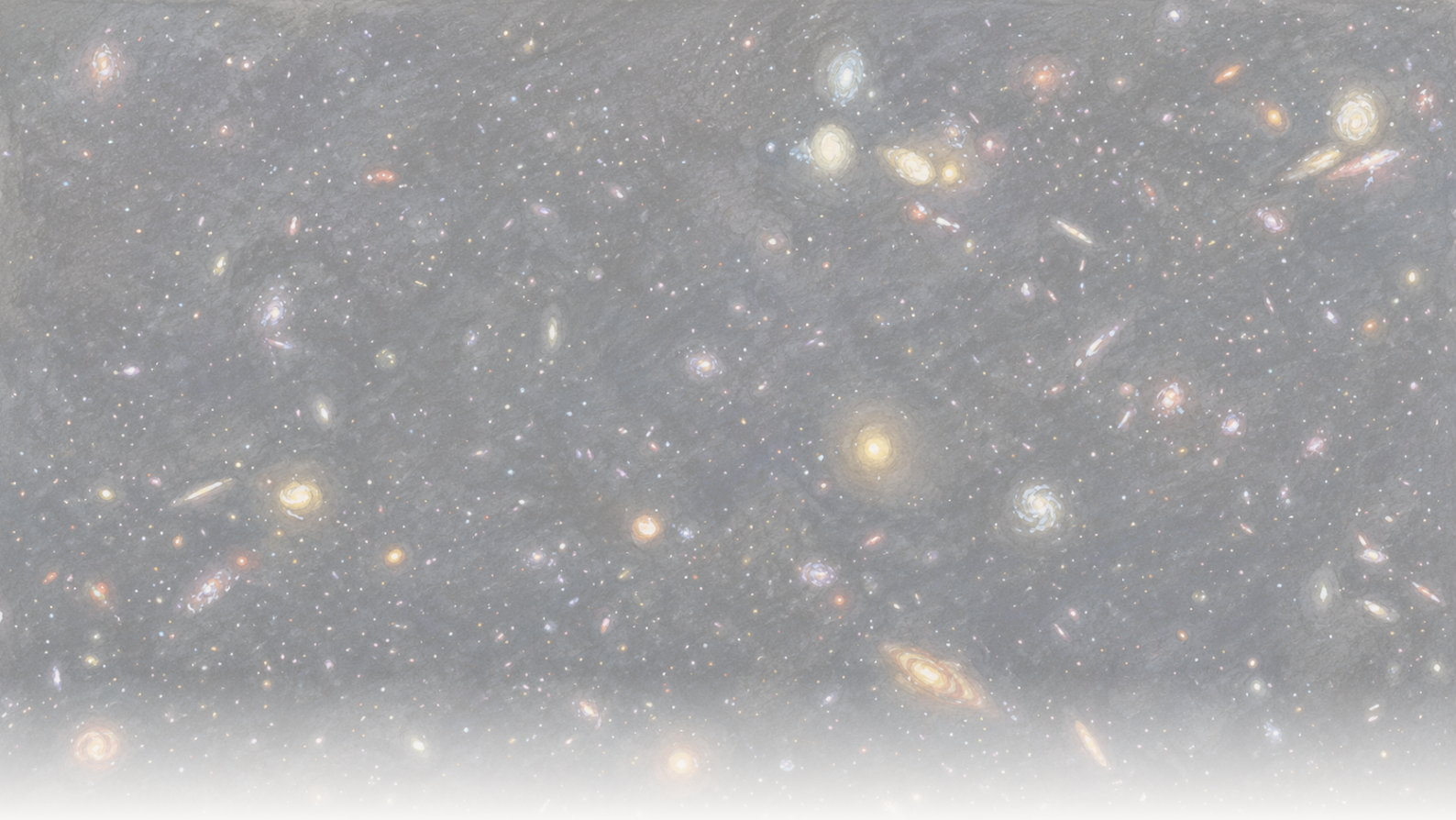


The CLEAN PAPER

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

أبعد مجرة حتى الآن التُقطت وهي تسرّب ضوءها المؤين

استخدم فلكيون *JWST* و*Hubble* لالتقاط الأشعة فوق البنفسجية المؤينة الهاربة من مجرة واحدة بعد نحو 250 مليون سنة من إعادة التأين الكوني — أبعد «تسرب» من هذا النوع شوهد مباشرة. كسر الهروب الرئيسي، 50–100%، حقيقي لكنه أُعيد بناؤه عبر نماذج ولم يُقَس مباشرة؛ والنتيجة الأهدأ هي أول اختبار عالي الانزياح الأحمر لطريقة رصد التسرب عندما لا يعود بالإمكان رؤيته مباشرة.

