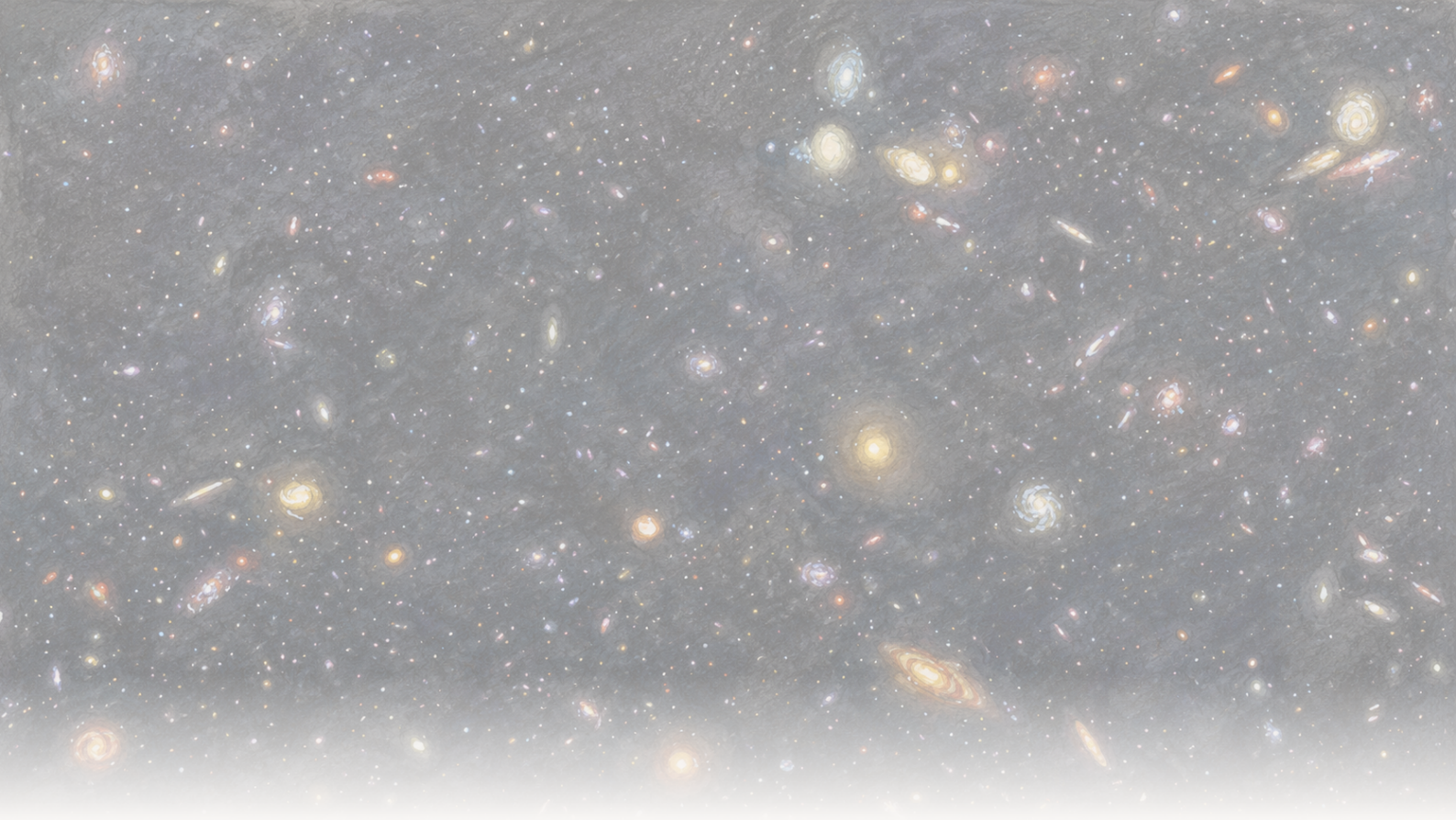


The Clean Paper

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

Galaksi paling jauh setakat ini yang dikesan membocorkan cahaya pengionnya

Ahli astronomi menggunakan JWST dan Hubble untuk menangkap ultraungu pengion yang terlepas daripada sebuah galaksi tunggal kira-kira 250 juta tahun selepas reionisasi kosmik — 'kebocoran' seumpamanya yang paling jauh pernah dilihat secara langsung. Pecahan pelepasan utama 50–100% itu nyata tetapi dibina semula melalui model, bukan diukur; hasil yang lebih senyap ialah ujian pertama pada anjakan merah tinggi tentang cara mengesan kebocoran itu apabila ia tidak lagi dapat dilihat.

