

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04828

研究課題名（和文）大規模数値シミュレーションによる、初代星からはじまる宇宙初期の天体形成史の研究

研究課題名（英文）Studies of formation and evolution of high redshift objects based on large numerical simulations

研究代表者

石山 智明 (Ishiyama, Tomoaki)

千葉大学・統合情報センター・准教授

研究者番号：90616426

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は高分解能宇宙論的シミュレーションと準解析的な手法を用いて、宇宙論的な文脈における初代星や高赤方偏移銀河、銀河中心ブラックホールの形成や進化の研究を目的としている。本研究ではまず、初代星が誕生するミニハローを分解した、世界最大空間体積の宇宙論的シミュレーションを行い、データの二次利用を可能にした。その上で準解析的モデルを構築し、高赤方偏移における銀河形成と近傍宇宙で観測される恒星ストリーム構造の比較、恒星間天体による低質量初代星への金属汚染、初代星由来の金属の観測可能性の研究などを行い、査読付欧文論文として発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これらの成果は高分解能宇宙論的シミュレーションに基づいている。従来は、シミュレーションの規模に限界があり、分解能と空間分布の統計の評価を両立させるのが困難であった。我々の取り組みによりそれが可能となり、宇宙初期の初代星、高赤方偏移銀河などに対して、空間分布まで含めて統計的な研究をできるようになった。本研究成果はこうした空間分布を評価できる強みを特に生かしたものである。

研究成果の概要（英文）：We investigate the formation and evolution of first stars, high redshift galaxies, and black holes in galactic centers. To understand them in cosmological context, we combine high resolution cosmological simulations and semi-analytic models. We performed cosmological simulations that can resolve first star forming dark matter minihalos and made them publicly available. Combining the simulations with semi-analytic models, we studied, for example, statistical properties of substructures around galaxies and their implications for the formation of stellar streams, effect of interstellar objects on metallicity of low-mass first stars, and discrimination of heavy elements originating from first stars in $z=3$ intergalactic medium.

研究分野：シミュレーション天文学

キーワード：宇宙物理 高性能計算 ダークマター 銀河 星

1. 研究開始当初の背景

宇宙初期の初代星、高赤方偏移銀河、ブラックホールの形成、および現在に残ったそれら痕跡の探査は世界中で大きな注目を集めている。宇宙初期の天体形成史の理解には、観測と比較するための理論モデルが必要である。これまでこれら天体の統計的分布は、主に準解析的な方法を用いて調べられてきた。そのため空間分布推定の不定性が大きく、空間一様といった非現実的な仮定がなされることも多かった。

2. 研究の目的

高分解能宇宙論的シミュレーションと準解析的な手法を用いて、宇宙論的な文脈における初代星や高赤方偏移銀河、銀河中心ブラックホールの形成進化を、近傍宇宙で観測可能な物理量と接続させる。そして現在進行中の観測と比較し、宇宙初期の天体形成史を理解するとともに、将来の観測に向けた理論予測を行う。宇宙論的 N 体シミュレーションをベースにし、従来は困難であった空間分布まで含めた予測を行う。

3. 研究の方法

(1) 初代星が誕生するミニハローを分解しつつ、赤方偏移 $z=0$ での銀河ハロー形成まで追える高分解能宇宙論的 N 体シミュレーションを行い、数十個程度のハローの階層的合体形成史を追う。これほど高分解能で、かつ一辺 5 Mpc/h 以上の大領域をシミュレーションしたものはこれまで存在しなかった。

(2) これらハローの合体形成史上で初代星やそれに続く銀河形成を準解析的にモデル化する。応募者らの先行研究では、シミュレーションから得られたハローの合体形成史の上で、背景一様な輻射場において初代星を形成しそうなミニハローを同定していた。モデルを拡張し、初代星形成に続く金属を含む星の形成や、それらの超新星爆発による重元素汚染、近傍の天体からの輻射による水素分子解離といった重要な物理過程を組み込む。

