

太阳活动预报与射电幅射频谱研究

周树荣 刘 炎 吴洪敖

摘 要:

本文简述了耀斑爆发前和耀斑进行过程中的太阳射电辐射的某些特性。根据这些特性,我们提出了“太阳质子事件和电离层突然骚扰的预警报,射电爆发频谱,太阳射电爆发快速变化过程和高空间分辨的太阳射电观测等项研究课题。

太阳第22周活动峰年观测是本世纪末的最后一个太阳活动峰年观测,在这一个峰年里,我们既要搞好单个小天线的多波段太阳射电观测,又要适当增加一些高空间分辨的太阳射电观测。这些观测对于太阳活动预报,太阳射电频谱及其太阳射电辐射理论的研究是十分重要的,而且也是必不可少的。因此,我们应该积极的做好峰年观测的准备,争取下一个峰年期间能多做些课题研究。

按照当前的国情,基础研究要面向应用,因此我们把“太阳活动预报与射电爆发频谱研究”列为第22周太阳活动峰年的研究课题之一。下面分五个方面来介绍这个课题。

一、耀斑爆发前微波辐射源缓变辐射成分的变化

耀斑爆发前,太阳活动区一般都有一个较长时间的贮能过程,在这个过程中,双极黑子群彼此接近、黑子的磁极由简单变为复杂和射电局部源的缓变辐射增强。统计分析表明⁽¹⁾:只要3.2cm太阳射电辐射流量连续增长,而且第三日的流量相对三日前的增长速率超过5.5%时,则在今后的7天——10天以内,日面上就有可能出现大耀斑和相应的SID事件。多年的实践已证明:3.2cm太阳射电缓变辐射的增长速率,可以较好的作为太阳活动趋势性预报的指数。

太阳耀斑贮能过程中,在耀斑区域局部范围内也可能出现能量的“泄漏”现象,射电局部源缓变辐射成分的周期性脉动,也许反映了这一事实。在厘米波段,我们观测到了微波辐射的这种周期性的振荡。振荡的周期从几秒到10几秒,振幅约为太阳非状动分量的1%⁽²⁾。这种振荡一般在耀斑之前几小时或几天内出现。对于较小的射电爆发,振荡一直要延续到爆发开始。但对较大的47GB型爆发,振荡往往在爆发前几十分钟或几小时突然停息,观测记录变为光滑曲线。因此,利用微波辐射的这种周期性的振荡特性,也有可能提前几十分钟或几小时预报大耀斑。

P. Steffen (1980)⁽³⁾分析了111个与耀斑有关的太阳射电缓变辐射的频谱,并把SVC频谱分成 A_0 、 A_1 、 A_2 等6类(见图1)。统计结果表明:一般中等和强的耀斑都发生在 A_1 型SVC频谱的源上; A_1 型频谱在活动区中存活的周期不超过三天,但 A_0 或 A_2 型频谱在活动区的整个周期中都可看到,而且它们一般在一天左右的时间里就能演化成 A_1 型谱。因此,一当发现SVC源的频谱从其他谱型转变成 A_1 型谱时,那么在这个区域便有可能出现

一个中等以上的耀斑。

H. Tanaka (1964) ⁽⁴⁾ 发现质子耀斑发生前活动区的缓变辐射频变硬, 即3.2cm 波长上的流量密度与7.5cm波长的流量密度之比 $R = S_{3.2}/S_{7.5} \geq 1$ 。观测的事实表明: R 从 < 1 到 > 1 的转变仅仅是在质子耀斑之前 1—2 天才发生, 微波辐射能量的这种转变造成了活动区的局部不稳定, 触发了质子耀斑的发生。利用这种方法, 曾在1966年7月的质子耀斑计划期间, 提前二天准确的预报了7月7日的一次大质子耀斑。

