0254-6124/2023/43(2)-0340-12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Weijie, SHEN Guohong, ZHANG Shenyi, ZHANG Xianguo, YE Yizhong. Design and Simulation of the Space-based TOF×E Medium Energetic Ion Detector (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(2): 340–351. DOI:10.11728/cjss2023.02.220310027

一种基于 TOF×E 方法的空间中能离子探测器设计与仿真*

张伟杰[1,2,3,4] 沈国红[1,3,4] 张珅毅[1,2,3,4]
张贤国[1,3,4] 叶依众[1,3,4]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

摘 要 对空间中几十 keV 到几 MeV 的中能离子进行成分、能谱和角分布进行测量，具有重要的科学价值和应用意义。中国在载人登月等深空探测计划中明确提出了对中能离子的探测需求，但当前尚未掌握中能离子测量技术。本文提出了一种基于 SEE TOF×E 方法的中能离子探测器方案，方案包括复合材料二次电子薄膜、电极、位置灵敏 MCP 探测器和 SSD 等核心部件的设计，可同时实现对 5 个方向的中能离子和 4 个方向的中能电子的测量。结合目前空间粒子探测载荷可实现的硬件时间分辨率、能量分辨率和仿真计算结果，可以发现，该设计可以在 40 keV～5 MeV 能量范围实现中能离子能谱测量；并能够对 40 keV～5 MeV 的 H 离子，45 keV～5 MeV 的 He 离子，130 keV～5 MeV 的 O 离子和 240 keV～5 MeV 的 Fe 离子进行离子成分分辨；同时可实现对 20～500 keV 的电子进行能谱测量。

关键词 飞行时间法，质量分辨率，中能离子，中能电子，深空探测

中图分类号 P353，P354

Design and Simulation of the Space-based TOF×E Medium Energetic Ion Detector

ZHANG Weijie[1,2,3,4] SHEN Guohong[1,3,4] ZHANG Shenyi[1,2,3,4]
ZHANG Xianguo[1,3,4] YE Yizhong[1,3,4]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

* 国家重点研发计划项目资助（2020YFE0202100）

2022-03-09 收到原稿，2022-12-09 收到修定稿

E-mail：zhangweijie@nssc.ac.cn. 通信作者 E-mail：zsy@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

3(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration*, *Beijing* 100190)

4(*Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology*, *Beijing* 100190)

Abstract This paper introduces a designing scheme of a medium energetic ion detector based on SEE TOF×E method, including key components such as secondary electron emission foils, electrodes, position sensitive MCP detector, and SSDs, which can simultaneously achieve both 5-directional medium energetic ions and 4-directional medium energetic electrons measurements. Based on the hardware time resolution and energy resolution limits that can be achieved by the current space-based particle detection payload, this paper presents a simulation analysis of the energy range and ion species resolution of the design scheme. The results show that this design scheme can achieve ion spectrum measurement in the energy range of 40 keV to 5 MeV, and electron spectrum measurement from 20 to 500 keV as well. And it can also perform ion component resolution for proton at 40 keV to 5 MeV, He ions at 45 keV to 5 MeV, O ions at 130 keV to 5 MeV, and Fe ions at 240 keV to 5 MeV.

Key words Time-of-flight method, Mass resolution, Medium energetic ion, Medium energetic electron, Deep space exploration

0 引言

空间中能离子通常指空间中几十 keV 至几 MeV 的重离子，能量介于等离子体和高能粒子之间。中能离子广泛存在于地球、行星磁层、日球层和行星际空间中。测量空间中能离子具有非常重要的科学价值和应用意义。中能离子可以用于对磁场的拓扑结构边界及其动态进行遥感测量[1,2]，用于研究不同的粒子加速机制[3–5]，还是包括太阳风粒子传输[6]、磁暴时环电流离子注入[7]等物理过程的示踪剂。中能离子探测器在多种空间任务中都是重要的粒子探测载荷。

20 世纪 70 至 80 年代，Gloeckler 和 Wilken 等[8–12]研发出基于二次电子的 TOF×E 中能离子探测器，简称SEE TOF×E(Secondary Electron Emission TOF×E)探测器。SEE TOF×E 探测器性能优异，具有良好的离子成分分辨能力，可覆盖等离子体探测器和高能粒子探测器的能量范围空缺部分，是空间中能离子探测器的主流方案[8]。SEE TOF×E 探测器在 AMPTE[13], Galieo[14], ACE[15], Cluster[16], MESSENGER[17], New Horizon[18], Van Allen Probe[19], JUNO[20], MMS[21], Parker Solar Probe[22], Solar Orbiter[23] 等多个空间任务中均有搭载。

目前中国已成熟掌握空间等离子体[24–26]、中能质子、中能电子[27]和高能粒子[28]探测器技术，研制的探测器已分别搭载在双星计划[24,25]、风云系列气象卫星[29]、北斗导航卫星、嫦娥系列卫星[30–32]、天宫系列、空间站、火星探测等空间任务中并开展了相应的探测。如 2020 年升空的天问一号火星探测器搭载的火星离子与中性粒子分析仪[33]可对 2.8 eV ～ 25.8 keV 范围的 H^+, He^{2+}, He^+, O^+, O_2^+, CO_2^+离子进行分辨；2022 年发射的空间站问天舱搭载的能量粒子探测器可对 5～300 MeV 的质子和 8～300 MeV/n 的重离子($Z = 2$～26)进行成分分辨和能谱测量。

中国尚未掌握中能离子探测技术。目前，中国有一系列的空间科学和深空探索任务正在论证[34–36]，其中包括载人登月、行星探测、太阳探测、太阳系边际探索等深空计划。对于这些空间任务，从科学需求和工程需求出发，中能离子探测器都是有着十分重要意义的载荷。因此，中能离子成分测量技术是目前中国亟需填补的空间粒子探测技术空白。基于此背景，依托于载人月球探测工程科学研究与空间应用系统“关深”阶段任务，中国首次开展对 TOF×E 中能离子探测器关键技术攻关。本文从该探测器的基本原理出发，提出了方案设计，进而对探测器的关键性能指标满足度进行了仿真分析。

1 TOF×E 中能离子探测器测量原理

离子的能量 E 和质量 m 存在以下简单关系：

$$E=\frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow m=2E\frac{1}{v^2}. \tag{1}$$

