

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22358

研究課題名（和文）成層圏赤外線天文台で暴く近傍銀河の電離光子放射メカニズム

研究課題名（英文）Unveiling Lyman Continuum photon escape mechanisms of local galaxies with SOFIA

研究代表者

橋本 拓也（Hashimoto, Takuya）

筑波大学・数理解析系・助教

研究者番号：40870887

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：銀河の遠赤外線輝線光度比（ $[OIII]88\mu\text{m}/[CII]158\mu\text{m}$ ）と電離光子脱出の物理を観測的に結びつけることを目指した。研究代表者がSOFIA望遠鏡を用いて、近傍銀河の遠赤外線データを取得した。近傍銀河のアーカイブデータも組み合わせることで、 $[OIII]88\mu\text{m}/[CII]158\mu\text{m}$ が高い天体の特徴を明らかにした。さらに、光度比と電離光子脱出率を結びつける経験則を導くことに成功し、これを遠方銀河に適用した。遠方銀河が宇宙再電離を引き起こしやすい状況であったことを示した。論文が受理され、のちに出版された（Ura & Hashimoto et al. 2023 ApJ）。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙再電離現象とは、宇宙誕生後およそ2-10億年に起きた宇宙空間の最後の相転移を指す。未解明な部分が多く、現代天文学におけるフロンティアの一つである。とくに重要な課題の一つが、遠方銀河の電離光子脱出率の推定である。これは測定自体が難しいため、従来の研究では、銀河の紫外線や可視光の光学特性と電離光子脱出率を結びつける試みが主流であった。本研究では、近年のALMA望遠鏡の成果を時宜よく鑑みて、遠赤外線の特性と電離光子脱出率の関係に着目した点で学術的意義が高い。本研究の成果は、今後、ALMAやJWSTを用いた遠方銀河の研究成果を解釈する上で、土台になると期待される。

研究成果の概要（英文）：The goal of this study was to make an observational connection between the far-infrared emission line luminosity ratio ( $[OIII]88\mu\text{m}/[CII]158\mu\text{m}$ ) of galaxies and the physics of ionized photon escape. Far-infrared data of nearby galaxies were obtained by the principal investigator using the SOFIA telescope. By combining the data with archival data of nearby galaxies as well, we have identified the characteristics of objects with high  $[OIII]88\mu\text{m}/[CII]158\mu\text{m}$ . Furthermore, we succeeded in deriving an empirical law linking the luminosity ratio to the ionizing photon escape rate, and applied it to distant galaxies. We showed that distant galaxies were prone to cosmic reionization. The paper was accepted and later published (Ura & Hashimoto et al. 2023 ApJ).

研究分野：天文学

キーワード：赤外線天文学 銀河形成進化 近傍銀河 電離光子 SOFIA

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 宇宙再電離とは、宇宙誕生後およそ2-10億年に起きた宇宙空間の中性状態から電離状態への相転移現象を指す。理論的には、初代星や初代銀河の放射する紫外電離光子(以下LyCと呼ぶ)によって、中性状態だった宇宙空間が徐々に電離されたと考えられている。しかし宇宙初期すなわち遠方の天体は極めて暗いため、観測が難しく未解明な点の多い現代天文学のフロンティアの一つである。宇宙再電離の過程を定量的に理解する上で不可欠な物理量は、再電離時代の銀河のLyC脱出率( $f_{\text{esc}}$ )である。 $f_{\text{esc}}$ は銀河内で生成されたLyCのうち銀河外へ脱出して周囲の宇宙空間の電離に使われた割合を表す。残念ながら再電離時代の銀河からのLyC観測は原理的に不可能であるため、観測から制限が付いていなかった。
- (2) 近年のALMAの観測によって、遠方銀河は極めて高い[OIII]88 $\mu\text{m}$ /[CII]158 $\mu\text{m}$ の光度比を示すことが明らかになっていた。
- (3) 近年注目を浴びるのが、LyCの観測ができる近傍宇宙にあり、かつ再電離期の銀河と似た性質を示す「アナログ天体」である。アナログ天体を用いて $f_{\text{esc}}$ と良い相関を示す他の特徴的な観測量を確立できれば、その観測量から間接的に再電離期の銀河の $f_{\text{esc}}$ を推定できるのである。しかし、そのような特徴的な観測量は確立されていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、近傍宇宙に存在するアナログ天体を利用して、銀河の遠赤外線特性を宇宙再電離の研究の文脈に位置付けることである。従来の研究では、銀河の紫外線や可視光の光学特性と電離光子脱出率を結びつける試みが主流であった。本研究では、本研究では、近年のALMAの観測を鑑みて、遠赤外線特性と電離光子脱出率の関係にとくに着目している。

