

大质量恒星形成区样本外向流的高灵敏度 搜寻*

孙 燕^{1,2†} 徐 烨¹ 杨 戟¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 对 13 个大质量恒星形成区样本进行了 SiO (2-1)、CH₃OH (2-1) 和 C³⁴S (2-1) 热线的观测. 在 9 个分子云核中, 3 条热线同时被探测到. 这 9 个 SiO 探测中, 有 3 个是新探测到的且它们强度都相对较弱. 所有探测到的谱线都有较明显的线翼, 这可能是外向流出现的证据. SiO 谱线的线宽最宽, 这也更进一步表明 SiO 辐射可能是来自高速的外向流, 即更靠近外向流的激发源. 估算了各分子谱线的旋转温度, 柱密度和相对元素丰度. 结果表明 SiO 和 CH₃OH 元素丰度之间有较好的相关性, 相关系数 $R = 0.77$, 但是 SiO 和 C³⁴S 元素丰度之间却没有任何相关性.

关键词 恒星: 形成, 射电连续谱线: 星际介质, 星际介质: 丰度

中图分类号: P 152; **文献标识码:** A

1 引言

分子外向流是大质量恒星形成极早期的一大表征之一. 在这个阶段, 一些分子谱线常表现出有很宽的线翼. CO 是元素丰度最大的星际分子之一, 在恒星形成区, 也常被用来研究分子外向流. 然而, 在大质量恒星形成区, CO 辐射常会被来自前景和背景分子云辐射污染. 另一个用来研究分子外向流的分子, SiO 被认为是受激波气体激发的. SiO 分子辐射相对于周围气体辐射通常有一个速度偏移^[1]. 在很多与年轻原恒星外向流成协的激波环境中, 研究发现 SiO 辐射被增强的现象参见文献 [2].

CH₃OH 是一个对称分子, 被认为是示踪高密度和中等激波环境的理想分子^[3]. 尤其是在毫米波和亚毫米波段的甲醇热线能示踪高达 10^5 cm^{-3} 的密度, 并且对运动学温度很敏感^[4]. 基于对甲醇谱线多个能级辐射的拟合, Leurini 等^[5] 得到了一个大质量恒星形成区样本的最佳物理参量, 该样本包含大质量原恒星天体 (HMPOs) 和红外暗云 (IRDCs). 光学薄的 C³⁴S 谱线非常强, 几乎在所有致密分子云核中都能探测得到. 同时该分子谱线能示踪分子云核的高密度区域. 因此, 这 3 条热线的结合使我们能同时证认大质量恒星

2011-05-09 收到原稿, 2011-10-14 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (11003046, 10973040, 11073054, 10733030, 10621303)、中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目和射电天文联合开放实验室共同资助

† yansun@pmo.ac.cn

形成区的致密区域及致密区域的外向流. 但是至今, 很少有对这 3 条复杂分子谱线的同时观测研究. 主要因为 CH_3OH 和 SiO 元素丰度相对较低, 这使得观测这两条分子谱线相对较难^[6]. 此外, 过去对这两个分子的研究主要集中在它们的脉泽辐射上而不是热辐射.

为了在分子云核致密区域搜寻到明显的外向流或激波的证据, 我们最近对 13 个大质量恒星形成区样本, 开展了 $\text{SiO } J=2-1$, $\text{C}^{34}\text{S } J=2-1$ 和 $\text{CH}_3\text{OH } J_K = 2_K - 1_K$ 热线的高灵敏度的观测.

2 观测

该研究样本由 13 个大质量恒星形成区组成, 离我们的距离小于 3.0 kpc. 它们都与脉泽 (H_2O 或 CH_3OH) 和 UC H II 区成协 (表 1), 该样本来自 Sun 等^[7] 的文章. 其中, 源 AFGL 5142 和 AFGL 4029 的观测坐标采用的是 Snell 等^[8] 文章中的坐标. 该样本也是 Harju 等^[9] (后面简称为 H 98) 对 SiO 搜寻研究的子样本.