如图 1 所示，通过 start 和 stop 两组定时探测器可以测量出离子穿过特定距离 l 的时间差 τ，从而可以获得离子的飞行速度$v=l/\tau$。另外利用固体探测器(Solid State Detector, SSD)可以测出离子剩余能量 E_{SSD}，通过修正可获得离子入射能量

$$E=\Delta E+E_{\mathrm{SSD}}. \tag{2}$$

其中ΔE为离子在时间探测器中的能量损失。在实际测量中，根据离子的 TOF 与 E 测量值的不同即可分辨离子种类。

2 探测器设计

任务对该探测器设定的关键性能指标为，可对 30～300 keV 的电子、50 keV～5 MeV 的质子和重离子进行能谱测量和种类分辨，角分辨 15°。

基于以上性能需求，探测器采取多方向 SEE TOF×E 探测方案，共包含 9 个测量方向。其中 5 个方向用于测量中能离子(方向 1, 3, 5, 7, 9)，另外 4 个方向用于测量中能电子(方向 2, 4, 6, 8)。整体结构如图 2 所示，离子和电子测量方向互相交错相邻，既保证二者的总张角覆盖，也有利于互相进行干扰修正。

探测器主体由准直器、飞行时间测量系统和 SSD 能量测量系统构成。准直器包含 9 个方向的开口，限制 9 个方向的粒子入射张角。准直器开口内安装一片准直薄膜，用于光子和低能粒子屏蔽。飞行时间测量系统位于探测器中部，包括 5 个离子测量方向的 Start 和 Stop 薄膜，以及共用的一组电极系统和位置灵敏 MCP 探测器。能量测量系统则包括 9 组 SSD 探测器，分别测量中能离子和中能电子。

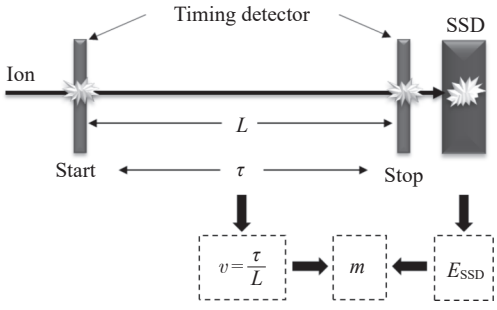

图 1 TOF×E 方法基本原理

Fig. 1 Fundamental of TOF×E method

2.1 离子测量

5 个离子测量方向分别由准直器、2 片二次电子薄膜(Start 和 Stop)、电极系统、位置灵敏 MCP 探测器和 1 片 SSD 探测器构成，为典型的 SEE TOF×E 探测器(见图 3)。当离子通过准直器入射到探测器内，先后穿过 Start 和 Stop 薄膜，并触发二次电子，通过电极加速和偏转到 MCP 上，分别触发 Start 和 Stop 定时信号，用于测量飞行时间 τ。离子穿过薄膜后入射到 SSD 中并将能量全部沉积在灵敏区内转化成电信号，对电信号进行幅度分析可获得离子的剩余能量 E_{SSD}。再利用 TOF×E 方法得到离子种类和能量等信息。

2.1.1 薄膜

每个离子测量方向包括 Start 和 Stop 两片二次电子发射薄膜。薄膜采用复合材料 C/polyimide/Al/C，总厚度不超过 100 nm。其中，polyimide 材料主要提供稳定的机械强度和抗辐照能力，并用于屏蔽 UV，避免 UV 通过产生光电子等方式干扰离子探测；C 材料是常用的二次电子发射材料，可提供稳定的二次电子发射产额；Al 材料用于屏蔽可见光，避免其触发 SSD 干扰离子测量。

