

● 杉村 和幸 特定助教

Kazuyuki SUGIMURA (Assistant Professor)

研究課題：大規模数値流体シミュレーションによる初代銀河形成理論の構築：

宇宙の大規模構造から星・ブラックホールまでの統一描像

(Simulating first galaxy formation: unified picture

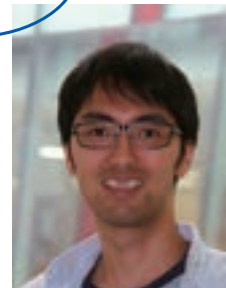
from cosmological structures to stars and black holes)

専門分野：宇宙物理学、宇宙論 (Astrophysics, Cosmology)

受入先部局：理学研究科 (Graduate School of Science)

前職の機関名：東北大学大学院 理学研究科

(Graduate school of science, Tohoku University)



人類は太古の昔から「宇宙の誕生と進化」の謎に惹き付けられてきました。私自身もこの謎に惹かれて研究の道を志し、博士号をビッグバン前に起こったとされる宇宙の加速膨張の研究で取得し、その後はビッグバン後の宇宙に星やブラックホールといった小スケール天体が形成する過程の研究に主に取り組んで来ました。

この白眉期間中には、これまでの研究から次の段階へと進み、宇宙進化の重要なマイルストーンである宇宙で最初の銀河（初代銀河）の誕生に迫ることを目的に研究を進めます。各階層の宇宙物理現象の最新の理解をモデル化して大規模流体シミュレーションの中で切れ目無く紡ぎ合わせることで、ビッグバン後の宇宙に初代銀河が形成する過程を計算機の中で「第一原理的」に再現し、宇宙の大規模構造から星・ブラックホールに渡る初代銀河形成の統一描像を構築することを目指します。

Humankind has been attracted to the mystery of “the birth and evolution of the Universe” since ancient times. I have also been attracted to this mystery and eventually aspired to be a researcher. I obtained a doctoral degree in research on the accelerated expansion of the early Universe, considered to have occurred before the Big Bang. Thereafter, I have been working on small-scale astronomical objects such as stars and black holes that form after the Big Bang.

As a HAKUBI scientist, I will set a new research goal of revealing the birth of the first galaxies in the Universe, which is an important milestone in the evolution of the Universe. I will try to reproduce the formation of the first galaxies after the Big Bang in a computer in a “first-principle” way, by seamlessly implementing the latest understanding of small-scale astrophysical phenomena in various layers into galactic-scale hydrodynamics simulations. With the help of the simulations, I will aim to develop a unified picture of the first galaxy formation, from the large-scale structure of the universe to small-scale objects such as stars and black holes.

宇宙の誕生と進化

我々が存在するこの宇宙はどのように誕生し現在まで進化したのか？このような問いを一度は持った経験のある人は多いのではないのでしょうか。人類は太古からこの問いの答えを求め続け、今では宇宙は高温高压の火の玉として誕生し膨張しながら進化したというビッグバン宇宙論を標準理論として手にしています。しかし、膨張する宇宙の中で、我々の知る多種多様な

天体がどのように生まれ、どのようにして宇宙が現在の姿をなすに至ったかの理解は限られたままです。大枠として、まず宇宙で最初の星（初代星）、次に宇宙で最初の銀河（初代銀河）が生まれ、その後さらに長い年月をかけて我々の天の川銀河をはじめとする現在の銀河が作られたと考えられています（図1参照）、その内実は依然として謎に包まれています。

