

# 太阳耀斑硬X射线观测

徐永焯

(中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

这篇报告扼要地叙述了太阳耀斑硬X射线爆发的观测结果,着重介绍时间轮廓、能谱特征、X辐射的偏振以及硬X射线爆发源的位置和结构。全文共分六节。第一节简要地介绍太阳硬X射线爆发的观测史及“太阳峰年”卫星和“火鸟”卫星上的仪器,第二节描述两类太阳硬X射线爆发的特征,第三节描述能谱特征,第四节给出X辐射偏振的观测资料,第五节叙述太阳硬X射线源的位置和结构,最后,在第六节里提出我们对今后从事这项工作的看法。

## 一、引 言

太阳耀斑硬X射线辐射是太阳活动水平的灵敏指示器,对于了解太阳大气扰动,特别是日冕物理状态很有效,因此它的探测工作受到空间天文工作者和太阳物理学家的极大重视。

首次探测到太阳耀斑硬X射线是在1958年3月20日。这是比特森和温克勒在气球上完成的<sup>[1]</sup>。自那以后,科学工作者用气球、火箭和人造卫星等先进的运载工具进行了大量观测,获得了许多有价值的资料。这些观测不仅为太阳耀斑研究提供了新资料,也为X射线天文学发展创造了条件。

太阳X射线辐射有两种:硬X射线和软X射线。两类X射线的界限不是很严格的,一般以10keV为界。光子能量超过10keV的叫硬X射线,小于10keV的叫软X射线。太阳硬X射线只在耀斑期间出现。

太阳耀斑硬X射线爆发的观测工作大致分为两个时期。它们以美国“太阳峰年”卫星(SMM)和日本“火鸟”卫星(Hinotori)的发射为分界线。前者发射于1980年2月14日,后者发射于1981年2月21日。前一时期的测量仪器大多数是闪烁计数器。这种探测器只能接收一定能量范围的整个日面的硬X射线,空间分辨率和能谱分辨率都不高。“太阳峰年”卫星和“火鸟”卫星的发射,标志着太阳耀斑硬X射线研究进入了一个新时期。这两颗卫星主要用来测量在紫外、X射线和 $\gamma$ 射线能量范围内的太阳耀斑辐射。两颗卫星所载的仪器列于表1中。其中同本文讨论有关的是表中的硬X射线探测器。“太阳峰年”卫星的硬X射线成像频谱仪(简称HXIS)和“火鸟”卫星的太阳硬X射线成像望远镜(简称SXT)是首批在硬X射线能量范围内成像的探测器,分辨率都比较高。“太阳峰年”卫星上硬X射线成像频谱仪在3.5—30keV能量范围内工作,分六道成像。时间分辨率由工作模式确定,一般在1.5—7秒之间。它有粗细两种视场。

粗视场相应于日面上 $6'24'' \times 6'24''$ 区域,空间分辨率为 $32'' \times 32''$ 。细视场相应于日面上 $2'40'' \times 2'40''$ 区域,空间分辨率为 $8'' \times 8''$ 。“火鸟”卫星上太阳硬X射线成像望远镜在17—40keV能量范围内成像,时间分辨率约为4秒,空间分辨率为 $7'' \times 7''$ 。表中另外两架硬X射线探测器能够快速记录太阳耀斑硬X射线爆发的瞬时变化。SMM的时间分辨率是128毫秒, Hinotori是125毫秒。因此这两颗卫星能够给出高时间分辨率、高能量分辨率和高空间分辨率的观测资料。

表1 “太阳峰年”卫星和“火鸟”卫星上的探测器

| “太阳峰年”卫星       | “火鸟”卫星            |
|----------------|-------------------|
| 硬X射线频谱仪        | 太阳硬X射线检测器         |
| 硬X射线成像频谱仪      | 太阳硬X射线成像望远镜       |
| $\gamma$ 射线频谱仪 | 太阳 $\gamma$ 射线探测器 |
| 软X射线多色光计       | 太阳软X射线监测器         |
| 紫外光谱仪和偏振计      | 太阳软X射线晶体频谱仪       |
| 日冕仪/偏振计        | 粒子和X射线检测器         |
| 太阳常数监测箱        |                   |