表 1 样本和谱线经过通道平滑后达到的噪声水平

Table 1 Observed sample and the RMS levels of each line after channel smoothing

Source	R.A. (2000)	Dec. (2000)	$\text{CH}_3\text{OH}(2-1)$ RMS(K)	$\text{C}^{34}\text{S}(2-1)$ RMS(K)	$\text{SiO}(2-1)$ RMS(K)
G123.07-6.31	00:36:47.51	+63:29:02.1	0.029	0.026	0.027
W3Main	02:25:39.45	+62:05:49.2	0.025	0.020	0.036
W3(OH)	02:27:04.69	+61:52:25.5	0.028	0.024	0.018
AFGL4029	03:01:32.30	+60:29:11.8	0.028	0.023	0.019
AFGL5142	05:30:45.60	+33:47:51.6	0.029	0.026	0.014
S231	05:39:12.91	+35:45:54.1	0.037	0.028	0.019
S235	05:40:53.32	+35:41:48.8	0.031	0.027	0.017
S252A	06:08:35.41	+20:39:03.0	0.030	0.024	0.012
S255	06:12:53.72	+17:59:22.0	0.034	0.022	0.013
IRAS20126+4104	20:14:25.80	+41:13:33.0	0.031	0.024	0.021
W75N	20:38:36.93	+42:37:37.5	0.033	0.034	0.017
BFS11-B	21:43:06.68	+66:07:04.1	0.027	0.026	0.027
Cep-A	22:56:18.14	+62:01:46.4	0.025	0.025	0.018

观测是在 2010 年 4 月进行的, 使用的观测设备是紫金山天文台青海观测站 13.7 m 望远镜. 表 2 列出了所有观测谱线的频率. 利用 500 MHz 带宽的快速傅立叶变换频谱仪 (FFTS), 对 CH_3OH 和 C^{34}S 谱线进行了同时观测, 这两条谱线都落在下边带. 接收机的频率设定为甲醇 2_0-1_0 E 跃迁的静止频率 96744.5490 MHz. 500 MHz 带宽的 FFTS 具有 0.031 MHz 的频率分辨率, 对应 CH_3OH 和 C^{34}S 谱线频率处的速度分辨率为 $0.095 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. SiO 谱线观测采用的后端设备是声光频谱仪 (AOS), 有 1024 个通道, 频率分辨率为 0.042 MHz, 对应 $0.144 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度分辨率. 望远镜的指向精度好于 $9''$. 数据校准采用的是标准的斩波轮校准法, 观测得到的是已经经过大气改正的天线温度, T_A^* . 望远镜的波束大小约 $60''$, 对应我们样本的距离, 可分辨的线尺度为 0.20 pc 到 0.87 pc. 望远镜系统的稳定性和指向通过每 2 h 对周围邻近标准源的观测来检查. 观测模式是位

置调制模式. 对每个源在源上的积分时间约为 20 m, 这使绝大部分源都能达到足够高的灵敏度.

数据处理采用的是 GILDAS 的软件包. 对大部分谱线进行的是一阶线性基线拟合, 个别谱线采用了高次基线拟合. 为了提高谱线的信噪比, 我们对谱线进行了通道平滑, 最终 CH_3OH 、 C^{34}S 和 SiO 的速度分辨率分别为 $0.378 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.380 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.576 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 表 1 分别列出了每条谱线经过通道平滑后达到的噪声水平, 即 RMS.

表 2 观测的谱线

Table 2 Observed lines

Line	Species	Transition	Rest Frequency (MHz)	T_{sys} (K)
1	CH_3OH	$2_{-1} - 1_{-1} \text{ E}$	96739.3630	130
2	CH_3OH	$2_0 - 1_0 \text{ A}$	96741.3770	130
3	CH_3OH	$2_0 - 1_0 \text{ E}$	96744.5490	130
4	CH_3OH	$2_1 - 1_1 \text{ E}$	96755.5070	130
	C^{34}S	2-1	96412.9610	130
	SiO	2-1 $v=0$	86847.0100	210

