

# 基于小孔成像技术的中能电子成像谱仪 及其空间观测结果

邹鸿<sup>1</sup>, 宗秋刚<sup>1</sup>, 陈鸿飞<sup>1</sup>, 邹积清<sup>1</sup>, 陈江<sup>1</sup>, 施伟红<sup>1</sup>, 于向前<sup>1</sup>, 仲维英<sup>1</sup>, 王永福<sup>1</sup>, 叶雨光<sup>1</sup>,  
贾向红<sup>2</sup>, 许峰<sup>2</sup>, 邵思霏<sup>3</sup>, 王博<sup>3</sup>, 郝晓云<sup>3</sup>

(1. 北京大学地球与空间科学学院空间物理与应用技术研究所, 北京 100871;  
2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094; 3. 山东航天电子技术研究所, 烟台 264000)

**摘要:** 中能电子测量对空间辐射环境的理论研究和空间航天器的防护设计具有重要意义。北京大学研制的中能电子成像谱仪 (BD-IES) 利用小孔成像技术实现多方向中能电子的能谱测量。地面标定试验结果表明, BD-IES 具有良好的能量线性度和较小的系统噪声, 能够有效实现对中能电子的能谱测量。该仪器已成功应用在我国导航卫星上。最新测量结果表明 BD-IES 对中能电子的测量是成功的, 其结果对于研究如亚暴注入、波-粒子相互作用等空间物理热点问题具有重要意义。BD-IES 未来将被应用到“风云”等空间环境探测平台上。

**关键词:** 中能电子成像谱仪; 小孔成像技术; 导航卫星; 亚暴粒子注入; 波-粒子相互作用

中图分类号: TN16; V520.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2018)04-0307-08

DOI: [10.3969/j.issn.1673-1379.2018.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1379.2018.04.001)

## An imaging spectrometer for energetic electrons based on pin-hole imaging technique and its space observations

ZOU Hong<sup>1</sup>, ZONG Qiugang<sup>1</sup>, CHEN Hongfei<sup>1</sup>, ZOU Jiqing<sup>1</sup>, CHEN Jiang<sup>1</sup>, SHI Weihong<sup>1</sup>,  
YU Xiangqian<sup>1</sup>, ZHONG Weiyong<sup>1</sup>, WANG Yongfu<sup>1</sup>, YE Yuguang<sup>1</sup>, JIA Xianghong<sup>2</sup>,  
XU Feng<sup>2</sup>, SHAO Sipei<sup>3</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>, HAO Xiaoyun<sup>3</sup>

(1. Institute of Space Physics and Applied Technology, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China;  
2. Chinese Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China;  
3. Shandong Aerospace Electro-technology Institute, Yantai 264000, China)

**Abstract:** The observation of energetic electrons is important for studies of the space radiation environment and the design of spacecraft. The Imaging Electron Spectrometer developed by Peking University (BD-IES) is based on the pin-hole imaging technique and the Si-PIN position sensitive detector, which can measure the spectra of the energetic electrons in multi-directions. The results of the ground calibration tests show that the BD-IES has a good energy linearity and small system noise, which can measure the spectrum of energetic electrons effectively. The BD-IES is successfully deployed onboard a Chinese navigation satellite in the inclined GEO orbit. The latest observation verifies that the energetic electron observation of the BD-IES is successful, which is important for studies of space physics, such as the sub-storm injection, and the wave particle interaction, etc.

**Key words:** imaging spectrometer for energetic electrons; pin-hole imaging technique; navigation satellite; sub-storm injection; wave-particle interactions

收稿日期: 2018-06-09; 修回日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 41374167, 41421003, 41474140); 国家基础研究与发展计划项目 (编号: 2012CB825603)

引用格式: 邹鸿, 宗秋刚, 陈鸿飞, 等. 基于小孔成像技术的中能电子成像谱仪及其空间观测结果[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(4): 307-314

ZOU H, ZONG Q G, CHEN H F, et al. An imaging spectrometer for energetic electrons based on pin-hole imaging technique and its space observations[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(4): 307-314

## 0 引言

能量粒子对人类了解近地空间环境起到十分重要的作用。能量粒子(及磁场)测量首先揭示了地球磁层中的各种特征区域,如辐射带、磁层顶、磁鞘、弓激波、等离子体片和磁尾等。回旋半径小、速度快的能量电子可以沿磁场线快速移动,因此对能量电子进行准确观测可用于研究磁层磁场拓扑结构及其随时空的变化。例如,根据 IMP-8 卫星对  $>200$  keV 电子的观测,在地球中磁尾区域的开放和闭合磁场结构才得以被清晰地描绘出来<sup>[1-2]</sup>,而 ISEE-3 卫星对  $>70$  keV 电子的观测对确定远磁尾磁场结构以及等离子体团的拓扑结构和尺寸起到了决定性作用<sup>[3-4]</sup>。

