様　式　C－１９、F－１９、Z－１９　(共通)

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ６ 月　 ５ 日現在

機関番号： ６２６１６
研究種目： 基盤研究(A)（一般）
研究期間： 2012～2015
課題番号： ２４２４４０１８

研究課題名（和文） 超広視野深宇宙サーベイで探る電離光子銀河の進化

研究課題名（英文） Unveiling the evolution of Lyman continuum galaxies with ultra-wide and deep survey

研究代表者
岩田　生（Iwata, Ikuru）

国立天文台・ハワイ観測所・准教授

研究者番号：４０３９９２７５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　28,200,000円

研究成果の概要（和文）：遠方銀河からの電離光子脱出率を測定するため、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ(HSC)用の狭帯域フィルタを製作した。複数の狭帯域フィルタ観測を組み合わせ、赤方偏移3および5付近の星形成銀河を多数検出し、かつそれらからの電離光子放射を直接観測する計画である。フィルタは計画通り製作されたが、HSCの観測が当初予定よりも遅れたため、研究期間内にHSCを用いた電離光子銀河探査を行うことはできなかった。一方、すばるSuprime-Camによる電離光子銀河探査とそれによって検出された電離光子銀河候補に対する追究観測を精力的に進め、強力に電離光子を放つ銀河・活動銀河核が存在することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to disclose the escape fraction of Lyman continuum (LyC) from distant galaxies, we fabricated a special narrow-band filter for Subaru Telescope Hyper Suprime-Cam (HSC). Our plan was to carry out multiple narrow-band imaging observations to select star-forming galaxies at redshift around 3 and 5 and also to directly detect LyC from them. While the fabrication of the filter was completed successfully, the HSC observation was delayed and we could not conduct the planned LyC observation in time. On the other hand, we conducted search for LyC emitting galaxies using Subaru Suprime-Cam and the follow-up observations of the candidates, and revealed the existence of galaxies and active galactic nuclei with very strong LyC emission.

研究分野： 銀河天文学

キーワード： 銀河天文学　光赤外線天文学　宇宙再電離

1　研究開始当初の背景

ビッグバン後宇宙膨張により冷却され中性状態であった水素ガスは、赤方偏移 z=6(宇宙年齢約 10 億年) までにほぼ完全に電離した状態になったことが観測的に明らかになっている。この「宇宙再電離」は、天体形成に伴う紫外線により引き起こされたと考えられ、現在の宇宙の姿の礎となった重要な現象であるが、その具体的な過程は未だ十分に理解できていない。特に、どのような天体が主要な電離光子光源であったかが不明である。大質量星を擁する若い銀河が有力視されているが、銀河の電離光子放射率は全くの未知であった。これは、電離光子 (静止系波長 912Å 以下) に対する中性水素の吸収断面積が非常に大きく、銀河内の星間ガス雲を避けて銀河外へ到達する確率が低いこと、また、銀河間空間の中性水素雲により電離光子はさらに吸収されることから、直接観測が非常に困難なためである。このため、銀河の電離光子放射率は、小サンプルに対する一部の先駆的試み (Steidel et al. 2001, ApJ, 546, 665 等) を除けば、測定例が全く無かった。研究代表者らは 2007 年にすばる望遠鏡主焦点カメラ (Suprime-Cam; S-Cam) に特製の狭帯域フィルタ NB359 を装着して、z=3.1(宇宙年齢約 20 億年) にある約 200 個の銀河に対して電離光子の直接観測を行ない、10 数個の銀河から強い電離光子を検出した。驚くべきことに、強い水素ライマン α 輝線により特徴づけられるライマン α 銀河 (Lyman α emitter; LAE) の中には、従来の銀河スペクトルモデルでは説明できないほど電離光子が強いものがあることが発見された。この成果は、世界で初めて 100 個を超える統計的なサンプルをもとにした、星形成銀河からの電離光子放射の系統的な探査であった。

