

射电干涉测量对天文脉泽研究的贡献

蒋 栋 荣

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

天文脉泽已成为一个迅速发展的研究领域, 重点评述了射电干涉测量对天文脉泽观测和研究所起的作用。

关键词 技术: 干涉 — 脉泽

1 引 言

自从 1965 年发现天文脉泽以来, 天文脉泽已成为一个迅速发展的研究领域。随着射电天文观测仪器灵敏度的改善和毫米波、亚毫米波技术的发展, 已发现了许多新的分子脉泽跃迁和新的脉泽源。射电干涉测量技术的进展, 使人们能更好地认识和理解天文脉泽现象, 并从中获得越来越多的天体物理信息。近 30 年间, 系统性评述文章主要有 Litvak^[1]、Moran^[2]、Reid and Moran^[3] 和 Elitzur^[4] 等。

天文脉泽作为分子谱线的特殊现象, 有着重要的研究价值。因为脉泽斑 (spot) 极高的亮温度和极小的视尺度, 使它们成为 VLBI 等高角分辨率观测研究的对象, 在研究脉泽形成区的致密结构和运动学以及探测遥远星系核区域中分子气体的分布等方面, 是其他分子谱线无法替代的。

天文脉泽的研究内容可以概括为: 一是天文脉泽现象本身的性质, 包括脉泽气体放大的是背景信号还是自身的发射, 放大过程是饱和还是非饱和的, 产生能级布居数反转的机制 (抽运机制) 是什么等; 二是利用天文脉泽研究脉泽形成区域的物理条件 (密度、温度和丰度等) 以及磁场、速度场和源距离等; 三是研究天文脉泽与恒星形成和演化的关系。

表 1、表 2 和表 3 给出了作者所收集到的至今已知的天文脉泽, 由于有关文献数量很大, 且不断有新的观测结果发表, 以及某些脉泽源分类的困难, 统计可能是不完整的。关于 OH 恒星脉泽数, 有人给出多于 1500 个的统计, 由于未给出详细文献, 此值仅供读者参考。

1993 年 12 月 13 日收到, 1994 年 3 月 6 日收到修改稿

国家自然科学基金资助项目

表 1 已知的天文脉泽

分子脉泽	恒星脉泽数	星际脉泽数	河外脉泽数		参考文献
			非核	核	
OH	>1326	>200	~50		5,6,7;3;8
H ₂ O	>420	>565	14	10	5,9,10,11,12,14;15
SiO	209	3			5
CH ₃ OH I		71			13
CH ₃ OH II		>215	1		13,16;17
NH ₃		11			18
H ₂ CO		NGC7538	3		19
CH			6		20
HCN	CIT6, YCVn				21
SiS	IRC10216				22
H _{30α}	MWC349				19

表 2 已知的甲醇星际脉泽

CH ₃ OH I			CH ₃ OH II		
跃迁	频率 (MHz)	数量	跃迁	频率 (MHz)	数量
9 ₋₁ -8 ₋₁ E	9936.20	1	5 ₁ -6 ₀ A ⁺	6668.518	~150
J ₂ -J ₁ E	25018.12	7	2 ₀ -3 ₋₁ E	12178.595	>50
4 ₋₁ -3 ₀ E	36169.24	12	2 ₁ -3 ₀ E	19967.396	3
7 ₀ -6 ₁ A ⁺	44069.43	36	9 ₂ -10 ₁ A ⁺	23121.024	3
5 ₋₁ -4 ₀ E	84521.18	6	7 ₋₂ -8 ₋₁ E	37703.729	5
8 ₀ -7 ₁ A ⁺	95169.49	7	6 ₂ -5 ₃ A ⁻	38293.306	2
9 ₀ -8 ₁ A ⁺	146618.82	2	6 ₂ -5 ₃ A ⁺	38452.662	2

