

## 几个著名的恒星形成区及其脉泽活动\*

欧阳晶 孙锦

(北京师范大学天文系)

### 提 要

本文评述了星际脉泽的观测和理论研究。为了更清楚地了解星际脉泽在恒星形成区中的空间分布以及它们与该区射电、红外和高速外流等现象的关系,本文在前一部分对7个著名的恒星形成区中的物理条件和脉泽活动作了综述。这7个恒星形成区是:W3(OH), W3(Cont.), W49N, W49S, SgrB2, W51和Orion(OMC-1)。本文在后一部份讨论了与这些恒星形成区成协脉泽( $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )的研究现状和可能的抽运机制。

### 一、引 言

天体脉泽可以分为两类:一类产生于恒星形成区,另一类产生于晚型星的拱星包层中。由于历史上的原因,通常称前者为星际脉泽,后者为恒星脉泽。还有一类脉泽是在彗星与行星大气中观测到的。本文仅讨论星际脉泽。

目前强的星际脉泽有四种: $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{OH}$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 。这四种脉泽又以 $\text{OH}$ 脉泽和 $\text{H}_2\text{O}$ 脉泽最为常见,并且对这两种脉泽的研究也最多。目前已发现的星际 $\text{SiO}$ 脉泽不多,而 $\text{CH}_3\text{OH}$ 脉泽只在近几年才被广泛地注意,正处于研究的初期阶段。

星际脉泽产生于恒星形成区中,它是大、中质量星正在形成的一个标志,也是主序前星最后演化阶段质量外流的一个重要表现形式。观测表明,一些正在形成或刚形成的星,其周围有致密的H II区、脉泽源、热分子发射区、分子外向流和近红外、远红外源。通常 $\text{H}_2\text{O}$ 脉泽源和最年轻的天体成协,而 $\text{OH}$ 脉泽源是和尺度小于 $10^{17}\text{cm}$ 的致密H II区成协。因此研究星际脉泽为我们研究恒星形成环境和恒星早期活动提供了有力的手段。同时,要想清楚地了解形成星际脉泽的物理条件,对恒星形成区的了解也是不可缺少的。因此本文分为两部份:前一部份介绍具有典型意义的7个著名的恒星形成区,它们的脉泽活动及其与该区射电、红外以及高速外流等现象的联系;然后再分别介绍与这些恒星形成区有关的几种天体脉泽源的主要研究课题和抽运机制。有关星际脉泽其他各个方面的研究细节,读者可查阅近年来发表的有关评述文章[1—7]。

\* 国家自然科学基金资助项目。  
1989年12月19日收到。

## 二、7 个著名的恒星形成区

### 1. W3(OH)

W3 分子云复合体距地球为 2.2kpc。这个复合体中包含了 3 个主要的恒星形成区: W3N, W3(OH)和 W3(Cont.)。W3(OH)区包含一个超致密的 H II 区, 一个红外源, OH、H<sub>2</sub>O、CH<sub>3</sub>OH 脉泽发射和几种分子的热发射。Harten 对于该区的连续源做了成图观测<sup>[8]</sup>, 发现只有最强的致密源伴有 OH 脉泽发射。有许多作者都发表了最强连续源的高分辨率图<sup>[9,10,11]</sup>。这些图表明在电离气体的区域有一个壳层或环状结构。该区红外观测<sup>[12]</sup>发现在连续源和 OH 脉泽附近有一个不能分辨的(尺度 $\leq 3''$ )20 $\mu$ m 的红外源。

对于 W3(OH)区中 H<sub>2</sub>O 脉泽发射已经有许多文献讨论过<sup>[9,10]</sup>。W3(OH)中的 H<sub>2</sub>O 脉泽位于连续源东面 7'' 的位置上(见图 1)<sup>[9,13,14]</sup>。在 W3(OH)中 H<sub>2</sub>O 脉泽的激发一直是一个谜。这是因为在 H<sub>2</sub>O 脉泽区域中均没有发现红外和射电辐射。H<sub>2</sub>O 脉泽距 W3(OH)连续区投影距离大约是 0.07pc, 在 H II 区中的中心星不太可能激发 H<sub>2</sub>O 脉泽。可是近来的 HCN 88.6GHz 的综合孔径观测解决了这个问题<sup>[15]</sup>, HCN 分子热发射与 H<sub>2</sub>O 脉泽发射位于同一区域, 这说明在该区域的云中可能有一颗新形成的恒星或原恒星。

早先对于 W3(OH)中的 OH 脉泽研究发表了许多文章<sup>[16-22]</sup>。这些研究表明, 大多数 OH 脉泽发射位于西半部(见图 1), 但并不一定投影到连续区上。最初是 Reid<sup>[19]</sup>, 后来是 Garay<sup>[23]</sup>对 H II 区做了 H 的复合线观测, 发现 H II 区速度为  $-51\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于所有的 OH 脉泽相对于球状 H II 区有红移运动, Reid<sup>[19]</sup> 提出 OH 脉泽产生于仍然被吸积的物质壳层中。可是, 最近对 OH 脉泽自行的测量却支持了这个脉泽区正在膨胀的观点<sup>[24]</sup>。

Norris<sup>[18]</sup>在 1612, 1665 和 1667MHz 跃迁上做了成图观测, 发现大部份脉泽都投影到距致密 H II 区角距离为 1'' 的区域。Guilloteau<sup>[10]</sup>对 W3(OH)做了 NH<sub>3</sub> 的吸收线观测, 发现它仅仅覆盖图 1 的西部区域。最近 Menten 等人的观测还表明, 在指向 W3(OH)致密 H II 区方向有强的 CH<sub>3</sub>OH 脉泽发射<sup>[25]</sup>, 和 H<sub>2</sub>O 脉泽相比, 它与 H II 区和 OH 脉泽有更密切的联系。

### 2. W3(Continuum)

W3(cont.)与 W3(OH)不同, 它比 W3(OH)复杂。它至少包含 7 个红外源<sup>[12]</sup>, 几个射电连续源<sup>[26]</sup>, 一个 HCN 云<sup>[27]</sup>, 致密的高速 CO 发射<sup>[28]</sup>, H<sub>2</sub>O 脉泽<sup>[13,14]</sup>, 1720MHz 上

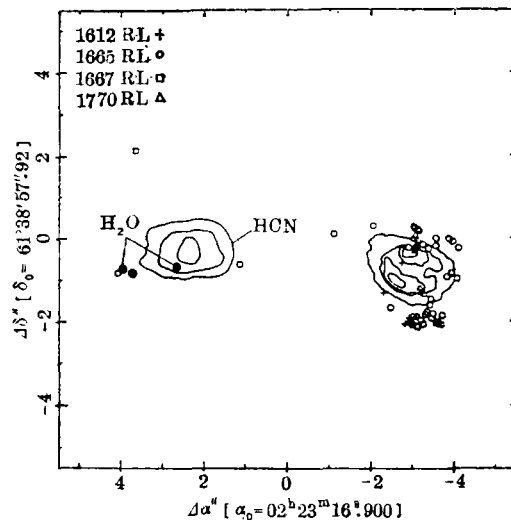


图 1 W3(OH)中 OH 脉泽的分布。右面等强度图是氢的连续谱<sup>[10]</sup>, 左面等强度图是 HCN 的热发射谱<sup>[15]</sup>

