

# 地球物理学报

DIQIU WULI XUEBAO

第 47 卷 第 5 期

## 目 次

2001 年 4 月 2 日太阳耀斑及其太阳质子事件的观测结果研究 .....	马宇倩 王焕玉 张承模 徐玉朋 汪锦州	
..... 唐仕奎 梁晓华 徐霁舒 肖 佐 邹 鸿 郝永强 张东和 邹积清 仲维英 吴中祥 (737)		
太阳黑子相对数最强周期的小波分析 .....	乐贵明 王家龙 (743)	
磁场重联中的电子加速机制的数值模拟研究 .....	葛亚松 李 毅 王 水 窦贤康 (747)	
地球同步轨道附近哨声湍流对“种子电子”的加速 .....	李柳元 曹晋滨 周国成 (756)	
用 AED 卫星近地点上观测的 $n(\text{He})$ 估算湍流层顶高度 .....	沈长寿 资民筠 王劲松 王英鉴 徐寄遥 (762)	
东南亚地区生物体燃烧影响华南地区对流层臭氧垂直分布的个例分析 .....	郑永光 朱佩君 陈尊裕 陈鲁言 崔 宏 郑向东 赵 琼 秦 瑜 (767)	
SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果 .....	姜大膀 王会军 郎咸梅 (776)	
穿云飞机电磁噪声的实验分析 .....	张义军 孟 青 Paul R. Krehbiel 刘欣生 (785)	
青藏高原东北缘—鄂尔多斯地壳上地幔地震层析成像研究 .....	郭 颀 刘启元 陈九辉 赵大鹏 李顺成 赖院根 (790)	
张家口—渤海断裂带西缘壳幔过渡带研究 .....	赖晓玲 张先康 成双喜 方盛明 (798)	
川滇地区活动地块现今地壳形变特征 .....	乔学军 王 琪 杜瑞林 (805)	
中国大陆及邻区 SKS 波分裂研究 .....	罗 艳 黄忠贤 彭艳菊 郑月军 (812)	
华北地区 Lg 尾波衰减研究——Lg 尾波 $Q$ 的测量 .....	刘建华 刘福田 阎晓蔚 胥 颐 郝天珧 (822)	
新疆和田 $M_L 7.1$ 地震前 ULF 电磁辐射的激发机理 .....	杜爱民 周志坚 徐文耀 杨少峰 (832)	
云南地区地壳中上部横波速度结构研究 .....	何正勤 叶太兰 苏 伟 (838)	
南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析 .....	赵明辉 丘学林 叶春明 夏戡原 黄慈流 谢剑波 王 平 (845)	
东海重磁地震综合探测剖面研究 .....	高德章 赵金海 薄玉玲 唐 建 王舜杰 (853)	
泥岩、页岩声速各向异性及其影响因素分析 .....	邓继新 史 震 刘瑞麟 俞 军 (862)	
广义 $S$ 变换域有色噪声与信号识别方法 .....	高静怀 满蔚仕 陈树民 (869)	
基于 Gabor-Daubechies 小波束叠前深度偏移的角度域共成像道集 .....	陈 凌 吴如山 王伟君 (876)	
基于独立分量分析的多次波自适应相减技术 .....	陆文凯 骆 毅 赵 波 钱忠平 (886)	
小波尺度域含气储层地震波衰减特征 .....	李宏兵 赵文智 曹 宏 姚逢昌 邵龙义 (892)	
动态网络最短路径射线追踪 .....	张建中 陈世军 徐初伟 (899)	
饱和多相流体岩石电性的格子气模拟 .....	岳文正 陶 果 朱克勤 (905)	
饱和土沉积谷场地对平面 SV 波的散射问题的解析解 .....	李伟华 赵成刚 (911)	
高阶统计量油气检测方法研究 .....	熊晓军 尹 成 张白林 丁 峰 李大卫 (920)	
高阶统计量在大地电磁测深数据处理中的应用研究 .....	王书明 王家映 (928)	
大地电磁测深资料的二次函数逼近非线性反演 .....	严良俊 胡文宝 (935)	
简 讯		
欢迎订阅《地球物理学报》(中、英文版) .....		(746)
欢迎订购《地球科学量和单位规范使用辨识》 .....		(789)
本刊启事 .....		(852)

MA Y Q, WANG H Y, ZHANG C M, et al. A conjunctive study of solar flare 20010402 and related solar proton events by the observation of SZ2/ XD and ZY1/ CBMC. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(5): 737 ~ 742

## 2001 年 4 月 2 日太阳耀斑及其太阳质子事件的 观测结果研究

马宇倩<sup>1</sup> 王焕玉<sup>1</sup> 张承模<sup>1</sup> 徐玉朋<sup>1</sup> 汪锦州<sup>1</sup> 唐仕奎<sup>1</sup> 梁晓华<sup>1</sup> 徐霁舒<sup>1</sup>  
肖佐<sup>2</sup> 邹鸿<sup>2</sup> 郝永强<sup>2</sup> 张东和<sup>2</sup> 邹积清<sup>2</sup> 仲维英<sup>2</sup> 吴中祥<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院高能物理研究所, 北京 100039

