

谢 伦, 涂蔚超, 张 辉等. 基于 NOAA/POES 卫星观测的磁层相对论电子起源的初探. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1632 ~ 1638

Xie L., Tu W C., Zhang H., et al. NOAA/POES observation of the sources of the relativistic electron in the magnetosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(6): 1632 ~ 1638

# 基于 NOAA/POES 卫星观测的磁层相对论电子起源的初探

谢 伦, 涂蔚超, 张 辉, 濮祖荫

北京大学空间物理与应用技术研究所, 北京 100871

**摘 要** 本文利用低高度极轨卫星 NOAA/POES 的观测数据, 并结合 ACE 卫星和 Polar 卫星的观测结果, 研究分析了磁层相对论电子的起源. NOAA/POES 卫星对于不同地磁活动时期相对论电子的分布和起源进行了较为详细观测, 分析结果表明 (1) 亚暴期间注入磁层的能量电子可以为与磁暴相关的磁层高能电子暴提供种子电子; (2) 太阳质子事件期间太阳风中的能量电子也可以为磁层中的相对论电子提供所需要的源.

**关键词** 相对论电子, NOAA 卫星, 磁亚暴, 太阳质子事件

文章编号 0001 - 5733(2007)06 - 1632 - 07

中图分类号 P533

收稿日期 2007 - 03 - 12, 2007 - 06 - 25 收修定稿

## NOAA/POES observation of the sources of the relativistic electron in the magnetosphere

XIE Lun, TU Wei-Chao, ZHANG Hui, PU Zu-Yin

*Institute of Space Physics and Applied Technology, Peking University, Beijing 100871, China*

**Abstract** Using data from low-altitude polar orbit satellite of NOAA and ACE, we investigate the possible sources of the enhancement of relativistic electron in the magnetosphere. The observation from NOAA for the different geomagnetic activity period show that substorm injections provide seed electrons for MeV electron enhancement associated with geomagnetic storms and that energetic electrons in the solar wind provide an alternative sources for the relativistic electrons in the magnetosphere during the SEP (Solar Energetic Proton) events.

**Key words** Relativistic electron, NOAA satellite, Substorm, Solar Proton Events

## 1 引 言

磁层中能量为  $\sim 100$  keV 到  $\sim$  MeV 的相对论电子通量增强事件又被称之为高能电子暴. 它通常发生在磁暴期间, 是磁层常见的危害最大的灾难性空间天气现象. 相对论电子具有极强的穿透力, 能进入并积聚在卫星内部电解质材料中, 并在其附近产

生高达数千伏的电位差. 由此引起的放电脉冲可损坏卫星材料, 破坏电子器件, 导致卫星报废, 是同步高度通讯卫星、导航卫星和高纬低轨卫星面临的巨大威胁. 因此对相对论电子的起源、形成和损失机制的研究在科学和应用两方面都具有重大意义, 是当前空间天气和空间物理学的前沿课题.

最早在 1979 年 Paulikas 和 Blake 首先注意到相对论电子通量和太阳风速度是联系在一起的<sup>[1]</sup>.

基金项目 国家自然科学基金项目(40504017)资助.

作者简介 谢 伦, 女, 1973 年生, 2004 年博士毕业于北京大学, 主要从事磁层物理和模型的研究. E-mail: xielun@pku.edu.cn

1989 年基于 LANL 同步轨道卫星的测量, Cayton 等<sup>[2]</sup>对同步轨道的相对论电子进行了更全面的分析. Li 等<sup>[3]</sup>和 Hudson 等<sup>[4,5]</sup>通过激波加速的机制成功模拟了 1991 年 3 月 24 日伴行星际激波的大磁暴所导致的相对论电子快速增强的事件. 1994 年 Baker 等<sup>[6]</sup>利用 SAMPEX 的数据描述了和磁暴相联系的相对论电子事件的加速和损失机制. 他们认为一两天的相对论电子通量增强是磁层对宇宙电子进行有效显著的加速引起的, 5~10 天的相对论电子通量衰减是由于较慢的电子投掷角扩散引起的. Baker 等<sup>[7]</sup>在前人的基础上,更进一步分析了相对论电子和行星际磁场(IMF)及太阳风的关系. 并从相对论电子增强和磁暴周期性的关系的研究中发现, 太阳风高速流是产生相对论电子十分有效的因素<sup>[8]</sup>. 同时 Baker 提出了相对论电子产生具备两个条件: (1) 100~200 keV 的种子电子; (2) 长时间高能量的 pc4~5 频段的 ULF 脉动<sup>[9]</sup>.