(3) それを用いて、初代星や高赤方偏移銀河の形成進化を理解する。

4. 研究成果

(1) 高分解能宇宙論的 N 体シミュレーションの実行

初代星が誕生するミニハローを分解しつつ、赤方偏移 $z=0$ での銀河ハロー形成まで追える高分解能宇宙論的 N 体シミュレーションを実行した。そして数十個程度の銀河ハローの合体形成史を作成した。シミュレーションは一辺 16 Mpc/h 共動距離の立方体内に、ダークマター質量解像度 5×10^3 Msun/h を実現している。また構造検出コードを最適化し、ボックス全体にわたるハローカタログ、およびハロー合体形成史を利用できるようにし、データの二次利用を可能にした。

(2) 準解析的モデルの構築

(1) で得られたハロー合体形成史の上で、新しい準解析的初代星形成モデルを構築を進めた。これまでシミュレーションから得られたハローの合体形成史の上で、背景一様な輻射場において初代星を形成しそうなミニハローを同定していた。モデルを拡張し、初代星形成に続く金属を含む星の形成や、それらの超新星爆発による重元素汚染、近傍の天体からの輻射による水素分子解離といった重要な物理過程を組み込んだ。

同時に、シミュレーションや準解析的モデルに必要な、ツリーコードの SIMD 命令を用いた最適化を進めた。成果が Publications of the Astronomical Society of Japan に査読付欧文論文として出版された

(3) 高赤方偏移における銀河形成と、近傍宇宙で観測される恒星ストリーム

簡易な現象論的モデルと "particle tagging" という手法を用いて、ハロー内で形成する恒星の質量や分布の推定を可能にした。これにより高赤方偏移における銀河形成と、近傍宇宙で観測されている恒星ストリーム構造の対応づけを可能にした。現在観測される恒星ストリームは赤方偏移 z が $0.5 < z < 2.5$ の特徴的な期間に、銀河系ハローに取り込まれた矮小銀河を祖先とすることを明らかにした。結果をまとめた論文が Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌に査読付欧文論文として出版された。さらに恒星ストリームの統計的空間分布は、宇宙大規模構造と関連し、コズミックフィラメントからのサブハロー降着が多いハローほど、スト

リームの向きとハロー長軸が揃いやすい傾向にある。

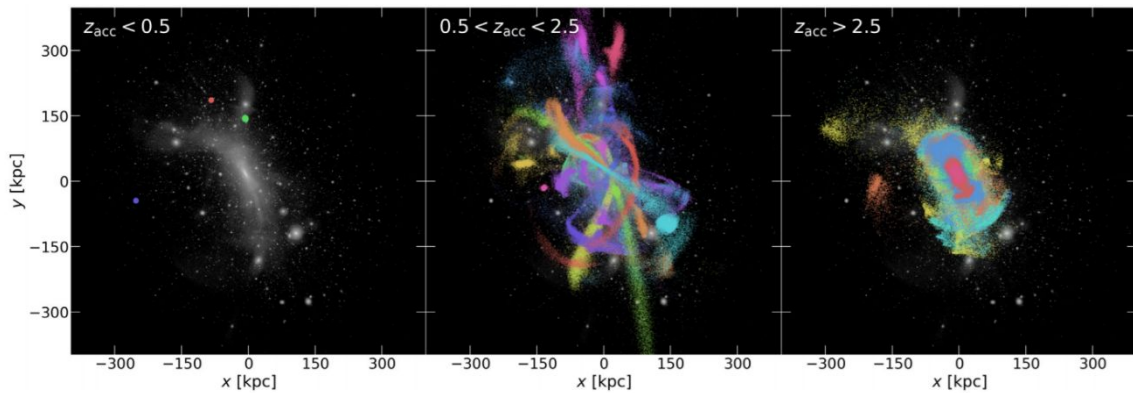


図: 銀河系ハローに取り込まれた矮小銀河の、現在の宇宙における分布。取り込まれた赤方偏移 (各パネル中左上に表示) で3つにわけている。赤方偏移 z が $0.5 < z < 2.5$ で取り込まれた矮小銀河は (中央パネル)、現在ストリーム構造を示す傾向にある。

(4) 恒星間天体による低質量初代星への金属汚染

恒星間天体との衝突による低質量初代星への金属汚染の効果を調べた。高解像度の宇宙論的 N 体シミュレーションを用いて、初代星の軌道を従来よりも精密に取り入れた。太陽近傍では、100m 以上のサイズの恒星間天体との衝突は、典型的には 1000 年に 1 回程度の頻度で起こることがわかった。結果をまとめた論文が Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌にて査読付欧文論文として出版された。

