

ALMA による原始星形成初期段階の高密度分子ガス観測

徳田一起 (大阪府立大学大学院 理学系研究科)

Abstract

分子雲の高密度領域 (分子雲コア) において原始星が形成される。原始星形成瞬間の段階に相当する分子雲コアの状態や性質は形成する星の性質を直接左右する。従って、この段階の分子雲コアの性質を精査することは星形成の研究において重要課題であり、本質的である。そこで我々は、ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 望遠鏡を用いて、小質量原始星形成の初期段階である MC27 の分子輝線および星間微粒子からの熱輻射 (ダスト連続波) の観測を行った。その結果、I. 非常にコンパクトで若い (100 ~ 200 年) アウトフロー、II. 極めて密度の高い ($\sim 10^7$ 個 cm^{-3}) 星なし分子雲コア、III. アーク構造や複数の分子雲コアの存在等が明らかになった。これらの結果は、原始星形成の初期段階では複数の構造体がダイナミックに相互作用し連星系が形成されるといった様相を観測的に初めて提案するものである。

キーワード：星形成-小質量星形成、原始星、アウトフロー、分子雲コア、ALMA

1 Introduction

原始星は分子雲における高密度領域 (分子雲コア) が重力的に収縮することによって形成される。原始星形成の瞬間においてはガス密度が非常に高く、外側から持ち込んだ磁場・角運動量が、連星系の形成やアウトフローに見られる質量放出現象に大きく影響を及ぼし、星の質量もそれらに大きく依存すると考えられる。つまり、原始星形成の瞬間のガスの質量・速度分布を明らかにすることは、星の初期質量や連星系形成など、星形成の根源的な問題を解決することにつながる。MC27 は太陽系で最も近傍に位置する星形成領域おうし座分子雲において最も進化した高密度な ($> 10^6$ 個 cm^{-3}) 分子雲コアである (Mizuno et al. 1994, Onishi et al. 1999, 2002)。これらの先行研究では、中心に向かって密度が高くなっている様子が示唆される (図 1 にガスやダストの分布を示す)。Spitzer 望遠鏡の観測 (Bourke et al. 2006) では、原始星と思われる非常に輝度が弱い天体や、アウトフローが起因の可能性がある散乱光 (図 3) が見られるため、星形成の極めて初期段階にあると考えられる。このような天体の詳細構造の分解は ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) を用いて初めて可能になった。

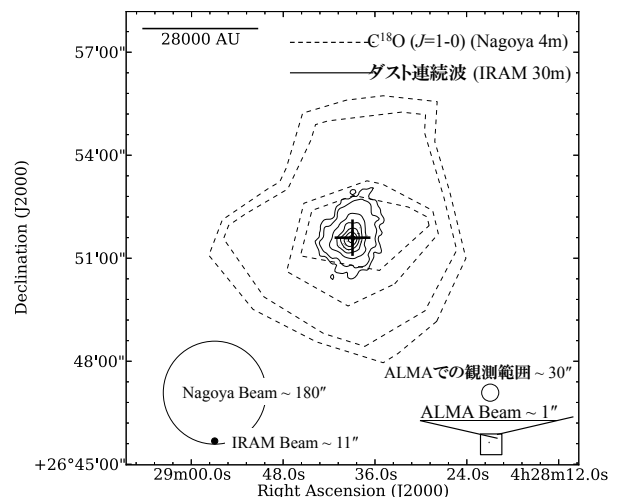


図 1: MC27 における $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ (Onishi et al. 1996 より) とダスト連続波 (Kauffmann et al. 2008 より) の分布および、各観測の分解能の比較。十字マークは Spitzer 望遠鏡で検出された原始星の位置を表す。

2 ALMA Observations

ALMA 望遠鏡 (その初期科学運用である Cycle 0) を用いて MC27 の観測を行った。観測諸元を表 1 に示す。観測されたデータを科学的意義のあるデータに変換する基礎解析は観測所の提供するパッケージ (CASA) を用いて行った。速度グリッドは 0.1 km/s