总结几十年来相对论电子的研究工作, 可以看出相对论电子的研究主要集中在三个方面: (1) 相对论电子的源在哪里? (2) 相对论电子是怎样进行加速的? (3) 相对论电子是如何损失的?

相对论电子加速机制的研究一直是空间物理研究的热点问题. 相对论电子的加速机制主要有以下两种观点: 一种是 Li 等人<sup>[10]</sup>为代表的较高能量的种子电子通过径向扩散从高  $L$  ( $L \sim 11$ ) 处向低  $L$  扩散, 同时得到加速; 另一种是 Reeves 等人<sup>[11]</sup>提出的在  $L \sim 4$  附近区域内由于低频等离子波 ULF 和已位于磁层内部的较高能量 ( $\sim 100$  keV) 电子之间的共振相互作用, 使 keV 电子能量增加到 MeV 以上. 然而, 在现有的相对论电子加速机制中, 共同存在一个有待解决的问题——磁层中相对论电子的起源? 即使 Li 等<sup>[3]</sup>用行星际激波加速来解释突发型高能电子暴形成机制和用径向扩散来解释滞后型高能电子暴时, 也需要存在初始能量几百 keV 到 MeV 的种子电子. 因此这些相对论电子加速机制需要在磁层的不同区域(磁层边界、中磁尾和极盖区)存在高能电子源, 而相对论电子的起源仍旧是一个没有完全解决的问题. 目前可能的关于相对论电子起源的解释有两种:

#### (1) 亚暴产生的种子电子

目前普遍认为, 高能电子暴起源于对磁层亚暴产生的能量  $E \sim (10 \sim 10^2)$  keV 的中能电子的加速过程<sup>[12]</sup>. 太阳风高速流期间, 高速和强磁场(经常为南向磁场)引起强的亚暴活动性. 亚暴在磁尾  $L =$

7~10 处产生大量的能量为 30~300 keV 的中能电子. 亚暴中能电子在对流电场驱动下向向阳面漂移. 若磁场存在不停的起伏, 则不少电子在感生电场作用下, 一面增能, 一面向内磁层渗透, 穿入其 Alfvén 层, 变成沿闭合轨道绕地球作漂移运动的捕获粒子. 上述亚暴电子作为“种子电子”, 经过再次加速, 成为高能相对论电子. 因此这种亚暴产生的种子电子为高能电子暴的形成提供了源.

#### (2) 来自太阳风中的种子电子

太阳风中的高能电子是否能提供磁层高能电子源是人们一直在探讨, 但还没有解决的问题. Baker 等人<sup>[13,14]</sup>曾经指出太阳风中的高能电子可能为磁层中的相对论电子提供种子电子, 但他们没有给出正确的观测依据.

本文通过分析 NOAA/POES 卫星对高能电子的观测数据, 对于两种高能电子的起源分别进行了初步的分析和研究, 研究结果为相对论电子起源提供了重要的观测依据.

## 2 NOAA/POES 卫星

NOAA/POES 卫星是美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发射的系列极轨低高度太阳同步轨道天气卫星. 卫星携带了空间环境监测器 SEM (Space Environment Monitor), 用来沿卫星轨道探测离子和电子的辐射通量. NOAA/POES 是圆轨道卫星, 轨道高度变化范围约是 800 km 到 850 km, 实际倾角变化范围约是 98 到 99°, 轨道周期为 101 min. 本文中使用的 NOAA-15 和 NOAA-16 (15 和 16 是卫星的序列号) 的 16 谱道、8 s 精度的卫星数据. SEM 由 3 个探测仪器(MEPED、TED 和 HEPED)组成. 本文中使用的数据来自中等能量质子电子探测器(Medium Energy Proton and Electron Detector, MEPED). MEPED 由两个探头组成: 方向粒子探头和全向粒子探头. 本文使用的数据来自方向粒子探头探测的数据, 质子的能量范围为 60 keV~6900 keV, 电子能量范围为 30 keV~2500 keV.

MEPED 上的电子探测器能自动清除能量大于 1 MeV 的质子对电子探测器的影响. 但是能量在 135 keV 到 1 MeV 的质子仍能够污染方向电子探测器. 因此我们利用方向质子探测器的测量值对本文中使用的电子探测数据进行了修正, 基本消除了质子对电子数据的污染.

