

JWSTで探る初代銀河の構造と宇宙再電離期の起源

柿市航樹

〈カリフォルニア大学・サンタバーバラ校 Santa Barbara, CA 93106, USA〉

e-mail: koki.kakiichi@ucsb.edu

今回ジェームスウェット宇宙望遠鏡の打ち上げにあたり、我々の行う観測計画の目的と構想からの道のりを簡単に紹介します。今回採択された「NIRSpec Integral Field Spectroscopy of LyC-Leaking Galaxies」では「どのような物理機構が電離光子脱出率を制御するか」という問いに焦点を当て、初代銀河の構造と宇宙再電離の起源を解明する手がかりを掴むことを目指します。本稿では今回の観測計画の科学背景とここまでに至る経緯も紹介し、少しでも多くの方のインスピレーションに繋がれば幸いです。

1. はじめに

宇宙138億年の歴史において、最初に形成された銀河の起源は、2021年12月に打ち上げられたジェームスウェット宇宙望遠鏡（James Webb Space Telescope, JWST）の初期計画・構想の頃から調べたいとされてきた天文学の大きな謎の一つです。宇宙初期の銀河（以下、初代銀河）の形成史とそれらが宇宙全体の環境にどのように影響し、相互作用してきたかを解き明かすことをJWSTは大きな目標の一つとしています。本記事では、私たちがJWSTを用いて行う観測がどのようにしてこの謎に取り組もうとしているのかを、今までの道のりを含め、紹介したいと思います。

現在の宇宙論では、ビッグバン後1-2億年までは星も銀河もない時代だと考えられています。この間、宇宙初期に生じた量子揺らぎによる物質密度の不均一性が重力により増幅され、その重力場によりガス雲が形成され、さらにその重力崩壊により宇宙最初の恒星が誕生し、それらが集まり初代銀河を形成したと考えられています。この宇宙初期約10億年の間は、主に水素からなる宇宙全体のガスは電氣的に中性の状態であり、今現在の私たちの住む宇宙のような電離プラズマとは大きく異なった状態でした。初

代銀河とその子孫の銀河は多くの大質量星を含み、その高い表面温度により大量の紫外線（電離光子：13.6 eVより大きなエネルギーを持つ紫外線）を銀河外に放射することで、周りのガスを中性から電離プラズマに相転移させ、宇宙史における大きな節目である「宇宙再電離」を起こしたとされています。理論計算シミュレーションによるシナリオ [1] では、初代銀河からの電離光子が周囲のガスを電離していくとされていますが、銀河進化や環境との相互作用の物理機構はまだよく解明されていません。

宇宙再電離の起源を観測的に検証するうえで、非常に重要になるのが、銀河内で生成された電離光子が銀河外に放射される割合「電離光子脱出率」です。プランク探査機による宇宙マイクロ波背景放射ゆらぎの測定 [2] と現在のハッブル宇宙望遠鏡の観測による遠方銀河の数密度の測定 [3] によると、電離光子脱出率が約10%以上であると仮定すれば、宇宙再電離を説明できます [4]。しかし、銀河からの電離光子脱出率の測定は非常に難しく、天の川銀河やマゼラン星雲の電離光子脱出率の間接的測定では2%程度以下 [5, 6] だと報告されています。また、100億光年（赤方偏移 $z=2-3$ ）程度の平均的な遠方銀河でも同程度の低い電離光子脱出率だと示唆されています [7, 8]。このように、

今までの観測からでは「宇宙初期10億年間に誕生した銀河が電離光子脱出率10%以上という値を持てるのか」、「どのような物理機構が電離光子脱出率を制御するか」はまだわかっていません。これらの問いを解明することは宇宙再電離の起源の謎を解き明かすうえで重要な手がかりとなります。

2. 初代銀河の構造と宇宙再電離期

上記の問いに答えるうえで大きな障害となっているのが、再電離期の遠方銀河は銀河間ガスによる吸収のため電離光子脱出率の直接観測が原理的に不可能な点です。つまり、この問いの解明には多角的に研究を進める必要があります。