## 二、爆发的种类

### 1. 按照大小,太阳耀斑硬X射线爆发可分为两种,它们的特征各不相同

大爆发持续时间在几分钟至几十分钟。有复杂的尖峰结构,有些还有准周期特征<sup>[2-5]</sup>。还有一些大爆发的脉冲在衰减过程中重新出现持续时间较长的第二个脉冲(图1)。理论家认为,出现第二脉冲的现象可能是二次加速造成的。

光子能量在20keV以上的小耀斑硬X射线爆发是经常出现的。目前大多数耀斑观测都是观测上述耀斑。这种耀斑爆发的硬X射线具有两种成份:脉冲成份和缓变成份。两种成份的时间特征和能谱特征很不相同。脉冲成份具有尖峰结构,上升和衰减时间均小于10秒。能谱是非热谱;缓变成份的强度-时间图比较平滑,上升和衰减时间均较长(达几分钟)。能谱是热谱。观测表明,热辐射只存在于50keV以下的低能辐射之中。

### 2. 按照形态,太阳耀斑硬X射线爆发可分脉冲爆发、缓变爆发和混合爆发三种

(1) 大多数太阳耀斑硬X射线爆发属于混合爆发。这种爆发中既有脉冲成份,又有缓变成份。一个典型的混合爆发大致可分为三个相位:先兆相、脉冲相和缓变相(图2)。

**先兆相** 出现在硬X射线耀斑之前,其特征是软X射线流量缓慢上升,上升到一定的水平出现X射线爆发。耀斑爆发一般出现在软X射线开始上升以后10分钟左右。但不是所有软X射线流量上升后都出现硬X射线爆发,有的时候虽有软X射线流量缓慢上升,却不出现X射线耀斑爆发。

