

近傍渦巻銀河における分子ガスの速度場の フーリエ解析



サラク ドラガン・COMINGチーム

〈筑波大学宇宙史研究センター 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1〉

e-mail: salak.dragan.fm@u.tsukuba.ac.jp

星間空間の分子ガスは、星形成の燃料となり、銀河進化に重要な役割を果たしている。我々は、分子ガスの分布や運動を調べるために野辺山宇宙電波観測所の45 m電波望遠鏡で近傍銀河のCO輝線観測を行うCOMINGプロジェクトを実施した。本稿では、プロジェクトの一つの成果として、観測で得られたCOガスの速度場のフーリエ解析について紹介する。20天体の渦巻銀河における分子ガスの円運動と非円運動の速度成分を測定し、棒渦巻銀河の棒構造のパターン速度について新たな測定方法を検討した。

1. はじめに

銀河において星は、分子ガスから生まれると知られている。そのため、分子ガスの分布や運動は、銀河進化に繋がると期待されており、多くの研究が進んでいる。

星形成が比較的活発な渦巻銀河の中では、大きく分けて棒構造を持っている銀河(SAB, SB)と持っていない銀河(SA)という二種類がある。円盤を持つ典型的な渦巻銀河では、星と星間ガスが円運動に近い運動をして銀河中心の周りを回っている。一方、棒渦巻銀河では、kpcスケールで数十km/sといったガスの系統的な非円運動成分もよく観測されている。これは、重力ポテンシャルの形がガスの動きに大きな影響を与えているためと思われる。特に低温の分子ガスは、速度分散が小さくて、薄い円盤に集中的に分布しているので、その分布と速度が銀河の力学に関する重要な情報を持っている。

棒構造は、銀河の力学的進化に重要な役割を果たしていると考えられている[1]。銀河衝突のような短期的で激しいイベントと異なって、棒構造

による銀河進化は、長期的(secular evolution)であり、銀河の年齢の時間スケールで進んでいる。その過程を理解するために、まず観測で分解できる近傍銀河の棒構造の特徴を調べることが不可欠である。特に重要なのは、棒構造の半径(長さ)と回転速度である。我々は、回転速度について調べており、新たな測定方法を考案した。本稿では、その結果を簡単に紹介する。

2. 分子ガスの速度場とフーリエ級数

2.1 解析の原理

円盤銀河は、一般的に地球から見た時に傾斜角*i*によって楕円の形に見える。楕円の長半径が*a*で短半径が*b*とすると、傾斜角との関係は、 $\cos i = b/a$ となる(図1)。傾斜角が*i*=0の場合はface-on銀河で、*i*= $\pi/2$ の場合はedge-on銀河となる。この見かけの楕円は、実際には傾いた円であり、その中でガスなどが中心の周りを回っていると考える。長半径(銀河の長軸)から反時計回りで方位角 φ を定義すれば、見かけの視線速度*v*は、非円運動成分がない場合、 $v = v_{\text{sys}} + v_{\varphi} \sin i \cos \varphi$ という式で表すことができる。 v_{sys} は銀河の後退速

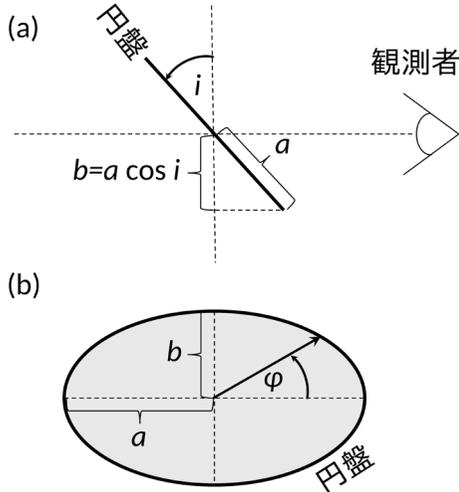


図1 (a) 銀河円盤の傾斜角の定義。(b) 観測者から見た銀河円盤. i は式(1)で定義した傾斜角で, φ は長軸に対する方位角である.