### 3 观测结果

#### 3.1 亚暴产生的种子电子

2001 年 11 月 4~14 日期间,发生了两次地磁暴(6 日和 10 日),  $Dst$  指数分别达到了  $-150$  nT 和  $-100$  nT. 这两次的磁暴期间,都有频繁的亚暴活动. 图 1a 和图 1b 分别给出了磁暴期间能量为  $E > 0.3$  MeV 和  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  的电子计数随  $L$  值和时间  $t$  的变化,图中右侧的色标表示电子的计数率(计数/秒)(同图 3 和图 4). 从图 1a 可以看出  $E > 0.3$  MeV 高能电子的计数在两次磁暴主相期间都会减少,然后在磁暴恢复相期间(11 月 7 日 02:00 UT 和 11 日 01:00 UT)逐渐增加. 在磁暴的主相和恢复相期间,亚暴活动频繁. AE 指数在 11 月 6 日 15:00 UT 和 11 月 10 日 12:00 UT 分别达到  $-2000$  nT 和  $-1500$  nT. 由图 1b 可以明显地看出在相应的亚暴活动强烈时期内,位于内磁层的等离子体片区域,能量为  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  的电子通量显著增强,表明有大量亚暴产生的能量电子由磁尾注入到等离子

体片中. 图 2 给出了 11 月 5~6 日能量  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  的种子电子在不同  $L$  值上随时间的变化. 11 月 5 日和 6 日分别在 19:00 UT 和 12:00 UT 有较强的亚暴活动,但是我们可以看到 11 月 5 日亚暴活动注入的能量电子仅可以注入到  $L \sim 6$  附近,而 11 月 6 日亚暴产生的种子电子可以随着磁暴主相电场的增加被输运到更深的区域,这些种子电子最低可以注入到  $L \sim 3.5$ . 值得指出的是这些种子电子注入的时间都发生在磁暴主相期间和高能电子增加之前. 这就说明了,磁暴主相期间(高能电子增加之前),位于内磁层  $L \sim 4$  的区域充满了亚暴产生的种子电子. 因此我们可以得到这样的推断:亚暴产生的  $\sim 100 \text{ keV}$  电子在磁暴主相期间被加速渗透到内磁层,成为背景的种子电子,然后在磁层内部被局地加速为 MeV 的相对论电子. 2001 年 3 月 31 日的大磁暴期间的观测数据也显示了相同的特征. 图 3 为 2001 年 3 月末磁暴期间能量分别为  $E > 0.3$  MeV 和  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  的电子计数随  $L$  值与时间  $t$  的变化. 从图中可以看出在 高能电子增加之前都有亚暴产生的种子电子向内磁层的渗透.

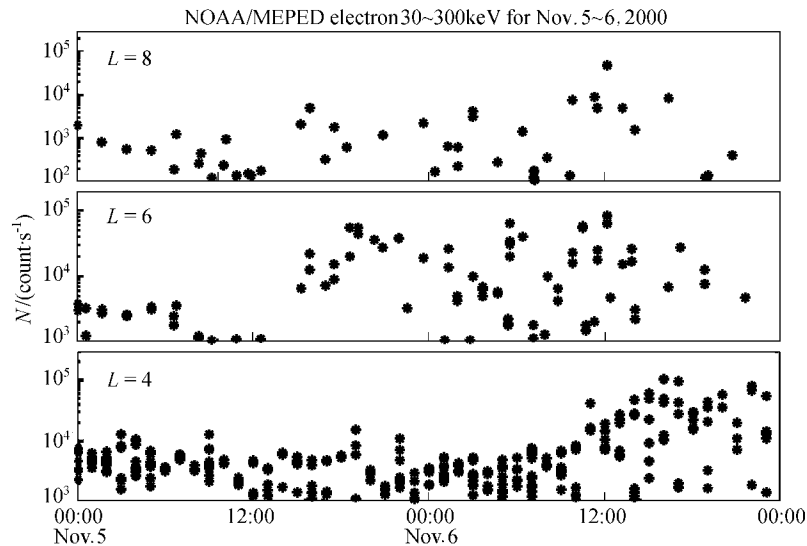


图 2 2000 年 11 月 5~6 日  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  的种子电子计数率( $N$ )在不同  $L$  值上随时间的变化

Fig. 2 The variation of the seed electron  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  with different  $L$  value during Nov. 5~6, 2000