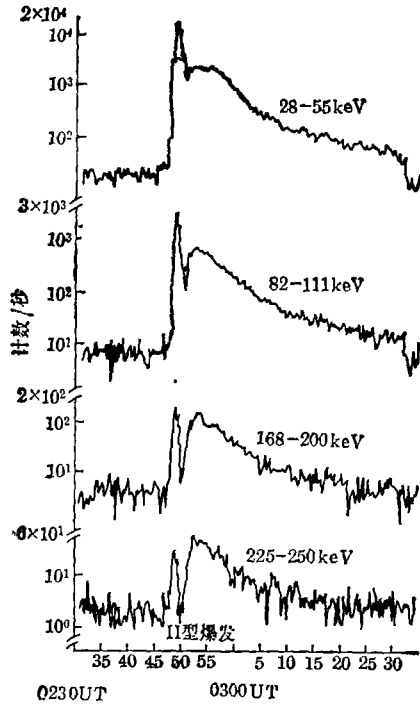


图 1. 1969年3月30日事件——一个巨大爆发后面出现较长的第二个脉冲, 它表明粒子有二次加速<sup>[5]</sup>。

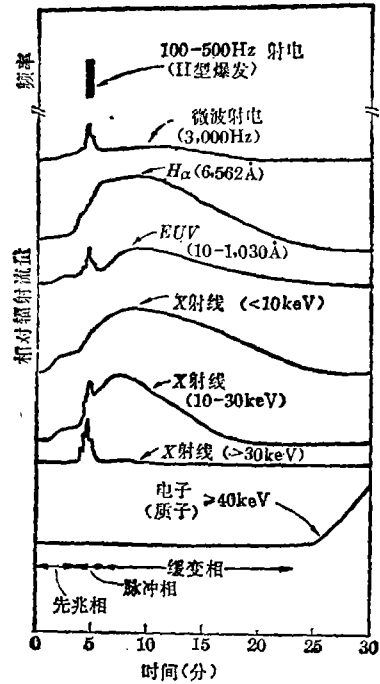


图 2. 一个耀斑的时间序列<sup>[54]</sup>。

脉冲相 又称闪光相, 持续时间在几秒至几分钟, 在此期间, (i) 耀斑区域被馈送能量; (ii) 由几个分立的区域产生X射线辐射; (iii) 在10—100秒的时间内出现许多爆发性的辐射(爆发的光子能量不一定很高)。脉冲相的硬X射线流量上升和衰减都很迅速。上升和衰减的时间取决于光子能量, 能量愈高, 上升和衰减时间愈短, 并且常常出现尖峰结构。

对于尖峰结构, 由于不同的观测者使用不同分辨率的探测器, 各个观测者所得的尖峰时标是不相同的。贝格曼发现有0.005秒的精细结构<sup>[7]</sup>。“TD-1A”卫星的资料表明, 一些结构的时标小于1秒<sup>[5]</sup>。“太阳峰年”卫星和“火鸟”卫星在第21周太阳活动峰年期间, 探测到6,000多个太阳硬X射线爆发, 其中几百个事件具有1秒以下的尖峰结构<sup>[8]</sup>。我们分析了其中几十个爆发的资料, 发现它们具有以下特征: (i) 尖峰结构和缓变结构同时存在, 而且尖峰结构总是迭加在缓变结构上面; (ii) 尖峰结构呈准周期性, 周期在1秒以下; (iii) 由于探测器分辨率的限制, 尖峰结构的上升和衰减时间还不能确定, 但很可能在10—100毫秒之间; (iv) 每个缓变结构上的尖峰数目不同, 一般在几个至十几个。关于这种尖峰结构的产生机制, 目前正在探索之中, 我们认为, 这是日冕振荡的反映<sup>[8]</sup>。

缓变相 出现在耀斑爆发的末期。特征是硬X射线流量缓缓衰减到耀斑前的水平, 软X射线流量变化更慢。

缓变相实际上同脉冲相同时开始, 因为能量抛射之后有对流云存在, 甚至还进一步扩大, 所以缓变相持续的时间较长。持续的时间长短取决于云的面积, 一般在10—100分钟。其后由

辐射和传导慢慢损失能量而逐渐消失。

缓变相是热的爆发区向上运动的热气形成的,因此出现一个面积慢慢增加的展延弥漫云。弥漫云投影到日面上,位置同脉冲相的一小块亮区相符,但面积较亮区大。弥漫云出现在日面边缘,位置比脉冲相的“亮区”要高,形状象“对流羽”。发生在不同位置上的弥漫云如图3所示。(a)投影在日面上,(b)发生在日面边缘。

