

8.6 毫米波段日全食观测

紫金山天文台 8.6 毫米日食工作小组*

提 要

本文介绍1980年2月16日8.6毫米波段日全食观测及其研究结果。在观测过程中,天气晴朗,接收机工作稳定,用步进马达精确跟踪,对大气折射效应作了即时改正,并用黑体辐射源在天线口面上进行温度定标,用标准增益喇叭作绝对测量,得到了一条良好的食变曲线。在资料归算中,对接收机系统的增益漂移、调制参考终端的温度变化以及大气吸收等效应均作了细致的改正。特别是对低仰角时段的观测曲线作了大气球面分层模型的吸收改正。在此基础上作了日面亮度温度的分布计算,结果表明,在光学边缘内侧 $2\sim 3'$ 范围内,有显著增亮,其峰值约为18%。

一、引 言

利用日食观测,可以获得高分辨率的观测资料,从而可为太阳活动区物理及日面亮度温度分布的研究提供重要信息。早在1954年的8.6毫米的日食观测资料中就得到光学边缘处有亮尖的分布^[1],但在后来的多次日食观测及平时用大天线、干涉仪的高分辨观测中,常常得到有临边增亮及昏暗的不同结果;再从各种色球大气模型计算所得的理论分布来看,分歧也很大。到目前为止,8.6毫米波段的亮度分布到底是临边增亮还是临边昏暗,尚无可靠结论。而这种结论对色球大气模型的研究是极为重要的。为此,我们用8.6毫米射电望远镜对1980年2月16日的日全食进行了观测。为了尽量取得较好的见食条件,特别是为了尽可能提高食甚时的见食高度,我们将观测点选在全食带中我国境内的最西端——云南省瑞丽县营盘山的谷家大地包的山顶上(北纬 $24^{\circ}02'56''$,东经 $97^{\circ}43'49''$,海拔1800米)。该地的见食情况见表1。

表1 光学见食情况

初亏时刻 (UT)	食甚时刻 (UT)	食甚食分	食甚地平高度
$09^{\text{h}} 27^{\text{m}} 12^{\text{s}}$	$10^{\text{h}} 32^{\text{m}} 26^{\text{s}}$	1.03	$10^{\circ} 49' 47''$

虽然这次日食食甚时太阳仰角较低,观测条件不利,但是由于仪器性能良好,日食时天空晴朗无云,加之我们对影响观测记录的各项因素均作了细致的改正,因而取得了较为可靠的观测资料。利用所得的食曲线对日面的亮温度分布进行计算,得到了临边增亮

* 参加本工作的有: 周树荣、杨桂攀、刘炎、肖汉流、周爱华、吴洪教、梁征犹、戴立峰、马福鹏、时瑞生。

的结果。

二、仪器和观测概况

这次日食观测的仪器是我台于 1979 年自制的 8.6 毫米射电望远镜^[2]。天线口径为 0.4 米,采用卡塞格林系统,赤道式装置,用步进马达驱动,跟踪及定位精度较高。为减小天线远旁瓣和后瓣来的辐射,在抛物面的边缘加了一圈金属屏蔽罩。辐射计为 Dicke 型,工作频率为 35 千兆赫,其有关参数列于表 2。

表 2

天线主瓣宽度	接 收 机 性 能				
	灵敏度	非线性	时间常数	增益漂移	中放带宽
1°38'	0.4K	<1%	1 秒	≤0.3%/小时	100 兆赫

太阳天线温度的定标用标准黑体辐射源在喇叭口面进行。我们用微波黑体的辐射作为噪声标准。黑体辐射源有二个,低温源是一个浸在液氮中的角锥簇状吸收体(其反射系数为-45 分贝),其辐射温度即是液氮沸点的温度。高温源是一个处于环境温度中的平板状黑体。两个黑体源的温度之差即是定标温度。用这种精确稳定的黑体源在喇叭口面上进行定标,可消除馈源、波导等传输损耗的影响,大大提高定标精度。

太阳射电流量的绝对测量是用最佳角锥喇叭进行的。喇叭的口径为 135×109 毫米²。高为 671 毫米,用电铸法制造,内壁镀银。喇叭的增益 G 取其理论值,为 31.15 分贝。由于喇叭的主瓣宽度远大于太阳的角径,因此其方向图改正因子 K 可取为 1。用喇叭天线和抛物面天线交替观测太阳并分别定标,求出抛物面天线的 GK 值为 6843。由黑体辐射源校正出任一时刻的太阳天线温度,即可求出太阳流量。我们在 2 月 16 日中午作了二次测量,得到当日的太阳流量值为 2568 s. f. u.。

