

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 2 日現在

機関番号：34407

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23684010

研究課題名(和文) 宇宙再電離完了期 $z = 6.6$ における電離度空間分布の描画と再電離光源の探究研究課題名(英文) Depicting the spatial distribution of the ionization degree at the completion epoch of the Cosmic Reionization, $z=6.6$, and research for sources of the Reionization

研究代表者

井上 昭雄 (Inoue, Akio)

大阪産業大学・教養部・准教授

研究者番号：30411424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,900,000円

研究成果の概要(和文)：すばる望遠鏡の新主焦点カメラHyper Suprime-Cam (HSC)に装着し、宇宙再電離完了期である赤方偏移 $z=6.6$ の星形成銀河を効率的にサンプルするための中帯域フィルターIB945の開発を行なった。また、京コンピュータを利用した宇宙再電離現象の大規模数値シミュレーションの開発を進め、宇宙の構造形成の大規模かつ高解像度のN体シミュレーションを実施した。これを土台とした輻射輸送数値シミュレーションを実行するため、N体シミュレーションで得られるダークマターハローの質量に応じた電離光子放射率のモデル化を行なった。さらに、遠方宇宙の銀河形成進化や銀河間媒質の研究も行なった。

研究成果の概要(英文)：We have developed a medium-band filter, IB945, to be equipped to the new prime-focus camera of the Subaru Telescope, Hyper Suprime-Cam (HSC). This filter is to be used to efficiently sample star-forming galaxies at redshift $z=6.6$ which is the completion epoch of the Cosmic Reionization. We have also performed a large and high-resolution N-body simulation of the structure formation in the Universe in order to realize a large numerical simulation of the Cosmic Reionization by using the K-computer. For a radiative transfer simulation based on the N-body result, we have also modeled the ionizing photon emissivity depending on the dark-matter halo mass obtained in the N-body simulation. In addition, we have studied the galaxy formation and evolution and the intergalactic medium in the distant Universe.

研究分野：天体物理学

キーワード：光学赤外線天文学 理論天文学 宇宙再電離 銀河形成進化

1. 研究開始当初の背景

観測的宇宙論に残された大問題、宇宙再電離とは、ビッグバンから 38 万年後に一旦中性化した宇宙が、その後の天体構造形成の結果放射された電離紫外線により、再び電離状態となった現象である。これまでの研究で、宇宙再電離現象が起こった時期は、赤方偏移 $z=6-10$ 程度とおおまかには分かったが、その詳しい電離史や光源の特定には至っていない。光源の有力候補として、初代星や初代銀河が有力視されており、宇宙再電離現象は銀河の形成進化と密接に関わっていると考えられている。また、低光度の AGN の寄与も未だ否定されておらず、AGN の形成進化とも関わっている可能性もある。

宇宙再電離現象解明への課題は、①電離度の時間・空間進化の理解と②主要光源の特定である。①に関して、2020 年代に、水素 21cm 線トモグラフィにより決着する可能性があるが、再電離期の信号より 5 桁も強い銀河系シンクロトロン放射などの前景放射の除去の困難があるため、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河(LAE; 強い $\text{Ly}\alpha$ 輝線により選択される星形成銀河)を用いる手法が現時点では有望である。

2. 研究の目的

本研究では、再電離完了期と考えられる赤方偏移 $z=6.6$ の宇宙を、すばる望遠鏡の新主焦点カメラ、Hyper Suprime-Cam (HSC)を用いて観測し、LAE とライマンブレイク銀河(LBG; ライマン端[高赤方偏移では $\text{Ly}\alpha$])でのスペクトルブレイクを用いて選択される星形成銀河)の空間分布を比較する。それにより電離度空間分布を世界で初めて観測的に描き出す。同時に、銀河形成進化を詳細に考慮し、かつ、広大な HSC 探査領域をカバーする宇宙再電離数値シミュレーションを行い、それと HSC 探査の結果を比較検討することで、電離光源に対しても制限を与える。

3. 研究の方法

本研究は、上記二つの課題①、②に対して、独自のアプローチを試みる。まず、①に対して、HSC による LAE 探査に加えて、ほぼ同じ赤方偏移の LBG の探査も行なう。具体的には、LAE/LBG の探査領域を小領域に分け、その各小領域内での LAE と LBG の個数比を計算する。LBG 選択では銀河間中性水素の影響は無視でき、それゆえ、LBG は構造形成の効果のみを含んでいる。その個数密度で規格化することで、構造形成の効果を取り除く。中性水素の多い小領域では、 $\text{Ly}\alpha$ 光子が減光されるため LAE/LBG 個数比が小さくなり、十分に電離している小領域では、LAE/LBG 個数比が大きくなる。これはまさに電離度の空間分布を描くことに相当する。このような試みはこれまで無く、極めて斬新である。LAE とほぼ同じ赤方偏移の LBG を選択することが肝要であるが、LAE 選択の狭帯域フィルターに合わせた中帯域フィルターを製作