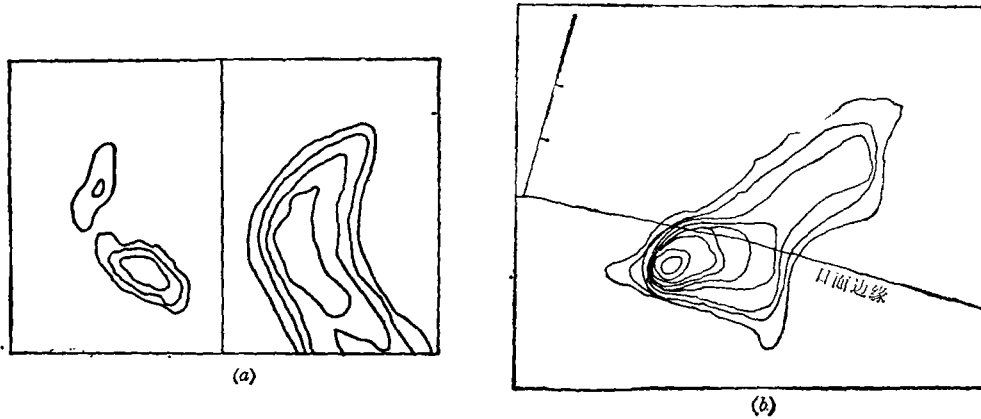


图3. 投影在日面上和出现在日面边缘的硬X射线耀斑像<sup>[355]</sup>。

(a) 投影在日面上的1980年11月12日耀斑; (b) 出现在日面边缘的1980年4月30日耀斑。

(2) 由硬X射线像分析得知,观测到的耀斑大多数是脉冲爆发<sup>[39-41]</sup>。这类爆发具有如下特征:(i)大多数源是单源,其中有展延源也有致密源。一些巨大的爆发也出现双源结构。由推算的高度得知,双源的两个源分别位于耀斑环的两个足点,(ii)在主相之后,源的面积变小,位置有些移动,(iii)在大爆发的上升相和主相,X射线源的整个结构没有明显的变化,(iv)X射线源的尺寸比 $H_p$ 大得多,(v)在硬X射线时间图上,一般显示出许多尖峰。

(3) 硬X射线像上看到的另一种爆发是纯缓变爆发。这类事件似乎从事件开始就出现第二相,没有脉冲相迭加在上边。在“火鸟”卫星得到的100多个事件中,只发现五个这样的事件,因此它们是稀少的事件。这五个事件发生在1981年的4月1日<sup>[355]</sup>、5月13日<sup>[371]</sup>、10月7日<sup>[351]</sup>、5月8日<sup>[366]</sup>和4月27日<sup>[338]</sup>。它们又可分为两类:前三个属类环结构,后两个属双源结构。这些源位置较脉冲源高,大多数是日冕里产生的。频谱比较简单:自始至终基本上是幂律谱。这表明缓变爆发是非热电子厚靶产生的。

还有一种热耀斑是由 $3 \times 10^7 \text{K}$ 的等离子体产生的,其特征是平滑地变化,有很强的热硬X射线。在这种耀斑的X射线像上等强度线很密集。

### 三、硬X射线谱

严格地说,太阳耀斑硬X射线的能谱不能用任何简单的函数拟合,为方便起见,通常用热辐射和非热辐射两种模式来说明。

主张热辐射的理由是:(1)在硬X射线能谱上,不是所有能量范围都能用单一的幂律谱拟合,而是从某一能量 $\varepsilon_0$ 开始能谱变陡<sup>[3], [11], [12]</sup>,除一些巨大事件幂律谱可以延续到几百keV以外, $\varepsilon_0$ 一般在60—100keV之间。(2)典型的脉冲谱的瞬时行为同热解释很符合。无论是上升时间变硬,衰减时间变软,或者整个爆发连续变软,都和热辐射相符。(3)有些爆发既可用非热辐射拟合,又可用热辐射拟合。因此对于这些爆发,不能排除热谱的可能性。

热辐射公式是

$$\frac{dJ}{d\varepsilon} = \frac{g(\varepsilon, kT)}{\varepsilon \sqrt{kT}} \exp\left[-\frac{\varepsilon}{kT}\right] \quad (1)$$

其中 $kT$ 在10—100keV之间, $g(\varepsilon, kT)$ 是高恩特因子。

上式给出单一温度 $T$ 下的热辐射谱。查布曾利用多热模型讨论过脉冲爆发<sup>[18]</sup>。他指出,用晶体频谱仪测量的X射线耀斑具有冷等离子体的多热特征。他认为只有高温下有多热特征才合理,因此他提出硬X射线耀斑区具有多热特征。但凯勒等人不同意这种看法<sup>[14], [15]</sup>,所以查布理论的可靠性有待于进一步验证。

