第22卷 第1期 空 间 科 学 学 报 Vol.22, No.1
2002 年 1月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 2002

太阳质子事件对太阳同步轨道空间辐射环境影响分析

朱光武 李保权 王世金 梁金宝 张 微
黄红锦 沈思忠 翟应应 孙越强 叶宗海
(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

介绍了南大西洋异常区的辐射环境及其特点，重点研究了发生于 2000 年 7 月 14 日的太阳质子事件对太阳同步轨道空间环境造成的影响. 太阳质子事件期间，抵达近地空间的高能电子、质子及重离子对太阳同步轨道空间环境造成剧烈地扰动，并且不同种类不同能量的粒子扰动特征不尽相同.

关键词 太阳质子事件—太阳同步轨道

1 引言

1999 年 5 月 10 日在太原卫星发射基地成功地发射了 FY-1C 气象卫星，这颗卫星定轨于 862 km 高度的太阳同步轨道上，卫星倾角为 98.8°, 对地 3 轴稳定. 该卫星上的空间粒子成分监测器能够实现对卫星轨道环境中高能质子、电子和重离子的实时监测. FY-1C 星在轨运行期间，监测器一直处于良好的工作状态，获得了大量的环境数据，在国内首次完整地探测到了太阳同步轨道空间环境的高能质子、高能电子及重离子在空间分布情况.

2000 年 7 月 14 日，太阳爆发了一起 4 级质子事件. 这起质子事件的强度是近几年来太阳爆发的最大的一起，受到各国航天界、天文界和空间物理界的高度关注. FY-1C 星上空间粒子成分监测器监测到了这起太阳质子事件发生的全部过程，获得了一批重要的数据. 根据数据的初步处理结果，比较研究了这起太阳质子事件对太阳同步轨道空间辐射环境的影响.

2 仪器简介

2.1 仪器特点

FY-1C 星空间粒子成分监测器能够探测质子、电子和重离子，同国外同种类型的探测仪器[1−3]相比具有功能全、体积小、重量轻、功耗低等优点. 仪器体积为 187×167×175 mm^3, 重 3.24 kg, 供电电源 +16 V, 仪器功耗 2.0 W. 该仪器的探头部分是由 3 块半导体探测器组成的望远镜系统，探测器布局如图 1 所示，其中 D_1 是厚度为 100 μm 的金硅面垒探测器,

2001-06-19 收到原稿, 2001-11-03 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

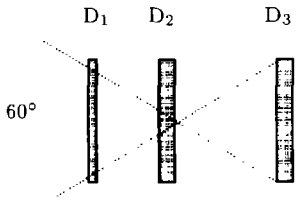


图 1　探测器布局

Fig.1　Layout of the solid state detectors

D_2 和 D_3 是厚度为 3500 μm 的锂漂移探测器, 3 块探测器的直径均为 12 mm. 另外, 为了避免太阳光线照射半导体探测器而导致探测器的噪声增加, 在 D_1 的前部放置了一块厚度为 15 μm 的铝挡光层. 3 块探测器构成 60° 的全向探测张角, 仪器的几何因子为 0.255 $cm^2 \cdot sr$.

2.2　工作原理

当带电粒子穿越传感器时, 由于电离作用而损失能量, 在硅中产生电子 -空穴对, 这些电子 -空穴对在电场的作用下, 被探测器收集. 所以探测器收集到的脉冲信号幅度与粒子在其中沉积的能量成正比. 这样, 对探测器收集的脉冲幅度进行分析, 结合符合和反符合的测试方法, 可以实现对质子能谱和电子能谱的测量.

对重离子的区分是根据 Bethe-Block 公式 [4]:

$$-\left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right)_{\text{电离}} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} NZ\left[\ln\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \delta\right].$$

根据公式, 可以推出带电粒子在薄传感器中的能量损失 ΔE 与粒子能量 E 的乘积与粒子的 MZ^2 成正比 (M 为粒子质量, Z 为核电电荷数), 不同种类的重离子 MZ^2 差别很大. 利用这一原理, 结合 D_1(ΔE 探测器)、D_2 和 D_3 探测器的脉冲幅度, 就能实现重离子甄别.