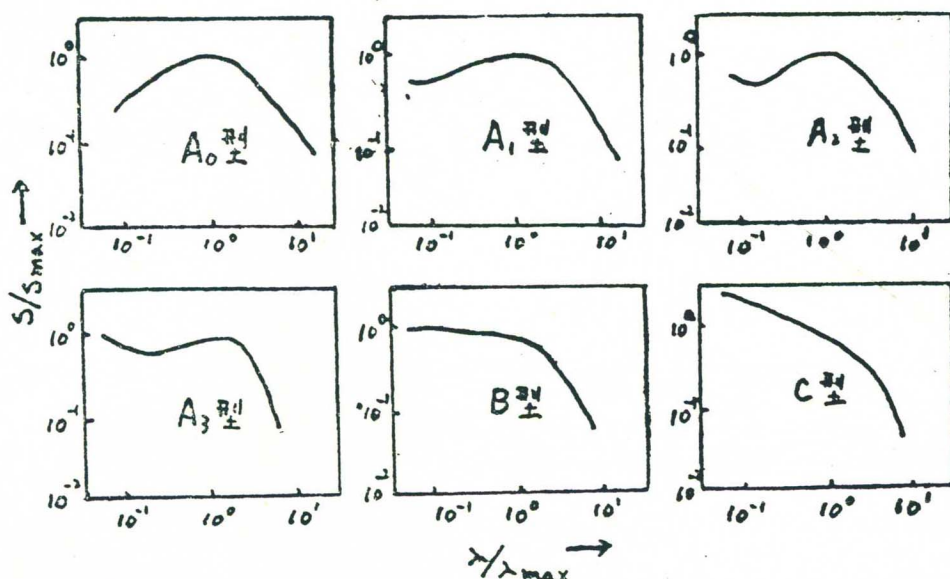


图1. 活动区缓变辐射频谱分类。

M. Simon (1964) 还发现, 在耀斑发生前 1—2 天, 活动区的3.2mm 射电辐射出现增强, 一般比背景 (宁静太阳6400k) 高出 $\Delta T_b = 200k$ 左右。1970年E. B. Mayfield ⁽⁵⁾ 又明确提出当活动区在 $\lambda = 3.3mm$ 上增强辐射超过宁静背景的8.5%, 温度梯度 $> 0.5\%/度$ 时, 在48小时内, 可能产生2级以上的耀斑。因此活动区的毫米波辐射增强, 同样也可以用来预报太阳耀斑, 这些都值得我们每一个从事太阳耀斑预报工作的同志注意。

二、太阳原子事件预报

伴随有质子事件的太阳射电爆发一般具有如下特征:

(1) 爆发峰值流量密度在厘米波段, 一般随着频率的增加而增加, 频谱指数为负值 (即频谱变硬)。峰值频谱在3 GHz附近出现极小, 在3 GHz以下直到米波段爆发的峰值再次增加到很大的强度, 这样整个频谱就呈现成U形, 简称U型谱。

(2) 峰值流量谱具有一个确定的极大值 S_m , 单个频谱峰值频率 f_{max} 平均在10—12 GHz频率上, 峰值频率的实际范围从5到70GHz。与非质子事件爆发谱 (极大在5—6GHz) ⁽⁶⁾ 相比, 质子事件爆发谱在较高频率上达到极大 (见图2)。

(3) 微波爆发辐射流量的主要部分集中在10GHz以上的频率上。

(4) 厘米波段上某一频率的峰值流量密度超过1000sfu。

Castelli ⁽⁷⁾ 认为质子事件的射电频谱最重要的是①厘米波段的频谱指数为负。②厘米波

段上某频率的流量达到1000sfu以上。二者缺一不可，有时虽然厘米波段的流量超过1000sfu，频谱也呈现U形，但是频谱指数在厘米波段为正或频谱呈U形但厘米波段能量很低，这些都是非质子耀斑射电爆发所具有的特征，决不能把它与质子事件相关的射电爆发的特征混淆起来。