主张非热谱的理由是,(1)上升和衰减时间短,对于40keV的X射线,上升时间 $\tau_r$ 一般在2—5秒,衰减时间 $\tau_d$ 一般在3—10秒。(2)大多数太阳耀斑硬X射线的能谱可用幂律谱公式

$$\frac{dJ}{d\varepsilon} = k\varepsilon^{-\gamma} (\text{光子数/厘米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{keV}) \quad (2)$$

表示。式中 $k$ 是常数, $\gamma$ 是谱指数。在一般情况下, $\gamma$ 在2—8之间,其中以3—5居多。 $\gamma < 3$ 的硬谱极少。(3)一些硬X射线爆发和III型射电爆发有密切的联系<sup>[10]</sup>,在时间上符合得很好,不仅最大强度的时间相同,持续时间也一致。III型射电爆发是非热电子流产生的,因此硬X射线也可能起源于此。

现在对太阳耀斑硬X射线的成份提出了四种来源:(1)新的热成份<sup>[24]</sup>,(2)二次加速电子的韧致辐射<sup>[25]</sup>,(3)日冕缓变辐射<sup>[26], [27]</sup>,(4)脉冲成份。因此硬X射线辐射相当复杂。从理论角度讲,这意味着无论热辐射抑或非热辐射都不一定能很好地拟合观测结果。因此硬X射线能谱本身不一定描绘出耀斑模型。鉴于这种认识,仁田等人提出“动力谱”概念<sup>[28]</sup>。所谓动力谱即X射线光子谱随时间发展的序列图。仁田等人统计了“火鸟”卫星的20个脉冲事件和少量缓变事件资料,所得结果如下:

对于20个强度、谱的硬度、持续时间、尖峰数目和尖峰宽度不相同的脉冲事件,共同的特征是:

- (1) 强度-时间图上的尖峰只出现在源中物质稠密的区域;
- (2) 强度-时间图上尖峰消失以后,能谱往往从对数形式变到指数形式;
- (3) 能谱变到幂律谱后,斜率越来越大。爆炸接近结束时,动力谱高能端出现弥散。据分析,这种弥散大多数是统计涨落的结果。它表明能量大于150keV的光子已经耗尽;
- (4) 尖峰峰值的能谱最硬。

对于缓变事件,得到如下结果:不同能量的时间结构不同,一般都呈幂律谱。用对数谱加幂律谱拟合表明,低能光子来自温度为 $1.2 \times 10^8 \text{K}$ 、辐射量为 $2 \times 10^{48} \text{厘米}^{-3}$ 的热等离子

体, 而高能光子则来自谱指数不大的幂律谱。

#### 四、偏 振

耀斑硬 X 射线是非热电子韧致辐射的, 由于高能电子沿着一定方向传播, 它所产生的硬 X 射线应当是各向异性的。因此利用偏振测量可以从理论上鉴别 X 射线源的辐射机制、源中电子分布、来源以及电子的各向异性。

耀斑硬 X 射线的线偏振由偏振度  $P$  和方向角  $\theta$  表征。在非热耀斑模型中, 高能电子有一定的能量分布, 以一定的投射角射入磁场, 并围绕磁力线作回旋运动。X 射线的偏振度  $P$  同光子能量  $\varepsilon$  和投射角  $\theta$  都有关系。

由于耀斑硬 X 射线强度低, 变化快, 其偏振很难测量, 迄今为止, 只获得少量的结果。第一批偏振测量是苏联学者廷多等人进行的<sup>[18-20]</sup>, 他们获得的偏振度高达 40%, 许多人把这些结果作为耀斑硬 X 射线起源于强电子束的证据。然而美国哥伦比亚大学天体物理实验室在航天飞机上的实验结果与廷多等人的结果相差甚大。哥伦比亚大学的结果是, 单个爆发脉冲相的最大偏振度为  $3.4\% \pm 2.2\%$ 。利奇和佩特罗松从理论上分析了廷多等人的结果<sup>[21]</sup>。他们指出, 由于电子束在释放能量的过程中趋向于各向同性, X 射线的偏振水平将大大减小, 因此廷多等人的高达 40% 的偏振度是难以令人置信的。

