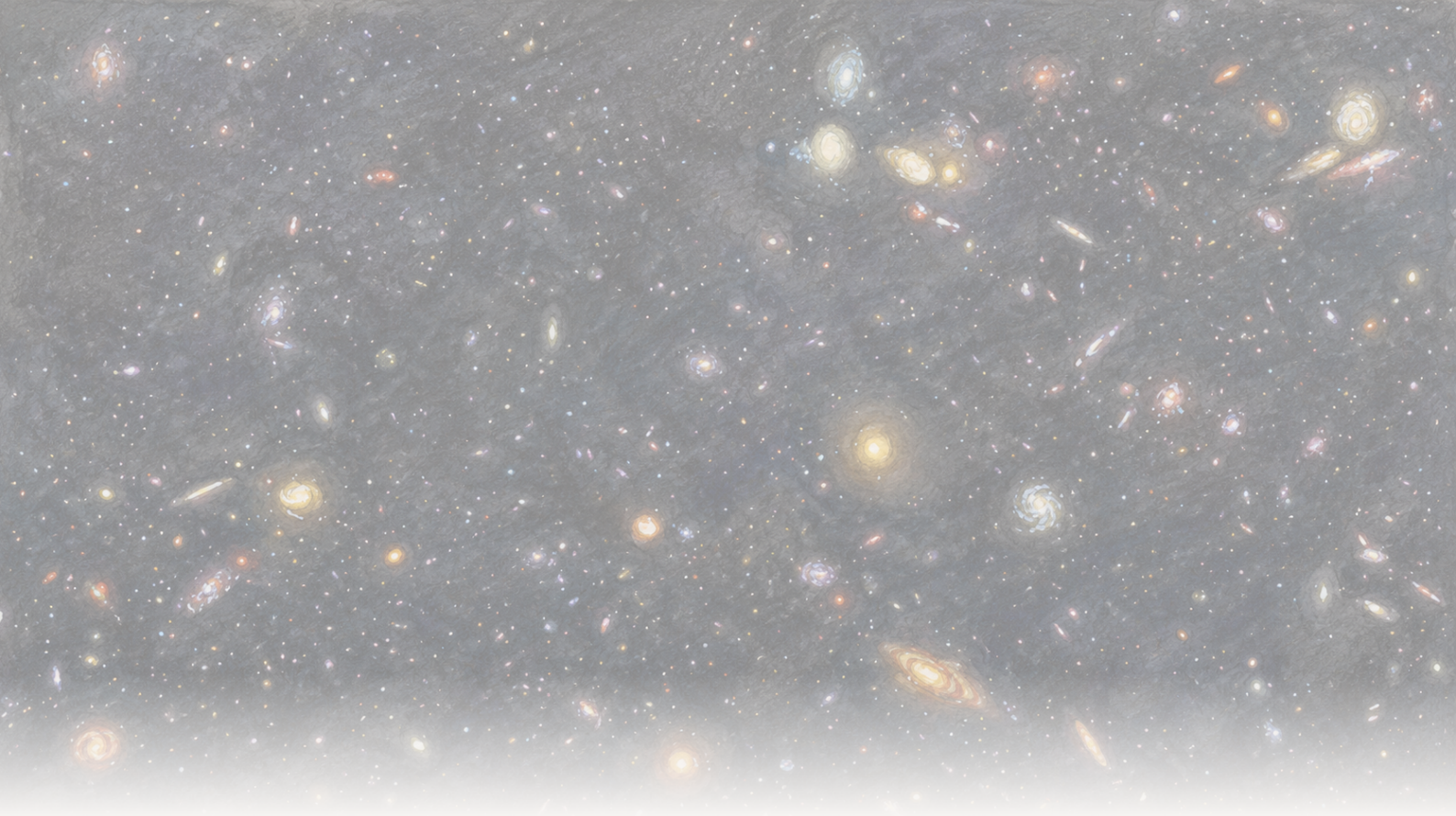




# The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

## 電離性の光が漏れ出す様子をとらえた、これまでで最も遠い銀河

天文学者たちは *JWST* とハッブルを用いて、宇宙の再電離からおよそ 2 億 5000 万年後の 1 つの銀河から逃げ出す電離性の紫外線をとらえた——この種の「漏れ」を直接観測したものとしては最も遠い。見出しになる 50~100% という脱出率は本物だが、測定されたのではなく模型を通じて再構成されたものである。より静かな結果は、漏れがもはや見えなくなったときにそれを見つける方法を、高赤方偏移で初めて検証したことである。

