

1987 年日环食射电多波段联合观测的主要结果*

刘 炎

(中国科学院紫金山天文台)

纪 树 臣

(中国科学院云南天文台)

提 要

1987 年日环食时,我们用十多架射电望远镜在 0.86—21cm 波段的十个波长上进行了射电多波段联合观测,得到太阳在活动宁静年期间各种射电辐射的参数.本文介绍这次联测的主要结果:(1)得到各个波长上日面的射电掩食半径 R_i 和等效半径 R_{eq} 的值.其中 R_{eq} 比 E. Fürst (1980)^[6] 的统计值略低,而比 1968 年和 1980 年时我国的日全食射电观测的结果略高.(2)得到各波段日面射电辐射的等效高度 ($0.5—11 \times 10^4 \text{km}$) 和平均亮温度 ($0.9—13 \times 10^4 \text{K}$) 以及射电辐射的等效温度随等效高度的变化.(3)得到食甚时各波段的剩余流量百分比以及日面亮度分布具有临边增亮特征的定性结论.(4)得到短厘米波段上日面亮度的分布:在 0.86、2.0、2.56 和 3.2cm 波长上都是临边增亮,增亮的幅度为 5—20%,增亮区域在日面光学边缘内侧 $0.8—1.0R_\odot$ 范围内,环带的宽度约为 $0.03—0.15R_\odot$.而在 1.46cm 波长上,则得到临边昏暗的结果.(5)证认了日面上与黑子、谱斑、日珥等光学客体等相对应的一些射电局部源,计算了这些局部源的角径、流量、射电亮温度及离日面高度等主要参数及其随波长的变化.(6)分析了某些局部源的流量谱、晕辐射标度以及辐射机制等问题.(7)还观测到日面南部的某些大暗条具有明显的吸收效应.所有这些结果都为宁静太阳辐射和缓变源辐射的理论研究提供了重要的实测资料.

一、引 言

文[1]已对 1987 年日环食射电多波段联测的概况和资料分析方法要点作了介绍.这次观测共有十多架射电望远镜,在厘米波段的近十个波长上取得了良好的观测资料.在观测之后,我们对资料进行了联合的分析研究.关于各波段具体的观测概况和所得的结果,可分见本文集中的有关工作报告;而在本文中,我们则对由联测所得的主要实测结果进行综合的分析研究,以得到各种射电太阳的参数随波长而变化(即频谱)的资料.

总的说来,射电日食观测的目的乃在于利用日食所提供的高空间分辨率时机,去观测研究日面上射电辐射特征的细节结构.而这些细节结构则是指两个方面的含义:一是指日面总辐射的特性,例如太阳射电半径大小,日面亮温度分布状况等;一是指日面局部区域的辐射特性,即日面活动区——射电局部源的有关参数等.

以下我们就主要从这两个方面来作分析讨论.

* 本工作是中国科学院数理化学局支持的项目,参加的单位 and 波段见本文中的表 1.

二、日面总辐射的特性

日面射电总辐射的物理特性,主要有以下这些参数:

1. 日面的平均射电半径

这是日面射电辐射特征的基本参数之一。表 1 中汇总列出了各波段射电掩食半径 R_λ 和射电等效半径 $R_{e\lambda}$ (其定义见文[2]) 的值 (由第一接触和第四接触所得的平均值), 而图 1 则画出了 R_λ 和 $R_{e\lambda}$ 随波长 λ 变化的图。其中米波段的资料取自文[3], 我们把其观测曲线上相应于第一次下降时刻月面边缘离日心的距离作为掩食半径 R_λ 的近似值, 因此这几个数据仅具有参考的意义。

由图 1 可看出, 各波段 R_λ 的资料较为弥散, 而 $R_{e\lambda}$ 的资料, 除了 $\lambda = 3.2\text{cm}$ 的外, 其内符合程度都比较好, 而且米波段的 R_λ 也在合理范围之内。

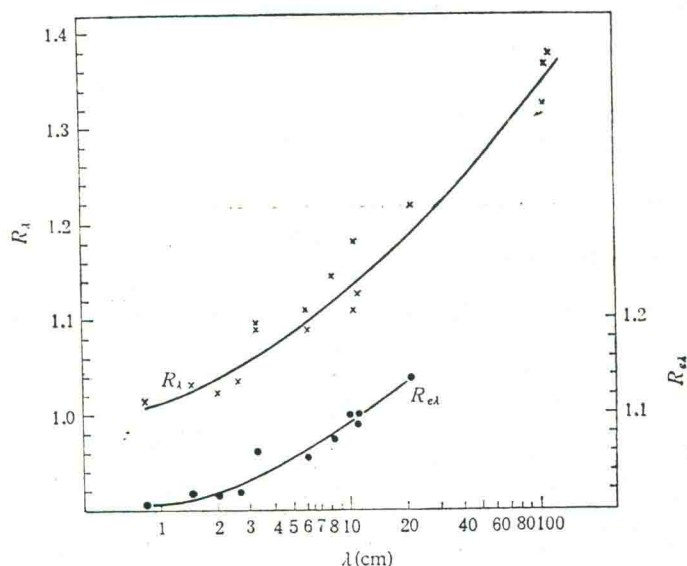


图 1 由日环食观测所得到的各波段的射电太阳掩食半径 R_λ 和等效半径 $R_{e\lambda}$ 。

图 1 中 $R_{e\lambda}$ 的误差, 在 $\lambda \leq 6\text{cm}$ 处, $\sigma \approx \pm 0.01R_\odot$, 而在长厘米波段上, 则稍大一些。

作为比较参考, 表 1 中还给出了 1968 年 9 月 22 日在新疆和 1980 年 2 月 16 日在云南的射电日全食观测结果^{[4],[5]}。由表 1 可见, 本次观测的掩食半径一般都小于前两次, 但等效半径却大于前两次。其原因还有待于进一步分析。

2. 射电太阳的形状

由实测资料和理论研究可知, 射电太阳的日面形状实际上不是圆形, 而是椭圆形, 这在 $\lambda > 6\text{cm}$ 波长上更为明显。而在日食观测中, 各观测点上所见到的月面掩食日面的方

表 1 各波段的太阳射电半径

序 号	波 长 $\lambda(\text{cm})$	观测单位	1987.9.23.		1968.9.22.		1980.2.16.	
			R_1	R_{e1}	R_1	R_{e1}	R_1	R_{e1}
1	0.86	紫金山天文台	1.014	(1.007)*			1.014	1.007
2	1.46	上海科技大学	1.030	1.016				
3	2.0	北京师范大学	1.024	1.014			1.040	1.013
4	2.56	武汉大学	1.035	1.019				
5	3.2	紫金山天文台	1.094	1.060			1.070***	1.040
6	3.2	南京大学	1.09		1.070	1.040		
7	3.2	新乡 22 所	1.09					
8	5.9	北京天文台	1.09					
9	6.0	上海天文台	1.106	1.061				
10	8.2	云南天文台	1.145	1.076			1.121	1.067
11	10.6	云南天文台	1.181	1.089			1.270	1.070
12	10.6	北京天文台	1.110	1.100				
13	11.1	紫金山天文台	1.126	1.098	1.220	1.070		
14	21.1(3m)	云南天文台	1.249	1.114	1.300**	1.085	1.320	1.090
15	21.1(10m)	云南天文台	1.160	1.083				
16	103.4	云南天文台	1.311					
17	107.1	云南天文台	1.325					
18	111.1	云南天文台	1.366					
19	115.4	云南天文台	1.378					

说明:

(1) 本表中的 R_1 和 R_{e1} 均以光学太阳半径 $R_\odot$ 为单位 ($R_\odot = 959''6$).