2　研究の目的

この「電離光子銀河」は z=3 の宇宙で発見されたが、この種の銀河が z>6 の宇宙再電離期に存在すれば、電離光源として大きな寄与を果たす可能性がある。宇宙再電離が起きた $z = 6$ 以前の宇宙にむかって、より過去の宇宙での電離光子銀河の存在割合、平均的な電離光子脱出率を求めること、また、そのような強力な電離光子放射がいかにして可能になっているかを理解することが必要である。本研究は、すばる望遠鏡に新たに搭載された超広視野主焦点カメラ (Hyper Suprime-Cam; HSC) を用いて、宇宙再電離の物理過程を理解する上で本質的に重要な、遠方銀河からの電離光子放射の研究を推進することを目的とするものである。

3　研究の方法

(1) HSC による電離光子銀河探査

HSC は従来の主焦点カメラ (Suprime-Cam) に対して約 7 倍の有効視野を持ち、世界で最も効率的に深宇宙探査を行うことができる。この HSC に z=2 から 7 にかけてのライマン α 輝線を捉える狭帯域 (NB) フィルタ 6 枚を搭載し、超広域かつ深い、史上最大のライマン α 輝線銀河 (Lyα emitters; LAE) 探査を行う。特に NB527 では $z = 3.3$ の LAE が、NB718 では $z = 4.9$ の LAE がそれぞれ検出できるが、NB387 と NB527 によってそれぞれの赤方偏移の銀河の電離光子をとらえることができる (Fig. 1)。この探査により、$z = 3.3$ での史上最大規模の電離光子探査を行い、高い統計的精度で平均的な電離光子放射率を決定する。一方、$z > 4$ では銀河間ガスの中性度が高くなるため、これまで電離光子銀河の探査は行われていない。HSC による超広視野・高感度サーベイにより、史上初の $z = 4.9$ での電離光子銀河の系統的な探査を行い、$z \sim 3$ から $z \sim 5$ での電離光子脱出率の進化を直接的な観測で調査する。

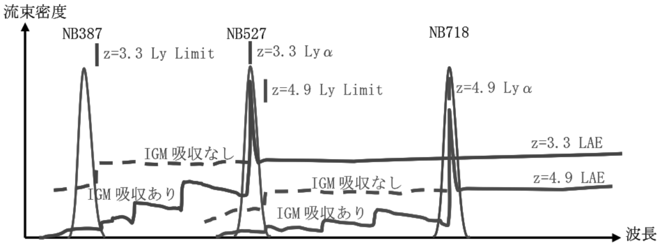

Figure 1: NBF による LAE&電離光子探査の概念図

狭帯域フィルタを用いた LAE 探査を行うためには、狭帯域フィルタのみではなく、広帯域フィルタによる観測も行って、両者を比較することで特定の波長での輝線放射を検出する必要がある。本研究では、広帯域フィルタの観測データとしては、HSC を用いた大規模観測計画として日本および海外協力機関による HSC collaboration が推進する戦略枠プログラムのデータを使用する。HSC 戦略枠プログラムでは 2 つの天域について非常に深い広帯域撮像を行う計画になっており、これらの天域を狭帯域フィルタでも観測し、効率的に LAE サンプルを構築することができる。

(2) 電離光子銀河の性質の解明

これまでの研究により研究代表者らが発見した電離光子銀河および HSC による狭帯域フィルタを用いた電離光子銀河探査で検出される大規模なサンプルに対して、可視・近赤外線での分光観測を行って、撮像観測による測光データと併せてこれらの銀河の性質の究明を行う。先に述べたように、これまでに発見された電離光子銀河の中には、従来の星種族合成モデルでは説明できない強力な電離光子放射が検出されたものがある。これらを説明するためには、極めて金属量の低い、もしくはヘリウムよりも重い元素を含まない始原的なガスからの大質量星に偏った星形成を考える必要があると考えている。分光観測による輝線比の診断で、金属量やガスの温度・密度といった物理パラメータに制限を与え、いかにして強力な電離光子放射が実現されているかを理解することを目指す。

