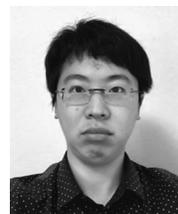


棒渦巻銀河における星形成抑制メカニズム

前田 郁 弥

〈東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: fmaeda@ioa.s.u-tokyo.ac.jp



これまでの観測的研究により、銀河内部の星形成活動は環境（腕部や棒部）によって異なることがわかってきた。特に、棒部では星形成活動が腕部に比べて抑制されていることが知られている。しかしながら、このような環境間での星形成活動の差が生じる原因は未解明であり、銀河進化を理解するうえでの重要な課題の1つとなっている。そこで、我々は棒部で著しく星形成活動が抑制されている棒渦巻銀河NGC 1300を対象にアルマ望遠鏡と野辺山45-m単一鏡を使った分子ガス観測を行い、原因を包括的に調査してきた。その結果、抑制の原因には少なくとも（1）星形成に関与しない大量の希薄な分子ガスが存在していること、（2）質量の小さい巨大分子雲が高速衝突していることの2つがあると結論づけた。

1. はじめに

1.1 銀河進化=ガスから星への転換史

銀河とは、多数の星、星間物質（ガスやダスト）、それに暗黒物質が重力的に結合した天体である。典型的に、銀河は数百億から数千億個の星を含んでいる。その星は巨大分子雲（Giant Molecular Cloud: GMC）と呼ばれる冷たい分子ガス（主成分は水素分子）の集合体で誕生する。太陽のような小質量星は約100億年の寿命があるのに対し、大質量星は数百万年から数千万年でその生涯を閉じ、最期に超新星爆発を起こしてガスを星間空間に戻すとともに、重元素やダストを供給する。重元素やダストを多く含むガスは、再び集積することで、次世代の星の揺りかごとなる。このような循環を通して銀河は星の総量と重元素量を増加させながら進化する。したがって、銀河進化とはガスから星への転換史とも言うことができ、その転換プロセス（つまり、星形成メカニズム）を理解することが銀河天文学の最重要な課題の1つである。

1.2 銀河の星形成則

銀河の星形成メカニズムを理解するためには、まず星形成とガスの関係を知るところから始めなければならない。近傍銀河の星形成率面密度（単位面積あたり、単位時間あたりに新たに生まれる星の質量）とガスの面密度の関係は1990年代後半から詳しく調べられるようになった。観測の結果、両者の間にべき乗則、つまり

$$(\text{星形成率面密度}) \propto (\text{ガス面密度})^n \quad (1)$$

が成り立ち、そのべきが $n=1.4$ であることが報告された（図1; [1]）。この関係は研究者の名前をとってケニカット-シュミット則（KS則）あるいはシュミット-ケニカット則と呼ばれている。この結果は、一見すると銀河の星形成の規模というのはガスの面密度だけで決まってしまうということを示唆しているようである。

1.3 棒渦巻星形成における星形成抑制

図1の結果は銀河全体で積分した量を面積で割って得られた銀河全体での平均量であった。2000年代後半以降、観測技術の発展に伴い、銀

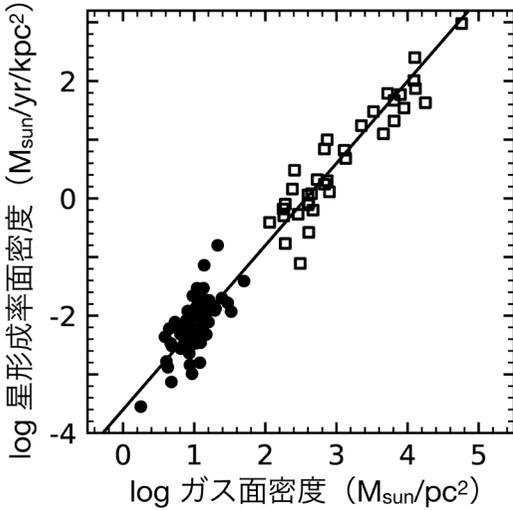


図1 1998年に発表されたグローバルなKS則. 黒丸は渦巻銀河を, 四角はスターバースト銀河を示す. 直線の傾きは約1.4である. 図は [1] をもとに作成.

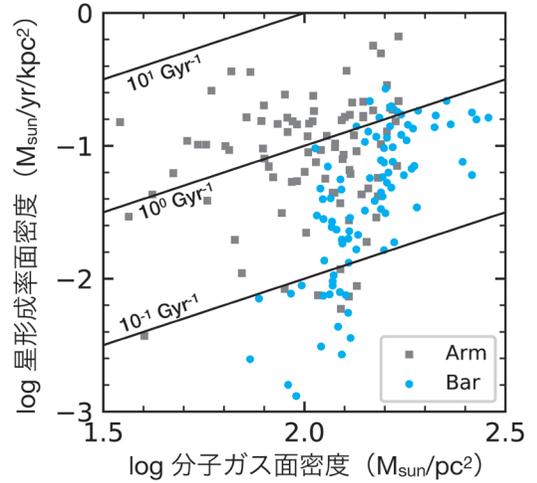


図2 棒渦巻銀河NGC 4303におけるKS則. 分解能は500 pcである. 斜めの線が星形成効率が一定の線である. 棒部の星形成効率が腕部に比べて系統的に低いことがわかる. 図は [5] をもとに作成.

