阳风与星际介质之间相互作用动力学过程的认识。其次, 目前太阳风超热粒子的起源、加速过程和机制还不清楚或有很大争议, 因此还无法推测出在日球层边界区域中的粒子的完整能谱, 这也局限了对日球层与星际介质之间的相互作用过程的认识。

本文详细介绍了太阳风超热粒子在日球层普遍存在的成分: 超热电子和超热离子。超热电子粒子对日球层边界区域的调制作用, 在现有可知的探测任务的基础上, 提出了太阳系边缘能量粒子的探测需求。给出了太阳系边缘能量粒子探测器的具体测量参数, 这样可以有针对性地设计探测器及其携带的科学仪器, 扩展人类未知的深空探测领域。

1 太阳风超热粒子

在超过等离子体热能的能量范围上, 如果粒子的通量远大于符合麦克斯韦分布的热成分的通量, 那么这些粒子被称为超热粒子。超热粒子在日球层中持续普遍存在的成分, 被称为太阳风超热粒子(电子和离子)。

1.1 太阳风超热粒子种类

1.1.1 太阳风超热电子

在行星际1 AU处观测到的太阳风电子由3部分组成^[8, 22]: ①热麦克斯韦(温度约为10 eV)主体成分, 占总等离子体密度约90%~95%; ②等效温度更高(约为50~80 eV)的halo和strahl成分, 占总等离子体密度的约0.1~0.5; ③能量高于~2 keV的superhalo成分。在1 AU处的行星际电子速度分布函数如图2所示, 太阳风超热电子包括能量约0.1~1.5 keV的halo和strahl成分, 以及能量高于~2 keV的superhalo成分。这些超热电子为研究发生在太阳上和行星际空间中的普遍粒子加速过程提供了重要的信息。

观测显示能量为~100 keV和1~2 keV伏特的太阳风电子通常为沿行星际磁力线向外运动的strahl束流成分和近似各向同性的halo成分^[9-12]。strahl和halo成分的能谱通常均呈现为一个卡帕(Kappa)分布函数^[13-14]。Maksimovic等^[13]和Stverak等^[15]发现strahl成分的数密度和太阳风电子总数密度之比会随径向距离的增加而减小, 而halo成分的相对数密度则随径向距离的增加而增大, 并且strahl和halo之合的相对数密度几乎不随径向距离而改变。

基于这些观测结果, Feldman和Salem等认为沿磁力线向外运动的strahl束流成分源自从日冕逃逸的热电子^[16-17], 而近似各向同性的halo成分可能是由于strahl电子在行星际空间中受到散射而形成的。很多研究建立了理论模型用于解释strahl和halo电子的形成^[18-21]。但

是, 目前还没有理论可以解释strahl和halo电子的卡帕分布的形成, 以及这些电子的卡帕指数与等效温度之间的正相关的成因^[14]。

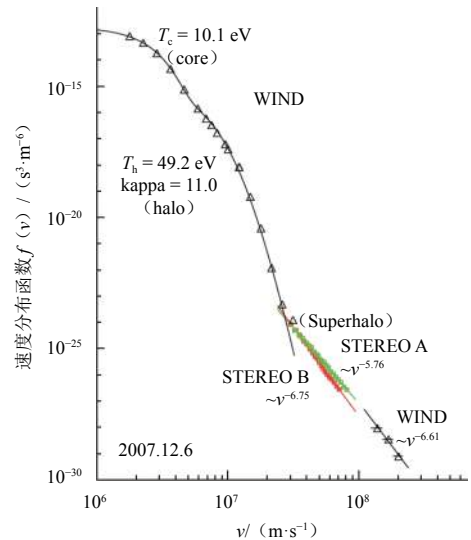


图2 在1 AU处的行星际电子速度分布函数^[8]

Fig. 2 Quiet-time interplanetary electron velocity distribution function observed by WIND at 1 AU^[8]