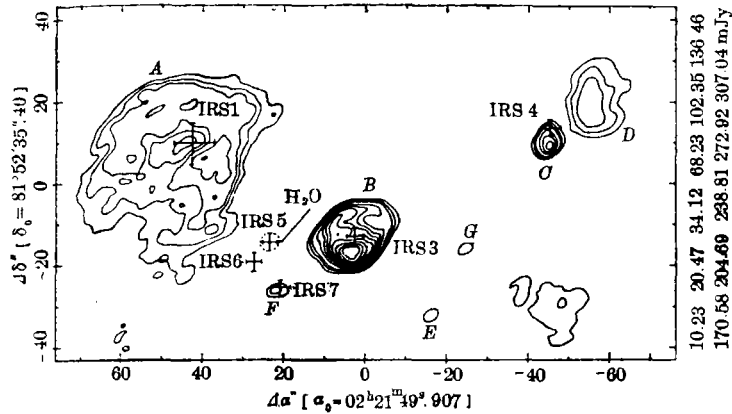


图 2 W3(cont.)区中 15GHz 的连续辐射的等强度图<sup>[11,12,14,26]</sup>

的 OH 脉泽发射<sup>[20]</sup>以及主线上 OH 脉泽发射<sup>[11]</sup>(见图 2)。

图中的 IRS5 比 IRS4 更为活跃, 在 IRS5 附近有 H<sub>2</sub>O 脉泽<sup>[13,14]</sup> 和一个高速致密的 CO 外流<sup>[28]</sup>。

### 3. W49N

W49 区域像 W3 复合体一样, 也是银河系中被广泛研究的一个复杂的恒星形成区。在这里我们讨论 W49N 是 W49 恒星形成区北面的那部分区域。W49N 距地球 14kpc, 是一个非常明亮的恒星形成区, 它包含了银河系中最强的 H<sub>2</sub>O 脉泽<sup>[30]</sup>, 它也是强的 OH 脉泽发射区<sup>[11]</sup>、强的红外发射区<sup>[31]</sup>; 此外还有一个 CO 的双极流和几个致密的 H II 区<sup>[33]</sup>。CO 1→0 和 HCO<sup>+</sup>1→0 的干涉仪测量表明, 在 W49N 中分子双极流是以强的 H<sub>2</sub>O 脉泽为中心的。图 3 给出了 H<sub>2</sub>O 和 OH 脉泽在 W49N 射电连续源上的位置。OH 脉泽发射大多数对应于连续谱中的 A—G 部分<sup>[11]</sup>, 但也有一部份 OH 脉泽与连续区不对应。

在 A—G 部分的 OH 脉泽发射中, 大部分 OH 脉泽均集中分布在连续区的边缘, 考虑到投影效果, 这种集中分布就体现得更好了。如图 4 所示。

1667MHz 脉泽集中在  $\alpha = 19^{\text{h}}07^{\text{m}}49^{\text{s}}.85$ ,  $\delta = 09^{\circ}01'15''.8$  的区域内, 在这个区域 OH 脉泽速度分布从 34.6—29.0 km·s<sup>-1</sup>。这些 OH 脉泽点均投影在 0''.5 范围内, 它与 H<sub>2</sub>O 脉泽群正巧差不多吻合。同时 H<sub>2</sub>O 脉泽速度也有正负的差异<sup>[30]</sup>。这表明 H<sub>2</sub>O 脉泽和 OH 脉泽的形成原因可能是相同的, 都是由于中心源的准直外流与周围分子云作用的结果。在 G 部份中所有脉泽速度都分布在 -7.8—13.4 km·s<sup>-1</sup> 范围内, 同时

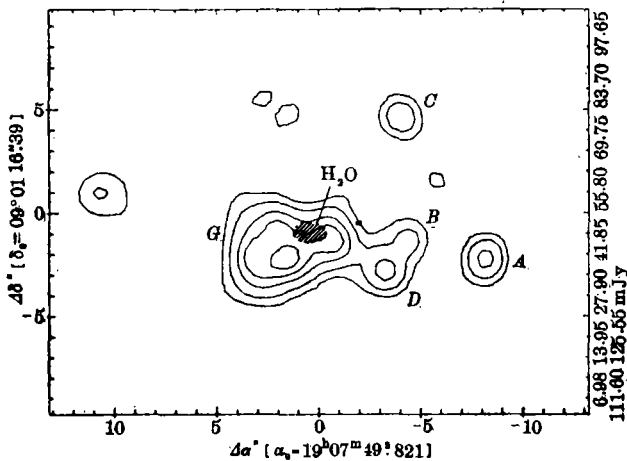


图 3 W49N 中 15GHz 连续辐射的等强度图<sup>[9,11]</sup>

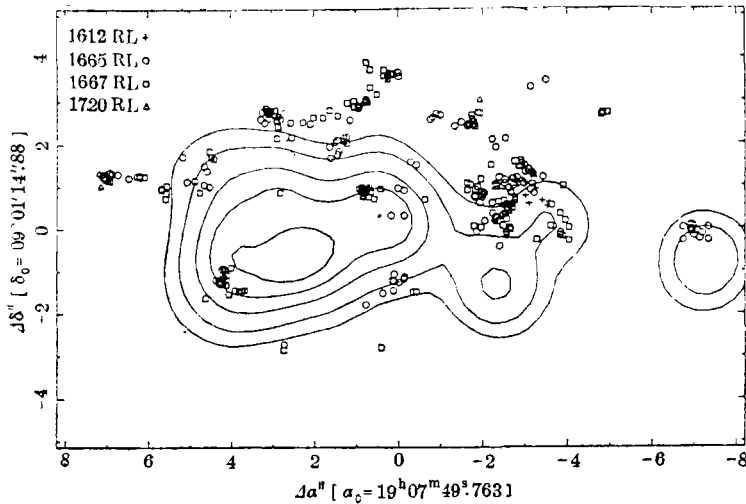


图 4 W49N 的 G, B, D 和 A 连续区中的 OH 脉泽的空间分布<sup>[11]</sup>

在 B, D 区域中分布范围为 2.8—34 km·s<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>。相似的速度分布特征在高分辨的 CO 观测数据中也可发现<sup>[32]</sup>。

一般来说恒星形成区内星际脉泽的磁场测量是通过 OH 的脉泽谱线的 Zeeman 分裂来进行的。W49N 的脉泽点的磁场大约在 3—9 mG 范围内<sup>[11]</sup>。

### 4. W49S

W49S 区域包含了一个红外发射源<sup>[31]</sup>、H<sub>2</sub>O 脉泽<sup>[34]</sup>、OH 脉泽<sup>[11]</sup>和连续射电发射<sup>[11]</sup>, 如图 5 所示。

