

天体 SiO 脉泽谱线的观测和研究*

俞志尧 向德琳

(中国科学院上海天文台) (中国科学院紫金山天文台)

提 要

本文评述了1973年发现天体 SiO 脉泽谱线以来其观测和研究的进展。内容包括(1)天体 SiO 脉泽谱线的观测特征;(2)在恒星早期和晚期演化过程中 SiO 脉泽分子所起的作用和它们可能的状态;(3)利用 SiO 脉泽谱线的观测,研究晚型星拱星包层结构和速度流场、恒星质量损失率、速度频谱分析;(4)SiO 脉泽时变特征的观测和研究。

一、引 言

天体 SiO、H₂O 和 OH 脉泽是宇宙中最强、最重要的脉泽。因此,对天体 SiO 脉泽源的观测研究显得很重要。

首先观测到 SiO 脉泽辐射是 Snyder 和 Buhl^[1]。他们是在搜索 Orion-kL 区域的某一个氧化物的卫线时,意外地非常惊奇地发现大约在 3.48mm 波长处有一组强的未被证认的分子谱线。他们通过对这组分子谱线进行分析以后,首先排除了 OH/H₂O 脉泽辐射的可能性,同时发现(1)具有零速度的脉泽谱线的静止频率为 86243.45 ± 0.4MHz,这与 ²⁸Si¹⁶O 的 $v=1, J=2-1$ 的静止频率(86243.28 ± 0.22MHz)相一致。这种跃迁大约需要 1773K 的激发温度;(2)谱线的亮温度大约为 10⁹K;(3)速度的分布与 Orion-kL 区域的 H₂O 谱线的两翼相一致。因此,他们的结论是:强的未证认的分子谱线是 ²⁸Si¹⁶O 脉泽的发射线。

在发现了 Orion-kL 区域的 SiO 脉泽辐射以后,他们又做了大量的搜寻工作^[2,3],并且也引起了人们的广泛兴趣和注意^[4-10]。Snyder 和 Buhl 搜寻了 SiO 的 $v=1, 2, 3, J=1-0$ 的谱线,并在许多晚型星的包层中找到了 SiO 脉泽谱线。但是除了 Orion-kL 区外,没有在其他恒星形成区发现 SiO 脉泽谱线。直至 1985 年, Ukita et al. 在 W51 IRS₂ 中发现了 $v=2, J=1-0$ 跃迁的 SiO 脉泽辐射和在 Sgr B₂ MD5 中发现了 $v=1, J=1-0$ 跃迁的 SiO 脉泽辐射^[5]。但是,其他关于恒星形成区的 SiO 脉泽的搜寻却没有获得成功。这主要是由恒星形成区的具体的物理条件所决定的。

首先对天体 SiO 脉泽源进行了长期观测的是 Hjalmarsen 和 Olofsson^[20]。他们对 Mira 变星 oCet 和 R Leo 以及恒星形成区 Orion A 的 SiO 脉泽源进行了大约 1 年时间的监视。而 Lane^[19]则对 10 个 Mira 变星、2 个超巨星和 Orion A 的 SiO 脉泽的 $v=1, J=1-0, J=2-1, v=2, J=1-0$ 跃迁进行了二年的长期监视。Nyman 和 Olofsson^[21]则继续对

* 国家自然科学基金资助项目。
1990年10月18日收到。

U Ori、IK Tan(即 NML Tan)、R Aql、T Cep、R Cas 和 χ Cyg 进行了监视, 监视一直持续到 1984 年 1 月^[21]。而 Snyder^[22]对 10 个星体作了长达三年的跟踪观测^[22], 他们是每年观测一次。Gómez et al. 则对 o Cet 做了三年的跟踪观测^[23]。Olofsson et al. 对 S 型 Mira 变星 χ Cyg 的 SiO 脉泽 $v=2$, $J=2-1$ 跃迁的跟踪观测是在 1980 至 1984 年期间每两个月观测一次^[24]。Martinez et al. 对 Orion A 和 14 个晚型星的 SiO 脉泽 $v=1.2$, $J=1-0$ 跃迁发射进行了两年左右时间的跟踪观测, 得到谱的总数为 715 个^[16]。从以上这些对于 SiO 脉泽的长期跟踪观测可以看到 SiO 脉泽源有着明显的时变。

