第20卷 第3期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.3
2000 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2000

FY-2 卫星太阳质子事件监测警报系统及质子事件警报的尝试

林华安 朱光武 王世金
(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

介绍搭载在 FY-2 地球同步轨道气象卫星上的空间粒子监测器和太阳 X 射线探测器所组成的太阳质子事件监测报警系统; 1997-11-04 和 1997-11-06 二次质子事件警报的尝试及相关的观测资料.

关键词 质子事件—警报

1 引 言

太阳质子事件是大耀斑高能粒子加速和逃逸过程的产物, 是突发性的空间高能粒子辐射增强事件, 也是对航天器正常运行和载人空间飞行安全构成重大影响的空间环境因素之一. 高能单粒子翻转事件和 "锁定 "现象经常导致航天器工作异常, 甚至完全失效. 太阳质子事件的辐射剂量效应可能对在飞行器舱内外活动的宇航员造成辐射损伤, 甚至构成生命威胁, 因此, 太阳质子事件预报和警报对于保障航天器正常运行和宇航员生命安全是至关重要的, 其作用和意义在于, 在质子事件警报期间加密对航天器运行状态的监测, 为及时发现问题, 排除故障争取时间; 实时调整宇航员出舱和回舱时刻表等, 将质子事件警报纳入对航天器进行 "飞控" 的工程设计中, 可能是提高航天器运行寿命的一个有效措施.

太阳质子事件警报实际上是指太阳耀斑已经发生, 根据耀斑的电磁辐射 (光学、射电、微波、γ 射线、X 射线等) 特征, 实时判断该耀斑是否为质子耀斑, 是否可能形成质子事件, 并给出质子事件到达近地空间的时间、质子峰值流量、积分流量、能谱特性等警报参数. 之所以选择太阳耀斑电磁辐射作为耀斑质子事件的警报手段, 是由于耀斑电磁辐射超前耀斑粒子辐射几十分钟至几十小时到达地球. 太阳质子事件警报的必要条件应该是: 能一天 24 h 全天候监测太阳, 捕捉每一个太阳耀斑, 实时接收处理太阳活动观测资料.

工作于地球同步轨道卫星上的太阳 X 射线探测系统满足了上述必要条件. 太阳 X 射线, 特别是硬 X 射线为耀斑粒子加速的非热过程产生, 它不像射电、微波那样受活动区磁场的影响, 而是直接携带耀斑粒子加速过程的重要物理信息. 虽然 γ 射线线谱辐射是太阳耀斑存在质子加速过程的一种特征表现, 但观测表明, 约有 1/3 的质子事件并不伴随可探测的 γ 射线线谱辐射 [1], 而每一个太阳耀斑, 特别是大耀斑必然伴随着 X 射线辐射过程, 因此, 从太阳活动监测和质子事件警报考虑, 太阳 X 射线辐射波段是最佳的选择.

1999-09-07 收到原稿, 2000-01-02 收到修定稿

2 质子耀斑 X 射线辐射特征

根据 HINOTORI 和 SMM 卫星观测的太阳耀斑硬 X 射线辐射的空间、时间和能谱等特征，将耀斑划分为 A 、 B 和 C 三类 [2]，是第 21 周太阳活动峰年空间观测的一个重要成果. A 、 B 和 C 三类耀斑中， A 型仅占不到 1%，而 B 型和 C 型则分别占 81% 和 18%. 耀斑中占绝大多数的 B 型和 C 型在硬 X 射线源的空间结构、时间形态和能谱演变上存在着重大差别. B 型耀斑硬 X 射线源的高度低 (~2 500 km)，呈双源结构， X 射线辐射持续时间短 (秒量级)，高能时延不显著 (< 10 s)，能谱呈现软-硬-软的演变特征；而 C 型耀斑硬 X 射线源的高度高 ($> 4 \times 10$ km)，呈单源结构， X 射线辐射持续时间长 (min 量级)，高能时延显著 (> 10 s)，并呈现软-硬-硬的能谱演变特征.