河を空間分解したKS則が調べられるようになった. すると, 銀河内部の星形成率面密度はガスの面密度だけでは決まらないことがわかってきた. 図2は例として棒渦巻銀河NGC 4303のKS則を500 pcの分解能で描いたものである. ここで, 棒渦巻銀河とは渦巻銀河のうち中心部から顕著な棒状の構造が伸びている銀河のことである. 渦巻銀河の約半数が棒渦巻銀河であることが知られている [2]. 図2の斜めの線は星形成効率が一定の線である. ここで星形成効率はガスが星に変換される効率として単位分子ガス質量あたりの星形成率と定義され,

$$\text{星形成効率} = \frac{\text{星形成率面密度}}{\text{ガス面密度}} \quad (2)$$

である. 図2をみると, 同じガス面密度でも星形成効率にはばらつきがあることがわかる. しかも, その星形成効率には傾向があり, 棒部 (以下, bar) の効率は腕部 (以下, arm) に比べて系統的に低いことがわかる. 言い換えると, この結果は銀河のbarでは星形成が抑制されていることを示している. 実は, このような棒渦巻銀河の

barにおける星形成の抑制現象は以前から可視光観測を通して報告されていた [3, 4]. 近年になって電波による分子ガス観測が進んだ結果, その抑制が図2のように定量的に明らかになったのである. しかしながら, このような銀河内部での星形成効率の系統的な差, 特にbarで星形成が抑制される原因というのは未解明である. 銀河内部で分子ガスがどのような物理条件下にあれば星が形成されるのかという疑問に答えるためには, この星形成効率の差の原因を突き止めることが重要であると言える.

1.4 抑制の原因候補

星形成が抑制される原因はこれまで様々な説が唱えられてきた. たとえば, barでは強い衝撃波により分子ガスが壊される説 [3] や, 強いシアーによるGMCの破壊説 [6], 棒構造の形成に伴うガスの枯渇説 [7] などがあるが, 本稿では, 最近考えられている3つの説について詳しくみていく.

説1: GMCが重力的に束縛されていない説 [8, 9]. 通常, 星は重力的に束縛されたGMCが収縮することにより生まれるが, barではそのような

GMCが少ないという説である。

説2: 希薄な分子ガスが大量に存在している説.
これは分子ガスのすべてがGMCを構成しているわけではなく、中には星形成に寄与しない広がった希薄な成分が存在する。それがbarには大量にあるため、分子ガスがあっても星形成が起きにくいという説である。

説3: GMCが高速で衝突している説[10, 11].
分子雲衝突は、短時間に分子ガスを高密度に圧縮し大質量星の形成を促進させる、星形成の重要なプロセスであると考えられている [12]。しかしながら、barではarmに比べて衝突速度が大きく、衝突している期間が短かすぎるため、逆に星形成が抑制される可能性が示唆されている。

以上の3つの説はシミュレーションやGMC（大きさ約50 pc）よりはるかに大きい分解能（kpcスケール）で観測した結果に基づいて唱えられたものであり、実際にGMCを検出して調べた例はなかった。また、様々な説を包括的に調べた研究もなかった。ゆえに、実際に棒渦巻銀河のGMCを観測することでこれらの説を観測的に検証することが課題となっていた。

2. 強い棒渦巻銀河NGC 1300

星形成効率の差の原因を解明するためには、まずはarmとbarで星形成活動の差が著しい銀河を観測することが重要であろう。なぜならば、差が大きければ、星形成を制御する物理条件の違いがはっきりと検出できると期待されるからである。この観点に基づくと、直線的で明瞭な棒構造を持つ銀河（以下、強い棒渦巻銀河）が最適である。強い棒渦巻銀河は星形成がみられないbarを持ち、従来観測されてきた銀河に比べて環境間での星形成活動の差が著しいことが知られている [13, 14]。図3に代表例のNGC 1300を示す。Armでは多数の星形成領域（H α 領域：黒い粒々）がみられる。一方、barでは顕著なダストレーン（白い筋）がみられ分子ガスの存在が示唆されるが、

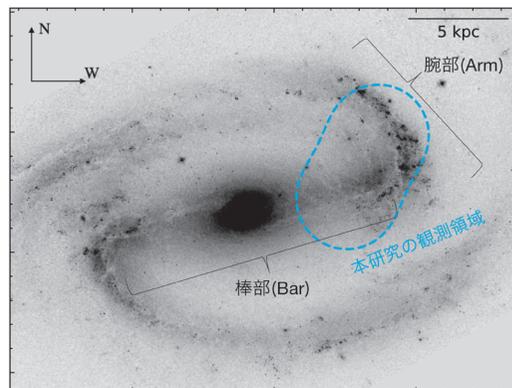


図3 強い棒渦巻銀河NGC 1300の可視光画像（ハッブル宇宙望遠鏡のVバンド）。直線的で明瞭な棒構造がみられる。Armにみられる黒いつぶつぶが大質量星形成領域であるH α 領域を示すが、そのような領域はbarにはみられない。