表 3 已知的 H₂O 脉泽

跃迁	频率 (MHz)	恒星脉泽数	星际脉泽数
6 ₁₅ -5 ₂₃	22235.08	>400	>538
v ₂ 4 ₄₀ -5 ₃₃	96261.16	1	0
3 ₃₁ -2 ₃₀	183310.12	8	9
v ₂ 5 ₅₀ -6 ₄₃	232686.70	2	0
10 ₂₉ -9 ₃₆	321225.64	12	6
5 ₁₅ -4 ₂₂	325152.92	1	5
4 ₁₄ -3 ₂₁	380197.37	0	1
7 ₃₅ -6 ₆₀	437346.67	1	0
6 ₄₃ -5 ₅₀	439150.81	1	3
6 ₄₂ -5 ₅₁	470888.95	1	3

2 射电干涉测量的贡献

2.1 甲醇 (CH_3OH) 脉泽

自从 1971 年 Barrett 等人在 Orion-KL 区域发现 25GHz 甲醇脉泽跃迁以后, 甲醇脉泽的观测研究一直没有大的进展, 但 80 年代中期以后, 在许多恒星形成区域中陆续发现了许多新的甲醇脉泽发射, 这些甲醇脉泽现在分类为 I 型和 II 型。I 型脉泽最主要的特征谱线是 25GHz 发射; II 型脉泽在 6.6GHz 和 12GHz 有突出的发射特征, 其谱一般比 I 型脉泽复杂。没有一个 I 型脉泽源有 II 型脉泽发射, 反之亦然。而在许多 I 型脉泽区域中存在 6.6GHz 和 12GHz 加强的吸收特征, 在有些 II 型脉泽区域中存在 25GHz 吸收特征。两类脉泽的另一个差别是 I 型脉泽通常偏离极致密的 H II 区 0.1—1pc, 而 II 型脉泽则与极致密 H II 区成协。

I 型甲醇脉泽的原型是 Orion-KL。Menten^[13]总结了毫米波干涉仪 BIMA 对 DR21(OH)/DR21 I 型脉泽的观测结果: 84GHz 干涉测量分解 DR21(OH) 为 4 个脉泽分量, 脉泽分量之间的间隔 $\sim 0.2\text{pc}$ 。95GHz 的观测结果表明在 $1''$ 测量准确度条件下, 存在与 84GHz 相同速度和位置的脉泽分量。36/44GHz 脉泽谱类似于 84/95GHz 的脉泽谱, 并在单天线测量准确度 ($< 10''$) 下, 36/44GHz 与 84/95GHz 脉泽发射来自相同的空间区域。而 25GHz Orion-KL 的 VLA 观测未分辨 ($\theta < 0''.08$)^[13], 两台站 VLBI 观测无条纹 ($\theta > 0''.006$)^[13,23]。

II 型甲醇脉泽的原型是 W3(OH)。在所搜索的星际 OH 脉泽区域中有 70% 检测到 6.6GHz 甲醇脉泽, 25% 检测到 12GHz 甲醇脉泽 (检测率实际上取决于搜索观测的灵敏度)。澳大利亚综合阵对 6.6GHz 和 12GHz 的观测表明, 两种脉泽斑的位置重合在 20mas 以内^[25]; VLBI 观测表明两种脉泽斑位置重合在几个 mas 以内, 视向速度重合到测量不确定性以内^[24]。这意味着可能是一个物理上的脉泽斑产生两种脉泽跃迁的发射, 这对脉泽的抽运机制提供了强的约束。II 型脉泽斑的大小 $\sim 10^{13}\text{cm}$, 亮温度 $\sim 10^{12}\text{K}$, 在 10^{15}cm 尺度上成团^[24]。且这些脉泽斑通常分布在直线或弧上, 这意味着脉泽发射气体的几何学可能是喷流、激波波前或者是边缘对着视线的气体盘。

由于甲醇脉泽的跃迁频率是非标准的射电天文观测频率, 所以高分辨率干涉测量的结果还不多。但甲醇脉泽, 特别是 6.6GHz 跃迁的干涉测量研究对恒星形成区的气体动力学研究将是重要的。

