

河外超脉泽辐射*

郑兴武 彭云楼

(南京大学天文系)

提 要

本文给出了新近才发现的超脉泽的主要观测结果。对超脉泽形态、形成的物理环境、辐射机制等方面研究作了简要评述。提出一些值得进一步探讨的问题。

一、引 言

河外超脉泽(Megamaser)是一个新的,耀目的天文现象,它那非常奇特的物理特征吸引着越来越多天文学家的关注。在1982年, Baan 等人^[1,2]首先在特殊星系 IC4553(Arp220)中发现羟基(OH)超脉泽辐射,它的辐射强度是银河系最强OH脉泽源W3(OH)的 7×10^7 倍。自那以后,美国国立射电天文台的91m,阿雷西博天文台的300m以及西德波恩的100m大射电天线都对准河外射电星系。在数百个搜寻目标中,发现了16个OH超脉泽源和6个H₂O超脉泽源。

本文评论6年来超脉泽源的主要观测结果;阐述从这些不多的资料中提出的超脉泽辐射机制、抽运机制以及具有超脉泽辐射的河外星系的特征。试图从这些不多的资料和不成熟的模型中,提出若干有价值的问题,供读者思考。

二、OH超脉泽的一般特征

表1给出16个超脉泽的物理参数^[3-10]。其中 $\Delta\nu_{\text{OH}}$ 为OH脉泽线的半峰全宽(FWHM),距离 D 是由星系的红移资料计算得到的(取 $H_0=100\text{km s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$), S_{18} 为源在 $\lambda=18\text{cm}$ 上的连续辐射流量密度, S_{1667} 和 S_{1665} 为脉泽线在1667MHz和1665MHz两个跃迁上的峰值流量密度,所有的红外资料均选自IRAS观测资料^[4]。表中的 $R=\int T_A(1667\text{MHz})d\nu/\int T_A(1665\text{MHz})d\nu$, S_{60} 为 $\lambda=60\mu\text{m}$ 的红外辐射流量密度, L_{OH} 和 L_{IR} 分别为脉泽辐射和红外辐射光度。

首先,超脉泽源都有非常强的辐射功率,一般为银河系中最强的W3(OH)辐射的 10^7 倍[W3(OH)辐射功率为 $2 \times 10^{28}\text{erg/s}$],是河外星系OH脉泽源(如NGC253、M82等)的 10^{4-5} 倍^[19,20]。图1给出源MRK273 OH超脉泽谱线^[11],其中一个脉泽子源的流量为51mJy,线宽为

* 国家自然科学基金资助项目,
1989年3月9日收到。

$\sim 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应辐射功率为 $W_3(\text{OH})$ 的 4×10^7 倍。迄今测到最强的 OH 超脉泽源是 MRK 231, 它的辐射总功率为 $9.7 \times 10^{35} \text{ erg/s}^{[6]}$ 。

绝大部分 OH 超脉泽星系的 OH 线辐射都与该星系的射电连续辐射区重合。对五个 OH 超脉泽源 (IC4553、MRK273、IIIZw35、IRAS17208-0014 和 IRAS11506-3851) 的 VLA 高分辨率观测表明^[2,10], 脉泽辐射的射电像重叠在 18cm 连续辐射的射电图上。图 2 是 MRK273 的 18cm 连续辐射图, 图中心的十字是 OH 超脉泽的位置。因此, 估计脉泽活动区在射电致密核的前面 (观测者与射电致密核之间)。射电连续辐射是脉泽活动的初始入射辐射, 脉泽活动区发生在射电核周围的星际介质里。

