

論文内容の要旨

論文題目

Determining Star Formation Timescale and Pattern Speed in Nearby Spiral Galaxies

(近傍渦巻銀河における星形成時間とパターン速度の決定)

氏名 江草 芙実

我々は、パターン速度と星形成時間を同時に決定する方法を独自に考案した。本論文では、この方法を **Offset 法** と名づけ、その手法の詳細を述べる。また、この方法を適用するためのデータについて紹介し、適用した結果について議論する。そしてその結果から、銀河の力学と星形成の関連性について考察する。

パターン速度とは、**Lin & Shu (1964)**によって提唱された「密度波理論」の根幹をなす物理パラメータのひとつである。「密度波理論」とは、渦巻銀河のらせん模様（渦状腕構造）が密度波によって形成されると説明した理論であり、現在広く定説として受け入れられている。この理論において、渦巻腕は物質の運動のパターン（物質波）ではなく密度のパターン（密度波）として表され、パターン速度とはそのパターン、つまり密度波の回転角速度のことである。このパターン速度が銀河研究において重要であるのは、その値によって **corotation** など銀河の形態や力学に重要な共鳴点を定めるからである。しかし、パターン速度は実際に物質が運動している速度ではないので、観測から直接求めることはできないという問題がある。しかしパターン速度を観測から決定できれば、各共鳴点での物理状態を他の場所と比較することにより、銀河力学の理論に制限を与えられる。また、より遠方の銀河のパターン速度がわかれば、その結果を近傍銀河と比較することで銀河進化の理解にもつながる。

そこで、これまでに多くの研究者がそれぞれにパターン速度や共鳴点を求める方法を提案し、実際の銀河に適用されてきた。また、最近では数値計算の結果と観測結果との比較によってもパターン速度が求められている。しかし、あるひとつの銀河に対する複数の結果が一致していない場合が多く、またその誤差を正しく評価しているものも少ないので、パターン速度を求める決定的な方法は未だ確立されていないと言える。

一方、星形成時間とは、星の母体である分子雲から星ができるまでに必要な時間のことである。渦巻腕では星やガスの密度が高いため音速が小さくなり、パターンとガスの速度

差が超音速となって衝撃波を形成し、分子雲が収縮して星形成が起きると考えられている。しかしこの衝撃波が分子雲形成やその後の星形成に与える影響や、特に大質量星の場合は分子雲から星形成までの理論も確立されていないため、その正確な値は求められていない。よって、分子雲が自己重力のみで収縮する際の時間（自由落下時間）である約百万～千万年程度だろうという推定や、星形成モデルを用いた星形成領域の年齢の推定にとどまっている。しかし星形成時間を観測から決定できれば、大質量星形成の理論に重要な制限を加えられる。

以上より、パターン速度と星形成時間は銀河の力学や星間物理状態を理解する上で極めて重要であるにもかかわらず、観測に基づいた決定方法は確立されていなかったことがわかる。そこで私は、渦巻腕に付随している分子雲と星形成領域の位置のずれを用いる方法（Offset法）を考案した。分子雲は一酸化炭素分子の出す電波輝線 $^{12}\text{CO}(1-0)$ の高分解能データから、星形成領域は若い大質量星からの放射によって電離された水素ガスの出す可視光輝線 $\text{H}\alpha$ のデータを用いている。

この CO と $\text{H}\alpha$ のずれは多くの渦巻銀河でその存在が知られていて、その大きさは距離にして数 100 pc 程度であり、銀河の回転方向に対して分子雲 (CO) の方が上流側にあることがわかっている。このずれを用いたこれまでの研究では、パターン速度と星形成時間のどちらか片方を仮定してもう一方の値を推定するにとどまっていたが、Offset法では両者を誤差も含めて同時に決定できるという点で新しく、独創的である。

