

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：62616
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2014～2017
課題番号：26800099
研究課題名(和文) 宇宙初期における円盤銀河の形成進化過程の解明

研究課題名(英文) Formation of disk galaxies

研究代表者

馬場 淳一 (Baba, Junichi)

国立天文台・JASMINE 検討室・特任研究員

研究者番号：90569914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000 円

研究成果の概要(和文)：われわれの太陽系が属する銀河である天の川銀河をはじめとして、約半数の銀河は渦巻構造や棒状構造をもつ渦巻銀河である。本研究では、詳細な星間化学反応を考慮した銀河シミュレーションコードを開発し、観測との比較を通して、銀河の動力学進化と星間ガスからの星形成過程の理解を目指した。その結果、申請者らが提唱する新たな渦状腕構造モデル(動的渦状腕モデル)の観測的検証法の提案や、約1億粒子の天の川銀河の超高分解能シミュレーションなどに成功し、渦状腕領域における分子雲の形成進化に関する新たな知見を得た。さらにシミュレーション結果は立体動画として一般向けに公開(4D2U)され、映像作品として優秀賞を受賞した。

研究成果の概要(英文)：Our habitat, the Milky Way galaxy, is one of spiral galaxies in the Universe. In this project, in order to reveal the formation and evolution of the spiral galaxies via comparisons with latest observations, in particular, dynamical evolution and the ISM properties, we developed the N-body/hydrodynamic simulation code including the detailed ISM processes. As a result, we proposed the new diagnostics of spiral theories between the classical and our new models based on simulation results. Furthermore, we achieved the 100 million-scale simulation of the Milky Way-like barred spiral galaxy. This simulation result was visualized as a 3D movie and opened to the public from NAOJ/4D2U. This movie won the Grand Prix promoted by the Advanced Imaging Society.

研究分野：銀河物理学

キーワード：天の川銀河 銀河シミュレーション 星間化学 星形成銀河 電波観測

1. 研究開始当初の背景

銀河円盤の形成過程は、これまで宇宙構造形成の標準理論である冷たいダークマター (CDM) 仮説に基づき重力収縮した CDM ハロー内での高温ガスハローの輻射冷却と、それに伴うゆっくりとしたガス降着という比較的静的なシナリオが支持されてきた。

近年、現在の円盤銀河の祖先と思われる銀河が、赤方偏移 $z \sim 2 - 3$ (約 100 億年以上前) で多数発見されてきている。これらの初期円盤は星形成率や星間ガス含有量、乱流速度が現在の円盤銀河の 10 倍もあることが明らかになってきた。これらの観測は、円盤銀河形成の初期段階は非常に激しい現象を伴っていることを示唆する。しかし、これまでの観測は主に電離ガスの分光観測に基づくものであり、その乱流運動は激しい星形成に伴う大質量星からの輻射や超新星爆発などによるフィードバック(星形成フィードバック)の影響を受けている可能性が高い。そのため、電離ガスは星間ガスの主成分である低温ガスの運動と大きく異なる可能性が高く、初期銀河円盤の性質は未だ不明な点が多い。

一方、近年の宇宙流体シミュレーションから初期銀河円盤は、衝撃波加熱を経ない宇宙大規模構造のフィラメントに沿うような銀河間ガスの降着を伴い急成長している可能性が示唆されている。しかしながら、宇宙流体シミュレーションの分解能では個々の銀河の内部の構造や運動を追うことはできず、ガス降着と円盤銀河形成の関係は明らかになっていない。

このように、近年の初期銀河円盤の観測や理論的研究により、円盤銀河形成の標準シナリオは動的描像へと修正を迫られているものの、その物理素過程は十分に明らかになっていないのが現状である。これらの理解のためには、天の川銀河や近傍銀河の詳細な観測データの取得、及び観測データと理論モデルの比較が必須である。