2.2 天文脉泽的基本性质

单天线观测到的脉泽谱, 从包含一个简单的谱特征到包含几百个谱特征的很复杂的谱。高角分辨率的干涉测量表明, 脉泽的一个谱特征由一个或者多个空间上位置不同的脉泽斑的发射所组成, 有时甚至是由两个以上的中央激励源的不同脉泽叠加组成的 (例如 Cep A 的 H_2O 脉泽)。因此, 对单天线脉泽观测结果的物理解释应持慎重态度。至今大量的干涉测量得出如下结果。

星际水脉泽: 脉泽斑的典型大小 $\sim 10^{13}\text{cm}$, 典型的亮温度 $\sim 10^{12}\text{K}$, W49 中有的高达 10^{14}K 。脉泽斑通常在 10^{14} — 10^{15}cm 尺度上成致密团, 又在 10^{16}cm 尺度上成团 (相

应于单星激励区), 最大成团尺度 $\sim 10^{20}$ cm(相应于巨分子云中多星激励区)。与致密 H II 区的连续区辐射通常不重叠, 投影距离在 0.1—1pc。强度变化的时标短至天量级, 脉泽斑的寿命从小于 3 个月到大于 1 年^[3]。

星际 OH 脉泽: 脉泽斑大小 $\sim 10^{14}$ cm, 亮温度最高达 10^{13} K。在 10^{15} cm 尺度上成团, 通常投影在致密 H II 区的连续区辐射上。强度变化时标大于几年, 脉泽斑的寿命可能大于 20 年。

星际 NH₃ 脉泽: 脉泽斑大小 $\sim 10^{13}$ cm, 亮温度 $\sim 10^{12}$ K^[26]。

恒星水脉泽: 脉泽斑大小 $\sim 10^{13}$ cm, 亮温度 10^{11} — 10^{12} K, 分布在 10^{14} cm(长周期变星)到 10^{16} cm(超巨星)尺度上。脉泽斑数从 1 个到几十个^[27]。

恒星 OH 脉泽: 脉泽斑的亮温度 10^8 — 10^{12} K, 分布在 10^{16} — 10^{17} cm 距离上。

恒星 SiO 脉泽: 亮温度 $\sim 10^{10}$ K, 分布在 2—6 个恒星半径范围内 (10^{13} — 10^{14} cm)^[28]。

由于大多数脉泽源位于银道面中, 观测结果可能受到相对大的星际散射的影响, 因此, 高银纬脉泽源的 VLBI 观测将可提供更多的星际散射和脉泽斑基本性质的信息。

2.3 星周结构的研究

OH/IR 星的 OH1612MHz 脉泽的干涉测量成图证实了双峰轮廓是由晚型星包层“前后”(front-back)发射产生的解释, 这种模型为利用晚型星 OH 脉泽测量源距离提供了依据。不同空间分辨率的干涉测量揭示了星周包层中不同的空间结构, VLA 图上显示的是一个较完整的类环结构, MELIN 图上显示的是这些环中的团块物质的发射(包层的不均匀性), VLBI 图上揭示的是一个致密的核^[29]。

Reid 等人^[30]用 VLA 对 W Hya 同时进行了连续区和脉泽谱线(H₂O)观测, 用 H₂O 脉泽作为连续区观测的相位参考, 使连续区图达到了接近完美的视宁度水平, 得出中央星大小 $\sim 0''.09$ (直径 $\sim 1.7 \times 10^{14}$ cm), 射电亮温度为 1600K。而 H₂O 脉泽发射来自一个半径 $\sim 3 \times 10^{14}$ cm 的类环结构, 且在恒星所在位置上没有强的脉泽发射。

Plambeck 等人^[31]用毫米波阵观测了 Orion-KL IRC₂ 的 SiO 脉泽, 成图结果表明脉泽分布在一个环中, 他们用正在膨胀和转动的星周气体盘拟合观测结果, 得出气体盘的内半径 r_0 为 41AU, 外半径为 82AU, 厚度为 20AU。径向膨胀速度, $v_r = 20(r/r_0)^{-\frac{1}{2}} \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 切向速度 $v_t = 10(r/r_0)^{-\frac{1}{2}} \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.4 脉泽模型的约束

