

2000 年 7 月 14 日太阳高能粒子事件引起地球 同步轨道区相对论电子通量巨幅增加*

赵 华^{①**} 朱光武^① 王世金^① 高玉芬^② 刘振兴^①

(^①中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气研究开放实验室, 北京 100080; ^②中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要 2000 年 7 月 14 日 10:24UT 一个 X5.6 级的耀斑暴发生在太阳中心子午线附近 (AR 9077), 同时伴随着一个朝向地球的 CME 事件及太阳高能粒子 (Solar Energetic Particle, SEP) 事件. 这次耀斑暴发及 CME 事件引起了地球磁层、电离层及高层大气的强烈扰动. 中国“风云二号(B)”卫星上的高能粒子探测器 (EPD) 观测到 SEP 事件期间, 同步轨道区高能质子、相对论电子有非常剧烈的增加. SEP 期间, 高能质子对相对论电子通量的探测造成严重的污染. 结合“风云二号(B)”卫星上的高能粒子探测器 (EPD) 的特性, 建立了一种从相对论电子通量探测中“清除”高能质子“污染”的方法, 并对相对论电子通量的探测数据实施“清洁”处理. “纯净的”相对论电子通量探测结果显示, 当行星际磁场南向时, 上游太阳风中的高能电子使同步轨道区相对论电子通量有大幅度的增加.

关键词 同步轨道区 相对论电子通量 太阳高能粒子事件

2000 年进入到太阳活动的高峰年, 不断有大的太阳活动暴发, 造成近地空间环境的剧烈扰动. 特别是 7 月 10 日以来, 太阳上连续不断地发生太阳耀斑暴发及日冕物质抛射 (CME, Coronal Mass Ejection Event) 事件. 7 月 14 日太阳发生了自 1989 年 3 月以来最强的一次耀斑暴发活动. 一个 X5.6 级的耀斑暴发生于 14 日太阳中心子午线附近 (AR 9077), 耀斑光强的极大值时间是 2000 年 7 月 14 日 10:24UT; 耀斑同时伴随着一个朝向地球的 CME 事件及太阳高能粒子事件. 耀斑暴发及 CME 事件引起了地球磁层、电离层及高层大气的较大扰动. 使许多科学探测卫星的工作及短波通讯受到较大的干扰. 如美国的 WIND 太阳风观测卫星的探测数据在 7 月 14 日 11:40UT ~ 7 月 16 日 17:57UT 期间出现中断. 我国也报道了短波通讯受到这次太阳剧烈活动的严重干扰 (参见《北京青年报》2000 年 7 月 17 日第一版).

地球同步轨道区是许多应用卫星运行的重要区域. 太阳耀斑暴发伴随的高能质子会造成航天器上微电子器件的总剂量效应、单粒子翻转效应, 使星上计算机产生错误指令或使存储器锁定, 给卫星的安全运行带来极大的危害. 多年来人们了解到相对论电子也是造成同步轨道卫星计划失败或发生故障的重要原因之一. 经过长期和大量的观测研究, 人们已认识到同步轨道区相对论电子通量是多变的, 并且变化的动态范围也很大. 经常表现出几个量级的通量

2001-11-20 收稿

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 49774245, 49834040)

** E-mail: hzhao@center.cssar.ac.cn

增加,持续一天的时间尺度^[1].人们已提出两种机制来解释同步轨道区相对论电子的变化.第一种是磁暴产生的相对论电子通量快速变化^[2].第二种是同步轨道区相对论电子通量的变化与一天前的太阳风流速有很好的相关性^[3].这种相关性可能是由于太阳风流速的变化扰动磁层,驱动内磁层辐射带的相对论电子沿径向扩散到同步轨道区.

在本文中我们将研究中国“风云二号(B)”的观测结果.这些观测表明引起同步轨道区相对论电子通量增加的过程还可能存在着有别于前述两种之外的第三种形式:太阳高能粒子事件能引起同步轨道区相对论($E > 1.6$ MeV)电子通量的大幅增加.电子通量的增加发生在磁暴出现之前.在电子通量增加时,行星际磁场的方向指向南,而太阳风动压及流速的扰动都很小.

