

分子雲衝突によって誘発される 大質量星形成

鳥居 和史・古川 尚子
大浜 晶生・福井 康雄



鳥居

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

e-mail: torii@phys.nagoya-u.ac.jp

e-mail: naoko@phys.nagoya-u.ac.jp

e-mail: ohama@phys.nagoya-u.ac.jp

e-mail: fukui@phys.nagoya-u.ac.jp

太陽の8倍以上の重い恒星（大質量星）の形成メカニズムの解明は、天文学の最も重要な課題の一つです。観測的困難さもあるが、理解が立ち後れているこの課題ですが、分子雲同士の衝突が、非常に重要な役割を果たしていることが、最近の筆者らの研究からわかってきました。筆者らは、NANTENおよびNANTEN2 4 m 電波望遠鏡を用いた分子雲の観測から、三つの領域（Westerlund 2, NGC 3603, 三裂星雲M20）で、分子雲衝突によって大質量星が形成されていることを発見しました。本稿では、これら三つの領域での観測結果を詳しくご紹介するとともに、系外銀河への発展も含めた今後の展望をお伝えしたいと思います。

1. はじめに

太陽の8倍以上の質量をもつ恒星を大質量星と呼びますが、この大質量星は星風と紫外線、さらには終末期の超新星爆発によって、周囲の星間物質に強い影響を与えます。その形成と進化のメカニズムを解明することは、銀河進化の解明にもつながる天文学の重要な課題の一つです。しかし、依然として、この課題の多くが謎に包まれたままです。大質量星が太陽系から数百pc（パーセク）以内のごく近傍に存在しないことや、その活動性ゆえに、母体の星間分子雲を散逸してしまうことなど、観測の難しさがその原因として挙げられます。一方で、太陽程度の小質量星は、太陽系の近傍にも多く分布しており、母体分子雲の状態も保存されるため、非常によく調べられ、すでに標準的なモデルが確立しています¹⁾。

大質量星の形成メカニズムとして、次の二つが議論されています。一つは小質量星と同様に、降着円盤からの質量降着によって形成するシナリオです。このケースの問題は、高い降着率をどう実現するかという点です。小質量星の形成に必要なガスの降着率は、 $10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$ 以下ですが、大質量星の形成には、 10^{-4} – $10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$ という非常に高い値が要求されます²⁾。もう一つは、恒星同士が衝突して合体することで形成するというシナリオですが、こちらも、 10^6 個/ pc^3 という非常に高い星の密度が必要であるという議論があります³⁾。いずれのケースも星間空間のごく狭い領域に、大量のガスもしくは星を集中させる必要があります。この課題に対し、最近の筆者らの研究から、分子雲同士の衝突が、非常に重要な役割を果たすことが明らかになってきました。このことは、大質量星形成の研究において、新たな

局面を切り拓くものです。本稿では、この最新の研究結果をお伝えしたいと思います。

2. 観測結果

私たちが発見した分子雲同士の衝突によって大質量星が形成された領域は、Westerlund 2, NGC 3603, 三裂星雲 (M20) の三つです。Westerlund 2とNGC 3603はO型星10個以上を含む巨大星団です。巨大星団は1 pc程度の狭い領域に若い大質量星を多数形成している非常に特徴的な星団です。一方で、M20は単一のO型星を中心とする天体です。巨大星団とは大きく規模が異なりますが、形成過程を解明するにあたって、ごく狭い範囲 (1 pc以下) に、いかにガス (もしくは星) を集中させるかという点では、共通した問題をもつと言えます。また、これら三つの天体は、いずれも数100万年以下と、非常に若い天体であることも大きな特徴です。私たちは、NANTENおよびNANTEN2による分子雲観測の結果から、これら三つの領域すべてで、巨大星団もしくはO型星に付随する二つの分子雲を検出しました。これらの分子雲は、互いに10–20 km/sと

いう重力的に束縛できない大きな速度差をもって、います。そこで、筆者らは、二つの分子雲が過去に衝突することによって星団が形成されたとするシナリオを提案しました。衝突によって局所的に分子雲を強く圧縮し、通常の自発的収縮では形成できない大質量星を形成するというシナリオです。この説では、二つの分子雲がもつ大きな速度差は、衝突以前の両分子雲の相対速度をそのまま表していると考えられます。次から、この三つの例について詳しくみていきます。