WIND/3DP和STEREO/STE的观测研究^[8, 22]显示: superhalo电子的能谱通常呈现为一个幂律谱(图2): $J \propto E^{-\beta}$, 其谱指数 β 随空间和时间在1.5~3.7之间变化。这些研究还发现superhalo电子似乎不随太阳活动和太阳风参数变化。此外, Yang等^[23]发现平静时期superhalo电子的投掷角分布近似各向同性。

目前仍然不清楚superhalo电子的起源、加速机制与过程。观测研究发现superhalo电子持续地存在于太阳风中, 它们的参数与太阳黑子数、耀斑、太阳活动区、太阳风参数、日冕物质抛射、流相互作用区等现象没有相关性^[8, 22]。Wang等^[22]提出superhalo电子可能源自与太阳风源区相关的加速过程, 例如, 纳耀斑^[24]或者源自行星空间中的粒子加速和输运过程(例如, 波粒相互作用)。Yang等^[25]提出在太阳风源区中, 电子可以被磁重联产生的电场加速, 形成一个谱指数约为1.5~2.4的幂律能谱。Yoon和Zack等^[26-27]提出在行星际空间中的电子加速过程也可以产生一个幂律能谱。

1.1.2 太阳风超热离子

卫星的就位观测显示在行星际太阳风中, 超热离子主要包括拾取(pickup)离子和尾端(tail)离子成分, 图3为Ulysses飞船在4.8 AU处观测的数据, 拟合得到的平静时期太阳风超热质子的速度分布函数。进入到日球层内的星际介质风中的中性原子可以由于光电离、与太阳风质子发生电荷交换以及与太阳风电子发生碰撞而变成离子, 被太阳风磁场拾取, 称为“拾取”

离子。拾取离子通常具有单电荷状态，典型的速度范围为从0~2倍的太阳风速度。拾取离子对太阳风的特性有重要的调制作用^[28]。超热离子尾端成分位于能谱的尾部，一直持续到 > 100 MeV/u^[29]。超热离子尾端的源可能包括太阳高能粒子事件、共转相互作用区高能粒子、异常宇宙线、银河宇宙线、被加热的太阳风、拾取离子和星际粒子^[30]。

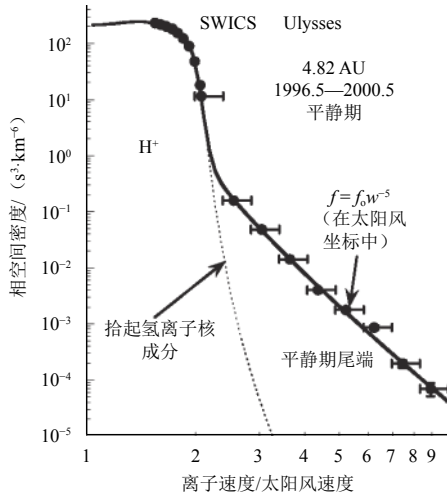


图3 Ulysses飞船在4.8 AU处观测的平静时期太阳风超热气质的速度分布函数^[31]

Fig. 3 Quiet-time interplanetary proton velocity distribution function observed by Ulysses at 4.8 AU^[31]

Gloeckler等^[31-32]发现在平静太阳风中，超热离子尾端通常呈现为一个谱指数不变的幂律分布（图3）： $f \propto v^{-5}$ （速度分布函数）或 $J \propto E^{-1.5}$ （微分通量能谱）。Fisk等^[33]发现在行星际中超热气质的显著增强部分具有一个共同的 v^{-5} 幂律谱，它们总是伴随着一个扩展的压缩区而不是行星际激波。此外，观测到的这些超热气质的能谱谱指数与扩散激波加速理论的预测也不符合。

很多观测研究给出了不同的结果^[34]。例如，Giacalone等^[35]发现在行星际激波附近，能量约为47 keV的超热气质的最大通量几乎总是发生在激波经过飞船的5 min内，而且在一些激波的下游中并没有超热气质的通量增强，表明这些超热质子通常伴随着行星际激波而不是下游的压缩区。此外，Dayeh等的观测研究^[36]显示超热离子尾端的速度分布函数（或能谱）并不总是符合一个单幂律分布，而且速度谱的谱指数会在4.5~6.5之间变化。