很久以前,人们就知道太阳高能粒子事件发生时有相对论电子产生出来^[4].Bothmer 等人^[5]的研究结果显示,CME 似乎在太阳高能粒子事件中扮演着重要的角色.在太阳高能粒子事件期间相对论电子喷出太阳日冕区并传播到行星际空间,并伴随着高能质子大通量辐射.有时质子的能量高达 700 MeV,对一些卫星上相对论电子探测器的探测结果造成严重“污染”.起源于太阳的相对论电子由于受到地球磁层的屏蔽作用不能直接进入地球同步轨道区.多年来,人们认为在 SEP 事件期间同步轨道卫星上相对论电子探测器观测的通量增加是由于高能质子污染造成的.在本文中我们将给出一些由中国科学院空间中心研制的相对论电子探测器 EPD 在同步轨道上获得的“纯净”相对论电子通量观测结果.EPD 探测器是经特殊设计并采用复合及反复合技术以尽量减弱高能质子及重粒子对相对论电子探测的污染.我们在本文中建立了一种从相对论电子通量探测中“清除”高能质子“污染”的方法,利用高能质子探测谱计算高能质子对电子探测造成的污染,并对相对论电子通量的探测数据实施“清洁”处理,从而获得 SEP 事件期间同步轨道区“纯净的”相对论电子通量观测数据.

1 观测仪器

搭载在“风云二号(B)”同步轨道卫星上的高能粒子探测器 EPD 是中国科学院空间中心为监测空间高能粒子通量而特别研制的.“风云二号(B)”同步轨道卫星于 2000 年 6 月 24 日成功发射,定轨于东经 105°的地球同步轨道.搭载在“风云二号(B)”同步轨道卫星上的 EPD 探

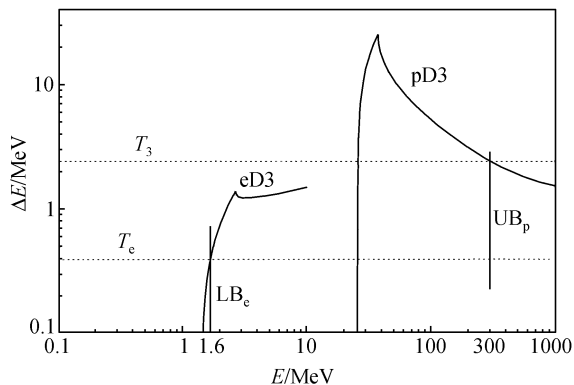


图 1 通过计算得到的粒子能量与粒子在相对论电子探测器中 D3 探头上能量沉积的关系曲线
曲线 pD3 是质子的能量沉积特性,而 eD3 则标记相对论电子的能量沉积特性曲线

测器已经过多次飞行测试,其工作稳定可靠.EPD 由 3 个硅探测器(D1, D2, D3)组成.EPD 能够探测能量 $E > 1.6$ MeV 的相对论电子通量,高能质子的探测谱段为: $E > 1.1$ MeV, $3.5 < E < 26$ MeV, $10 < E < 26$ MeV 和 $26 < E < 300$ MeV. EPD 也具有探测一些重粒子通量的能力.图 1 给出了通过计算得到的粒子能量与粒子在 D3 探测器上能量沉积的关系曲线.图中 eD3 表示电子的能量沉积曲线, pD3 是质子的沉积曲线.图中的两条竖直直线分别为电子探测的能量下限(1.6 MeV)及质子探测的能量上限(300 MeV).图中的两条水平虚线表示能量损失处于其

间的质子将对电子探测产生“污染”。从图 1 能够清楚地看出, 虽然 EPD 采用了反复合技术减弱质子干扰, 能量为 25.7 ~ 25.9 MeV 和能量大于 290 MeV 的高能质子仍然对相对论电子通量探测造成污染. 290MeV 的选取是由于计算得到的质子能量沉积特性曲线 pD3 在实际实验条件下会有一定幅度的涨落. 经实验研究发现, 高能段质子造成电子探测器污染的能量下限为 290 MeV.

在本文里, 用于记录这次磁暴的磁通门磁力仪^[6]是由中国地震局与美国加州大学洛杉矶分校(UCLA)的合作项目——中国低纬地磁台阵 SMALL(Sino-Magnetic Array at Low Latitudes)项目提供的, 仪器由 UCLA 设计制造. 上游太阳风参数是由 WIND 卫星上磁强计 MFI^[7]提供行星际磁场, 太阳风实验探测器 SWE^[8]提供太阳风动压、密度和速度.

