

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740114

研究課題名(和文)宇宙論的輻射シミュレーションで解明する宇宙再電離期の銀河形成史

研究課題名(英文)Elucidating the history of galaxy formation during the epoch of reionization by cosmological radiation hydrodynamic simulations

研究代表者

長谷川 賢二 (HASEGAWA, Kenji)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：20536627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙論的輻射流体コードを開発し、これを用いて宇宙初期の銀河形成史とそれに伴う宇宙再電離過程を矛盾なく計算した。

これにより、輻射性フィードバックが星形成率、電離光子脱出確率、銀河間物質の非一様性に重大な影響を与える事がわかった。これらの輻射流体力学的効果をモデル化し、ポストプロセスの輻射輸送計算による宇宙再電離シミュレーションに組み込むためのレシピの作成にも着手した。

シミュレーションで得られた銀河のUV光度関数は、赤方偏移 $z>6$ で観測される光度関数と概ね一致し、再電離に主に寄与するのは、未だ観測されていない暗い銀河である事も示した。

研究成果の概要(英文)：We developed a new cosmological radiation hydrodynamic code, and applied it to the simulations in which formation of galaxies and reionization in the early Universe are consistently solved.

As a result, we found that radiative feedback severely affects the star formation in the galaxies, the escape fraction of ionizing photons from the galaxies, and the clumpiness of intergalactic medium. We also attempted to make a recipe for incorporating these radiative feedback effects into post-processing simulations of reionization.

We showed that simulated UV luminosity functions (LFs) at  $z>6$  reproduce observed UV LFs at the corresponding epoch. We also indicated that faint galaxies, which have not been observed yet, mainly contribute to the reionization.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天文学 宇宙物理 輻射流体力学 宇宙再電離 銀河形成

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙誕生のおよそ 38 万年後に宇宙は一旦中性化した。その後再び電離された事が知られている。この過程は宇宙再電離と呼ばれるが、これがどのように引き起こされたかは明らかでなかった。

宇宙再電離は、宇宙誕生後 10 億年程度の時代には、概ね完了している事が観測から示唆されるが、どのような天体によって、どのように電離が進んだのかを知る為には、この時期での天体形成史を明らかにする必要がある。天体形成史を調べる上では、天体形成への紫外線の影響を無視できない。これは、銀河内などの天体内で形成される星から紫外線だけでなく、再電離が進むにつれて形成される紫外線背景放射も天体形成史に影響を与える事を意味し、これら天体形成史と再電離史を矛盾なく解き明かす為には、個々の天体を分解するほどの高い空間分解能と再電離史を計算する為の広大な計算領域の両方を満たし、紫外線が天体形成に与える影響を正確に組みこんだシミュレーションを実行する必要がある。しかし、このような計算は非常に計算コストが高く実現が困難であった為、数値分解能を落とした計算やポストプロセスで輻射輸送計算を行うなど、計算コストをおさえた手法がとられてきた。

## 2. 研究の目的

再電離期における天体形成史とそれに伴う再電離史を統合的に数値シミュレーションする事で、宇宙初期にどのような天体がどのように形成され、それら天体からの輻射によっていかに再電離が進んだのか明らかにする事を目的とし、次世代観測機器による高赤方偏移銀河観測結果から銀河間物質の電離状態に関する情報を引き出しうる理論モデルの構築をする。

## 3. 研究の方法

天体形成史と再電離史を矛盾なく解く為には、高分解能かつ大計算領域での宇宙論的輻射流体シミュレーションが必要となるが、既存の計算コードではそのような計算は実現困難であった為、自ら開発した輻射流体コードをより大規模並列化に適したアルゴリズムに改良し、上記のようなシミュレーションを可能とし、研究の目的である再電離過程と銀河形成過程、それらの相互関係の理論的に解明を試みた。

## 4. 研究成果

まずは、比較的小さな計算領域(5Mpc 立方)での宇宙論的輻射流体シミュレーションを実行し、特に紫外線の影響が敏感な低質量な銀河の形成に輻射フィードバックが定量的にどの程度の影響を与え、その形成された銀河からの輻射がどの程度の早さで銀河間物質を電離できるかを調査した。この計算により、輻射が銀河内の星形成率を 1/3 程度まで

阻害する事を明らかにした(投稿論文 1)。また、銀河内部での輻射は銀河内の密度分布にも影響を与える事で、銀河から電離光子が抜け出す割合(電離光子脱出確率)が 2 倍程度上昇する事も示した(投稿論文 2)。結果として得られる再電離終了期の銀河間空間の中性密度割合は、観測から示唆される値とよく一致する事も示した。しかし、計算領域が小さいことから、この結果が典型的な電離史を表しているとは断言できないものであった。

その後、より多くの粒子数での輻射流体シミュレーションを実現すべく、大規模並列計算に適したアルゴリズムへの改良を行った。この新たに開発したアルゴリズムにより、計算コストの削減と並列化効率の大幅改善に改善する事に成功し、より大きな計算領域での計算が可能となった。