#### 3.2 来自太阳风的种子电子

2003 年 10 月 28 日 11:10 UT 爆发了本太阳活动周以来最大的一次 X17 级耀斑,此耀斑伴随一强全晕 CME 事件. 接下来在 11:50 UT 同步轨道 GOES 卫星观测到一次强太阳质子事件,观测显示大于  $10 \text{ MeV}$  的质子通量迅速上升. 来自太阳的大磁云扫过地球产生两个大磁暴. 磁暴发生时间分别为 10 月 29 日 06:11 UT ( $\sim 350$  nT) 和 30 日 16:37 UT

( $\sim 383$  nT). 图 4 显示了 2003 年 10 月 27~31 日太阳质子事件期间能量为  $E > 0.3 \text{ MeV}$  的电子计数随  $L$  值与时间  $t$  的变化. 从图中可以看出在 10 月 28 日 12:00 UT 相对论电子在整个磁层空间的急剧增加. 这种增加发生在 10 月 29 日的磁暴之前,与太阳质子事件的起始时间一致,因此显示了与太阳质子事件高度的相关性. 图 4 还清楚地显示出相对论电子的增加贯穿整个高  $L$  区域 ( $L > 6$ ),并且这种增

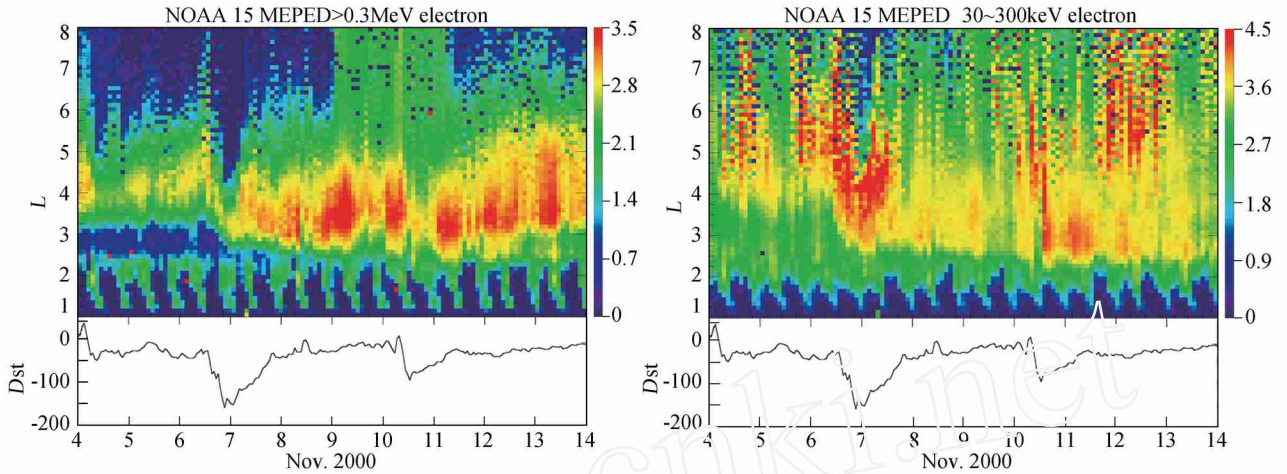


图1 2000年11月4~14日  $E > 0.3 \text{ MeV}$  (a) 和  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  (b) 的电子计数随  $L$  值随时间  $t$  的变化谱图, 以及  $Dst$  指数随时间的变化

Fig.1 The counts rate of  $E > 0.3 \text{ MeV}$  and  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  electrons as a function of time and  $L$ -shell during Nov. 4 ~ 14, 2000. The  $Dst$  index is shown below