脉泽和连续区发射的相对位置提供了脉泽模型的观测约束。星际 OH 脉泽斑投影在致密 H II 区上, 提示星际 OH 脉泽放大的是背景连续区信号, H II 区的远红外辐射可能是主要的抽运机制。基于 W3(OH) 中 OH 激发态脉泽的观测结果, Casaromi 等人实现了详细的模型计算, 他们发现用远红外辐射场和谱线重叠的适当组合, 可以定性地解释 W3(OH) 中的观测结果。但这个模型应用于基态主线脉泽方面尚有一些问题^[4]。

星际 H₂O 脉泽偏离极致密 H II 区, 意味着 H₂O 脉泽放大的是脉泽气体的自发发射, 这些脉泽斑可能位于星风与星际介质相互作用区域(激波区域)。Elitzur 等人^[32]提出了由星际激波压缩和加热的中性气体碰撞抽运的模型。Felli 等人^[33]研究了 CO 分子外流与 H₂O 脉泽的关系, 发现脉泽发射的积分光度正比于 CO 外流的力学光度, 支持了这种模型。1989 年以后, 发现了若干 H₂O 毫米波和亚毫米脉泽发射, 推动了脉泽模

型研究的发展。Nenfeid 和 Melnick^[34] 用 H_2 分子为主要碰撞对象, 以大速度梯度的条件, 计算了 349 个转动态的粒子平衡布居数, 发现在 400K(相应于快速耗散的激波后面分子重新形成的区域中的温度), H_2O 有 7 个脉泽跃迁, 在 1000K(相应于被非耗散激波加热的区域的温度), H_2O 有 22 个脉泽跃迁。325GHz H_2O 脉泽跃迁是第一条基于理论预报发现的天文脉泽谱线。在单天线角分辨率下, 22、183、321、325GHz 脉泽发射来自相同的空间区域, 原则上谱线比可用来约束脉泽形成区的物理条件, 由于脉泽区域存在大量脉泽斑, 这类研究工作还需等待亚毫米波干涉测量设备的建成。最近观测发现的三个 400 多 GHz 的脉泽跃迁又将推动脉泽模型的发展。

I 型甲醇脉泽偏离极致密 H II 区, 分子碰撞可能是重要的抽运机制, 而 II 型甲醇脉泽与 OH/H II 紧密成协, 暗示与 OH 星际脉泽可能有着类似的抽运机制。

2.5 河外脉泽

至今已发现了近 50 个河外 OH 超脉泽, Henkel^[19] 根据它们的各向同性光度把它们分类为 kilo- 脉泽 ($10^{-3} - 1L_{\odot}$)、mega- 脉泽 ($1 - 10^3L_{\odot}$) 和 giga- 脉泽 ($> 10^3L_{\odot}$)。由于它们距离较远, 流量密度较低, 至今只对少数源进行了干涉测量研究。Arp220、Mrk273、IRAS17208-0014、NGC3690 和 III Zw3S 等源的 VLA 或 MELIN 观测表明, 脉泽致密分量尚未分辨, 通常与射电连续区辐射重叠^[19]。Arp220 的 VLBI 观测表明两个相距 $\sim 1''$ 的致密发射区^[35], 与射电和光学连续区图像类似, 认为这是两个塞佛特星系的核。所有这些干涉测量的结果都支持 OH 超脉泽是对星系核连续区发射低增益放大的模型, 平均视增益近似为 1, 连续区源被 OH 云覆盖的比例估计为 0.1—0.01^[4]。