2.1.2 电极设计

电极用于提供内部电场，将薄膜表面释放的二次电子引导到 MCP 探测器，触发定时信号。本探测器电极系统主要包括加速电极和偏转电极两部分，其结构如图 4 所示。

通过施加合适的电压，加速电极与薄膜形成正电压差，将二次电子从初始能量几 eV 加速到约 1 keV，

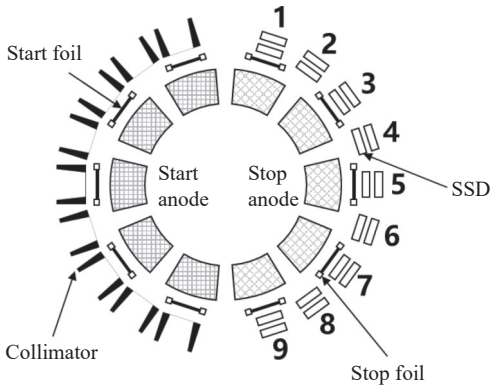

图 2 TOF 中能离子探测器探头系统组成

Fig. 2 Compositions of TOF medium energetic ion detector head

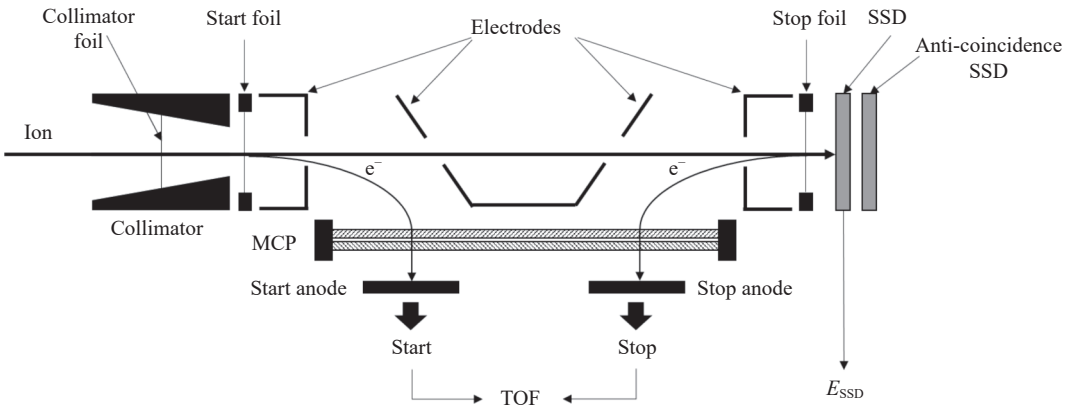

图 3　中能离子测量原理

Fig. 3　Principle of medium energetic ion measurement

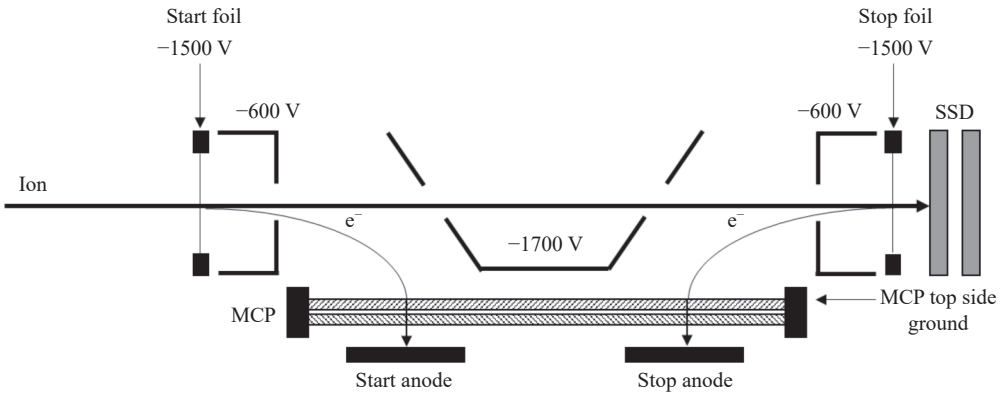

图 4　电极结构设计

Fig. 4　Design of the electrodes structure

并引向探测器内部; 偏转电极施加负电压形成偏转电场, 将二次电子偏转向 MCP 探测器表面。

2.1.3　位置灵敏 MCP 探测器

位置灵敏 MCP 包括 MCP 叠层和位置灵敏阳极两部分, 位于探测器中部, 用于接收二次电子, 产生 Start 和 Stop 定时信号。位置灵敏 MCP 探测器结构如图 5 所示, 二片 MCP 形成 chevron 型叠层, 提供足够的增益; 位置灵敏阳极位于 MCP 叠层下方, 用于接收经过 MCP 增益后的二次电子云, 输出电荷脉冲, 并通过电子学处理成定时信号。

位置灵敏阳极设计方案如图 6 所示。其中, 位置灵敏阳极分为 Start 和 Stop 两组, 每组包含 5 个接收面, 分别对应 5 个离子探测方向。当离子从某个方向入射, MCP 可接收到该方向发射出的二次电子, 转化成电子云被相应的阳极片接收, 分别输出 Start 和 Stop 信号。通过输出信号的接收面可判断离子入射方向, 通过 Start 和 Stop 信号时间差, 可以测量出离子在两片薄膜之间的飞行时间 τ。

2.1.4　SSD 探测器

每个离子测量方向包括两片 SSD, 第一片为灵敏区厚度为 300 μm 的硅探测器, 用于测量离子剩余能量 E_{SSD}。入射离子通过三层薄膜后会损失发射能量, 尤其是低能端能损更加明显, 50 keV 的入射质子到达 SSD 时能量约剩余 20 keV。因此, 5 片用于测量中能离子的 SSD 需要采用薄死层(50 nm)和低噪声设计, 保证足够低的起测能量和足够好的能量分辨率。第二片 SSD 作为反符合探测器, 用于判断并剔除高能离子的干扰(见图 7)。

2.2　电子测量

4 个电子测量方向由准直器和 2 片 SSD 探测器构成。准直薄膜起挡光作用, 为典型的望远镜探测器构造(见图 8)。由于没有 Start 和 Stop 薄膜, 入射电

子不会产生定时信号，可通过电子在 SSD 灵敏区内沉积能量并输出的能量信号直接实现能谱测量。电子方向的第一片 SSD 探测器表面镀一层 2 μm 厚的铝屏蔽层，排除质子和重离子的干扰。第二片 SSD 为反符合探测器，用于判断高能端电子是否全沉积于第一片 SSD，排除高能粒子干扰，获得干净的中能电子能谱。

3 主要性能仿真分析

3.1 离子测量性能

3.1.1 起测能量

SEE TOF×E 方法的起测能量可延伸至几十 keV，这是该方法相较其他中能离子测量方法的一大优势。任务对离子测量范围的要求的下限是 50 keV，因此起测能量是设备重要的性能指标。起测能量取决于薄膜对入射离子产生的能损和 SSD 的系统能量阈值。一般而言，应用于空间探测器上的硅半导体探测器的沉积能量阈值约为 10 keV，本文分析时将 10 keV 沉积能量作为测量阈值。利用 SRIM 仿真计算每种离子的入射能量和其在 SSD 灵敏区中沉积能量的变化曲线，沉积能量等于 10 keV 的入射能量即为起测能量。

通过 SRIM 计算，可以得到每一种离子穿透薄膜和 SSD 死层后沉积能量超过 10 keV 的概率曲线，结果如图 9 所示，

仿真计算结果可以得到 4 种离子的起测能量（见表 1），可知对离子的测量范围下限可达 40 keV（质子）。

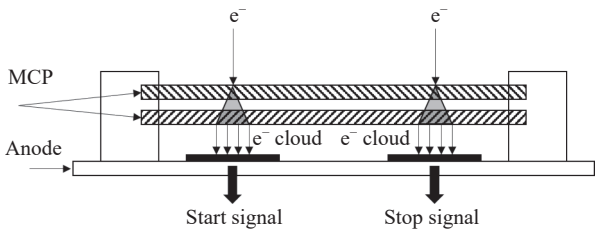

图 5 位置灵敏 MCP 探测器结构

Fig. 5 Structure of position-sensitive MCP detector

3.1.2 质量分辨率

探测器的离子种类鉴别能力通常以质量分辨率

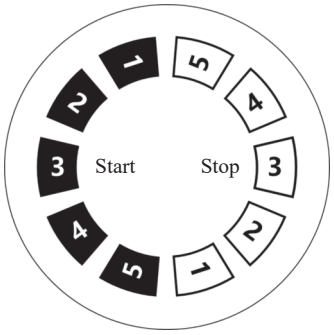

图 6 位置灵敏阳极设计

Fig. 6 Design of position-sensitive anode

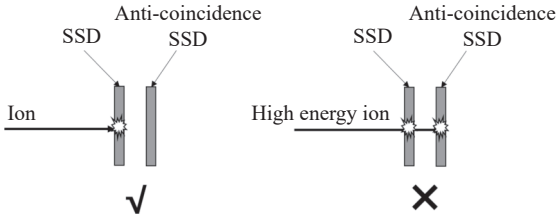

图 7 利用反符合探测器排除高能离子干扰

Fig. 7 High energy ion elimination using anti-coincidence SSD

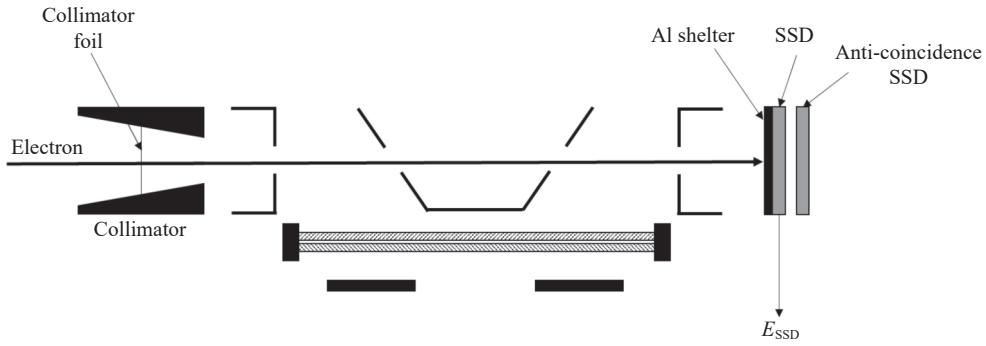

图 8 电子测量原理

Fig. 8 Principle of medium energetic electron measurement

$\frac{\sigma_m}{m}$(也有写作 $m/\Delta m$)考量,$\frac{\sigma_m}{m}$越小($m/\Delta m$ 越大)表示离子种类分辨能力越好。