2.1 Westerlund 2

Westerlund 2 (ウェスタルンド2) は、わずか半径1 pcの空間に、合計1万 M_{\odot} の星が集中する、ミニ球状星団とも呼ぶべき巨大星団です。筆者らは、名古屋大学が南米チリ共和国のアタカマ高地 (標高約4,800 m) に所有する、NANTEN2 4 m望遠鏡を用いたCO分子の回転遷移輝線 $J=2-1$ と $J=1-0$ の観測から、このWesterlund 2方向に分布する二つの分子雲を発見しました (図1)。二つの分子雲は、15 km/s以上の大きな速度差をもつため (図1b)、これらが共に星団に付随しているかどうか大きな焦点でした。そこで、

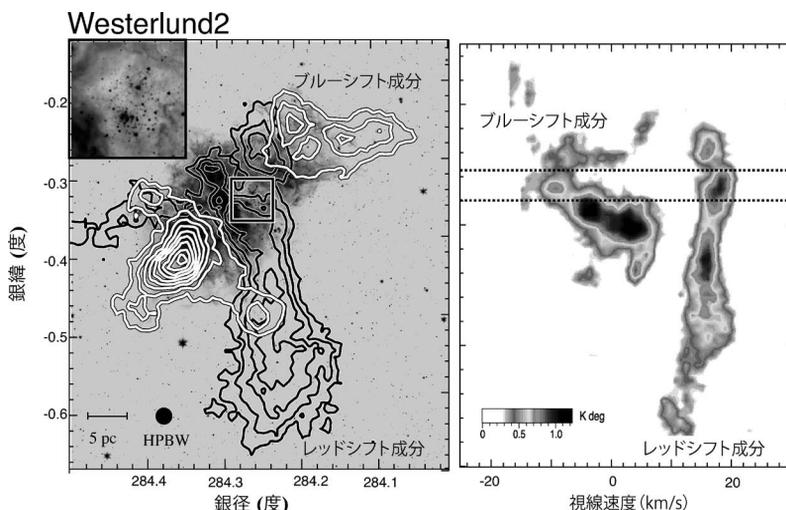


図1 (a) イメージ: Spitzer衛星によるWesterlund 2の8 μm イメージ。コントア: NANTEN2によるCO $J=2-1$ の分布。左上は図中中央の四角で示した星団付近の拡大図。(b) CO $J=2-1$ の銀緯-速度図³⁾。積分範囲は銀経282.2°から282.4°。

筆者らは、まず二つの分子雲が周囲のH II領域と形態的によく対応することを示しました⁴⁾。さらに、観測されたCO $J=2-1$ 輝線と $1-0$ 輝線の強度比を調べました⁵⁾。こうすることで分子雲がどれだけ励起されているかがわかります。すると、この比が星団方向で有意に高いことがわかりました。また、LVG解析を用いることで⁶⁾、比の高い星団付近の領域で、両分子雲の温度が有意に上昇していることを明らかにしました⁵⁾。したがって、この二つの分子雲は、共に星団に付随していると考えられ、星団の母体分子雲である可能性が

高いと言えます。ここで、両分子雲は共に巨大分子雲であり、全質量は20万 M_{\odot} にも達しますが、15 km/sの速度分散を半径10-20 pcの距離で重力的に束縛するには、50-100万 M_{\odot} もの質量が必要になり、1桁足りません。したがって、この二つの分子雲は、共に星団に付随していながら、重力を大きく超える相対速度で運動しているということになります。Westerlund 2では超新星爆発の発生は知られておらず、星風による膨張運動でこの速度差を解釈するにも、エネルギーが足りません。そこで、筆者らは、この二つの分子雲が、相対速度15 km/s以上で衝突し、それにより巨大星団の形成がトリガーされたというシナリオを提案しました^{4),5)}。このシナリオを採用することで、二つの分子雲の星団への付随と、大きな速度差という二つの特徴を、矛盾なく説明することができます。

2.2 NGC 3603

NGC 3603は、合計1万 M_{\odot} の星が、半径1 pc以内に集中する、銀河系内ではWesterlund 2に並ぶ巨大星団です。年齢は約200万年と若く、赤外線星雲(H II領域)を伴っていることが特徴です。筆者らは、NANTEN2を用いたCO $J=1-0$ 輝線と $J=2-1$ 輝線の観測を実施し、大きな速度分散(約20 km/s)をもつ二つの分子雲が、星団方向に存在することを発見しました(図3)。Westerlund 2での研究と同様に、この二つの分子