星形成領域はみられない。NGC 1300は強い棒渦巻銀河の中でも最も近傍（約20 Mpc）にある銀河であるということで、我々はこの銀河を研究対象とし、先の3つの説を包括的に調べた。本稿では、その検証結果を含めた我々の最近の研究成果を紹介する。

3. 巨大分子雲の性質調査

3.1 高空間分解能CO($J=1-0$) 観測

説1を検証するためには、まずGMCを観測する必要がある。分子ガスの観測は一般的に一酸化炭素 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$) のスペクトル線を観測することで行われる。ここでは回転量子数 J が $J=1$ から $J=0$ の回転遷移CO($J=1-0$) 輝線を用いる。天の川銀河内のGMCのCO観測結果から、GMCは典型的に分子ガス質量が $\sim 10^5$ – $10^6 M_{\text{sun}}$ 、大きさが約50 pcである。このような過去のGMC観測に基づき、我々はNGC 1300のGMCを検出するためアルマ望遠鏡を用いてCO(1–0) 輝線を0.4秒角（約40 pcに相当）の分解能で観測した。観測した領域は図3の青点線である。

観測結果が図4である。可視光の画像の上に、検出されたCO(1–0) 輝線を白色の等高線で示し

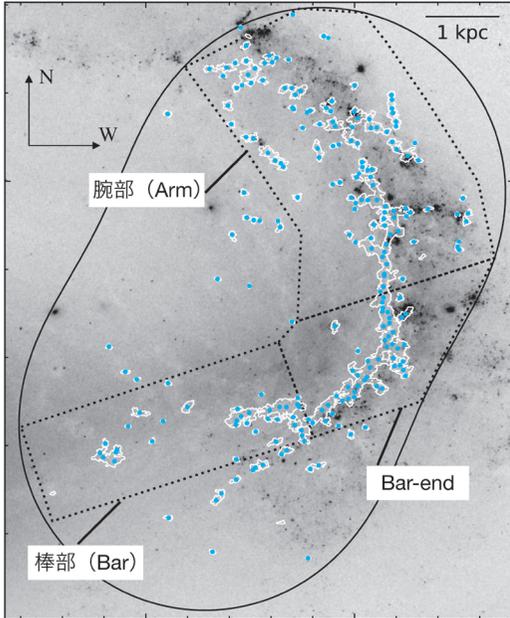


図4 アルマ望遠鏡を用いたCO(1-0)観測の結果を可視光画像(ハッブル宇宙望遠鏡のVバンド)の上に白線で示している。青点はCPROPSによって同定されたGMCの位置を示す。本研究では、観測領域をbar, arm, bar-endに分けて議論を行う。

ている。我々はarmからbarにかけて分子ガスを検出することに成功した。以下では、この観測領域のうち分子ガスが検出された領域をbar, arm, bar-end (armとbarの接合部)の3領域に分けて議論する。

次に、この観測データを基にGMCの同定を行った。同定にはCPROPS [15] という3次元クランプ発見アルゴリズムを用いた。CPROPSは同定したGMCについて分解能と雑音(ノイズ)の影響を取り除いたGMCの性質を計算してくれる。ここでは、シグナルの面積が角分解能以上であり、かつシグナルノイズ比が4以上のGMCを同定するようにパラメータを設定した。これは、質量に換算して $2 \times 10^5 M_{\text{sun}}$ 以上のGMCを同定するように設定していると言える。結果として、233個(bar: 28, arm: 55, bar-end: 43)のGMCを同定した。図4の青点が同定されたGMCの位置

を示す。

3.2 GMCの性質の比較

まず、同定されたGMCの基本的な性質(速度分散, 半径, および分子ガス質量)についてみていく。図5はそれぞれの環境におけるGMCの性質の箱ひげ図を示している。環境間で性質の分布に違いがあるかどうかを調べるため、コルモゴロフ-スミルノフ検定を行った。ここでは、有意水準を5%として、 p 値が0.05以下ならば帰無仮説は棄却、つまり2つの分布は異なると判定した。各GMCの測定誤差に基づきランダムリサンプリングを繰り返しながら p 値を計算した。結果として、速度分散と半径については環境間での違いはみられなかった。一方、分子ガス質量については、armやbarと比べるとbar-endでの質量が大きいということがわかった。この結果については、後半の5.4節にて注目する。

さて、本題のGMCの重力束縛状態の調査について述べる。GMCの重力束縛状態を調べるのに有用な指標としてビリアル比がある。これは、ビリアル平衡を仮定したときの質量であるビリアル質量と分子ガス質量の比で定義される。したがって、ビリアル比が1であることはビリアル平衡を示す。そして、ビリアル比が2より大きければ、運動エネルギーと重力エネルギーの和が正であること、つまり重力的に束縛されていないことを示す。図5の右端にビリアル比の分布を示している。Barでやや高い傾向にあるようにみえるが、コルモゴロフ-スミルノフ検定を行ったところ有意な差はみられなかった。すなわち、GMCの重力束縛状態に環境間の違いは無いということである。なお、最近の3次元銀河シミュレーションにおいても環境間でのビリアル比に違いはみられていない [11]。以上から、我々は説1、すなわちGMCの重力束縛状態の違いだけでNGC 1300の星形成抑制を説明するのは難しいだろうと結論づけた。