4　研究成果

(1) HSC による電離光子銀河探査

① HSC に搭載する狭帯域フィルタとして、中心波長 527nm、半値全幅 7.4nm のフィルタ NB527 を製作した。2012 年度に詳細な仕様検討を行った上で製作を開始し、2013 年度に国立天文台三鷹の装置でフィルタ各部での透過曲線の測定を行って、必要な性能が達成されていることを確認した (Fig. 2)。HSC への搭載に必要なフィルタ枠への取り付け等を経て、現在フィルタはすばる望遠鏡の山頂施設にて保管され、観測機会を待っている。

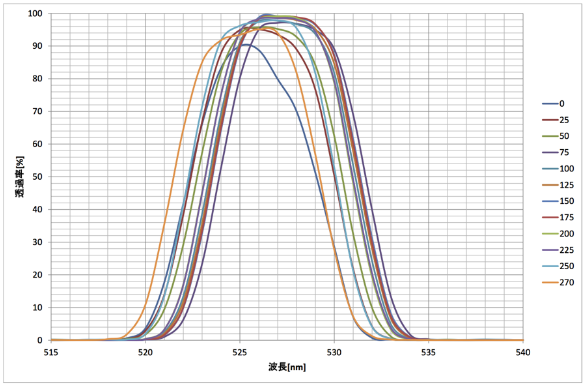

Figure 2: 製作した NB527 フィルタの透過効率

② HSC の組み上げ、搭載試験、試験観測を経て、2014 年 3 月から HSC の科学観測が開始された。装置の調整に時間を要したため、観測開始は当初予定よりも遅れたが、その後戦略枠プログラムは順調に観測を進めており、共同研究者へのデータ公開が始まっている。一方 HSC では一度に搭載できるフィルタの枚数に 6 枚という強い制限があり、狭帯域フィルタの観測は従来の Suprime-Cam よりもスケジュール上の制約を大きく受ける。当初予定していた戦略枠プログラム内での狭帯域フィルタ観測は、使用フィルタ数を大幅に減らすこととなり、本研究で使用するフィルタのうち NB527, NB718 の観測は一般共同利用の中で実施することになった。また、すばる望遠鏡の共同利用観測において HSC のフィルタ搭載枚数に対し当初の想定よりも強い制限がかかったことから、これらの観測について研究期間内に実施することができなかった。このような強い制約のもとで、狭帯域フィルタによる効率的な観測を行うために、宇宙再電離の解明を目指す他の研究テーマに基づく狭帯域フィルタを使用する計画と共同して、集中的な観測プログラムを実施することを提案 (代表者: 井上昭雄 氏) し、2016 年度後半の観測期から実行することが決定している。約 2 年間をかけて本研究に必要な観測データが取得できる見込みである。

③ HSC による観測の準備と平行して、Suprime-Cam による電離光子探査観測を推進した。Suprime-Cam では HSC に比べて視野が限定されるが、HSC には搭載されない、研究代表者らが製作した中心波長 359nm の狭帯域フィルタがある。既に 2007 年にこのフィルタを用いた $z = 3.1$ の原始銀河団領域での観測で電離光子銀河を発見しているが、同フィルタを用いて、一般的な天域での電離光子銀河探査を行い、銀河が存在する領域の環境によって電離光子放射率に違いがあるのかを調べる観測を提案・実行した。観測提案は 2012 年度から採択されていたが、悪天候や装置トラブルなどに見舞われ、2015 年 4 月と 2016 年 5 月にようやく観測データを取得することができた。現在データ解析を進めている。

