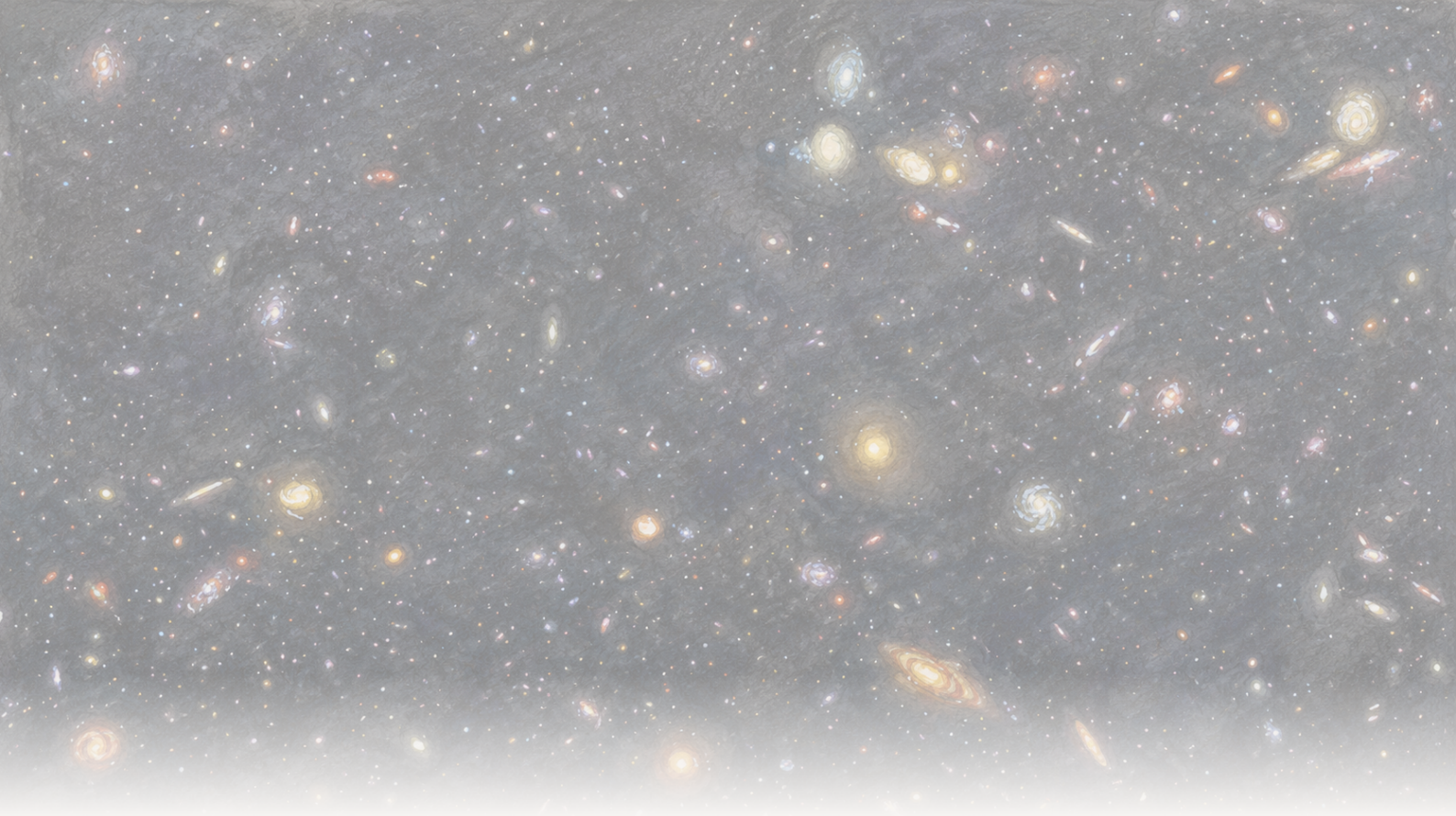




The CLEAN PAPER

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

迄今最遠的被捕捉到洩漏其電離光的星系

天文學家利用 *JWST* 和哈勃捕捉到了宇宙再電離結束後約 2.5 億年的一個單一星系逃逸的電離紫外線——這是迄今直接看到的最遠的此類「洩漏」。標題中 50-100% 的逃逸分數是真實的，但是通過模型重建而非測量得出的；更安靜的結果是對如何在該洩漏不再能被直接看見時發現它的一次首次高紅移測試。

