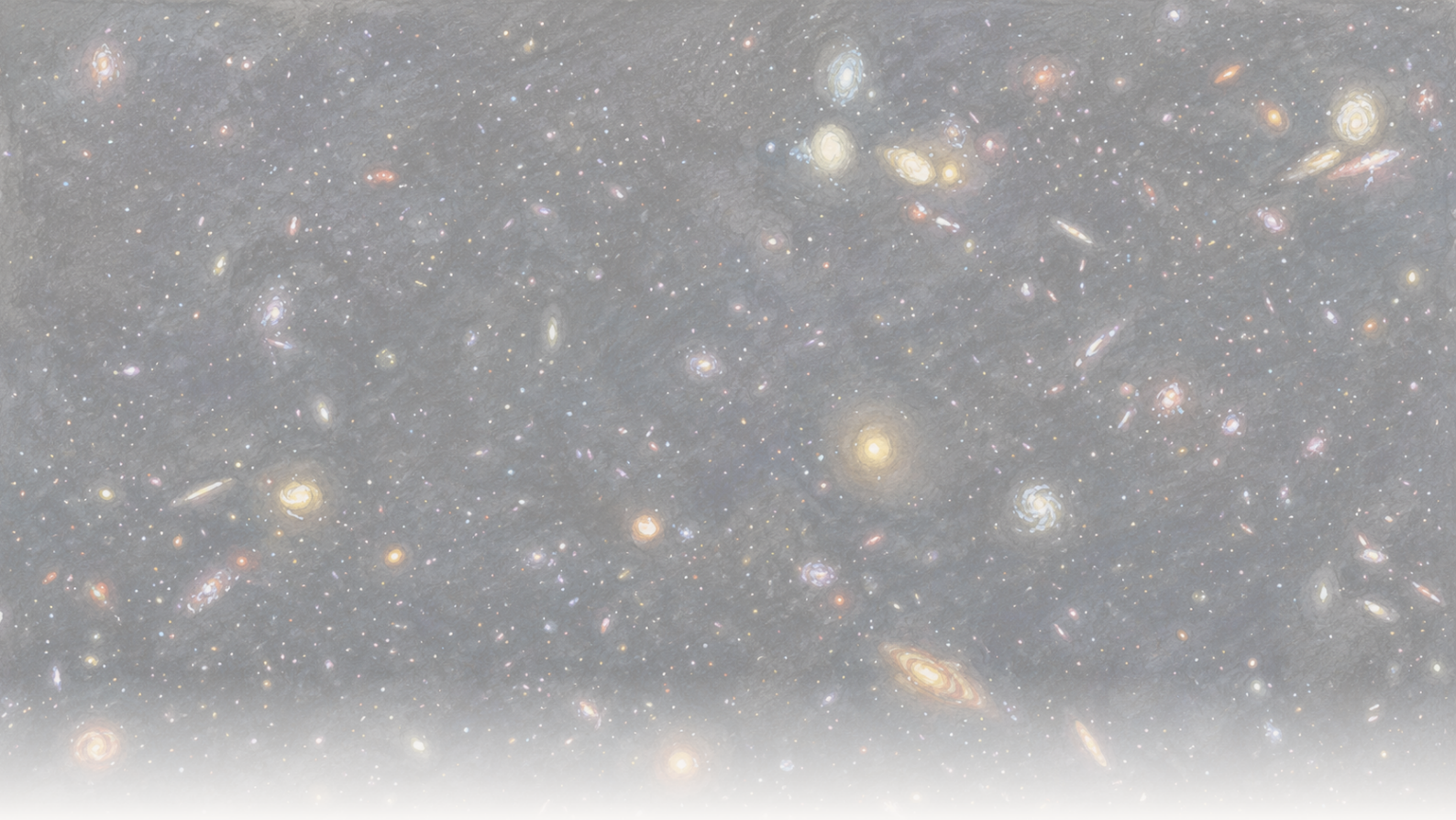


The Clean Paper

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

Самая далёкая галактыка, у якой непасрэдна ўбачылі ўцечку іянізавальнага святла

Астраномы з дапамогай JWST і Hubble непасрэдна выявілі іянізавальны ультрафіялет, які выходзіць з адной галактыкі прыкладна праз 250 мільёнаў гадоў пасля касмічнай рэіянізацыі — гэта самая далёкая такая «ўцечка», убачаная непасрэдна. Доля выхаду 50–100% рэальная як вынік аналізу, але яна рэканструяваная праз мадэлі, а не вымераная непасрэдна; больш ціхі вынік — першая пры такім вялікім чырвоным зрушэнні праверка таго, як распазнаваць уцечку, калі прамы метад ужо перастане працаваць.

