

基于ALMA高分辨率的多谱线数据对 NGC 1068核区中物理性质的研究*

林淑婷^{1,2†} 高煜^{3,1} 谈清华¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

(3 厦门大学物理科学与技术学院天文学系 厦门 361005)

摘要 利用ALMA干涉阵望远镜(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)的高分辨($\sim 0.2''-0.7''$)的多谱线数据,包括CO (1-0)、CO (2-1)、CO (3-2)、HCN (1-0)、HCO⁺ (1-0)、HCN (3-2)、HCO⁺ (3-2)、HCN (4-3)和HCO⁺ (4-3),并结合连续谱数据对近邻星系NGC 1068核区的物理性质进行了研究.速度积分强度图显示核周盘(CircumNuclear Disk, CND)呈现不对称的环状结构,尺度 ~ 300 pc.各分子谱线均显示,CND上的东发射结(E-knot)比西发射结(W-knot)有着更强的发射,且E-knot处表现出的分子气体的速度比W-knot更高.致密分子气体含量占比(用HCN或HCO⁺不同转动跃迁线与CO (1-0)的积分强度比值表示),以及致密分子气体比值(HCN/HCO⁺)均在CND的东部表现出更高的值,意味着CND东部和西部有着不同的物理环境或化学组成.CO (3-2)/CO (1-0)的积分强度比值在E-knot很高,意味着该处极端的物理环境导致分子激发增强.通过与单镜望远镜JCMT (James Clerk Maxwell Telescope)比较HCN (4-3)和HCO⁺ (4-3)的流量,得到高分辨率ALMA成图测量的致密分子气体在1 kpc尺度上的流量损失为10%–20%.各分子谱线在E-knot和W-knot的流量比为1.8–3.9,CND中E-knot和W-knot的差异可能与活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN)的反馈有关.此外,在AGN位置处的CO (2-1)、CO (1-0)和HCO⁺ (1-0)的谱线发现了吸收特征.这种吸收主要为其背景的强大连续谱辐射导致,同时AGN附近的气体下落也可能产生自吸收现象.

关键词 恒星:形成,亚毫米:星际介质,星系:星暴,射电谱线:星系,星系:个别:NGC 1068

中图分类号: P157; **文献标识码**: A

1 引言

星系的演化与恒星形成、活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN)的反馈、超新星爆发等活动有关,星系的核区往往蕴含着与之关系密切的复杂的活动.因此,研究星系中心核区的结构对理解星系的形成与演化至关重要.大量分子谱线的观测

可以较好地示踪星系核区内部的物理状态. AGN是星系中心非常致密的结构,AGN产生的强X射线辐射导致X射线电离区(X-ray-Dominated Region, XDR)的形成^[1].而大质量恒星形成产生紫外辐射会产生光致电离区(Photon-Dominated Region, PDR)^[2].示踪分子气体的探针可以用于探测AGN的反馈.分子外流是反馈活动的足迹之一,有许多

2022-03-21收到原稿,2022-04-20收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11803090、11861131007、12033004、11520101002、12003070),国家重点研发计划(2017YFA0402704),中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDJ-SSW-SLH008)资助

[†]linst@stu.xmu.edu.cn

包含AGN的星系中检测到了分子外流的现象^[3-5]. 最近的一项研究认为射电喷流可能驱动星系中大质量的分子外流^[6]. AGN与星暴活动之间可能存在一定的物理联系, 然而星暴活动是否为AGN提供原料, 分子气体又在星暴和AGN中扮演怎样的角色? 关于这些问题的答案我们尚不清楚.

恒星形成是星系中最重要的活动之一, 分子气体与恒星形成活动紧密相关. 密度阈值的恒星形成模型认为只有一定密度以上的气体才能坍塌形成恒星^[7-9]. 由于不同的分子探针可以示踪不同温度和密度的气体, 因此不同的分子探针倾向于示踪星系中的不同区域. 与示踪的总分子气体的CO相比, 拥有更高临界密度的致密分子气体探针(如HCN、HCO⁺等)与恒星形成活动可能具有更加紧密的相关性. 观测研究发现星系总红外光度与致密分子气体的光度存在线性关系^[7-8, 10]. 然而在星系的小尺度上恒星形成与分子气体之间的关系尚不清楚. 不同的物理环境如何影响分子气体, 并进一步影响恒星形成活动, 这些问题都需要更加深入的探索. 研究分子气体和物理环境之间的关系, 能够帮助我们更好地理解恒星形成的机制.

分子气体的丰度在星暴主导的星系和AGN主导的星系中有着不同的表现, 因此分子气体的线比可以用来推测和限制物理条件. 一些研究表明, AGN的辐射会导致HCN的丰度增强^[11-12]. 所以HCN相对于CO (或HCO⁺)的增丰, 常常用来检测星系中AGN的存在^[13-15]. 然而, 最新的大样本近邻星系致密分子观测研究发现HCN和HCO⁺的比值在不同类型的星系中无明显相关性, 并不能很好地区别星系核区是否存在AGN^[16]. 此外, 分子探针的多能级转动跃迁, 其激发与物理环境的温度和密度有关, 因此不同跃迁线之间的比值, 如CO (3-2)/CO (1-0)等, 可以用于限制激发条件^[17]. 分子线比在星暴环和核周盘(CircumNuclear Disk, CND)上也有不同的表现. Tacconi等^[18]的研究表明, CND上的HCN/CO的比值要比星暴环上高约5-10个数量级.

NGC 1068是一个塞弗特2型的近邻星系(光度距离 $D_L = 15.7$ Mpc, $1'' \sim 76$ pc). 该星系是一个典型的星暴与AGN混合的星系, 其中心的AGN被星

暴环所环绕. 近期对该星系的中红外多波段成像^[19]表明其遮蔽的大质量黑洞附近的温尘埃和热尘埃的分布呈现出两个主轴方向, 该分布可能与黑洞的旋转轴有关. 研究显示NGC 1068中的CND中存在一个巨大的XDR区^[20], 该区域由于X射线辐射存在较高的动力学温度. 同时, CND中较强的CN分子辐射表明该区域也可能存在PDR区^[21]. Viti等^[22]关于NGC 1068的研究发现, CND中的分子气体非常致密且温度很高(温度 $T > 150$ K, 氢分子数密度 $n(\text{H}_2) > 10^5 \text{ cm}^{-3}$). 相对于HCO⁺和CO的发射, 该星系CND上的HCN有发射增强的迹象, 很可能是由于AGN辐射的影响导致的HCN增丰^[13]. Saito等^[23]的研究发现了NGC 1068中存在AGN负反馈的证据, 抑制了恒星形成活动. 最近的一项关于NGC 1068星暴环致密气体的研究发现, 致密气体与恒星形成率的线性相关关系在空间分辨的300-400 pc尺度上失效^[24]. 有关星系小尺度上的恒星形成定律仍存在不少争议. 由于NGC 1068中复杂的物理环境, 研究该星系需要借助高空间分辨的多谱线数据来解析不同的物理区域. 尤其是致密分子气体, 主要分布在星系中心, 研究致密分子气体更需要解析其中心的核区. 干涉阵如ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)的高分辨率数据使得我们能够研究近邻星系的核区. 此外, MALATANG (Mapping the dense molecular gas in the strongest star-forming galaxies)项目对该星系的致密分子气体HCN (4-3)和HCO⁺ (4-3)进行了从中心到外围的大尺度的观测^[10]. 尽管该星系拥有丰富的数据, 但是关于该星系的分子谱线的系统性分析还较少. 为了系统地研究NGC 1068中分子气体与其物理环境的关系, 本文利用了ALMA的高分辨率数据, 对该星系的核区进行了多谱线的分析. 表1列出了NGC 1068星系的一些基本性质的参数.

在本文第2节中介绍了使用的数据以及数据的处理方法. 第3节展示了主要的结果, 包括积分强度图、速度场图、积分强度比值图. 第4节我们讨论了分子气体在核区中的分布, 不同的物理环境和激发机制对分子线比的影响, 以及不同物理环境中流量和谱线的特征. 此外, 结合连续谱分析了谱线吸收产生的机制. 第5节给出了主要的结论.

表 1 NGC 1068的基本物理性质
Table 1 The basic physical properties of NGC 1068

Parameter	Value	Reference
Galaxy center (J2000)	(R.A.: 02h42m40.711s, Dec.: -00d00m47.81s)	[25]
AGN position (J2000)	(R.A.: 02h42m40.710s, Dec.: -00d00m47.94s)	[26]
E-knot position ^a (J2000)	(R.A.: 02h42m40.771s, Dec.: -00d00m47.84s)	[22]
W-knot position ^b (J2000)	(R.A.: 02h42m40.630s, Dec.: -00d00m47.84s)	[22]
Redshift/ z	0.00379	[27]
D_L ^c	15.7 Mpc	[10]
Position angle	278°	[28]
Inclination	41°	[3]
Type	(R)SA (rs)b, AGN	[29]
Heliocentric velocity (v_{hel})	1137 km · s ⁻¹	[30]

^a The eastern peak position of the CND, where R.A. and Dec. represent the right ascension and the declination, respectively.

^b The western peak position of the CND.

^c Luminosity distance, calculated with Hubble constant $H_0 = 71 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, corrected for the Virgo infall motion.

2 数据及数据处理

2.1 数据

本工作是在MALATANG项目研究的基础上,开展的对星系NGC 1068从中心核心区到外围星系盘的扩展深入的研究. 我们选用了来自于ALMA数据档案中心的NGC 1068高分辨谱线数据, 包括了CO (1-0)、CO (2-1)、CO (3-2)、HCN (1-0)、HCO⁺ (1-0)、HCN (3-2)、HCO⁺ (3-2)、HCN (4-3)和HCO⁺ (4-3). 此外, 还利用了2.6 mm、1.3 mm和0.8 mm的连续谱作为辅助数据. 表2中列出了使用的各谱线和连续谱数据的项目代码、静止频率和临界密度等信息.

所有的谱线和连续谱数据均来源于ALMA项目. HCN (1-0)和HCO⁺ (1-0)的数据于2015年观测, 该观测使用了12 m阵列的35个天线和band 3接收机, 水汽条件(Precipitable Water Vapor, PWV)为

1.48 mm, 基线长度范围: 41–2251 m. HCN (3-2)和HCO⁺ (3-2)数据于2015年观测, 该观测使用了12 m阵列的36个天线和band 6接收机, PWV为1.9 mm, 每个谱线窗口都使用了最宽的带宽, 约1.875 GHz, 基线长度范围: 41–2270 m. HCN (4-3)数据于2015年观测, 使用了12 m阵列的39个天线和band 7接收机, 基线长度范围: 15–1466 m, 总的观测时间为32.1 min. HCO⁺ (4-3)和CO (3-2)数据观测于2015年, 该观测使用了12 m阵列的41个天线和band 7接收机, PWV为0.8 mm, 总观测时间为83 min. CO (2-1)数据于2015年观测, 使用了12 m阵列的37个天线和band 6接收机, PWV为2.4 mm, 总观测时间为29 min. CO (1-0)数据于2019年观测, 使用了12 m阵列的46个天线和band 3接收机, PWV为2.0 mm, 观测时间为56 min. 连续谱数据来源于相应的频率段的无谱线发射的通道.

