

文章编号:1671-4229(2022)04-0087-07

HC₃N, 另一种激波示踪分子?

张江水, 汪友鑫, 陈家梁, 赵洁瑜, 邹益鹏

(广州大学 天体物理中心, 广东 广州 510006)

摘要: 激波,即冲击波,与恒星形成演化过程密切相关。目前,已知的激波示踪分子主要有氧化硅(SiO)、氧化硫(SO)和异氰酸(HNCO)。最近的研究表明,恒星形成区中HC₃N的形成可能与激波有关。为了检验HC₃N是否可以作为激波的示踪分子,使用IRAM望远镜对21个大质量恒星形成区的HC₃N J=12-11和SiO J=5-4进行了观测。对观测资料处理分析,发现在所有源中都探测到了HC₃N J=12-11,在12个源中探测到SiO J=5-4谱线。和SiO分子谱线一样,绝大多数源(16个)的HC₃N J=12-11谱线也显示出明显的线翼特征。对HC₃N J=12-11有明显线翼的源进一步分析显示,HC₃N确实存在于恒星形成活动活跃的区域。通过分析HC₃N J=12-11和SiO J=5-4的积分强度的相关性,发现这两种分子参数具有显著的正相关(相关系数 $r=0.86$)。观测分析结果支持HC₃N为另外一种高速激波的示踪分子。

关键词: 天体化学; 星际介质; 激波; HC₃N

中图分类号: ET 471 **文献标志码:** A

HC₃N, another shock tracing molecule?

ZHANG Jiang-shui, WANG You-xing, CHEN Jia-liang, ZHAO Jie-yu, ZOU Yi-peng

(Center for Astrophysics, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Shock waves are closely connected with star formation and evolution. So far, the known tracing molecules of shock waves include silicon monoxide (SiO), sulfur monoxide (SO) and isocyanic acid (HNCO). Recent studies suggest that the formation of HC₃N may also be associated with shock waves. To investigate whether HC₃N can be a tracer of shock waves, we used the IRAM 30m telescope to observe HC₃N J=12-11 and SiO J=5-4 toward 21 high-mass star-forming regions. Our analysis results on observation data show that, SiO J=5-4 was detected in 12 sources and HC₃N J=12-11 was detected in all 21 sources. As all detected SiO J=5-4 spectra, line wings appear clearly in most of the HC₃N J=12-11 spectra (16 out of 21). Investigations on those sources with line wing features found that HC₃N molecules are really existing in regions where star formation is active. Further, statistical analysis on the integrated intensities of HC₃N J=12-11 and SiO J=5-4 shows a significant positive correlation, with a correlation coefficient of 0.86. All of these results support that HC₃N can be used as another tracing molecule of the high-speed shock waves.

Key words: Astrochemistry; ISM; shock; HC₃N

激波,即冲击波,是星际介质(Interstellar Medium, ISM)中一种普遍的现象,可能由超新星爆炸、星风以及快速移动的星际气体团块之间的碰撞等驱动^[1]。恒星的形成、演化和死亡过程都与激波密切相关,一方面,星

际介质中的激波可能触发分子云核的塌缩,从而导致新的恒星的形成;另一方面,新形成的恒星又会在演化过程中产生新的激波^[2]。目前,已知的激波示踪分子主要有氧化硅(SiO)、氧化硫(SO)和异氰酸(HNCO)^[3-5]。

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-03-23

作者简介: 张江水(1972—),男,教授,博士。E-mail: jszhang@gzhu.edu.cn

引文格式: 张江水,汪友鑫,陈家梁,等. HC₃N, 另一种激波示踪分子? [J]. 广州大学学报(自然科学版), 2022, 21(4): 87-93.

其他分子是否可以示踪激波? 以及它们示踪的物理环境和已知的激波示踪分子是否具有差异, 这些问题依旧是天体化学研究中的重点问题。寻找新的激波示踪分子对于理解这些分子的化学特性和限定恒星形成中的物理环境具有重要意义。

1971 年, HC_3N 首次在银河系中心人马座 Sgr B2 中被探测到^[6], 是一个良好的致密分子探针^[7-9]。它的主要合成途径为 $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CN} \rightarrow \text{HC}_3\text{N} + \text{H}$ ^[10-11]。激波模型提出 HC_3N 的前体分子 (C_2H_2) 在高速 ($\sim 40 \text{ km s}^{-1}$) 激波的作用下被释放到气态环境中, 并和 CN 反应生成 HC_3N ^[12]。观测方面, 在具有明显外向流的源中, HC_3N 的谱线显示出明显的线翼特征^[13], 相对于 HC_5N 和 N_2H^+ , HC_3N 的谱线具有更大的线宽^[14-15]。以上的模型和少量的观测研究表明, HC_3N 可能是另一种激波示踪分子。