2. 研究の目的

そこで、ミリ波・サブミリ波干渉計 ALMA 望遠鏡稼働により、近傍円盤銀河の分子ガスの詳細観測や宇宙初期の円盤銀河の低温ガス成分観測も可能となることを見据え、星間ガスの水素/ヘリウム/炭素/酸素などの主要元素の電離/再結合/分子生成・解離などの詳細な化学反応と、それに伴う加熱冷却過程を組み込んだ銀河シミュレーションを行い、銀河進化の素過程である (1) 銀河構造の動力学進化、(2) 銀河スケールの星間媒質の物理的・化学的性質、及び (3) 銀河動力学構造と星間媒質の相互作用、を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

銀河はダークマターと星、ガスからなる多成分系である。従って、銀河進化を明らかにするには構成成分の自己重力相互作用と、詳

細な星間過程を考慮した数値シミュレーションを行う必要がある。本研究ではこのような銀河シミュレーションを行うために、銀河形成シミュレーションコードである「ASURA」(Saitoh et al. 2008, 2009; Saitoh & Makino 2009, 2010)を利用する。ASURA はスーパーコンピュータで高精度高分解能の重力多体系/流体シミュレーション (SPH 法) を高い並列化率で高速で行えるコードである。しかし、ALMA などの観測データとの比較のためには恒星系の自己重力進化に加え、分子生成などの星間化学反応を考慮するなどの星間モデルの詳細化が必要である。

そこで本研究では、星間ガスの水素/ヘリウム/炭素/酸素などの主要元素の電離/再結合/分子生成・解離などの詳細な化学反応と、それに伴う加熱冷却過程や、星間化学反応に必須である星間紫外線場の計算ルーチンを開発し、ASURA への組み込みを行う。そして、これらを組み込んだ天の川銀河や近傍円盤銀河を想定した銀河進化シミュレーションを行い、ALMA などの電波観測データとの比較を行う。さらに、こうして近傍銀河で検証/確立した銀河スケールの星間ガスモデルをもとに、遠方星形成銀河を想定した銀河進化シミュレーションを行い、最新/次世代観測に示唆を与えることを目指す。

また、本研究のシミュレーション結果の観測的検証や次世代観測への予測のために、観測グループと共同研究を行い、既存の観測データとの比較、新たなサーベイ観測などの立案、および関連した研究会の開催なども行う。

なお、数値シミュレーションには国立天文台の共同利用計算機 Cray XC30 (通称、アテルイ) を利用し、結果の解析には本経費で購入した並列計算機を利用する。

4. 研究成果

(1) 棒状渦巻銀河の渦状腕構造の動力学

天の川銀河をはじめとした多くの円盤銀河に存在する渦状腕構造の正体は、銀河円盤面を伝播する定常波と解釈する「密度波理論」(Lin & Shu, 1964) が定説であった。しかし近年の数値計算技術の進歩により、渦状腕は数億年で形成破壊を繰り返す動的構造であることが示唆されるようになった (Baba et al. 2013)。一方で、多くの渦巻銀河には数 kpc スケールの棒状構造が存在するが、棒状構造が存在する場合の渦状腕の動力学の性質の理論的理解は不十分であった。

そこで、天の川銀河を想定した銀河シミュレーションを行い、渦状腕構造の性質を調べた。このシミュレーションでは棒状構造や渦状腕構造は自己重力により自発的に形成される。その結果は、棒状構造は比較的安定な構造であるが、渦状腕構造は棒状構造がない場合と同様に数億年スケールで増幅・減衰を繰り返す動的構造であることを明らかにした。さらに、その動力学機構はスウィング増幅機構の理論予測と整合的であることも

明らかにした (Baba, 2015, MNRAS, 454, 2954)。

(2) 「動的渦状腕モデル」の観測的検証法の考案と観測データへの応用

銀河の主幹動力学構造である渦状腕構造の理論モデルには、渦状腕の寿命や回転の仕方の観点から「密度波理論」と「動的渦状腕理論」の2つに大きく分けられる (Dobbs & Baba 2014, PASA, 31, 35)。しかし、理論モデルの観測的検証は十分に行われていない。その背景として、それぞれの理論モデルに基づく観測的違いの予測が進んでいないことが挙げられる。