<sup>2</sup> 北京大学地球物理系, 北京 100871

<sup>3</sup> 中国空间技术研究院, 北京 100086

**摘要** 2001 年 4 月 2 日, 太阳爆发了一个近年来 X 射线通量最大的一次耀斑并伴有质子事件, 利用“资源一号”卫星星内粒子探测器和神舟二号飞船 X 射线探测器的观测资料, 对这一事件的高能粒子响应进行了特例研究。“资源一号”卫星运行于太阳同步轨道, 高度约 800km, 和宁静时期的统计结果对比, 这次耀斑后, 星内粒子探测器在地球极盖区(地球开磁场区)观测到耀斑粒子的出现, 这是宁静时期没有的; 神舟二号飞船轨道高度 400km, 倾角为 42°, X 射线探测器在 42° 中高纬地区也观测到高能电子通量比宁静时明显的增加, 这表明, 太阳耀斑引起的近地空间辐射环境的变化遍及纬度约 40° 以上的区域, 甚至在 40°N 附近 400 km 左右的高度上仍然有响应。但是, 中高纬度、极光带和极盖区的粒子来源, 加速机制和响应方式却不一定相同, 需要分别讨论。资料分析和对比还表明, 质子事件的强度并不一定和耀斑的 X 射线通量成正比, 因此, 近地空间高能粒子对耀斑的响应也不是完全决定于 X 射线强度。

**关键词** 太阳质子事件 太阳耀斑 X 射线探测器 高能粒子探测器

文章编号 0001 - 5733(2004)05 - 0737 - 06 中图分类号 P414 收稿日期 2003 - 09 - 27, 2004 - 05 - 20 收修定稿

### A CONJUNCTIVE STUDY OF SOLAR FLARE 20010402 AND RELATED SOLAR PROTON EVENTS BY THE OBSERVATION OF SZ2/ XD AND ZY1/ CBMC

MA Yu-Qian<sup>1</sup> WANG Huan-Yu<sup>1</sup> ZHANG Cheng-Mo<sup>1</sup> XU Yu-Peng<sup>1</sup> WANG Jin-Zhou<sup>1</sup> TANG Shi-Kui<sup>1</sup>  
LIANG Xiao-Hua<sup>1</sup> XU Ji-Shu<sup>1</sup> XIAO Zuo<sup>2</sup> ZOU Hong<sup>2</sup> HAO Yong-Qiang<sup>2</sup> ZHANG Dong-He<sup>2</sup>  
ZOU Ji-Qing<sup>2</sup> ZHONG Wei-Ying<sup>2</sup> WU Zhong-Xiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

<sup>2</sup> Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

<sup>3</sup> Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100086, China

**Abstract** The solar flare occurred on April 2, 2001 is the biggest flare in 23rd cycle of solar activity, which is accompanied by a big solar proton event. We study this event by combining the observational results from spacecraft SZ2/ XD and satellite ZY1/ CBMC. SZ2 has the orbit with 400 km height and inclination of 42°, and ZY1 has solar-synchronous orbit and 780km to the Earth surface. The results show that after this flare ZY1/ CBMC

基金项目 国家自然科学基金项目(10233010)。

作者简介 马玉倩, 中国科学院高能物理研究所研究员, 多年从事高能天体物理研究。E-mail: mayq@mail.ihep.ac.cn

detected the flare particles in the polar cap region and XD observed an increase of energetic electron flux near the latitude  $42^\circ$ . Morphological analysis of the temporal and spatial variations of energetic particles after this flare indicates that particles in different regions have varied origins. Those in the polar cap region come from the Earth's open field lines and those in the auroral oval and mid-latitudes near  $42^\circ$  are particles of the Earth's outer radiation belt. Data analysis and comparison show that the intensity of the solar proton event is not proportional to the X ray flux of the related solar flare. The response of energetic particles in the near Earth space is not solely related with solar X ray intensity.

**Key words** Solar flare, Solar proton event, X-ray detector, High energy particle detector.

## 1 引言

由中国科学院高能物理研究所研制的神舟二号“X射线探测器”(简称 SZ2/XD),主要用于观测宇宙暴、太阳耀斑的高能 X 射线辐射,也可测量高能带电粒子. SZ2 飞船于 2001 年 1 月 10 日发射升空,轨道倾角  $42^\circ$ ,轨道高度约 400 km,周期 92 min,采用三轴稳定姿态控制,定期交替实现对地和对日指向.