为了证实 HC_3N 是否可以示踪激波, 笔者申请并获得了 IRAM 30 m 望远镜的观测时间, 对 21 个大质量恒星形成区的 $\text{HC}_3\text{N J}=12-11$ 和另一种高速激波示踪分子 $\text{SiO J}=5-4$ 进行了观测。本文的第 1 节主要介绍观测情况, 在第 2 节给出对观测资料的处理过程, 以及相应的处理分析结果。关于 HC_3N 谱线的线翼以及 HC_3N 和 SiO 积分强度之间的相关性, 在第 3 节中进行了讨论。第 4 节列出了主要结论。

1 观 测

在 2020 年 9 月和 10 月, 笔者利用当前最先进的单天线毫米波望远镜 IRAM 30 m (西班牙, 格拉纳达)^① 对 21 个大质量恒星形成区的 $\text{HC}_3\text{N J}=12-11$ 和 $\text{SiO J}=5-4$ 进行了观测。观测中采用具有双极化功能的 8 个混频接收机 (Eight Mixer Receiver, EMIR) 和宽带模式下的快速傅里叶变换频谱仪 (FTS)。观测的频率范围为 108 ~ 115.5 GHz 和 216.5 ~ 220.5 GHz, 频率分辨率为 195 kHz, 对应的速度分辨率在 109 GHz 和 217 GHz 分别为 $\sim 0.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。观测的 $\text{HC}_3\text{N J}=12-11$ 和 $\text{SiO J}=5-4$ 谱线的静止频率分别为 109.173 634 GHz 和 217.104 980 GHz, 对应的望远镜波束大小分别为 19 角秒和 10 角秒。观测采用位置切换模式 (Position-switching mode), 其 Off 点的位置在源的方位角上偏离 30 角分。

观测 $\text{HC}_3\text{N J}=12-11$ 和 $\text{SiO J}=5-4$ 时的系统温度分别为 156 ~ 300 K 和 300 ~ 1 300 K。主波束亮度温度 (T_{mb}) 等于天线温度 (T_A^*) 乘以前端效率和主波束效率的比值 (对于 HC_3N 和 SiO , $F_{\text{eff}}/B_{\text{eff}}$ 分别为 0.94/0.78 ~ 1.21 和 0.94/0.63 ~ 1.49)。每一次扫描的积分时间为 4.8 min, 谱线均方根误差 (root-mean-square, rms) 的典型值为 0.02 K (HC_3N) 和 0.05 K (SiO)。样本源的观测信息见表 1。

表 1 样本源的观测参数及谱线参数

Table 1 Observed parameters and spectral parameters of our sources

源名	赤经 (J2000)	赤纬	分子	积分 时间	均方根 误差	积分 强度	主波束 亮温度	蓝端 线翼	红端 线翼
	(J2000)	(J2000)		/min	/K	/(K km · s ⁻¹)	/K	wing	wing
G000.37	17:46:21.40	-28:35:39.8	HC_3N	114	0.01	11.00 ± 0.14	1.45	Y	Y
			SiO		0.02	4.59 ± 0.07	0.40		
G010.62	18:10:17.98	-19:54:04.6	HC_3N	58	0.02	2.47 ± 0.04	0.90	Y	N
			SiO		0.05				
G010.621	18:10:28.56	-19:55:48.7	HC_3N	89	0.02	35.20 ± 0.06	4.64	Y	N
			SiO		0.04	20.60 ± 0.15	2.02		
G012.02	18:12:01.84	-18:31:55.8	HC_3N	60	0.01	0.88 ± 0.02	0.24	Y	N
			SiO		0.02				
G012.81	18:14:14.06	-17:55:11.3	HC_3N	58	0.03	26.20 ± 0.08	7.00	N	Y
			SiO		0.10				
G013.87	18:14:35.83	-16:45:35.8	HC_3N	120	0.01	3.77 ± 0.02	1.25	Y	N
			SiO		0.02				
G027.36	18:41:51.05	-05:01:43.4	HC_3N	58	0.02	14.90 ± 0.13	2.20	Y	Y
			SiO		0.07	16.80 ± 0.36	1.19		

