

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2023

課題番号：17K14259

研究課題名（和文）近傍渦巻銀河における腕構造の寿命

研究課題名（英文）Lifetime of spiral structures in nearby galaxies

研究代表者

江草 芙実（EGUSA, Fumi）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：30644843

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：解析対象とした1つの近傍棒渦巻銀河について、多波長データをモデルでフィットし、星質量分布を得た。その結果をもとに、銀河円盤の内側領域において、渦巻腕領域の定義に成功した。ここで定義した領域を使い、銀河の大局的な構造が星間分子ガスに与える影響について調査した。一方、別の近傍棒渦巻銀河では、星間分子ガスから放射される電波輝線の強度比を解析し、その比が銀河内の場所や速度成分によって異なることを明らかにした。この結果は、銀河内部の環境によって星間分子ガスの物理状態（温度・密度）が変化していることを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

渦巻銀河における星質量分布は、銀河円盤の重力ポテンシャル分布に相当する。重力ポテンシャルに対する星間ガスの応答は、渦巻腕構造の起源を理解する上で重要だが、星質量分布は単一波長の観測データだけでは導出できないという問題があった。そこで我々はモデルと多波長データを利用して、星質量分布の導出に成功した。当初の目的であった腕構造の寿命の決定には至らなかったが、腕構造が星間ガスに与える影響について一定の理解を得た。

一方、関連して開始した分子ガス輝線強度比の研究については、銀河を空間方向・速度方向に分解した議論を行い、銀河内の環境が星間分子ガスの物理状態に与える影響について詳細に調査できた。

研究成果の概要（英文）：For one nearby barred spiral galaxy, we obtained a stellar mass distribution map by fitting a model to multi-wavelength data. Based on this map, we succeeded in determining spiral arm regions in the inner part of the galactic disk. With these defined regions, we investigated the impact of galactic structures on interstellar molecular gas. Meanwhile, in another nearby barred spiral galaxy, we analyzed radio emission lines from interstellar molecular gas and found that their ratios depend on the location and velocity components. This result indicates that the environments within the galaxy affect the physical conditions (temperature and density) of interstellar molecular gas.

研究分野：電波天文学

キーワード：渦巻銀河

1. 研究開始当初の背景

近傍宇宙においては、銀河の半数以上に渦巻腕構造が存在する。渦巻腕には若い星が形成されている領域やその元となる分子ガスが集中しているため、腕構造は星間物質の進化、ひいては銀河の進化を理解する上でも重要である。腕構造の生成・維持機構については50年以上前から理論的研究が行われているが、現在でも多くのモデルが存在し、統一の見解は得られていない(e. g. Dobbs & Baba 2014)。特に腕の持続性・寿命は、円盤銀河がどのような進化を経て現在の姿に至ったかの理解に重要な観点である。そこで理論モデルを腕の寿命によって大別すると、(i)長寿命、(ii-a)短寿命、(ii-b)短寿命だが再帰的に分けられる。ただし、これらの機構のうち、どれが、いつ、どのような条件下で優勢になるかについては、理論的な予測はあるものの、観測的な検証は行われていない。その主な原因は、観測データから腕構造の過去の姿を推定することが原理的に困難なため、モデルの区別が難しいという点にある。

ところが近年の銀河円盤の理論計算から、星間ガスの振る舞いが腕構造の安定性によって異なるということがわかってきた。そこで我々は、星間ガスと星質量のピーク位置のずれに初めて着目し、このずれの半径依存性から腕構造の起源と寿命を判定する手法(*arm-gas offset 法*)を提唱した(Baba, Morokuma-Matsui, & Egusa 2015)。そしてこの手法を近傍渦巻銀河 M51 に適用したところ、2本の腕のうち一方は(i)長寿命、もう片方は(ii)短寿命と判定された。その一方で、我々は、CO輝線(分子ガス)とH α 輝線(星形成領域)のずれを用いることで、星形成時間とパターン速度(腕構造の回転角速度)が求められることを示していた(CO-H α offset 法; Egusa et al. 2004, 2009)。これら2つの手法を組み合わせることにより、腕の寿命をさらに制限できる可能性を示した(Egusa et al. 2017)。

2. 研究の目的

本研究では、上記の M51 と同様の解析を様々な性質を持つ約 20 の近傍渦巻銀河に対して実施する。各銀河・各腕での寿命を判定すること、さらに全銀河での結果から腕構造の寿命と深く関わる要因を明らかにすることを目的とする。得られた結果から、近年研究が進んでいる銀河円盤の理論を検証し、さらに新たな制限をつけられると期待できる。