(2) 1987 年 9 月 23 日的的数据是第一接触和第四接触资料的平均值,误差为 $\pm 0.005R_\odot$.

(3) 第二列中第 14 项是指云南天文台 3m 天线的观测,而 15 项则是指云南天文台 10m 天线的观测. 本文中以下各表均指此意.

(4) * 1987 年无数据,取 1980 年的. ** 为北京天文台的观测. *** 为云南天文台的观测.

(5) 第 16—19 项是云南天文台米波段频谱仪的观测资料.

向是不同的,也就是说,表 1 中的射电半径,对于不同的观测点,甚至在不同观测点上由第一接触和第四接触所得到的,都是指日面不同方位上的向径. 因此,如果把不同观测点上,由不同接触时所得到的射电半径,直接加以比较,甚至作频谱研究,显然会引入较大误差. 为此我们需得对 R_1 和 R_{e1} 作日面形状的改正.

文[6]综合了 1980 年以前的各种实测资料,得出在各不同波段上日面赤道方向(0°)、极向(90°)和 45° 方向上的等效射电向径,也就是给出了不同波长上日面椭圆的形状. 根据这一资料,我们结合各观测点在第一接触和第四接触时的切点方位角,对各波段的 R_{e1} 值分别作了日面形状的改正,计算了各波段上不同方位上的向径:

$$R_{e1}(0^\circ) = a, R_{e1}(90^\circ) = b \text{ 和 } R_{e1}(45^\circ)$$

其向径的图象见图 2.

计算结果列在表 2 中,表中还给出了各波段日面椭圆的离心率 e . 为了进行比较,表 2 中还列出了由文[6]所得到的赤道、极向和 45° 方向上的等效射电半径;以及由文[2]给出的未作改正的 R_{e1} 值,文[2]的数据是由 1970—1972 年在日食观测时实测得到的.

由表 2 的资料所作的图见图 3.

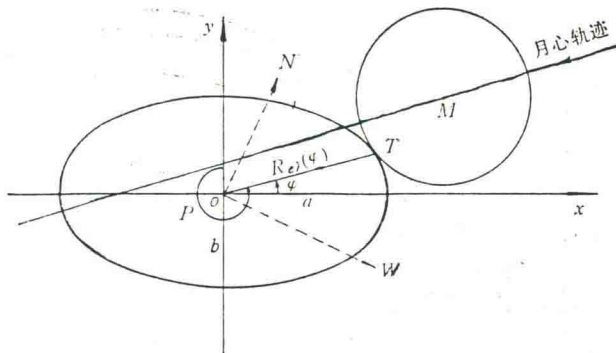


图 2 掩食方向图.

图中 o 为日面中心; x, y 轴分别为日面的赤道和极轴方向; N, W 为日面北点和西点方向. M 为月心位置, T 为切点位置, P 为由日轴起算的切点方位角, 而 φ 为由赤道起算的方位角.

表 2 各波段等效射电半径的实测值与统计值的比较

序号	波 长 (cm)	观测单位	切点方位角* (°)		1987.9.23.实测值			统计值 ^[6]				1970— 1972 ^[2] 平均值
			第一接触 $ \varphi_1 $ *	第四接触 $ \varphi_4 $ *	$a(0^\circ)$ (赤道)	$b(90^\circ)$ (极向)	$R_{e2}(45^\circ)$ (45°)	e (离心率)	$a(0^\circ)$ (赤道)	$b(90^\circ)$ (极向)	$R_{e2}(45^\circ)$ (45°)	
1	0.86	紫金山天文台	19	19	(1.007)			0	1.020	1.014		1.022
2	1.46	上海科技大学	19	21	1.016			0	1.025	1.017		1.028
3	2.0	北京师范大学	7	25	1.014			0	1.030	1.018		1.038
4	2.56	武汉大学	22	12	1.019			0	1.034	1.020		1.043
5	3.2	紫金山天文台	19	19	1.062	1.043	1.053	0.185	1.040	1.022	1.034	1.048
6	3.2	南京大学	19	19	—	—	—	0.185	1.040	1.022	1.034	1.048
7	3.2	新乡 22 所	17	16	—	—	—	0.185	1.040	1.022	1.034	1.048
8	5.9	北京天文台	7	25	—	—	—	0.250	1.069	1.035	1.061	1.062
9	6.0	上海天文台	19	21	1.065	1.033	1.047	0.254	1.070	1.035	1.062	1.062
10	8.2	云南天文台	39	9	1.088	1.027	1.058	0.332	1.095	1.033	1.083	1.072
11	10.6	云南天文台	39	9	1.109	1.009	1.060	0.414	1.123	1.022	1.098	1.076
12	10.6	北京天文台	7	25	1.101	1.002	1.053	0.414	1.123	1.022	1.098	1.076
13	11.1	紫金山天文台	19	19	1.109	1.004	1.058	0.424	1.126	1.020	1.100	1.077
14	21.1(3m)	云南天文台	39	9	1.141	0.930	1.051	0.597	1.172	0.940	1.100	1.086
15	21.1(10m)	云南天文台	39	9	1.102	—	—	0.597	1.172	0.940	1.100	1.086
16	109	云南天文台	39	9	—	—	(1.345)	—	—	—	—	—

* $|\varphi_1|$ 和 $|\varphi_4|$ 是由赤道方向起算的切点方位角(见本文图 2)之绝对值.

由表 2 和图 3 我们可以看到, 我们实测所得到的各波段的射电等效半径值, 小于国外历次观测的统计值. 这可能是与 1987 年 9 月太阳的活动性还处于极小期附近(刚开始上升)有关.