TOF×E 方法的质量分辨率$\frac{\sigma_m}{m}$主要受三个要素影响,即能量分辨率$\frac{\sigma_E}{E}$、飞行时间分辨率$\frac{\sigma_\tau}{\tau}$、飞行距离误差$\frac{\sigma_l}{l}$。关系式如下:

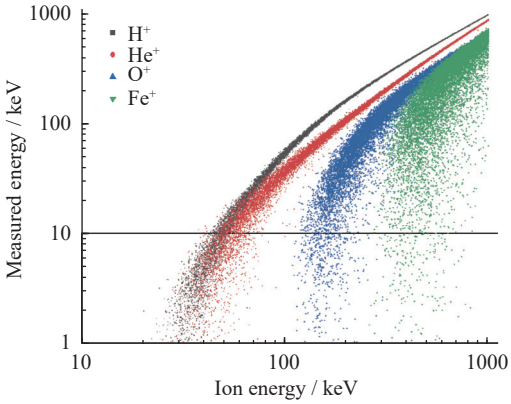

图 9 H^+, He^+, O^+和 Fe^+离子测量能量仿真计算结果

Fig. 9 Simulations of the measured energy of H^+, He^+, O^+, and Fe^+ ions

表 1 4 种离子的起测能量

Table 1 Energy thresholds of four species of ions

离子种类	起测能量/ keV
H^+	40
He^+	45
O^+	130
Fe^+	240

$$\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2=\left(\frac{\sigma_E}{E}\right)^2+\left(\frac{2\sigma_\tau}{\tau}\right)^2+\left(\frac{2\sigma_l}{l}\right)^2. \quad (3)$$

这些要素受入射离子种类、能量,硬件分辨率,探测器几何构型等因素影响。输入相关参数,分别对设计方案的$\frac{\sigma_E}{E}$,$\frac{\sigma_\tau}{\tau}$和$\frac{\sigma_l}{l}$进行分析和估算,则可通过式(3)计算出$\frac{\sigma_m}{m}$。以下以 200 keV 的 H^+和 He^+为例计算探测器的$\frac{\sigma_m}{m}$。

3.1.2.1 能量分辨率$\frac{\sigma_E}{E}$

能量分辨率$\frac{\sigma_E}{E}$是指系统对离子能量 E 的测量相对误差。能量误差σ_E受薄膜和 SSD 死层造成的能量歧离和 SSD 测量系统的硬件分辨率影响。

利用 SRIM 对入射离子穿过每一层薄膜发生的能损和散射进行仿真,离子入射方向设置为视场内随机入射,可以得到离子穿过薄膜和 SSD 死层以后在灵敏区中沉积能量平均值和能量歧离,如图 10 所示。

通过高斯拟合,200 keV 的 H^+和 He^+离子在 SSD 灵敏区沉积能量平均值为 160.92 keV 和 103.57 keV,单能峰的 FWHM(Full Width at Half Maximum,半高全宽)为能量歧离,分别为 5.95 keV 和 10.73 keV。能谱中的 FWHM 有一部分由 Start 薄膜的能量歧离贡献。由于离子飞行时间与离子穿过 Start 薄膜后的出射能量直接相关,因此由 Start 薄膜贡献的能量歧离对单能时间谱和能谱 FWHM 的贡献部分会互相抵消,不会贡献到质量分辨率$\frac{\sigma_m}{m}$中,计算时需对该部分能量歧离进行修正。

如图 11 所示,通过 SRIM 仿真计算,两种离子在

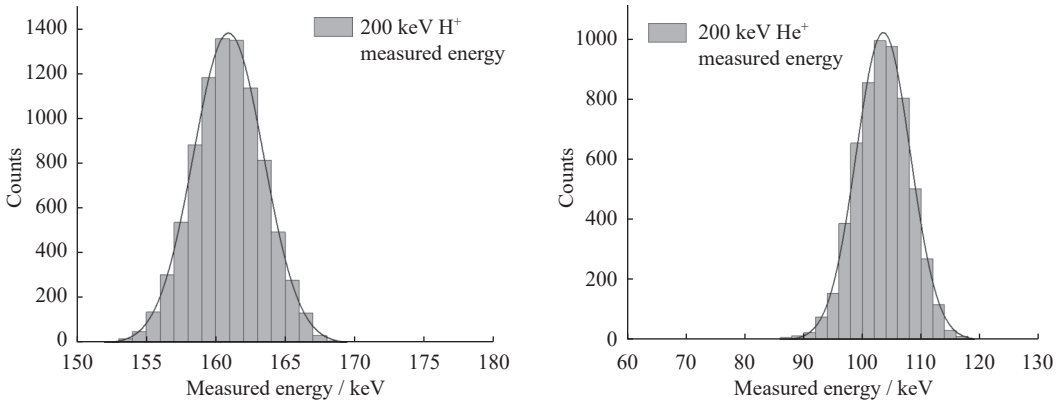

图 10 离子在 SSD 灵敏区中的沉积能量分布

Fig. 10 Measured energy spectra of ions in the SSD's sensitive layer

经过 Start 薄膜后的能量歧离分别为 3.45 keV 和 6.91 keV。经修正，Stop 薄膜和死层中产生的有效能量歧离σ_e为

$$(\sigma_e)_{200\ \mathrm{keV H^+}} = \sqrt{5.95^2 - 3.45^2} \approx 4.85\ \mathrm{keV},$$

$$(\sigma_e)_{200\ \mathrm{keV He^+}} = \sqrt{10.73^2 - 6.91^2} \approx 8.21\ \mathrm{keV}.$$

根据实际应用经验，SSD 系统硬件能量分辨率约为 20 keV，则探测器对 200 keV 的 H^+和 He^+离子进行测量时的能量分辨率为

$$\left(\frac{\sigma_E}{E}\right)_{200\ \mathrm{keV H^+}} = \frac{\sqrt{4.85^2 + 20^2}}{160.92} \approx 12.86\%,$$

$$\left(\frac{\sigma_E}{E}\right)_{200\ \mathrm{keV He^+}} = \frac{\sqrt{8.21^2 + 20^2}}{103.57} \approx 20.87\%.$$

3.1.2.2 飞行时间分辨率$\frac{\sigma_\tau}{\tau}$

飞行时间分辨率$\frac{\sigma_\tau}{\tau}$是指探测器对离子在 Start 和 Stop 薄膜间飞行时间 τ 测量的相对误差。同样地，通过 SRIM 可以计算出两种单能离子在 Start 和 Stop 薄膜之间的飞行时间，平均值分别是 10.09 ns 和 21.69 ns(见图 12)。能量歧离贡献的部分可与能量测量抵消，飞行距离误差σ_L单独讨论，此处的 FWHM 忽略。

