

在波长 6 厘米上 Markarian 8 的 甚大阵 (VLA) 观测

尹 其 丰

(北京大学地球物理系)

D. S. Heeschen J. Heidmann

(美国国家射电天文台, NRAO) (法国巴黎天文台)

摘 要

VLA 的观测表明, Mark. 8 是由三个子成分组成的, 它们对应于光学上的块斑 (Clumps), 其射电辐射谱符合于光学薄情况下的热谱. 这些子成分浸在弥漫的壳层 (背景) 中, 后者的辐射谱是非热的. 射电观测表明, Mark. 8 在 6 厘米波长上的射电图同光学观测有良好的对应关系.

在热辐射的假设下, 文中计算了射电子成分的电子密度和所含的电离氢的质量, 结果表明, 这些块斑的确可能是超巨型的 HII 区.

根据 VLA 的高分辨率观测, 直接计算了由早型星发射的莱曼光子数. 结果表明, 对于一个“平均子成分”来说, 早型星 (以 O8V 为例) 的数目高达 3.5×10^4 个. 这说明, 在 Mark. 8 中, 恒星以超大规模形成, 即存在恒星形成爆发.

一、引 言

近年来, 许多国家的天文学家对于一种新近发现的特殊天体进行了大量的观测研究工作, 所使用的波段是从紫外、可见光到射电波段. 这种特殊天体属于不规则星系, 称为块斑星系 (Clumpy Galaxy). 这种星系是 Heidmann 在研究 Markarian 星系中的某些不规则星系时首先发现的. Mark. 8 是这种块斑星系中的一个很好的代表天体.

这种块斑星系最初只是根据其光学现象和星系的某些总体参数确定的: 1. 它们通常是由 5—10 个高表面亮度的块斑所组成, 这些块斑散布在一个共同的包壳上; 2. 它们的光度、尺度和内部运动速度都比经典的不规则星系大.

Benvenuti 等人 (1979)^[1] 利用国际紫外探测卫星 (IUE), 对 Mark. 8 等块斑星系作了观测, 结果表明, 这种星系中的块斑可能是超巨型的 HII 区, 其根据是观测到了过剩的近紫外辐射. 他们进而推论出这种块斑平均来说比剑鱼座 30 的巨型 HII 区要大 100 倍.

这些光学和紫外观测的初步结果, 产生了一系列十分重要的问题. 首先, 这些块斑的确切

的物理性质是什么;在星系起源和演化上,也提出了一些问题,其中关键问题是,这种块斑星系是否代表星系演化中的一种短暂的过渡状态.如果是,那么它们是怎样形成的,从哪种状态演化来的,它们是否在形成另一种类型的天体^[2].

为了弄清块斑星系的辐射性质和结构,射电观测是十分重要的.为此,Heidmann 和 Wielebinsky (1982) 曾用 MPI 的 100 米射电望远镜作了观测^[3].但是,由于射电源对于望远镜的分辨率来说是小的(相对来说是点源),无法得到源的图象,因而得不到结构方面的信息.此外,他们所得到的 Mark. 8 在厘米波段的射电谱指数为 -0.67 ± 0.19 ,这似乎又偏离了光学和 UV 观测所预言的热辐射谱.

在这种情况下,使用具有极高分辨率和灵敏度的 VLA 综合孔径射电望远镜来观测 Mark. 8 星系,以确定其辐射性质、结构和块斑的物理性质,则成为至为重要的了.

本文即给出在 6 厘米波长上的这种观测结果,并讨论 Mark. 8 星系中块斑的物理性质.

表 1 给出了由光学和 UV 观测得出的 Mark. 8 星系的一些总性质.在确定距离时,使用的哈勃常数值为 $H_0 = 75$ 公里/秒·百万秒差距,本文通篇都采用此值.