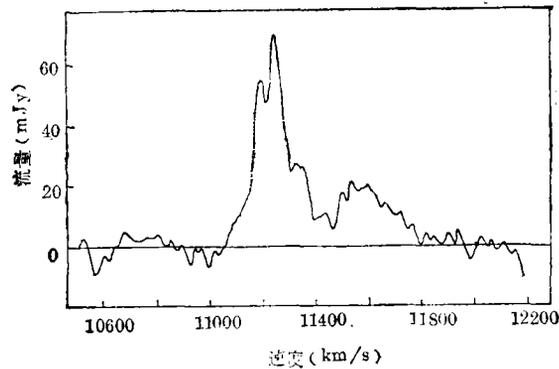


图 1 源 MRK 273 OH 超脉泽谱线

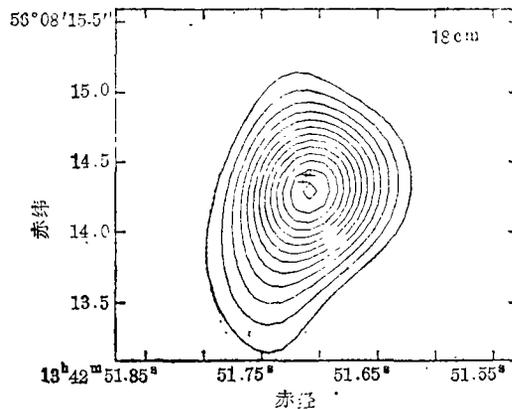


图 2 由 VLA 测得的 MRK273 超脉泽星系的 18cm 连续辐射射电图。等高线强度分别为 $\pm 10, 15, 20, 25, \dots, 70 \text{ mJy}$, 其中十字符号为超脉泽的位置

几乎所有的 OH 超脉泽星系都有强的红外辐射 ($L_{\text{IR}} \sim 10^{11} - 10^{12} L_{\odot}$), 其均匀的红外色温度为 $\sim 55 - 71 \text{ k}$ 。从表 1 看出源 NGC3690 和 IC4553 的红外辐射 ($60 \mu\text{m}$) 甚至超过 $100 \text{ Jy}^{[21-23]}$ 。图 3 给出 OH 和红外辐射光度的关系。显然, 具有 OH 超脉泽辐射的星系有强的红外辐射。在图中我们给出一条拟合曲线。但是, 为什么有这种关系还待进一步研究。

在热动平衡条件下, OH 脉泽 1667 和 1665 MHz 分子线强度比 $R = 1.8$ 。在 OH 超脉泽星系

中, 这个值为4, 有的源 (如IIIZw35) 高达8.2。如果超脉泽是星系核连续辐射的非饱和、低放大过程, 这个线强度比直接反映星系介质远离热动平衡的物理性质。

表2收集部分超脉泽星系的HI观测资料。大部分超脉泽星系有强的HI吸收, 其中四个源已获得HI的柱密度 $\mathcal{N}(T_i)$ (为氢原子的自旋温度)。图3给出Zw15107+0724的HI吸收线和OH超脉泽线^[12]。它们有相同的视向速度, 这说明HI吸收和OH超脉泽辐射来自同一区域。高柱密度表明OH超脉泽星系中有很大的星际介质盘。而且发现大多数超脉泽星系都是侧向的, 因此, 在视向方向有较高的星际介质柱密度, 它提供足够多的反转分子产生超脉泽现象。

以上是OH超脉泽星系的一般特征。为了进一步了解它们的性质, 下面给出目前研究得最详细的OH超脉泽源IC4553的主要观测和研究结果。

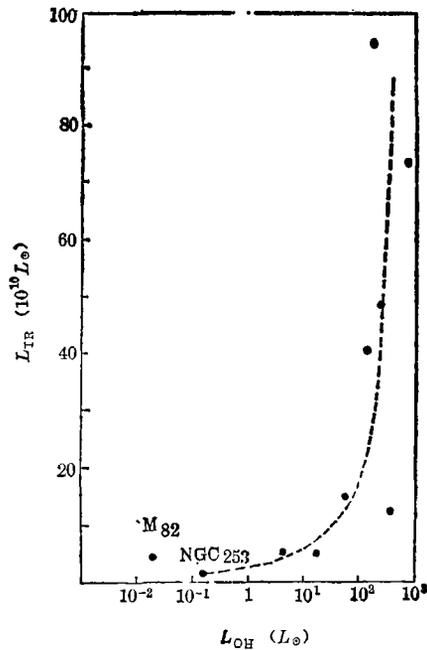


图3 OH超脉泽辐射和红外光度的关系 (图中M82和NGC253是一般的河外星系脉泽源)