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

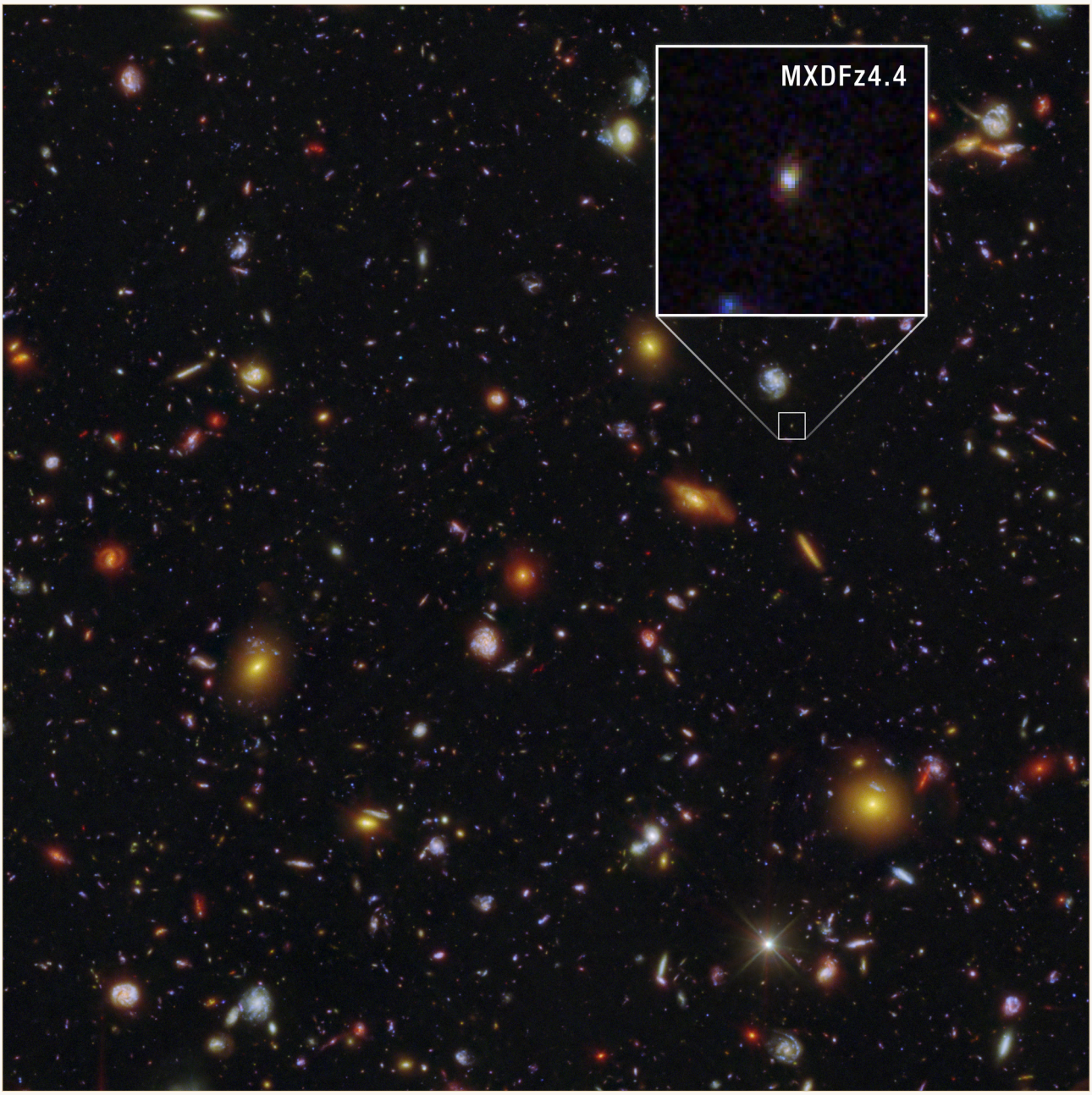
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M. Koekemoer, Mitchell 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: 10.3847/1538-4357/ae75b0