2 电子通量观测中高能质子造成的污染

关于太阳高能粒子事件期间行星际空间质子能谱的研究已有很长的历史^[9]. McGuire 等^[10]的研究结果显示, 平均来说太阳高能粒子事件期间, 能量为 0.8 ~ 400 MeV 质子谱的主要特征是用 Bessel 函数形式来描述的. 我们在研究中认识到, 由于磁层的存在, 太阳高能粒子事件期间从太阳风进入磁层的高能质子谱将与太阳风中质子谱有所不同. 为简单起见, 我们假设在太阳高能粒子事件期间地球同步轨道区能量为 10 ~ 300 MeV 的质子谱为幂律形式:

$$dJ/dE = AE^{-\gamma}, \quad (1)$$

其中 dJ/dE 是高能质子的微分通量, E 是质子的能量(单位为 MeV), 而 γ 是质子谱的幂指数. A 和 γ 将由“风云二号(B)”卫星上与相对论电子通量探测 F_e 同时进行的质子探测而确定. 能量大于 100 MeV 的质子谱比低能段更陡. 我们在本文中将把从低能段得出的质子谱外推到高能部分, 这可能引起对质子污染的过大估计.

能量在 $E_1 < E < E_2$ 范围内的全向通量 $F(E_1, E_2)$ 通过微分通量表示为

$$F(E_1, E_2) = 4\pi \int_{E_1}^{E_2} AE^{-\gamma} dE = \frac{4\pi A}{1-\gamma} (E_2^{1-\gamma} - E_1^{1-\gamma}), \quad (2)$$

γ 可以很容易地由下式得到:

$$B = \frac{F(E_1, E_2)}{F(E_3, E_4)} = \frac{E_2^{1-\gamma} - E_1^{1-\gamma}}{E_4^{1-\gamma} - E_3^{1-\gamma}}. \quad (3)$$

针对“风云二号”上的质子探测器, 10 MeV = E_1 < E_4 = 300 MeV 及 $E_3 = E_2 = 26$ MeV, (3)式可以简化为

$$\gamma(t) \approx 1 + \frac{\ln(B(t)+1)}{\ln E_2 - \ln E_1}, \quad (4)$$

并且

$$A(t) = \frac{(\gamma-1)F(E_1, E_2)}{4\pi(E_1^{1-\gamma} - E_2^{1-\gamma})} = \frac{(\gamma-1)F(E_3, E_4)}{4\pi(E_3^{1-\gamma} - E_4^{1-\gamma})} \approx \frac{(\gamma(t)-1)F(E_3, E_4, t)}{4\pi} E_3^{\gamma-1}. \quad (5)$$

在太阳高能粒子事件期间, 质子对相对论电子通量的污染主要由以下两项给出:

$$F_1 = 4\pi A \int_{E_0-\Delta E}^{E_0+\Delta E} E^{-\gamma} dE \approx 8\pi A \Delta E \cdot E_0^{-\gamma}, \text{ 如果 } \Delta E \ll E_0; F_2 = 4\pi A \int_{E_t}^{+\infty} E^{-\gamma} dE = \frac{4\pi A}{\gamma-1} E_t^{1-\gamma}.$$

“风云二号”卫星上的相对论电子探测器其 $\Delta E = 0.1$ MeV, $E_0 = 25.8$ MeV, $E_t = 290$ MeV, 因

此我们得到: $\frac{F_1}{F_2} = 2(\gamma-1) \frac{\Delta E}{E_t} \left(\frac{E_t}{E_o} \right)^\gamma \ll 1$, 如果 $1 < \gamma < 2$. 我们可以忽略 F_1 对污染的贡献. 我们也忽略了 α -粒子及其他重粒子对电子探测的污染, 因为 α -粒子在能量范围为 3.5 ~ 26 (MeV/每核子) 的通量比同能量段质子通量低一个量级. 因此, 我们通过计算 F_2 而得到相对论电子通量探测中的污染成分. 我们建立一种方法从相对论电子通量探测的原始数据中清除高能质子的污染而得到“干净的”相对论电子通量: $F_{ec}(t) = F_e(t) - F_2(t)$.

