

# 耀斑在可见光、X射线和微波区的协调观测

叶式辉

(中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

本文扼要叙述近年来世界各国天文工作者对耀斑各波段辐射进行协调观测与综合研究的主要结果。这些观测和研究包括耀斑的形态演变、物理参数和结构模型随时间的变化以及各波段辐射出现的时间序列。“结束语”对这些工作的发展趋势提出一些概括性的意见和建议。

## 一、引 言

耀斑是最强烈的,也是对地球影响最大的太阳活动现象。耀斑是极为复杂的快速物理过程,它可以在几分钟至几十分钟的短时间内释放出 $10^{31}$ — $10^{33}$ 尔格的能量。这样浩大的能量分布在从 $\gamma$ 射线到X射线、紫外、可见区、红外以至射电微波区的辽阔波段内。由于各波段的辐射来自不同的大气层次并由不同的机制形成,对各波段的耀斑辐射进行协调观测和综合分析,这对耀斑物理的研究是大有裨益的。在这方面已经有一些初步的工作,但更全面和更系统的研究还有待于进一步开展。

## 二、耀斑的形态演变

耀斑呈现出剧烈的动力学过程,而这种过程在各波段的表现不尽相同。近年来一些国家的太阳研究者组织起来,在不同波段对同一耀斑进行协调观测,已经取得一些有意义的结果。规模较大的一次是在太阳活动第21周峰年期间,苏联和两个东欧国家组织的协调观测(详细报道见[1])。他们用匈牙利Debrecen天文台的色球望远镜和苏联科学院地磁、电离层和无线电波传播研究所(ИЗМИРАН)的太阳塔作光学观测,捷克Ondrejov天文台和苏联ИЗМИРАН分别在150—1000兆赫和45—236兆赫作射电观测,并用捷克的光度计在苏联“预测(Прогноз)8号”人造卫星上进行2—360keV的X射线测量。他们用这些仪器对1981年5月16日 $3^+$ 级特大耀斑进行协调观测,得到一系列有意义的结果,主要是以下几点:

1.  $H\alpha$ 耀斑的演变可分为两个阶段。耀斑出现在黑子群之间时为低能阶段,而当耀斑侵入黑子群,尤其是掩盖黑子半影区时,为高能阶段。

2. 硬X射线(20—80keV)和微波辐射的强度不断起伏变化。它们到达峰值的时刻与若干

个  $H\alpha$  节点的变亮分别有关。

3. 在耀斑的演变过程中, 微波辐射的频谱分布不断改变。当  $H\alpha$  耀斑移向黑子群时, 频谱极大点向短厘米波段转移, 而在初期(即当耀斑位于黑子群之间时)以及在耀斑下降期, 极大频率都属于分米波段。

4. 耀斑从两个亮点发出的冲击波(时间分别为 08:14—08:15 和 08:20—08:21 UT), 在日冕中传播时产生两个 II 型射电暴(08:19:12—08:31:00 和 08:30:35—08:43:30 UT)。

5. 第二个 II 型射电暴在 10 兆赫频带具有精细结构, 包含许多寿命约为 0.1 秒的快速脉冲。这可认为是冲击波穿过尺度为  $10^7$ — $10^8$  厘米的非均匀结构体时发出的。

6. IV 型射电暴在分米波段和米波段都有寿命约为几秒的宽带脉冲。它们与黑子半影中  $H\alpha$  节点的变亮有关。这说明当耀斑过程对脚跟位于黑子本影或半影的磁环有影响时, 脉冲就出现了。

此外, 对这个耀斑的观测表明, 一个时空结构复杂的大耀斑, 可认为是由在不同时刻和不同位置出现的一系列小耀斑组成的。

对耀斑各波段形态演变的协调观测做得不多。上述对 1981 年 5 月 16 日大耀斑的观测可认为是最完整的。Chertok 等<sup>[2]</sup>对 1971 年 11 月 9 日和 10 日的两个耀斑, 还进行过光学与射电的协调观测。这两个耀斑的亮度不同(前者为 1 B 级, 而后者为 2 B 级), 但它们出现在同一活动区内并有若干类似之处。对它们的观测表明, 在耀斑出现后至少 24 小时内, 活动区上面色球和日冕的物理状态并无显著变化。

