

令和元年6月20日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2018

課題番号：25400222

研究課題名（和文）輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築

研究課題名（英文）Study of galactic evolutionary tree using radiation-hydrodynamic simulation

研究代表者

森 正夫（MORI, MASAO）

筑波大学・計算科学研究センター・准教授

研究者番号：10338585

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：現代宇宙論ではコールドダークマター仮説が観測される宇宙の構造をうまく再現できることが知られており、銀河の形成においてもコールドダークマターが重要な役割を果たすことが分かっている。本研究では、銀河進化の過程を理解するために、銀河形成の数値シミュレーションを遂行し、銀河形成の初期の段階から現在に至るまでの進化の過程を調べた。そして、近傍銀河のいくつかの観測的特徴を再現するモデルを構築することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では宇宙理論と計算科学、宇宙観測といった三つの研究分野を融合し、理論と観測の融合というキーワードを念頭に、銀河形成・進化モデルの構築に取り組んだ。特に、大規模な数値シミュレーションを駆使して構築した銀河形成・進化の理論モデルと、遠方の銀河候補天体及び近傍銀河の観測データとの詳細な比較を行い、多様な銀河宇宙を解読するための基礎的な研究を行った。

研究成果の概要（英文）：In modern theoretical cosmology, the cold dark matter scenario has been successfully applied to reproduce the observed large-scale structure of the universe; this indicates that cold dark matter plays an essential role in galaxy formation. To understand the evolution of galaxies based on the cold dark matter scenario, we performed the numerical simulations that follow the evolution from the earliest stages of galaxy formation through the period of dynamical relaxation, at which point the resulting galaxy is in its final form. Our results nicely reproduce the observational characteristics in local galaxies.

研究分野：理論天文学

キーワード：銀河形成 計算科学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

多様な特徴を持つ深宇宙で発見されてきた数多くの銀河候補天体は、我々の住む現在の宇宙に存在し、ハッブル系列などで分類され研究されてきた近傍銀河とどのように関連しあっているのだろうか？これらは非常に基本的な問いかけにもかかわらず、その明確な答えを我々は持っていない。この様な銀河の進化の過程は銀河天文学の研究者にとって最大の急務であり、未だ発展途上である。

### 2. 研究の目的

本研究では宇宙理論と計算科学、宇宙観測といった三つの研究分野を融合し、理論と観測の融合というキーワードを念頭に、銀河形成・進化モデルの構築に取り組む。そして、その計算機を駆使して構築した銀河形成の理論模型と、遠方の銀河天体及び近傍銀河の観測データとの詳細な比較を行う。このような理論と観測の相互のフィードバックサイクルを徹底的におこない、銀河形成・進化の標準模型を作り上げ、銀河宇宙の諸問題の解明に挑戦する。

### 3. 研究の方法

本研究では“高赤方偏移で発見されている様々な銀河天体が、近傍宇宙のハッブル系列を構成する銀河の進化経路の一側面を見ているに過ぎない”という仮説を掲げ、理論・観測両方の観点からこの仮説を検証する。その為に輻射輸送を取り入れた銀河形成・進化モデルを構築する。そして可視・近赤外線、中間・遠赤外線、サブミリ波、電波、X線等の多波長観測と理論研究との間の相互のフィードバックサイクルをおこない、銀河スケールでの多様な問題に対して理解を深める。

### 4. 研究成果

(1)銀河からのアウトフロー(銀河風)はガスのエネルギーや質量輸送、銀河内での重元素循環や銀河間空間の重元素汚染といった、銀河の形成・進化や銀河間空間の進化に対して決定的な役割を担っている。本研究では、現実的なダークマターハロー(DMH)/超大質量ブラックホール(SMBH)重力場の下での銀河風の基礎過程を明らかにし、銀河形成・進化への寄与を系統的に調べた。その加速過程は超新星や恒星風などによって供給される熱エネルギーと銀河中心のSMBHやDMHによる重力ポテンシャルの大小関係を表す無次元パラメーターによって決定され、遷音速流が最大エントロピーもしくは最小エネルギーの解であることを示した。そして近傍銀河のX線観測による高温ガスの分布を再現するとともに、可視赤外で観測された銀河風の速度分布を再現することにも成功した。さらに、高温の銀河風ガスからの輻射を計算し、将来のX線観測に対する理論予言を行った。

