

Li B Q, Zhu G W, Wang S J, et al. The space particle composition detector aboard FY-1C satellite and analysis of particle radiation in South Atlantic anomaly. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(6):954~958

风云一号 C 星空间粒子成分探测器 及 SAA 区粒子辐射实测分析

李保权^{1,2} 朱光武¹ 王世金¹ 梁金宝¹ 王春琴¹

1 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 FY-1C 星空间粒子成分探测器能够实现对质子能谱、电子积分通量及重离子成分的同时测量。在第 23 周太阳活动峰年期间, 空间粒子成分探测器对 860km 高度的南大西洋负磁异常区高能粒子辐射进行了长达 3 年的连续探测。本文根据实测结果, 得出了南大西洋负磁异常区粒子辐射特征, 分析了太阳质子事件和地磁暴对南大西洋负磁异常区粒子辐射的影响。

关键词 空间粒子成分探测器 南大西洋负磁异常区 粒子辐射

文章编号 0001-5733(2004)06-0954-05 中图分类号 P353

收稿日期 2003-10-31, 2004-07-09 收修定稿

THE SPACE PARTICLE COMPOSITION DETECTOR ABOARD FY-1C SATELLITE AND ANALYSIS OF PARTICLE RADIATION IN SOUTH ATLANTIC ANOMALY

LI Bao-Quan^{1,2} ZHU Guang-Wu¹ WANG Shi-Jin¹ LIANG Jin-Bao¹ WANG Chun-Qin¹

1 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract The space particle composition detector aboard FY-1C satellite can simultaneously detect proton spectrum, electron integrated flux and heavy ion composition. During the maximum of the 23rd solar cycle, the high energy particle radiation in the South Atlantic Anomaly (SAA) of 860 km altitude had been detected for more than three years by the space particle composition detector. The particle radiation characteristics in the SAA are obtained according to the observed data from space particle composition detector. The effects on particle radiation in the SAA by solar proton events and magnetostorms are analyzed.

Key words Space particle composition detector, South Atlantic anomaly, Particle radiation.

1 引言

1999 年 5 月 10 日在太原卫星发射基地成功发

射了风云一号 C 气象卫星 (FY-1C), 该卫星定轨于 860km 高度的太阳同步轨道, 卫星姿态为对地定向, 三轴稳定, 倾角为 98.8°。在该卫星上安装了一台空间粒子成分探测器, 用于空间高能粒子的辐射

基金项目 国家自然科学基金项目资助 (40474096)。

作者简介 李保权, 男, 1973 年生, 博士, 2004 年毕业于中国科学院空间科学与应用研究中心, 主要从事空间环境探测。

E-mail: lbq_1973@yahoo.com.cn

测量.

FY-1C 星空间粒子成分探测器主要有两项科学任务:(1) 卫星异常情况分析. 在人类航天活动的早期,对空间辐射环境并没有引起足够的重视,随着卫星故障的频发和对辐照损伤机理的认识,人们发现卫星的许多故障是由空间粒子辐射造成,所以在卫星发生异常或者故障时,首先考虑是否是空间环境的影响所致,这需要实时监测卫星轨道上的空间辐射环境.(2) 空间粒子辐射变化规律研究. 目前,对于南大西洋负磁异常区(SAA)辐射的量化认识依赖于 AP8 和 AE8 粒子辐射带模型,这两个模型的数据基本上基于 20 世纪 70 年代以前的探测结果,而且模型反映的只是一种静态的平均效果. 现在正在积极开发能够反映太阳质子事件和地磁暴的动态辐射带模型,但这需要积累更多的探测数据. SAA 的辐射情况是否存在长期的变化,也是现在的空间物理界存在争议的问题. 所以都需要对 SAA 进行长期探测,但近几年对 SAA 实测数据的报道甚少. 在 20 世纪 90 年代初, Rosat 卫星^[1], DUOSat-3、KITSAT-1 和 POSAT-1 卫星^[2]对 SAA 区进行了短期探测,得出了 SAA 区分布区域、粒子线性能损(LET)与位置分布,但缺乏详细的粒子能谱信息和扰动情况下的粒子响应. FY-1C 星任务期间,正处于 23 周太阳活动峰年期,太阳质子事件及地磁暴活动频繁,这期间空间粒子成分探测器一直处于良好的工作状态,获得了大量的扰动和平静情况下的粒子辐射数据. 本文根据 1999 年 5 月至 2002 年 5 月 FY-1C 的实测结果,总结了 SAA 区高能粒子辐射基本特征,并分析了地磁暴和质子事件对 SAA 区粒子辐射的影响.