---

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Cinzia Vaglio and Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

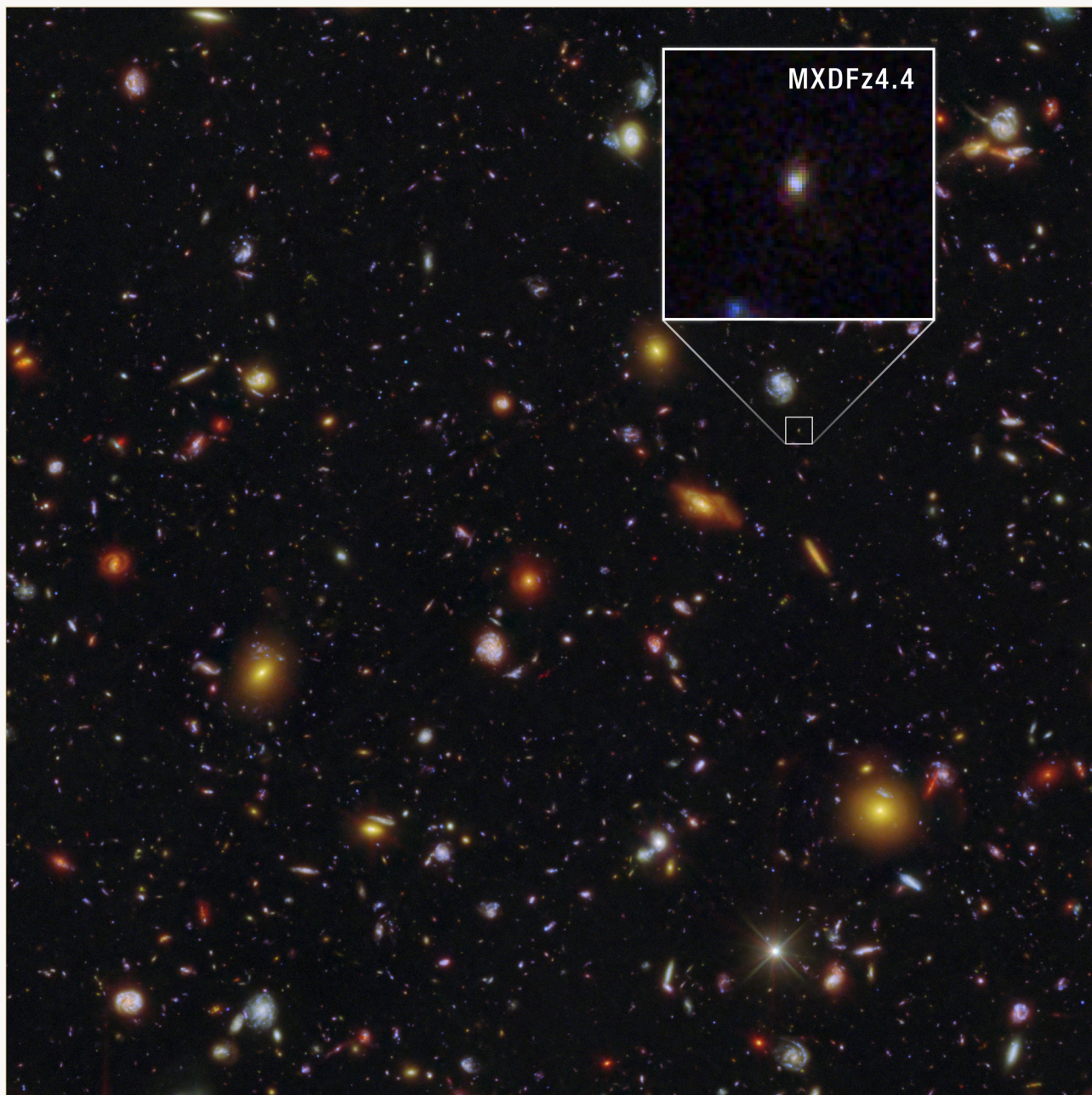
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M. Koekemoer, Mitchell Revals, Matthew J. Hayes, Claudia Scarlata, Ray A. Lucas, Norman A. Grogan, David V. Stark, Paolo Sun, Nor Pirzkal, and Louis-Gregory Strolger, *The Astrophysical Journal* (accepted, 2026) · DOI: 10.3847/1538-4357/ae75b0

