

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06022

研究課題名（和文）輻射流体数値シミュレーションで解き明かす初代銀河形成過程

研究課題名（英文）Probing the formation of first galaxies under radiative feedback

研究代表者

矢島 秀伸 (Yajima, Hidenobu)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：10756357

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：大規模な数値シミュレーションにより、高密度環境における初代銀河から大質量銀河へと至る進化を計算した。同時に、多波長輻射輸送計算によって銀河の輻射特性を明らかにした。結果として、高密度領域では、大量のガス降着によって銀河内に高密度なガス円盤が作られる事が示された。そして、そのような大質量円盤銀河は、ダスト熱放射によって赤外線で見える銀河になることが分かった。また、解析的な手法により、初代銀河内における初代星団の形成条件、大質量ブラックホールの形成条件についても制限を与えた。

研究成果の概要（英文）：We have performed large-scale numerical simulations and multi-wavelength radiation transfer calculations. Our simulations show evolution from first galaxies to massive galaxies, and their observational properties. Large amounts of gas accrete onto galaxies, and make massive galactic disks in an over-dense region. The massive galaxies become bright at infrared band due to dust thermal emission in the galactic disk. We also derive the conditions for formations of Population III star clusters and massive black holes in first galaxies by using analytical models.

研究分野：理論天文学

キーワード：銀河形成 巨大ブラックホール 輻射輸送 星間ダスト 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

近年の観測装置の発展により、宇宙初期に形成された銀河の観測が可能になりつつある。一方で、宇宙で最初に形成される銀河である初代銀河は未だ観測が難しく、その形成・進化メカニズムは謎に包まれている。現在初代銀河を検出するために、ジェームスウェッブ宇宙望遠鏡や、Thirty Meter Telescope など国際的観測プロジェクトが進められている。これら次世代の観測装置稼働を見据えて、初代銀河の形成と進化を理論的に明らかにする事が現在の天文学における重要課題の一つである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大規模な数値シミュレーションを用いて、初代銀河の形成・進化メカニズムを明らかにする事である。特に、初代銀河の形態や、多波長輻射特性、銀河内の星種族や大質量ブラックホール形成などを調べる事で、初代銀河の性質を多角的に明らかにするのが目的である。また、初代銀河は現在の星形成銀河に比べ質量が非常に小さい。そのため、星からの紫外線輻射や超新星爆発によって銀河内の物理状態が大きく変化する事が予想されている。この初代銀河進化におけるフィードバックの役割についても理論的に明らかにする事を目指す。

3. 研究の方法

SPH 法に基づいて開発された流体計算コード Gadget-3 を用いて宇宙論的流体計算を実行し、銀河の形成・進化を調べる。そして、流体計算結果に対して多波長輻射輸送計算を行うことで銀河の輻射特性をモデル化し、観測との直接比較を可能にする。多波長輻射輸送計算コードはモンテカルロ法を基に開発した。星からの連続波の輸送を解き、星間ダストによる吸収、ダストの温度、ダストによる赤外線熱放射を計算する。これにより紫外線から電波までの多波長連続波をモデル化する。この計算を宇宙の平均的な密度場で形成される銀河と、高密度環境で形成する銀河に適用する事で、銀河の輻射特性に対する環境効果を明らかにする。

また、流体計算コード PLUTO に紫外線輻射輸送と電離過程を実装した輻射流体計算により、巨大ブラックホールの成長過程を計算する。

4. 研究成果

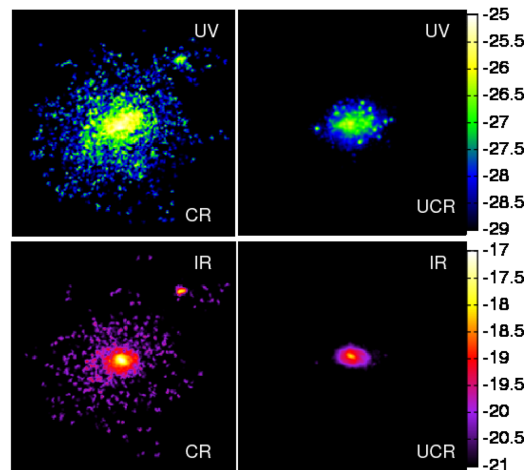
(1) 高密度領域における初代銀河から大質量銀河への進化と多波長輻射特性

高密度環境に着目した宇宙論的流体計算により、初期宇宙の初代銀河から大質量銀河へと至る進化メカニズムを調べた。結果として、高密度領域では大量のガス降着によって、高密度な銀河ガス円盤構造が維持されることが分かった。一方で、平均的な密度場で形成される銀河はフィードバックにより円盤