河外 H_2O 脉泽分为两类。一类是类似于银河系恒星形成区的脉泽, 它们位于星系核区域的外面。M33 中的 IC133 已有两个历元的 VLBI 观测, 发现了两个相距约 1pc 的活动中心, 有几十个脉泽斑。另一类河外 H_2O 脉泽位于星系核区域上, 即通常所称的 H_2O 超脉泽。对这类脉泽目前有三种解释: (1) 脉泽发射来自核区域中很浓密的分子气体团, 是中央源质量外流与周围介质相互作用产生的^[36]; (2) 河外 H_2O 超脉泽仅是银河系恒星形成区脉泽向高光度的延伸^[37]; (3) H_2O 超脉泽是前景分子气体团对核连续区辐射的低增益非饱和放大。NGC4258 的 VLBI 观测表明, 脉泽分布在 $\sim 0.2\text{mas}$ ($\sim 2 \times 10^{16}\text{cm}$) 区域中, NGC3079 VLBI 观测揭示脉泽分布在 $\sim 7 \times 10^{16}\text{cm}$ 区域中, 单个脉泽斑未分辨 (小于 $1.5 \times 10^{16}\text{cm}$)^[38]。IC10 的 VLBI 观测结果是两个相距 10^{16}cm 的脉泽斑, 单个脉泽斑小于 10^{15}cm 。而 Grechill 对 NGC3079 成图揭示脉泽斑分布在两个团上, 与 5GHz 连续区 VLBI 的结果不相同^[15]。虽然不少研究者接受第三种解释, 但由于缺乏高角分辨率的观测证据, 超脉泽的模型还是一个需要继续探索的课题。

NGC4258 是已知的河外 H_2O 超脉泽星系, Nakai 等人^[39] 在 22GHz 附近用 285MHz 带宽 (相应于 $3850\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度范围) 观测, 发现除了原来已知的在该星系速度附近的主脉泽以外, 还存在强的红移特点 ($740 - 980\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$) 和弱的蓝移特点 ($-760 - -985\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)。野边山 45m 和鹿岛 34m 单基线 VLBI 观测得出, 红移高速脉泽在距离主脉泽 $\pm 0''.05$ ($\pm 1.6\text{pc}$) 以内。红移特点的流量密度和峰值强度的视向速度随时间同步变化, 说明这些脉泽特点有共同的抽运源, 且与主脉泽无关。这种极高速脉泽可能的解释有: (1) 在一个致密的中央源 (黑洞) 周围迅速转动的分子环的发射, 如中央质量为 $2 \times 10^8 M_{\odot}$, 分子环

的半径 1pc, 可能有 $1000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的开普勒运动; (2) 核区域中外流 (或内流) 的分子气体的发射, 如这个双极流垂直于星系盘, 要求外流的速度 $3000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。射电和光学喷流观测支持这种解释; (3) 不是气体的多普勒运动产生的而是受激 Raman 散射产生的结果, 观测到的红移和蓝移特点的速度对称性, 有利于这种解释。最终的结论需要高分辨率 VLBI 观测来确定极高速脉泽相对于主脉泽的位置和自行。

2.6 距离测量

天文脉泽研究最重要的成果之一是提供了源距离的一种独立估算。目前用天文脉泽测定源距离的方法有两种:

(1) 恒星形成区脉泽 (目前主要是 H_2O 脉泽) 的多历元 VLBI 观测, 可获得脉泽斑的视向速度 (线速度) 和相对自行 (角速度), 然后用统计视差或运动学模型拟合方法导出源距离。至今用这种技术研究了 8 个河内星际 H_2O 脉泽区域, 确定了 7 个源的距离^[40]。Greehill 等人已将这种技术应用于河外非核 H_2O 脉泽 M33/IC133 两历元 VLBI 观测, 用统计视差进行了距离估算。

(2) 利用 OH/IR 源 OH1612MHz 脉泽发射起源于正在膨胀的星周气体壳层的模型。用双峰谱变化的相位延迟测量可确定 OH 脉泽壳层的线大小, 用干涉测量确定这个壳层的角大小, 组合两种测量结果, 在球对称假定条件下导出源距离。van Langevelde 等人^[41]用更严格的数学处理, 得出了 43 个源的相位延迟测量, 给出了 12 个源的距离估算。Champan 等人对一个更大样本的观测, 将给出更多的源的距离估算。