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

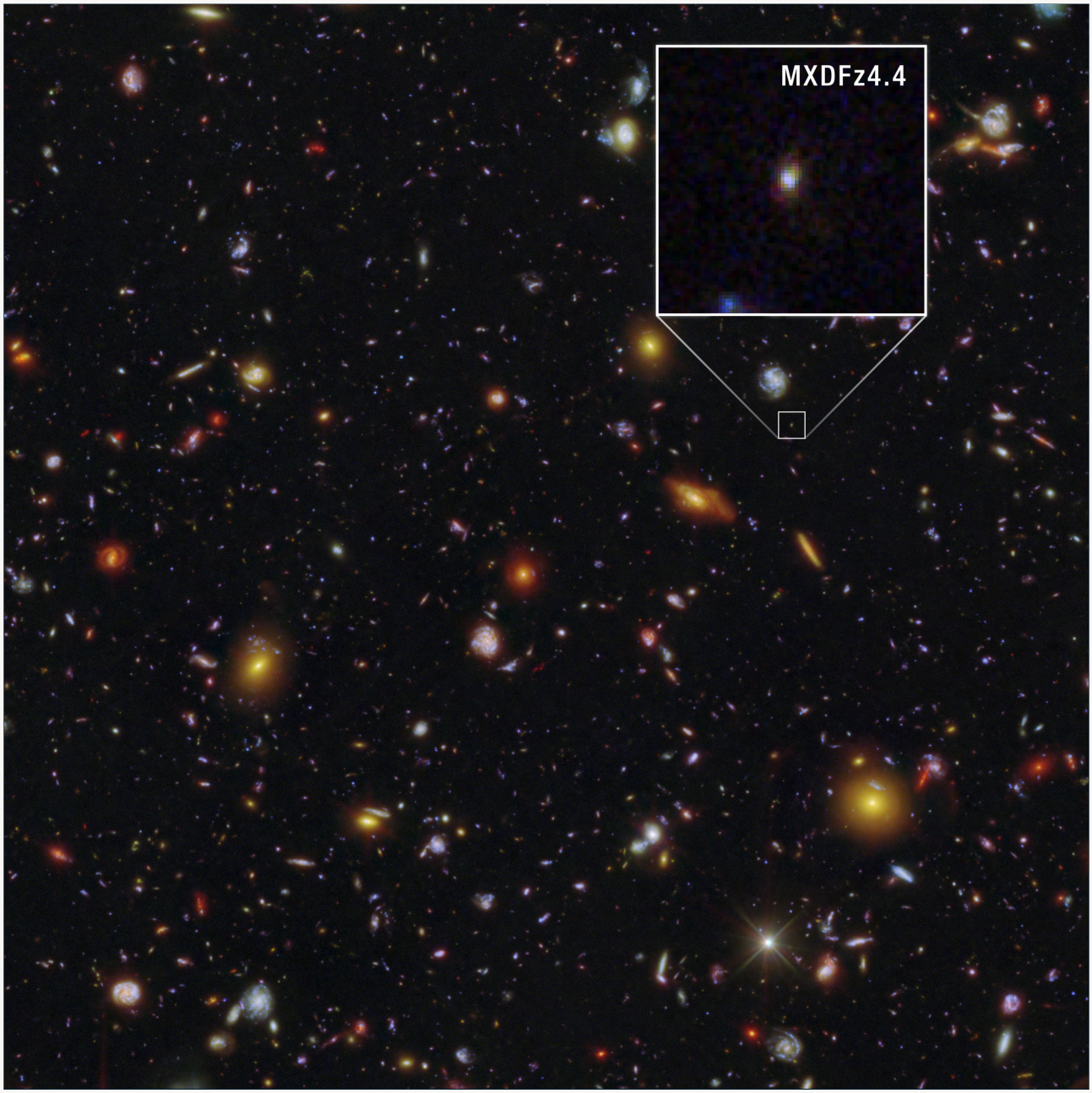
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshfit*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M. Koekemoer, Mitchell Revalski, Matthew J. Hayes, Claudia Scarlata, Ray A. Lucas, Norman A. Grogin, David V. Stark, Paolo Sun, Nor Pirzkal, and Louis-Gregory Strolger, The Astrophysical Journal (accepted, (2026 · DOI: -3847/1538.10 ae75b0/4357

