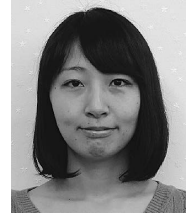


銀河系の外縁部で探る銀河形成初期の星生成

泉 奈都子

〈国立天文台 チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: izumi.natsuko@nao.ac.jp



銀河系の外縁部は、銀河系の中にありながらいまだに銀河系の形成初期の環境を残す非常に興味深い領域である。しかし、その希薄で静穏な環境ゆえこれまでほとんど注目を浴びてこなかった領域でもあった。そこでわれわれは優れた感度をもつWISE (Wide-Infrared Survey Explorer) 衛星による赤外線観測データと、5大学電波天文台 (Five Collage Radio Astronomical Observatory; FCRAO) の探査により検出された分子雲データを用いて外縁部における星生成領域探査を行い、約700個もの星生成領域候補を新たに同定した。この数は既知の星生成領域の20倍以上であり、これにより外縁部における星生成の統計的な議論が初めて可能となった。そこで手始めに分子ガスが星に変換される効率を調べた結果、その効率は原子ガスの密度や金属量などが異なる環境下でも大きく変化しないことが示唆された。ここで仮定しているいくつかは今後の検証が必要なものの、周囲の環境の変化に左右されない統一した星生成メカニズムの存在を示唆したことになる。

1. 銀河形成初期の星生成

星は銀河の主要な構成要素であり、銀河の進化の歴史はすなわちその内部に存在する星の生成の歴史とも言うことができる。この数十年における観測衛星や大型望遠鏡の台頭により、非常に多くの星生成領域が観測されるようになり、その特徴が明らかにされてきた。星の生成プロセスは大雑把に言うと、星間空間を漂う原子雲（原子ガスの塊）が圧縮されて分子雲（分子ガスの塊）になり、さらに分子雲が圧縮されて最終的に星に至ると考えられている。そこで、単位時間あたりの星の生成率である「星生成率」や、原子ガス、分子ガスが星に変換される効率である「星生成効率」などが星の生成過程を示すパラメータとして求められている。特に星生成率と「ガス密度」*¹には強い相関があることも知られている^{1),2)}。

これまではオリオン星雲などをはじめとした太陽近傍の星生成領域における多数の観測により、いわゆる“現在の銀河系”における星生成メカニズムが明らかにされてきた。しかし、銀河の進化の中で特に重要な“銀河形成初期”についてはいまだ不明確な点が多い。これは、ガスから銀河が生成された過程が殆ど100億年前（赤方偏移 z が2以上）に起こったため、その時代の光を発する遠方の銀河に対して太陽近傍の星生成領域と同様の観測を行うには空間分解能と感度が不足する多くの困難があるためである。銀河形成初期はガス密度やヘリウムより重い元素の存在比率を示す「金属量」が太陽近傍と比較して低い環境を持っていたと考えられている。この環境下においてはガス密度の減少に伴い、星生成率、星生成効率が急激に減少することが知られているが^{3),4)}、上記の理由によりその原因は未だ明らかにされていない。

