doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2021.06.010

亮红外星系NGC 1614中多谱线示踪的 致密分子气体*

陈玉东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 利用高空间分辨率的¹²CO(1-0)、¹³CO(1-0)、¹²CO(3-2)、¹²CO(6-5)、HCN(3-2)、 HCN(4-3)、HCO⁺(3-2)和HCO⁺(4-3)分子谱线的ALMA (Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array)归档数据,来研究近邻亮红外星系NGC 1614的分子气体性质,尤其 是致密分子气体的性质.在高分辨率分子气体谱线的积分强度图中,在星系中心区域(< 1 kpc)可以看到环状结构,分子气体主要分布于星系中心区域,核区分子气体含量较少. ¹²CO(1-0)显示出向南部、北部以及东南部的延展结构,高阶的CO ($J \ge 3$, J为转振能 级量子数)分子谱线和致密分子HCN、HCO⁺谱线显示,较致密的分子气体主要集中于 星系中心区域.HCN(4-3)/¹²CO(1-0)和HCN⁺(4-3)/¹²CO(1-0)积分强度比值图显示,致 密分子气体主要集中于中心区域的环状结构上.HCN/HCO⁺强度比值的分布变化表明 星暴环的不同区域可能具有不同的激发条件.HCN/HCO⁺(4-3)强度比值分布在环的东、 西部(~0.44 ± 0.04)高于环的南、北部(~0.35 ± 0.03).HCN/HCO⁺(3-2)强度比值权高 的区域(~0.38 ± 0.04)分布在HCN(3-2)峰值位置,而环的西北、东南部强度比值相对较 低(~0.3 ± 0.03).对于中心不同区域HCN/HCO⁺比值变化的原因进行了讨论.

关键词 星系: 星暴, 射电谱线: 星系, 射电谱线: 比值, 星系: 个别: NGC 1614 中图分类号: P157; 文献标识码: A

1 引言

在近邻宇宙中,像(极)亮红外星系((U)LIRG)这类有着极强红外辐射($L_{\rm IR}$ (8–1000 µm) $\geq 10^{11}L_{\odot}$)的星系并不多见,其中 $L_{\rm IR}$ 为星系(8–1000 µm)红外波段辐射的总光度, L_{\odot} 为太阳光度.在这些星系中,有着强烈的恒星形成活动,且通常与星系的合并活动密切相关^[1–2].在并合过程中,气体丢失角动量流入星系中心,触发星暴活动,同时触发中心黑洞核活动,对星系的演化起着重要作用.星系红外光度函数研究发现LIRG和ULIRG

[†]chenyd@pmo.ac.cn

²⁰²¹⁻⁰⁵⁻⁰⁶收到原稿, 2021-06-09收到修改稿

^{*}国家自然科学基金项目(11803090、11861131007、12033004、11520101002),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

的数密度随红移演化,在高红移z > 1处对红外背景辐射的贡献可能占主导^[3–4].因此,对 邻近宇宙LIRG高角分辨率的研究能够实现对极端SF (Star Formation)环境的独特描述, 也能对高红移星系SFR (Star Formation Rate)的研究提供重要参考^[5].

通常, 星系中的活动可以总结为两大类, 一是高度活跃的恒星形成活动, 也称为星暴活动(Star Burst, SB), 另一类就是星系中心超大质量黑洞吸积气体触发核活动(即活动 星系核, AGN)释放巨大能量.显然, 分子气体在这些活动过程中不仅起着提供燃料的作 用, 而且还受到这些活动的强烈影响. 受这些星系活动的类型、强烈程度和演化阶段的 影响, 分子气体的激发条件和化学丰度的变化可能涉及不同的物理过程, 比如说强紫外 线(UV)或者X射线辐射场的作用亦或者运动学过程, 例如星系相互作用、大尺度激波、 气体流出或流入.因此研究星系分子气体的组成和特征, 对于理解星系的恒星形成, 星系 活动演变以及AGN和SB活动之间可能存在的物理关联也至关重要.

然而,由于这些星系中心核区的活动,其紫外和光学等波段的辐射通常被尘埃遮蔽,而毫米波和亚毫米波波段的观测,则对于研究星系中心核活动提供了有力的工具. ¹²CO(1-0)和¹³CO(1-0)分子谱线常被用来示踪星系分子气体的空间分布,以及运动学特征^[6-7],而具有高偶极矩、高临界密度的HCN、HCO+致密分子谱线,可以示踪致密分子气体^[8-11].以往的观测研究表明,致密分子气体的空间分布与低密度分子气体的分布有明显不同,致密分子气体主要集中于星系中心区域^[6, 8, 12-14].在这些并合的LIRG中,存在着丰富的致密($n(H_2) > 10^4$ cm⁻³,其中 $n(H_2)$ 为H₂分子气体体密度)分子气体,而恒星往往形成于这些致密分子气体中^[8-9, 15].单镜和毫米/亚毫米波干涉阵的观测发现,在(U)LIRG星系中,示踪温暖致密气体的CO高阶($J \ge 3$, J为转振能级量子数)跃迁线辐射和恒星形成的强度和空间分布密切相关^[6, 13, 16-18].同样,具有高偶极矩的分子,例如HCN、HCO+和HNC,不仅可以有效地示踪高密度分子气体,也和恒星形成活动密切相关^[8, 12].但是这些致密分子谱线由于丰度较低,因此相比于CO分子谱线要暗得多.

由于AGN和SB产生的辐射场的差异, AGN周围分子气体的激发条件和化学环境与SB环境下的明显不同. 已有的文献研究表明, ¹²CO/¹³CO、HCN/HCO⁺、HCN/CO等谱线强度比值, 可以分析隐藏在富尘埃星系中心核区域内的星暴和AGN中涉及的物理和化学过程^[7-8, 10-12, 19-23].

为了探讨分子气体,尤其是致密分子气体、恒星形成以及AGN活动之间的关系,研究分子气体激发条件是很有必要的.在富尘埃环境里形成H₂后,由于尘埃-气体碰撞或者引力收缩,分子气体可以被宇宙线加热(将H₂电离).在高密度环境里,相比于通过宇宙线或者分子氢形成加热,气体尘埃碰撞是占优势地位的.除此以外,激波、恒星形成活动的不同演化阶段(对于星暴而言尤为重要)、被UV/X射线加热的尘埃通过红外辐射抽运泵 浦作用对气体的非碰撞激发^[24]和超新星爆发(SNe)^[25-26],这些因素同样对谱线流量比值的变化有着重要的影响.