3 实验观测

在 2000 年 7 月 14 日日冕暴发期间伴随着很强的太阳高能粒子事件. “风云二号(B)”卫星上的高能粒子探测器 EPD 在此期间观测到了高能质子和相对论电子通量的巨幅增加. 图 2(d) 给出了 EPD 探测器在 2000 年 7 月 14 日高能粒子通量的观测曲线. 图中曲线 P_1 , P_2 和 P_3 分别是质子在能段 3.5 ~ 26 MeV, 10 ~ 26 MeV 和 26 ~ 300 MeV 的全向通量. 而图 2(b) 中的点线 e 是能量大于 1.6 MeV 相对论电子通量的原始数据. EPD 探测器的时间分辨率率为 30 s. 在这里, 同步轨道区高能粒子通量的巨幅增加出现在世界时 10:40 UT. 此时, 高能质子通量 P_2 和 P_3 有

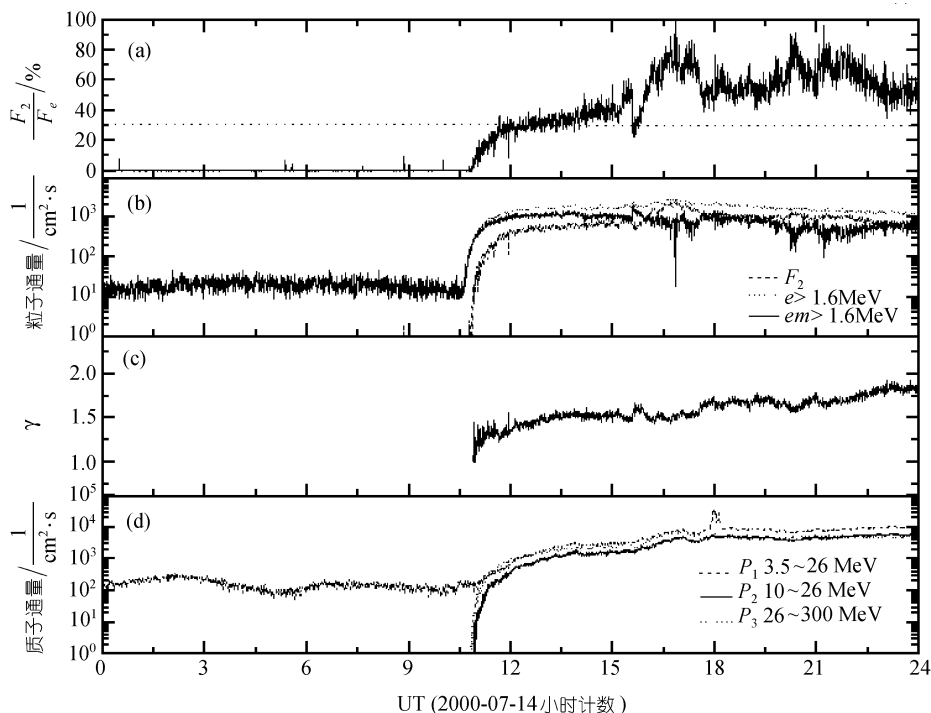


图 2 2000 年 7 月 14 日“风云二号(B)”卫星上高能粒子探测器 EPD 观测的全向高能粒子通量的变化曲线

(a) 给出了相对论电子通量原始探测数据中高能质子污染所占的比例; (b) e 是 EPD 探测器观测相对论电子通量的原始数据, F_2 是高能质子造成的污染, em 是“清除”污染后“纯净的”相对论电子通量的变化; (c) 由“风云二号(B)”卫星上高能粒子探测器 EPD 观测的高能质子通量数据计算出高能质子谱的幂指数 γ ; (d) 高能粒子探测器 EPD 观测的不同能段质子通量