2.3　探测内容

空间粒子成分监测器监测内容分为 1 道电子、5 道质子和 6 道重离子. 监测的重离子成分从 He 到 Fe, 并按原子序数分为 6 道, 每道原子序数最小的离子分别为 He、Be、C、Mg、Ar 和 Fe. 监测各种粒子的能量范围如下:

电子	E	>1.6 MeV
质子	p_1	2.9 MeV—5.4 MeV
	p_2	5.4 MeV—11.7 MeV
	p_3	11.7 MeV—40 MeV
	p_4	40 MeV—100 MeV
	p_5	100 MeV—300 MeV
重离子	He	12 MeV—102 MeV
	Be	30 MeV—320 MeV
	C	60 MeV—570 MeV
	Mg	0.2 GeV—1.7 GeV
	Ar	0.3 GeV—2.8 GeV
	Fe	0.5 GeV—2.3 GeV

3　太阳质子事件对太阳同步轨道空间辐射环境影响分析

2000 年 7 月 14 日, 爆发了一起 4 级强太阳质子事件. FY-2B 地球同步轨道卫星上

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

的 X 射线探测器在当日的 1830 时监测到一起 X2 级太阳耀斑. 在北京时间 1930 时太阳发出的高能粒子流就随后到达地球近地空间. 在 862 km 的太阳同步轨道高度上, 粒子扰动强度 15 日达到最大. 在随后的几天里, 粒子强度缓慢回落, 到 7 月 20 日基本恢复到平静时的状态. 这次太阳质子事件持续一周的时间, 是进入第 23 太阳活动周以来最大的一起质子事件. FY-1C 星上空间粒子成分监测器监测到事件发生的全部过程. 根据卫星探测数据的初步处理结果, 比较研究了太阳及地磁宁静与太阳质子事件期间的太阳同步轨道空间辐射环境分布特征及其变化.

3.1 宁静南大西洋异常区辐射环境

通过分析和总结 FY-1C 星探测的大量数据发现, 在太阳及地磁宁静时, 太阳同步轨道的辐射环境主要集中在南大西洋负磁异常区, 分布在经度 −90°—30°, 纬度为 −60°—15° 的区域内, 在该区域内存在大量的质子、电子及原子序数小于 12 的重离子. 在异常区以外的区域基本上探测不到高能的电子、质子.

分布在南大西洋异常区的高能质子, 通量随能量的增大而逐渐降低. 探测结果发现, 质子 p_1 的最大通量基本维持在 800/s 左右 (仪器的几何因子为 0.255 $cm^2 \cdot sr$, 没有转换成全向通量), 到质子 p_5 最大通量降低到 450/s 左右. p_1—p_5 在异常区的最大通量位置在分布区的偏西部分, 而偏东部分的粒子通量相对较低. 图 2 是 1999 年 6 月 20 日质子 p_1 在轨道上的分布, x 轴为纬度, y 轴为经度, xy 平面上的曲线是卫星运行轨迹.

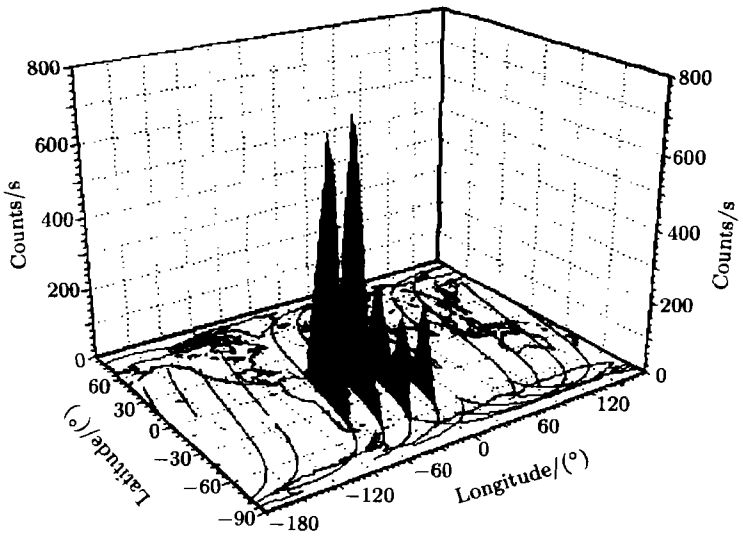


图 2 1999 年 6 月 20 日质子 p_1 在轨道上的分布

Fig.2 The distribution of proton p_1 in solar synchronous orbit on June 20, 1999

异常区内高能电子分布形状类似于质子的分布, 其强度相对比质子 p_1—p_5 都大, 最大电子通量基本维持在 2500/s, 最大通量位置也位于分布区的偏西部分. 在分布区的偏东部分, 电子通量下降迅速. 在经度 0° 以东的区域, 电子的通量极低. 图 3 是 1999 年 6 月 20 日电子在轨道上分布.