得益于ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)的高分辨率和高 灵敏度观测数据,使我们可以详细研究近邻星系中致密分子气体和总气体的空间分布和 物理性质以及分子谱线强度比值的空间分布和气体物理环境的变化.

NGC 1614是一个近邻的、有着并合迹象的LIRG (红外光度 $L_{IR} = 10^{11.65}L_{\odot}$ 、光度距离67.8 Mpc、物理尺度为1″ = 329 pc^[27]). 图1展示了星系NGC 1614 HST (Hubble

Space Telescope) F606W WFPC2 (Wide Field Planetary Camera II)的光学图像,并叠加了这个星系¹²CO(1-0)谱线的等值线. Väisänen等^[28]通过数值模拟发现NGC 1614是由两个富含气体的星系并合而成,这两个并合星系的质量比大概是3:1-5:1,并且在光学图像上可以看到明显的并合特征—潮汐尾. 此外,在分子气体多种示踪分子图像上,都分辨出了恒星形成环的存在,比如Paa^[29]、射电连续谱^[30]、PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)^[28]、¹²CO(2-1)^[31]和¹²CO(6-5)^[32]. 对于星暴环的形成,目前有两种竞争性的假设:其中一个是,Alonso-Herrero等^[29]提出的"wildfire"假设,即星暴环是由中心核的星暴活动向外扩展(propagating)形成的;另一个是,星暴环是在"Lindblad"共振的位置处形成的,由穿越星暴环北部的尘埃带提供气体作为燃料,为环中恒星形成活动提供动力^[30].



图 1 NGC 1614 HST F606W WFPC2光学图像(http://hla.stsci.edu/). 图中向上指向北,向左指向东,横坐标是 赤经(RA), 纵坐标是赤纬(Dec). 等值线是¹²CO(1-0)积分强度值,分别是5 σ 、10 σ 、15 σ 、20 σ 、25 σ , 1 σ = 0.219 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹. 在星系中心区域的北部有一个尘埃带穿过星系.

Fig. 1 The HST F606W WFPC2 optical image (http://hla.stsci.edu/) of the NGC 1614. The orientation is north up, east to the left and the abscissa is right ascension (RA), the ordinate is declination (Dec). Contour: ¹²CO(1-0) integrated intensity emission line, levels are $5\sigma - 25\sigma$, with steps of 5σ ,

 $1\sigma = 0.219 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, there is a dust lane crossing the galaxy just north of the central region of galaxy.

Olsson等^[30]的研究表明在环上存在较年轻的星暴活动(5–10 Myr),而星系中心的星暴活动则较年老(> 10 Myr).NGC 1614整体的恒星形成率(SFR_{tot})约为51.3 M_{\odot} ·yr^{-1[33]},星暴环为32.8 M_{\odot} ·yr^{-1[32]}.在Imanishi等人在2013年的工作中发现^[34],致密分子HCN、HCO⁺和HNC的J = 4-3谱线流量比值符合星暴星系的标准,从而可以推断在星系中心AGN活动的迹象可能较弱;这一结论也与ALMA 435 µm连续谱图像^[32]中的分析结果一致.另外,García-Burillo等^[35]发现NGC 1614有大质量的分子外流(3 × 10⁷ M_{\odot} ; $\dot{M}_{out} \sim 40 \ M_{\odot}$ ·yr⁻¹,其中 M_{\odot} 为太阳质量, \dot{M}_{out} 为分子气体质量外流速率)并且是由星暴环中恒星形成活动提供动力.表1列举了NGC 1614的基本物理性质,其中 $D_{\rm L}$ 为光度距

离, r_{in}为星暴环内半径, r_{out}为星暴环外半径.

NGC 1614是一个有着明显并合特征的近邻亮红外星系,有着丰富的观测数据资源, 尤其是ALMA高空间分辨率的观测数据.借助这些数据,可以深入了解这个星系中气体 的分布,利用谱线强度比了解气体的激发环境,能够对高红移亮红外星系的研究提供参 考.第2节介绍使用的数据及分析方法.第3节介绍了主要的结果.第4节分析讨论星系中 心区域HCN/HCO⁺比值的变化.最后,在第5节给出研究的结论.

表 1 星系NGC 1614基本物理性质							
Table 1 The basic physical properties of NGC 1614							
Object	RA	Dec	Podebift	$D_{\rm L}$	$\lg(L_{\rm IR})$	$\mathrm{SFR}_\mathrm{tot}$	Ring radius
	(J2000)	(J2000)	neusiint	$/\mathrm{Mpc}$	$/L_{\odot})$	$/(M_\odot \cdot { m yr}^{-1})$	$/\mathrm{pc}$
NGC 1614	$04^{\rm h}33^{\rm m}59^{\rm s}.854$	$-08^{\circ}34'43.98''$	0.016	67.8	11.65	51.3	$r_{\rm in} = 100,$
							$r_{\rm out} = 360$

2 数据

从ALMA的归档数据¹中,获取了NGC 1614的CO J = 1-0、3-2、6-5, HCN J = 3-2、4-3和HCO⁺ J = 3-2、4-3致密分子跃迁谱线数据. 在表2中,列出了所用数据的简要信息. 在表3中,列出了这些分子谱线临界密度和上能级温度.