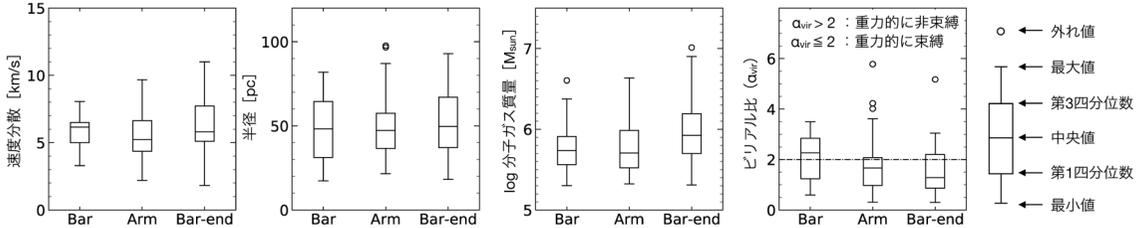


図5 NGC 1300の各環境におけるGMCの性質(速度分散, 半径, 分子ガス質量, ビリアル比)の箱ひげ図 [16]. 鎖線はビリアル比が2を示している.

4. 希薄な分子ガスの調査

4.1 干渉計の特性を利用した調査方法

次に, 説2: barには希薄な分子ガスが多く存在する可能性についてみていく. 一般的に, 星形成効率(式(2))を求めるときの分子ガス面密度はCO(1-0)がトレースする分子ガスの総量である. しかしながら, CO(1-0)はGMCだけをトレースするわけではない. COでトレースされる分子ガスは階層構造になっており, 密度の高くコンパクトな成分と, 密度が低く広がっている成分で構成されていると考えられる. コンパクトな成分はGMCそのものである. 図5からもわかる通り, 大きさが100 pc以下の構造物であり, まさに星形成の現場であると言える. 一方, 密度が低く広がっている成分, すなわち希薄な分子ガス成分はGMCとは異なり, 数百pcからkpcのスケールで広がっていると考えられている [17]. GMCに比べて密度は低いため, 現在の星形成には直接寄与していない成分であると言える. したがって, 同じ分子ガス面密度であっても, 希薄な分子ガスの割合が高ければ, 星形成率は小さくなるので, 結果として星形成効率は小さくなりうる.

この説を検証するためには各環境での星形成効率と希薄な分子ガスの割合を求め, 相関があるかを調べる必要がある. そのためには, 希薄な分子ガス由来のCO(1-0)とGMC由来のそれを区別しなければならないが, ここでは電波干渉計の特性を利用することで区別を試みる. アルマ望遠鏡

などの干渉計は高い空間分解能を実現できる一方で, 空間的に広がった成分をサンプルすることができない弱点がある. 前節で紹介したNGC 1300のGMCを観測したアルマ望遠鏡のデータはおおよそ700 pcより広がった成分に感度がないことがわかっている [16]. 言い換えると, 今回のアルマ望遠鏡の観測により得られたCOフラックスは700 pc以下の構造物由来である. したがって, 全体の分子ガスに対して, 希薄な分子ガスの割合は

希薄な分子ガスの割合

$$= 1 - \frac{\text{アルマ望遠鏡のCOフラックス}}{\text{全COフラックス}} \quad (3)$$

と表される. 銀河全体でこの値を求めた先行研究はあるものの [17], この割合の環境依存性と星形成効率の関係は調べられてこなかった.

NGC 1300でこの割合を求めるためには, 全COフラックスを求める必要がある. そこで, 野辺山45 m単一鏡を用いたCO(1-0)観測を実施した. 単一鏡は空間的な分解能に限界がある一方で広がった成分まで観測が可能である. 観測は, アルマ望遠鏡で観測した領域をカバーするように行い, 無事CO(1-0)を検出した. 角分解能は約17秒角で, これはNGC 1300において1.7 kpcに相当する.

星形成効率を求めるためには星形成率面密度も必要である. 原理的には星形成率は大質量星が放射する紫外線から推定が可能である. しかし, 紫外線は周囲のダストに吸収され赤外線として再放

射されるため、現実には紫外線と赤外線の間を両方観測することで真の紫外線の量を推定し星形成率を求める [18]. 本研究では、主に紫外線天文衛星 GALEX (Galaxy Evolution Explorer) の遠紫外 (FUV) バンドの撮像データと、赤外線データとして WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) の 22 μm バンドの撮像データを利用した.

4.2 星形成効率と希薄な分子ガスの割合の関係

図6がNGC 1300におけるKS則 (分解能 1.7 kpc) である. ここでは、図3の各領域をさらに2, 3分割して求めている. 斜めの線が星形成効率が一定の線である. この図から arm と bar-end に比べて bar では星形成効率が5-10倍低く、今回の観測によって、強い棒渦巻銀河では星形成抑制が顕著であるということが定量的に明らかになった.

さて、本題の星形成効率と希薄な分子ガスの割合との関係を示したのが図7である. 横軸は式(3)より求めた希薄な分子ガスの割合を示している. 結果として我々は、その割合と星形成効率

の間に負の相関を発見した. Arm や bar-end では希薄な分子ガスの割合が28-65%であるのに対して、bar では74-91%とほとんどの分子ガスが希薄な分子ガスとして存在しており、そのために星形成効率が低くなっていることがわかる. すなわち、この結果は説2を支持するものである.