*1 本稿においては、原子ガス、分子ガスと明言せずにガスとのみ記述している場合は原子ガスと分子ガス両方含む場合を意味している。

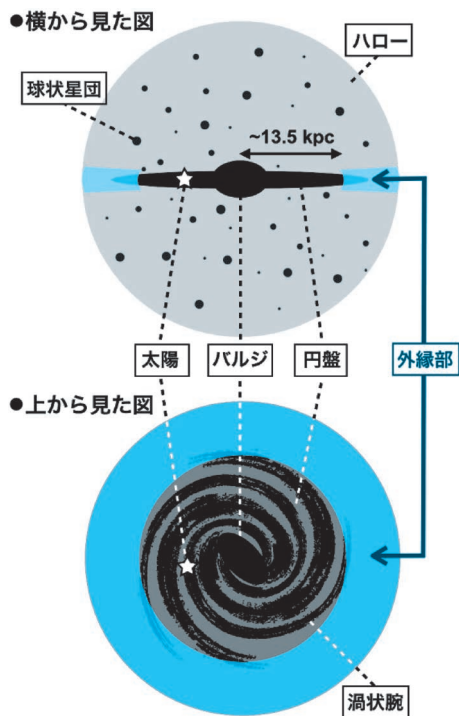


図1 銀河系の模式図。われわれのターゲット領域である外縁部は円盤の外側の部分になる。

2. 銀河系の外縁部

そこで、われわれは十分な空間分解能と感度を達成できる近傍において、銀河形成初期の環境下における星の生成過程を観測できないか考え、銀河中心からの距離が13.5キロパーセク (kpc)^{*2} 以遠の領域である銀河系の外縁部に注目した (図1)。銀河系のガス密度は、銀河中心からの距離が13.5 kpc付近で急激に減少し始め、20 kpc付近では太陽近傍 (銀河中心からの距離は約8.5 kpc) の僅か10分の1程度まで減少する⁵⁾。金属量も同様に、銀河中心からの距離が13.5 kpcから20 kpcの間では太陽近傍の3分の1から10分の1まで減

少する⁶⁾。主な金属は核融合反応により星の内部、あるいは超新星爆発で生成されるため、星の進化の最終段階でないとこれらは外部に放出されない。ゆえに、金属量が少ないということは、この領域ではまだ活発に星生成活動が行われていない (星生成活動が行われ始めて間もない) ことを示している。以上より、銀河系の外縁部は星の材料となるガスの量が少なく、星がまだ活発に生成されていない希薄で静寂な環境であると考えられる。そしてこのような環境は矮小銀河や銀河系の形成初期の環境と非常に似通っていると考えられている^{7), 8)}。銀河系の外縁部は系外の銀河^{*3}より非常に近傍にあるため、以上に挙げた始原的環境下において星を一つひとつ完全に分解した観測が容易にできる非常に貴重な環境とすることができる。

銀河系の外縁部は、ガス雲が多数存在し星が活発に生成されている内部領域に比べると、殆ど注目されてこなかった未開の領域であった。それでもここ10-20年のうちに少しずつ観測的研究が進められ、アメリカにある5大学電波天文台 (Five College Radio Astronomical Observatory; FCRAO) をはじめとした複数の望遠鏡による分子雲の探査が行われてきた⁹⁾⁻¹⁶⁾。その結果、数百個もの分子雲がすでに検出されており、図2の上図に示されるように最も外側の腕と考えられている“Outer Arm”の外側にも多くの分子雲が分布していることが明らかになった。しかし星生成領域に関してははまだ外縁部における探査が進んでおらず、図2の下図に示されるようにこれまで検出されたものは僅か30個程度であった¹⁷⁾⁻²⁴⁾。星生成領域の探査には今まで基本的に赤外線 (12, 25, 60, 100 μm) の波長域で全天の観測を行った IRAS (Infrared Astronomical Satellite) 衛星²⁵⁾ のデータが用いられてきたが、感度の限界から外縁部の

^{*2} パーセク (pc) とは天文学でよく用いられる距離を表す計量単位の一つである。約 3.09×10^{16} m (約3.26光年) に相当する。

^{*3} 銀河系の外縁部と同様に低金属量環境下であることが知られているマゼラン雲までの距離はおよそ50 kpc、他の渦巻き銀河までの距離は1 Mpc 以上になる。

