

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20373

研究課題名（和文）小スケール天体現象の理解に基づく初代銀河形成シミュレーション：星団形成の影響

研究課題名（英文）Simulations of first galaxy formation based on understanding of small-scale astronomical phenomena: the effect of stellar cluster evolution

研究代表者

杉村 和幸 (Sugimura, Kazuyuki)

北海道大学・理学研究院・助教

研究者番号：10773856

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、初代銀河形成過程を明らかにするために大規模数値流体シミュレーションをおこなった。その際、小スケールの宇宙物理現象に関する精密な理解を組み込むことで、これまでと比べて、より現実に近い形で初代銀河形成過程を記述することができた。特に、小スケールの現象として巨大ガス雲からの星団形成過程に着目し、最新の星団形成モデルを組み込んだ初代銀河形成シミュレーションをおこなうことで、星団からの遠紫外線輻射によってバースト的な星形成が誘起されることや、バースト的な星形成が起こっている明るい初代銀河においては星団からの輻射が卓越して不規則銀河に分類されることなどを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ビッグバンから現在までの銀河形成史における初期段階にあたる、宇宙で最初の銀河（初代銀河）の形成過程の理論的解明を進めるものである。2021年のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の打ち上げ以降、宇宙初期の銀河観測は大きく進展しており、その結果を最大限活用するためにも、初代銀河理論を進めることが求められている。本研究により、小スケール天体現象の理解を用いた現実に近い形で初代銀河形成過程がシミュレーション可能になり、その結果に基づいて初代銀河過程の物理的理解を進めることができた。一方で、初代銀河の理論的理解にはまだ大きな改善の余地もあり、今後、さらに研究を発展させることが重要である。

研究成果の概要（英文）：In this project, we have performed a series of large-scale numerical hydrodynamics simulations to study the first galaxy formation. By incorporating a precise understanding of small-scale astrophysical phenomena, we are able to treat the first galaxy formation more realistically compared to previous studies.

Specifically, by focusing on the process of star cluster formation from giant gas clouds and performing first galaxy formation simulations incorporating the latest star cluster formation models, we revealed that burst-like star formation is induced by far-ultraviolet radiation from the clusters and that during the burst-like star formation phases, radiation from the clusters dominates the entire radiation from the galaxies, leading to their classification as irregular galaxies.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：初代星 初代銀河 初代ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

宇宙で最初の銀河 (初代銀河) の形成は、ビッグバンから現在までの銀河形成史における初期の重要なマイルストーンと言える。研究開始当初の背景としては、まもなくジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の打ち上げがおこなわれるというタイミングで、宇宙初期の銀河観測が大きく進展することへの期待が高まり、それと同時に、観測と比較可能な初代銀河形成理論を構築することの必要性も高まりつつあった。しかしながら、これまでの初代銀河形成シミュレーションの多くは、現在までの銀河形成を記述するための現象論的モデルを採用しており、初代銀河形成過程を現実に沿った形で再現できているかの根拠が弱いという問題があった。一方で、最近の研究の進展により、宇宙初期に起こる小スケールの天体現象の理解が大きく進んでいるため、その理解をシミュレーションに取り込むことで、現実に近い形で初代銀河形成過程のシミュレーションをおこない、初代銀河形成過程の理論的理解を大きく進展させることができる可能性があった。

2. 研究の目的

(1)

このような背景の下、本研究では、宇宙初期に起こる小スケールの天体現象の理解を取り込んだシミュレーションによって現実に近い形で初代銀河形成過程を再現し、それに基づいて初代銀河形成の理論的解明を進めることを主な目的に設定した。具体的には、宇宙初期の星団形成過程の理解が進んでいることを踏まえ、最新の星団形成モデルを組み込んだ新たなシミュレーションをおこなって、初代銀河を構成する星々がどのように形成するかを明らかにし、さらに、形成した初代銀河がどのような観測的特性を持つかを明らかにすることを目指して研究を進めた。

(2)

初代銀河がどのように形成するかは、初代銀河形成の少し前に起こる宇宙で最初の星である初代星がどのように形成し、初代星からの光や寿命を終えた初代星の超新星によってまき散らされる金属が宇宙空間の状態をどのように変えたかに大きく依存する。そのため、初代星の性質を正しく決めることは、初代銀河形成理論の不定性を減らす上で非常に重要である。そこで、初代銀河のシミュレーションに加えて、別途、初代星形成シミュレーションをおこない、形成する初代星の性質を決めることを目的に研究を進めた。

3. 研究の方法

(1)

本研究は、初代銀河形成の分野で先駆的な研究を進めているメリーランド大学の Massimo Ricotti 教授のグループとの共同研究である。本研究のシミュレーションは、公開の宇宙論的輻射流体コード「RAMSES」(Teyssier 2002) をベースに初代銀河形成シミュレーション用に開発した独自のコードを用いておこなった。本研究では、特に、高密度ガス雲からの星団形成モジュールを新たに実装した。その際、最新の星団形成モデルに基づき、ガス雲中で形成する星団の質量やサイズを与えるようにモデル化した。星団を構成する星々の輻射や超新星による周囲のガスへのフィードバックは、「RAMSES」に備わっている輻射輸送・超新星モジュールを用いて取り扱った。そして、このシミュレーションコードを用いて、ビッグバン直後の宇宙初期の初期密度ゆらぎを初期条件にして宇宙論的な初代銀河形成シミュレーションをビッグバンから 5 億年の時間スケールでおこなった。その結果を解析し、初代銀河形成がどのように進むか、および、初代銀河がどのような観測的特性を持つかを調べた。