Moran^[40]用这两种方法得到的源距离和速度估算, 拟合到银河转动模型中 (用 $220\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的常数转动速度), 得到太阳至银心的距离估算, 用晚型星 OH 脉泽的资料导出 $R_0=8.8\pm 0.9\text{kpc}$, 用恒星形成区 H_2O 脉泽的资料导出 $R_0=7.8\pm 0.6\text{kpc}$ 。随着源样本数的增加, 可望获得更准确的银河系转动模型参数。

2.7 脉泽形成区的速度场

天文脉泽的干涉测量, 除了提供脉泽斑的空间分布信息外, 视向速度提供了不完整的速度场信息。而多历元干涉测量可获得脉泽斑的相对自行, 从而得到脉泽形成区的三维速度场信息。恒星形成区的 H_2O 脉泽观测研究表明, Orion^[42]、SgrB^[43]等源的球形膨胀, W49N 为双极外流以及垂直于外流轴的转动^[44]。OH 脉泽的观测研究表明, CepA 的球形膨胀速度场^[45], W3(OH) 亦是球形膨胀, 从而否定了过去曾经认为的内流解释^[46]。由于运动学模型拟合的残差对模型的依赖不很灵敏, Bloemhof 发展了用速度方差与协方差之比来区别球对称外流与彗星状外流的方法, 并对 W3(OH) 提出了彗星状弓形激波的模型。

此外, 对若干河内和河外源的观测表明, 脉泽发射区域上存在着视向速度的梯度, 如 G35.2-0.7N 的 OH 脉泽 VLA 观测, Arp220 的 OH 脉泽 VLA 观测, G339.88-1.26 甲醇 6.7 GHz 脉泽及 NGC4258 的 H_2O 脉泽 VLBI 观测等, 这些观测提示可能存在着转动的分子盘。

2.8 磁场

高分辨率干涉测量, 使人们可以较准确地识别 OH 脉泽的 Zeeman 分裂对, 因为真正的 Zeeman 对应该是空间位置相同的脉泽斑产生的。如果仅依据谱的信息来识别是不

可靠的, 由运动产生的多普勒频移与 Zeeman 分裂所产生的频移是难以区别的。

对恒星形成区 OH/H II 区脉泽研究表明, 典型的磁场为几 mG。Reid 等人^[47]利用 17 个源的 Zeeman 对, 发现 14 个源的视线方向磁场是指向银河系转动方向的。这意味着磁场方向在从星际介质到形成恒星过程中大部分是守恒的, 磁场在坍缩形成恒星过程中可能有重要影响。Cohen 等人在 CepA 中检测到磁场有每年 0.4% 的衰减, 这可解释为脉泽区域的膨胀, 且与该区域中自行测量结果是自洽的。

晚型星脉泽的观测已导致恒星表面磁场的粗略估算。Reid^[48]总结了观测结果, OH 脉泽区的典型磁场为 5mG, H₂O 脉泽区的磁场为 0.5—5G, SiO 脉泽区磁场 ~50G。用 $B_*(\text{恒星表面磁场})=B_{\text{maser}}(R_{\text{maser}}/R_*)^\alpha$, $\alpha=2-3$ 推算, 估计恒星表面的磁场可达 10^2G (Mira 变星) 至 10^3G (超巨星)。

3 结束语

随着射电天文观测仪器的灵敏度的提高, 毫米波、亚毫米波天文观测设备的陆续投入观测以及空间 VLBI 技术的发展, 将把天文脉泽研究, 特别是干涉测量研究推向一个新阶段。