表 1 Mark. 8 星系 (=IC2184) 的某些参数

$\alpha(1950.0)$	$\delta(1950.0)$	D (百万秒差距)	M_B	$U - B$	$B - V$	$M_{H\text{I}}(10^9 M_\odot)$	$M_* (10^9 M_\odot)$
07 ^h 23 ^m 38.5 ^s	72°13'50.0"	46	-19.98	-4.0	0.39	10	270

二、观测和资料处理

1980 年 1 月,使用当时部分完成的 VLA 孔径 25 米的 18 面天线,对 Mark. 8 星系进行了孔径综合观测.关于 VLA 的有关数据和资料,可参阅 Thompson 等 (1980)^[4] 的工作.我们观测所用的有关 VLA 的参数列于表 2. 为了对仪器的幅度和相位起伏进行校准,在观测时,对附近非分解校准源 0615+820 也进行了观测.时间分配为源 (Mark. 8), 8 分钟——0615+820, 4 分钟,交替进行.因为对 Mark. 8 源的观测共用了近三个小时(比较源所用时间除外),这三个小时又分散在很宽的时角范围内(因同时还观测几个其他河外目标),所以有很好的 UV 平面覆盖.为进行绝对流量校准,还观测了射电源 3C286,它在 6 厘米波长上的强度为 7.41Jy.在整个观测过程中,仪器状态和天气条件都极好.

经过校准的可见度资料,通过傅里叶变换等一系列标准的 VLA 处理程序,可以画出射电源图.在计算机处理过程中,为了突出源结构方面的不同特征,使用了不同的 UV 平面锥形 (Taper). 为了去掉旁瓣的影响,射电图经过近千次迭代的 Högbom 清洗 (Clean) 程序处理 (Högbom, 1974). 后面所进行的全部物理讨论都是基于这种“干净”的射电图.

表 2 观测中使用的 VLA 参数

天线阵的配置方式	天线数	频率(千兆赫)	波长(厘米)	频宽(兆赫)	天线间距(公里)	
					极大	极小
混合式	18	4.885	6	50	17.5	0.08

三、结 果

图 1, 2 和 3 给出 Mark. 8 的不同分辨率的射电图. 图 1 是 Mark. 8 的大视场低分辨率射电图, 原图为 $20' \times 20'$ 视场, 本图为 $10' \times 10'$ 视场. 半功率方向束为 $18.36'' \times 15.30''$. 由图 1 可看到, 在观测源 Mark. 8 附近没有干扰源. 这对资料的程序处理是有利的. 这种低分辨率大视场射电图, 在研究射电源时是需要的, 它给出源辐射的一般性质, 判断是否有干扰源存在, 并可通过对源的亮度的积分得到源在所观测的波长上的总辐射流量密度. 在这个图上, 峰值流量密度为 4.6 mJy/方向束 . 计算出的总流量密度值列于表 3. 低分辨率观测, 虽然不能给出源的结构, 却能显示出源的背景(或壳层)射电辐射.

图 2 是 Mark. 8 的高分辨率射电图. 由图可知, 峰值流量密度只有 1.46 mJy/方向束 . 由总流量密度及这个高分辨率射电图可知, 这是一个很弱的射电源, 目前, 只有 VLA 能够得出这种弱源的射电亮度分布图. 下面, 我们就图 2 作一些说明: 首先, 这是一张质量极好的射电