我们用太阳漂过天线主瓣的方法描记了天线方向图。

毫米波段的大气吸收效应比较严重。为了对日食观测资料作改正,我们对大气吸收因子进行了实测。在日食前后十多天内,同时用观测不同天顶距的太阳辐射和天空背景的大气辐射两种方法进行测量,求出射电望远镜的有关仪器常数。然后在日食前后多次测量天空背景的大气辐射,从而得到 2 月 16 日天顶方向的大气吸收因子 T_0 为 0.0548。

除此以外,我们还实测了 2 月 16 日前后的月亮辐射和日食前后的背景辐射(包括大气辐射、宇宙背景辐射和地面辐射)。

2 月 16 日,日食过程中,天气晴朗,为观测提供了有利条件。射电望远镜自北京时间 17 时 10 分开始连续跟踪太阳,直至 19 时 25 分带食而没。

由于观测的仰角较低,大气折射效应使太阳的视位置偏离真位置,并随不同的仰角而变化。因此在日食过程中为了使天线的电轴始终对准太阳,必须对恒速跟踪作相应的改正。在日食观测中,我们根据在 2 月 13 日用望远镜实测到的折射角随时角的变化曲线对望远镜的跟踪作即时改正,即每当折射角的增量累积达一时秒时,就控制步进马达使跟踪停止一秒钟。赤纬方向的折射较小,用手动作微调改正。由于改正几乎是连续的,因此用这种改正方法使记录到的食曲线受折射效应的歪曲很小。