الضوء الذي بدد الضباب

خلال مئات الملايين الأولى من السنين كان الكون معتمًا. امتلأ الفضاء بالهيدروجين المتعادل — ذرات ما زالت إلكتروناتها مرتبطة بها — والهيدروجين المتعادل ممتاز في امتصاص الأشعة فوق البنفسجية المؤينة: الضوء قصير الطول الموجي، دون 912 أنغستروم (أي حد لايمان)، الذي يملك طاقة كافية لانتزاع إلكترون من ذرة هيدروجين. ليست كل الأشعة فوق البنفسجية كذلك — الأطوال الموجية الأطول لا تُمتص بالطريقة نفسها، ونرى كثيرًا منها من المجرات المبكرة — لذا فهذا الضوء المؤين تحديدًا هو ما كان الكون الفتي يحجبه. ثم، خلال نحو المليار سنة التالية، أغرق شيء ما الكون بقدر كاف منه لانتزاع تلك الإلكترونات مجددًا، مؤينًا الهيدروجين ومتيحًا للضوء أن يسافر بحرية. يسمي الفلكيون ذلك **حقبة إعادة التأين**، والمشتبه بهم الواضحون هم المجرات الأولى: نجومها الحارة قصيرة العمر تطلق كميات هائلة من الأشعة فوق البنفسجية المؤينة، وإذا تسرب منها ما يكفي إلى الفضاء بين المجرات فربما قامت بالمهمة.

المشكلة في كلمة تسرب. معظم الضوء المؤين الذي تنتجه المجرة لا يخرج أصلًا — يمتصه الهيدروجين نفسه داخل المجرة الذي تحاول النجوم تأيينه. لا يتسرب إلى الفضاء إلا جزء، وهذه النسبة، **كسر الهروب** (escape fraction)، هي أصعب رقم في القصة كلها. والأسوأ أن الضوء المتسرب أثناء إعادة التأين نفسها يكاد يستحيل التقاطه: الضباب بين المجرات الذي يساعد الضوء في إزالته يمتصه قبل أن يصل إلينا بوقت طويل. لذلك، لدراسة التسرب، يجب على الفلكيين النظر إلى زمن بعد انقشاع الضباب مباشرة، إلى مجرات قريبة بما يكفي من الحقبة لتعمل كبدائل لها.

التقط فريق بقيادة Goovaerts Ilias هذا التسرب الآن في زمن أبكر تقريبًا من أي مرة سابقة. باستخدام تصوير عميق من Hubble وJWST، يصفون مجرة خافتة واحدة — MXDFz4.4 — يظهر ضوؤها فوق البنفسجي المؤين الهارب كبقعة ضوء في مرشح واحد من Hubble. تقع المجرة عند انزياح أحمر 442.4، أي نحو 250 مليون سنة بعد انتهاء إعادة التأين: أبعد «مسرّب» كُشف مباشرة حتى الآن.



MXDFz4.4 (مكبرة في الإطار) بقعة خافتة في هذا الحقل العميق من Hubble وJWST — أبعد مجرة التُقطت حتى الآن وهي تسرّب أشعتها فوق البنفسجية المؤينة مباشرة، كما بدت نحو 250 مليون سنة بعد انتهاء إعادة التأين الكوني.

NASA, ESA, CSA, STScI, Ilias Goovaerts (STScI), Marc Rafelski (STScI, JHU), Anton Koekemoer (STScI); Image Processing: Alyssa Pagan (STScI)
CC BY 0.4

الرقم الذي سينتشر من هذه الورقة هو كسر الهروب، وهو مرتفع — بين نصف الضوء المؤين للمجرة وكلّه تقريبًا. الرقم حقيقي، لكن من المهم توضيح ما تعنيه «حقيقي» هنا. لم يُقرأ من الصورة مباشرة؛ بل أُعيد بناؤه عبر سلسلة من النماذج، ونطاقه واسع لسبب مشروع. القصة الأكثر فائدة لها جزآن: ما الذي يستطيع تسرب واحد التُقط مباشرة أن يخبرنا به وما الذي لا يستطيع، ونتيجة ثانية أهدأ — أول محاولة في هذا الزمن المبكر لاختبار طريقة غير مباشرة لاكتشاف التسرب، استعدادًا للوقت الذي تتوقف فيه الطريقة المباشرة عن العمل.