Cahaya yang menyingkirkan kabus

Untuk beberapa ratus juta tahun pertamanya, alam semesta bersifat legap. Ruang dipenuhi hidrogen neutral — atom yang elektronnya masih terikat — dan hidrogen neutral sangat cekap menyerap ultraungu *pengion*: cahaya berpanjang gelombang pendek, di bawah 912 ångström (*had Lyman*), yang cukup bertenaga untuk menyingkirkan elektron daripada atom hidrogen. Bukan semua ultraungu melakukan perkara ini — ultraungu berpanjang gelombang lebih panjang tidak diserap dengan cara yang sama, dan kita memang melihat banyak daripadanya daripada galaksi awal — jadi secara khusus cahaya pengion inilah yang terperangkap dalam alam semesta muda. Kemudian, sepanjang kira-kira satu bilion tahun berikutnya, sesuatu membanjiri kosmos dengan cahaya ini dalam jumlah yang cukup untuk menanggalkan semula elektron tersebut, mengionkan hidrogen dan membolehkan cahaya bergerak dengan bebas. Ahli astronomi menamakan tempoh ini zaman reionisasi, dan calon yang paling jelas ialah galaksi-galaksi pertama: bintang panas dan berusia pendek di dalamnya menghasilkan ultraungu pengion dalam jumlah besar, dan jika cukup banyak cahaya itu terlepas ke ruang antara galaksi, galaksi-galaksi tersebut boleh melakukan tugas itu.

Masalahnya terletak pada perkataan *terlepas*. Sebahagian besar cahaya pengion sesebuah galaksi tidak pernah keluar — ia diserap oleh hidrogen yang sama di dalam galaksi yang cuba diionkan oleh bintang-bintang itu. Hanya sebahagian yang bocor ke ruang, dan bahagian itu, iaitu *pecahan pelepasan* (*escape fraction*), ialah satu-satunya nombor yang paling sukar ditentukan dalam keseluruhan cerita ini. Lebih menyukarkan lagi, semasa reionisasi itu sendiri, cahaya yang bocor hampir mustahil ditangkap: kabus antara galaksi yang sedang dibantu untuk dibersihkan oleh cahaya itu menyerapnya lama sebelum ia sampai kepada kita. Jadi untuk mengkaji kebocoran tersebut, ahli astronomi perlu melihat sejurus *selepas* kabus itu terangkat, pada galaksi yang cukup dekat dengan zaman tersebut untuk dijadikan wakilnya.

Pasukan yang diketuai Ilias Goovaerts kini telah menangkap kebocoran itu hampir sejauh ke masa lampau yang pernah dilihat. Menggunakan pengimejan mendalam daripada Hubble dan JWST, mereka melaporkan sebuah galaksi malap tunggal — dikatalogkan sebagai MXDFz4.4 — yang ultraungu pengionnya yang terlepas kelihatan sebagai tompokan cahaya dalam satu penapis Hubble. Galaksi itu berada pada anjakan merah 4.442, kira-kira 250 juta tahun selepas reionisasi berakhir: galaksi “pembocor” paling jauh yang pernah dikesan secara langsung.



MXDFz4.4 (ditunjukkan dalam pembesaran, sisipan) ialah tompokan malap dalam medan dalam Hubble dan JWST ini — galaksi paling jauh setakat ini yang dikesan secara langsung membocorkan ultraungu pengionnya, dilihat kira-kira 250 juta tahun selepas reionisasi kosmik berakhir.

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

Nombor daripada kertas ini yang paling mungkin tersebar luas ialah pecahan pelepasan, dan nilainya tinggi — antara kira-kira separuh hingga keseluruhan cahaya pengion galaksi itu. Nombor itu nyata, tetapi kita perlu berhati-hati tentang apa yang dimaksudkan dengan “nyata” di sini. Ia tidak diukur terus daripada imej; ia dibina semula melalui satu rangkaian model, dan julatnya luas atas sebab yang wajar. Cerita yang lebih berguna mempunyai dua bahagian: apa yang boleh dan tidak boleh kita pelajari daripada satu kebocoran yang berjaya ditangkap, dan hasil kedua yang lebih senyap — percubaan pertama pada sejauh ini ke masa lampau untuk menguji kaedah tidak langsung bagi mengesan kebocoran itu, sebelum tiba zaman apabila kaedah langsung tidak lagi berfungsi.

Apakah "pecahan pelepasan", dan mengapa ia begitu sukar ditentukan

Bintang — khususnya yang paling besar, paling panas dan paling muda — memancarkan ultraungu yang cukup bertenaga untuk menyingkirkan elektron daripada atom hidrogen. Ahli astronomi memanggilnya sinaran pengion, atau pada panjang gelombang khusus yang terlibat, cahaya *kontinum Lyman*. Ia ialah mata wang reionisasi: alam semesta menjadi telus apabila cukup banyak foton ini dilepaskan untuk mengekalkan hidrogen antara galaksi dalam keadaan terion.