飞行时间测量误差主要由二次电子飞行时间发散和时间测量系统硬件分辨率两个因素共同决定。二次电子飞行时间发散是指每一个二次电子从薄膜上发射到被 MCP 接受所经历的时间不完全相同，这跟二次电子在薄膜上发射位置、初始能量和发射方向分布、偏转电场等因素影响有关。利用 SIMION[37,38] 对探测器电极进行建模，并根据经验模型输入二次电子的角分布和能谱，可以计算出二次电子在电场中的飞行路径和飞行时间。

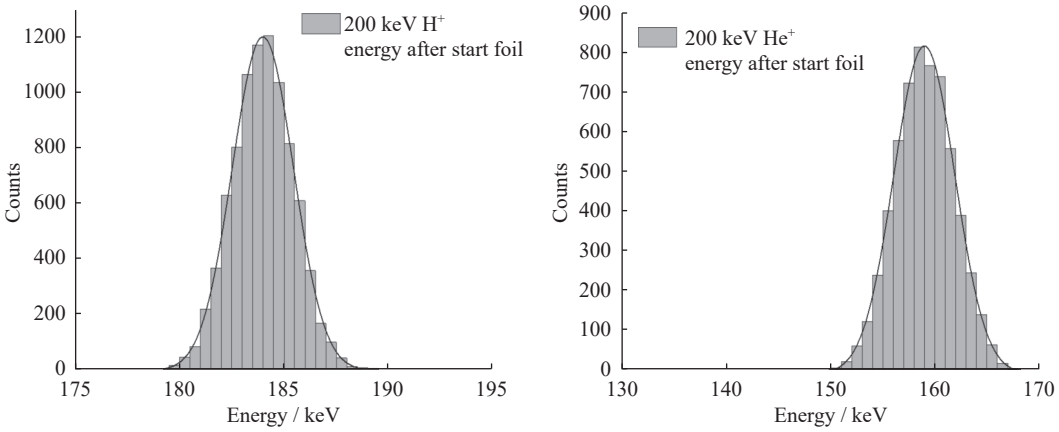

图 11 穿过 Start 薄膜后的能量歧离

Fig. 11 Energy straggling after start foil

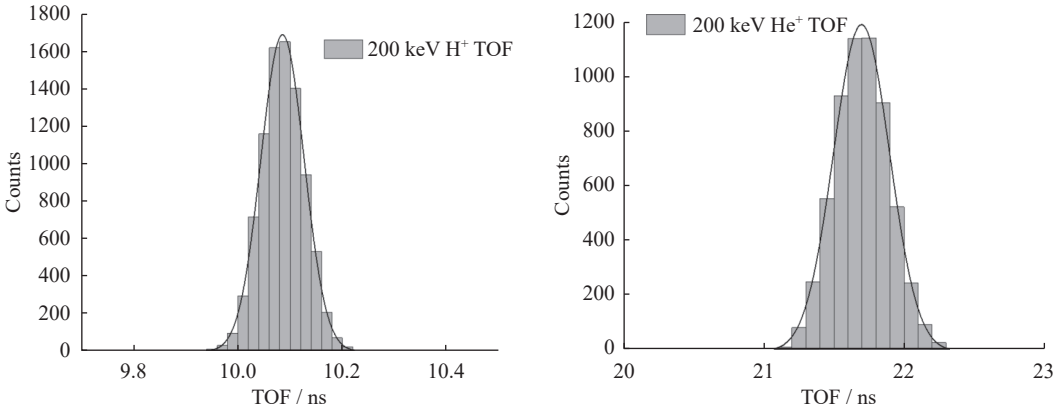

图 12 飞行时间分布

Fig. 12 Time of Flight (TOF) distribution

图 13 为仿真计算所得的二次电子飞行路径, 飞行时间谱如图 14 所示, 峰值位置约为 2.5 ns, FWHM 约为 0.4 ns。

硬件分辨率则由 MCP 和电子学性能决定。目前国际上同类 TOF 质谱仪的硬件时间分辨率一般约为 0.5 ns。则时间误差估算值为$\sqrt{2\times0.4^2+0.5^2}\approx0.755$ ns。200 keV 的 H^+和 He^+离子的$\frac{\sigma_\tau}{\tau}$为

$$\left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)_{200\ \mathrm{keVH+}}=\frac{0.755}{10.09}\approx7.48\%,$$

$$\left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)_{200\ \mathrm{keVHe+}}=\frac{0.755}{21.69}\approx3.48\%.$$

3.1.2.3 飞行距离误差σ_l/l

飞行距离误差由 Start 薄膜和 Stop 薄膜的几何关系决定, 不受入射粒子性质影响。本方案中 Start 薄膜和 Stop 薄膜构成的几何张角为 10°×10°, 飞行距离误差为

$$\frac{\sigma_l}{l}\approx0.1\%.$$

根据以上三项误差的计算结果, 两种单能离子的$\frac{\sigma_m}{m}$计算如下:

$$\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)_{200\ \mathrm{keVH+}}\approx\left[(12.86\%)^2+2\times(7.48\%)^2+2\times(0.1\%)^2\right]^{1/2}\approx16.65\%,$$

$$\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)_{200\ \mathrm{keVHe+}}\approx\left[(20.87\%)^2+2\times(3.48\%)^2+2\times(0.1\%)^2\right]^{1/2}\approx21.44\%.$$

每一种离子在某能量点的质量分辨率均可以通过以上计算方法获得。

可通过不同种类离子在 TOF 与 E_{SSD} 二维谱中的分布来对离子种类进行分辨。能量范围在 40 keV～5 MeV 连续分布的 H^+, He^+, O^+, 和 Fe^+离子在输入张角内随机入射, 硬件能量分辨率为 20 keV, 时间测量误差为 0.755 ns, 能量测量阈值设定在 10 keV, 通过 SRIM 进行 TOF 与 E_{SSD} 二维谱仿真计算, 计算结果如图 15 所示。可以看出, 在设定的硬件条件下, 40 keV～5 MeV 能量范围内的 H^+, He^+, O^+和 Fe^+离子能够被很好地区分。