## 3. 研究の方法

近傍宇宙にある電離光子放射天体のうち、これまでに赤外線の輝線が観測された天体はわずか1天体(Haro11)のみであった。本研究では、SOFIA望遠鏡を用いて電離光子放射天体で遠赤外線の輝線を新たに2天体観測する。近傍銀河のアーカイブデータも組み合わせることで、[OIII]88 $\mu\text{m}$ /[CII]158 $\mu\text{m}$ 光度比と良く相関する物理量を調べる。これを利用して、[OIII]88 $\mu\text{m}$ /[CII]158 $\mu\text{m}$ 光度比と電離光子脱出率を結びつける経験則を導く。この経験則を遠方銀河に適用することで遠方銀河の電離光子脱出率を間接的に推定し、遠方銀河が宇宙再電離を引き起こしやすい状況であったか調べる。

## 4. 研究成果

- (1) SOFIA望遠鏡を用いて、Mrk 54とTololo1247-232という2天体の電離光子放射天体を観測した。ターゲットにした輝線は[OIII]88 $\mu\text{m}$ 及び[CII]158 $\mu\text{m}$ 輝線である。これらの輝線は、近年、ALMAを用いて遠方銀河において多数観測されているため、比較を行う上で重要である。この結果、Mrk54では両輝線とも高い統計的有意度で検出に成功した。一方、Tololo1247-232のデータは大気の影響を強く受けているため、輝線検出には成功したもの、科学的な用途に使えるものではなかった。以下ではMrk54とアーカイブデータを組み合わせておこなった成果を述べる
- (2) Mrk54の[OIII]88 $\mu\text{m}$ 及び[CII]158 $\mu\text{m}$ 輝線光度を、アーカイブデータと比較した(図1)。この結果、Mrk54は[CII]158 $\mu\text{m}$ 輝線が赤外線光度の1%程度を占めるほど明るい一方で、[OIII]88 $\mu\text{m}$ 輝線は比較的弱いことが明らかになった。従来の考えでは、Mrk54のような電

電離光子放射天体は強い[OIII]88 $\mu$ m輝線を示すと予想されていたため、これ自体が興味深い成果である。

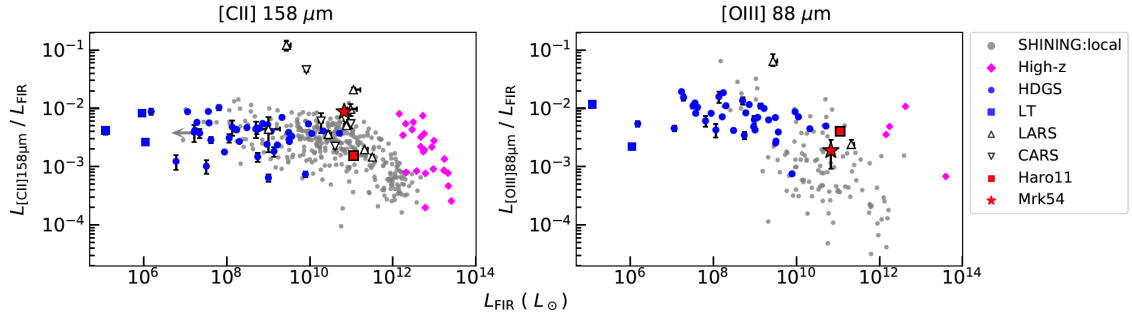


図1: 左(右)は[CII]158 $\mu$ m ([OIII]88 $\mu$ m)輝線の対赤外線光度を縦軸、赤外線光度を横軸にとったもの。電離光子放射天体 Mrk54 と Haro11 は赤色のデータで示され、他のアーカイブデータは右の凡例のとおりである。