(5) 初代星由来の金属の観測可能性

初代星由来の金属が赤方偏移 3 の宇宙でどのように分布しているか、高解像度の宇宙論的 N 体シミュレーションを用いて調べた。低密度領域では重元素が銀河由来のものに比べ卓越して存在する。次世代望遠鏡による分光観測で、キューサーのスペクトルを通してこれらの重元素を検出できる可能性がある。結果をまとめた論文が Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌にて査読付欧文論文として出版された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Chan Hei Yin Jowett, Chiba Masashi, Ishiyama Tomoaki	4. 巻 490
2. 論文標題 Void Formation: Does the Void-in-Cloud Process Matter?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2405 ~ 2413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2786	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 Morinaga Yu, Ishiyama Tomoaki, Kirihara Takanobu, Kinjo Kazuki	4. 巻 487
2. 論文標題 Statistical properties of substructures around Milky Way-sized haloes and their implications for the formation of stellar streams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2718 ~ 2729
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1373	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 Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki	4. 巻 486
2. 論文標題 Effect of interstellar objects on metallicity of low-mass first stars formed in a cosmological model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5917 ~ 5923
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1277	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 Ishiyama Tomoaki, Ando Shin'ichiro	4. 巻 492
2. 論文標題 The abundance and structure of subhaloes near the free streaming scale and their impact on indirect dark matter searches	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 3662 ~ 3671
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa069	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 Ando Shin' ichiro, Ishiyama Tomoaki, Hiroshima Nagisa	4. 巻 7
2. 論文標題 Halo Substructure Boosts to the Signatures of Dark Matter Annihilation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 68 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies7030068	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 Inoue Akio K, Hasegawa Kenji, Ishiyama Tomoaki, Yajima Hidenobu, Shimizu Ikkoh, Umemura Masayuki, Konno Akira, Harikane Yuichi, Shibuya Takatoshi, Ouchi Masami, Shimasaku Kazuhiro, Ono Yoshiaki, Kusakabe Haruka, Higuchi Ryo, Lee Chien-Hsiu	4. 巻 70
2. 論文標題 SILVERRUSH. VI. A simulation of Ly α emitters in the reionization epoch and a comparison with Subaru Hyper Suprime-Cam survey early data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	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) 10.1093/pasj/psy048	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 Shirakata Hikari, Okamoto Takashi, Kawaguchi Toshihiro, Nagashima Masahiro, Ishiyama Tomoaki, Makiya Ryu, Kobayashi Masakazu A R, Enoki Motohiro, Oogi Taira, Okoshi Katsuya	4. 巻 482
2. 論文標題 The New Numerical Galaxy Catalogue (2GC): properties of active galactic nuclei and their host galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4846 ~ 4873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2958	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 Kodama Tetsushi, Ishiyama Tomoaki	4. 巻 71
2. 論文標題 Acceleration of the tree method with a SIMD instruction set	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	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) 10.1093/pasj/psy151	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 Hiroshima Nagisa, Ando Shin'ichiro, Ishiyama Tomoaki	4. 巻 97
2. 論文標題 Modeling evolution of dark matter substructure and annihilation boost	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.97.123002	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 Hayashi Kohei, Ishiyama Tomoaki, Ogiya Go, Chiba Masashi, Inoue Shigeki, Mori Masao	4. 巻 843
2. 論文標題 Universal Dark Halo Scaling Relation for the Dwarf Spheroidal Satellites	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 97 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa74d9	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28件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 A tutorial on cosmological N-body simulations databases
3. 学会等名 第6回銀河進化研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ishiyama Tomoaki, Hirano Shingo
2. 発表標題 A new semi-analytic model of Pop III formation with ultralarge cosmological N-body simulations
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ishiyama Tomoaki, the Uchuu collaboration
2. 発表標題 大規模天体サーベイ観測に向けた模擬カタログの構築と公開
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 Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 高解像度宇宙論的N体シミュレーションに基づいた準解析的初代星形成モデルの開発