2.1 統計的な電離光子脱出率の推定

電離光子脱出率の直接観測は不可能なものの、間接的手法を用いて統計的に電離光子脱出率を調べる方法があります。それは初代銀河を見るのではなく、その銀河を取り巻く銀河間ガスの電離状態を測定するというものです。銀河間ガスの電離状態は明るい活動銀河核（クェーサー）のスペクトル吸収線から推定することができ、吸収線から示されるガスと周辺の銀河分布を8-10 m級の地上望遠鏡で観測することにより、銀河と銀河間ガスの電離状態の相関を測定することができます。遠方銀河が銀河間ガスの電離度の高い部分に分布していれば、銀河の電離光子脱出率が高いと推測されます。上記のサーベイ計画を元に、我々がケック望遠鏡（Keck）とヨーロッパ南天天文台の大型望遠鏡（VLT）を用いて行った観測では、銀河の位置と銀河間ガスの電離度に正の相関が見られ、理論計算と比較することにより、再電離期直後の銀河からの平均の電離光子脱出率は約8%程度だと推定されました [9, 10]。このことから宇宙初期の銀河からの電離光子脱出率は、近傍宇宙の銀河より大きくなることが推測されます。

現在この観測手法で測定される銀河-銀河間ガスの相関関数の統計的不定性はいまだ大きく、残念ながらまだ精密な測定であるとは言えません。

特に地上からのKeck/DEIMOS装置などによる広域スリット分光法を用いた銀河の赤方偏移サーベイを銀河-銀河間ガスの相関関数を測定できるようなクェーサー視線領域で行うには前もって深い撮像観測を幅広い領域で用意することになるため、多くの望遠鏡時間を必要とし、統計的サンプルを増やすのに効率のよい方法とは言えません。また、先行撮像観測を必要としないVLT/MUSE装置による広域分光観測でも視野は1平方分角にとどまるため、効率を上げるのは困難です。

JWSTで採択されているクェーサー視線領域での銀河赤方偏移サーベイの計画プログラムによってこの問題が克服できると期待されます。我々の行う25個のクェーサー視線領域をターゲットとする銀河赤方偏移サーベイ（ASPIRE, GO Cycle 1 ID 2078, PI: Feige Wang氏）と6個のクェーサー視線領域を深く観測する柏野大地氏らが行うGTOプログラム（ID 1243, PI: Simon Lilly氏）があります。これらはJWSTのNIRCam広視野スリットレス分光法を用いるため、MUSE装置の10倍である一視野9.7平方分角もの広視野の領域全ての天体のスペクトルを撮ることが可能で、効率よく銀河の統計的サンプルを構築することができます。これらJWSTによるクェーサー視線領域での銀河赤方偏移サーベイにより、再電離期の銀河と銀河間ガスの環境の相互作用を直接調べることができるようになり、宇宙再電離期の過程を解明する重要な手がかりになることが期待されます。

2.2 電離光子銀河の直接観測

上記の銀河赤方偏移サーベイでは初代銀河とその周りのガスの電離・物理環境の統計的関係性が調べられますが、第二の問いである「どのような物理機構が電離光子脱出率を制御するか」を明らかにするには、銀河内の詳細な観測が必要です。しかし、上記のように再電離期の銀河からの再電離光子を測定するのは、視線の間にあるガスによる吸収のため不可能です。そのため、より近傍宇宙にある銀河からの電離光子の観測が必要となり

ます。このような電離光子を放出する銀河を「電離光子銀河」と呼びます。

銀河からの電離光子の脱出の物理機構は非常に複雑だと考えられています。これは電離光子発生源である大質量星が10 pc程度より小さいスケールの高密度の分子雲で形成され、さらに電離光子が1 kpc以上先の銀河外に放出されるまでに多相な星間物質に吸収・影響されるためです。これらの星間物質の物理状態は超新星爆発による銀河風や乱流・衝撃波または活動銀河核に影響されるため、銀河内の非常に詳細な情報が必要です。現在の理論では、超新星爆発による銀河風により、銀河に低密度の穴が開き、大質量星から発せられた電離光子がその穴を通り銀河の外に放出されると考えられています。しかし、この物理機構の観測的証拠はいまだ得られていません。

