

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：10101
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19H01931
研究課題名（和文）銀河団形成領域の高分解能計算と広視野・高分解能観測で解き明かす銀河と銀河団の進化

研究課題名（英文）Revealing evolution of galaxies and galaxy clusters by high-resolution simulations and wide-field, high-resolution observations

研究代表者
岡本 崇（OKAMOTO, Takashi）
北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：50541893
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：銀河形成において本質的に重要な役割を果たす超新星爆発の影響と超大質量ブラックホールをエンジンとする活動銀河核によるフィードバックの効果をシミュレーションに取り入れるためのモデル化を行い、実装し、シミュレーションを実行した。さらに、機械学習を用いて、観測される銀河の分布からその銀河がダークマターのどのような構造の中に存在するのか調べる方法を開発した。また、ALMA 望遠鏡を用いた銀河団銀河の分子ガスの観測を行い、銀河団銀河が星形成を止める物理過程として、銀河団ガスからのラム圧による星形成ガスの剥ぎ取りが主要な役割を果たすことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河は活発な星形成活動を行う「星形成銀河」とほとんど星形成活動を示さない「静的な銀河」の2つに大きく分けられる。星形成銀河がどのようにして静的な銀河へと進化していくのかは現代天文学の大きな謎とされている。星形成は超新星爆発や活動銀河核からのエネルギー放出などの内部的な要因と銀河団ガスからラム圧によるガスの剥ぎ取りのような環境効果によって抑制される。本研究成果の意義は、この内部的な要因をシミュレーションに取り入れることにより環境効果の理論研究を可能にするとともに、どのような環境効果が早期型銀河の形成にもっとも重要かを観測的に明らかにしたことである。

研究成果の概要（英文）：We have implemented the effects of supernova explosions, which play an intrinsically important role in galaxy formation, and the effects of feedback by active galactic nuclei powered by supermassive black holes, and we perform cosmological simulations. In addition, we have developed a method to determine from the observed distribution of galaxies what structure of dark matter the galaxies reside in by using machine learning. We have also observed the molecular gas in cluster galaxies using the ALMA telescope and found that the stripping of star-forming gas by ram pressure from the cluster gas plays a major role as a physical process by which cluster galaxies stop star formation.

研究分野：銀河形成

キーワード：銀河形成 銀河団 環境効果 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、銀河形成シミュレーションでは、1辺 100 Mpc 程度以上の宇宙論的な体積を比較的低い数値分解能で計算し、銀河の統計量を調べるものと、計算領域の 1 部分だけを高分解能にした初期条件を用意することで、1 つの銀河の形成を高分解能でシミュレーションする、zoom シミュレーションに 2 分されていた。銀河の進化には星形成や超新星爆発、銀河中心超大質量ブラックホール (SMBH) をエンジンとする活動銀河核 (AGN) からのエネルギーや運動量の放出 (AGN フィードバック) 等の内部要因と、他の銀河との合体や銀河団ガスから受けるラム圧による星間ガスの剥ぎ取り等の環境要因が重要な役割を果たす。しかし、大きな体積を計算するために分解能を落としたシミュレーションでは銀河の内部構造が分解できないため、内部要因に対してはサブグリッドモデルと呼ばれる現象論的なモデルを用いるしかなく、同様に銀河の内部構造を分解できていないため、周辺環境との相互作用も適切に取り入れることができない。一方、zoom シミュレーションでは分解能を高めているため、内部要因に対してはある程度物理的な取り扱いが可能であるが、孤立した銀河をターゲットとしているため、環境要因は全く取り入れることができない。観測的には銀河の性質はその存在する環境に強く依存することが知られており、銀河形成理論を完成させるためには環境効果とその役割を明らかにすることが必須であった。

