

称号及び氏名 博士(理学) 原田 遼平

学位授与の日付 平成 31 年 3 月 31 日

論 文 名 Formation of High-Mass Stars in an Isolated Environment in the
Large Magellanic Cloud
(大マゼラン雲の孤立した環境における大質量星形成の観測的研究)

論文審査委員 主査 大西 利和
副査 久保田 佳基
副査 三浦 大助

2018年度 博士論文要旨

**Formation of High-Mass Stars in an Isolated Environment
in the Large Magellanic Cloud**

(大マゼラン雲の孤立した環境における大質量星形成の観測的研究)

大阪府立大学 理学系研究科 物理科学専攻 宇宙物理学研究室

原田 遼平

恒星の大部分は大質量星形成領域で集団的に生まれる。大質量星からの星風・紫外線、超新星爆発などは周囲の環境に多大な影響を与え、銀河の進化にも大きな影響を及ぼす。それゆえ、大質量星の形成メカニズムを理解することは極めて重要な課題である。しかし、現在のところ大質量星の形成メカニズムについては十分な理解が得られていない。その観測的な要因としては1)大質量星の絶対数が少なく、進化のタイムスケールも短いため、原始星形成段階に対応するサンプル数が少ない 2)太陽系近傍の大質量星形成領域が少なく高い空間分解能の観測が難しいこと、3)銀河系内の大質量星形成領域の大半は銀河面に沿って分布しており、様々な天体が同じ視線上に重なってしまうこと、4)分子雲までの距離の不定性に伴う物理量の推定のエラーが大きいこと、などが挙げられる。これらのことから、銀河系内の典型的な大質量星形成分子雲の統計的な性質は未だによく分かっていないことが多い。大質量星が形成されるメカニズムとしては、1. 原始星への質量降着率が劇的に増加するか、2. 誕生時には小質量であるが、その後に周囲のガスの降着により質量が増加するか、が考えられている。特に前者の場合は、ガスの実効線幅を大きくするメカニズムが必要であり、分子雲同士の衝突や電離水素領域・超新星爆発などによるガスの圧縮がその原因として考えられる。この場合、大質量原始星付近で乱流が大きくなっていることが予想されるが、大質量星形成領域の多くは銀河面に位置することから、両形成モデルを検証することは困難であった。

系外銀河は、銀河の中にある様々な天体までの距離はほぼ同じとして良く、正面向きの銀河であれば様々な天体の重なりが少ないため、銀河全域にわたる分子雲やそこでの星形成活動の均質なデータを得ることが可能である。大マゼラン雲(Large Magellanic Cloud, 以下

LMC)は我々から最も近い銀河の一つであり、その距離は約 50 kpc である。LMC は星形成が非常に活発で、我々に対してほぼ正面を向いていることから、銀河全体における分子雲から星形成への過程を調べる上で、理想的な天体の一つであるといえる。そのため、これまで CO を用いた分子雲の研究が活発に行われてきた。南米チリに設置されていた名古屋大学の「なんてん」望遠鏡により、40 pc の分解能で銀河全域にわたる巨大分子雲の分布がはじめて明らかになった(Fukui et al. 1999, 2008)。ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)の登場以前は空間分解能が不足し、分子雲の詳細な観測は行われてこなかったが、近年 ALMA によって、星形成の直接の現場である分子雲コアスケールの観測が行われている。しかし、これらの研究は大規模で活発な星団での大質量星形成領域にフォーカスされたものであり、より小さなスケールで起こっている星形成の研究はなされていなかった。

現在の星形成の理論では、1.大部分の星は巨大分子雲の中において集団で形成される、2.大質量原始星の進化のタイムスケールは母体となる分子雲の散逸タイムスケールと比較して短い、3.星形成は非効率である(c.f., Zinnecker & Yorke 2007)、ことが言われている。星の質量頻度分布を仮定すると、1つの大質量星には多くの小質量星も同時に誕生しており、大質量原始星は巨大分子雲(10^5 太陽質量以上)に付随しているはずであると考えられてきた。最近、LMC において、*Spitzer*, *Herschel* の赤外線衛星の観測により、「なんてん」で観測された巨大分子雲から離れている孤立した大質量原始星が多く存在することが報告されているがその起源は未だ知られていない。多くの大質量星は、多数の電離水素領域や超新星残骸等とも共存しているため、非常に複雑な系の中で形成される。孤立した大質量星形成領域は、比較的単純な系であり、形成条件を調べるのに適しているが、その母体となる分子雲の情報は得られていなかった。私は「なんてん」で観測された巨大分子雲から 200 pc 以上離れた「孤立した」大質量原始星を選定し、分子ガスの付随を調べるために、原始星方向のマッピング観測を単一鏡電波望遠鏡である Mopra 望遠鏡を用いて 30" (LMC の距離で 7 pc) の分解能で行った。