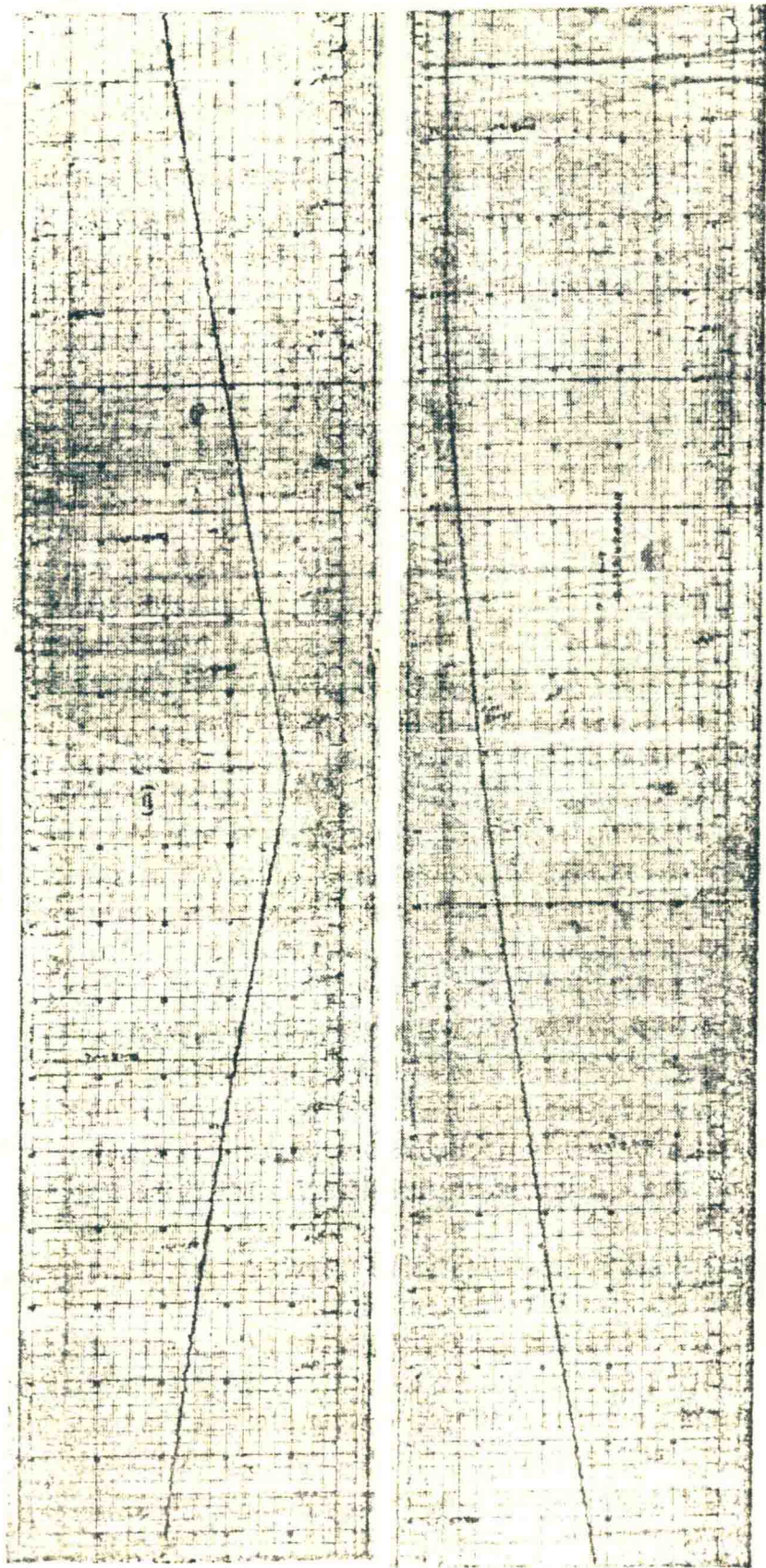


图 1. 1980 年 2 月 16 日日全食观测记录曲线

为确保食曲线记录的可靠性,日食观测时使用二台记录仪同时记录(记录纸的速度为每分钟20毫米)。图1列出了记录到的食变曲线。

三、资料处理

日食观测中,当射电望远镜指向太阳圆面中心时,接收到的辐射来自三个部分:太阳的,月亮的和背景的。设它们的有效天线温度分别为 T'_s , T'_M 和 T'_φ , 则由食变记录曲线所得到的随时间 t 变化的读数应为

$$R_s(t) = L[(T'_s + T'_M + T'_\varphi) - T_0] + b \quad (1)$$

式中 L 为温度标度常数, T_0 为调制参考端的温度, b 为与仪器有关的常数。在日食观测过程中, L , T'_s , T'_φ , T'_M , T_0 均随时间而变化,其中 T'_M , L , T_0 的变化较小。

太阳流量值由下式确定:

$$S(t) = \frac{8\pi k}{KG\lambda^2} T'_s e^{\Gamma(z)} M \quad (2)$$

式中 k 为玻耳兹曼常数, λ 为工作波长, M 为日地距离改正因子(由天文年历查得), K , G 分别为天线方向图改正因子和天线增益, $\Gamma(z)$ 为大气吸收因子, z 为观测时刻太阳的天顶距。因此为了求得 $S(t)$, 必须测定下列量: GK , $\Gamma(z)$, L , T'_s , T'_M , T'_φ 和 T_0 等。其中 GK , T_0 的测量见上节叙述。

对于大气吸收的改正,在高仰角时,采用平面分层的大气模型近似,其精度已足够,即

$$\Gamma(z) = \Gamma_0 \sec(z) \quad (3)$$

考虑到低仰角时平面分层模型引起的误差较大,我们对 $z > 75^\circ$ 的大气吸收因子作了球面分层大气模型的改正,即

$$\Gamma(z) = \Gamma_0 \sec(z) [f(x_1) + f(x_2)] \quad (4)$$

式中 $[f(x_1) + f(x_2)]$ 为改正因子^[1]。 x_1 , x_2 为改正引数,与天顶距及大气中的氧气和水汽的特征高度有关。图2中(d)给出了改正曲线 $e^{\Gamma(z)}$ 。

日食过程中任一时刻月亮辐射的 $T'_M(t_i)$ 值是利用2月15日的实测值,并作月相变化和大气吸收改正后求出的(见图2中曲线(f))。

背景辐射的 $T'_\varphi(t_i)$ 值由日食前后三次测量的实测值,根据实际气温的变化用线性内插求出(见图2中曲线(c))。

温度标度 L 由黑体辐射源定标求出。由于在食前和食后的两次定标测量相隔了四个小时,而且在这过程中环境温度的变化较大,因此必须考虑到系统增益的漂移和调制参考终端温度的变化对记录读数所产生的影响,这样太阳有效天线温度的归算公式应为

$$T'_s(t_i) = \left[\frac{\Delta R_s(t_i)}{L(t_i)} + T_\star - T_0(t_1) \right] \cdot [1 - h \cdot (t_i - t_1)] + T_0(t_i) - [T'_\varphi(t_i) + T'_M(t_i)] \quad (5)$$