また、銀河風の安定性について調べ、DMHの密度分布に依らず、常亜音速解は物理的には不安定であるが摂動の成長時間が宇宙年齢よりも長く実質的には安定であるという結果を得た。本研究では、常亜音速流の吹出す速度について、赤方偏移やDMHの密度分布、銀河の質量に対する依存性について解析を行った。赤方偏移が小さくなるにつれて常亜音速流として銀河風が吹出すことが難しくなり、低質量の銀河においてその条件はより厳しくなっていくことを示した。その結果、高赤方偏移で形成された銀河から現在に至るまでの銀河進化に対する星形成と質量放出に関する知見を得ることができた。

(2)現在の銀河形成モデルの根幹をなすcold dark matter(CDM)モデルは、宇宙の大規模構造の統計的性質を説明することに成功した反面、銀河や銀河より小さなスケールの構造において理論と観測の矛盾点が指摘されている。例えば、DMHの中心質量密度が発散するcusp構造を予言するCDMモデルに対し、中心質量密度が一定となるcore構造が近傍矮小銀河の多数で観測されていること(Cusp-core問題)や、質量の中心集中度が高いDMHを持つ大質量衛星銀河が見つからない(Too-big-to-fail問題)等がある。本研究ではこれら二つの問題を、銀河進化とDMHの関連性の観点から、ガスとDMHの力学的相互作用に起因する問題として捉え解析を行った。その結果、高赤方偏移に存在するであろう活発な星形成活動が発生する以前の原始銀河のDMHはcusp構造を持っているが、銀河形成期に発生する周期的な超新星爆発フィードバックによってcore構造へと遷移する、cusp-core遷移過程が重要な役割を果たすことを見出した。銀河形成期の銀河で活発な星形成が始まるとやがて大質量星の超新星爆発によって駆動される銀河からのアウトフローが発生する。このアウトフローは銀河から大量のガスを銀河の中心付近から遠方に放出することになるが、やがて輻射冷却の効果でエネルギーを失い、最終的には銀河中心へ再度落ち込むインフローに転ずる。それらのガスが銀河中心に集積すると、新たな星形成活動が活発化する。この様なアウトフロー・インフローの再帰的なガスの流れが発生し、銀河中心付近の重力ポテンシャルに周期的な変動を及ぼすようになるのである。本研究では、ガスの振動がランダウ共鳴を介してダークマターハローの中心部分を加熱する加熱効率について詳細な解析を行うことに成功した。そこでは、振動の高波長モードが高いエネルギー輸送効率を示すことを見出し、カスプからコアへの遷移を引き起こす物理過程を系統的に明らかにすることができた。さらに輻射輸送と流体をカップルしたシミュレーション計算を行い、より現実的なモデル構築を推し進めている。

(3)近年、ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡に代表される大型望遠鏡を最大限活用した近傍宇宙の大規模探査により、現在も続く銀河進化の過程を垣間見ることができるようになってきた。近傍のアンドロメダ銀河においては、おびただしい数の暗い矮小銀河が発見されるとともに、それら矮小銀河の衝突によるものと思われるステラーストリームやステラージェル、あるいは銀河円盤上で見られるリング構造等、銀河衝突の痕跡が続々と明らかにされてきている。本研究では、銀河衝突の重力多体計算及び流体力学計算による銀河衝突過程のみならず、アンドロメダ銀河に付随するダークマターハローの構造や、銀河円盤の構造、銀河ハロー中を徘徊するブラックホールの存在可能性について議論した。特に、アンドロメダ銀河のダークマターハローに関する解析では、現在の標準理論として考えられているコールドダークマター模型の予言するユニバーサル密度分布に従わない可能性を示唆しており、理論と観測の深刻な矛盾点について指摘した。