总之, 天体 SiO 脉泽谱线的观测和研究正在深入进行, 并且越来越引起人们广泛的注意。SiO 脉泽的形成和发射与它所处的物理环境有着密切的关系, 因此可以把 SiO 脉泽作为探针来研究恒星形成区和晚型星的拱星包层。现在的观测指出, 所有观测到的天体 SiO 脉泽源不是处在恒星形成区附近, 就是与晚型星(如 Mira 变星、半规则变星、超巨星等)成协^[27,28]。因此, 天体 SiO 脉泽源的观测和研究与天体演化中最有兴趣的两个阶段——恒星演化的早期与晚期密切相关。

由于天体 SiO 脉泽具有其独特的观测特征: 极高的亮温度(10^9-10^{13} K), 极窄的线宽($1-3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), 诸多的脉泽特征峰(1—20), 足够小的视尺度($10^{-2}-1$ 角秒)和非常敏感的时变特征(见表 1)^[1,47-50], 因此天体 SiO 脉泽源成为研究辐射源发射区的最好工具。大量的观测表明 SiO 脉泽具有大的速度弥散^[19], 并且 SiO 脉泽激发温度高, 需要有高的抽运能量, 因此 SiO 脉泽的形成和辐射需要有独特的环境。这样天体 SiO 脉泽可以根据其成协关系被分为两大类。

由于 SiO 的强脉泽活动必须发生在气体密度相当高($\sim 10^5-10^{11}\text{cm}^{-3}$)又有足够的抽运能量($\geq 10^4 L_{\odot}$)的地方, 因此与 H II 区成协的 SiO 脉泽源常常也与新形成或正在形成的恒星(O、B)成协, 并且比 H_2O 脉泽源更靠近中央星。正是这些明亮天体提供了脉泽活动的高的抽运能量, 而 SiO 脉泽分子也正适合于处在这些正在形成天体的高凝聚的星际物质中。因此把这类 SiO 脉泽称为“星际 SiO 脉泽”。

与晚型星(如 Mira 变星、半规则变星、超巨星等)成协的 SiO 脉泽源处在湍动的恒星光球附近。显然这类脉泽源是来自重新回到星际环境的恒星物质中, 所以把这类 SiO 脉泽称为“恒星 SiO 脉泽”, 或称为“拱星 SiO 脉泽”。

图 1 给出了典型的恒星 SiO 脉泽辐射。

表 2 给出了 SiO 脉泽分子不同能级跃迁谱线频率。

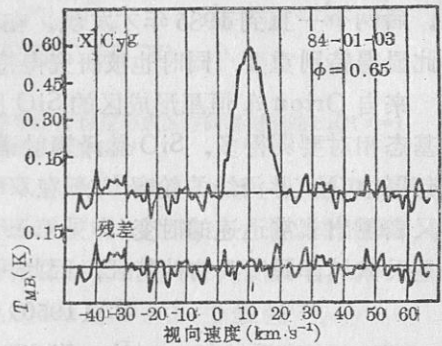


图 1 在 χ Cyg 方向观测到的 SiO($v=0$, $J=2-1$)谱线^[4]

二、天体 SiO 脉泽

1. 星际 SiO 脉泽

目前已发现的星际 SiO 脉泽主要是来自 Orion A、W51 IRS2 和 Sgr B₂MD5 恒星形成

表 1 与年轻恒星及晚型星成协的 SiO 脉泽特征^[1,47-51]

	与年轻恒星成协的SiO脉泽	与晚型星成协的SiO脉泽
已知脉泽数	3	~60
线宽(km·s ⁻¹)	~1	1-3
特征峰数	10-15	1-10
偏振度(%)	线偏振~5	线偏振(60-80)
亮温度(K)	~2×10 ⁹	10 ¹⁰ -10 ¹³
特征寿命(yr)	~3×10 ³	10 ⁵

表 2 观测到的 ²⁸Si¹⁶O 脉泽分子不同能级跃迁谱线频率^[52]

J+1→J	v	测量频率(MHz)	J+1→J	v	测量频率(MHz)
1→0	0	43423.76	4→3	2	171275.28
	1	43122.03		3	170070.35
	2	42820.48	5→4	0	217104.98
	3	42519.34		1	215595.95
2→1	0	86846.96	6→5	2	214088.54
	1	86243.37		3	212582.60
	2	85640.46		4	211077.87
3→2	0	130268.61	7→6	0	260518.02
	1	129363.24		1	258707.45
4→3	0	173688.31			
	1	172481.15			