式中 $\Delta R_s(t_i)$ 为在任一时刻 t_i 时的食曲线读数与日食前 t_1 时刻定标时的低温源记录线读数之差(因低温黑体源的辐射温度精确稳定,为减少计算误差,故以此为零点); $T_\star$ 是低温黑体的温度,在我们的观测地点, $T_\star = 75.8\text{K}$; h 是温度标度变化系数,设随时间作线性变化,则可由日食前后二次定标求出。

调制参考终端的温度 T_0 近似地取为微波箱的温度。在日食观测过程中,每隔20分

钟测量一次,得到的变化曲线见图 2 中的(e)。

经过上述各种计算后,即可得到任一时刻的天线温度 $T_a^0(t_i)$ (见图 2 中曲线(a)):

$$T_a^0(t_i) = T_a'(t_i)e^{f(z(t_i))} \quad (6)$$

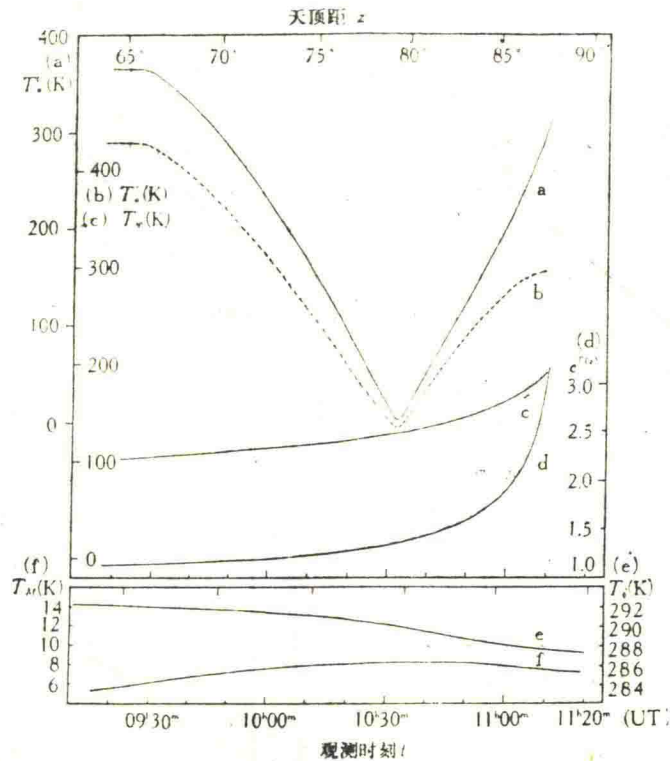


图2. 太阳天线温度的食变曲线以及几种改正曲线

- a——太阳天线温度 $T_a^0(t_i)$;
- b——记录得到的天线温度 $T_a'(t_i) = T_a^0(t_i) + T_{\psi}'(t_i) + T_M'(t_i)$;
- c——背景辐射天线温度 $T_{\psi}'(t_i)$;
- d——大气吸收改正因子 $e^{\tau(z)}$;
- e——调制参考端温度变化 $T_0(t_i)$;
- f——月亮辐射天线温度 $T_M'(t_i)$ 。

横坐标是共同的,图下端的标度为相应的日食观测时间(UT),上端为观测时间所对应的太阳天顶距;每条曲线的纵坐标分别标出对应的符号

$T_a^0(t_i)$ 的误差可根据(5)式和(6)式中的各项进行估算,其中食变曲线记录读数偶然误差的均方根偏差 $\sigma_T = 0.7(K)$; 而经逐项分析估计后,得到 $T_a^0(t_i)$ 总的系统误差为 6—8K。由于月亮半径比 8.6 毫米射电太阳半径大些,食甚时应没有剩余流量,但在食变曲线上可以看出,食甚时的天线温度还有 2.3K,这在误差范围之内,故我们的观测结果是合理的。