表 2 NGC 1068谱线和连续谱数据的基本信息
Table 2 The basic information of molecular lines and continuum in NGC 1068

Molecular line (or Continuum)	Project-ID ^a	Rest frequency /GHz	Band	$n_{\text{crit}}^{\text{b}}$ /cm ⁻³	Beam size /'	LAS ^c /'	F.O.V ^d /'
HCN (1-0)	2013.1.00055.S ^[31]	88.6316	3	1.1×10^5	0.79×0.54	16.2	64.5
HCO ⁺ (1-0)	2013.1.00055.S ^[31]	89.1885	3	2.2×10^4	0.79×0.54	16.2	64.5
HCN (3-2)	2013.1.00188.S ^[32]	265.8864	6	3.8×10^6	0.18×0.13	3.3	22.0
HCO ⁺ (3-2)	2013.1.00188.S ^[32]	267.5576	6	8.1×10^5	0.2×0.13	3.3	22.0
HCN (4-3)	2013.1.00014.S ^[33]	354.5055	7	9.1×10^6	0.15×0.11	2.5	16.8
HCO ⁺ (4-3)	2013.1.01307.S	356.7342	7	2.0×10^6	0.18×0.13	2.8	16.7
CO (3-2)	2013.1.01307.S	345.7960	7	6.8×10^3	0.18×0.13	2.8	16.7
CO (2-1)	2013.1.00111.S ^[34]	230.5380	6	1.9×10^3	0.65×0.21	4.0	25.3
CO (1-0)	2018.1.01684.S	115.2712	3	2.1×10^2	0.4×0.35	14.8	51.3
2.6 mm continuum	2018.1.01684.S	115.2712	3	2.1×10^2	0.4×0.35	14.8	51.3
1.3 mm continuum	2013.1.00111.S ^[34]	230.5380	6	1.9×10^3	0.65×0.21	4.0	25.3
0.8 mm continuum	2013.1.01307.S	356.7342	7	2.0×10^6	0.18×0.13	2.8	16.7

^a ALMA project-ID, where superscripts are references.

^b Critical densities at the kinematic temperature of 100 K, from Shirley^[35].

^c Largest angular scale recovered.

^d Field-of-view of the observations.

2.2 数据处理

CASA¹ (Common Astronomy Software Applications)是来自ALMA的一款标准数据处理软件. 本工作使用该软件对数据进行了成像处理. 我们使用ALMA提供的标准程序对数据进行了校准处理. 对于分子谱线的成图, 我们首先利用没有谱线发射的通道来确定连续谱的流量水平, 并使用“uvcontsub”任务从UV平面的数据中减去了连续谱的辐射. 连续谱的成像使用了多频率合成(Multi-frequency synthesis, mfs)的方法. 我们利用了“tclean”任务对数据进行交互式的洁化和成像. 成像过程使用了“briggs”的数据加权方式, 健壮度(robust)为0.5. 根据奈奎斯特采样定律, 在成像时像素大小设置为波束大小的1/4–1/5. 得到了成图后, 我们还对数据进行了主波束改正. 方均根噪声(root

mean square, RMS)的测量来自于没有信号发射的区域, 我们使用“imstat”任务来查看其噪声水平. 此外, 为了提高信号探测的显著度, 所有的谱线都被平滑到了 $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度分辨率上.

3 结果

3.1 速度积分强度图

为了研究NGC 1068中心区域分子气体的分布, 我们使用CASA命令“immoments”, 设置零阶矩(moment = 0), 对谱线的强度进行了速度积分. 图1展示了不同分子谱线的速度积分强度图, 积分强度用 I 表示, 下标为对应的谱线. 图中红色叉代表中心AGN的位置, 白色十字分别代表CND的东发射结和西发射结的位置(参见表1).

¹<https://casa.nrao.edu>.

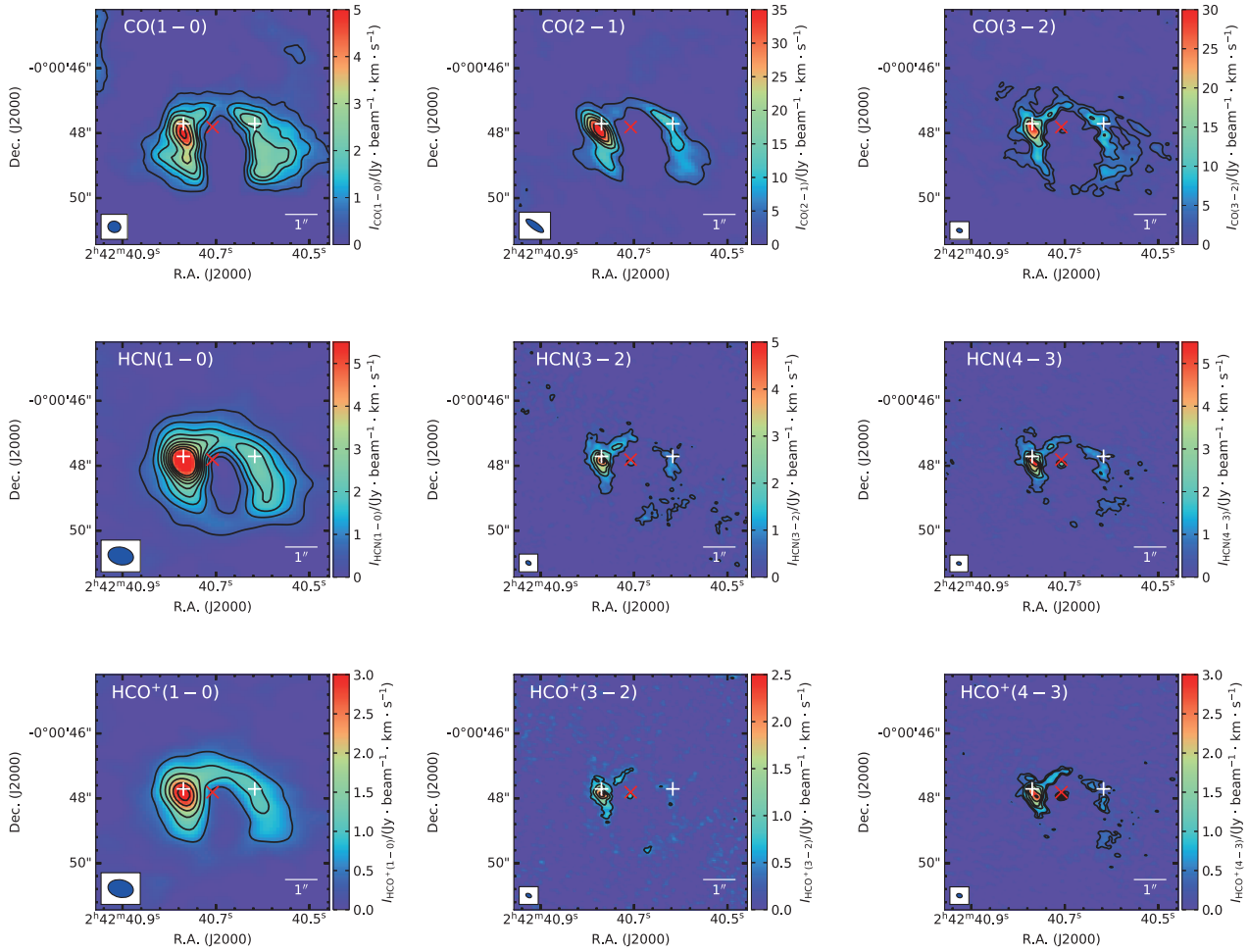


图 1 NGC 1068 中分子谱线的速度积分强度图(moment 0)。每张子图右边的颜色棒显示了积分强度值(用 I 表示, 下标为对应的谱线), 单位为 $\text{Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。波束的大小展示在子图的左下角。红色叉代表中心 AGN 的位置, 两个白色十字分别代表东发射结和西发射结的位置。图中等值线水平为 CO (1-0): 2σ – 20σ (σ 为噪声的标准偏差), 步长 2σ , 其中 $1\sigma = 0.25 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; CO (2-1): 3σ – 30σ , 步长 6σ , 其中 $1\sigma = 0.98 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; CO (3-2): 3σ , 7σ , 15σ , 29σ , 其中 $1\sigma = 0.70 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCN (1-0): 5σ – 45σ , 步长 5σ , 其中 $1\sigma = 0.10 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCN (3-2): 2σ – 18σ , 步长 4σ , 其中 $1\sigma = 0.25 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCN (4-3): 2σ – 18σ , 步长 4σ , 其中 $1\sigma = 0.25 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCO⁺ (1-0): 5σ – 30σ , 步长 5σ , 其中 $1\sigma = 0.09 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCO⁺ (3-2): 3σ – 12σ , 步长 3σ , 其中 $1\sigma = 0.17 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCO⁺ (4-3): 3σ , 5σ , 10σ , 15σ , 20σ , 30σ , 其中 $1\sigma = 0.09 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

Fig. 1 The velocity-integrated intensity images (moment 0) of different molecular lines in NGC 1068. The color bars on the right side of each panel show the integrated intensities (expressed by I , the subscript is the corresponding spectral line) in units of $\text{Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. Beam sizes are shown in the lower-left corner of panels. The red cross represents the position of the AGN, and the two white crosses represent the positions of the E-knot and W-knot. The contour levels are as follows, CO (1-0): 2σ – 20σ (σ is standard deviation of noise), in steps of 2σ , where $1\sigma = 0.25 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; CO (2-1): 3σ – 30σ , in steps of 6σ , where $1\sigma = 0.98 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; CO (3-2): 3σ , 7σ , 15σ , 29σ , where $1\sigma = 0.70 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCN (1-0): 5σ – 45σ , in steps of 5σ , where $1\sigma = 0.10 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCN (3-2): 2σ – 18σ , in steps of 4σ , where $1\sigma = 0.25 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCN (4-3): 2σ – 18σ , in steps of 4σ , where $1\sigma = 0.25 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCO⁺ (1-0): 5σ – 30σ , in steps of 5σ , where $1\sigma = 0.09 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCO⁺ (3-2): 3σ – 12σ , in steps of 3σ , where $1\sigma = 0.17 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; HCO⁺ (4-3): 3σ , 5σ , 10σ , 15σ , 20σ , 30σ , where $1\sigma = 0.09 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

我们发现, 相比于CO示踪的分子气体, HCN和HCO⁺示踪的分子气体更加致密, 集中在更靠近星系中心的区域. 除了CO (2-1)在AGN位置处没有检测到明显的发射(信号 $< 3\sigma$, 其中 σ 为噪声的标准偏差), 其他积分强度图均清楚地探测到了AGN和CND的结构. 图1中的积分强度图显示CND为椭圆环状结构, 其结构延展至大约4'' (~ 300 pc)的尺度. 此外, 在各谱线的积分强度图中均显示了不对称的结构. 该星系E-knot的分子气体辐射峰值位置距离AGN $\sim 1''$, 而W-knot的辐射峰值位置距离AGN $\sim 1.5''$, 相比于W-knot, E-knot的辐射峰值位置距离AGN较近. 并且E-knot位置的发射明显要比W-knot位置的发射更强, 这些结果与之前的高分辨率CO分子气体成图观测研究^[36]吻合. E-knot和W-knot由CND南部和北部较低强度的辐射连接, 且南部的连接桥辐射要比北部连接桥辐射更弱, 在一些分子辐射中没有探测到. 此外, AGN的西南方向存在一个空洞区域, 该区域没有探测到任何气体辐射. 一些近红外波段的研究显示, CND的环状结构可能与核区星系棒上的ILR (Inner Lindblad Resonance)有关, 使大量分子气体聚集在该区域^[1, 36]. 我们会在4.1节中讨论气体在核区的分布以及可能的影响机制.