在南大西洋异常区探测到含量较为丰富 He 离子和原子序数小于 12 的重离子. He

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

离子的最大强度为 15—20/s 左右. $Z \leqslant 12$ 重离子在异常区的最大强度大约为 25/min. 在异常区之外的全球区域偶尔也探测到少量的 $Z \leqslant 12$ 重离子，它们分布在轨道上的各个位置，这些重离子属于宇宙线异常成分. 在太阳同步轨道上，原子序数大于 12 的重离子在全球范围内很少探测到，可见在太阳及地磁宁静时，该轨道上原子序数大于 12 的重离子含量极少. 图 4 是 1999 年 6 月 20 日 $4 < Z \leqslant 12$ 的重离子分布，图中的曲线是一分钟内的平均计数.

3.2　质子事件期间的轨道辐射环境

太阳同步轨道高度的辐射环境受太阳活动的影响较大. 发生于 2000 年 7 月 14 日的质子事件使地球同步轨道的空间环境受到剧烈扰动，平时没有粒子出现的极区位置在事件期间各种粒子通量大幅度增加，7 月 15 日扰动强度达到最大.

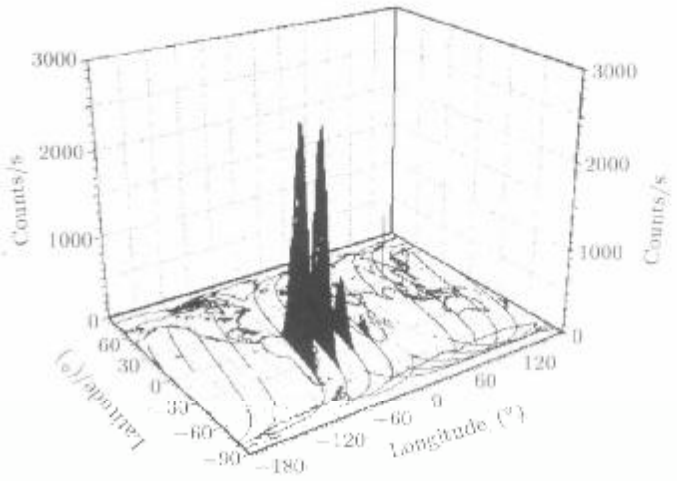


图 3　1999 年 6 月 20 日电子在轨道上的分布

Fig.3　The distribution of electron in solar synchronous orbit on June 20, 1999

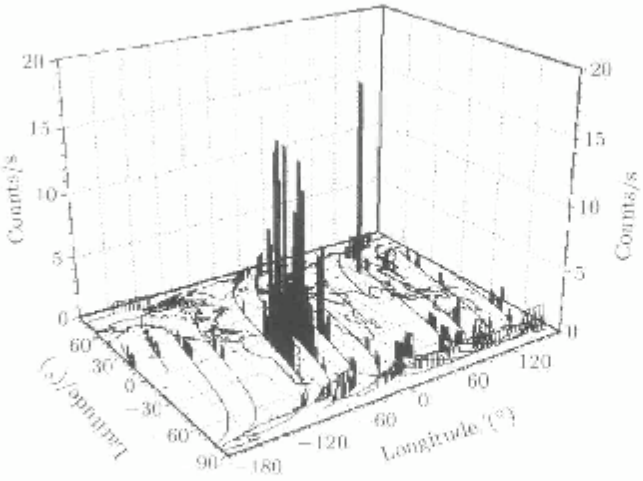


图 4　1999 年 6 月 20 日 $4 < Z \leqslant 12$ 的重离子在轨道上的分布

Fig.4　The distribution of heavy ions in solar synchronous orbit on June 20, 1999

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

通过分析 7 月 15 日的探测结果发现，p_1—p_5 这 5 个能道的质子在极区附近辐射通量大幅度增加. p_1、p_2 的最大通量达到 4500/s, p_3 达到 3000/s, p_4、p_5 分别达到 800/s 和 400/s. 较低能量的 p_1—p_3 在极区的最大通量是它们异常区最大通量的约 5 倍，p_4 约为 2 倍. 即使 100—300 MeV 的高能质子 p_5, 其极区最大通量也同异常区最大通量相当. 不同能量的质子对南北两极的扰动也不均衡，p_1、p_2、p_3 多集中在南极，北极的辐射部分集中在经度 −180°——120° 的高纬地区，且通量比南极位置低很多，而质子 p_4、p_5 在南北极区的扰动相对均衡. 图 5、图 6 是 7 月 15 日的质子 p_1、p_5 在轨道上的分布. 在质子事件持续的随后几天里，太阳活动减弱，极区出现的质子强度也逐渐减弱，到 7 月 19 日，极区位置基本上探测不到高能质子.