ما هو «كسر الهروب»، ولماذا يصعب قياسه إلى هذا الحد

ذرات من الإلكترونات لنزع تكفي بطاقة بنفسجي فوق تبعث — عمراً والأصغر حرارة والأشد الأكبر خصوصًا — النجوم وهو .(Lyman continuum) لايمان متصل ضوء المعنية الموجية الأطوال عند أو مؤينًا، إشعاعًا هذا الفلكيون يسمي الهيدروجين.

متأينًا. المجرات بين الهيدروجين ليبقي الفوتونات هذه من كاف عدد أُطلق عندما شفافًا الكون أصبح التأين: إعادة عملة لكن المجرة مليئة بالهيدروجين أيضًا. يُمتص الكثير من الضوء المؤين الذي تنتجه قبل أن يغادرها — ويُستهلك في تأيين غازها الخاص. **كسر الهروب** هو الحصة التي تنجو إلى الفضاء بين المجرات، حيث يمكنها فعلًا المساعدة في إعادة تأيين الكون الأوسع. وهو لب السؤال كله، ومن الصعب قياسه لسببين.

أولًا، أثناء إعادة التأين يظل الوسط بين المجرات ممتلئًا بالهيدروجين المتعادل، الذي يمتص بالضبط الضوء الذي تحاول كشفه — ولذلك لا يصل الضوء المتسرب إلينا عادة. ثانيًا، حتى عندما يمكن رؤية بعضه (بعد الحقبة مباشرة وعلى خط رؤية صافي بصورة غير معتادة)، فإن تحويل هذا الكشف إلى كسر هروب يتطلب قسمة ما نرصده على ما أنتجته المجرة — وما أنتجته لا يمكن رؤيته مباشرة أيضًا. يجب نمذجته من ضوء المجرة الآخر، ومن تاريخ تشكل نجومها المستنتج، ومن افتراضات عن النجوم نفسها.

لهذا تأتي كسور الهروب بهوامش خطأ واسعة، ولماذا — عندما يجب نمذجة امتصاص الوسط بين المجرات أيضًا — يمكن للكشف نفسه أن يدعم نطاقًا واسعًا من الإجابات. الرقم إعادة بناء، لا قراءة مباشرة.

ما الذي فعله الباحثون

- أكدوا مسافة المجرة بتحليل طيفي عميق من أداة MUSE على VLT، التي التقطت خط انبعاث واحدًا — لايمان-ألفا — بملف غير متناظر نموذجي لهذا الخط عند الانزياح الأحمر العالي، مثبتًا الانزياح عند z = 442.4. وقدروا احتمال محاذاة عشوائية مع جسم أمامي بـ0.0076%.
- كشفوا الضوء المؤين الهارب (متصل لايمان) في صورة Hubble عميقة بمرشح F435W — وهو المرشح الذي يرى عند هذا الانزياح الأحمر فقط الضوء تحت 912 أنغستروم الذي يُعد «هاربًا». تبلغ دلالة الكشف $3.5–2.5\sigma$ (تقيس سيغما مدى ارتفاع الإشارة فوق الضجيج المتوقع؛ و5σ عتبة إحصائية شديدة الصرامة، لا دليلًا أن التفسير صحيح — الدليل)، وقورنت شدة الضوء بمليون رقعة فارغة من السماء للتأكد من أنها ليست ضجيجًا.
- استبعدوا الفخ الكلاسيكي لهذا النوع من الادعاءات — أن الضوء «الهارب» هو في الواقع مجرة منخفضة الانزياح الأحمر تقع صدفة أمام الهدف — باستخدام الشكل المحلول للمصدر وفصل ضوئي مخصص لجار خافت.
- نمذجوا نجوم المجرة بملاءمة ألوانها كاملة من Hubble+JWST (باستخدام CIGALE وعدة نماذج لسكان النجوم)، وهو ما أشار إلى طفرة حديثة في تشكل النجوم قبل بضعة ملايين من السنين.
- نمذجوا مقدار الضوء المؤين الذي كان الوسط بين المجرات سيمتصه في الطريق عبر 10 آلاف خط رؤية محاكى، وجمعوا ذلك كله لاشتقاق كسر الهروب.
- اختبروا، للمرة الأولى في هذا الزمن المبكر، طريقة غير مباشرة لرصد الهروب — شكل وامتداد خط لايمان-ألفا («نسبة الهالة») — مقابل الكشف المباشر.