### 三、耀斑物理状态随时间的变化

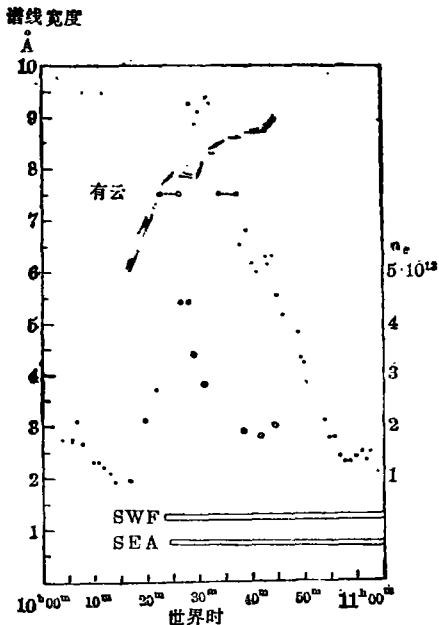


图1. 1961年7月12日耀斑的电子密度随时间的变化。

上节所述耀斑形态随时间的演变, 必然是耀斑物理状态(包括物理参数和结构模型)不断变化的反映。既然耀斑是一种快速动力学过程, 它们的物态应当随时间作剧烈变化。因此, 由多波段的观测资料推导出耀斑的结构模型和一些参数, 并探求它们在耀斑发展各阶段的变化规律, 肯定是有意义的研究课题。但目前这方面的工作还做得很少, 以下是两个零星的例子。

1. de Feiter 和 Svestka<sup>[3]</sup>对 1961 年 7 月 12 日三级耀斑在 17.5 分钟内连续观测七次。他们利用在 Stark 效应作用下氢的高项巴耳末线的宽度与波长之比随主量子数增加的原理, 由  $H_{10}$ — $H_{12}$  谱线宽度推求耀斑的电子密度( $n_e$ )。他们发现  $n_e$  (在图 1 中用“○”表示)与  $H\alpha$  发射线的宽度(“●”)的变化基本同步, 但后者的变化比前者约迟 20 分钟。这个现象是否由一定的物理原因造成, 目前

还不清楚。

2. 方成等<sup>[4]</sup>用南京大学太阳塔的多波段光谱仪对1982年12月2日耀斑拍摄  $H\alpha$ 、 $H\beta$  和  $Ca II K$  光谱, 发现谱线的剩余强度和  $H\alpha$  的不对称性都随时间变化。作者们用文[5]的方法, 由  $K$  线翼的强度计算耀斑区色球低层的模型。利用不同时刻的观测资料, 便可推导出这个模型随时间的变化。此外还求得光球-色球过渡区极小温度以及物质柱密度随时间的变化。这些资料有助于了解耀斑的动力学过程。

#### 四、耀斑各波段辐射的时间序列

耀斑在不同波段的辐射以及在相同波段内激发和电离电位不同的谱线, 出现和到达极大的时刻往往不一样。由此形成的时间序列有助于研究耀斑的结构和能量传输机制。将近30年来不少天文工作者从事这方面的研究, 已经取得一些有意义的结果。

1. 早在五十年代后期和六十年代初期, 苏联克里米亚天体物理台用太阳塔和阶梯光栅摄影仪, 在3100—6700埃以1—0.5埃/毫米的色散度和0.5—1秒的曝光时间在若干波段同时拍摄耀斑光谱, 发现不同元素的谱线到达极大的时刻可有较大差异。具体说来, 文[6]由对1959年8月17日和1960年10月11日的两个耀斑的观测发现, 稀土元素( $Ba^+$  和  $Si$ ) 的谱线到达极大的时刻比  $Mg$ 、 $Fe$ 、 $Al$  等金属的谱线约迟5分钟。该文作者的解释是稀土元素的原子位于色球低层, 而  $Mg$  等原子在色球高层, 耀斑辐射自上向下传播, 因此低层的激发比高层迟一些。文[7]指出, 1958年9月14日耀斑的氦线到达极大比氢线迟15—20分钟。作者们的解释是耀斑在上升阶段时温度逐渐增高, 因此氢原子先激发, 而氦后激发。文[8]把耀斑谱线分为四类, 即(1)氢线和某些金属线; (2)几乎全部金属线; (3)氦线; (4)色球谱线。以1959年7月25日边缘耀斑为例, 这四类谱线的分布如图2所示。第(1)和第(3)类谱线最早出现, 其次为第(2)类, 最后为第(4)类。此外, 各类谱线的空间分布也不一样。第(1)类谱线有四个节点, 其中最亮的为  $A$  和  $B$  ( $B$  向红端延伸)。第(2)类谱线出现在  $A$ 、 $B$  两个节点上, 但此处的  $A$  点比第(1)类谱线的  $A$  点略低。第(3)类谱线出现的位置甚为弥散, 在  $B$  处达到极大。第(4)类谱线(主要是  $Ti$ 、 $Co$ 、 $Y$ 、 $Zr$  等稀土元素谱线)的位置很低, 主要在色球层, 有一部分甚至在日面上。还应谈到, 和前面两项工作的结果相似, 文[8]也指出各类谱线达到极大的时刻不同。最早的是氢、氦和最强的金属线, 几分钟后其他金属线闪亮, 而最迟的仍是稀土族元素谱线。作者的解释是耀斑能量由冲击波从日冕经色球向光球传播。稀土族元素的原子大部分位于色球低层, 因此最后激发。