Table 2 The brief information of molecular line data							
Project	Emission line	$\nu_{\rm rest}/{\rm GHz}$	Beam sizes/ $^{\prime\prime}$	$\mathrm{PA}/^{\circ}$	$\mathrm{Flux}/(\mathrm{Jy}\cdot\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1})$		
2012 1 00001 8[23]	$^{12}CO(1-0)$	115.271	0.64×0.45	78.98	211.2 ± 0.15		
2013.1.00991.5	$^{13}CO(1-0)$	110.201	0.68×0.46	67.71	4.03 ± 0.11		
2011 0 00700 0[36]	$^{12}CO(3-2)$	339.782	0.57 imes 0.39	91.36	590.75 ± 0.13		
2011.0.00708.5	$HCO^{+}(4-3)$	349.919	0.55×0.38	92.82			
$2011.0.00182.\mathrm{S}^{[32]}$	$^{12}CO(6-5)$	679.552	0.26×0.20	-81.22	578.17 ± 0.35		
2012 0 00022 C[22]	HCN(3-2)	261.738	0.95×0.55	77.59	6.76 ± 0.26		
2013.0.00032.5	$\mathrm{HCO}^{+}(3-2)$	263.383	0.95×0.54	-77.06	17.34 ± 0.32		
2011 0 00022 8[34]	HCN(4-3)	347.923	1.47×1.32	76.08	3.94 ± 0.36		
2011.0.00022.5	$HCO^{+}(4-3)$	349.919	1.47×1.31	76.13	11.66 ± 0.46		

表 2 使用的分子谱线数据的简要信息 ble 2 The brief information of molecular line

Column 1: The observed project code, superscripts are references;

Column 2: The observed molecular lines of each project;

Column 3: The rest frequencies of the molecular lines;

Column 4: Synthesized beam size;

Column 5: The position angle;

Column 6: Molecular line velocity-integrated intensity, measured from a circular aperture with a diameter of $\sim 8''$.

¹https://almascience.nrao.edu/asax/

6期

Table e	erittedi dem	neres and apper .	ever energie	s or the morecu	a milos
Transition	$n_{\rm crit}^{\rm a}/{\rm cm}^{-3}$	$(A_{ul}/\Gamma_{ul})^{\rm a}/{\rm cm}^{-3}$	$n_{\rm crit}/{\rm cm}^{-3}$	$(A_{ul}/\Gamma_{ul})/\mathrm{cm}^{-3}$	$(E_{\rm J}/k_{\rm B})$
	(100 K)	(100 K)	(20 K)	(20 K)	$/\mathrm{K}$
$^{12}CO(1-0)$	2.1×10^2	2.1×10^3	2.1×10^2	2.2×10^3	5.53
$^{12}CO(2-1)$	1.9×10^3	2.2×10^4	3.6×10^3	2.3×10^4	16.60
$^{12}CO(3-2)$	$6.8 imes 10^3$	4.0×10^4	1.3×10^4	3.5×10^4	33.19
$^{12}CO(6-5)$	5.4×10^4	3.1×10^5	1.0×10^5	$2.7 imes 10^5$	82.97
$^{13}CO(1-0)$	1.8×10^2	1.8×10^3	3.7×10^2	1.9×10^3	5.29
$^{13}CO(2-1)$	1.7×10^3	1.9×10^4	3.1×10^3	2.0×10^4	15.87
HCN(3-2)	2.6×10^6	6.4×10^7	5.2×10^6	$5.6 imes 10^7$	25.52
HCN(4-3)	5.6×10^6	$7.3 imes 10^8$	1.3×10^7	$9.8 imes 10^8$	42.53
$\mathrm{HCO}^{+}(3-2)$	5.2×10^6	4.2×10^6	1.0×10^6	4.0×10^6	25.68
$HCO^{+}(4-3)$	1.3×10^6	5.8×10^7	2.5×10^6	4.0×10^7	42.53

表 3 分子线的临界密度和上能级能量 Table 3 Critical densities and upper level energies of the molecular lines

^a $n_{\rm crit}$ is a function of kinematic temperature. $n_{\rm crit}$ and $A_{ul}/\Gamma_{u\neq l}$ are the critical density of simplified calculation and precise calculation, respectively. Using this formula, $n_{\rm crit} = A_{ul}/\Sigma(\Gamma_{u\neq l})^{[37]}$, to compute the critical density at the $T_{\rm kin} = 20$ K and $T_{\rm kin} = 100$ K, respectively, adopting the assumption of optical thinness, and A_{ul} refers to Einstein coefficients, $\Gamma_{u\neq l}$ refers to reaction cross-section coefficients, u and l are energy levels. All reaction cross-section coefficients and Einstein coefficients data come from the Leiden Atomic and Molecular Database (LAMDA) database (http://home.strw.leidenuniv.nl/moldata/).

对于HCN(4-3)和HCO⁺(4-3)、¹²CO(6-5)以及¹²CO(3-2)和HCO⁺(4-3)谱线数据,本 文进行了重新成像处理.对于部分分子谱线数据,利用ALMA标准数据处理软件CASA (Common Astronomy Software Applications)^[38],从经过标准校准的数据开始进行数据 分析.首先检查在可见性图中是否看到发射线信号,使用CASA的task-"tclean"对减去 连续谱的分子谱线数据进行洁化,来提高信噪比,并采用"briggs"数据加权(robust = 0),生成分子线的cube数据文件.对于¹²CO(6-5)、¹²CO(3-2)和HCO⁺(4-3)以及HCN(4-3)和HCO⁺(4-3)谱线,处理得到的速度分辨率分别为~7 km·s⁻¹、5 km·s⁻¹、17 km·s⁻¹ 像素大小分别为0.05"、0.1"、0.25".对于其他分子谱线数据,直接使用归档数据中提 供的cube数据图像.使用CASA的task-"immoments"积分含有信号的速度通道,获得积 分强度图像.利用这些积分强度图,获得积分强度比值图.首先将两张图像像素大小一 致,以使图像空间位置对齐;使用CASA的task-"imsmooth"匹配分子谱线的角分辨率, 采用"pixel by pixel"的方式,使用CASA的task-"immath"来制作分子谱线的积分强度 比值图.选择显示信号大于3倍信噪比的区域,来显示积分强度比值图.

使用CASA的task-"specflux",对星系中心约8"的区域(覆盖中心亮发射线区域)进行了不同分子的流量测量.为了获得每条发射线的流量误差,利用这些无发射线信号的速度通道来估算均方根(root mean square, rms),并利用Matthews等人2001年文献中的

标准误差公式[39]

$$\Delta I = T_{\rm rms} \Delta v_{\rm FWZI} / [f(1 - \Delta v_{\rm FWZI}/W)]^{1/2}, \qquad (1)$$

来计算流量误差 ΔI ,其中 T_{rms} 是分子谱线强度的均方根误差, $f = \Delta v_{\text{FWZI}}/\delta_v$, Δv_{FWZI} 是分子谱线的线宽, δ_v 是谱线所占的速度通道数,W是谱线整个速度范围(单位是km·s⁻¹).表2列出不同分子的观测信息以及测量得到的速度积分强度大小.

