

# 太阳耀斑硬X射线爆和 射电微波爆之间的关系\*

姚金兴

(中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

本文介绍了在21周太阳峰年中,耀斑脉冲相期间高分辨率的地面射电微波和空间硬X射线的联合观测结果。评述了X射线和射电之间的关系及其理论的进展,并对22周峰年有关这方面的发展趋势作了简单的预测。

## 一、引 言

在十分广阔的波段里,太阳耀斑发射出从波长0.002埃到1万米以上的电磁波辐射。其中以X射线和射电微波的辐射最引人注目,而它们之间紧密的相关性更引起了人们的广泛兴趣。

早在五十年和六十年代,从低分辨率的观测上就发现:太阳X射线和射电辐射之间,无论是它们的缓变频谱还是它们的爆发频谱都存在着很强的相关性。这表示它们可能具有共同的起源。

在上一个太阳峰年——21周太阳活动峰年期间,空间和地面都成功地进行了高分辨率的两维成像观测。美国在1980年2月14日发射的SMM卫星上的X射线成像频谱仪(The Hard X-ray Imaging Spectrometer,简称为HXIS)<sup>[1]</sup>的两维空间分辨率为 $8'' \times 8''$ ,最快时 $1^{\circ}.5$ 可成一张像。SMM卫星上X射线的爆发频谱仪(The Hard X-ray Burst Spectrometer,简称为HXRBS)<sup>[2]</sup>观测的最高时间分辨率为10ms。1981年2月21日,日本发射的火鸟卫星<sup>[3]</sup>上太阳X射线望远镜(The Solar Hard X-ray Telescope,简称为SXT)<sup>[4]</sup>的两维成像分辨率达 $7'' \times 7''$ ,在 $10^{\circ}$ 内可以成一张像。火鸟卫星上硬X射线频谱仪(The Hard X-ray Monitor Spectrometer,简称为XHM)<sup>[5]</sup>观测的最高时间分辨率为7.81ms。在地面上,美国的甚大阵(VLA)在微波段的两维成像最高分辨率达 $0''.75 \times 1''$ , $10^{\circ}$ 可成一张像;荷兰的Westerbork综合孔径射电望远镜(WSRT)的最高分辨率为 $3''$ 。这样高的角秒量级的空间分辨率可以和光学上的分辨率相比拟了。在上一个峰年中,用上述的高分辨率仪器取得了大量的观测资料。这些资料使我们对耀斑中的一些重大问题,如耀斑的建立、初始能量的释放位置、耀斑能量的辐射、转移以及爆后的行星际现象等的认识大大深化了。对这些资料的分析研究表明,X射线和射电这两者之间确实存在着空

\*本文为1986年9月在密云召开的太阳物理前沿学术会上的发言稿。

1986年11月7日收到。

间上和时间上的某种联系，但两者之间又有很大的不同。

目前，这两者的辐射机制究竟是热的，还是非热的尚无定论。从非热的观点来看，认为硬 X 射线是由非热电子撞击色球或低日冕的离子引起的韧致辐射，而微波爆则是由非热电子绕磁力线回旋发出的回旋-同步加速辐射。这些非热电子是在耀斑脉冲相得到加速的。对于这两者的脉冲爆发而言，非热机制的解释似乎更好一些。

当前耀斑的重大问题之一是集中在耀斑的初始能量释放位置和电子的加速问题上。耀斑的初始能量释放位置在日冕、色球、光球上还是光球下？粒子加速区域的特征尺度有多大？它的温度、密度有多高？磁场位形如何等。这些问题都与非热电子的行为和所处的环境有关。因此，要对上述这些问题有进一步的认识自然地要与 X 射线和射电观测分辨率的提高和理论研究的深入联系起来。不言而喻，X 射线和射电之间关系的研究对促进这些问题的解决会起很大的作用，它们在耀斑理论中占有很重要的地位。

本文只涉及到耀斑脉冲相的 X 射线爆和射电爆之间有关关系的观测资料 and 理论研究，从时间、空间二个方面的观测来加以介绍。最后对这方面的理论研究和观测的趋势作了简单的预测。

## 二、爆发图形之间的关系

早期观测太阳耀斑时，用低分辨率（即对爆发源的细节没有分辨能力）的地面和空间的仪器进行观测。这样得到的资料称为爆发图，即强度-时间轮廓图。这些爆发强度的时变曲线也披露了 X 射线和射电微波之间关系的很多信息。尤其在耀斑脉冲相期间，硬 X 射线爆和微波爆像孪生兄弟一样，经常相伴同时出现。在 21 周峰年中，高空间分辨率的两维成像仪投入观测以后，这种频谱观测仍然有它的独特作用。下面我们分四方面来介绍。

