

論文内容の要旨

論文題目

An Observational Study of the Origin of Spiral Structures with High Resolution Imaging of Nearby Spiral Galaxies

(近傍渦巻銀河の高分解能撮像による
渦状腕構造の起源の観測的研究)

氏名 橋場 康人

渦巻銀河の渦状腕構造には、古くから巻き込みの困難という問題があることが知られている。観測により銀河内の物質は差動回転をしていることが分かっており、渦状腕が物質と同じ運動をしているとすると、短い時間できつく巻き込まれてしまい、現在観測される巻き込みのゆるい渦状腕構造を説明することができない。1960年代に提唱された密度波理論は、渦状腕を波動現象として捉えることで、定常的な渦状腕構造を説明する。この理論では、差動回転をするガスと剛体回転をする渦状腕の重力ポテンシャルの相互作用により星形成が起こり、共回転共鳴（半径）の内側では、渦状腕の上流から下流にかけて星の原料となるガス、若い星、古い星が並ぶことが予言される。密度波理論は、予言と一致するガス分布と星形成領域のずれが、複数の銀河で観測されてきたこともあり、広く受け入れられている理論である。しかし、その一方で、最近の数値シミュレーションによる研究では、渦状腕は非定常であり、短命で生成、消滅を繰り返していると考えられている。この場合、若い星や古い星の分布に、密度波理論に予言される空間分布の違いは見られない。また、最近の観測研究においても、密度波理論と一致しない結果が報告されるようになっている。しかし、そのような観測研究は、手法や銀河によって異なる結果が報告されており、渦状腕構造の起源の理解には、密度波理論の詳細な検証が必要とされている。

本論文は2部構成であり、2つの手法を用いて密度波理論の検証を行った。第1部では、ガス分布と星形成領域のずれ、第2部では、若い星団と古い星団の空間分布の違いを調べる手法を用いた。前者は、先行研究で広く使用されてきた手法であるが、銀河や観測データによって異なる結果が報告されてきた。そのため、複数の銀河でガス分布と星形成領域のずれを測定し、密度波理論と一致しない可能性の高いずれが検出できない銀河を見つけ、その性

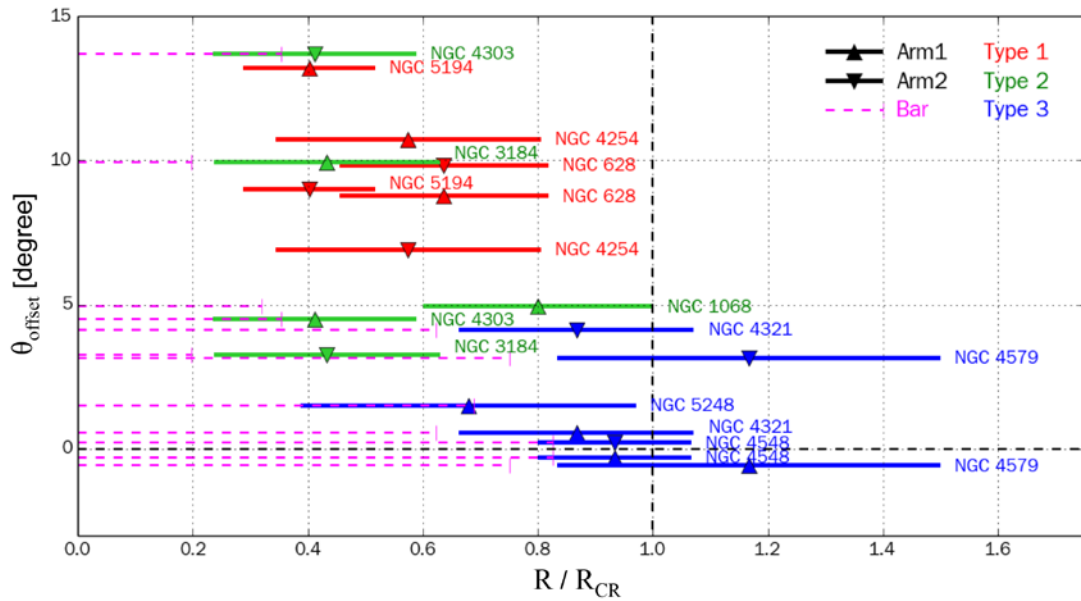


図1：ダストレーンをトレースした渦状腕の中心からの距離（横軸）と、ダストレーンに対する星形成領域のずれ量（縦軸）の関係。渦状腕の中心からの距離は、過去の研究により求められている共回転半径で規格化した。