2. Neupert<sup>[9]</sup>报道说, 轨道太阳观测站OSO-5在六十年代后期已经发现,  $FeXXVI$ 、 $FeXXV$  等级高度电离离子的谱线出现在耀斑的闪光相, 而一些禁线(如  $OIV\lambda 1,400$ 、

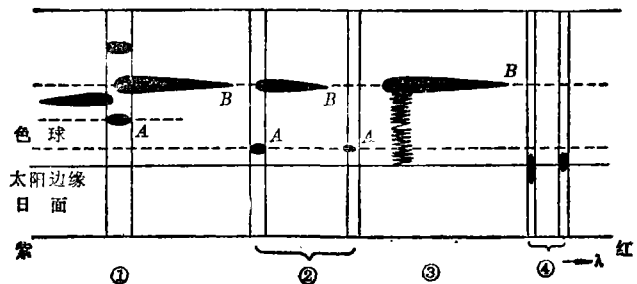


图2. 耀斑四类谱线的分布。

FeX II  $\lambda 1,241$ )却在爆发相结束后才显著增强。上述两类谱线出现的时间差可达 10 分钟左右。

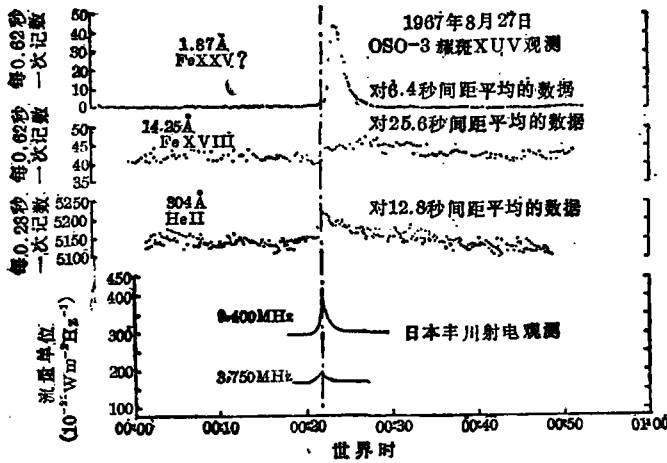


图 3. 1967年8月27日耀斑的XUV和射电观测结果。

射线  $\lambda 304$  的强度上升较早,在微波爆发之前一、两分钟就开始缓慢上升。可是在微波爆发时它迅速增强,并在微波极大之后 25 秒钟达到极大。 $\lambda 1.87$  比  $\lambda 14.25$  先达到极大。在  $\lambda 1.87$  已达到极大并开始减弱时,  $\lambda 14.25$  的流量才缓慢上升。这可能是由于耀斑等离子体在不断冷却过程中由于复合而产生电离度较低的离子的谱线所致。

4. 高仓等<sup>[10]</sup>利用日本“火鸟”(Hinotori)人造卫星在 30—40keV 取得的硬 X 射线爆发高时间分辨率记录和巴西 Itapetinga 射电天文台口径 45 米望远镜在毫米波段同时的观测资料,发现两者的毫秒级时间精细结构呈现出对应关系。此外,他们<sup>[11]</sup>还发现强烈的硬 X 射线爆发和微波爆发的峰值出现时刻有大于 5 秒的时间差。这样的时差可分为两类,一类与 X 射线的能量有关,另一类与微波辐射的频率有关。

5. 吉森等<sup>[12]</sup>也是用“火鸟”资料,发现  $\gamma$  射线暴峰值的出现时刻比相应的硬 X 射线峰值迟得很多,时差可达 30 秒以至 1 分钟。

6. 黑河<sup>[13]</sup>把“火鸟”记录的硬 X 射线暴与地面拍摄的耀斑 H $\alpha$  单色像进行比对,发现前者的尖峰与后者的变亮有对应关系。