3.2 电子测量性能

电子测量的主要指标是能量测量范围, 还需要对离子干扰排除能力进行分析。

3.2.1 能量范围

电子测量方向没有 Start 和 Stop 薄膜, 中能电子在进入 SSD 灵敏区前需要先穿过 2 μm 铝屏蔽层和

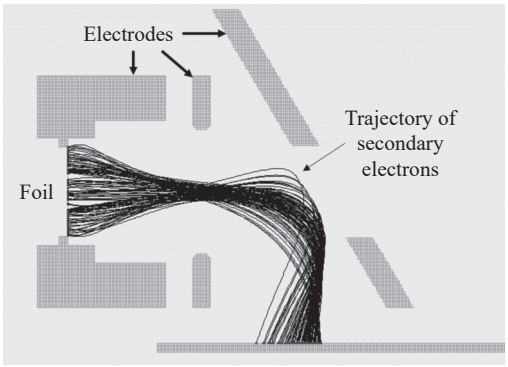

图 13 SIMION 仿真二次电子飞行路径

Fig. 13 Trajectory simulation of the secondary electrons using SIMION

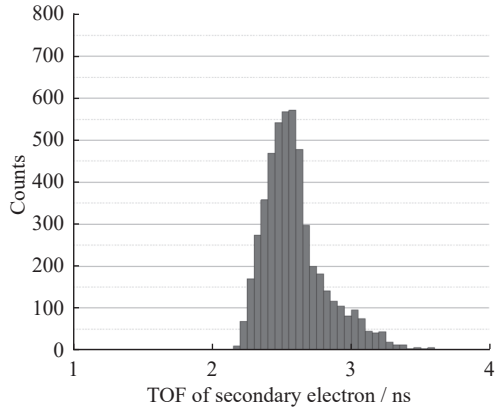

图 14 二次电子飞行时间谱

Fig. 14 Time of Flight (TOF) distribution of secondary electron

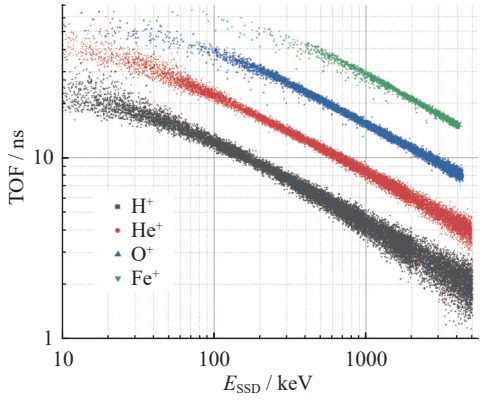

图 15 TOF×E 离子种类区分

Fig. 15 Ion species discrimination using TOF×E method

SSD 死层。SSD 对电子的最小测量能量为沉积能量超过 10 keV 对应的入射能量，最大测量能量为能够在灵敏区内沉积全部能量的最大入射能量。通过 CASINO 对薄膜、屏蔽层和死层进行建模，并输入不同能量的单能电子进行仿真计算，可以得出电子测量能量下限约为 20 keV，如图 16 所示。

同样利用 CASINO 对薄膜、屏蔽层、死层和灵敏区建模，输入不同能量的单能电子进行仿真计算，可以获得能量可完全沉积的测量上限，结果如图 17 所示。

从图 17 可以看出，当能量超过 200 keV 时，有一部分电子无法完全沉积能量在 SSD 灵敏区中。能量为 300 keV 时全沉积比例约为 80%，能量为 500 keV 时只有 10%，更高能量的电子全沉积比例则更低。在 200～500 keV 范围内，可通过 SSD 探测器后方的反符合探测器识别出全沉积电子。更高能量的电子在空间中的通量更低，且全沉积比例太低，实测效果难以保证。因此，电子的探测范围可以覆盖 20～500 keV。

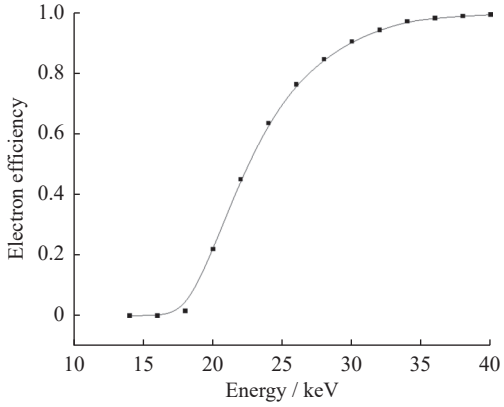

图 16 低能端电子测量效率

Fig. 16 Efficiencies of the lower energy electron measurement

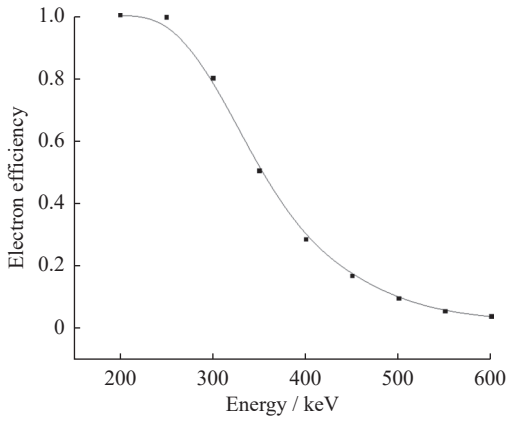

图 17 高能端电子全沉积比例

Fig. 17 Full-deposited rates of higher energy electrons

3.2.2 排除质子离子干扰

这里采用主动屏蔽的方式排除质子和离子对电子测量的干扰。电子方向的 SSD 探测器表面镀 2 μm 的 Al 屏蔽层，可以将一定能量以下的质子和重离子完全阻止。通过 SRIM 对 H^+, He^+, O^+和 Fe^+离子在铝屏蔽层中的能量沉积情况进行仿真计算（见图 18），结果表明 2 μm 铝屏蔽层可以完全阻挡≤220 keV 的 H^+，≤600 keV 的 He^+，≤2000 keV 的 O^+和≤3100 keV 的 Fe^+。

3.2.3 与同类探测器性能对比

仿真分析结果表明，本文提出的探测器方案可对 20～500 keV 的中能电子，50 keV～5 MeV 的中能 H^+, He^+, O^+和 Fe^+离子进行成分分辨、能谱和角分布测量。其主要性能指标与同类探测器的先进水平对比结果列于表 2。

通过对比可知，本探测器设计方案与同类探测器的性能指标大体相近，主要差距在于离子和电子的能量范围。其中离子测量下限与冰球探测器相比存在较大差距，这是由于冰球探测器对低能端无法使用 TOF×E 方法的质子和离子使用了 TOF×PH 方法。该方法主要原理是相同飞行速度的不同种类离子在二次电子薄膜触发的二次电子数量不同，仅需通过 TOF 和 MCP 输出的脉冲幅度（Pulse Height, PH）即可进行离子成分分析，理论上可以将离子测量范围延