3 结果

参考Sliwa等^[36]2014年的工作中采用的位置定义,定义了4个区域,中心坐标分 别是北部(north) (RA (J2000) = 04^h34^m00^s.000, Dec (J2000) = -08^o34'44.251"),南 部(south) (RA (J2000) = 04^h34^m00^s.020, Dec (J2000) = -08^o34'45.844"),东部(east) (RA (J2000) = 04^h34^m00^s.080, Dec (J2000) = -08^o34'45.006"),西部(west) (RA (J2000) = 04^h33^m59^s.980, Dec (J2000) = -08^o34'45.064"). 以8.4 GHz连续谱的射电中心(RA (J2000) = 04^h34^m00^s.030, Dec (J2000) = -08^o34'45.1")作为该星系的中心位置(hole). 前述坐标均为赤经与赤纬. 红色圆圈代表星暴环的外直径^[30-32],约1.1" (物理尺 度~360 pc).

3.1 积分强度图

在图2中, 展示了NGC 1614的9条分子谱线的积分强度图, 分别是¹²CO (J = 1-0、 3-2、 6-5), ¹³CO (J = 1-0), HCN (J = 3-2、 4-3)和HCO⁺ (J = 3-2、 4-3). 在图中, 位于左下角的蓝色椭圆代表每种分子观测的分辨率大小, 中心红色的十字符号代表8.4 GHz连续谱的射电中心位置, 即hole; 黑色十字符号代表前文定义的环中的4个位置(north、east、west、south); 红色圆圈表示星暴环的外直径. 不同分子观测的角分辨率对应的空间物理尺度范围大概在¹²CO(6-5)的85.5 pc × 65.8 pc到HCN(4-3)的490.5 pc × 425.1 pc 之间.

图2的分子积分强度分布清楚展示了星系中心区域的环状结构,环状结构的空间 尺度大概在100-350 pc范围内.同时,¹²CO(1-0)的积分强度图显示出向东北、西南、 东南的延展结构,与文献中数据展示的结构基本一致^[23].根据已有的¹²CO(2-1)^[31]和 ¹²CO(1-0)^[23]的研究,尘埃带从环北部穿越,且环绕星暴环向南延伸,在南部可能存在 尘埃带的延续结构(见图1);在北部区域附近存在一个"umbilical cords"结构,气体由此 从尘埃带进入星暴环.因此CO分子气体的分布极可能是受到尘埃带的影响.同时,谱 线强度的峰值位置主要集中在星暴环的北部、西部和南部区域,东部分子气体的发射 相对较弱.另外,在星系的中心位置,也就是8.4 GHz连续谱的射电中心位置,所有的谱 线都没有较强的发射强度.在图2中,展示了较低分辨率(1.47"×1.32")的HCN(4-3)和 HCO⁺(4-3)分子谱线积分强度图.虽然,细节结构没有分辨出来,但这两条谱线的强度 分布,同样集中于星暴环的北部、南部和西部区域,在东部和中心谱线发射很少,和 Imanishi等人于2013年工作中展示的结果一致^[34].这表明,分子气体主要集中于星暴环 的北部、西部和南部区域,且可能有着不同的气体成分.在Xu等^[32]2015年和Saito等^[40] 2016年的工作中,他们的REDAX(在非热动平衡条件下计算均匀分子云中分子谱线强度 的程序代码)多模型检验结果表明,在星暴环区域可能确实存在着两种气体成分:冷气体

68-6



成分(~19 K)和热气体成分(> 70 K).

図 2 ALMA南方井平処調NGC 1614的小向方子速度积方强度图像. 石边颜色泉代表的定方子语线积方强度入小. 時報 図覆盖有对应谱线的等值线. 图像等值线的范围、步长、σ数值按照从左到右从上到下的顺序, 依次是¹²CO(1-0)、 5σ - 25σ、5σ、1σ = 0.219 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹; ¹³CO(1-0)、1.5σ - 9σ、1.5σ、 1σ = 0.094 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹; ¹²CO(3-2)、3σ - 27σ、3σ、1σ = 1.24 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹; HCO⁺(4-3)、2σ - 20σ、2σ、1σ = 0.102 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹; ¹²CO(6-5)、3σ - 18σ、3σ、 1σ = 2.284 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹; HCN(3-2)、2σ - 8σ、1σ、1σ = 0.293 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹; HCO⁺(3-2)、2σ - 10σ、1σ、1σ = 0.328 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹; HCN(4-3)、2σ - 8σ、1σ、 1σ = 0.370 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹; HCO⁺(4-3)、2σ - 10σ、1σ、1σ = 0.720 Jy · beam⁻¹ · km · s⁻¹.

Fig. 2 ALMA high-resolution velocity-integrated intensity images of different molecular lines of NGC 1614. The color bars represent the velocity-integrated intensity of molecular line. Each image is overlayed by the correspoding transition line. The range, step, 1 σ value of image contours in order from left to right, top to bottom, followed by ¹²CO(1-0), $5\sigma - 25\sigma$, 5σ , $1\sigma = 0.219$ Jy \cdot beam⁻¹ \cdot km \cdot s⁻¹; ¹³CO(1-0), $1.5\sigma - 9\sigma$, 1.5σ , $1\sigma = 0.094$ Jy \cdot beam⁻¹ \cdot km \cdot s⁻¹; ¹²CO(3-2), $3\sigma - 27\sigma$, 3σ , $1\sigma = 1.24$ Jy \cdot beam⁻¹ \cdot km \cdot s⁻¹; HCO⁺(4-3), $2\sigma - 20\sigma$, 2σ , $1\sigma = 0.102$ Jy \cdot beam⁻¹ \cdot km \cdot s⁻¹; ¹²CO(6-5), $3\sigma - 18\sigma$, 3σ , $1\sigma = 2.284$ Jy \cdot beam⁻¹ \cdot km \cdot s⁻¹; HCN(3-2), $2\sigma - 8\sigma$, 1σ , $1\sigma = 0.293$ Jy \cdot beam⁻¹ \cdot km \cdot s⁻¹; HCO⁺(3-2), $2\sigma - 10\sigma$, 1σ , $1\sigma = 0.328$ Jy \cdot beam⁻¹ \cdot km \cdot s⁻¹; HCN(4-3), $2\sigma - 8\sigma$, 1σ ,