3. 射电辐射的有效高度 $h_{a\lambda}$

由 $R_{e\lambda}$ 减去日面的光学半径 R_0 , 就能得到由光球表面起算的射电辐射的等效高度. 由于日面的形状不是正圆形的, 因此我们仅计算了赤道方向各个波段的等效高度 $h_{a\lambda}$, 列

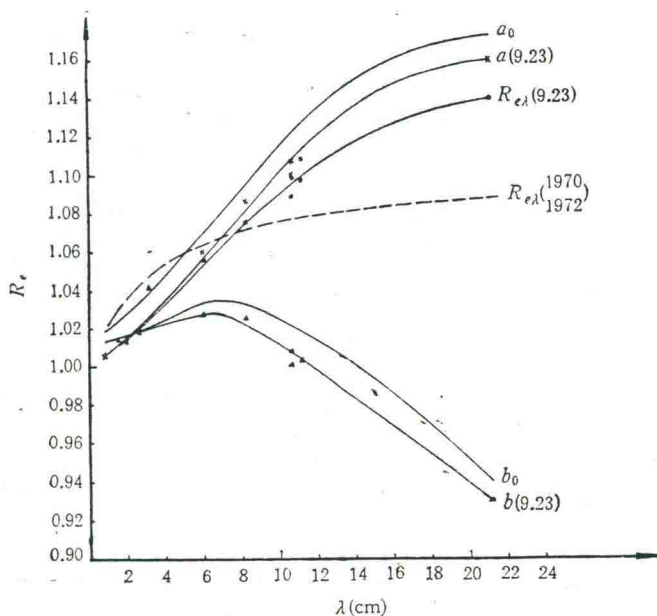


图3 日面不同方位的向径。

图中 $R_{e\lambda}$ 为由 1987 年 9 月 23 日日食观测得到的射电等效半径。 $a(9.23)$ 和 $b(9.23)$ 为由 $R_{e\lambda}$ 归算所得的赤道方向和极轴方向的等效半径。而 a_0 和 b_0 则由文[6]所得的等效半径。 $R_{e\lambda}(1970-1972)$ 是由文[2]所得的统计结果。

在表 3 中, $h_{a\lambda}$ 随 λ 的变化见图 4。由图可以看出, 在 1—20cm 波段范围内, 射电辐射主要产生于光球层之上 10^4-10^5 km 之间的低日冕层次之中。

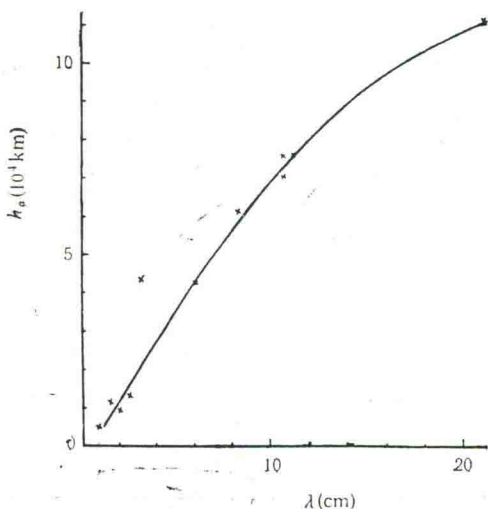


图4 射电辐射的有效高度 h_a 随波长的变化。

4. 日面的平均亮温度 $\bar{T}_{b\lambda}$

由各波段的日面辐射总流量值 S_λ 和相应的射电半径 (a, b), 我们即能算出日面的平均亮温度 $\bar{T}_{b\lambda}$ 。根据美国 SGMR、日本 TYKW 和加拿大 OTTA 所发布的资料(见文[1]中的表 4), 并作内插计算, 我们得到 1987 年 9 月 23 日各个观测波段上的 S_λ , 并由此计算了各波段的全日面平均亮温度 $\bar{T}_{b\lambda}$, 也列在表 3 中, 相应的图则画在图 5 中。由图可以看出, $\bar{T}_{b\lambda}$ 随 λ 增加而迅速上升。

为了进行比较, 在图 5 中还画出了在太阳活动极大年和极小年时, 日面平均亮温度统计值(图中虚线), 其资料来源于文[7]。由图可以看出, 我们的数据处在合理的范围之内; 只是在 3cm 到 10cm 波段的范围内, 还低于文[7]的极小年的值。这有可能是由于我们的观测误差所造成的; 但也有可能是[10]中的数据取自于 1971 年以前的早期资料, 那时关于太阳射电流量值的精确绝对对标问题

表 3 各波段的日面平均亮温度和辐射等效高度

序 号	波 长 (cm)	观测单位	等效半径		等效高度 h_{e2} (10^4 km)	太阳流量值			日 面		
			赤 道 a	极 向 b		总流量 S_1 (s. f. u.)	宁 静 ₁ S_{011} (s. f. u.)	宁 静 ₂ S_{012} (s. f. u.)	立体角 $\Omega_{\odot}$ (10^{-2} sr)	平 均 T_{E2} (10^4 K)	宁 静 T_{01} (10^4 K)
1	0.86	紫金山天文台	(1.007)		0.49	~2347			6.90	0.91	~0.91
2	1.46	上海科技大学	1.016		1.11	~790			7.03	0.92	~0.92
3	2.0	北京师范大学	1.014		0.97	477		443	7.00	0.99	~0.93
4	2.56	武汉大学	1.019		1.32	348		325	7.07	1.17	~1.09
5	3.2	紫金山天文台	1.062	1.043	4.31	264	246	248	7.54	1.30	1.22
6	3.2	南京大学	/	/	/	264	246	248	/	/	/
7	3.2	新乡 22 所	/	/	/	264	246	248	/	/	/
8	5.9	北京天文台	/	/	/	112	95	101	/	/	/
9	6.0	上海天文台	1.065	1.033	4.52	110	94	100	7.49	1.92	1.74
10	8.2	云南天文台	1.088	1.027	6.12	83	65	70	7.61	2.64	2.22
11	10.6	云南天文台	1.109	1.009	7.59	72	54	60	7.62	3.82	3.18
12	10.6	北京天文台	1.101	1.002	7.03	72	54	60	7.51	3.90	3.25
13	11.1	紫金山天文台	1.109	1.004	7.59	71	53	59	7.53	4.18	3.47
14	21.1(3m)	云南天文台	1.160	0.930	11.14	59	44	46.5	7.34	12.96	10.22
15	21.1(10m)	云南天文台				59	44	46.5			
16	109	云南天文台	(1.345)		(24.01)	12.5	9	(9)	(12.31)	(43.7)	(31.5)

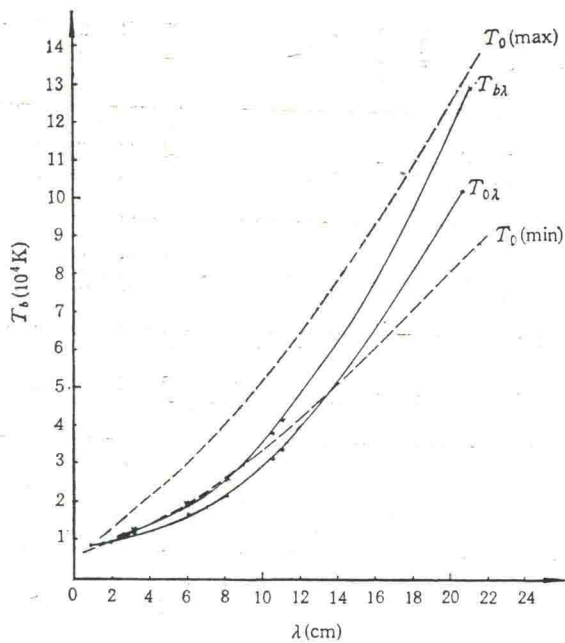


图5 全日面平均亮温度 $T_{b\lambda}$ 和宁静太阳平均亮温度 $T_{0\lambda}$.
 $T_0(\max)$ 和 $T_0(\min)$ 是文[7]中的太阳活动极大年和极小年时的全日面平均亮温度.