Tetapi sesebuah galaksi juga penuh dengan hidrogen. Sebahagian besar cahaya pengion yang dihasilkan galaksi diserap sebelum sempat keluar — digunakan untuk mengionkan gas galaksi itu sendiri. *Pecahan pelepasan* ialah bahagian yang berjaya keluar ke ruang antara galaksi, tempat ia benar-benar boleh membantu mereionisasikan alam semesta yang lebih luas. Inilah inti seluruh persoalan, dan ia sukar diukur atas dua sebab.

Pertama, semasa reionisasi, medium antara galaksi masih dipenuhi hidrogen neutral, yang menyerap tepat cahaya yang cuba anda kesan — jadi cahaya yang bocor biasanya langsung tidak sampai kepada kita. Kedua, walaupun anda *boleh* melihat sebahagiannya (sejurus selepas zaman itu, sepanjang garis pandang yang luar biasa jernih), menukar pengesanan tersebut kepada pecahan pelepasan bermaksud membahagikan apa yang diperhatikan dengan apa yang dihasilkan galaksi — dan jumlah yang dihasilkan itu juga tidak dapat dilihat secara langsung. Ia perlu dimodelkan: daripada cahaya lain galaksi, sejarah pembentukan bintang yang disimpulkan, dan andaian tentang bintang itu sendiri.

Itulah sebabnya pecahan pelepasan mempunyai julat ketidakpastian yang luas, dan mengapa — apabila penyerapan antara galaksi juga perlu dimodelkan — pengesanan yang sama boleh menyokong julat jawapan yang besar. Nombor itu ialah hasil pembinaan semula, bukan bacaan langsung.

Apa yang dilakukan oleh para penulis

- Mengesahkan jarak galaksi dengan spektroskopi mendalam daripada instrumen MUSE pada VLT, yang menangkap satu garis pancaran — Lyman-alpha — dengan profil tidak simetri yang tipikal bagi garis itu pada anjakan merah tinggi, lalu menetapkan anjakan merah pada $z = 4.442$. Mereka menganggarkan kebarangkalian penjajaran kebetulan dengan objek latar hadapan pada 0.0076%.
- Mengesan cahaya pengion (kontinum Lyman) yang terlepas dalam imej Hubble F435W yang sangat dalam — penapis yang, pada anjakan merah ini, hanya melihat cahaya di bawah 912 ångström yang dikira sebagai "terlepas". Pengesanan itu berada pada 5.2–5.3σ (sigma mengukur sejauh mana sesuatu isyarat berada di atas hingar yang dijangka; 5σ ialah ambang statistik yang sangat ketat, bukan bukti bahawa tafsirannya benar — panduan), dan disemak silang dengan fluks dalam sejuta kawasan langit kosong untuk memastikan ia bukan hingar.
- Menolak perangkap klasik bagi dakwaan seperti ini — bahawa cahaya "yang terlepas" sebenarnya datang daripada galaksi beranjakan merah rendah yang kebetulan berada di hadapan — menggunakan bentuk sumber yang dapat diuraikan serta pemisahan tersuai (*de-blending*) bagi jiran malap.
- Memodelkan bintang dalam galaksi dengan memadankan keseluruhan warna Hubble-plus-

JWSTnya (menggunakan kod CIGALE dan beberapa model populasi bintang), yang menunjukkan letusan pembentukan bintang baru-baru ini, beberapa juta tahun lalu.
- Memodelkan berapa banyak cahaya pengion yang akan diserap oleh medium antara galaksi sepanjang perjalanan, merentasi 10,000 garis pandang simulasi, kemudian menggabungkan semuanya untuk memperoleh pecahan pelepasan.
- Menguji, buat kali pertama sejauh ini ke masa lampau, kaedah *tidak langsung* untuk mengesan pelepasan — bentuk dan keluasan garis Lyman-alpha ("pecahan halo"nya) — dengan membandingkannya terhadap pengesanan langsung.