度で, v_φ は回転速度である. 動径方向にも円運動以外の速度成分が存在した場合は, 見かけの速度は, 一般的にフーリエ級数として表現することができる.

$$v = v_{\text{sys}} + \sum_{m=1}^{\infty} c_m \cos(m\varphi) + \sum_{m=1}^{\infty} s_m \sin(m\varphi) \quad (1)$$

但し, c_m と s_m は, 中心からの距離(半径 $R \equiv a$)の関数で, 方位角に依存しないとする. この式をよく見ると, $m=1$ の時の $c_1 = v_\varphi \sin i$ は円運動成分の回転速度で, s_1 は軸対称的な動径方向の速度成分である. 正負によって s_1 は内側方向か外側方向のガスの動きを表す. さらに円盤の中に渦状腕による周期的な非円運動があれば, $m \geq 2$ の項に現れる. つまり, c_1 以外の全ての項は様々な非円運動成分を表現している.

図2は, $m=1$ のみのフーリエ級数で満たした速度場の簡単なモデルを示したものである. この例では, ある半径 R_0 で観測された速度分布 $v(R=R_0, \varphi)$ が実線のようなものであれば, 方位角成分 $0.5 \cos \varphi$ と動径方向成分 $-0.5 \sin \varphi$ に分解できる.

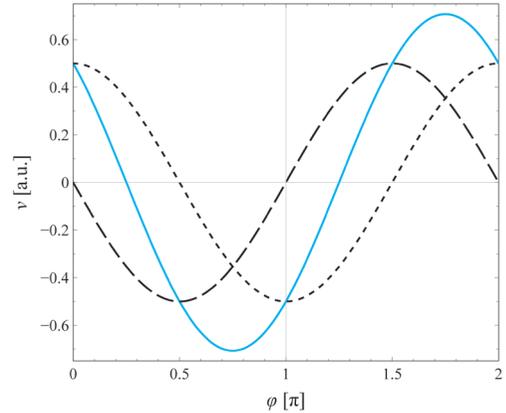


図2 ある半径 R_0 での速度分布 $v(R_0, \varphi)$ の単純な例. 円運動 $0.5 \cos \varphi$ は点線, 軸対称的な動径方向の速度 $-0.5 \sin \varphi$ は破線で, その足し算 $0.5 \cos \varphi - 0.5 \sin \varphi$ は実線で示している. 単位は任意. 但し, 後退速度は $v_{\text{sys}}=0$ とした.

この方法を用いれば, 基本的にガスや星の速度場のデータがあれば, 円運動成分と非円運動成分を定量的に導出することができる. まず, 銀河の円盤の各半径(円環)で速度のデータを取得する. 半径ごとに図2のような速度の関数があれば, 回転運動が支配的と仮定して c_1 以外の項が最小になるように速度関数をフーリエ級数で再現する. 自由パラメーターは, c_m と s_m だが, 銀河の方位角(position angle)や傾斜角 i なども同時に決定できる. 非円運動の項が最小になった際に全てのパラメーターが決まる.

2.2 COMING データ

上記の解析を行うために速度場の2次元の観測データが必要だが, どのようなデータが最適であろうか. 銀河の中で運動するのはガスや星など色々あるが, 前述の通り銀河の力学によく使われるのは分子ガスである. 分子ガスのプローブとしてよく観測されるのは, 一酸化炭素(CO)である. CO分子の量子数 $J=1$ から $J=0$ への回転遷移は, 静止周波数が115 GHz付近にあるので, 国立天文台の野辺山45 m電波望遠鏡などで観測できる.