構造は長時間維持されないことが明らかになった。

この結果に対して、多波長輻射輸送計算により、図で示されるような紫外線、赤外線での表面輝度分布、多波長スペクトルを示す事に成功した。高密度環境の大質量銀河はガス円盤に含まれるダストによって、星からの紫外線のほとんどが吸収され、赤外線（銀河静止系）で明るい銀河となることが分かった。一方で、平均的な密度場の銀河では半分以上の紫外線が銀河から脱出し、紫外線で明るい銀河となることを示した。これらの結果により、銀河が形成される環境の違いが銀河の輻射特性の多様性を生み出す要因である可能性を示した。

図1 紫外線と赤外線での銀河の表面輝度分布。左2枚のパネルは高密度環境で形成される大質量銀河の表面輝度、右2枚のパネルは平均的な密度場で形成される銀河の表面輝度分布である。カラーバーの数字は $\text{erg/s/cm}^2/\text{Hz}$ の単位でログスケールである。



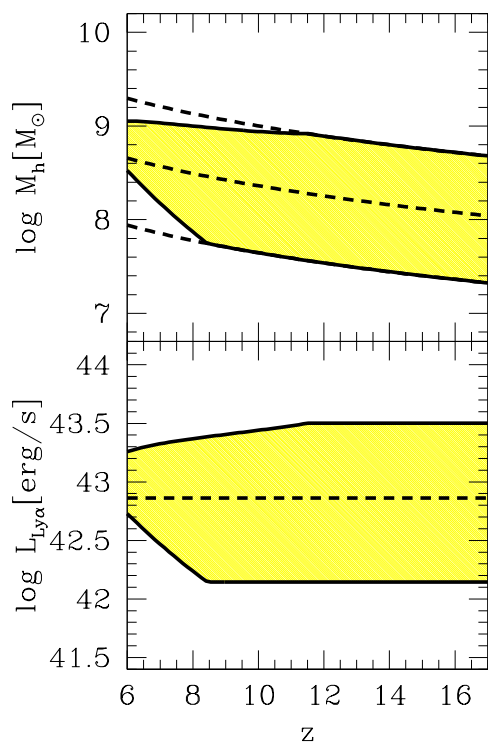
(2) 輻射フィードバック下における初代星銀河の形成

近年、初代星のみによって形成された銀河（初代星銀河）の候補天体が観測された (Sobral et al. 2015)。これまでの理論研究では、初代星は主にミニハロー内で1個もしくは数個程度形成される。その後はミニハロー内の初代星による超新星爆発によって重元素汚染が進み、初代銀河内は低金属の星種族 II の星団が形成されると考えられている。本研究では、初代銀河内における初代星星団の形成条件を解析的に調べた。

まず、初代銀河内に大量の原始ガスが保持されるためには、ミニハロー段階で星形成が抑制される必要がある。そこで、近傍星形成銀河からの電離フィードバックを考え、星形成が抑制される限界距離を求めた。その後、短時間で大量の初代星を作るためには、ガスの角運動量が効率的に輸送され、銀河中心に大量のガスが落ち込む必要がある。本研究で

は、ライマンアルファ冷却光による輻射粘性を考え、角運動量が効率的に輸送されるハローの質量範囲を見積もった。そして、初代星団の形成後、ライマンアルファ輻射圧によって駆動される銀河風の速度を導出した。図は初代星団が形成されるハロー質量とライマンアルファ光度の範囲を各赤方偏移で示したものである。これにより、現在の観測装置でも初代星銀河からのライマンアルファ輝線は観測可能であること、一方初代星の間接的な証拠になるヘリウムの輝線は次世代の観測装置によって検出される可能性があることを示した。また、近年観測された初代星銀河の候補天体は我々の理論モデルに比べライマンアルファ光度が大きすぎる事から、初代星銀河では無い可能性を示唆した。

