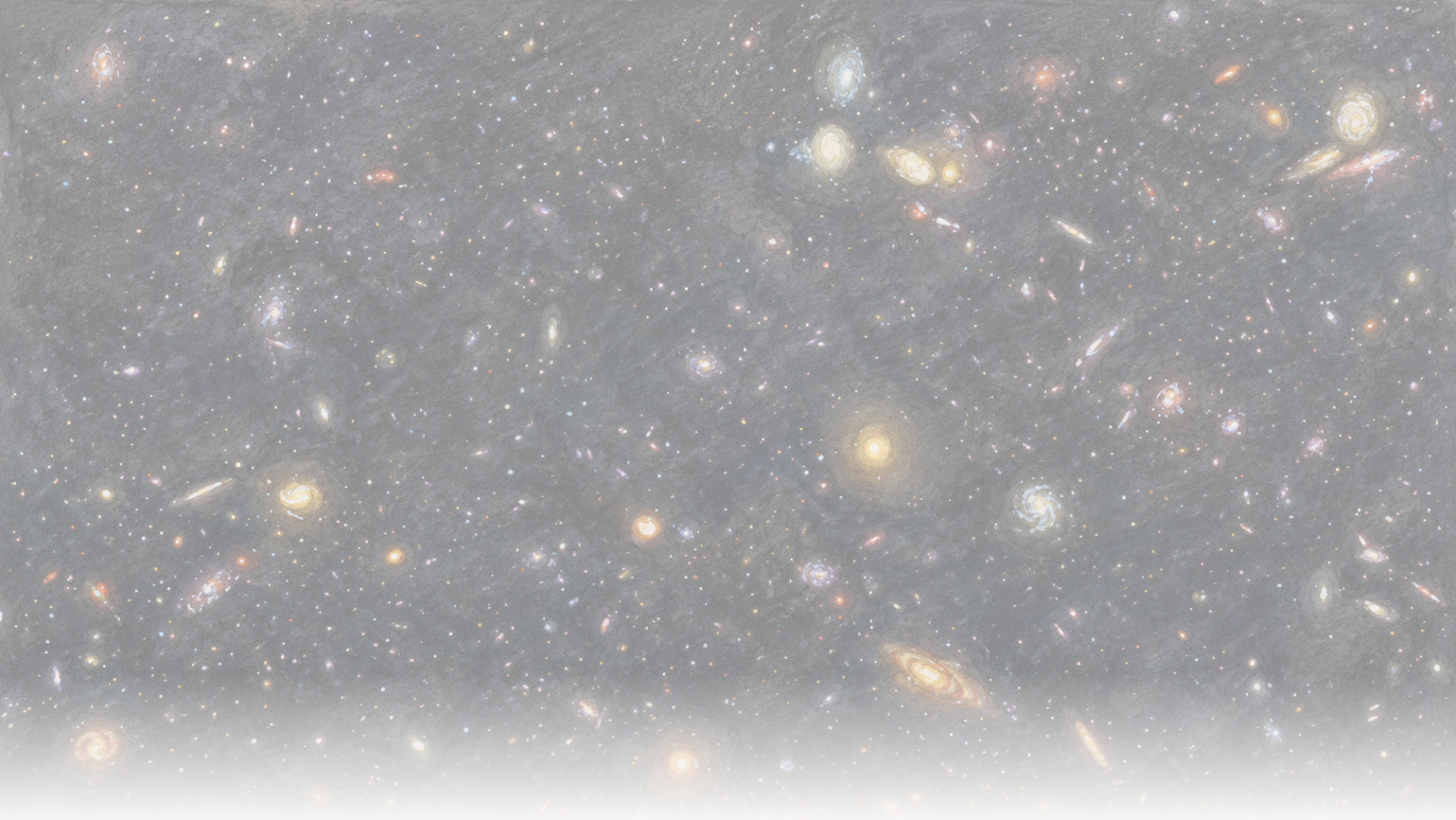


The Clean Paper

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

Vistālākā galaktika, no kuras tieši uztverta izkļūstošā jonizējošā gaisma

Astronomi ar JWST un Habla teleskopu uztvēra jonizējošo ultravioleto starojumu, kas izkļūst no vienas galaktikas aptuveni 250 miljonus gadu pēc kosmiskās rejonizācijas beigām — vistālākā šāda "noplūde", kas redzēta tieši. Virsrakstos pievilcīgā 50–100% izkļūšanas daļa ir reāls, taču no modeļiem rekonstruēts, nevis tieši izmērīts lielums; klusākais rezultāts ir pirmais lielas sarkanās nobīdes tests tam, kā noplūdi atpazīt tad, kad to vairs nevarēs redzēt tieši.