3 结果和讨论

3.1 光谱

图 1 展示了所有有探测和无探测的谱线, 这里我们定义信噪比至少达到 3 为有探测. 在 9 个区域中, CH_3OH 、 C^{34}S 和 SiO 3 条谱线同时都有探测. C^{34}S 和 SiO 的光谱都显示出单高斯成分且有明显的宽线翼特征, 这可能暗示了这些谱线是外向流很好的示踪谱线. 尽管 CH_3OH 谱线的线翼特征比较模糊, 但是部分源的 CH_3OH 的谱线形状仍然显示了较宽的线翼, 尤其是在源 S 231 和 W 75N 中. 由于这些谱线示踪的都是分子云核的致密部分, 自然而然, 它们示踪的外向流也就是外向流的致密部分. 下一步, 我们将计划用其它的高速气体示踪谱线的成图观测来验证这些分子谱线对外向流的探测能力.

我们对谱线进行了高斯拟合, 表 3 列出了拟合的结果, 包括峰值强度 (T_{A}^*)、线心速度 (V_{lsr}) 和线宽. 对 13 个源中的 12 个源, 至少有一个跃迁的甲醇辐射被探测到有大于 3σ 的信号. 其中, W 3 Main 显示出非常临界的探测. 所有源中都探测到 C^{34}S 辐射, 因此是 3 条谱线中探测率最高的. 在这些被探测到的源中, BFS 11-B 源的 CH_3OH 和 C^{34}S 的谱线线宽非常的窄.

SiO (2-1) 热线仅在 9 个源中被探测到. 其中, S 255、S 252A 和 S 235 是新探测到的源, 它们的强度都相对较弱, 分别只有 8σ 、 6σ 和 4σ . 这些源在 H 98 的研究样本中都没有被探测到, H 98 观测的谱线的速度分辨率为 $1.37 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 对这 3 个源的噪声水平分别为 0.04 K、0.02 K 和 0.03 K, 相对于该研究的噪声水平高很多.

由于这 3 条分子谱线都是很好的高速致密气体的示踪, 同时也可能是外向流或激波的示踪, 因此该样本的高探测率暗示了该样本中大部分源都处于外向流阶段. CH_3OH 和 C^{34}S 的线宽为 $3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 但是 SiO 谱线的线宽大于 $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 3 条谱线线宽的区

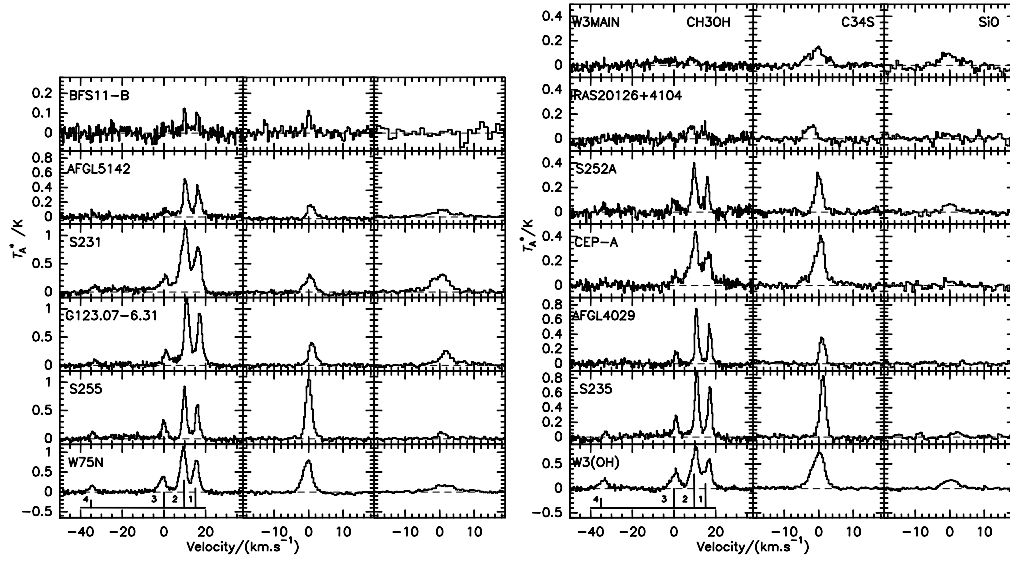


图 1 所有观测的谱线. 所有源的静止速度都被平移到了 0, 即 $\Delta V=0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 1 All spectra observed in this study. For each source, its rest velocity is plotted as $\Delta V=0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

别可能暗示了 SiO 辐射与更高速的气体成协, 或是示踪与外向流激发源更近的区域.