虽然我们对近地空间环境已有初步了解,但是近地空间环境的变化,特别是磁暴、磁层亚暴、高能电子暴等扰动事件以及其中涉及的一些关键物理机制仍有待进一步研究。对能量电子的能谱和投掷角分布的准确测量是研究亚暴粒子注入、磁场高能电子起源和加速机制等热点问题的基础<sup>[5-8]</sup>,对于准确地评估空间辐射环境、建立动态辐射带模型具有十分重要的科学意义。

目前,探测空间能量电子的仪器主要有 3 类。第一种是准直器加单一硅半导体探测器或多个硅半导体探测器组成的探测器望远镜。这类仪器的代表是 NOAA-POES 卫星上的 MEPED 的方向电子

探测器<sup>[9]</sup>。这种仪器通过准直器或望远镜结构限定电子的入射角度范围,可以测量入射电子的能谱,但很难获取电子的投掷角分布。第二种是磁谱仪,典型仪器为 VAP 卫星上的磁电子谱仪 MagEIS<sup>[10]</sup>。这类仪器利用磁铁形成的均匀磁场将入射的不同能量电子聚焦在不同位置,再通过位置灵敏或线阵列传感器测量入射电子的能谱。为了确保同一能量的入射电子可以被聚焦在同一个探测器单元上,电子的入射角度通常较小。第三种是采用针孔成像技术的仪器,如 Cluster 卫星上的成像能量电子谱仪 IES<sup>[11]</sup>。这类仪器通过针孔与多单元位置灵敏传感器构成多方向望远镜系统,可以覆盖更大的视场角。与其他 2 种类型的能量电子探测技术相比,针孔成像结构具有体积小、重量轻、无漏磁、视场大等优点。

本文介绍了北京大学研制的基于针孔成像技术的中能电子成像谱仪 BD-IES 的基本原理、系统构成、地面标定试验、在轨交叉定标和最新观测结果。2015 年 9 月底,中能电子探测器由某导航卫星搭载成功发射进入倾斜地球同步轨道。在轨交叉定标结果表明:BD-IES 测量的中能电子能谱与国外最新的观测结果具有可比性,其最新观测数据可以为研究亚暴注入、波-粒子相互作用和高纬捕获粒子等空间物理热点问题提供可靠数据。

## 1 仪器介绍

BD-IES 的原理框图如图 1 所示。

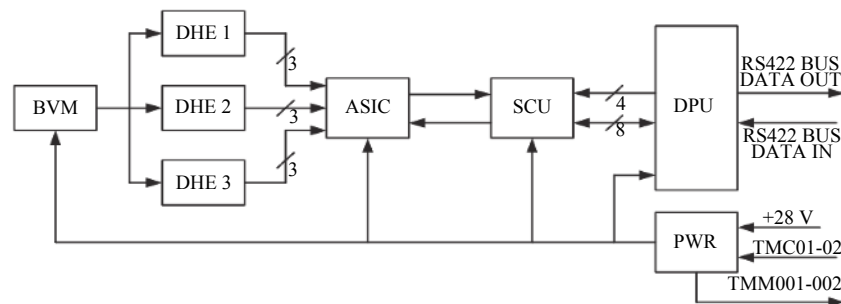


图 1 BD-IES 原理框图

Fig. 1 Principle diagram of BD-IES

BD-IES 共有 8 个电路模块,主要包括:一组小孔成像探头(含 3 个电子探头单元,即 DHE1、DHE2、DHE3);集成前放单元(ASIC);信号调节单元(SCU);数据处理单元(DPU);偏压电源(BVM)和二次电源(PWR)。

每个电子探头单元(DHE)都连接到 ASIC 单

元,对中能电子入射方向进行识别的同时实现脉冲高度的采样保持。SCU 对来自 ASIC 单元的方向信息和脉冲幅度进行分析,并实现相应通道的数据累积。DPU 定期采集 SCU 中累积的能谱数据,得到相应通道的单位时间计数率,进一步根据几何因子可以获得通道的通量测量。BVM 为 3 个电子探头

单元提供偏压。PWR 将卫星平台提供的+28 V 电源转换为设备需要的+5.2 V 供电。

仪器对外提供 RS422 总线实现与分系统上位机的通信, 并输出 2 个遥测信号 TMM001 和 TMM002。仪器接收来自卫星平台的 2 个遥控信号 TMC01 和 TMC02, 实现对仪器的开机和关机控制。

## 2 地面标定试验

对 BD-IES 进行地面标定试验的目的是了解该仪器的系统能量分辨率、角度分辨率是否能够满足多方向准确测量能量电子能谱的需求。

为了确定 BD-IES 探头的能量响应, 我们用  $^{207}\text{Bi}$  放射源和模拟信号源对 BD-IES 探头进行了能量刻度和系统性能检测。结果表明, BD-IES 探头的第一个探测单元的 3 个方向对应的硅探测器均测量到  $^{207}\text{Bi}$  电子放射源能谱中几个典型的谱峰: 74、481.6、554、976.4 和 1 048.1 keV, 其中前 4 个峰值很明显。