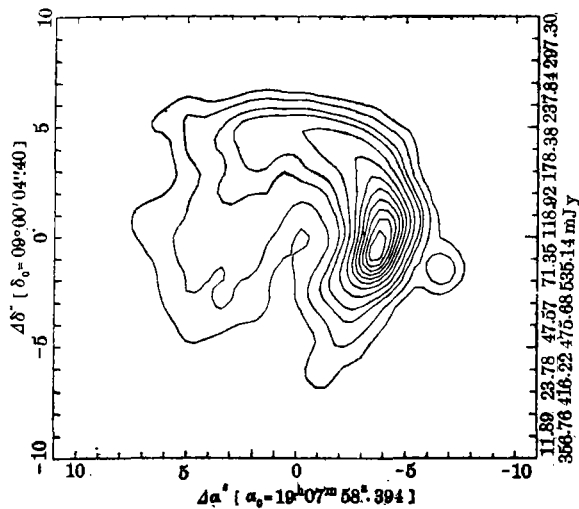


图 5 W49S 中的 HII 区的等强度图<sup>[11]</sup>

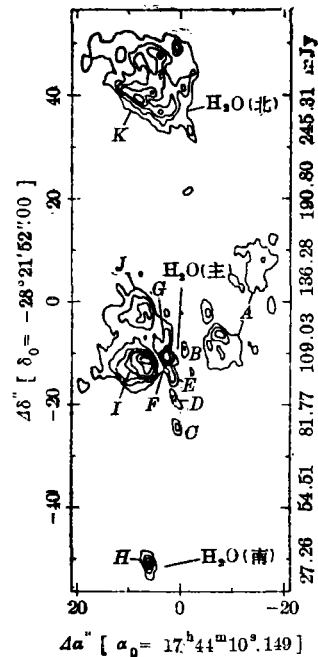


图 6 Sgr B2 区域中的 4885 MHz 的等强度图<sup>[43]</sup>

在 W49S 连续谱上最惊人的发现是 H II 区相对于周围介质有移动<sup>[11]</sup>。Reid<sup>[35]</sup>提到 G 34.3+0.2 的致密 H II 区其形状类似彗星, W49S 的 H II 区的形状也像彗星一样。Gaume<sup>[11]</sup>给出了 OH 脉泽在 W49S 上的分布。所有的 OH 脉泽都分布在一个  $3'' \times 1'' .5$  的长条状区域内。像大多数其他彗状的 H II 区一样, W49S OH 脉泽也都投影在连续区中具有最大亮度梯度的部份, 这部份通常在彗头上。W49S 中的 OH 脉泽速度似乎可以分为两组<sup>[11]</sup>。一组速度范围为  $24.8-16.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 另一组为  $7.2-13.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这两组速度分布来自空间不同区域处。

### 5. Sgr B2

Sgr B2 是一个著名的银心附近的分子云复合体, 也是恒星形成活跃的地方。高分辨的连续谱成图的观测由 Benson 在 1984 年完成了。他们用了 5GHz 和 15GHz 两个波段, 其中 5GHz 图见图 6。Sgr B2 中间部分包括了许多高度致密的连续区, 其中 Sgr B2 I 有一个彗状 H II 区。Benson 认为 I 部分与恒星外残留的壳层正在被更为年轻区域 E, F, G 的辐射所吹散, 从此形成了彗状结构。

在 Sgr B2 区域中有三个地方看到了 H<sub>2</sub>O 脉泽<sup>[44]</sup>, 虽然这些 H<sub>2</sub>O 脉泽都没投影到连续区上, 但它们都与一个连续区相关连。特别应该提到的是在 Sgr B2 中 H<sub>2</sub>O 脉泽谱的速度弥散高达  $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这种现象起先被看成是一种冲击运动的证据<sup>[45]</sup>。以后通过 VLBI 手段观测 H<sub>2</sub>O 源的横向运动, 发现数十个 H<sub>2</sub>O 脉泽源斑正从同一个中心向外径向膨胀<sup>[46]</sup>。利用 H<sub>2</sub>O 脉泽自行还测得 Sgr B2 离我们为  $7.1 \pm 1.5 \text{ kpc}$ 。Hasegawa<sup>[42]</sup>报道了他们在 Sgr B2(主)处发现了 SiO 的脉泽线, 其中  $V=1$  的 SiO 脉泽速度范围在 H<sub>2</sub>O 脉泽的速度之外。

Sgr B2 中的 OH 脉泽的位置已经由许多人研究过了<sup>[23,43]</sup>, Gaume<sup>[11]</sup>绘出了 Sgr B2 各部分 OH 脉泽的空间分布图。在 F 区域内的 1665 和 1667MHz 的速度是很有趣的。速度场分为低速区和高速区。低速区范围为  $45-55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 高速区范围为  $55-65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其对称中心正好是连续谱的中心。以上这一观测事实, 意味着 OH 脉泽很可能处于一个重力不稳定的盘中, 或处于双极流与周围物质作用的区域<sup>[11]</sup>。

### 6. W51

W51 距地球 7kpc, 它包含了一些连续的扩展源<sup>[11]</sup>, 几个红外源<sup>[36]</sup>, 几种分子的热发射<sup>[37,38,39]</sup>, 4 个 OH 脉泽群<sup>[11]</sup>以及 H<sub>2</sub>O 脉泽<sup>[13]</sup>。如图 7 所示。

在整个 W51 复合体中, W51(南<sub>2</sub>)是最活跃的区域。W51(南<sub>2</sub>)连续部分靠近强的 H<sub>2</sub>O 脉泽 W51(主)。Genzel<sup>[40]</sup>研究了 W51(主)的自行, Ho<sup>[37]</sup>观测了 HCN 的谱线发射, Jaffe<sup>[41]</sup>进行了亚毫米波的连续谱观测, 所有这些观测其峰值都在 W51(南<sub>2</sub>)区域附近。和 Sgr B2 一样, 在 W51 中也观测到了 H<sub>2</sub>O 脉泽的高速分量, 它处在一个直径为  $3 \times 10^{16} \text{ cm}$  以低速分量为主的核区域的壳层中。还有些高速分量处在更外层, 它可能是成协分子云边界附近的碎片。H<sub>2</sub>O 脉泽正是靠碎片与周围分子云碰撞而激发的。在 W51(南<sub>1</sub>)区域附近还观测到了 OH 脉泽<sup>[11]</sup>, 但 OH 脉泽与 H II 区投影距离为  $0.07 \text{ pc}$ , 这个距离说明 W51(南<sub>1</sub>)可能不是 OH 脉泽以及附近 H<sub>2</sub>O 脉泽的激发源。在 W51(南<sub>2</sub>)中的主线脉泽的速度分为两组, 一组速度范围为  $63-72 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 另一组范围为  $45-54 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 两组在空间上分开的距离为  $1''$ <sup>[11]</sup>。

在 W51 IRS2 中发现的 OH 脉泽是由速度相差  $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  两个相反的偏振组成的, 并且