#### 五、源的位置和结构

硬 X 射线耀斑区的空间分布和大小很难直接测量。在八十年代前, 只有高仓等人用调制准直器作过一维观测<sup>[22]</sup>, 其余的测量都是整个日面的总流量。就是高仓等人的测量也只给出源的位置线, 没有给出源的空间分布情况。

时至今日, 太阳耀斑硬 X 射线爆发区的空间分布知识几乎都是靠间接测量及与它同时发生的光学耀斑得知的。直到 1981 年, “火鸟”卫星上太阳硬 X 射线成像望远镜才给出第一个硬 X 射线爆发源的位置<sup>[23]</sup>。

测量爆发源位置的间接方法有两个: (1) 观测日面边缘后面的耀斑。用这种方法得到硬 X 射线源位于光球以上  $(1-2) \times 10^4$  公里, 有些达到  $7 \times 10^4$  公里。这种方法有一定的局限性, 它只适用于出现在日面边缘后面的耀斑, 对于投影在日面上的耀斑就无能为力了。(2) 用几艘位于不同日面经度或纬度的飞船对同一源进行同时观测。现已用“国际日-地探险者-3号”(ISEE-3)、“先驱者-金星轨道站”(PVO)和“太阳神-2号”(HELIOS-2)测定过 16 个 X 射线源的垂直结构。1978 年 10 月 5 日事件就是其中一个。这个事件的硬 X 射线爆发来自东部边缘后面  $15^\circ$  的太阳耀斑。PVO 和 ISEE-3 卫星同时探测了它。PVO 能探测到日面上空 600 公里以上全部区域, 而 ISEE-3 只能探测到 25,000 公里以上的区域。25,000 公里以下由于日面阻挡而全然不能看见。观测资料表明, 两颗卫星都探测到辐射源的 X 射线辐射, 不过, ISEE-3 的强度只有 PVO 的六分之一。两颗卫星都探测到辐射源的辐射, 说明硬 X 射线源绵延的高度范围很大, 起码在 25,000 公里以上有硬 X 射线辐射, ISEE-3 探测的强度低于 PVO, 说明硬 X

射线辐射的最强部分位于25,000公里以下的区域。

耀斑硬X射线爆发源的结构尚未完全探明,最初探索这个问题是在1967年。那时,苏联科学家利用“宇宙-166”和“宇宙-230”进行这项工作。所用的波长是 $1-10\text{\AA}$ ,准直器的分辨率是 $15''$ 。该装置测得X射线耀斑区是一个长 $1'-2'$ 、宽约 $15''$ 的细长纤维<sup>[7], [29]</sup>,美国人也进行了此项研究。他们将掠射式X射线成像望远镜放在“天空实验室”上拍摄日面活动区的X射线像。这架望远镜的工作波长是 $3.5-13.5\text{\AA}$ ,空间分辨率优于 $10''$ ,它测得1968年6月8日事件的辐射源呈类环结构。该环连接着磁中性线两边极性相反区域的 $H_{\alpha}$ 辐射<sup>[30], [31]</sup>,这种类环结构同“太阳峰年”卫星和“火鸟”卫星上成像仪器所得的结果颇为相似。这表明类环结构可能是X射线源的普遍特征。此外,“轨道太阳天文台-7号”(OSO-7)探测到1972年8月2日的辐射源也具有细长的形状,其长为 $35''$ ,宽在 $20''$ 以下。利用月亮边缘掩食日面的机会探测到1970年3月7日事件的总辐射区的直径为136,000公里,中间有一直径为54,000公里的稠密的热核心。八十年代在空中飞行的“太阳峰年”卫星和“火鸟”卫星在揭示X射线源结构方面做了许多工作。它们的资料表明<sup>[32]</sup>: (1)耀斑硬X射线源可分为类环结构和双源结构两种,双源结构的两个源往往分布在磁环的两个足点;(2)类环结构往往出现在缓变爆发,位置比较高,大多数位于日冕里。双源结构往往出现在脉冲爆发或爆发的脉冲相,位置比较低;(3)脉冲爆发源往往位于 $H_{\alpha}$ 发亮的区域,像 $H_{\alpha}$ 亮区一样,往往由许多小的亮区组成。在它们周围是缓变爆发的展延弥漫源;(4)由许多帧硬X射线像可以看出,X射线源在空间和时间上都不是固定不变的,很少看到一组形状相似的X射线像;(5)在X射线强度-时间图上出现许多尖峰结构时,X射线源区密度比较大。这就是说,尖峰结构出现在源中高密度区。