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 Effect of interstellar objects on metallicity of low-mass first stars formed in a cosmological model
3. 学会等名 Subaru 20th Anniversary (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kirihara Takanobu, Kenji Hasegawa, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 Discrimination of heavy elements originating from Pop III stars in $z=3$ intergalactic medium
3. 学会等名 First Stars VI (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 Effect of Interstellar Objects on Metallicity of Population III Survivors Formed in a Cosmological Model
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 Effect of interstellar objects on metallicity of low-mass first stars formed in a cosmological model
3. 学会等名 第6回銀河進化研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kirihara Takanobu, Kenji Hasegawa, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 First star discrimination in the metal abundance of the $z=3$ intergalactic medium
3. 学会等名 Galaxy-IGM workshop 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 宇宙論的シミュレーションを用いた恒星間天体の衝突による初代星の金属汚染
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 Kirihara Takanobu, Kenji Hasegawa, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 First star discrimination in the metal abundance of the $z=3$ intergalactic medium
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 宇宙論的N体シミュレーションを用いた恒星間天体の衝突による低質量初代星の重元素汚染
3. 学会等名 第32回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kirihara Takanobu, Kenji Hasegawa, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki
2. 発表標題 宇宙論的シミュレーションで探る $z=3$ の銀河間物質における初代星起源重元素
3. 学会等名 日本天文学会 2020春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Morinaga Yu, Ishiyama Tomoaki, Kirihara Takanobu, Kinjo Kazuki
2. 発表標題 Statistical properties of substructures around MW-sized halos and their implications for the formation of stellar Streams
3. 学会等名 第6回銀河進化研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 児玉哲史、石山智明
2. 発表標題 Acceleration of the tree method with SIMD instruction set
3. 学会等名 The Eighth East Asian Numerical Astrophysics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森永優、石山智明、桐原崇亘、金城和樹
2. 発表標題 Statistical properties of substructures around MW-size halos and their implications for the formation of stellar streams
3. 学会等名 The Eighth East Asian Numerical Astrophysics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石山智明
2. 発表標題 Where are the low mass Pop III stars?
3. 学会等名 The life and times of the Milky Way (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石山智明
2. 発表標題 Observability of low mass Pop III survivors in the Milky Way and dwarf galaxies
3. 学会等名 Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森永優、石山智明、桐原崇亘、金城和樹
2. 発表標題 Statistical properties of substructures around MW-size halos and their implications for the formation of stellar streams
3. 学会等名 The life and times of the Milky Way (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森永優、石山智明、桐原崇亘、金城和樹
2. 発表標題 Statistical properties of substructures around MW-size halos and their implications for the formation of stellar streams
3. 学会等名 Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森永優、石山智明、桐原崇亘、金城和樹
2. 発表標題 大規模シミュレーションを用いた銀河サブストラクチャの統計的研究
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石山智明
2. 発表標題 大規模宇宙論的シミュレーションを用いた銀河古成分の研究
3. 学会等名 2018年度国立天文台 天文シミュレーションプロジェクトユーザーズミーティング
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桐原崇亘, 梅村 雅之, 長谷川 賢二, 石山 智明, 森 正夫, 鈴木 尚孝, 大内 正己
2. 発表標題 初代星由来の銀河間物質重元素汚染
3. 学会等名 第31回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石山智明
2. 発表標題 銀河の中に生き残った初代星の分布
3. 学会等名 天体形成論 ~過去・現在・未来~
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石山智明
2. 発表標題 PFSによる銀河系内に生き残った初代星の探査
3. 学会等名 天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桐原崇亘, 梅村雅之, 森正夫, 長谷川賢二, 石山智明, 鈴木尚孝, 大内正己
2. 発表標題 低赤方偏移銀河間物質の観測による初代星起源金属汚染の検出可能性
3. 学会等名 天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 桐原崇亘, 梅村雅之, 森正夫, 長谷川賢二, 石山智明, 鈴木尚孝, 大内正己
2. 発表標題 初代星による銀河間物質の重元素汚染
3. 学会等名 第30回 理論懇シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 桐原崇亘, 梅村雅之, 森正夫, 長谷川賢二, 石山智明, 鈴木尚孝, 大内正己
2. 発表標題 初代星による赤方偏移3の銀河間物質の重元素汚染
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2017@呉
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Cosmological N-body simulations databases http://hpc.imit.chiba-u.jp/~ishiytm/db.html
--

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			
オランダ	アムステルダム大学			