

## 宇宙再電離の現場を初観測

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡が捉えた銀河が引き起こす宇宙の大転換

### 【本研究のポイント】

- ・クエーサー<sup>注 1)</sup>の深い分光スペクトル<sup>注 2)</sup>とジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)による高効率な銀河探査を組み合わせることにより、宇宙再電離の現場の直接観測に成功した。
- ・銀河の周囲には泡状の電離領域が約 250 万光年に渡って広がっていることが明らかになった。

### 【研究概要】

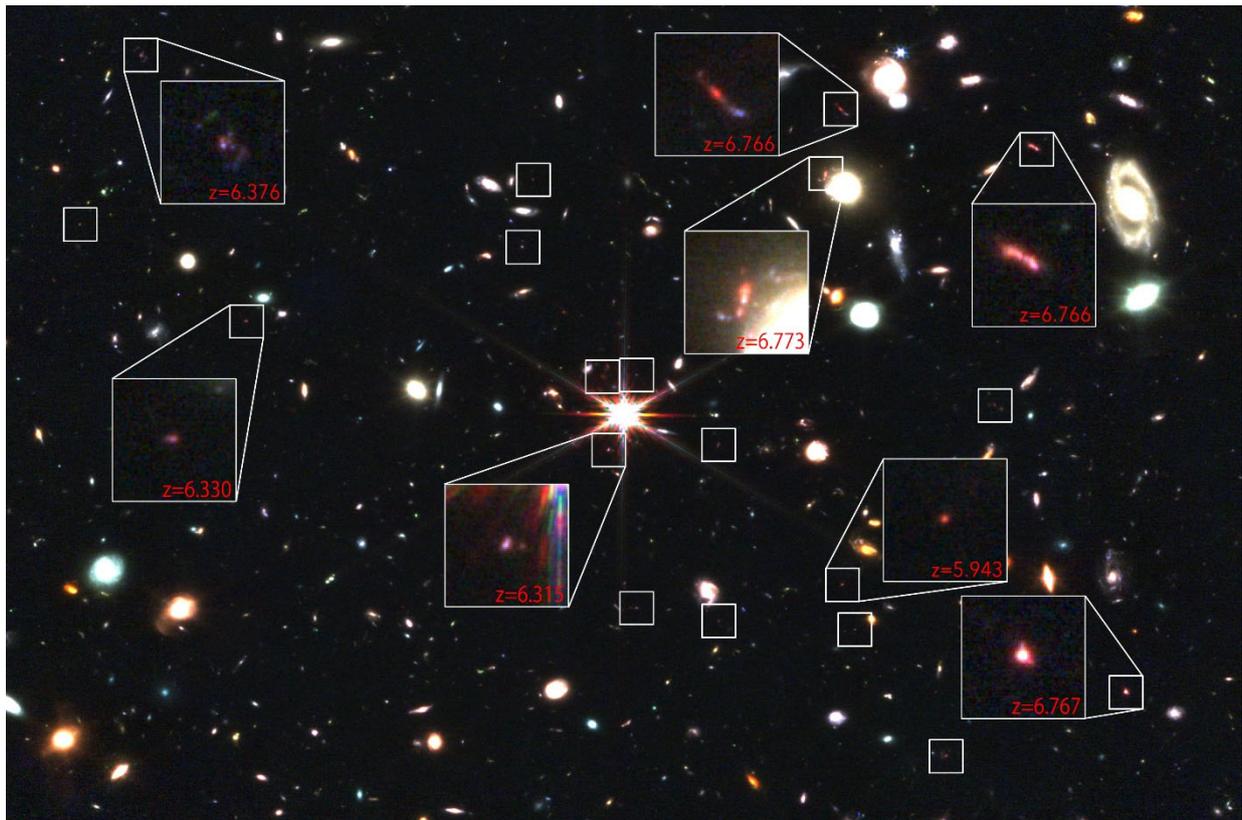
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学高等研究院の柏野 大地 特任助教らは、チューリッヒ工科大学(スイス)、マサチューセッツ工科大学(アメリカ)、ノースカロライナ州立大学(アメリカ)の研究者らとの国際共同研究によって、約 129 億年前の太古の宇宙において、若い星形成銀河が周囲の銀河間ガスを電離し、「宇宙再電離」を引き起こしている現場を直接観測することに世界で初めて成功しました。