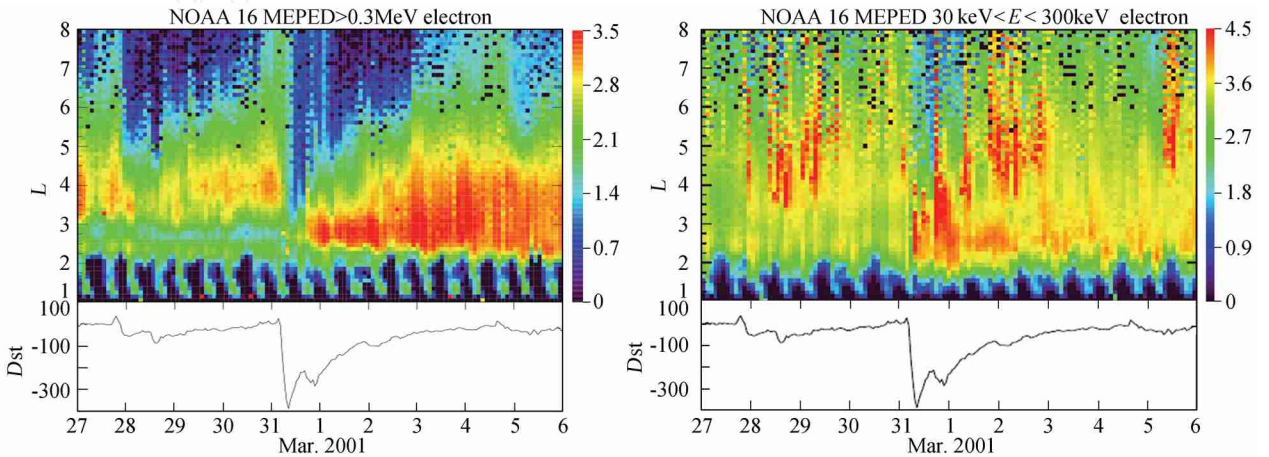


图3 2001年3月27日~4月5日  $E > 0.3 \text{ MeV}$  (a) 和  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  (b) 的电子计数随  $L$  值随时间  $t$  的变化谱图, 以及  $Dst$  指数随时间的变化

Fig.3 The counts rate of  $E > 0.3 \text{ MeV}$  and  $30 \text{ keV} < E < 300 \text{ keV}$  electrons as a function of time and  $L$ -shell during Mar. 27 ~ Apr. 5, 2001. The index is shown below

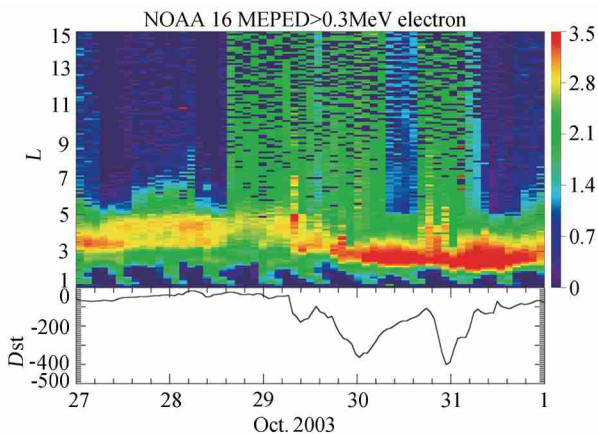


图4 2003年10月27~31日太阳质子事件期间能量分别为  $E > 0.3 \text{ MeV}$  的电子计数率随  $L$  值随时间的变化谱图  
Fig.4 The counts rate of  $> 0.3 \text{ MeV}$  electrons as a function of time and  $L$ -shell during Oct. 27 ~ 31, 2003. The  $Dst$  index is shown below

加几乎是同时的,没有时间的延迟. 图5给出了10月28~29日ACE卫星探测到的能量175~315 keV的电子和 $> 10 \text{ MeV}$ 质子的微分通量随时间的变化. ACE的探测数据显示,太阳质子事件期间高能质子增加的同时,能量为几百keV的电子通量也显著地增加. 电子增加的起始时间在28日的12:00 UT,与NOAA/POES卫星观测到的高能电子计数的增加具有同时性.

根据以上的观测事实,我们会提出这样一个问题:太阳质子事件中来自太阳风的能量电子是否是磁层MeV电子一个很重要的起源? 为了验证高能电子这种可能的起源,我们分析了NOAA和POLAR卫星的一些观测数据. 我们设定当磁纬度大于 $70^\circ$ 时NOAA/POES轨道卫星探测到的为极尖区的电子. 这是因为在开磁场模型中,磁纬度大于 $70^\circ$ 时的磁力