### 1. 秒量级分辨率上的同步相似爆发图

图 1 和图 2 是两个例子。从图 1<sup>[6]</sup>可以看出，X 射线的各个能通道之间，X 射线和射电 17GHz 的爆发之间，它们的爆发曲线同时上升，同时达极大，爆发的第二个峰也是完全对应的，峰值之间没有时间延迟，整个爆发图形几乎“完全”同步的。而图 2 与图 1 有区别。从图 2<sup>[7]</sup>可见，在 48—60keV 能量范围内的 X 射线爆发图和微波 8,800MHz 上的爆发几乎是同步的。而对于 X 射线的低能部份，只是爆发的第一峰同步。相关分析表明，X 射线的能量愈高，微波的频率越高，两者的相关性愈好。

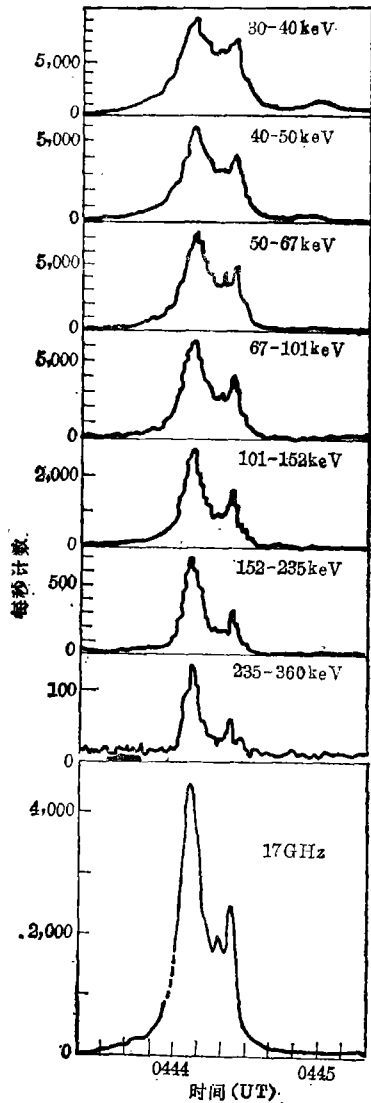


图 1. 1981 年 10 月 15 日的 17GHz 的微波爆和硬 X 射线爆的时间轮廓的比较，注意到没有时间延迟。

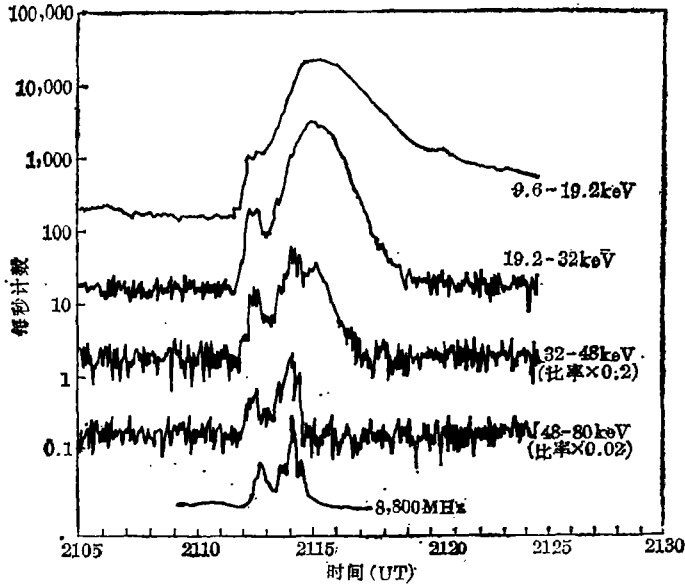


图 2. 不同能通道的X射线记录和 8.8GHz的微波爆比较表明硬X射线 (>50keV)和微波之间有类似性。

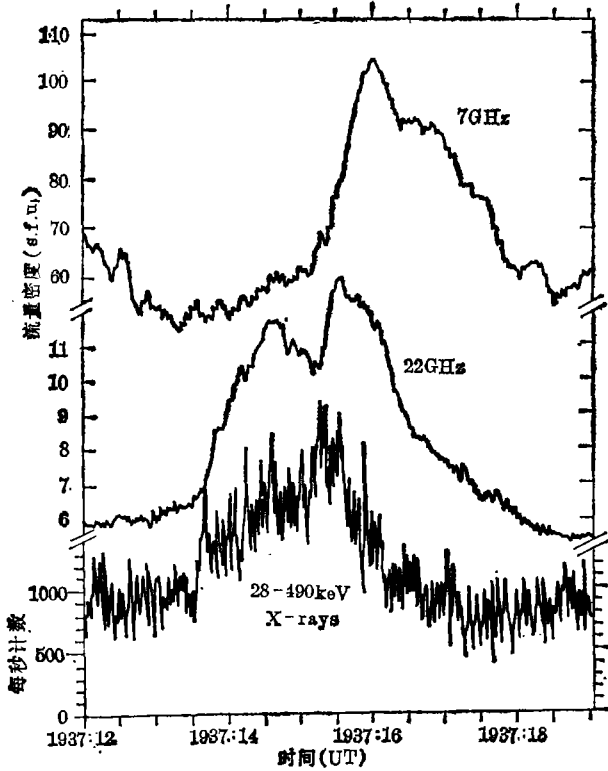


图 3. 1980年5月8日事件中X射线和射电的爆发图。

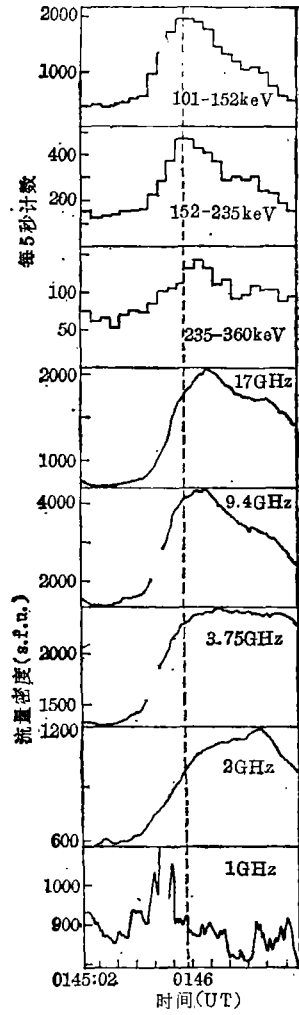


图 4. 1981年4月1日爆发的X射线和微波的时间轮廓的比较, 注意到有明显的时间延迟。

### 2. 峰值时间延迟

一般说来，只是在脉冲相期间，X射线爆和射电爆之间的相关性比较好，而在其后的发展过程中，相关性变差。即使在脉冲相期间，它们的峰值之间有时会有时间延迟。图3和图4给出了时间延迟的两个例子。