質を調べることを目的として検証を行った。後者は、高空間分解能を持つ撮像データを用いて、先行研究において密度波理論と一致しない観測結果が報告されている代表的な渦巻銀河で検証を行った。

第1部では、近傍渦巻銀河12天体を用いてガス分布と星形成領域のずれを調べた。銀河には、2本腕が比較的顕著な渦巻銀河を選んだ。先行研究では、ガス分布を求めるためにHIやCOの電波による観測データが用いられてきたが、本研究では、より空間分解能の高い可視・近赤外の撮像データを用いてガス分布と相関の強いダスト分布（ダストレーン）を求めた。観測データには、ダストレーンを検出するためにIバンドとHまたはKバンド、星形成領域を検出するためにH α の撮像データを用いた。解析では、I-K(H)画像を用いて、それぞれの銀河の渦状腕で、ピッチアングルが一定で近似できる領域のダストレーンをトレースし、それに対するH α 輝線の分布の平均値（ずれ量）を調べた。その結果、ずれ量と中心部の棒状構造に関係があることが分かり、12天体を次の3つに分類した。Type 1: 棒状構造をもたない銀河（4天体）。Type 2: 半径が3 kpc以下の棒状構造を持つ銀河（3天体）。Type 3: 半径が3 kpc以上の棒状構造を持つ銀河（5天体）。Type 3の銀河では、星形成領域がダストレーン上に集中して分布する傾向が見られ、ほとんどずれが検出できなかった。Type 3の銀河の特徴としては、他のTypeの銀河に比べて、棒状構造を持つことに起因すると考えられる、渦状腕が銀河中心から離れたところに位置する傾向や、古い星の分布の指標となるKバンド画像の解析結果から重力ポテンシャルの強い対称的な2本腕を持つ傾向が

見られた。本研究の結果は、CO と H α のずれを調べた先行研究 (Egusa et al. 2009) の結果と、サンプルが重なる 7 天体で一致した。また、ずれが検出できない Type 3 に分類される銀河を新たに 3 天体発見することに成功した。Type 3 のような比較的大きな棒状構造を持つ銀河で、ずれが検出できない理由としては、非定常な渦状腕構造を持つ可能性が考えられる。しかし、その一方で、定常的な渦状腕構造を持つ場合でも、ずれが検出しにくい原因として、次の 2 つの理由が推測された。(1) 渦状腕が共回転共鳴付近に位置する、(2) ガスや星が楕円軌道により腕に沿う運動をしている。(1) の理由に対して、過去に共回転半径が測定されている 10 天体において、ダストレーンをトレースした渦状腕の共回転半径に対する位置とずれ量の関係を調べた (図 1)。その結果、Type 3 の銀河では、棒状構造の半径 (R_{bar}) と共回転半径 (R_{CR}) の比 ($R_{\text{bar}}/R_{\text{CR}}$) が 0.6 以上であり、他の Type の銀河に比べて、渦状腕が共回転共鳴の近くに位置する傾向があることが分かった。ただし、本手法では、ずれが予測される領域が、H α で検出可能な 10 Myr 以内の若い星団が分布する領域に限られるため、Type 3 の銀河において密度波理論の詳細な検証は難しい。(1) と (2) のどちらの場合においても、古い星団の分布を調べることで、空間的に十分大きなずれが検出できることが予測される。そのため、Type 3 の銀河において密度波理論の検証を行うためには、10 Myr よりも長いタイムスケールの年齢指標を用いる手法が必要となる。

第 2 部では、第 1 部で Type 3 に分類された NGC 4321 で 10 Myr 以上の古い星団の分布を調べることで密度波理論の検証を行った。この銀河は、先行研究でガス分布から 100 Myr までの古い星団の分布の違いが見られないことが報告されており、密度波理論と一致しないと考えられる代表的な渦巻銀河である。しかし、先行研究では、観測データの空間分解能が不足し、密度波理論に予言される星団の年齢分布の違いが検出できていない可能性があった。そこで、本研究では、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) で撮られた高空間分解能の撮像データを用いて個々の星団を検出し、若い星団と古い星団の分布を調べた。観測データには、HST の WFC3 と WFPC2 の 2 つのカメラで撮像された公開データを使用し、観測領域が重なる南側の渦状腕で調査を行った。WFC3 は、ピクセルスケールが約 3 pc に相当し、これは個々の星団と星を分離して検出することを可能にした。一方、WFPC2 は、分解能は多少劣るものの、H α を含めて U、B、V、R、I の多色バンドで撮像が行われており、これらは星団の年齢推定を可能にした。解析では、空間分解能の高い WFC3 の V バンドの撮像データを用いて星団の検出を行い、WFPC2 の H α と R バンドの撮像データを用いて、星団を年齢によって Young (年齢 \leq 6 Myr)、Middle (6 Myr \leq 年齢 \leq 10 Myr)、Old (年齢 \geq 10 Myr) の 3 つのサンプルに分類した。次に、それぞれの星団サンプルのダストレーンに対する分布を調べた (図 2)。密度波を仮定すると、ダストレーンに対する星の速度は中心からの距離によって変化するため、図の横軸には、過去に求められている渦状腕のパターン速度とガスの回転速度を用いて、ダストレーンから移動する星の年齢を採用した。その結果、古い星団サンプル (Old) ほうが若い星団サンプル (Young) に比べて下流に分布する傾向を発見した。これは、密度波理論が予言する星団の年齢分布の傾向と一