目前解释超热离子尾端起源和加速的理论模型主要分为相互冲突的两类：①超热离子尾端源自在行星际空间中的持续加速^[37-40]；②超热离子尾端是由被共转相互作用区、日冕物质抛射激波、耀斑等加速的各类

高能粒子中的低能离子组成^[41-43]。这两类理论模型都只能解释超热离子的部分观测特性。例如，理论①可以解释谱指数不变的情况，而理论②可以解释变化的能谱指数。因此，目前还不清楚超热离子尾端的起源、加速机制与过程。

1.2 超热粒子对日球层边界区域的调制作用

卫星的观测显示超热粒子在太阳风与星际介质风的相互作用过程中有很重要的调制作用^[44-45]。“旅行者1号”和“旅行者2号”飞船分别在日心距离94 AU和84 AU处穿过终止激波进入到下游日鞘内，对上游和下游内的等离子体（小于1 keV）和高能（大于40 keV）离子进行了首次的就位观测。这些观测表明，上游太阳风能量密度的20%加热了下游日鞘内的等离子体，而其余的80%则很可能加速了日鞘内中等能量超热粒子。由于缺乏对这些超热气质的观测，目前对太阳风与星际介质风相互作用的动力学过程的认识仍然处于半知半解的状态。

星际风中的中性成分与太阳风质子（或离子）之间的电荷交换是在日球层边界区域中发生的重要物理过程^[28,46]。电荷交换后产生的中性原子（ENA）携带着源离子的信息离开日球层边界区域，其中一部分可能会在星际介质中与离子发生二次电荷交换^[47]。IBEX飞船对日鞘内能量为0.2~6 keV的氢原子的全景成像^[7]发现了一个近圆形的能量氢原子窄带（约为20°半峰宽度）。“卡西尼”（Cassini）飞船在土星附近对日鞘内能量为5~55 keV的氢原子的遥测也发现了一个能量氢原子带（~100°半峰宽度），但不是窄带结构^[48]。Cassini观测到的高能氢原子带相对于IBEX观测到的低能氢原子带的倾斜夹角是纬度约为25°和纬度约为30°。导致这些观测的不同原因还是未知的。

综上所述，关于太阳风超热气质的形成机制及其对日球层边界的影响还远未得到解决，新的探测结果也在不断更新人们的认识并带来新的挑战。

2 太阳系边缘的能量粒子探测需求

太阳系能量粒子的起源、加速及传播一直是空间物理学的重要前沿课题。太阳系边缘探测将为研究这一前沿课题提供至关重要的信息。太阳风超热粒子对太阳系边缘的形态和动力学过程会有很强的调制作用。此外，利用能量中性原子的高精度全局性成像也是研究太阳系边缘的形态和动力学过程的关键观测手段。但是，现在仍然缺乏相应的高精度探测手段。20世纪60年代研制出的第一代ENA成像是基于ENA的薄膜剥离技术，让能量中性原子（Energetic

Neutral Atoms, ENA) 重新成为带正电粒子再进行分析。随着ENA探测技术的发展, 增加了一个衍射过滤器, 目的是把极紫外/紫外辐射的背景过滤掉, 提高传感器探测的ENA与极紫外/紫外光子的比率。但是, 衍射过滤器把极紫外/紫外辐射过滤掉 10^5 后, ENA的通量也会下降20倍。此外, 过去的ENA成像仪采用了类似小孔成像的直接成像技术, 几何因子比较小, 需要积分较长的时间或足够多的计数才能完成一次有效成像。而且, 对于低能(小于30 keV)的ENA探测器大多都是利用通道倍增器和微通道板加衍射过滤器, 探测效率很低。代表性的卫星项目包括20世纪70年代的IMP (International Monitoring Platform) 7/8和ISEE (International Sun-Earth Explorer) 1、21世纪初的IMAGE (Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration) 和TWINS (Two Wide-angle Imaging Neutral-atom Spectrometers), 以及2008年发射的IBEX。因此, 需要发展新一代探测仪器实现对能量粒子的高精度测量。