从 BD-IES 获得的  $^{207}\text{Bi}$  放射源能谱中可以读取前 4 个典型能量峰对应的中心道数。通过衡量 4 个谱峰峰值能量及其对应的中心道数的线性关系, 可以评估 BD-IES 探头 9 个方向的通道能量响应的线性度。结果表明, BD-IES 探头 9 个方向通道测量的  $^{207}\text{Bi}$  电子放射源的 4 个典型谱峰峰值道数点基本在同一直线上, 这说明 BD-IES 探头 9 个方向通道的能量响应具有很好的线性度。利用精密脉冲信号源产生一个测试信号(其信号幅度等效于 481.6 keV 电子产生的信号幅度)输入 BD-IES 的测试段, 测其输出信号幅度谱的半峰宽即可获得 BD-IES 的系统噪声。检测结果表明: BD-IES 的 9 个方向通道的系统电子学噪声最小为 4.17 keV, 最大为 6.20 keV, 平均为 5.15 keV。该水平优于 Cluster/RAPID-IES 的系统噪声水平。

BD-IES 的方向标定结果表明 BD-IES 的探头具有很好的方向响应能力<sup>[12]</sup>。在探测平面内有 9 个均匀分布的入射方向, 每个方向覆盖的入射角度  $< 20^\circ$ , 因此其角分辨率为  $20^\circ$ 。BD-IES 探头单元的 3 个探测器的方向响应曲线的半峰宽均不到  $20^\circ$ , 因此 BD-IES 的小孔成像结构具有很好的角度分辨能力。

## 3 在轨初交叉定标结果

BD-IES 于 2015 年 9 月底发射进入倾斜地球同步轨道, 目前仪器工作正常, 已获得大量数据。为了确认 BD-IES 对地球同步轨道中能电子观测结果的准确性, 我们比较了 BD-IES 和美国辐射带风暴探测器(Radiation Belt Storm Probes, RBSPs, 又称范艾伦探测器)的磁电子谱仪(Magnetic Electron Ion Spectrometer, MagEIS)的观测结果。为了排除轨道高度对观测的影响, 我们将 BD-IES 与 RBSPs 的 MagEIS 观测的不同能档的电子通量换算为不同磁矩( $\mu$ )条件下的电子相空间密度。我们统计了两种仪器对高度在  $(5.68 \sim 6.04 R_E)$  范围内 1 年(2015 年 11 月 1 日到 2016 年 10 月 31 日)时间观测的在不同磁矩条件下的平均电子相空间密度。图 2<sup>[13]</sup>比较了它们观测的平均电子相空间密度随磁矩的分布。蓝色曲线为 BD-IES 观测结果, 红色和绿色分别为 RBSPa 和 RBSPb 的 MagEIS 的观测结果。从图中可以看到, 在相同的磁矩范围内 BD-IES 与 RBSPs 的 2 颗星的 MagEIS 的观测结果符合得非常好。

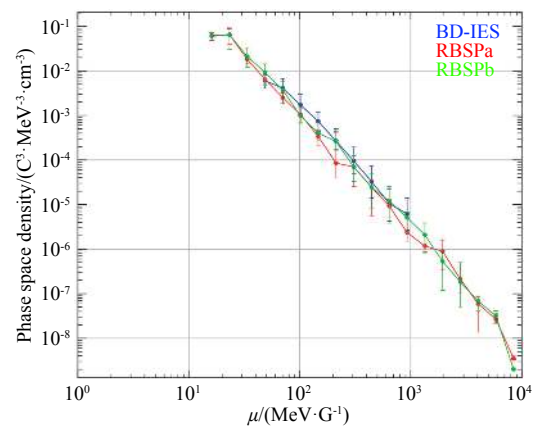


图 2 BD-IES、RBSPa 和 RBSPb 在 1 年内观测的平均电子相空间密度随磁矩的分布

Fig. 2 The average phase space density of electron observed in a year by BD-IES, RBSPa and RBSPb, respectively, vs. magnetic torque

## 4 最新观测结果

由于搭载 BD-IES 的卫星的运行轨道非常特殊, 所以, BD-IES 对能量电子的观测对于研究磁层波-粒子相互作用、亚暴电子注入等热点问题具有十分重要的意义。

#### 4.1 亚暴注入观测

磁层亚暴注入与许多重大的空间物理现象有关,包括能量粒子加速、传输等。能量粒子注入是与磁层亚暴有关的被人熟知的现象。亚暴注入粒子会漂移进入内磁层,其漂移速度与能量和粒子种类有关,因此导致色散或非色散注入观测,这取决于观测者的相对位置。所有不同能量的能量粒子通量的同时增加被解释为观测点位于注入区内,这一现象被命名为非色散注入,而非色散注入所在的区域则被命名为“注入区”。如果卫星位于“注入区”之外,则其观测到的能量粒子通量增加可能是能量色散的。这主要是因为被注入的能量粒子通过梯度-曲率漂移从注入区漂移出来,而漂移速度与粒子能量有关,因此卫星可以观测到飞行时间(ToF)效应。