SZ2/XD 覆盖能区 10 ~ 800 keV,有效几何面积  $120 \text{ cm}^2$ ,在硬 X 射线波段有高灵敏度.利用探测器对电子和 X 射线响应特点的不同,以及各类事件的观测特征不同,可以区分宇宙暴、太阳耀斑和带电粒子沉降事件. XD1 和 XD2 对一个各向同性入射的电子成分可探测的电子能量跨度为 200 keV ~ 2.5 MeV.

“资源一号”卫星的星内粒子探测器(简称 ZY1/CBMC)是由北京大学地球物理系空间物理专业、北京大学技术物理系和航天部 501 研究所共同研制的用于监测卫星内部高能粒子辐射环境的仪器<sup>[1]</sup>,卫星于 1999 年 10 月 14 日发射升空,运行在倾角  $98.5^\circ$  的太阳同步轨道,轨道高度 780km.该探测器主要被用于监测卫星舱内的高能粒子辐射环境,为可能的卫星异常提供所需要的环境数据;由于星内辐射环境与星外空间辐射环境是相关的,因此可对近地空间高能粒子的时空分布进行观测.

ZY1/CBMC 对电子的观测分为 0.5 ~ 2.0 MeV 和  $> 2.0 \text{ MeV}$  两道,对质子的观测分为 5 ~ 30 MeV 和 30 ~ 60 MeV 两道,用金硅面垒型探测器和硅锂漂移型探测器组合形成的望远镜,每 24s 采集一组电子和质子的粒子数.

2001 - 04 - 02 - 21:51UT,太阳爆发了近年来 X 射线通量最大的一次 X20 级耀斑,在日面的位置为北纬  $18^\circ$  西经  $82^\circ$ ,从 GOES 卫星观测的在此前后

5 天内 X 射线通量图(图 1)可看到软 X 射线通量  $F$  的变化.我们利用两个探测器的观测数据,对该太阳耀斑以及随后的近地空间高能粒子辐射环境的变化作了一个综合分析,取得了一些有意义的结果.

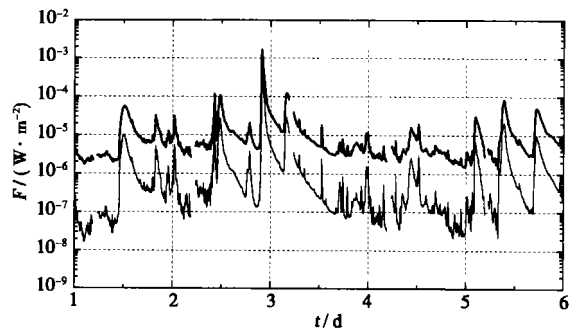


图 1 GOES 卫星在 2001 年 4 月 1 ~ 5 日观测的 X 射线通量在 1 ~ 8Å(粗线)和 0.5 ~ 4Å(细线)的变化

Fig. 1 GOES observed fluxes of X-ray (1 ~ 8Å, thick line) and (0.5 ~ 4Å, thin line) for April 1 ~ 5, 2001

## 2 观测结果与初步分析

### 2.1 SZ2/XD 的观测结果

2001 年 4 月 2 日 SZ2/XD 两探头均观测到 X 射线耀斑爆发,能量跨度 10 ~ 800keV,流量增长了 500 倍,且与 GOES-8 卫星探测器的 X 射线流量同时达到最大值.图 2 给出了 XD2 在 40 ~ 800 keV 的计数率  $C_0$  随时间的变化以及和 GOES-8 通量  $F$  变化的时间对比.其中 XD2 数据的空缺时段是因为进入异常区工作模式.

文献[2]指出,神舟二号搭载的 X 射线探测器在 400 km 左右的高度上,在中高纬度的  $40^\circ \text{N}$  附近仍然观测到数百至数千电子伏特的高能电子事件.通过分析可以发现,其流量反映出某种时变特性,并与伴有质子事件的太阳耀斑或磁暴有某种关联,以 4 月 2 日的太阳耀斑为例,在 ( $120^\circ \text{E}, -42^\circ \text{S}$ ) 区,

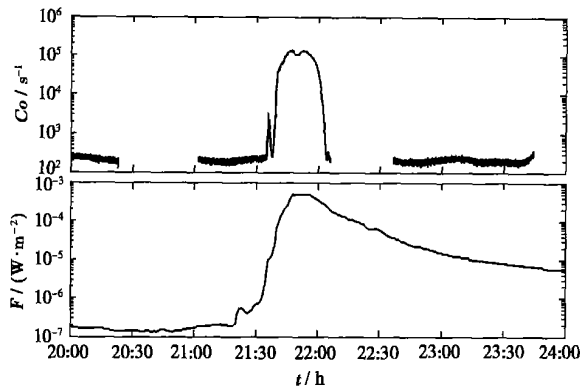


图2 2001年4月2日耀斑的X射线流量图

(a) SZZ/ XD的观测结果; (b) GOES-8卫星的软X射线观测结果.

