

論文内容の要旨

論文題目 Star formation in the outer Galaxy (銀河系外縁部における星生成)

氏名 泉 奈都子

オリオン星雲をはじめとした太陽近傍の星生成領域に対する長年の研究により、“現在の銀河系”における星生成メカニズムの理解が大きく進展したのに対し、銀河進化の理解に特に重要な“銀河形成初期”における星生成メカニズムには未だ不明確な点が多く残されている (e.g. Krumholz, 14)。銀河形成初期のようにガス密度や金属量が低い始原的環境下においては大きな空間スケール (数 10 kpc ~ 数 100 pc スケール) で星生成効率、星生成率が大きく下がることが知られているが (e.g. Kennicutt & Evans, 2012; Shi et al., 2014)、その具体的なメカニズムは殆ど明らかにされていない。これは、high- z 銀河は勿論のこと、比較的近傍の銀河に対してもこれらの詳細過程を直接観測することが困難なためである。そこで私は、銀河系内にありながらその形成期の環境を残す特別な領域として銀河系の外縁部 ($R_G \geq 13.5$ kpc) に注目している。銀河系の HI 密度、柱密度は $R_G = 13.5$ kpc 付近で急激に減少し始め、 $R_G = 18$ kpc 付近では太陽近傍の 10 分の 1 程度まで減少する (e.g. Nakanishi & Sofue, 2003)。金属量も同様に、 $R_G = 13.5 - 20$ kpc では太陽近傍の 3 分の 1 から 10 分の 1 にまで減少するため (e.g. Smartt & Rolleston, 1997)、銀河系の外縁部は銀河系の形成初期、特に Thick disk 形成期の環境に非常に似通っていると考えられている (Ferguson et al., 1998; Kobayashi et al., 2008)。内縁部と比較して物理パラメータが大きく異なるため、銀河の外縁部では、星生成のプロセスが同様に大きく異なることが理論的に示唆されている (e.g. Krumholz, 2014)。銀河系の外縁部は、昨今の大型望遠鏡を用いれば星を一つ一つ完全に分解した観測ができる唯一の環境であり、また銀河系内縁部と比較してフィールド星が少なくかつ複雑な星生成史がないため、低ガス密度・低金属量環境下における星生成を直近で研究できる理想的な実験場であると言える。また、このような領域は近年、系外銀河においても XUV (Extended UV) 領域として普遍的に存在することが認識されつつある (Thilker et al., 2007)。本研究では、以上に挙げた銀河系外縁部のメリットを活かし、領域ごとの大きなスケール (数 100 pc スケール) ではなく分子雲スケール (pc スケール) における星生成の性質を調べることを目的とする。

我々はまず外縁部の星生成領域の性質がどこまで詳しく調べられるか試験的に確認するため、外縁部の中でも渦状腕の影響を殆ど受けない「最外縁部 ($R_G \geq 18$ kpc)」に着目した。そして、このような最遠方における初の無バイアスサーベイの結果発見された分子雲候補 Digel Clouds (Cloud 1-8; Digel et al., 1994) の中でも、最遠方に位置し ($R_G = 22$ kpc) かつピリアル質量が最も大きい「Cloud 1」に対して野辺山 45 m 電波望遠鏡による高分解能・高感度の ^{12}CO マッピングとすばる 8.2 m 望遠鏡による近赤外深撮像観測を実施した。その結果、Cloud 1 の 2 つの CO ピークに付随する 2 つの星生成クラスターを発見した。それらの K バンド ($2.2\mu\text{m}$) 光度関数や赤外超過を示す割合から、ともに年齢 1 Myr 以下の若いクラスターであることを示した。また、photometric distance は $D \geq 12$ kpc ($R_G \geq 19$ kpc) と推定されたが、これは kinematic distance による距離 ($D = 16$ kpc, $R_G = 22$ kpc) と矛盾しない。以上の性質を用いて分子雲あたりの星生成効率を導出したところ、5–20 % となり、太陽近傍の星生成領域の効率と同程度であることが分かった (2.3–57 %; Yasui et al., 2008)。さらに、アーカイブされている H α 21 cm 線などの大規模サーベイによって得られた多波長データを総合的に調べた結果、Cloud 1 の星生成は巨大な H α 雲である HVC (High-Velocity Cloud) と銀河ディスクの衝突でトリガーされた可能性が高いことを示した。HVC は銀河系としばしば相互作用することが分かっており、銀河系の星生成を促進する可能性が示唆されている。銀河形成期にはそのような相互作用による星生成は主要なモードであったことが推測されており、Cloud 1 系はそのようなモードの存在を示唆するとともにその詳細を知る貴重なターゲットとなるかもしれない。以上のように、大型望遠鏡や大規模サーベイによる観測データを用いることで、最遠方の星生成領域に対しても太陽近傍と同様に分子雲単位での星生成活動の詳細な研究が可能であることを示した。