亚暴注入粒子将围绕地球做漂移运动,因此甚至在几个完整的粒子漂移周期之后,被观测到的粒子通量与背景比仍能保持在一个较高的通量水平。这样一个伴随着不断增加色散的周期性能量电子通量增强-恢复现象(又称为“漂移回声”)被认为是亚暴注入电子环绕地球做方向角漂移运动的结

果。我们可以利用飞行时间信息,根据漂移粒子的能量色散剖面追踪其漂移起始位置,从而获得亚暴注入的起始时间和粒子注入边界的方位角位置。更进一步,我们可以通过注入粒子的峰值持续时间评估注入区的方位角范围。

目前内磁层中亚暴粒子注入机制及其相关的径向范围仍不清楚。我们仍然不知道亚暴注入粒子是在哪里以及如何被产生和传输进入磁层的。确定亚暴注入粒子的径向范围和传播过程有助于区分与亚暴注入相关的机制。搭载 BD-IES 的卫星轨道与地球赤道面的交点随季节变化围绕地球转动,因此 BD-IES 可以扫过很宽的磁尾经度范围。用 BD-IES 的观测数据配合在地球同步转移轨道上的 2 颗 RBSP 卫星上的 MagEIS 的观测数据,有可能对亚暴粒子注入问题进行更深入的研究。

从 2015 年 10 月到 2016 年 3 月, BD-IES 所在 IGSO 卫星轨道扫过了地球磁赤道的所有磁地方时。在这段时期, BD-IES 观测到多次磁层能量电子注入事件。图 3<sup>[14]</sup>显示了 BD-IES 在 2015 年 10 月 16 日观测到的一次能量电子注入事件,图中不同颜色的曲线代表 BD-IES 的 8 个能档,横坐标为 UT。

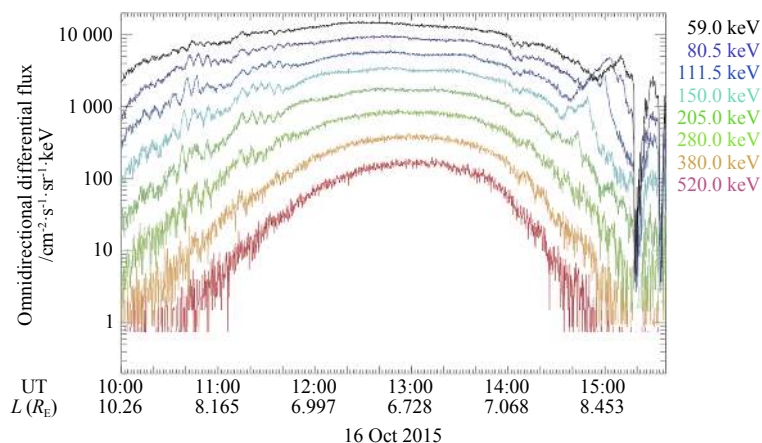


图 3 2015 年 10 月 16 日 BD-IES 观测到的色散型能量电子注入事件

Fig. 3 The dispersive electron injection event observed by BD-IES on Oct 16, 2015

从图 3 可见, 13:30 到 15:30 期间出现了色散型能量电子注入事件。这是一次典型的色散型电子注入事件, 不同能量的注入电子在不同时刻到达 BD-IES, 能量越高的电子到达 BD-IES 的时间越早。宗秋刚等<sup>[14]</sup>通过分析这次电子注入事件中不同能量电子的飞行时间信息, 获得了这次亚暴注入的起始时间和注入边界位置。图 4<sup>[14]</sup>显示了利用 BD-

IES 观测的不同能档的中能电子通量随时间的变化, 获取亚暴注入的起始时间和注入位置的方法。其中: 上图显示了 BD-IES 在 2015 年 10 月 16 日 14:10—14:30UT 观测的 50~600 keV 能量范围内 8 个能档的中能电子通量随时间的变化, 下图中“+”显示了 BD-IES 的前 5 个能档观测的亚暴电子注入起始的时间和位置。