3.2 平均速度场图像

我们利用CASA命令“immoments”, 设置一阶矩(moment = 1), 得到了各谱线的平均速度场图. 图2展示了不同谱线示踪的分子气体的速度场图像, 速度用 V 表示, 下标为对应的谱线, 此处仅展示了信号大于 2σ 的区域. 可以看到, 所有的分子探针均显示了相似的速度趋势. 该星系的西北部明显速度更大, 显示出红移的趋势, 而星系的东南部速度要更小, 显示出蓝移的趋势, 意味着CND存在显著的旋转运动. Imanishi等^[32]对NGC 1068中HCN (3-2)和HCO⁺ (3-2)的研究同样也显示了这种特征. CND上的两个速度成分被认为与E-knot和W-knot有关^[20]. 然而, CND与星系盘的动力学特征表现不同, 并非简单的沿东西方向的旋转运动.

为了方便比较星系盘上的速度场与CND上的速度场之间的差异, 图3展示了CO (1-0)在大尺度

星系盘上以及CND上的放大的速度场图像. CO (1-0)的速度场图像显示, 该星系盘的运动学特征表现为标准的旋转盘模型, 旋转方向为东西方向, 东部显示出蓝移, 西部显示出红移. 然而中心的CND在东部存在红移的速度成分, 西部存在蓝移的速度成分. 有关于NGC 1068的研究显示, CND的主轴方位角(Position Angle, PA) ($330^\circ \pm 10^\circ$)^[3], 和盘上的主轴方位角(278°)相比, CND的主轴发生了一定的倾斜. 此外, H α 辐射中也发现了类似的CND动力学主轴倾斜的现象^[37]. 单纯圆周运动的旋转盘模型并不能很好地解释这种红移与蓝移发射之间的空间重叠. Krips等^[38]利用速度位置图(P-V diagrams)的研究表明, NGC 1068中的CND上存在明显的非圆周运动. 这种非圆周运动的动力学特征很可能是由于激波或者喷流导致的分子外流造成的. García-Burillo等^[3]提出了一种模型, 他们认为该星系的CND上的动力学特征是在旋转盘上叠加分子外流导致的.

3.3 积分强度比值图

图4展示了致密分子气体探针(HCN和HCO⁺)与CO (1-0)的积分强度比值. 我们使用CASA的“immath”任务来制作分子线比图. 值得注意的是, 由于我们的不同分子探针所用的原始波束大小是不一样的, 因此在做比值图之前需要先将不同图像卷积到相同的波束大小上, 并进行重投影, 以保证两幅图的空间位置对齐, 像素大小相同. 此外, 还选取了大于 2σ 的信噪比阈值来确定比值的区域.

CO (1-0)通常用来示踪总分子气体的含量, 而HCN和HCO⁺示踪更加致密的分子气体. 因此HCN和HCO⁺相对于CO (1-0)的积分强度比值, 可以用来表示致密分子气体的含量占比(f_{dense})^[39]. Helfer等^[40]的研究显示, NGC 1068中心100 pc区域的分子气体的面密度与银河系中心200 pc区域内的面密度一致. 银河系中分子云的HCN (1-0)/CO (1-0)比值大约为 10^{-3} – 10^{-4} ^[41]. 此外, 在其他的正常星系和星暴星系中, HCN (1-0)/CO (1-0)的典型值为 ~ 0.03 – 0.08 ^[42]. 然而, 我们的结果显示, NGC 1068的HCN (1-0)/CO (1-0)比值要比典型值高约一个数量级(~ 0.1 – 0.8). Helfer^[43]利用BIMA (Ber-

keley-Illinois-Maryland Association)干涉阵观测得到的数据显示, HCN (1-0)/CO (1-0)的积分强度比值在NGC 1068中心200 pc的区域大约为0.6, 我们的结果与其相似. 该星系的HCN (1-0)/CO (1-0)比值和其他星系相比要高得多, 意味着NGC 1068星系中心存在极端物理环境. Bloemen^[44]的研究显示, 该星系中心的压强比局域星际介质中的压强大4个数量级. 辐射转移的计算表明, CND上的HCN (1-0)/CO (1-0)的丰度比为 $\sim 10^{-3}$, HCN (1-0)相对

于CO (1-0)的丰度表现出增强^[38, 45]. 由AGN产生的XDR会导致更高的HCN丰度^[20]. 也有一些研究认为, NGC 1068核心区中之所以会表现出不同寻常的较高HCN (1-0)/CO (1-0)比值, 是因为窄线区(Narrow Line Region, NLR)中的分子气体非常致密($> 10^5 \text{ cm}^{-3}$)^[18, 46]. 此外, Sternberg等^[45]认为, 较高的HCN (1-0)/CO (1-0)比值还可能是由于NGC 1068中核心区分子云中氧的选择性吸收, 导致CO丰度的减少, 进而导致HCN的丰度相对增强.

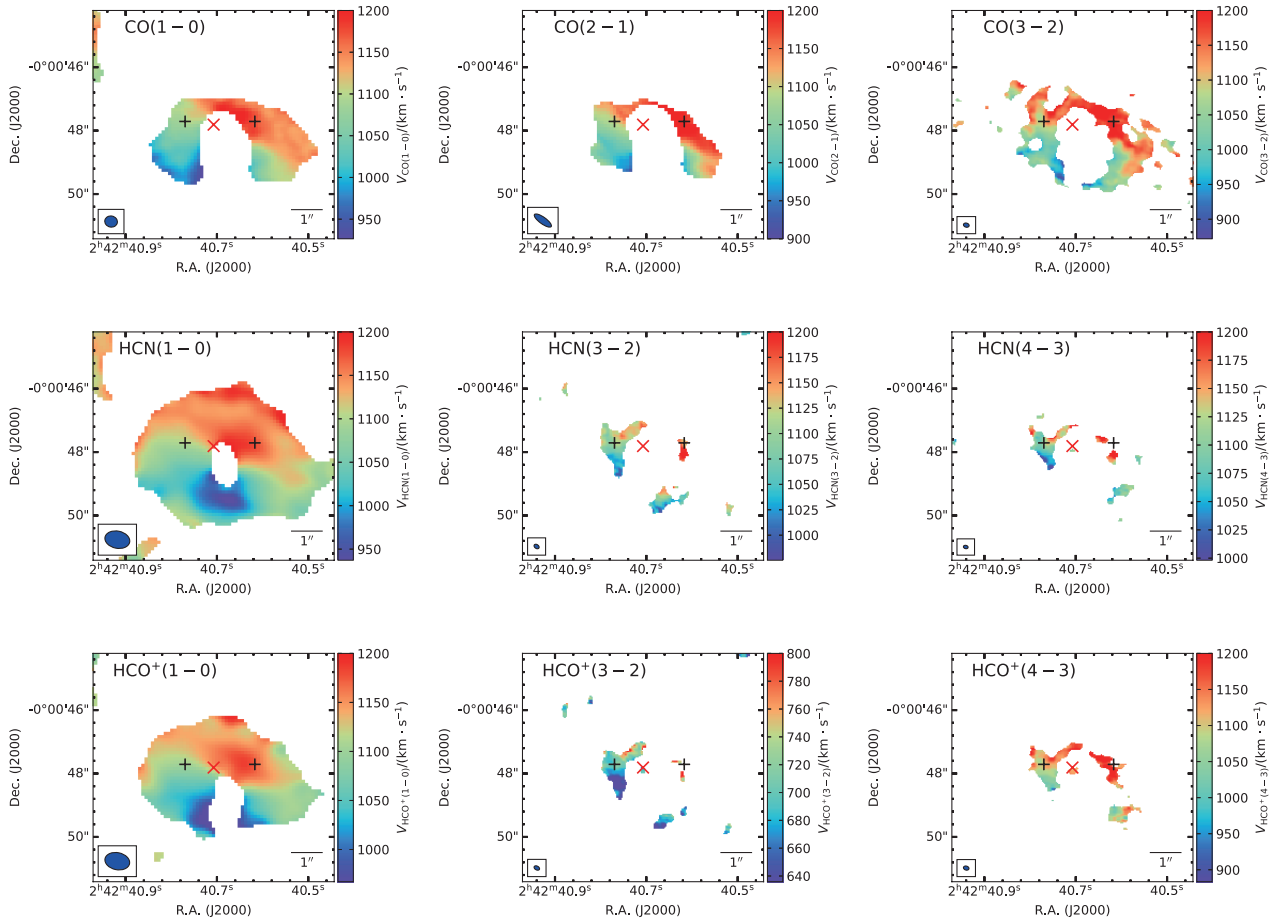


图2 NGC 1068中分子谱线的平均速度场图(moments 1). 颜色棒代表速度的大小(用 V 表示, 下标为对应的谱线), 单位为 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 其他符号代表图1中的含义.

Fig. 2 Mean-velocity fields (moments 1) derived from different molecular lines in NGC 1068. The color bars on the right side of each panel represent the velocity (expressed by V , the subscript is the corresponding spectral line) in units of $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. The other symbols are same as Fig. 1.