(2) 電離光子銀河の性質の解明

① Suprime-Cam の狭帯域フィルタ NB359 を用いた電離光子銀河探査データについて、広帯域フィルタデータの再解析や他波長データの統合、およびハッブル宇宙望遠鏡での高空間分解能撮像データを用いて、電離光子銀河サンプルの再構築を行った。また、すばる望遠鏡、ケック望遠鏡などによる可視分光観測を用いて、これらの電離光子銀河候補の赤方偏移確認を進めた。結果として、$z > 3.06$ の 159 個の LAE および 136 個のライマンブレイク銀河 (LBG) からなる母集団のうち、18 個の LAE、7 個の LBG を電離光子銀河候補と同定した (Fig. 3)。狭帯域フィルタによる電離光子探査では、視線上の手前に銀河が偶然存在すると、電離光子放射として誤認するおそれがある。この研究では銀河の明るさと数密度の情報を用いてそのような事象が起こる可能性を検討し、これらの電離光子銀河候補をすべて視線上の銀河の混入によって説明することは統計的に非常に難しい、すなわち真の電離光子銀河が含まれていることを示した。また、NB359 で信号が検出されない銀河の画像を重ね合わせることで信号雑音比を向上させても、NB359 で有意な信号が検出されないことから、電離光子の放射率が高いものと低いものに二極化して分布していると考えられることを指摘した。電離光子と静止系紫外線との明るさの比を調べることで、LBG の電離光子銀河では、若い大質量星を中心とした星種族によって電離光子放射が説明し得るのに対して、LAE では通常の星種族モデルでは説明できず、大質量星に偏った星種族を考えた上で、電離光子の再結合によるエネルギーの再配分によってライマン端付近の放射を大きくするようなモデルを想定するなどする必要があることを示した。本研究結果は 2015 年に投稿後、レフェリーによる要求を反映した改訂を行って、再投稿中である (arXiv:1509.03996)。

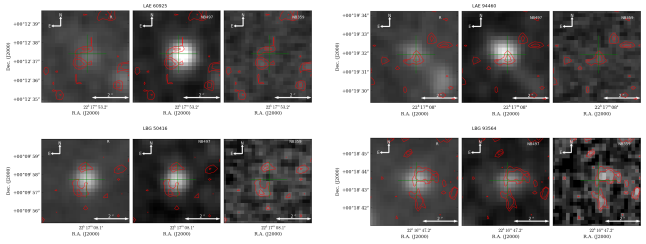

Figure 3: 検出した電離光子銀河の例。それぞれ左から紫外線、Lyα、電離光子の画像で、等高線で電離光子の強度分布 (2σ, 3σ) が示されている

また、電離光子銀河候補とされた銀河のうち LAE 221724+001716 について、可視分光観測によって、336nm に輝線が検出された。これを Lyα 輝線と考えると、赤方偏移 1.76 の銀河からの放射となる。ハッブル宇宙望遠鏡による高解像度画像を調べると、非常に小さな間隔で $z = 3.1$ の銀河の手前に銀河が存在し、銀河–銀河の重力レンズ現象が起きていることが分かった (論文 3)。

② 星形成に伴う大質量星からの放射に加えて、銀河内の低光度の活動銀河核 (AGN) が電離光子放射に寄与している可能性が示唆されている。そこで、Suprime-Cam による NB359 のデータを用いて、$z > 3.06$ の銀河のうち X 線観測や可視分光観測によって、AGN の存在が確認されている銀河について、電離光子放射を調査した。その結果、14 個の AGN のうち、4 天体から電離光子放射を確認した (うち少なくとも 1 個は静止系紫外線の中心とずれているため、星形成による電離光子放射と考えられる)。電離光子の検出と、紫外線光度、紫外線放射の傾きや Lyα 輝線の透過幅、X 線放射の検出などを比較し、明瞭な相関が見られないことから、電離光子放射は AGN においても多様であると結

論した。また、AGN の宇宙全体での電離光子放射への寄与はせいぜい 23%程度であり、主要な部分とはなっていないことを示した。本研究結果についての論文は 2016 年 5 月に受理された (論文 1)。

③ 銀河からの電離光子の脱出率を観測結果から推定するためには、銀河間中性水素ガスによる吸収の影響を補正する必要がある。視線方向によって水素ガス雲の分布は異なるが、Lyα 吸収体の観測から統計的な分布を知ることができる。近年の Lyα 吸収体の観測結果をよく説明できる銀河間中性水素ガスの分布関数の解析的なモデルを作成した。これによると、従来よく使われている Madau (1995) のモデルに比べて、赤方偏移 3–5 での電離光子の吸収はより小さくなることが分かった (論文 2)。