しかし、未開の領域である銀河系外縁部においては、既存の星生成領域はわずか 30 個程度であり (e.g. Snell et al., 2002)、星生成の性質を統計的に明らかにするにはサンプル数が不十分であった。星生成領域の探査には今まで基本的に IRAS (Infrared Astronomical Satellite) データが用いられてきたが、感度の限界から外縁部の星生成領域は殆ど検出されなかった。そこで我々は赤外線衛星 WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer) による中間赤外線の全天サーベイデータに注目した。WISE 衛星は IRAS 衛星の 100 倍以上の優れた感度を持つため、外縁部のような遠方の星生成領域の探査に威力を発揮すると期待される。実際、上記に述べた非常に遠方に位置する星生成領域 Cloud 1 も WISE で明確に検出されていることが確認された。そこで我々は、まず外縁部に位置する既存の星生成領域の WISE の等級、カラーを詳細に調べ、WISE のカラーだけで高い確率で星生成領域 (embedded cluster/stellar aggregate) を同定できることを示した。そこで、FCRAO outer Galaxy survey による銀河系第二象限の約 320 平方度に分布する 466 個の分子雲に対して付随する WISE 天体から若い星生成領域を探査した。その結果、240 個の分子雲に対して、新たに 711 個の星生成領域候補を検出し、外縁部の星生成の統計的な議論を初めて可能とした (図 1)。

この星生成領域候補の銀河面上の分布を調べたところ、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は分子雲の分布や H α の輝線などから示唆されてきたが、今回見つけたものはそれらとは位置が異なる初めての構造であり、渦状腕の存在を決定づける星生成領域によってその存在を示したことになる。また、星生成領域を持つ雲と持たない雲を比較した結果、1) 星生成領域を持つ雲の Mass spectrum の傾き (-1.41 ± 0.12) は持たない雲の傾き (-1.87 ± 0.11) よりも急で

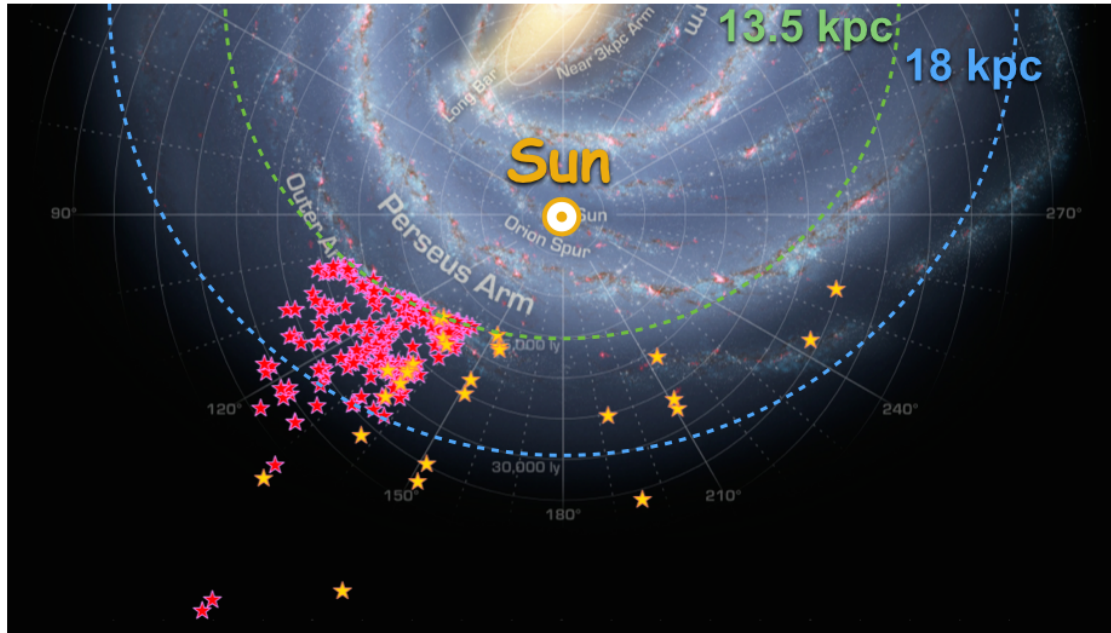


図 1: 銀河系外縁部（第 2・3 象限）における星生成領域の分布。黄色の星が既存の星生成領域、赤色の星生成領域が本論文で新たに検出した星生成領域の位置を示す。Outer arm ($R_G \sim 13.5$ kpc) 以遠の $R_G = 16 - 17$ kpc の範囲に星生成領域が集中して分布しており、新たな渦状腕の可能性もある。NASA/JPL-Caltech による銀河系の画像を改変。