してこれを実現する。

次に、②に対して、宇宙再電離数値シミュレーションを用いて、HSC による LAE および LBG 探査結果を解釈することで、電離光源に対する制限を与える。まず、広大な HSC 探査領域と直接比較可能な宇宙論的輻射輸送数値シミュレーションはこれまでに無い。また、これまでのシミュレーションは光源としての銀河形成進化も極めて単純なモデルを用いていた。そこで、HSC 探査領域をカバーできる 500 Mpc 立方で、かつ、銀河形成進化の物理モデルを大きく改良した計算を行なう。このシミュレーションを用いて、LAE/LBG 探査により描いた電離度空間分布の統計量を再現するような再電離光源の特定を行なう。さらに、これまでのシミュレーションでは考慮されていない、AGN の寄与も取り入れる。AGN の X 線は長い平均自由行程を持つため再電離トポロジーに大きな影響を与え、非常に重要である。

また、高赤方偏移の LAE および LBG の性質を理解するための研究や、銀河間媒質の物理を解明するための研究も並行して行ない、銀河形成進化のモデル化や宇宙再電離大規模シミュレーションの高精度化に資する。

4. 研究成果

(1) HSC 用中帯域フィルターIB945 の開発

HSC による宇宙再電離期 $z=6.6$ の LAE 探査に合わせて、ほぼ同じ赤方偏移の LBG を探査するため中帯域フィルターIB945 (図 1; 直径 60 cm)を開発した。HSC で用いられる広帯域および狭帯域フィルター仕様、HSC の CCD 感度特性および装置の透過率特性、すばる望遠鏡の鏡面特性、ハワイ・マウナケア山頂での大気透過率および放射率特性の情報を収集してモデル化し、 $z=6.6$ の LBG 選択に最適なフィルター仕様を詳細に検討した。銀河のスペクトルモデルは、まずは単純な星形成史を仮定した恒星種族合成モデルにもとづき与えた後、よりリアルな星形成史とスペクトルモデルとするために、数値流体銀河形成進化シミュレーションによるモデルを最終的に利用した。確定した仕様をもとにメーカーに依頼してフィルターを製作した。完成したフィルターの透過率試験を国立天文台三鷹の先端技術センターにおいて実施し、要求仕様を満たしていることを確認した。この結果について天文学会で発表した。

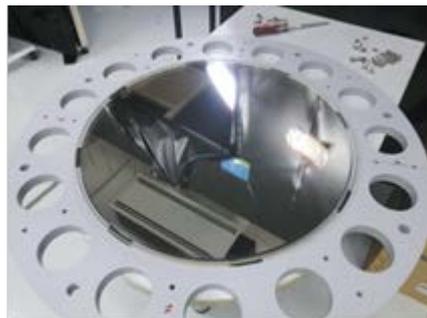


図 1 HSC 用中帯域フィルターIB945

(2) 京コンピュータによる宇宙再電離大規模数値シミュレーションの開発

共動系約 500 Mpc 四方位の超広視野で実施される HSC 観測と比較可能な宇宙論的輻射輸送大規模数値シミュレーションの仕様を検討した。宇宙再電離末期の電離バブルのサイズは約 100 Mpc であり、また、観測から得られる角度相関の最大サイズも 100 から 200 Mpc となることから、シミュレーションボックスサイズは 160 Mpc または 320 Mpc 程度で十分であることが分かった。重要な点として、宇宙再電離光源として寄与する可能性のある最小ダークハロー質量である 10^8 太陽質量程度まで分解できる高解像度が求められる点がある。京コンピュータで実行可能な N 体計算の粒子数 4096³ または 8192³ で上記ボックスサイズの場合、それが 40 粒子程度で表現されるので十分良い解像度となる。このような仕様で N 体計算を実施し、輻射輸送計算の土台となる構造形成部分のモデル化は完了した。