区。后两个一直到1985年才发现。在这以前 Orion A 是唯一的星际 SiO 脉泽辐射区域。因此显得特别重要，同时也被研究得特别仔细。

来自 Orion A 恒星形成区的 SiO 脉泽辐射在 $v=2$ 振动激发态显得特别强，而在 $v=1$ 的基态相对要弱得多。SiO 脉泽辐射谱通常具有双峰结构，这种双峰结构有点像晚型星的拱星包层中 OH 脉泽线的轮廓^[12]，在双峰之间可以发现一些弱的发射(图 2)^[16]。这种双峰结构又表现出非常迅速的时变(详见第三节)。在 Orion A 中 SiO 脉泽源的角范围是很小的，这是天体脉泽源所具有的特征，因此可以比较准确地确定 SiO 脉泽源的位置：红外源位置在

$$RA(1950) = 5^h 32^m 47.0^s \pm 0.03^s$$

$$Dec.(1950) = -5^\circ 24' 23'' \pm 1''$$

两个主峰分别在 -6 和 $+16 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在振动基态，SiO 脉泽辐射是很弱和较宽的，它的谱的轮廓有点类似于在 CO 和 HCN 中所看到的那种谱的轮廓。

Ziurys et al. 报告了他们在 Orion-kL 区的 OMC-1 外部边缘的新位置上探测到 SiO 脉泽辐射^[17]。他们发现 SiO 脉泽辐射的新位置在 Orion-kL 区南面 $1'.5$ 处，其峰值位置在 $\alpha(1950) = 5^h 32^m 44.8^s$ ， $\delta = -5^\circ 26' 00''(1950)$ 附近，并具有很狭的峰，峰值天线温度 $T_{\text{mb}}^* = 1.1 \text{ K}$ 。在这个峰值周围偏离 $1'$ 位置均未探测到任何辐射。他们认为，对于新位置来说其 SiO 密度足够高以致于 $J=2-1$ 跃迁可以被激发，并且 SiO 脉泽是处在与恒星形成区成协的高速运动中。在 Orion-kL 区南的 $1'.5$ 处可能成为新的外流源，也可能是一个被包围的早型星体。这进一步说明 SiO 的形成必须在激波和高温的外流物质中发生。

在1985年 Ukita et al.^[5] 发现在 W51 IRS2 中 SiO 脉泽 $v=2, J=1-0$ 的辐射, 而在 Sgr B2MD5 中同时发现 $v=1, J=1-0$ 及 $v=2, J=1-0$ 的 SiO 脉泽辐射; 但 $v=1, J=1-0$ 比 $v=2, J=1-0$ 强 5 倍。图 3 给出了观测结果。上述两个源中 SiO 脉泽谱线光度也可以与 Orion A 中相应的 SiO 脉泽谱线光度相比拟。对于恒星形成区, SiO 脉泽也发现了明显的时变。搜寻工作还在进行。

2. 恒星 SiO 脉泽

恒星 SiO 脉泽源主要处于晚型星的拱星包层内。它们很靠近恒星, 大约在离恒星中心几倍恒星半径处就可以找到它, 因为那里的拱星包层温度比较高, 拱星介质的密度相对比较密。

对恒星 SiO 脉泽源的搜寻结果表明, 恒星 SiO 脉泽呈现出各种各样的图像, 很难总结出共同特征来。因此, 下面就个别 SiO 脉泽源的观测特征加以说明。

对于 W Hya, SiO ($v=1, J=1-0$) 脉泽源是饱和脉泽^[8]。Snyder 在对 SiO 脉泽速度频谱分析后给出其 SiO 脉泽是处在恒星和 H₂O 脉泽源之间, 并在紧靠恒星的地方^[8]。Buhl 对 SiO 脉泽 ($v=1, J=2-1$) 谱观测发现它的主峰在 $+39\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处, $T_a^* = 10\text{K}$, 速度宽度为 $5\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且有一个较弱的伴峰, 伴峰在 $+44\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_a^* = 2\text{K}$; $v=1, J=1-0$ 谱线具有稍微对称的轮廓, 而 $v=2, J=1-0$ 谱线轮廓较窄, 有较高的速度成分, $v=2, J=1-0$ 线比 $v=1, J=1-0$ 线强^[2]。