图3<sup>[1]</sup>所示的是1980年5月8日的X射线和射电的观测资料。X射线为SMM卫星上HXRBS所观测，能量范围为28—490keV，时间分辨率为10ms。7, 22GHz的爆发图为巴西Itapetinga射电天文台所观测，时间分辨率分别为100ms和1ms(下同)。从图3可以看出，22GHz的主峰值相对于X射线爆的峰值延迟了约240ms，7GHz峰值相对于22GHz峰值延迟了1<sup>s</sup>.5。

图4<sup>[6]</sup>是由日本火鸟卫星的HXM和Nobeyama的17GHz干涉仪的观测结果。比较这图上的峰值时刻可以看到，X射线的峰值从低能向高能延迟，而微波段则从高频向低频延迟，X射线能量最高的能通道235—360keV的峰值相对于微波高频17GHz的峰几乎是同时的(≤4s)。相互间的时间延迟量为4<sup>s</sup>—10<sup>s</sup>。

第一个事例表明这两者之间的延迟量小于1<sup>s</sup>，而第二个事例则表明它们的延迟量大于5<sup>s</sup>。从理论上，第一个事例可以用环顶的电子束沿着磁力线射向下面的色球的厚靶模型来解释，而第二个事例显然不能。因为电子束在5秒内至少行程100万公里以上，目前还没有观测到这样长的冕环。Takakura用射电源的膨胀来解释。

### 3. 在0<sup>s</sup>.1分辨率上脉动的相关性

图5<sup>[9]</sup>所示的是7, 22, 44GHz和X射线于1981年11月4日的爆发图形。从整个爆发图形来看，在低分辨率1<sup>s</sup>的时间标尺上，射电的各波段之间，射电和X射线之间都不存在相关性。但是，当我们用较高的时间分辨率0<sup>s</sup>.1来考察时，发现在峰值附近它们的脉动有相关性。例如在峰值附近取二小段(每一小段的时间间隔为2<sup>s</sup>)A和B，发现它们有准周期的脉动，如图6所示。图6中的A、B相应于图5中所切的A、B部份，不过时标放大了。从图6可以看出，对于A，X射线、