对 SMM 卫星硬 X 射线谱仪 (HXRBS) 观测的太阳硬 X 射线暴， GOES 卫星相应的软 X 射线观测数据，及相关文献上发表的资料，进行统计分析表明 [1,3,4]：与非质子耀斑相比较，质子耀斑具有高的硬 X 射线源的高度，硬的 X 射线能谱，大的 X 射线辐射峰值流量，长的持续时间，快的 X 射线辐射上升时间，显著的硬 X 射线高能时延，和软-硬-硬的能谱演变等特征. 观测资料分析显示：质子耀斑具有 C 型耀斑特征，而绝大多数 B 型耀斑是非质子耀斑.

为了进一步理解 B 型和 C 型 (非质子与质子) 耀斑在 X 射线辐射的空间，时间和能谱特征上的差别，作者曾分析了在非均匀截面耀斑环中硬 X 射线源的高度分布 [5]，解释了 B 型和 C 型耀斑硬 X 射线源的空间结构特征；并提出流量与能谱同步变化的高能电子注入源函数模型，获得了时变的硬 X 射线辐射方程，对 B 型与 C 型耀斑之间不同的高能时延现象 [6] 和能谱演变特征 [7] 作了解释. 探讨 B 型与 C 型 (非质子与质子) 耀斑在 X 射线辐射特征上差别的形成机制和物理内涵，对深入了解耀斑热与非热过程和基于 X 射线辐射特征的太阳质子事件警报具有重要的科学意义和应用价值.

太阳耀斑是一个非常复杂的物理过程，人们对影响，制约和控制这一复杂过程的物理因素还不十分了解，对耀斑能量释放，转换和输运过程也还不十分清楚，虽然硬 X 射线辐射特征参数在质子与非质子耀斑之间存在着差别，但它们之间在特征参数值上并不存在明确的分界线，如何利用这些特征参数差别进行质子事件警报是个重要研究课题.

3 FY-2 卫星太阳质子事件监测警报系统组成

系统组成框图如图 1 所示，星上设备包括空间高能粒子监测器 (SPM)，用于监测太阳质子事件及地球同步轨道空间高能粒子，太阳 X 射线探测器 (SXD)，用于太阳活动监测及质子事件警报. 地面接收站用于实时的数据接收，存储和显示.

空间粒子监测器是由三片半导体粒子探测器组成的高能粒子望远镜和相关电子线路所组成，它主要性能是：

质子能道： P1: 3.5—26 MeV; P2: 10—26 MeV; P3: 26—300 MeV; P4: > 1.1 MeV. 重离子能道： ^{3}He: 3.5—26 MeV/n; ^{4}He: 3.5—26 MeV/n.

电子能道： E >1.4 MeV.

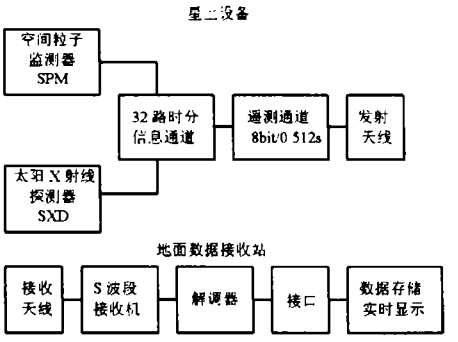

图 1　FY-2 卫星太阳质子事件监测警报系统组成框图

Fig.1　Block diagram of FY-2 solar proton events monitoring and warning system

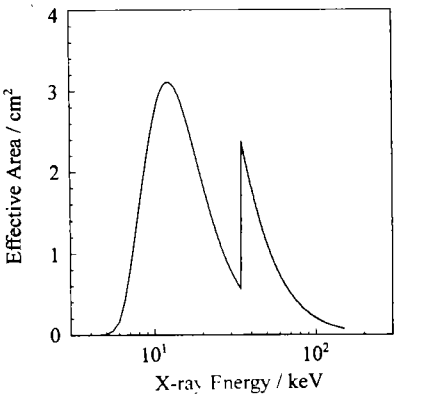

图 2　X 射线探测器有效灵敏面积

Fig.2　Effective sensitivity of X-ray detector

时间分辨率：16.4 s.

太阳 X 射线探测器是由盒形铍窗氙气正比计数器和 10 道对数等道宽的脉冲幅度分析器等相关电路组成. 图 2 表示 X 射线探测器有效灵敏面积. 太阳 X 射线探测器主要性能指标：

能量范围：4—84 keV, 包括软、硬 X 射线波段.

能道划分：4.0 keV−5.4 − 7.3 − 10.0 − 13.5 − 18.3 −24.8 − 33.7 − 45.6 − 61.9 − 84.0 keV.