基于STEREO (Solar TERrestrial Relations Observatory) 卫星上的STE (Supra Thermal Electron instrument) 仪器对太阳风超热粒子的高精度探测和对地球磁层的高精度ENA探测, 建议采用低能量阈值的新一代半导体探测器, 结合已成熟的调制狭缝成像系统及数据反演技术, 实现对太阳系边际(和顺访行星的磁层)的能量中性原子高精度成像和对太阳风超热粒子的高精度就位探测。如图4所示, 新一代能量粒子探测器可以借鉴RHESSI (Reuven ramaty High Energy

Solar Spectroscopic Imager) 卫星对硬X射线和伽马射线高精度成像设计, 采用调制栅格成像系统, 这种由256个探测器像素组成的阵列既满足了成像原理和高精度成像的要求, 又可以实现仪器的小型化。为了实现太阳风超热粒子和ENA成分的同时探测, 借鉴美国CINEMA (CubeSat for Ions, Neutrals, Electrons, & MAGnetic fields) 微小卫星上搭载的STEIN仪器, 增加一个电场偏转系统(如图5所示), 通过选取适当的偏转电压和合适高度的准直偏转腔室, 使得电子向一侧而离子向另一侧。表1则给出了太阳系边际能量粒子探测器的具体测量参数。这些高精度观测将会为认识太阳系与星际介质之间相互作用的动力学演化和太阳系能量粒子的起源、加速及传播这些前沿课题提供关键信息。

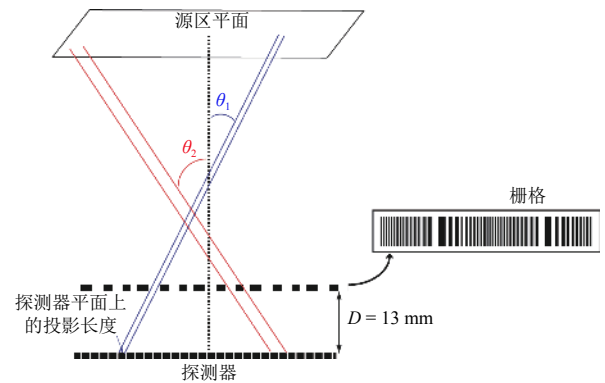
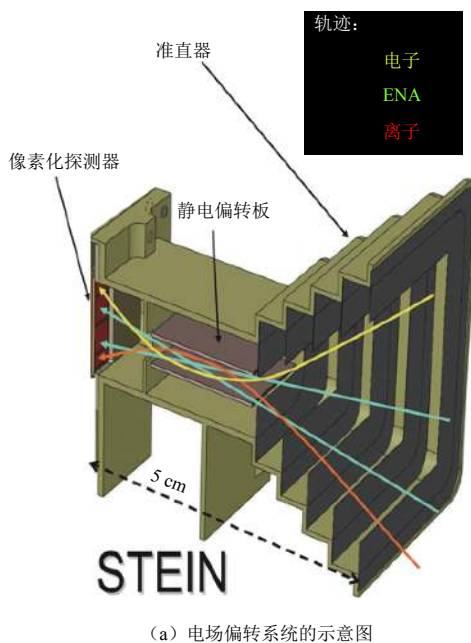
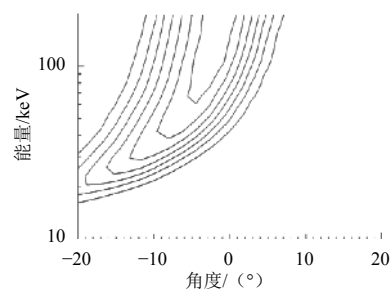


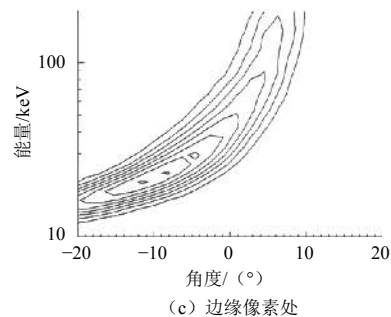
图4 ENA成像仪的调制栅格成像系统示意图
Fig. 4 Schematic of the bi-grid subcollimators in ENA Imager, showing representative incident ENA with respect to the collimator axis



