

射电微波爆发与质子事件的相关分析

周树荣 刘 炎 吴洪放

摘 要

本文对1967年—1973年期间具有对应的3cm与10cm波段的射电爆资料的27个质子事件,作了相关分析。发现质子事件在3cm波段附近存在一个爆发能量密度($E = \int_0^{\infty} s dt$)阈值,并可按8800MHz上的爆发能量密度,将质子事件分为二类:一类与小的爆发能量密度 $9,000 \leq E \leq 600,000$ (10^{-22} 焦耳·米 $^{-2}$ ·Hz $^{-1}$)对应,简称A类事件,另一类与 $E > 600,000$ 的大的爆发能量密度对应,简称B类事件,则与8800MHz和2695MHz上的爆发峰值谱斜率 $\gamma \leq 0$ 对应的质子事件,几乎都位于小的爆发能量密度部分,而与 $\gamma > 0.03$ 对应的质子事件,全都位于大的爆发能量密度部分。质子流强度(质子/厘米 2 ·立体角·秒)与8800MHz的爆发能量密度呈显著相关,相关系数 $R = 0.73$,剩余标准差 $\sigma = 1.4$;若与峰值谱斜率 γ 相关,则在大的爆发能量密度部分, $R = 0.92$ 、 $\sigma = 0.75$,比与能量密度相关的精度约高一倍。而在小的爆发能量密度部分,虽然 γ 与质子流强度没有明显的相关,但 $\gamma \leq 0$ 的爆发,似乎有利于质子事件的产生,这对于判断中小爆发是否对应于质子事件,可能是个有用的判据。

引 言

某些强烈的耀斑爆发,可能伴随有大量高能带电粒子的抛射,太阳的这种突发性的 高能粒子现象,通常称作为太阳质子事件,能量大于0.5Bev的为相对论性事件,能量小于0.5Bev的为非相对论性事件,本文所讨论的是能量大于10Mev的,能引起极冠吸收(PCA)的质子事件。当这种高能带电粒子流进入日地空间时,要受到行星际空间磁场的调制,形成所谓的质子事件东—西不对称效应⁽¹⁾,并导致一系列地球物理效应,致使短波通讯品质下降,甚至完全中断。因此,对太阳质子事件的预测,可为有关部门提供有用的信息;另一方面,由于它是一种高能耀斑现象,因此受到普遍重视,并对粒子加速机制、粒子在行星际空间的传播、粒子间的相互作用以及粒子与磁场的作用等,进行了系统的研究,提出了一些模型并给以合理的解释,从而使得太阳物理、空间物理、地球物理有机的结合在一起。本文侧重于质子事件所引起的地球物理效应,试图从太阳微波爆发资料探求与质子流强度之间的关系,从而能比较及时、比较可靠的预测质子流强度,进而对PCA事件作出较高置信度的预报。

1982年4月26日收到。

分 析 处 理

随着空间事业的迅速发展,要求对质子事件的详尽了解日益迫切,因此,自第20太阳活动周以来,相继发射了专门用来探测具有一定能量范围的质子流强度的飞行器,并随着探测器灵敏度的不断提高,使得检测到的质子事件数大为增加,为质子事件的研究提供了有利条件。

1. 时段及资料来源

为了能够较完整的得到所需资料,故所考虑时段为67年—74年期间。67年—69年的质子事件取自质子事件一览表^[2],其余则取自S.G.D,而对应耀斑及射电爆则取自S.G.D.^[5]

2. 事件的证认

根据质子事件的不同特征,可以用不同的方法对质子事件进行分类,例如可按质子流的传播速度来分类^[3],也可按质子流强度来分类,即S—S分类^[4]。由于S—S分类将PCA事件的级别,在能量大于10Mev情况下,按其质子流强度分档,这样既使得PCA事件定量化,又使它与微波爆之间的相关分析比较方便,所以我们采用S—S分类法,并根据S—S分类法对PCA事件的规定,在选取质子事件时,只选用能量大于10Mev的‘0’级以上的质子事件。对于具有相应耀斑和射电爆的、持续期较长的质子事件,如果质子流量出现几个峰值,则事件数就以峰数计。