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

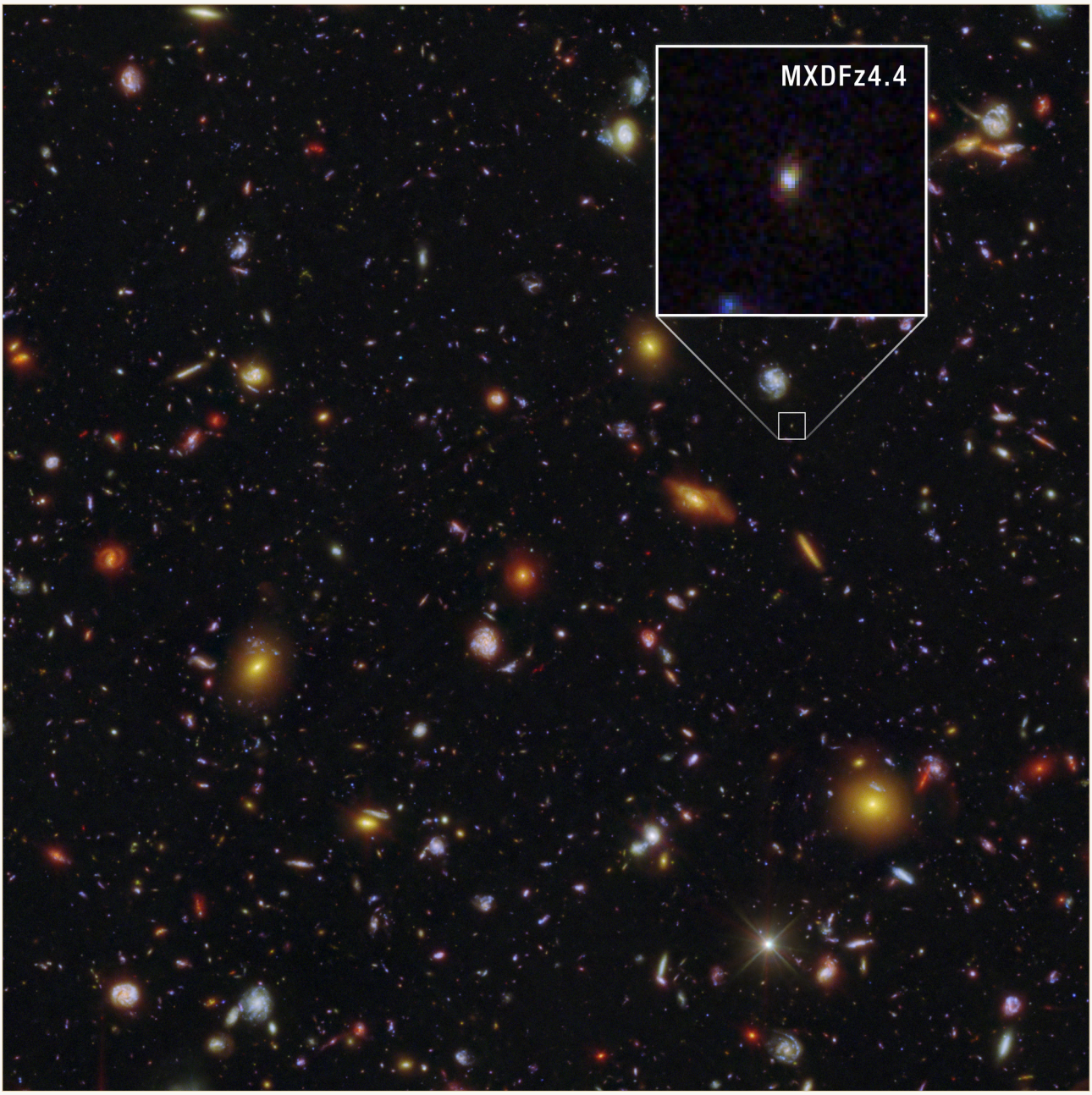
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