(2)

本研究は、すでに自身で開発した初代星形成用の輻射流体シミュレーションコード「SFUMATO-RT」を用いて行った。先におこなった宇宙論的シミュレーションから初代星が形成する直前のガス分布を取得し、それを初期条件にして、初代星が周囲のガスを降着して最終的に星の質量が決まるまでの間の進化を高解像度シミュレーションで調べた。本研究では、宇宙の中で実現する複数の初代星形成環境に対してシミュレーションをおこない、形成する初代星の性質について系統的に考察した。

4. 研究成果

(1)-1 Garcia, Ricotti, Sugimura, Park (2023)

まず、上述の初代銀河形成シミュレーションに基づき、初代銀河形成の際の星団の形成と進化を明らかにした。シミュレーションの結果、初代銀河を構成する星々はまず星団中の星として形成し、その後、大半の星団は周囲との相互作用の中で解体して、星々は銀河の中を漂ういわゆるフィ

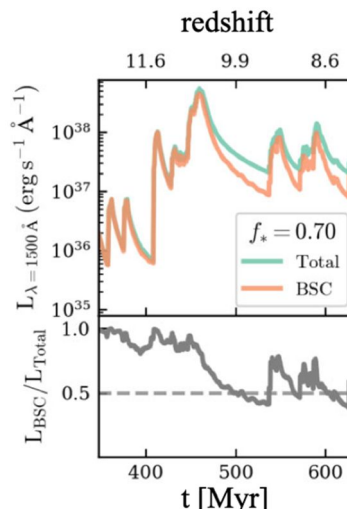


図1: 初代銀河の全光度 (L_{Total}) における星団の寄与 (L_{BSC})

ールド星になることがわかった。また、図1のように、初代銀河中でバースト的な星形成が起きている際には、星形成は星団中で起こるため、フィールド星からの光よりも星団中の星からの光が初代銀河からの光において支配的になる。このことは、バースト的に星形成して明るく輝く初代銀河を観測すると、複数の星団からなる不規則銀河として観測されるだろうということを予言する。

(1)-2 Sugimura, Ricotti, Park, Garcia, Yajima (2024)

さらに、星からの放射のモデルを変更して比較計算をおこなうことで、先の初代銀河形成シミュレーションで見られた、バースト的な星形成の物理的なメカニズムを明らかにした。図2のように、初代銀河中は低金属度、かつ、強紫外線放射場の環境にあるため、ガスが重力的に収縮するにはたくさんの質量が集まる必要があり、一度収縮が始まると、今度は急激に星形成が進んでバースト的な星形成になることがわかった。このようなメカニズムでバースト的な星形成が引き起こされることはこれまで知られておらず、観測的にも示唆されている初代銀河でのバースト的な星形成について、理解を進めることができたと言える。

(2) Sugimura, Matsumoto, Hosokawa, Omukai, Hirano (2023)

上述のように、初代銀河だけでなく、初代星についての研究も進めた。複数の初代星形成環境における初代星形成過程のシミュレーションの結果は図3の通りである。この結果から、まず、初代星は多くの場合、連星や多重星のような複数の星の系として誕生することがあきらかになった。また、初代星形成時は母体となる雲から中心に向かってのガス流入率が大きいため星の系の全質量は典型的に太陽の数10倍か数100倍と非常に大きくなり、さらに、母体となる雲の持つ角運動量が連星の軌道角運動量の起源となって連星間距離も太陽と地球の1000倍以上と大きくなることがわかった。このように初代星の性質について新たに得られた知見を今後の初代銀河形成シミュレーションに組み込むことで、より現実に近い形で初代銀河形成過程の解明を進めることが可能になると考えられる。