本研究では、遠方クエーサー領域を最先端の観測装置であるジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)を用いて観測し、ビッグバン後 7 億 5 千万年から 11 億年の時期の星形成銀河を高効率で検出し、世界最大の分光銀河サンプルを構築しました。また、銀河の空間分布とクエーサーの地上観測によって得られた銀河間ガスの物理状態を比較することで、銀河が周囲のガスを電離し、宇宙再電離を推し進めている直接的な証拠を得ました。

本研究成果は、2023 年 6 月 12 日付アメリカ天文学会の雑誌「Astrophysical Journal」に掲載されました。

## 【研究背景】

宇宙再電離は、宇宙の歴史において最後に起こったガスの大転換です。再電離では、宇宙の水素ガスのほとんどが、中性原子の形から高温プラズマに戻ります。この宇宙再電離は、ビッグバン後、約1億5千万年から10億年の間に起こったことが知られています。再電離の原因は、これまで特定することが困難でした。一般的には、若い銀河の中で新しく生まれた星からの紫外線放射が、宇宙再電離の主要な原因であると考えられてきました。しかしそれ以外にも、非常に明るいクェーサーのブラックホール降着による放射や、粒子崩壊などのさらにエキゾチックな「新しい物理」の可能性も提案されています。宇宙再電離のプロセスを理解することは、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）ミッションの主要な科学的目標でした。



## 【研究内容】

報告者らの研究チームは「EIGER 計画」と名付けられた、JWST を用いた深宇宙探査プロジェクト(プログラム ID 1243)を遂行しています。このプロジェクトは、JWST のNIRCam(近赤外線カメラ)装置を広視野スリットレス分光モードで使用し、宇宙再電離の最終段階に相当する赤方偏移範囲  $5.3 < z < 6.9$  (ビッグバン後約7億5千万年から11億年の時代)の銀河を検出し、その赤方偏移(距離)を測ることを目的としています。スリットレス分光モードの大きな利点は、天球球面上の観測領域に存在するすべての天体のスペクトルが記録されることです。特定の天体をあらかじめ選択する必要がないため、ある明るさ以上の全ての銀河について取りこぼしなく「人口調査」を行うことが可能です。

「EIGER 計画」は、宇宙再電離の後期における銀河と銀河間ガスの相互作用を研究するため、赤方偏移範囲  $6.0 < z < 7.1$  に存在するクェーサーという非常に明るい天体の方向にある 6 つの天域を観測対象としています。これらの 6 つのクェーサーは、ケック望遠鏡、マゼラン望遠鏡、ヨーロッパ南天点天文台超大型望遠鏡などの地上望遠鏡によって、非常に高精度かつ高解像度のスペクトルが得られています。

中性水素は特定の波長、特に 121.6 nm で光を吸収するため、クェーサースペクトルを分析すると、視線（我々とクェーサーを結ぶ直線）に沿って、異なる赤方偏移（距離、あるいは時期）における中性水素の吸収を測定できます。そのため、銀河間物質における中性水素の分布を、これらの特定の視線に沿って空間的・時間的にマッピングすることができます。また、クェーサーの光を吸収することで、星の中で作られ、銀河風によって銀河間空間に排出される炭素、酸素、マグネシウムなどの化学元素の存在も検出することができます。このようにクェーサースペクトルは、視線上のガスに関する情報を教えてくれます。「EIGER 計画」では、JWST を用いてクェーサー視線の周囲に存在する多数の銀河を検出し、距離を精密に測定します。この組み合わせが、高赤方偏移宇宙を研究する他の多くの JWST プログラムと比べて、「EIGER 計画」を非常にユニークなプロジェクトとして位置付けています。