2 仪器特点

FY-1C 星空间粒子成分探测器采用一种由三元半导体探测器组成的望远镜系统^[3],这种望远镜系统不仅能够实现对质子、电子和重离子的同时测量,还能够有效屏蔽视场角之外的干扰粒子. 仪器在电路设计时采用了具有自主知识产权的计数率电路、重离子计数电路、甄别器等专用集成电路模块,解决了空间粒子成分探测器对电路实现的复杂要求,并降低了仪器体积、重量和功耗. 同国外同类探测仪器^[4~6]相比 FY-1C 星空间粒子成分探测器具有探测功能全、仪器体积小、重量轻、功耗低等优点. 表 1

给出了空间粒子成分探测器的基本技术参数.

表 1 空间粒子成分探测器技术参数
Table 1 The technical parameters of the space particle composition detector

名称	参数
仪器体积	187 mm × 167 mm × 175 mm
重量	3.24 kg
工作电源	+ 16 V
功耗	2.0 W
探测张角	60°
几何因子	电子测量: 0.255 cm ² ·sr; 质子测量: 0.737 cm ² ·sr; 重离子测量: 0.737 cm ² ·sr
探测内容	电子 $E > 1.6\text{MeV}$ 质子 $p_1: 2.9 \sim 5.4\text{MeV}; p_2: 5.4 \sim 11.7\text{MeV}; p_3: 11.7 \sim 40\text{MeV}; p_4: 40 \sim 100\text{MeV}; p_5: 100 \sim 300\text{MeV}$ 重离子 He: 12 ~ 102MeV; Be: 30 ~ 320MeV; C: 60 ~ 570MeV; Mg: 0.2 ~ 1.7 GeV; Ar: 0.3 ~ 2.8 GeV; Fe: 0.5 ~ 2.3 GeV

3 实测结果分析

3.1 860km 高度 SAA 辐射特征

由于地球磁场相对于地理位置的非对称性,使得在南大西洋位置(巴西东海岸)上空形成一个类似于“锅底”的磁场位形,在该磁场的约束下,地球内辐射带的下边缘最低可以达到 200km 的高度,而在其他位置地球内辐射带的下边缘高度通常在 1200 ~ 1300km,南大西洋上空这个特殊的地理位置被称之为南大西洋负磁异常区,简称 SAA 区. FY-1C 星轨道高度 860km,每天都要穿过 SAA 辐射区多次. 分析空间粒子成分探测器的数据发现 860km 高度的 SAA 区分布在经度 - 100° ~ 40°,纬度为 - 60° ~ 10° 的区域内,该轨道高度的 SAA 分布类似于“蛋”形. SAA 的粒子辐射主要以质子、电子为主,同时也存在少量低原子序数的重离子. 长期的探测结果显示,不考虑太阳质子事件和地磁暴的影响, SAA 的粒子种类、辐射强度及位置分布相对比较稳定,这些特征随时间推移没有明显的改变.

860km 高度的 SAA 区辐射以质子为主要成分,质子辐射中心区集中在经度 - 40°,纬度 30° 附近. 辐射中心区的质子 p_1 最大通量基本维持在 800 protons/s (仪器张角内探测到的积分通量), p_2 约 500 protons/s, p_3 约 300 protons/s, p_4 约 300 protons/s, p_5

约 400 protons/s. 积分仪器的探测结果, 2.9 ~ 300MeV 质子在辐射中心区的微分通量可达 3000 protons/(cm²·s·sr). 质子 p₁ ~ p₅ 单位能量间隔的微分通量随能量增加而减小, 但位置分布不随能量发生变化. 图 1 是 p₃ 在 860km 高度 SAA 区分布.