3.2 旋转温度, 柱密度和元素丰度

表 4 分别列出了 SiO、CH₃OH、C³⁴S 和 H₂ 的柱密度. 柱密度的计算是基于光学薄和局部热动平衡的假设, 并假设 SiO 的环境温度为 40 K, C³⁴S 的环境温度为 20 K. 对于光学薄的分子谱线, 上能级的柱密度 N_u 的计算表达式为 [2,10],

$$N_u = \frac{8k\pi\nu^2}{hc^3} \frac{1}{A_{ul}} \int T_{MB} dv. \quad (1)$$

其中 A_{ul} 是爱因斯坦自发辐射系数, ν 是 $J=u-1$ 能级跃迁的频率, $\int T_{MB} dv$ 是谱线的积分强度, 单位为 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 上能级的柱密度 N_u 与总柱密度通过配分函数 $Q(T)$ 联系起来. 对于双原子分子, $Q(T)$ 近似可以表达为 $Q(T) = KT/hB$, 其中 B 是旋转常数. SiO 和 C³⁴S 的旋转常数分别为, $B = 21787 \text{ MHz}$ 和 24103 MHz [11]. SiO 柱密度的平均值为 $2.52 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Klaassen 等 [2] 通过对 23 个大质量恒星形成区样本 JCMT 的 SiO (8-7) 观测, 计算得到 SiO 柱密度的平均值为 $\sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 与我们的结果比较类似.