Fig.2 A comparison of X-ray flux, (a) from SZZ/ XD and compared with (b) from GOES-8

从4月1日开始,X射线探测器观测到中高纬地区高能电子的通量有大幅度增加,通过对观测事例的分类鉴别,选出并构造粒子沉降事件(PPE)时间表<sup>[3]</sup>.图3显示了3月28日、4月3日和5日耀斑爆发前后在该区域XD观测到的粒子沉降事件(PPE),以及事件发生的地理经度和地理纬度 $\phi$ .明显地,在3月28日太阳耀斑爆发前XD1和XD2的计数率相对较低,不到 $10^4$ 次/s,而从4月3日开始高能粒子的计数率增加,到4月5日两个能段的计数率分别达到或接近 $10^5$ 次/s.

由于神舟飞船的轨道倾角的限制,无法观测到纬度42°以上区域的高能粒子,而在400 km高度上,纬度42°以下应属于地球闭合磁场线区域,这里观测到的高能电子不太可能是直接沿极区开磁场线进

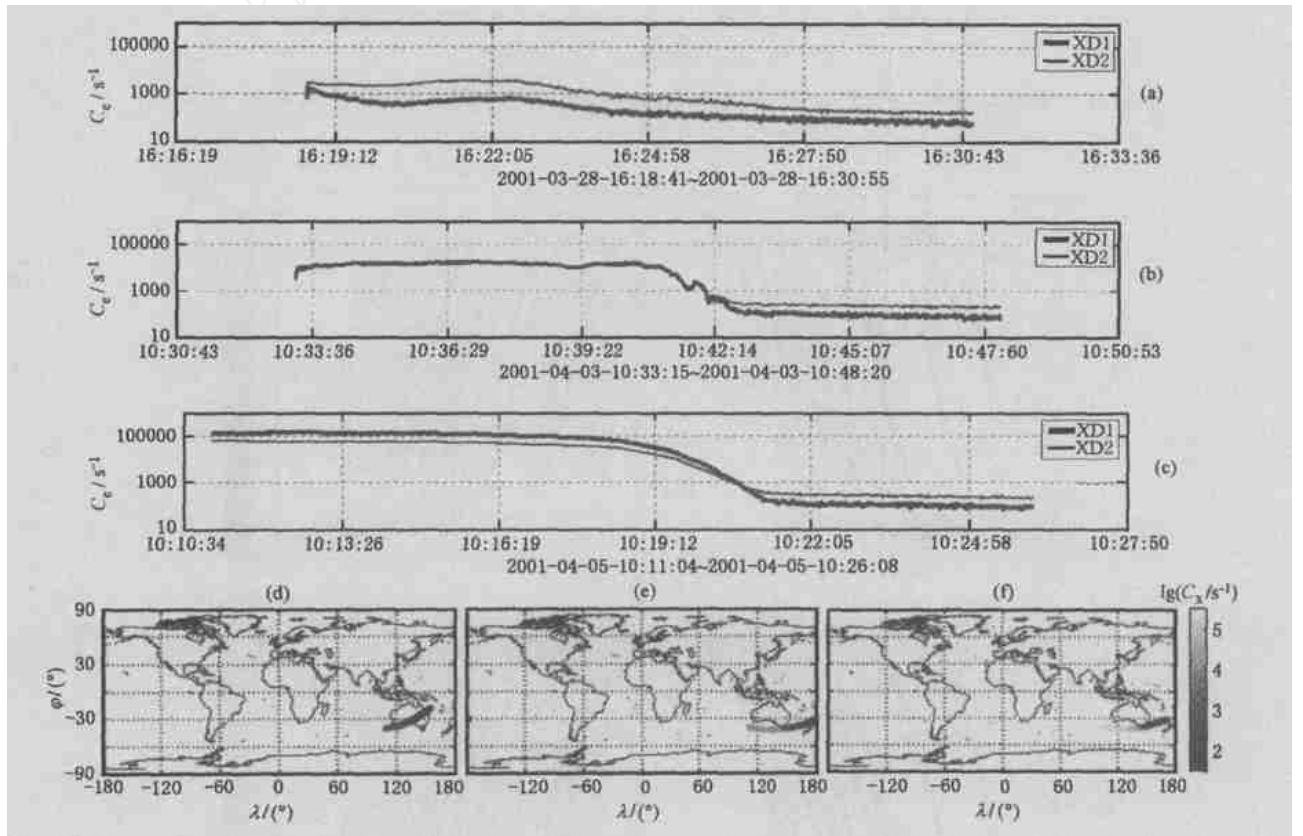


图3 SZZ/ XD于2001年3月28日、4月2日和4月5日在中高纬地区观测到的高能电子沉降事件

(a)、(b)、(c)分别为3天中的XD1和XD2流量变化;(d)、(e)、(f)分别为对应的星下点位置; $C_x$ 表示X射线探测器的计数率.