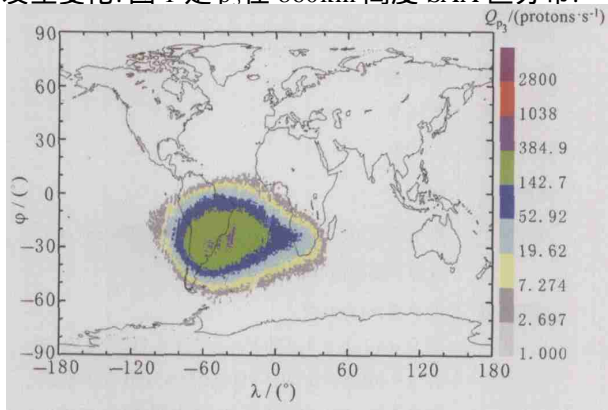


图 1 空间环境宁静期质子 p₃ (11.7 ~ 40MeV) 分布图
Fig. 1 The proton p₃ distribution (11.7 ~ 40MeV) in the quiet time of space environment

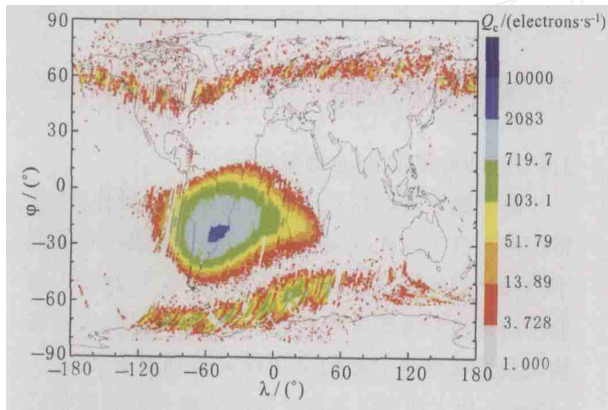


图 2 空间环境宁静期电子分布图
Fig. 2 The electron distribution (> 1.6MeV) in the quiet time of space environment

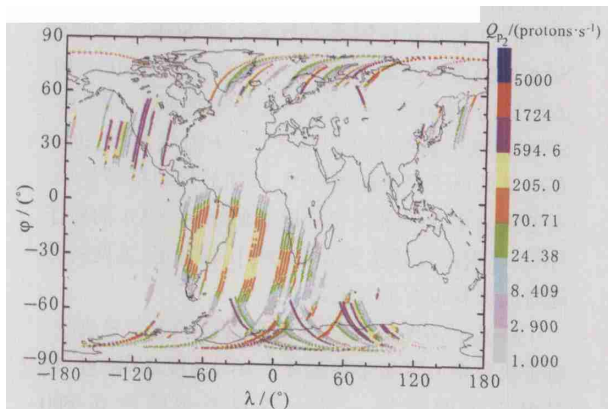


图 3 太阳质子事件质子 p₂ 分布
Fig. 3 The proton p₂ distribution during the solar proton event

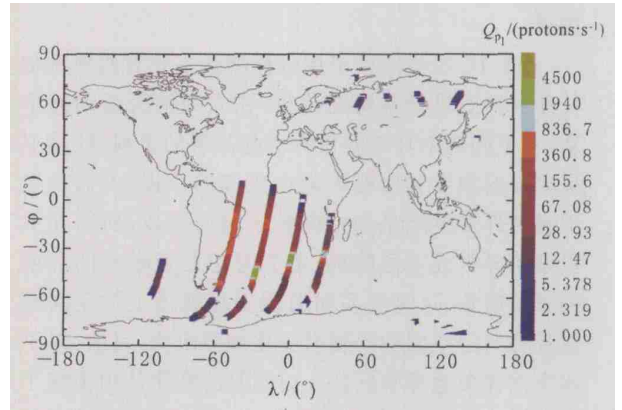


图 4 强地磁暴形成的新辐射区域
(2000 年 4 月 18 日质子 p₁ 分布)
Fig. 4 The new radiation region produced by the strong magnetostorm (the p₁ distribution on April 18, 2000)