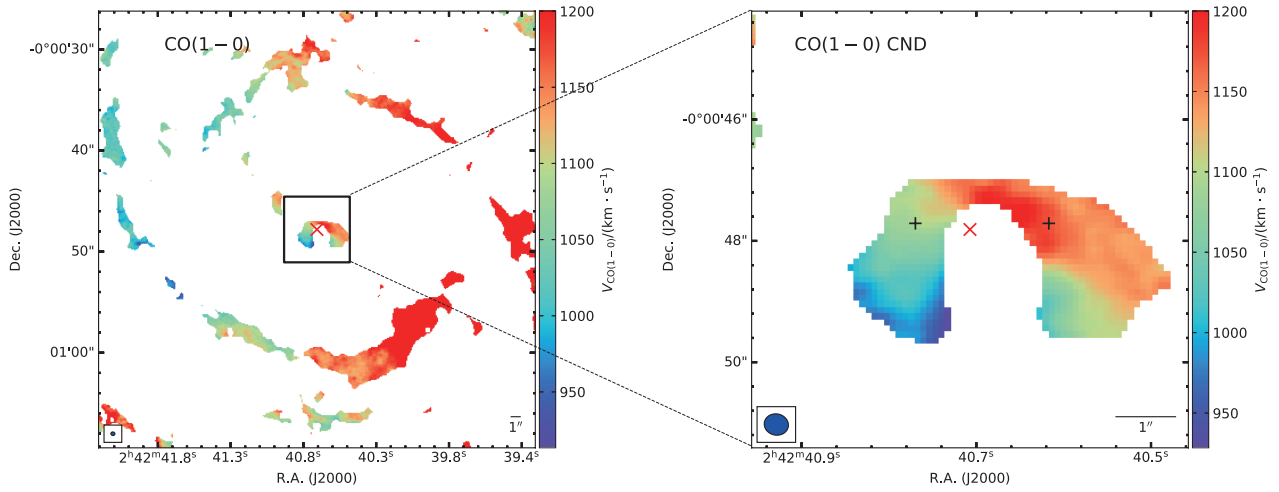


图 3 CO (1-0) 谱线的平均速度场图. 左图显示 CO (1-0) 在大尺度上星系盘的速度场, 右图显示放大的 CN D 区域的速度场.

Fig. 3 Mean-velocity fields derived from CO (1-0). The left panel shows the mean-velocity field in the disk, and the right panel shows the zoom-in area on the CN D.

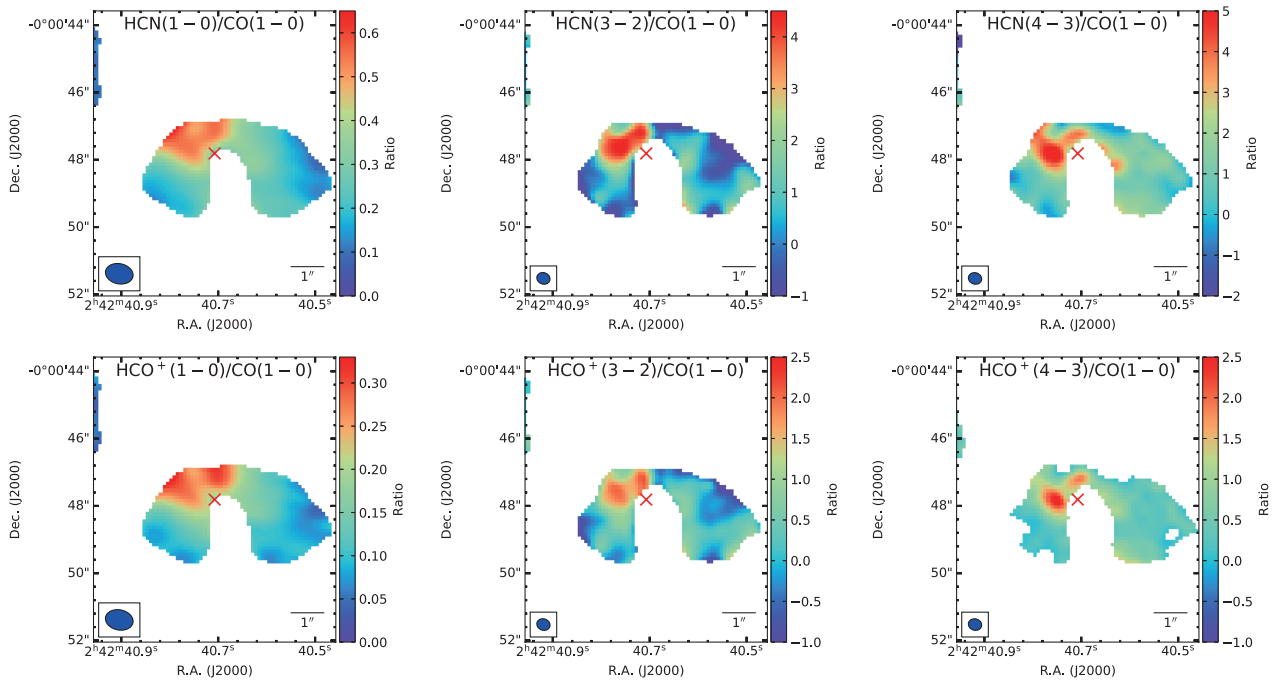


图 4 HCN 和 HCO^+ 的不同转动跃迁线与 CO (1-0) 的积分强度比值图 (代表致密分子气体含量占比). 颜色棒代表比值的大小. 卷积后的积分强度比值图的分辨率大小显示于左下角.

Fig. 4 The integrated intensity ratio maps of different transitions of HCN (or HCO^+)/CO (1-0), which represents the dense gas fraction. The color bars show the ratio values, and the beam sizes of the convolved ratio maps are shown in the lower-left corner.

除了HCN (1-0), HCN的其他转动跃迁线也均表现出了发射增强的现象. 我们发现, 在CND的东部, HCN和HCO⁺的不同跃迁线示踪的致密分子气体相比CO示踪的总分子气体都表现出明显更高的比值, 说明CND的东部的致密分子气体含量更多. 这些差异表明CND的东部和西部可能有着不同的物理环境.

我们还研究了HCN相对于HCO⁺的发射情况. 图5展示了致密分子气体的积分强度比值(用HCN/HCO⁺表示). 图5显示, 对CND的整体而言, HCN的辐射相对于HCO⁺有增强的迹象. 并且在CND的东

部, 这种增强要更明显一些. García-Burillo等^[3]的研究发现, 致密分子气体比值HCN (4-3)/HCO⁺ (4-3)在CND上的平均值为2.5, 我们的结果和这个比值接近(2.57 ± 0.33). 尽管CND上的HCN (4-3)/HCO⁺ (4-3)的比值较高, 但是HCN (4-3)/HCO⁺ (4-3)比值在AGN上的相对增强并不明显(1.4 ± 0.18). 陈玉东等^[47-48]在关于亮红外星系NGC 1614的研究中认为HCN的辐射在O型星的UV辐射影响下可能会增强, 从而导致较高的HCN/HCO⁺比值. 由此推测, NGC 1068中CND上的星暴活动也可能在一定程度上导致了HCN的辐射增强.

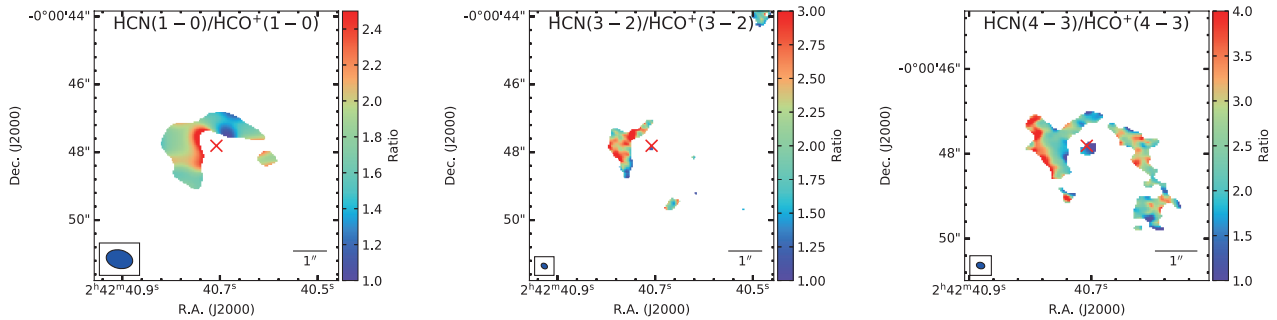


图5 致密分子气体的积分强度比值(HCN/HCO⁺). 左下角为卷积后的波束大小. 符号表示的含义与图4相同.

Fig. 5 The dense gas integrated intensity ratios (HCN/HCO⁺). The lower-left corner shows the convolved beam size. Symbols are same as Fig. 4.

图6展示了CO的不同跃迁线之间的积分强度比值. CO (3-2)示踪的气体比CO (1-0)示踪的气体更致密、温度更高, 因此CO (3-2)/CO (1-0)的强度比值常用来示踪分子气体的激发. 有研究表明, 星系尺度上的CO (3-2)/CO (1-0)的积分强度比值 $\sim 0.2-1.9$ ^[49]. 我们的结果显示, NGC 1068的CND上的CO (3-2)/CO (1-0)比值为(10.22 ± 1.53), 要比星系整体尺度的比值高1-2个量级. 另外, 与其星系盘相比, CND的CO (3-2)/CO (1-0)比值也要更高, 这表明CND上可能拥有更强的气体激发. 我们注意到, CO (3-2)/CO (1-0)的比值在CND上的变化跨度较大, 达到一个数量级. 尤其在CND的东部比值很大, 意味着该处极端的物理环境导致分子气体的激发增强. 这种变化可能与AGN的紫外或X射线辐射有关. Schinnerer等^[36]的研究发现CO

(2-1)/CO (1-0)在CND的W-knot上比值约为2.0, 我们的比值(3.44 ± 0.31)比其更高. 此外, CO (3-2)相对于CO (2-1)也表现出了发射增强的现象. 我们将在4.2节中讨论其光度比值在不同区域中平均值的变化.

4 讨论

4.1 核区分子气体的分布

不同物理环境往往与不同的物理过程有关, 例如大尺度的激波、分子气体的下落和外流、湍流、强辐射场等. NGC 1068中的CND为环状结构, 中心有一个空洞无气体的区域, 这可能是由于喷流与气体的相互作用导致的. 喷流会将大于100 pc尺度的气体吹出, 同时导致更小尺度的气体下落^[38]. 此外,

也有研究认为CND的环状结构可能是由星系盘上的星暴活动的反馈导致气体下落产生^[3]. CND的不对称结构说明分子气体在其东部和西部的分布不同. 我们发现, CO示踪的分子气体的分布, 相对于致密分子气体的分布来说, 要显得更为延展. HCN和HCO⁺的强发射说明CND上聚集有大量高密度的分子气体($> 10^5 \text{ cm}^{-3}$). 利用统计平衡的辐射转

移代码(radiative transfer code, RADEX)分析的研究显示, CND上有可能有化学上的差异^[22]. 他们的研究还显示CND上聚集着大量致密的高温分子气体, 平均密度 $> 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 平均温度 $> 150 \text{ K}$, 而西发射结的分子气体却较冷($T < 80 \text{ K}$). AGN和CND的W-knot位置的高温可能是由于X射线的加热导致的.