4 个量级的增加, 通量 P_1 也增加了一个量级. 相对论电子通量有两个量级的增加, 并且电子的增加比质子的增加超前 5 分钟. 这可能是由于相对论电子在行星际空间的速度大于高能质子的速度, 电子到达地球同步轨道区早于质子. 在 EPD 原始电子探测中含有高能质子造成的污染. 我们采用前面建立的“清除”方法从原始探测数据中清除污染而得到同步轨道区“纯净的”相对论电子通量. 高能质子能谱的幂指数 γ 在图 2(c)中给出. 在图 2(c)中, γ 在太阳高能粒子事件之前的值没有给出, 因为此时高能质子的计数率太低, 计数的涨落很大, γ 值的涨落也很大. 在太阳高能粒子事件开始的时候, γ 处于它自己的极小值并随着太阳高能粒子事件的发展而逐渐增加. 这种逐渐增加似乎显示出高能质子从日冕传输到地球同步轨道区具有能量色散的性质. 质子的能量越大, 它到达同步轨道的时刻越早. 得到了同步轨道区高能质子谱, 我们可以很容易地清除相对论电子通量原始探测中的质子污染. 图 2(b) F_2 是计算出的质子污染, em 是清除污染后“纯净的”相对论电子通量. 在太阳高能粒子事件发生之前, “纯净的”相对论电子通量曲线与原始探测符合得很好. 这表明在非太阳高能粒子事件期间, 高能质子对相对论电子通量探测的污染可以完全忽略不计. 在太阳高能粒子事件的初期, 清除污染后的电子曲线仍然与原始观测重合得很好, 这可能是由于电子通量的增加早于质子通量的增加, 在电子通量增加的初期高能质子还没有对电子探测造成污染. 随着质子通量增加的开始, 电子通量探测中的污染变得非常显著. 图 2(a)给出了质子污染占电子总通量的比 F_2/F_e . 在 2000 年 7 月 14 日太阳高能粒子事件期间, F_2/F_e 大部分时间都大于 30%, 有些时刻几乎达到了 100%. 这显示出在有些太阳高能粒子事件期间, 相对论电子通量的探测中污染可能会是非常严重的. 没有经过修正污染的相对论电子通量原始探测, 其结果的可信度令人怀疑. 在这里需要指出的是, 我们采用单幂指数高能质子谱近似, 幂指数 γ 是从较低能量段的探测推导出来的并外推到较高能量段. 这可能造成我们计算的污染比实际污染要高. 随着我国探测仪器研制的发展, 我们相信, 未来对污染的修正将越来越符合实际. 经过污染修正后比较“纯净的”相对论电子通量与原始探测的电子通量, 我们从图 2(b)中发现, 虽然在太阳高能粒子事件期间实线 em 低于点线 e , 但在此期间同步轨道区“纯净的”相对论电子通量仍比高能粒子事件前有约一个量级的巨幅增加. 同步轨道区相对论电子通量的增加与太阳高能粒子事件暴发时刻有约 11 分钟的延迟.

2000 年 7 月 14 日的上游太阳风参数由 WIND 卫星的探测数据给出. 在世界时 7 月 14 日 10:30 UT, WIND 卫星处在 GSE 坐标系 $(-3.4, -64.4, -6.1) R_e$ 的位置. 图 3 是 WIND 卫星探测的太阳风动压、密度及流速的三分量. 图 4 是行星际磁场在 GSM 坐标系的三分量及总磁场. WIND 卫星的一些探测数据由于受到大幅度行星际扰动的干扰而在 15:36 UT 以后动压、密度、速度及行星际磁场 B_x 和 B_y 分量出现探测数据中断. 很幸运的是, WIND 卫星给出了高能粒子通量出现巨幅增加时刻 10:40UT 的上游太阳风参数. 在 10:40UT 之前, 上游太阳风动压及速度扰动的幅度都不是很大. 在 10:40UT 时刻行星际磁场是南向的. 由 7 月 14 日太阳日冕暴发及伴随 CME 在地球磁层产生的磁暴 14 日还没有发生. 图 5 是北京白家疃地磁台 SMALL 磁强计观测到的地磁水平 H 分量在 7 月 15 ~ 18 日的变化曲线. 一个非常典型的磁暴变化形态出现在图 5 中. 磁暴急始出现于 7 月 15 日 14:32UT, 并且这个急始的幅度非常大, 约为 240 nT. 急始前沿的增长速度也非常快, 在 85 s 的时间里即升高了 210 nT. 急始后有一个约为 4.5 h 的磁暴初相. 磁暴的主相开始于 7 月 15 日 19:30UT. 因此, 7 月 14 日 10:40UT 开始