(a) 电场偏转系统的示意图



(b) 中间像素处的带电粒子偏转响应



(c) 边缘像素处

图5 STEIN仪器的电场偏转系统^[49]

Fig. 5 Schematic of electrostatic deflection system in STEIN instrument^[49]

表 1 太阳系边缘能量粒子探测器的设计参数

Table 1 Characteristics of the energetic particle instrument for the heliospheric boundary explorer

粒子种类	H, O	e	p
能量范围/keV	4~200 (H) 8~250 (O)	2~200	4~200
能量分辨率/keV	1	1	1
能档数	16	16	16
采样率/s ⁻¹	60	10	10
几何因子/cm ² sr	>1	>1	>1
视场角/ (°)	10 × 45	180 × 20	180 × 20

3 结 论

在太阳系边缘中, 太阳风超热粒子对太阳系边缘的形态和动力学过程会有很强的调制作用。但是, 现在仍然缺乏对太阳风超热粒子的高精度就位探测和对太阳系边缘的高精度 ENA 成像这些关键观测手段。本文建议采用低能量阈值的新一代半导体探测器, 结合已成熟的调制狭缝成像系统, 以实现太阳系边缘的高精度 ENA 成像和对太阳风超热粒子的高精度就位探测。这些观测将会为认识太阳系与星际介质之间相互作用的动力学演化过程和太阳系能量粒子的起源、加速及传播这些前沿课题提供重要信息。

参 考 文 献

- [1] AXFORD W I. The interaction of the solar wind with the interstellar medium[R]. USA: NASA, 1972.
- [2] BARANOV V B. Gasdynamics of the solar wind interaction with the interstellar medium[R]. *Space Science Reviews*, 1990, 52: 89-120.
- [3] BARANOV V B, MALAMA Y G. The model of the solar wind interaction with the local interstellar medium: numerical solution of self-consistent problem[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 15157-15163.
- [4] BARANOV V B, MALAMA Y G. Effect of local interstellar medium hydrogen fractional ionization on the distant solar wind and interface region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 14755-14761.
- [5] 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.
- [6] Stone E C, CUMMINGS A C, MADONALD F B, et al. An asymmetric solar wind termination shock[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 71-74.
- [7] 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.
- [8] WANG L H, LIN R P, SALEM C, et al. Quiet-time interplanetary ~2-20 keV superhalo electrons at solar minimum[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, 753(1): 1-6.
- [9] Montgomery M D, BAME S J, HUNDHAUSEN A J, et al. Solar wind