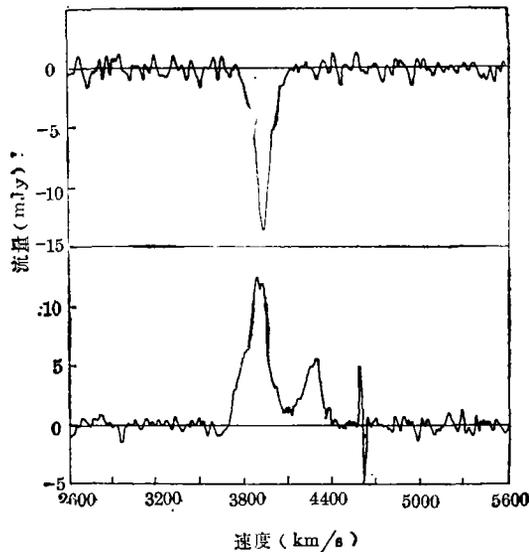


图4 OH超脉泽源HI吸收和OH发射线
(a) HI吸收谱, 积分时间为30分, rms=0.5mJy.
(b) OH发射谱, 积分时间为45分, rms=0.4mJy

表 2 部分超脉泽星系的HI观测资料

源	v_{HI} (km/s)	Δv_{HI} (km/s)	\mathcal{N}/T_e	参考文献
IIIZw35	8225	170	...	[17]
NGC3690	3115	210	1.1×10^{20}	[24]
11506-3851	3120	300	...	[8]
MRK231	12638	150	2.8×10^{19}	[24,25]
15107+0724	3870	85	5.2×10^{18}	[12]
IC4553	5350	330	1.1×10^{20}	[26]
Zw475.056	8197	296	...	[17]