2. 研究の目的

銀河には活発な星形成活動をする「星形成銀河」と星形成活動を終えた「静的な銀河」が存在する。静的な銀河は何らかの原因で星形成銀河での星形成が止まり形成されたものだと考えられている。静的な銀河は銀河団のような高密度領域に多く存在するため、その形成には環境効果が重要な役割を果たしていると考えられているが、環境効果にも銀河団ガスからのラム圧による星間ガスの剥ぎ取り、同様にラム圧による銀河のハロー部に存在する熱いガスの剥ぎ取り、銀河同士の合体、銀河-銀河または銀河-銀河団間の潮汐相互作用など、様々なものがあり、どれが主要な役割を果たしているのかは未だに明らかになっていない。本研究では、銀河団形成領域の高分解能銀河形成シミュレーションを行うことで、銀河の進化、特に星形成銀河がどのようにして星形成活動を終え静的な銀河へと進化する上で、環境効果がどのような役割を果たすのかを明らかにする。また個々の銀河の内部構造を十分に分解できる高分解能のシミュレーションを行うことで、爆発的星形成やそれに伴うバルジ形成、銀河中心部へのガス供給もモデルを介さずに扱うことを目指す。銀河中心部のガス量の見積もりは、銀河中心超大質量ブラックホールの成長を決める上で (銀河中心部からブラックホールへのガス供給には依然としてモデルを仮定する必要があるが) 不可欠である。このブラックホールをエンジンとした活動銀河核からのエネルギー放出 (AGN フィードバック) は、大質量銀河の星形成を止めるメカニズムとして最有力視されているが、この仮説を直接支持する観測的証拠は発見されていない。そこで AGN フィードバックの役割を観測的に検証する方法をシミュレーションを用いて提案する。

3. 研究の方法

「研究開始当初の背景」で説明した zoom シミュレーションの手法を銀河団形成領域に適用し、環境効果が最も強く現れる銀河団形成領域での銀河の形成と進化を調べる。銀河団形成領域とその周辺部という環境効果が最も強く現れる領域に注目し、銀河の形成と進化における環境因子と内部因子を切り分けることを目指す。(原始) 銀河団とその周辺部のフィラメント状の大規模構造の観測と、それに対応するシミュレーションを直接比較することで環境効果を含む銀河形成理論の確立を目指す。銀河団形成領域とその周辺部を含む大領域の銀河形成シミュレーションを銀河内部の構造まで分解できる高分解能で行うことで、星形成領域や銀河中心部を扱える 10 pc の空間分解能を実現し、研究開始当初に行われていたせいぜい 100 pc 程度の空間分解能の銀河団銀河シミュレーションとは銀河の内部構造を分解できるという極めて本質的な違いを生み出す。この分解能は環境効果として重要な星間ガスと銀河団ガスの流体的相互作用を直接扱えるだけでなく、爆発的星形成やそれに伴うバルジ形成、銀河中心部へのガス供給もモデルを介さずに扱うことを可能とする。

4. 研究成果

銀河の進化における内部因子として最も重要であると考えられている超新星爆発の影響を高分解能の超新星残骸のシミュレーション結果にもとづいて銀河形成シミュレーションに取り入れる手法を開発して実装した。従来方法では、多数の星粒子から 1 つのガス要素に同時に運動量が与えられた場合にガス粒子が以上に大きな運動エネルギーを獲得しており、超新星爆発の影響を過大評価していたことを明らかにし、エネルギー保存則を破らないようにガス要素に与える運動量を補正することでこの問題を解決した。また大質量銀河の星形成抑制メカニズムだと考えられている AGN フィードバックをそのエンジンとなる SMBH の進化と同時に扱うために、SMBH の形成・進化のモデル及び、AGN フィードバックをシミュレーションに実装した。そ

の結果、AGN フィードバックは（少なくとも天の川銀河質量程度の銀河では）銀河そのものの成長にはあまり影響を与えず、SMBH の成長を抑制するだけであることが明らかになった。この性質と、観測されている SMBH の質量と銀河のバルジの速度分散の関係を用いることで AGN フィードバックの効率に制限をつけられることも分かった。