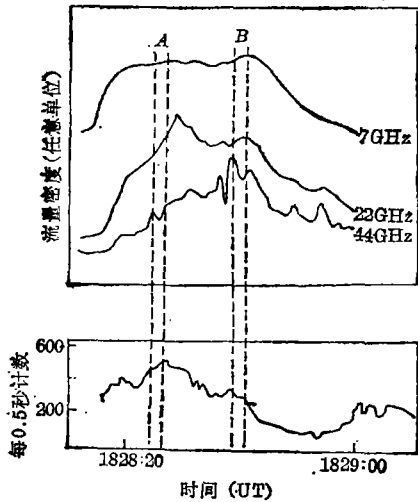


图5. 1981年11月4日的射电和X射线的爆发图形。

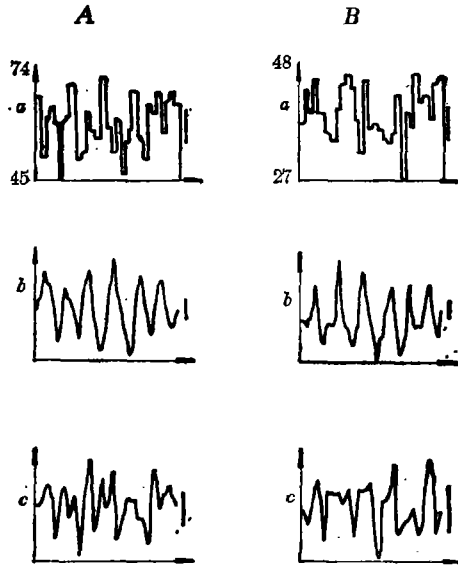


图6. 图5中的切口A、B放大时间尺度后的图。  
a. X射线, b. 22 GHz, c. 44 GHz.

22和44GHz各有互相对应的准周期的6个尖峰。B与A相类似, 不过有7个尖峰。所作的互相关分析表明: A、B分别约有290ms和320ms的脉动周期。对于A, 22GHz上的峰对硬X射线峰似乎有200ms的延迟, 而44GHz上的峰对X射线峰似乎有250ms的延迟。对B也有类似的结果。在X射线和射电毫米波上, 这样的亚秒结构上的相似脉动和时间延迟第一次为 Takakura<sup>[9]</sup> 所发现。爆发的这种亚秒结构特性, 目前在理论上尚未作出正确的解释。

#### 4. 微波爆脉动中的双峰与X、 $\gamma$ 射线之间的关系

图7<sup>[10]</sup>给出了1980年6月7日的微波、X射线和 $\gamma$ 射线的爆发资料。17GHz的微波大爆发是由准周期的七个峰组成, 周期约为8秒。“同时”, 80—140keV的X射线爆和4.1—6.4MeV的 $\gamma$ 射线爆也有相对应的7个峰。而饶有趣味的是: 17GHz上的每一个峰是由两个子峰(sub-peak)组成(除去最后不太明显的两峰)。比较图上的三个爆发图形可以看出, 第一个微波子峰与硬X射线峰相对应, 而第二个微波子峰与 $\gamma$ 射线峰相一致。这样的对应关系在微波爆的第二, 三, 四峰是很明显的。在上一个峰年中, 这样的观测事例发现了三个, 当然不能作为普遍的观测结果, 但从中可以得到有益的启示。

文[10]的作者对上述的观测资料提出了一种初步的解释。他认为: 首先被有效地加速的非热电子引起了X射线爆和微波爆的第一个子峰; 几秒钟之后, 电子和离子一起被加速到较高能量, 它们分别产生了第二个微波爆子峰和瞬发的(prompt) $\gamma$ 射线的线发射。这似乎可说成是两相加速的一个例子; 或者至少是对电子-离子模型中的微波、 $\gamma$ 射线、X射线的辐射机制提出了更苛刻的条件。

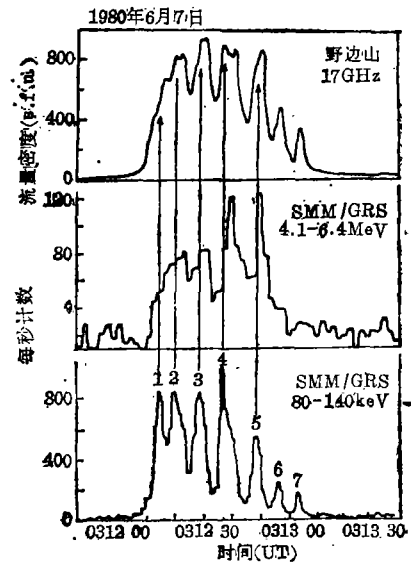


图7. 1980年6月7日事件的微波、X射线、 $\gamma$ 射线谱线的时间轮廓的比较。

### 三、X射线爆和微波爆空间结构之间的关系

从上述时间序列的关系上考察, 很容易使人想到这两者在空间结构上会有紧密的联系。的确, 高分辨率的观测结果似乎证实了这种设想, 但要揭开它们之间的真面目, 还需要作继续深入的研究。下面我们从三个方面来介绍观测的发现及对其分析结果。

