

遠赤外線微細構造輝線で切り拓く前・宇宙再電離期の銀河形成

研究代表者	名古屋大学・理学研究科・准教授
	田村 陽一（たむら よういち） 研究者番号:10608764
研究課題 情報	課題番号：22H04939 キーワード：電波天文学、銀河形成、宇宙再電離、超伝導受信機 研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

本研究では、宇宙最初期の銀河の成長をつかさどる物理を探るため、遠赤外線原子輝線のミリ波・サブミリ波分光観測に注目し、前・宇宙再電離期（宇宙年齢6億年未満）の銀河がどのような頻度で出現したか、その銀河がどのような性質を持つかを明らかにする。そこで、メキシコ高山に建設された大型ミリ波望遠鏡LMTと組み合わせることで北半球で最高感度を実現する受信機「FINER」を開発する。北半球のLMT-FINERと南半球のアルマ望遠鏡を駆使し、全天に渡って未確認のまま残された前・宇宙再電離期の候補銀河を酸素と炭素の輝線スペクトルを分光観測し、人類未踏の前・宇宙再電離期の銀河形成を開拓する。

本研究の問い
 ①前・再電離期の大質量銀河がどのような頻度（個数密度）で出現したのか
 ②前・再電離期の銀河の成長をつかさどる物理は何か

A. ミリ波・サブミリ波受信機 FINER の開発

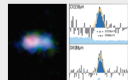
✓ 新技術受信機FINERを世界最大口径のミリ波望遠鏡 LMT（北半球）へ搭載し、アルマ望遠鏡（南半球）に比肩する感度を実現



全天にわたる
前・再電離期の
銀河分光探査

B. 前・再電離期銀河の個数密度の進化と星間物理の研究

✓ LMT-FINER（北天）とアルマ（南天）を用いた遠赤外線酸素・炭素輝線スペクトルの分光観測を実施



✓ 全天にわたって未確認のまま残された、大質量銀河候補の同定と個数密度の変遷
 ✓ 星間ガスの物理状態と星形成活動の理解

分光観測による同定に成功した前・再電離期の銀河とその酸素・炭素スペクトル
(田村+2019, Bakx+2020)

宇宙の夜明け = 前・再電離期の銀河形成をつかさどる物理の解明

図1 本研究課題のイメージ図

●研究の背景・目的

宇宙で最初の銀河や恒星は、いつ、どのように誕生したのか。これは、あらゆる天体の形成や物質の進化の源流点を探るうえで最も重要な問いのひとつである。ビッグバンで始まった宇宙を満たす電離ガス（陽子と電子）は、その約38万年の時点で冷えて中性水素ガスになる。この水素ガスは恒星や銀河の材料である。恒星や銀河が誕生すると、それらが放つ紫外線によって広大な宇宙を満たす水素ガスが再び電離される。この宇宙再電離と呼ばれる現象は、天体の誕生なくしては生じえない。近年、宇宙再電離はビッグバン後約6.6億年頃を中心に生じたことが報告されたが、実はそれより前の時代（前・再電離期）で100個を超える銀河候補が発見されている。つまり、人類はすでに宇宙で最初の天体が生まれる時代を目撃しつつあるのだ。

なかでも、前・再電離期の質量の重い銀河は、きわめて希少だと予想される。現在の標準宇宙モデルでは軽い銀河が合体して次第に重い銀河へ成長すると理解されている。つまり、宇宙年齢の数%という短期間に、観測にかかるほど成長した銀河を生み出すのは難しいのである。裏を返せば、大質量の銀河がどのような頻度（個数密度）で出現したのか、銀河の成長をつかさどる物理が何なのか、という問いに答えることが、銀河の形成過程の理解に結びつく。これが、本研究の核心をなす問いである。この問題がいまだ決着を見ないのは、ひとえに対象天体が依然として銀河「候補」であることにほかならない。一般に、ある天体を銀河であると同定し、その銀河が位置する年代を決定し、その物理的な性質を明らかにするには、原子や分子が放射する線スペクトル