近年の観測進展はめざましく、ハッブル宇宙望遠鏡の紫外領域の観測によって20–30天体ほどの電離光子銀河が発見されてきています。このような銀河からの電離光子脱出率は10%以上だと報告されており、これらの銀河の物理的性質を詳しく観測することにより、再電離期の銀河がいかんして電離光子を放出するかの手がかりとなります。つまり、電離光子銀河の観測は初代銀河を再電離の関係を知る実験室となります。

3. 初代銀河を探る“実験室”

我々の採択されたJWST観測計画「NIRSpec Integral Field Spectroscopy of LyC-Leaking Galaxies」(GO Cycle 1, ID: 1827, PI: 柿市航樹)では、110億光年先の電離光子銀河を詳細に観測することにより、電離光子脱出率の物理機構を明らかにすることを目標としています。現在、ハッブル望遠鏡と可視光領域の地上からの観測により、30億光年ほど先までの近傍の電離光子銀河の性質が徐々に明らかになってきています。その特徴は高い星形成効率と高い星間物質の電離度です。特に、電離酸素からの $[\text{OIII}]5008 \text{ \AA}/[\text{OIII}]3727 \text{ \AA}$ 輝線比が高く、銀河

内の電離水素領域が平均的な星形成銀河に見られるような中性水素の状態の星間物質に覆われておらず、むき出しの状態にあると示唆されています。しかし、このような近傍銀河と再電離期の間には約100億年の差があり、宇宙の環境が大きく異なっていると予測されます。つまり、再電離期により近い時代、110億光年(赤方偏移3)の電離光子銀河においても上記のような物理性質が確認されるか示す必要があります。これらの可視領域の輝線は宇宙遠方では近赤外線領域に移るため、地上望遠鏡では難しかったものの、JWSTの登場により初めて詳細観測が可能となり、110億光年の遠方での電離光子銀河の物理性質を明らかにすることができます。

3.1 電離光子とライマン α 銀河

今回我々がJWSTで観測する天体は「ライマン α 銀河」と呼ばれ、その強いライマン α 輝線から星形成領域の周りの電離水素領域(HII領域)形成の原因となる多くの若い大質量星を持ち、宇宙初期の銀河に似た天体であるとされています。これらはすばる望遠鏡の狭帯域フィルターにより、同質的に選択された銀河サンプルです。また、これらの銀河サンプルではハッブル宇宙望遠鏡での先行研究(LACESプログラム [11, 12])により紫外領域の撮像観測がなされており、電離光子脱出率の直接観測が可能です。つまり、これらの天体のJWSTによる近赤外線領域の追観測を行うことで電離光子脱出率と銀河内の物理性質を調べ、その相関から物理機構を明らかにすることが可能になります。

そのため、我々の観測計画では、JWSTのNIRSpec装置の面分光モード(Integral Field Spectroscopy, 以下略IFU)を使います。面分光では、銀河の様々な位置で空間分解されたスペクトルが得られます。JWSTの空間分解能は0.1秒角と高く、ハッブル望遠鏡で得られた0.1秒角で分解された紫外領域の撮像画像、つまり、電離光子脱出率、との相関を研究することができます。

3.2 輝線比による物理状態の検証

NIRSpec/IFUにより、遠方の電離光子銀河から発

せられる空間分解された可視光輝線の検出が可能です。特に、電離水素からのH α 、H β 輝線、酸素・窒素・硫黄原子からの[OIII]5008 Å, [NII]6584 Å, [SII]6716 Å, 6731 Å輝線を観測できます。これらの空間分解された輝線比からBPT図と呼ばれる可視光輝線診断図を用い、銀河内の星間物質の電離度、衝撃波や活動銀河核の有無を知ることができます。このJWSTによる銀河内の輝線比とハッブル望遠鏡の紫外撮像画像による電離光子脱出率の空間的相関により、電離光子脱出率が高い星間物質の物理状態がどのようになっているかを同定・解明します。