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

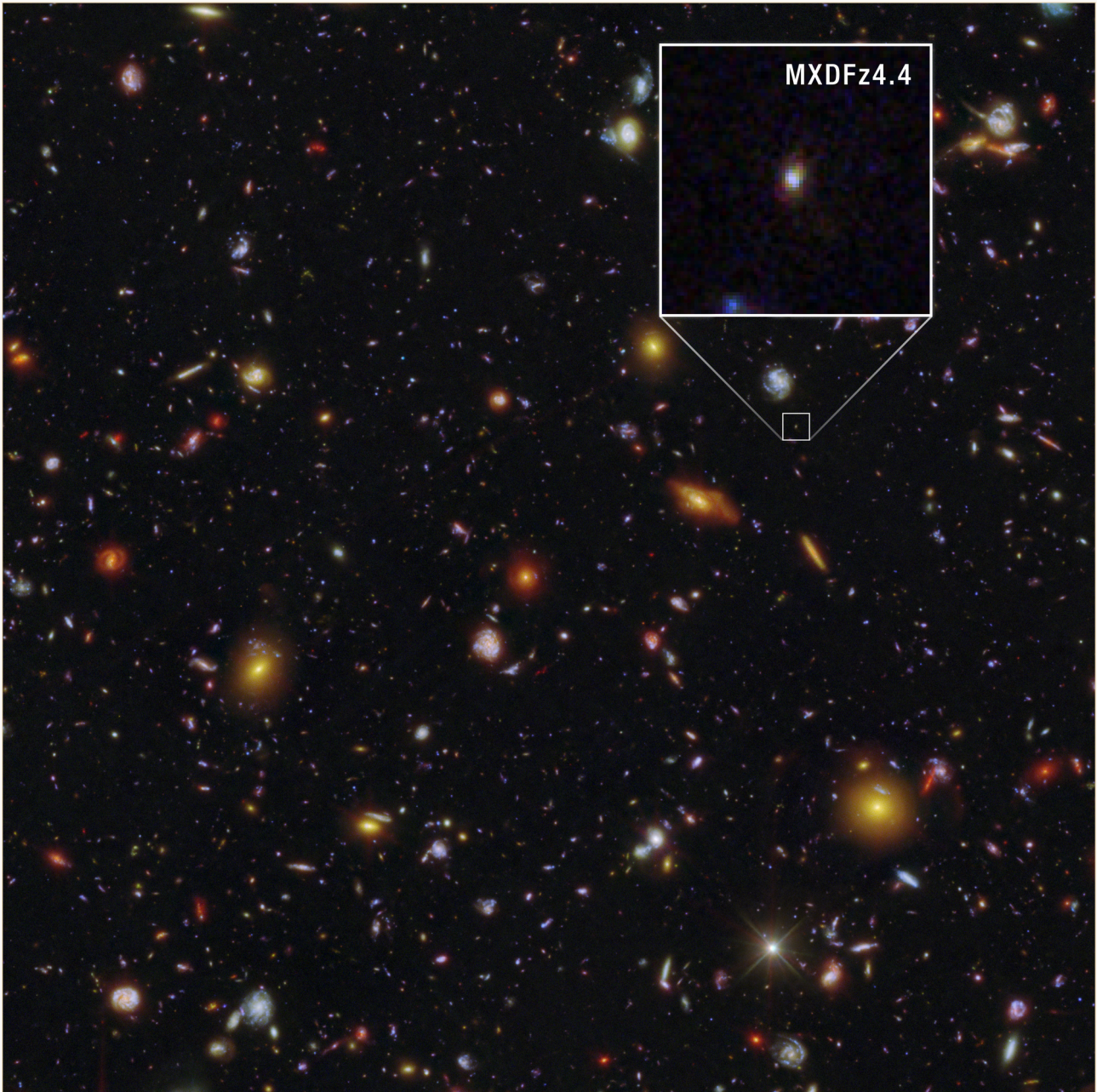
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