Святло, якое рассеяла туман

На працягу першых некалькіх сотняў мільёнаў гадоў Сусвет быў непразрыстым. Прастора была запоўненая нейтральным вадародам — атамамі, у якіх электроны ўсё яшчэ заставаліся звязанымі з ядрамі, — а нейтральны вадарод вельмі добра паглынае *іянізавальнае* ультрафіялетавае выпраменьванне: кароткахвалевае святло з даўжынёй хвалі менш за 912 ангстрэмаў (*мяжа Лаймана*), дастаткова энергічнае, каб выбіць электрон з атама вадароду. Не ўвесь ультрафіялет робіць гэта: даўгахвалевае УФ-выпраменьванне паглынаецца інакш, і мы без праблем бачым шмат такога святла ад ранніх галактык. Такім чынам, малады Сусвет затрымліваў менавіта іянізавальнае святло. Затым, прыкладна на працягу наступнага мільярда гадоў, нешта напоўніла космас дастатковай колькасцю такіх фатонаў, каб зноў адарваць электроны, іянізаваць вадарод і дазволіць святлу свабодна падарожнічаць. Астраномы называюць гэта эпохай рэіянізацыі, а відавочнымі падазраванымі з'яўляюцца першыя галактыкі: іх гарачыя, кароткажывучыя зоркі вырабляюць велізарную колькасць іянізавальнага ультрафіялету, і калі б дастатковая яго доля выходзіла ў міжгалактычную прастору, гэтага магло б хапіць.

Праблема — у слове *выходзіла*. Большая частка іянізавальнага святла галактыкі ўвогуле яе не пакідае: яго паглынае той жа вадарод унутры галактыкі, які зоркі спрабуюць іянізаваць. У космас прасочваецца толькі пэўная доля, і менавіта гэтая *доля выхаду* (escape fraction) — самае цяжкае значэнне ва ўсёй гісторыі. Яшчэ горш, падчас самой рэіянізацыі гэтае святло амаль немагчыма ўбачыць: міжгалактычны «туман», які яно дапамагае рассеяць, паглынае яго задоўга да таго, як яно даходзіць да нас. Таму, каб даследаваць уцечку, астраномам даводзіцца глядзець крыху *пасля* знікнення туману — на галактыкі, дастаткова блізкія па часе да гэтай эпохі, каб служыць яе аналагамі.

Каманда пад кіраўніцтвам Elias Gohverts цяпер убачыла такую ўцечку амаль настолькі далёка ў мінулым, наколькі яе ўвогуле ўдавалася назіраць. З дапамогай глыбокіх выяў Hubble і JWST яны паведамляюць пра адну слабую галактыку — MXDFz4.4, — чыё іянізавальнае ультрафіялетавае святло, якое выйшла вонкі, відаць як слабую пляму ў адным з фільтраў Hubble. Галактыка мае чырвонае зрушэнне 4,442, гэта значыць мы бачым яе прыкладна праз 250 мільёнаў гадоў пасля завяршэння рэіянізацыі. Гэта самы далёкі аб'ект, для якога такую «ўцечку» выявілі непасрэдна.



MXDFz4.4 (павялічаная на ўстаўцы) — слабая пляма ў гэтым глыбокім полі Hubble і JWST. Гэта самая далёкая галактыка, у якой непасрэдна выявілі ўцечку іянізавальнага ультрафіялету; мы бачым яе прыкладна праз 250 мільёнаў гадоў пасля завяршэння касмічнай рэіянізацыі.

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

Лічба, якая, хутчэй за ўсё, разыдзецца з гэтага артыкула, — доля выхаду, і яна вялікая: ад паловы да ўсяго іянізавальнага святла галактыкі. Гэтая лічба рэальная, але варта акуратна растлумачыць, што тут азначае «рэальная». Яе не палічылі непасрэдна з выявы; яе рэканструявалі праз ланцуг мадэляў, і ў шырокага дыяпазону ёсць сумленная прычына. Больш карысная гісторыя складаецца з дзвюх частак: што можа і чаго не можа сказаць адна зафіксаваная ўцечка, і другі, цішэйшы вынік — першая настолькі далёкая ў мінулым праверка ўскоснага спосабу распазнаваць уцечку, які спатрэбіцца ў эпоху, калі прамы метад ужо перастане працаваць.

Што такое «доля выхаду» і чаму яе так цяжка вызначыць

Зоркі — асабліва самыя масіўныя, гарачыя і маладыя — выпраменьваюць ультрафіялет, дастаткова энергічны, каб выбіваць электроны з атамаў вадароду. Астраномы называюць гэта іянізавальным выпраменьваннем, а для канкрэтнага дыяпазону даўжынь хваль — святлом *кантынууму Лаймана*. Гэта своеасаблівая «валюта» рэіянізацыі: Сусвет стаў празрыстым, калі дастаткова такіх фатонаў было выпушчана ў прастору, каб падтрымліваць міжгалактычны вадарод іянізаваным.