考虑到我台现有的观测手段以及今后的应用方便,对于对应的射电微波爆,仅选取波长3cm附近(8800MHz—9400MHz)与10cm附近(2695MHz—3750MHz)的资料。为了在处理过程中尽可能保持射电爆资料内部一致性以及减少由频差所引起的误差,我们主要选用SGMR射电天文台和MANI天文台的8800MHz与2695MHz的爆发资料。在这两台站没有爆发资料的情况下,则选取其它台站相近波段上的资料。与质子事件对应的射电爆资料根据下列原则证认。从耀斑极大到检测到质子流之间有一滞后时间,一般从几分钟、几十分钟到1500多分钟,这种不同的滞后期与耀斑所在活动区的具体物理条件以及该活动区所在日面上的位置有关。因此,凡是在质子事件最长滞后期以后出现的耀斑则不被考虑;同时,由于伴随有质子流抛射的耀斑一般都是高能耀斑,故在相应时段里若同时存在几个耀斑,则认为其级别高的即为相应的质子耀斑;此外还参考紫外辐射增强、X射线爆、射电微波Ⅵ型爆等征兆作为佐证。对应耀斑确定后,再找出对应射电爆就比较容易。因为耀斑极大和射电爆峰值几乎是同时现象,但若在对应时段里有几个耀斑,且级别都差不多,则相应的射电爆就视其频谱是否呈U型谱,可以认为呈U型谱的射电爆即是与质子事件对应的射电爆,由此,在级别差不多的耀斑中可以证认出对应于质子事件的耀斑,所以耀斑、射电爆和质子事件之间,基本上可以互相验证。根据上述原则,在67年—74年期间,我们考证了54个质子事件,但能得到完整射电爆资料的只有到73年为止的32个质子事件,其中5个属于边缘事件应予以剔除,因此在相关分析中实际能使用的只有27个质子事件。见表1。

表 1

质子流强度与微波爆参数

参 数 编 号	$\ln n_p$ (质子流强度对数)	$\ln E$ (能量密度对数)	γ (峰值谱斜率)
1	6.9226	12.6559	2.8829
2	4.7449	10.9682	0.9688
3	5.8690	9.3742	-0.0057
4	4.0000	8.5059	-0.0393
5	3.4720	9.1442	0.3374
6	4.4853	8.5659	-0.1539
7	2.6879	9.6928	0.3894
8	2.3125	4.9199	-0.0005
9	2.7213	7.6497	-0.0004
10	3.1987	8.3502	-0.0001
11	4.5401	7.0901	-0.0097
12	4.1897	11.7032	0.6880
13	2.9549	5.0285	0.0125
14	5.5835	11.1191	0.7453
15	5.2095	10.5251	1.0319
16	3.8649	10.9644	0.0999
17	7.0656	11.6767	1.1138
18	3.9396	9.6918	0.2539
19	3.6839	11.0801	1.1188
20	3.0445	6.7719	0.0012
21	6.9764	10.7780	0.0737
22	10.0442	12.8847	0.2398
23	9.0279	12.0682	4.7502
24	8.1702	13.0334	3.7838
25	3.7136	6.2126	0.0298
26	3.8544	10.9660	1.7497
27	3.2581	7.2808	0.0008

3. 回归分析

在射电微波爆与质子流强度的相关分析中, 射电微波爆参数可分成单频参数与多频参数二大类, 单频参数基本上又可分成三类: 时间参数、强度参数以及时间和强度相结合的复合参数, 而多频段情况, 则还可考虑它们与峰值流量谱有关的参数。考虑到质子事件是个高能现象, 因而质子流强度理应与对应射电爆的爆发能量密度 $E = \int_0^T S dt$ 有某种相关, 其中 S 为爆发分量的瞬时流量密度、 T 为爆发持续时间。分别对质子流强度 n_p (质子/cm² · 立体角 · 秒) 与能量密度 E (10⁻²² 焦耳 · 米⁻² Hz⁻¹) 取自然对数, 并作散点图得到图 1。图中不同符号表示质子耀斑在日面上的不同位置。由图 1 可见, 在 27 个资料点的 $\ln n_p$ 与 $\ln E$ 之间基本上呈线性关系, 即:

$$\ln n_p = a' + b \ln E$$

或

$$n_p = aE^b; \text{ 其中 } a' = \ln a$$

作回归分析, 得到表 2 中的结果。

表 2 微波爆参数与质子流强度的相关分析

参 数	相 关 性					相关系数检验	
	a	a'	b	R	σ	N-2	$\alpha=0.01$ 时的 显著相关值
能量密度E	0.28	-1.27	0.63	0.73	1.43	25	0.487
峰值谱斜率 $\gamma(>0.03)$	33.0	3.49	1.13	0.92	0.75	11	0.684

表中a、a'为常数项, b为回归系数, R为相关系数, σ 为剩余标准差, N为事件数而 α 为相关的显著水平, α 愈小显著程度愈高。这里 $N-2=25$ 时, $\alpha=0.01$ 的水平上达到显著程度的最小值为0.487, 而 $R=0.73$, 大于0.487, 所以 $\ln n_p$ 与 $\ln E$ 显著相关, 这结果与北京大学吴鑫基等人, 于1978年在上海中国天文学会代表会议上所作报告的结果一致。但按S—S分类法预测质子流强度, 其精度不算高。