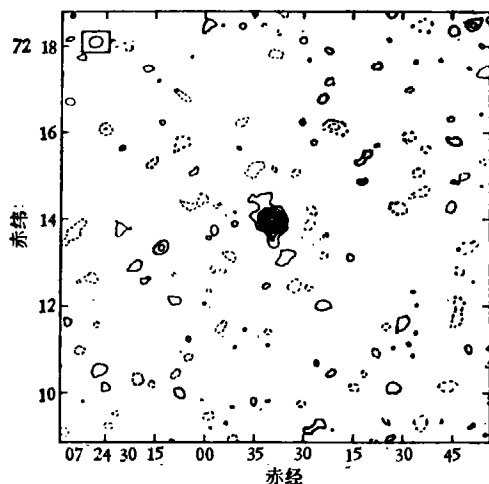


图 1 Mark. 8 星系的大视场低分辨率射电图

[波长 6 厘米 (4885 兆赫). 分辨率为: $18.63'' \times 15.30''$. 方向束椭圆半长轴与北向夹角(反时针为正), 即方向束的方位角为 -76.7° . 峰值流量密度 $= 4.6 \text{ mJy/方向束}$. 等强线为: $0.46 \text{ mJy} \times (9, 7, 5, 3, 2, 1, -1, -2)$, 负等强线表示仪器噪音起伏, 图中用虚线表示. 左上角为半功率方向束].

表 3 Mark. 8 星系在 6 厘米波长上的观测值

成 份	角径(弧秒)	流量密度 (mJy)	频谱光度(尔格·秒 ⁻¹ ·赫 ⁻¹)
A	3.3	2.2	5.2×10^{27}
B	2.7	0.6	1.4×10^{27}
C	3.0	0.7	1.6×10^{27}
壳 层	≥ 40	10.5	24.0×10^{27}
整个星系	≥ 40	14.0	3.2×10^{28}

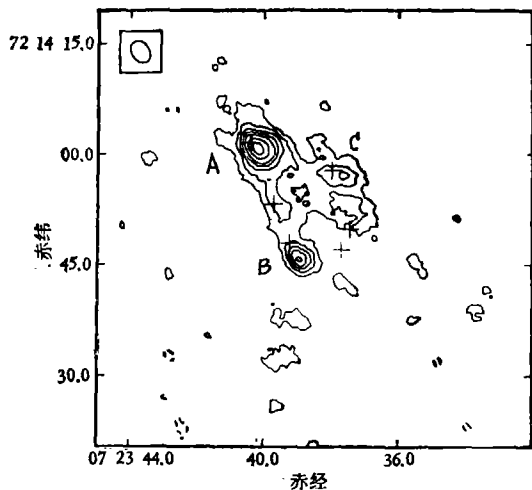


图 2 Mark. 8 星系的高分辨率射电图

[分辨率为 $3.30'' \times 2.40''$, 方位角为 35.5° . A, B 和 C 表示三个主要的射电子成分, “+”表示光学观测到的块斑 (Clumps) 位置. 等强线数值见正文].

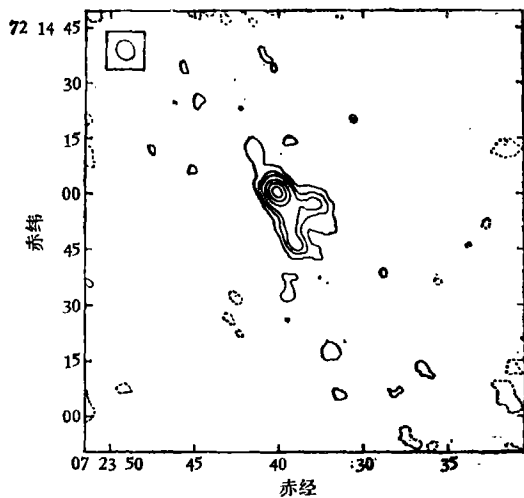


图 3 Mark. 8 星系的中等分辨率射电图

[分辨率为 $5.70'' \times 4.71''$, 方位角为 35.7° . 峰值流量密度为 2.2 mJy/方向 . 此图很好地显示出该星系的射电壳层(背景)].