 $1\sigma = 0.370 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}; \text{ HCO}^+(4\text{-}3), 2\sigma - 10\sigma, 1\sigma, 1\sigma = 0.720 \text{ Jy} \cdot \text{beam}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}.$

强度分布更紧凑,并且星暴环空间结构也已经解析出来;在除¹²CO(3-2)以外的其他致密 分子谱线积分强度图中,并未探测到如¹²CO(1-0)等低阶分子谱线中的延展结构.这表明 星暴环以外区域的气体可能处于弥散状态,这样的物理环境只能足够激发临界密度较低 的低阶CO分子谱线(见表3).此外,这些分子谱线在星系中心几乎没有探测到发射,尤其 是¹²CO(6-5)分子谱线和较高分辨率的HCO+(4-3)分子谱线.这表明,在星系中心分子气 体含量较少.相关文献[29]研究表明,星系中心核区的恒星形成活动向外扩展,而核区的 恒星形成活动消耗掉了大量的分子气体;这和图中展示的结果相一致.

Xu等^[32]对¹²CO(6-5)分子谱线的研究发现, 在星暴环中发现了很多分子云团块状结构, 并且发现了几个未解析的节(knot)状结构. 同样, 在König等^[31]高分辨率的¹²CO(2-1) 观测中, 在星暴环及尘埃带中发现了10个GMA (Giant Molecular Association). 这些GMA和knot结构可能与尘埃带的分布关联, 这些结构主要存在于北部、西部和南部区域(见图2). 此外, ¹²CO(3-2)和HCO⁺(4-3)分子谱线强度分布, 也同样显现出类似的分子 云团块结构.

3.2 流量

在表2中展示了分子谱线测量所得到的流量及相应的误差. 因数据分析过程和流量 计算方法的不同,本文中测量得到的谱线流量值与文献中给出的有所差异.¹²CO(1-0) π^{13} CO(1-0)测量得到的流量值分别是(211.20 ± 0.15) Jv·km·s⁻¹和(4.03 ± 0.11) $Jy \cdot km \cdot s^{-1}$, 而文献[23]给出的分别是(241 ± 1.0) $Jy \cdot km \cdot s^{-1}$ 和(6.6 ± 1.0) $Jy \cdot km \cdot s^{-1}$. 测量值有所不同可能是因为本文使用的是ALMA 12米阵列数据测量的结果,相比文 献结合ALMA ACA (Atacama Compact Array) 7米阵列和12米阵列的测量,存在少 量的流量丢失. 测量得到的HCN(3-2)和HCO⁺(3-2) (分别为(6.76 ± 0.26)和(17.34 ± (0.32) Jy·km·s⁻¹)以及HCN(4-3)和HCO⁺(4-3) (分别为(3.94 ± 0.36)和(11.66 ± 0.46) Jy·km·s⁻¹)的流量值,与文献中HCN(3-2)和HCO⁺(3-2)(分别为(5.1±1.7)和(15.7± 1.5) Jy·km·s⁻¹)^[22, 34]以及HCN(4-3)和HCO⁺(4-3) (分别为(2.8 ± 0.8)和(16.0 ± 1.4) Jy·km·s⁻¹)给出的流量值相比,略有不同.另外对于两次HCO⁺(4-3)观测,对比测量 的流量值发现, 高分辨率观测获得流量值((23.55 ± 0.13) $Jy \cdot km \cdot s^{-1}$)高于低分辨率 观测得到的流量值((11.66 ± 0.46) Jy·km·s⁻¹), 与文献中给出的高分辨率HCO⁺(4-3)流量测量值((24.33 ± 0.6) Jy·km·s⁻¹)^[36]和低分辨率HCO⁺流量测量值((16.0 ± 1.4) Jy·km·s⁻¹)^[34]的结果表现一致. 而Wilson等人于2008年使用SMA (Submillimeter Array)观测 $(2.6'' \times 2.1'')$ 获得HCO⁺(4-3)的流量值为 \geq (14.0 ± 3) Jy·km·s^{-1[6]}, 与ALMA低分辨率(1.47"×1.32") HCO+(4-3)观测获得的流量值大体一致,因此推 测ALMA高分辨率HCO⁺(4-3)数据的流量定标可能有一些问题,还需进一步验证.

3.3 积分强度比值图

HCN和HCO⁺具有较高的偶极矩,碰撞激发所需的临界密度比CO分子的要高约100 倍(见表3),因此能够很好地示踪致密分子气体环境.图3中展示了致密分子HCN和HCO⁺ 不同转动能级跃迁之间以及与CO分子的积分强度比值图,HCO⁺(4-3)/¹²CO(3-2)和



HCO⁺(4-3)/¹²CO(6-5)不作详细讨论.

图 3 与致密分子跃迁线相关的积分强度比值图. 位于左下角的蓝色椭圆代表每张积分强度比值图卷积到的分辨率大小. HCN(4-3)/HCO⁺(4-3)强度比值图使用的是低分辨率的HCO⁺(4-3)数据; 下面3张图, 使用的是高分辨率的HCO⁺(4-3)数据. 图中等值线的名称、范围、步长、1σ值按照从左到右从上到下的顺序分别为HCN(3-2)、 $2\sigma \sim 8\sigma$ 、 1σ 、 $1\sigma = 0.293$ Jy·beam⁻¹·km·s⁻¹; HCN(4-3)、 $2\sigma \sim 8\sigma$ 、 1σ 、 $1\sigma = 0.370$ Jy·beam⁻¹·km·s⁻¹; 12 CO(1-0)、 $5\sigma \sim 25\sigma$ 、 5σ 、 $1\sigma = 0.219$ Jy·beam⁻¹·km·s⁻¹; 12 CO(1-0)、 $5\sigma \sim 25\sigma$ 、 5σ 、 $1\sigma = 0.219$ Jy·beam⁻¹·km·s⁻¹; 12 CO(1-0)、 $5\sigma \sim 25\sigma$ 、 5σ 、 $1\sigma = 2.284$ Jy·beam⁻¹·km·s⁻¹.