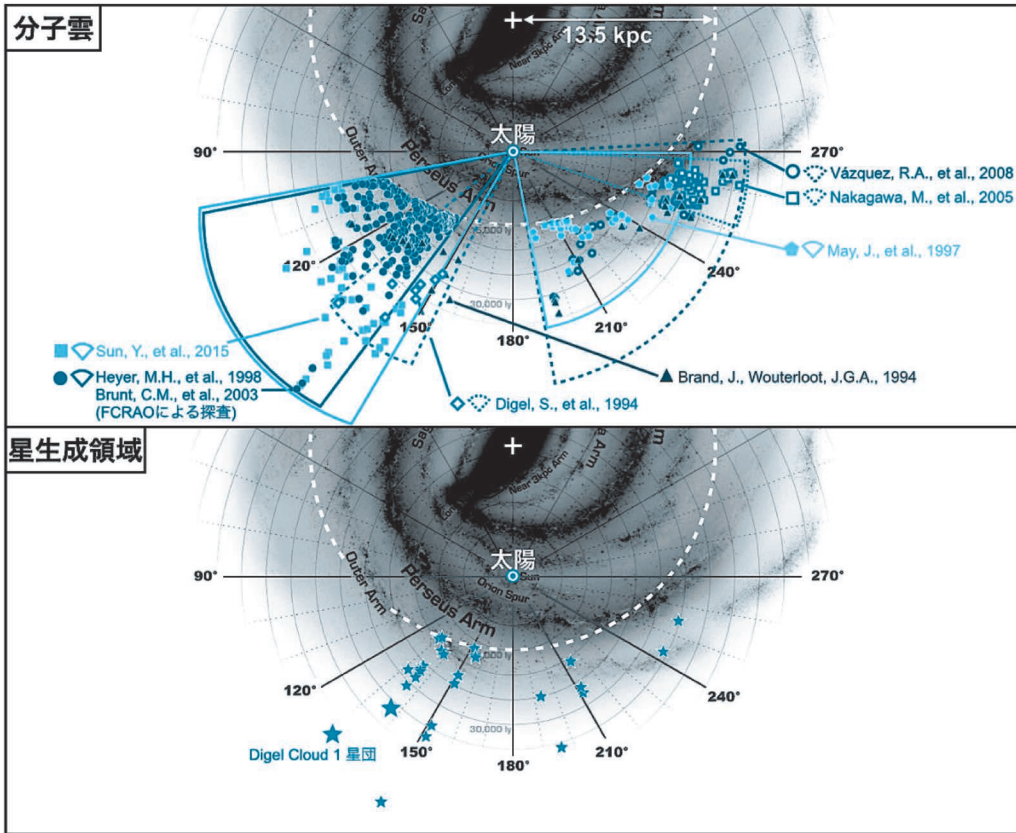


図2 外縁部で見つかった分子雲，星生成領域の分布. 背景は銀河系円盤を上から見た想像図である (Credit: NASA/JPL-Caltech). 十字は銀河系の中心の位置を示している. 上: 銀河系の第二象限, 第三象限 (銀経90–270度)で行われた代表的な分子雲探査^{9)–16)}によって検出された分子雲の分布. 扇形が探査の領域, そして内部の分布している記号が探査の結果検出された分子雲を示している (Brand-Wouterloot²⁰⁾による探査はIRAS衛星で検出された天体をベースとして分子雲の探査を行っており, 探査領域は設定されていない). 下: 銀河系の第二象限, 第三象限でこれまで検出された星生成領域の分布^{17)–24)}. ほかの星よりも大きい銀経130–140度付近の二つの星は, われわれの研究によって検出された星生成領域の位置を示している.

星生成領域は上記のとおり検出されたものは僅かであった.

3. 新たな星生成領域探査

星生成の基本的な特徴を研究するためには多くのサンプルを用いた統計的な議論が必要不可欠である. われわれはこれまで主にハワイにあるすばる望遠鏡を用いた近赤外線での高感度観測によって外縁部の星生成領域の検出, 研究を進めてきた. その結果, 銀河中心からの距離が22 kpcと非常に遠方に位置する星生成領域 Digel Cloud 1

星団の検出に成功したが²¹⁾, これからまた新たな観測によって統計的に十分な数の星生成領域を検出するには膨大な望遠鏡時間が必要となる. そこでわれわれは近年, 優れた感度をもつ観測衛星によるデータがアーカイブされ始めたことに注目した. 特に注目したのが, 2009年に打ち上げられ, 中間赤外線の波長帯 (3.4, 4.6, 12, 22 μm) で全天の観測を行った広域赤外線衛星WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer) である²⁶⁾. WISE衛星はIRAS衛星の100倍以上という非常に優れた感度を持ち, 外縁部のような銀河系内では比較

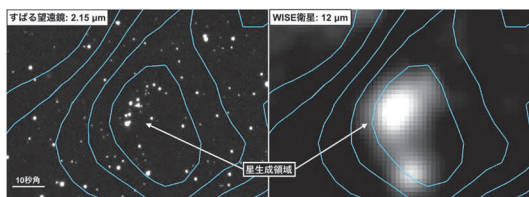


図3 Digel Cloud 1 星団とそれが付随する分子雲の分布。左図はすばる望遠鏡を用いた観測で得られた近赤外線 (2.15 μm) の画像, 右図は WISE 衛星によって取得された中間赤外線 (12 μm) の画像を示している。コンタ (等高線) は野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いた観測で得られた分子雲の分布を示している。左図で検出された星生成領域が右図でも明確に検出されていること, ただし, 一つひとつの星ではなく星生成領域全体が一つの天体として検出されている。