① <https://www.iram-institute.org/EN/>

(续表1)

源名	赤经(J2000)	赤纬	分子	积分时间	均方根误差	积分强度	主波束亮温度	蓝端线翼	红端线翼
	(J2000)	(J2000)		/min	/K	$/(K km \cdot s^{-1})$	/K	wing	wing
G029.86	18:45:59.57	-02:45:06.5	HC ₃ N	58	0.02	2.93 ± 0.03	0.97	Y	Y
			SiO		0.03				
G029.95	18:46:03.74	-02:39:22.3	HC ₃ N	120	0.01	13.51 ± 0.14	2.72	Y	Y
			SiO		0.02	14.10 ± 0.13	1.18		
G049.48	19:23:39.82	14:31:04.9	HC ₃ N	56	0.02	27.85 ± 0.18	3.90	Y	Y
			SiO		0.03	24.52 ± 0.21	2.01		
G059.78	19:43:11.24	23:44:03.0	HC ₃ N	58	0.02	5.68 ± 0.04	2.64	Y	Y
			SiO		0.06				
G069.54	20:10:09.07	31:31:35.9	HC ₃ N	58	0.01	8.98 ± 0.04	2.14	Y	N
			SiO		0.03	10.11 ± 0.17	0.98		
G073.65	20:16:21.93	35:36:06.0	HC ₃ N	58	0.02	0.78 ± 0.04	0.21	N	N
			SiO		0.06				
G081.75	20:39:01.99	42:24:59.2	HC ₃ N	29	0.02	10.13 ± 0.03	4.51	Y	Y
			SiO		0.03	2.81 ± 0.09	0.32		
G109.87	22:56:18.05	62:01:49.5	HC ₃ N	58	0.02	8.58 ± 0.05	2.29	N	Y
			SiO		0.04	9.40 ± 0.24	0.63		
G111.54	23:13:45.36	61:28:10.5	HC ₃ N	114	0.09	4.67 ± 0.03	1.06	N	Y
			SiO		0.02	4.77 ± 0.08	0.46		
G133.94	02:27:03.81	61:52:25.2	HC ₃ N	87	0.01	9.43 ± 0.03	2.29	Y	N
			SiO		0.02	14.20 ± 0.07	1.64		
G135.27	02:43:28.56	62:57:08.3	HC ₃ N	492	0.04	0.35 ± 0.07	0.13	N	N
			SiO		0.06	1.33 ± 0.03	0.21		
G160.14	05:01:40.24	47:07:19.0	HC ₃ N	174	0.07	0.55 ± 0.01	0.22	N	N
			SiO		0.09	0.56 ± 0.02	0.10		
G168.06	05:17:13.74	39:22:19.9	HC ₃ N	174	0.06	0.27 ± 0.01	0.12	N	N
			SiO		0.01				
G196.45	06:14:37.64	13:49:36.6	HC ₃ N	174	0.06	0.64 ± 0.01	0.23	N	N
			SiO		0.01			Y	Y

注:列(1-3):源名以及对应的坐标;列(4):分子;列(5-6):积分时间及对应的均方根误差;列(7):积分强度及误差;列(8):主波束亮温度。列(9-10):HC₃N谱线是否具有线翼