図 2 初代星銀河が形成されるハロー質量の範囲と、ライマンアルファ光度の範囲（黄色の領域）。上パネルのダッシュ線はそれぞれ下からビリアル温度が1万ケルビン、3万ケルビン、8万ケルビンのハロー質量を示している。下のパネルのダッシュ線はビリアル温度が3万ケルビンのハローのライマンアルファ光度。



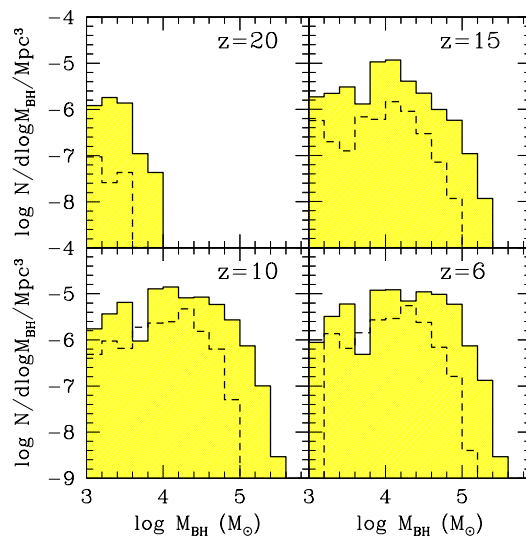
(3) 初代銀河同士の合体過程によって形成される高密度星団と其中で生まれる大質量ブラックホール

近年の観測により、赤方偏移6を超える初期宇宙において太陽の10億倍もの質量をもつ超巨大ブラックホールが観測された。この超巨大ブラックホールを説明するためには、

初代銀河内において太陽の10万倍程度の巨大ブラックホールが既に作られている可能性が高い。本研究では初代銀河同士の合体過程に着目し、解析的なモデルとダークマターハローのmerger treeを組み合わせる事によって、初代銀河内の大質量ブラックホール形成条件を調べた。

図は各赤方偏移におけるブラックホールの質量関数である。初代銀河の典型的質量である太陽の1億倍程度の質量の銀河同士が合体すると、潮汐力とバー不安定によってガスの角運動量が輸送され、銀河中心に高密度かつコンパクトなガス雲が出来る。このガス雲から作られた高密度星団は、重力多体緩和過程を経て、中心に巨大星を作り太陽の千倍程度のブラックホールを残す事が分かった。そして、その後も残された星は重力二体緩和により中心ブラックホールに降着し、最終的にはブラックホールの質量は太陽の10万倍に達することを明らかにした。

図 3 ブラックホール質量関数。実線とダッシュ線はそれぞれガス雲から星団への星形成効率が100%と30%のモデルを示している。



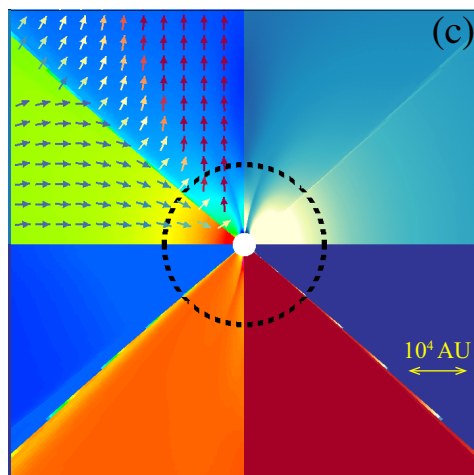
(4) ブラックホール降着円盤からの非等方輻射フィードバックを考慮したブラックホールの成長過程

初代銀河内のブラックホールの成長は、ブラックホール降着円盤からの紫外線やX線のフィードバックによって大きく阻害されることが先行研究により示されていた。しかし、ブラックホールからの輻射が非等方である場合、日陰の部分からガスが効率的にブラックホールに降着する事が考えられる。本研究ではこの非等方な輻射フィードバックを導入した二次元輻射流体計算により、初代銀河内のブラックホール成長を調べた。