3. 研究の方法

上記の *arm-gas offset 法* と CO-H α *offset 法* を適用するために必要なデータは、星質量分布、原子ガス・分子ガス質量分布、H α 画像である。原子ガスの質量は HI 輝線(波長 21cm)データから、分子ガスの質量は CO 輝線(波長 2.6mm)データから導出する。これらは既存の観測やサーベイのアーカイブから入手するが、星質量分布については単一波長の観測データだけでは導出できない。そのため、紫外線から赤外線までの多波長データを用意し、Spectral Energy Distribution (SED) モデルをフィットすることで星質量分布を得る。このフィットには CIGALE (Burgarella et al. 2005; Boquien et al. 2019) と呼ばれるコードを使用する。

研究開始時点で、必要なデータが全て入手可能であったのは約 20 銀河であった。全銀河での解析終了後は、腕構造の寿命を決定する要因を探るため、得られた寿命と他の物理量との相関を調査する。その結果を理論計算から示唆されている傾向と比較し、モデルの検証や新たな制限についての議論を行う。

4. 研究成果

(1) 当初の目的：腕構造の寿命について

1年目と2年目は、ある近傍渦巻銀河の多波長データに対して SED フィットを行い、星質量分布を導出した。しかし、その銀河の分子ガスのデータに問題があることが3年目にわかった。そこで4年目には解析対象の銀河を変更し、これまでの研究と同様に多波長データと SED フィットコードを用いて星質量分布を導出した。5年目には得られた星質量分布の誤差・不定性を評価し、6年目にはその結果をもとに、腕の位置を決定する複数の手法のうち、どの手法が今回の銀河に最適かを調査した。その結果、銀河の内側から外側の全面における腕の位置を単一の手法で決定するのは難しいことがわかった。これは、銀河面内の位置によって腕の性質が変化しているためだと考えられる。また、現在の星質量分布の精度では、星質量分布がピークとなる腕の位置を十分な精度で決められないこともわかった。そこで7年目は、腕の「位置」ではなく腕の範囲を示す「領域」を定義することに方針を変更し、銀河円盤の内側部分での腕領域を定義した。一方、円盤の外側部分では、この銀河の性質から腕領域を定義することも現時点では困難と判断した。このように定義した領域ごとに解析をした結果、分子ガス量や分子ガス輝線強度比の分布が領域によって異なることを確認した。一方、領域の違いだけでは説明できない点もあったため、星形成活動が星間ガスに与える影響(フィードバック)についても調査した。その結果、大局的

な銀河構造と局所的な星形成活動の両者が、分子ガスの物理状態に影響を与えていることがわかった。

上述の通り、星の腕の位置を決めることが困難であったため、当初の目的であった腕構造の寿命を求めるまでには至らなかった。その一方で、分子ガスの物理状態の指標としてその輝線強度比に着目し、下記の関連研究へとつながった。

(2) 関連研究：分子ガスの輝線強度比

星間分子ガスの指標として広く利用されている CO から輝線には、励起状態によって周波数の異なる遷移が多く存在する。その中でも、波長 2.6mm の J=1-0 輝線は低温分子ガスの質量や力学状態を調べる目的で長く利用されてきた。一方、ALMA の登場により、近年は波長 1.3mm の J=2-1 輝線も頻繁に観測されるようになってきた。そして、両者の輝線強度比 $R_{21} = CO(2-1)/CO(1-0)$ が分子ガスの温度・密度の指標として注目され、kpc スケールではこの比が星形成率などと関連していることがわかってきた (Koda et al. 2012; Yajima et al. 2021)。

そこで我々は、近傍の棒渦巻銀河 NGC1365 について、ALMA で取得された 200pc 分解能の CO(1-0) と CO(2-1) データから、これまでよりも高い空間分解能での輝線強度比調査を行った。その結果、上記の kpc 分解能での結果と同様に、星形成率が高いほど輝線の積分強度比も高くなることがわかった。これは、最近の星形成活動に関わるガスの温度か密度（もしくはその両者）が高いことを示しているが、その傾向が 200pc でも kpc でも変わらないことを明らかにした。また、我々は、積分強度に加えて輝線の幅（速度分散）の比も調査した。その結果、線幅の比は多くの地点で 1 に近いことがわかった。これは、CO(1-0) と CO(2-1) の輝線プロファイルの形が同じ、すなわちこの 2 輝線が同じガス成分から出ていることを示している。さらにいくつかの地点について輝線プロファイルを詳細に調べたところ、2 つの速度成分を持つ地点が複数見つかった。これらは、回転する銀河円盤の成分と、Gao, Egusa, et al. (2021) で我々が発見していた「円盤内でガスが動径方向に移動するアウトフロー」に対応する成分だと考えられる。円盤成分とアウトフロー成分を分離して輝線強度比を求めると、アウトフロー成分の方が比が低いこともわかった。これは、アウトフローのガスは円盤に比べて温度か密度（もしくはその両者）が低いことを示唆している。これらの結果は、 R_{21} が分子ガスの物理状態を調べる上で有用であることと、輝線強度比を求める際にはそのプロファイルを詳細に調べることの重要性を示している (Egusa et al. 2022; 図 1)。