对一些源的搜寻结果表明, 有些源中既发现了 SiO ($v=1, J=1-0$) 脉泽辐射, 又发现了 $v=1, J=2-1$ 的 SiO 脉泽辐射; 而有些源中只发现 $v=1, J=1-0$ 的 SiO 脉泽辐射, 却没有发现 $v=1, J=2-1$ 的 SiO 脉泽辐射。

对于 VYCMa, $v=1, J=2-1$ 的 SiO 脉泽谱线, 其主峰在 $+10\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($T_a^* = 4\text{K}$), 而较小的伴峰在 $30\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($T_a^* = 1\text{K}$), 还有几个较小的峰。从峰线轮廓上看, $v=1, 2, J=1-0$ 的谱线上有很多窄的各自分离的峰, 它们分别在 $+25, +12, +5\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处。 $v=2, J=1-0$ 的谱线比 $v=1, J=1-0$ 的谱线狭, 而 $v=2, J=1-0$ 谱线在 $+12\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处的峰比 $v=1, J=1-0$ 的强, 而 $v=2, J=1-0$ 谱线在 $+25\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $+5\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的峰比 $v=1, J=1-0$ 的弱。

对于 R Leo 的 $v=1, J=2-1$ 的 SiO 脉泽谱线观测表明, 在 $+7\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处有个狭的峰

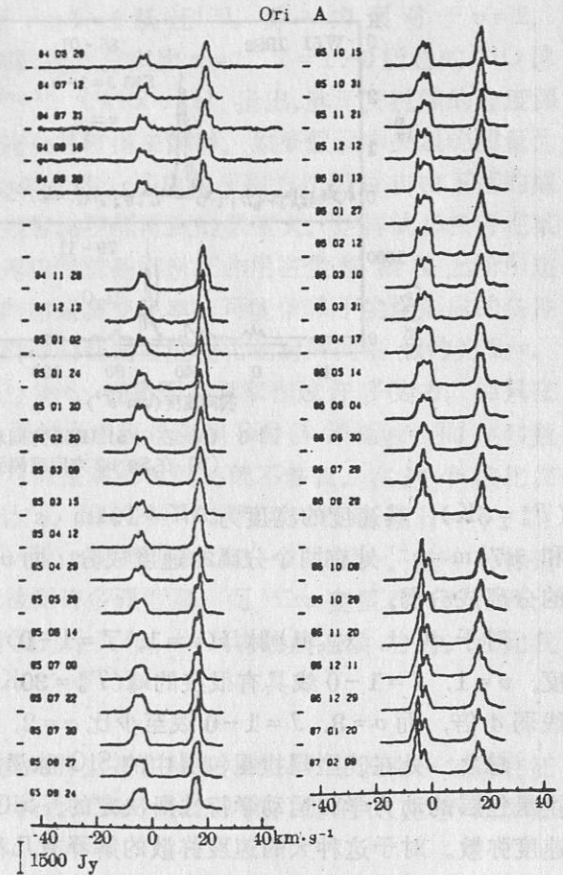


图 2 在 Ori A 恒星形成区方向观测到的 SiO ($v=1, J=1-0$) 谱线^[16]

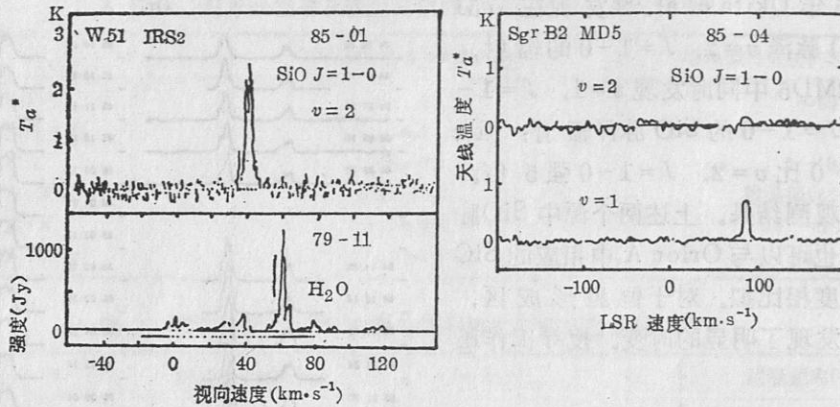


图 3 (a) 在 W51 IR52 方向观测到 SiO($v=2, J=1-0$) 脉泽跃迁
(b) 在 SgrB2 方向观测到 SiO($v=1, J=1-0$) 脉泽跃迁^[5]