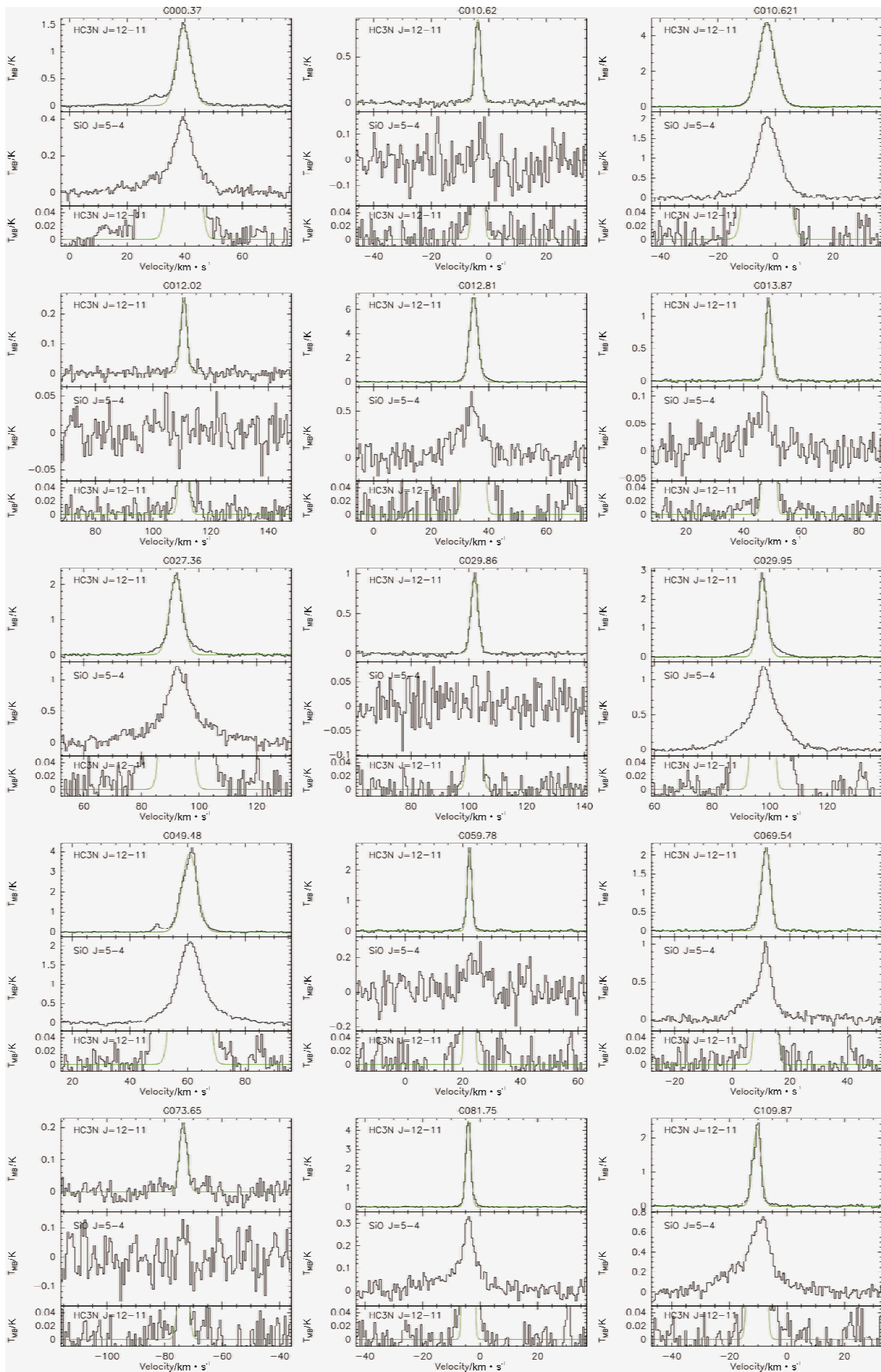
2 数据处理和结果

笔者使用专用射电连续谱和谱线分析软件(GILDAS/CLASS)^①对观测资料进行了处理分析。为了提高信噪比,将同一个源、同种分子的谱线进行平均,并进行基线改正和平滑处理(平滑后的谱线速度分辨率约为0.6 km s⁻¹)。结果显示,在这21个目标源中都探测到了HC₃N J=12-11,而SiO J=5-4只在12个源中被

