

# ALMA を使った NGC1068 における高密度ガスの物理状態診断

谷口 暁星 (東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻 M1)

## Abstract

本研究では、ALMA の初期科学観測 (Cycle 0) における 2 型セイファート銀河 NGC1068 の Band3, 7 での高感度観測によって、高密度ガストレーサー分子である  $^{13}\text{CO}$ , CS,  $\text{C}^{18}\text{O}$  を高い S/N 比で検出した。今回の観測によって得られたのは、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ ,  $^{13}\text{CO}(J=3-2)$ ,  $\text{CS}(J=2-1)$ ,  $\text{CS}(J=7-6)$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}(J=3-2)$  の 6 輝線である。さらに、既存の干渉計では感度不足のため困難であった、NGC1068 の中心領域 ( $\sim 5$  arcsec) をこれらの輝線で 2 つのノットに空間分解することに成功し、各ノットにおける 6 輝線の輝線強度比を求めることができた。東側のノットにおける  $^{13}\text{CO}(3-2)/^{13}\text{CO}(1-0)$  の輝線強度比は輝度温度換算で  $3.7 \pm 0.5$  であった。これは近傍の星形成領域として最大規模の 30 Doradus における比と同程度に高いことが示され、中心領域の数 100pc スケールという広範囲にわたって高い輝線強度比が得られたことは興味深い結果である。この結果の意味する物理状態を解析するために 6 輝線の輝線強度を RADEX を用いて non-LTE 解析した結果、ガスが高密度であり、かつ中心領域内の空間分布が非対称であることが示された。これはガスが高温高密度であり、かつ AGN からのショックのような非対称な加熱機構を示唆するものである。

## 1 Introduction

銀河の星形成活動は、主に活動銀河核 (AGN) やスターバースト (SB) で起きているが、これに関わる分子ガスの化学的、力学的な特性はあまり知られていない。近傍の最も観測がなされている 2 型セイファート銀河の NGC1068 では、銀河中心付近 ( $\sim 5$  arcsec) の Circumnuclear Disk (CND) では  $^{12}\text{CO}(3-2)/^{12}\text{CO}(1-0)$  の輝線強度比が、一般的な星形成領域や SB ( $\lesssim 1$ ) と比べて、3 という高い値になっている (Tsai et al. 2012)。また、より高密度なトレーサー分子である  $^{13}\text{CO}(3-2)$ ,  $^{13}\text{CO}(1-0)$  などの輝線観測もなされている (Krips et al. 2011)。複数の輝線の non-LTE 解析から、CND では高温 ( $\geq 200\text{K}$ ) かつ高密度 ( $\simeq 10^4\text{cm}^{-3}$ ) という物理状態を示唆している (Krips et al. 2011)。

しかし、これらの輝線は感度不足のため十分な S/N で検出されておらず、CND での高密度トレーサー分子の観測は、上記のシナリオを確認する意味でも重要である。また、CND を空間分解することで、AGN からの影響がどのように及ぶのかを見ることが出来るはずである。

本研究では、近傍の NGC1068 (redshift  $z = 0.0038$ ) における高密度ガストレーサー分子である  $^{13}\text{CO}$ , CS,

$\text{C}^{18}\text{O}$  を観測した。NGC1068 は中心の CND ( $\sim 200$  pc) とそれを取り囲む Starburst Ring ( $\sim 2$  kpc) という構造であり、CND は東西の 2 つのノット (Eastern-knot: E-knot, Western-knot: W-knot) からなる。観測では CND と Starburst Ring の両方を観測し、CND をノットに空間分解するために必要な空間分解能を達成している。