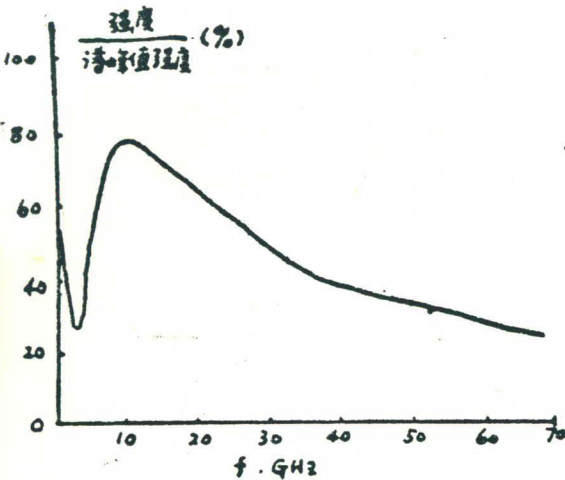


图2(a) 质子事件射电爆发频谱

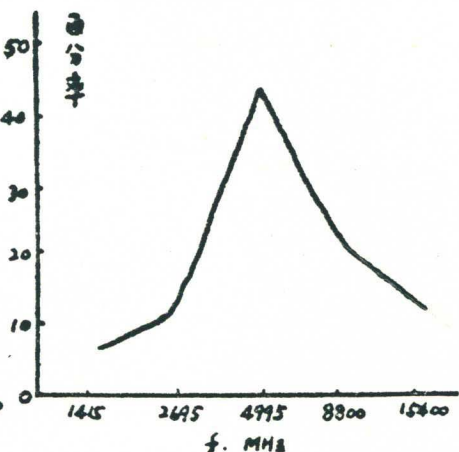


图2(b) 非质子事件爆发峰值出现的百分数

根据质子事件射电爆发的这些特征，可以警报质子事件。D. L. Croom曾用这种U型谱的特征作了质子事件的报警，报准率可达60—80%。

单频爆发辐射的强度特性和时间特性与质子事件也密切相关，同样也可用来预报太阳质子事件。

我们统计分析了厘米波段的射电爆发能量密度与质子事件的关系^[8]，发现质子事件在3.2cm波长附近存在一个爆发能量密度 $E = \int_0^T s dt = 9000 (10^{-22} \text{焦耳}/\text{m}^2 \text{Hz})$ 阈值， $E > 9000$ 的3.2cm射电爆发一般对应于质子事件。与3cm和10cm爆发峰值谱斜率 $r < 0$ 对应的质子事件，爆发的能量密度几乎都位于 $9000 < E < 600000$ 部分，而与 $r > 0.03$ 对应的质子事件，爆发的能量密度 E 都 > 600000 。利用 $E > 600000$ 的3cm射电爆发的峰值频谱指数(厘米波段) r 可以预报质子事件的质子流强度 N_F

$$N_F = 33e^{1.13r} \tag{1}$$

相关系数 $R = 0.92$ ，剩余标准差 $\sigma = 0.75$ ，按S-S分类法预报精度可达0.65级，报准率达95%。

D. L. Croom (1970)^[9]在统计了19GHz单频射电爆发与质子耀斑的相关之后，指出至少76—88%的19GHz太阳射电爆发①峰值强度增长 $>$ 爆前水平50%；②爆发流量增长 $>$ 爆前水平10%以上部分的时间要 $>$ 5分钟的爆发，与太阳耀斑直接有关。而且1966年—1969年四年期间的60%到85%的中等的到大的质子事件均可用19GHz的射电爆发进行预报。

现定义一个爆发的有效持续时间 T_M

$$T_M = \frac{1}{S_m} \int_0^T S(t) dt \tag{2}$$

式中 S_m 是爆发的峰值流量密度, $S(t)$ 是 t 时刻的爆发流量密度, T 为总的持续时间。从定义可以明显的看出: T_m 实际上是用爆发峰值流量归一后的爆发能量密度值, 反映了爆发的强度和形态特性。

质子流密度 N_F 与 T_m 的一般相关关系可以用下式表示。

$$N_F = AT_m^B \tag{3}$$

A 和 B 是回归系数。不同的研究者所得到的相关系数 R , 常数 A 和 B 值也不相同, 表1列出了它们的研究结果。

表1 质子流密度 N_F 与 T_m 的相关

作者	射电爆发频率 MHz	r	A	B
D. L. Croom	19000	0.78	0.034	3.2
北台	9395	0.88	2.89	1.30
吴鑫基等	8800	0.24	2.58	0.37

D. L. Croom还比较了不同能量范围的 N_F 与 T_m 的相关, 其结果已列入表2。

表2 各种质子能量范围的 N_F 与 T_m 的相关

质子能量范围	r	A	B
10—30Mev	+0.79	0.022	3.3
>10Mev	+0.78	0.034	3.2
30—60Mev	+0.73	0.036	2.4
>30Mev	+0.69	0.070	2.3
>60Mev	+0.42	0.385	1.0

从表1和表2可以明显地看出: D. L. Croom^[10]和北台^[11]给出的 N_F 与19000MHz和9375MHz的爆发有效持续时间相关的很好。10—30Mev能量范围的 N_F 与 T_m 相关性最高, 达0.79, 高能量的即>60Mev的 N_F 与 T_m 相关性最差。吴鑫基等人^[12]所得到的结果与上述相反, 相关系数只有0.24, 这就说明了 N_F 与 T_m 根本不相关。他们指出: Croom所提出的有效持续时间 T_m 在8800MHz频率上至少不能用来预报质子流强度。 N_F 与 T_m 究竟是否相关, 相关的程度如何, 还有待于今后进一步的探讨。