三、强超脉泽星系IC4553

河外星系IC4553是一个非常强的超脉泽源, 并已用VLA、MERLIN和VLBI确定了超脉

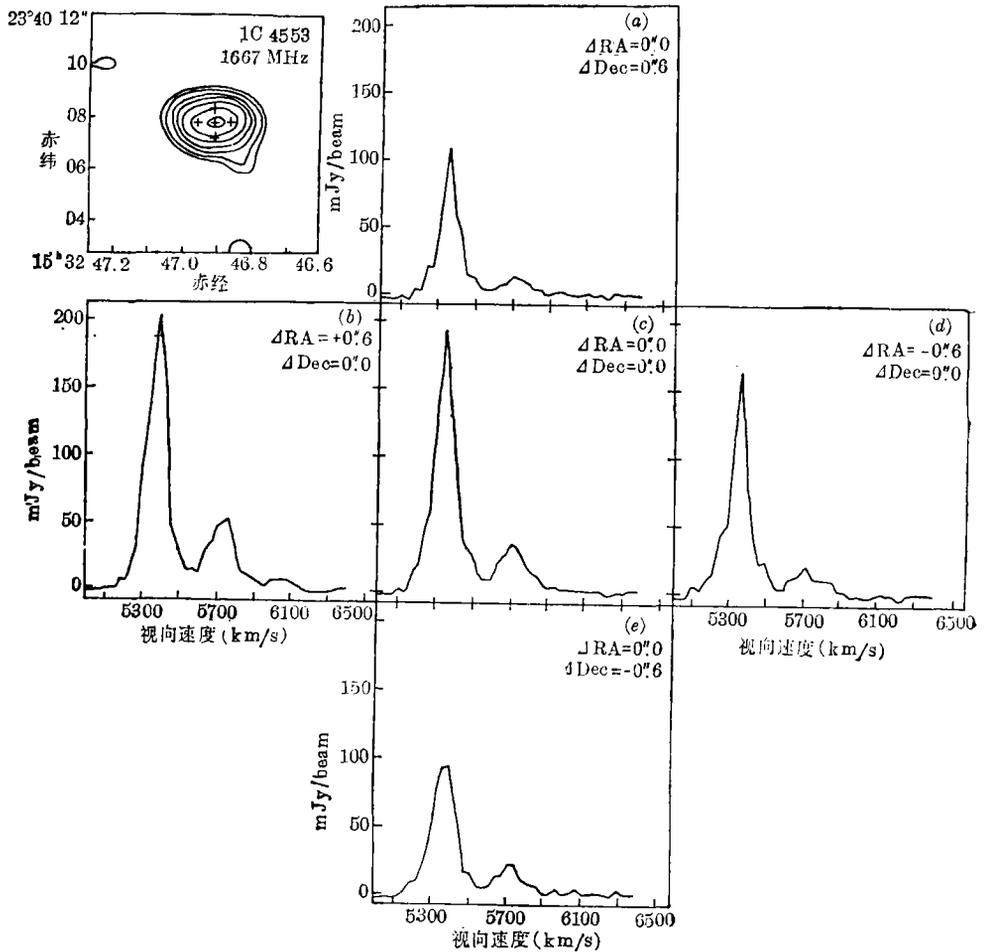


图 5 超脉泽星系IC4553的射电连续辐射图(左上角)和超脉泽源的投影位置(十字符号)以及它们的OH谱线^[23], 其中中心位置为 $\alpha_0 = 15^{\text{h}}32^{\text{m}}46^{\text{s}}.9$, $\delta_0 = 23^{\circ}40'07''.8$

泽结构^[2, 13, 27]。它是一个双核的星系或者可以看作共生的星系对^[23]。MERLIN给出的 18cm 连续辐射射电图与光学结构一样^[13]。超脉泽射电图结构同连续辐射结构很相似。因此, 一个可能的解释是脉泽区放大了连续辐射, 或者它们来自同一区域。从其他物理条件来看, 脉泽区在连续源的前面, 星际介质盘中的分子云放大了连续辐射。图 5 给出 IC4553 连续辐射的等强度线射电图和超脉泽源的投影位置以及它们的谱。

由 VLA 观测的 IC4553 脉泽源位置—速度分布图, 发现源自东向西有速度梯度, 其值为 33km/s/arc(95km/s/kpc), 这个速度与星系作为刚体的旋转速度一致。综合 H I、光学、红外和 OH 线的观测资料, 估计它是一个正在旋转的星际气体盘, 射电致密核沉浸在这个盘的中心。由于射电致密核的频谱为徒谱($\alpha=0.7$), 估计在星际气体盘的中心正经受一场恒星形成爆发。假定脉泽云在引力势下运动, 由 OH 超脉泽谱线翼的宽度(114km/s)、估计这个射电核有质量 $8 \times 10^6 M_{\odot}$, 其连续辐射等效于 5×10^5 个超新星遗迹的射电辐射。

四、超脉泽的辐射过程

根据 OH 超脉泽的 H I、红外和 OH 谱线观测资料, Baan 等人^[2]认为 OH 脉泽辐射来自河外星系分子云, 这些分子云正处于恒星形成爆发核区的周围。他们认为这是一种非饱和脉泽过程。有辐射转移方程解

$$I = I_0 e^{-\tau_\nu} + \frac{j_\nu}{k_\nu} (e^{-\tau_\nu} - 1),$$

其中 j_ν 和 k_ν 分别是介质的体辐射率和吸收系数, 光学深度 $\tau_\nu = k_\nu L$ ($k_\nu < 0$), L 为路径长度。假定自发辐射系数很小, 则由谱线流量和连续辐射流量之比 $I_L/I_0 \approx 1$ (参看表 1), 得 $k_\nu L = -0.69$, 而银河系脉泽区的典型值约为 20—30。可以推测超脉泽的入射辐射是强活动星系核的连续辐射场, 但放大因子很低。有人称 OH 超脉泽是活动射电星系核的“像”。

Norris 等人^[13]认为在活动星系核中心发生吸积的过程中产生的同步加速辐射形成射电连续辐射。从这个核发射的相对论性喷流与星系盘上的星际介质相互作用, OH 脉泽过程发生在这个作用区外面的压缩层。尽管他们提出不同的模型, 但是, 强背景辐射和低放大因子的看法是一致的。