この方法では、以下の3点を仮定する。①ガスや星は純円軌道上を運動する。②パターンは剛体であり、パターン速度 (Ω_P) は一定である。③星形成時間 (t_{SF}) は一定である。これらの仮定は非常に簡単ではあるが、実際の銀河と大きくかけ離れない良い近似である。そしてこの仮定をおくことによって、分子雲と星形成領域のずれの角度 (θ) は、ガスの回転角速度 (Ω) の一次関数 ($\theta = (\Omega - \Omega_P) \times t_{SF}$) で表される。これら θ と Ω は観測から求められるので、最小二乗法によってフィットする事で係数である t_{SF} と Ω_P を誤差も含めて求められる。この方法は非常に単純な物理に基づいており、必要な観測量やその誤差も測定が容易なので、結果として得られる物理量とその誤差は従来の方法よりも信頼性が高いと言える。

我々は、この Offset法を適用するデータを得るため、野辺山ミリ波干渉計 (NMA) を用いて、近傍渦巻銀河 NGC 4254 と NGC 6181 の CO 観測を行った。前者はおとめ座銀河団に属する銀河で銀河円盤の視直径が大きいため 3 視野によるモザイク観測を、後者は前者より倍以上遠く視直径も小さいため 1 視野での観測を行った。前者については更に、既存の 45m 電波望遠鏡によるデータとの合成を行い、干渉計データに特有の Missing Flux 問題を解決した。

この2銀河の観測データに加え、分子雲による渦巻構造を持つ11銀河についての CO データを文献から得ることにより、全サンプル数を 13 銀河とした。また、これらの銀河について、 $\text{H}\alpha$ のデータと回転速度のデータを論文から入手した。そのうち1銀河については十分

な回転速度のデータが得られなかったため、その後の解析から除外することとし、総データサンプルは 12 銀河となった。

これら 12 銀河について Offset 法を適用した結果、全ての渦巻銀河において、 $\Omega - \theta$ の分布が同じであるわけではないことがわかった。そこで我々は 12 銀河をその CO と H α の画像と $\Omega - \theta$ 分布から、以下の 3 種類に分類した。① CO と H α のずれがはっきりと確認でき、 $\Omega - \theta$ 分布から t_{SF} と Ω_P を求めることができる銀河。Clear Offset の頭文字を取って、C 銀河と呼ぶ。② CO と H α で腕がはっきり見えるものの、そのずれがほぼゼロである銀河。No Offset の頭文字を取って、N 銀河と呼ぶ。③ 上記 2 分類に当てはまらない銀河。CO や H α で腕がやや不明瞭である銀河が多い。Ambiguous Offset の頭文字を取って、A 銀河と呼ぶ。我々が解析した 12 銀河では、C 銀河が 4 天体、N 銀河が 2 天体、A 銀河が 6 天体であった。

C 銀河については、 $\Omega - \theta$ 分布へのフィット (図 1) から得た t_{SF} と Ω_P より、以下のことがわかった。① Ω_P から求めた corotation 半径は、分子雲の銀河円盤の半径とほぼ同程度であり、可視光の銀河円盤の半径の約半分である。② t_{SF} は数千万年程度であり、分子雲の自由落下時間と一致する。このことから、渦巻腕での星形成は主に分子雲の重力不安定性によって引き起こされていると考えられる。③ 銀河円盤での分子ガス表面密度と重力不安定性の指標である Q 値は、 t_{SF} と相関があり上記②での結論を支持している。④ 銀河円盤での重元素量は t_{SF} と相関があり、これは重元素による分子ガスの冷却効果が星形成過程を促進することを示していると考えられる。