的遠方に位置する星生成領域の探査に威力を発揮すると期待された。実際, 図3で示されるようにすばる望遠鏡によって検出された Digel Cloud 1 星団も WISE 衛星の観測データで明確に検出されていることが確認された。

WISE 衛星の観測データは 2011 年頃から公開され始めており, 座標や等級など, 検出された天体の情報は All WISE Source Catalog にまとめられている*4。さらに先行研究により, すでに WISE 衛星のデータを用いて生まれたばかりの若い星を検出する方法が確立されていた²⁷⁾。若い星はほかの天体とは異なる独自のスペクトルエネルギー分布 (波長ごとのエネルギー分布, Spectral Energy Distribution; SED) をもつ。ゆえに図4で示したような各波長のフラックス比をとった図 (2色図) を用いて, ほかの天体と区別することが可能となる。しかしこの方法は太陽近傍 (太陽からの距離が 2-3 kpc 以内) に位置する天体用に作られており, 残念ながらそのまま外縁部 (太陽からの距離が 5-6 kpc 以上) に位置する天体に流用することはできなかった。WISE 衛星の分解能 (6-12 秒角)

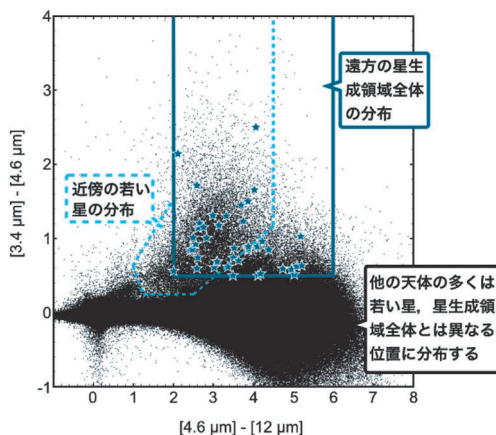


図4 WISE 衛星の観測データによる 2 色図。横軸は各天体の 4.6 μm の等級から 12 μm の等級を引いた値, 横軸は 3.4 μm の等級から 4.6 μm の等級を引いた値を示す。黒色の点は FCRAO の観測領域において WISE 衛星によって検出された天体を示し, 青色の星はすでに知られている外縁部の星生成領域を WISE 衛星の観測データで見た結果を示している。水色の点線で囲まれた領域が, 太陽近傍に位置する若い星が分布する範囲を示しており²⁷⁾, 青色の線で囲まれた領域が, 本研究で定めた星生成領域全体が分布する範囲を示している。

では, 太陽近傍に位置する星生成領域についてはそれを構成する一つひとつの星に分解して検出可能である。それに対し, 図3で示されるように外縁部に位置する星生成領域については一つひとつの星に分解することができず, 星生成領域全体を一つの天体として検出してしまうためである。

そこでわれわれは外縁部に位置する, 分解できない星生成領域全体をほかの天体と区別して検出する方法を確立するため, 既存の星生成領域における WISE 衛星の観測データを調べ, その特徴を調べることにした。その結果, 図4で示されるように, 星生成領域全体も 2色図上では個々の若い星と似た分布をしていることが確認された。2色図上での分布の範囲が若干異なる (遠方の星生成領域は長い波長側の光が強い傾向にある) 理由と

*4 AllWISE Source Catalog については <http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allwise/expsup/> に情報がまとめられている。