时间分辨率：8.2 s.

卫星上二台观测仪器的总重量为 3.6 kg, 总功耗为 2.5 W, 数据传输速率为 8 bit/0.512 s.

4　二次质子事件警报的尝试

FY-2 地球同步气象卫星于 1997 年 6 月 4 日成功发射入轨, 经在轨测试, 定点于 E105°. FY-2 卫星太阳 X 射线探测器投入观测以后, 很长一段时间太阳活动较为平静, 9 月 8 日和 9 日各发生一次小的 X 射线耀斑, 9 月 24 日这一天连续观测到三次较大的 X 射线暴 (见图 3). 图 3 给出硬 X 射线能段 (18.3—24.8 keV) 三个耀斑 X 射线流量曲线. 图中在卫星所处的地方时午夜前后, 太阳 X 射线数据中断, 是由于地球同步卫星在每年春分、秋分前后 20 多天中, 在地方时的午夜, 有一段时间进入地球阴影形成 “星食” 所造成的. 从 9 月份以后, 太阳耀斑逐渐频繁, 预示着太阳逐渐进入第 23 周的活动期. 1997-11-03 太阳 X 射线探测器观测到多次 X 射线耀斑事件 (见图 4). 图 4 给出了 11 月 3 日至 6 日的太阳 X 射线辐射流量曲线 (7.3—10 keV), 其中较大一次耀斑发生于北京时间 3 日 1820. 从 4 日凌晨到中午约 12 h 时间内, 观测到 10 多个太阳 X 射线耀斑, 其中北京时间 1040 的耀斑特别引人注意. 在太阳活动低年, 连续发生较强的太阳活动, 表明该活动区正处于不寻常的活动状态, 果然, 4 日下午 1352—1415(北京时间), 一个特大的 X 射线耀斑发生了 (见图 5). 图 5 是 4 日特大 X 射线耀斑多能段流量曲线, 从图的 X2 能段的流量曲线可以看出：这个耀斑具有大的 X 射线峰值流量 ($F_{\mathrm{M}} > 4 \times 10^4$ c/s), 快的上升时间 ($T_{\mathrm{R}} < 40$ s), 和长的持续时间 ($T_{\mathrm{D}} > 1\,200$ s) 等质子耀斑的参数特征, 根据这些特征及耀斑前频繁的太阳

活动，判断该耀斑为质子耀斑，并及时向航天有关部门发出太阳质子事件警报． 3 个多小时后， FY-2 卫星空间粒子监测器 (P1 和 P3) 开始监测到太阳质子事件 (见图 6). 图 6 给出了 1997-11-03—10 的空间粒子监测器 P1 和 P3 能道观测的 FY-2 卫星轨道的质子流量的时间变化，图上二个箭头分别表示 4 日和 6 日二个太阳耀斑的起始时刻.