## 2 Observations

本研究の観測は、ALMA (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) の初期科学観測 (Cycle 0) として 2012 年 12 月に行われた (P.I. Takano S., NAOJ)。受信機は Band3 (84~119 GHz) と Band7 (275~370 GHz) が使われ、配列は compact configuration である。各バンド、各サイドバンドごとに、周波数分解能 488KHz のチャンネルが 3840 個並ぶことで 1.875GHz をカバーしており、これが 2 チューニング存在する。すなわち、各バンドのバンド幅は  $1.875\text{GHz} \times 2(\text{sideband}) \times 2(\text{tunings}) = 7.5\text{GHz}$  である。アンテナ台数は Cycle 0 のためそれぞれ 16 台 (Band3)、14 台 (Band7) であり、総観測時間はそれぞれ 2.8hours (Band3)、0.8hours (Band7) である。本観測では  $^{13}\text{CN}$ , SO, HNC,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$  といった分子輝線も検出されてい

るが (Takano et al. 2013 in prep)、本研究では表 1 にある高密度ガストレーサーである 6 輝線を扱っている。このうち CS(7-6) は本観測によって初めて検出された分子輝線である。観測データはデータリダクションソフトウェア CASA (Ver. 4.0) によってリダクションされた。データは EA-ARC から提供された continuum subtraction 済みのものを使用し、特に弱い  $^{13}\text{CO}(1-0)$  の CND 付近を扱うため、CLEAN のゲインを 0.05 (default では 0.1) に設定して慎重に行った。CLEAN は Band3 は単一視野、Band7 は 2 視野のモザイクマッピングを行なっている。各チャンネルは周波数ごとにビニングされ、速度分解能は 20 km/s である。このときの Rms noise の値は表 1 の通りである。特に  $^{13}\text{CO}(1-0)$  と  $^{13}\text{CO}(3-2)$  については Schinnerer et al. (2000) の値と比べ大幅に改善していることが分かる。

### 3 Results

観測とリダクションにより得られた輝線強度マップを図 2~3 に示した。紙面の都合上、 $^{13}\text{CO}$  系のみを示すが、同じ分子でも、回転量子数  $J$  の違いで受かる領域と強度が異なることが分かる。 $J$  が小さい方はリング領域が見えているのに対し、 $J$  の大きい方は CND にピークを持つ傾向がある。この傾向は CS,  $\text{C}^{18}\text{O}$  でも同様に見られる。

図 2 は  $^{13}\text{CO}(1-0)$  の輝線強度マップに同輝線の Contour を重ねたマップである。 $1\sigma=0.11$  [Jy/beam km/s] であり、Contour は  $3\sigma, 6\sigma, \dots, 15\sigma, 20\sigma, \dots, 40\sigma$  を示している。また、図 3 は  $^{13}\text{CO}(3-2)$  の輝線強度マップに同輝線の Contour を重ねたマップである。 $1\sigma=0.98$  [Jy/beam km/s] であり、Contour は  $3\sigma, 6\sigma, \dots, 18\sigma, 21\sigma$  を示している。本観測によって、CND を S/N 比 5 以上によって検出し、さらに E/W-knot に空間分解することに成功した。

図 1 に、以下で輝線強度と輝線強度比を求める領域を示した。領域を選定するにあたり、 $^{13}\text{CO}(3-2)$  の E-knot と W-knot のピークを中心とする CND 内の  $1'' \times 1''$  の領域 (CE, CW) と、 $^{13}\text{CO}(1-0)$  のピークを含む Starburst Ring 領域 (STB) の 3 つを指定して以下では値を求めていくことにする。

表 2 は各領域でのそれぞれの輝線強度である。この表の値から計算した各領域の代表的な輝線

強度比を表 3 に示した。E-knot における輝線温度換算の  $^{13}\text{CO}(3-2)/^{13}\text{CO}(1-0)$  比は  $3.7 \pm 0.5$  である。この値は近傍の星形成領域としては最大規模の 30 Doradus (NGC2070 or タランチュラ星雲) の GMC (Giant Molecular Cloud) 内で得られた値  $3.6 \pm 0.9$  (Minamidani et al. (2011)) と同程度である。