#### 1. X射线和射电同时一维的观测

图8<sup>[11]</sup>给出了1969年9月27日耀斑的观测结果, X射线、射电一维观测得到的源的中心线已迭加在Ha耀斑上。从干涉仪的一维扫描观测得到<sup>[12]</sup>, 3,750MHz的射电源的角径 $<1'.8$ , 而X射线源的角径 $<1'$ <sup>[13]</sup>。从图8可以看出, 这两者的源的中心线都通过Ha耀斑的中心。这表明, X射线和射电可能是同源的。

#### 2. 二维的X射线像和一维的射电观测

图9<sup>[14]</sup>给出了1981年5月13日大耀斑的观测结果。10—20keV的两维X射线图象已迭加在Ha耀斑上, 图下面的曲线是35GHz的一维干涉观测结果。从图9可以看出, X射线爆发源和

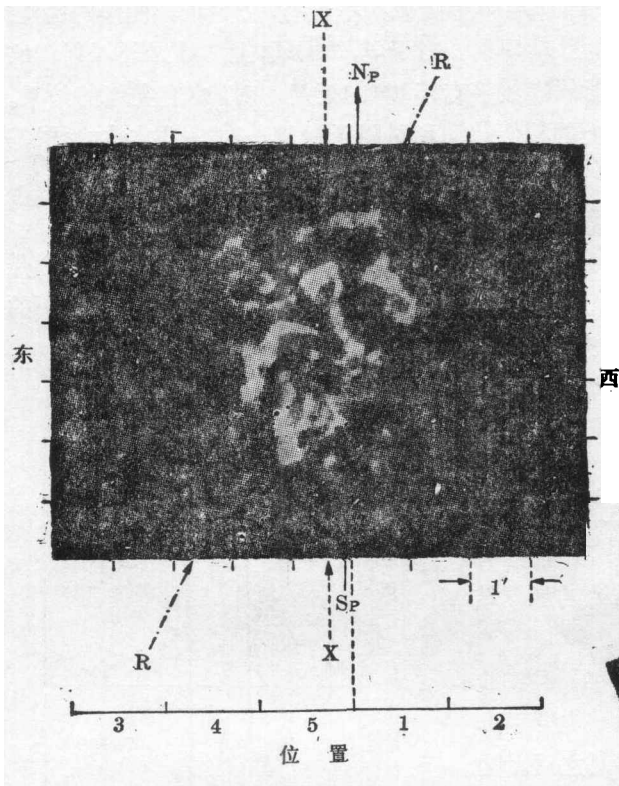


图 8. 1969年9月27日的耀斑位置。从一维观测得到的X射线、射电源的中心线已迭加在Ha耀斑的照片上。R、X分别表示射电和X射线。

### 3. X射线和射电的同时两维观测

1980年11月5日的脉冲耀斑是21周年年中观测资料最为完整的一个耀斑。图10, 11<sup>[16]</sup>给出了这个耀斑的X射线和射电的观测结果。

图10是15, 9.4GHz和25—386keV的爆发图。这个爆发的时间轮廓有三个峰(由于VLA10秒成一张像, 因而只有一个峰), 分别以1, 2, 3标出。X射线的第三峰主要是50keV以下的能通道所贡献的。与这三个峰值时刻相对应的微波15GHz和X射线在16—30keV范围内的二维图在图11中给出。图11中的小长方形的大小为8"×16"。根据文[16]作者的分析, 用等温的热机制去拟合观测的X射线频谱, 发现相应于第三峰(22:27:17)的第

Ha耀斑不重合, 两者的中心相距1'多, 而X射线源更靠近太阳边缘。这表明X射线源位于高冕弧上, 大致在冕环的环顶部份, 离开光球有66,000 km<sup>[15]</sup>。35GHz干涉仪观测得到的一维亮度分布表明有双源结构, 其中一个主源正好通过X射线源中心, 而另一次源中心通过Ha耀斑。从耀斑环的理论来看, 可以认为, X射线和射电的源都位于环顶, 而环腿正好是射电的次源所在, Ha耀斑位在环足, 这似乎很符合厚靶辐射模型。