我々はこの輝線比の理解をさらに進めるため、近傍棒渦巻銀河 M83 における調査を開始している。この銀河では、ALMA で取得された 40pc 分解能の CO(1-0) と CO(2-1) データがある (Koda, Hirota, Egusa, et al. 2023) ため、より小さな空間スケールで分子ガスの物理状態がどのように変化しているかを明らかにできると考えている。これは、分子雲から星が生まれ、その星からの放射や超新星爆発によって周囲のガスの状態を変化させ、星の一部は星間ガスに戻るといった星間物質の輪廻を理解する上で、非常に重要である。

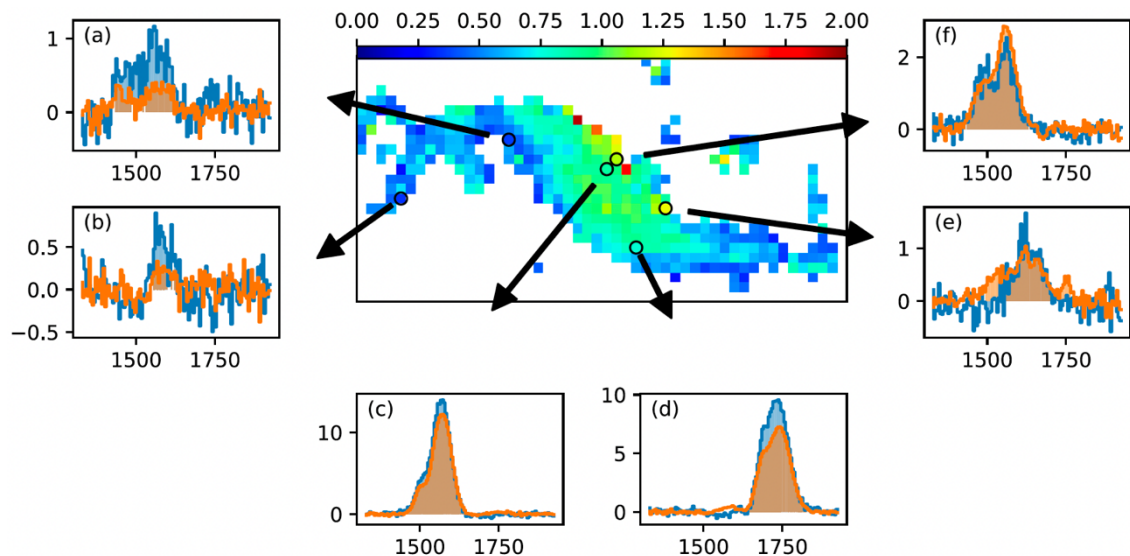


図 1: NGC1365 における CO 輝線の積分強度比 (R_{21} ; 中央) と各地点でのスペクトル (青=CO(1-0)、橙=CO(2-1))。縦軸が輝線強度 [K] で横軸が後退速度 [km/s]。 (a), (c), (f) の 3 地点では 2 つの速度成分が確認され、アウトフロー成分では R_{21} が低いことがわかった (Egusa et al. 2022)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Egusa Fumi, Gao Yulong, Morokuma-Matsui Kana, Liu Guilin, Maeda Fumiya	4. 巻 935
2. 論文標題 CO Excitation and its Connection to Star Formation at 200 pc in NGC 1365	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac8050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Fumi Egusa, Yulong Gao, Kana Morokuma-Matsui, Guilin Liu, Fumiya Maeda
2. 発表標題 CO excitation and its connection to star formation and outflow in NGC 1365
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Egusa, E. Mentuch Cooper, J. Koda, J. Baba
2. 発表標題 Stellar and Gas Mass Distributions for Understanding the Nature of Spiral Arms
3. 学会等名 (IAUS 341) PanModel2018: Challenges in Panchromatic Galaxy Modelling with Next Generation Facilities (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Egusa, F., Gao, Y., Morokuma-Matsui, K., Liu, G., and Maeda, F.
2. 発表標題 CO Excitation and its Connection to Star Formation and Dynamics in NGC 1365
3. 学会等名 Asia-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fumi Egusa, Yulong Gao
2. 発表標題 Molecular gas conditions in the central region of NGC 1365
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Egusa, Y. Gao
2. 発表標題 Spatially-resolved CO(2--1)/CO(1--0) Ratio in NGC 1365
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Egusa, Y. Gao
2. 発表標題 Spatially-resolved CO(2--1)/CO(1--0) Ratio in NGC 1365
3. 学会等名 ALMA2019: Science Results and Cross-Facility Synergies (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	幸田 仁 (Koda Jin)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高 玉竜 (Gao Yulong)		
研究協力者	諸隈 佳菜 (Morokuma-Matsui Kana)		
研究協力者	劉 桂琳 (Liu Guilin)		
研究協力者	前田 郁弥 (Maeda Fumiya)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Stony Brook University		
中国	南京大学	中国科学技術大学	