表 3 对已探测谱线高斯拟合的结果和 1σ 拟合误差

Source	Line	CH ₃ OH			C ³⁴ S			SiO		
		V_{lsr} (km · s ⁻¹)	Width (km · s ⁻¹)	T_{A}^* (K)	V_{lsr} (km · s ⁻¹)	Width (km · s ⁻¹)	T_{A}^* (K)	V_{lsr} (km · s ⁻¹)	Width (km · s ⁻¹)	T_{A}^* (K)
IRAS -20126	1	-3.48(0.37)	3.23(0.84)	0.08(0.04)	-3.93(0.15)	3.14(0.31)	0.11(0.02)	...	...	...
	2	-3.18(0.23)	3.21(0.56)	0.11(0.03)						
W75N	1	9.22(0.04)	3.40(0.09)	0.79(0.04)	9.47(0.03)	3.11(0.07)	0.78(0.03)	11.20(0.22)	8.32(0.61)	0.16(0.02)
	2	9.25(0.03)	3.59(0.07)	1.09(0.04)						
	3	9.16(0.38)	4.79(0.38)	0.34(0.04)						
	4	9.24(0.15)	3.16(0.37)	0.16(0.03)						
BFS11 -B	1	-10.30(0.23)	1.78(0.79)	0.09(0.07)	-10.14(0.08)	1.07(0.20)	0.12(0.04)	...	...	...
	2	-10.19(0.12)	1.26(0.40)	0.13(0.07)						
CEP-A	1	-10.27(0.38)	3.36(0.38)	0.25(0.04)	-10.39(0.05)	3.53(0.14)	0.36(0.03)	...	...	...
	2	-10.51(0.38)	4.97(0.38)	0.37(0.04)						
	3	-9.79(0.38)	4.28(0.38)	0.08(0.02)						
G123.07 -6.31	1	-17.40(0.38)	3.13(0.38)	0.88(0.13)	-17.45(0.04)	2.36(0.10)	0.39(0.03)	-16.67(0.16)	4.75(0.61)	0.22(0.05)
	2	-17.30(0.02)	3.06(0.05)	1.19(0.04)						
	3	-16.51(0.25)	7.12(0.59)	0.18(0.03)						
	4	-17.54(0.22)	2.74(0.61)	0.10(0.04)						
W3 -(OH)	1	-46.49(0.05)	3.68(0.13)	0.56(0.04)	-47.10(0.03)	4.27(0.07)	0.72(0.02)	-46.70(0.19)	5.01(0.43)	0.17(0.03)
	2	-46.56(0.04)	4.54(0.11)	0.78(0.03)						
	3	-46.34(0.09)	4.85(0.24)	0.31(0.03)						
	4	-46.78(0.17)	4.77(0.44)	0.17(0.03)						
S255	1	7.18(0.04)	2.46(0.11)	0.58(0.05)	7.30(0.01)	2.09(0.03)	1.06(0.03)	7.86(0.14)	2.78(0.35)	0.11(0.03)
	2	7.25(0.03)	2.32(0.06)	0.88(0.04)						
	3	7.33(0.08)	2.70(0.23)	0.29(0.04)						
	4	7.17(0.22)	2.54(0.60)	0.11(0.05)						
S252A	1	8.98(0.08)	2.25(0.23)	0.25(0.05)	9.06(0.05)	2.34(0.12)	0.30(0.03)	9.25(0.26)	3.76(0.65)	0.07(0.02)
	2	9.00(0.06)	2.87(0.16)	0.36(0.04)						
	3	9.24(0.37)	3.30(1.46)	0.08(0.05)						
AFGL -5142	1	-3.64(0.06)	3.32(0.17)	0.36(0.03)	-3.34(0.06)	2.53(0.14)	0.24(0.03)	-3.24(0.36)	8.32(1.03)	0.08(0.02)
	2	-3.55(0.38)	2.89(0.38)	0.50(0.08)						
	3	-2.39(0.47)	7.30(1.03)	0.08(0.02)						
	4	-3.96(0.29)	1.55(0.43)	0.06(0.03)						
S231	1	-16.76(0.05)	3.80(0.12)	0.80(0.05)	-16.68(0.07)	3.08(0.17)	0.28(0.03)	-16.82(0.12)	6.00(0.30)	0.29(0.03)
	2	-16.69(0.05)	4.34(0.15)	1.07(0.08)						
	3	-15.95(0.45)	10.79(1.64)	0.20(0.05)						
	4	-16.24(0.40)	4.07(1.01)	0.10(0.04)						
S235	1	-17.06(0.04)	2.32(0.09)	0.66(0.05)	-16.91(0.02)	1.92(0.04)	0.82(0.03)	-16.06(0.31)	3.38(0.69)	0.07(0.03)
	2	-16.98(0.02)	2.36(0.07)	0.92(0.05)						
	3	-17.18(0.09)	2.46(0.28)	0.27(0.05)						
	4	-16.99(0.29)	1.77(0.52)	0.08(0.04)						
AFGL -4029	1	-37.83(0.03)	1.98(0.08)	0.51(0.04)	-37.87(0.03)	1.80(0.07)	0.36(0.03)	...	...	...
	2	-37.85(0.03)	1.99(0.06)	0.72(0.04)						
	3	-37.95(0.10)	1.98(0.23)	0.16(0.04)						
W3 -Main	...	...	...	...	-39.56(0.14)	5.69(0.32)	0.12(0.01)	-39.29(0.47)	5.55(1.17)	0.09(0.03)