距離や時間を遡ると、 $\text{Ly}\alpha$  光<sup>注3)</sup>の透過が少なくなることが数年前から知られています。これは、宇宙再電離が完了する前の宇宙に存在する中性水素ガスの量が増えるためです。実際、宇宙年齢約 10.5 億年以前（赤方偏移  $z > 5.5$ ）を見ると、 $\text{Ly}\alpha$  光はほぼ完全に中性水素に吸収され、わずかな透過領域が残るだけであることがわかります。このような透過領域は、局所的に再電離がほぼ完了した宇宙の領域と考えられます。EIGER 計画の主要な科学目標の一つは、このような再電離が完了したばかりの領域が、銀河の分布とどのように結び付けられるかを理解し、再電離過程をより良く理解することです。

「EIGER 計画」で最初に観測された領域は、非常に高輝度であることで有名なクェーサー J0100+2802 の方向です。研究チームはこの領域で、赤方偏移  $5.3 < z < 6.9$  の範囲で 117 個の銀河を分光学的に同定することに成功しました。これは、当時、JWST による最大の分光銀河サンプルとなりました。そして、この銀河サンプルとクェーサースペクトルから、銀河間ガスの平均透過率が銀河からの距離によってどのように変化するかを測定しました。その結果、宇宙が部分的にしか電離されていない宇宙年齢 9.5 億年頃（赤方偏移 5.9 付近）では、銀河の周りに半径 250 万光年程度の、泡状の透過率の高い電離領域が形成されていることを示しました。そして、この時代からさらに 1 億年ほど経過すると（赤方偏移 5.5 付近）、個々の電離領域が広がり重なり合うことで宇宙全体が電離されることを示しました。

このことは、赤方偏移 5.9 付近の透過領域が、およそ 250 万光年以内にある銀河からの電離放射の局所的な影響によって生成されていることを示しています。また、宇宙再電離を引き起こしたのは、この時代の一般的な銀河であり、希少なクェーサーや、これまで提案されてきたようなエキゾチックな可能性（例えば、崩壊粒子）ではないことを強く示しています。これは重要な新結果です。

これら銀河の性質については EIGER II (Matthee 他) ※1 で詳しく分析され、特に重要な性質として重元素の濃度が低く、電離光子の生成効率が低いことが明らかになりました。これらの性質は、このような初期の時期には、一般に銀河はまだガスが豊富で、

超新星爆発で大量の重元素を生成する時間がなかったことを反映しており、電離光子の生成効率が高いため、若い銀河は宇宙を再電離するのに非常に有効な源となるのです。このような銀河の性質は、現在の宇宙でも 1%程度しか見られませんが、宇宙年齢がただか 10 億年の頃には、それが当たり前だったことが明らかになっており、銀河の性質が宇宙時間の中でいかに強く進化しているかを物語っています。

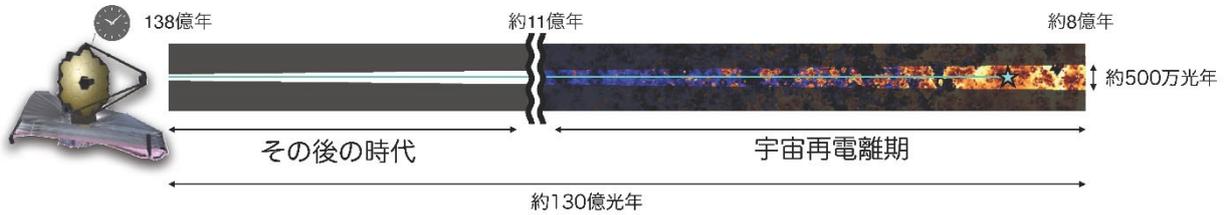


図 1. JWST 観測の模式図。クエーサーは星印で示されており、その光は、再電離のエポックにあるさまざまなガスのパッチを通過して望遠鏡に向かう。オレンジ色はまだ電離が起こっていない中性領域、紺色は電離した領域を示している。クエーサーのスペクトルを解析することで、この視線方向のどこでガスが中性あるいは電離しているかマッピングすることができる。JWST は、クエーサーと望遠鏡を結ぶこの直線の周辺にある銀河を探すために使われた。