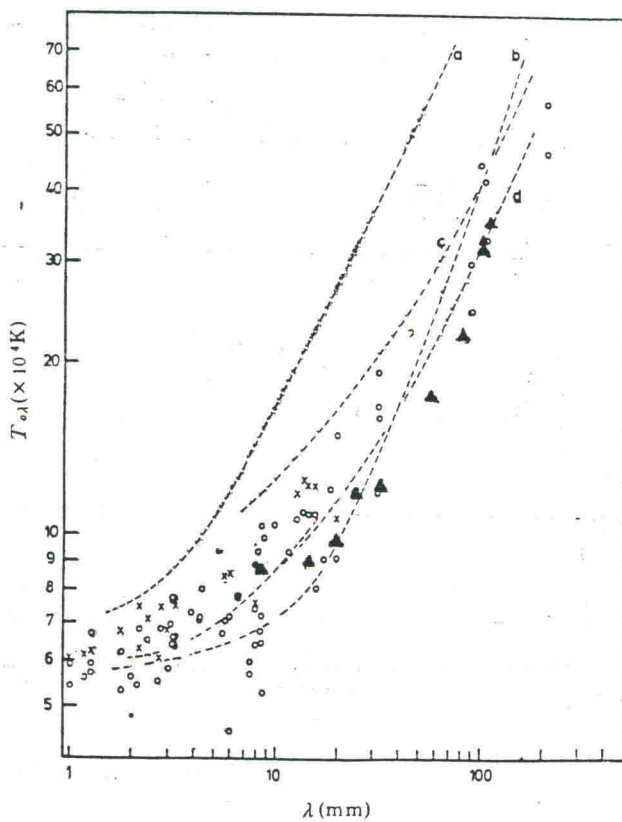


图6 宁静太阳的日面亮温度。
 本图引自于 E. Fürst^[6], 图中“▲”为1987年9月23日日食观测的结果.

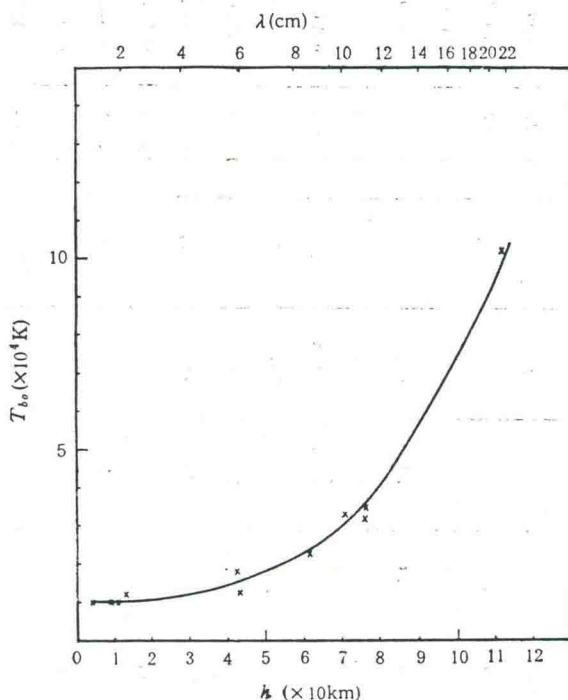


图7 低日冕区的等效亮温度随高度的分布。

尚未解决,因而误差较大。从我们各波段资料内部符合较好的情况看来,我们认为主要的原因还在于后者。

5. 宁静太阳的平均亮温度 $\bar{T}_{0\lambda}$

以上在计算 $\bar{T}_{b\lambda}$ 时, S_{λ} 中包含了日面缓变分量的辐射在内。而为了研究宁静太阳辐射的特征,还必须把这缓变分量分离出来。计算缓变分量的方法有好几种^[9],我们则取1986年中太阳射电流量的最低值 $S_{0\lambda}$ 作为宁静太阳辐射的分量,其值见表3和文[1]中的表4。由此算出的宁静太阳的平均亮温度 $\bar{T}_{0\lambda}$ 也列在表3中,相应的频谱图见图6。

E. Fürst 在文[6]中总结了1978年以前对各波段宁静太阳的测量结果,这些结果也画在图6中。现将我们的观测结果也画在图6中,可见在3—8cm波段的 $\bar{T}_{0\lambda}$ 值较低,但总的来说趋势是一致的,结果是合理的。

6. 低日冕中有效温度 $T_{e\lambda}$ 随高度的分布

由以上分析我们已经知道, $\bar{T}_{0\lambda}$ 表示在某一波长上日面宁静背景辐射的平均亮温度,而等效射电半径 $R_{e\lambda}$ 则表示射电辐射的等效高度。因此,作为一种粗略的估计,我们可以把 $\bar{T}_{0\lambda}$ 近似看作为在太阳大气中等效高度 h_e 处的某种等效温度 $T_{e\lambda}$ 。于是由 $\bar{T}_{0\lambda} (\approx T_{e\lambda})$ 和 R_{λ} 的关系,我们就可以得到低日冕中等效温度随高度分布的实测资料了。 $T_{e\lambda}-h_e$ 的图画在图7中,由图7可以看出:

(1) 1—20cm波段的射电辐射,主要来自于光球层之上1—10万公里高度的低日冕层次。

表 4 各波段食甚时射电参数

序 号	波 长 λ (cm)	观测单位	食 分 g	日 月 心 距 d	时 刻			未被掩食部分				平均射 电半径* $\bar{R}_r$	$\bar{R}_r - d$
					光 学 t_0 (UT)	射 电 t_r (UT)	时 间 差 $t_r - t_0$ (m.s.)	剩余流量 ΔS_0 (s.f.u.)	百分比 $\Delta S_0/S$ (%)	面积比 $\Delta A/A$ (%)	备注**		
1	1.46	上海科技大学	0.965	0.030	020558	020800	02 ^m 02 ^s	95.6	12.1	11.6	↗	1.021	0.991
2	6.0	上海天文台	0.965	0.030	020630	020710	0040	10.0	17.0	18.3	↘?	1.062	1.032
3	3.2	乌鲁木齐天文站	0.963	0.034	012501	012300	-0201	40.8	15.5	13.8	↗	1.034	1.000
4	0.86	紫金山天文台	0.943	0.074	020118	020200	0042	293.3	12.5	11.0	↗	1.014	0.940
5	3.2	紫金山天文台	0.943	0.074	020118	020120	0002	45.3	16.8	13.8	↗	1.034	0.960
6	3.2	南京大学	0.943	0.074	020120	020110	0010	45.0	17.1	13.8	↗	1.034	0.960
7	3.2	新乡 22 所	0.95	0.069	020151	020146	~ -05 ^m	42.2	16	13.8	↗	1.034	0.974
8	11.1	紫金山天文台	0.943	0.074	020118	015540	-0538	18.2	25.7	23.8	↗	1.100	1.026
9	2.0	北京师范大学	0.858	0.244	015052	014930	-0122	86.6	20.3	21.2	↘?	1.024	0.780
10	6.0	北京天文台	0.855	0.250	015045	~0150	~-0045	30.8	~28	24.6	↗	1.062	0.812
11	10.6	北京天文台	0.855	0.250	015045	011730	-0315	20.2	28	27.5	↗	1.098	0.848
12	2.56	武汉大学	0.85	0.260	015556	015500	-0056	55.7	16	22.4	?	1.027	0.767
13	8.2	云南天文台	0.536	0.888	014431	014520	+0149	50.2	59.6	58.9	↗	1.083	0.195
14	10.6	云南天文台	0.536	0.888	014431	014720	0249	43.8	60.9	59.1	↗	1.098	0.210
15	21.1(3m)	云南天文台	0.536	0.888	014431	015020	0549	35.2	62.9	59.2	↗	1.100	0.212
16	21.1(10m)	云南天文台	0.536	0.888	014431	015030	0559	35.3	63	59.2	↗	1.100	0.212

* $\bar{R}_r$ 数值取为表 2 中的统计值 $R_{eA}(45^\circ)$.