ماذا وجدوا

- أبعد باعث لمتصل لايمان كُشف مباشرة حتى الآن، عند z = 442.4.

- كشفًا حقيقيًا للضوء المؤين الهارب نفسه — ليس استنتاجًا، بل إشارة في الصورة عند $2.5–3.5\sigma$.
- كسر هروب مرتفعًا، بين 50 و100% بحسب الافتراضات — كبيرًا، لكنه معتمد على النموذج. (تقدير نسبي منفصل يرتفع حتى فوق 100%. هذه غرابة في تعريفه — فهو يقارن الضوء المؤين الهارب بضوء المجرة فوق البنفسجي من دون تصحيح الغبار أولًا — وليس علامة على أن ضوءًا أكثر يهرب مما تنتجه النجوم.)
- دليلًا من ملاءمة ضوء النجوم على أن طفرة حديثة في تشكل النجوم تقود إنتاج الضوء المؤين وهروبه معًا.
- «دعمًا حذرًا»، بعبارة المؤلفين، لاستخدام شكل خط لايمان-ألفا كمتتبع للهروب عند الانزياح الأحمر العالي.

ما الذي لا تثبته هذه الدراسة

- لا تحدد «المجرات التي أعادت تأيين الكون». هذه مجرة واحدة تقع نحو 250 مليون سنة بعد انتهاء إعادة التأين، لا خلالها. إنها خطوة نحو الحقبة، لا صورة للحدث.
- كسر الهروب **ليس قياسًا مباشرًا.** يُعاد بناؤه بقسمة الضوء المرصود على تقدير منمذج للضوء المنتج، ثم تصحيح امتصاص بين المجرات منمذج أيضًا — ويختار المؤلفون عمدًا خط رؤية ملائمًا لأن المجرة التي يصل ضوؤها الهارب إلينا أصلًا يجب أن تكون في اتجاه أوضح من المتوسط. النطاق الواسع (50–100%، وأعلى بالنسبية) هو العلامة الصادقة لاعتماد النتيجة على النموذج.
- لا تؤكد المتتبع الجديد بلايمان-ألفا. «دعم حذر» من جسم واحد هو اختبار أول، لا توثيقًا نهائيًا.
- ولا تثبت بمفردها أن تشكل النجوم المتقطع هو ما قاد إعادة التأين. هذا تفسير معقول مبني على مجرة واحدة وتحليل المتتبع، لا قانون مثبت.

ما مدى قوة الدليل

- **قوي** حيث يكون مباشرًا: الانزياح الأحمر (خط لايمان-ألفا ذو شكل مميز، مع احتمال 0.0076% لتلوث أمامي) وكشف الضوء الهارب ($2.5–3.5\sigma$، مقارنة بمليون فتحة فارغة، مع إغلاق نفخ الجسم الأمامي بعناية — وهو الفخ الذي أسقط ادعاءات هروب عالية الانزياح الأحمر من قبل).
- **أضعف، وبصراحة، حيث يكون منمذجًا:** قيمة كسر الهروب (تعتمد على نموذج النجوم وخط الرؤية بين المجرات المختار)، ودلالته لإعادة التأين (جسم واحد مع تفسير)، والمتتبع الجديد (اختبار أول حذر).
- صدق الورقة يظهر في نطاقاتها. تبلغ عن مجالات لا أرقام مفردة، وتسمي دعم المتتبع «حذرًا»، بل ترفض الوثوق بأحد تقديراتها الخاصة لنفاذية الوسط بين المجرات. هذه ورقة حذرة لا تبالغ في بيع نفسها؛ خطر التضخيم يأتي من الخارج.

لماذا يهم ذلك

دُفعت عمليات الكشف المباشر للضوء المؤين الهارب الآن إلى أقرب ما يمكن تقريبًا من حقبة إعادة التأين — إلى الحافة التي ما زال الضوء عندها بالكاد يعبر. وهذا ذو قيمة في حد ذاته. لكن النتيجة الأهدأ قد تكون أهم: عندما تدخل داخل إعادة التأين تفشل الطريقة المباشرة تمامًا، ويعتمد كل شيء على متتبعات غير مباشرة تُعاير على مجرات أقرب وأسهل. اختبار أحد هذه المتتبعات هنا، حيث ما زال بإمكانك مقارنته بكشف حقيقي، هو ما يمنحك حق الثقة به لاحقًا حيث لا تستطيع. قيمة MXDFz4.4 أقل في «وجدنا مجرة أعادت تأيين الكون»

وأكثر في «نتعلم قراءة التسرب، ونبدأ بفحص أدواتنا استعدادًا للظلام».