(4)銀河の中心に存在するブラックホールの質量は、銀河のバルジ(又は楕円銀河本体)の質量に比例しているが、その相関関係の起源は未解明である。その理由の一つは本研究で行っている銀河形成・進化の過程と銀河中心ブラックホールの形成・進化過程が複雑に絡み合っていることにある。銀河が衝突・合体する際に巨大ブラックホールどうしも合体することが銀河と銀河中心ブラックホール共進化の起源として有力であるものの、いまだ観測的に検証されていない。我々はまずば抜けて近いために過去の銀河衝突の履歴が詳細に明らかになっているアンドロメダ銀河に着目し、大規模数値シミュレーションとガスからの輻射計算をカップルさせることにより輻射スペクトルの理論計算を行い、銀河進化と銀河中心ブラックホールの共進化の過程の解明に取り組んだ。さらに、アンドロメダ銀河との衝突の際に潮汐破壊された衛星銀河の中心部に期待される観測的特徴を調べた。衛星銀河の大部分は、潮汐力により散り散りになりアンドロメダストリームなどを形成している。一方、潮汐破壊を耐えて生き残った衛星銀河中心部は、中心に大質量ブラックホールを含む星団として、現在、アンドロメダ銀河円盤の外縁部に居ると考えられる。この残骸星団の質量は、主に両銀河の近心点距離で決まり、アンドロメダ銀河中心から約 1kpc の位置を衛星銀河中心が通過したこの衝突では、衛星銀河の中心ブラックホール質量の約 1 割、すなわち合計約  $10^6$  太陽質量の星々が衛星銀河中心ブラックホールに引き連れられていると考えられる。星種族合成モデルを用いて年齢が 10-100 億年の場合について星団の放射スペクトルを見積もると、例えば可視光 V バンドで光度は、 $L = 10^{38.7-39.5}$  [erg/s] と予想され、見かけの明るさは  $F = 10^{-(10.4-11.2)}$  [erg/s/cm<sup>2</sup>] (AB 等級で 14-16mag) 程度で観測されるという観測に対する理論予言を行った。現在は、理論から観測へのフィードバックとして、観測グループに対する観測提案を行っている。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 24 件)

1. “Systematic Identification of LAEs for Visible Exploration and Reionization Research Using Subaru HSC (SILVERRUSH). I. Program Strategy and Clustering Properties of ~2,000 Ly $\alpha$  Emitters at  $z=6-7$  over the 0.3-0.5 Gpc<sup>2</sup> Survey Area”, Ouchi, Masami; Harikane, Yuichi; Shibuya, Takatoshi; Shimasaku, Kazuhiro; Taniguchi, Yoshiaki; Konno, Akira; Kobayashi, Masakazu; Kajisawa, Masaru; Nagao, Tohru; Ono, Yoshiaki; Inoue, Akio K.; Umemura, Masayuki; Mori, Masao, et al., Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 13 (2018), 査読有
2. “Stellar Stream and Halo Structure in the Andromeda Galaxy from a Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey”, Komiyama, Yutaka; Chiba, Masashi; Tanaka, Mikito; Tanaka, Masayuki; Kirihara, Takanobu; Miki, Yohei; Mori, Masao, et al., The Astrophysical Journal, 853, 29 (2018), 査読有
3. Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., “Polytropic transonic galactic outflows in a dark matter halo with a central black hole”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 440, 2225 (2017), 査読有
4. Hayashi, K., Ishiyama, T., Ogiya, G., Chiba, M., Inoue, S., and Mori, M., “Universal Dark Halo Scaling Relation for the Dwarf Spheroidal Satellites”, The Astrophysical Journal, 843, 97 (2017), 査読有
5. Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., “The nature of the progenitor of the M31 North-western stream: globular clusters as milestones of its orbit”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 469, 3390 (2017), 査読有