観測結果から CO 放射が原始星方向でコンパクトに分布しているものが見られた。このことは、非常に小さな分子雲(7 pc 以下、 10^4 太陽質量以下)が存在していることを示しており、この領域において小さな分子雲から大質量星が生まれた可能性が極めて高いことを示唆した。また、孤立した大質量原始星の統計的な調査を行うため、ダストからの熱放射を示す波長 350 μm での flux が 200 mJy を越えるすべての(37 個)孤立大質量原始星方向の観測を Mopra 望遠鏡で行った。そのうち 8 割で CO を検出し、多くがコンパクトな分子雲であり、CO 強度と 350 μm フラックスとの間に非常に良い相関が見られた。ダストは原子ガスと分子ガスの中に一定の割合で存在すると考えられるが、CO 強度と 350 μm フラックスの

相関が良いという事実から、350 μm の波長帯の観測では星の周りの星間ガスの中のダストからの放射を捉えており、原始星の周りに母体となった分子ガスがまだ残っていることが考えられる。

次に、分子雲の詳細な分布と物理量も明らかにするために高感度・高分解能の ALMA を用いて観測を行った。分解能は 1.5" で LMC の距離で 0.4 pc であり、分子雲を十分に空間分解可能である。Mopra 望遠鏡で観測した天体のうち 10 天体の孤立した大質量原始星方向を CO 同位体輝線等を用いて観測した。その結果、10 個の原始星すべてでサイズが数 pc、質量が数千太陽質量（最も軽いものは 300 太陽質量、最も重いものは 6,000 太陽質量）のコンパクトな分子雲が付随していることを確認した。銀河系内の典型的な小質量星形成領域である、牡牛座分子雲の総質量よりも小さく、分子ガスを効率良く消費して大質量星が形成されたことを示している。

星形成は主に分子ガスの重力と乱流のバランスで決まる。乱流によって支えることのできる質量との比較から、分子ガスは重力的に束縛されていることが確認された。 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$, $^{12}\text{CO}(J=2-1)$, $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線を用いて輻射励起計算を行った結果、分子ガスの典型的な密度は $6 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, 20 K と見積もられた。これは銀河系内の大質量星形成領域よりも高く、この高温・高密度は LMC の低金属量環境における CO の光解離を反映していると考えられる。このような環境で水素分子の量を良くトレースできると考えられているのが、炭素原子からの [CI](1-0) スペクトルである (e.g., Papadopoulos and Greve 2004)。ALMA で 10 個の孤立した大質量原始星に向かって、3" (0.7 pc) の分解能で [CI] の観測を行った。その結果、CO と [CI] の対局的な分布はよく似ていることがわかった。一方、両者の柱密度の比、 $N[\text{CI}]/N[\text{CO}]$ は、0.5 に及ぶ物もあり、銀河系の星形成分子雲よりも有意に高く、銀河系の低密度分子雲で見られる比に近い。これは、ダストが少ないために紫外線が分子雲の奥まで入り込み、銀河系の巨大分子雲等よりも光解離が進んでいることを示している。

星形成の活発度合いを調べるため、標準的な星質量頻度分布を仮定して、分子ガス質量に対する星団質量の割合である星形成効率を計算したところ、数%から最大で 40%であることがわかった。このことはコンパクトな分子雲から星形成が非常に効率的に起きていることを意味し、大質量星が選択的に形成される何らかのメカニズムが働いていると思われる。分子輝線のスペクトルの速度線幅を調べたところ、原始星方向で線幅が大きくなっており、原始星方向で大きな乱流状態をもっていることがわかった。原始星形成初期段階においてはアウトフローと呼ばれる質量放出現象が知られているが、その線幅の増加が大質量原始星からのアウトフローの影響によるものなのかどうかを調べるために分子ガスとアウトフロ

ーが持つ運動量との比較を行った。その結果、線幅の増加は原始星からのアウトフローの寄与だけでは説明できず、星が形成される前から分子ガスが乱流状態にあったと考えられる。分子ガスの速度構造を調べたところ、2天体に関しては、異なる速度をもつひも状の分子ガスが存在し、その交点で大質量星が誕生していた。同様のメカニズムは大規模な大質量星形成領域でも見られており (e.g., Fukui et al. 2015, Saigo et al. 2017)、孤立した環境においても分子ガス同士の相互作用が大質量星を形成するための主要なメカニズムになっていることが考えられる。しかし、他の天体では、CO ガス同士の相互作用の兆候は見られなかった。孤立した大質量原始星の多くは、*Herschel* の 350 μm の波長帯で捉えられるダスト分布の端に存在しており、ダスト分布は CO 分布よりもはるかに広がって存在している。ダスト分布の多くは CO では見えておらず、主に水素原子ガスである低密度ガス領域であると考えられる。孤立した大質量原始星の多くは水素原子ガスで見られる、多数の超新星爆発により形成された数百 pc スケールのスーパーシェルに沿って分布している、という事実から、過去の爆発イベントによる密度の低いガス同士の相互作用が活発な星形成活動の原因となっている可能性が高い。