また、これらの銀河サンプルでは電離光子脱出率と可視光輝線の両方が直接観測可能なため、電離光子脱出率との相関が強い可視光輝線の性質を同定することにより、直接測定が不可能な初代銀河の電離光子脱出率の間接的測定に適用することも目的としています。

3.3 H α 輝線ハローの探査

電離光子脱出率の物理機構を深く理解するうえで、さらに重要となってくるのが、電離光子放射の方向不均一性です。現在の銀河の流体シミュレーションによると、超新星爆発による銀河風で生じた多相な星間物質の状態が電離光子脱出率を制御するなら、このような方向不均一性は自然に生じることになります。上に書いたハッブル望遠鏡の紫外撮像からは銀河から地球に向かって放出された特定の方向の電離光子の脱出率しか測定できません。しかし、再電離の原因を明らかにするためには、銀河からあらゆる方向に向かって放出された電離光子を平均する必要があります。この立体角平均された電離光子の脱出率の測定を可能にするのが、銀河を取り巻くH α 輝線ハローの探査です。原理としては、銀河外に放出された電離光子が銀河周辺の中性水素を電離し、その再結合の際に微光のH α 輝線を放つガスの‘ハロー’を生じます。これを観測することにより、銀河周辺に放出された電離光子の量、つまり電離光子脱出率を測定するというもの

です [13]。この手法は希薄なガスからの微光のH α 輝線を使うため、今までは天の川銀河やマゼラン星雲などの非常に近い天体にしか適用されていませんでした。しかし、JWSTは、近赤外線の高感度観測が可能であり、かつ宇宙にあるため大気や夜光の影響がないという利点から、微光で空間的に広がった天体を観測するのに非常に適しています。このように電離光子銀河の新しい構造を探查するのも我々のJWSTの観測計画の強みの一つです。

4. 構想から観測までの道のり

今回のJWSTのNIRSpec/IFU観測計画の元となる「電離光子銀河の空間分解されたスペクトル観測をしたい」という構想は、2018年から2020年のユニバーシティ・カレッジ・ロンドンでのポスドク時代にRomain Meyer氏、Sarah Bosman氏、Richard Ellis氏と共同で行った2.1章で述べた銀河赤方偏移サーベイが発端です。このサーベイの2018年の初期成果と2020年のさらなる成果から、宇宙初期、再電離期の終わりの時代の銀河の電離光子脱出率は大きいだろうと観測的に推察されていました。しかし、ライマン α 輝線と1500 Åの紫外光度の2つのみの観測量で銀河内の物理機構を知るには限度があり、推測にとどまっていた。そのため、電離光子脱出率の物理機構を詳しく調べるために、類似した(ライマン α 輝線)銀河を系統的に調査可能で、かつ電離光子脱出率と星間物質などの性質を詳しく測定できる銀河サンプルが必要でした。

この頃、同時期にポスドクをしていた今回のJWST観測計画のメンバーでもある中島彦彦氏、Brant Robertson氏らのすばる望遠鏡とハッブル望遠鏡の観測を組み合わせたLACESサーベイにより、赤方偏移3でのライマン α 銀河の電離光子脱出率の系統的研究が可能になってきていました。LACESサーベイと先行研究の結果から、ライマン α 銀河は初代銀河と類似しており、電離光子脱出率が高いことが知られていました。つまり、これらLACESサーベイにより観測されたラ