数値シミュレーションの結果により、ブラックホールからの輻射が等方の場合にはエディントン限界の1%程度まで降着率は下がる

事が分かった。そして、非等方性を考慮した場合は、日陰領域からのガス降着によって、降着率はボンディ降着率程度に達することが可能になり、エディントン限界も超える事が可能であることを示した。

図 4 非等方輻射フィードバック下でのブラックホール周辺のガスの構造。左上はガス密度（赤が高密度）、右上は圧力、左下は温度（赤が高温）、右下は電離度（赤が電離領域）を示している。ダッシュ線はボンディ半径、矢印は速度場の向きを表している。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1) "Rapid Black Hole Growth Under Anisotropic Radiation Feedback", Sugimura, K., Hosokawa, T., Yajima, H., Omukai, K., MNRAS, 469, 62-79, (2017) 査読有り

2) "Upper Limits on the Mass and Luminosity of Population III-dominated Galaxies", Yajima, H., Khochfar, S., MNRAS, 467, L51-L55 (2017) 査読有り

DOI: 10.1093/mnrasl/slw249

3) "The Role of Stellar Relaxation in the Formation and Evolution of the First Massive Black Holes", Yajima, H., Khochfar, S., MNRAS, 457, 2423-2432 (2016) 査読有り

DOI: 10.1093/mnras/stw058

4) "Japanese Cosmic Dawn/Epoch of Reionization Science with the Square Kilometre Array", Hasegawa, K., Asaba, S., Ichiki, K., Inoue, A. K., Inoue, S., Ishiyama, T., Shimabukuro, H., Takahashi, K., Tashiro, H., Yajima, H., Yokoyama, S., Yoshikawa, K., Yoshiura, S., arXiv:1603.01961 (2016) 査読無し

5) "Observational Properties of Simulated Galaxies in Over Dense and Average Regions at Redshifts $z=6-12$ ", Yajima, H., Shlosman, I., Romano-diaz, E., Nagamine, K., MNRAS, 451, 418-432 (2015) 査読有り

DOI: 10.1093/mnras/stw974

[学会発表] (計 8 件)

1) 矢島 秀伸, "Formation of Massive Black Hole Seeds, in First Galaxies", 国際研究集会 "Guillermo Halo Workshop 2015: Forming and Fueling Supermassive Black Hole Seeds", 2015/7/21, メキシコ プエブラ (招待講演)

2) 矢島 秀伸, "Cosmological Simulation of High-redshift Galaxies in the Epoch of Reionization", 国際研究集会 "Ultimate-Subaru Science Workshop 2016", 2016/6/16, 東京都 三鷹市 国立天文台 (招待講演)

3) 矢島 秀伸, "宇宙再電離期における銀河形成史", 国内研究集会 "銀河進化と遠方宇宙 2015", 2015/9/7, 兵庫県 神戸市 セミナーハウス (招待講演)

4) 矢島 秀伸, "数値シミュレーションによる銀河形成", 国内研究集会 "初代星・初代銀河研究会 2015", 2015/12/2, 群馬県 草津市 草津セミナーハウス (招待講演)

5) 矢島 秀伸 "高赤方偏移ディスク銀河における輻射輸送計算", 国内研究集会 "銀河・銀河間物質に関する観測・理論合同ミニワークショップ", 2015/6/11, 茨城県 つくば市 筑波大学

6) 矢島 秀伸 "21cm 線観測で探る初代星形成と宇宙再電離", 国内研究集会 "日本天文学会秋季年会", 2015/9/11, 兵庫県 神戸市 甲南大学

7) 矢島 秀伸 "超新星爆発の影響下における初代銀河の進化と星形成史", 国内研究集会 "日本天文学会春季年会", 2016/3/16, 東京都 八王子市 首都大学東京

8) 矢島 秀伸 "数値シミュレーションで探る初代銀河形成過程", 国内研究集会 "第3回銀河進化研究会", 2016/6/1, 宮城県 仙台市 東北大学

〔図書〕（計 1 件）

1) 矢島 秀伸, 「天文月報 2015 年 12 月号」
記事 EUREKA “ライマンアルファ輝線輻射輸
送計算で探る銀河形成”, 2015, 日本天文学
会, ページ 834 - 841 (共著)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢島 秀伸 (YAJIMA, Hidenobu)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・
助教

研究者番号： 10756357

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()