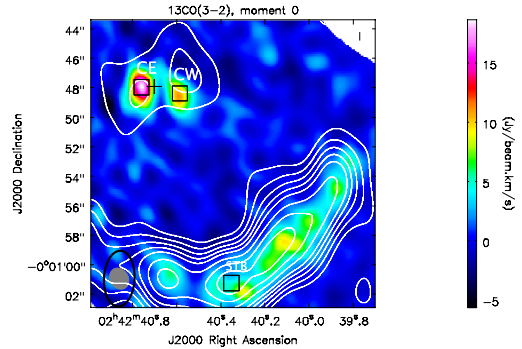


図 1:  $^{13}\text{CO}(1-0)$  のマップに  $^{13}\text{CO}(3-2)$  の Contour を重ねた図。図中の 3 つの黒い四角は輝線強度や輝線強度比を求めた領域 ( $1'' \times 1''$ ) である。図の上から E-knot (CE), W-knot (CW), Starburst Ring (STB) である。CND のクロス記号は AGN 中心を表す。

### 4 Discussion

回転量子数  $J$  が同じ分子で比較して大きいものは、臨界密度が同様に大きく、すなわち高密度の部分を見ていることになる。E-knot での  $^{13}\text{CO}(3-2)/^{13}\text{CO}(1-0)$  比が数 100pc スケールで高いということからも、E-knot が高密度であることを示唆している。そこで、2 つのノットの物理的な状態を診断するために、得られた 6 輝線の輝線強度比を用いて non-LTE 解析を行った。解析には non-LTE での輻射輸送方程式を解くコードである RADEX (Van der Tak et al. 2007) を用いた。 $^{13}\text{CO}$ , CS,  $\text{C}^{18}\text{O}$  分子の abundance は Krips et al. (2011), Usero et al. (2004), Padeli et al. (1996) の値を用いて固定し、運動温度  $T_{\text{kin}} (10 \sim 410\text{K})$ , 水素分子密度  $n_{\text{H}_2} (10^2 \sim 10^7 \text{cm}^{-3})$ , 水素分子柱密度  $N_{\text{H}_2} (10^{16} \sim 10^{23} \text{cm}^{-2})$  をパラメータとして振ることにより、それぞれの分子輝線に対して RADEX の計算によってモデルの輝線強度を求めることができる。これを用いて、3 つの輝線強度比をモデルと観測

輝線名	観測周波数 [GHz]	臨界密度 [cm <sup>3</sup> ]	観測バンド (Band, LSB/USB)	rms noise [mJy/beam]	ビームサイズ, P.A. ["×", °]
<sup>13</sup> CO(1-0)	109.785	2 × 10 <sup>3</sup>	Band3, USB	1.2 (← 1.7 <sup>a</sup> )	3.8×2.1, -2.8
<sup>13</sup> CO(3-2)	329.340	3 × 10 <sup>4</sup>	Band7, LSB	6.9 (← 39 <sup>a</sup> )	1.5×1.2, 31.5
CS(2-1)	97.611	4 × 10 <sup>5</sup>	Band3, LSB	1.0	4.2×2.3, 0.3
CS(7-6)	341.588	2 × 10 <sup>7</sup>	Band7, USB	4.3	1.5×2.3, 28.4
C <sup>18</sup> O(1-0)	109.368	2 × 10 <sup>3</sup>	Band3, USB	1.2	3.9×2.3, -6.3
C <sup>18</sup> O(3-2)	328.087	3 × 10 <sup>4</sup>	Band7, LSB	10.0	1.6×1.2, 31.1