## 六、几点想法

(1) 太阳耀斑硬X射线观测工作虽已进行了近三十年,取得了许多重要成果,但今后仍有许多工作要做。进行这项工作的关键在选择课题。八十年代以前,耀斑硬X射线观测仪器基本上是闪烁计数器。它们虽然取得了许多资料,但它们20多年的工作同“太阳峰年”卫星和“火鸟”卫星两、三年的观测相比,却显得黯然失色。究其原因,后者采用了高时间分辨率、高能谱分辨率和高空间分辨率(硬X射线成像技术)的仪器。因此在我们选题时,要充分应用高速发展的现代技术来进行新的探索。

(2) 目前在耀斑硬X射线研究中,留下很多问题没有解决,例如快速结构的时标,源区结构和状态,源随时间和空间的演化,贮能、加速和释能过程以及高能粒子传输和演化等均未探明。欲探明这些问题,应当使用更高的时间分辨率、能量分辨率和空间分辨率的仪器。在未来的探测中,仪器的灵敏度还应提高。

(3) 在我国,目前应当充分利用高空科学气球进行太阳耀斑硬X射线观测。有人担心,气球能否胜任此项观测。我们根据调查认为,作为太阳耀斑空间探测的最佳运载工具,气球是不合格的。但气球在太阳耀斑观测中,各个时期都有成功的例子。近年来林柏中(R.P.Lin)<sup>[24]</sup>小组在亚耀斑探测与研究中取得了出色成绩,他们的运载工具就是高空科学气球。我们认为,在今后一段时间内,利用气球进行太阳耀斑硬X射线观测是可行的。有人担心我国空间