Але і сама галактыка поўная вадароду. Значная частка іянізавальнага святла паглынаецца яшчэ да таго, як пакіне яе, расходуючыся на іянізацыю ўласнага газу галактыкі. *Доля выхаду* — гэта частка выпраменьвання, якая сапраўды выходзіць у міжгалактычную прастору і таму можа дапамагаць рэіянізаваць шырэйшы Сусвет. Гэта цэнтральная велічыня ўсёй праблемы, і вымяраць яе цяжка па дзвюх прычынах.

Па-першае, падчас рэіянізацыі міжгалактычнае асяроддзе ўсё яшчэ змяшчае шмат нейтральнага вадароду, які паглынае менавіта тое святло, якое мы спрабуем убачыць, — таму выпушчанае выпраменьванне звычайна ўвогуле да нас не даходзіць. Па-другое, нават калі *частку* яго можна ўбачыць — адразу пасля гэтай эпохі, уздоўж незвычайна празрыстага прамяня зроку, — каб ператварыць дэтэкцыю ў долю выхаду, трэба падзяліць назіранае святло на тое, колькі галактыка вырабіла. Але і выробленую колькасць непасрэдна не відаць. Яе даводзіцца мадэляваць па іншай частцы святла галактыкі, адноўленай гісторыі зоркаўтварэння і дапушчэннях пра самі зоркі.

Менавіта таму долі выхаду маюць шырокія хібнасці, а калі даводзіцца яшчэ і мадэляваць міжгалактычнае паглынанне, адна і тая ж дэтэкцыя можа падтрымліваць шырокі дыяпазон адказаў. Гэтая лічба з'яўляецца рэканструкцыяй, а не прамым паказаннем прыбора.

Што зрабілі аўтары

- Пацвердзілі адлегласць да галактыкі глыбокай спектраскапіяй інструмента MUSE на VLT. Ён выявіў адну эмісійную лінію — Лайман-альфа — з асіметрычным профілем, тыповым для гэтай лініі пры вялікіх чырвоных зрушэннях, і зафіксаваў чырвонае зрушэнне z = 4,442. Імавернасць выпадковага накладання больш блізкага аб'екта аўтары ацанілі ў 0,0076%.
- Выявілі іянізавальнае святло кантынууму Лаймана, якое выходзіць з галактыкі, на глыбокай выяве Hubble у фільтры F435W — пры гэтым чырвоным зрушэнні ён бачыць толькі святло карацей за 912 ангстрэмаў, якое і лічыцца «выпушчаным». Значнасць дэтэкцыі складае 5,2–5,3σ (сігма паказвае, наколькі сігнал ляжыць вышэй за чаканы шум; 5σ — вельмі строгі статыстычны парог, але не доказ правільнасці інтэрпрэтацыі — даведка). Вынік перакрыжавана праверылі па патоку ў мільёне пустых участкаў неба, каб пераканацца, што гэта не шум.

- Ліквідавалі класічную пастку такіх заяў: што «ўцечка» насамрэч з'яўляецца святлом галактыкі з малым чырвоным зрушэннем, якая выпадкова ляжыць наперадзе. Для гэтага выкарысталі прасторава развязаную форму крыніцы і спецыяльнае аддзяленне слабога суседняга аб'екта.
- Змадэлявалі зорнае насельніцтва галактыкі, падагнаўшы поўны набор яе колераў Hubble+JWST (кодам CIGALE і некалькімі мадэлямі зорных папуляцый). Вынік паказаў на нядаўні ўсплёск зоркаўтварэння некалькі мільёнаў гадоў таму.
- Змадэлявалі, колькі іянізавальнага святла паглынула б міжгалактычнае асяроддзе па дарозе да нас, для 10 000 сімуляваных прамянёў зроку, і аб'ядналі ўсе кампаненты, каб вывесці долю выхаду.
- Упершыню настолькі далёка ў мінулым праверылі *ўскосны* спосаб вызначаць уцечку — форму і прасторавую працягласць лініі Лайман-альфа (яе «долю гало») — з дапамогай прамой дэтэкцыі.