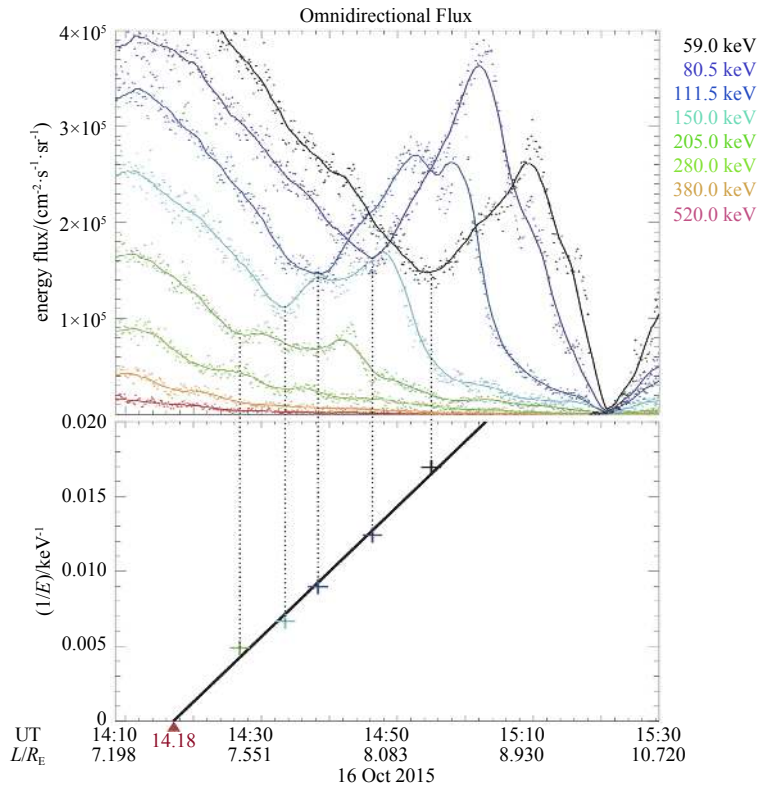


图 4 从色散型能量电子注入事件中获取亚暴注入起始时间和位置

Fig. 4 The initial time and location of substorm injection obtained from the dispersive electron injection event

除了色散型亚暴电子注入事件, BD-IES 也观测到非色散型电子注入事件。图 5<sup>[15]</sup>所示为在 2016 年 2 月 17 日 BD-IES 观测到的一次非色散型电子注入事件。从图 5 可见, 不同能量的电子通量

在 14:38 左右突然下降后, 最低 3 个能档的电子通量同时迅速增加。这说明 BD-IES 应该位于注入区中。从数据中可知, 本次亚暴粒子注入区位于午夜侧磁赤道区域。

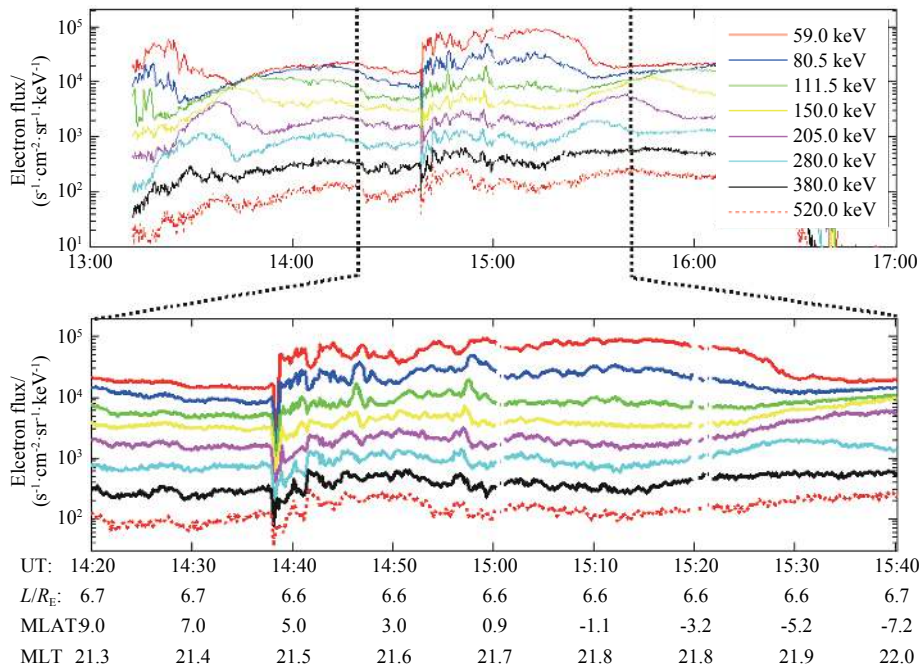


图 5 2016 年 2 月 17 日 BD-IES 观测到的非色散型能量电子注入事件

Fig. 5 The dispersionless electron injection event observed by BD-IES on Feb 17, 2016

## 4.2 波-粒子相互作用

图6<sup>[16]</sup>显示了BD-IES在2015年11月11日观测的8个能档的全向电子微分通量随时间的变化。从图6可见,在靠近磁地方时18:00点左右的低地磁纬度( $16^{\circ}\sim 20^{\circ}$ )处, BD-IES观测的第2~

6能档电子微分通量出现明显的波动。根据2个相邻波峰的间距,可以估算出波动的周期大致为5 min,这正是ULF波的典型周期。因此,这是BD-IES在磁层黄昏侧观测到的一次典型的ULF波与粒子相互作用事件。