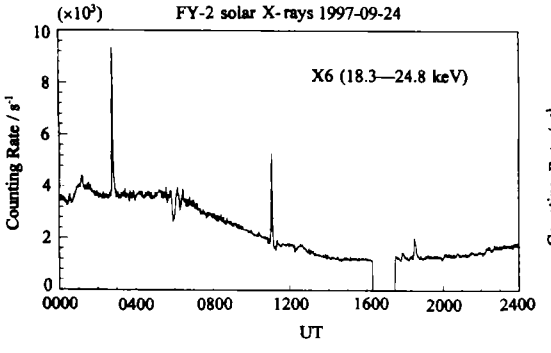

图 3 1997-09-24 三次太阳耀斑
Fig.3 Three solar flares in 1997-09-24

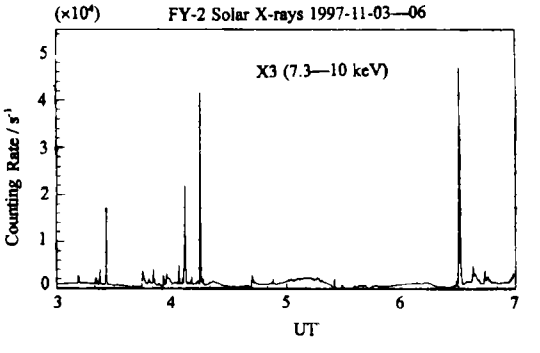

图 4 1997-11-03—06 太阳耀斑
Fig.4 Solar flares in 1997-11-03—06

11 月 4 日质子耀斑之后，太阳活动相对平静 (图 4)，与 1986 年太阳活动谷年期间连续发生 1986-02-04 和 1986-02-06 二次质子耀斑相比较，预示着现在的活动区正在积累能量孕育着另一次大耀斑，经过约 54 h 的能量积累， 6 日 1947—2050(北京时间)，太阳 X 射线探测器又一次探测到一个更大的耀斑 (见图 4 和 7)，从图 7 的 X2 能段的 X 射线流量曲线可以看出：与 4 日的质子耀斑相比较，这次耀斑具有更大的 X 射线峰值流量 ($F_M > 5 \times 10^4$ c/s)，更快的上升时间 ($T_R < 35$ s) 和更长的持续时间 ($T_D > 2\,400$ s)，表现出更明显的质子耀斑 X 射线辐射特征，为此，再次向有关部门发出质子事件警报，随后空间粒子监测器再次观测到质子流量的增加 (见图 6)，再次验证了质子事件警报的正确性.

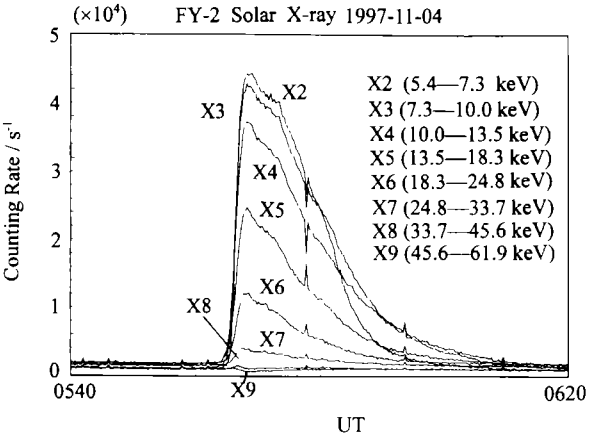

图 5 1997-11-04 质子耀斑 X 射线辐射
Fig.5 Solar X-ray emission of proton flare in 1997-11-04

从图 6 所展示的 1997-11-03—1997-11-10 FY-2 卫星观测的地球同步轨道质子流量的变化，可以看出， 4 日太阳质子耀斑发生前，质子流量处于背景辐射水平， 4 日 0554(UT) 第一次质子耀斑后 3 个多小时，质子流量很快上升并出现二个质子辐射峰值，随后质子流

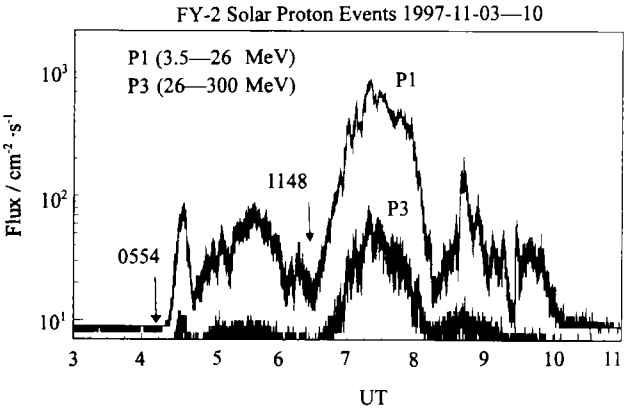

图 6　1997-11-03—10 地球同步轨道高能质子流量的时间变化

Fig.6　High energy proton flux in geosynchronous orbit during 1997-11-03—1997-11-10