- electrons: vela 4 measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 73(15): 4999-5003.
- [10] ROSENBAUER H, SCHWENN R, MARSCH E, et al. A survey on initial results of the HELIOS plasma experiment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 42(6, 19): 561-580.
 - [11] PILIPP W G, MIGGENIEDER H, MONTGOMERY M S, et al. Characteristics of electron velocity distribution functions in the solar wind derived from the helios plasma experiment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(A2): 1075-1092.
 - [12] PIERRARD V, MAKSIMOVIC M, LEMAIRE J. Core, Halo and Strahl electrons in the solar wind[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2001, 277: 195-200.
 - [13] MAKSIMOVIC M, ZOUGANELIS I, CHAUFRAY J Y, et al. Radial evolution of the electron distribution functions in the fast solar wind between 0.3 and 1.5 AU[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(A9): 1-9.
 - [14] TAO J W, WANG L H, ZONG Q G, et al. Quiet-time suprathermal (~0.1-1.5 keV) electrons in the solar wind[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 820(1): 1-10.
 - [15] STVERAK S, MAKSIMOVIC M, TRAVNICEK P M, et al. Radial evolution of nonthermal electron populations in the low-latitude solar wind: helios, cluster, and Ulysses observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, 114(A5): 1-15.
 - [16] FELDMAN W C, ASBRIDGE J R, BAME S J, et al. Upper limits for the solar wind He+ content at 1 AU[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(13): 1808-1812.
 - [17] MAKSIMOVIC M, BALE S D, VAIVADS A, et al. A radio and plasma wave experiment for the solar orbiter mission[C]//Second Solar Orbiter Workshop. Athens, Greece: ESA, 2007.
 - [18] SCUDDER J D, OLBERT S. A theory of local and global processes which affect solar wind electrons 2. experimental support[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(A11): 6603-6620.
 - [19] MAKSIMOVIC M, PIERRARD V, RILEY P. Ulysses electron distributions fitted with Kappa functions[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(9): 1151-1154.
 - [20] PIERRARD V, MAKSIMOVIC M, LEMAIRE J. Electron velocity distribution functions from the solar wind to the corona[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(A8): 17021-17032.
 - [21] YOON P H, RHEE T, RYU C M. Self-consistent formation of electron κ distribution: 1. Theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, 111(A9): 1-10.
 - [22] WANG L H, LIU G, HE J S, et al. Solar wind ~20-200 keV superhalo electrons at quiet times[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2015, 803(1): 1-6.
 - [23] YANG L, WANG L H, LI G, et al. The angular distribution of solar wind superhalo electrons at quiet times[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2015, 811(1): 1-6.
 - [24] PARKER E N. Nanoflares and the Solar X-Ray Corona[J]. *The Astrophysical Journal*, 1988, 330: 474-479.
 - [25] YANG L P, WANG L H, HE J S, et al. Numerical simulation of superhalo electrons generated by magnetic reconnection in the solar wind source region[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, 15(3): 348-362.
 - [26] YOON P H, ZIEBELL L F, GAELZER R, et al. Langmuir turbulence and suprathermal electrons[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 173: 459-

- 489.
- [27] ZANK G P, HUNANA P, MOSTAFAVI P, et al. Diffusive shock acceleration and reconnection acceleration processes[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 814(2): 137-160.
- [28] ZANK G P. Pickup ion-mediated plasma physics of the outer heliosphere and very local interstellar medium[J]. *Geoscience Letters*, 2016, 3(22): 1-17.
- [29] MEWALDT R A, MASON G M, GLOECKLER G, et al. Long-term fluences of energetic particles in the heliosphere[C]//Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference. Hamburg, Germany: The Auspices of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), 2001.
- [30] MASON G M, DESAI M I, MAZUR J E, et al. Energetic particles accelerated by shocks in the heliosphere: what is the source material?[C]//The Physics of Collisionless Shocks: 4th Annual IGPP International Astrophysics Conference. [S. l.]: IGPP, 2005.
- [31] GLOECKLER G, FISK L. Acceleration of low - energy ions in the quiet - time solar wind and at the termination shock[J]. *AIP Conference Proceedings*. [S. l.]: American Institute of Physics, 2006.
- [32] GLOECKLER G, FISK L A, MASON G M, et al. Formation of power law tail with spectral index-5 inside and beyond the heliosphere[C]//AIP Conference Proceedings. [S. l.]: American Institute of Physics, 2008.
- [33] FISK L A, GLOECKLER G. Particle acceleration in the heliosphere: implications for astrophysics[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 173: 433-458.
- [34] MASON G M, GLOECKLER G. Power law distributions of suprathermal ions in the quiet solar wind[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 172: 241-251.
- [35] GIACALONE J. Energetic charged particles associated with strong interplanetary shocks[J]. *Astrophysical Journal*, 2012, 761(1): 28-40.
- [36] DAYEH M A, DESAI M I, DWYER J R, et al. Composition and spectral properties of the 1 AU quiet-time suprathermal ion population during solar cycle 23[J]. *Astrophysical Journal*, 2009, 693: 1588-1600.
- [37] FISK L A, GLOECKLER G. Acceleration of suprathermal tails in the solar wind[J]. *Astrophysical Journal*, 2008, 686: 1466-1473.
- [38] ZHANG M. Acceleration of suprathermal particles by compressional plasma wave trains in the solar wind[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2010, 115(A12): 1-12.
- [39] DRAKE J F, SWISDAK M, FERMO R. The power-law spectra of energetic particles during multi-island magnetic reconnection[J]. *Astrophysical Journal*, 2012, 763(1): 1-13.
- [40] ZANK G P, LE ROUX J A, WEBB G M, et al. Particle acceleration via reconnection processes in the supersonic solar wind[J]. *Astrophysical Journal*, 2014, 797(1): 1-18.
- [41] LIVADIOTIS G, MCCOMAS D J. Beyond kappa distributions: exploiting Tsallis statistical mechanics in space plasmas[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2009, 114(A11): 1-21.
- [42] JOKIPII J R, LEE M A. Compression acceleration in astrophysical plasmas and the production of $f(v) \sim v^{-5}$ spectra in the heliosphere[J]. *Astrophysical Journal*, 2010, 713(1): 475-483.
- [43] SCHWADRON N A, DAYEH M A, DESAI M I, et al. Superposition of stochastic processes and the resulting particle distributions[J]. *Astrophysical Journal*, 2010, 713(2): 1386-1392.
- [44] 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.
- [45] RICHARDSON J D. Weak termination shock decelerates upstream solar wind but heliosheath plasma is cool[J]. *Nature*, 2008, 454: 63-66.
- [46] GRUNTMAN M, ROELOF E C, MITCHELL D G, et al. Energetic neutral atom imaging of the heliospheric boundary region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(A8): 15767-15781.
- [47] MCCOMAS D J, FUSELIER S A, SCHWADRON N A. Local interstellar medium: six years of direct sampling by IBEX[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, 220(2): 1-11.
- [48] KRIMIGIS S M, MITCHELL D G, ROELOF E C, et al. Imaging the interaction of the heliosphere with the interstellar medium from Saturn with Cassini[J]. *Science*, 2009, 326(5955): 971-973.
- [49] GLASER D L, HALEKAS J S, TURIN P, et al. STEIN (SupraThermal Electrons, Ions and Neutrals), a new particle detection instrument for space weather research with cubesats[C]//23rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. [S. l.]: AIAA, 2009.