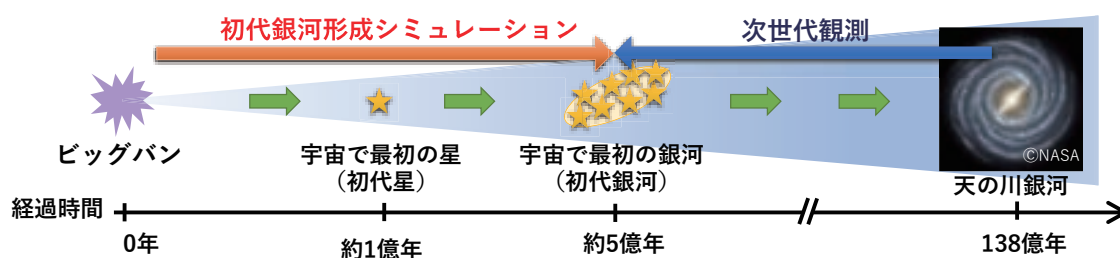


図1 ビッグバンから現在までの宇宙進化の概要図。

シミュレーション宇宙物理学の発展

近年、計算機技術の進歩を背景にシミュレーション宇宙物理学がめざましい発展を遂げ、宇宙の各階層で起こる様々な宇宙物理現象の理解が急速に進んでいます。宇宙の進化に関しても、ビッグバンから初代星形成までの進化について、既知の物理・化学過程に基づく第一原理的シミュレーションにより多くのことが明らかにされています。私も、コード開発から手がけた大規模流体シミュレーションにより、初代星が単独の星ではなく連星や多重星として生まれるという、初代星がその後の宇宙進化に与える影響を考える上で重要になる事実を明らかにしました（参考文献 [1]、図 2）。一方で、現在に至る銀河形成過程については、その解明を目指し世界的に巨大シミュレーションプロジェクトがしのぎを削っているものの、銀河を構成する大量の物質の宇宙年齢に渡る長時間発展を計算することは計算コストの観点から現代の計算機技術をもってしても困難であり、シミュレーションで記述可能なスケールと銀河内で起こる各宇宙物理現象のスケールの間にギャップが生じ不定性の原因となっています。

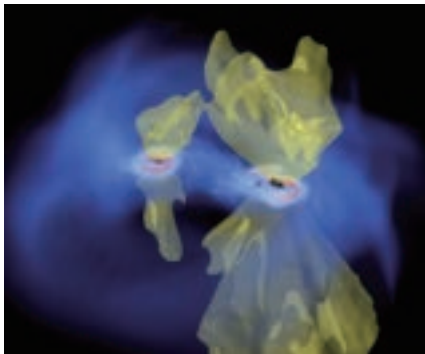


図 2 形成途上の初代星連星（参考文献 [1]）。

第一原理的初代銀河形成シミュレーション

そこで、私は宇宙進化において初代星形成の次のマイルストーンに当たる初代銀河形成に着目しました。初代銀河は宇宙初期に低質量銀河として形成すると考えられており、通常の銀河と比べて少量の物質の短時間の発展の記述で済むことから計算コストが大幅に抑えられるため、宇宙物理学の各分野の最新の知見を結集して最先端の計算機技術と組み合わせることで、各階層の宇宙物理現象を切れ目無く積み上げた「第一原理的」な銀河形成シミュレーションを実現できる可能性があります。私はこの白眉期間中に、「初代星」、「ブラックホール」、「低金属星団」といった初代銀河の形成に主要な役割を果たすと考えられる天体について、最新の理解（例えば参考文献 [1,2]）をモデル化して組み込んだ大規模銀河形成シ

ミュレーションをおこない、ビッグバン後の宇宙に初代銀河が形成する過程を計算機の中で再現することを目指します。そして、その結果に基づき、宇宙の大規模構造から星・ブラックホールまでの広範なスケールに渡って整合的な初代銀河形成の統一描像を探究します。

シミュレーションと観測の邂逅

初代銀河は、NASA の JWST 衛星や日本を含む国際プロジェクトの TMT 望遠鏡をはじめ次世代大型観測計画の主要ターゲットであり、史上初の観測が目前に迫っています。そのため、私が進めようとしているような、初代星からその先へと時代を前進する第一原理的シミュレーションのフロンティアと、より遠方の宇宙初期の銀河へと時代を遡る観測のフロンティアが、初代銀河を舞台についに邂逅する瞬間が間もなく訪れると期待されます（図 1）。そうなれば、理論と観測の相乗効果により初代銀河の理解が急速に進むことは想像に難くありません。本研究においても、シミュレーション中の初代銀河の疑似観測などを通じて観測的研究との協調を図る予定です。

さらに先へ

白眉期間中は初代銀河形成の解明を目指して研究を進めますが、宇宙の進化の解明はそれで終わりではありません。長期的には、初代銀河の研究で得た知識や経験をもとに、我々の天の川銀河のようなより後の時代に形成する銀河も含めた宇宙の銀河形成史の全容解明へとつながっていくつもりです。さらに、ビッグバン後の宇宙進化の理解を確立することは、直接見ることでできないビッグバン前の宇宙で起きた現象の微かな痕跡（例えば参考文献 [3]）の観測的な探査の可能性を拓けることにつながります。果てしない話になりますが、究極の目標である「宇宙の誕生と進化」の解明に向けて、白眉期間中の研究を足がかりに大きなスケールで研究を展開していきたいと考えています。

参考文献

- [1] K. Sugimura, T. Matsumoto, T. Hosokawa, S. Hirano, K. Omukai, 2020, ApJL, 892, L14, “The Birth of a Massive First-star Binary”
- [2] K. Sugimura, M. Ricotti, 2020, MNRAS, 495, 2966, “Structure and instability of the ionization fronts around moving black holes”
- [3] K. Sugimura, E. Komatsu, 2013, JCAP, 1311, 065, “Bispectrum from open inflation”