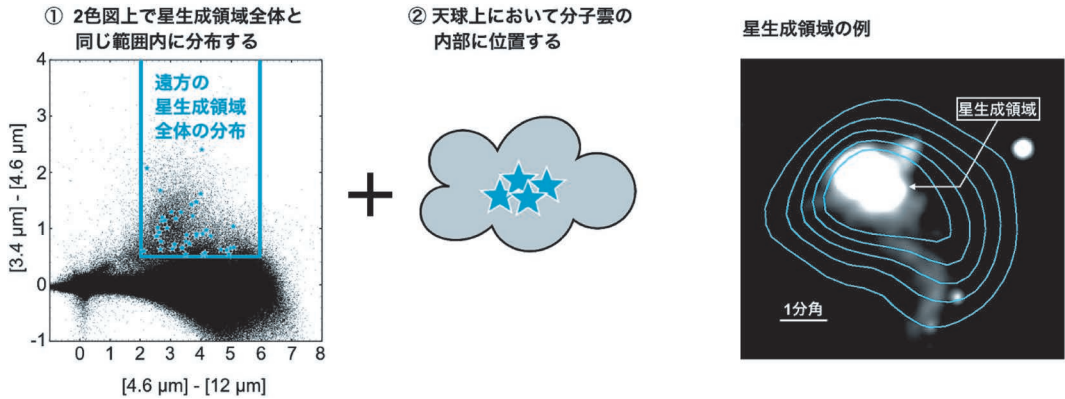


図5 外縁部における星生成領域候補の検出方法の概略図。一番左の2色図は図4で示したものと同一である。一番右の図は検出した星生成領域の例であり（WISE衛星による12 μm の画像，コントアはFCRAOによる観測で得られた分子雲の分布を示している），2色図上で星生成領域全体と同じ範囲内に分布し，なおかつ分子雲の内部に位置している様子を示している。

しては、遠方では個々の星ではなく星生成領域全体を見ているため、その中にある長波長側の光が強い星にひきずられて全体も長波長側の光が強くて見えてしまうことが考えられる。また、PAH（芳香族炭化水素）放射^{*5}の影響を受けてしまうことなども理由として考えられる。今はまだ十数個程度の星生成領域しか調べられていないため、その分布の基準範囲は暫定的なものであるが、今後サンプル数を増やしていくことでより厳密な基準が作られることが期待される。

しかし、外縁部の星生成領域を検出するためにはもう一つ大きな問題があった。それは活動銀河中心核や惑星状星雲なども2色図上で星生成領域と似た範囲に分布していることである^{26), 27)}。WISE衛星の観測データでは奥行き方向（距離）の情報が得られないため、外縁部の星生成領域を探そうにも間違っして活動銀河中心核や惑星状星雲、そして近くにある若い星を検出してしまふ可能性は高い。そこでわれわれは生まれたばかりの若い星生成領域（年齢が約300万年以下）は、通

常はまだ母体となる分子雲の中に埋もれていることに注目した。そして、「2色図上で星生成領域全体と同じ範囲内に分布し，なおかつ天球上において分子雲の内部に位置する天体」をその分子雲に付随する星生成領域の候補として同定することとした（図5）。天球上では、外縁部のような比較的遠方に位置する分子雲の面積は比較的小さくなるため、その限られた領域内にほかの天体が重なる可能性は十分低いと考えられる。

4. 星生成領域探査の結果

実際に星生成領域の探査を行うにあたり、先に紹介したFCRAOの分子雲探査により検出された分子雲を、探査のベースとなる分子雲として用いた。FCRAOの分子雲探査は銀河系の第二象限における約360平方度と比較的広い領域に対して行われ、466個の分子雲が外縁部において検出されている（図6(a)）。そしてわれわれの星生成領域探査の結果、466個中252個の分子雲に付随する778個^{*6}の星生成領域候補が新たに同定された

^{*5} 星生成領域では、PAH（芳香族炭化水素）分子が星からの遠紫外線によって励起され、赤外線波長域の光を放射することが知られている。WISEの観測波長帯では、3.4 μm と特に12 μm において強いPAH放射が検出されている。