これまでのシミュレーションでは、計算領域が小さかった為、観測される明るい銀河が計算領域内で形成されないという問題があったが、この新たな計算では、これまでの計算と比べてシミュレーション領域を 64 倍とする事で、シミュレーションで形成された銀河と観測される銀河の個数を直接比較する事が可能となった。シミュレーション結果は、観測される銀河の個数を概ね良く再現し、同時に現在観測不可能な暗い銀河が多数存在する事も示唆した。これら低光度銀河は、電離光子が高く、数も多い事から、宇宙再電離に主に寄与している事を示した。また、再電離が進むにつれて、銀河間物質の非一様性がならされる輻射流体の効果が存在するため、これまで主流だったポストプロセスでの輻射輸送計算による再電離シミュレーションでは、銀河間空間の電離状態を維持する為の電離光子数でも 2-3 倍ほど多くなってしまっている事がわかった。

以上のように、輻射がガスの熱・力学進化に与える影響を直接的に解く輻射流体計算を実行する事で、輻射性フィードバックが銀河形成過程・再電離過程において重要である事を示してきたが、このような計算は計算コストが高く、さらに大規模な計算を行う事は困難である。そこで、輻射流体計算で得られた結果、特に銀河のスペクトル(星形成率)、電離光子脱出確率、銀河間物質非一様性の均一化の効果をモデル化し、これらを計算コストの低いポストプロセスでの輻射輸送計算や準数値的計算法による再電離計算に組み込む新たな計算手法の開発にも着手し、大規模な計算領域での再電離計算を可能とした。

従来の計画では、上記の手法を用いた大規模数値シミュレーション結果と Subaru Hyper Suprime-Cam(HSC)による観測結果との比較を行う予定であった。しかし、計算アルゴリズムに関して、予想以上の大幅改良が必要であった事、HSC による高赤方偏移銀河観測が大幅に遅れた事から、実現ができなかった。従って、このようなシミュレーションと観測の比較は今後の課題とした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- 1) Hasegawa, K., Semelin, B.: “The impacts of ultraviolet radiation feedback on galaxies during the epoch of reionization”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 428, Issue 1, pp.154-166, (2013)  
DOI: 10.1093/mnras/sts021
- 2) Umemura, M., Susa, H., Hasegawa, K., Suwa, T., Semelin, B.: “Formation and Radiative Feedback of First Objects and First Galaxies”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, Volume 2012, Issue 1 id.01A306, (2012)  
DOI: 10.1093/ptep/pts018
- 3) Hasegawa, K., Semelin, B.: “Impacts of Ultraviolet Radiation Feedback on the Cosmic Reionization History”, FIRST STARS IV -from Hayashi to the Future-, AIP Conference Proceedings, 査読無, Volume 1480, pp. 267-270, (2012)  
DOI: 10.1063/1.4754365

[学会発表] (計 13 件)

- 1) 長谷川賢二 “再電離シミュレーション”、研究会「銀河進化と遠方宇宙」、(20140324-20140325), 東京大学本郷キャンパス、東京都
- 2) 長谷川賢二 “宇宙初期の銀河形成と宇宙再電離”、HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム、(20140303-20140304), 富士ソフトプラザ、東京都
- 3) 長谷川賢二 “宇宙論的輻射流体計算で解明する再電離期の宇宙進化史”、CfCA ユーザーズミーティング、

(20140128-20140129), 国立天文台三鷹キャンパス、東京都

- 4) 長谷川賢二 “近年の宇宙再電離に関する理論・観測研究の進展と今後の課題”、初代星・初代銀河研究会、(20140122-20140124), 鹿児島大学、鹿児島県
- 5) 長谷川賢二、“宇宙再電離過程における輻射性フィードバックの重要性”、第26回理論懇シンポジウム、(20131225-20131227), 東京大学柏キャンパス、千葉県
- 6) 長谷川賢二 “紫外線フィードバックが再電離期の銀河や銀河間物質に与える影響”、天文学会秋季年会、(20130910-20130912), 東北大学、宮城県
- 7) Hasegawa, K.,: “Radiation hydrodynamics simulations on the formation of galaxies during the epoch of reionization”, Reionization in the Red Center: New windows on the high redshift Universe, (20130715-20130719), Yulara, Australia
- 8) Hasegawa, K.: “The roles of radiative feedback on galaxies and IGM during the epoch of reionization”, Photo-Evaporation in Astrophysical Systems, (20130603-20130628), Stockholm, Sweden
- 9) Hasegawa, K.: “The improvement of a Radiation hydrodynamics code START”, 3<sup>rd</sup> AICS international Symposium, (20130228-20130301), Kobe, Japan
- 10) 長谷川賢二、“大規模並列化へ向けた輻射輸送コード START の改良”、第25回理論懇シンポジウム、(20121222-20121224), エポカルつくば、茨城県
- 11) Hasegawa, K., Okamoto, T.: “The improvement of START”, Cosmological

Radiative Transfer Comparison Project  
Workshop IV, (20121212-20121214),  
Austin, USA

12) Hasegawa, K., Semelin, B.: “Impacts  
of Ultraviolet Radiation Feedback on  
the Cosmic Reionization History”,  
FIRST STARS IV -from Hayashi to the  
Future-, (20120521-20120525), Kyoto,  
Japan

13) Hasegawa, K., Semelin, B., Umemura,  
M.: “Impacts of Ultraviolet Radiation  
Feedback on the Cosmic Reionization  
History”, The Epoch of Reionization:  
Theory - Simulations - Observations,  
(20120423-20120427), Strasbourg,  
France

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷川 賢二 (HASEGAWA, Kenji)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：20536627