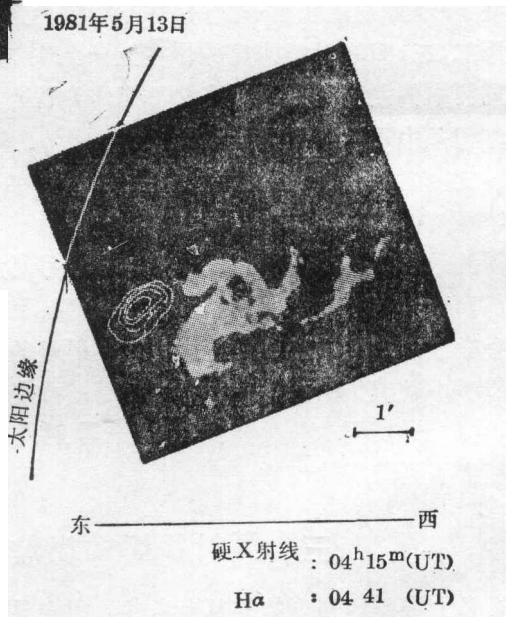
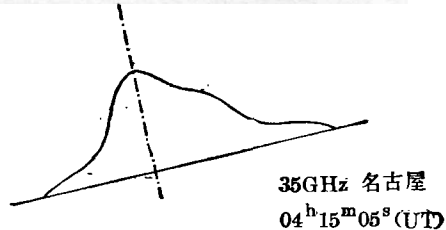


图 9. 1981年5月13日耀斑的Ha照片, X射线的二维图象(图中四圈点线)已迭加在上面, 注意到它在Ha耀斑(图中白色亮块)的东边。图中下面的曲线为35GHz的一维亮度分布图, 即射电源。



三个大方块图的频谱没有热尾巴上的过剩流量, 亦即可用热辐射来解释。这与第三峰是由50keV以下的电子贡献的观测结果相吻合。而对第二大方块图来说, 计算表明有较为显著的热尾巴上的过剩流量, 第一大方块图因观测误差较大而不能确定。因此, 文[16]作者认为, 至少对第二峰来说, 排除了热机制的可能性, 似乎与厚靶辐射模型较为符合。

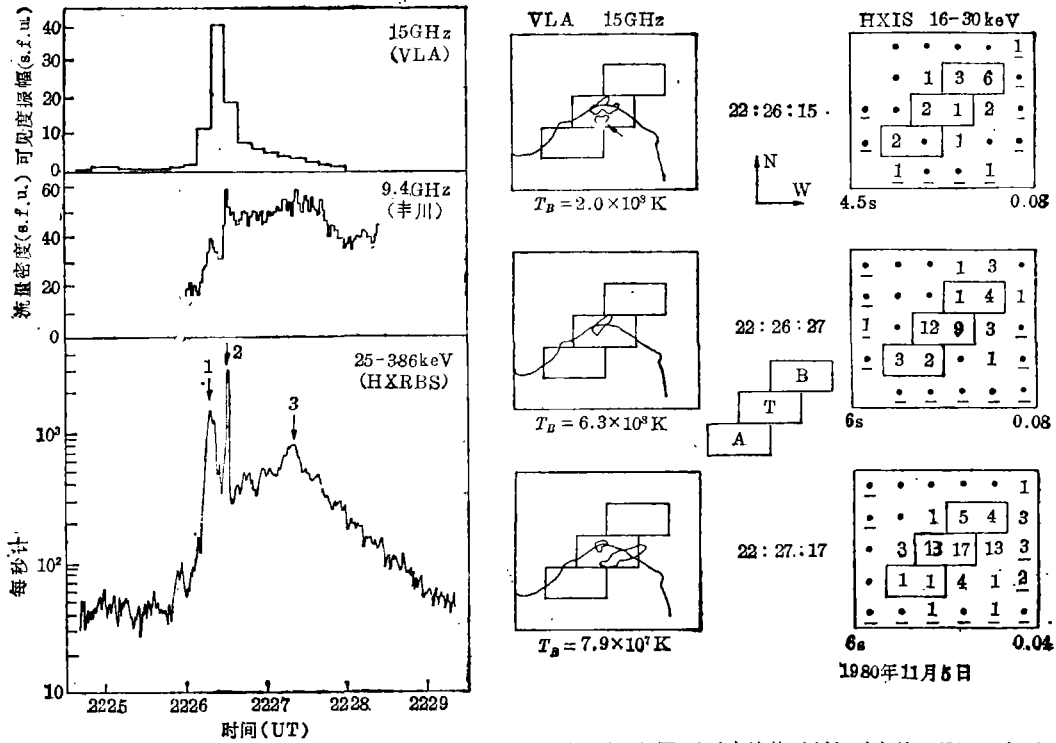


图 10. 1980年11月5日的15, 9.4GHz和25—386keV的爆发图。图中箭头所指向的是三个爆发峰, 分别以1, 2, 3表之。

图 11. 与图 10三个峰值时刻相对应的二维图。左面: VLA的总强度二维图。顶图中箭头指向先兆爆发源的遗迹。右面: 相应的硬X射线图像。图中表明了每一小块(8"×16")的累计光子数。图注: 点=零, 短线=下限。