^{*6} 12個の分子雲に付随する19個の星生成領域についてはすでにその存在が確認されていたため、厳密に言えば新しく検出した星生成領域候補は759個である。

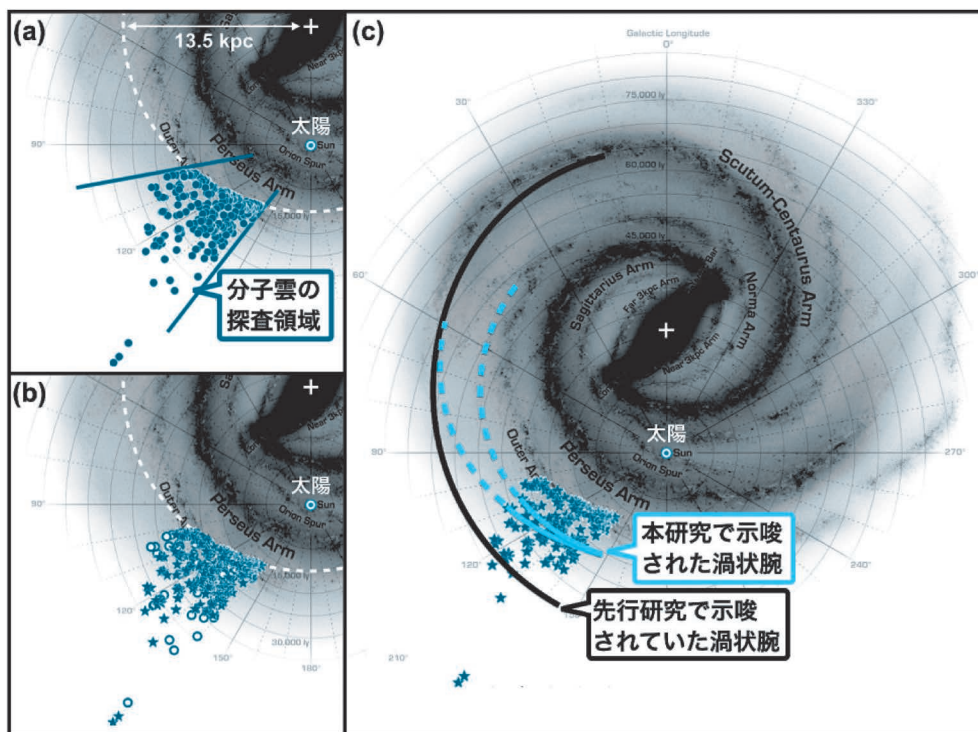


図6 本研究によって新たに検出された星生成領域候補の分布図。背景は銀河系円盤を上から見た想像図である (Credit: NASA/JPL-Caltech)。十字は銀河系の中心の位置を示している。a): 青色の線はFCRAOによる分子雲探査が行われた領域を示し、青色の丸は探査の結果検出された分子雲を示している^{12), 13)}。b): 青色の星は本研究によって付随する星生成領域候補が検出された分子雲、白色の丸は星生成領域候補が検出されなかった分子雲を示している。c): 黒色の線は先行研究によって示唆されていたOuter Arm以遠にある渦状腕の分布^{16), 28)}、水色の線と点線は本研究によって新たに示唆された渦状腕の分布を示している。

(図6(b)). これは今まで知られていた星生成領域の20倍以上であり、外縁部の星生成における統計的な議論を初めて可能にしたと言える。

新たに同定された星生成領域候補の中には銀河中心からの距離が20 kpcに達するものもあり、分子雲と同様にOuter Armの外側にも多くの星生成領域が分布していることが明らかになった。また、Outer Armの外側の星生成領域候補は、ある程度において集まって分布しており、Outer Armの外側に新たな渦状腕が存在する可能性が示唆された。Outer Arm以遠の新しい渦状腕の存在については、分子雲の分布や中性水素 (HI) ガス雲の輝線などから示唆されてきたが^{16), 28)}、今回新たに示唆されたものは図6(c) に示される

ように先行研究のものより若干内側に分布している。先行研究で示唆されていた渦状腕はScutum-Centaurus Armとつながっていると考えられており、本研究で示唆された渦状腕も同様にScutum-Centaurus Armとつながっている可能性は考えられる。しかし、ほかの渦状腕の巻き込みの構造を考えると、Outer Armが枝分かれしたものである可能性が高いと考えている。

5. 星の生成効率

最初に述べたとおり星の生成プロセスは、原子ガスが圧縮され分子ガスになり、最終的に星に至ると考えられている。そして外縁部のような始原的環境下においては、ガス密度の減少に伴い、星