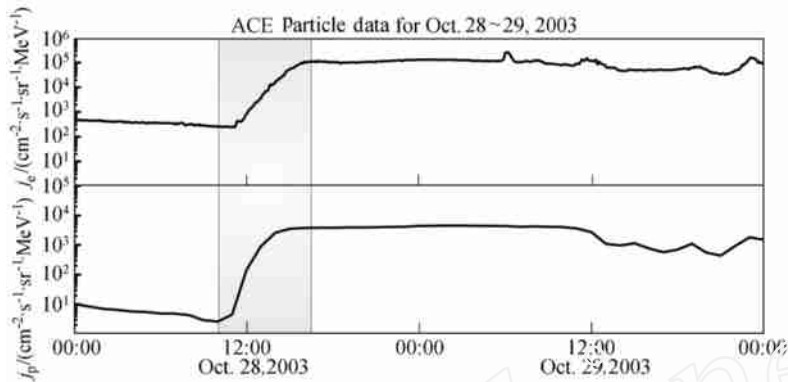


图5 2003年10月28~29日ACE卫星探测到的能量175~315 keV的电子和>10 MeV质子微分通量随时间的变化  
Fig. 5 The variation of energetic electron (175~315 keV) and proton (>10 MeV) flux of Oct. 28~29 measured by the ACE

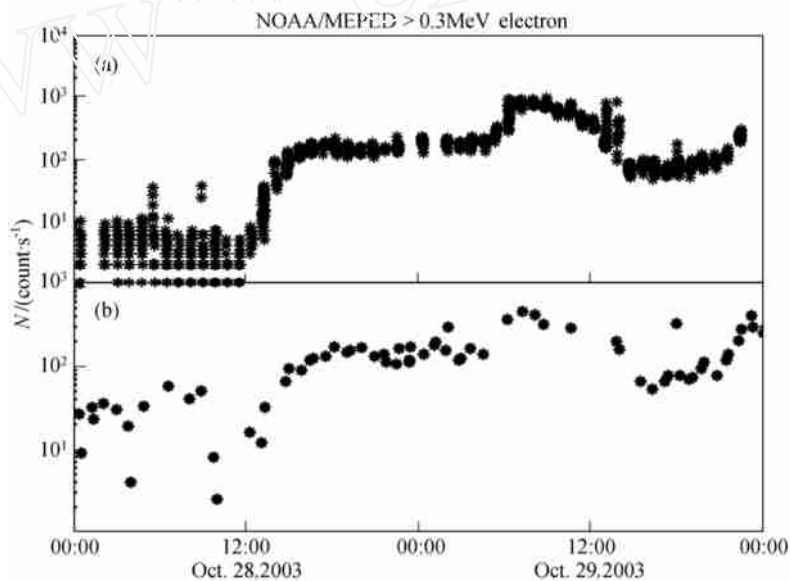


图6 NOAA/MEPED的探测数据:(a)磁纬度大于70的极盖区  $E > 0.3$  MeV电子随时间的变化;  
(b)  $L = 6.6$ 处  $E > 0.3$  MeV电子随时间的变化

Fig. 6 (a) Polar cap electron counts rates (>0.3 MeV) measured by NOAA during Oct. 28~29, 2003.  
(b) Same as (a) but showing electron counts rate at low latitudes for  $L = 6.6$

线与行星际磁场是连通的,相当于NOAA卫星采集到的是来自行星际太阳风中的数据.图6a为NOAA卫星探测到的磁纬度大于70极盖区的  $E > 0.3$  MeV电子随时间的变化.图6b为与图6a相同时间段NOAA卫星探测到的位于  $L = 6.6$ ,  $E > 0.3$  MeV电子随时间的变化.从图6a可以看出自10月28日12:00 UT开始  $E > 0.3$  MeV的电子与背景值相比有明显的增加,与ACE观测到的能量电子的增加具有同时性.这说明了NOAA卫星在极盖区观测到的是来自太阳风的能量电子.同时图6b显示了在磁层中  $L = 6.6$ 的区域也观测到高能电子的增加.因此由图6的结果可以看出,在  $L = 6.6$ 处电子的增加与来自太阳风极盖区电子增加是同步的、相关的.

POLAR卫星是美国ISTP卫星计划之一,用来探测来自高高度 ( $2R_E \sim 8R_E$ )和低高度 ( $< 2R_E$ )地球空间的数据.2003年10月28日12:00 UT附近,POLAR卫星接近地球赤道附近并穿过地球辐射带区域.图7给出了POLAR卫星在相同时间的观测数据,我们可以看到在同样的时间段(12:00 UT),POLAR卫星观测的高能电子的微分通量也有明显的增加.