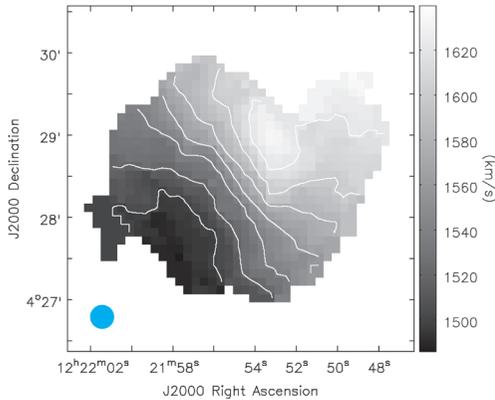


図3 NGC 4303銀河のCO速度場のマップ. 等高線の間隔は20 km/s. 左下の円の大きさは分解能を示す. 後退速度1563 km/sに対し, 右上は我々から遠ざかり左下は近づいていることがわかる.

我々は, 近年, “CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies” (COMING) という野辺山宇宙電波観測所のレガシープロジェクトで45 m電波望遠鏡を用いて多くの近傍銀河におけるCO ($J=1 \rightarrow 0$) 分子ガスを観測してきた [2-7]. COMINGのCOデータは, 空間分解能 ($17''$) も速度分解能 (10 km/s) も高く, 観測視野も広いので, 前章で紹介したフーリエ解析を行うために最適である. 分子ガスの分布の広がりなど考慮した上で最終的に20天体を選んだ. その中でSABとSBを含めて棒渦巻銀河が7天体で, 普通の渦巻銀河SAが13天体だった [4]. Kinemetry [8] というInteractive Data Languageに基づいたプログラムを使い, 全ての天体でCOガスの速度場のマップから半径ごとにフーリエ級数を計算した. 一つの棒渦巻銀河の速度場の例を図3に示す. 下記, 解析結果について述べる.

3. 分子ガスの円運動と非円運動

棒渦巻銀河は, 重力ポテンシャルが軸対称的ではないため, 円盤の中で力のモーメントが働く. 従って, 方位角によって分子ガスが動径方向と垂直方向に加減速され, 非円運動が発生する. この

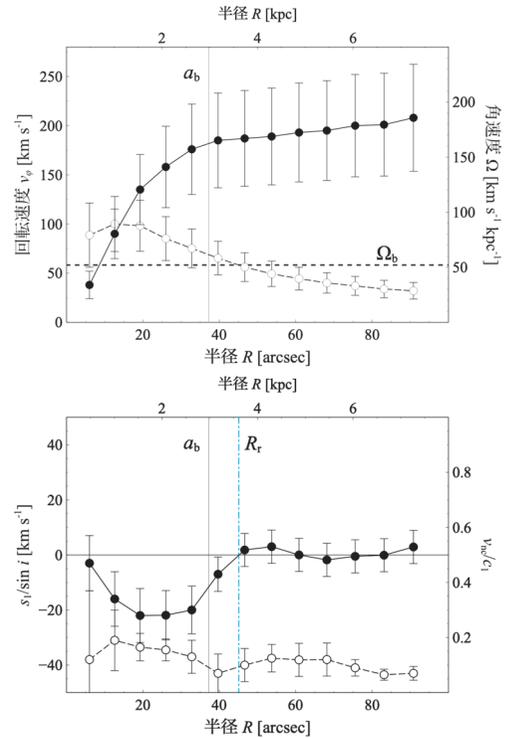


図4 NGC 4303銀河の計算結果. (上) 回転速度 (黒丸) と角速度 (白丸). パターン速度 Ω_b (点線) は速度反転半径 R_t での角速度 (本文参照). (下) 動径方向の速度 $s_i/\sin i$ (黒丸) と非円運動の割合 v_{nc}/c_1 (白丸). a_b は棒構造の半径.

非円運動成分は, 速度場のフーリエ級数の分析で円運動成分から判別することができる [4]. 図4 (上) は, 円運動成分 $v_\phi = c_1/\sin i$ を示した例である. 図4 (下) は, $v_{nc} = \sqrt{s_1^2 + c_2^2 + s_2^2 + c_3^2 + s_3^2}$ と定義した速度の非円運動成分であり, 比較のために円運動成分 c_1 で割ったものを表している.