表 4 柱密度和元素丰度

Table 4 Column density and abundance

Source	N_{SiO} ($\times 10^{14}$)	$N_{\text{CH}_3\text{OH}}$ ($\times 10^{14}$)	$N_{\text{C}^{34}\text{S}}$ ($\times 10^{14}$)	N_{H_2} ($\times 10^{23}$)	$X(\text{SiO})$ ($\times 10^{-10}$)	$X(\text{CH}_3\text{OH})$ ($\times 10^{-10}$)	$X(\text{C}^{34}\text{S})$ ($\times 10^{-10}$)
IRAS20126+4104	...	...	1.12	2.14	...	...	5.23
W75N	4.34	3.82	8.15	8.21	5.29	4.65	9.93
BFS11-B	...	...	0.42	1.90	...	...	2.20
CEP-A	...	1.78	4.28	8.42	...	2.11	5.08
G123.07-6.31	3.44	2.99	3.08	2.06	16.71	14.51	14.95
W3(OH)	2.84	5.22	10.3	4.26	6.68	12.25	24.18
S255	1.01	2.07	7.40	3.30	3.06	6.27	22.42
S252A	0.83	0.62	2.37	4.56	1.82	1.36	5.20
AFGL5142	2.17	1.27	2.04	4.51	4.80	2.82	4.52
S231	5.75	4.07	2.89	3.71	15.50	10.97	7.79
S235	0.72	1.62	5.24	2.51	2.85	6.45	20.88
AFGL4029	...	0.90	2.18	3.06	...	2.95	7.12
W3MAIN	1.63	...	2.34	4.61	3.54	...	5.08

H_2 的柱密度的估算依赖于 C^{18}O 的柱密度^[7], 假设 $N(\text{H}_2)/N(\text{C}^{18}\text{O}) \sim 7 \times 10^7$. CH_3OH 的旋转温度和柱密度计算的表达式为^[12],

$$\ln\left(\frac{N_u}{g_u}\right) = \ln\left[\frac{N}{Q(T)}\right] - \frac{E_u}{kT_{\text{rot}}}. \quad (2)$$

(2) 式中, 配分函数取值为 $Q(T) = 1.2327T_{\text{rot}}^{1.5}$ (例如, Purcell 等^[13]). 图 2 展示了 CH_3OH 谱线的旋转图, 图中给出计算得到的柱密度和旋转温度. 实线及图中标注的 T_{rot} 和 N 的值仅仅是对 E 能级跃迁拟合的结果. 虚线则是对所有探测到的跃迁拟合的结果. 计算所得的柱密度分布从 $0.62 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 到 $5.22 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 平均值为 $2.44 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. 旋转温度分布从 5.2 K 到 16.1 K, 平均值为 8.7 K. 我们计算的结果与对 78 个与甲醇脉泽源成协的热核样本计算的典型值是一致的^[13], 尤其与处于 UCHII/HII 演化阶段的子样本的结果相一致 (该子样本 $T_{\text{rot}} \sim 9 \text{ K}$, $N \sim 2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$). 由于我们样本主要是由处于 UCHII/HII 阶段的分子云核主导, 因此我们的结果也就进一步验证了 Purcell 等^[13] 的观点, 即 CH_3OH 热辐射在 UCHII 区更亮, 丰度更高.

假设文章中的所有分子谱线占据相同的空间, 它们的相对丰度 X 就可以简单的等效于它们柱密度的比值, 即 $X = N_1/N_2$. 利用这种方法, 我们得到了 SiO、 CH_3OH 和 C^{34}S 相对于 H_2 的元素丰度. 表 4 中分别列出了计算结果. 一般而言, C^{34}S 的元素丰度最高. 图 3 展示了 SiO、 CH_3OH 和 C^{34}S 元素丰度之间的相关关系. 图中标注了最小二乘法拟合结果和相关系数. 很明显 $X(\text{SiO})$ 和 $X(\text{CH}_3\text{OH})$ 之间有较强的相关性, 相关系数为 $R = 0.77$. 然而, $X(\text{SiO})$ 和 $X(\text{C}^{34}\text{S})$ 之间却几乎没有任何相关性. 正如前面提到的, SiO 是很好的激波示踪. CH_3OH 元素丰度与 SiO 元素丰度成正比也许暗示了 CH_3OH 同样也可以示踪受激波扰动的气体. 而相反, 尽管 C^{34}S 也是著名的致密气体示踪, 它示踪的区域可能与 SiO 是不一样的.