图 12<sup>[17]</sup>给出了1980年11月23日“同时”的另一个两维观测事例。左边的 I 图是Berne观测的5.2GHz的爆发图。它的第一, 二峰(14:51:50和14:52:05)对应于右面的图Ⅲ的 a, b, c。从VLA图上发现, 6cm上有两个相同偏振的源。根据 a, b, c三图的对比, 也考虑到此耀斑发生在太阳边缘, 可以认为, 在爆发的第一, 二峰时, 射电源和 X射线源处于同一环中, 且两个射电源位于同一侧的环腿, 而 X射线源位于射电源下面的环足上。但在随后较弱的爆发时(第三峰: 14:52:20; 第四峰: 14:52:55), 在VLA的偏振图(图12的Ⅲ)上, 射电的南源被“劈成”两个, 与此相应的 X射线图像也有相似的“劈开”现象(见图 12Ⅲ中的 d, 此图相应于射电偏振“劈开”的开始时刻)。因此, 文[17]的作者认为: 在14:52:20之前开头的二个爆发峰发生在一个环内, 而以后的能量继续释放是在另外不同的环中进行, 此两环相距约为10"。两维成像观测似乎为我们提供了存在环系冕环的观测证据。

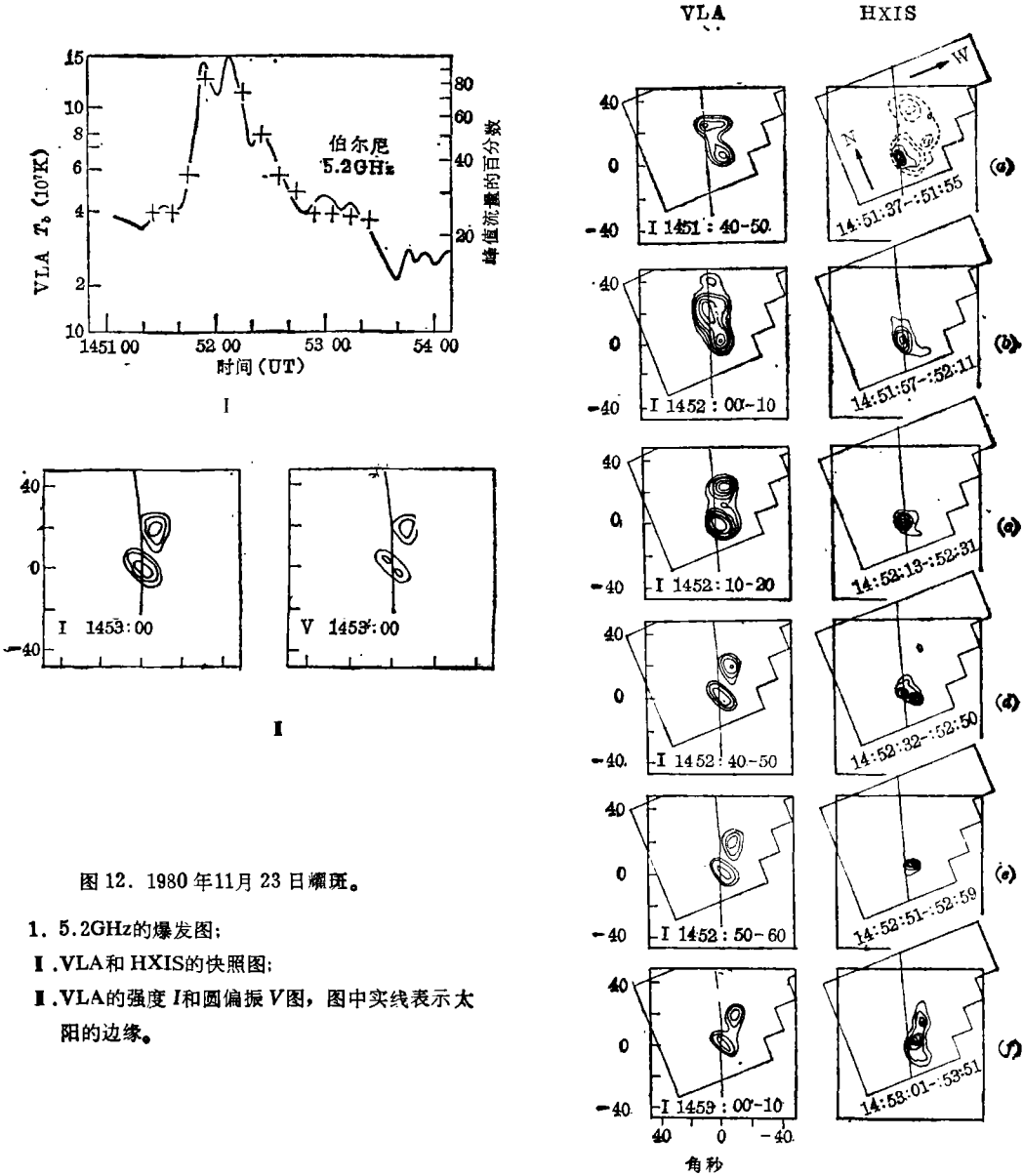


图 12. 1980 年 11 月 23 日耀斑。

- I. 5.2GHz 的爆发图;
- II. VLA 和 HXIS 的快照图;
- III. VLA 的强度 I 和圆偏振 V 图, 图中实线表示太阳的边缘。

### 四、展 望

在 21 周太阳峰年中取得了丰富的观测资料, 特别是两维高分辨率的空间 X 射线和地面射电的资料似乎使理论家们陷于困境。我们上面介绍的那些观测事例, 目前还没有从理论上得到很好的解释。相对于观测来说, 理论的进展似乎要缓慢一些。但是大量的观测资料也大大地丰富了人们的思维, 促进理论工作的开展。如对热机制与非热机制的争论, 厚靶还是薄靶模型的争论, 都可找到有利的观测证据, 使这些理论不再是纯粹的假设了。

最近一段时期, 人们似乎渐渐倾向于耀斑环的辐射理论, 而对中性片理论的兴趣减弱了,



这当然也有所失偏。而在耀斑环的辐射中, 试图从理论上统一来解释X射线和射电的观测事实, 目前还有不少困难。主要原因可能还是受到观测资料和分辨率的限制。

虽然在上一个峰年取得了大量的资料, 但是很有意义的边缘耀斑资料只有几个, 可以算作“套”的即各波段有完整资料的大概只有一、二个。另外, X射线的空间分辨率低, 不能和VLA相匹配; 各波段的时间分辨率也不相匹配。这些问题在下一个峰年中可望会得到部份解决。

据说, 下一个峰年——22周峰年中, 至少有三个国家将进行两维高分辨率的地面和空间的联合观测。美国NASA可能要发射载有1"的X射线成像镜的卫星来和地面的VLA相配合, 日本将把Nobeyama的17GHz的一维干涉仪改装成分辨率优于10"的二维成像观测与“第二代”空间卫星相配合, 苏联在西伯利亚新建了分辨率高于20"在频率5,700MHz上的两维图像观测和卫星观测相配合。这些相配合的高分辨率仪器联合投入观测, 必将对耀斑脉冲相的X射线和射电两者之间关系的研究揭开新的一页, 将会大大地加速太阳耀斑研究的进展。

### 参 考 文 献

- [1] Van Beek, H. F. et al., *Solar Phys.*, 65 (1980), 39.
- [2] Orwig, L. E. et al., *Solar Phys.*, 65 (1980), 25.
- [3] Kondo, I., in *Proceedings of Hinotori Symposium on Solar Flares*, 3, ed. by Y. Tanaka et al., Institute of Space and Astronautical Science, Tokyo, Japan, (1982).