7. 成中杰等<sup>[14]</sup>在太阳活动第 21 周峰年期间用“太阳峰年使者”(SMM)卫星的观测资料,对一个日面耀斑和一个边缘耀斑取得紫外(UV)和硬 X 射线爆发的时间和空间结构资料。UV 观测的空间分辨率为 3—4 角秒。由观测资料的分析可以知道,UV 与 X 射线爆发在时间上有对应关系,两者变化曲线的峰呈现一一对应。此外,UV 爆发开始上升的时刻比相应的 X 射线爆发大约早几秒钟。作者们认为,这表明硬 X 射线爆发的辐射源位于色球低层。该处物质密度较大,有局部加热。

8. Cornell 等<sup>[15]</sup>把 SMM 上的硬 X 射线光谱仪对 5 个耀斑的观测结果,与美国 Owens Valley 射电天文台 10.6 赫兹观测资料对比,时间分辨率约为 0.1 秒。对比结果表明,微波和硬 X 射线暴的时间轮廓相似,但是前者比后者约早 0.2 秒钟。

作者们用厚靶模型来解释上述现象。他们认为电子在耀斑环的顶部加热,但电子流冲击

Neupert 认为,这是由于  $\lambda 1,400$  等禁

线是在比较低的大气层内形成的。但笔者认为这个解释可能不当,因为一般说来禁线只能在极为稀薄的物质中形成,而低层大气甚为稠密。

3. Neupert<sup>[9]</sup>还谈到 OSO-3 对 1967 年 8 月 27 日耀斑的 FeXXV  $\lambda 1.87$ 、FeXV III  $\lambda 14.25$  和 He II  $\lambda 303.77$  同时进行的高时间分辨率观测(每 0.62 秒或 0.28 秒有一个测量数据)以及与日本名古屋大学在 9,400 兆赫和 3,750 兆赫的射电观测资料的对比(见图 3)。这些观测表明,氢发

到环的脚跟才产生X射线暴，因此迟一些，微波暴却是在环顶附近产生的，所以早一些。

9. Acton 等<sup>[16]</sup>用 SMM 装载的仪器对 1980 年 5 月 7 日 14:56 UT 耀斑进行硬、软 X 射线测量，并用美国 Sacramento Peak 天文台(SPO) 真空太阳塔同时进行 H $\alpha$  单色像观测。他们发现硬 X 射线的第一个峰值出现最早，大约 40 秒后才有第二峰值以及 H $\alpha$  光度曲线的峰值，再过大约 30 秒才出现软 X 射线的峰值(见图 4)。此外，文[16]还用 H $\alpha$  轮廓的变化来计算色球蒸发的数量。

以上九项均为观测工作。它们的结果大致相同，都肯定耀斑各波段辐射出现的时刻有一定的差距。下面一个课题是用由实测得出的时间序列建立耀斑的结构模型。这方面的工作可以说还没有正式开始，只是 Smith 和 Muth<sup>[17]</sup> 做过一些预备性的理论计算。他们对硬 X 射线暴建立耀斑环模型，计算整个环发射的 10、30 和 100 keV 辐射出现的时间序列。他们求得直径为 15,000 公里的耀斑环所产生的 100 keV 的 X 射线辐射，相对于 300 keV 辐射的时间延迟为 1.5 秒。这个时间间距应当能够观测出来。他们的计算所根据的原理是无碰撞传导界面与色球及色球-日冕过渡层的作用。求解的方程组和详细的计算方法见文[18]。