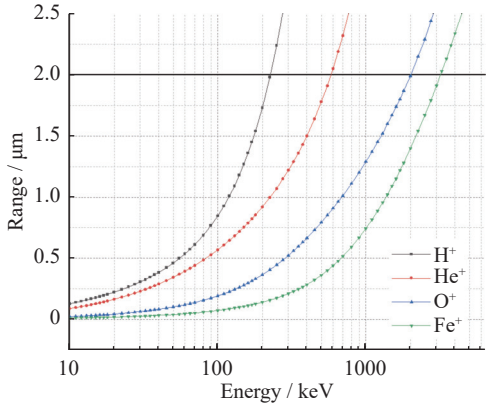

图 18 H^+, He^+, O^+和 Fe^+在铝材料中的射程

Fig. 18 Ranges of H^+, He^+, O^+, and Fe^+ ions in the Al shelter

伸到<10 keV。但这种方法的质量分辨率比较差, 实际应用效果也不好。另外, 离子与电子能量测量上限也有一定差距, 主要由所使用的 SSD 灵敏区厚度决定。本方案使用 300 μm 厚的硅探测器, 而 JEDI 和 Mushroom 探测器则分别使用了 500 μm 和 700 μm 厚的硅探测器。在角分辨率方面, 本方案每个方向设计视场为 10°×10°, 比 JEDI 和 Mushroom 探测器的单方向张角更小, 角分辨率略高, 但是在方向数量和覆盖视场方面则逊色于后两者。

总体而言, 作为中国关于 TOF×E 中能离子探测技术的首个详细方案设计, 本方案在设计中考虑了中国目前的硬件与技术水平, 在设计指标上优先保证目前探测技术未覆盖的能区, 与国际先进水平相比相对保守。在未来面向具体空间任务的载荷研制工作中, 需要针对具体任务指标需求进行设计。此外, 还需要不断提升各项关键技术水平, 包括低噪声能量探测技术、高分辨率时间测量技术等, 从而进一步提升探测器的整体性能, 赶超国际先进水平。

4 结语

面向中国未来深空任务对中能离子探测的需求, 设计了一种基于二次电子的 TOF 中能离子探测器, 并对其基本性能进行了仿真分析。探测器采用多方向设计, 可同时测量 5 个方向的中能离子和 4 个方向的中能电子。仿真分析结果列于表 3, 该方案可以实现 40 keV～5 MeV 的 H^+, He^+, O^+和 Fe^+离子的成分分辨和角分布测量; 同时可以实现 20～500 keV 的中能电子能谱和角分布测量, 并排除≤220 keV 的 H^+, ≤600 keV 的 He^+, ≤2000 keV 的 O^+和≤3100 keV 的 Fe^+离子的干扰。该探测器可以填补目前中国在空间中能离子探测技术上的空白, 满足未来包括载人登月、行星探测、太阳探测、太阳系边界探索等深空任务的需求。本文仅对关键性能指标进行

表 2 本探测器与冰球探测器和 Mushroom 探测器的主要性能对比

Table 2 Main parameters comparison among puck detector, Mushroom detector and the detector in this article

	本文探测器方案	JUNO的JEDI探测器 (冰球探测器)	Parker Solar Probe的 Mushroom探测器
离子探测	H^+: 40 keV～5 MeV He^+: 45 keV～5 MeV O^+: 130 keV～5 MeV Fe^+: 240 keV～5 MeV	H: 10 keV～2 MeV He: 25 keV～2 MeV O/S: 45 keV～10 MeV	H: 40 keV～7 MeV $Z\geqslant 2$: 20 keV/n～2 MeV/n
电子探测	20～500 keV	25～1000 keV	25～1000 keV
角分辨率	离子: 10°×10°, 5个方向 电子: 10°×10°, 4个方向 总视场: 154°×10°	离子: 13°×12°, 6个方向 电子: 13°×12°, 6个方向 总计视场: 160°×12°	离子: 15°×12°～30°×30° 电子: 30°×45° 总视场: 2π

表 3 设计方案性能仿真结果

Table 3 Simulations of the designing scheme

性能指标		仿真结果
离子测量	能量范围	H^+: 40 keV～5 MeV He^+: 45 keV～5 MeV O^+: 130 keV～5 MeV Fe^+: 240 keV～5 MeV
	质量分辨率	$\sigma_m/m \approx 16.65\%$, @200 keV H^+ $\sigma_m/m \approx 21.44\%$, @200 keV He^+
电子测量	能量范围	20～500 keV
	抗离子干扰	可排除≤220 keV的H^+, ≤600 keV的He^+, ≤2000 keV的O^+, ≤3100 keV的Fe^+

了仿真分析和估算,实际性能指标需待原理样机研制完成后进行实测验证。

致谢 中国科学院空间应用工程与技术中心和天基空间环境探测北京市重点实验室对本工作给予了支持。

参考文献

[1] ZONG Q G, FRITZ T A, KORTH A, *et al.* Energetic electrons as a field line topology tracer in the high latitude boundary/CUSP region: cluster rapid observations[J]. *Surveys in Geophysics*, 2005, **26**(1): 215-240

[2] ZONG Q G, FRITZ T A, WILKEN B, *et al.* Energetic ions in the high latitude boundary layer of the magnetosphere – RAPID-CLUSTER observation[M]//NEWELL P T, ONSAGER T. Earth's Low-Latitude Boundary Layer, Volume 133. American Geophysical Union, 2003: 101-110. DOI: 10.1029/133 GM10

[3] MILLAN R M, BAKER D N. Acceleration of particles to high energies in Earth's Radiation belts[J]. *Space Science Reviews*, 2012, **173**(1/2/3/4): 103-131

[4] REAMES D V. The two sources of solar energetic particles[J]. *Space Science Reviews*, 2013, **175**(1/2/3/4): 53-92

[5] REAMES D V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere[J]. *Space Science Reviews*, 1999, **90**(3/4): 413-491

[6] JOKIPII J R. Acceleration and transport of energetic charged particles in space[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2001, **277**(1/2): 15-26

[7] KOZYRA J U, LIEMOHN M W. Ring current energy input and decay[J]. *Space Science Reviews*, 2003, **109**(1/2/3/4): 105-131

[8] WÜEST M. Time-of-flight ion composition measurement technique for space plasmas[M]//PFAFF R F, BOROVSKY J E, YOUNG D T. Measurement Techniques in Space Plasmas: Particles, Volume 102. American Geophysical Union, 1998. DOI: 10.1029/GM102 p0141

[9] GLOECKLER G. A versatile detector system to measure the change states, mass compositions and energy spectra of interplanetary and magnetosphere ions[R]. NASA Center for Aerospace Information (CASI), 1977

[10] GLOECKLER G, HSIEH K C. Time-of-flight technique for particle identification at energies from 2-400 keV/nucleon[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1979, **165**(3): 537-544

[11] WILKEN B, FRITZ T A, STÜDEMANN W. Experimental techniques for ion composition measurements in space[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1982, **196**(1): 161-167

[12] WILKEN B, STUDEMANN W. A compact time-of-flight mass-spectrometer with electrostatic mirrors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1984, **222**(3): 587-600

[13] MCENTIRE R W, KEATH E P, FORT D E, *et al.* The medium-energy particle analyzer (MEPA) on the AMPTE CCE spacecraft[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(3): 230-233