- (3) Mrk54 とアーカイブ天体を組み合わせることで、[OIII]88 $\mu$ m/[CII]158 $\mu$ m 輝線光度比の物理量への依存性を調べた。ここでは、アーカイブデータとして輝線光度比だけでなく銀河の基本的な物理量の情報が揃っている Herschel Dwarf Galaxy Survey 及び Little Things Survey を用いた。相関を調べた物理量は、これまで理論的な研究において[OIII]88 $\mu$ m/[CII]158 $\mu$ m 輝線光度比と良い相関を持つと予想されてきた電離パラメータ、中性水素のガス被覆率、星形成の活発さ、重元素量、ダスト温度の5つである(図2)。この結果、[OIII]88 $\mu$ m/[CII]158 $\mu$ m 輝線光度比が高い天体の特徴は、(i)電離パラメータが高く、(ii)中性水素ガスの被覆率が低く、(iii)爆発的な星形成活動を行っており、(iv)重元素量が低く、(v)ダスト温度が高い傾向にあることを、初めて観測データを用いた統計解析から明らかにした。

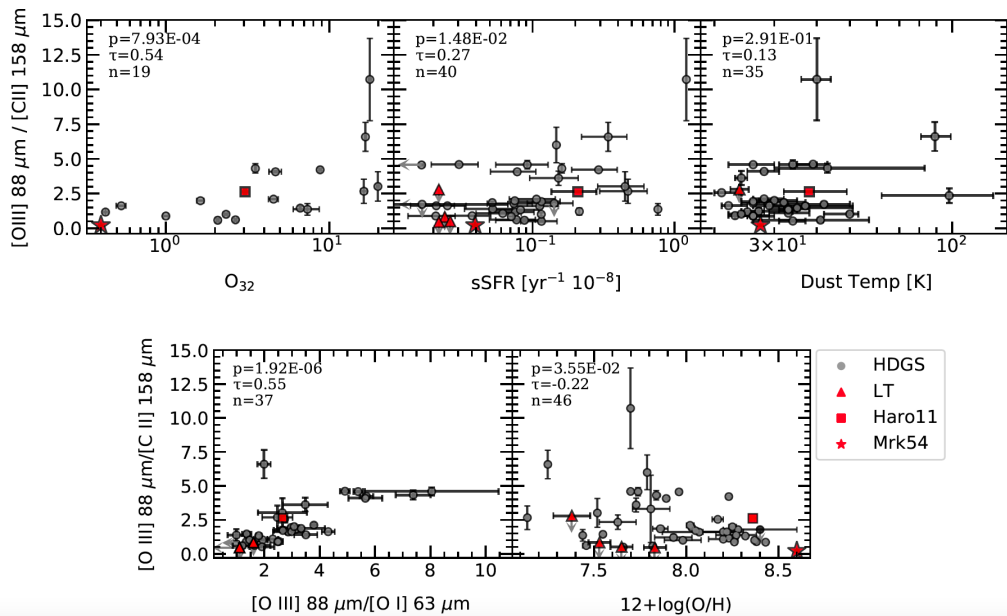


図2: 左上から右下にかけて、電離パラメータ、星形成の活発さ、ダスト温度、中性水素ガス被覆率、重元素量をそれぞれ[OIII]88 $\mu$ m/[CII]158 $\mu$ m 光度比に対してプロットしたもの。電離光子放射天体 Mrk54 と Haro11 は赤色のデータで示され、他のアーカイブデータは右の凡例のとおりである。各パネルの左上には、スピアマンの順位相関係数を用いた各相関の有意度が示されている。