④ 本研究では赤方偏移 3–5 における電離光子放射率を直接観測によって求めることを主たる目的としているが、赤方偏移 6 以遠で起きた宇宙再電離を理解するためには、宇宙最初期からの銀河候補を検出し、その明るさ、数密度を求めた上で、本研究で調べる比較的低赤方偏移の銀河からの情報を用いて電離光子放射を推定することが必要になる。このような宇宙最初期の銀河の探査は、現在の望遠鏡の近赤外線探査能力では不可能である。そこで、研究代表者らは将来の宇宙望遠鏡計画として、広視野高感度近赤外線サーベイに特化した WISH (Wide-field Imaging Surveyor for High-redshift) を検討してきた (論文 4)。米国で打ち上げ準備が進む JWST とあわせて、5μm 付近までカバーするこのような広視野サーベイ宇宙望遠鏡をもたなければ、最初期の銀河形成と宇宙再電離を理解することはできない。国際協力も視野に入れて、今後も検討を継続する考えである。

5 主な発表論文等

[**雑誌論文**]: 査読有 3 件、査読無 1 件

① Micheva, G., Iwata, I., Inoue, A. K., ‘Lyman continuum leaking AGN in the SSA22 field’, 2016, MNRAS in press (査読有)

② Inoue, A. K., Shimizu, I., Iwata, I., Tanaka, M., ‘An updated analytic model for attenuation by the intergalactic medium’, 2014, MNRAS 442, 1805 (査読有) DOI: 10.1093/mnras/stu936

③ 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 Lyα Emitter LAE 221724+001716 at $z = 3.1$ in The SSA 22 Field’, 2013, ApJ 766, 122 (査読有) DOI:10.1088/0004-637X/766/2/122

④ Yamada, T., Iwata, I., (5 名), Inoue, A. K., (他 24 名). ‘WISH for deep and wide NIR surveys’, 2012, Proc. SPIE 8442, 84421A (12pp) (査読無) DOI: 10.1117/12.925632

[**学会発表**]: 計 4 件

① Genoveva Micheva, Ikuru Iwata, Akio Inoue, ‘Escaping Lyman Continuum from a large new sample of redshift 3 galaxies in the SSA22 field’, “IAU Symp 319, Galaxies at High Redshift and Their Evolution Over Cosmic Time”, Honolulu, Hawaii, USA, 2015/08/11 - 08/14

② Ikuru Iwata, ‘Constraints on LyC escape fraction from direct observations of z 3 galaxies’, “Lyman Cotinuum Leakage and Cosmic Reionization”, Stockholm University, Sweden, 2014/08/13 -08/15

③ Genoveva Micheva, ‘New Analysis of LyC leaking z 3 galaxies in the SSA22 field’, “Lyman Cotinuum Leakage and Cosmic Reionization”, Stockholm University, Sweden, 2014/08/13 -08/15

④ 岩田 生, ‘星形成銀河からの電離光子脱出率’, “ALMA 時代の宇宙の構造形成理論”, 北海道大学 (北海道札幌市), 2013/01/26 - 01/28

6 研究組織

(1) 研究代表者
岩田 生 (IWATA, Ikuru)
国立天文台ハワイ観測所 准教授
研究者番号: 40399275

(2) 研究分担者
(なし)

(3) 連携研究者
井上 昭雄 (INOUE, Akio)
大阪産業大学 准教授
研究者番号: 30411424

嶋作 一大 (SHIMASAKU, Kazuhiro)
東京大学 理学研究科 准教授
研究者番号: 00251405

大内 正巳 (OUCHI, Masami)
東京大学 宇宙線研究所 准教授
研究者番号: 40595716

(4) 研究協力者
Genoveva Micheva: 国立天文台 ハワイ観測所 RCUH 職員