6. Miki, Y., Mori, M., Rich, R.M., “Collision tomography: Physical properties of possible progenitors of the Andromeda stellar stream”, *Astrophysical Journal*, 827, 82 (2016), 査読有
7. Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., & Rich, R. M. “Formation of the Andromeda Giant Stream: Asymmetric Structure and Disc Progenitor”, 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464 (3): 3509-3525, 査読有
8. Kirihara, T., Miki, Y., and Mori, M., “The nature of the progenitor of the M31 North-western stream: globular clusters as milestones of its orbit”, submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letter*, 査読有
9. Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., 2014, “Transonic galactic outflows in a dark matter halo with a central black hole and its application to the Sombrero galaxy”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444, 1177-1188, 査読有
10. Kawaguchi, T., Saito, Y., Miki, Y., Mori, M., 2014, “Relics of Galaxy Merging: Observational Predictions for a Wandering Massive Black Hole and Accompanying Star Cluster in the Halo of M31”, *Astrophysical Journal Letters*, 789, L13-17, 査読有
11. Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., 2014, “Puzzling outer-density profile of the dark matter halo in the Andromeda galaxy”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66, L106, 査読有
12. Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., Saito, Y., 2014, “Hunting a Wandering Supermassive Black Hole in the M31 Halo Hermitage”, *The Astrophysical Journal*, 783, 87-95, 査読有
13. Momose, R., Ouchi, M., Nakajima, K., Ono, Y., Shibuya, T., Shimasaku, K., Yuma, S., Mori, M., Umemura, M., 2014, “Diffuse Ly  $\alpha$  haloes around galaxies at  $z = 2.2-6.6$ : implications for galaxy formation and cosmic reionization”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442, 110-120, 査読有
14. Ogiya, G., Mori, M., Ishiyama, T., Burkert, A., 2014, “The connection between the cusp-to-core transformation and observational universalities of DM haloes”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 440, L71-L75, 査読有
15. Ogiya, G., Mori, M., 2014, “The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback: Effects of Oscillation”, *The Astrophysical Journal*, Volume 793, article id. 46, 12, 査読有
16. Shibuya, T., Ouchi, M., Nakajima, K., Yuma, S., Hashimoto, T., Shimasaku, K., Mori, M., Umemura, M., 2014, “What is the Physical Origin of Strong Ly  $\alpha$  Emission? I. Demographics of Ly  $\alpha$  Emitter Structures”, *The Astrophysical Journal*, 785, 64-76, 査読有
17. Shibuya, T., Ouchi, M., Nakajima, K., Hashimoto, T., Ono, Y., Rauch, M., Gauthier, J., Shimasaku, K., Goto, R., Mori, M., Umemura, M., 2014, “What is the Physical Origin of Strong Ly  $\alpha$  Emission? II. Gas Kinematics and Distribution of Ly  $\alpha$  Emitters”, *The Astrophysical Journal*, 788, 74-84, 査読有

[学会発表] (計 60 件)