で解析を行い、分子輝線観測の典型的なノイズレベル (1σ rms) は 10 mJy/beam (~ 0.22 K) となった。尚、ダスト連続波 (星間微粒子からの熱輻射) のイメージは、分子スペクトルが検出されていない周波数帯のフラックスを全て積算することにより作成した。こちらの 1σ rms は 1.2 mJy/beam であった。

表 1: 観測諸元

望遠鏡	ALMA cycle0
観測期間	2012/1, 2012/11
アンテナ台数	16 台 (2012/1), 24 台 (2012/11)
観測輝線	HCO ⁺ (3-2), HCN(3-2), H ¹³ CO ⁺ (3-2), CS(5-4), SiO(6-5), 260GHz 帯連続波
空間分解能	1".1 × 0".8
周波数分解能	61 kHz (= 0.075 km/s)

3 Results & Discussions

図 2 に、MC27 における高密度ガスおよびアウトフローの分布を示す。ダスト連続波の分布を見ると、*Spitzer* 望遠鏡で検出された原始星 (Bourke et al. 2006) 付近に、ピークが 2 つ存在することがわかる。北側のピークは原始星の位置に一致するが、その南側にもう 1 つビーム以上に広がった成分を持つことが分かる。この構造は IRAM-PdBI 干渉計の観測 (Maury et al. 2010) では未検出であったものである。また、この成分は高密度 ($>10^{5-6}$ 個 cm^{-3}) ガストレーサーである、H¹³CO⁺(3-2) の積分強度分布と空間的に良い相関があるため、**極めて高密度のコア**であることが伺える。さらにこのコアは H¹³CO⁺(3-2) のスペクトルの分布より、速度方向に 2 つの成分が存在することが分かった。

ダスト連続波のフラックスより、この高密度ガスの質量を見積もった結果、 $\sim 10^{-3} M_{\odot}$ 程度であり、大きさ 380AU 程度なので、形状が球であると仮定すると、密度は $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ となった。これは、中小質量星形成領域の中でも最も密度の高い星なし分子雲コアであり、内部で原始星第 1 コア (密度 $\sim 10^{11}$ 個

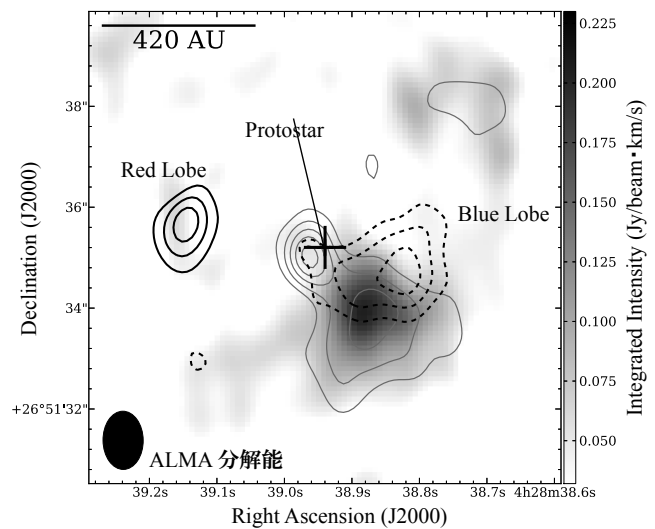


図 2: MC27 における高密度ガスとアウトフローの分布。グレースケールは H¹³CO⁺(3-2) の速度積分強度図。グレーのコントアは 260 GHz ダスト連続波の分布。黒破線および黒実線はそれぞれ HCO⁺(3-2) の青方、赤方偏成分の分布である。十字マークは原始星 (*Spitzer* の観測による) の位置。