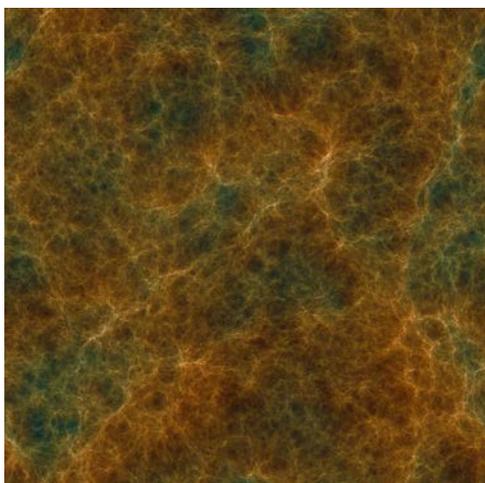


図 2 大規模高解像度 N 体シミュレーション結果の可視化。1 辺 110 Mpc/h=161.7 Mpc。奥行き 6.875 Mpc/h を投影。赤方偏移 $z=5.5$ 。

並行して、ダークハローの電離光子放射率およびそのスペクトルのモデル化を、共動系 10 から 40 Mpc のボックスサイズの輻射流体銀河形成進化数値シミュレーションにより行なった。この計算は個別の銀河の内部まで分解できる高解像度のものであり、施される仮定・近似がミニマムのものである。これにもとづき、ダークハロー質量の関数として電離光子放射率およびスペクトルをテーブル化する“レシピ”の構築を行なった。この成果は現在論文準備中である。

(3) 宇宙再電離期 LBG モデルの構築

ハッブル宇宙望遠鏡による深い撮像探査により、宇宙再電離期である赤方偏移 $z=7-10$ にある LBG が多数発見されている。それらの物理的諸性質を解明するため、数値流体銀河形成進化シミュレーションを実施した。シミュレーションで得られた疑似宇宙から、

ハッブル宇宙望遠鏡の LBG 観測手法と全く同じ基準で銀河を選択することで、疑似的に実際の LBG をサンプルしたと考え、シミュレーション LBG の物理的諸性質について議論した。成果を学術論文として発表した(論文 2 および 5)。

また、これら最遠方 LBG の正確な距離は未だ測定されていない。これを実現するには LBG を分光観測し、何らかの輝線の波長を測定する必要がある。そこで、上のシミュレーション結果を用いて、どの輝線を狙うのが有効か調べ、遠赤外線波長にある酸素の輝線は ALMA 望遠鏡で比較的簡単に検出可能であることを示した。成果を学術論文として発表した(論文 3)。

(4) 初代銀河のスペクトルモデル構築

銀河の形成過程を解明するためには、初代銀河を観測し、その物理的諸性質を調べることが重要である。しかし初代銀河と呼べる天体は未だ発見されていない。そこで、初代銀河を観測的に発見するにはどのような観測手法が有効か検討するため、初代銀河のスペクトルモデルを構築した。成果を学術論文として発表した(論文 4 および 10)。

(5) 銀河間媒質の新しいモデル構築

宇宙再電離は、銀河間媒質の水素が中性状態から電離状態に変化する現象であり、銀河間媒質の物理状態を理解することが重要となる。そこで、宇宙再電離後でもわずかに残された中性の銀河間水素の観測結果を収集し、その統計的性質を調べた。またその結果を記述する新しいモデルを構築した。成果を学術論文として発表した(論文 1)。

(6) 初代銀河探査を主目的とする広視野近赤外線宇宙望遠鏡 WISH の開発

ハッブル宇宙望遠鏡で実施されている深宇宙探査では、観測できる波長の限界により、赤方偏移 $z=10$ 程度が限界である。より長波長の観測を実施することで、さらに赤方偏移した、つまり、より遠方にある初期の銀河を探査することができる。それを主目的とする宇宙望遠鏡の開発において、特に、その科学目的策定に貢献した(論文 9)。

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 10 件)

(1) Inoue, Akio K.; Shimizu, Ikkoh; Iwata, Ikuru; Tanaka, Masayuki

An updated analytic model for attenuation by the intergalactic medium

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 442, p.1805-1820, 2014

DOI: 10.1093/mnras/stu936

査読有

(2) Shimizu, Ikkoh; Inoue, Akio K.; Okamoto, Takashi; Yoshida, Naoki
Physical properties of UDF12 galaxies in cosmological simulations
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 440, p.731-745, 2014
DOI: 10.1093/mnras/stu265
査読有

(3) Inoue, A. K.; Shimizu, I.; Tamura, Y.; Matsuo, H.; Okamoto, T.; Yoshida, N.
ALMA Will Determine the Spectroscopic Redshift $z > 8$ with FIR [O III] Emission Lines
The Astrophysical Journal Letters, Vol. 780, article id.L18, 5 pp., 2014
DOI: 10.1088/2041-8205/780/2/L18
査読有

