

論文内容の要旨

論文題目

"Properties of giant molecular clouds and star formation
in the nearest spiral galaxy M33"

「最近傍の渦巻銀河 M33 における分子雲の性質と星形成」

氏名 小野寺 幸子

野辺山宇宙電波観測所の 45m 望遠鏡を用い、最も近傍の渦巻銀河のひとつ M33 における $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 分子輝線の観測を行った。M33 の距離 840 kpc は巨大分子雲を 45m 鏡で分解することを可能にする (分解能 20 秒 \sim 80 pc)。また銀河面を俯瞰できるために銀河の構造と巨大分子雲の位置関係がとらえやすく、一つの銀河内における巨大分子雲の進化の研究には絶好のフィールドである。本研究では、25 素子マルチビーム受信機 BEARS と近年 45m 鏡に実装された On-The-Fly (OTF) 観測モードを用いて M33 の中心部から北側 30 分 \times 20 分 (7.3 \times 4.9 kpc) の領域をマッピングした。OTF 観測モード観測領域を掃天しながら短い時間間隔でデータを取得するために装置や大気の変動の影響を受けにくく、観測効率も高い。さらにナイキストサンプリングより高いサンプリングレートが実現できるため、空間情報を失わずにすむ。これら OTF 観測の利点と 45m 鏡の大集光力・高い分解能、そして 25 素子マルチビーム受信機による効率の高い多点同時観測を組み合わせることで、先行研究である BIMA 干渉計による M33 全面サーベイに比べ、感度においても均質性においても優位となる高品質のデータを取得することができた。その結果が図 1 である。このデータから、 $2.9\times 10^4\sim 1.1\times 10^6$ 太陽質量の範囲にわたる巨大分子雲が 87 個同定された。このうち 17 個は本研究により新しく発見されたものであり、これらは我々のデータの優位性を示している。

これら 87 個の巨大分子雲の分布を中性水素原子ガスと比較したところ、一つを除いた全ての巨大分子雲が、中性水素原子の柱密度が 10^{21} 個 cm^{-2} を超える比較的密度の高い領域に位置することが判明した。これは高密度の中性水素原子ガスにおける分子雲形成のシナリオを支持している。また、 $\text{CO}(1-0)$ 輝線

の積分強度から求められる水素分子ガス質量の面密度 Σ_{H_2} と星形成率の面密度 Σ_{SFR} は、500 pc を越えるような大局的スケールでは良い相関を示すことが知られている (Schmidt 則と呼ばれる; $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{H}_2}^n$)。M 33 において、 $\text{H}\alpha$ 輝線やダストによる $24\mu\text{m}$ の連続波放射の強度から星形成率を求めたところ、星形成率は $\Sigma_{\text{SFR}} \sim 10^9\text{-}10^6 \text{ Mo yr}^{-1} \text{ pc}^{-2}$ と 3 桁にもわたる一方で、 $\text{CO}(1\text{-}0)$ 輝線の積分強度は巨大分子雲の間でほとんど一定であることがわかった。これは、100 pc 以下の巨大分子雲のスケールにおいては、Schmidt 則が成立しないことを示している。Schmidt 則は、あるスケール以上の分解能では、さまざまな個性を持つ、たとえば、星形成率やガス質量、進化段階が異なるような巨大分子雲を平均していることによって見える相関であり、個々の分子雲が従う法則ではないと考えられる。