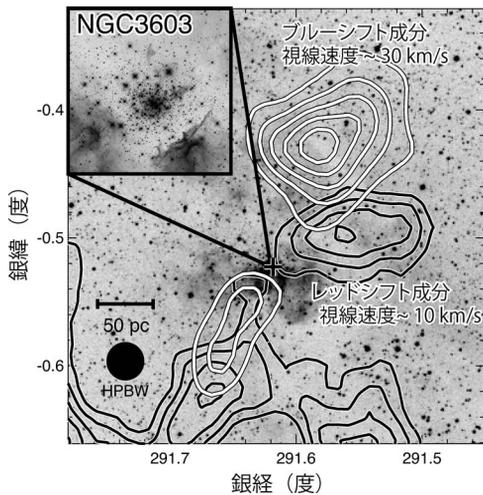


図2 イメージ: NGC 3603 付近の可視光写真. コントア: NANTEN2によるCO $J=2-1$ の分布. 左上はハッブル衛星による星団付近の写真 (credit: NASA, ESA, Hubble Heritage Team).

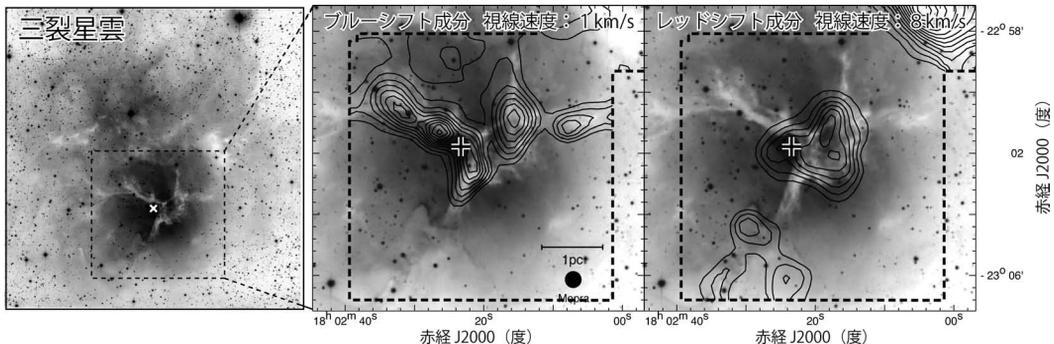


図3 (a) M20の可視光の写真. (b), (c) 可視光の写真にMopra望遠鏡によるCO ($J=1-0$) 輝線の分布を重ねたもの. 図中央の十字はO型星の位置を示す.

雲でも $^{12}\text{CO } J=2-1/J=1-0$ の輝線強度比を調べたところ、二つの分子雲両方で、この比が顕著に高くなっていることがわかりました⁷⁾。したがって、二つの分子雲は共に星団に付随しており、星団の母体であると考えられます。この二つの分子雲はやはり巨大分子雲ですが、その質量(約10万 M_{\odot})では、この20 km/sという速度差を重力的に束縛することはできません。そこでWesterlund 2と同様に、分子雲同士の衝突によって、NGC 3603が形成されたというシナリオが考えられます。

2.3 三裂星雲 (M20)

M20は三裂星雲としてよく知られており、鮮やかな輝線星雲と、フィラメント状の暗黒星雲が印象的な天体です。この天体は、500 M_{\odot} 程度の散開星団と分類されますが、中心にはO7.5型星(約20 M_{\odot})があり、その周囲0.2 pc以内には、B型星を含む5個の早期型星が集中しています⁸⁾。また、年齢は数十万年とたいへん若いのが特徴です。筆者らは、NANTEN2を用いたCO $J=2-1$ 輝線の観測から、このO型星の方向で、二つの分子雲がO型星に付随していることを発見しました⁹⁾。この二つの分子雲をオーストラリアのMopra望遠鏡で詳しく調べた結果が図3です。この二つの分子雲は1,000 M_{\odot} の小質量分子雲です。ここでもCO $J=2-1/J=1-0$ 強度比を調べることで、二つの分子雲が共にO型星に付随していることがわかりました⁹⁾。二つの分子雲の速度差は約7 km/sですが、やはりこれを重力的に束縛するには、質量が足りません。したがって、筆者らは、このM20でも、Westerlund 2, NGC 3603と同様に、分子雲同士の衝突が中心のO型星の形成を誘起した可能性が高いと結論づけました。Westerlund 2とNGC 3603のミニチュア的な天体であると言えます。また、図3を見ると、暗黒星雲と分子雲の比較から、ブルーシフト成分が私たちに近い側に、レッドシフト成分が星雲の内部か後方に位置することがわかります。これは二