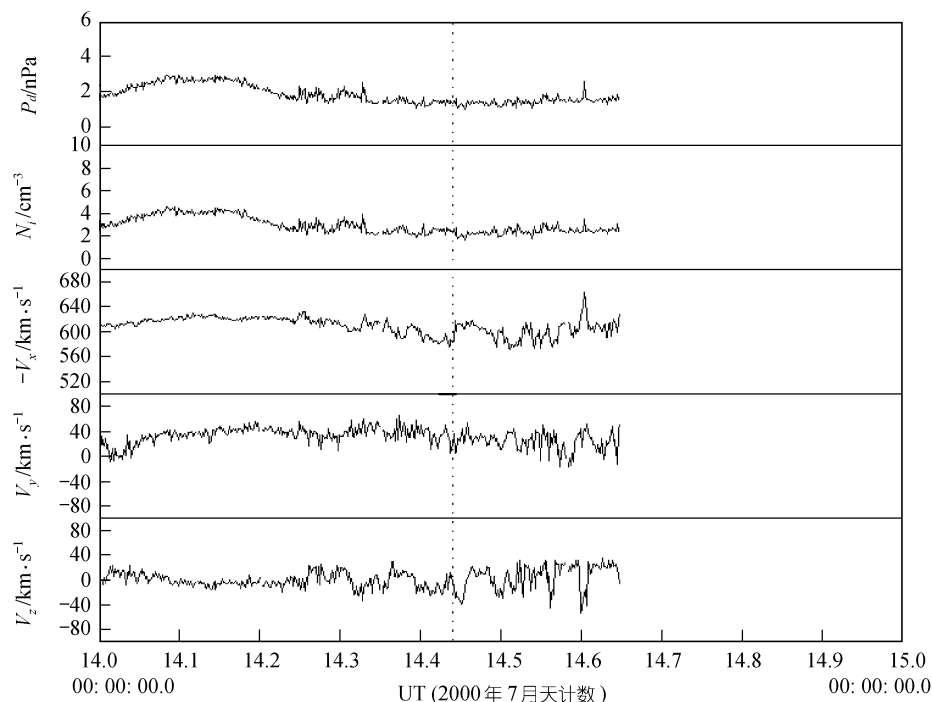


图 3 2000 年 7 月 14 日 WIND 卫星观测的上游太阳风参数

图中从上到下分别是动压、密度及太阳风流速在 GSE 坐标系中 x , y 和 z 分量

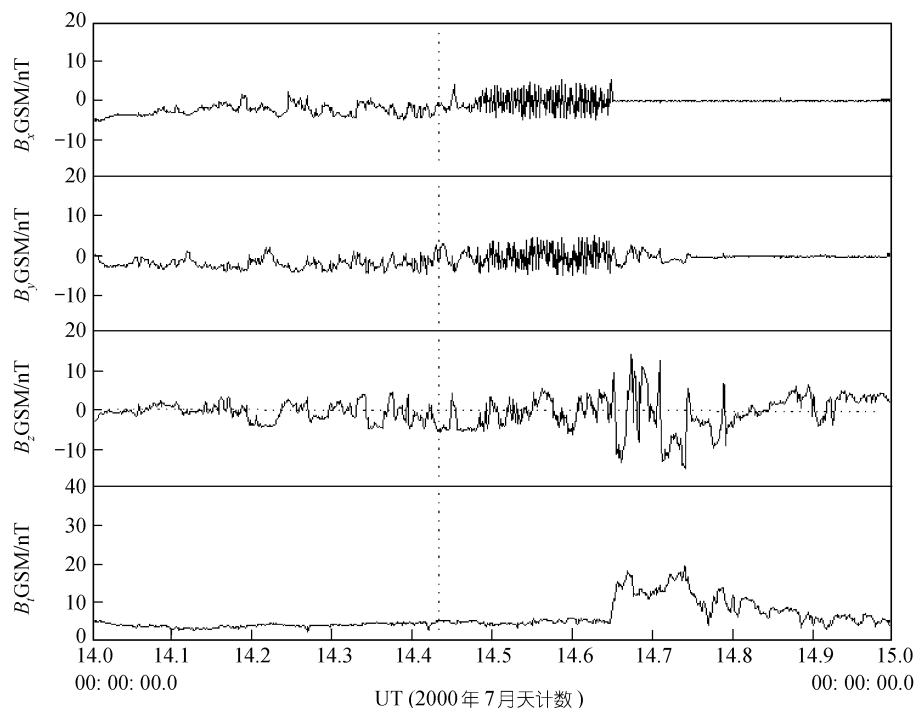


图 4 2000 年 7 月 14 日 WIND 卫星观测的行星际磁场

图中从上到下分别是磁场在 GSM 坐标系中 x , y , z 三分量及总磁场

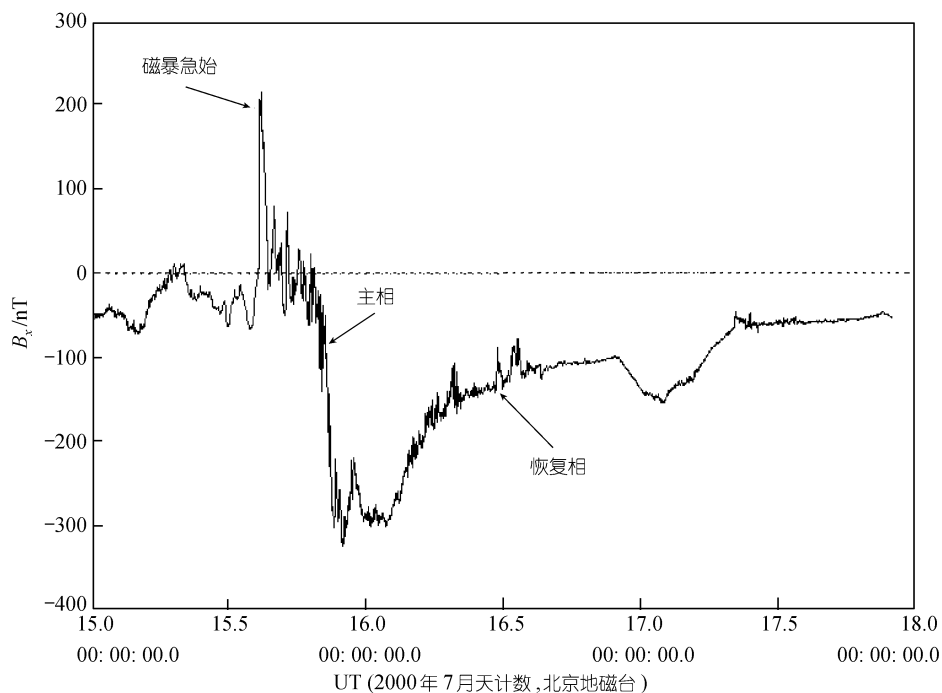


图 5 2000 年 7 月 15~18 日北京白家疃地磁台 SMALL 地磁仪观测的水平 x 分量的变化
图中磁暴是由于 7 月 14 日太阳上发生日冕物质抛射(CME)事件撞击地球磁层而产生的

的同步轨道区相对论电子通量增加的观测事实很难归因于磁暴或太阳风速扰动。这样一个观测现象表明, 同步轨道区相对论电子通量的巨幅增加有可能是由太阳高能粒子事件而引起的。出现这种相关性时上游太阳风中行星际磁场是南向的。