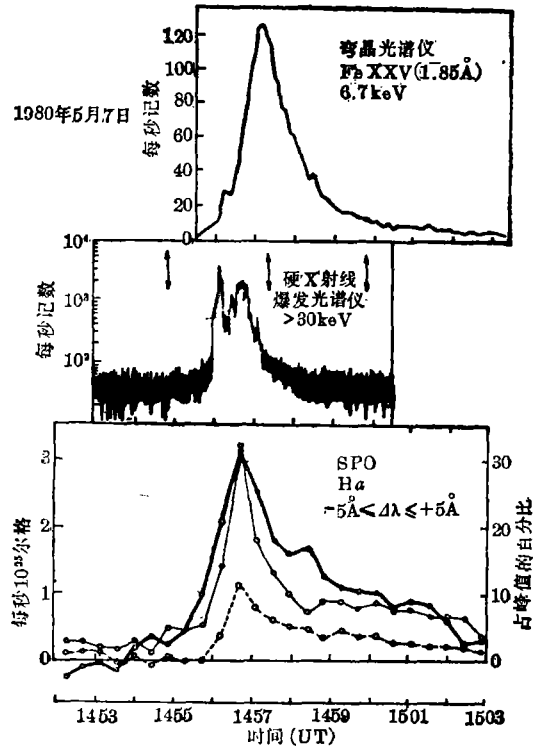


图 4. 1980 年 5 月 7 日耀斑的硬、软 X 射线和 H $\alpha$  协调观测结果。

### 五、结 束 语

从以上三节可以了解到，耀斑各波段的协调观测已经取得一些进展，但现有的工作还只是初步的。就耀斑的形态演变而言，文[1]发现的一些现象是否具有普遍性，尚待用大量的新观测资料来证实。此外，对这些现象的物理实质还需进行深入的探索。例如 X 射线和微波辐射的尖峰可以和 H $\alpha$  节点的变亮对应起来，这就是一个值得钻研的饶有趣味的现象。对于耀斑物态随时间的变化，迄今只有寥寥几项零星工作，亟须开展系统的观测与研究。至于耀斑的时间序列，虽然二十多年来已有多项工作，但是把可见光、X 射线和微波区的观测全面协调起来取得完整和精确的时间序列，至今尚未办到。此外，前面已谈到，通过时间序列研究耀斑的结构模型和能量传输机制，实际上还未正式开始。上述种种情况都告诉我们，对耀斑各波段辐射的协调观测是一项可以产生丰硕成果的工作，值得我们付出辛勤的劳动。

要做好耀斑的协调观测，首先必须有整套的仪器设备，包括多波段光谱仪、射电频谱仪、

高空飞行器装载的X射线记录装置等,这些仪器应当配备统一的计时系统。其次,需要有一个完整的观测规程和有效的协调组织。耀斑存在的时间很短,并且至少在目前还难以准确预报,要使各波段的观测用各种仪器对同一个耀斑甚至同一节点协调进行,并非容易事。此外,观测资料的理论分析也很重要。文[17]和[18]仅是工作的开端,系统和深入的研究还有待于进一步开展。

目前我国和许多国家的太阳物理工作者,正在积极筹备太阳活动第22周峰年(1990—1992年)的观测。鉴于耀斑各波段协调观测的重要意义,我们建议把这项工作列为峰年观测与研究的一个大型协作项目,争取使这方面工作在下次峰年期间有重大的新进展。

### 参 考 文 献

- [1] Ishkov, V. N. et al., *Publ. Debrecen Heliophys. Obs.*, 5 (1983), 193.
- [2] Chertok, I. M. et al., *Publ. Debrecen Heliophys. Obs.*, 5 (1983), 73.
- [3] de Feiter, L. D., Svestka, Z., *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia*, 15 (1964), 117.
- [4] Fang Cheng et al., in *Proc. Kunming Workshop on Solar Phys.*, p.765, ed. by C. de Jager et al., (1985).
- [5] Shine, R. A., Linsky, J. L., *Solar Phys.*, 37 (1974), 145.
- [6] Степанян, Н. П., *Изв. Крым. Астроф. Обс.*, 26 (1961), 41.
- [7] Стешенко, Н. В., Хохлова, В. Л., *Изв. Крым. Астроф. Обс.*, 23 (1960), 322.
- [8] Степанян, Н. Н., *Изв. Крым. Астроф. Обс.*, 29 (1963), 68.
- [9] Neupert, W. M., in *Physics of the Solar Corona*, p.237, ed. by C. J. Macris, (1971),
- [10] Takakura, T. et al., *Nature*, 302 (1983), 317.
- [11] Takakura, T. et al., *Solar Phys.*, 89 (1983), 379.
- [12] Yoshimori, M. et al., 18th Internat. Cosmic Rays Conf., 4 (1983), 85.
- [13] Kurokawa, H., *Solar Phys.*, 86 (1983), 195.
- [14] Chung-Chieh Cheng et al., *Ap. J.*, 278(1984), 853.
- [15] Cornell, M. E. et al., *Ap. J.*, 279 (1984), 875.
- [16] Acton, L. W. et al., *Ap. J.*, 263 (1982), 409.
- [17] Smith, D. F., Muth, L. A., *Solar Phys.*, 90 (1984), 83.
- [18] Smith, D. F., Harmony, D. W., *Ap. J.*, 252 (1982), 800.

(责任编辑 林一梅)

## The Coordinated Observations of Solar Flares in the Visible Light, X-rays and Microwave Region

Ye Shihui

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

This paper presents a brief review of the major results of the coordinated observations and comprehensive studies of solar flares in various regions of radiation, performed by astronomers of various countries. These observations and studies include the process of morphological evolution, the variations of the physical parameters and structural models with time as well as the time sequence of appearance of radiations in various spectral regions. The concluding part generalizes some ideas concerning developments of these observations and studies.