つの分子雲が互いに遠ざかっていることを意味しており、分子雲が衝突した後の様子をみていると考えると矛盾しません。ここで特筆すべきは、その星形成効率の高さです。一般に、大質量星の形成には数十万 M_{\odot} の巨大分子雲が必要とされていますが、ここでは約1,000 M_{\odot} という非常に小さな分子雲が、O型星を形成しています。M20に含まれる星の大部分は、中心のO型星とともに形成されたと考えられるため¹⁰⁾、これを踏まえて星形成効率を計算すると、約20%と非常に高い数字となります。分子雲衝突による大質量星形成が、いかに効率良く行われるかを示唆する結果です。

3. 分子雲衝突による大質量星形成のシナリオ

ここまでで、分子雲衝突によって大質量星形成が誘発されたと思われる3領域についてみてきました。現在、筆者らは、これらの天体のさらに詳しい解析を進めていますが、一つ興味深い結果をご紹介しますと思います。NGC 3603とM20において、二つの母体分子雲をつなぐ、大きな速度分散(10-20 km/s)をもつ成分が存在することがわかったのです。冒頭で述べたように、ガスの降着で大質量星を形成するには、非常に高い降着率が必要になります。分子雲同士の衝突により、大きな速度分散をもつ乱流が励起されたとすると、降着率はおおむね速度の3乗に比例すると考えられます。これは速度分散が2-4倍大きくなると、降着率は1-2桁大きくなることを意味します。この考えに従うと、観測された大きな速度分散が、大質量星形成に本質的に寄与している可能性が考えられます。しかし、これはまだ想像の範囲を超えませんので、今後はさらに詳細な観測を実施するとともに、数値シミュレーションとの比較を通して、詳しく調べていくことが重要です。

つづいて、分子雲衝突によって大質量星が形成された後の段階を考えます。ここまでで紹介して

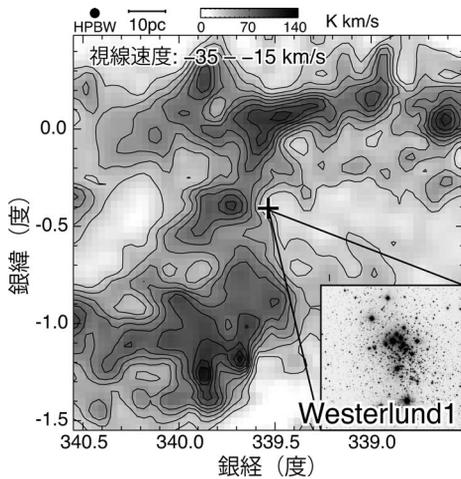


図4 Westerlund 1 付近のNANTEN2によって得られたCO $J=2-1$ 輝線の分布。中央の十字が星団の位置を示し、右下に星団の可視光写真を示した。

きた3天体は、どれも年齢が数100万年以下の若い天体です。O型星は、強い紫外線と星風を放出し、彼らの母体であった分子雲を破壊してしまうため、分子雲衝突によって形成された大質量星があっても、年齢が1,000万年程度になると、すでに、その母体分子雲は見られない可能性があります。その場合、速度分散をもつ分子雲が、大質量星付近で、空洞を作りながら周囲を覆っているか、もしくは、すべて散逸してしまい、後には何も残っていないという状態が想像できます。

このような進化の後期段階と思われる状態を、筆者らは、Westerlund 1で発見しました。Westerlund 1は、Westerlund 2をしのぐ巨大星団ですが、年齢が約500万年とやや古く、星団の周囲にはH II領域も赤外線星雲も存在していません。筆者らはNANTEN2の観測データを調べることで、数個の巨大分子雲が、20 km/s程度の速度分散をもちながら、星団を覆うように分布し、星団の近傍10 pcには、分子雲が分布していないことを明らかにしました(図4)。これは、散逸によって分子雲の空洞ができていると考えて矛盾のない結果です。

以上を踏まえ、分子雲衝突による大質量星形成のシナリオを整理すると、以下ようになります。最初に相対速度10-20 km/sをもつ二つの分子雲が衝突します。すると、強いガスの圧縮と乱流が起こり、大質量星が誕生します。大質量星は、誕生とともに、強い紫外線と星風を放出し、母体である分子雲を破壊します。1,000万年程度で、大質量星周囲1-10 pcの分子雲をすべて破壊し、後には空洞が残る、というのが一連の流れです。