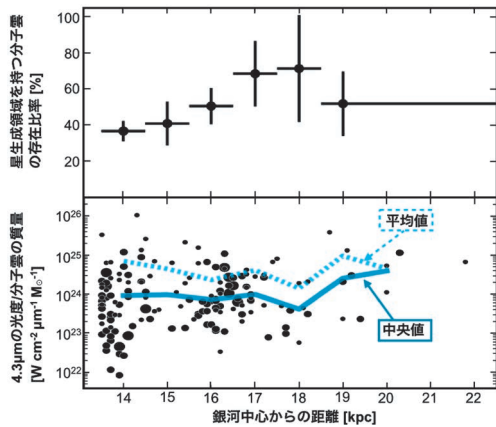


図7 分子ガスが星に変換される効率の指標と銀河中心からの距離の関係。上：星生成領域をもつ分子雲の存在比率。縦軸方向の誤差棒は、ポアソン誤差 (1σ) の値、横軸方向の誤差棒は銀河中心からの距離の範囲を示している。下：分子雲の単位質量あたりの $4.3\ \mu\text{m}$ の光度。黒丸の大きさは付随している分子雲の質量の大きさを示している（大： $10^4 M_{\odot}$ 以上，中： $10^3 M_{\odot}$ 以上で $10^4 M_{\odot}$ より小さい，小： $10^2 M_{\odot}$ 以上で $10^3 M_{\odot}$ より小さい）。水色の点線は平均値，青色の直線は中央値を示している。

生成率や星生成効率が急激に減少することが知られている^{3), 4)}。その理由としては“原子ガスが分子ガスに変換される効率”か“分子ガスが星に変換される効率”，もしくはその両方の効率が低くなることが考えられる。そこでまず，今回新たに同定した星生成領域候補を用いて，後者の「分子ガスが星に変換される効率」から調べることとした。

分子ガスが星に変換される効率を調べるにあたり，まずその指標として1) 星生成領域をもつ分子雲の存在比率と，2) 分子雲の単位質量あたりの赤外線光度を定義した。1) 星生成領域をもつ分子雲の存在比率は，分子雲や星生成領域の質量や年齢などのパラメータをすべて平均した最も単純な指標である。今回統計的に十分な量の星生成領域候補を検出したことで，初めてこの議論が可能となった。2) 分子雲の単位質量あたりの赤外線光度に関しては，先行研究において用いられてきた，中間赤外線から遠赤外線光度 ($12-$

$100\ \mu\text{m}$) と分子雲の質量の比を，星生成の指標として用いた¹⁸⁾。星生成領域から放射された赤外線の光度の強さが星生成領域の質量に比例すると仮定すると，分子雲の質量の何割が星に変換されたかを示すことになる。もちろん実際はそのように単純にはいかないが，最初に見る指標としては十分であると考えられる。

本研究で同定された星生成領域候補は銀河中心からの距離が $13.5-20\ \text{kpc}$ の範囲に分布している。この範囲内では銀河中心からの距離が大きくなるにつれてガス密度や金属量が減少し，銀河中心からの距離が $20\ \text{kpc}$ に達する時，ガス密度は $13.5\ \text{kpc}$ のときの 10 分の 1 ，金属量は半分以下になる^{5), 6)}。ゆえに周囲の環境の変化に伴い，分子ガスが星に変換される効率も銀河中心からの距離が大きくなるにつれ減少することが予想された。しかし，実際に二つの指標の銀河中心からの距離に対する変化を調べたところ，図7で示されるように大きな変動は検出されなかった。ばらつきが大きいものの，少なくとも効率が銀河中心からの距離の増加に伴い減少するという傾向は見られなかった。

以上の結果は，分子ガスから星に至るプロセスにおいては，ガス密度や金属量などの環境パラメータで大きく変化しないことを示唆している。これにより，始原的環境下において見られる星生成率や星生成効率の急激な減少は，分子雲中の星生成プロセスの変化よりも，分子雲の数自体の減少，すなわち“原子ガスが分子ガスに変換される効率の減少”が原因であると考えられる。近年，銀河系を含むいくつかの渦巻き銀河の内部領域において星生成率は分子ガスの量のみ依存し，分子ガスが星に変換する効率も変化しないことが示唆されている²⁹⁾。そして本研究で初めて，内部領域でとは全く環境の異なる外縁部においても，分子ガスが星に変換する効率は原子ガスの量に依存せず一定であること，ひいては星生成率は分子ガスの量のみ依存することが示唆された。

6. 今後の課題

以上より、本研究によって銀河系の形成初期も現在も変わらない、つまり“周囲の環境の変化に左右されない統一した星生成メカニズム”の存在が示唆されたことになる。しかし、この結論を出すにあたって用いた、いくつかの仮定の妥当性を検証するためにはまだ多くの課題が残っている。