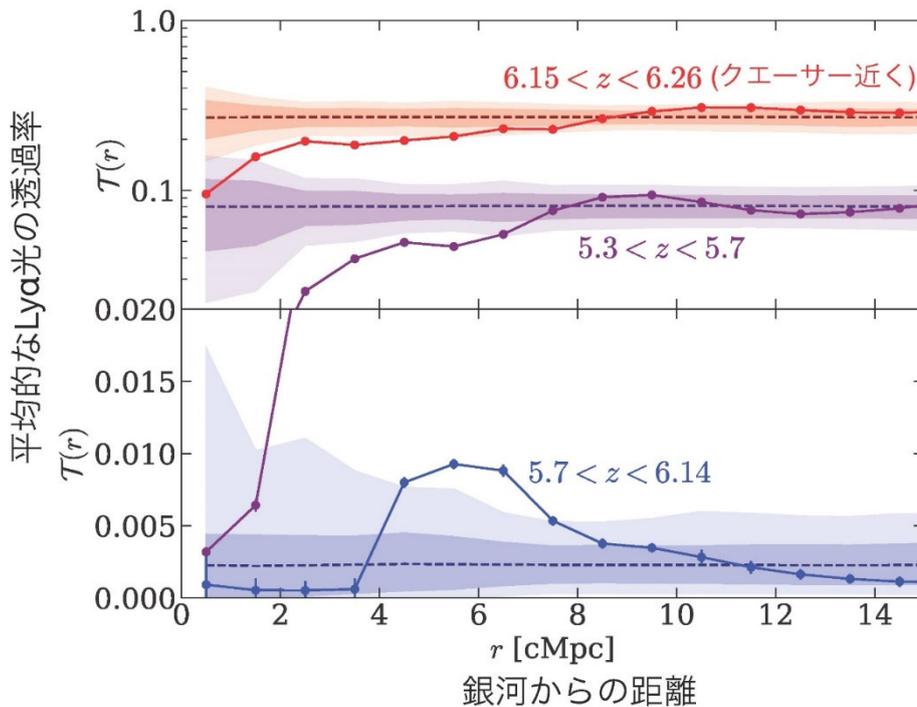


図 2. 論文より図 12 を抜粋。横軸は各銀河からの距離を、縦軸は  $\text{Ly}\alpha$  光の平均透過率を表している。縦軸の値が大きいほど中性の水素ガスが少ないことを意味する。赤、青、紫の折れ線はそれぞれ 129 億年前、128 億年前、127 億年前を表している。赤色の折れ線は今回の研究で中心に扱ったクエーサー近くの領域を示しており、クエーサーからの強い光によりガスが電離し、その結果透過率は高くなる。

青色の折れ線はまだ宇宙全体に中性ガスが豊富で、光の透過率が低い時期を表している。ただし、5-6 cMpc (250 万光年) の地点で透過率が高くなっており、これは銀河周辺でガスが電離し、透明度が高くなっていることを示している。このシグナルこそが今回の研究成果の肝であり、銀河の周囲で選択的にガスの透明度が高い、すなわち銀河が周囲のガスを電離している証拠である。距離  $r$  が小さなところで透過率が低いのは、銀河周囲のガス密度が高いためと考えられる。さらに時代が降ると、紫色が示すように、銀河からの距離に応じて透過率が単調に高くなっていく。宇宙全体がほとんど電離されるが、銀河の周囲ではガス密度が高いため光の吸収が強くなっていることを示している。

## 【成果の意義】

本研究成果は、現代宇宙論・天体物理学の長年の問いであった宇宙再電離の原因を特定し、若い星形成銀河が主要な原因であることを直接的に示しました。「EIGER 計画」は宇宙再電離中期から後期にかけての描像の確立を目指しており、この研究から得られる知見は、2030年代以降に実現を目指している、中性水素 21cm 線観測による宇宙再電離初期および暗黒時代の観測的研究のための土台を提供します。本研究成果は、宇宙史を切れ目なく理解するという、究極的な目標における重要な一歩となります。