SAA 区内高能电子的分布类似于质子, 能量大于 1.6MeV 的电子在辐射中心区的微分通量基本维持在 10⁴ electrons/(cm²·s·sr). 电子辐射中心区位置同质子一致. 图 2 是 SAA 区高能电子的空间分布. 太阳及地磁宁静时, 在高纬地区上空基本上探测不到高能电子, 图 2 中高纬地区之所以出现少许的高能电子, 是由于该图统计了一百多天的探测数据, 数据的当天虽然没有发生太阳质子事件或者地磁暴, 但是这些事件对极区粒子辐射的影响会持续一段时间, 所以数据累积造成图中高纬地区会出现少许高能电子.

除了质子电子之外, 在 SAA 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 离子在 SAA 的最大辐射强度约 20 ~ 30 particles/(cm²·s·sr). Z > 12 重离子在 SAA 区的最大强度约 30 particles/(cm²·s·sr). SAA 区基本上不存在原子序数大于 Mg 的重离子. SAA 区之外的高纬地区, 也能够探测到少许的 Z > 12 宇宙线异常成分.

3.2 质子事件对 SAA 区粒子辐射影响

在 1999 年 5 月到 2002 年的 5 月期间爆发了近 50 起质子事件, 太阳活动表现出明显的峰年特征. 发生强质子事件时, SAA 区里的电子、质子及重离子辐射强度及其分布没有出现明显的变化, 但在高纬度位置探测到高能粒子, 而且高纬度位置粒子的辐射强度与质子事件的强度呈现明显的正相关性. 南北高纬地区的高能粒子位置分布并不对称 (如图 3 所示, SAA 区空白部分由于缺少轨道数据), 北向的高能粒子向低纬扩展, 扩展位置集中在地磁北极附

近,南向的沉降粒子相对集中高纬地区。

发生太阳质子事件时,极区粒子通量的增长,对较低能量的质子而言表现更为明显,随能量增加,极区粒子通量逐渐变小。例如 2000 年 7 月 15 日发生的强质子事件中,极区 p_1 的最高通量是 SAA 辐射中心区的 5 倍,达到 4000 protons/s。而极区 p_5 的最大强度与 SAA 辐射中心区接近。质子事件对电子辐射影响类似于质子,发生四级质子事件时,极区最大电子通量与 SAA 辐射中心区相当。

统计发现,只有发生强质子事件时,才会在极区位置上空探测到能量大于 1.6MeV 的高能电子和能量大于 40MeV 的高能质子。一般而言,二级以下的质子事件在极区位置附近基本上探测不到 40MeV 以上的高能质子,也没有出现高能电子。

对重离子而言,太阳及地磁宁静时基本上一天探测不到一个 Mg、Ar、Fe 等重离子成分,在强太阳质子事件时出现了比较高的计数,可以达到每分钟几十个离子,这些重离子集中在南北极区位置上空,由于它们能量高、电离能力强,容易在集成电路中产生单粒子效应,损坏集成电路,因此,太阳质子事件是对空间技术系统威胁最为严重的空间天气。

3.3 地磁暴对 SAA 区粒子辐射影响

SAA 区粒子辐射特征受强地磁暴的影响变化比较显著。2000 年 4 月 6 日,发生一起强地磁暴, K_p 指数达到 8,4 月 7 日,在 SAA 之外,临近 SAA 南向,纬度 $-30^\circ \sim -60^\circ$,经度 $-60^\circ \sim 30^\circ$ 位置形成一个相对较窄的、高辐射强度的区域,如图 4 所示。该辐射区域存在时间较长,而且一直处于比较高的辐射水平,质子 p_1 最高辐射强度达到 5000 protons/s。2000 年 7 月 15 日和 8 月 12 日,又发生了两起强地磁暴, K_p 指数分别为 9 和 8,进一步增强了低能质子的辐射通量。8 月 15 日,新形成辐射区域质子 p_1 的通量达到约 1.2×10^4 protons/s,是 FY-1C 在轨运行期间探测到的最强辐射。新形成的辐射区域持续时间约 7 个月,在这 7 个月内,SAA 中心区的辐射强度也出现了大幅度的增长,质子 p_1 基本维持在 $(3 \sim 7) \times 10^3$ protons/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$) 范围内变化,是无扰动状况下的 3~7 倍。