其位置与 W51(北)的  $H_2O$  脉泽相一致。最近 Hasegawa 报道, 在 IRS2 附近发现了 SiO 脉泽的  $V=2, J=1-0$  的发射。SiO 脉泽的速度范围与其对应位置的  $H_2O$  脉泽相一致。另外在 W51(南) IRS1 附近观测到的 OH 脉泽<sup>[11]</sup>, 其谱线有 Zeeman 分裂, 从分裂的能级中测到的磁场强度为 7mG。

### 7. Orion

Orion 分子云 (OMC-1) 是一个包含有 4 种强星际脉泽的区域。Orion 分子云离我们很近 ( $\sim 450pc$ ), 因此脉泽发射是探测小尺度范围恒星形成条件的有力手段<sup>[1]</sup>。在图 8 中画出了 OMC-1 中已探测到的红外源, 其中 kL 星云附近是分子发射最强的地方。

在 Orion 复合体中致密红外源的性质已被某些作者研究过<sup>[47,48]</sup>。有名的红外源有 BN, IRC2, IRC4 和 IRS2。其中 IRC2 的研究最有意义, 它提供了一个年轻巨星周围环境可能的

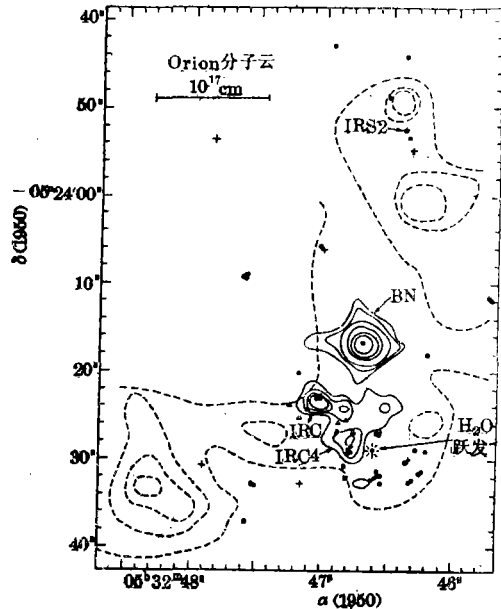


图 8 图中虚线表示氢分子  $N=1-0, S(1)$  的发射, 实线是  $8.6\mu$  的发射。图中标出了一些已知的红外源。图中 + 号表示高速的  $H_2O$  脉泽, 圆点表示低速的  $H_2O$  脉泽, 三角代表 OH 的 1665MHz 发射, 正方形表示  $1.25cm$  上三个强的  $CH_3OH$  脉泽

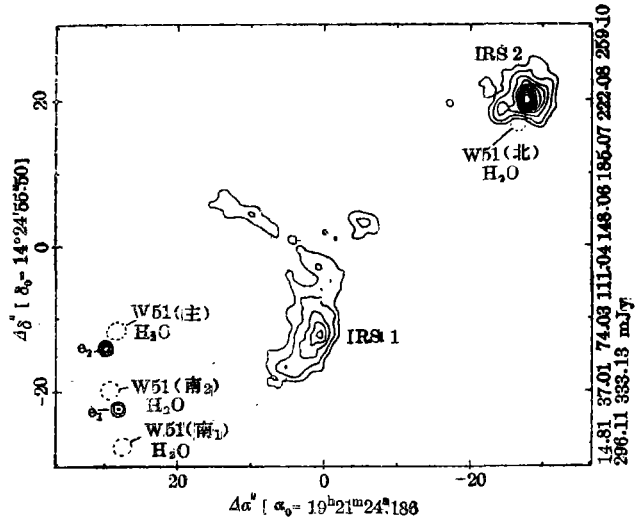


图 7 W51 区域中的 15GHz 的等强度图<sup>[11]</sup> 以及  $H_2O$  脉泽的位置<sup>[42]</sup>

的详细图像。Genzel<sup>[49]</sup>在 IRC2 附近发现了 SiO 的热发射, Baud<sup>[50]</sup>在 IRC2 附近发现了 SiO 脉泽。SiO 脉泽速度分为两个范围, 一个是  $-12-5 km \cdot s^{-1}$ , 另一个是  $5-24 km \cdot s^{-1}$ 。VLBI 观测<sup>[51]</sup>表明, 这些脉泽发射是来自于尺度为  $5 \times 10^{14} cm$  的区域内。在 IRC2 附近的  $H_2O$  脉泽速度特征与 SiO 脉泽一样, 且尺度为  $10^{15} cm$ 。它们的谱线像在晚型星的包层中那样呈现出双峰结构。在 IRC2 附近还观测到了  $CH_3OH$  脉泽, 它们没有明显的双峰特征, 相应的脉泽壳层半径约为  $10^{17} cm$ <sup>[52]</sup>。

利用 SiO 脉泽和  $H_2O$  脉泽的观测, 可以设想围绕 IRC2 的一个正在膨胀的盘, 其尺度为  $10^{15}-5 \times 10^{16} cm$ 。Wright<sup>[53]</sup>对 SiO 脉泽  $V=1, J=2-1$  的观测, 以及其他人的观测<sup>[54]</sup>, 都发现在 IRC2 附近有一个倾斜的环状结构或盘状结构。倾斜盘的轴与视线方向成  $60^\circ$  角, 且膨胀速度为  $10-15 km \cdot s^{-1}$ 。

Genzel<sup>[54]</sup>从 Plambeck<sup>[55]</sup>对 HCN 的观测得

出结论,认为 IRC2 周围  $\sim 6 \times 10^{16}$  cm 的盘是一个旋转盘。同时 OH 脉泽的主线观测(位于一个低速膨胀的环中)证明在 NE—SE 方向上速度差别很大<sup>[64]</sup>。更大尺度  $(12-5) \times 10^{17}$  cm 上的图像是通过其他分子和原子的观测得到的。在离 IRC2 大约 0.1 pc 处,人们发现了高速气流(CO, HCO<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O,  $\Delta v \sim 100-200$  km·s<sup>-1</sup>)和被激波加热的气体(H<sub>2</sub>, CO, OH 和 OI)以及某些 HH 天体。有趣的是 IRC2 外高速流的方向是与低速膨胀的环形壳层垂直的,它们来自一个有点准直的角度中, H<sub>2</sub>O 脉泽的高速和低速分量分别示踪了上述两种运动。IRC2 中心位置是一个弱的(在 15 GHz, 2 mJy)不可分辨的( $\leq 10^{16}$  cm)射电连续源, IRC2 的中心星可能是一个热星<sup>[65]</sup>。由于 IRC2 区域中严重的红外消光,目前对中心星或其包层的红外谱线的探测均失败了。因此,目前我们仅对中心星的光度  $[(3-10) \times 10^4 L_{\odot}]$  和质量  $(10-20 M_{\odot})$  略有所知<sup>[66]</sup>。Kaifu 和 Snyder 虽提出这颗星可能是一个奇特的晚型星<sup>[66]</sup>,但从最新的观测和分析来看,IRC2 更可能是一颗主序后年轻超巨星。