$T_a^0(t_i)$ 相对于初亏前 t_0 时刻的天线温度的归一化值为

$$T_a(t_i) = \frac{T_a^0(t_i)}{T_a^0(t_0)} \quad (7)$$

计算时记录读数 $R_i(t_i)$ 的值,每隔 15 秒取一个点,归算所得的 $T_a(t_i)$ 值列于表 3。

表 3 天线温度归一化值 $T_a(t_i)$

时间 (UT)	$T_a(t)$	时间 (UT)	$T_a(t)$	时间 (UT)	$T_a(t)$	时间 (UT)	$T_a(t)$	时间 (UT)	$T_a(t)$
0 ^h 20 ^m	1.000	0 ^h 41 ^m	0.886	10 ^h 02 ^m	0.581	10 ^h 23 ^m	0.184	10 ^h 44 ^m	0.229
21	1.000	42	0.874	03	0.567	24	0.164	45	0.248
22	1.000	43	0.863	04	0.553	25	0.144	46	0.271
23	1.000	44	0.850	05	0.535	26	0.121	47	0.289
24	0.999	45	0.836	06	0.516	27	0.102	48	0.309
25	0.999	46	0.823	07	0.500	28	0.083	49	0.327
26	0.999	47	0.810	08	0.482	29	0.062	50	0.349
27	0.999	48	0.795	09	0.461	30	0.041	51	0.368
28	0.996	49	0.782	10	0.443	31	0.022	52	0.390
29	0.990	50	0.770	11	0.421	32	0.007	53	0.412
30	0.983	51	0.753	12	0.403	33	0.010	54	0.431
31	0.976	52	0.738	13	0.387	34	0.025	55	0.452
32	0.969	53	0.724	14	0.366	35	0.043	56	0.476
33	0.958	54	0.711	15	0.346	36	0.066	57	0.491
34	0.951	55	0.695	16	0.326	37	0.084	58	0.518
35	0.942	56	0.683	17	0.305	38	0.105	59	0.540
36	0.932	57	0.666	18	0.282	39	0.127	11 ^h 00 ^m	0.564
37	0.923	58	0.650	19	0.260	40	0.145	01	0.582
38	0.912	59	0.634	20	0.244	41	0.166	02	0.609
39	0.902	10 ^h 00 ^m	0.618	21	0.226	42	0.188	03	0.640
40	0.891	01	0.601	22	0.207	43	0.210	04	0.682

四、亮度温度计算

在第三节中给出天线温度的归一化值 $T_a(t_i)$ 后, 经滤波^[4]可得天线温度的归一化食变斜率值 $\dot{T}_a(t_i)$ (见图 3)。

日食当天, 日面上虽有黑子群存在, 但它们的水平平均较低, 在对应的天线温度归一化食变斜率曲线 (图 3) 上也无反应, 因此我们可认为每一时刻观测到的辐射均来自宁静太阳。

宁静太阳亮度温度的计算, 涉及到射电宁静太阳亮度温度模型的选取, 一般认为在 3 厘米以下的射电短波区域, 宁静太阳亮度温度呈圆对称分布, 因此可将射电宁静太阳分成一系列的同心环 (见图 4), 环半径以 r_i 表示, 并使环宽足够地小, 以致每一环的亮度温度可视为常数, 计算各环的亮度温度, 则可得宁静太阳的亮度温度分布。宁静太阳模型的射电半径可由原始食曲线、天线温度 $T_a^0(t_i)$ 曲线及天线温度的归一化食变斜率曲线 $\dot{T}_a(t_i)$ (见图 1, 2, 3) 综合分析得到。经分析取 8.6 毫米射电太阳掩食半径 r_1 为 $1.014r_0$ (r_0 为光