あること、2) 星生成領域を持つ雲の質量は持たない雲の約 2 倍であること、そして 3) 星生成領域を持つ雲の速度幅の分布は比較的広範囲 ($0.5 \leq \Delta v \leq 5 \text{ km s}^{-1}$) でばらついているのに対し、持たない雲の分布は狭い範囲 ($0.5 \leq \Delta v \leq 3 \text{ km s}^{-1}$) に集中していることが確認された。さらに、分子雲のピリアル質量と銀河系の平均の H_2/CO 質量比 ($2.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$; e.g. Bolatto et al., 2013) を用いて CO 強度から導出した質量 (CO 質量) を比較した結果、 $10^3 M_\odot$ 以上の CO 質量を持つ雲の殆どは、ピリアル質量と CO 質量が等しいことが分かった。 H_2/CO 質量比は周囲の金属量の減少に伴って増加し、それゆえ銀河系外縁部は銀河系の平均値より大きい値を持つことが予想されていたが、本研究で見た範囲 ($R_G = 13.5 - 20$ kpc) では平均値と大差ないことが示唆された。また、星生成領域を持つ雲の殆どがピリアライズしているのに対し、持たない雲の多くはピリアライズしていないことも確認された。

WISE を用いて同定した数多くの星生成領域候補に対して、HI ガスから星に至るまでのプロセスを調べるにあたり、その最初のステップとして、特に重要と考えられる H_2 分子ガスから星が生成される効率を分子雲単位で調べた。星生成効率の指標としては、1) 星生成領域を持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、それらの R_G に対する変化を調べた。 $R_G = 13.5, 20$ kpc の間で HI ガス密度、金属量が半分以上減少するため、周囲の環境の変化に伴い、星生成の効率も変化することが予想されたが、これらの指標の大きな変動は $R_G = 13.5 - 20$ kpc の間では検出されなかった (例: 図 2)。これは、分子雲単位での星生成は、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。以上の結果は、“原始的”環境において知られている大きなスケールでの星生成効率の低下は、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、すなわち分子の生成効率の低下によることを示唆する。銀河の内縁部については近年、星生成効率が HI ガスではなく H₂ 分子ガスの量にのみ依存することが示唆されているが、本研究で初めて、HI ガスが支配的で内縁部と全く環境が異なる銀河系外縁部においても、星生成効率が H₂ 分子ガスの量にのみ依存することが示唆された。本研究で同定した多数の星生成領域はこのような特殊環境における星生成プロセスの詳細過程を明らかにできる貴重なサンプルであり、今後の多数のフォローアップ観測が期待される。

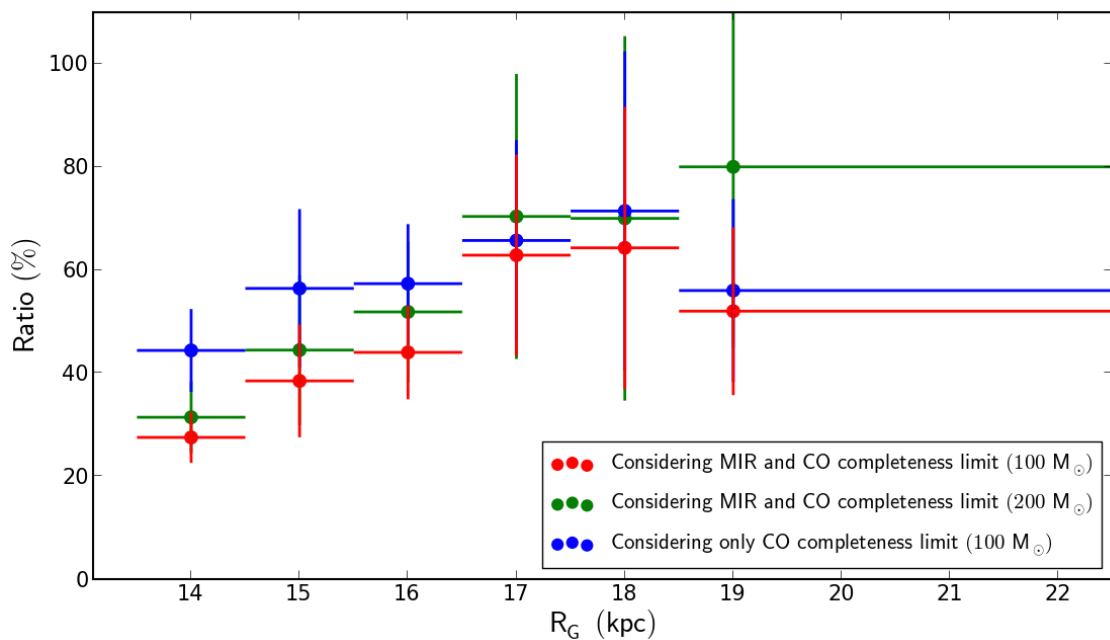


図 2: 分子雲あたりの星生成効率の指標 1 : 星生成領域を持つ分子雲の存在比率と銀河半径の関係。縦軸のエラーバーはポアソンエラー (1σ)、横軸のエラーバーは使用した半径の範囲を示す。赤色と緑色の丸は共に、WISE による中間赤外線 (MIR) データ、FCRAO による CO データ両方の Completeness limit を考慮したものであるが、緑色は赤色よりも CO データの Completeness limit の設定を厳しくしている (赤色: $100M_{\odot}$ 、緑色: $200M_{\odot}$)。青色の丸は CO データの Completeness limit ($100M_{\odot}$) のみ考慮したものである。使用する Completeness limit の値を変化させても、銀河半径の増加に伴う存在比率 (星生成効率) の減少は見られない。