($T_a^* = 5\text{K}$), 其速度的宽度为 $\Delta V = 10\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时 $v=1, 2$ 的 $J=1-0$ 线各在 $0\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $+7\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处有两个分离的速度成分, 而 $v=2, J=1-0$ 的分离成分比 $v=1, J=1-0$ 的分离成分弱。

对于 oCet, 对 SiO 脉泽($v=1, J=1-0$) 观测结果表明, 它比其他源有更强的峰值强度。 $v=1, J=1-0$ 线具有很狭的峰($T_a^* = 30\text{K}$), 但是 $v=2, J=1-0$ 线比 $v=1, J=1-0$ 线弱 4 倍, 而 $v=3, J=1-0$ 线至少比 $v=2, J=1-0$ 线弱 20 倍。

总之, 处在晚型星拱星包层中的 SiO 脉泽源具有复杂、多样的速度频谱。这主要是由拱星包层的动力学和运动学特性所决定的。SiO 脉泽源的复杂、多样的速度频谱具有大的速度弥散。对于这种大的速度弥散的解释有几种不同的看法, 有的认为是由于湍流引起的, 有的认为是激波所造成的, 还有的认为恒星的脉动是造成大的速度弥散的主要原因(详见第四节)。

三、天体 SiO 脉泽谱线的时变

1. 星际 SiO 脉泽的时变

来自 Orion A 的 SiO 脉泽谱线在强度和轮廓上都有明显的时变。Ukita et al. 注意到在 1976 年 9 月至 1977 年 6 月的 SiO 脉泽谱中的双峰之间有一些弱的发射, 但是在 1978 年 2 月至 1979 年 10 月期间这个宽范围的发射消失了。1976 年 9 月观测到的 $-63\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的峰到 1977 年 6 月漂移到 $-6.0\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处, 然后又消失了, 到了 1977 年 10 月又在 $-7.0\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处出现, 在 1979 年 10 月又漂移到 $-5.3\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处。1976 年 11 月观测到的 $16.6\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 峰到了 1978 年 2 月漂移到 $16.2\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处了。而在 1978 年 11 月观测到的 $17.3\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 峰在 1980 年 2 月则漂移到 $16.4\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处^[12]。这些被观测到的峰的线心视向速度漂移的典型时间尺度为 2 年。从 1973 年末到 1975 年初高速主峰的径向速度漂移率为 $-1.5 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$, 低速主峰径向速度漂移率为 $-5.4 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。同时, $-6.5\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 成分与 $+16.2\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 成分的相对强度从 1976 年 9 月的 0.4 变到 1978 年 7 月的 1.25。而

在观测期间 $J=2-1$ 跃迁的相对强度变化小于 $J=1-0$ 跃迁^[25]。另一方面对于 $v=2$, $J=1-0$ 的 SiO 脉泽辐射, 高速和低速成分之间的速度分离比 $v=1$, $J=1-0$ 跃迁的 SiO 脉泽辐射的高速和低速成分之间的速度分离大^[2,29,30]。Ukita et al. 指出, 脉泽发射峰的速度漂移可用从中央星向外流的膨胀的致密包层被减速及其传播来解释。如果假设中央星的质量为 $3-10M_{\odot}$, SiO 脉泽处在平均距离为 $2 \times 10^{14} \text{cm}$ 的位置, 那末由于引力作用而自由下落的减速度 ($GM * r^{-2}$) 为 1 至 $3 \times 10^{-2} \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$, 这个数值比观测得到的数值大。这样就必然存在某种加速机制, 才能解释观测到的现象。这种加速机制就是辐射压作用在尘埃颗粒上所引起的。观测得到的速度漂移指出, 每个抛射壳层的加速度变化率, 可能依赖于尘埃形成的条件或每个膨胀壳层的初始速度。从观测可得到个别峰的视向速度变化的时间间隔大约为 2yr 。因此也可以假设中央星脉动典型的时间间隔也为 2yr 。许多天文学家作过许多努力, 但只在 Orion A、W51 IRS2 和 Sgr B2MD5 少数几个恒星形成区检测到 SiO 脉泽辐射, 而在多数恒星形成区均未检测到 SiO 脉泽辐射。这也许可能是观测时间持续不够长。在这个演化位相时, 高光度的原恒星依赖于这个阶段的持续时间。用 Kelvin 时标可以粗略估计一下。对 $3M_{\odot}$ 、 $10^2-10^3 R_{\odot}$ 和 $10^3-10^4 L_{\odot}$ 的恒星来说 Kelvin 时标为 $3 \times 10^4-3 \times 10^5 \text{yr}$ 。这个时标是太短了, 以致于我们不能利用 SiO 脉泽辐射来检测许多原恒星。而 Mira 变星不一样, Mira 变星虽然只占 H-R 图上一小部分, 但它可以停留几十万年, 并且有物质连续抛射, 因此我们能经常用 Mira 变星来检测 SiO 脉泽。