Fig. 3 The integrated intensity ratio maps related to the dense molecular transition lines. The blue ellipse in the lower left corner represents the resolution to which each integrated intensity ratio map is convolved. The HCN(4-3)/HCO⁺(4-3) ratio map uses the lower resolution HCO⁺(4-3) data; while the bottom three images use the higher resolution HCO⁺(4-3) data. The name, range, step, 1σ value of the image contours in order from left to right, top to bottom, followed by HCN(3-2), $2\sigma \sim 8\sigma$, 1σ ,

$$\begin{split} 1\sigma &= 0.293 \; \rm{Jy} \cdot \rm{beam}^{-1} \cdot \rm{km} \cdot \rm{s}^{-1}; \; \rm{HCN}(4\text{-}3), \; 2\sigma \sim 8\sigma, \; 1\sigma, \; 1\sigma = 0.370 \; \rm{Jy} \cdot \rm{beam}^{-1} \cdot \rm{km} \cdot \rm{s}^{-1}; \; ^{12}CO(1\text{-}0), \\ 5\sigma \sim 25\sigma, \; 5\sigma, \; 1\sigma = 0.219 \; \rm{Jy} \cdot \rm{beam}^{-1} \cdot \rm{km} \cdot \rm{s}^{-1}; \; ^{12}CO(1\text{-}0), \; 5\sigma \sim 25\sigma, \; 5\sigma, \end{split}$$

$$\begin{split} 1\sigma &= 0.219 \; \rm{Jy} \cdot \rm{beam}^{-1} \cdot \rm{km} \cdot \rm{s}^{-1}; \; {}^{12}\rm{CO}(3\text{-}2), \; 3\sigma \sim 27\sigma, \; 3\sigma, \; 1\sigma &= 1.24 \; \rm{Jy} \cdot \rm{beam}^{-1} \cdot \rm{km} \cdot \rm{s}^{-1}; \; {}^{12}\rm{CO}(6\text{-}5), \\ 3\sigma \sim 18\sigma, \; 3\sigma, \; 1\sigma &= 2.284 \; \rm{Jy} \cdot \rm{beam}^{-1} \cdot \rm{km} \cdot \rm{s}^{-1}. \end{split}$$

HCN(4-3)/¹²CO(1-0)和HCO⁺(4-3)/¹²CO(1-0)可以表征致密分子气体含量比例 (f_{dense}),相关研究发现这一比值与星系的恒星形成活动的剧烈程度相关^[8].需要注 意的是,由于高分辨率的HCO⁺(4-3)数据在pipeline进行流量定标时,存在一定的误差, 因此在做与HCO⁺(4-3)相关的强度比值大小的分析时,也存在一些误差;而本文中,只讨 论NGC 1614中心不同区域强度比值相对的分布变化.在图3中,HCN(4-3)/¹²CO(1-0)和 HCO⁺(4-3)/¹²CO(1-0)积分强度的比值,在星系中心区域比较高,然后向星系中心外区 域降低.这表明,在星系中心区域拥有更多的致密分子气体.由于HCN(4-3)/¹²CO(1-0) 积分强度比值图有较低的分辨率,因此在比值图上无法得知更细致的结构,而HCO⁺(4-3)/¹²CO(1-0)的强度比值则展示出了更细致的区域分布.图4展示了不同分子积分强度 比值在星系不同区域的分布变化,HCN(4-3)/¹²CO(1-0)在中心区域(除核区)的比值比

68-9

较高(0.46±0.01),而在星系中心环状区域趋近于一个常数(0.35±0.05). HCO⁺(4-3)/¹²CO(1-0)强度比值在中心区域尤其是星暴环区域较高(0.17~0.26),而在环的北部和西部相比于其他区域呈现更高的值.更为明显的是在星系中心核区有着较低的值,这也和前面的积分强度分布一致.分析表明:星系中心区域有较多的致密分子气体,且在环的不同区域,致密分子气体的含量占比也不同,表明分子环的不同区域气体激发环境不同.



图 4 不同区域的致密分子谱线积分强度比值(最大值-蓝色,最小值-橘黄色,平均值-绿色,中值-红色)的折线变化图.中 值加上了误差棒.HCN(4-3)/HCO⁺(4-3)使用的是低分辨率的HCO⁺(4-3)数据,HCO⁺(4-3)/¹²CO(1-0)使用的是高 分辨率的HCO⁺(4-3)数据.

Fig. 4 The variation of HCN and HCO⁺ emission line ratios (maximum-blue, minimum-orange, mean-green, median-red) in different regions. Error bars are added to the median value. HCN(4-3)/HCO⁺(4-3) uses the lower resolution HCO⁺(4-3) data, while the HCO⁺(4-3)/¹²CO(1-0) uses

 $(4-3)/HCO^{+}(4-3)$ uses the lower resolution $HCO^{+}(4-3)$ data, while the $HCO^{+}(4-3)/f^{-2}CO(1-0)$ uses the higher resolution $HCO^{+}(4-3)$ data. 图4显示HCN/HCO⁺ (J = 3-2、4-3)的强度比值分布大体上是一致的:在环的东部 区域有着比较高的值,环的西部、北部、南部则有相对较低的值.由于HCN/HCO⁺在J= 3-2的数据空间分辨率要高于J = 4-3,因此在两张图中看到的细节变化有所不同.对于 HCN/HCO⁺(3-2)强度比值图,根据3倍信噪比对图像进行修剪,信噪比较高的强度比 值主要集中于星系中心区域,在北部、西部和南部外围也存在比值分布;比较高的 值(~0.38 ± 0.04)分布于HCN(3-2)峰值位置(见于图3中的等高线),而星暴环的西北 部以及东南部的强度值则比较低(~0.3 ± 0.03);而对于HCN/HCO⁺(4-3),存在比值 分布的区域较HCN/HCO⁺(3-2)的要大一些,在星暴环外围的东部和西部有较高的值 (~0.44 ± 0.04);在星暴环北部的尘埃带位置(北部)及南部,有较低的值(~0.35 ± 0.03). 由于HCO⁺相对HCN的临界激发密度较低,因此HCN/HCO⁺比值的变化也可能表明星 暴环不同区域气体密度的差异.