cm^{-3}) のような天体が形成されている可能性が示唆される。

また、HCO⁺(3-2) のスペクトルを見ると、青方偏移方向 ($V_{lsr} = 0 \sim 4$ km/s)、赤方偏移方向 ($V_{lsr} = 9.5 \sim 13.5$ km/s) に高速度成分が存在し、この速度に限定して積分した HCO⁺(3-2) の分布 (図 2) は、原始星を中心に同一直線上に分布し、*Spitzer* で確認された散乱光 (図 3) の向きとも一致するため、**原始星アウトフロー**の分布であると考えられる。このアウトフローの年齢をそのサイズと速度より見積もると、**~200 年**となり、形成されてから非常に若い段階と言える。

図 3 に示すのが、HCO⁺(3-2) の分布と赤外線画像の比較である。特筆すべきは、HCO⁺(3-2) の分布に見られる**アーク構造** (大きさ ~ 2000 AU) である。このような構造は、単純な分子ガスの収縮運動では説明できない。

さらに中心天体より半径 ~ 500 AU の範囲に渡って、複数の HCO⁺(3-2) のピークが見られる。このうち上部 2 つに相当するピーク (図中 A,B) では、HCO⁺(3-

2) よりも高い密度領域をトレースする HCN(3-2), CS(5-4)(ピーク A), $\text{H}^{13}\text{CO}^+(3-2)$ (ピーク B) の輝線も検出された。これらおよび、図 2 で示した高密度コア (速度方向に 2 つ) をあわせると、MC27 では少なくとも 4 つ以上の高密度領域が 1000 AU のスケールに渡って分布していることが分かる。

量分布の探査

(2) 中心の高密度コア領域をさらに高い空間分解能 ($\sim 0''.1$) で観測

(3) MC27 と進化段階が近い天体を複数観測し、同様な構造が普遍的に見られるかどうかの検証などを行う。

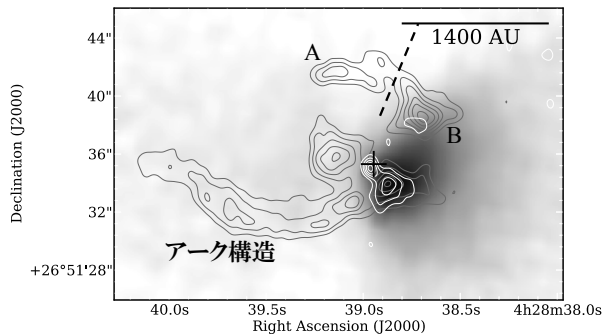


図 3: MC27 における $\text{HCO}^+(3-2)$ の分布と赤外線画像との比較。*Spitzer* 赤外線 ($3.6 \mu\text{m}$) の結果 (グレースケール:色が濃いほど赤外線の強度が強い) に、 $\text{HCO}^+(3-2)$ の速度範囲が $6.8 \sim 7.0 \text{ km/s}$ に相当する分布 (灰色コントア) と 260 GHz ダスト連続波の分布 (白コントア) を重ねたもの。十字マークは原始星 (*Spitzer* の観測による) の位置。

4 Summary & Future Works

MC27 の中心は、原始星の形成が進んでいるが、アウトフローの年齢から察するに星形成の非常に若い段階に相当すると考えられ、形成時の初期条件を色濃く残している系であると思われる。そこでは、星形成の兆候がない非常に密度の高い ($\sim 10^7 \text{ 個 cm}^{-3}$) コアや、2000 AU スケールのアーク構造、複数の分子雲コアが見受けられた。これらは、1 つの分子雲コアが 1 つの原始星を作るといった単純な収縮モデルではなく、星形成の初期条件でさえ非常に複雑で、複数の構造体が相互作用しながら、連星形成を進行させるモデルを観測的に初めて提案するものである。今後は、

(1) ダスト連続波や分子輝線をさらに広がった成分まで観測し、空間的ダイナミックレンジの大きい質