2. 恒星 SiO 脉泽的时变

处在晚型星拱星包层中的 SiO 脉泽谱征时变的特点是多种多样的, 几乎没有一定的特征和规律。L-Å Nyman et al. 曾对 8 个源进行了长达 5 年的跟踪观测, 他们的主要结果如下^[21]:

对 Rleo 的 SiO ($v=0$, $J=2-1$) 的发射在 1980 年 1 月到 1984 年 4 月之间被 6 次观测过。发现这些谱线的轮廓可以用抛物线来拟合。在 1983 年 1 月和 1984 年 1 月的谱中存在着强的红移峰。谱线的轮廓具有很明显的对称性。红移成分有着比包层的膨胀速度 ($\sim 6 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) 更高的速度分量 ($\sim 8 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$), 而在 1984 年 1 月—1984 年 4 月的 4 个月中红移峰完全没有出现。

对于 R Cas, SiO ($v=0$, $J=2-1$) 谱线在三个阶段中被观测到。在 1979 年 12 月观测时谱线的轮廓粗糙地与抛物线相拟合。而在 1984 年 1 月观测到的谱线轮廓变成宽的高的主峰, 同时主峰速度范围之外的比较弱的两翼也可被观测到。

而对于 R Aql, 1984 年 1 月观测到的谱线轮廓是抛物线形的, 在 $47 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处具有一个狭窄的峰 ($\Delta v \sim 3 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)。NML Tau 的谱线轮廓也是抛物线状的, 在 $\sim 35 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处有一个尖峰。o Cet、U Ori 和 T Cep 的拱星 SiO 脉泽谱线较弱, 具有很窄的峰, 没有明显的抛物线轮廓。对 χ Cyg, 在 1979 年 12 月至 1984 年 1 月之间有 4 次观测到它的谱线轮廓近似为抛物线。

通过观测, L-Å Nyman et al.^[4] 认为观测到的 SiO ($v=0$, $J=2-1$) 的很窄的谱线特征是通过脉泽作用的。它们有高的亮温度和小的视尺度, 并且 SiO 脉泽 ($v=0$, $J=2-1$) 时变是由轴对称的质量外流及从恒星来的辐射所激发的。发射区域尺度可以粗略地用下面关系

式得到:

$$R = 43 \left[\frac{D}{100 \text{ pc}} \right] \left(\left[\frac{T_{mb}}{0.1 \text{ K}} \right] \left[\frac{1000 \text{ K}}{T_x} \right] \left[\frac{1}{1 - e^{-\tau}} \right] \right)^{1/2} (\text{AU})$$

其中 D 是到恒星的距离, T_{mb} 是特征峰的亮温度, T_x 是激发温度, τ 是光学厚度, 假设光学厚度是大的。 $T_x \sim 2000 \text{ K}$, 对于 R Leo 来说 $T_{mb} \sim 0.3 \text{ K}$, $D \sim 300 \text{ pc}$, $R \sim 2.4 \times 10^{15} \text{ cm}$ ($\sim 160 \text{ AU}$), 这将比具有这样激发温度的实际区域大得多。在这样大的区域上却发射出如此狭的谱线的观测事实是不能接收的。因此, 这样狭的谱线也许只能在小的区域中形成, 并且具有高的亮温度, 是一种典型的脉泽作用。