本工作得到攀登项目和国家自然科学基金的支持, 并感谢孙锦教授提供了若干天文脉泽源表的资料。

参 考 文 献

- [1] Litvak M M et al. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1974: 97
- [2] Moran J M. In: Avrett E H ed. *Frontiers of astrophysics*, Cambridg: Harvard University Press. 1976: 399
- [3] Reid M J, Moran J M. In: Verschuur G L et al eds. *Galactic and extragalactic radio astronomy*. 2nd ed. NewYork: Springer, 1988. ch.6
- [4] Elitzur M. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1992, 30: 75
- [5] Benson P J et al. *Ap. J. Suppl.*, 1990, 74: 911
- [6] Becker R H et al. *A. J.*, 1992, 103: 545
- [7] te Lintel Hekkert P et al. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1991, 90: 327
- [8] Henkel C et al. *Astron. Astrophys.*, 1990, 229: 431
- [9] Caseroni R et al. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1988, 76: 445
- [10] Comoretto et al. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1990, 84: 179
- [11] 凌兆芬等. 紫金山天文台台刊, 1989B(3): 199
- [12] Brand J et al. Preprint, 1993
- [13] Menten K M. In: Haschick A D et al. eds. *Skyline*. San Francisco: ASP. 1991. 119
- [14] Melnick G J et al. *Ap. J.*, 1993, 416: L37
- [15] Greenhill L J. Ph D. Thesis. Massachusetts: Harvard University, 1990
- [16] Menten K M. In: *Astrophysics maser*. [s.l.]: [s.n.], 1992: 199
- [17] Sinclair M W et al. *M.N.R.A.S.*, 1992, 256: 33
- [18] Madden S C et al. *Ap. J.*, 1986, 300: L79
- [19] Henkel C et al. *Astron. Astrophys. Rev.*, 1991, 3: 47

- [20] Guilloteau S *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1987, 176:L24
- [21] Henkel C *et al.* *Ap. J.*, 1983, 267: 184
- [22] Martin-Pintodo J *et al.* *Ap. J.*, 1992, 386: L23
- [23] Diamond P J. In: Felli M *et al* eds. *Very long baseline interferometry*. Dordrecht: Kluwer, 1989. 345
- [24] Menten K M *et al.* *Ap. J.*, 1992, 401: L39
- [25] Norris R P *et al.* *Ap. J.*, 1993, 412: 222
- [26] Preethi P *et al.* *Ap. J.*, 1991, 373: L13
- [27] Lane A P *et al.* *Ap. J.*, 1987, 323: 756
- [28] McIntosh G *et al.* *Ap. J.*, 1989, 337: 934
- [29] Bowers P F *et al.* *Ap. J.*, 1990, 354: 676
- [30] Reid M J *et al.* In: Haschick A D *et al* eds. *Skyline*. San Francisco: ASP, 1991. 375
- [31] Plambeck R L *et al.* *Ap. J.*, 1990, 348: L65
- [32] Elitzur M *et al.* *Ap. J.*, 1989, 346: 983
- [33] Felli M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1992, 255: 293
- [34] Neufeid D A *et al.* *Ap. J.*, 1991, 368: 215
- [35] Diamond P J *et al.* *Ap. J.*, 1989, 340: L49
- [36] Claussen M J *et al.* *Ap. J.*, 1986, 308: 592
- [37] Ho P T P *et al.* *Ap. J.*, 1986, 320: 663
- [38] Haschick A D *et al.* *Ap. J.*, 1990, 356: 149
- [39] Nakai N *et al.* *Nature*, 1993, 361: 45
- [40] Moran J, Preprint, 1992
- [41] van Langevelde H J *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1990, 239 : 193
- [42] Genzel R *et al.* *Ap. J.*, 1981, 244: 884
- [43] Reid M J *et al.* *Ap. J.*, 1988, 330: 809
- [44] Gwinn C R *et al.* *Ap. J.*, 1992, 393: 149
- [45] Migenes V *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1992, 254: 501
- [46] Bloemhof E E *et al.* *Ap. J.*, 1992, 397: 500
- [47] Reid M J *et al.* *Ap. J.*, 1990, 361: 483
- [48] Reid M J *et al.* In: Beck R *et al* eds. *Galactic and intergalactic magnetic fields*. Dordrecht: Kluwer, 1989. 21

(责任编辑 刘金铭)

The Impact of Radio Interferometry Observations on the Study of Astronomical Masers

Jiang Dongrong

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

The study of astronomical masers has become a rapidly developing field of research. The impact of radio interferometry observations on the study of astronomical masers is presented in this paper.

Key words techniques: interferometric—masers