Што яны выявілі

- Самую далёкую на сёння крыніцу кантынууму Лаймана, выяўленую непасрэдна: z = 4,442.
- Рэальную дэтэкцыю самога выпушчанага іянізавальнага святла: не выснову з ускосных прыкмет, а сігнал на выяве з 5,2–5,3σ.
- Высокую долю выхаду — у межах 50–100% у залежнасці ад дапушчэнняў. Гэта вялікая лічба, але залежная ад мадэляў. (Асобная *адносная* ацэнка яшчэ вышэйшая і перавышае 100%. Гэта асаблівасць яе азначэння: яна параўноўвае выпушчанае іянізавальнае святло з ультрафіялетавым выпраменьваннем галактыкі без папярэдняй карэкцыі на пыл. Гэта не азначае, што вонкі выходзіць больш святла, чым вырабляюць зоркі.)
- Паводле падагнанага зорнага спектру — сведчанні таго, што нядаўні ўсплёск зоркаўтварэння адначасова забяспечвае вытворчасць і выхад іянізавальнага святла.
- «Асцярожную падтрымку», паводле слоў аўтараў, выкарыстанню формы лініі Лайман-альфа як індыкатара ўцечкі пры вялікіх чырвоных зрушэннях.

Чаго гэта не даказвае

- Гэта **не** ідэнтыфікуе «галактыкі, якія рэіянізавалі Сусвет». Гэта адна галактыка, якую мы бачым прыкладна праз 250 мільёнаў гадоў *пасля* завяршэння рэіянізацыі, а не падчас яе. Гэта прыступка да патрэбнай эпохі, а не выява самой падзеі.
- Доля выхаду — **не прамое вымярэнне**. Яе рэканструююць, дзелячы назіранае святло на *змадэляваную* ацэнку выпрабленага святла, а затым карэктуючы на *змадэляванае* міжгалактычнае паглынанне. Аўтары наўмысна выкарыстоўваюць спрыяльны прамень зроку, бо галактыка, чыя ўцечка ўвогуле даходзіць да нас, і павінна ляжаць у больш празрыстым, чым у сярэднім, напрамку. Шырокі дыяпазон

50–100% — і яшчэ вышэйшыя адносныя ацэнкі — з'яўляецца сумленным следам гэтай залежнасці ад мадэляў.
- Гэта **не** валідзіруе новы індыкатар на аснове Лайман-альфа. «Асцярожная падтрымка» па адным аб'екце — першы тэст, а не пацверджанне.
- Сам па сабе вынік **не** ўсталёўвае, што менавіта ўспышкавае зоркаўтварэнне выклікала рэіянізацыю. Гэта разумная інтэрпрэтацыя на аснове адной галактыкі і аналізу індыкатара, а не прадэманстраваны закон.

Наколькі пераканаўчыя доказы

- **Моцныя** там, дзе вымярэнне прамое: чырвонае зрушэнне (характэрная форма лініі Лайман-альфа, з імавернасцю забруджвання пярэднім аб'ектам 0,0076%) і дэтэкцыя выпушчанага святла (5,2–5,3σ, праверана на мільёне пустых апертур, а пастка з пярэднім аб'ектам — тая самая, якая ўжо разбурала папярэднія заявы пра ўцечку пры вялікіх чырвоных зрушэннях, — старанна закрытая).
- **Слабейшыя — і гэта наўпрост прызнаецца — там, дзе вынік мадэльны:** *значэнне* долі выхаду (яно залежыць ад зорнай мадэлі і абранага міжгалактычнага прамяня зроку), «значэнне» для рэіянізацыі (адзін аб'ект плюс інтэрпрэтацыя) і новы індыкатар (першая, асцярожная праверка).
- Сумленнасць артыкула бачная ў дыяпазонах. Ён прыводзіць інтэрвалы, а не адну лічбу, называе падтрымку новага індыкатара «асцярожнай» і нават адмаўляецца давяраць адной з уласных ацэнак міжгалактычнага прапускання. Гэта асцярожны артыкул, які сам сябе не перабольшвае; рызыка гіпербалы ўзнікае ўжо за яго межамі.

Чаму гэта важна

Прамыя дэтэкцыі іянізавальнага святла, якое выходзіць з галактык, цяпер прасунуліся амаль да самой эпохі рэіянізацыі — да мяжы, дзе гэтае святло яшчэ ледзь праходзіць. Ужо гэта важна. Але больш ціхі вынік можа мець большую вагу: як толькі мы апынаемся *ўнутры* рэіянізацыі, прамы метад цалкам перастае працаваць, і ўсё залежыць ад ускосных індыкатараў, адкалібраваных на больш блізкіх і простых галактыках. Праверыць адзін з такіх індыкатараў тут, дзе яго яшчэ можна супаставіць з сапраўднай прамой дэтэкцыяй, — гэта спосаб заслужыць права давяраць яму пазней, калі прамой праверкі ўжо не будзе. Каштоўнасць MXDFz4.4 менш у тым, што «мы знайшлі галактыку, якая рэіянізавала Сусвет», і больш у тым, што «мы вучымся чытаць уцечку і пачынаем правяраць інструменты перад уваходам у цемру».