河外超脉泽的抽运机制可能有红外、紫外和碰撞抽运。为了寻找最合理的超脉泽的抽运机制, 首先讨论获得所要求放大因子的反转 OH 分子的柱密度, 有方程^[28]

$$k_\nu = \frac{h\nu B}{4\pi\Delta\nu} \frac{\Delta N_0}{1 + (2C/P)}$$

其中 B 为爱因斯坦系数, $\Delta\nu$ 是多普勒宽度(一般为 56kHz), $\Delta N_0 = n_2 - n_1$ 为反转布居数密度, C 和 P 分别表示碰撞和辐射抽运率。一般情况下 $(1 + 2C/P) \sim 1$, 对于 IC4553, $\tau_\nu = -0.69$, 计算获得 $\Delta N_0 L = 5.8 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 。河外星系 OH 的柱密度典型值是 $N_{\text{OH}} L = 3 \times 10^{14} \text{Tex}/\text{cm}^2$ ^[29], 对于 IC4553, 其值大约为 $N_{\text{OH}} L = 4 \times 10^{15} \text{Tex}/\text{cm}^2$, 于是有 $\Delta N_0/N_{\text{OH}} = 3.8 \times 10^{-3}$ (参看表 1)。

Norris(1985年)等人倾向于红外抽运机制, 这是因为具有超脉泽辐射的星系都有强的红外辐射。如果超脉泽是辐射抽运的话, 它们的抽运光子数必须大于 18cm 辐射的脉泽光子数。

从表1看出, OH超脉泽星系的红外辐射提供足够多的红外光子使OH分子布居数反转。另外, 星际分子云在这个频率(35 μm 或80 μm)是光学薄的, 这样可以提供足够大的抽运区域, 产生能观测到的OH超脉泽^[30]。

紫外抽运的困难在于: 在河外星系, 不可能有像迄今观测到的脉泽辐射区那样大的UV辐射区, 紫外辐射很可能在核区附近就被吸收, 尘埃吸收紫外辐射后, 转换成红外辐射, 成为OH超脉泽抽运源。

五、H₂O 超脉泽

到目前为止, 已发现6个河外H₂O超脉泽源(参看表3)。H₂O和OH超脉泽有许多类似之处。普遍认为H₂O超脉泽也是河外分子云低放大背景连续辐射的结果。但是, 有H₂O超脉泽的星系的红外光度较小, 而且背景连续辐射也较弱^[39]。

表3 已观测H₂O超脉泽源参数

源名	D(Mpc)	L _{H₂O} (L _☉)	L _{IR} (L _☉)	参考文献
NGC4945	8.1	240	2×10 ¹⁰	[31,32,33]
Circinus	4	35	1.2×10 ¹⁰	[34]
NGC1068	20	320	3×10 ¹¹	[35]
NGC4285	9.5	157	6×10 ⁹	[35,36]
NGC3079	21	960	1×10 ¹¹	[31]
IC10				[37]

在致密H II区, H₂O脉泽发生在分子密度较高的区域, 也就是说H₂O脉泽较靠近激励源。如果把这个结论推广到河外星系, H₂O脉泽活动应发生在分子云的核区, 而OH脉泽活动在较大的范围内。于是, H₂O脉泽线要比OH线窄得多, 并预计有时变现象。

图6给出NGC3079和NGC4258的H₂O超脉泽线^[36], 线宽约为10km/s。对于NGC4258的H₂O超脉泽谱, 速度为455km/s的峰值流量由1984年的5Jy升至1985年的10Jy。