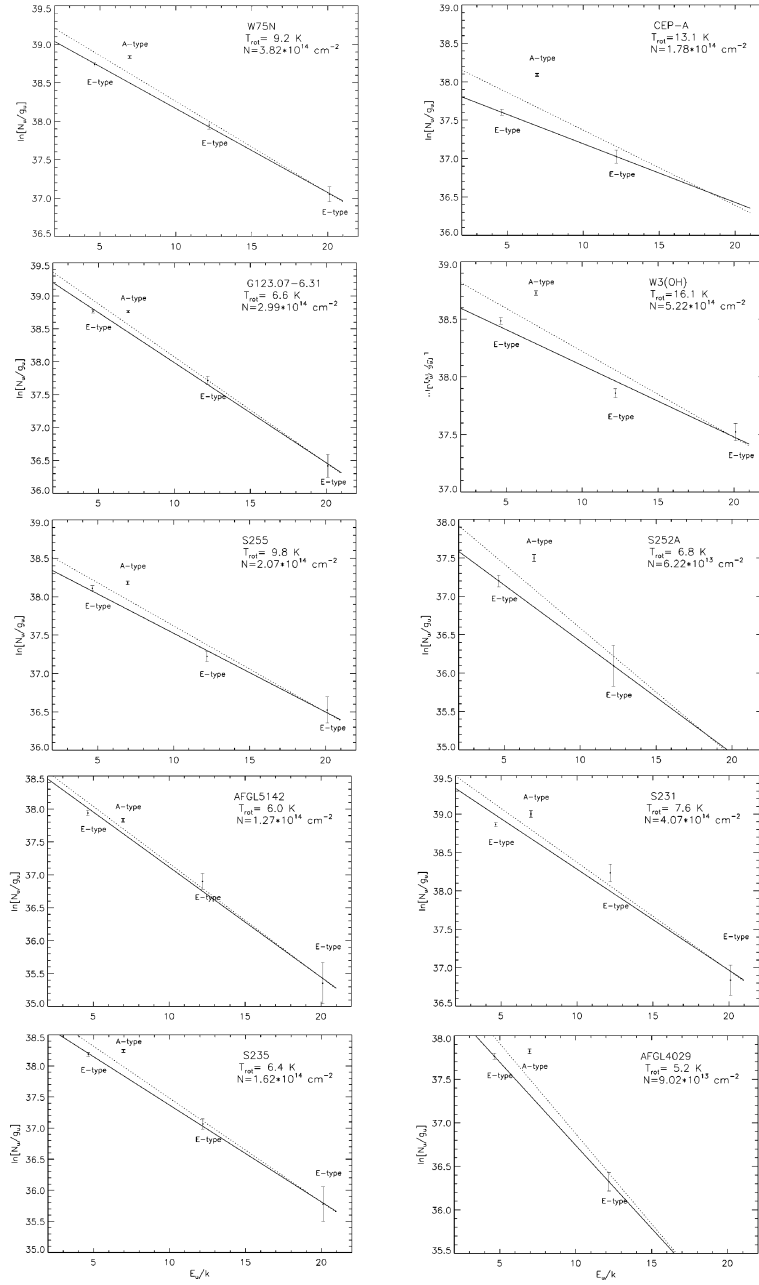


图 2 CH_3OH 的旋转图. 图中的实线和标注的旋转温度 T_{rot} 和柱密度 N 是对 E 能级跃迁拟合的结果, 而虚线是对所有能级跃迁拟合的结果

Fig. 2 The rotational diagram of CH_3OH . The solid line and values for T_{rot} and N correspond to a fit through the E transition only. The dashed line represents a fit to all transitions