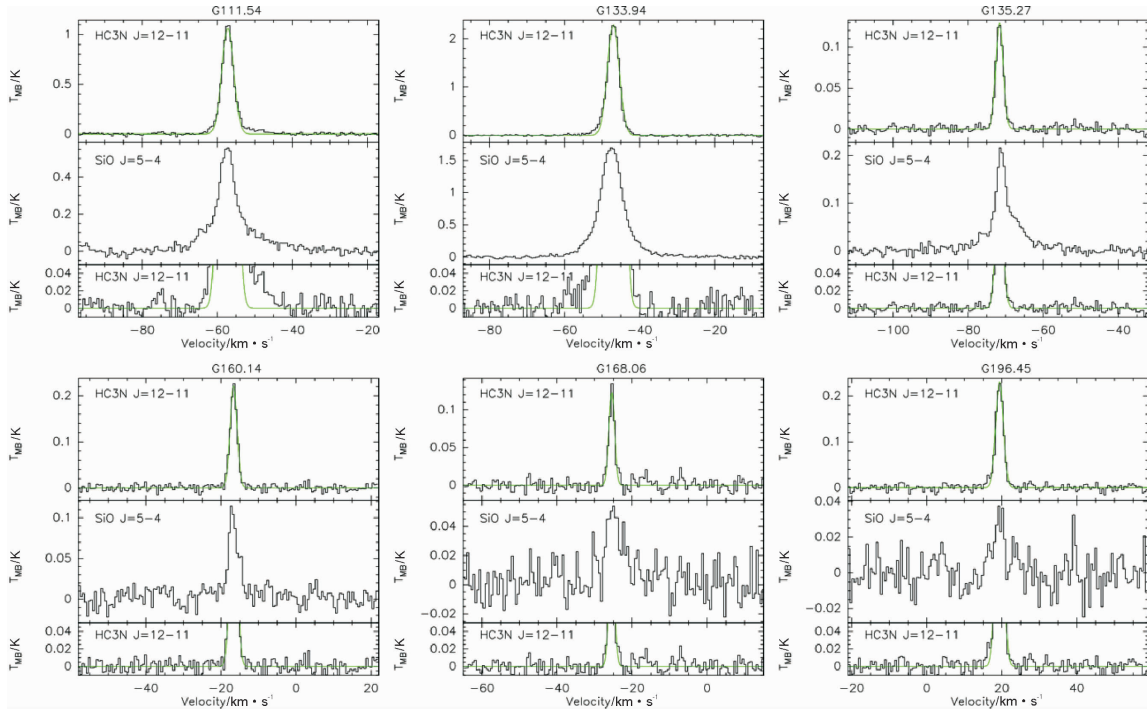
探测到(信噪比>5)。

观察探测到的谱线,发现所有源的SiO J=5-4谱线和大多数源(16个)的谱线HC₃N J=12-11都显示出明显的线翼特征。对这些源的谱线,直接使用Class软件中的“Print”命令得到谱线的积分强度和峰值等谱线参数。对于其他源(G073.65、G135.27、G160.14、G168.06和G196.45)的HC₃N J=12-11谱线,通过对其进行高斯拟合,获得相应的谱线参数。图1给出了这些源的谱线图和拟合结果。

^① <https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>



(续上图)

图1 观测得到的 HC₃N J = 12-11 和 SiO J = 5-4 的谱线及拟合线(绿线)Fig. 1 Spectral lines and fits (green lines) for HC₃N J = 12-11 and SiO J = 5-4 obtained from the observations

注:上部为 HC₃N J = 12-11 谱线,中部为 SiO J = 5-4 谱线。为清晰显示 HC₃N J = 12-11 谱线的线翼特征,将其谱线进行了放大(见底部)。绿色线条表示高斯拟合结果

3 分析和讨论

3.1 线翼

谱线的线翼特征主要是源于分子气体的非热运动,包括外向流、内落和电离氢区的膨胀等。因为 HC₃N 分子的谱线在整个速度范围内通常是光学薄的,所以高速非热运动的气体与总气体的相对比例与流量成正比^[16]。因此,如果探测到这种光学薄的致密气体分子探针具有明显的线翼,那就说明目标源中具有明显的高速非热运动气体。对上述提到的 HC₃N J = 12-11 谱线具有明显线翼成份的 16 个源进行调研,发现其中 4 个源(G059.78、G109.87、G111.54 和 G168.06)存在 CO 分子的外向流^[17],5 个源(G010.621、G029.95、G059.78、G111.54 和 G133.94)存在气体内落特征^[18]。进一步与致密电离氢区的源表^[19-21]交叉认证发现,其中 14 个源属于致密电离氢区。这些反应出 HC₃N 分子确实存在于恒星形成活跃的区域。

3.2 HC₃N 和 SiO 的相关性统计和分析

基于以上处理分析结果,有 12 个源同时探测到了 HC₃N J = 12-11 和 SiO J = 5-4。对这 12 个源进行分析,

图 2 给出了它们的 HC₃N 和 SiO 谱线积分强度的对比情况,可以发现,HC₃N 和 SiO 之间存在显著的相关性。使用不加权的最小二乘法进行拟合,得到: $I_{HC_3N} = (1.12 \pm 0.21) I_{SiO} + (0.51 \pm 2.69)$,对应的线性相关系数为 0.86。这与之前基于 43 个南天的大质量恒星形成区样本的观测分析结果一致^[22],拟合结果得到, $I_{HC_3N} = (1.15 \pm 0.09) I_{SiO} + (1.08 \pm 2.45)$,相关系数为 0.89。