図4 (下) に示す $s_i/\sin i$ 成分の絶対値が半径 R_t (4.1で詳しく説明) 以内で大きいので, 分子ガスが軸対象的な動径方向の運動もしていることがわかる.

フーリエ級数の計算で求めた渦巻銀河SAと棒渦巻銀河SAB, SBの平均の非円運動成分を図5に示す [4]. この結果から渦巻銀河も棒渦巻銀河も全体的に非円運動の割合が1-2割程度になっていることがわかる. しかし, 棒渦巻銀河では, 半径

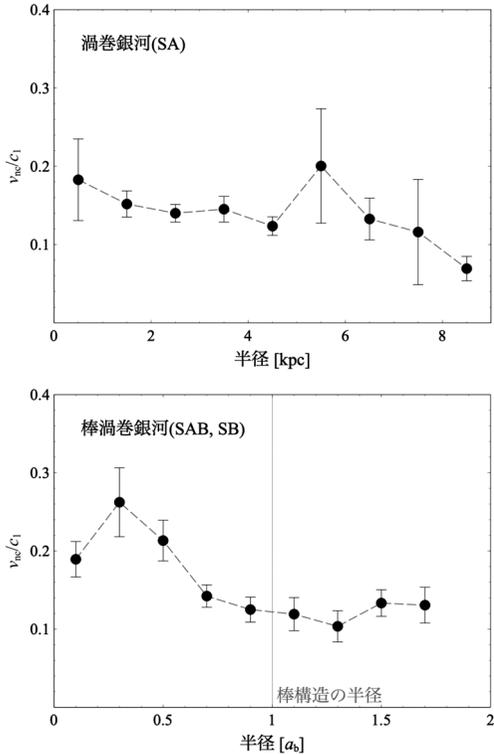


図5 非円運動の割合 v_{nc}/c_1 . (上) SA 銀河の平均値.
(下) SAB+SB の銀河の平均値.

が小さいところで分子ガスの非円運動がさらに2割以上に上がっている。棒構造の半径 (a_b) でいうと、非円運動の最大値は、半径 $R \sim 0.3 a_b$ であり、最小値は、 $R \sim 1.3 a_b$ であった。ここで使用した半径 a_b は、先行研究で赤外線のパターン速度から求められたものである [9]。

4. 棒構造のパターン速度

4.1 共回転半径と分子ガスの運動

棒構造は、数多くの星で構成されており、銀河円盤の中で一定の角速度 Ω_b 、いわゆるパターン速度で回転していると思われる。ところが、円盤自体は、そのような剛体回転ではないので、一般的に棒構造と異なる速度で回転している。棒構造と銀河円盤が同じ速度で回転している半径は、共回転半径 R_{CR} (corotation radius, 図6) という。 $R <$

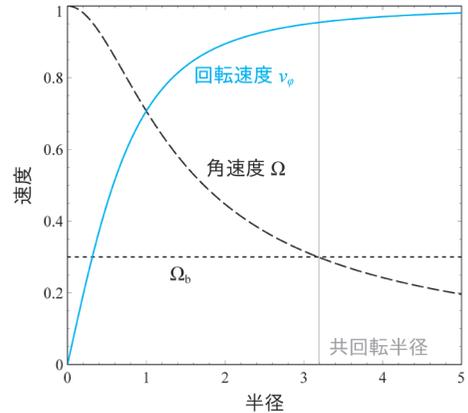


図6 共回転半径 R_{CR} の定義。円盤銀河の典型的な回転速度のモデル (実線)、その角速度 (破線)、棒構造のパターン速度 Ω_b (点線) を表示している。単位は任意。