2001 年 3 月下旬和 4 月上旬发生的多起强地磁暴,造成 4 月份 SAA 中心区较低能量的质子辐射强度增加,质子 p_1 的通量基本维持在 4000 protons/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$) 以上,比 3 月份平均高出 4 倍。这种高辐射水平一直持续到 6 月下旬才慢慢回落,到 9 月中

旬,质子通量基本回落到正常状态。

统计空间粒子成分探测器的监测结果发现,中等及中等强度以下的地磁暴对 SAA 区粒子辐射影响微弱,但受强地磁暴的影响变化比较显著,尤其是对能量低于 11.7MeV 的质子影响最为显著,通量呈现明显增长,而且持续时间长,但能量高于 11.7MeV 的质子辐射特征没有明显变化。SAA 区的高能电子和重离子基本上不受地磁暴的影响。另外在发生强地磁暴时,在极区位置上空探测到高通量的沉降质子和电子,有时能够达到 SAA 辐射中心区的几倍以上,但地磁暴产生的极区沉降质子能量一般低于 11.7MeV。

4 结 论

FY-1C 星空间粒子成分探测器能够实现质子能谱、电子积分通量及重离子成分的同时测量,并且仪器重量轻、体积小、功耗低。在第 23 周太阳活动峰年期间,空间粒子成分探测器对 860km 高度的高能粒子辐射进行了长期地连续探测。发现 SAA 区存在大量的质子、电子及少量的原子序数小于 12 的重离子,从长期的变化来看,SAA 区粒子辐射特性相对比较稳定。强质子事件对 SAA 区粒子辐射特性影响不明显,发生二级以上的质子事件时在极区位置上空能够探测到能量大于 1.6MeV 的高能电子和能量大于 40MeV 的高能质子。强地磁暴对 SAA 区粒子辐射影响显著,在发生强地磁暴之后,能量低于 11.7MeV 的质子通量呈现明显增长,但更高能量的质子辐射特征没有明显变化。高能电子和重离子辐射特性基本上不受地磁暴的影响。

参考文献

- [1] Pfeffermann E, Briel U G. Soft X-ray optics and technology. Proceedings of the international society for optical engineering. in Berlin, Federal Republic of Germany. 1986, 733: 519~532
- [2] <http://www.ee.surrey.ac.uk/CSER/UOSAT/missions/mission-summary.html>
- [3] 朱光武,李保权,王世金等. 太阳质子事件对太阳同步轨道空间辐射环境影响分析. 空间科学学报, 2002, 22(1): 58~64
Zhu G W, Li B Q, Wang S J, et al. The effect analysis of solar proton event on solar synchronous orbit space radiation environment. Chinese. J. Space Sci. (in Chinese), 2002, 22(1): 58~64
- [4] Winningham J D, Sharber J R, Frahm R A, et al. The UARS particle environment monitor. J. Geophys. Res., 1993, 98(D6): 10649~10666

- [5] Belian R D, Gsler G R, Cayton T, 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
- [6] Williams D J, Mcentier R W, Jaskulek S, et al. The Galileo energetic particles detector. *Space Sci. Rev.*, 1992, **59-60**: 385 ~ 412

《地球物理学报》稿约

《地球物理学报》创刊于 1948 年,是中国科学院地质与地球物理研究所、中国地球物理学会联合主办的有关地球物理科学的综合性学术刊物.主要刊载固体地球物理、应用地球物理、地磁和空间物理、大气和海洋地球物理,以及与地球物理密切相关的交叉学科研究成果的高质量论文.中文版为双月刊,在国内外发行,并由美国地球物理学家联合会(简称 AGU)同步发行英文网络版.作者和读者对象主要为从事地球物理学、地球科学及其他相关学科的国内外科技工作者和大专院校师生.