・ 雑誌

- 1) Formation of High-Mass stars in an isolated environment in the Large Magellanic Cloud, R. Harada, T. Onishi, K. Tokuda, S. Zahorecz, A. Hughes, M. Meixner, M. Sewiło, R. Indebetouw, O. Nayak, Y. Fukui, K. Tachihara, K. Tsuge, A. Kawamura, K. Saigo, T. Wong, J. Bernard and I. W. Stephens, Publications of the Astronomical Society of Japan, accepted
- 2) High-mass Star Formation Triggered by Collision between CO Filaments in N159 West in the Large Magellanic Cloud, Y. Fukui, R. Harada, K. Tokuda, Y. Morioka, T. Onishi, T. Kazufumi, A. Ohama, Y. Hattori, O. Nayak, M. Meixner, M. Sewiło, R. Indebetouw, A. Kawamura, K. Saigo, H. Yamamoto, K. Tachihara, T. Minamidani, T. Inoue, S. Madden, M. Galametz, V. Lebouteiller, N. Mizuno, C. Chen, The Astrophysical Journal Letters, 807, 1, article id. L4 (6 pp) (2015)
- 3) Kinematic Structure of Molecular Gas around High-mass Star YSO, Papillon Nebula, in N159 East in the Large Magellanic Cloud, K. Saigo, T. Onishi, O. Nayak, M. Meixner, K. Tokuda, R. Harada, Y. Morioka, M. Sewiło, R. Indebetouw, K. Torii, A. Kawamura, A. Ohama, Y. Hattori, H. Yamamoto, K. Tachihara, T. Minamidani, T. Inoue, S. Madden, M. Galametz, V. Lebouteiller, C. Chen, N. Mizuno, Y. Fukui, The Astrophysical Journal, 835, 108 (11pp) (2017)

- 会議録

Investigating formation of isolated intermediate/massive YSOs in the LMC, R. Harada, T. Onishi, A. Hughes, M. Meixner, M. Sewilo, R. Indebetouw, O. Nayak, K. Tokuda, Y. Morioka, Y. Fukui, A. Kawamura, T. Wong, J. Bernard, IAU General Assembly, Meeting #29, id.2254727, (Honolulu, USA, 2015)

学位論文審査結果の要旨

学位論文題目

Formation of High-Mass Stars in an Isolated Environment in the Large Magellanic Cloud
(大マゼラン雲の孤立した環境における大質量星形成の観測的研究)

提出者氏名 原田 遼平

恒星の大部分は、10 万太陽質量を超える巨大分子雲の中で集団的に形成される。巨大分子雲は複雑な階層構造を持ち、異なる進化段階を持つ様々な質量の原始星がその中で生まれている。太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星の主要な形成場所となっているが、環境が複雑であること、進化が非常に早いことから、大質量星形成のメカニズムの解明は困難であった。最近の巨大分子雲の電波観測により、分子雲同士の相互作用が大質量星形成の鍵であることが示されつつある。一方、巨大分子雲から遠く離れた孤立した環境下でも、大質量星原始星が数多く観測されつつあるが、その起源は謎のままであった。

本研究は、大マゼラン雲 (LMC) における「孤立した」大質量原始星に付随する分子雲を詳細観測することにより、それらの形成メカニズムに迫ったものである。系外銀河である LMC においては銀河全域を均一に観測が可能であり、*Spitzer*, *Herschel* 衛星の観測により、巨大分子雲から離れている孤立した大質量原始星が多く存在することが報告されていた。最初に、これら的大質量原始星方向を、*Mopra 22m* 鏡で高感度観測を行うことにより、1 万太陽質量程度以下のコンパクトな母体分子雲が付随していることを確認した。さらに、10 天体に対して、ALMA を用いた一酸化炭素分子同位体での高空間分解能観測 (分解能 0.4pc) を行った。すべての原始星にコンパクトな分子雲が付随しており、広がり数は数 pc 以下、質量は数百から数千太陽質量であった。水素分子個数密度が約 6000 個/cm²、運動温度が 20-30K と高密度・高温である。これは、LMC の重元素量が少ないため、恒星からの遠紫外線が、分子雲の奥深くまで達していることが原因と考えられる。この結果は、炭素原子/一酸化炭素比が、銀河系の分子雲と比較して高いという本観測の結果とも整合している。また、星形成率は非常に高く、効率的に星が形成されていることがわかった。その原因として、分子雲同士の相互作用や、過去の超新星爆発などにより、乱流の大きい分子雲が形成され、さらに効率的な星形成が促された事を明らかにした。

以上のように本研究は、孤立した環境下における大質量星原始星の形成メカニズムを ALMA による大マゼラン雲での観測を通して、はじめて明らかにしたものであり、大質量星形成のメカニズム解明の理解に大きな影響を与えるものと考えられる。

以上により、本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものとして判断した。

主査 大西 利和
久保田佳基
三浦 大助