另外, OH超脉泽的速度与星系的系统速度基本相同。但是, H₂O超脉泽的视向速度与

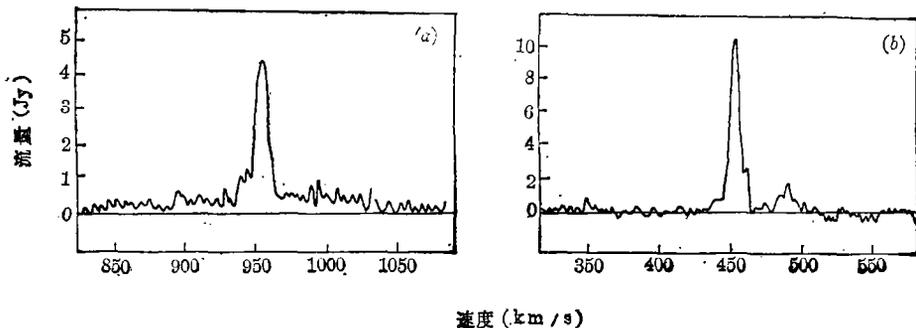


图6 (a) NGC3079和(b) NGC4258的H₂O超脉泽谱线

星系系统速度差得比较远。如H₂O超脉泽星系NGC3079的H₂O脉泽线相对于星系的系统速度蓝移140km/s, 这反映H₂O超脉泽源与核之间有相对运动。

六、讨 论

OH和H₂O超脉泽现象才发现短短的六年, 发现的数目还很少。对超脉泽的形态、物理性质、抽运机制等等给出结论性的意见还为时过早。但是, 就目前的观测资料, 以下几点看法是合理的。

1. OH超脉泽是一种非饱和、低放大因子的脉泽过程。它们的初始入射辐射是这些星系的致密或延展的连续辐射。这些连续辐射可能是因最近发生的恒星形成爆发或者星系核相互作用而产生的。估计在这些射电连续源的周围有一个星际分子盘, 观测到超脉泽星系的星际分子盘是侧向的, 这样可以在视向提供足够多的反转分子, 产生超脉泽辐射。

2. 星系核恒星形成爆发产生的紫外辐射加热周围的尘埃, 使这些超脉泽星系都发射强的红外辐射, 它提供了OH超脉泽辐射的抽运能。

3. OH和H₂O超脉泽可能有相同的辐射过程。但是, OH脉泽活动区要比H₂O活动区大得多。H₂O超脉泽可能发生在射电核附近的小分子云团块里, 这些云块可能以速度~100km/s下落或飞出核区。这些云块可能有较高的脉泽放大因子。

以上的推测, 有待进一步观测证实, 同时也要求人们在这些不完全的资料的基础上, 凭借想象力提出正确的推断来指导观测。河外星系中的超脉泽现象是否可能在一种特殊的物理环境中产生? 这种特殊的物理环境是什么? 有不少的观测者在大量不同类型的河外星系中寻找超脉泽源, 但发现的数目不多, 这是否说明超脉泽有很强的方向性? 为什么没有在一些近的河外星系中发现超脉泽? 这些问题给我们开拓了一个新的研究领域。

该文是1988年全国“恒星形成过程中的分子辐射”学术讨论会的评述报告。会议期间, 北京天文台的胡景耀、北京师范大学孙锦、紫金山天文台的木村博、刘彩品和周震甫等同志提出不少有益的意见, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Baan, W. A., Wood, P. A. and Haschick, A. D., *Ap. J.*, 260 (1982), L49.
- [2] Baan, W. A. and Haschick, A. D., *Ap. J.*, 279 (1984), 541.
- [3] Schmelz, J. T., Baan, W. A. and Haschick, A. D., *Ap. J.*, 321 (1987), 225.
- [4] Lonsdale, C. J., Helou, G., Good, J. C. and Rice, W., in *Catalogued Galaxies and Quasars observed in the IRAS Survey*, ed. by JPL, Pasadena, (1985).
- [5] Chapman, J. M., Cohen, R. J., Pointon, L., Staveley-Smith and Unger, S. W., *IAU Circ.*, No. 4180. (1986).
- [6] Baan, W. A., *Nature*, 315 (1985), 26.
- [7] Bottinelli, L., Gougenheim, L., Le Squeren, A. M., Martin, J. M., Dennefeld, M. and Paturcl, G., *IAU Circ.*, No 4379, (1987).
- [8] Norris, R. P., Whiteoak, J. B., Gardner, F. F., Allen, D. A. and Roche, P. F., *M.N.R.A.S.*, 221 (1986), 51.