在 IRC4 附近有许多 H<sub>2</sub>O 脉泽群和一些热而宁静的致密气体块<sup>[67]</sup>。靠近这一区域有 OH 脉泽和 CH<sub>3</sub>OH 脉泽<sup>[68,62]</sup>。致密的 SO 平台(plateau)也靠近 IRC4<sup>[69]</sup>。IRC4 是一个气体密度和辐射密度都很高的区域。

Abraham<sup>[60]</sup>在 Orion 中还发现了 H<sub>2</sub>O 脉泽的耀亮(flare),这一 H<sub>2</sub>O 脉泽的速度为 8 km·s<sup>-1</sup>。1980 年它耀亮时其流量达到  $2 \times 10^9$  Jy,亮温超过  $10^{16}$  K<sup>[1]</sup>。但当时并没发现 20  $\mu$  红外发射,也没发现同样速度的 CH<sub>3</sub>OH 发射的亮度有什么改变。关于 H<sub>2</sub>O 脉泽耀亮的起因,目前尚无一致的看法。

Orion 复合体的磁场测量主要通过以下两种方法:(1) H 和 OH 谱线的 Zeeman 分裂。(2) kL 天体的红外线偏振。

以上两种方法测得的磁场强度差别较大,并且在不同的位置测出的磁场彼此之间也相差很大。在 OMC-1 中的 IRC4 附近利用 OH 谱线(1612, 1665)测得磁场为 3—5 mG,中性氢(21 cm)Zeeman 分裂测得磁场为  $0.06 \pm 0.02$  mG。在 kL 天体核心部分用红外伪振方法测得磁场为 7—10 mG。

### 三、四种星际脉泽的研究现状

以上我们对几个恒星形成区做了一般的探讨。从这几个恒星形成区中不难发现星际脉泽与恒星的早期活动是密不可分的。要想通过脉泽的研究了解恒星形成区的物理条件,首先要做的就是发展星际脉泽的理论,可惜,到目前为止星际脉泽的理论工作还极不成熟,对各种星际脉泽的抽运过程还处于探讨之中。下面我们就已有的理论对四种星际脉泽做一个讨论。

#### 1. CH<sub>3</sub>OH

自从 Barrett<sup>[61]</sup>在 Orion 中发现了星际 CH<sub>3</sub>OH 脉泽的  $J_2 \rightarrow J_1$  E 发射后,对银河系的星际 CH<sub>3</sub>OH 脉泽做了大量的搜寻工作。Buxton<sup>[62]</sup>对于 132 个已知的 H<sub>2</sub>O、OH 和 SiO 脉泽区域,在 25 GHz [ $J_2 \rightarrow J_1$  ( $J = 2, 4, 6$ )] 上没有发现 CH<sub>3</sub>OH 源。许多星际 CH<sub>3</sub>OH 脉泽源的发现都是近年的事。Matsakis<sup>[62]</sup>对 Orion-kL 的 CH<sub>3</sub>OH 的  $6_2 \rightarrow 6_1$  E 和  $7_2 \rightarrow 7_1$  E 谱线做了干涉图, Wilson<sup>[63]</sup>在 W3(OH)发现了  $9_2 \rightarrow 10_1$  A<sup>+</sup> 发射,并在 NGC 7538 上也发现了可能

的  $9_2 \rightarrow 10_1 A^+$  脉泽发射。Morimoto<sup>[64]</sup>在 SgrB2、W51 和其他两个银河源中分别发现了  $4_{-1} \rightarrow 3_0 E$  和  $7_0 \rightarrow 6_1 A$  脉泽谱线。Menten<sup>[65]</sup>对 30 个银河源进行观测, 在 W31、W33、W51 和 DR 21 中发现了  $J_2 \rightarrow J_1$  的一系列脉泽谱线。1985 年 Batrla<sup>[66]</sup>在 12.1786GHz 波段上对 W3(OH)、NGC 6334、NGC 7538 和几个其他源进行观测, 又发现了  $2_0 \rightarrow 3_{-1} E$  脉泽跃迁。在 W3(OH) 和 NGC 6334F 上的谱线强度竟达到了 1000Jy 的数量级, 这使得它们成了银河系中已知最强的  $CH_3OH$  脉泽。Koo<sup>[67]</sup>用同样的频率对 78 个非恒星  $H_2O$  脉泽和 33 个典型 I 型 OH/IR 星做了观测。结果又发现了 11 个新的  $CH_3OH$  源, 但没有一个是恒星脉泽。诸多的观测表明, 在 12.2GHz 上的  $CH_3OH$  脉泽与星际 OH 脉泽以及致密 H II 区密切相关, 有一些还是线偏振的<sup>[67]</sup>, 而 25GHz 上的  $CH_3OH$  脉泽却与致密的 H II 区不协调。它们可能是另一类  $CH_3OH$  脉泽, 这类脉泽和恒星演化的更早阶段相联系<sup>[65]</sup>。

目前观测到的  $CH_3OH$  脉泽还不多, 且它们大多数比较弱, 所以今后还要进一步对它们进行搜寻。对于  $CH_3OH$  的理论计算工作为数极少。Zeng<sup>[68]</sup>虽用简化的辐射转移和统计平衡模型计算了 Orion-kL 和 Sgr B2 的 E 型  $CH_3OH$  的脉泽发射, 但是由于  $CH_3OH$  分子与  $H_2$  的碰撞速率在实验和理论上均未解决, 所以采用了非常近似的速率系数。关于  $CH_3OH$  在 12.2GHz 上的超强发射的起因以及它与恒星形成的关系, 更是目前富有挑战性的一个课题。

## 2. SiO

自从 1973 年在 Orion-kL 发现了 SiO 脉泽发射之后, 上百个 SiO 脉泽已被发现, 但在 1985 年以前仅有一个 SiO 脉泽是在恒星形成区中被发现的。这个恒星形成区就是 Orion-kL。最近在恒星形成区 W51 和 Sgr B<sub>2</sub>MD 5 中又发现了两个新的 SiO 脉泽源, 但对它们研究的甚少。

由于 Orion-IRC2 的 SiO 脉泽是处在年轻天体 IRC2 高速外向流的最内部份, 因此它提供了研究高速气流里星风形成最好的手段。根据 IRC2—SiO 脉泽的双峰频谱和空间分布, 我们得知在 IRC2 外大约  $1-2 \times 10^{15} \text{cm}$  处, 气体除了径向膨胀外, 还有一个随机湍动的分量, 其湍动速度大约为  $2-4 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对 Orion 中的 SiO 脉泽已做了许多研究, 如 Zeng<sup>[70]</sup>, Elitzur<sup>[71]</sup>等。

Zeng 等人着重从辐射转移角度来研究 SiO 脉泽产生的条件, 通过解辐射转移和统计平衡方程来确定 SiO 脉泽区域的物理参数。Elitzur 则用了不同的方法<sup>[4,71]</sup>。