4.3 GMCを構成する分子ガスの星形成効率

図7より説2は正しそうであるが、ではこの説だけで星形成抑制は説明できるのだろうか? もし、希薄な分子ガスの割合のみによって星形成効率が左右されるのであればGMCを構成する分子ガスだけを使って求める星形成効率は一定になるはずである. そこで、実際にGMCを構成する分子ガスの星形成効率を調べてみた. GMCを構成する分子ガス面密度は、同定したGMCについて、各領域における総量を求めたうえで領域の面積で割って求めた. 結果は図8に示したように、GMCを構成する分子ガスの星形成効率は一定ではなく、barでの値はarmやbar-endに比べて5倍から1桁以上低いことがわかった. この結果は、barの星形成抑制は大量の希薄な分子ガスの存在だけでは説明できず、GMC自体の星形成活動を制御する別のメカニズムがあることを示唆し

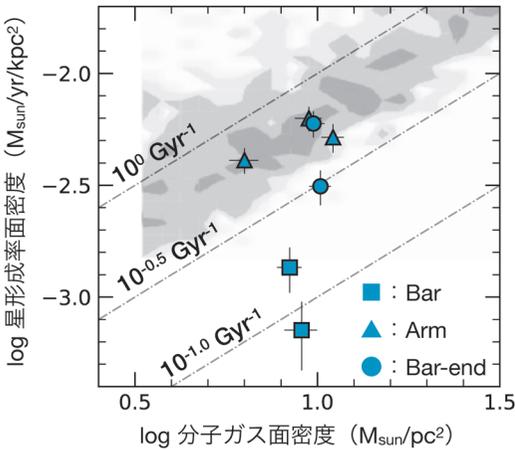


図6 NGC 1300におけるKS則. 分解能は1.7 kpcである. 図3の各領域をさらに2, 3分割して値を導出している. 斜めの一点鎖線が星形成効率が一定の線を示している. 灰色の領域は近傍の渦巻銀河で求められたKS則 [19]. NGC 1300のbarではarmやbar-endに比べて5-10倍星形成効率が低いことがわかる.

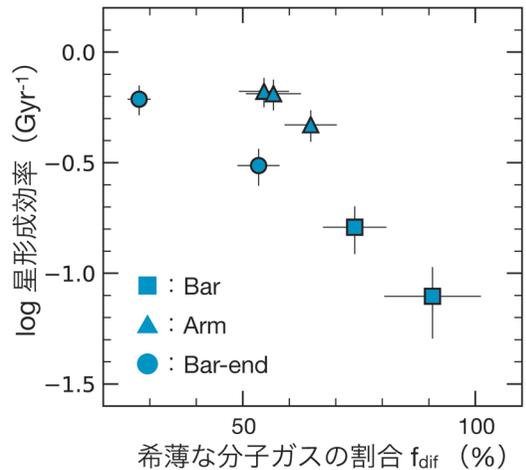


図7 NGC 1300における星形成効率と希薄な分子ガスの割合の関係. 希薄な分子ガスの割合が高いほど星形成効率が低いことがわかる.

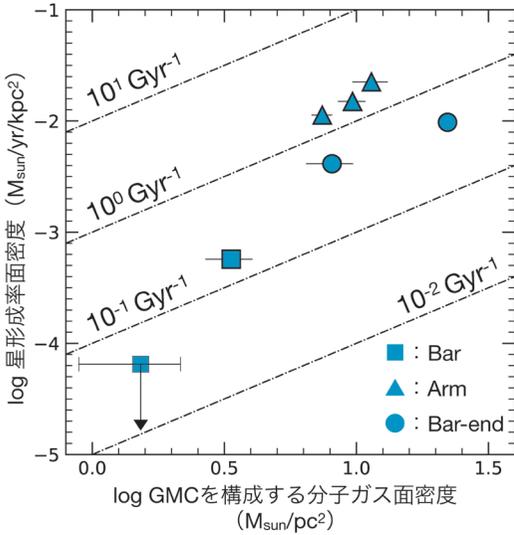


図8 NGC 1300におけるGMCを構成する分子ガスに関するKS則 [20]. GMCの星形成効率もbarで低いことがわかる. ここで, 縦軸の星形成率面密度はGMCのデータと分解能を揃えるため, ハッブル宇宙望遠鏡のデータを基に作成した水素の電離再結合線H α 線画像から求めている.

ている.

5. 分子雲衝突速度の調査

5.1 分子雲衝突の理論的研究

さて, 説2の検証を通してGMC自体の星形成を抑制する機構も存在することが示唆された. 説1の検証で述べたとおり, GMC自体の重力束縛状態に大きな違いはないので, それ以外のメカニズムを考える必要がある. そこで登場するのが, 説3: GMCの高速衝突説である.

