The Clean Paper

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

Самая далёкая галактика, у которой напрямую увидели утечку ионизирующего света

Астрономы с помощью JWST и Hubble напрямую обнаружили ионизирующий ультрафиолет, выходящий из одной галактики примерно через 250 миллионов лет после космической реионизации — это самая далёкая такая «утечка», увиденная непосредственно. Доля выхода 50–100% реальна как результат анализа, но она реконструирована через модели, а не измерена напрямую; более тихий результат — первая на таком большом красном смещении проверка того, как распознавать утечку, когда прямой метод уже перестанет работать.

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

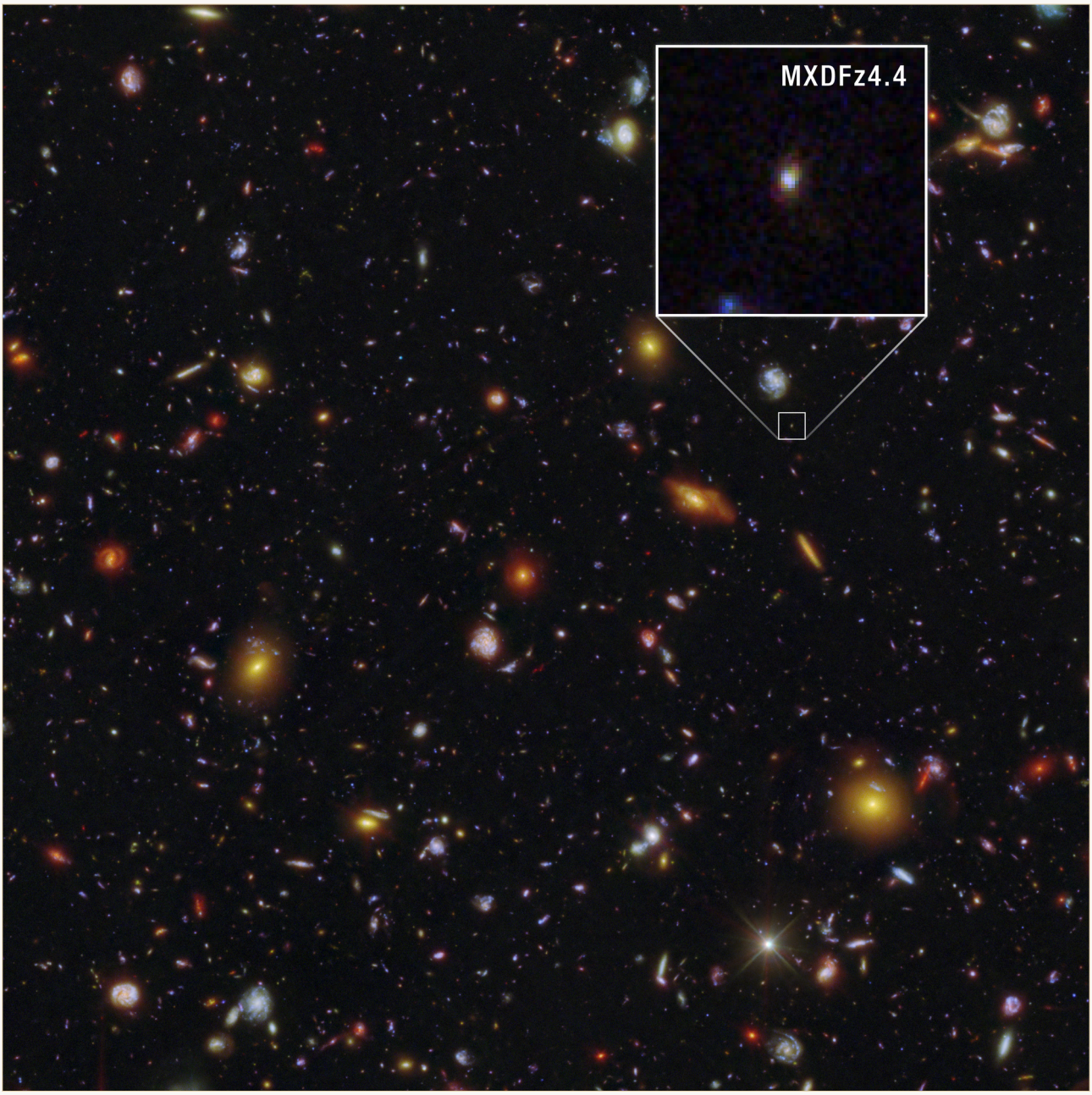
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