خلاصة واضحة

استخدم فلكيون Hubble وJWST لكشف الأشعة فوق البنفسجية المؤينة الهاربة مباشرة من مجرة واحدة عند انزياح أحمر 442.4 — أبعد كشف من هذا النوع حتى الآن، بعد نحو 250 مليون سنة من انتهاء إعادة التأين الكوني. الكشف نفسه متين. أما كسر الهروب المتداول، 50–100%، فليس قياسًا مباشرًا بل إعادة بناء عبر نماذج لنجوم المجرة ولامتصاص الوسط بين المجرات على خط رؤية مختار عمدًا لأنه ملائم، ولذلك نطاقه واسع. إلى جانب الكشف، أجرى الفريق أول اختبار عالي الانزياح الأحمر لطريقة غير مباشرة لرصد الضوء الهارب — شكل خط لايمان-ألفا — ووجد «دعمًا حذرًا» لها. إنها نتيجة دقيقة من جسم واحد: تسرب حقيقي التُقط، ورقم غير يقيني صراحة مرتبط به، وخطوة أولى نحو الأدوات التي سيحتاجها الفلكيون عندما يصبح التسرب غير قابل للرؤية تمامًا.

مراجعة بلا تهويل

ما الذي تُظهره الورقة: كشفًا مباشرًا بدلالة σ3.5–2.5 للضوء المؤين الهارب (متصل لايمان) من مجرة عند z = 442.4 — أعلى انزياح أحمر لكشف من هذا النوع حتى الآن — مع استبعاد دقيق لفخ التلوث بجسم أمامي.

ما هو معقول لكنه غير مثبت: أن كسر هروب المجرة 50–100%. الكشف حقيقي؛ أما الكسر فأعيد بناؤه عبر نماذج لسكان النجوم وامتصاص الوسط بين المجرات (وعلى خط رؤية ملائم)، ولذلك يمتد على مجال واسع. ومعقول أيضًا لكنه غير مثبت أن شكل لايمان-ألفا يعمل متتبعًا للهروب في هذا الزمن — الورقة تقدم «دعمًا حذرًا» من جسم واحد.

ما الذي لا تُظهره: أن هذه مجرة «أعادت تأيين الكون» (فهي تقع بعد الحقبة وهي جسم واحد)، أو أن تشكل النجوم المتقطع قاد إعادة التأين (تفسير لا إثبات).

أهم القيود: عينة من جسم واحد؛ وكسر هروب يعتمد على خيارات النماذج وخط رؤية صافي عمدًا؛ واختبار أول حذر للمتتبع الجديد؛ والصعوبة الشديدة لدراسة الضوء المؤين الهارب بهذا القرب من الحقبة التي يصبح فيها غير مرئي.

ما مقدار الثقة المناسب للقارئ العام؟ ثقة عالية بأن الضوء الهارب كُشف فعلًا، وأن هذا أبعد التقاط مباشر له حتى الآن. وثقة منخفضة إلى متوسطة في كسر الهروب الدقيق — تعامل مع «50–100%» كنطاق منمذج لا قياس. وثقة متوسطة في المتتبع الجديد: فحص أول واعد، لا أداة محسومة.

تحديثات ما بعد النشر

- **تصحيح · 28-07-2026**

بعد ملاحظات من Ilias Goovaerts، أحد مؤلفي الورقة، أصبح المقال يعرّف الضوء المؤين منذ الافتتاح بدل الحديث عن الأشعة فوق البنفسجية عمومًا، موضحًا أن فوق البنفسجي قصير الطول الموجي فقط — دون حد لايمان 912 أنغستروم — هو المؤين، بينما الأطوال الموجية

الأطول غير مؤينة وتُرصد بصورة روتينية من المجرات عالية الانزياح الأحمر.

المصادر

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

ae75b0/4357-3847/1538.10 DOI ,(2026) Journal Astrophysical The
https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae75b0