分子雲衝突は大質量星形成のトリガーとして近年注目されている現象である. 分子雲衝突については2020年の月報に詳しく取り上げられているのでそちらを御覧いただきたい [21]. この分子雲衝突については, 衝突すれば必ず星形成が起きるというわけではなくて衝突速度が速すぎると衝突時間が短いため, 十分な質量の分子雲コア(GMCの中で最も密度が高く星が誕生する場所)が形成されず, 大質量星形成が抑制されることが

近年理論的に示されている [22, 23]. さらに, 銀河シミュレーションによってarmに比べてbarではGMCが高速で衝突していることが示唆されている [24]. これら2つの理論的研究からGMCの高速衝突説が唱えられているのである.

これまでのCO観測によって, armに比べてbarでのCOスペクトルの速度幅が大きいことが報告されている [14, 25]. これは定性的には上述の銀河シミュレーションと同じ傾向であるため, GMCの高速衝突説と矛盾ない結果であった. しかし, この観測は分解能がkpcスケールとGMCよりはるかに大きく速度幅がGMCの衝突速度を反映しているとは限らない. そこで, 我々は説1の検証で作成したGMCのカタログを使って, 実際にGMCの衝突速度の調査を試みた. 調査に用いた2つの手法についてそれぞれ解説する.

5.2 速度場モデルを用いた衝突速度の推定

第一の方法は, GMCの速度ベクトルを求めて, 今後衝突するGMCを抽出し, その衝突速度を推定するというものである. 我々観測者はGMCの速度成分について視線速度の1成分しか観測できない. その視線速度だけから銀河円盤上でのGMCの速度ベクトルを求めることは原理的に不可能である. そこで, 我々は銀河全体での大局的な分子ガスの速度場を求め, GMCはこの速度場に沿って運動すると仮定することで, GMCの速度ベクトルを導出した.

NGC 1300は銀河全体をCO($J=2-1$)輝線で観測されている. そこで, このデータを基に銀河の大局的な速度場をモデル化した. 詳細は割愛するが, 銀河円盤において中心を原点とした極座標を張り, 位置(r, θ)における速度場の動径成分と方位角成分を仮定し, これが観測されたCO($2-1$)の視線速度と合うようにフィッティングを行った.

次に, GMCの速度ベクトルを求める. 個々のGMCの速度は大局的な分子ガスの速度に対して速いものもあれば遅いものもある. つまり, 観測

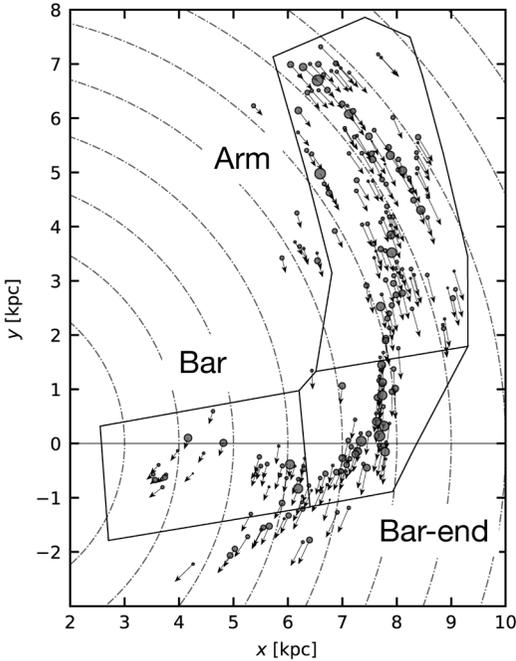


図9 求めた GMC の速度ベクトル [26]. この図は銀河を真上 (face-on) からみたものである. 座標 (0, 0) が銀河中心に対応する. 点線は 1 kpc ほどの同心円を示す.

された GMC の視線速度と速度場のモデルが予想する視線速度には差がある. ここでは, GMC の速度ベクトルの向きは大局的な速度場と同じと仮定しているので, 観測された GMC の視線速度と整合するように速度ベクトルの大きさを求めて, 速度ベクトルを計算した. このようにして求めた GMC の速度ベクトルを示したのが図9である. これをみると, arm の GMC は円運動をしている一方, bar では円運動からずれた動きをしているのがわかる. これは棒構造のポテンシャルによって GMC の軌道が曲げられているためであり, 同様の GMC の運動は銀河シミュレーションでもみられている [11].

最後に, 衝突速度を推定する. 今述べたように, 個々の GMC は大局的な分子ガスの速度に対して前後しているため, 一定の間隔で衝突する. ここでは, GMC は等速直線運動を行うと仮定す

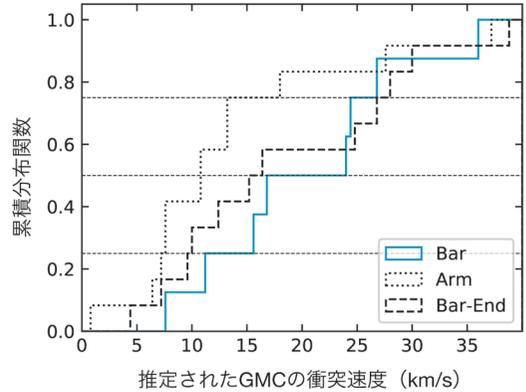


図10 推定された GMC の衝突速度の規格化された累積分布関数 [26].

る. この仮定の下, (1) 現時点で距離が 300 pc 以内であり, (2) 今後 10 Myr 以内に衝突するペアを抽出する. 300 pc は最近接 GMC までの典型的な距離であり, また, 10 Myr というのは円運動を直線運動と近似できる範囲に由来しており, 移動距離にして銀河一周の 1/30 に相当する. 抽出されたペアについて, 相対速度を衝突速度として計算した.