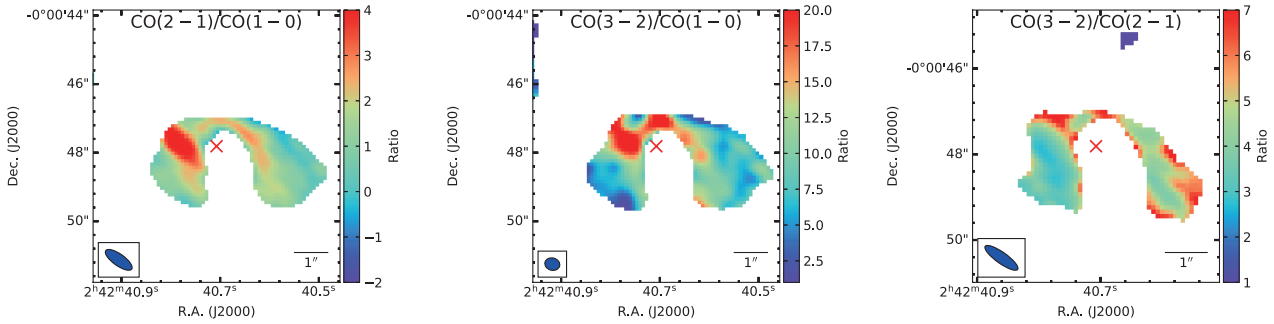


图 6 CO 的不同跃迁线之间的积分强度比值图. 左下角为卷积后的波束大小. 符号表示的含义与图 4 相同.

Fig. 6 The integrated intensity ratio maps of different transitions of CO. The lower-left corner shows the convolved beam size. Symbols are same as Fig. 4.

如在 3.2 节中提到的, CND 上的旋转盘很可能叠加了分子外流. AGN 的喷流与 CND 上的分子云作用, 可以产生激波^[50], 从而将分子气体吹出. SiO 分子辐射是激波的探针之一, Huang 等^[21]对于 NGC 1068 核区的研究发现 SiO 的辐射大部分集中在 CND 的东部, 意味着东部可能存在更强的激波活动. 尽管也有许多其他机制可以产生激波, 但是对于 NGC 1068, 相关研究显示 CND 上没有明显的星暴活动^[38], 因此 CND 上的激波不太可能由诸如超新星爆发、云碰撞等机制^[1, 51]形成. 有研究认为该星系 NLR 中的射电喷流不是驱动分子云上的外流的唯一机制^[52]. 同时 Murray 等^[53]的研究也表明, NGC 1068 中 CND 上的恒星活动不足以驱动分子外流. 此外, Tacconi 等^[18]的研究发现, 恒星成分的星系棒(stellar bar)会将气体拖拽到核区. 因此 NGC 1068 中的恒星成分的棒也会影响 CND 上分子气体的分布和动力学特征.

4.2 不同物理环境对分子线比的影响

分子线比可以用于限制分子气体的激发条件. 为了了解星系中心不同的激发条件(不同的气体温度和密度)对分子发射的影响, 我们探索了不同分子谱线的光度比值. 表 3 展示了 E-knot、W-knot、CND 整体和 AGN 上不同分子之间的光度比值, 光度由以下公式^[54]得到:

$$\begin{aligned} L'_{\text{dense}} / (\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{pc}^2) \\ = 3.25 \times 10^7 [S \Delta_{\nu} / (\text{Jy} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1})] \\ (\nu_{\text{obs}} / \text{GHz})^{-2} (D_L / \text{Mpc})^2 (1+z)^{-3}, \quad (1) \end{aligned}$$

其中 $S \Delta_{\nu}$ 是速度积分流量密度, ν_{obs} 是观测线频率, D_L 是光度距离. 我们参考 Viti 等人的工作^[22], 假设 band 3、band 6 和 band 7 的强度系统误差分别为 5%、10% 和 15%. 表 3 列出的不同谱线光度比值的不确定度及下一节中流量的不确定度均来源于测量误差.

表 3 不同分子谱线之间的光度比值
Table 3 The luminosity ratio between different molecular lines

Luminosity ratio	E-knot ^a	W-knot ^b	CND ^c	AGN ^d
HCN (1-0)/CO (1-0)	0.55 ± 0.06	0.35 ± 0.06	0.34 ± 0.07	0.13 ± 0.03
HCN (3-2)/CO (1-0)	2.25 ± 0.34	0.77 ± 0.26	0.55 ± 0.19	–
HCN (4-3)/CO (1-0)	2.25 ± 0.32	1.19 ± 0.42	0.89 ± 0.29	–
HCO ⁺ (1-0)/CO (1-0)	0.28 ± 0.02	0.18 ± 0.05	0.17 ± 0.05	0.22 ± 0.06
HCO ⁺ (3-2)/CO (1-0)	0.98 ± 0.15	0.29 ± 0.08	0.23 ± 0.05	–
HCO ⁺ (4-3)/CO (1-0)	0.85 ± 0.04	0.41 ± 0.10	0.35 ± 0.11	–
HCN (1-0)/HCO ⁺ (1-0)	2.05 ± 0.14	1.93 ± 0.21	1.83 ± 0.18	–
HCN (3-2)/HCO ⁺ (3-2)	2.52 ± 0.45	1.86 ± 0.34	2.31 ± 0.41	1.18 ± 0.21
HCN (4-3)/HCO ⁺ (4-3)	2.83 ± 0.37	2.76 ± 0.36	2.58 ± 0.33	1.40 ± 0.18
CO (2-1)/CO (1-0)	2.43 ± 0.24	1.25 ± 0.22	0.68 ± 0.21	–
CO (3-2)/CO (1-0)	10.32 ± 1.44	7.54 ± 1.13	5.90 ± 0.88	–
CO (3-2)/CO (2-1)	3.25 ± 0.22	3.92 ± 0.63	3.61 ± 0.57	–

^a The circle region centered on (02h42m40.771s, -00d00m47.8s), with a radius of 0.5".

^b The circle region centered on (02h42m40.630s, -00d00m47.84s), with a radius of 0.5".

^c The circle region centered on (02h42m40.711s, -00d00m47.81s), with a radius of 3".

^d The circle region centered on (02h42m40.710s, -00d00m47.9s), with a radius of 0.1".

表3显示不同的分子谱线发射光度比值在不同的物理环境中的存在变化, 变化范围为~ 1–4倍. 对于所有的分子线比, E-knot区域均显示出更高的比值. 在AGN位置处, HCN (3-2)相对于HCO⁺ (3-2)以及HCN (4-3)相对于HCO⁺ (4-3)也同样表现出了发射的增强(HCN (3-2)/HCO⁺ (3-2) ~ 1.18, HCN (4-3)/HCO⁺ (4-3) ~ 1.40), 然而这种增强的趋势相比于CND区域较弱. 我们推测除了AGN辐射的影响, CND上存在其他机制导致HCN相对发射增强. 相对于HCN和HCO⁺的低阶跃迁线的光度比, 其高阶跃迁线表现出相对较高的比值.

HCN相对于CO和HCO⁺的发射增强, 很可能与AGN辐射产生的高温环境或者X-ray的辐射/电离有关^[1, 55]. Krips等^[13]对HCN和HCO⁺的多跃迁线研究认为, AGN辐射会导致HCN丰度增强. 然而, 对高红移类星体Cloverleaf的研究没有发现HCN发

射增强的现象^{[10]:2}, 说明AGN并不是导致HCN增丰的唯一机制. 有研究表明, 星暴活动也可能导致HCN的发射增强^[14]. 此外, 关于M51的研究表明由红外抽运机制产生的HCN脉泽同样也会导致HCN相对于CO和HCO⁺的发射相对增强^[56].

4.3 不同环境下谱线流量的比较

图7展示了NGC 1068中CND区域的分子谱线, 并分别叠加了单个高斯的拟合结果. 9种分子探针示踪的分子谱线的线宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)约为166–334 km · s⁻¹. 这比星暴环上的分子谱线线宽(30–40 km · s⁻¹)更宽^[57]. 我们注意到, CND上CO (3-2)的流量最高, 比其他分子谱线的流量高一个数量级. 此外, 不同转动跃迁线都显示了HCN/HCO⁺的流量比大约为2, 这同样也表现了CND上HCN相对于HCO⁺的发射增强现象.

²报告发表在IRAM Newsletter: <https://www.iram-institute.org/medias/uploads/NewsletterAug2010.pdf>

干涉阵由于受限于最短基线, 通常会存在流量损失的问题. 由于ALMA探测到的HCN (4-3)和HCO⁺ (4-3)的发射绝大部分来自于CND区域, 因此我们将星系中心半径为3''的圆形区域当作HCN

(4-3)和HCO⁺ (4-3)的辐射区域, 并与一个JCMT波束大小(14'')内的流量, 即JCMT单镜望远镜的HCN (4-3)和HCO⁺ (4-3)的数据进行了比较(见图7).

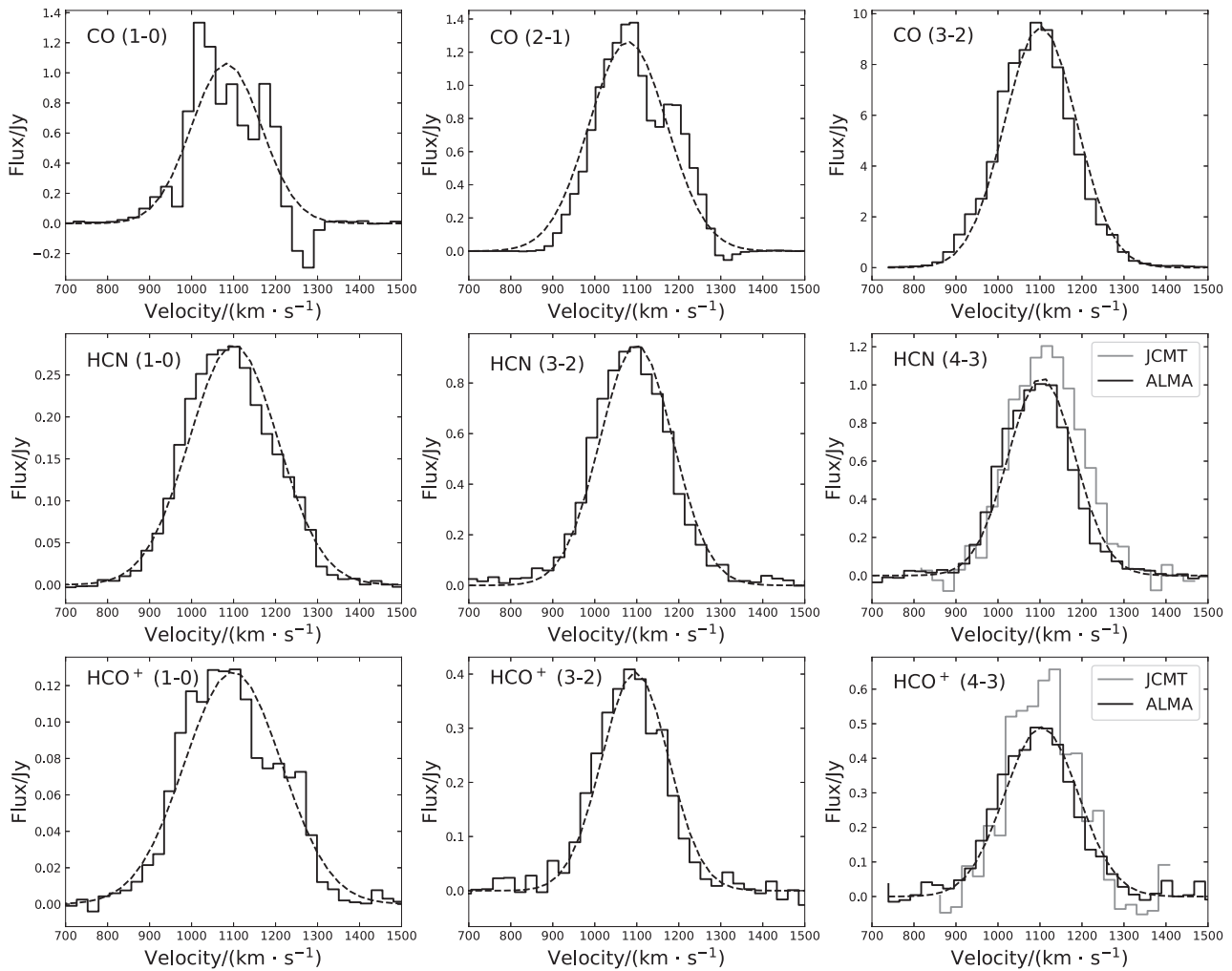


图 7 NGC 1068中CND上的分子谱线. 黑色实线表示提取自中心半径为3''的圆形区域的谱线. 黑色虚线为高斯拟合的结果. 灰色实线代表来自JCMT望远镜观测的谱线数据.