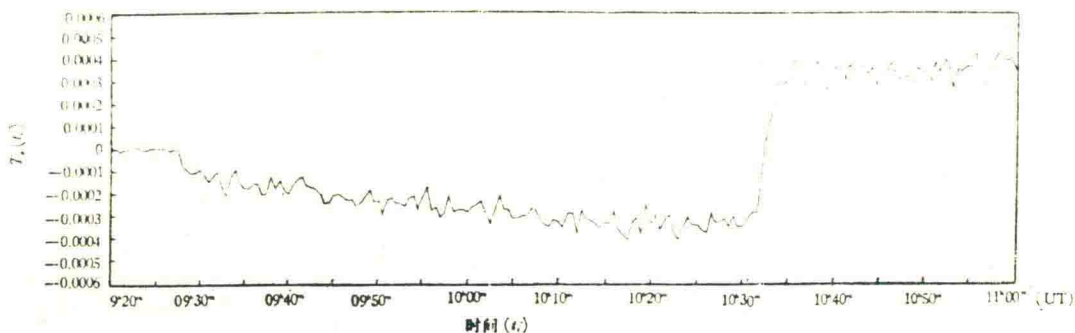


图 3. 天线温度的归一化食变斜率曲线

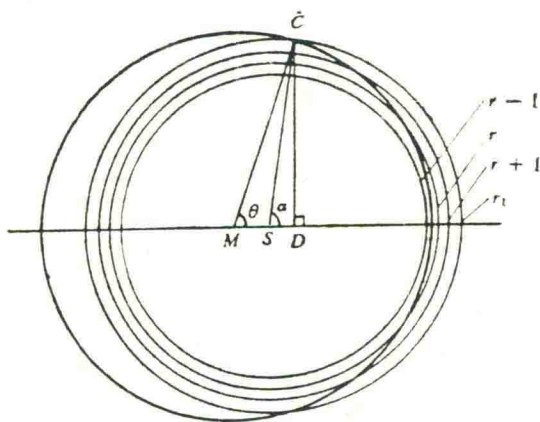


图 4. 8.6 毫米宁静太阳亮度温度模型示意图

学太阳半径), 等效半径为 $1.007r_{\odot}$, 它们的误差为 $\pm 0.004r_{\odot}$ 。

在图 4 中给出计算所采用的宁静太阳模型示意图, 其中 M , S 分别为某一时刻日、月心位置, r_t 为最外环半径。为了考察增亮峰的精细结构, 在光学边缘附近的环宽取得密些, 但环宽不小于食时观测的角分辨率(由灵敏度估算得本望远镜在食时观测的角分辨率为 5 角秒), 故在 $1.014-0.934r_{\odot}$ 范围内, 环宽取为 $0.008r_{\odot}$; 在 $0.934-0.784r_{\odot}$ 范围内, 环宽取为 $0.030r_{\odot}$; 在 $0.784-0.064r_{\odot}$ 范围内, 环宽取为 $0.060r_{\odot}$ 。这样, 计算所用的同心环为 27 个。

参考文献[5], 给出日心距为 $(r-1/2)$ 处的观测天线温度相对于日、月心距离 d 的导数 $y_{r-1/2}$ 值(这里下标 $r-1/2$ 表示半径 r , $r-1$ 的圆形成的环宽的中点处)为

$$y_{r-1/2} = T_{r-1/2} P_{r-1/2} A'_{r-1/2, r} + \sum_{n=r}^{r_t} (A'_{r-1/2, n+1} - A'_{r-1/2, n}) T_{n+1/2} P_{n+1/2} \quad (8)$$

其中 y 值可由斜率值 $T_e(t_i)$ 归算得到, $T_{r-1/2}$, $P_{r-1/2}$ 分别是日心距为 $(r-1/2)$ 处的亮度温度及归一化功率方向图因子, $A'_{r-1/2, r}$ 为月亮边缘处在半径为 $(r-1/2)$ 处时所引起的此环面积随 d 的变率, A' 的第二个下标表示计算中圆环的外径, 在计算中是一循环变量。