このように星形成率と星形成効率 (≡星形成率/分子ガス質量) が大きくばらつく要因を探るべく、個々の巨大分子雲の物理状態を調べるため、我々はさらに同定された巨大分子雲の中から 28 個について南米チリ・アタカマ砂漠に設置された 10m サブミリ波望遠鏡 ASTE を用いて、 ^{12}CO ($J=3\text{-}2$) 分子輝線の観測を行った。密度の低いガスも含めた分子ガス全体をトレースする $\text{CO}(1\text{-}0)$ に比べ、サブミリ波帯にある高励起 CO 輝線は、より高密度なガスを選択的に反映すると考えられている。この結果、 $\text{CO}(3\text{-}2)$ 輝線と星形成率との間には $\text{CO}(1\text{-}0)$ 輝線では見られなかった強い相関が見られた (図 2)。この相関関係は、銀河全体あるいは kpc スケールにおいて成り立つことが先行研究により知られていたが、これより小さいスケールでの関係は明らかになっていなかった。本研究では先行研究より一桁小さい、巨大分子雲スケールの $I_{\text{CO}(3\text{-}2)} \sim 1\text{-}10 \text{ Kkm/s}$ の範囲までこの関係が成り立つことを初めて明らかにした。すなわち、星形成は巨大分子雲のスケールでも、巨大分子雲の分子ガスの総量ではなく、 $\text{CO}(3\text{-}2)$ 輝線のトレースする高温・高密度の領域とより密接に関連があることがわかった。2 輝線の積分強度比をとると、我々のサンプル中、ほとんどの巨大分子雲が $R_{3\text{-}2/1\text{-}0} \sim 0.2\text{-}0.6$ 周辺の値を示した。これは銀河系の中で特に星形成の活発でない場所と同程度の値である。一方で、 $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ が飛びぬけて高く 1 を超える巨大分子雲が二つだけ存在した。これらは、M33 の中で最も活発な星形成領域 NGC604 に属している。1 を超える $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ や高い星形成効率は M83 の銀河中心などと同等であり、M83 の銀河中心には NGC604 のような活発な星形成を行う巨大分子雲が集合体として存在している可能性が考えられる。さらに、500 pc のスケールにおいて、 $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ と星形成効率の相関関係があることが先行研究により明らかになっていたが、巨大分子雲のスケールにおいてもこの関係が成立し、さらにより低い $R_{3\text{-}2/1\text{-}0} \sim 0.1\text{-}0.4$ の範囲まで成り立つことが確かめられた (図 3)。

さらに我々は、100pc スケールで如何に高密度ガスが形成されるかに迫るために、 $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ と巨大分子雲の質量、星形成率の関連を調べた (図 4)。ここから、 $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ の下限値が巨大分子雲の質量とともに増加すること、さらに星形成率の低い巨大分子雲はプロット図上で $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ の低い領域に存在することが判明した。この結果に基づいて、 $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ の下限側に存在する巨大分子雲は進化の初期で星形成を始めたばかりの状態にあり、進化が進むにつれて星形成が活発になり周囲のガスの温度を上げるために $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ が高くなると考察した。すなわち $R_{3\text{-}2/1\text{-}0}$ の下限は星形成による温度の影響が除かれ、ほぼ密度によって定められると考えられ、そうであれば、質量の大きい巨大分子雲ほど高密度ガスを効率的に作っているという仮説を立てることができる。さらにもう一つの CO 分子輝線である $^{13}\text{CO}(1\text{-}0)$ や、高密度ガスをトレースする HCN 輝線の観測がこの仮説を検証する次の課題である。