Fig. 7 The molecular spectra from the CND of NGC 1068. The black solid lines are spectra extracted from the central circle region with a radius of 3''. The black dotted lines represent the Gaussian fit spectra, and the grey solid lines represent the spectra from the JCMT telescope.

JCMT的HCN (4-3)和HCO⁺ (4-3)的数据来源于MALTANAG (项目代码: M16AL007)的观测. 对NGC 1068的观测分别于2015年和2016年进行, 在该观测中, 利用了HARP (Heterodyne Array Receiver Program)接收机阵列和ACSIS (Auto-Correlation Spectral Imaging System)的接收机后端, 并使用了抖动(Jiggle)观测模式, 对星系中心的2' × 2'的区域进行了大尺度的观测. 更加具体的数据观测介绍见Tan等^[10]2018年的工作.

我们利用转换公式 $S_\nu/Jy = 15.6 T_{mb}/K$ 将JCMT数据从主波束温度 T_{mb} 转换为流量 S_ν . 结果显示, ALMA探测到的流量大约为JCMT探测到的流量的80%–90%. 我们认为损失的流量(10%–20%)大部分来自于星暴环. García-Burillo等人的研究^[3]认为对于NGC 1068来说, 在大于6''的尺度上会有较明显的流量损失. 因此对于致密气体辐射, 在CND尺度上, 流量损失较小, 可以忽略. 但是在更外围的尺度上, 尤其是星暴环上, 会遭受严重的流量损失. 一项关于NGC 1068的研究估计了CO (3-2)在2 kpc的尺度上流量损失可以达到50%^[58]. 而另一项研究估算了ALMA的CO (3-2)观测只恢复了单镜流量的32%^[57]. 因此, 研究星暴环尺度上的分子气体有必要做短基线的流量校正. 我们在接下来的工作中正在尝试结合单镜数据和干涉阵数据, 恢复星系外围的延展结构, 以此来更好地研究星系的分子气体分布以及分子气体和恒星形成之间的联系.

为了研究CND的东部发射与西部发射的差异, 我们在图8展示了CND的子区域E-knot和W-knot的谱线图. 谱线图显示, 两个区域的谱线线心位置有明显的偏移, W-knot显示出红移的趋势, E-knot显示出蓝移的趋势. 此外, E-knot上的发射明显要比W-knot上的发射更强(流量比 $Flux_{E-knot}/Flux_{W-knot} \sim 1.8-3.9$), 其中CO (1-0)的东西发射结的流量比最小(1.8 ± 0.09), 说明CO (1-0)在CND上的分布最均匀. Usero等^[20]的研究认为两个发射结之间存在着化学上的差异, 我们这些流量比的差异支持他

们的观点.

图9展示了AGN上的谱线图(来自半径0.1''的圆区域). 值得注意的是, 对于HCN (1-0)和HCO⁺ (1-0), 其波束大小要比该区域大得多, 因此得到的采样并不可靠. 作为比较, 我们在图9中叠加了AGN位置处每个谱线的波束大小内的谱线. AGN上检测到的分子谱线的发射要比CND上更弱, 且FWHM相对CND上谱线的FWHM较小一些. AGN位置处两种区域大小内的谱线均显示, 一些频率较低的分子谱线CO (2-1)、CO (1-0)和HCO⁺ (1-0)中, 存在吸收的特征, 其中CO (2-1)探测到了强吸收线. 我们为了探讨吸收线产生的物理机制, 4.4节中讨论了不同波段的连续谱辐射.

4.4 连续谱与吸收

图10分别展示了2.6 mm、1.3 mm和0.8 mm的连续谱. 我们测量得到了辐射区域内连续谱辐射空间积分的流量水平, 2.6 mm: 31.4 mJy, 1.3 mm: 13.1 mJy, 0.8 mm: 12.8 mJy. 连续谱在AGN的位置处均表现出很强的辐射, 且长波段的连续谱辐射更为延展. 我们发现, 与正常星系典型的光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED)不同, 我们得到的2.6 mm连续谱的积分流量要比1.3 mm和0.8 mm的积分流量更高. 这个结果与Krips等^[59]于2006年的研究类似, 他们测量了NGC 1068星系AGN处的连续谱流量, 发现3 mm的连续谱流量水平比1 mm的连续谱流量水平更高. 此外, García-Burillo等^[60]在2019年的研究给出了NGC 1068星系中心的连续谱的SED拟合结果, 发现在AGN处, 1.3 mm的辐射要比0.8 mm和0.4 mm的辐射更强. 类似的情况也发生在NGC 3227星系的核区连续谱的SED^[5], 该星系中心与NGC 1068中心一样也存在AGN. NGC 1068由于AGN影响, 其核区并不是射电宁静的. Krips等^[38]2011年的SED拟合表明非热辐射在波长大于850 μm的连续谱会贡献更多成分. 因此我们认为是AGN位置处的非热辐射(如射电喷流的同步辐射)导致了毫米波较长波段辐射的增强.

对于1.3 mm连续谱辐射, 可明显看到从AGN处向北部延伸的结构, 该结构与喷流的方向相同^[61]. 利用22 GHz的射电连续谱研究表明, NGC 1068中心的喷流与分子云存在相互作用, 可以产生激波并压缩局域的气体和磁场, 使该处的气体表现出高温、高电离态^[62]. 我们发现, CND上各分子谱线比值最高的区域, 与AGN喷流方向与CND的相互作用区域一致, 所以CND的E-knot处极端的物理环境可能是由于喷流与CND上的分子气体相互作用造成的. García-Burillo等^[60]在NGC 1068的AGN

中的CO (2-1)谱线中发现了发射, 但同时也表现出强吸收的特征. 值得注意的是, 他们的数据比我们所使用的数据的分辨率和灵敏度更高, 因此谱线表现出的特征也不完全相同. 我们推测由于1.3 mm连续谱在AGN位置处的强辐射, 使相对较冷的前景气体吸收了特定频率的线, 导致CO (2-1)表现出了很强的吸收特征. CO (1-0)和HCO⁺ (1-0)谱线中表现出的吸收特征同样也与其对应的强连续谱辐射有关.

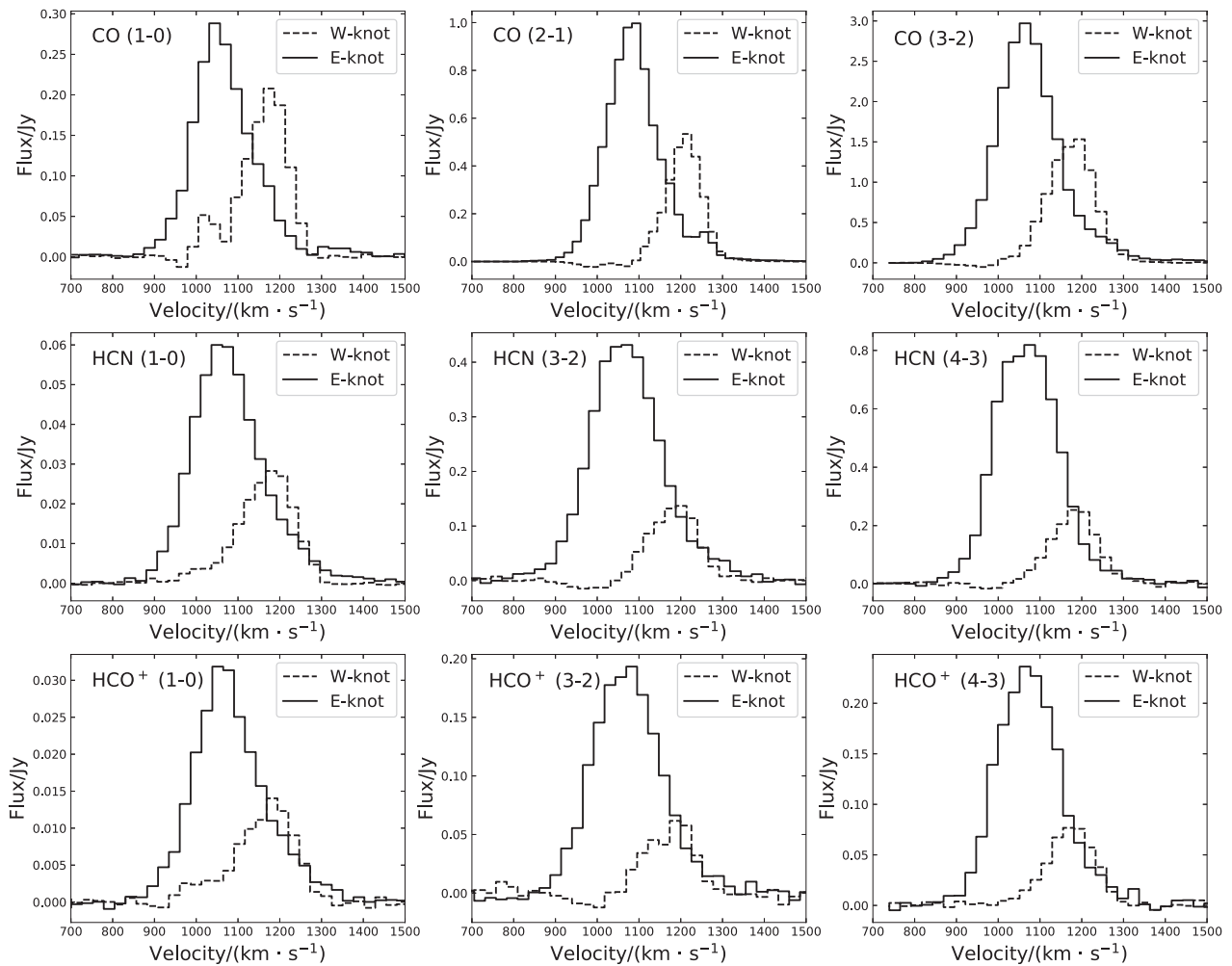


图 8 NGC 1068中的CND上子区域W-knot和E-knot的分子谱线. 谱线分别提取自以W-knot和E-knot为中心的半径为0.5''的圆形区域.