[14] WILLIAMS D J, MCENTIRE R W, JASKULEK S, *et al.* The Galileo energetic particles detector[J]. *Space Science Reviews*, 1992, **60**(1/2/3/4): 385-412

[15] MASON G M, GOLD R E, KRIMIGIS S M, *et al.* The Ultra-Low-Energy Isotope Spectrometer (ULEIS) for the ACE spacecraft[J]. *Space Science Reviews*, 1998, **86**(1/2/3/4): 409-448

[16] WILKEN B, AXFORD W I, DAGLIS I, *et al.* RAPID – the imaging energetic particle spectrometer on cluster[J]. *Space Science Reviews*, 1997, **79**(1/2): 399-473

[17] ANDREWS G B, ZURBUCHEN T H, MAUK B H, *et al.* The energetic particle and plasma spectrometer instrument on the MESSENGER spacecraft[J]. *Space Science Reviews*, 2007, **131**(1/2/3/4): 523-556

[18] MCNUTT R L JR, LIVI S A, GURNEE R S, *et al.* The Pluto energetic particle spectrometer science investigation (PEPSSI) on the new horizons mission[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **140**(1/2/3/4): 315-385

[19] MITCHELL D G, LANZEROTTI L J, KIM C K, *et al.* Radiation belt storm probes ion composition experiment (RBSPICE)[J]. *Space Science Reviews*, 2013, **179**(1/2/3/4): 263-308

[20] MAUK B H, HAGGERTY D K, JASKULEK S E, *et al.* The Jupiter energetic particle detector instrument (JEDI) investigation for the Juno mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **213**(1/2/3/4): 289-346

[21] MAUK B H, BLAKE J B, BAKER D N, *et al.* The Energetic Particle Detector (EPD) investigation and the Energetic Ion Spectrometer (EIS) for the Magnetospheric Multiscale (MMS) mission[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1/2/3/4): 471-514

[22] HILL M E, MITCHELL D G, ANDREWS G B, *et al.* The Mushroom: a half-sky energetic ion and electron detector[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(2): 1513-1530

[23] RODRÍGUEZ-PACHECO J, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, MASON G M, *et al.* The Energetic Particle Detector: energetic particle instrument suite for the Solar Orbiter mission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **642**: A7

[24] CAO J B, LIU Z X, YAN C X, *et al.* First results of Chinese particle instruments in the Double Star Program[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, **23**(8): 2775-2784

[25] CAO J B, YANG J Y, YAN C X, *et al.* The observations of high energy electrons and associated waves by DSP satellites during substorm[J]. *Nuclear Physics B -Proceedings Supplements*, 2007, **166**: 56-61

[26] KONG Linggao, ZHANG Aibing, SUN Yueqiang. Applications of plasma detectors on meteorological satellites[C]//The 32 nd Annual Meeting of China Meteorological Society. Tianjin: Chinese Meteorological Society, 2015: 155-160 (孔令高, 张爱兵, 孙越强. 等离子体探测在气象卫星上的应用[C]//第32届中国气象学会年会S17空间天气观测、建模与同化. 天津: 中国气象学会, 2015: 155-160)

[27] JIA Xianghong, ZOU Hong, XU Feng, *et al*. Detector design of medium-energy electron imaging[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(1): 014005 (贾向红, 邹鸿, 许峰, 等. 中能电子成像仪探头的设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**(1): 014005)

[28] SHEN G H, ZHANG X X, WANG J H, *et al*. Development and calibration of a three-directional high-energy particle detector for FY-3 E satellite[J]. *Aerospace*, 2023, **10**(2): 173

[29] LIU Zhen, YANG Xiaochao, ZHANG Xiaoxin, *et al*. On-orbit cross-calibration and assimilation for relativistic electron observations from FengYun 4 A and GOES-13[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, **68**(15): 159401 (刘震, 杨晓超, 张效信, 等. 风云四号A星和GOES-13相对论电子观测数据在轨交叉定标及数据融合研究[J]. 物理学报, 2019, **68**(15): 159401)

[30] WANG Xinyue, JING Tao, ZHANG Shenyi, *et al*. The first results of Chang'e-1 high energetic particles detector[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, **27**(6): 2289-2295 (王馨悦, 荆涛, 张珅毅, 等. "嫦娥一号"卫星太阳高能粒子探测器的首次观测结果[J]. 地球物理学进展, 2012, **27**(6): 2289-2295)

[31] WANG Xinyue, ZHANG Aibing, JING Tao, *et al*. The lunar charged particle environment by Chang'E-1 and Chang'E-2[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(2): 119-126 (王馨悦, 张爱兵, 荆涛, 等. 近月空间带电粒子环境——"嫦娥1号""嫦娥2号"观测结果[J]. 深空探测学报, 2019, **6**(2): 119-126)

[32] SUN Huixian, LI Huijun, ZHANG Baoming, *et al*. Achievements and prospect of payloads technology in Chinese lunar and deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(6): 495-509 (孙辉先, 李慧军, 张宝明, 等. 中国月球与深空探测有效载荷技术的成就与展望[J]. 深空探测学报, 2017, **4**(6): 495-509)

[33] KONG Linggao, ZHANG Aibing, TIAN Zheng, *et al*. Integrated ion and neutral particle analyzer for Chinese Mars mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(2): 142-149 (孔令高, 张爱兵, 田峥, 等. 自主火星探测高集成离子与中性粒子分析仪[J]. 深空探测学报, 2019, **6**(2): 142-149)

[34] YE Peijian, ZOU Leyang, WANG Dayi, *et al*. Development and prospect of Chinese deep space exploration[J]. *Space International*, 2018(10): 4-10 (叶培建, 邹乐洋, 王大轶, 等. 中国深空探测领域发展及展望[J]. 国际太空, 2018(10): 4-10)

[35] GAN Weiqun, YAN Yihua, HUANG Yu. Prospect for space solar physics in 2016-2030[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, **49**(5): 059602 (甘为群, 颜毅华, 黄宇. 2016-2030年我国空间太阳物理发展的若干思考[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, **49**(5): 059602)

[36] LIN Jun, WANG Min, TIAN Hui, *et al*. In situ measurements of the solar eruption[J]. *Scientia Sinica Pysica, Mechanica & Astronomica*, 2019, **49**(5): 059607 (林隽, 汪敏, 田晖, 等. 太阳爆发的抵近探测[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, **49**(5): 059607)

[37] GILBERT J A, LUNDGREN R A, PANNING M H, *et al*. An optimized three-dimensional linear-electric-field time-of-flight analyzer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(5): 053302

[38] PUDJORAHARDJO D S, SUPRAPTO, DARSONO, *et al*. Simulation study of electron beam spot size from thermionic electron gun using SIMION 8.1 software[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, **2014**: 020156