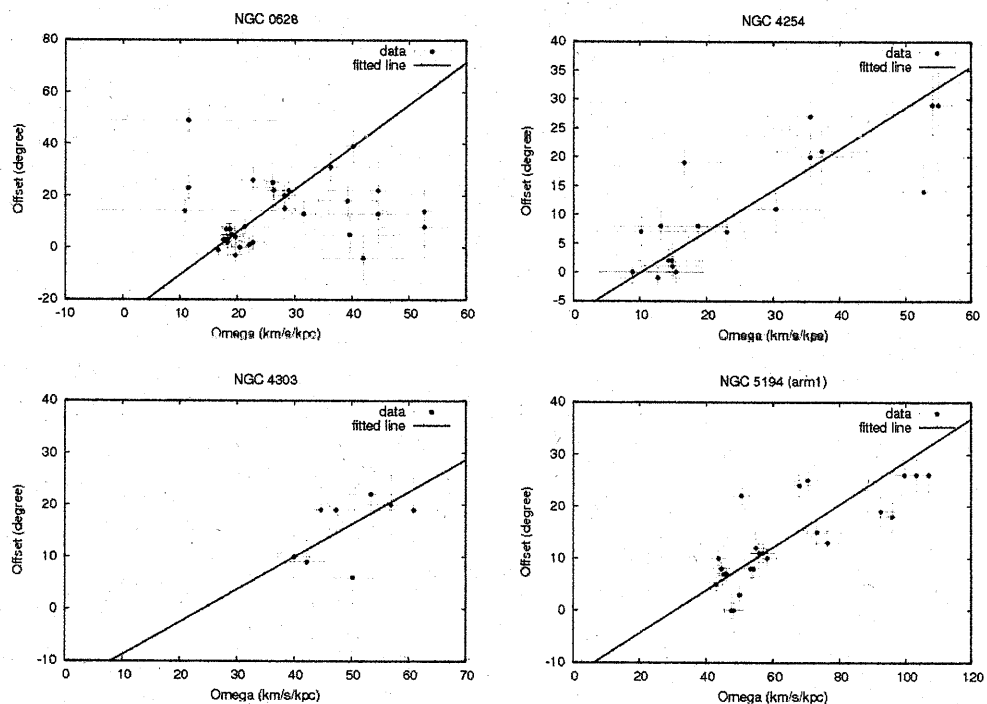


図 1 : C 銀河 4 天体の $\Omega - \theta$ 分布とフィットした直線
直線の傾きが t_{SF} 、 $\theta = 0$ との切片が Ω_P として得られる

N 銀河にずれが見られないことについては、以下のような理由が考えられる。①腕の見えている部分がちょうど corotation である。②星やガスの軌道が円ではなく、腕に沿った運動をしている。③密度波ではなく、物質波によってできた腕である。これらのうちどれが最も適切であるかはわからないが、2 天体とも中心に棒状構造があることから、中心の棒状構造と外側の腕でずれがないことについては何らかの関連性があると示唆される。また、上記の 3 項目は、それぞれ棒状構造と関連して説明することができる。

A 銀河については、それぞれ特徴も異なることからその $\Omega - \theta$ 分布への理由も様々だと考えられるが、主には以下の 2 つの理由が考えられる。①密度波が弱い。②使用したデータの分解能・感度が十分でない。後にも述べる腕の強さの指標が A 銀河では他より小さいという傾向は、前者を支持している。しかしこれは後者を否定するものではない。

さらにそれぞれの分類ごとに分子ガスや形態の性質を調べた結果、以下のことがわかった。①銀河円盤で平均した分子ガスの面密度や Q 値に、分類ごとの傾向は無い。これは、銀河全体としてのガスの性質が腕の形状に与える影響は小さいことを示している。②個々の分子雲の性質は銀河の中でも分散が大きく、分類ごとの傾向は見られなかった。③K バンド画像の解析から、重力ポテンシャルの腕の強さの指標が C 銀河では大きく A 銀河では小さい。これは先にも述べた通り、A 銀河で腕があまり明瞭でなく、密度波が弱いと考えられる銀河が多い理由である。

以上の結果から、我々は渦巻銀河における星形成、分子ガス、重力ポテンシャルの関連性について以下のような知見を得た。①渦巻腕における星形成は、主に分子雲の自己重力不安定性の成長に起因する。②銀河円盤内の重元素によって、星形成過程は加速される。③重力ポテンシャルの形状は渦巻腕の形状に影響を与えるが、ポテンシャルの腕の強さと星形成時間との関連性は認められなかった。これらの結果は全て観測データに基づいたもので、星形成過程やその銀河力学との関連性を理解する上で非常に重要である。