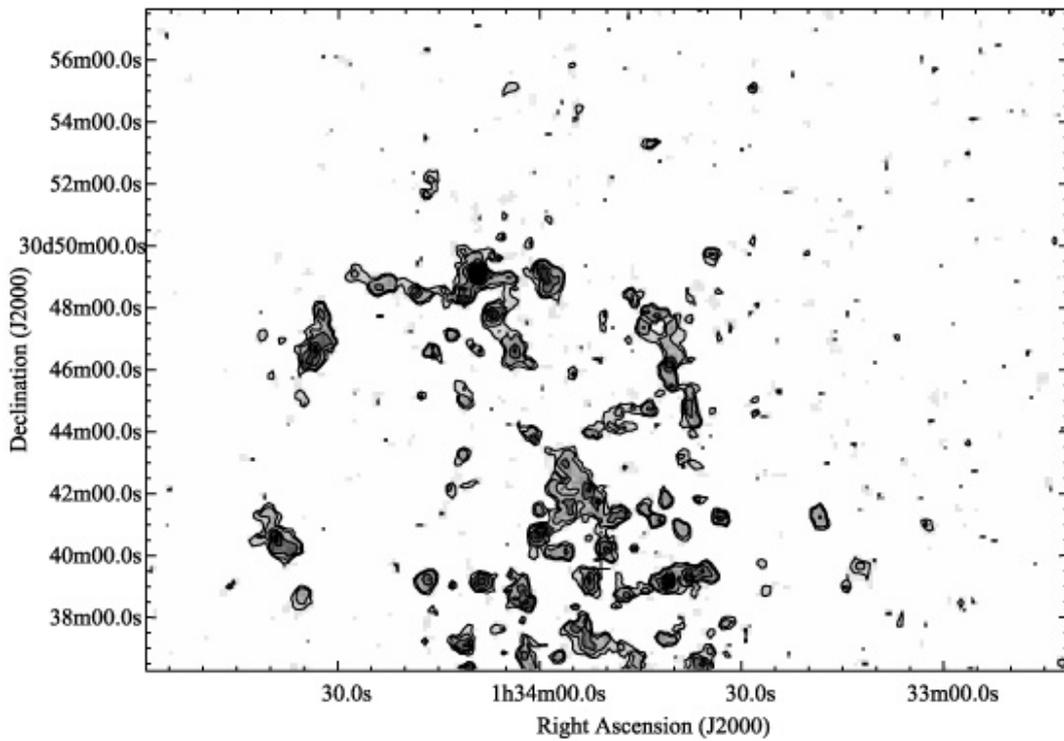


図 1 : 野辺山宇宙電波観測所 45m 望遠鏡による、近傍渦巻銀河 M33 の $^{12}\text{CO}(1-0)$ 輝線積分強度図

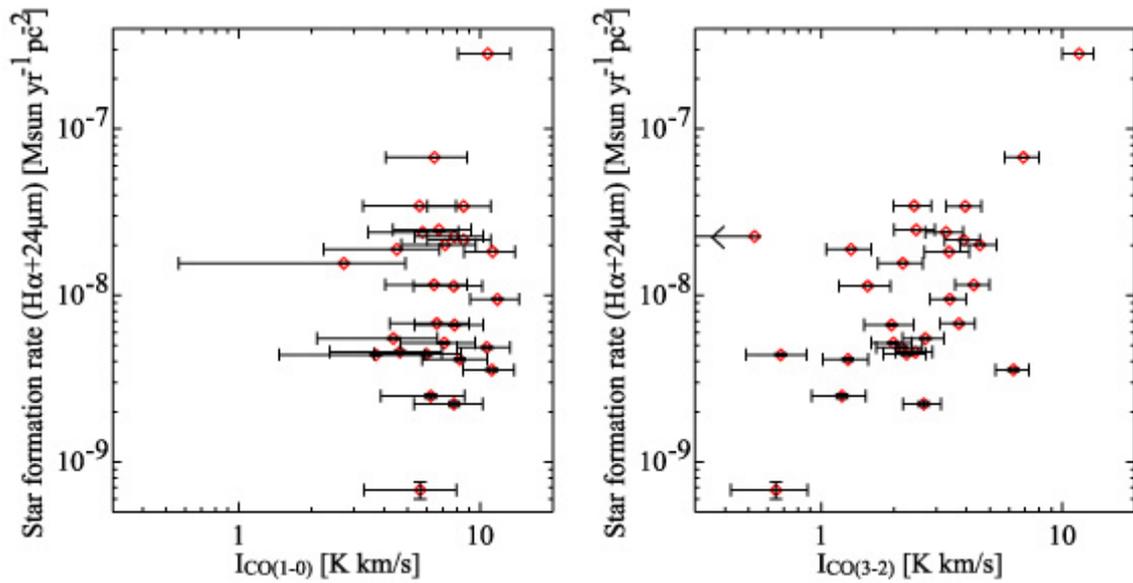


図 2 : (左) $^{12}\text{CO}(1-0)$ (右) $^{12}\text{CO}(3-2)$ それぞれの輝線積分強度と、星形成率の面密度の関係。