そこで本研究では、密度波モデルと動的渦状腕モデルのシミュレーション結果に基づき、特に電波観測で得られる低温ガスの空間分布や速度構造の違いを調べた。その結果、密度波モデルでは分子ガスの空間分布が渦状腕に対して系統的に銀河中心からの距離で変化するのに対して、動的渦状腕モデルではそのような系統的な分布の違いは見られないことを明らかにした (Baba et al. 2015, PASJ Letter, 65, L45)。また、2次元非円運動速度場の性質も密度波モデルと動的渦状腕モデルで異なることを明らかにした (Baba et al. 2016, MNRAS, 460, 2472)。ただし、系外銀河の観測では基本的に観測者に対して視線方向の速度成分しか得ることができない。速度場の違いを実際の観測データに適用して渦状腕理論モデルの検証を行うためには、今後さらなる研究が必要である。

さらに、最新の位置天文観測衛星 Gaia (ESA) のデータとの比較により、天の川のペルセウス腕は減衰期にある動的渦状腕モデルとよく合うことを示した (Baba et al. 2018, ApJ, 853, L23)。

(3) 動的渦状腕における巨大分子雲の形成進化

銀河進化は、棒状構造や渦状腕といった星からなる動力学構造の進化と、それと相互作用をしながら運動する星間媒質の進化からなる非線形過程である。本研究では、これまでに得られた銀河動力学構造の新たな描像 (e.g. Baba 2015) に基づき、星形成の母体である (巨大) 分子雲の形成進化を数値シミュレーションにより調べた。

そのために、数値シミュレーションコードに分子生成とそれに必要な星間紫外線場の計算を組み込んだ。分子生成は予め知られていた星間ガスの密度・温度・重元素量・星間紫外線強度に依存する簡易的なフィッティング形式をもとに実装した。星間紫外線場は、銀河を構成する星種族に従った SED をもとに、局所密度構造をもとにして評価した光学的厚みを考慮した簡易的な輻射輸送計算を行い求めた。これらにより銀河内における様々な環境での星間ガスの熱的・運動学的性質の数値モデルを構築することが可能となった。

これらを考慮した 8000 万粒子規模の銀河シミュレーションを行い、動的に進化する渦状腕における分子雲の形成進化過程に着目して調べた。これにより渦状腕の形成に伴い広域から星間ガスが集積し、その過程で小さな分子雲が合体衝突を経て成長する過程で、衝突星形成、そして HII 領域形成に伴うフィードバックで分子雲が破壊される様子を描写出すことに成功した (Baba et al. 2017, MNRAS, 464, 246)。このシミュレーションは国立天文台 4D2U との共同研究のもとに立体動画「天の川銀河紀行」として制作され、一般向けに公開されている。また、この動画は映像関係の国内外のコンペティションで高く評価され、最優秀賞なども受賞した。

(4) 星間化学反応ライブラリの開発

最新の ALMA 観測データとの比較や次世代観測に対し理論研究から指針を与えるためには、観測との比較に耐えうる銀河スケールでの星間ガスモデルの構築が必須である。Baba et al. (2017) では計算コストの問題で、分子生成を簡易的なフィッティング形式をもとにして考慮したため、具体的な観測量である CO 輝線や電離炭素や中性酸素からの微細構造輝線 ([CII]158 μ m 輝線、[OI]63 μ m 輝線など) の強度を定量的にシミュレーションから評価することができない。また、既存のフィッティング形式に基づいて予測される水素分子ガスと、遠方銀河 (主に $0 < \text{赤方偏移} < 2$ の星形成銀河) の観測から推定される水素分子ガス量の間には無視できない不整合も存在することも指摘された (Morokuma-Matsui & Baba, 2015, MNRAS, 454, 3792)。