Fig.3 Energetic electron events observed by SZZ/ XD on March 28, April 2 and 5, 2001

入近地空间的太阳耀斑粒子,有可能是来自地球外辐射带底部.一种可能的原因是:4月2日的耀斑以后,耀斑粒子到达近地空间,使外辐射带高能粒子开始增加,4月4日耀斑产生的磁云作用于地球磁层,磁场的变化产生感生电场,外辐射带中较低能量的粒子由这一感生电场加速,使得外辐射带中

较高能量的电子数目进一步增加,在4月5日达到较高计数率.

### 2.2 ZY1/ CBMC的观测结果

资源卫星在太阳同步轨道上,倾角 $98^\circ$ ,可覆盖全球的所有纬度,图4显示了4月2日到5日观测到的各能段粒子计数率.可以看到,从耀斑后的

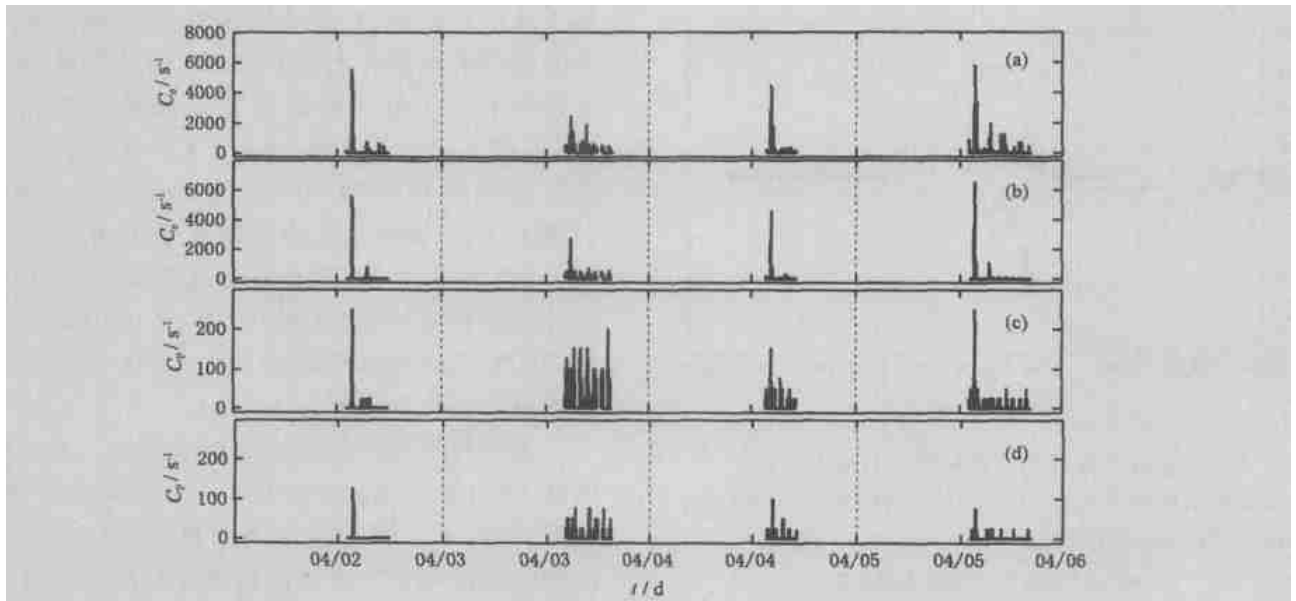


图 4 2001 年 4 月 2 日到 5 日 ZY1 星内粒子探测器的观测数据  
(a)、(b) 电子数据; (c)、(d) 质子数据.

Fig. 4 Counting rate of energetic electrons and protons observed by ZY1/CBMC on April 4–5, 2001