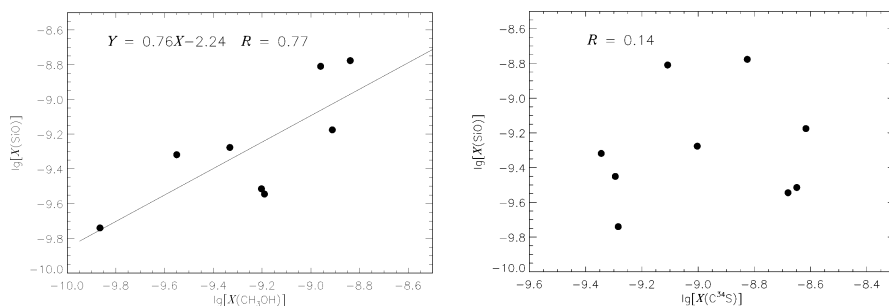


图 3 SiO, CH₃OH 和 C³⁴S 元素丰度之间的相关性, 坐标轴为 lg-lg. 图中实线是对所有数据点最小二乘法拟合的结果

Fig. 3 Correlations among abundances of SiO, CH₃OH and C³⁴S in the lg-lg plots. The solid line represents least-squares fit result to all data points, which is marked in the plot

4 总结

对 13 个大质量恒星形成区样本进行了 SiO (2-1)、CH₃OH (2-1) 和 C³⁴S (2-1) 3 条热线的观测, 并分别在 9, 12 和 13 个核中探测到. 9 个有 SiO 探测的源, 其中 3 个是新探测到的, 且它们的强度都相对较弱. 大部分有探测的谱线都有很宽的线翼, 这可能是外向流的一个表征. SiO (2-1) 和 C³⁴S (2-1) 谱线都是单峰成分, 这也进一步表明这些谱线是很好的致密外向流的示踪. 总体上, SiO 谱线的线宽最宽, 这也进一步暗示了 SiO 谱线能示踪高速外向流, 即更接近激发源. 我们还发现 SiO 和 CH₃OH 元素丰度之间有很好的相关性, 相关系数为 $R = 0.77$.

这个工作是研究大质量恒星形成区周围物理和运动学环境的第一步工作. 这将为后期的高分辨率观测提供很多有价值的参考信息.

致谢 非常感谢 13.7 m 望远镜全体工作人员在观测过程中提供的帮助.

参 考 文 献

- [1] Mikami H, Umemoto T, Yamamoto S, et al. ApJ, 1992, 392: 87
- [2] Klaassen P D, Wilson C D. ApJ, 2007, 663: 1092
- [3] Menten K M, Walmsley C M, Henkel C, et al. A&A, 1988, 198: 267
- [4] Leurini S, Schilke P, Menten K M, et al. A&A, 2004, 422: 573
- [5] Leurini S, Schilke P, Wyrowski F, et al. A&A, 2007, 466: 215
- [6] Kalenskii S V, Dzura A M, Booth R S, et al. A&A, 1997, 321: 311
- [7] Sun Y, Gao Y. MNRAS, 2009, 392: 170
- [8] Snell R L, Huang Y L, Dickman R L, et al. ApJ, 1988, 325: 853
- [9] Harju J, Lehtinen K, Booth R S, et al. A&AS, 1998, 132: 211
- [10] Tielens A G G M. The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, New York: Cambridge University Press, 2005, 53-75
- [11] Lovas F J, Krupenie P H. JPCRD, 1974, 3: 245

- [12] Goldsmith P F, Langer W D. ApJ, 1999, 517: 209
- [13] Purcell C R, Longmore S N, Burton M G, et al. MNRAS, 2009, 394: 323

A Sensitive Survey of Dense Parts of Outflows toward Massive Cores

SUN Yan^{1,2} XU Ye¹ YANG Ji¹

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT A sample of 13 massive star-forming cores was observed in SiO (2-1), CH₃OH (2-1) and C³⁴S (2-1) thermal lines. Nine of these cores were detected in all three lines. Among the nine SiO detections, three were new detections and were relatively faint. Most of the lines have wide wings, which might be interpreted as the evidence of ongoing energetic outflows in the cores. The line widths of SiO are generally the broadest, which might further suggest that SiO emissions are due to higher velocity outflow and are closer to the excited source. We derive the rotational temperatures, column densities, and chemical relative abundances of the cores. There is a strong correlation between SiO and CH₃OH abundances, with correlation coefficient $R = 0.77$, but no correlation is observed between SiO and C³⁴S.

Key words stars: formation, radio continuum lines: ISM, ISM: abundances