- [9] Kazes, I. and Dickey, J. M., *A. Ap. (Lett.)*, **152** (1985), L9.
- [10] Bottinelli, L. et al., *IAU Circ*, No. 4357, (1987).
- [11] Baan, W. A., Haschick, A. D. and Schmelz, J. T., *Ap. J. (Lett)*, **298** (1985), L51.
- [12] Baan, W. A., Henkel, C. and Haschick, A. D., *Ap. J.*, **320** (1987), 154.
- [13] Norris, R. P., Baan, W. A., Haschick, A. D. Dimond, P. J. and Booth, R. S., *M. N. R. A. S.*, **213** (1985), 821.
- [14] Staveley-Smith, L., Unger, S. W., Cohen, R. J., Chapman, J. M. and Pointon, I., *IAU Circ.*, No. 4248, (1986).
- [15] Bottinelli, L., Dennefeld, M., Gougenheim, L., Le Squeren, A. M., Martin, J. M. and Paturel, G., *IAU Symp*, No. 115, p. 638, (1986).
- [16] Bottinelli, L., Gougenheim, L., Le Squeren, A. M. and Martin, J. M., *IAU Circ*. No. 4231, (1986)
- [17] Mirabel, I. F. and Sanders, D. B., *Ap. J.*, **322** (1987), 688.
- [18] Kazes, I., Mirabel, I. F. and Sanders, D. B., *IAU Circ*, No. 4362, (1987).
- [19] Gardner, F. F. and Whiteoak, J. B., *M. N. R. A. S.*, **173** (1975), 77.
- [20] Nguyen-Q-Rieu, Mebold, U., Winnberg, A., Guibert, J. and Booth, R., *A. Ap.*, **52** (1976), 467.
- [21] Gehrz, R. D., Sramek, R. A. and Weedman, D. W., *Ap. J.*, **267** (1983), 551.
- [22] Lonsdals, C. J., Neugebauer, G. A. and Soifer, B. T., *B. A. A. S.*, **16** (1984), 47.
- [23] Soifer, B. T. et al., *Ap. J. (Lett.)*, **283** (1984), L1.
- [24] Dickey, J. M., *Ap. J.*, **263** (1982), 87.
- [25] Heckman, T. M., Balick, B. and Sramek, B. A., *Ap. J.*, **247** (1981), 419.
- [26] Mirabel, I. F., *Ap. J.*, **260** (1982), 75.
- [27] Diamond, P. J., Norris, R. P., Baan, W. A. and Booth, R. S., in press.
- [28] Reid, M. J. and Moran, J. M., *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, **19** (1981), 231.
- [29] Richard, L. J., Bania, T. M. and Turner, B. E., *Ap. J.*, **252** (1982), 147.
- [30] Weliachew, L., Fomalont, E. E. and Greisen, E. W., *Ap. J.*, **137** (1984), 335.
- [31] Henkel, C., Gusten, B., Downes, D., Thum, C., Wilson, T. L. and Biermann, P., *A. Ap. (Lett.)*, **141** (1984), L1.
- [32] Dos Santos, P. M. and Lepine, J. R. D., *Nature*, **278** (1979), 34.
- [33] Batchelor, R. A., Jauncy, D. L. and Whiteoak, J. B., *M. N. R. A. S.*, **200** (1982), p.19.
- [34] Gardner, F. F. and Whiteoak, J. B., *M. N. R. A. S.*, **201** (1982), p.13.
- [35] Claussen, M. J., Heiligman, G. M. and Lo, K. Y., *Nature*, **310** (1984), 298.
- [36] Haschick, A. D. and Baan, W. A., *Nature*, **314** (1985), 144.
- [37] Henkel, C., Wouterloot, J. and Bally, B., *A. Ap.*, **155** (1986), 193.
- [38] Bottinelli, L. et al., *IAU Circ*, No. 4357; (1987).
- [39] Dimond, P. J., *IAU Symp.*, No. 129, p. 213, (1987).

(责任编辑 林一梅)

Megamasers in External Galaxies

Zheng Xingwu Peng Yunlou

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

Main observational results of megamasers are presented. Studies on the morphology, physical environment and radiation mechanism of megamasers are briefly reviewed and some interesting questions worth discussing in detail are put forward.