表 1: 6 輝線の観測情報と物理的性質

<sup>a</sup>Schinnerer et al. (2000) の観測による

の両方で計算し、両者の  $\chi^2$  を求める。 $\chi^2$  が最小値を与える上記のパラメータを、物理的に尤もらしい値として診断値とした。これを E-knot, W-knot について解析した結果が図 4~5 である。これらの図は、 $\chi^2$  が最小値をとる水素分子柱密度  $N_{\text{H}_2}$  での  $n_{\text{H}_2}$ - $T_{\text{kin}}$  平面をプロットしたものである。青色が濃いほど  $\chi^2$  が小さいことを示しており、この平面内での 3 つの観測値の輝線強度比の Contour (と  $1\sigma$  の Contour) も表している。これより、E-knot, W-knot の両者ともに高密度であることが示された。しかし、運動温度  $T_{\text{kin}}$  に関しては両者で異なっており、E-knot の方が高温 (~100 K) であるという結果が得られた。これは、AGN 中心からほぼ等距離にある 2 つのノット間で、AGN からのショックのような、非対称な加熱機構が働いていることが示唆される結果である。

## 5 Summary & Conclusion

本研究によって達成されたのは次の 3 点である。

- NGC1068 の CND を <sup>13</sup>CO, CS, C<sup>18</sup>O の輝線で空間分解した。
- E-knot における <sup>13</sup>CO(3-2)/<sup>13</sup>CO(1-0) 比は近傍最大規模の星形成領域 30 Dor と同程度に大きい。
- 2 つのノットの物理状態診断により、ノットは高密度であることが示された。さらに E-knot のほうが高温であることから、AGN からの非対称な加熱機構が示唆される。

今回の RADEX 計算では各分子の abundance を固定して計算を行ったが、系外銀河における分子の abundance はばらつきが大きい。今後の課題として、abundance を変化させたときに同様の RADEX 計算を行っても、上記で示唆される結果が得られるかを確認することが挙げられる。また、C<sup>18</sup>O は CND で十分な S/N 比で検出が達成されていない。今後の ALMA の観測で、さらなる高感度かつ高分解能によってこれらの輝線が観測されることが重要である。

## Reference

- Krips, M., Martín, S., Eckart, A., et al. 2011, ApJ, 736, 37
- Kohno, K., Nakanishi, K., Tosaki, T., Muraoka, K., Miura, R., Ezawa, H., & Kawabe, R. 2008, Ap&SS, 313, 279
- Minamidani, T., Tanaka, T., Mizuno, Y., Mizuno, N., Kawamura, A., et al. 2011, ApJ, 141, 73
- Padeli, P. P., Sequist, E. R., & Scoville, N. Z. 1996, ApJ, 465, 173
- Schinnerer, E., Eckart, A., Tacconi, L. J., Genzel, R., & Downes, D. 2000, ApJ, 533, 850
- Tsai, M., Hwang, C., Matsushita, S., Baker, A. J., Espada, D. 2012, ApJ, 746, 129
- Usero, A., García-Burillo, S., Fuente, A., Martín-Pintado, J., & Rodríguez-Fernández, N. J. 2004, A&A, 419, 897
- Van der Tak, F. F. S., Black, J. H., Schöier, F. L., Jansen, D. J., & van Dishoeck, E. F. 2007, A&A, 468, 627

領域名	輝線強度 [Jy/beam km/s]					
	$^{13}\text{CO}(1-0)$	$^{13}\text{CO}(3-2)$	CS(2-1)	CS(7-6)	$\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$	$\text{C}^{18}\text{O}(3-2)$
CE	$0.82 \pm 0.11$	$27.4 \pm 0.98$	$4.24 \pm 0.09$	$9.85 \pm 0.56$	$0.52 \pm 0.11$	$6.82 \pm 1.27$
CW	$0.75 \pm 0.11$	$17.3 \pm 0.98$	$2.44 \pm 0.09$	$3.83 \pm 0.56$	-	-
STB	$5.07 \pm 0.11$	$20.1 \pm 0.98$	$0.98 \pm 0.09$	-	$1.46 \pm 0.11$	$5.61 \pm 1.27$