Fig. 8 The molecular spectra from the W-knot and E-knot sub-regions in the CND of NGC 1068. The spectra are extracted from the circle region centered on W-knot and E-knot, with a radius of 0.5''.

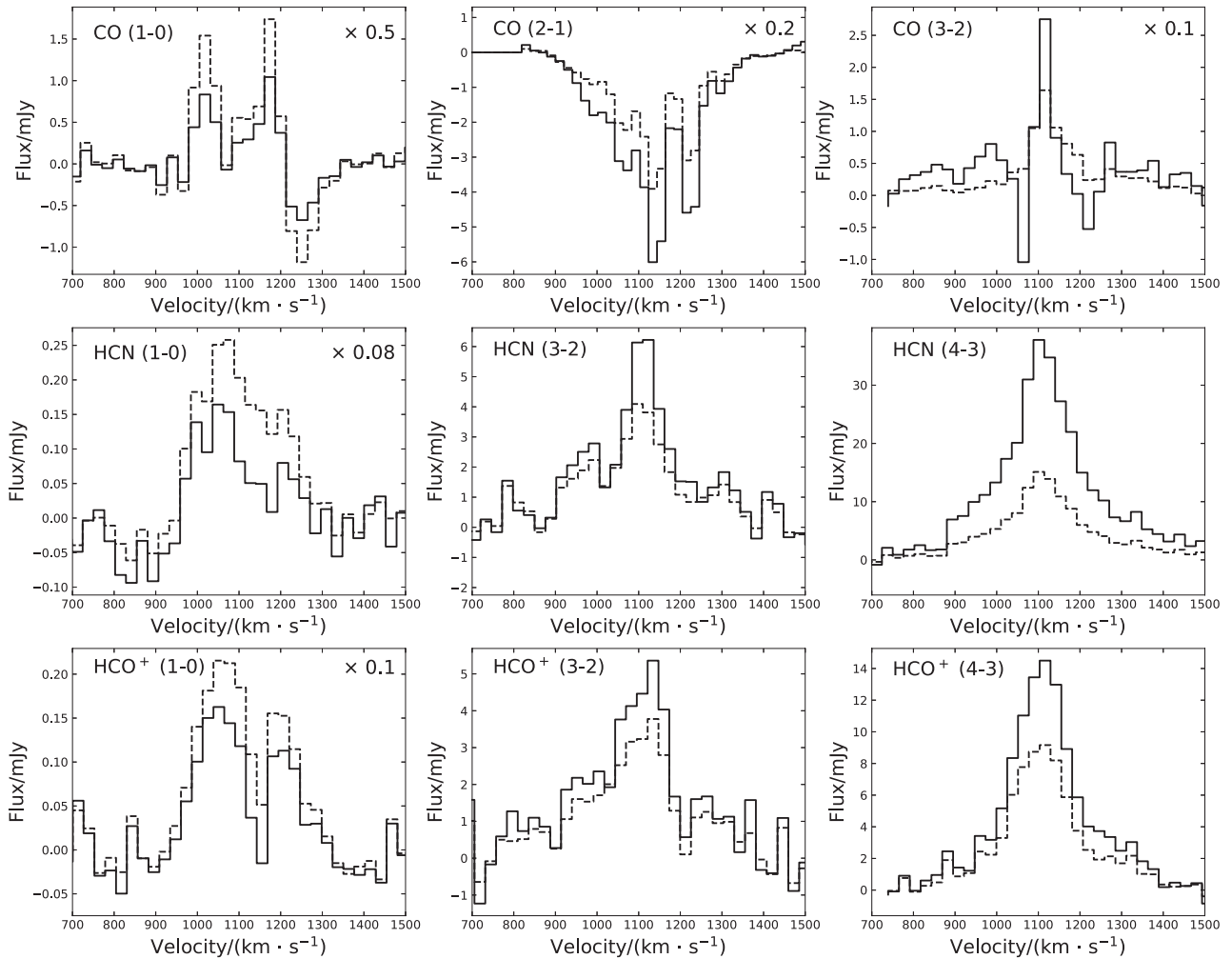


图9 NGC 1068中的AGN上的分子谱线. 黑色实线表示提取自半径为 $0.1''$ 的圆形区域的谱线, 黑色虚线表示提取自AGN位置处各谱线的波束大小区域的谱线. 为方便展示, 对于AGN位置处的一些谱线流量进行了缩小, 缩小因子见面板右上角.

Fig. 9 The molecular spectra from the AGN of NGC 1068. The black solid lines are spectra extracted from the circle region with a radius of $0.1''$. The black dotted lines are spectra extracted from the beam area of each spectrum in the AGN position. For the convenience of display, some spectral fluxes at AGN position have been scaled, and the scale factors are shown in the right-top corner.

另外, 这些谱线也可能包含自吸收现象. 研究表明, 喷流结构上的连续谱辐射属于非热同步辐射^[61, 63], 而同步辐射往往伴随着自吸收现象. 由于Krips等^[38]的研究表明波长 $\leq 850 \mu\text{m}$ 的连续谱由尘埃辐射主导, 因此这些谱线的自吸收不太可能由同步辐射的自吸收主导. 分子气体的下落会导致发射峰值的红移和蓝移, 使静止的外层气体发射在谱线中心产生自吸收坑^[64]. 此外, 开普勒形式

的旋转运动也可能产生类似的吸收现象^[65]. NGC 1068中围绕超大质量黑洞的旋转尘埃环^[66]可能产生类似的吸收现象, 但是该星系中核心区内部气体表现出的动力学特征并不是完全的圆周运动. 有证据表明, 气体很可能沿着喷流向中心产生下落^[67]. 因此这种下落也可能是AGN位置处谱线自吸收的产生机制之一. Imanishi等^[68]对NGC 1068核区的研究在 $\sim 260 \text{ GHz}$ 的连续谱辐射峰值位置处, 检测到

了HCN (3-2)的吸收, 并提出了一种核心区中心尘埃环的旋转盘叠加外流的模型. 分子外流会导致谱线

产生蓝移的吸收尾, 然而在我们的谱线中没有观测到这种由于外流导致的不对称结构.

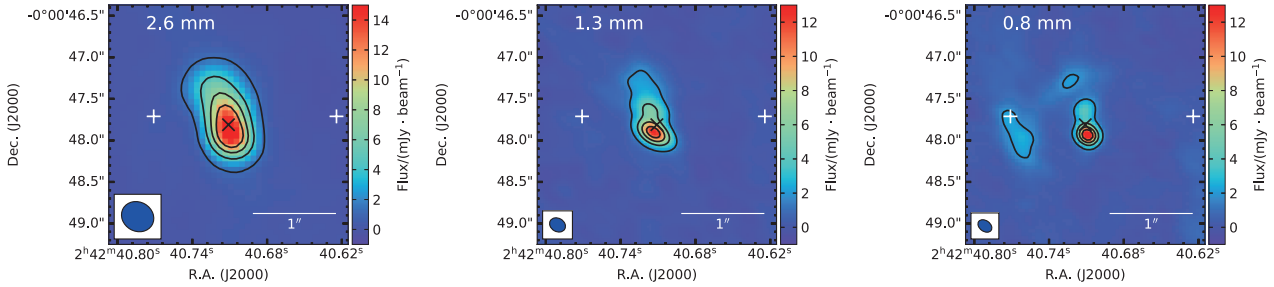


图 10 NGC 1068核心区中不同波段的连续谱. 颜色棒代表积分强度的大小, 单位为 $\text{Jy} \cdot \text{beam}^{-1}$. 黑色叉代表AGN的位置, 两个白色十字分别代表E-knot和W-knot. 波束大小显示在每幅子图的左下角. 等值线水平为, 2.6 mm: 8σ – 68σ , 间隔 20σ , 其中 $1\sigma = 1.6 \times 10^{-4} \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1}$; 1.3 mm: 15σ – 90σ , 间隔 25σ , 其中 $1\sigma = 1.2 \times 10^{-4} \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1}$; 0.8 mm: 13σ – 73σ , 间隔 20σ , 其中 $1\sigma = 1.5 \times 10^{-4} \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1}$.

Fig. 10 The continuum from different wave bands in the nuclear region of NGC 1068. The color bars represent the integrated intensities, in units of $\text{Jy} \cdot \text{beam}^{-1}$. The black cross shows the position of the AGN, and the white crosses represent the positions of the E-knot and W-knot, respectively. The lower-left corner shows the beam size. The contour levels are as follow, 2.6 mm: 8σ – 68σ , in steps of 20σ , where $1\sigma = 1.6 \times 10^{-4} \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1}$; 1.3 mm: 15σ – 90σ , in steps of 25σ , where $1\sigma = 1.2 \times 10^{-4} \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1}$; 0.8 mm: 13σ – 73σ , in steps of 20σ , where $1\sigma = 1.5 \times 10^{-4} \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1}$.

5 结论

利用ALMA的高分辨率多谱线数据, 我们对NGC 1068核心区中的物理性质进行了讨论. 通过分子线比, 探索了不同物理环境对分子激发的影响, 讨论了AGN反馈和恒星形成活动与分子气体之间可能的关联. 我们的主要结论如下:

(1)高分辨率的ALMA谱线图像清晰地解析了NGC 1068中心核区的结构. 星系中心的AGN被CND包围, CND呈现为不对称的环状结构. 各谱线的积分强度图均显示CND上的东部发射要比西部的发射更强, 北部的发射比南部强. 这种不对称的结构可能是由于喷流与气体的相互作用导致的;

(2)速度场显示CND上存在两个速度成分, E-knot表现出蓝移的趋势, 而W-knot表现出红移的趋势. 并且CND上气体的旋转方向的主轴与星系盘上旋转方向的主轴有一定的倾斜, 这可能是由于CND上大尺度的分子外流造成的;

(3)不同分子谱线及不同的转动跃迁线之间的积分强度比值显示, E-knot的比值要比W-knot和AGN位置的比值更高. 并且E-knot和W-knot的流量比为1.8–3.9, 意味着CND的东西两个区域可能

存在着一定的物理和化学差异;

(4)通过与单望远镜JCMT的流量比较, ALMA探测到的HCN (4-3)和 HCO^+ (4-3)流量大约比JCMT的流量少10%–20%. 这些流量损失主要来自于星暴环, 我们认为在CND尺度上流量损失可以忽略;

(5)分子谱线显示, CND上的谱线线宽相比于星暴环上的谱线线宽要更大. AGN位置处探测到了CO (2-1)的强吸收线, 且CO (1-0)和 HCO^+ (1-0)在AGN处也表现出吸收的特征. 结合连续谱数据的分析, 这些较低频率谱线的吸收主要是由于背景长波的强连续谱辐射导致. 此外, AGN附近的气体下落也可能产生谱线的自吸收现象;

(6)在AGN位置处的1.3 mm波段连续谱显示出明显的喷流结构. 喷流与CND上的分子气体的作用可能导致了E-knot处极端的物理环境, 分子气体激发增强, 使E-knot处表现出极高的致密分子气体含量占比、致密分子气体的积分强度比值(HCN/HCO^+)和CO不同跃迁线间的积分强度比值.