Apa yang mereka temui

- Pemancar kontinum Lyman paling jauh yang pernah dikesan secara langsung setakat ini, pada z = 4.442.
- Pengesanan sebenar cahaya pengion yang terlepas itu sendiri — bukan inferens, tetapi isyarat dalam imej pada 5.2–5.3σ.
- Pecahan pelepasan yang tinggi, dalam julat 50–100% bergantung pada andaian — besar, tetapi bergantung pada model. (Anggaran *relatif* yang berasingan malah lebih tinggi, melebihi 100%. Ini ialah kesan sampingan cara ia ditakrifkan — ia membandingkan cahaya pengion yang terlepas dengan ultraungu galaksi tanpa terlebih dahulu membetulkan kesan habuk — bukan petanda bahawa lebih banyak cahaya terlepas daripada yang sebenarnya dihasilkan oleh bintang.)
- Bukti daripada cahaya bintang yang dipadankan bahawa letusan pembentukan bintang baru-baru ini memacu kedua-dua penghasilan dan pelepasan cahaya pengion.
- "Sokongan berhati-hati," menurut kata-kata para penulis, untuk menggunakan bentuk garis Lyman-alpha sebagai penjejak pelepasan pada anjakan merah tinggi.

Apa yang tidak dibuktikan oleh kajian ini

- Ia **tidak** mengenal pasti "galaksi-galaksi yang mereionisasikan alam semesta." Ini satu galaksi, dan ia berada kira-kira 250 juta tahun *selepas* reionisasi berakhir, bukan semasa reionisasi. Ia batu loncatan menuju zaman itu, bukan gambaran peristiwanya.
- Pecahan pelepasan itu **bukan** satu ukuran langsung. Ia dibina semula dengan membahagikan cahaya yang diperhatikan dengan anggaran *bermodel* bagi cahaya yang dihasilkan, kemudian membetulkannya untuk jumlah penyerapan antara galaksi yang juga *dimodelkan* — dan para penulis sengaja menggunakan garis pandang yang menguntungkan, kerana galaksi yang cahaya bocornya sampai kepada kita mestilah terletak pada arah yang lebih jernih daripada purata. Julat luas (50–100%, dan lebih tinggi dalam istilah relatif) ialah tanda jujur kebergantungan kepada model itu.
- Ia **tidak** mengesahkan penjejak Lyman-alpha yang baharu. "Sokongan berhati-hati" daripada satu objek ialah ujian pertama, bukan pengesahan.
- Ia **tidak**, dengan sendirinya, membuktikan bahawa pembentukan bintang secara letusan memacu reionisasi. Itu ialah tafsiran munasabah yang dibina daripada satu galaksi ditambah

analisis penjejak, bukan hukum yang telah dibuktikan.

Sejauh mana kukuh buktinya?

- **Kuat** pada bahagian yang langsung: anjakan merah (garis Lyman-alpha berbentuk khas, dengan kebarangkalian 0.0076% bahawa ia pencemaran latar hadapan) dan pengesanan cahaya yang terlepas (5.2–5.3σ, diperiksa terhadap sejuta apertur kosong, dengan perangkap objek latar hadapan — perkara yang pernah menggagalkan dakwaan pelepasan pada anjakan merah tinggi sebelum ini — ditutup dengan teliti).
- **Lebih lemah, dan dinyatakan secara terbuka, pada bahagian yang dimodelkan:** *nilai* pecahan pelepasan (yang bergantung pada model bintang dan garis pandang antara galaksi yang dipilih), "kepentingannya" bagi reionisasi (satu objek, ditambah tafsiran), dan penjejak baharu (ujian pertama yang berhati-hati).
- Kejujuran kertas ini terletak pada julatnya. Ia melaporkan julat dan bukannya satu nombor, menyifatkan sokongan untuk penjejaknya sebagai "berhati-hati," malah enggan mempercayai salah satu anggarannya sendiri bagi penghantaran antara galaksi. Ini kertas yang teliti dan tidak membesar-besarkan hasilnya; risiko gembar-gembur datang sepenuhnya dari luar.

Mengapa ia penting

Pengesanan langsung cahaya pengion yang terlepas kini telah ditolak hampir sedekat mungkin dengan zaman reionisasi — hingga ke sempadan tempat cahaya itu masih, hampir-hampir sahaja, dapat menembusinya. Itu sendiri sudah bernilai. Tetapi hasil yang lebih senyap mungkin lebih penting: sebaik sahaja anda berada *di dalam* reionisasi, kaedah langsung gagal sepenuhnya, dan segala-galanya bergantung pada penjejak tidak langsung yang ditentukur menggunakan galaksi yang lebih dekat dan lebih mudah dikaji. Menguji salah satu penjejak itu di sini, ketika anda masih boleh membandingkannya dengan pengesanan sebenar, ialah cara untuk memperoleh alasan mempercayainya kelak, apabila anda tidak lagi boleh membuat semakan itu. Nilai MXDFz4.4 bukanlah sangat "kami menemui galaksi yang mereionisasikan alam semesta," tetapi lebih kepada "kami sedang belajar membaca kebocoran itu, dan mula memeriksa instrumen kami untuk zaman gelap."