図10が推定された GMC の衝突速度の累積分布である. 図をみると, 推定された衝突速度が環境に依存する傾向にあることがわかる. すなわち, bar と bar-end の衝突速度が arm に比べて高い傾向にある. また, 星形成が抑制されうる 20 km/s を超える分子雲衝突の数密度も bar と bar-end で高いことがわかった. Bar は星形成が抑制されている一方で, bar-end では星形成活動が活発である (図8). このように全く異なる星形成活動を示すのにもかかわらず, ともに衝突速度が大きいということは, 衝突速度以外にも分子雲衝突による星形成を制御するパラメータが存在することを示唆している.

5.3 GMC間の速度差

議論の前に, もう一つの手法による結果を紹介する. ここでは, 衝突速度を調べるため, GMC 間の速度差に着目する. これは, 注目している

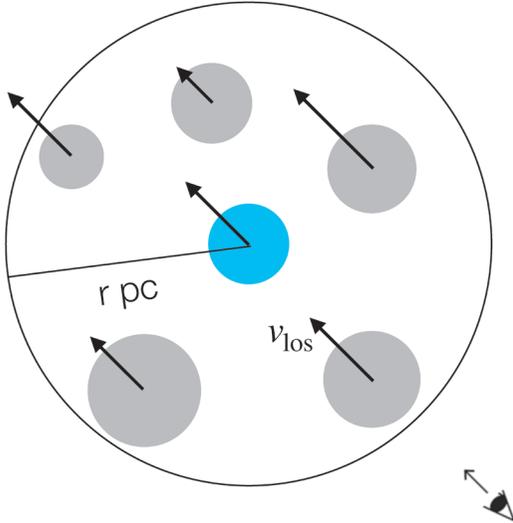


図11 GMC間の速度差を求めるイメージ図。注目しているGMC (青) の視線速度 (v_{los}) とその周囲 (r pc 以内) に位置する複数のGMC (黒) の視線速度の平均値の差をGMC 間の速度差として求める。ここで、平均値はGMC の質量で重み付けしている。

GMCの視線速度とその周囲に存在するGMCの視線速度の平均値との差で定義される量である(図11)。銀河シミュレーションによるとGMC間の速度差の大小関係とGMCの衝突速度の大小関係は同じであることがわかっている。したがって、GMC間の速度差を調べることで衝突速度の定性的な傾向をつかめるのである。先程はモデルを使い様々な仮定の下で衝突速度を推定したが、このGMC間の速度差はモデルフリーな観測量である。NGC 1300で調べた結果を図12に示す。結果として、armに比べてbarとbar-endでGMCの速度差が大きかった。これは、衝突速度がbarとbar-endで大きいことを示唆しており、前述の手法と矛盾ない結果である。

5.4 同じ高速衝突でも、barとbar-endで星形成活動が異なる原因

両方の結果から、barとbar-endは星形成活動が異なるのにもかかわらずともに衝突速度が大きいことが示唆された。なぜこのような違いが生ま

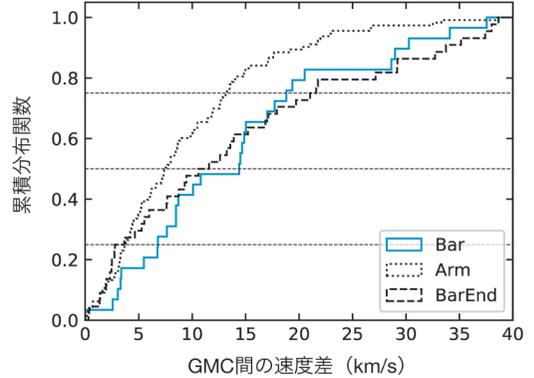


図12 GMC間の速度差の規格化された累積分布関数 [26]。銀河の傾きを補正した値である。ここでは、図11における r として典型的なGMC間距離である300 pcを採用している。

れるのだろうか？ その答えとして、衝突するGMCの質量が異なることが原因である可能性が挙げられる。実は分子雲衝突のシミュレーションでは、衝突速度だけではなく衝突する分子雲の質量にも依存して星形成が決まることが示されている [23]。すなわち、衝突速度が大きくても衝突するGMCの質量が大きければ、衝突時間は長くなり、星形成が誘起されるのである。説1でのGMCの性質調査(3.2節)を思い出してもらおうと、barとbar-endではGMC質量が統計的に有意に異なり、barの方が小さいと述べた。したがって、barでは質量が小さめのGMCが高速で衝突しているために、星形成が抑制されている可能性があるといえる。以上から、我々はbarでは質量が小さいGMCが高速衝突しているために、GMCの星形成活動が抑制されている可能性がある結論づけた。

6. まとめと今後の課題

以上の3つの研究をまとめると、強い棒渦巻銀河NGC 1300における棒部の星形成抑制メカニズムは少なくとも(1)星形成に寄与しない希薄な分子ガスが大量にあること、(2)質量が小さいGMCが高速衝突していることの2つであるとい