为了避免热化, Elitzur 认为  $N=1 \rightarrow 0$  振动退激发必须是辐射退激发, 同时脉泽区的密度必须低于某个上限值 ( $\sim 10^{12} \text{cm}^{-3}$ )。此外, 为了提供足够的脉泽增益, SiO 的  $V=1 \rightarrow 0$  跃迁应该是光学厚的。由于脉泽光学厚度和光子发射率都正比于  $\dot{M}/rv_{\infty}^2$  ( $\dot{M}$  为中心星的质量损失率,  $r$  为脉泽源的位置,  $v_{\infty}$  为脉泽区的膨胀速度), 因此在  $n_{H_2}$  不超过上限值的情况下,  $r$  越小越有利脉泽作用。据此, 结合观测数据, Elitzur 得出 Orion-IRC2 的  $\dot{M} = 1-2 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$ , 与其他方法估计的质量损失率相符<sup>[54]</sup>。

Elitzur<sup>[4]</sup>同时指出抽运是由 SiO 与中性气体粒子之间碰撞产生的, 这与恒星 SiO 脉泽有一定的相似<sup>[72]</sup>。

## 3. OH

根据已得到的观测资料<sup>[73]</sup>, 可以肯定  $H_2O/OH$  脉泽源与致密 H II 区、致密红外区和热物



质外流存在着很强的物理联系。 $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$  脉泽标志着 OB 星或其他低质量的星在主序前阶段已停留了大约  $10^4$ — $10^5\text{yr}$ <sup>[54]</sup>。然而究竟 OH 脉泽是否与 H II 区一一对应? OH 脉泽的物理参数和动力学条件与新形成的大质量星究竟有哪些关系? 都仍然是一些不清楚的问题。

有许多作者基于对某恒星形成区的观测而提出了一些 OH 脉泽产生的模型。Reid<sup>[19]</sup>在对 W3(OH) 进行观测时发现 OH 谱线相对于 H II 区有红移。因此他们认为 OH 脉泽是处于一个残留的仍受到原恒星吸积的吸积盘中。后来 Garay<sup>[23]</sup>对 W51 中的 OH 脉泽也做了同样的观测, 其结果与 Reid 的相一致。Elitzur<sup>[74]</sup>提出 OH 脉泽产生于 H II 区的等离子区与中性区的交界处, 在交界面上 H II 区由于超声速膨胀而产生了激波, 当激波作用到中性区时, 会使激波前的气体状态发生很大变化从而产生 OH 脉泽。Guilloteau<sup>[10]</sup>, Norris<sup>[16]</sup>, Haschick<sup>[75]</sup>等则认为 OH 脉泽存在于新形成恒星周围的旋转盘中或旋转环里(toroid)。

在晚型星中 OH 脉泽是靠红外辐射抽运的<sup>[2]</sup>。然而, 对于星际 OH 脉泽而言, 辐射抽运几乎是不可能的。这是因为在多种潜在的抽运波长上(无论是 UV 还是近红外)观测到的光子数总是少于 OH 脉泽的光子数。唯一的例外是在远红外波段。最近从 40—150 $\mu\text{m}$  范围的观测发现, 在 30—50 $\mu\text{m}$  区域有红外的超额发射, 这种发射有可能用于抽运<sup>[76]</sup>。但是这种红外的超额发射是来自冷(30—50K)的尘埃, 它无疑是位于 OH 脉泽区之外的。因此无法提供 OH 的抽运。这样我们只好转到碰撞抽运。

第一个碰撞抽运的模型是 Gwinn<sup>[77]</sup>提出的。但 Anderson<sup>[78]</sup>近来的工作似乎否定了 Gwinn 最初的思想。最初由 Johnston<sup>[79]</sup>后经 Elitzur<sup>[80]</sup>修正的电子束(或离子束)流与脉泽分子相互作用的抽运模型也是基于碰撞抽运的, 但看来也有一定的困难<sup>[82]</sup>。此外, 由于 OH 与 H 或  $\text{H}_2$  的碰撞截面至今尚未能足够精确地给出, 因此给恒星形成区 OH 脉泽的理论计算带来了困难。最近磁流体激波的计算有可能解决这一问题。这一计算表明, 当垂直磁场的激波扫过后, 将产生具有较高规则速度的带电粒子流<sup>[81]</sup>。这一激波计算结果与 Elitzur 模型<sup>[80]</sup>的要求符合很好。

#### 4. $\text{H}_2\text{O}$

$\text{H}_2\text{O}$  脉泽与致密 H II 区有紧密的联系, 但通常它并不在 H II 区的旁边。在 15 个恒星形成区中,  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽与致密 H II 区的平均距离为 0.1pc, 这差不多等于 H II 区的直径。因此和 OH 脉泽不同,  $\text{H}_2\text{O}$  源与 H II 在投影位置上并不重合。紧挨着  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽源后面究竟是什么天体, 至今尚不清楚。对  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽源的所有射电连续谱和红外发射的探测均失败了。但从演化的角度看, 可以肯定  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽的产生早于 OH 脉泽<sup>[34]</sup>。它在 H II 区很小甚至探测不到时就已经出现了。此外, 由于在很多  $\text{H}_2\text{O}$  源中都观测到了高速特征, 因此它是新形成星在主序前最后演化阶段质量外流的重要标志。

观测已表明, 在 OB 星的形成区中大部分高亮度的  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽都有高速特征。弱的  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽与低光度(T Tau 星)和 H-H 天体的恒星形成区相联系, 并且速度小, 速度特征也少<sup>[83]</sup>。低光度的  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽缺少高速成份这一点已成为一个敏感的问题。统计表明, 大约 70% 的强  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽都具有高速特征( $|\Delta v| > 10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )。可见在恒星早期活动中强的质量外流是一个普遍现象。关于脉泽效应与高速外流现象的关系, 已经有几位作者进行了研究。Norman 和 Silk 提出“星际弹丸”(Interstellar Bullets)模型<sup>[84]</sup>, 该模型认为脉泽的激发与

高速风中的不稳定性有关。Welch 的云—云碰撞<sup>[85]</sup>模型则认为, H<sub>2</sub>O 脉泽是通过云—云碰撞表面产生的能量在云中扩散而抽运的。谈到抽运, 和 OH 脉泽类似, 由于 H<sub>2</sub>O 脉泽的光子发射率更高, 离中心星更远, 因此肯定说明 H<sub>2</sub>O 脉泽的辐射抽运是不可能的。

关于 H<sub>2</sub>O 脉泽的各种抽运模型, 已经有不少作者作过讨论。特别是 Strel'nitskij<sup>[86]</sup>对已有的许多模型作了一个完整的说明。但这些模型都有一个共同缺点, 那就是抽运能力还没有强到使脉泽光子发射率与观测相符合的程度。