由公式(8)并结合我们选取的宁静太阳模型, 可解出一系列的 $T_{r-1/2}$ 值, 其结果在图 5 中给出。

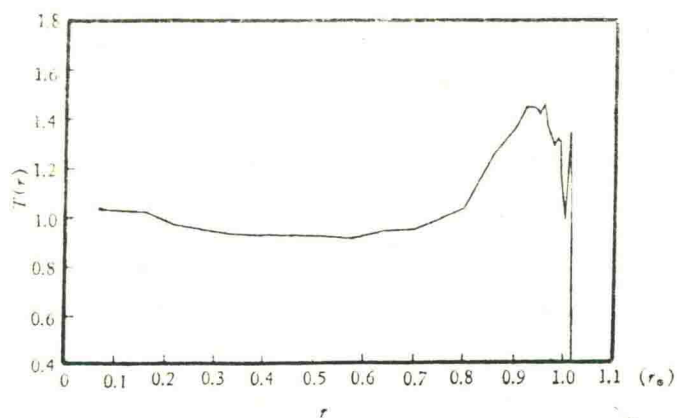


图 5a. 利用第一接触资料计算得到的亮度温度分布

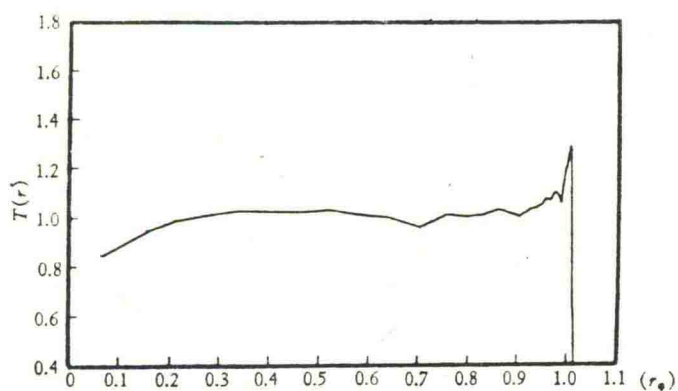


图 5b. 利用第二接触资料计算得到的亮度温度分布

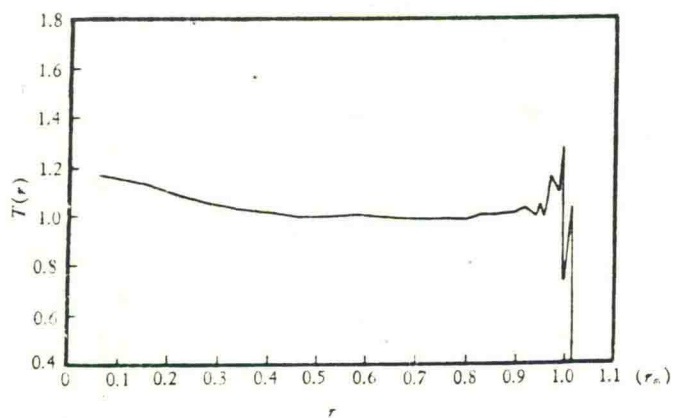


图 5c. 利用第三接触资料计算得到的亮度温度分布

在图 5 中可见,用第一接触资料计算得到的峰值较第二、第三接触的资料计算得到的峰值要高,峰的宽度也较后两者宽,而第二、第三接触的资料所得峰值基本相近,其形态也较相似,而三者均得到较为光滑的单峰结构,其平均峰值约为 18%,增亮区域大致落在

0.99—0.86 $r_{\odot}$ 范围内.

为了分析增亮峰的可靠性,我们还取环宽为 0.060 $r_{\odot}$ 的大尺度的均匀分环的宁静太阳模型进行计算,结果表明在光学太阳边缘内侧也有增亮效应,只是峰值显得低些,由此可见,增亮峰的存在是明确的,但第一接触资料得到的峰值明显高于第二、第三接触的相应结果,其原因尚待进一步研究.

参 考 文 献

- [1] Coates et al., *Ap. J.* **128**, 406 (1958).
- [2] 8毫米射电镜研制小组,天文学报, **21** (3), 1980.
- [3] Радиотехника и Электроника **4**(1), 21, 1959.
- [4] 紫金山天文台日食观测小组,天文学报, **15**(2), 1974.
- [5] Hagen, J. P., and Swanson, P. N., *Ap. J.*, **198**, 219 (1975).

OBSERVATION OF THE SOLAR TOTAL ECLIPSE AT $\lambda = 8.6$ mm

GROUP OF 8.6mm SOLAR ECLIPSE OBSERVATIONS
(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

ABSTRACT

We present in this paper the results of an observation of the solar total eclipse of February 16, 1980 at $\lambda = 8.6$ mm. During the observation the weather was fine, the receiver was stable, the antenna tracking with a stepping motor was sufficiently accurate. Correction of the effect of atmospheric refraction was carried out. The temperature scale was established with a cryogenic black body placed on the aperture of the feed and the antenna gain was measured with a standard horn. An excellent eclipse curve has been obtained. In the process of data reduction, the gain drift of the receiver, the temperature variation of the reference terminal and the atmospheric attenuation were taken into account carefully. We pay special attention to the spherical layer model of the atmospheric attenuation for the low elevation segment of the eclipse curve. The calculated distribution of the brightness temperature on the solar disk shows that there is an apparent brightening in the $2'-3'$ range on the inner side of the optical limb. The peak brightening amounts to 18%.

《1980年2月16日中国云南日全食观测文集》,

科学出版社, (1983), PP. 94-102