撥開迷霧的光

宇宙誕生後最初的幾億年，空間並不透明。宇宙中充滿了中性氫——電子仍附著在原子上的氫——而中性氫非常善於吸收游離紫外線：波長短於 912 埃（萊曼極限）的光，能量足以把電子從氫原子上撞離。並非所有紫外線都會如此——波長較長的紫外線不會以同樣方式被吸收，而我們也能從早期星系看見大量這類光——因此，真正被年輕宇宙困住的，是這種游離光。接下來約十億年，某種來源以足夠的游離光充滿宇宙，把那些電子再次剝離，使氫游離，讓光得以自由穿行。天文學家稱這段時期為再游離時期，而最明顯的嫌疑者就是第一批星系：其中熾熱、壽命短暫的恆星會大量放出游離紫外線；只要有足夠的光逃逸到星系際空間，它們就可能完成這項工作。

問題出在逃逸這個詞。星系的游離光大多永遠出不去——它會被星系內、恆星正試圖游離的同一批氫吸收。只有一部分會滲漏到太空，而這個比例，即逃逸率，是整個故事中最難確定的單一數字。更糟的是，在再游離時期本身，幾乎不可能捕捉到這些洩漏的光：它正在協助清除的星系際迷霧，會在光抵達我們之前很久就把它吸收。因此，為了研究這種洩漏，天文學家必須觀察迷霧剛剛散去後的宇宙，尋找距離那個時代足夠近、可以作為替代樣本的星系。

由 Ilias Goovaerts 領導的團隊，如今在過去幾乎前所未有的距離捕捉到了這種洩漏。他們利用哈伯和 JWST 的深度影像，報告了一個單獨的暗弱星系——編錄為 MXDFz4.4——其正在逃逸的游離紫外線，在哈伯的一個濾鏡影像中呈現為一抹模糊的光。這個星系位於紅移 4.442，約在再游離結束後 2.5 億年：目前直接偵測到的最遙遠「洩漏者」。



MXDFz4.4（放大的內嵌圖）是這片哈伯與 JWST 深度觀測場中的一抹暗弱光斑——目前直接捕捉到其游離紫外線洩漏的最遙遠星系；觀測時距離宇宙再游離結束約 2.5 億年。

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

這篇論文最可能流傳開來的數字是逃逸率，而且它很高——大約是這個星系游離光的一半到全部。這個數字確實有根據，但值得仔細理解這裡的「有根據」意味著什麼。它不是直接從影像上量出來的，而是透過一連串模型重建的；範圍之所以寬，也有誠實的理由。更有用的故事分成兩部分：這次捕捉到的洩漏能、不能告訴我們什麼；以及一個較安靜的第二項結果——在這麼早的宇宙中，首次嘗試檢驗一種間接辨認洩漏的方法，為直接方法失效之時預作準備。

什麼是「逃逸率」，以及它為何如此難以捉摸

恆星——尤其是質量最大、溫度最高、年齡最輕的恆星——會放出能量足以把電子從氫原子上撞離的紫外線。天文學家稱這種輻射為游離輻射；在涉及的特定波長上，也稱為萊曼連續光。它是再游離的通貨：當足夠多的這些光子被釋放出來，持續讓星系際氫保持游離時，宇宙才變得透明。

但星系裡也充滿了氫。星系產生的大量游離光，在離開之前就被吸收了——消耗在游離星系自身的氣體上。逃逸率是指真正進入星系際空間的比例；只有到了那裡，它才真正能幫助更廣大的宇宙再游離。這是整個問題的核心，而它很難測量，有兩個原因。

第一，在再游離時期，星系際介質仍充滿中性氫，會吸收你想偵測的正是這種光——所以洩漏的光通常根本到不了我們這裡。第二，即使你能看見其中一部分（就在那個時期之後，沿著異常清澈的視線），要把這項偵測轉換成逃逸率，就必須用觀測到的光除以星系產生的光——而它產生了多少光，你同樣無法直接看見。你必須根據星系的其他光、推算出的恆星形成歷史，以及對恆星本身的假設來建立模型。