また、ALMA 望遠鏡による銀河団銀河の観測データを用いて、銀河団内での星形成銀河から静的銀河への遷移において、どの環境効果が主要な役割を果たしているのかを調べた。銀河の視線方向速度と銀河団中心からの距離を軸にした図上に、銀河団銀河の中性水素ガス量や分子ガス量を示した位相図を用いることで、銀河団内で星形成銀河を静的銀河へと進化させる上で最も重要な物理過程は銀河団ガスからのラム圧による分子ガスの剥ぎ取りであることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Iles Elizabeth J, Pettitt Alex R, Okamoto Takashi	4. 巻 510
2. 論文標題 Differences in star formation activity between tidally triggered and isolated bars: a case study of NGC4303 and NGC3627	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3899 ~ 3916
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab3330	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamamoto Yasuyoshi, Okamoto Takashi, Saitoh Takayuki R	4. 巻 504
2. 論文標題 Testing the effect of resolution on gravitational fragmentation with Lagrangian hydrodynamic schemes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3986 ~ 3995
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Morokuma-Matsui Kana, Kodama Tadayuki, Morokuma Tomoki, Nakanishi Kouichiro, Koyama Yusei, Yamashita Takuji, Koyama Shuhei, Okamoto Takashi	4. 巻 914
2. 論文標題 A Phase-space View of Cold-gas Properties of Virgo Cluster Galaxies: Multiple Quenching Processes at Work?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 145 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abedb6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Bakx Tom J L C and Okamoto Takashi et al.	4. 巻 493
2. 論文標題 ALMA uncovers the [CII] emission and warm dust continuum in a $z = 8.31$ Lyman break galaxy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4294 ~ 4307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa509	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ren Yi W., Fudamoto Yoshinobu, Inoue Akio K., Sugahara Yuma, Tokuoka Tsuyoshi, Tamura Yoichi, Matsuo Hiroshi, Kohno Kotaro, Umehata Hideki, Hashimoto Takuya, Bouwens Rychard J., Smit Renske, Kashikawa Nobunari, Okamoto Takashi, Shibuya Takatoshi, Shimizu Ikkoh	4. 巻 945
2. 論文標題 Updated Measurements of [O iii] 88 μm , [C ii] 158 μm , and Dust Continuum Emission from a z = 7.2 Galaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 69 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb8ab	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

1. 著者名 Hirai Yutaka, Beers Timothy C, Chiba Masashi, Aoki Wako, Shank Derek, Saitoh Takayuki R, Okamoto Takashi, Makino Junichiro	4. 巻 517
2. 論文標題 Origin of highly r-process-enhanced stars in a cosmological zoom-in simulation of a Milky Way-like galaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4856 ~ 4874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2489	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Morokuma-Matsui Kana, Bekki Kenji, Wang Jing, and Takashi Okamoto et al.	4. 巻 263
2. 論文標題 CO(J = 1-0) Mapping Survey of 64 Galaxies in the Fornax Cluster with the ALMA Morita Array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 40 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac983b	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

1. 著者名 Nashimoto Masashi, Tanaka Masayuki, Chiba Masashi, Hayashi Kohei, Komiyama Yutaka, Okamoto Takashi	4. 巻 936
2. 論文標題 The Missing Satellite Problem outside of the Local Group. II. Statistical Properties of Satellites of Milky Way-like Galaxies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 38 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac83a4	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 -

1. 著者名 Shirasaki Masato, Okamoto Takashi, Ando Shin'ichiro	4. 巻 516
2. 論文標題 Modelling self-interacting dark matter substructures I. Calibration with N-body simulations of a Milky-Way-sized halo and its satellite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4594 ~ 4611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2539	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Inoue Shigeki, Si Xiaotian, Okamoto Takashi, Nishigaki Moka	4. 巻 515
2. 論文標題 Classification of cosmic structures for galaxies with deep learning: connecting cosmological simulations with observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4065 ~ 4081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakre Nimit, Habe Asao, Pettitt Alex R, Okamoto Takashi	4. 巻 73
2. 論文標題 Massive core/star formation triggered by cloud-cloud collision: Effect of magnetic field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S385 ~ S404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 堀江秀、岡本崇
2. 発表標題 分子雲衝突による星形成と銀河シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会 2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀江秀、岡本崇、羽部朝男
2. 発表標題 分子雲衝突による星形成と銀河シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会 2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本 崇
2. 発表標題 衛星銀河ハローのダークマターによる構造の違いと銀河形成過程による影響
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 崇
2. 発表標題 Structure of subhalos around Milky Way-mass galaxies in CDM and SIDM universe
3. 学会等名 Cosmic acceleration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本 崇
2. 発表標題 銀河と銀河中心ブラックホールの進化における AGN フィードバックの役割
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本崇
2. 発表標題 厳密なエネルギーの制限を課した超新星フィードバックの実装とその効果
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水達生、大木平、岡本崇、長島雅裕、榎基宏
2. 発表標題 SMBH質量－バルジ質量関係の赤方偏移進化
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023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
研究分担者	諸隈 佳菜 (Morokuma Kana) (70649467)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特別研究員 (12601)	
研究分担者	児玉 忠恭 (Kodama Tadayuki) (80343101)	東北大学・理学研究科・教授 (11301)	

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			
オランダ	Leiden Observatory	ASTRON	University of Amsterdam	
英国	Liverpool John Moores University			
米国	JINA-CEE	University of Notre Dame		
オーストラリア	University of Western Australia	Western Sydney University		
中国	Peking University			