## 霧を晴らした光

最初の数億年のあいだ、宇宙は不透明だった。空間は中性水素——電子がまだ結びついたままの原子——で満たされており、そして中性水素は電離性の紫外線を吸収するのが非常に得意である。すなわち波長の短い光、912 オングストローム未満（ライマン限界）で、水素原子から電子を叩き出すのに十分なエネルギーをもつ光である。すべての紫外線がこれを起こすわけではない——波長の長い紫外線は同じようには吸収されず、初期の銀河からそれが大量に見えている——だから若い宇宙が閉じ込めていたのは、まさにこの電離性の光だった。それから、その後の10億年ほどをかけて、何かが宇宙を、それらの電子を再び剥ぎ取るのに十分なだけのその光で満たし、水素を電離させ、光が自由に進めるようにした。天文学者はこれを再電離期と呼び、明白な容疑者は最初期の銀河である。すなわち、それらの内部にある高温で短命な星は電離性の紫外線を大量に放出しており、もしそれが十分な量、銀河間空間へと逃げ出したのであれば、その仕事をなし得たはずだ。

厄介なのは逃げ出したという言葉である。銀河の電離性の光の大半は決して外へ出られない——星たちが電離させようとしているまさにその銀河内部の水素によって吸収されてしまうのだ。ほんの一部分だけが空間へと漏れ出し、そしてその割合、すなわち脱出率は、この物語全体のなかで突き止めるのが最も難しい単一の数値である。さらに悪いことに、再電離のさなかそのものでは、漏れ出した光をとらえるのはほとんど不可能である。すなわち、それが晴らすのを助けている銀河間の霧が、その光が私たちに届くはるか手前でそれを吸収してしまう。だから、この漏れを研究するために、天文学者は霧が晴れた直後を、その時代の代役を務められるほど近い銀河を見なければならぬ。

Ilias Goovaerts 率いるチームは、いまや、この漏れをこれまでに観測されたなかでほぼ最も過去にさかのぼってとらえた。ハッブルと JWST による深撮像を用いて、彼らは1つのかすかな銀河——MXDFz4.4 というカタログ名——を報告している。その逃げ出していく電離性の紫外線が、ハッブルのある1つのフィルターのなかで、ぼんやりとした光のしみとして現れているのだ。この銀河は赤方偏移 4.442 に位置し、再電離が終わってからおよそ2億5000万年後にあたる。すなわち、これまでに直接検出された「漏出天体（リーカー）」のうち、記録上もっとも遠いものである。



MXDFz4.4（拡大して差し込み図に示す）は、このハッブルと JWST の深撮像の視野のなかでは、かすかなしみである——これまでに、その電離性の紫外線が漏れ出す様子を直接とらえられた最も遠い銀河であり、宇宙の再電離が終わってから約 2 億 5000 万年後の姿として見えている。

NASA, ESA, CSA, STScI, Ilias Goovaerts (STScI), Marc Rafelski (STScI, JHU), Anton Koekemoer (STScI); Image Processing: Alyssa Pagan (STScI) CC BY 4.0