以上的观测事实证明,在太阳质子事件期间,来自太阳风的高能电子可以通过某种方式直接进入地球内磁层.同时,我们还采用了另外一种较直接的研究粒子起源的方法——能谱分析法.我们通过比较太阳风中能量电子的能谱和磁层  $L = 6.6$ 处能量电子的能谱,来进一步验证太阳风高能电子可以为

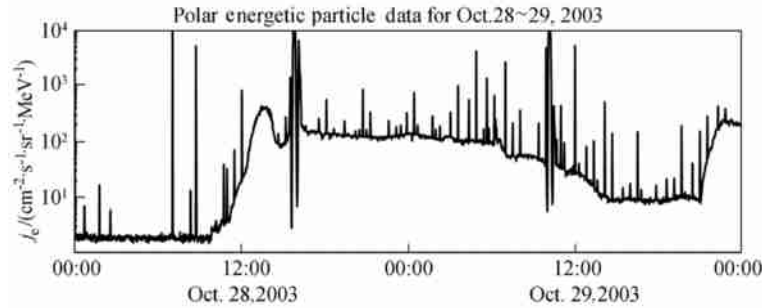


图7 POLAR卫星在2003年10月28~29日  $E > 0.3$  MeV 电子的微分通量随时间的变化

Fig. 7 Spin average integral electron rates with  $E > 0.3$  MeV of POLAR for the same period as in Fig. 6

磁层内的相对论电子提供源.

观测表明,太阳风和磁层中的能量粒子和高能粒子的能谱分布服从幂次定律  $j(E) \propto E^{-\alpha}$ , 其中  $E$  为能量值,  $j(E)$  为该能量对应的微分通量,  $\alpha$  为幂指数. 通过比较  $\alpha$  值, 即可获得两部分粒子能谱的相似性和差异性. 分析太阳风中能量电子的能谱, 我们是基于 ACE 卫星探测到的 38 ~ 53 keV、53 ~ 103 keV、103 ~ 175 keV 和 175 ~ 315 keV 四个能档的电子数据; 而分析磁层  $L = 6.6$  电子的能谱我们是基于 NOAA/MEPED 探测到的 30 ~ 100 keV、100 ~ 300 keV 和 0.3 ~ 2.5 MeV 三个能档的电子数据. 比较能谱分析结果中两者的  $\alpha$  数值, 可较直接地研究太阳风提供磁层种子电子的可能性.

我们针对 2003 年 10 月 28 日 SEP 事件期间的高能电子暴进行了研究, 能谱图如图 8 所示. 所得结果是, 太阳风中能量电子能谱对应的  $\alpha$  值为  $2.70156 \pm 0.4587$ , 磁层  $L = 6.6$  处电子能谱的  $\alpha$  值为  $2.25528 \pm 0.12429$ , 两者在误差范围内相等, 这说明太阳风中的能量电子和磁层相对论电子很可能是同一个源.

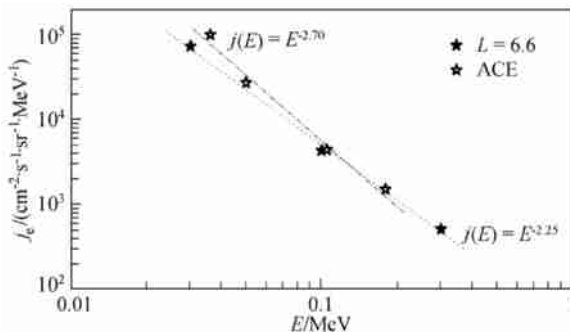


图8 2003年10月28日 SEP事件期间 ACE卫星探测到的电子能谱图和磁层  $L = 6.6$  处 NOAA/MEPED 探测到的电子能谱图

Fig. 8 The energy spectrum of the high energy electron detected by ACE and NOAA during SEP event in Nov. 28, 2003

根据以上的观测数据和理论分析, 我们进一步证明了在太阳质子事件期间, 来自太阳风的能量电子可以为发生在磁层中的相对论电子提供需要的源.

## 4 结论与讨论

我们对 2000 年 11 月和 2001 年 3 月大磁暴期间的高能电子暴进行了研究, 结果清楚地表明了大磁暴期间发生的磁层亚暴可以产生能量为  $\sim 100$  keV 的电子并注入到内磁层, 这些电子在某种有效的加速机制(如 ULF 与电子之间的共振相互作用)作用下成为相对论电子, 为与磁暴相关的高能电子暴的形成提供了源.