Свет, который рассеял туман

В течение первых нескольких сотен миллионов лет Вселенная была непрозрачной. Пространство было заполнено нейтральным водородом — атомами, в которых электроны всё ещё оставались связанными с ядрами, — а нейтральный водород очень хорошо поглощает *ионизирующее* ультрафиолетовое излучение: коротковолновый свет с длиной волны менее 912 ангстремов (*граница Лаймана*), достаточно энергичный, чтобы выбить электрон из атома водорода. Не весь ультрафиолет делает это: длинноволновое УФ-излучение поглощается иначе, и мы без проблем видим много такого света от ранних галактик. Следовательно, молодая Вселенная задерживала именно ионизирующий свет. Затем, примерно в течение следующего миллиарда лет, что-то наполнило космос достаточным количеством таких фотонов, чтобы снова оторвать электроны, ионизировать водород и позволить свету свободно путешествовать. Астрономы называют это эпохой реионизации, а очевидными подозреваемыми являются первые галактики: их горячие, короткоживущие звёзды производят огромное количество ионизирующего ультрафиолета, и если бы достаточная его доля выходила в межгалактическое пространство, этого могло бы хватить.

Проблема — в слове *выходила*. Большая часть ионизирующего света галактики вообще её не покидает: его поглощает тот же водород внутри галактики, который звёзды пытаются ионизировать. В космос просачивается лишь определённая доля, и именно эта *доля выхода* (escape fraction) — самое трудное число во всей истории. Ещё хуже, во время самой реионизации этот свет почти невозможно увидеть: межгалактический «туман», который он помогает рассеять, поглощает его задолго до того, как он доходит до нас. Поэтому, чтобы исследовать утечку, астрономам приходится смотреть немного *после* исчезновения тумана — на галактики, достаточно близкие по времени к этой эпохе, чтобы служить её аналогами.

Команда под руководством Илиаса Говертса теперь увидела такую утечку почти настолько далеко в прошлом, насколько её вообще удавалось наблюдать. С помощью глубоких изображений Hubble и JWST они сообщают об одной слабой галактике — MXDFz4.4, — чей вышедший наружу ионизирующий ультрафиолетовый свет виден как слабое пятно в одном из фильтров Hubble. Галактика имеет красное смещение 4,442, то есть мы видим её примерно через 250 миллионов лет после завершения реионизации. Это самый далёкий объект, для которого такая «утечка» обнаружена напрямую.



MXDFz4.4 (увеличена на вставке) — слабое пятно в этом глубоком поле Hubble и JWST. Это самая далёкая галактика, у которой напрямую обнаружена утечка ионизирующего ультрафиолета; мы видим её примерно через 250 миллионов лет после завершения космической реионизации.

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

Число, которое, скорее всего, разойдётся из этой статьи, — доля выхода, и она велика: от половины до всего ионизирующего света галактики. Это число реально, но стоит аккуратно объяснить, что здесь означает «реально». Его не считали напрямую с изображения; его реконструировали через цепочку моделей, и у широкого диапазона есть честная причина. Более полезная история состоит из двух частей: что может и чего не может сказать одна зафиксированная утечка, и второй, более тихий результат — первая настолько далёкая в прошлом проверка косвенного способа распознавать утечку, который понадобится в эпоху, когда прямой метод уже перестанет работать.

Что такое «доля выхода» и почему её так трудно определить

Звёзды — особенно самые массивные, горячие и молодые — испускают ультрафиолет, достаточно энергичный, чтобы выбивать электроны из атомов водорода. Астрономы называют это ионизирующим излучением, а для конкретного диапазона длин волн — светом *континуума Лаймана*. Это своего рода «валюта» реионизации: Вселенная стала прозрачной, когда достаточно таких фотонов было выпущено в пространство, чтобы поддерживать межгалактический водород ионизированным.

Но и сама галактика полна водорода. Значительная часть ионизирующего света поглощается ещё до того, как покинет её, расходуясь на ионизацию собственного газа галактики. *Доля выхода* — это часть излучения, которая действительно выходит в межгалактическое пространство и потому может помогать реионизировать более широкую Вселенную. Это центральная величина всей проблемы, и измерять её трудно по двум причинам.

Во-первых, во время реионизации межгалактическая среда всё ещё содержит много нейтрального водорода, который поглощает именно тот свет, который мы пытаемся увидеть, — поэтому вышедшее излучение обычно вообще до нас не доходит. Во-вторых, даже когда *часть* его можно увидеть — сразу после этой эпохи, вдоль необычно прозрачного луча зрения, — чтобы превратить детекцию в долю выхода, нужно разделить наблюдаемый свет на то, сколько галактика произвела. Но и произведённое количество напрямую не видно. Его приходится моделировать по другой части света галактики, восстановленной истории звездообразования и предположениям о самих звёздах.