4 讨论与小结

我们通过观测发现, 当行星际磁场南向时 CME 伴随的太阳高能粒子事件使地球同步轨道区相对论电子通量产生巨幅增加。在此次观测中相对论电子通量的增加超前于磁暴发生数十小时, 并且上游太阳风速及动压扰动都不是同步轨道区相对论电子通量增加的原因。众所周知, 十几个 MeV 以下能量的相对论电子在向阳面磁层顶的回旋半径约为 1000 km 的量级。上游太阳风中的相对论电子不可能像高能质子一样直接穿过向阳面磁层而进入地球同步轨道区。为了理解上游太阳风中相对论电子向地球同步轨道区的快速传输过程, 我们注意到在发生相对论电子通量增加时行星际磁场是南向的, 因此向阳面磁层顶重联在电子传输过程中起到了重要作用。当行星际磁场南向时, 我们认为地球磁尾是处于开磁力线状态。起源于日冕的相对论电子则会注入到磁尾中。磁尾中的重联过程将形成含有相对论电子的闭合磁力线并朝着地球方向漂移。磁尾电流片附近的相对论电子其回旋半径与此区域的磁力线曲率半径相当, 电子不再保持磁矩 μ 守恒, 相对论电子在磁尾电流片附近的运动轨道具有一些随机特性^[11]。相对论电子能够快速地从磁尾进入同步轨道区。