上面提到的云—云碰撞导致抽运的模型, 由于是基于热尘埃与冷气体相互作用来抽运的, 因此无法产生高亮度的 H<sub>2</sub>O 脉泽。Kylafis<sup>[87]</sup>在 Strel'nitskij<sup>[88,89]</sup>文章的启发下, 用新的一套 H<sub>2</sub>O 与电子碰撞速率计算了 H<sub>2</sub>O 的能量反转。我们这里简单介绍一下: Strel'nitskij 首先提出, 如果水分子与两种不同温度的粒子 (H<sub>2</sub> 分子和电子) 发生碰撞而导致抽运, 那么这个模型有可能避免以前许多模型的缺点。Kylafis 进一步研究了的想法, 提出在 MHD 激波的前沿区中 (precursor) H<sub>2</sub>O 分子和 H 分子与电子碰撞导致抽运。在这一区域中  $T_e \gg T_n$ 。<sup>[90,91,81]</sup>

我们知道, 当强磁激波的速度小于离子磁声速时, 那么磁声速会在激波前产生磁前沿区 (magnetic precursor)。在磁前沿区中带电粒子会被加热到很高温度, 带电与中性粒子之间的动量耦合, 能把激波能量传给致密的分子气体, 分子再通过辐射达到冷却, 同时激发 H<sub>2</sub>O 的脉泽发射。由这种 MHD 模型算出的 H<sub>2</sub>O 脉泽的光子发射率为:

$$\Phi(\text{H}_2\text{O}) = 2 \times 10^{49} \left( \frac{L}{10^{14} \text{cm}} \right)^3 \text{ (光子数/秒)}$$

其中  $L$  为磁前沿区长度, 计算表明  $L \propto B^2/n_n$ 。  $B$  为磁场强度,  $n_n$  为氢原子密度。在足够强的磁场强度下, 可以期望得到足够高的脉泽光子发射率。

这个模型最吸引人的地方在于它提出了一个完全偏离热平衡的区域, 在这个有磁场的区域中, 粒子不会很快地热化。可是这种模型要求非常高的磁场来升高电子的能量。

#### 四、结 语

从最初发现星际脉泽到现在已经 20 多年了, 随着观测技术的不断改进, 发现的天体脉泽已经超过了 1000 个; 但仅仅发现脉泽是不够的, 我们更想知道脉泽区域内的细节, 可惜目前的分辨率还远未达到这一要求。

对于恒星形成区的观测现在已全面展开, 利用各种各样的手段, 如氧离子的谱线, 碳离子的谱线以及许多星际分子的热发射线、吸收线和脉泽。但由于可供研究的恒星形成区还太少, 所以目前对于恒星的早期活动还不太清楚, 或可以说很不清楚。

从星际脉泽发现到现在, 相对观测而言, 有关星际脉泽的理论工作进展缓慢, 一般性讨论很多, 具体计算很少, 可以说有关星际脉泽的研究要做的工作很多。我们仅列举三个方面: (1) H<sub>2</sub>O 脉泽的能量来源问题。显然许多高亮度的 H<sub>2</sub>O 脉泽的能量仅来自中心星的辐射激发是不够的; (2) 在恒星形成区, 除了本文所述的四种强脉泽外是否还有其他种类的强脉泽? 如果没有则说明强的脉泽激发是与分子的能级分布有关的; (3) 由于脉泽是在非平衡状态下

产生的, 而我们在处理非平衡的辐射场时, 还没有很好的方法, 因此脉泽现象促使我们去进一步发展非平衡状态下的辐射场方程。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Reid, M. J. and Moran, J. M., *Ann Rev. Astron. Astrophys.*, 19 (1981), 231.
- [ 2 ] Elitzur, M., *Rev. Mod. Phys.*, 54 (1982), No. 4, 1225.
- [ 3 ] Reid, M. J. and Moran, J. M., in *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy*, ed. by G. L. Verschuur and K. I. Kellermann, p. 255, (1988).
- [ 4 ] Elitzur, M., in *Interstellar Processes*, ed. by D. J. Hollenbach and H. A. Thronson, p. 763, (1987).
- [ 5 ] 周震浦, 紫金山天文台台刊, 7 (1988), 285.
- [ 6 ] 王 强, 天文学进展, 7 (1989), 32.
- [ 7 ] Moran, J. M., in *Masers in the Envelopes of Young and Old Stars*, Preprint series, (1989).
- [ 8 ] Harten, R., *A. Ap.*, 46 (1976), 109.
- [ 9 ] Dreher, J. and Welch, W. J., *Ap. J.*, 245 (1981), 857.
- [ 10 ] Guilloteau, S. et al., *A. Ap.*, 126 (1983), 10.
- [ 11 ] Gaume, R. A. and Mutel, R. L., *Ap. J. Suppl.*, 65 (1987), 193.
- [ 12 ] Wynn-Williams, C., et al., *M.N.R.A.S.*, 160 (1972), 1.
- [ 13 ] Genzel, R. et al., *A. Ap.*, 66 (1978), 13.
- [ 14 ] Forster, J., et al., *Ap. J. Lett.*, 215 (1977), L121.
- [ 15 ] Turner, J. and Welch, W. J., *Ap. J. Lett.*, 287 (1984), L81.
- [ 16 ] Norris, R. et al., *M.N.R.A.S.*, 201 (1982), 209.
- [ 17 ] Norris, R. and Booth, R., *M. N. R. A. S.*, 195 (1981), 213.
- [ 18 ] Fouquet, J. and Reid, M., *A. J.*, 87 (1982), 691.
- [ 19 ] Reid, M. J. et al., *Ap. J.*, 239 (1980), 89.
- [ 20 ] Mader, G., and Johnston, K., *Ap. J.*, 224 (1978), 115.
- [ 21 ] Moran, J. et al., *Ap. J. Lett.*, 224 (1978), L67.
- [ 22 ] Lo, K. et al., *Ap. J.*, 202 (1975), 650.
- [ 23 ] Garay, G. et al., *Ap. J.*, 289 (1985), 681.
- [ 24 ] Bloemhof, E. E. et al., in *Proceedings of the Conference on the Physics and Chemistry of Interstellar Molecular Clouds*, ed. by G. Winnewisser and J. T. Armstrong, p. 228, (1989).
- [ 25 ] Menten, K. M. et al., *Ap. J.*, 333 (1983), L83.
- [ 26 ] Colley, D., *M. N. R. A. S.*, 193 (1980), 495.
- [ 27 ] Wright, M., Dickel, H. and Ho, P., *Ap. J. Lett.*, 281 (1984), L71.
- [ 28 ] Claussen, M. et al., *Ap. J. Lett.*, 285 (1984), L85.
- [ 29 ] Wynn-Williams, C., Werner, M. and Wilson, W., *Ap. J.*, 187 (1974), 41.
- [ 30 ] Walker, R., Matsakis, D. and Gericia-Barreto, J., *Ap. J.*, 255 (1982), 128.
- [ 31 ] Becklin, E., Neugebauer, G. and Wynn-Williams, C., *Ap. J. Lett.*, 13 (1973), 147.
- [ 32 ] Scoville, N. et al., *Ap. J.*, 303 (1986), 416.
- [ 33 ] Dreher, J. et al., *Ap. J.*, 283 (1984), 632.
- [ 34 ] Genzel, R. and Downs, D., *A. Ap. Suppl.*, 30 (1977), 145.
- [ 35 ] Reid, M. J. and Ho, P., *Ap. J. Lett.*, 288 (1985), L17.
- [ 36 ] Genzel, R. et al., *Ap. J.*, 255 (1982), 527.
- [ 37 ] Ho, P., Genzel, R. and Das, A., *Ap. J.*, 266 (1983), 596.
- [ 38 ] Mufson, S. and Liszt, H., *Ap. J.*, 232 (1979), 451.
- [ 39 ] White, G. et al., *M. N. R. A. S.*, 199 (1982), 375.
- [ 40 ] Genzel, R. et al., *Ap. J. Lett.*, 207 (1981), L105.
- [ 41 ] Jaffe, D., Becklin, E. and Hildebrand, R., *Ap. J. Lett.*, 279 (1984), L51.
- [ 42 ] Hasegawa, T. et al., in *Masers, Molecules and Mass Outflows in Star Forming Regions*, ed. by A. D. Haschick, p. 275, (1986).
- [ 43 ] Benson, J. and Johnston, K., *Ap. J.*, 277 (1984), 181.
- [ 44 ] Elmegreen, B. et al., *Ap. J.*, 241 (1980), 1007.
- [ 45 ] Strelnitskij, V. S. and Sunyaev, R. A., *Soviet Astronomy*, 16 (1973), 579.
- [ 46 ] Reid, M. J. et al., *Ap. J.*, 330 (1988), 809.