そこで標準的な低温ガスの化学反応モデル (Wolfire et al. 1995 など) を改良して、水素/ヘリウム/炭素/酸素などの主要元素の電離/再結合/分子生成/解離などの詳細な化学反応と、それに伴う加熱冷却率を計算する独自ライブラリ「CEQLib」を開発した。これを ASURA や他のシミュレーションコードに実装することで、星間ガスの物理化学状態と自己無頓着な冷却・加熱率のもとで銀河進化シミュレーションを行うことが可能となる (投稿論文の準備中)。また、既存のシミュレーション結果の星間ガスの物理量 (密度、温度、重元素量、遠紫外線強度) をもとにポストプロセスで化学状態を計算し、主要な観測輝線などを評価することも可能である。今後、CEQLib を用いて高分解能の天の川銀河シミュレーションの結果 (Baba et al. 2017, MNRAS, 464, 246) のポストプロセス計算を行い、電波観測データなどとの比較を行う予定である。将来的には遠方星形成銀河を想定したシミュレーション、またその結果のポストプロセス計算なども行い、次世代観測への理論的な示唆を与えることを目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文](計 11 件)

J. Baba et al., Gaia DR1 Evidence of Disrupting the Perseus Arm, ApJ Letter, 査読有, Volume 853, pp.23-28,(2018)
DOI: 10.3847/2041-8213/aaa839

J. Baba et al., Eventful Evolution of Giant Molecular Clouds in Dynamically Evolving Spiral Arms, MNRAS, 査読有, Volume 464, pp.246-263,(2017)
DOI: 10.1093/mnras/stw2378

J. Baba et al., Gas velocity patterns in simulated galaxies: Observational diagnostics of spiral structure theories, MNRAS, 査読有, Volume 460, pp.2472-2481,(2016)
DOI: 10.1093/mnras/stw987

J. Baba, Short-term dynamical evolution of grand-design spirals in barred galaxies, MNRAS, 査読有, Volume 454, pp.2954-2964,(2015)
DOI: 10.1093/mnras/stv2220

J. Baba et al., Radial distributions of arm-gas offsets as an observational test of spiral theories, PASJ Letter, 査読有, Volume 67, pp.L45-49,(2015)
DOI: 10.1093/pasj/psv048

K. Morokuma-Matsui & J. Baba, Redshift evolution of stellar mass versus gas fraction relation in $0 < z < 2$ regime: an observational constraint for galaxy formation models, MNRAS, 査読有, Volume 454, pp.3792-3804,(2015)
DOI: 10.1093/mnras/stv222

[学会発表](計 25 件)

馬場 淳一 他, “Gaia TGAS によるセファイドの特異速度とペルセウス腕の動力学的性質”, 口頭講演、日本天文学会 2017 年秋季年会

馬場 淳一 他, “非平衡化学反応を考慮した銀河シミュレーションによる多相星間ガスの性質”, 口頭講演、日本天文学会 2015 年秋季年会

馬場 淳一 他, “渦状腕理論の新たな観測的診断法の提案: arm-gas offset 法”, ポスタ講演、日本天文学会 2015 年秋季年会

馬場 淳一, “数値シミュレーションによる銀河系モデル”, 招待講演、天の川銀河研究会 2015、2015/03/23-24、東京大学

馬場 淳一 他, “棒状渦巻銀河における分子雲形成進化の環境依存性”, 口頭講演、日本天文学会 2015 年春季年会

馬場 淳一, “棒状銀河の渦状腕のダイナミクス”, 口頭講演、日本天文学会 2014 年秋季年会

J. Baba, “Dynamics of Spiral Structures in Disk Galaxies”, 招待講演, The 6th East-Asian Numerical Astrophysics

Meeting, 2014/09/15-19, Suwon, Korea
馬場 淳一, “銀河シミュレーションで探る銀河構造と星形成”, 招待講演、「大質量星形成銀河系から近傍銀河まで -ALMA が動いた今-」, 2014/09/13-14、茨城大学
J. Baba et al., “The Structure and Kinematics of the ISM of Star-Forming Galaxies”, ポスター講演, IAU Symposium 309: GALAXIES IN 3D, 2014/07/7-11, Vienna, Austria

[その他]

ホームページ等

研究成果ホームページ:

<https://sites.google.com/site/milkywayspiral/research/formation-of-disk-galaxies>

国立天文台 4D2U 動画「天の川銀河紀行」:
<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/MWJourney.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

馬場 淳一 (Baba, Junichi)

国立天文台・JASMINE 検討室・特任研究員

研究者番号: 90569914