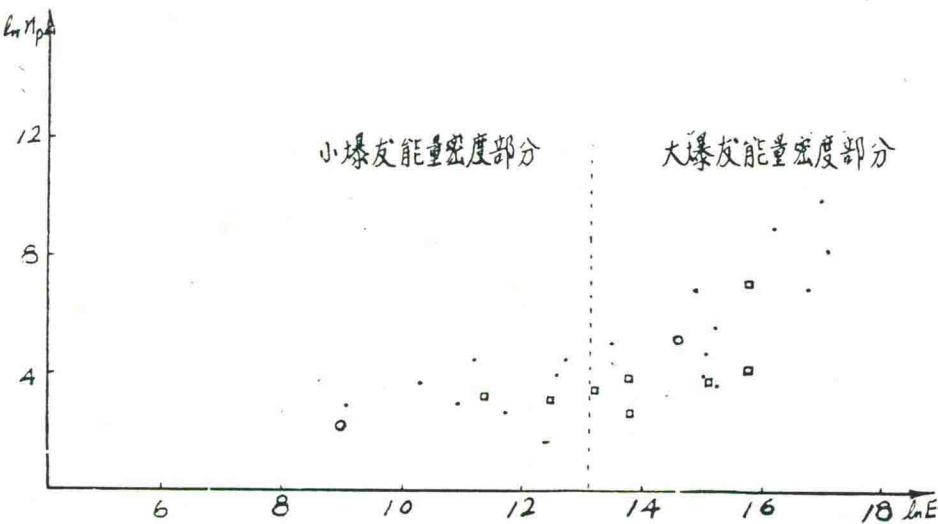


图 1 质子流强度对8800MHz上爆发能量密度的回归

- —中径距 0—30°W(或E)
- —中径距30—90°W
- —中径距30—90°E

另一个爆发参数则是8800MHz和2695MHz之间的峰值流量谱的斜率 $\gamma = \Delta s / \Delta f = (S_3 - S_{10}) / (f_3 - f_{10})$, 其中 S_3 、 S_{10} 分别为3cm、10cm波段附近的爆发峰值流量密度, f_3 、 f_{10} 分别为3cm、10cm波段的相应频率。对27个事件作 $\ln n_p \sim \gamma$ 的回归图如图2, 发现在 $\gamma \lesssim 0$ 的部分, 资料点几乎重叠在一起, 另外有几点比较弥散; 而在 $\gamma > 0.03$

的部分，由于有三个事件的质子流强度是若干个爆发的综合贡献，故不予考虑，因此这一部分就只有13个事件，这13个事件的 $\ln n_p \sim \gamma$ 的关系，如图2所示呈好的线性关系，即可表示成：

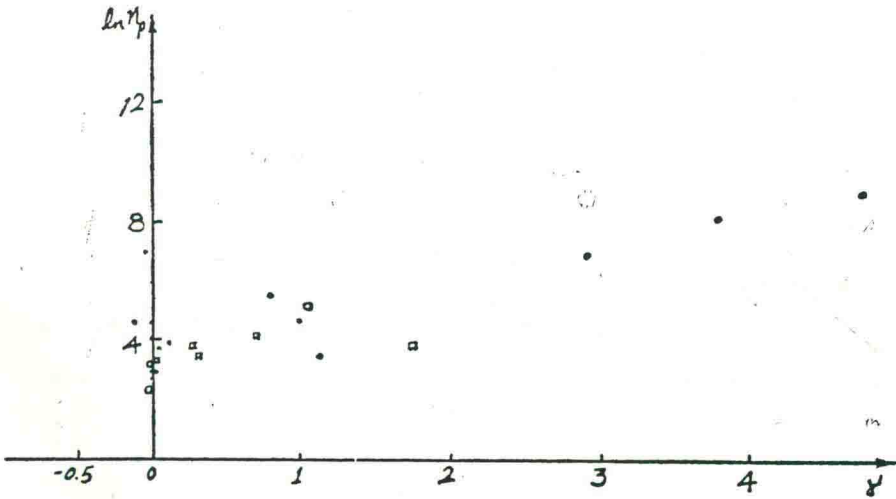


图2 质子流强度对峰值流量谱斜率的回归

$$\ln n_p = a' + b\gamma$$

或

$$n_p = ae^{b\gamma}$$

这13个事件的 $\ln n_p \sim \gamma$ 的回归分析结果也列于表2中。

如表2所见，在 $\gamma > 0.03$ 部分， $\ln n_p \sim \gamma$ 的线性相关经显著性检验，在1%的置信水平上是高度显著相关的，且其预测精度要比用能量密度相关约高一倍。