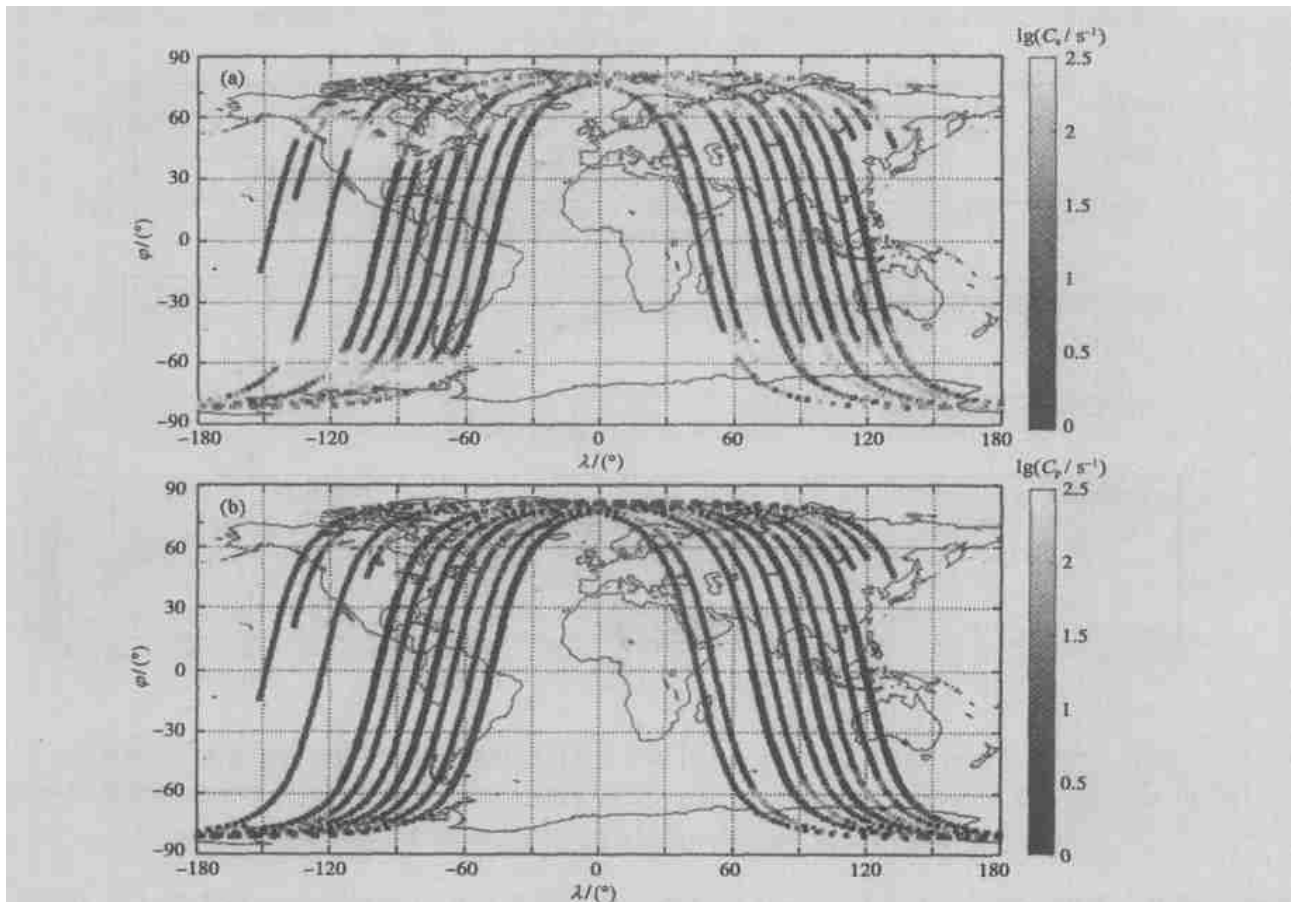


图 5 2001 年 4 月 2 日到 5 日 ZY1 星内粒子探测器观测的电子和质子沿轨道的分布情况  
(a) 0.5 ~ 2.0MeV 电子通量分布; (b) 5 ~ 30MeV 质子通量分布.

Fig. 5 Distributions of electrons and protons along the tracks of sub-satellite points of ZY1