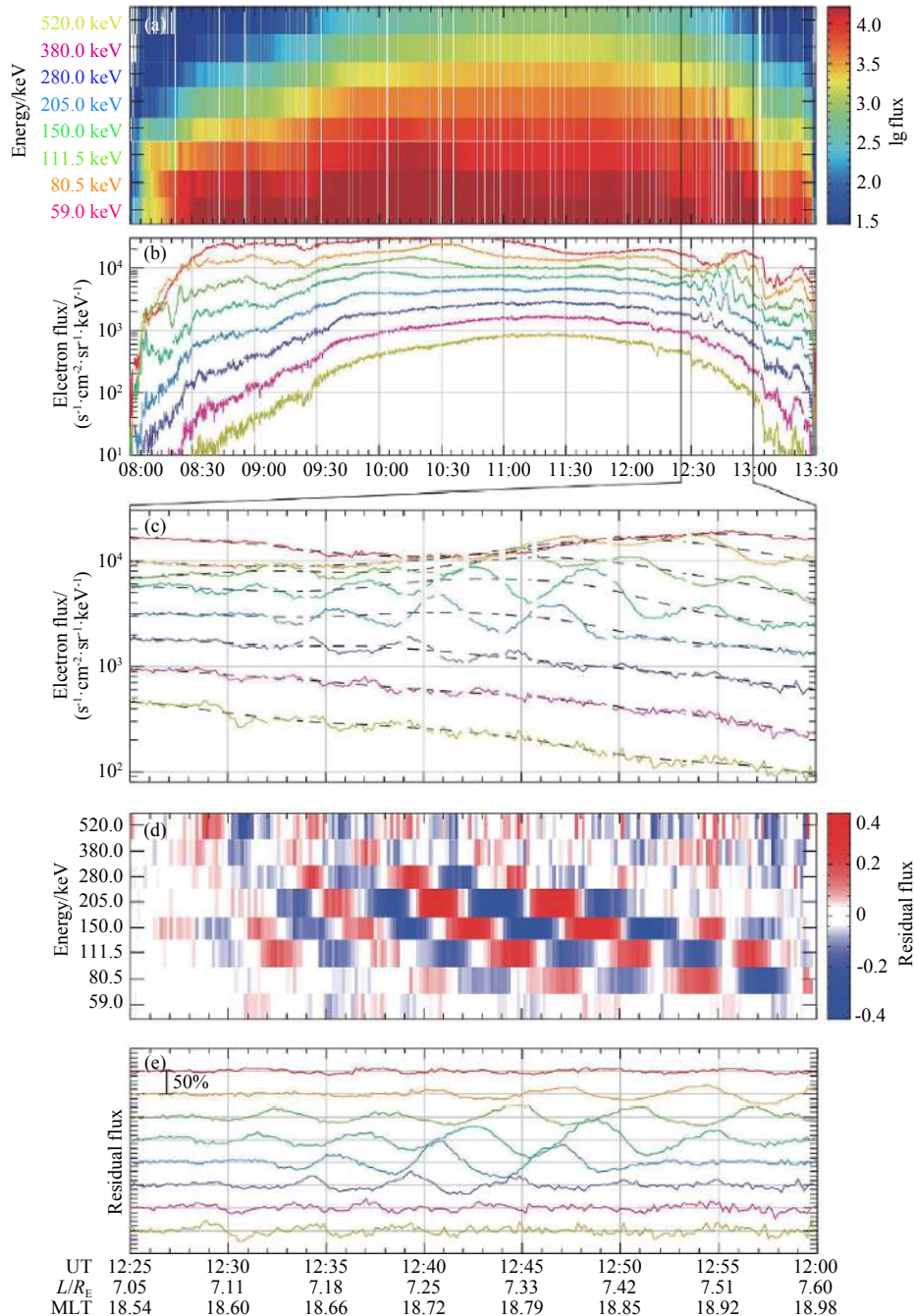


图6 2015年11月11日BD-IES观测的ULF波与能量电子的相互作用例子

Fig. 6 IGSO spacecraft observations of ULF wave event on 11 Nov, 2015

李莉等<sup>[16]</sup>对BD-IES在2015年11月11日观测到的ULF波动事件进行了详细研究。他们发现BD-IES观测到的能量电子通量的波动与归一化漂移共振理论的预测结果符合得很好。通过对观测

结果和理论计算应用最佳拟合过程,他们提出了一种在缺少电磁场测量数据的情况下从BD-IES能量电子通量的观测结果中获取ULF特征参数信息的方法。针对最佳拟合结果与BD-IES观测结果存在

的一些小差异,李莉等<sup>[17]</sup>在波粒子漂移共振理论中考虑了 ULF 波振幅的地方时变化。修正过的波粒子漂移共振理论与 BD-IES 的观测结果符合更好,并使我们对波-粒子相互作用理论有了更深刻的理解。

### 4.3 高纬捕获区

BD-IES 所在的 IGSO 轨道卫星可以扫过向日面磁层顶内部的高磁纬区域,因此有可能观测到高纬捕获区附近的能量电子。图 7<sup>[18]</sup>显示了 BD-IES