この論文から広まっていく数値は脱出率であり、それは高い——銀河の電離性の光の半分から全部までのどこかである。この数値は本物だが、ここで「本物」が何を意味するのかについては注意する価値がある。それは画像から測定されたものではなく、いくつもの模型 (モデル) の連鎖を通じて再構成されたものであり、その範囲が広いのには正直な理由がある。より有用な物語は 2 つの部分からなる。すなわち、1 つのとらえられた漏れが私たちに教えられること、教えられないことと、そしてより静かな第 2 の結果——これほど過去にさかのぼって、漏れを見つける間接的な方法を、直接的な方法が使えなくなる日に備えて検証しようとする、初めての試み——である。

### 「脱出率」とは何か、そしてなぜそれがこれほどつかみどころがないのか

星——とりわけ最も大きく、最も高温で、最も若い星——は、水素原子から電子を叩き出せるほど高エネルギーの紫外線を放つ。天文学者はこれを電離放射、あるいは、その特定の波長ではライマン連続光と呼ぶ。それは再電離の通貨である。すなわち、銀河間の水素を電離したままに保つのに十分なだけのこれらの光子が解き放たれたとき、宇宙は透明になった。しかし銀河もまた水素で満ちている。銀河が作り出す電離性の光の多くは、外へ出る前に吸い取られてしまう——銀河自身のガスを電離するのに費やされるのだ。脱出率とは、銀河間空間へと抜け出す割合であり、そこでこそ、それはより広い宇宙の再電離を実際に助けることができる。それは問い全体の核心であり、そして2つの理由から測定が難しい。

第一に、再電離のあいだ、銀河間物質はまだ中性水素で満ちており、それはまさにあなたが検出しようとしている光を吸収する——だから漏れ出した光はたいてい、そもそもまったく私たちに届かない。第二に、たとえその一部が見えたとしても（その時代の直後、異例なほど澄んだ視線方向に沿って）、その検出を脱出率へと変えるということは、観測されたものを、銀河が生み出したもので割るということを意味する——そしてその生み出したものもまた、直接には見えないのだ。それをモデル化しなければならない。すなわち、銀河のほかの光、そこから推定される星形成史、そして星そのものについての仮定から。

これが、脱出率に広い誤差棒がつく理由であり、そして——銀河間吸収もまたモデル化しなければならなくなると——同じ検出が幅広い答えを支持しうる理由である。この数値は再構成であって、読み取りではない。

## 著者たちが行ったこと

- VLT の MUSE 装置による深分光で、この銀河の距離を確認した。これは単一の輝線——ライマンアルファ——を、高赤方偏移でのこの輝線に典型的な、いびつな輪郭とともにとらえ、赤方偏移を  $z=4.442$  に確定した。彼らは、前景天体との偶然の重なるの確率を  $0.0076\%$  と見積もっている。
- 逃げ出していく電離性（ライマン連続光）の光を、ハッブルの深い F435W 画像のなかで検出した——このフィルターは、この赤方偏移では、「逃げ出した」ものとして数えられる  $912$  オングストローム以下の光だけを見る。この検出は  $5.2\sim 5.3\sigma$  である（シグマは、信号が予想される雑音よりどれだけ上に位置するかを測る。 $5\sigma$  は非常に厳格な統計的閾値であって、解釈が正しいことの証明ではない——ガイド）。それが雑音ではないことを確かめるため、 $100$  万個の空っぽの空の区画のフラックスと照合された。
- この種の主張につきものの古典的な罠——「逃げ出す」光が、実際には偶然その手前に位置する低赤方偏移の銀河である、というもの——を、光源の分解された形状と、かすかな隣接天体の特注のデブレンディング（重なるの分離）を用いて排除した。
- ハッブルと JWST の色の全体をフィッティングして（CIGALE コードといくつかの星種族モデルを用いて）、この銀河の星々をモデル化し、数百万年前の最近の星形成のバーストを指し示した。
- 電離性の光が途中で銀河間物質にどれだけ吸収されたはずかを、 $1$  万本のシミュレートされた視線方向にわたってモデル化し、そのすべてを組み合わせで脱出率を導いた。
- これほど過去にさかのぼっては初めて、脱出を見つける間接的な方法——ライマンアルファ線の形状と広がり（その「ハロー割合」）——を、直接検出と照らし合わせて検証した。