** ↗ 表示临边增亮, ↘ 表示有临边增亮趋势, ~ 表示有昏暗趋势, “?” 表示 $(\Delta S_0/S)$ 值似有疑问,

(2) 在这低日冕层中,射电辐射的等效亮温度由 10^4K 急剧地上升到 10^5K 。

三、食甚时的剩余流量和日面边缘亮度

1. 射电食甚

在食甚时,由于太阳的射电半径大于月面半径,因此日面的露出部分依然有射电辐射。此时太阳的射电流量值称为剩余流量 ΔS_0 ,而 ΔS_0 与全日面总流量 S 的比值则称为剩余流量比。

显然, ΔS_0 及 $(\Delta S_0/S)$ 反映了日面边缘辐射的情况:如果日面边缘部分的亮度比中心部分高(临边增亮),或者有较强的局部源辐射,其值就高;反之其值则低。

局部源的辐射不仅要影响比值 $\Delta S_0/S$,还会影响到射电食甚的时刻。特别是日面边缘部分的局部源辐射,会使射电中心相对于光学中心产生较大的偏离,从而又使射电食甚的时刻与光学食甚时刻不一致。

表4列出了本次联测中各波段射电食甚的时刻,相应的光学食甚的时刻,以及时刻差。由表中可以看出,除了昆明和上海地区之外,射电食甚时刻一般都比光学的提前。对照文^{[8],[9]}中的日面光学图进行分析,可以认为南京地区的提前是由于食甚前后正好露放 No.101 黑子和 P3 谱斑的局部源;而北京地区的则是由于食甚前掩食 No.102 黑子和 P5 谱斑的局部源所引起的。

2. 日面边缘亮度的估计

表4中不仅列出了各波段实测的 ΔS_0 和比值 $\Delta S_0/S$,同时还列出了由计算所得的光

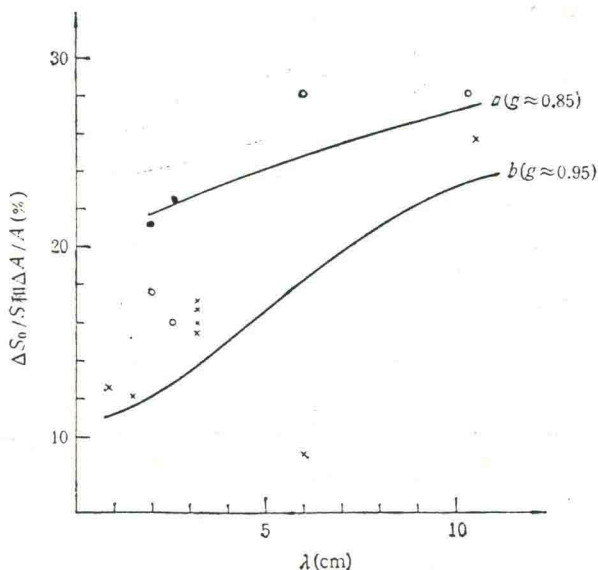


图8 各波段的剩余流量百分比 $\Delta S_0/S$ 。

图中曲线表示由均匀圆面模型算得的食甚时露出面积百分比 $\Delta A/A$ 。曲线 a 是食甚时食分 $g = 0.85$ 时的情况;“○”是实测的数据;而曲线 b 是 $g = 0.95$ 时情况,实测数据用“×”表示。

学食甚时日面露出部分面积 ΔA 与射电日面总面积 A 的比值。计算时把日面看作为是均匀亮度的圆面,而平均射电半径 $\bar{R}_r$ 的值取为表 2 中的统计值 $R_{ci}(45^\circ)$ 。显然,如果 $(\Delta S_0/S) > (\Delta A/A)$, 则日面边缘的平均亮度高于中心部分的;反之,则是临边昏暗的日面亮度分布。这里所作的仅是对日面亮度分布一种定性的分析。由于仅是作定性的分析比较,为此我们把日面作为圆面,而不是作为椭圆面来计算,不至会引起太大的误差。

图 8 中画出了各波段的 $(\Delta S_0/S)$ 和 $(\Delta A/A)$ 值随波长变化的图。为了便于比较,我们根据食分 g 的不同把资料分成两组,一组的 $g = 0.94-0.96$, 另一组的 $g = 0.85-0.86$ 。由图可以看出,大部分波段上的实测值 $(\Delta S_0/S)$ 大于计算值 $(\Delta A/A)$, 因此我们即可得到在 $0.86-11\text{cm}$ 波段上,日面的亮度分布都是临边增亮的结论。但其中有三个波段,其实测的 $(\Delta S_0/S)$ 值偏低,其原因还有待于进一步分析研究;据初步估计,可能主要是由观测误差引起的。

射电食甚时刻、食甚时剩余流量以及前面所述射电半径等参数,都是我们分析研究宁静太阳辐射特性,特别是日面亮度分布状况的主要参数。

四、日面的亮度分布

将归一化食变斜率曲线作大跨度的滤波平滑之后,即能得到宁静太阳背景的食品变斜

表 5 短厘米波段的日面亮度分布 $B(r)$

序 号	波 长 (cm)	单 位	日面增亮(昏暗)区				说 明
			接触数	最大幅度 (%)	环带半宽 (Δr)	位 置 (日心距 r)	
1	0.86	紫金山天文台 (PMO)	1	—			在日面光学边缘处有 5% 增亮,带宽 $\sim 0.1R_\odot$
			2	—			
			3	—			
			4	5	0.1	1.0	
2	1.46	上海科技大学	1	不规则起伏 明显临边昏暗 明显临边昏暗 不规则起伏			临边昏暗
			2				
			3				
			4				
3	2.56	武汉大学 (WHU)	1	—			在日面光学边缘有 20% 明锐增亮,带宽 $0.03R_\odot$
			2	20	0.03	0.99	
			3	20	0.03	0.99	
			4	—			
4	3.2	紫金山天文台 (PMO)	a1	3	~ 0.1	0.7	a1 有干扰,结果不可靠 在日面 $0.9R_\odot$ 处有 $\sim 10\%$ 增亮,带宽 $\sim 0.15R_\odot$
			a2	10	~ 0.13	0.85	
			a3	12	~ 0.20	0.75	
			a4	10	~ 0.1	0.85	
			c4	12	~ 0.1	0.95	
5	3.2	南京大学 (NJU)	b1	~ 4	~ 0.3	0.6	有增亮趋势,结果较为弥散
			b2	~ 15	~ 0.16	0.85	
			b3	~ 4	~ 0.3	0.5	
			b4	—			昏暗?(有干扰)