表 2: 6 輝線の各領域での輝線強度。空欄部分は S/N 比が 3 以下のため使用できない部分である。

領域名	輝線強度比 (輝度温度換算)		
	$^{13}\text{CO}(3-2)/^{13}\text{CO}(1-0)$	CS(7-6)/CS(2-1)	$\text{C}^{18}\text{O}(3-2)/\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$
CE	$3.73 \pm 0.52$	$0.19 \pm 0.01$	$1.44 \pm 0.40$
CW	$2.56 \pm 0.40$	$0.13 \pm 0.02$	$2.44 \pm 0.57$
STB	$0.44 \pm 0.02$	-	$0.98 \pm 0.10$

表 3: 各領域での代表的な輝線強度比。RADEX 解析ではこの組み合わせとは異なる輝線比も使用している。

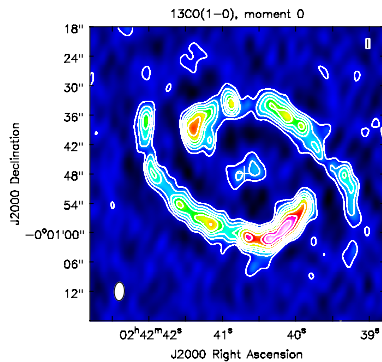


図 2:  $^{13}\text{CO}(1-0)$  の輝線強度マップ

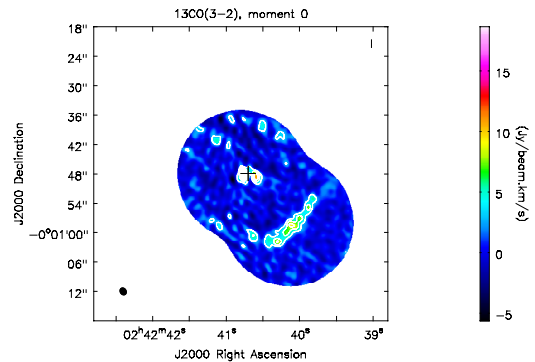


図 3:  $^{13}\text{CO}(3-2)$  の輝線強度マップ

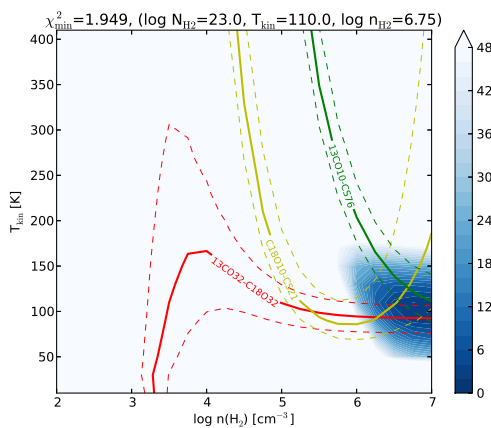


図 4: RADEX の解析結果 (E-knot)。使用した輝線強度比は、 $^{13}\text{CO}(3-2)/^{13}\text{CO}(1-0)$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)/\text{CS}(2-1)$ ,  $^{13}\text{CO}(1-0)/\text{CS}(7-6)$  である。

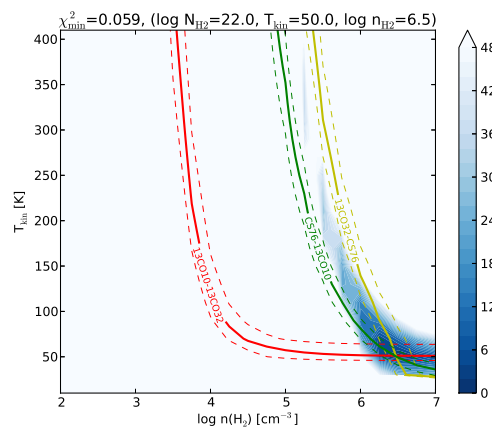


図 5: RADEX の解析結果 (W-knot)。使用した輝線強度比は、 $^{13}\text{CO}(3-2)/^{13}\text{CO}(1-0)$ ,  $\text{CS}(7-6)/^{13}\text{CO}(3-2)$ ,  $^{13}\text{CO}(1-0)/\text{CS}(7-6)$  である。