对于太阳质子事件期间发生的高能电子暴的研究表明, 来自太阳风中的高能电子, 可以通过某种机制直接进入磁层, 为磁层中的相对论电子提供所需要的源. 但是高能电子是通过何种途径进入磁层的? Sheldon 等人在 1998 年根据 POLAR 卫星的观测数据发现, 极尖区存在大量的 MeV 电子<sup>[15]</sup>. 因此可以给出这样一个推断: 当太阳质子事件中产生的高能电子到达地球后, 可以沿着磁层开放磁力线进入极盖区和极尖区, 然后进一步深入内磁层并被捕获. 极尖区是带电粒子的一个准捕获区, 在其中运动的带电粒子环绕极尖区“赤道”漂移若干圈后, 会沿等  $B$  线侵入到内磁层, 导致在地球同步轨道观测到高能电子通量的突增. 最近 Zhou 等<sup>[16]</sup> 通过详细的三维轨道计算结果证明了这种机制的存在.

致谢 本文使用的数据来自美国国家海洋大气局 (NOAA) 的国家地球物理数据中心 (National Geophysical Data Center, NGDC).

## 参考文献 (References)

- [1] Paulikas G, Blake J. Effects of the solar wind on magnetospheric

- dynamics: energetic electrons at the synchronous orbit. In: Olson W ed. *Quantitative Modeling of the Magnetospheric Processes*. Washington D. C. : AGU Geophysical Monograph 79, 1979. 180 ~ 202
- [ 2 ] Cayton T E, Belian R D, Gary S P, et al. Energetic electron components at geosynchronous orbit. *Geophys. Res. Lett.*, 1989, **16**: 147 ~ 151
- [ 3 ] Li X, Roth I, Temerin M. Simulation of the prompt energization and transport of radiation particles during the march 23, 1991 SSC. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**: 2423 ~ 2426
- [ 4 ] Hudson M K, Marchenko V A, Roth I, et al. Radiation belt formation during storm sudden commencements and loss during main phase. *Adv. Space Res.*, 1998, **21**(4): 597 ~ 607
- [ 5 ] Hudson M K, Elkington S R, Lyon J G, et al. Simulations of radiation belt formation during storm sudden commencements. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 14087 ~ 14102
- [ 6 ] Baker D N, Klimas A J, Vassiliadis D. Global convection, low-dimensional magnetospheric dynamic, and deterministic chaos. In: Kan J R, Akasofu S I eds. *Magnetospheric Substorms*. Fairbanks: Geophys. Insti., 1994. 75 ~ 80
- [ 7 ] Baker D N, Pulkkinen T I, Toivanen P, et al. A possible interpretation of cold ion beams in the earth's tail lobe. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 1996, **48**: 699 ~ 710
- [ 8 ] Baker D N, Li X, Turner N, et al. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 14141 ~ 14148
- [ 9 ] Baker D N, Pulkkinen T I, Li X, et al. Coronal mass ejections, magnetic clouds, and relativistic magnetospheric electron events: ISTP. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 17279 ~ 17291
- [ 10 ] Li X, Baker D, Reeves G, et al. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit on the basis of solar wind measurement. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 1887 ~ 1890
- [ 11 ] Reeves G D, Belian R D, Baker D N, et al. The global response of relativistic radiation belt electrons to the January 1997 magnetic cloud. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 3265 ~ 3268
- [ 12 ] Baker D N, Blake J B, Callis L B, et al. Relativistic electrons near geostationary orbit: evidence for internal magnetospheric acceleration. *Geophys. Res. Lett.*, 1989, **16**: 559 ~ 562
- [ 13 ] Baker D N, Higbie P R, Belian R D, et al. Do jovian electrons influence the terrestrial outer radiation zone? *Geophys. Res. Lett.*, 1979, **6**: 531 ~ 534
- [ 14 ] Baker D N, Kanekal S, Looper M, et al. Jovian, solar and other possible sources of radiation belt particles. In: Lemaire D H J ed. *Radiation Belts Models and Standards*. Washington D. C. : AGU Geophysical Monograph 97, 1997. 49 ~ 55
- [ 15 ] Sheldon R, Spence H, Sullivan J, et al. The discovery of trapped energetic electrons in the outer cusp. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 1825 ~ 1828
- [ 16 ] Zhou X Z, Fritz T A, Zong Q G, et al. The cusp: a window for particle exchange between the radiation belt and the solar wind. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**: 3131 ~ 3137

(本文编辑 何燕)