Именно поэтому доли выхода имеют широкие погрешности, а когда приходится ещё и моделировать межгалактическое поглощение, одна и та же детекция может поддерживать широкий диапазон ответов. Это число является реконструкцией, а не прямым показанием прибора.

Что сделали авторы

- Подтвердили расстояние до галактики глубокой спектроскопией инструмента MUSE на VLT. Он обнаружил одну эмиссионную линию — Лайман-альфа — с асимметричным профилем, типичным для этой линии при больших красных смещениях, и зафиксировал красное смещение z = 4,442. Вероятность случайного наложения более близкого объекта авторы оценили в 0,0076%.
- Обнаружили выходящий из галактики ионизирующий свет континуума Лаймана на глубоком изображении Hubble в фильтре F435W — при этом красном смещении он видит только свет короче 912 ангстремов, который и считается «вышедшим». Значимость детекции составляет 5,2–5,3σ (сигма показывает, насколько сигнал лежит выше ожидаемого шума; 5σ — очень строгий статистический порог, но не доказательство правильности интерпретации — справка). Результат перекрёстно проверили по потоку в миллионе пустых участков неба, чтобы убедиться, что это

не шум.
- Устранили классическую ловушку таких заявлений: что «утечка» на самом деле является светом галактики с малым красным смещением, случайно лежащей впереди. Для этого использовали пространственно разрешённую форму источника и специальное разделение слабого соседнего объекта.
- Смоделировали звёздное население галактики, подогнав полный набор её цветов Hubble+JWST (кодом CIGALE и несколькими моделями звёздных популяций). Результат указал на недавнюю вспышку звездообразования несколько миллионов лет назад.
- Смоделировали, сколько ионизирующего света поглотила бы межгалактическая среда по дороге к нам, для 10 000 симулированных лучей зрения, и объединили все компоненты, чтобы вывести долю выхода.
- Впервые настолько далеко в прошлом проверили *косвенный* способ определять утечку — форму и пространственную протяжённость линии Лайман-альфа (её «долю гало») — с помощью прямой детекции.

Что они обнаружили

- Самый далёкий на сегодня источник континуума Лаймана, обнаруженный напрямую: z = 4,442.
- Реальную детекцию самого выходящего ионизирующего света: не вывод из косвенных признаков, а сигнал на изображении с 5,2–5,3σ.
- Высокую долю выхода — в пределах 50–100% в зависимости от предположений. Это большое число, но зависящее от моделей. (Отдельная *относительная* оценка ещё выше и превышает 100%. Это особенность её определения: она сравнивает вышедший ионизирующий свет с ультрафиолетовым излучением галактики без предварительной коррекции на пыль. Это не означает, что наружу выходит больше света, чем производят звёзды.)
- По подогнанному звёздному спектру — свидетельства того, что недавняя вспышка звездообразования одновременно обеспечивает производство и выход ионизирующего света.
- «Осторожную поддержку», по словам авторов, использованию формы линии Лайман-альфа как индикатора утечки на больших красных смещениях.

Чего это не доказывает

- Это **не** идентифицирует «галактики, которые реионизировали Вселенную». Это одна галактика, которую мы видим примерно через 250 миллионов лет *после* завершения реионизации, а не во время неё. Это ступень к нужной эпохе, а не изображение самого события.
- Доля выхода — **не прямое измерение**. Её реконструируют, деля наблюдаемый

свет на *смоделированную* оценку произведённого света, а затем корректируя на *смоделированное* межгалактическое поглощение. Авторы намеренно используют благоприятный луч зрения, потому что галактика, чья утечка вообще доходит до нас, и должна лежать в более прозрачном, чем в среднем, направлении. Широкий диапазон 50–100% — и ещё более высокие относительные оценки — является честным следом этой зависимости от моделей.
- Это **не** валидирует новый индикатор на основе Лайман-альфа. «Осторожная поддержка» по одному объекту — первый тест, а не подтверждение.
- Сам по себе результат **не** устанавливает, что именно вспышечное звездообразование вызвало реионизацию. Это разумная интерпретация на основе одной галактики и анализа индикатора, а не продемонстрированный закон.