致谢 感谢ALMA数据档案中心提供的数据. 该工作使用了来自以下ALMA项目的数据: #2013.1.00

055.S, #2013.1.00188.S, #2013.1.00014.S, #2013.1.01307.S, #2013.1.00111.S, #2018.1.01684.S. 感谢陈玉东对数据处理提供的帮助. 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 帮助改善了文章质量.

参考文献

- [1] García-Burillo S, Usero A, Fuente A, et al. *A&A*, 2010, 519: A2
- [2] Hollenbach D J, Tielens A G G M. *RvMP*, 1999, 71: 173
- [3] García-Burillo S, Combes F, Usero A, et al. *A&A*, 2014, 567: A125
- [4] Aalto S, Garcia-Burillo S, Muller S, et al. *A&A*, 2012, 537: A44
- [5] Alonso-Herrero A, García-Burillo S, Pereira-Santaella M, et al. *A&A*, 2019, 628: A65
- [6] Murthy S, Morganti R, Wagner A Y, et al. *NatAs*, 2022, 6: 488
- [7] Gao Y, Solomon P M. *ApJS*, 2004, 152: 63
- [8] Gao Y, Solomon P M. *ApJ*, 2004, 606: 271
- [9] Evans II N J, Heiderman A, Vutisalchavakul N. *ApJ*, 2014, 782: 114
- [10] Tan Q H, Gao Y, Zhang Z Y, et al. *ApJ*, 2018, 860: 165
- [11] Izumi T, Kohno K, Aalto S, et al. *ApJ*, 2016, 818: 42
- [12] Imanishi M, Nakanishi K, Tamura Y, et al. *AJ*, 2007, 134: 2366
- [13] Krips M, Neri R, García-Burillo S, et al. *ApJ*, 2008, 677: 262
- [14] Privon G C, Herrero-Illana R, Evans A S, et al. *ApJ*, 2015, 814: 39
- [15] Imanishi M, Nakanishi K, Izumi T. *ApJS*, 2019, 241: 19
- [16] Li F, Wang J Z, Gao F, et al. *MNRAS*, 2021, 503: 4508
- [17] Mauersberger R, Henkel C, Walsh W, et al. *A&A*, 1999, 341: 256
- [18] Tacconi L J, Genzel R, Blitz L, et al. *ApJ*, 1994, 426: L77
- [19] Gámez-Rosas V, Isbell J W, Jaffe W, et al. *Nature*, 2022, 602: 403
- [20] Usero A, García-Burillo S, Fuente A, et al. *A&A*, 2004, 419: 897
- [21] Huang K Y, Viti S, Holdship J, et al. *A&A*, 2022, 666: A102
- [22] Viti S, García-Burillo S, Fuente A, et al. *A&A*, 2014, 570: A28
- [23] Saito T, Takano S, Harada N, et al. *ApJ*, 2022, 927: L32
- [24] Sánchez-García M, García-Burillo S, Pereira-Santaella M, et al. *A&A*, 2022, 660: A83
- [25] Capetti A, Macchetto F D, Lattanzi M G. *ApJ*, 1997, 476: L67
- [26] Gallimore J F, Baum S A, O'Dea C P, et al. *ApJ*, 1996, 458: 136
- [27] Huchra J P, Vogeley M S, Geller M J. *ApJS*, 1999, 121: 287
- [28] Bland-Hawthorn J, Gallimore J F, Tacconi L J, et al. *Ap&SS*, 1997, 248: 9
- [29] Osterbrock D E, Martel A. *ApJ*, 1993, 414: 552
- [30] Allison J R, Sadler E M, Meekin A M. *MNRAS*, 2014, 440: 696
- [31] García-Burillo S, Combes F, Almeida C R, et al. *ApJ*, 2016, 823: L12
- [32] Imanishi M, Nakanishi K, Izumi T. *ApJ*, 2016, 822: L10
- [33] Gallimore J F, Elitzur M, Maiolino R, et al. *ApJ*, 2016, 829: L7
- [34] Scoville N, Sheth K, Aussel H, et al. *ApJ*, 2016, 820: 83
- [35] Shirley Y L. *PASP*, 2015, 127: 299
- [36] Schinnerer E, Eckart A, Tacconi L J, et al. *ApJ*, 2000, 533: 850
- [37] Dehnen W, Bland-Hawthorn J, Quirrenbach A, et al. *Ap&SS*, 1997, 248: 33
- [38] Krips M, Martín S, Eckart A, et al. *ApJ*, 2011, 736: 37
- [39] Usero A, Leroy A K, Walter F, et al. *AJ*, 2015, 150: 115
- [40] Helfer T T, Blitz L. *ApJ*, 1995, 450: 90
- [41] Blake G A, Sutton E C, Masson C R, et al. *ApJ*, 1987, 315: 621
- [42] Helfer T T, Blitz L. *ApJ*, 1993, 419: 86
- [43] Helfer T T. *BIMA Observations of Molecular Gas in NGC 1068*//Latter W B, Radford S J E, Jewell P R, et al. *CO: Twenty-Five Years of Millimeter-Wave Spectroscopy*. Dordrecht: Springer, 1997: 324
- [44] Bloemen J B G M. *ApJ*, 1987, 322: 694
- [45] Sternberg A, Genzel R, Tacconi L. *ApJ*, 1994, 436: L131
- [46] Jackson J M, Paglione T A D, Ishizuki S, et al. *ApJ*, 1993, 418: L13
- [47] 陈玉东, 高煜, 谈清华. *天文学报*, 2021, 62: 68
- [48] Chen Y D, Gao Y, Tan Q H. *ChA&A*, 2022, 46: 330
- [49] Mao R Q, Schulz A, Henkel C, et al. *ApJ*, 2010, 724: 1336
- [50] Kraemer S B, Ruiz J R, Crenshaw D M. *ApJ*, 1998, 508: 232
- [51] Sakamoto K, Ho P T P, Peck A B. *ApJ*, 2006, 644: 862
- [52] Das V, Crenshaw D M, Kraemer S B, et al. *AJ*, 2006, 132: 620
- [53] Murray N, Quataert E, Thompson T A. *ApJ*, 2005, 618: 569
- [54] Solomon P M, Downes D, Radford S J E, et al. *ApJ*, 1997, 478: 144
- [55] Izumi T, Kohno K, Martín S, et al. *PASJ*, 2013, 65: 100
- [56] Matsushita S, Trung D V, Boone F, et al. *ApJ*, 2015, 799: 26
- [57] Nakajima T, Takano S, Kohno K, et al. *PASJ*, 2015, 67: 8

- [58] Tsai M, Hwang C Y, Matsushita S, et al. *ApJ*, 2012, 746: 129
- [59] Krips M, Eckart A, Neri R, et al. *A&A*, 2006, 446: 113
- [60] García-Burillo S, Combes F, Almeida C R, et al. *A&A*, 2019, 632: A61
- [61] Gallimore J F, Baum S A, O’dea C P. *ApJ*, 2004, 613: 794
- [62] Gallimore J F, Henkel C, Baum S A, et al. *ApJ*, 2001, 556: 694
- [63] Cotton W D, Jaffe W, Perrin G, et al. *A&A*, 2008, 477: 517
- [64] Evans II N J. *ARA&A*, 1999, 37: 311
- [65] Menten K M, Serabyn E, Guesten R, et al. *A&A*, 1987, 177: L57
- [66] Miller J S, Antonucci R R J. *ApJ*, 1983, 271: L7
- [67] Müller Sánchez F, Davies R I, Genzel R, et al. *ApJ*, 2009, 691: 749
- [68] Imanishi M, Nguyen D D, Wada K, et al. *ApJ*, 2020, 902: 99

Physical Properties of the Nuclear Region of NGC 1068 Based on ALMA High-resolution Multi-spectral Lines

LIN Shu-ting^{1,2} GAO Yu^{3,1} TAN Qing-hua¹

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(3 Department of Astronomy, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005)

ABSTRACT Using the multi-spectral lines from ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) with high-resolution ($\sim 0.2''\text{--}0.7''$) and the continuum data, this work studies the physical properties of the nuclear region of nearby galaxy NGC 1068. The spectral lines include CO (1-0), CO (2-1), CO (3-2), HCN (1-0), HCO⁺ (1-0), HCN (3-2), HCO⁺ (3-2), HCN (4-3) and HCO⁺ (4-3). The CNB (CircumNuclear Disk) shows an asymmetric ring structure with a size of ~ 300 pc in the velocity-integrated intensity images. All the molecular lines of the CNB show stronger emission at the eastern knot (E-knot) than the western knot (W-knot) of the CNB. Furthermore, the E-knot shows larger velocities than the W-knot, which indicates that there is significant rotational pattern in the CNB. The dense gas fraction (traced by the different transitions of HCN or HCO⁺ to CO (1-0) integrated intensity ratios) and dense gas ratio (HCN/HCO⁺) are higher at the E-knot, implying that the E- and W-knots have different physical environments or chemical compositions. The HCN emission in the CNB show enhancement compared with HCO⁺, which could be affected by the AGN (Active Galactic Nucleus) radiation and starburst activity. The CO (3-2)/CO (1-0) integrated intensity ratio is a significant indicator of gas excitation. CO (3-2)/CO (1-0) ratios show much higher values at the E-knot, suggesting that there is molecular excitation enhancement caused by the extreme physical environment. Compared with the fluxes of HCN (4-3) and HCO⁺ (4-3) from the single-dish telescope JCMT (James Clerk Maxwell Telescope), the ALMA missing fluxes of dense molecular gas on 1 kpc scale are about 10%–20%. The spectral lines show that the flux ratios between E-knot and W-knot are $\sim 1.8\text{--}3.9$. These differences shown between E-knot and W-knot may be associated with the AGN feedback. In addition, the CO (2-1), CO (1-0) and HCO⁺ (1-0) spectra show absorption features in the position of AGN. This absorption could be caused by the strong background of continuum emissions, and the gas inflow around the AGN can produce self-absorption in spectra.

Key words stars: formation, submillimeter: ISM, galaxies: starburst, radio lines: galaxies, galaxies: individual: NGC 1068