率曲线(文[1]图1中的曲线(b))。然后再通过求解法或拟合法,即能求出宁静太阳辐射的日面亮度分布状况。这是本次日食观测,特别是短厘米波段观测的主要内容。

图9中画出了 $\lambda 0.86$ 、 1.46 、 2.56 和 3.2cm 四个波段五架射电镜的观测和分析结果。为了便于比较,我们将各波段的日面亮度分布曲线用同一比例画在一张图上。由四个不同接触得到的结果,分别画在(a)、(b)、(c)、(d)四张图上。图中横坐标是以日面光学半径 $R_{\odot}$ 为单位的日心距,纵坐标则是相对于全日面平均亮温度 $\bar{T}_{b\odot}$ 归一的日面相对亮度 $B(r) = T_b(r)/\bar{T}_{b\odot}$ 。在图9(d)中,对于紫金山天文台 3.2cm 波段,还画出由两种不同分

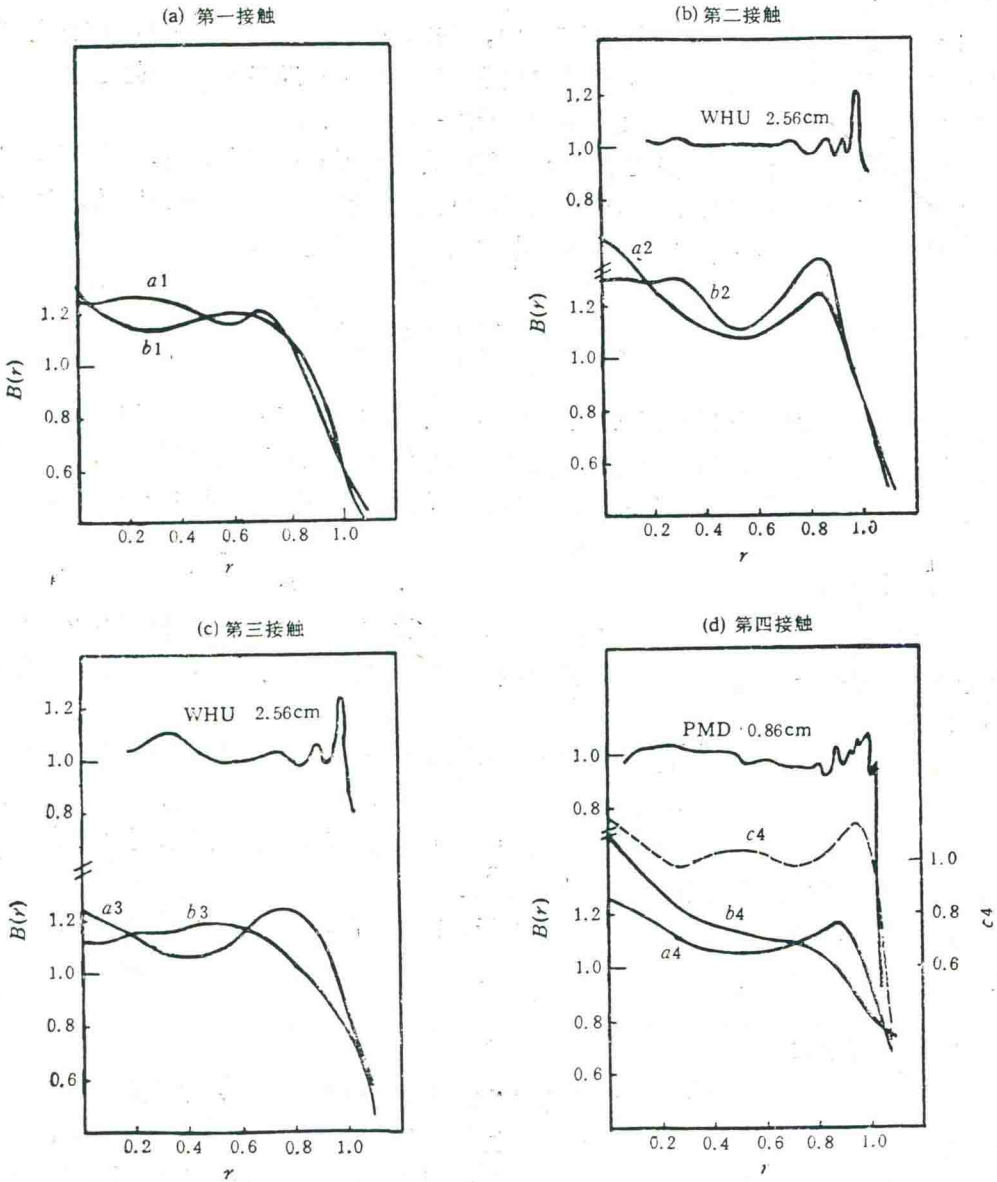


图9 各波段的日面亮度分布。

曲线 a 、 c 和 b 分别表示紫金山天文台和南京大学 3.2cm 的结果。 a 、 b 是用核函数变换的方法得到的。WHU和PMO则分别表示武汉大学和紫金山天文台 2.56cm 和 0.86cm 的结果。

析方法^[10]所得的分布曲线 a_4 和 c_4 。

由图 9 可以看出,由这几个波段、四个接触所得的结果(除 b_4 外)都是临边增亮的趋势。表 5 中列出了由图 9 所得的临边增亮分布的参数。

对各波段进行比较我们可以看出,在 2.56cm 波段上的增亮最为明锐,0.86cm 上次之,且有不规则起伏。至于 3.2cm 波段上,增亮区较为弥散,增亮区也靠近日面中心,而且由不同射电镜观测,不同接触所得的结果也不甚一致。不过紫金山天文台 3.2cm 的第四接触由两种不同方法所得的结果符合得还是较好的。至于这些差别的原因,估计主要是由观测的误差所引起的,当然也可能与日面上亮度分布的东西不对称性(例如日面局部源的影响)有关。

1.5cm 波段的分析结果也列在了表 5 中,与其它波段相反,是明显的临边昏暗趋势^[11]。几个短厘米波段的结论不同,这究竟是日面亮度分布确实如此,还是由于不同的观测或资料分析方法的误差所造成的,也有待于进一步探讨。

关于长厘米波段的日面亮度分布分析,将在其它的报告中再作讨论,在此不再赘述。

以上所得的各波段的日面射电半径、平均亮温度、食甚时的剩余流量以及日面亮度分布等结果,都是进而研究宁静太阳大气模型的基础性的实测资料。

五、射电局部源

由食变斜率曲线可以得到日面上各个射电局部源的有关参数。文[1]已对获得这些参数的方法作了简要说明,各个波段所得的结果也都已列在各自观测报告中。在本节,我们则对各个射电局部源的各有关参数的总特性和频谱特性作进一步的分析讨论。