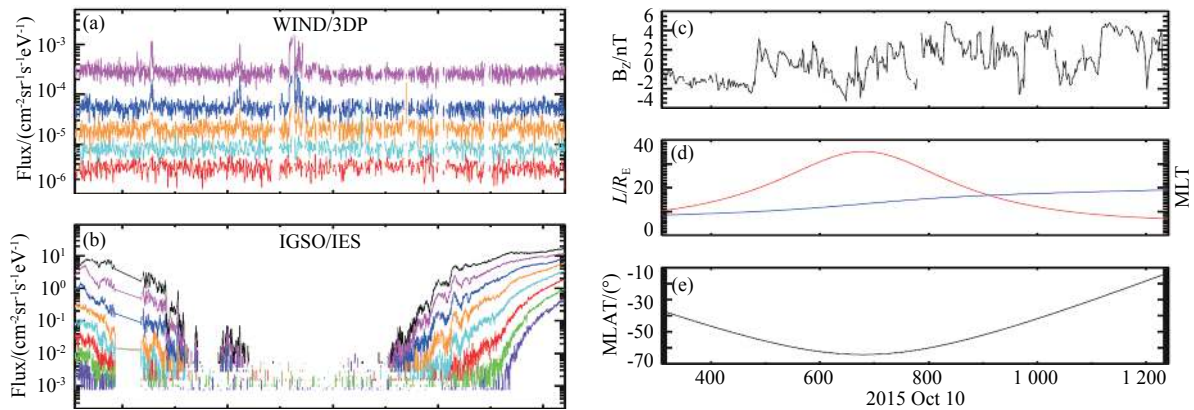


图 7 BD-IES 在向日面高磁纬区域观测到的能量电子通量增强事件

Fig. 7 Boosting of energetic electron observed in dayside high magnetic latitude region

王玲华等<sup>[18]</sup>对包括这一事件在内的 BD-IES 在 2015 年 10 月到 2016 年 1 月观测到的 28 个类似事件进行了统计研究。通过分析这些事件中电子的幂律谱分布,他们发现这些事件中的电子可能是太阳风中 superhalo 电子经过某些过渡过程(如磁重联)形成的。

## 5 总结与展望

根据放射源能量刻度和精密脉冲信号源测试试验结果, BD-IES 的 9 个方向通道的系统总电子学噪声最小为 4.17 keV, 最大为 6.20 keV, 平均为 5.15 keV。而 BD-IES 采用的英国 Micron 公司的位置灵敏探测器的性能至少达到 ClusterII-IES 的探测器水平。因此 BD-IES 在能量分辨率方面应优于 Cluster-IES。根据方向响应试验和仿真计算的结果, BD-IES 所采用的小孔成像技术可以很好地区分不同方向入射的电子, 其方向分辨率可以达到 20°。利用蒙特卡罗模拟, 我们详细估算了 BD-IES 的 9 个方向不同能档的有效几何因子, 同时利用 Geant4 仿真计算了在 GEO 的 BD-IES 的质子污

在向日面高磁纬区域观测到的能量电子通量增强事件。图 7(a) 为 WIND/3DP 观测的 40, 66, 108, 180, 310 keV 电子通量随时间的变化。图 7(b) 为不同能档的电子全向微分通量。图 7(c)~(e) 分别显示的是对应不同时间点的太阳风磁场  $B_z$ ,  $L$  值和磁地方时, 以及地磁纬度。从图 7 可见, 该事件出现在的磁地方时 12:00 左右, 地磁纬度在  $-60^\circ$  左右,  $L$  值在  $(24.1\sim 33.5)R_E$  之间。在这一事件中, 通量增加的主要是能量低于 150 keV 的电子。

染率。仿真结果表明 BD-IES 探头的防质子污染技术可以将 BD-IES 各能档质子平均污染率限制在 2% 左右<sup>[19]</sup>。因此, 在非太阳质子事件期间, BD-IES 观测结果中的质子污染是可以忽略的。

BD-IES 于 2015 年 9 月 30 日成功发射入轨, 并于 10 月 5 日顺利开机, 到目前已正常工作近 3 年。其初步观测结果表明 BD-IES 的观测与 RBSP 卫星 MagEIS 的类似观测具有可比性, 这说明 BD-IES 的数据是可信和可靠的。BD-IES 观测的 GEO 能量电子能谱是中国首次实现 50~600 keV 能段能量电子能谱的测量。在近 2 年的时间中, BD-IES 观测了大量的在不同磁层区域发生的 ULF 波动事件和亚暴粒子注入事件, 为研究波-粒子相互作用、亚暴电子注入和高能电子暴等磁层研究热点问题提供了有价值的数

据。采用小孔成像技术的能量电子谱仪最初搭载在 Polar 卫星上, 即 Polar-CEPPAD, 该仪器在成功获取近 20 年数据后已停止运行。ClusterII 卫星搭载的类似设备 ClusterII-RAPID-IES 在空间中运行了近 17 年, 已进入任务寿命末期。而 BD-IES 尚处