在本文中我们建立了一种从相对论电子通量的原始探测数据中“清除”高能质子污染的

方法, 并对太阳高能粒子事件期间同步轨道区相对论电子通量探测的原始数据进行“清洁”处理. 研究结果显示, 在 2000 年 7 月 14 日太阳高能粒子事件期间, 高能质子对相对论电子通量的污染是很严重的, 大部分时间污染程度超过 30%. 因此, 太阳高能粒子事件期间, 相对论电子通量的探测必须进行污染修正. 我们的观测发现, 当行星际磁场南向时, 太阳高能粒子事件在地球同步轨道区引起“纯净的”相对论电子通量巨幅增加. 太阳高能粒子事件伴随的 CME 可能在地球磁层中产生磁暴. 我们注意到, 太阳高能粒子事件引起的同步轨道区相对论电子通量巨幅增加比 CME 产生的磁暴发生要早十几个小时; 在相对论电子通量巨幅增加前上游太阳风流速及动压的扰动也较小, 不是产生这次电子通量增加的原因. 我们利用中国科学院空间中心研制的高能粒子探测器 EPD 在同步轨道的探测数据, 发现了产生同步轨道区相对论电子通量巨幅增加的第三种机制: 当行星际磁场南向时, 太阳高能粒子事件引起同步轨道区相对论电子通量巨幅增加. 这一现象以前被淹没在高能质子的污染中. 我们经过“清除污染”使这一现象显现出来. 在本文, 我们还定性地给出了太阳风中相对论电子快速传输到地球同步轨道区的物理过程. 不久我们将通过解析分析及数值模拟, 定量地给出相对论电子在磁尾电流片附近的运动形式, 进一步说明相对论电子进入同步轨道区的过程.

致谢 本文作者感谢 R. P. Lepping 提供 WIND 卫星上磁场观测数据, 感谢 K. Ogilvie 提供 WIND 卫星上太阳风观测数据.

参 考 文 献

- 1 Baker D N, Blake J B, Callis L B, et al. Relativistic electron acceleration and decay time scales in the inner and outer radiation belts: SAMPEX. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 409
- 2 Li X, Baker D N, Temerin M D, et al. Are energetic electrons in the solar wind the source of the outer radiation belt? *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 923
- 3 Paulikas G A, Blake J B. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit. In: *Quantitative Model of Magnetospheric Processes*, 21 Geophys Monograph Series, American Geophysical Union, Washington, DC, 1979
- 4 Datlowe D. Relativistic electrons in solar particle events. *Solar Phys*, 1971, 17: 436
- 5 Bothmer V, Posner A, Kunow H, et al. Solar energetic particle events and coronal mass ejections: New insights from SOHO. In: Wilson A, eds. *Proceedings of the 31st ESLAB Symposium on Correlated Phenomena at the Sun*. Noordwijk: ESA Publications Division, ESTEC, 1997. 207~216
- 6 Gao Y F, Chi P J, Le G, et al. Sino-magnetic array at low latitudes (SMALL) including initial results from the sister sites in the United States. *Adv Space Res*, 1999, 25(7-7): 1343~1351
- 7 Lepping R P, Acuna M H, Burlaga L F, et al. The WIND Magnetic Field Investigation. *Space Sci Rev*, 1995, 71: 207
- 8 Ogilvie K W, Charnay D J, Frizenreiter R J, et al. SWE, a comprehensive plasma instrument for the Wind spacecraft. *Space Sci Rev*, 1995, 71: 55 ~ 77
- 9 Freier P S, Webber W R. Exponential rigidity spectrums for solar-flare comic rays. *J Geophys Res*, 1963, 68: 1605
- 10 McGuire R E, Von Rosenvinge T T. The energy spectra of solar energetic particles. *Adv Space Res*, 1984, 24(2-3): 117~125
- 11 Buchner J, Zelenyi L M. Regular and chaotic charged particle motion in magnetotaillike filed reversals 1. Basic theory of trapped motion. *J Geophys Res*, 1989, 94: 11821