- [4] Ohki, K. et al., *Ibid.*, p.120, 130, 142, (1982).
- [5] Ohki, K. et al., *Ibid.*, p.69 (1982).
- [6] Takakura, T. et al., *Solar Phys.*, 89 (1983), 379.
- [7] Svestka, Z.(ed.), in *Solar Flares*, 149, D. Reidel, Dordrecht-Holland, (1976).
- [8] Kaufmann, P. et al., *Solar Phys.*, 84 (1983), 311.
- [9] Takakura, T. et al., *Nature*, 302 (1983), 318.
- [10] Nakajima, H. et al., in *Proceedings of Hinotori Symposium on Solar Flares*, 273, ed. by Y. Tanaka, et al., Institute of Space and Astronautical Science, Tokyo, Japan, (1982).
- [11] Kane, S. R., in *I.A.U. Symp.*, No.57, p.105. (1974).
- [12] Tanaka, H. et al., *Solar Phys.*, 17 (1971), 408.
- [13] Takakura, T. et al., *Solar Phys.*, 16 (1971), 454.
- [14] Tsuneta, S. et al., *Solar Phys.*, 86 (1983), 313.
- [15] Loughhead, R. et al., *P.A.S.J.*, 37 (1985), 619.
- [16] Hoyng, P. et al., *Ap. J.*, 268 (1983), 865.
- [17] Schmahl, E. J. et al., *Ap. J.*, 299 (1985), 1017.

(责任编辑 林一梅)

## **The Relationship between Hard X-ray and Microwave Emissions of Solar Flares**

**Yao Jinxing**

*(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)*

### **Abstract**

This paper presents the simultaneous observational results with high resolution in hard X-ray and microwaves during the impulsive phase of solar flares in the maximum year of the 21st cycle of solar activity. It discusses the relationship between X-rays and microwaves and the advance in theoretical research as well. Besides, it gives a preliminary prediction of the tendency of development in this respect in the 22nd cycle.