这起太阳质子事件还伴随着高能电子流的发射，探测结果显示，极区位置最大辐射通量同异常区最大通量相当. 高能电子对两极区的扰动分布也不均衡，但扰动强度差别不大. 北极的高能电子分布在纬度 −180°——120° 的高纬地区，而南极分布遍及极区位置. 图 7 是电子在轨道上的分布图.

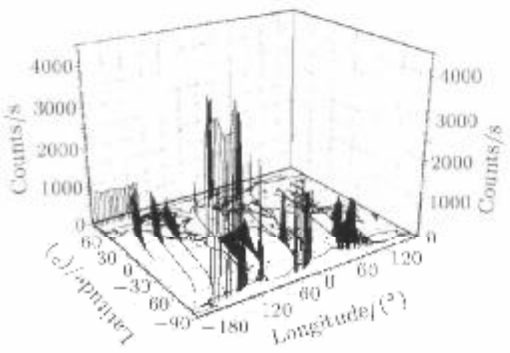


图 5 2000 年 7 月 15 日 p_1 在轨道上的分布

Fig.5 The distribution of proton p_1 in solar synchronous orbit on July 15, 2000

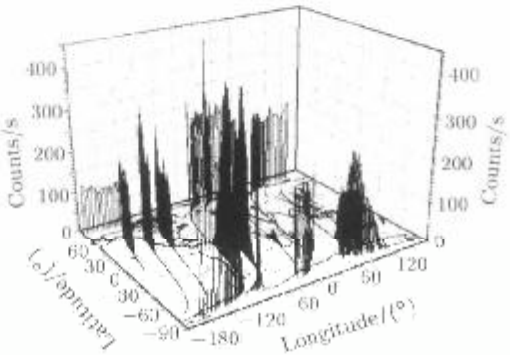


图 6 2000 年 7 月 15 日 p_5 在轨道上的分布

Fig.6 The distribution of proton p_5 in solar synchronous orbit on July 15, 2000

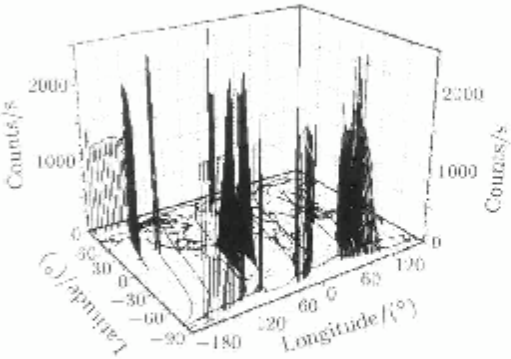


图 7 2000 年 7 月 15 日电子在轨道上的分布

Fig.7 The distribution of electron in solar synchronous orbit on July 15, 2000

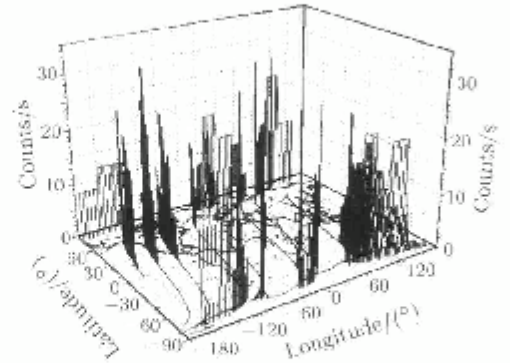


图 8 2000 年 7 月 15 日 Fe 以上重离子在轨道上的分布

Fig.8 The distribution of heavy ion ($Z \geqslant 26$) in solar synchronous orbit on July 15, 2000

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

7 月 15 日，氦离子的扰动相对最大，极区最大强度为 600/s, 而平静时异常区最大通量的每秒大约 15—20/s, 是平静时强度的 30—40 倍，且分布遍布两极区.