《地球物理学报》荣获首届国家期刊奖和中国科学院优秀期刊特等奖,2001 年进入“中国期刊方阵”被评为“双高期刊”.2002 年底荣获第二届国家期刊奖.本刊为中国科技信息研究所信息分析中心、中国科学院引文数据库等的统计源期刊和 SCI 等国际检索系统的源期刊.

1 主要栏目

- 1.1 学术论文 报道我国以及国际地球物理各分支学科及相关边缘、交叉学科的重要研究成果,包括具有创新性的基础研究和应用基础研究成果.以及具有重大应用价值的研究成果.一般不超过 6000 字.附中、英文摘要约 300 字,关键词 3~8 个.
- 1.2 综述或评述 介绍国内外地球物理学和相关交叉学科在某一领域或某一专题的最新研究进展或评述.6000 字以内,其余要求同 1.1.
- 1.3 研究短论 快捷报道地球物理学领域和相关交叉学科某项研究的重要阶段性成果,或主要结论,或重要发现.3000 字左右.
- 1.4 科学论坛 开展对地球物理学和相关交叉学科以及对本刊文章某一学术观点的讨论,一般 3500 字以内.
- 1.5 学术动态 国内外有关地球物理学学术活动的报道.一般 800 字以内.“1.2”~“1.5”为不定期栏目.

2 稿件要求

- 2.1 文稿观点明确,论据可靠,层次分明,论述精练,语言准确,符合规范,求真反伪,文责自负.
- 2.2 量、符号和单位采用国家标准《量和单位》.量符号、代表变动性数字的符号以及坐标轴的符号均排斜体;矢量、张量排黑斜体;量符号的下标,凡用以上符号者排斜体,其他情况排正体.量符号在文中首次出现时,必须给出其量名称及单位.单位一律采用国际符号,排正体.地球物理学中常用的数学符号(自然对数的底 e , 圆周率 π , 转置 T , 虚数 i , d 中的 ∂ , dx 中的 d , ∂x 中的 ∂ 等)均排正体.外文缩写词必须符合国际规范,在文中第一次出现时要说明中文含义.
- 2.3 图件 附最必要的图,一般不超过 6 幅,每幅注明图号.要求图件具科学性,符合规范,清晰美观,能直接用于制版.坐标轴标目的书写以规范形式“量符号/单位”表示,如 f/Hz , $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$.图中内容要中、英文并列给出.对于涉及国界的图件,必须绘制在地图出版社出版的最新地图上,或通过 www.sbsm.gov.cn 下载.在正文中标示图的位置(画框示意),框的下方写明图号、图题(中、英文并列)和图注.
- 2.4 表格 采用三线表,必要时加辅线.表号和表题置于表的上方(中、英文并列).表中量和单位的标示形式同图.表直接列于文中,勿另置.注意表与图的内容勿重复.
- 2.5 参考文献 遵循著作权法,凡引用他人资料、数据、方法、图表以及结果、结论的,必须注明出处,列出文献,涉及版权事宜作者自负.参考文献的著录格式本刊采用“顺序编码制”,著录格式详见“《地球物理学报》文后参考文献著录格式”.
- 2.6 提交文稿研究工作的基金来源(批准号),以及 100 字以内的第一作者简介.

3 注意事项

- 3.1 来稿一式两份,计算机打印.
- 3.2 投稿者可建议 3~5 名评审者(请注明学位、职称、研究领域、单位和通讯处),以及要求回避的评审者.供编辑部参考.
- 3.3 来稿如不符合以上要求,将退作者修改后再投.自留稿件底稿,刊用与否恕不退稿.作者收到本刊回执后 3 个月未接到录用通知时,可自行处理,并请告之编辑部,双方有约定者除外.勿一稿多投.
- 3.4 来稿一经发表,酌寄稿酬并酌收版面费.赠送抽印本 20 份及样刊.

来稿请寄:北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮 编:100029

电 话:62007700,62007709,62007696 E-mail:actageop@mail.icgas.ac.cn