Насколько убедительны доказательства

- **Сильные** там, где измерение прямое: красное смещение (характерная форма линии Лайман-альфа, с вероятностью загрязнения передним объектом 0,0076%) и детекция выходящего света (5,2–5,3σ, проверено на миллионе пустых апертур, а ловушка с передним объектом — та самая, которая уже разрушала предыдущие заявления об утечке на больших красных смещениях, — тщательно закрыта).
- **Слабее — и это прямо признаётся — там, где результат модельный:** *значение* доли выхода (оно зависит от звёздной модели и выбранного межгалактического луча зрения), «значение» для реионизации (один объект плюс интерпретация) и новый индикатор (первая, осторожная проверка).
- Честность статьи видна в диапазонах. Она приводит интервалы, а не одно число, называет поддержку нового индикатора «осторожной» и даже отказывается доверять одной из собственных оценок межгалактического пропускания. Это осторожная статья, которая сама себя не преувеличивает; риск гиперболы возникает уже за её пределами.

Почему это важно

Прямые детекции ионизирующего света, выходящего из галактик, теперь продвинулись почти к самой эпохе реионизации — к границе, где этот свет ещё едва проходит. Уже это важно. Но более тихий результат может иметь больший вес: как только мы оказываемся *внутри* реионизации, прямой метод полностью перестаёт работать, и всё зависит от косвенных индикаторов, откалиброванных на более близких и простых галактиках. Проверить один из таких индикаторов здесь, где его ещё можно сопоставить с настоящей прямой детекцией, — это способ заслужить право доверять ему позже, когда прямой проверки уже не будет. Ценность MXDFz4.4 меньше в том, что «мы нашли галактику, которая реионизировала Вселенную», и больше в том, что «мы учимся читать утечку и начинаем проверять инструменты перед входом в темноту».

Краткий итог

С помощью Hubble и JWST астрономы напрямую обнаружили ионизирующий ультрафиолетовый свет, выходящий из одной галактики на красном смещении 4,442 — самую далёкую такую детекцию на сегодня, примерно через 250 миллионов лет после завершения космической реионизации. Сама детекция надёжна. Доля выхода 50–100%, которую легко цитировать, не измерена напрямую, а реконструирована по моделям звёзд галактики и межгалактического поглощения вдоль намеренно благоприятного луча зрения — именно поэтому диапазон так широк. Параллельно команда провела первую на таком большом красном смещении проверку косвенного способа распознавать утечку — по форме линии Лайман-альфа — и получила «осторожную поддержку» этого метода. Это аккуратный результат для одного объекта: настоящая детекция утечки, честно неопределённое число, прикреплённое к ней, и первый шаг к инструментам, которые астрономам понадобятся там, где саму утечку уже вообще нельзя будет увидеть.

Проверка без прикрас

Что показывает статья: Прямую детекцию с 5,2–5,3σ ионизирующего света континуума Лаймана, выходящего из галактики на z = 4,442 — самую далёкую такую детекцию на сегодня, — с тщательно исключённым загрязнением передним объектом.

Что правдоподобно, но не доказано: Что доля выхода этой галактики составляет 50–100%. Детекция реальна; долю реконструируют через модели звёздной популяции и межгалактического поглощения вдоль благоприятного луча зрения, поэтому диапазон настолько широк. Так же правдоподобно, но не доказано утверждение, что форма линии Лайман-альфа работает как индикатор утечки настолько далеко в прошлом — статья даёт лишь «осторожную поддержку» на одном объекте.

Чего она не показывает: Что это галактика, «которая реионизировала Вселенную» — она находится после эпохи и является лишь одним объектом, — или что именно вспышечное звездообразование вызвало реионизацию. Это интерпретация, а не демонстрация.

Главные ограничения: Выборка из одного объекта; доля выхода, зависящая от моделей и намеренно прозрачного луча зрения; первый, осторожный тест нового индикатора; и фундаментальная сложность исследования выходящего ионизирующего света так близко к эпохе, где он становится невидимым.

Какой уверенности заслуживает вывод для широкого читателя? Высокой в том, что выходящий свет действительно обнаружен и что это самая далёкая такая детекция на сегодня. Низкой или умеренной относительно точной доли выхода: «50–100%» следует читать как смоделированный диапазон, а не измеренное число. Умеренной относительно нового индикатора: перспективная первая проверка, а не устоявшийся

инструмент.

Обновления после публикации

- **Исправление · 2026-07-28**

  После отзыва Илиаса Говертса, автора статьи, материал с самого начала уточняет, что речь идёт именно об ионизирующем свете, а не об ультрафиолете вообще: только коротковолновый ультрафиолет ниже 912-ангстремовой границы Лаймана является ионизирующим, тогда как длинноволновое ультрафиолетовое излучение неионизирующее и регулярно наблюдается от галактик с большим красным смещением.

Источники

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