事件期间在极区位置附近探测到颇为丰富的各种高能重离子. 宁静时基本探测不到的 Mg 、Fe 等重离子在 7 月 15 日这天最大通量可达 35/min 左右，这些重离子只分布在极区附近，没有出现在南大西洋异常区，且两极分布相对均衡，不同于质子和电子扰动特征. 从图 8 中显示了 Fe 以上重离子在轨道上的位置分布及强度大小.

为便于比较事件期间的重离子丰度，表 1 列出了从 7 月 15—19 日这 5 天轨道上探测到的各种重离子累计计数，Z 为原子序数. 可以看出，在 7 月 15 日轨道上的重离子最为丰富. 16 日之后，重离子计数明显减少，到 19 日 $Z \geqslant 12$ 的重离子基本上恢复到平静状态. 从这五天的数据可以看到，考虑到统计误差之后，Mg 、Ar 、Fe 等重离子的丰度相差不大.

表 1　2000 年 7 月 15—19 日重离子计数

日期	$2 < Z < 12$	$12 \leqslant Z < 18$	$18 \leqslant Z < 26$	$Z \geqslant 26$
2000-07-15	3409	1483	1621	1579
2000-07-16	3369	642	488	419
2000-07-17	1685	117	35	20
2000-07-18	1249	57	14	13
2000-07-19	532	14	4	3

在这次质子事件发生的过程中，位于低纬区的南大西洋异常区的各种粒子通量没有明显变化，可见地磁屏蔽效果明显，使得质子事件携带的粒子流难以到达该区域. 同时也可以看到在质子事件期间，太阳同步轨道最严重的辐射区域不是来自南大西洋异常区，而是来自南北两极区.

4　结论

南大西洋负磁异常区是太阳同步轨道航天器的主要辐射环境，在太阳及地磁宁静时，太阳同步轨道高度的南大西洋负磁异常区分布在经度 $-90°$—$30°$, 纬度为 $-60°$—$15°$ 的区域内，在该区域内存在大量的质子、电子及原子序数小于 12 的重离子. 在异常区以外的区域基本上探测不到高能的电子、质子.

发生于 2000 年 7 月 14 日的这起太阳质子事件强度大、持续时间长，抵达近地空间的高能电子、质子及重离子对太阳同步轨道空间环境造成剧烈地扰动，并且不同种类不同能量的粒子扰动特征不尽相同. 这些粒子能量高、穿透能力强，容易引发航天器上的集成电路产生各种辐照效应，对航天器的安全运行构成极大的威胁. 同时这起太阳质子事件为我们开展空间物理研究提供了很好的机会. 在 FY-1C 星及 FY-2B 星上的空间环境探测仪器都成功的监测到这起事件发生的全部过程，获得了大量的空间环境数据，这些数据可根据研究需要进行进一步详尽地处理.

致谢　航天科技集团八院、国家气象卫星中心为空间粒子成分监测器提供了性能良好的卫星平台；感谢西安卫星测控中心的全体工作人员在探测数据的接收、传输等方面给予的大力协作与支持.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

参 考 文 献

[1] Winningham J D *et al.* The UARS particle environment monitor. *J. Geophy. Res.*, 1993, **98**(D6): 10649—10666

[2] Belian R D *et al.* High-Z energetic particles at geosynchronous orbit during the great solar proton event series of october 1989. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(A11):16897—16906

[3] Williams D J *et al.* The galileo energetic particles. Detector. *Space Sci. Rev.*, 1992, **59—60**: 385—412

[4] 叶宗海编著. 空间粒子辐射探测技术. 北京: 科学出版社, 1986

THE EFFECT ANALYSIS OF SOLAR PROTON EVENT ON SPACE RADIATION ENVIRONMENT AT SOLAR SYNCHRONOUS ORBIT

ZHU Guangwu LI Baoquan WANG Shijin LIANG Jinbao
ZHANG Wei HUANG Hongjin SHEN Sizhong
ZHAI Yingying SUN Yueqiang YE Zhonghai

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract

According to detected results of Space Particle Composition Detector on board the FY-1C meteorology satellite, the paper presents radiation environment and its distribution characteristics in the South Atlantic Anomalous during quiet days without solar proton events and magnetostorms. The effect analysis of solar proton event on July 14, 2000 on solar synchronous orbit space radiation environment has been discussed in detail. Space environment near Earth was disturbed intensively during the solar proton event. High energy electrons, protons and heavy ions possess high flux over both polar regions. The distributions of disturbances for different particles over both polar regions are different.

Key words Solar proton event, Solar synchronous orbit

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com