- (4) 前述の相関のうち、[OIII]88 $\mu$ m/[CII]158 $\mu$ m 輝線光度比と電離パラメータ(O32)の相関に着目した。電離パラメータは銀河の電離光子脱出率と良い相関を示すことが、最近の研究で明らかになっていた。そこでこれらの相関2つを組み合わせることで、[OIII]88 $\mu$ m/[CII]158 $\mu$ m 輝線光度比と電離光子脱出率の相関を経験則的に導いたのである。得られた関係式(図3)を遠方銀河に適用することで、ALMA で発見されている高い[OIII]88 $\mu$ m/[CII]158 $\mu$ m 輝線光度比

を持つ遠方銀河は、宇宙再電離に大きな寄与をしたことを定量的に明らかにした。

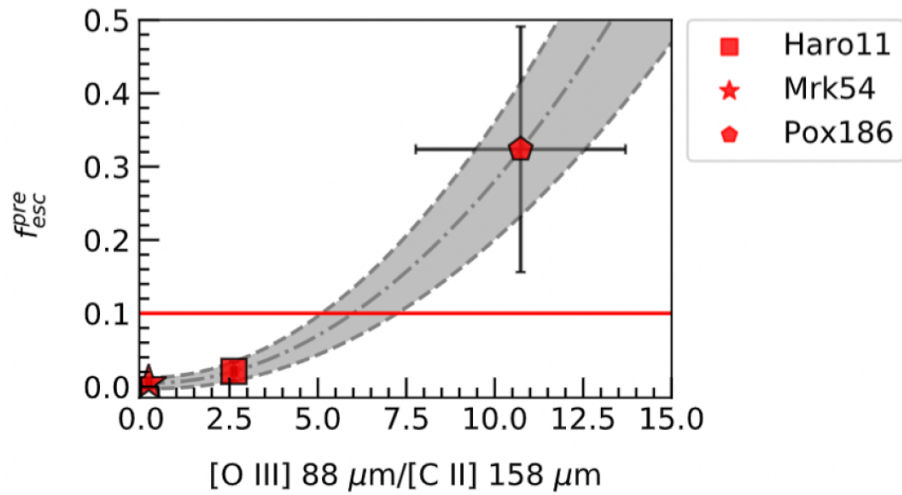


図3:[OIII]88μm/[CII]158μm 光度比と電離光子脱出率の経験則。電離光子放射天体 Mrk54 と Haro11 は、この経験則の妥当性を担保している。