える。言い換えると、銀河の環境間で星形成効率の違いが生まれるのは少なくとも GMC を構成する分子ガスの割合の違いと衝突する GMC の速度と質量の違いに起因しているだろうと言える。

しかしながら、まだ課題はある。ここ最近の分子ガスの大規模サーベイによって棒渦巻銀河の棒部では必ずしも星形成効率が低いわけではなく、様々であるということがわかってきている [27]。我々は極端なケースとして NGC 1300 を研究してきたが、今後はその星形成効率の多様性を希薄な分子ガスの量の違いや分子雲の衝突速度の違いで系統的に説明できるのか、あるいは別のメカニズムが存在するのか検証していく必要がある。

分子雲衝突についてもまだ課題は多い。今回の結果から、おおよそ大質量星形成が誘発されるような衝突速度と GMC 質量のパラメータスペースがありそうということがわかってきたが、今後はこの条件を定量的に求めていく必要がある。特に、衝突速度以外のパラメータが質量であるかどうかはまだ不明である。最近の銀河系内の研究では、分子雲の柱密度（面密度）が鍵だとも言われている [28]。最近では多数の近傍銀河で GMC の観測が行われている。今後はそれらのデータをもとに、GMC の性質の幅広いパラメータスペースにおいて分子雲衝突を調べ、同時に局所銀河群で行われている詳細観測と比較していくことが重要となっていこう。一方で、より衝突速度が大きい領域を詳しく調べていくことも重要であることを強調しておきたい。銀河形成・進化においては、銀河衝突というのは普遍的に起き、それにより活発な星形成が起きる。そのような銀河では分子雲衝突も頻繁に起きると考えられる。実際、近傍の衝突銀河では約 100 km/s の速度で分子ガスが衝突している [29]。このような観点から、渦巻銀河や棒渦巻銀河だけではなく衝突銀河も対象とすることでより一般的な分子雲衝突による星形成メカニズムが明らかになっていくのではないかと期待している。

謝 辞

本稿は筆者の博士論文をもとにしたものです。指導教官の太田耕司氏をはじめ、共同研究者の羽部朝男氏、藤本裕輔氏に深く感謝いたします。また、本稿の執筆を勧めてくださった江草実編集長にも感謝いたします。なお、本研究のデータ解析の一部は、国立天文台の天文データセンター (ADC) の多波長データ解析システムにて行いました。

参考文献

- [1] Kennicutt, R. C., Jr., 1998, ApJ, 498, 541
- [2] Marinova, I., & Jøgee, S., 2007, ApJ, 659, 1176
- [3] Tubbs, A. D., 1982, ApJ, 255, 458
- [4] James, P. A., et al., 2009, A&A, 501, 207
- [5] Mose, R., 2012, PhD Thesis, The University of Tokyo
- [6] Athanassoula, E., 1992, MNRAS, 259, 345
- [7] Spinoso, D., et al., 2017, MNRAS, 465, 3729
- [8] Sorai, K., et al., 2012, PASJ, 64, 51
- [9] Nimori, M., et al., 2013, MNRAS, 429, 2175
- [10] Fujimoto, Y., et al., 2014a, MNRAS, 445, L65
- [11] Fujimoto, Y., et al., 2020, MNRAS, 494, 2131
- [12] Habe, A., & Ohta, K., 1992, PASJ, 44, 203
- [13] 太田耕司, 1987, 天文月報, 80, 106
- [14] Maeda, F., et al., 2018, PASJ, 70, 37
- [15] Rosolowsky, E., & Leroy, A., 2006, PASP, 118, 590
- [16] Maeda, F., et al., 2020a, MNRAS, 493, 5045
- [17] Pety, J., et al., 2013, ApJ, 779, 43
- [18] 竹内努ほか, 2020, 天文月報, 113, 429
- [19] Bigiel, F., et al., 2008, AJ, 136, 2846
- [20] Maeda, F., et al., 2020b, MNRAS, 495, 3840
- [21] 福井康雄, 2020, 天文月報, 113, 269
- [22] Takahira, K., et al., 2014, ApJ, 792, 63
- [23] Takahira, K., et al., 2018, PASJ, 70, S58
- [24] Fujimoto, Y., et al., 2014b, MNRAS, 439, 936
- [25] Yajima, Y., et al., 2019, PASJ, 71, S13
- [26] Maeda, F., et al., 2021, MNRAS, 502, 2238
- [27] Muraoka, K., et al., 2019, PASJ, 71, S15
- [28] Enokiya, R., et al., 2021, PASJ, 73, S75
- [29] Tsuge, K., et al., 2021, PASJ, 73, S35

Mechanisms of Star Formation Suppression in a Strongly Barred Galaxy

Fumiya MAEDA

Institute of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Abstract: Star formation activity in the bar regions tends to be suppressed. However, its cause is still unclear. In order to investigate the mechanisms of the suppression, we conducted molecular gas observations using the ALMA telescope and the Nobeyama 45-m single-dish telescope toward the strongly barred galaxy NGC 1300, where SF is remarkably suppressed in the bar. As a result, we concluded that the leading candidates of causes for the suppression in NGC 1300 are (1) the presence of a large amount of diffuse molecular gases and, (2) high-speed cloud-cloud collisions between low-mass giant molecular clouds.