4 月 3 日开始, 高能粒子计数率发生了明显的变化, 出现高能粒子事件的范围(图示为时间跨度, 代表

了空间范围)显著扩大. 遗憾的是由于未能获得 4 月 3 日上午的观测数据, 当 GOES 卫星在 07:45UT

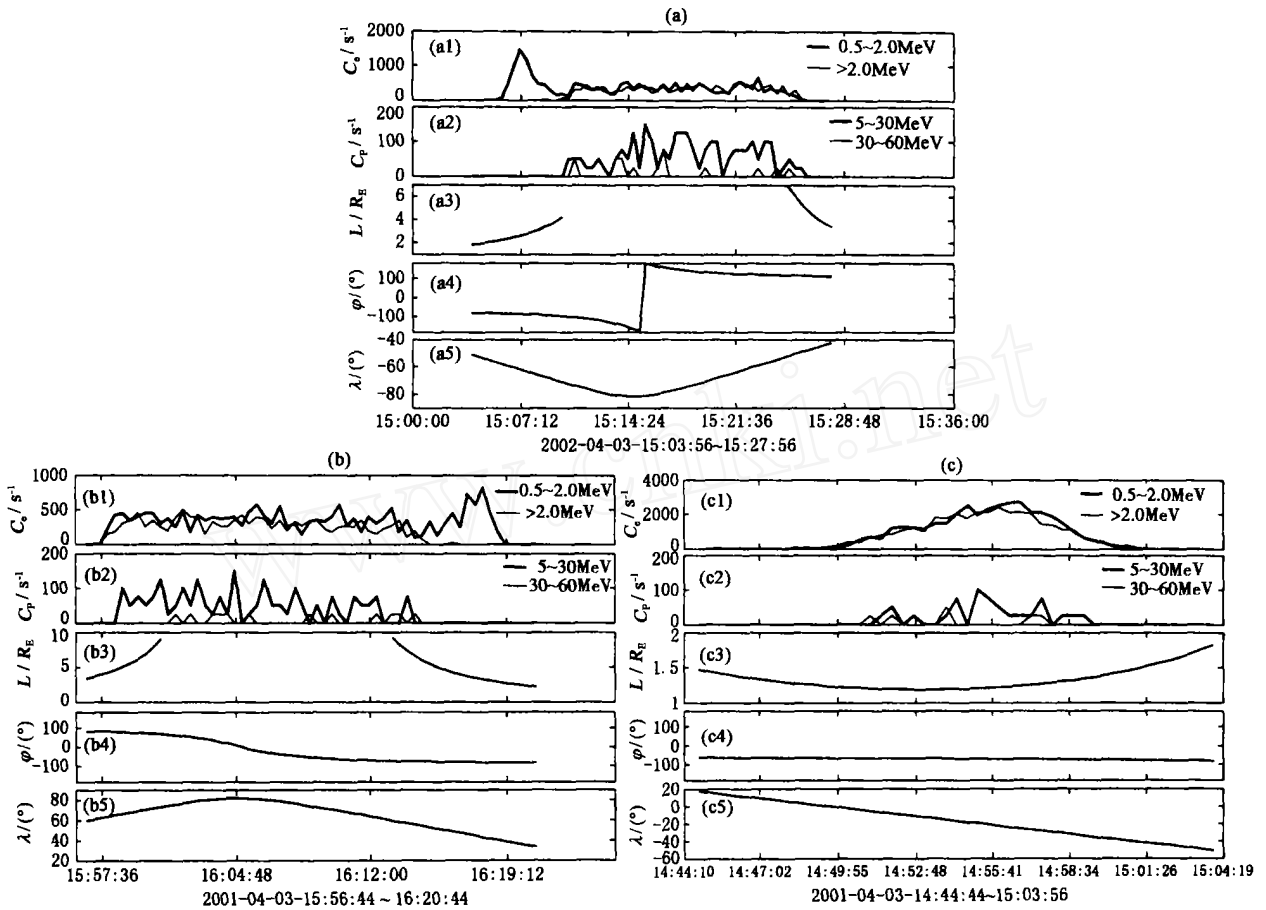


图 6 典型粒子通量增加事件 (ZY1)

(a) 南极极盖区; (b) 北极极盖区; (c) 南大西洋异常区.

Fig. 6 Typical particle events observed by ZY1

观测到太阳质子事件最大强度  $1110(10^{-4} \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$  时, 没有同时的数据可以对比. 图 5 中显示了 2001 年 4 月 2 日到 5 日低能段粒子沿轨道的分布情况, 是图 4 的另一种表达方式. 与宁静时间对比, 一个显著的特点是在极盖区(地球开磁场区)各能段的粒子均出现较高计数, 这是非耀斑时期没有的现象. 但是, 低能段电子在两极极光带的计数率要高于极盖区.

为了进一步说明极光区、极盖区和南大西洋异常区在耀斑期间的不同响应, 我们深入分析了这次事件在南北两极极盖区和南大西洋异常区的典型行为, 如图 6 所示. 图 6(a1, a2)、(b1, b2) 与 (c1, c2) 表示电子计数率  $C_e$  和质子计数率  $C_p$  的时间序列, 图 6(a3, b3, c3) 为此段卫星轨道所在的  $L$  值变化, 图 6(a4, a5)、(b4, b5) 与 (c4, c5) 表示星下点地理经度和地理纬度的变化.

在南极极盖区典型事件初期, 在  $L = 3 \sim 4$  处低能挡电子计数率有个极大值而高能段电子和质子计

数率为零; 高能段电子的计数率从开磁场区边缘开始增加, 进入开磁场区后计数率保持相对稳定, 而低能段电子的计数率则下降到与高能段电子相同的水平. 在开磁场区质子的计数率也增加, 但由于计数率较低, 显得起伏比较大. 在北极极盖区典型事件中也有类似情况, 只不过是在事件后期, 低能挡电子开始增加, 在  $L = 3 \sim 4$  处达到峰值, 这个峰值比南极极盖区典型事件中的小很多. 在南大西洋异常区, 电子出现极大值的区域在  $L = 1.5$  左右处. 一般认为内辐射带中心位于  $L = 1.5$  处, 在南大西洋的地磁异常, 内辐射带可下降到较低高度.