## 彼らが見出したこと

- これまでに直接検出されたライマン連続光の放射源として最も遠い、 $z=4.442$  のもの。
- 逃げ出していく電離性の光そのものの、本物の検出——推論ではなく、画像のなかの  $5.2\sim 5.3\sigma$  の信号。
- 高い脱出率、仮定にもよるが  $50\sim 100\%$  の範囲——大きいのが、模型に依存する。(別の相対的な推定はさらに高く、 $100\%$  を超える。これはその定義のしかたによる癖であり——それは、逃げ出した電離性の光を、まず塵の補正をせずに銀河の紫外線と比べている——星が実際に作り出す以上の光が逃げ出しているという兆候ではない。)
- フィッティングされた星の光から得られた、最近の星形成のバーストが電離性の光の生成と脱出の両方を駆動しているという証拠。
- ライマンアルファ線の形状を高赤方偏移での脱出の追跡指標として使うことへの、著者たちの言葉でいう「慎重な支持」。

## これが証明しないこと

- これは「宇宙を再電離した銀河たち」を特定するものではない。これは1つの銀河であり、しかも再電離が終わってから約2億5000万年後に位置するものであって、そのさなかのものではない。それは、その時代へと向かう踏み石であって、その出来事の写真ではない。
- 脱出率は測定ではない。それは、観測された光を、生み出された光の模型化された推定で割り、次いで模型化された量の銀河間吸収を補正することによって再構成される——そして著者たちは意図的に有利な視線方向を採用している。というのも、その漏れ出した光がそもそも私たちに届く銀河は、平均よりも澄んだ方向に位置しているはずだからだ。その広い範囲 ( $50\sim 100\%$ 、相対的にはさらに高い) は、その模型依存性の正直な署名である。
- これは新しいライマンアルファの追跡指標を検証するものではない。単一の天体からの「慎重な支持」は、最初の検証であって、確認ではない。
- これは、それ自体では、バースト的な星形成が再電離を駆動したと決着させるものではない。それは、1つの銀河に追跡指標の解析を加えたうえに築かれた妥当な解釈であって、実証された法則ではない。

## 証拠をどう評価するか

- 強いのは、直接的なところである。すなわち、赤方偏移(特徴的な形状のライマンアルファ線、前景汚染の確率は  $0.0076\%$ )と、逃げ出す光の検出 ( $5.2\sim 5.3\sigma$ 、100万個の空っぽの開口部と照合され、前景の侵入天体という罠——これまで高赤方偏移の脱出の主張を覆してきたもの——を注意深く閉じたうえで)。
- より弱く、そしてそれを率直に認めているのは、模型化されたところである。すなわち、脱出率の値(星の模型と、選ばれた銀河間の視線方向に左右される)、再電離にとっての「意義」(1つの天体に解釈を加えたもの)、そして新しい追跡指標(最初の、慎重な検証)である。
- この論文の正直さは、その範囲のなかにある。それは単一の数値ではなく幅を報告し、追跡指標

への支持を「慎重」と呼び、さらには銀河間の透過率についての自らの推定の1つを信頼することさえ避けている。これは自らを過剰に売り込まない、注意深い論文である。誇大化の危険は、もっぱら外側にある。