作者简介:

王玲华(1977-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 日球层能量粒子、空间能量粒子探测器。

通讯地址: 北京大学物理大楼北楼416室(100871)

电话: (010)62767193

E-mail: wanglhwang@pku.edu.cn

Detection of Energetic Particles in the Outer Heliosphere and its Boundaries

WANG Linghua^{1,2}, ZONG Qiugang^{1,2}, REN Jie^{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: The origin, acceleration and propagation of energy particles in the heliosphere/solar system has always been one of key frontier topics in physics and space physics. An exploration of the outer heliosphere and local interstellar medium will provide crucial information to investigate this frontier topic. In its boundaries, the energy particles originating from the heliosphere are mainly divided into two groups: solar wind suprathermal particles and energy neutral atoms (ENAs). These energy particles can strongly mediate the morphology and dynamics of the outer boundaries of heliosphere. However, key observations is still lacking, such as in-situ detection of solar wind suprathermal particles and ENA imaging in the outer boundaries of heliosphere. Based on the high-resolution detection of solar wind suprathermal particles and high-resolution ENA imaging of the Earth's magnetosphere by the STE instrument on the STEREO satellite, a new-generation semiconductor detectors with low energy thresholds is proposed, combined with the RHESSI's imaging concept to achieve the ENA imaging and in situ observations of suprathermal particles with high time, energy and angle resolutions in the outer heliosphere. These observations will provide key information to understand the dynamic evolution of the interaction between the heliosphere and local interstellar medium, as well as the origin, acceleration, and propagation of energy particles in the heliosphere.

Keywords: energetic particles; outer boundaries of the heliosphere; energetic particle detection in space

Highlights:

- Observations, theories and unsolved problems about solar wind suprathermal particles are systematically illustrated.
- The crucial role of superthermal particles in modulating the outer heliosphere and its boundaries is summarized.
- A new-generation energetic particle instrument is proposed to provide high-resolution measurements of energetic particles in the outer heliosphere and its boundaries.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]