内辐射带中高能质子主要来源于宇宙线反照中子衰减 (CRAND)<sup>[4]</sup>; 内辐射带高能电子可能来源于外辐射带和宇宙线反照中子衰减, 因此星内粒子探测器在南大西洋异常区可观测到高能电子和质子的计数率的增加. 在南北两极极盖区事件中, 在开磁场区域, 出现的计数率较低的高能粒子应该来源于太阳耀斑粒子, 所以电子和质子计数率都同步增

加,而在  $L = 3 \sim 4$  处出现的低能段电子极大值可能来自外辐射带高能电子. 外辐射带中心位于  $L = 3 \sim 4$  处,质子很少,高能电子占大多数,其来源一直是被关注的问题. 有人认为外辐射带高能电子来源于太阳风中的高能电子<sup>[5~7]</sup>,而 Li XL 等<sup>[8]</sup>认为太阳风中的高能电子没有足够的相空间密度来维持外辐射带高能电子的通量,外辐射带高能电子应该来源于磁层内部.

### 3 小结与讨论

两种探测器对 2001 年 4 月 2 日的太阳耀斑以及随后的太阳质子事件进行了联合观测,观测结果表明太阳耀斑后会在地球空间中、高纬度以上的很大区域观测到高能粒子的响应. 但在不同区域响应的方式很不相同. 地球开磁区高能质子和电子通量都增加,从形态和时间分析,它们直接来自太阳耀斑粒子,但太阳耀斑 X 射线通量的大小与太阳质子事件的强度不成正比. 虽然这次太阳耀斑的 X 射线通量很高,但在近地空间引发的太阳质子事件并不十分剧烈,可见太阳质子事件的强度与太阳耀斑的 X 射线通量、太阳耀斑所在的日面位置以及连接太阳耀斑和地球的行星际磁场有关. 耀斑后极光带附近以及在中高纬度地区的较低高度上也观测到高能粒子通量增加,这些粒子并非太阳耀斑粒子,而是外辐射带中被加速的本地较低能量的粒子. 其通量的增加与耀斑引起的内磁层中的粒子增能加速机制有关,实际上间接反映了外辐射带对耀斑及相应的质子事件的响应. GOES 卫星也观测到类似情况,4 月 2 日晚上出现的电子通量峰值是太阳耀斑粒子,而 4 月 4 日下午出现的峰值则属于外辐射带高能电子的增加.

2001 年 4 月 2 日耀斑事件中神舟二号飞船 X 射

线探测器和资源一号卫星内粒子探测器观测的联合分析还表明,这种不同高度上高能粒子的长期联合观测有助于深入了解内辐射带不同能量粒子的加速机制以及内辐射带的长期变化特征.

### 参考文献

- [ 1 ] 肖 佐, 邹积清, 邹 鸿等. “资源一号”卫星内高能粒子探测器. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**(3): 361 ~ 369  
Xiao Z, Zou J Q, Zou H, et al. Energetic particle detector on board ‘ZY-1’ satellite. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, **39**(3): 361 ~ 369
- [ 2 ] 邹 鸿, 肖 佐, 吴中祥等. 极轨卫星在 780km 高度上测得的高能粒子辐射事件. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**(3): 370 ~ 374  
Zou H, Xiao Z, Wu Z X, et al. Energetic particle event detected by polar orbited satellite at the height of 780km. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, **39**(3): 370 ~ 374
- [ 3 ] 邹 鸿, 肖 佐, 邹积清等. 资源一号卫星内粒子探测器与神舟二号 X 射线探测器对高能电子探测的比较分析. 地球物理学报, 2004, **47**(4): 562 ~ 570  
Zou H, Xiao Z, Zou J Q, et al. A comparison between detections of energetic electron by ZY1/CBMC and SZ2/XD. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(4): 562 ~ 570
- [ 4 ] Albert J M, Gnet G P, Gussenhoven M S. CRRES observations of radiation belt protons 1. Data overview and steady state radial diffusion. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 9261 ~ 9274
- [ 5 ] Baker D N, Higbie P R, Belian R D, et al. Do Jovian electrons influence the terrestrial outer radiation zone? *J. Geophys. Res.*, 1979, **6**: 531 ~ 534
- [ 6 ] Baker D N, Klebesadel R W, Higbie P R, et al. Highly relativistic electrons in the earth’s outer magnetosphere. Lifetimes and temporal history, 1979-1984. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 4265 ~ 4276
- [ 7 ] Bezdroznykh I P, Morozova E I, Shafer Iu G, et al. Variations in the intensity of the relativistic electron flux at the orbit of a geostationary satellite. *Cosmic Res.*, 1986, **24**: 762 ~ 769
- [ 8 ] Li XL, Baker D N, Temerin M, et al. Are energetic electrons in the solar wind the source of the outer radiation belt? *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**: 923 ~ 926