R_{CR} では、円盤のガスの方が棒構造より回転が速いので、回っている途中に棒構造に入ったり非円運動したりする。一方、 $R=R_{CR}$ においては、回転速度が同じなので、棒構造に対する動きが最も少ないと考えられる。もし観測から R_{CR} とそこでの回転速度 $v_\phi (R=R_{CR})$ を測定できれば、 $\Omega_b = v_\phi/R_{CR}$ からパターン速度を求めることができる。

回転速度 v_ϕ に関しては、前述の通り速度場のフーリエ解析から各半径で計算することができる。ところが、 R_{CR} はどうすれば良いか。共回転半径では、ガスの非円運動が最も少ないと考えれば、 c_1 以外の項が最小になるような半径を探せば良い。棒構造による影響を考えると、動径方向の速度成分を代表する s_1 が特に重要である。 s_1 の値がゼロになり、もしくはその正負が変わる半径を速度反転半径 (radial-velocity reversal radius) R_r とする。共回転半径で円運動が支配的だとすれば、理想的には $R_r=R_{CR}$ となる。従って、パターン速度を $\Omega_b = v_\phi/R_r$ から求められる (図4)。この手法は、先行研究でよく使われる Tremaine-Weinberg法 [10] などと異なって新たな提案である。

上記の手法を検証するために、得られた速度反転半径 R_r と別の手法で得られた共回転半径の値

を比較してみた。我々が解析した棒渦巻銀河の中で先行研究で Ω_b が測定されている天体は6つあった。しかし、 Ω_b は、適用した銀河までの距離に依存するので、 R_{CR}/a_b (= 共回転半径/棒の半径) という距離依存性のないパラメータを比較した。その結果、1天体を除いて、全ての銀河で我々の方法で出した値が先行研究の値と誤差の範囲内で一致した。平均値は $R_r/a_b=1.24\pm 0.12$ で、先行研究のシミュレーションからよく言われる1.0-1.4に収まる値となった [11]。

4.2 銀河の質量と棒構造との関係

最後に、得られた Ω_b を用いて棒構造と銀河進化について考察する。銀河の進化を理解するために棒構造の基本的な特徴(半径やパターン速度)と母銀河の特徴(質量など)の関係を調べるのが重要である。今回調べたのは、パターン速度に対する棒状構造の半径とその長さ以内の銀河の全質量である(図7) [4]。棒構造の半径は、先行研究の値 [9] を採用し、パターン速度は、本研究で測定した値を使った。また、銀河の質量は、Kinemetryで計算した回転速度からニュートンの万有引力の法則を用いて導出したものである。要するに、円運動が支配的と仮定して、重力と遠心力の釣り合いから全質量 $M(R < a_b) = a_b v_\phi^2 / G$ を求めた。 G は万有引力定数である。今回適用したフーリエ解析の方法であれば、回転速度が円運動成分 c_1 から簡単に導出できるので、棒構造の領域の半径 $R < a_b$ 以内の質量を求めた。

図7(上)に示したように棒構造が大きければ大きいほど、パターン速度が遅いという傾向が見られる。ここで、棒構造の半径は銀河円盤の半径によく使う r_{25} (表面輝度が可視光のBバンドで $m_B=25$ mag/arcsec²になる半径) [6] で規格化したものを用いている。また、棒構造の半径以内の全質量と比較すると、図7(下)のように質量の大きい天体はパターン速度が遅くなる傾向が見られる。理論的研究の観点からいうと、時間が経つにつれて棒構造が成長し、回転が遅くなるという