1. 射电源概况

为了比对和讨论的方便,我们把 1987 年 9 月 23 日日面上各射电局部源的编号、相应的光学客体的编号及位置、所属活动区等主要情况列在表 6 中。其相应的光学图见文[8]和[12]。

根据 SGD 资料,在日食当天,日面上只有四个活动区,共有四个小黑子,五个谱斑。在日面的边缘有一些小日珥,而在日面的西北边缘外,还有一个凝聚区。此外日面上还有二十多个大小暗条。由于暗条为数甚多,而且大多数在日食过程中没有显示出明显的影响,因此在表 6 中只列出少数几个较大的暗条。

总的来说,1987 年 9 月太阳活动还处于相当宁静的时期,日面上的活动区不多也不大。射电局部源的辐射一般都是相当弱的^[12]。

2. 射电源参数

表 7 和表 8 中综合了由各个波段的观测所得的各个射电局部源的主要参数:角径 θ 和相应的立体角 $\Delta\Omega$ (单位是 10^{-8}Sr)、射电流量值 ΔS_{ν} 、亮温度 T_b 、距离光球面的高度 h 以及谱斑的晕辐射标度 $\bar{N}^2L$ (单位是 10^{23} 电子数 $^2/\text{cm}^5$) 表中按各活动区和各射电源分别给出这些参数的频谱资料。

对于日面西北的日冕凝聚区 C,云南天文台的米波观测也有明显的反映^[3],但表中未

表 6 1987 年 9 月 23 日日面射电源与对应光学客体编号表

序 号	射电源编号		对应光学客体						云南天文台观测日面位置 (0306 UT)			紫金山天文台观测位置 (0245UT)		
	联测统一	云南天文台	所属 SGD 活动区	客 体	云南天文 台编号	国内统一 黑子编号	紫金山天 文台编号	纬 度	中经距	卡林顿经度	纬 度	中经距		
1	I-1	VI	4855	中黑子	100	104	104	N13	E02	131	N14	E01		
2	-2	V		中谱斑	P3		—	—			—	—		
3	-3	VII		中谱斑	R4		4855	N13			N13	E06		
4	-4	IV		东北黑子	103	108	108	N34	E09		N34	E09		
5	II-1		4857	西黑子	101	106	106	S30	W56	192	S29	W58		
6	-2			西谱斑	P2		4857	S30			S30	W62		
7	-3			西日珥	W2		—	S38—48	—		—	—		
8	-4			西暗条	S1		S1	S09—17	W54—67		S18	W68		
9	III-1		4858	东南黑子	102	107	107	S20	E66	69	S21	E61		
10	-2			东南谱斑	P5		4858	S05	—		S22	E62		
11	-3			东南日珥	E2		—	S19	—		—	—		
12	-4			东南日珥	E3		E2	S32—37	—		S20	—		
13	-5			东南日珥	E4		E3		—		S35	—		
14	IV-1		4856	西南暗条	S4		S5	S39—43	W09—17	141	S43	W15		
15	-2			西南暗条	S5		S3	S39—52	W01—23		S60	W20		
16	-3			西南暗条	S6		S6	S36—42	E07—15		S39	E08		
17	V	III		西北谱斑	P1		—	N27	—		—	—		
18	VI	VIII		东日珥	E1		—	—			N24	—		
19	VII	I		西北凝聚区	C		—	—			—	—		
20	VIII			西北日珥	W-1		—	N48—54			—	—		
21	IX	II		北暗条	N2		—	N56	W55—68		N55	W65		

表 7 4855 号活动区射电源参数

射 电 源		观 测 波 段			射 电 源 参 数					
统一编号	光学对应客体	波段编号	波长	观测单位	θ ($''$)	ΔQ (10^{-8} sv)	ΔS (s.f.u.)	T_b (10^3 K)	h (10^4 km)	$\bar{N}^2L$ (10^{28})
I-1	No.100 中黑子	1	2.0	北京师范大学	21	0.8	1.25	2.3	2.37	
		2	2.56	武汉大学	21	0.8	1.35	4.0		
		3	3.2	紫金山天文台	24	1.0	0.90	3.0		
		4	3.2	南京大学	19	0.6	0.85	5.0	2.77	
		5	5.9	北京天文台	92	15.6	1.50	1.2		
		6	6.0	上海天文台	45	3.8	2.90	10.5	0.4	
		7	8.2	云南天文台	36	2.3	2.00	10.0		
		8	10.6	云南天文台	27	1.2	1.15	37.0		
		9	10.6	北京天文台	42	3.4	1.98	30.0		
		10	11.1	紫金山天文台	43	3.5	0.91	11.3		
		11	21.1	云南天文台	30	1.7	0.45	60.0		
I-2	P3 中谱斑	1	2.0	北京师范大学	21	0.8	1.1	2.0		35.4
		2	2.56	武汉大学	27	1.4	0.69	1.2		12.9
		7	8.2	云南天文台	21	0.8	0.25	7.0		7.4
		8	10.6	云南天文台	21	0.8	0.25	10.0		6.3
		9	10.6	北京天文台	30	1.7	1.3	30.0		18.9
		10	11.1	紫金山天文台	24	1.1	1.4	14.8		8.5
		11	21.1	云南天文台	30	1.6	0.15	10.0		1.6
I-3	P4 中谱斑	1	2.0	北京师范大学	21	0.8	1.45	2.9		51.3
		2	2.56	武汉大学	27	1.4	0.73	1.3		14.0
		7	8.2	云南天文台	27	1.4	0.35	8.0		8.4
		8	10.6	云南天文台	27	1.4	0.35	11.0		6.9
		9	10.6	北京天文台	24	1.1	0.51	19.0		12.0
		11	21.1	云南天文台	36	2.3	0.35	28.0		4.4
I-(2+3)	P3 + P4 中谱斑	3	3.2	紫金山天文台	41	3.1	1.1	1.4	3.44	9.7
		4	3.2	南京大学	35	2.5	1.7	4.1		28.3
		9	10.6	北京天文台	44	3.6	1.0	11.0		6.9
		10	11.1	紫金山天文台	31	1.8	1.1	26.6		15.3
I-4	No.103 东北黑子	1	2.0	北京师范大学	20	0.8	1.7	4.0		
		5	5.9	北京天文台	83	12.7	0.9	0.9		
		7	8.2	云南天文台	24	1.1	0.45	10.0		
		8	10.6	云南天文台	12	0.3	0.1	14.0		
		11	21.1	云南天文台	27	1.3	0.25	37.0		

列具体参数。

3. 射电源流量 ΔS_i^f 的频谱和辐射机制

所有各射电源在各个波段上的流量值 ΔS_i^f 都很低，绝大部分都在 0.5—1.5 s. f. u. 之间。这些射电源的 ΔS_i^f 与 1968 年和 1980 年的观测结果相比，也显然小得多。那时一般的都在 1s. f. u. 以上，最大的甚至超过 10(2cm)—20(21cm) s. f. u.。