HC₃N 和 SiO 之间存在显著相关性,而氧化硅(SiO)分子是示踪恒星形成区高速(20 ~ 50 km · s⁻¹)激波区域的极佳探针^[23],支持 HC₃N 为另外一种高速激波示踪分子。这从激波模型结果也能得到验证,在高速激波的作用下,尘埃表面的硅原子和含硅分子被释放到气态环境中,随后被氧化成 SiO^[5,24-25]。HC₃N 也可以在类似的情况下产生,即在激波的作用下,HC₃N 的前体分子(C₂H₂)从尘埃表面释放到气态环境中并与 CN 反应生成 HC₃N。此外,相关的激波理论模型显示,HC₃N 的丰度在高速激波通过的区域确实会明显增大^[12,26]。基于以上结果和讨论,笔者认为 HC₃N 分子类似于 SiO 分子,可以作为另外一种高速激波示踪分子。

需要指出的是,在少数探测到 HC₃N 的源中,并没有探测到 SiO 分子。这可能表明 HC₃N 也能在非激波环

境下产生,激波触发其产生并非其唯一的形成机制。

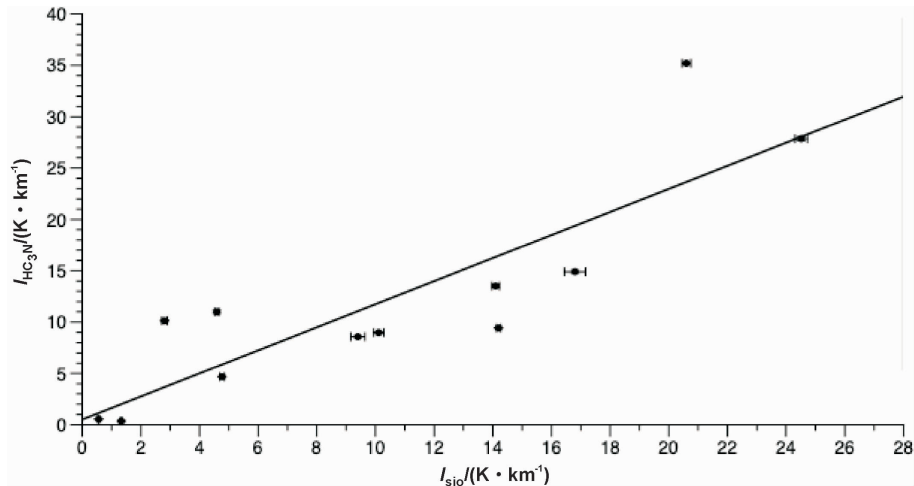


图 2 $\text{HC}_3\text{N J} = 12-11$ 和 $\text{SiO J} = 5-4$ 的积分强度的对比

Fig. 2 A comparison of the line integrated intensities of $\text{HC}_3\text{N J} = 12-11$ and $\text{SiO J} = 5-4$

注:实线表示不加权的最小二乘法拟合结果

4 总 结

为检验 HC_3N 分子是否可以作为激波示踪分子,我们使用 IRAM 30 米望远镜对 21 个大质量恒星形成区的 $\text{HC}_3\text{N J} = 12-11$ 和 $\text{SiO J} = 5-4$ 进行了观测。对观测资料进行了处理分析,主要结果如下:

(1) 在 21 个源中都探测到了 $\text{HC}_3\text{N J} = 12-11$, 在其

中 12 个源中探测 $\text{SiO J} = 5-4$ 分子。

(2) 探测到的所有 $\text{SiO J} = 5-4$ 谱线和绝大多数的 $\text{HC}_3\text{N J} = 12-11$ 谱线都显示出明显的线翼特征。对 $\text{HC}_3\text{N J} = 12-11$ 有明显线翼的源进一步分析显示, HC_3N 确实存在于恒星形成活动活跃的区域。

(3) HC_3N 和 SiO 的积分强度之间具有显著的相关性。结合之前的模型和观测结果, HC_3N 可以作为激波的示踪分子。

参考文献:

- [1] Draine B T, Mckee C F. Theory of interstellar shocks[J]. Annual Review Astronomy & Astrophysics, 1993, 31:373-432.
- [2] Gusdorf A. Shocks, star formation, and the JWST[C]//Proceedings of the Annual Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics. Toulouse: SF2A, 2015:87-91.
- [3] Zinchenko I, Henkel C, Mao R Q. HNC0 in massive galactic dense cores[J]. Astronomy & Astrophysics, 2000, 361: 1079-1094.
- [4] Bachiller R, Perez G M, Kumar M S N, et al. Chemically active outflow L 1157[J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 372:899-912.
- [5] Gusdorf A, Cabrit S, Flower D R, et al. SiO line emission from C-type shock waves: Interstellar jets and outflows[J]. Astronomy & Astrophysics, 2008, 482:809-829.
- [6] Turner B E. Detection of interstellar cyanoacetylene[J]. Astrophysical Journal, 1971, 163:35-39.
- [7] Morris M, Snell R L, Vanden B P. Emission from highly excited rotational states of HC_3N dense clouds[J]. Astrophysical Journal, 1977, 216:738-746.
- [8] Chung H S, Osamu K, Masaki M. A cyanoacetylene study of the molecular disk in star forming regions[J]. Journal of the Korean Astronomical Society, 1991, 24:217-271.
- [9] Bergin E A, Snell R L, Goldsmith P F. Density structure in giant molecular cloud cores[J]. Astrophysical Journal, 1996, 460:343-358.
- [10] Dishoeck E, Hogerheijde M R. Models and observations of the chemistry near young stellar objects[M]. The Origin of Stars and Planetary Systems. Dordrecht: Springer, 1999.

- [11] Chapman J F, Millar T J, Wardle M, et al. Cyanopolynes in hot cores: Modelling G305.2 + 0.2[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010,394:221-230.
- [12] Benedettini M, Viti S, Codella C, et al. The B1 shock in the L1157 outflow as seen at high spatial resolution[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013,436:179-190.
- [13] Feng H X, Wang J Z, Li S H, et al. Multiple HC₃N line observations towards 19 galactic massive star-forming regions[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2021,73:467-484.
- [14] Taniguchi K, Saito M, Sridharan T L, et al. Survey observations to study chemical evolution from high-mass starless cores to high-mass protostellar objects. I. HC₃N and HC₅N[J]. Astrophysical Journal, 2018,133:133-144.
- [15] Yu N P, Wang J J, Xu J L. Chemical evolution of HC₃N in dense molecular clouds[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019,489:4497-4512.
- [16] Morris M, Turner B E, Palmer P, et al. Cyanoacetylene in dense interstellar clouds[J]. Astrophysical Journal, 1976,205:82-93.
- [17] Wu Y, Wei Y, Zhao M, et al. A study of high velocity molecular outflows with an up-to-date sample[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004,426:503-515.
- [18] Wu J W, Evans N J, Shirley Y L, et al. The properties of massive, dense, clumps: Mapping surveys of HCN and CS[J]. Astrophysical Journal Supplement, 2010,188:313-357.
- [19] Hu B, Menten K M, Wu Y, et al. On the relationship of UC HII regions and class II methanol masers. I. source catalogs [J]. Astrophysical Journal, 2016,833:18-27.
- [20] Kalcheva I E, Hoare M G, Urquhart J S, et al. The coordinated radio and infrared survey for high-mass star formation III. A catalogue of northern ultra-compact H II regions[J]. Astronomy & Astrophysics, 2018,615:103-123.
- [21] Djordjevic J O, Thompson M A, Urquhart J S, et al. Beyond the solar circle-trends in massive star formation between the inner and outer galaxy[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019,487:1057-1071.
- [22] He Y X, Henkel C, Zhou J J, et al. Extended HNCO, SiO, and HC₃N emission in 43 southern star-forming regions[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2020,253:2-46.
- [23] Schilke P, Walmsley C M, Pineau F G, et al. SiO production in interstellar shocks[J]. Astronomy & Astrophysics, 1997,321:293-304.
- [24] Codella C, Bachiller R, Reipurth B. Low and high velocity SiO emission around young stellar objects[J]. Astronomy & Astrophysics, 1999,343:585-598.
- [25] López-Sepulcre A, Watanabe Y, Sakai N, et al. The role of SiO as a tracer of past star-formation events: The case of the high-mass protocluster NGC 2264-C[J]. Astrophysical Journal, 2016,822:85-99.
- [26] Mendoza E, Lefloch B, Ceccarelli C, et al. A search for cyanopolynes in L1157-B1[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018,475:5501-5512.

【责任编辑:陈 钢】