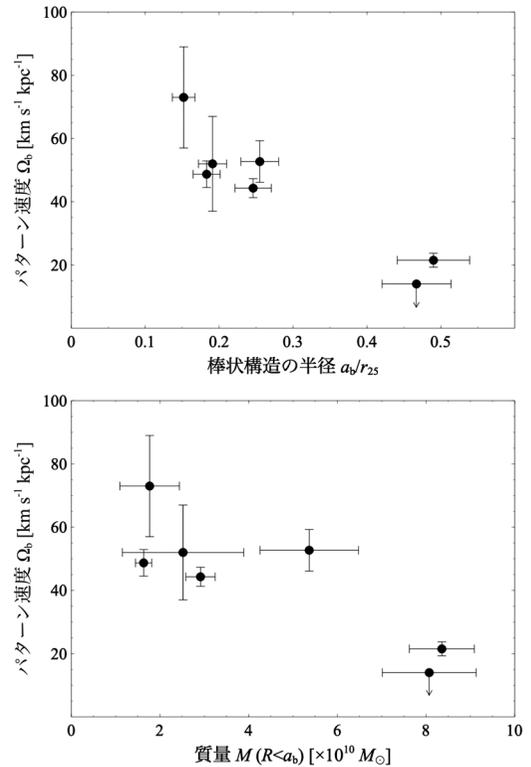


図7 (上) パターン速度 Ω_b と r_{25} で規格した棒構造の半径との関係。(下) 銀河の質量との関係。

予測が報告されている [1]。また、棒構造が回転していると、銀河のダークマターハロとの相互作用によって「力学摩擦」 [12] で減速されるという結果もある [13, 14]。我々の観測結果は、銀河のサンプル数が少ないとはいえ、その傾向を示唆している。

5. まとめ

野辺山宇宙電波観測所のレガシープロジェクトであるCOMINGでは、45 m望遠鏡を用いて近傍銀河のCO輝線データを取得した。我々は、このプロジェクトで得られたマップデータから速度場をフーリエ解析し、近傍渦巻銀河における分子ガスの非円運動と円運動の速度成分を測定した。加えて、その結果を利用し、棒渦巻銀河の進化において重要である棒構造のパターン速度の新たな

測定方法を検討した。

謝 辞

本研究は、多くの方の努力のおかげでできたものである。特に野辺山45 m望遠鏡での運用、装置開発、観測の支援に関わった方々、そして関西学院大学の野間勇斗さんをはじめCOMINGのメンバーで観測やデータ解析に尽力した方々に大変感謝する。

参考文献

- [1] Sellwood, J. A., 2014, *Rev. Mod. Phys.* 86, 1
 [2] Muraoka, K., et al., 2016, *PASJ*, 68, 89
 [3] Hatakeyama, T., et al., 2017, *PASJ*, 69, 67
 [4] Salak, D., et al., 2019, *PASJ*, 71, S16
 [5] Muraoka, K., et al., 2019, *PASJ*, 71, S15
 [6] Sorai, K., et al., 2019, *PASJ*, 71, S14
 [7] Yajima, Y., et al., 2019, *PASJ*, 71, S13
 [8] Krajnović, D., et al., 2006, *MNRAS*, 366, 787
 [9] Herrera-Endoqui, M., et al., 2015, *A&A*, 582, A86
 [10] Tremaine, S., & Weinberg, M. D., 1984, *ApJ*, 282, L5
 [11] Athanassoula, E., 1992, *MNRAS*, 259, 345
 [12] Chandrasekhar, S., 1943, *ApJ*, 97, 255
 [13] Tremaine, S., & Weinberg, M. D., 1984, *MNRAS*, 209, 729
 [14] Debattista, V. P., & Sellwood, J. A., 2000, *ApJ*, 543, 704

Fourier Analysis of Molecular Gas Velocity Fields in Nearby Spiral Galaxies

Dragan SALAK and COMING team

University of Tsukuba, Tomonaga Center for the History of the Universe, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

Abstract: Molecular gas in galaxies plays a crucial role in star formation. To study the distribution and kinematics of molecular gas, we used the Nobeyama 45-m telescope to image CO ($J=1 \rightarrow 0$) gas in nearby galaxies as part of the “CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies” legacy project of Nobeyama Radio Observatory. This article presents the results related to the Fourier analysis of the CO gas velocity fields. We quantitatively determined the circular and noncircular velocity components in 20 spiral galaxies and evaluated a new method to measure the bar pattern speed in barred spiral galaxies.