有的人用3db和10db爆发峰值流量的有效持续期代替 T_m , 对质子事件的质子流量密度进行预报, 也得到同样的效果。

爆发的平均流量密度, 总能量密度, 爆发的总的持续时间和上升时间等量均可用来警报质子事件的强度, 但不同的研究者所得的结果各不相同, 或是相关性很好, 或是相关性很差, 这些也许是由于作者的不同处理方法和所选用的观测资料的精度不一致引起的。

三、电离层骚扰的预警报

一般认为2级以上的耀斑与电离层突然骚扰（简称SID）密切对应，因此SID的预报关键在于能否准确的预报耀斑出现。本文的第一部分已经简述了从厘米波段缓变辐射成分增长的速率，周期性的微波振荡，活动区缓变辐射A₁型频谱的出现，厘米波射电辐射频谱的变硬和3.3mm波段缓变辐射增强等方面来预报太阳耀斑的出现。因此，有关SID的预报问题本节就不再重复。本节着重叙述如何利用射电爆发的上升速率、爆发上升时间和爆发的峰值流量密度来进行SID的警报。

表3列出了利用3.2cm射电爆发上升速率进行SID警报的判据。

表3 利用爆发上升速率进行SID警报

脉冲型爆发		缓变型爆发	
时间范围 (m)	判 据 (sfu/m)	时间范围 (m)	判 据 (sfu/m)
$1 \leq \Delta t \leq 2$	$d > 217$	$5.5 < \Delta t \leq 9$	$d \geq 18 - 1.8 \Delta t$
$\Delta t > 2$	$d > 165$	$9 < \Delta t \leq 20$	$d > 2.2$
$2.6 \leq \Delta t \leq 3.7$	$d \geq 156.3 - 35 \Delta t$	$20 < \Delta t \leq 36$	$d > 1.1$
$3.7 \leq \Delta t \leq 7.5$	$d \geq 122.2 - 12.3 \Delta t$	$\Delta t > 36$	$d > 0.4$
$\Delta t > 7.5$	$d > 11.2$		

表中的d是爆发的上升速率， Δt 是爆发的上升时间。利用上述判据进行警报，报准率为63.5%，虚报率36.5%。实际上虚报率比给出的数据要低的多，因为统计所用的短波通讯中断资料不全，有些短波通讯中断事件没有收集到，这样就增高了虚报率。

爆发的上升时间和爆发的峰值流量密度与2级以上的SID事件也密切关联，统计结果表明：①85—90%的峰值流量相对增长>50%的厘米波段脉冲型微波爆都伴随有2级以上的SID事件，②伴随有2级以上SID事件的厘米波段缓变型爆发中，有93%的爆发峰值流量密度都 ≥ 50 sfu(3.2cm)和 ≥ 25 sfu(10cm)或持续时间 ≥ 30 分(3.2cm)和25分(10cm)。

根据上述的结果，我们可以得到警报2级以上SID出现的判据。

(1) 对于脉冲型厘米波爆：

爆发流量相对爆发前流量的相对增长>50%。

(2) 对于缓变型厘米波爆：

(a) 爆发流量相对增长在3.2cm波长上 ≥ 50 sfu或在10cm波段上 ≥ 25 sfu。

(b) 爆发进行的时间在3.2cm波长上 ≥ 30 分或在10cm波长上 ≥ 25 分。

利用这些判据和爆发的上升速率，有时可提前5—15分钟警报SID，但是，准确的提前警报SID还是相当困难的，还有待于今后进一步研究爆发前的先兆，以提高警报水平。

四、今后的设想和研究内容

在第22周太阳活动峰年期间,我台太阳射电观测组的重点研究课题是太阳活动预报与多波段的射电爆发频谱研究。

在峰年期间,我们将开展3.2mm、4mm、8.6mm、3.2cm、5—6cm和10cm等多波段的太阳射电总强度观测。并进行5—6cm波段的偏振辐射和ms级的太阳快速现象研究。我们希望与兄弟单位合作,就几个大的活动区进行光学、射电、空间等方面联合观测。取得一些较完整的观测资料,这对于太阳活动预报、太阳物理研究和日地关系物理研究都是非常有益的,而且也是十分重要的。

我们进行多波段的太阳射电观测,目的在于研究如下几项课题。

1. 太阳质子事件的预警报。

(1) 从射电爆发峰值流量频谱是否成U型谱,厘米波段的频谱是否变硬,厘米波段的射电辐射流量是否超过1000sfu来警报质子事件。

(2) 研究太阳射电爆发的多种参数与质子流量密度 N_p 的相关,预报质子事件的质子流量密度。

可用来研究的参数有如下几类:

(a)、单频参数:

射电爆发的强度特性——峰值流量密度,平均流量密度和总能量密度。

爆发的时间特性——总持续时间、爆发上升时间,爆发下降时间,有效持续时间,10db有效持续时间等。

爆发的偏振特性。

(b)、多频参数:

频谱指数 r 、极大频谱频率 $f_{\max}$ 、极大频率峰值流量 $S_{\max}$ 、极大频率爆发能量密度,射电波段辐射总能量 E 等。

2. 电离层突然骚扰预报:

(1) 研究各个波段的太阳辐射流量与SID出现的关系,作好SID的趋势式预报。

(2) 寻找太阳大耀斑爆发出现前的先兆,在各个微波频率上研究各种周期性振荡与太阳大耀斑的关系,研究耀斑出现前夕的各类微波小爆发的特性与大耀斑出现的关系,力争提前预报大耀斑。

(3) 耀斑开始后,密切注视各波段射电爆发的先兆反映和上升相的变化,作好SID的警报。

(4) 研究6cm波段的偏振辐射变化与大耀斑出现的关系,为耀斑的预报寻找新的指数。

3. 多波段的射电爆发频谱研究。

(1) 利用U型爆发频谱判断质子耀斑,作质子事件警报。

(2) 从各类爆发频谱指数的变化,研究爆发的辐射机制。

(3) 根据不同频率上的爆发的时间漂移,研究喷注的高温等离子体流的运动状态。在假设了不同波段的辐射层次高度之后,还可以估计出这种等离子体流的主流宏观输运速度。

(13)

(4) 对于回旋同步辐射机制,频谱峰值频率 $f_{\max}$ 与射电源中的磁场 H 的近似关系为

$$f_{\max} = 9.8H$$

(4)

因此,从频谱极大频率 $f_{\max}$,还可粗略的估计出射电源的磁场^[14]。

4. 6 cm波段的太阳射电爆发快速变化过程的研究。

太阳射电爆发的快速变化是当前太阳活动研究中的一个比较重要的课题,太阳射电快速变化现象的出现与太阳活动区的变化和太阳射电辐射机制紧密相关,因此,我们准备在6 cm波段上建立ms级的太阳射电快速记录系统,并和兄弟单位一起研究太阳射电爆发的ms级快速变化频谱,探求它的辐射机制。

5. 高空间分辨力的太阳射电观测研究。

鉴于二十二周太阳活动峰年前夕,紫台的13.7米毫米波望远镜,北台的米波综合孔径、上海的25厘米波段的长基线干涉仪和云台的十米射电望远镜都相继建成。建议充分利用这些大型仪器设备,在太阳活动峰年期间也能开展太阳射电观测研究。这样,不但能使我国的太阳射电观测研究向前推进了一大步,而且还可以从事如下一些课题的研究工作。

(1) 日面活动区的演变过程。

(2) 耀斑爆发前射电局部源缓变分量的变化,寻找耀斑爆发的先兆,进行太阳耀斑预报。

(3) 射电局部源的位置、大小、高度等有关参量。

(4) 射电源缓变辐射频谱和射电爆发细节及其频谱。探讨太阳射电爆发产生的辐射机制。

(5) 宁静太阳射电辐射的研究,建立宁静太阳大气模型。

参 考 文 献

[1] 朱祖彦、周爱华、周树荣:中国科学院紫金山天文台,科研工作报导, 3、9 (1975)。

[2] 吴洪敖:空间科学学报, Vol. 2、NO. 1、31(1982)。

[3] P. Steffen: Solar phys. Vol. 67, NO. 1(1980)。

[4] H. Tanaka and T. Kakinuma: Rep Ionos Space Res, Japan 18, 32(1964)。

[5] E. B. Mayfield, J. Higman, C. Samson: Solar phys, vol, 13, 372(1970)。

[6] D. A. Guidice and J. P. Castelli: High Energy Phenomena on the Sun, 87(1972)。

[7] J. P. Castelli and D. A. Guidice: Vistas in Astronomy, 19 Part 14, 355(1976)

[8] 周树荣、刘炎、吴洪敖,紫金山天文台台刊 vol. 1, No. 3, 62(1982)

[9] D. L. Croom: Soiar phys, 19, 152(1971)。

[10] D. L. Croom: Soiar phys, 19, 171(1971)。

[11] 北京天文台射电天文组:北京天文台台刊,第1期(1972)

[12] 吴鑫基、安景竹、罗绍光、赵景芝、郁晓霞:云南天文台台刊,第4期(1979)

[13] 罗先汉、马媛:太阳微波爆发的形态分析(1984)

[14] T. Takakura: 1967, Soiar phys, 1. 304.