图, 这可由它给出的十分清晰的射电源结构和噪音起伏很小说明. 等值线强度为 $0.145 \text{ mJy} \times (9, 7, 5, 4, 3, 2, 1, -1)$. 负等值线 (图中为虚线) 表示仪器的噪音. 计算表明, 误差 $\leq 0.1 \text{ mJy}$. 图 2 显示 Mark. 8 是由三个子成分组成, 我们称为 A, B 和 C. 在 A, B 之间还有一个弱的子成分. 由射电观测求得的 A, B 和 C 峰值所处的精确位置列于表 4. 在 UV 平面的可见度资料中, 在上述子成分所对应的位置上, 采用高斯弥合方法, 可求出 A, B 和 C 三个子成分的流量密度. 所求得的结果列于表 3. 表 3 中还给出了这三个子成分的角径值. 由总流量密度中减去三个子成分的辐射贡献, 则求得该星系的壳层(背景)辐射, 结果也列于表 3.

图 3 是中等分辨率的射电图, 可以看出, 三个子成分浸在弥漫辐射的壳层(背景)中.

四、理论解释和讨论

Mark. 8 星系的光学观测表明, 它所包含的块斑可能是超巨型的 HII 区, 其中有大量的电离气体和 O. B 星, 从而推论其中有极活跃的恒星形成过程^[5,6]. 现在我们将根据 VLA 的高分辨率观测, 来讨论其射电结构和辐射特征是否支持这一假设.

1. 和光学观测的比较

图 2 的射电图与 Casini 用 Cima-Ekar 182 厘米望远镜拍摄的蓝色照片在结构上非常相似. 因此, 可以得出源的光学和射电结构很好符合的结论. 但是, 射电的三个子成分的精确位置同光学照相定出的位置有一个很小的系统差, 见表 4, 其产生原因尚不清楚.

2. 6—20 厘米子成分的射电谱

在引言中我们曾指出, 用 MPI 的 100 米射电望远镜对 Mark. 8 进行的射电多波段观测, 得出了总流量密度谱为 -0.67 的结果. 这显然偏离热谱, 与把块斑解释为超巨型 HII 区的热辐射机制不一致. 其原因是 100 米单天线望远镜的分辨率太低, 对 Mark. 8 无分解能力, 无

表 4 Mark. 8 射电子成分 ($\lambda = 6$ 厘米) 的位置及其与所对应的光学块斑位置的比较

成 分	$\alpha(1950.0)$	$\delta(1950.0)$
A_0 厘米	07 23 40.20	72 14 0.80
A 光学	07 23 40.40	72 14 1.54
B_0 厘米	07 23 38.96	72 13 45.80
B 光学	07 23 39.42	72 13 47.93
C_0 厘米	07 23 37.63	72 13 57.00
C 光学	07 23 37.98	72 13 57.76

法分别求出子成分和背景辐射的贡献,因而无法分别确定它们的辐射谱. 我们对 Mark. 8 也曾进行过 20 厘米波长上的 VLA 观测,发现三个子成分的辐射谱是相当平坦的. 在 20—6 厘米波长范围内, A , B 和 C 的谱指数分别为 -0.20 , -0.34 和 0.00 ^[7]. 这显然相当好地与 HII 区热辐射假设相容. 但是观测发现, Mark. 8 的壳层(背景)辐射具有陡的非热谱. 关于壳层的观测结果及其辐射机制我们将另文讨论.

3. 射电子成份物理参量的计算

在热辐射假设下,我们可以计算这些具有平谱的射电子成份中的一些物理参量,如电子密度 N_e , 电离氢的质量等. 从而和光学观测得出的物理参量进行比较.

光学观测表明,这种块斑星系的超巨型 HII 区的电子温度 $\sim 10^4\text{K}$ ^[8]. 在 6 厘米波长上,源可以假设为光学薄,在子成份的几何形状为球体的模型下,平均电子密度 N_e 为:

$$N_e = 4.91 \times 10^2 \times \frac{(10^{-4}T_e)^{0.18}(\nu)^{0.05}(S_\nu)^{0.5}}{(D)^{0.5}(\theta)^{1.5}}, \quad (1)$$