Коратка

З дапамогай Hubble і JWST астраномы непасрэдна выявілі іянізавальнае ультрафіялетавае святло, якое выходзіць з адной галактыкі на чырвоным зрушэнні 4,442 — самую далёкую такую дэтэкцыю на сёння, прыкладна праз 250 мільёнаў гадоў пасля завяршэння касмічнай рэіянізацыі. Сама дэтэкцыя надзейная. Доля выхаду 50–100%, якую лёгка цытаваць, не вымераная непасрэдна, а рэканструяваная па мадэлях зорак галактыкі і міжгалактычнага паглынання ўздоўж наўмысна спрыяльнага прамяня зроку — менавіта таму дыяпазон такі шырокі. Паралельна каманда правяла першую пры такім вялікім чырвоным зрушэнні праверку ўскоснага спосабу распазнаваць уцечку — па форме лініі Лайман-альфа — і атрымала «асцярожную падтрымку» гэтага метаду. Гэта акуратны вынік для аднаго аб'екта: сапраўдная дэтэкцыя ўцечкі, сумленна нявызначаная лічба, прымацаваная да яе, і першы крок да інструментаў, якія астраномам спатрэбяцца там, дзе саму ўцечку ўжо ўвогуле нельга будзе ўбачыць.

Праверка без прыкрас

Што паказвае артыкул: Прамую дэтэкцыю з 5,2–5,3σ іянізавальнага святла кантынууму Лаймана, якое выходзіць з галактыкі на z = 4,442 — самую далёкую такую дэтэкцыю на сёння, — з старанна выключаным забруджваннем пярэднім аб'ектам.

Што праўдападобна, але не даказана: Што доля выхаду гэтай галактыкі складае 50–100%. Дэтэкцыя рэальная; долю рэканструююць праз мадэлі зорнай папуляцыі і міжгалактычнага паглынання ўздоўж спрыяльнага прамяня зроку, таму дыяпазон настолькі шырокі. Гэтак жа праўдападобнае, але не даказанае сцвярджэнне, што форма лініі Лайман-альфа працуе як індыкатар уцечкі настолькі далёка ў мінулым — артыкул дае толькі «асцярожную падтрымку» на адным аб'екце.

Чаго ён не паказвае: Што гэта галактыка, «якая рэіянізавала Сусвет» — яна знаходзіцца пасля эпохі і з'яўляецца толькі адным аб'ектам, — або што менавіта ўспышкавае зоркаўтварэнне выклікала рэіянізацыю. Гэта інтэрпрэтацыя, а не дэманстрацыя.

Галоўныя абмежаванні: Выбарка з аднаго аб'екта; доля выхаду, залежная ад мадэляў і наўмысна празрыстага прамяня зроку; першы, асцярожны тэст новага індыкатара; і фундаментальная складанасць даследавання выпушчанага іянізавальнага святла так блізка да эпохі, дзе яно становіцца нябачным.

Якой упэўненасці заслугоўвае выснова для шырокага чытача? Высокай у тым, што выпушчанае святло сапраўды выяўлена і што гэта самая далёкая такая дэтэкцыя на сёння. Нізкай або ўмеранай адносна дакладнай долі выхаду: «50–100%» трэба чытаць як змадэляваны дыяпазон, а не вымераную лічбу. Умеранай адносна новага індыкатара: перспектыўная першая праверка, а не ўсталяваны інструмент.

Абнаўленні пасля публікацыі

- **Выпраўленне · 2026-07-28**

  Пасля водгуку Elias Gohverts, аўтара артыкула, матэрыял з самага пачатку ўдакладняе, што гаворка ідзе менавіта пра іянізавальнае святло, а не пра ультрафіялет увогуле: толькі кароткахвалевы ультрафіялет ніжэй за 912-ангстрэмавую мяжу Лаймана з'яўляецца іянізавальным, тады як даўгахвалевае ультрафіялетавае выпраменьванне неіянізавальнае і рэгулярна назіраецца ад галактык з вялікім чырвоным зрушэннем.

Крыніцы

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