這就是逃逸率會帶有很大誤差範圍的原因；而且一旦還必須對星系際吸收建立模型，同一項偵測就可能支持一個很寬的答案範圍。這個數字是重建結果，不是直接讀值。

作者做了什麼

- 利用 VLT 上 MUSE 儀器的深度光譜確認星系的距離。MUSE 捕捉到一條單獨的發射線——萊曼 α ——其不對稱的剖面是高紅移下這條譜線的典型特徵，將紅移確定為 $z = 4.442$ 。他們估計前景天體恰巧對齊的機率為 0.0076%。
- 在一張深度哈伯 F435W 影像中偵測到正在逃逸的游離（萊曼連續）光——在這個紅移下，這個濾鏡只會看見低於 912 埃、符合「逃逸」定義的光。偵測結果為 $5.2\text{--}5.3\sigma$ （ σ 衡量訊號高於預期雜訊的程度； 5σ 是非常嚴格的統計門檻，不代表該詮釋已獲證明——指南），並與天空中一百萬個空白區域的通量交叉核對，以確認它不是雜訊。
- 利用來源的解析形狀，以及對一個暗弱鄰近天體進行的客製化去混疊，排除了這類主張的典型陷阱——所謂「逃逸」的光其實是前方一個碰巧位於視線上的低紅移星系。
- 透過擬合星系完整的哈伯加 JWST 顏色（使用 CIGALE 程式碼及數個恆星族群模型），建立星系恆星的模型；結果指向幾百萬年前發生過一次近期的恆星形成爆發。
- 以 10,000 條模擬視線建立模型，估算星系際介質在光抵達途中吸收了多少游離光，並綜合所有結果推導逃逸率。
- 首次在這麼早的宇宙中，利用萊曼 α 譜線的形狀與延展程度（其「暈比例」）測試一種辨認逃逸的間接方法，並與直接偵測結果比較。

他們發現了什麼

- 截至目前直接偵測到的最遙遠萊曼連續光發射源，位於 $z = 4.442$ 。
- 真正偵測到正在逃逸的游離光本身——不是推論，而是影像中 $5.2\text{--}5.3\sigma$ 的訊號。
- 高逃逸率，範圍為 50–100%，取決於所採用的假設——數值很大，但取決於模型。（另一個相對估

計值甚至更高，超過 100%。這是定義方式造成的特性——它把正在逃逸的游離光與星系的紫外線相比，卻沒有先對塵埃效應進行校正——並不表示逃逸的光比恆星實際產生的還多。

- 從擬合出的星光得到證據，顯示近期的恆星形成爆發正同時推動游離光的產生與逃逸。
- 用作者的話說，對於在高紅移下把萊曼 α 譜線形狀作為逃逸示蹤器，提供了「謹慎的支持」。

這並不能證明什麼

- 它**並沒有**找出「讓宇宙再游離的星系」。這只有一個星系，而且它位於再游離結束後約 2.5 億年，而不是發生期間。它是朝向那個時代的墊腳石，不是那場事件的畫面。
- 逃逸率**不**是一項測量。它是用觀測到的光除以模型估計的產生光量，再根據模型估計的星系際吸收量進行校正後重建而來的；作者還刻意採用有利的視線，因為其洩漏光能抵達我們的星系，本來就必須位於比平均更清澈的方向。寬廣的範圍（50–100%，以相對定義表示時更高）正是這種模型依賴性的誠實表現。
- 它**並沒有**驗證新的萊曼 α 示蹤器。單一天體提供的「謹慎支持」是第一次測試，不是確認。
- 單靠這項結果，**並不能**確定爆發式恆星形成推動了再游離。這是建立在一個星系及示蹤器分析上的合理詮釋，而不是已獲證明的定律。