を測定（分光）することから始まる。しかし、遠い宇宙に位置する銀河を検出できるほどに明るい線スペクトルとその検出を可能にする高感度の観測装置の組み合わせは、極めて限られていた。

そこで本研究では、酸素原子および炭素原子が放射する遠赤外線スペクトルのミリ波サブミリ波分光観測による、前・再電離期の重い銀河の分光学的探査、およびその物理的性質の解明を目的とする。

●研究の方法・計画

メキシコ高山に建設された世界最大の単一開口ミリ波望遠鏡LMTと組み合わせることで北半球で最高の感度を実現する受信機FINERを開発し、LMTに搭載する。このFINERには、我が国独自の超伝導受信技術を採用する。北半球のLMT-FINERと南半球のアルマ望遠鏡を駆使し、全天に渡って未確認のまま残された前・宇宙再電離期の候補銀河を分光観測し、人類未踏の前・宇宙再電離期の銀河形成を開拓する。

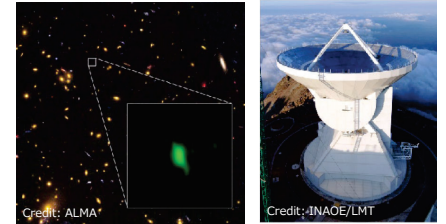


図2 アルマ望遠鏡によって同定された宇宙年齢5億年の時代の銀河（左）と大型ミリ波望遠鏡LMT（右）

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●ミリ波・サブミリ波受信機FINERの開発

FINERでは、広い周波数帯域にわたり微弱かつ幅の狭い輝線を精密に分光するために、高臨界電流密度超伝導SISミキサと呼ばれる新たな検出素子を採用するとともに、超広帯域デジタル分光計を開発する。これにより、アルマ望遠鏡の受信機と同等の低雑音を実現しながら、分光帯域幅を約5倍に拡大することが可能となる。LMT-FINERは、アルマ望遠鏡に比して40%の集光面積、アルマと同等の標高(4,600m)がもたらす高い大気透過率、アルマより5倍広い分光帯域をもたらす。これにより、アルマと同等の分光探査効率を、アルマではアクセスが困難な北天でも達成し、北半球で最大の分光探査能力を獲得する。これにより、以下に示す科学的成果が期待できる。

●前・再電離期の銀河の個数密度の進化と星間物理の研究

本研究では、宇宙年齢4億年から6億年にかけて質量の大きい銀河の個数密度がどのように時間発展したかを、LMT-FINERとアルマ望遠鏡による分光観測に基づき調べるとともに、人類未踏の時代、すなわち宇宙年齢2.5～4億年に対する銀河探査にも挑戦する。前・再電離期に位置する銀河のサンプルを現在の約10倍に拡大し、最遠方銀河の検出記録のトップリストを塗り替えるばかりでなく、質量の大きい銀河がどのような頻度で出現するかを高い信頼度で決定することが可能となる。この観測結果を理論予測と比較することによって、銀河形成の素過程や構造形成理論に対して新たな知見が得られるものと期待される。宇宙年齢2.5～4億年の時代に大質量銀河が同定された場合、数例の重い銀河の同定でさえも構造形成論や物質進化の理解に見直しを迫る重大な影響を及ぼすだろう。

さらに、こうした銀河が持つガスと星の物理的性質も明らかにできると期待される。酸素や炭素の線スペクトル、および静止系紫外線～可視光の広範なスペクトルを用いて、検出されたすべての銀河の物理的性質を明らかにする。これらのスペクトルからは、星形成の経過時間、ガスから恒星への変換率（星形成率）、全恒星の総質量や重元素量など、銀河がもつ基本的な物理量を推定することが可能となる。さらに、ガスの物理過程や化学反応をモデル化し、酸素や炭素等の観測結果と比較することで、この時代の銀河が持つ星間ガスの物理状態、特に電離状態を明らかにすることができる。並行して実施するアルマや赤外線宇宙望遠鏡の高解像度撮像も併せることによって、前・宇宙再電離期の重質量銀河の普遍的描像を確立することができると期待される。