(4) Zackrisson, Erik; Inoue, Akio K.; Jensen, Hannes
The Spectral Evolution of the First Galaxies II: Spectral Signatures of Lyman Continuum Leakage from Galaxies in the Reionization Epoch
The Astrophysical Journal, Vol. 777, article id.39, 12 pp., 2013
DOI: 10.1088/0004-637X/777/1/39
査読有

(5) Shimizu, Ikkoh; Inoue, Akio K.
Effect of the Remnant Mass in Estimating the Stellar Mass of Galaxies
Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 65, Article No.96, 8 pp., 2013
DOI: 10.1093/pasj/65.5.96
査読有

(6) Zackrisson, E.; Inoue, A. K.
SPICA as a probe of cosmic reionization
Proceedings of SPICA Science conference, 2013
査読無

(7) Nakahiro, Y.; Taniguchi, Y.; Inoue, A. K.; Shioya, Y.; Kajisawa, M.; Kobayashi, M. A. R.; Iwata, I.; Matsuda, Y.; Hayashino, T.; Tanaka, A. R.; Hamada, K.
A Gravitational Lens Model for the Ly α Emitter LAE 221724+001716 at $z=3.1$ in the SSA 22 Field
The Astrophysical Journal, Vol. 766, article id.122, 5 pp., 2013
DOI: 10.1088/0004-637X/766/2/122
査読有

(8) Kobayashi, Masakazu A. R.; Inoue, Yoshiyuki; Inoue, Akio K.
Revisiting the Cosmic Star Formation

History: Caution on the Uncertainties in Dust Correction and Star Formation Rate Conversion
The Astrophysical Journal, Vol. 763, article id.3, 12 pp., 2013
DOI: 10.1088/0004-637X/763/1/3
査読有

(9) Yamada, Toru; Iwata, Ikuru; Ando, Makiko; Doi, Mamoru; Goto, Tomotsugu; Ikeda, Yuji; Imanishi, Masatoshi; Inoue, Akio K.; Iwamura, Satoru; Kawai, Nobuyuki; and 22 coauthors
WISH for deep and wide NIR surveys
Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Proceedings of the SPIE, Volume 8442, article id. 84421A, 12 pp., 2012
DOI: 10.1117/12.925632
査読無

(10) Zackrisson, Erik; Inoue, Akio K.; Rydberg, Claes-Erik; Duval, Florent
The Hubble Space Telescope colours of high-redshift Population III galaxies with strong Ly α emission
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.418, p.L104-L108, 2011
DOI: 10.1111/j.1745-3933.2011.01153.x
査読有

〔学会発表〕(計8件)

(1) 井上昭雄、清水一紘、林野友紀、川野元聡
赤方偏移 $z=6.6$ ライマンブレイク銀河選択用 HSC XB945 の開発
日本天文学会 2014 年春季年会 X13b
2014 年 3 月 21 日 国際基督教大学

(2) 井上昭雄、清水一紘、松尾宏、田村陽一、吉田直紀、岡本崇
ALMA による赤方偏移 8 超銀河の遠赤外星雲輝線検出の可能性
日本天文学会 2013 年秋季年会 X39a
2013 年 9 月 12 日 東北大学

(3) 清水一紘、井上昭雄、吉田直紀、岡本崇
Physical Properties of UDF12 Galaxies in Cosmological simulations
日本天文学会 2013 年秋季年会 X40a
2013 年 9 月 12 日 東北大学

(4) 井上昭雄、Erik Zackrisson
測光カラーにもとづく種族 III 銀河の発見方法
日本天文学会 2013 年春季年会 X23a
2013 年 3 月 21 日 埼玉大学

(5) 清水一紘、井上昭雄
The Impact of the Remnant Mass on the

Stellar Mass Estimation of Galaxies
日本天文学会 2013 年春季年会 X19a
2013 年 3 月 21 日 埼玉大学

(6) 井上昭雄、松尾宏
ALMA で観測する赤方偏移 8 超の[OIII]88
ミクロン輝線
ALMA 時代の宇宙の構造形成理論:第 1 世代
から第 n 世代へ
2013 年 1 月 26 日 北海道大学

(7) 井上昭雄、岩田生
銀河間中性水素吸収の確率分布と遠方銀河
の電離光子探査 II
日本天文学会 2012 年秋季年会 X28a
2012 年 9 月 21 日 大分大学

(8) 井上昭雄
WISH による始原的恒星種族の探査
WISH Science meeting
2012 年 7 月 19 日 国立天文台三鷹

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 昭雄 (INOUE, Akio)
大阪産業大学・教養部・准教授
研究者番号：30411424

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：