證據有多強

- 在直接證據方面，**很強**：紅移（形狀獨特的萊曼 α 譜線，加上前景污染機率為 0.0076%）以及對逃逸光的偵測（ $5.2\text{--}5.3\sigma$ ，與一百萬個空白孔徑核對過；前景干擾源這個曾讓高紅移逃逸主張功虧一簣的陷阱，也已被仔細排除）。
- 在模型結果方面，**較弱，而且論文也公開承認這點**：逃逸率的數值（取決於恆星模型及選定的星系際視線）、再游離的「意義」（一個天體加上詮釋），以及新的示蹤器（首次、謹慎的測試）。
- 這篇論文的誠實體現在它提供的範圍上。它報告區間，而不是單一數字；把示蹤器的支持稱為「謹慎」；甚至拒絕相信自己對星系際透射率所作的其中一項估計。這是一篇不過度推銷自己的謹慎論文；炒作風險完全來自外部。

為什麼重要

正在逃逸的游離光之直接偵測，如今已被推到幾乎能抵達再游離時代的極限——接近光仍勉強能穿透的邊界。光是這一點本身就有價值。但那個較安靜的結果可能更重要：一旦你身處再游離之中，直接方法就會完全失效，所有事情都只能依賴在較近、較容易觀測的星系上校準過的間接示蹤器。在這裡、當你仍能用真正的偵測來檢查示蹤器時測試其中一種方法，正是為了日後在無法再看見洩漏時，取得信任它的資格。MXDFz4.4 的價值與其說是「我們找到了讓宇宙再游離的星系」，不如說是「我們正在學習讀懂這種洩漏，也開始檢查自己在黑暗中的儀器」。

重點摘要

使用哈伯和 JWST 的天文學家，直接偵測到一個位於紅移 4.442 的星系正在逃逸的游離紫外線——這是目前最遙遠的此類偵測，觀測時距離宇宙再游離結束約 2.5 億年。偵測本身很可靠。廣為引用的 50–100% 逃逸率並非測量值，而是透過星系恆星模型，以及沿著刻意選定的有利視線建立星系際吸收模型後重建的；這正是範圍如此寬的原因。在這項偵測之外，團隊還首次在高紅移下測試一種辨認逃逸光的間接方法——萊曼 α 譜線的形狀，並發現對它有「謹慎的支持」。這是一項謹慎的單一天體結果：真正捕捉到洩漏、附帶一個坦白承認不確定的數字，以及朝向天文學家在洩漏完全無法看見之後所需工具邁出的第一步。

務實檢視

論文顯示了什麼：對一個位於 $z = 4.442$ 的星系，直接以 $5.2\text{--}5.3\sigma$ 偵測到正在逃逸的游離（萊曼連續）光——這是截至目前紅移最高的此類偵測——並且仔細排除了前景污染陷阱。

合理但尚未證明的是：該星系的逃逸率為 50–100%。偵測是真的；這個比例是透過恆星族群及星系際吸收模型（沿著有利的視線）重建的，因此涵蓋如此寬的範圍。同樣合理但尚未證明的是：萊曼 α 譜線形狀在這麼早的宇宙中可以作為逃逸示蹤器——論文只根據一個天體提供了「謹慎的支持」。

它沒有顯示什麼：這是一個「讓宇宙再游離的星系」（它位於那個時期之後，而且只是單一天體），或爆發式恆星形成推動了再游離（這是詮釋，不是證明）。

主要限制：樣本只有一個；逃逸率取決於模型選擇及刻意挑選的清澈視線；對新示蹤器進行的首次、謹慎測試；以及在如此接近洩漏變得不可見的時代研究逃逸游離光，本身就極其困難。

一般讀者應有多大信心？可以很有信心地相信確實偵測到了逃逸光，也可以很有信心地相信這是目前最遙遠的此類捕捉。對確切的逃逸率則應抱持低到中等程度的信心——把「50–100%」視為模型產生的範圍，而不是測量值。對新示蹤器的信心為中等：這是有希望的首次檢驗，但還不是已確立的工具。

發布後更新

• 更正 · 2026-07-28

在論文作者之一伊利亞斯·霍瓦茨（Ilias Goovaerts）回饋之後，本文現在從開頭就引入電離光，而非籠統的紫外線，並明確指出只有波長較短的紫外線——低於 912 埃的萊曼極限——才是電離的，而波長較長的紫外線是非電離的，並在高紅移星系中被常規地觀測到。

來源

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>