Ringkasan utama

Ahli astronomi yang menggunakan Hubble dan JWST telah mengesan secara langsung ultraungu pengion yang terlepas daripada sebuah galaksi tunggal pada anjakan merah 4.442 — pengesanan seumpamanya yang paling jauh setakat ini, kira-kira 250 juta tahun selepas reionisasi kosmik berakhir. Pengesanan itu sendiri kukuh. Pecahan pelepasan 50–100% yang mudah dipetik secara meluas bukanlah ukuran langsung tetapi hasil pembinaan semula, melalui model bintang galaksi dan penyerapan antara galaksi sepanjang garis pandang yang sengaja dipilih kerana menguntungkan,

sebab itulah julatnya begitu luas. Di samping pengesanan itu, pasukan tersebut menjalankan ujian pada anjakan merah tinggi yang pertama bagi kaedah tidak langsung untuk mengenal pasti cahaya yang terlepas — bentuk garis Lyman-alpha — dan menemui "sokongan berhati-hati" untuknya. Ini ialah hasil teliti daripada satu objek: kebocoran yang benar-benar ditangkap, nombor dengan ketidakpastian yang dinyatakan secara jujur, dan langkah pertama menuju alat yang diperlukan ahli astronomi apabila kebocoran itu sudah tidak dapat dilihat sama sekali.

Semakan tanpa gembar-gembur

Apa yang ditunjukkan oleh kertas ini: Pengesanan langsung pada 5.2–5.3σ bagi cahaya pengion (kontinum Lyman) yang terlepas daripada galaksi pada z = 4.442 — pengesanan seumpamanya dengan anjakan merah tertinggi setakat ini — dengan perangkap pencemaran latar hadapan disingkirkan secara teliti.

Apa yang munasabah tetapi belum dibuktikan: Bahawa pecahan pelepasan galaksi ialah 50–100%. Pengesanan itu nyata; pecahan tersebut dibina semula melalui model populasi bintang dan penyerapan antara galaksi (sepanjang garis pandang yang menguntungkan), sebab itulah julatnya begitu luas. Turut munasabah tetapi belum dibuktikan: bahawa bentuk garis Lyman-alpha berfungsi sebagai penjejak pelepasan sejauh ini ke masa lampau — kertas tersebut menawarkan "sokongan berhati-hati" daripada satu objek.

Apa yang tidak ditunjukkannya: Bahawa ini ialah galaksi "yang mereionisasikan alam semesta" (ia berada selepas zaman itu, dan merupakan satu objek), atau bahawa pembentukan bintang secara letusan memacu reionisasi (satu tafsiran, bukan demonstrasi).

Had utama: Sampel satu objek; pecahan pelepasan yang bergantung pada pilihan model dan garis pandang yang sengaja dipilih kerana jernih; ujian pertama yang berhati-hati bagi penjejak baharu; dan kesukaran besar mengkaji cahaya pengion yang terlepas begitu hampir dengan zaman ketika ia menjadi tidak kelihatan.

Sejauh mana pembaca umum patut yakin? Tinggi bahawa cahaya yang terlepas benar-benar dikesan, dan bahawa ini ialah pengesanan seumpamanya yang paling jauh setakat ini. Rendah hingga sederhana bagi nilai tepat pecahan pelepasan — anggap "50–100%" sebagai julat bermodel, bukan ukuran. Sederhana bagi penjejak baharu: semakan pertama yang menjanjikan, bukan alat yang sudah mapan.

Kemas kini selepas penerbitan

- **Pembetulan · 2026-07-28**

  Selepas maklum balas daripada Ilias Goovaerts, salah seorang penulis kertas tersebut, artikel kini memperkenalkan cahaya pengion sejak pembukaan dan bukannya ultraungu secara umum, dengan menjelaskan bahawa hanya ultraungu berpanjang gelombang pendek — di bawah had Lyman 912 ångström — bersifat pengion, manakala ultraungu berpanjang gelombang lebih panjang tidak mengion

dan lazimnya diperhatikan daripada galaksi beranjakan merah tinggi.

Sumber

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