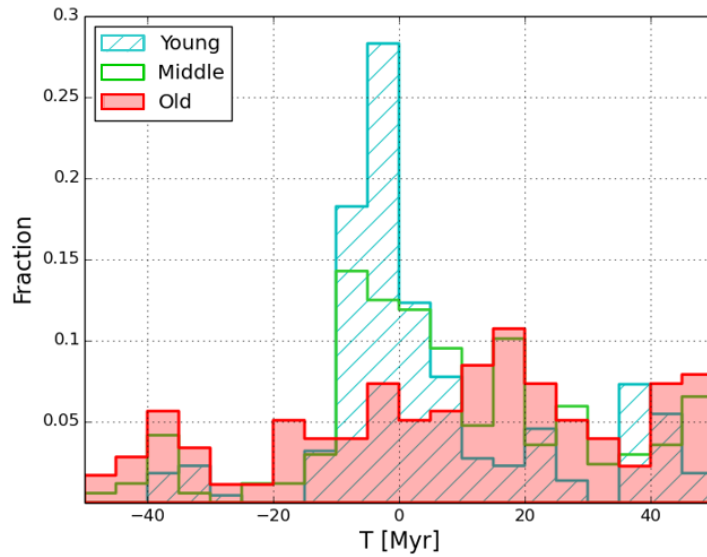


図2: Young (年齢 ≤ 6 Myr)、Middle ($6 \text{ Myr} \leq \text{年齢} \leq 10$ Myr)、Old (年齢 ≥ 10 Myr) の3つの星団サンプルのダストレーンに対する分布。

致する。また、U, B, V, I のカラーを用いて、各星団サンプルの平均年齢を求めたところ、若い星団サンプルと古い星団サンプルの平均年齢の差が約 20 Myr 以上と推定された。この年齢差は、図2のピーク位置の年齢差と同等またはそれ以上であり、ガスや星の円軌道からのずれを考慮すれば、図2の星団サンプルの分布は、密度波理論で概ね説明ができると考えられる。さらに、渦状腕付近で生まれた可能性が低い十分に古い星団（年齢 ≥ 200 Myr）やダスト減光が、図2の星団サンプルの分布に与える影響を調べ、これらが若い星団サンプルと古い星団サンプルの分布の傾向にほとんど影響を与えないことを確認した。

本研究では、先行研究において密度波理論と一致しない観測結果が報告されていた渦巻銀河 NGC 4321 において、10 Myr 以上の古い星団の分布を調べることで、初めて理論と一致する傾向を発見することに成功した。本研究により、NGC 4321 のように比較的大きな棒状構造 ($R_{\text{bar}}/R_{\text{CR}} \geq 0.6$) を持つ銀河では、主に渦状腕が共回転共鳴の近くに位置する理由で、従来のガス分布と $H\alpha$ による星形成領域のずれを調べる手法では、密度波理論に予言されるずれを検出することが難しい可能性があることが示された。従って、そのような銀河で密度波理論の検証を行うには、古い星団の分布を調べる手法が必要となる。また、古い星団は、密集して分布する若い星団に比べて、分散して分布する傾向があるため、そのような星団の空間分布を精度良く調べるには、個々の星団が検出可能な高空間分解能を持つ撮像データが必要となる。本研究のように、HST の画像を用いて渦状腕付近の星団の年齢分布を調べる研究は、かなり近傍にある数個の銀河を除いては、まだほとんど行われていない。近年、HST では近傍渦巻銀河の多色撮像サーベイが進められているので、本研究の手法をさまざまな銀河に適用することで渦状腕構造の起源の解明が期待できる。