## なぜこれが重要なのか

逃げ出す電離性の光の直接検出は、いまや再電離期にできるかぎり近くまで——その光がまだ、かろうじて、通り抜けられる縁まで——押し進められた。それだけでも、それ相応の価値がある。しかし、より静かな結果のほうが重要かもしれない。すなわち、いったん再電離の内側に入ると、直接的な方法は完全に失敗し、すべてが、より近く、より観測しやすい銀河で較正された間接的な追跡指標に委ねられる。そうした追跡指標の1つを、まだ本物の検出と照らし合わせて確かめられるここで検証することこそ、それを確かめられないのちの時代にそれを信頼する権利を勝ち取る方法なのだ。MXDFz4.4の価値は、「宇宙を再電離した銀河を見つけた」というよりも、むしろ「私たちは漏れを読むことを学びつつあり、暗闇に備えて自らの装置を確かめ始めている」というものである。

## 要点

ハッブルと JWST を用いた天文学者たちは、赤方偏移 4.442 にある 1 つの銀河から逃げ出す電離性の紫外線を直接検出した——この種としてはこれまでで最も遠い検出であり、宇宙の再電離が終わってから約 2 億 5000 万年後にあたる。検出そのものは確かである。広く引用されうる 50~100% という脱出率は、測定ではなく、銀河の星々のモデルと、意図的に有利にとった視線方向に沿った銀河間吸収のモデルを通じて再構成されたものであり、だからこそその範囲がこれほど広いのだ。この検出とあわせて、チームは、逃げ出す光を見つける間接的な方法——ライマンアルファ線の形状——の、高赤方偏移での初めての検証を行い、それに対する「慎重な支持」を見出した。これは注意深い、単一天体の結果である。すなわち、本物の漏れのとらえと、それに付随する正直に不確かな数値、そして、漏れがもはやまったく見えなくなったとき天文学者が必要とするであろう道具への第一歩、である。

## 冷静に見ると

**論文が示していること：**  $z = 4.442$  の銀河から逃げ出す電離性（ライマン連続光）の光の、直接的な  $5.2 \sim 5.3\sigma$  の検出——この種としてはこれまでで最も高い赤方偏移での検出——であり、前景汚染の罠を注意深く排除したうえでのもの。

**もっともらしいが証明されていないこと：** この銀河の脱出率が 50~100% であること。検出は本物だが、その割合は、（有利な視線方向に沿った）星種族と銀河間吸収のモデルを通じて再構成されており、だからこそこれほど広い範囲にわたる。もう 1 つのもっともらしいが未証明のこと：ライマンアルファ線の形状が、これほど過去にさかのぼっても脱出の追跡指標として機能すること——論文は 1 つの天体から「慎重な支持」を提示するにとどまる。

**論文が示していないこと：**これが「宇宙を再電離した」銀河であること（それはその時代よりあとに位置し、単一の天体である）、あるいはバースト的な星形成が再電離を駆動したこと（実証ではなく解釈である）。

**主な限界：**標本が1つであること。モデルの選択と、意図的に澄んだ視線方向に依存する脱出率。新しい追跡指標の、最初の、慎重な検証であること。そして、逃げ出す電離性の光が見えなくなる時代のこれほど近くでそれを研究することの、まさにその難しさ。

**一般の読者はどれほどの確信を持つべきか？**逃げ出す光が本当に検出されたこと、そしてこれがこの種としてはこれまでで最も遠いとらえであることについては、高い確信を。正確な脱出率については、低～中程度の確信を——「50～100%」を、測定ではなくモデル化された範囲として扱うこと。新しい追跡指標については、中程度の確信を。すなわち、有望な最初の確認であって、確立された道具ではない。

#### 公開後の更新

##### ・ 訂正・2026-07-28

論文の著者の一人であるイリアス・ゴーパールツ氏からのフィードバックを受け、本記事は冒頭から紫外線一般ではなく電離光を導入するようにし、電離性をもつのは波長の短い紫外線——ライマン限界である 912 オングストローム未満——だけであり、波長の長い紫外線は非電離性で、高赤方偏移の銀河から日常的に観測される、という点を明示した。

## 出典

Goovaerts et al., arXiv:2603.04517 (accepted in The Astrophysical Journal)  
<https://arxiv.org/abs/2603.04517>

The Astrophysical Journal (2026), DOI 10.3847/1538-4357/ae75b0  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae75b0>