4. まとめと今後の展望

以上、筆者らの観測から明らかになった分子雲衝突によって作られた大質量星の例と、考えられる形成シナリオについてご紹介してきました。今回取り扱った三つの天体は、どれも中心集中度の高い天体です。したがって、分子雲衝突は、このような大質量星を形成する特性があると考えられます。若い巨大星団は、銀河系内で7個しか存在しない非常に稀な天体ですが¹¹⁾、M20のような星団は、非常に数多く分布していると考えられます。このことは、分子雲衝突は、普遍的な現象であり、さまざまな規模の星団の形成に大きく寄与している可能性があることを意味します。これを確かめるには、より多くの分子雲衝突のサンプルを、観測的に取得することが重要です。

今後、筆者らは、銀河系内の巨大星団や、その他の中心集中度の高い星団に対する、大規模な分子雲観測を実施し、このシナリオを系統的に解明することを検討しています。また、同様の観測を系外銀河にも適用していきます。大小マゼラン雲を含む局所銀河群には、巨大星団が約30個分布していることが、明らかになっています¹¹⁾。銀河系内の巨大星団は、依然として少数に限られるため、サンプル数を増やす意味でも、視点を系外銀河に向けることは重要です。この観測にはALMA望遠鏡が非常に大きな力を発揮すると期待しています。

また、観測から得られた結果を、理論計算と綿密に比較することは、とても重要です。今回の筆者らの結果からは、大まかなシナリオをくみ取ることができましたが、実際にどのような物理過程で、分子雲同士の衝突から、大質量星形成が作られるのかは、推測の枠を出ません。そこで、大質量星形成のさまざまな進化段階における、分子雲の物理状態（温度・密度・形状・速度構造）を観測から明らかにし、この情報と理論の数値計算とを詳細に比較することで、具体的な物理過程を明らかにしていくことを考えています。

以上のような分子雲衝突による星形成メカニズムは、天文学の大きな謎である球状星団の形成にも応用できる可能性をもっています。例えばアンテナ銀河（触覚銀河）では、銀河同士の衝突が大規模な星形成を誘発したと考えられています。これが原始銀河での球状星団の形成をもたらしたとするアイデアもあります¹²⁾。その意味でも、今回、筆者らの研究から明らかになった分子雲衝突による大質量星形成が、若い宇宙において銀河進化に決定的な影響を与えた可能性も考えられます。このように、この研究は将来的に非常に多岐にわたる発展が期待される、新たな研究領域です。また、いずれ皆様に研究の進展をご報告できればと考えています。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果は、名古屋大学大学院理学研究科天体物理学研究室の皆様と、NANTEN2計画に携わってこられた方々の力によるものです。また、本研究は名古屋大学大学院理学研究科グローバルCOEプログラム「宇宙基礎原理

の探求」による支援をいただきました。皆様方に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Shu F. H., Adams F. C., Lizano S., 1987, ARAA 25, 23
- 2) Wolfire M. G., Cassinelli J. P., 1986, ApJ 310, 207
- 3) Zinnecker H., York H. W., 2007, ARAA 45, 481.
- 4) Furukawa N., et al., 2009, ApJ 696, 115
- 5) Ohama A., et al., 2010, ApJ 709, 975
- 6) Goldreich P., Kwan J., 1974, ApJ 189, 441
- 7) Fukui Y., et al., 2012, in preparation
- 8) Yusef-Zadeh F., Biretta J., Geballe T. R., 2005, AJ 130, 1171
- 9) Torii K., et al., 2011, ApJ 738, 46
- 10) Rho J., Lefloch B., Reach W. T., Cernicharo J., 2008, in ASP Conf. Ser. 5, Handbook of Star Forming Regions, Vol. II, ed. B. Reipurth (San Francisco, CA: ASP), 509
- 11) Portegies Zwart S., et al., 2011, ARAA 48, 431
- 12) Wilson C. D., et al., 2000, ApJ 542, 120

Triggered High Mass Star Formation via Cloud-Cloud Collision

Kazufumi TORII, Naoko FURUKAWA,
Akio OHAMA, and Yasuo FUKUI

Graduate School of Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601,
Japan

Abstract: Understanding the formation of high-mass stars is an important issue in modern astronomy. It is found that cloud-cloud collision plays an important role on the issue from our recent observational studies with NANTEN2 on three clusters, Westerlund 2, NGC 3603 and the Trifid Nebula. The suggested scenario has a possibility to be ubiquitously applied to many high-mass star objects with a wide mass range. In this article we introduce our results in the three objects and future prospects.