4 讨论

由于AGN和恒星形成活动,对周围的气体环境产生不同的影响^[41],不同区域具有不同的激发环境,可能导致分子谱线的强度比值在星系不同区域之间具有不同的分布. 相关研究表明,导致分子谱线强度比值的变化,可能与多种物理机制有关.从Meijerink 等^[42]模拟的结果可以得知,在相同的跃迁线和线不透明度条件下,HCN的临界密度 比HCO⁺的要高约5倍.因此,在相同密度和温度下的分子气体环境中,HCO⁺分子线 比HCN分子线更容易被激发.因此,气体密度和温度对此星系中心区域分子谱线积分强 度比值的变化有很重要的影响.

HCN辐射强度的增加也可能导致更高的HCN/HCO⁺分子谱线强度比值.相关研究 发现,有两种机制可能导致HCN的辐射强度增加:来自年轻大质量恒星形成区的O型 和B型星的紫外辐射^[43-45],或者来自AGN的强X射线辐射^[46-47].UV辐射主要影响星 系中心 < 1 kpc区域的分子云表面,从而形成光致电离区(Photon Dissociation Region, PDR);而AGN产生的X射线辐射可以穿透到星系外围的星周盘(circumnuclear disk)区 域,从而形成巨大的X射线电离区(X-ray Dissociation Region, XDR).对于NGC 1614这 个星暴星系,星暴活动中产生的UV辐射可能是导致HCN/HCO⁺比值不同的原因之一. 以往的研究表明^[29],在NGC 1614中存在着较为年轻的恒星形成活动.Paa (1.88 μ m)辐 射起源于HII区,在这个区域中存在着大量的电离UV光子($\lambda < 912$ Å),且主要由寿命较 短的大质量O型星主导.Alonso-Herrero等^[29]通过对Paa的空间分布研究发现,Paa主要 分布于星暴环的东西部,因此星暴环的东部和西部存在HII 区.Olsson等^[30]的研究发现, 星暴环中的恒星形成活动(5–10 Myr)比星系中心的要年轻,并且在Díaz-Santos等^[48]的 研究中得出,星暴环南北部的星暴活动年龄比东西部要年老.

因此可以推断,由于星暴环东西部存在年轻的星暴活动,寿命较短的O型星产生的UV辐射增加了HCN分子的辐射强度,对HCN/HCO+比值的变化造成了影响.对于HCN/HCO+(4-3)强度比值图,结合比值变化折线图了解到,在星暴环东西部区域相对较高的比值分布可能是受到了星暴活动导致HCN丰度增加的影响;同样对于HCN/HCO+(3-2)在东部区域的变化也是如此.

SNe或者来自宇宙射线的电离作用^[25],也可能导致HCN/HCO+比值的变化,因为

它可以增加HCO⁺分子的辐射强度,同时可以降低演化(evolved)星暴星系中的HCN分子 辐射强度. 3.3 µm PAH辐射主要来自于PDR, Väisänen等^[28]研究了NGC 1614中3.3 µm PAH谱线发射特征的空间分布,在星暴环的北部和南部发现强烈的PAH辐射,可知 在NGC 1614中, PDRs主要在星暴环的北部和南部.在EVN (European Very Long Baseline Interferometry (VLBI) Network) 5.0和8.4 GHz连续谱观测中^[49],在(RA(J2000) = 04^h34^m00^s.0118, Dec(J2000) = $-08^{\circ}34'44.547''$)位置探测到一个致密的辐射源,也就 是北部中心点附近,这可能是超新星爆发或者超新星爆发遗迹.同时,Herrero-Illana 等^[50]基于热辐射和非热辐射的关系,发现在北部和西部区域很可能存在着超新星遗迹.

由此,在HCN/HCO⁺(4-3)比值图中,星暴环北部和南部的强度比值较低,和HCN/HCO⁺(3-2)的南部区域,推测可能是由于超新星爆发使得HCO⁺辐射强度的增加导致HCN/HCO⁺比值的降低.

5 结论

利用NGC 1614的ALMA多条高空间分辨率CO、HCN和HCO+分子谱线归档数据, 获得了分子谱线积分强度图,并采用"pixel by pixel"的方式制作积分强度比值图.结合 已有的研究,从高分辨率解析图像的角度研究该星系不同区域的分子气体尤其是致密 分子气体性质.从分子谱线的积分强度图上可以看出,除了较低空间分辨率的HCN(4-3) 和HCO+(4-3)积分强度图外,在其他分子谱线积分强度图上均发现了清晰的星暴环 结构.分子气体主要分布在星暴环的北部、南部和西部区域,而东部和星系中心的 分子气体含量较少.相比于¹²CO(1-0)的延展分布,¹²CO(3-2)、¹²CO(6-5)、HCN(3-2)、 HCO+(3-2)和HCO+(4-3)等示踪密度较高气体的分子分布较为集中,主要分布在星暴 环结构,这表明星暴环外围气体密度相对较低.同样,HCO+(4-3)/¹²CO(2-1)强度比值 分布表明致密分子气体主要集中于环状结构上.分析认为,HCN/HCO+(4-3)在星暴环 东部和西部以及HCN/HCO+(3-2)在东部区域较高的强度比值,可能是由于年轻恒星形 成区域中短寿命O型星的紫外线辐射导致的HCN辐射强度增强;HCN/HCO+(4-3)在星

致谢 感谢审稿老师对文章的写作给出的宝贵建议. 感谢编辑部的老师对论文评阅工作 的辛勤付出. 感谢王小龙等对文章写作提出的宝贵建议. 感谢ALMA数据库提供的数据.