- [47] Rieke, G. H., Low, F. J. and Kleinmann, D. E., *Ap. J. Lett.*, 186 (1973), L7.
- [48] Phillips, J. P. and Beckman, J. E., *M. N. R. A. S.*, 193 (1980), 245.
- [49] Genzel, R. et al., *Ap. J.*, 239 (1980), 519.
- [50] Baud, B. et al., in IAU Symp. No. 87, p. 545. (1980).
- [51] Genzel, R. and Downes, D., *A. Ap.*, 72 (1972), 234.
- [52] Matsakis, D. N. et al., *Ap. J.*, 236 (1980), 481.
- [53] Wright, M. C. H. and Plambeck, R. L., *Ap. J. Lett.*, 267 (1983), L11.
- [54] Genzel, R., in *Masers, Molecules and Mass Outflows in Star Forming Regions*, ed. by A. D. Haschick, p. 233, (1986).
- [55] Plambeck, R. L. et al., in Proc. of URSI International Symp. on Millimeter and Submillimeter Radio Astronomy, p. 235 (1985).
- [56] Kaifu, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 33 (1981), 345.
- [57] Zuckerman, B., Palmer, P. and Morris, M., *Bull. Am. Astron. Soc.*, 12 (1980), 483.
- [58] Norris, R. P., Booth, R. S. and McLaughlin, W., in *Giant Molecular Cloud in the Galaxy*, p. 193, (1980).
- [59] Welch, W. J. et al., *Ap. J. Lett.*, 245 (1981), 87.
- [60] Abraham, Z., Opher, R. and Rafealli, J. C., *IAU. Circ.*, No. 3415, (1979).
- [61] Barrett, A. H., Schwartz, P. R. and Waters, J. W., *Ap. J. Lett.*, 168 (1971), L101.
- [62] Buxton, R. B., Barrett, A. H., Ho, P. T. P. and Schneps, M. H., *A. J.*, 82 (1977), 985.
- [63] Wilson, T. L. et al., *A. Ap.*, 134 (1984), L7.
- [64] Morimoto, M., Ohishi, M. and Kanzawa, T., *Ap. J. Lett.*, 288 (1985), L11.
- [65] Menten, K. M., Walmsley, C. M., Henkel, C. and Wilson, T. L., *A. Ap.*, 157 (1986), 318.
- [66] Batrla, W., Matthews, H. E., Menten, K. M. and Walmsley, C. M., *Nature*, 326 (1987), 49.
- [67] Koo, B., Williams, R. W., Heiles, C. and Backer, D. C., *Ap. J.*, 326 (1988), 931.
- [68] Zeng, Q., Lou, G. F. and Li, S. Z., *Ap. Space Sci.*, 132 (1987), 263.
- [69] Snyder, L. E. and Buhl, D., *Ap. J.*, 189 (1974), L31.
- [70] Zeng, Q., Sun, J. and Lou, G. F., *A. Ap.*, 172 (1987), 299.
- [71] Elitzur, M., *Ap. J.*, 262 (1982), 189.
- [72] Elitzur, M., *Ap. J.*, 240 (1980), 533.
- [73] Braz, M. A. and Epchtein, N., *A. Ap. Suppl.*, 54 (1983), 167.
- [74] Elitzur, M. and de Jong, T., *A. Ap.*, 67 (1978), 323.
- [75] Haschick, A. D. et al., *Ap. J.*, 244 (1981), 76.
- [76] Thronson, A. H. and Harper, D. A., *Ap. J.*, 230 (1979), 133.
- [77] Gwinn, W. D. et al., *Ap. J.*, 179 (1973), 789.
- [78] Andresen, P. et al., *A. Ap.*, 138 (1984), L17.
- [79] Johnston, I. D., *Ap. J.*, 150 (1967), 33.
- [80] Elitzur, M., *A. Ap.*, 73 (1979), 322.
- [81] Draine, B. T. et al., *Ap. J.*, 264 (1983), 485.
- [82] Genzel, R. and Downes, D., in *Highlights of Astronomy*, ed. by R. West, 6 (1982), p. 689.
- [83] Haschick, A. D. et al., *Ap. J.*, 237 (1980), 26.
- [84] Norman, C. and Silk, J., *Ap. J.*, 228 (1979), 197.
- [85] Tarter, J. C. and Welch, W. J., *Ap. J.*, 305 (1986), 467.
- [86] Strel'nitskij, V. S., *M. N. R. A. S.*, 207 (1984), 339.
- [87] Kylafis, N. and Norman, C., *Ap. J.*, 323 (1987), 346.
- [88] Strel'nitskij, V. S., in IAU Symp. No. 87, p. 591, (1980a).
- [89] Strel'nitskij, V. S., *Pis ma (Lett.) Astro. Zh.*, 6 (1980b), 354.
- [90] Draine, B. T., *Ap. J.*, 241 (1980), 1021.
- [91] Draine, B. T., *Ap. J.*, 246 (1981), 1045.

(责任编辑 刘金铭)

## Several Famous Star-Forming Regions and Their Maser Activities

Ouyang Jing

*(Department of Astronomy, Beijing Normal University)*

Sun Jin

*(Department of Astronomy, Beijing Normal University)*

### Abstract

The observations and theoretical researches of interstellar masers are discussed in this review. In the first part of this article we deal with the physical conditions and maser activities of seven well-known star-forming regions which are W3 (OH), W3 (cont.), Sgr B<sub>2</sub>, W49N, W49S, W51 and Orion(OMC-1). After that, four strong interstellar masers (CH<sub>3</sub> OH, SiO, OH, H<sub>2</sub>O), covering both observations and pumping considerations, are taken into account.