1. 森正夫, 田沼萌美, ダークマターハローのユニバーサルスケーリング関係, 日本天文学会

- 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 19 日-21 日, 兵庫県立大学 姫路工学キャンパス, 兵庫
2. Igarashi, A., Mori, M., & Nitta, S., “ Transonic galactic outflows in starburst galaxies ”, Tokyo Spring Cosmic Lyman-Alpha Workshop, March 27-30, 2018, Tokyo
  3. Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., ” Transonic galactic outflows in a dark matter halo with a central black hole ”, The 29th International Astronomical Union General Assembly, FM18p13, August 10-14 2015, Honolulu, USA (poster)
  4. Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., “ Disk minor merger as the progenitor of the Andromeda giant stream ”, (Poster), IAU XXIXth General Assembly Symposium 317, Aug 3-14 2015, Honolulu, USA
  5. Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., “ Investigating the outer density profile of the dark matter halo of M31 ”, (Poster), IAU XXIXth General Assembly Focused meeting 18, Aug 3-14 2015, Honolulu, USA
  6. Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., & Rich, R. M. “ Multilateral Study of the Formation of the Andromeda Giant Stellar Stream ”, IAU Symposium 321: Formation and Evolution of Galaxy Outskirts, March 14-18 2016, Toledo, Spain (poster)
  7. Igarashi, A., Mori, M., & Nitta, S., “ A new concept of transonic galactic outflows and its application to the Sombrero galaxy ”, IAU Symposium 321: Formation and Evolution of Galaxy Outskirts, March 14-18 2016, Toledo, Spain (poster)
  8. 森正夫, 「ダークマターの構造と銀河進化」, 研究会「新世紀における 銀河宇宙観測の方向」(2015 年 3 月 31 日 ~ 4 月 2 日, KKR 熱海, 熱海)
  9. 森正夫「南極テラヘルツ望遠鏡と銀河形成・進化シミュレーション」, 南極で切り開くテラヘルツ天文学 (2015 年 11 月 18 日, 国立天文台, 三鷹)
  10. Ogiya, G., Mori, M., “ Solving the core-cusp problem through resonances between dark matter particles and density waves of interstellar gas ”, (poster), IAU Symposium 311 Galaxy Masses as Constraints of Formation Models (Jul. 21-25, 2014, Oxford, UK)
  11. Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., “ Puzzling Outer Density Profile of the Dark Matter Halo in the Andromeda Galaxy ”, (poster), Satellite galaxies and dwarfs in the local group, (Aug. 25-29, 2014, Potsdam, Germany)
  12. Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., Saito, Y., “ Hunting a Wandering Supermassive Black Hole in M31 Halo Hermitage using GPU Cluster ”, The 6th East-Asian Numerical Astrophysics Meeting (Sep.15-19, 2014, Suwon, Korea)
  13. Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., “ A new puzzle of the Cold Dark Matter Prediction in the Outer Density Profile of the Andromeda Galaxy ”, (poster), Evolving Galaxies in Evolving Environments, (Sep. 15-19, 2014, Bologna, Italy)
  14. Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., “ Transonic solutions of isothermal galactic outflows in gravitational potential of a dark matter halo and a super massive black hole ”, Accretion and Outflows throughout the scales from young stellar objects to AGNs (Oct.1-3, 2014, Lyon, France)
  15. Kawaguchi, T., Saito, Y., Miki, Y., Mori, M., “ Relics of Galaxy Merging: Optical Emission from a Star Cluster Trailing a Wandering Massive Black Hole in the M31 Halo ”, (poster), Evolution of SMBHs with HSC: First results from initial dataset (Dec.18-20, 2014, Taipei, Taiwan)
  16. Kawaguchi, T., Saito, Y., Miki, Y., Mori, M., “ Relics of Galaxy Merging:

Observational Predictions for a Wandering Massive Black Hole and Accompanying Star Cluster in the M31 Halo”, (poster), 2015 Aspen Winter Conference -- Black Holes in Dense Star Clusters (Jan.17-22, 2015, Aspen, USA)

17. 森正夫, 桐原崇宣, 三木洋平, 川口俊宏, 斎濟祐理子, 「アンドロメダ銀河における, さすらいのブラックホールとダークマターハローの姿」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日 ~ 13 日, 山形大学, 山形市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

〔その他〕

1. 森正夫, Newton 別冊『138 億年の大宇宙』宙の章 PART3 「宇宙の未来」, 2018 年 9 月 5 日
2. 森正夫, 「地球と生命, 宇宙の全歴史」, Newton 6 月号増刊, 2017 年 5 月 18 日
3. 森正夫, 「銀河のすべて」, ニュートン別冊, 2017 年 12 月 18 日
4. 森正夫, 「アンドロメダ銀河の素顔」, Newton 6 月号, 2015 年 4 月 26 日
5. 森正夫, 「アンドロメダ銀河が我が銀河に大衝突」, Newton 9 月号, 2015 年 7 月 25 日
6. 森正夫, 「大宇宙 保存版」, Newton 別冊, 2015 年 11 月 26 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究協力者

研究協力者氏名: Michael, Rich  
ローマ字氏名: Rich, Michael

研究協力者氏名: 三木洋平  
ローマ字氏名: Miki, Yohei

研究協力者氏名: 扇谷豪  
ローマ字氏名: Ogiya, Go

研究協力者氏名: 五十嵐朱夏  
ローマ字氏名: Igarashi, Asuka

研究協力者氏名: 桐原崇亘  
ローマ字氏名: Kirihara, Tadanobu

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。