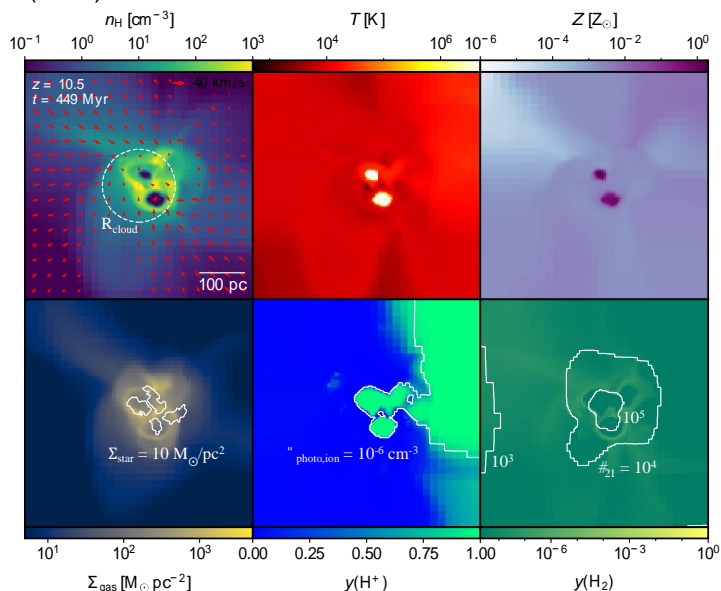


図2: バースト中の初代銀河の状態

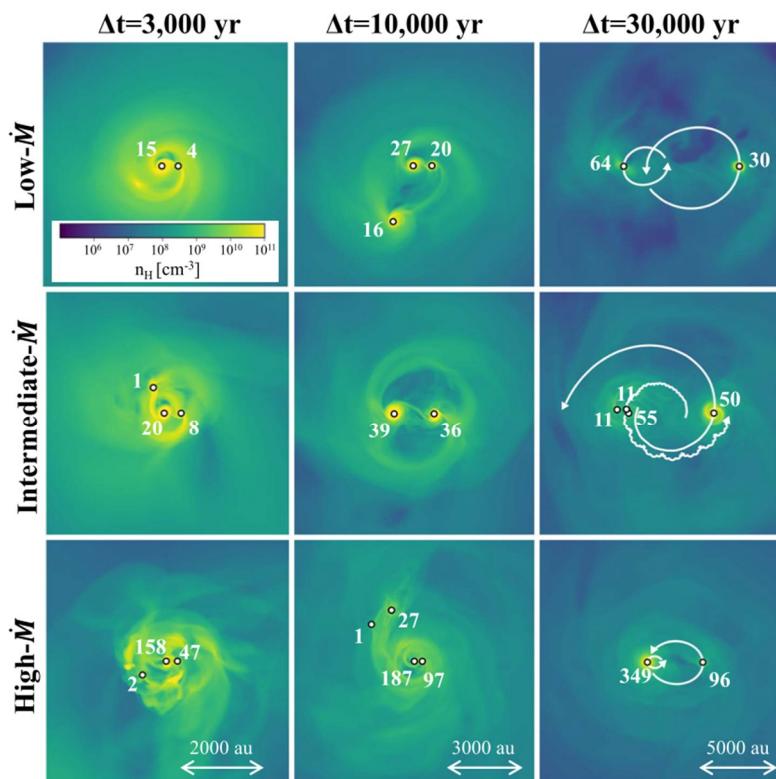


図3: 初代星の形成過程

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Garcia Fred Angelo Batan, Ricotti Massimo, Sugimura Kazuyuki, Park Jongwon	4. 巻 522
2. 論文標題 Star cluster formation and survival in the first galaxies	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2495 ~ 2515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad1092	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 Sadanari Kenji Eric, Omukai Kazuyuki, Sugimura Kazuyuki, Matsumoto Tomoaki, Tomida Kengo	4. 巻 519
2. 論文標題 Non-ideal magnetohydrodynamic simulations of the first star formation: the effect of ambipolar diffusion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3076 ~ 3090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac3724	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 Park Jongwon, Ricotti Massimo, Sugimura Kazuyuki	4. 巻 521
2. 論文標題 Population III star formation in an X-ray background: III. Periodic radiative feedback and luminosity induced by elliptical orbits	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5334 ~ 5353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad895	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 Sugimura Kazuyuki, Ricotti Massimo, Park Jongwon, Garcia Fred Angelo Batan, Yajima Hidenobu	4. 巻 -
2. 論文標題 Violent Starbursts and Quiescence Induced by FUV Radiation Feedback in Metal-poor Galaxies at High-redshift	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad499a	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 Kimura Kazutaka、Hosokawa Takashi、Sugimura Kazuyuki、Fukushima Hajime	4. 巻 950
2. 論文標題 3D Radiation-hydrodynamic Simulations Resolving Interior of Rapidly Accreting Primordial Protostar	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 184 ~ 184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acda8e	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 Suzuguchi Tomoya、Sugimura Kazuyuki、Hosokawa Takashi、Matsumoto Tomoaki	4. 巻 966
2. 論文標題 Gas Dynamical Friction on Accreting Objects	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 7 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad34af	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 Park Jongwon、Ricotti Massimo、Sugimura Kazuyuki	4. 巻 528
2. 論文標題 On the origin of outward migration of Population III stars	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 6895 ~ 6914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stae518	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5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 杉村和幸、松本倫明、細川隆史、平野信吾、大向 一行
2. 発表標題 初代星形成シミュレーション : 長距離大質量連星の形成
3. 学会等名 日本天文学会 2022年秋期年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉村和幸
2. 発表標題 小スケール天体現象の理解に基づく初代銀河形成シミュレーション
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉村和幸、Massimo Ricotti, Jongwon Park
2. 発表標題 小スケール天体現象の理解に基づく初代銀河形成シミュレーション
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 杉村和幸
2. 発表標題 初代星形成シミュレーション
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2021 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Sugimura
2. 発表標題 Simulating the formation of first stars in the Universe: the birth of first-star binaries
3. 学会等名 AAPPS-DACG Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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	The University of Maryland	Columbia University	