イマン α 銀河は電離光子脱出率の物理機構を探るうえで最適なサンプルだと言えます。

上記のことから、2019年にTucker Jones氏らと共同でLACESサーベイにより得られたライマン α 銀河を元に、Keck望遠鏡の補正光学を用いたOSIRIS面分光装置を使い、[OIII]5008 Åの面分光観測を開始しました。これにより、銀河内の電離領域とその速度場と電離光子脱出率の空間的相関を調べることができ、物理機構を調べるうえで重要だと考えたからです。以前の研究では銀河全体のスペクトルから銀河全体で平均化された星間物質の性質が調べられていましたが、Keck望遠鏡のMOSFIREの装置による[OIII]5008 Å/[OII]3727 Å輝線比の分散、近傍の電離光子銀河のライマン α 輝線の複雑さから銀河平均の可視光輝線の観測のみでは、物理機構を知るのに不十分でした。また、理論計算によると、銀河内の星間物質に電離度のゆらぎがあるとされ、かつ電離領域の速度場は、銀河風が駆動する乱流に大きな影響を受けると予測されています。そのため、星間物質の電離度の空間分布・速度場と電離光子脱出率の相関を取ることで、より詳しく電離光子脱出機構の検証ができると期待できます。つまり、詳細な高分解能の面分光観測が必要不可欠でした。

このKeck望遠鏡のOSIRIS観測は社会情勢の影響により困難をきわめました。2回目の観測は2019年のハワイ島マウナケア山での30 m望遠鏡(TMT)建設に対する抗議デモにより山頂へのアクセスロードが封鎖されたため、観測中止となりました。また、LACESサーベイのライマン α 銀河の可視光領域の輝線をヨーロッパ南天天文台のVLT望遠鏡のXSHOOTER装置を用いて観測した際、観測そのものには影響はなかったもののサンティアゴで発生したチリ暴動が激しくなっていたため現地観測への影響が懸念されていました。また、より詳しく調べられる初代銀河に似た近傍銀河のPalomar望遠鏡での観測も2020年にChris Martin氏らと計画していたのですが、COVID-19の影響により延期され、2021年秋ようやく初

期観測を実施することができました。これらの経験から天文学の進展には世界情勢が深く関係し社会の安定が必要不可欠だと痛感しました。

これらの観測案・初期観測は今回のJWST観測計画案を練るうえで非常に重要なものでした。特にKeck望遠鏡の補正光学OSIRIS観測で再電離銀河の空間分解された[OIII]5008 Åから、それが多様な星間物質により構成されていることのヒントを得ることができました。これはJWST観測計画の詳細を詰めるうえで非常に重要でした。今回JWST観測の採択にあたり、ようやく再電離銀河内の物理機構を知る手がかりをつかめると期待が高まります。

参考文献

- [1] Rosdahl, J., 2018, MNRAS, 479, 994
- [2] Planck Collaboration, 2020, A&A, 641, A6
- [3] Bouwens R., et al., 2021, AJ, 162, 47
- [4] Robertson, B., et al., 2015, ApJL, 802, 19
- [5] Bland-Hawthorn, J., & Maloney, P.R., 1999, ApJ, 510, 33
- [6] Barger, K. A., et al., 2013, ApJ, 771, 132
- [7] Mostardi, R. E., et al., 2015, ApJ, 810, 107
- [8] Rutkowski, M. J., et al., 2017, ApJL, 841, 27
- [9] Kakiichi, K., et al., 2018, MNRAS, 479, 43
- [10] Meyer, R. A., et al., 2020, MNRAS, 494, 1560
- [11] Fletcher, T., et al., 2019, ApJ, 878, 87
- [12] Nakajima, K., et al., 2020, ApJ, 889, 161
- [13] Mas-Ribas, L., et al., 2017, ApJ, 846, 4

Understanding the Structure of First Galaxies with JWST

Koki KAKIICHI

¹Department of Physics, University of California, Santa Barbara, CA 93106, USA

Abstract: Understanding how the first galaxies form and how they drive reionization is one of the key questions that motivated the construction of JWST. We describe the outline of our JWST program which aims at shedding light on the structure of the first galaxies and the journey that led us to propose the observation in GO Cycle 1.