以上の成果は、学術誌 *Astrophysical Journal* へ出版された (Ura & Hashimoto et al. 2023, ApJ)。これらの成果は、近傍銀河のデータを駆使し、遠赤外線光度比([OIII]88μm/[CII]158μm)を初めて電離光子脱出率に結びつけた点で独自性が高い。これまで遠方銀河の電離パラメータや重元素量などは測定が難しかったが、2021年冬に打ち上げられた JWST を用いれば、遠方銀河でこれらの物理量を調べることができる。本研究成果は、将来の ALMA+JWST 研究において重要な土台になることが期待されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ura Ryota, Hashimoto Takuya, Inoue Akio K., Fadda Dario, Hayes Matthew, Puschnig Johannes, Zackrisson Erik, Tamura Yoichi, Matsuo Hiroshi, Mawatari Ken, Fudamoto Yoshinobu, Hagimoto Masato, Kuno Nario, Sugahara Yuma, Yamanaka Satoshi, C. Bakx Tom J. L., Nakazato Yurina, Usui Mitsutaka, Yajima Hidenobu, Yoshida Naoki	4. 巻 948
2. 論文標題 Detections of [C ii] 158 $\mu\text{m}$ and [O iii] 88 $\mu\text{m}$ in a Local Lyman Continuum Emitter, Mrk 54, and Its Implications to High-redshift ALMA Studies*	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 3~3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc530	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 Ren Yi W., Fudamoto Yoshinobu, Inoue Akio K., Sugahara Yuma, Tokuoka Tsuyoshi, Tamura Yoichi, Matsuo Hiroshi, Kohno Kotaro, Umehata Hideki, Hashimoto Takuya, Bouwens Rychard J., Smit Renske, Kashikawa Nobunari, Okamoto Takashi, Shibuya Takatoshi, Shimizu Ikkoh	4. 巻 945
2. 論文標題 Updated Measurements of [O iii] 88 $\mu\text{m}$ , [C ii] 158 $\mu\text{m}$ , and Dust Continuum Emission from a $z = 7.2$ Galaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 69~69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb8ab	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 Akins Hollis B., Fujimoto Seiji, Finlator Kristian, Watson Darach, Knudsen Kirsten K., Richard Johan, C. Bakx Tom J. L., Hashimoto Takuya, Inoue Akio K., Matsuo Hiroshi, Michaowski Micha? J., Tamura Yoichi	4. 巻 934
2. 論文標題 ALMA Reveals Extended Cool Gas and Hot Ionized Outflows in a Typical Star-forming Galaxy at $Z = 7.13$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 64~64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac795b	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 Sugahara Yuma, Inoue Akio K., Fudamoto Yoshinobu, Hashimoto Takuya, Harikane Yuichi, Yamanaka Satoshi	4. 巻 935
2. 論文標題 Bridging Optical and Far-infrared Emission-line Diagrams of Galaxies from Local to the Epoch of Reionization: Characteristic High [O iii] 88 $\mu\text{m}$ /SFR at $z \gtrsim 6$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 119~119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7fed	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 Tokuoka Tsuyoshi, Inoue Akio K., Hashimoto Takuya, Ellis Richard S., Laporte Nicolas, Sugahara Yuma, Matsuo Hiroshi, Tamura Yoichi, Fudamoto Yoshinobu, Moriwaki Kana, Roberts-Borsani Guido, Shimizu Ikkoh, Yamanaka Satoshi, Yoshida Naoki, Zackrisson Erik, Zheng Wei	4. 巻 933
2. 論文標題 Possible Systematic Rotation in the Mature Stellar Population of a $z = 9.1$ Galaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L19 ~ L19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac7447	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 Sugahara Yuma, Inoue Akio K., Hashimoto Takuya, Yamanaka Satoshi, Fujimoto Seiji, Tamura Yoichi, Matsuo Hiroshi, Binggeli Christian, Zackrisson Erik	4. 巻 923
2. 論文標題 Big Three Dragons: A [N ii] 122 $\mu$ m Constraint and New Dust-continuum Detection of a $z = 7.15$ Bright Lyman-break Galaxy with ALMA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 5 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac2a36	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

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 浦遼太
2. 発表標題 電離光子放射天体 Mrk54 における [O iii] 88 $\mu$ m と [C ii] 158 $\mu$ m の検出とその意味-高赤方偏移 ALMA 研究への示唆 II
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本拓也
2. 発表標題 JWST-ALMA synergy I: 偏移7.88における極密度環境の同定
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2022年度
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本拓也
2. 発表標題 JWST observations of ALMA [O iii] 88 um emitters in the epoch of reionization
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浦遼太
2. 発表標題 遠方銀河で観測された高い[O iii] 88 um/[C ii] 158 um光度比の原因-近傍銀河からの示唆
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本拓也
2. 発表標題 JWST observations of ALMA [OIII] 88 μm emitters in the epoch of reionization
3. 学会等名 IAU symposium #377 Early Disk-Galaxy Formation from JWST to the Milky Way (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Takuya Hashimoto  <a href="http://thashimoto.weebly.com/">http://thashimoto.weebly.com/</a></p>
--

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
---------	---------