まず、今回は手始めに分子ガスが星に変換される効率の指標の値を求めたが、最終的には星生成領域の質量を導出し、効率そのものを導出して銀河中心からの距離との関係を調べる必要がある。その際重要なのは物理量をより正確に導出することである。今回使用した分子雲の距離、質量に関してもその導出には多くの仮定が含まれているため、これらの仮定に対してもその妥当性を確かめる必要がある。また、より始原的な環境をもつ最も外側の領域（銀河中心からの距離が20 kpc程度の領域）に関してはまだ十分な数の星生成領域が検出できておらず、データのばらつきが大きい。ゆえに今後そちらに重点をおいた探査も必要である。もちろん、今回同定した星生成領域候補が星生成領域そのものであるかどうかの確認も重要である。ほかの波長のアーカイブデータや、大型望遠鏡を用いたフォローアップ観測を駆使してこの貴重なサンプルの特徴を明らかにしていきたいと考えている。

謝辞

本稿の内容は、筆者の博士学位論文の一部および投稿論文（近々発表予定のものも含む）をまとめたものになります。博士課程当時の指導教官である小林尚人氏をはじめ、共同研究者である齋藤正雄氏、安井千香子氏、濱野哲史氏、Alan. T. Tokunaga氏ほか有意義な議論をさせていただいた多くの方々に改めて感謝いたします。

参考文献

- 1) Schmidt M., 1959, ApJ 129, 243
- 2) Kennicutt R. C., Jr., 1998, ApJ 498, 541
- 3) Kennicutt R. C., Evans N. J., 2012, ARA&A 50, 531
- 4) Shi Y., et al., 2014, Nature 514, 335
- 5) Wolfire M. G., et al., 2003, ApJ 587, 278
- 6) Smartt S. J., Rolleston W. R. J., 1997, ApJL 481, L47
- 7) Ferguson A. M. N., et al., 1998, AJ 116, 673
- 8) Kobayashi N., et al., 2008, ApJ 683, 178
- 9) Digel S., et al., 1994, ApJ 422, 92
- 10) Brand J., Wouterloot J. G. A., 1994, A&AS 103, 503
- 11) May J., et al., 1997, A&A 327, 325
- 12) Heyer M. H., et al., 1998, ApJS 115, 241
- 13) Brunt C. M., et al., 2003, ApJS 144, 47
- 14) Nakagawa M., et al., 2005, PASJ 57, 917
- 15) Vázquez R. A., et al., 2008, ApJ 672, 930
- 16) Sun Y., et al., 2015, ApJ 798, L27
- 17) Brand J., Blitz L., 1993, A&A 275, 67
- 18) Snell R. L., et al., 2002, ApJ 578, 229
- 19) Yasui C., et al., 2006, ApJ 649, 753
- 20) Brand J., Wouterloot J. G. A., 2007, A&A 464, 909
- 21) Izumi N., et al., 2014, ApJ 795, 66
- 22) Anderson L. D., et al., 2015, ApJS 221, 26
- 23) Yadav R. K., Pandey A. K., Sharma S., et al., 2015, New Astronomy 34, 27
- 24) Yun J. L., et al., 2015, MNRAS 452, 1523
- 25) Neugebauer G., et al., 1984, ApJL 278, L1
- 26) Wright E. L., et al., 2010, AJ 140, 1868
- 27) Koenig X. P., Leisawitz D. T., 2014, ApJ 791, 131
- 28) Strasser S. T., et al., 2007, AJ 134, 2252
- 29) Schrubba A., et al., 2011, AJ 142, 37

Star Formation Activity in the Outer Galaxy Natsuko Izumi

*National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The outer Galaxy offers an interesting opportunity to study star formation in similar environment with that in the early phase of the formation of our Galaxy. We searched for star-forming regions to identify about new 700 candidates of star-forming regions, which enable the statistical study of star-formation activity in the outer Galaxy for the first time. Using newly identified star-forming regions, we studied star-formation efficiency for converting molecular gas to stars. As a result, we found that the efficiency does not change with environment, such as metallicity and atomic gas density. This result suggests the existence of the unified mechanism for star-formation which is not influenced by change of environment.