技术水平能否达到预期目的，这个问题是需要重视的，有关部门已作了考虑。如果现行的方案能圆满实现，我想大部分疑虑是可以消除的。

## 参 考 文 献

- [1] Peterson, L. E. and Winckler, J. R., *J. Geophys. Res.*, 64 (1959), 697.
- [2] Frost, K. J., *Ap. J.*, 158 (1969), L159.
- [3] Frost, K. J. and Dennis, B. R., *Ap. J.*, 165 (1971), 655.
- [4] Parks, G. R. and Winckler, J. R., *Ap. J.*, 155 (1969), L117.
- [5] Hoyng, P. et al., in *Solar Gamma-, X-, and EUV Radiation*, IAU symp. No. 68, p. 233, ed by S. R. Kane, D. Reidel Pub. Co. Dordrecht Holland / Boston, (1975).
- [6] Kiplinger, L. et al., *Ap. J.*, 265 (1983), L100.
- [7] И. Л. Вейгман, и др., *Космический исследования*, 9 (1971), 123.
- [8] 徐永焯, 曹允庚, *空间科学学报*, 6 (1986), No. 3, 167.
- [9] Vaiana, G. and Tucker, W., in *X-Ray Astronomy*, p. 196, ed by R. Giacconi and H. Gursky, D. Reidel Pub. Co. Dordrecht, Holland / Boston, (1974).
- [10] Kane, S. R., *Solar Phys.* 27 (1972), 174.
- [11] 徐永焯, 张和祺, *科研工作报导*, 3 (1980), 75.
- [12] Suri, A. N. et al., *Solar Phys.*, 43 (1975), 415.
- [13] Chubb, T. A., in *Solar-terrestrial Physics*, part 1, p. 99, ed by E. R. Dyer, D. Reidel Pub. Co. Dordrecht, Holland / Boston, (1970).
- [14] Kahler, S., *Ap. J.*, 164 (1971), 365.
- [15] Kahler, S., *Ap. J.*, 168 (1971), 319.
- [16] Kane, S. R. and Anderson, K. A., *Ap. J.*, 162 (1970), 1003.
- [17] Mckenezie, D. L. et al., *Solar Phys.*, 28 (1973), 175.
- [18] Tindo, I. P. et al., *Solar Phys.*, 14 (1970), 204.
- [19] Tindo, I. P. et al., *Solar Phys.*, 24 (1972), 429.
- [20] Chanan, G. A. and Novick, R., *Impulsive phase solar flare X-ray polarimetry*, Presented at SMM Topical Workshop on Rapid Fluctuations in Solar Flares, Sep. 30—Oct. 4, Landham, Maryland. (1985),
- [21] Leack, J. and Petrosion, V., *Ap. J.*, 269 (1983), 715.
- [22] Takakura, T. et al., *Solar Phys.*, 16 (1971), 454.
- [23] Kane, S. R. et al., *Ap. J.*, 233 (1979), L151.
- [24] Lin, R. P. et al., *Ap. J.*, 251 (1981), L109.
- [25] Bai, T. et al., *Ap. J.*, 267 (1983), 433.
- [26] Hudson, H. S., *Ap. J.*, 224 (1978), 235.
- [27] Hudson, H. S. et al., *Solar Phys.*, 75 (1982), 245.
- [28] Nitta, N. et al., *Solar Phys.*, 86 (1983), 241.
- [29] Beigman, L. L. et al., *Solar Phys.*, 9 (1969), 160.
- [30] Vaiana, G. S. et al., *science*, 161 (1968), 564.
- [31] Vaiana, G. S. et al., *Ap. J.*, 185 (1973), L47.
- [32] Duijveman, A. et al., *Solar Phys.*, 81 (1982), 137.
- [33] C. De, Jager, *Solar Phys.*, 86 (1983), 21.
- [34] Kane, S. R., in *Coronal Disturbances*, IAU Symp. No. 57 p. 105, ed by G. A. Newkirk, D. Reidel Pub. Co. Dordrecht, Holland / Boston (1974).
- [35] Ohki, K. et al., *Solar Phys.*, 86 (1983), 301.
- [36] Ohki, K. et al., *Proc. of HINOTORI Symp. on Solar Flares*, p. 102, (1982).
- [37] Tsuneta, S. et al., *Proc. of HINOTORI Symp. on Solar Flares*, p. 130, (1982).
- [38] Takakura, T. et al., *Solar Phys.*, 94 (1984), 359.
- [39] Hoyng, P. et al., *Ap. J.*, 246 (1981), L155.



[40] Machado, M. E. et al., *Solar Phys.*, 79 (1982), 85.

[41] Takakura, T. et al., *Solar Phys.*, 86 (1983), 323.

(责任编辑 谢应纯)

## The Observational Results of Hard X-ray from Solar Flares

Xu Yongxuan

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

This review describes briefly the observational results of hard X-ray bursts in solar flares, with emphasis on the time profiles, spectral characteristics, polarization of X-radiation as well as the locations and structures of hard X-ray sources. It is divided into six sections. In §1 we introduce briefly the history of observations of solar hard X-ray bursts and instruments aboard the SMM & the HINOTORI satellites. In §2 some characteristics of two kinds of solar hard X-ray bursts are described. The spectral characteristics are presented in §3. We give observational data of polarization of X-radiation in §4. The locations and structures of solar X-ray sources are written in §5. Finally, in §6 our views are presented.