讨 论

1. 由图1可知，质子事件的产生似乎存在着一个对应射电微波爆发的能量密度阈值，在3 cm波段附近，该阈值约为 $9000 (10^{-22} \text{ 焦耳} \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1})$ ；而在质子流强度与射电爆发能量密度相关分析中，二者之间呈好的线性相关。这说明质子事件的产生既要求对应射电爆具有一定的能量密度，且其级别又随着对应射电爆的能量密度的增大而增大。

2. 如果将图1按能量密度分档，即： $9,000 \leq E < 600,000$ 为一档， $E > 600,000$ 为另一档，则 $\gamma \leq 0$ 的点几乎都落在低爆发能量密度档，而 $\gamma > 0.03$ 的点全部落在高爆发能量密度档。因此，对于质子事件似乎又可按微波爆发能量密度分成为对应于低爆发能量密度的A类事件，以及对应于高爆发能量密度的B类事件二种类型。

3. 根据上面的讨论，对质子流强度可建立下列判据：

A类事件：要用射电爆的大小来判断有无对应的质子事件是非常困难的，更不用说预测其质子流强度了。而这种A类事件所对应的射电爆发能量密度属于中低水平，因此如果按照低爆发能量密度来预报A类事件，那就会产生极大的虚报，从而使得这种预报

成为毫无意义,但所幸的是这类事件所对应的微波爆峰值流量谱斜率 γ ,在3 cm和10cm附近出现反常,也就是 $\gamma \lesssim 0$ 。因此对这类事件我们可以给出一个粗略的判据,就是:当 $9,000 \leq E < 600,000$ 且 $\gamma \lesssim 0$ 时,则能量 ≥ 10 Mev的质子流强度多半位于10—100(质子/cm²·立体角·秒)之间。

B类事件:在3 cm波段附近, $E > 600,000$ 的微波爆所对应的质子事件。质子流强度与3 cm、10cm波段附近的峰值流量谱斜率 $\gamma (> 0.03)$ 高度线性相关,因此可表示为:

$$n_p = 33.0e^{1.13\gamma}$$

剩余标准差 $\sigma = 0.75$ 。因此按S—S分类法,预报精度为0.65级时,报准率可达95%。所以对B类事件,用 γ 来预测质子流强度还是一个比较理想的参数。

4. 尽管上述讨论中给出了具有一定精度的统计结果,但我们仍然清醒的认识到,要想利用射电微波爆资料预报质子流强度,必然会面临两个不利因素,一是日面背后活动区抛射的质子流有可能到达地球附近引起PCA事件,而其对应的射电爆却观测不到;二是虽能观测到对应于日面东半球质子耀斑的射电爆,但耀斑抛射的质子流由于行星际磁场的扇形结构,可能永远到达不了地球。因此,射电微波爆与质子流强度的相关分析和其它任何预报一样,都不可避免的会有虚报和漏报,所以都是一种概率性的预报,而所谓的预报精度也都是相对而言的。因此我们所强调的乃是统计量之间的规律性以及这种规律的强弱程度。至于上述的统计结果,由于资料不够完整以及处理方法的不够完善,不可避免的会带来一些局限性,因此分析过程中所揭示的统计量之间的规律性,还有赖于今后实践过程中的进一步检验。

A CORRELATION ANALYSIS BETWEEN RADIO MICROWAVE BURSTS AND PROTON EVENTS

Zhou Shu-rong, Liu Yan, Wu Hong-ao

ABSTRACT

In this paper, 27 solar proton events with corresponding radio bursts at 3cm and 10cm wavelength during the period 1967~1973 have been analysed. It is found that a threshold of energy density of bursts at 3cm may be existed for proton events, it is about $9000(10^{-22} \text{JM}^{-2}\text{Hz}^{-1})$. According to the energy density of the bursts at 3cm, the proton events may be classified into two sorts, one is the lower energy events and the other is the higher energy events. When $\Delta s/\Delta f \leq 0$, ($\Delta s/\Delta f$ is the slop

of the spectra of bursts at 3cm and 10cm), the associated proton events almost all fall into the lower energy part, otherwise into the higher energy part. The energy density of bursts at 3cm is also closely related to the proton flux intensity, but the correlation precision with the slope $\Delta s/\Delta f$ is two times as much as the one with energy density of bursts. Finally, it is suggested that the above mentioned result $\Delta s/\Delta f \leq 0$ for the moderate or small bursts will be useful for the prediction of proton events.

Reference

1. C.E. Fichtel et al., 1967 Ann. Rev. Astron. Astron. Astrophys., 5, 351.
2. Z. Švestka and P. Simon, 1975, Catalog of Solar Particle Events 1955~1969.
3. K. Sakurai, J. Geomagn. Geoelect., 14, 144 (1963).
4. Smart, D.F. and Shea, M.A., 1971 Solar Phys., 16, 484.
5. Solar-Geophysical-Data 1967. 5. ~1973. 9.