其中 T_e 为源的电子温度 (K), ν 为射电辐射频率 (千兆赫), S_ν 为辐射流量密度 (Jy), D 为距离 (千秒差距), θ 为源所张的半功率角 (min, arc). 子成份所含的电离氢的质量 (以太阳质量 $M_\odot$ 为单位) 为:

$$M = 0.5 \times \frac{(10^{-4}T_e)^{0.18}(\nu)^{0.05}(S_\nu)^{0.5}}{(D)^{-2.5}(\theta)^{-1.5}}. \quad (2)$$

由所求得平均电子密度 N_e 和子成份的线性尺度可求得 HII 区的发射量 E. M. 值, $E. M. = \int N_e^2 dl = N_e^2 L$, 这里 L 为子成份的线性尺度, 以秒差距为单位, N_e 以每立方厘米所含电子数为单位, E. M. 的单位为 $\text{厘米}^{-6} \cdot \text{秒差距}$. 对于三个子成份, 根据上面给出的公式, 我们分别对 N_e , M 和 E. M. 作了计算, 计算结果列于表 5. 所得的结果和光学观测所计算的

表 5 Mark. 8 各子成份的物理参量

成 分 \ 参 量	$N_e (\text{厘米}^{-3})$	$M (10^6 M_\odot)$	E. M. ($10^4 \text{厘米}^{-6} \cdot \text{秒差距}$)
A	11	136	8.0
B	8	57	3.9
C	6	59	2.5

结果非常接近. 由光学观测计算了这种星系中的一个“平均块斑”的电子密度和电离氢的质量^[8], 结果为 $N_e < 100$, $M \sim 10^8 M_\odot$. 显然 Mark. 8 中三个子成分(块斑)的物理参量和这一结果非常一致.

4. 关于超巨型 HII 区和早型星

由表 5 的计算结果可以看出, Mark. 8 星系中的射电子成分(光学上的块斑)所含的电离氢的质量是十分巨大的 ($\sim 10^8 M_\odot$). 为了比较, 不妨指出, “巨型 HII 区”最初是在河内射电研究中引进的. 其定义虽然带有人为性质, 但也给出一种规模. 定义为在波长 $\lambda = 6$ 厘米上总流量密度满足下列判据时:

$$S_6 \cdot D^2 \geq 400,$$

称为巨型 HII 区. 其中 S 的单位为 Jy, D 是 HII 区到观测者的距离, 单位为千秒差距. 这个数值大约为猎户星云的 4 倍. 以前发现的最大河外 HII 区为大麦哲伦星云中的剑鱼座 30, 称为超巨型 HII 区. 在 Mark. 8 的射电子成分(块斑)中, HII 区的规模要比剑鱼座 30 大 100 倍以上. 因此, 以 Mark. 8 为代表的这种块斑星系中, 可能存在的 HII 区比目前已发现的最大的 HII 区还要大.

HII 区是由大质量高温恒星发出的连续莱曼辐射完全电离星际氢所形成的. 只有光谱型为 O 型星和非常早期的 B 型星才足够的热, 以形成 HII 区. 这些早型星在主星序上的典型寿命在 $10^6 \sim 10^7$ 年之间. 因此, HII 区是目前人们所知道的恒星形成的最好指示. 但是 HII 区的光辐射, 尤其是早期 HII 区的光辐射, 通常被尘埃所严重遮挡. 因此, 有关 HII 区的早期演化阶段的知识, 大都来自射电观测.