Robinson 和 Uan Blerkan^[31] 提出一种在红巨星周围产生 SiO 基态脉泽的机制。在他们的模型中, SiO 脉泽源是被从恒星来的径向 $8 \mu\text{m}$ 辐射抽运并具有各向异性的逃逸过程。最大的振幅发生在径向方向, 产生接近于 $\pm v_{\text{exp}}$ (拱星壳层膨胀速度) 的双峰特征的速度。由于恒星位置的影响, 红移分量比蓝移分量弱得多。

如果脉泽区是位于非常靠近恒星大气的地方, 则脉泽不必有比拱星壳层膨胀速度小的速度, 因为恒星大气运动速度超过包层的速度^[32]。用这一点能解释 R Leo 和 R Cas 中的高速峰。

四、恒星 SiO 脉泽速度频谱分析和抽运机制

恒星 SiO 脉泽处在晚型星的拱星包层内。由于 SiO 脉泽分子的激发温度较高, 因此在离恒星中心几倍恒星有效半径处就可观测到它的辐射^[33,34]。SiO 脉泽频谱正如上面所述的, 呈现出变化多样的形态, 有单峰的、双峰的, 也有更复杂结构的, 然而它们的共同之处是速度范围大, 频谱伸展宽。关于恒星 SiO 脉泽速度频谱分析是一个引人注意的问题。

有许多作者做过关于拱星包层的平滑变化的运动学结构和动力学特性方面的研究^[35-41]。这些研究是恒星 SiO 脉泽速度频谱分析的基础。

由于恒星 SiO 脉泽源位于离恒星中心几倍恒星有效半径的拱星包层处, 它受恒星的质量抛射、光度变化和脉动等作用的影响是大的, 因此 SiO 脉泽的发射频谱与 OH 脉泽频谱有着十分不同的特点。Lane^[19] 对恒星 SiO 脉泽频谱进行了较长时间的系统的观测, 取得了大量的恒星不同光变相位时的 SiO 脉泽资料, 其观测结果再次表明, 有不少晚型星的 SiO 脉泽源的平均速度超过了拱星包层中气体的外流极限速度。Zuckerman(1980)^[42] 认为, 观测到的 SiO 脉泽源速度很可能是由于湍动分离的。而 Lane(1982)^[19] 则认为某些 Mira 变星的 SiO 脉泽发射速度超过外流极限速度, 表明在 SiO 谱线形成区中可能存在着高程度的湍动。孙锦等则认为, 观测到的 SiO 脉泽速度分离很可能是变星脉动产生的传播波造成的^[43]。

关于恒星 SiO 脉泽抽运机制, Kwan 和 Scoville 提出过^[44]。这种机制可以解释 SiO 脉泽的第一激发振动态的转动跃迁辐射, 这种抽运机制要求 $v=2 \rightarrow 1$ 跃迁为光学薄, 而 $v=1 \rightarrow 0$ 跃迁为光学厚。抽运源为中央星。Elitzur^[45] 发展了这种模型, 认为 SiO 脉泽能够被包括碰撞激发和辐射去激发的循环过程所抽运。这种抽运机制只能工作在那些高密度、接近恒星表面的区域。恒星的脉动所产生的激波也许是拱星 SiO 脉泽的触发机制^[46]。