9 月 23 日的日面上，最强的射电源是 4855 号活动区中的 No. 100 号黑子，其次是

表 8 4857, 4858 活动区的和其他射电源的参数

射 电 源			观 测 波 段			射 电 源 参 数					
统一编号	所属活动区	对应光学客体	波段序号	波长	观测单位	θ ($''$)	ΔQ (10^{-8} Sr)	ΔS_{λ}^2 (s. f. u.)	T_b (10^4 K)	h (10^4 km)	$\bar{N}^2 L$ (10^{28})
II-1	4857	No.101 西黑子	1	2.0	北京师范大学	21	0.83	1.25	2.4		
			2	2.56	武汉大学	—					
			3	3.2	紫金山天文台	26	1.22	1.10	3.4	0.70	
			4	3.2	南京大学	26	1.24	1.01	3.0	1.05	
			5	5.9	北京天文台	79	11.5	0.8	0.9		
			6	6.0	上海天文台	28	1.4	1.3	12	2.4	
			7	8.2	云南天文台	—					
			8	10.6	云南天文台	47	4.3	1.4	15		
			9	10.6	北京天文台	—					
			10	11.1	紫金山天文台	—					
			11	21.1	云南天文台	—					
II-2		P2 西谱斑	1	2.0	北京师范大学	16	0.45	0.65	2.0		35.4
			3	3.2	紫金山天文台	40	2.94	1.2	1.5		10.4
			4	3.2	南京大学	37	2.53	1.26	1.90	3.57	13.1
			9	10.6	北京天文台	40	3.1	1.65	32		20.1
II-(1+2)		P2 + No.101	10	11.1	紫金山天文台	76	10.6	2.50	10.5	2.03	6.0
III-1	4858	No.102 东南黑子	1	2.0	北京师范大学	26	1.25	1.2	1.4		
			9	10.6	北京天文台	30	1.70	1.0	24.0		
III-2		P5 东南谱斑	1	2.0	北京师范大学	30	1.65	1.2	1.20	0.44	21.2
			6	6.0	上海天文台	77	11.0	5.4	6.2		12.2
			9	10.6	北京天文台	55	5.5	1.43	10.6		6.7
III-(1+2)		P5 + No.102	10	11.1	紫金山天文台	36	2.43	0.74	13.7	1.09	7.9
III-4		E-3 日珥	10	11.1	紫金山天文台	21	0.8	0.29	12	0.76	
III-5		E-4 日珥	10	11.1	紫金山天文台	64	8.5	0.88	5.4	3.9	
VI	—	E-1 东日珥	7	8.2	云南天文台	15	0.4	0.45	30		
			8	10.6	云南天文台	12	0.3	0.4	53		
			10	11.1	紫金山天文台	10	0.2	0.14	31	1.5	
			11	21.1	云南天文台	21	0.8	0.45	80		
VI + III (4+5)		(E-1)+ (E-3)+ (E-4)	6	6.0	上海天文台	28	1.4	3.9	36		
V	—	P1 西北谱斑	7	8.2	云南天文台	27	1.3	0.55	8.0		8.4
			8	10.6	云南天文台	36	1.8	0.8	11		6.9
			10	11.1	紫金山天文台	45	3.7	0.87	10.4	1.29	6.0
			11	21.1	云南天文台	57	6.0	0.7	27		4.2
VII	—	C 西北凝聚区	7	8.2	云南天文台	30	1.7	1.1	16	2.1	
			7	8.2	云南天文台	12	0.3	0.1	8	2.1	
			8	10.6	云南天文台	18	0.6	0.75	54	3.5	
			11	21.1	云南天文台	27	1.3	0.35	74	4.7	

4857 号活动区的 No. 101 黑子和 P2 谱斑。

由于这些射电源的流量值小,观测的相对误差也就较大;因此就流量频谱的情况来说,对于一般的弱源起伏就较大。弱源的频谱与 1980 年时的情况相近,频谱甚为平坦,没有显著的特征。但对于最强的 No.100 号黑子,则在 6—10cm 之间具有明显的峰值(见图 10)。

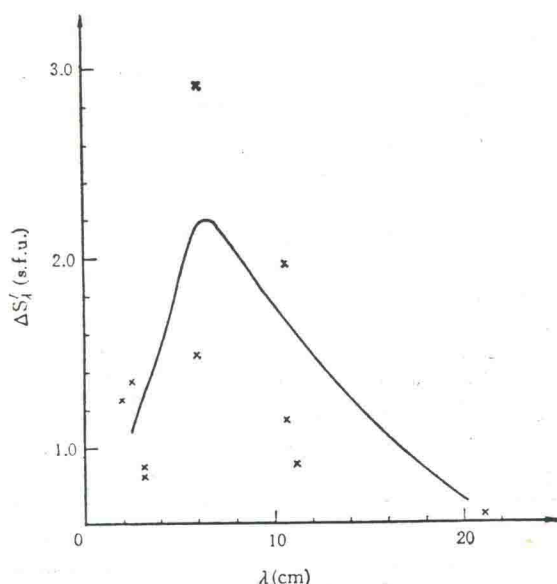


图 10 与 No.100 号黑子相应的射电源辐射的流量谱。
频谱的峰值在 $\lambda 6\text{cm}$ 附近。

图 10)。

根据图中的频谱,可以断定该射电源的辐射机制,应是典型的磁韧致辐射机制。因此在黑子区域,磁场应是比较强的。根据北京天文台磁场望远镜的观测,也已证明了这一点。在该天日面上各个黑子区中, No.100 黑子的磁场是最强的,中心处达 $+0.1\text{T}$ 和 $-0.28\text{T}^{[14]}$ 。

4. 射电亮温度 T_b

各个射电源的亮温度,在短厘米波段上一般较低,小于 $5 \times 10^5\text{K}$,而在长厘米波段上,则可达 $1-5 \times 10^6\text{K}$ 。这说明结果在合理的范围内。但是由于这些射电源都较弱,由此在食变斜率线上角径 θ 和流量 $\Delta S'_l$ 的值都不易

准确确定,误差较大,因此也就造成 T_b 在各波段上的值相对起伏较大,有些数据甚至明显地不太合理。

5. 射电源的高度 h

No.100 黑子几乎位于日面中心,对于确定其射电源的高度甚为不利。因此大多数波段未作计算。即有计算的,误差也较大。

No.101 黑子和日珥、西北凝聚区等射电源,正在日面的边缘,对这些源高度的计算十分有利,误差也较小。由表中可以看出,源的高度一般在 $1-4 \times 10^4\text{km}$ 范围。

6. 晕辐射标度 $\overline{N^2L}$

目前一般认为,在黑子区域的上空,磁韧致辐射起着非常重要的作用;而在黑子周围的谱斑区域,则是忽略磁场影响的碰撞韧致辐射起着主要的作用。因此在厘米波段上射电源有着特殊的亮度分布:在黑子上空有一个亮区,而在周围的谱斑区则有一个较弱的晕。而这种亮度分布的特点只有在谱斑上空各个不同部位的辐射标度 $\int N^2 dl$ 具有相同的特征时才会发生。由理论研究我们知道,可以把黑子区域的谱斑的辐射看作黑子上空晕辐射的极限,而晕的辐射则又可以看成为黑子上空各区域韧致辐射强度的极限。因此我们可以通过计算非黑子谱斑区域晕辐射的标度,来估计黑子上空韧致辐射强度的成分。