## 【共同リリース情報】

本研究成果は宇宙望遠鏡科学研究所（アメリカ）から 2023 年 6 月 12 日午前 10 時（現地時間）にリリースされました。

<https://www.webbtelescope.org/contents/news-releases/2023/news-2023-122>

## 【関連研究について】

柏野大地特任助教は、同国際共同研究によるアルマ望遠鏡を用いた電波による宇宙再電離時代の銀河観測を主導し、非常に高階電離した金属イオンを含むガス雲の周囲で、これまで知られていなかった銀河の検出に成功しました。この発見は、宇宙再電離や初期宇宙における銀河間ガスの金属汚染（銀河内で生成された金属元素が銀河間ガスに流出する現象）の過程の解明につながると期待されます。本研究成果は 2023 年 5 月 11 日付 Nature ※2 に掲載されました。

本研究および関連研究は、JSPS 科研費 JP21K13956 の助成を受けたものです。

## 【用語説明】

注 1)クェーサー:

銀河の中心に存在する、超巨大ブラックホールに周囲の物質が降着することで明るく輝く活動銀河核のうち、最も明るい部類の天体。本研究では、その明るさと滑らかな連続スペクトルを持つという性質を活かし、クェーサーと我々の間にある銀河間物質についての情報を得るために利用している。

注 2)分光スペクトル:

ここでは天体からの届く光の強度を波長ごとに記録したもの。単にスペクトルとも言う。

注 3)Ly $\alpha$ 光:

水素原子の基底状態と第一励起状態のエネルギー差に対応する 121.6nm の光。中性水素によって吸収されるため、Ly $\alpha$ 光の透過率から中性水素量を推定することができる。Ly $\alpha$ 光は非常に吸収されやすいため、本研究の文脈ではわずかでも透過していれば、そ

の領域には銀河からの放射が届いており電離されている(中性度 0.01%程度以下)と言うことができる。

#### 【論文情報】

雑誌名:The Astrophysical Journal

論文タイトル:EIGER I. A Large Sample of [O III]-emitting Galaxies at  $5.3 < z < 6.9$  and Direct Evidence for Local Reionization by Galaxies

著者:Daichi Kashino, Simon J. Lilly, Jorryt Matthee, Anna-Christina Eilers, Ruari Mackenzie, Rongmon Bordoloi, Robert A. Simcoe

DOI: 10.3847/1538-4357/acc588

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/acc588>

#### 【関連論文情報】

雑誌名:The Astrophysical Journal

※1 論文タイトル:EIGER II. First Spectroscopic Characterisation of the Young Stars and Ionised Gas Associated with Strong  $H\beta$  and [O III] Line-emission in Galaxies at  $z = 5 - 7$  with JWST

著者: Jorryt Matthee, Ruari Mackenzie, Robert A. Simcoe, Daichi Kashino, Simon J. Lilly, Rongmon Bordoloi, Anna-Christina Eilers

DOI: 10.3847/1538-4357/acc846

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/acc846>

雑誌名:The Astrophysical Journal

論文タイトル:EIGER III. EIGER III. JWST/NIRCam observations of the ultra-luminous high-redshift quasar J0100+2802

著者: Anna-Christina Eilers, Robert A. Simcoe, Minghao Yue, Ruari Mackenzie, Jorryt Matthee, Dominika Durovcikova, Daichi Kashino, Rongmon Bordoloi, Simon J. Lilly

DOI: 10.3847/1538-4357/acd776

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/acd776>

雑誌名:Nature

※2 論文タイトル: Compact [C II] emitters around a CIV absorption complex at redshift 5.7

著者: Daichi Kashino, Simon J. Lilly, Robert A. Simcoe, Rongmon Bordoloi, Ruari Mackenzie, Jorryt Matthee, Anna-Christina Eilers

DOI: 10.1038/s41586-023-05901-3

URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05901-3>

※本学関係教員は下線