从射电流量密度的观测值, 可以直接计算由早型星发射的连续莱曼光子数^[9,10]:

$$L_c = 4.761 \times 10^{48} \alpha[\nu, T_e]^{-1} [\nu]^{0.1} [T_e]^{-0.45} S \cdot D^2, \quad (3)$$

其中 $\alpha[\nu, T_e]$ 是一缓变函数, 在大多数情况下取 $\alpha = 1$ 是足够精确的, ν 的单位是千兆赫, T_e 的单位为 K, S 的单位是 Jy, D 的单位是千秒差距. 假设 $T_e = 10^4$ K, 对 Mark. 8 的三个射电子成分 A, B 和 C 进行了计算, 所求得的 L_c (光子数/秒) 列于表 6. 对于光谱型为 O8V 的恒星, 每个这样的早型星发出的光子通量设为 L_c , 有

$$\log L_c = 48.92. \quad (4)$$

这样, 可求得 Mark. 8 三个子成分所包含的 O8V 星数目, 计算结果也列于表 6.

表 6

子 成 分	L_c (光子数/秒)	O8V 星数目
A	4.6×10^{53}	5.4×10^4
B	1.5×10^{53}	1.8×10^4
C	2.7×10^{53}	3.2×10^4
平 均	2.9×10^{53}	3.5×10^4

为了同低分辨率的射电观测和 IUE 的紫外观测作比较, 我们也计算了一个“平均子成分”的相应值, 结果列于表 6 的第 4 行. 由表 6 看出, 一个“平均子成分”包含有 3.5×10^4 个 O8V 型星. 这个数目是十分巨大的. 这一结果同 Heidmann 等用 1.3 厘米总流量密度(低分辨率的

MPI 100 米射电望远镜) 观测所求得平均值 4.0×10^4 个 O8V 星是非常一致的, 也同 Benvenuti 等人由 IUE 的频谱观测求得的 2×10^4 个 O8V 星的结果相当一致。

五、结 论

1. VLA 在 6 厘米上的观测表明, 块斑星系 Mark. 8 包含三个主要的射电子成分。它们的射电形态和位置同光学上的块斑有很好的对应关系。结合 20 厘米波长上观测的初步结果, 可以推断这些子成分(块斑)的辐射机制是热辐射。结合光学和紫外观测, 可以认为 VLA 的观测结果强烈支持把这种光学上的块斑看作超巨型 HII 区的观点。VLA 的观测显示出 Mark. 8 星系有一个壳层(背景)辐射成分, 其辐射性质是非热的。

2. 在热辐射的前提下, 推出了 Mark. 8 中三个子成分的某些物理参量。其电子密度值相当于旋涡星系的典型值。电离氢的总质量则表明, 这些子成分(块斑)是一些超巨型 HII 区。

3. 根据 VLA 的观测, 直接求得由早型激发星发出的连续莱曼辐射光子通量。由此, 求得在一个“平均子成分”中包含有 3.5×10^4 个 O8V 型星。这说明, 在 Mark. 8 中, 恒星是以超大规模在形成中, 即存在“恒星形成爆发”(burst of star formation)。

参 考 文 献

- [1] Benvenuti, P., Casini, C., Heidmann, J., *Nature*, **282** (1979), 272.
- [2] Heidmann, J., *Astronomical Uses of the Space Telescopes, Geneva* (Ed. F. Machetto), 1979, 289.
- [3] Heidmann, J., Klein, U., Wielebinsky, R., *Astron. Astrophys.*, 1982, in Press.
- [4] Thompson, A. R., Clark, B. G., Wade, G. M., Napier, P. J., *Ap. J. Suppl.*, **44** (1980), 151.
- [5] Benvenuti, P., Casini, C., Heidmann, J., *Proc. Second IUE Conference*, 1980, 263, Tubigen.
- [6] Benvenuti, P., Casini, C., Heidmann, J., *MNRAS*, 1982, in Press
- [7] Heeschen, D. S., Heidmann, J., Yin, Q.-F., *Extragalactic Radio Sources* (Ed. D. S. Heeschen), 1982, Reidel Dordrecht.
- [8] Boesgaard, et al., *Ap. J.*, 1982, in Press.
- [9] Mezger, P. G., Henderson, A. P., *Ap. J.*, **147**, (1967), 471
- [10] Schraml, J., Mezger, P. G., *Ap. J.*, **156** (1969), 269.