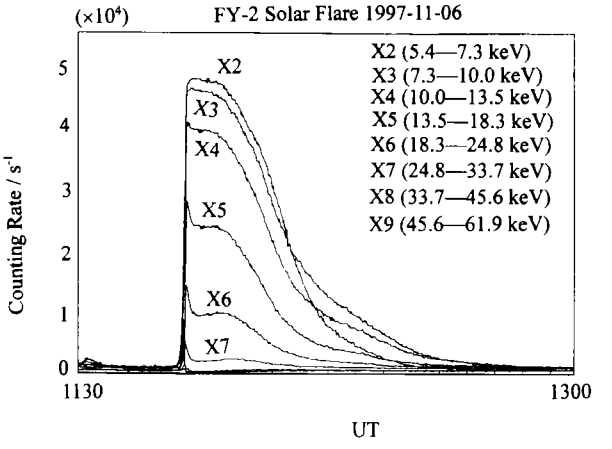

图 7　1997-11-06 质子耀斑 X 射线辐射

Fig.7　Solar X-ray emission of proton flare in 1997-11-06

量逐渐减小，6 日 1148(UT) 发生第二次质子耀斑，使处于谷值的空间质子辐射，又一次迅速增强，其辐射峰值超过前者，并随后出现多个峰值辐射，到 10 日 0300(UT) 恢复到背景水平. 从所观测的质子峰值流量，估计 4 日质子事件为一级，6 日质子事件为二级.

上述的质子事件警报，是一次成功的尝试，使“基于 X 射线辐射特征的质子事件警报”的可行性得到一次实际验证.

5　结　　语

太阳硬 X 射线辐射与质子事件都是耀斑非热过程的产物，软 X 射线辐射是耀斑热过程的产物，因此应用硬 X 射线辐射特征作为质子事件警报手段是更为有效的. 但是，由于受 FY-2 卫星的重量，功耗和遥测等限制，目前的 FY-2/SXD 还无法获得诸如硬 X 射线高能时延，能谱演变等对质子耀斑的判断十分有价值的参数. 因此，应用现在的 FY-2/SXD 的观测资料作质子事件警报时，要考虑质子耀斑 X 射线辐射所普遍具有的规律，例如大的

X 射线峰值流量，长的持续时间等参数特征，也要充分利用 FY-2/SXD 可同时获得软，硬 X 射线辐射信息，构成新的物理参数，例如耀斑热与非热能量比值，耀斑能量释放速率等参数，研究这些参数在质子与非质子耀斑之间所具有的不同表现，并应用于质子事件警报的实践中.

目前基于 X 射线辐射特征的太阳质子事件警报是定性和尝试性的. 质子事件警报有赖于多种观测手段相互配合，FY-2 太阳质子事件监测警报系统，只是日地空间灾害性环境监测、预报和警报中的一个组成部分. 就提高 FY-2 太阳质子事件警报水平而言，也有赖于 FY-2/SXD 的长期观测资料的积累，特别是对作为比较样本的质子耀斑 X 射线辐射特征参数的分析处理 [8]. 在分析大量观测资料的基础上，建立质子事件警报数学物理模型，构成具有自我完善功能的智能化的质子事件警报系统，以满足我国航天领域发展的需求.

参 考 文 献

[1] 林华安. 三种类型的质子耀斑. 空间科学学报， 1996, **16**(2):115—121
[2] Dennis B R. Solar Flare Hard X-ray Observations. *Solar Phys.*, 1988, **(1/2)**:49—94
[3] 林华安. 太阳耀斑显著的热和非热事件的统计特征. 空间科学学报， 1990, **10**(3):184—189
[4] 林华安，王世金. 太阳质子耀斑 X 射线辐射特征及质子事件警报. 空间科学学报， 1993, **13**(2):122—128
[5] 林华安. 非均匀截面耀斑环中硬 X 射线辐射空间结构和高度分布. 空间科学学报， 1994, **14**(1):8—14
[6] 林华安. 太阳耀斑硬 X 射线高能时延和辐射展宽. 空间科学学报， 1998, **18**(2):111—118
[7] 林华安. 太阳耀斑硬 X 射线能谱演变特征. 空间科学学报， 1999, **19**(4):295—300
[8] 王世金，林华安. 一种新的太阳质子事件警报方法的探讨. 空间科学学报， 1993, **13**(3):215—223

A SOLAR PROTON EVENTS MORNITORING-WARNING SYSTEM ON BOARD FY-2 AND AN ATTEMPT OF PROTON EVENTS WARING

LIN Huaan ZHU Guangwu WANG Shijin

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

Abstract

Solar proton events monitoring and warning system which consists of space high energy particles monitor and solar x-ray detector are introduced in this paper. The system are boarded on a FY-2 geosynchronous meteorological satellite launched in 10 June 1997. The first test for solar proton events according to the properties of solar flare x-ray emission occurring in 1997-11-04 and 1997-11-06, are introduced, too. Some relevant observational data obtained with FY-2 satellite.

Key words Proton event, Warning