参 考 文 献

- [1] Snyder, L. E. and Buhl, D., *Ap. J. Lett.*, 189 (1974), L31.
 [2] Buhl, D. et al. *Ap. J. Lett.*, 192 (1974), L97.
 [3] Snyder, L. E. and Buhl, D., *Ap. J.*, 197 (1975), 329.
 [4] Nyman, L. -Å. and Olofsson, H., *Astron. Astrophys.*, 147 (1985), 309.
 [5] Ukita, N. et al., in IAU Symp. No. 115, p. 178, (1987).
 [6] Lane, A. P. et al., in IAU Symp. No. 87, p. 535, (1980).
 [7] Buhl, D. et al., in IAU Symp. No. 87, p. 537, (1980).
 [8] Ukita, N., and Kaifu, N., in IAU No. 87, p. 539, (1980).
 [9] Hjalmarson, A., and Olofsson, H., in IAU Symp. No. 87, p. 541, (1980).
 [10] Clark, F. O. et al., in IAU Symp. No. 87, p. 543, (1980).
 [11] Baud, B. et al., in IAU Symp. No. 87, p. 545, (1980).
 [12] Ukita, N. et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 33 (1981), 341.
 [13] Snyder, L. E., in IAU Symp. No. 87, p. 525, (1980).
 [14] Lindqvist, M. et al., *Astron. Astrophys.*, 172 (1987), L3.
 [15] Ukita, N. and Goldsmith, P. F., *Astron. Astrophys.*, 138 (1984), 194.
 [16] Martinez, A. et al., *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, 74 (1988), 273.
 [17] Ziurys, L. M. and Friberg, P., *Ap. J.*, 314 (1987), L49.
 [18] Zuckerman, B., *Ap. J.*, 230 (1979), 442.
 [19] Lane, A. P., Ph. D. Thesis, University of Massachusetts, (1982).
 [20] Hjalmarson, A. and Olofsson, H., *Ap. J.*, 234 (1979), L199.
 [21] Nyman, L. -Å. and Olofsson, H., *Astron. Astrophys.*, 158 (1986), 67.
 [22] Snyder, L. E. et al., *A. J.*, 92 (1986), 416.
 [23] Gomez, A. M. and Lepine, J. R. D., *Astron. Astrophys.*, 159 (1986), 166.
 [24] Olofsson, H. et al., *Astron. Astrophys.*, 150 (1985), 169.
 [25] Moran, J. M. et al., *Ap. J.*, 217 (1977), 434.
 [26] Balister, M. et al., *M. N. R. A. S.*, 180 (1977), 415.
 [27] Snyder, L. E. et al., *Ap. J.*, 224 (1978), 519.
 [28] Lepine, J. R. D. et al., *Ap. J.*, 225 (1978), 880.
 [29] Jewell, P. R. et al., *Astron. Astrophys.*, 130 (1984), L1.
 [30] Genzel, R. et al., *Ap. J.*, 239 (1980), 519.
 [31] Robinson, S. E. and Van Blerkon, D. J., *Ap. J.*, 249 (1981), 566.
 [32] Hinkle, K. H. et al., *Ap. J.*, 252 (1982), 697.
 [33] Jewell, P. R. et al., *Astrophys. Lett.*, 242 (1980), L29.
 [34] Spencer, J. H. et al., *Ap. J.*, 230 (1979), 449.
 [35] Goldreich, P. and Scoville, N., *Ap. J.*, 205 (1976), 144.
 [36] 俞志尧, 天体物理学报, 4 (1984), 243.
 [37] 俞志尧, 天体物理学报, 6 (1986), 283.
 [38] 俞志尧, 天体物理学报, 8 (1988), 190.
 [39] 俞志尧, 科学通报, (1982), No. 12, 740.
 [40] Yu Zhiyao (俞志尧), *Science Bulletin*, 30 (1985), No. 2, 280.
 [41] 俞志尧, 自然杂志, 11 (1988), 636.
 [42] Zuckerman, B., in IAU Symp., No. 87, p. 479, (1980).
 [43] 孙锦等, 天体物理学报, 4 (1984), 97.
 [44] Kwan, J. and Scoville, N., *Ap. J. Lett.*, 194 (1974), L97.
 [45] Elitzur, M., *Ap. J.*, 240 (1980), 553.
 [46] Heske, A., in *Circumstellar Matter*, p. 253, (1987).
 [47] Moran, J. M. et al., *Ap. J. Lett.*, 231 (1979), L67.
 [48] Genzel, R. et al., *Ap. J. Lett.*, 231 (1979), L73.
 [49] Clark, F. O. et al., *Ap. J.*, 276 (1984), 572.
 [50] Barvainis, R., *Ap. J.*, 279 (1984), 358.
 [51] Reid, M. J. and Moran, J. M., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 19 (1981), 231.
 [52] Lowry Mauson, E. et al., *Physical Rev. A*, 15 (1977), 223.

The Observation and Study on the Spectra of Celestial SiO Maser

Yu Zhiyao

(Shanghai Observatory)

Xiang Delin

(Purple Mountain Observatory)

Abstract

The progress and current situation of observation and study on the spectra of celestial SiO maser since it was discovered in 1973 are reviewed in this paper. The content includes (1) the observational characteristics of the spectra of celestial SiO maser, (2) the roles which SiO maser molecules plays in early and late stages of star evolutionary process, and their possible state, (3) the results of theoretical study on the shell structure and velocity field of the circumstellar envelope, and the mass loss rate in late type star, and the analysis of spectra of velocity by the observation of the spectra of SiO maser, (4) the observation and study of the time variation of SiO maser.