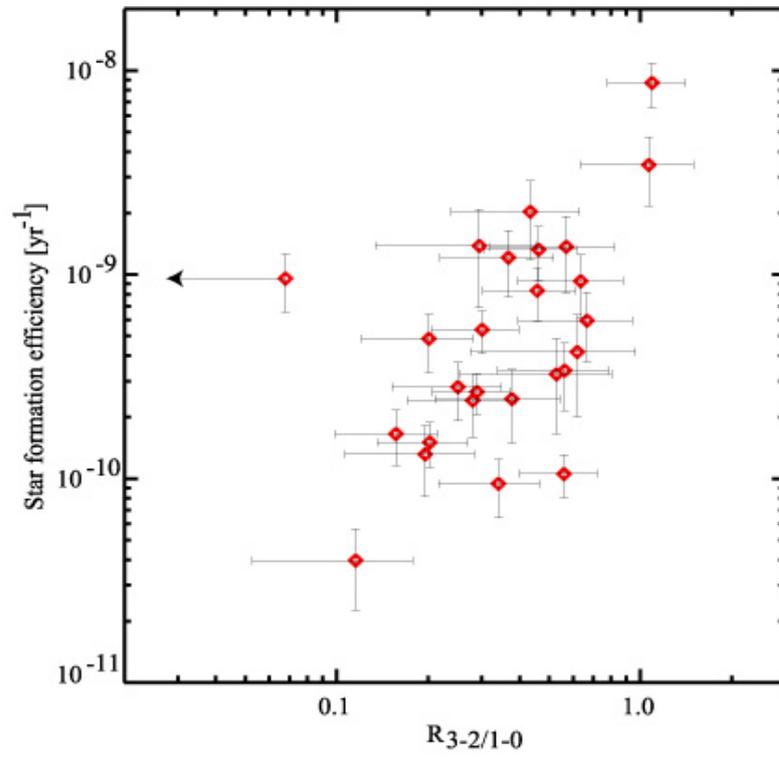


図 4 : CO(3-2)/CO(1-0) 積分強度比と星形成効率の関係。

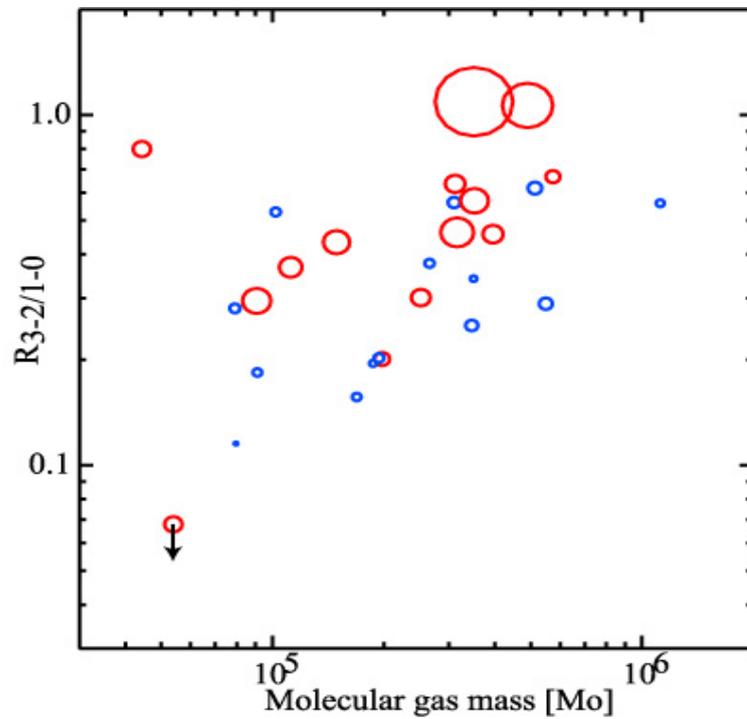


図 4 : 巨大分子雲のガス質量と積分強度比の関係。円の大きさは各分子雲の星形成率に比例している。(赤 : $\Sigma_{\text{SFR}} > 10^{-8} \text{ Mo yr}^{-1} \text{ pc}^{-2}$ 青 : $\Sigma_{\text{SFR}} > 10^{-9} \text{ Mo yr}^{-1} \text{ pc}^{-2}$)