参考文献

- [1] Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. ApJ, 1988, 325: 74
- [2] Sanders D B, Mirabel I F. ARA&A, 1996, 34: 749
- [3] Caputi K I, Lagache G, Yan L, et al. ApJ, 2007, 660: 97
- [4] Magnelli B, Elbaz D, Chary R R, et al. A&A, 2011, 528: A35
- [5] Madau P, Dickinson M. ARA&A, 2014, 52: 415
- [6]~ Wilson C D, Petitpas G R, Iono D, et al. ApJS, 2008, 178: 189
- [7]~Ueda J, Iono D, Yun M S, et al. ApJS, 2014, 214: 1
- $[8]\;$ Gao Y, Solomon P M. ApJ, 2004, 606: 271
- [9]~ Gao Y, Solomon P M. ApJS, 2004, 152: 63

6期

- [10] Kohno K, Matsushita S, Vila-Vilaró B, et al. The Central Kiloparsec of Starbursts and AGN: The La Palma Connection. San Francisco: ASP, 2001, 249: 672
- [11] Kohno K. AIP Conference Proceedings, 2005, 783: 203
- [12] Imanishi M, Nakanishi K, Tamura Y, et al. AJ, 2007, 134: 2366
- [13] Sakamoto K, Aalto S, Costagliola F, et al. ApJ, 2013, 764: 42
- [14] 高煜. 中国科学: 物理学力学天文学, 2021, 51: 030013
- [15] Solomon P M, Downes D, Radford S J E. ApJ, 1992, 387: L55
- $[16]\,$ Yao L
 H, Seaquist E R, Kuno N, et al. ApJ, 2003, 588: 771
- [17]Iono D, Wilson C D, Yun M S, et al. ApJ, 2009, 695: 1537
- $[18]\,$ Xu C K, Cao C, Lu N, et al. ApJ, 2014, 787: 48
- $[19]\,$ Aalto S, Black J H, Johansson L E B, et al. A&A, 1991, 249: 323
- [20] Casoli F, Dupraz C, Combes F. A&A, 1992, 264: 49
- [21] Aalto S, Radford S J E, Scoville N Z, et al. ApJ, 1997, 475: L107
- $\left[22\right]$ Imanishi M, Nakanishi K, Izumi T. AJ, 2016, 152: 218
- [23] König S, Aalto S, Muller S, et al. A&A, 2016, 594: A70
- [24] García-Burillo S, Graciá-Carpio J, Guélin M, et al. ApJ, 2006, 645: L17
- $\left[25\right]$ Wild W, Harris A I, Eckart A, et al. A&A, 1992, 265: 447
- [26] García-Burillo S, Martín-Pintado J, Fuente A, et al. ApJ, 2002, 575: L55
- [27] Armus L, Mazzarella J M, Evans A S, et al. PASP, 2009, 121: 559
- [28] Väisänen P, Rajpaul V, Zijlstra A A, et al. MNRAS, 2012, 420: 2209
- [29] Alonso-Herrero A, Engelbracht C W, Rieke M J, et al. ApJ, 2001, 546: 952
- [30] Olsson E, Aalto S, Thomasson M, et al. A&A, 2010, 513: A11
- [31] König S, Aalto S, Muller S, et al. A&A, 2013, 553: A72
- [32] Xu C K, Cao C, Lu N, et al. ApJ, 2015, 799: 11
- [33] U V, Sanders D B, Mazzarella J M, et al. ApJS, 2012, 203: 9
- [34] Imanishi M, Nakanishi K. AJ, 2013, 146: 47
- [35] García-Burillo S, Combes F, Usero A, et al. A&A, 2015, 580: A35
- [36] Sliwa K, Wilson C D, Iono D, et al. ApJ, 2014, 796: L15
- [37] Yang B H, Stancil P C, Balakrishnan N, et al. ApJ, 2010, 718: 1062
- [38] McMullin J P, Waters B, Schiebel D, et al. Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI. Tucson: ASP, 2007, 376: 127
- [39] Matthews L D, Gao Y. ApJ, 2001, 549: L191
- [40] Saito T, Iono D, Xu C K, et al. PASJ, 2016, 68: 20
- [41] Krips M, Neri R, García-Burillo S, et al. ApJ, 2008, 677: 262
- [42] Meijerink R, Spaans M, Israel F P. A&A, 2007, 461: 793
- [43] Blake G A, Sutton E C, Masson C R, et al. ApJ, 1987, 315: 621
- [44] Tielens A G G M, Hollenbach D. ApJ, 1985, 291: 747
- [45] Sternberg A, Dalgarno A. ApJS, 1995, 99: 565
- [46] Lepp S, Dalgarno A. A&A, 1996, 306: L21
- [47] Maloney P R, Hollenbach D J, Tielens A G G M. ApJ, 1996, 466: 561
- [48] Díaz-Santos T, Alonso-Herrero A, Colina L, et al. ApJ, 2008, 685: 211
- [49] Herrero-Illana R, Alberdi A, Pérez-Torres MÁ, et al. MNRAS, 2017, 470: L112
- [50] Herrero-Illana R, Pérez-Torres MÁ, Alonso-Herrero A, et al. ApJ, 2014, 786: 156

文 学 报

CHEN Yu-dong^{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, Xiamen University, Xiamen 361005)

ABSTRACT We investigate the molecular gas properties, especially the dense molecular gas in NGC 1614, using the ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) high resolution archival data of ¹²CO(1-0), ¹³CO(1-0), ¹²CO(3-2), ¹²CO(6-5), HCN(3-2), $HCO^{+}(3-2)$, HCN(4-3), and $HCO^{+}(4-3)$. From the high-resolution integrated intensity maps, a ring structure was detected in the central region (< 1 kpc), and the molecular gas mainly distributes in the central region while there is little gas in the nucleus. The $^{12}CO(1-0)$ shows an extended structure to the south, north, and southeast, and CO $(J \ge 3, J)$ is the quantum number of rotational vibration levels), HCN and HCO⁺ show that the dense gas mainly concentrated in the central region. Similarly, HCN(4- $3)/^{12}CO(1-0)$ and HCO⁺(4-3)/¹²CO(1-0) ratio maps show that the dense molecular gas is mainly concentrated in the ring in the central region. The HCN/HCO⁺ ratios, show that the different regions of the starburst ring might have different excitation conditions. The variations of HCN/HCO⁺ values in different region of central region may be due to the gas density and temperature. For $HCN/HCO^{+}(4-3)$ ratio map, the higher intensity values ($\sim 0.44 \pm 0.04$) were obtained in the eastern and western region of the ring, compared to the northern and southern region ($\sim 0.35 \pm 0.03$). For HCN/HCO⁺(3-2) ratio map, the higher values ($\sim 0.38 \pm 0.04$) are distributed at peak location of HCN(3-2) emission, while the lower values ($\sim 0.3 \pm 0.03$) are distributed at the northwestern and southeastern region of the ring. The mechanism of variations of HCN/HCO⁺ values in the central region of the galaxy has been discussed in the article.

Key words galaxies: starburst, radio lines: galaxies, radio lines: line ratios, galaxies: individual: NGC 1614