于仪器寿命初期,且搭载它的中国导航卫星的IGSO轨道非常特殊,因此BD-IES可以与RBSP等卫星形成多星联合测量条件<sup>[20]</sup>。

综上所述,BD-IES的在轨应用为我们进一步研究能量粒子加速、亚暴粒子注入等磁层热点问题提供了非常重要的机会。在未来的几年中,BD-IES将会应用到“风云”等空间环境探测应用平台上,相信其将会对我国空间物理理论研究和空间天气预报应用发挥重要作用。

## 致谢

作者由衷感谢北京大学空间探测仪器研制团队的所有成员、参与仪器数据分析的合作者和为仪器能够成功发射和运行做出努力的所有人员。

## 参考文献 (References)

- [1] BAKER D N, STONE E C. Energetic electron anisotropies in the magnetotail: identification of open and closed field-lines[J]. *Geophys Res Letters*, 1976, 3: 557
- [2] BAKER D N, STONE E C. The magnetopause electron layer along the distant magnetotail[J]. *Geophys Res Letters*, 1997, 4: 133
- [3] SCHOLER M, GLOECKLER G, HOVESTAND D, et al. Simultaneous observation of the plasma sheet in the near Earth and distant magnetotail, ISEE-1 and ISEE-3[J]. *Geophys Res Letters*, 1984, 11: 1034
- [4] SCHOLER M, BAKER D N, BAME S J, et al. Correlated observations of substorm effects in the near Earth region and the distant magnetotail[J]. *J Geophys Res*, 1985, 90: 4021
- [5] MORIOKA A, MISAWA H, MIYOSHI Y. Pitch angle distribution of relativistic electrons in the inner radiation belt and its relation to equatorial plasma wave turbulence phenomena[J]. *Geophys Res Letters*, 2001, 28: 931
- [6] HORNE R B, THORNE R M, GLAUERT S A, et al. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: A03225
- [7] BAKER D N, ELKINGTON S R, LI X, et al. Particle acceleration in the inner magnetosphere: physics and modeling[M]. Washington D C: AGU, 2005: 73-85
- [8] BAKER D N. How to cope with space weather[J]. *Science*, 2002, 297: 1486-1487
- [9] EVANS D S, GREER M S. Polar orbiting environmental satellite space experiment monitor-2: instrument descriptions and archive data documentation[G]. Tech Memo version 1.3. Boulder, CL, USA: Natl Oceanic and Atmos Admin Space Environ Cent, 2004
- [10] BLAKE J B, CARRANZA P A, CLAUDEPIERRE S G, et al. The Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) instruments aboard the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) spacecraft[J]. *Space Sci Rev*, 2013, 179: 383-421
- [11] WILKEN B, AXFORD W I, DAGLIS I, et al. RAPID: the imaging energetic particle spectrometer on cluster[J]. *Space Sci Rev*, 1997, 79: 399-473
- [12] ZOU H, LUO L, LI C F, et al. Angular response of 'pin-hole' imaging structure measured by collimated  $\beta$  source[J]. *Sci China: Tech Sci*, 2013, 56: 2675-2680
- [13] ZOU H, YE Y, ZONG Q G, et al. Monte Carlo simulations of the sensor head of imaging energetic electron spectrometer onboard a Chinese IGSO navigation satellite[J]. *Sci China: Tech Sci*, 2018, in press
- [14] ZONG Q G, HAO Y, ZOU H, et al. Radial propagation of magnetospheric substorm-injected energetic electrons observed using a BD-IES instrument and Van Allen Probes[J]. *Sci China: Earth Sci*, 2016, 59: 1508
- [15] ZOU H, YE Y, ZONG Q G, et al. Imaging energetic electron spectrometer onboard a Chinese navigation satellite in the inclined GEO orbit[J]. *Sci China: Tech Sci*, 2018, inpress
- [16] LI L, ZHOU X Z, ZONG Q G, et al. Ultralow frequency wave characteristics extracted from particle data: application of IGSO observations[J]. *Sci China: Tech Sci*, 2017, 60: 419-424
- [17] LI L, ZHOU X Z, ZONG Q G, et al. Charged particle behavior in localized ultralow frequency waves: theory and observations[J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 5900-5908
- [18] WANG L H, ZONG Q G, SHI Q, et al. Discrete energetic (~50 - 200keV) electron events in the high-altitude cusp/polar cap/lobe[J]. *Sci China: Tech Sci*, 2017, 60(12): 1-6
- [19] LUO L, ZOU H, ZONG Q G, et al. Anti-proton contamination design of the imaging energetic electron spectrometer based on Geant4 simulation[J]. *Sci China: Tech Sci*, 2015, 58(8)
- [20] ZONG Q G, WANG Y, ZOU H, et al. New magnetospheric substorm injection monitor: image electron spectrometer on board a Chinese navigation IGSO satellite[J]. *Space Weather*, 2018, 16: 121-125

(编辑: 闫德葵)

作者简介: 邹鸿(1975—),男,副教授,主要从事行星科学、磁层物理和空间探测技术研究; E-mail: hongzou@pku.edu.cn. 宗秋刚(1965—),男,长江学者特聘教授,主要从事磁层物理和空间探测研究; E-mail: qgzong@pku.edu.cn.