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

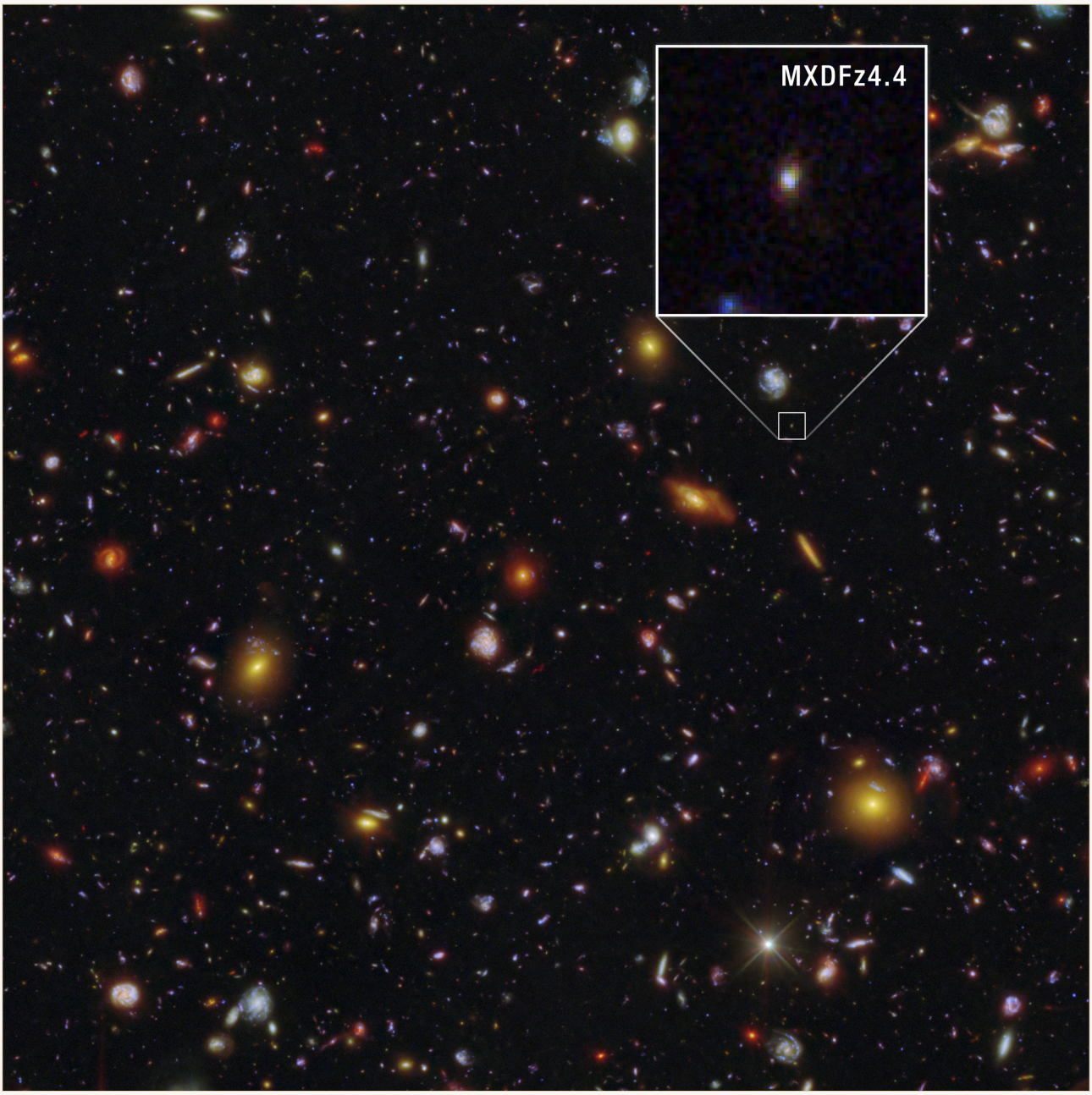
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

Gaisma, kas izkliedēja miglu

Pirmos vairākus simtus miljonu gadu Visums bija necaurspīdīgs. Telpu pildīja neitrāls ūdeņradis — atomi, kuros elektroni vēl bija piesaistīti kodoliem — un neitrāls ūdeņradis ļoti efektīvi absorbē *jonizējošo* ultravioleto starojumu: īsviļņu gaismu zem 912 ångstrēmu robežas (tā sauktās *Laimana robežas*), kam ir pietiekami daudz enerģijas, lai izrautu elektronu no ūdeņraža atoma. Ne viss ultravioletais starojums to spēj — garāku viļņu UV gaismu neabsorbē tāpat, un no agrīnajām galaktikām mēs to redzam daudz. Tāpēc jaunais Visums aizturēja tieši jonizējošo starojumu. Tad aptuveni nākamā miljarda gadu laikā kaut kas piepildīja kosmosu ar pietiekami daudz šādu fotonu, lai elektronus atkal atrautu no atomiem, jonizētu ūdeņradi un ļautu gaismai brīvi izplatīties. Astronomi šo laikmetu sauc par rejonizācijas epohu, un acīmredzamākie vaininieki ir pirmās galaktikas: tajās esošās karstās, īsmūžīgās zvaigznes izstaro daudz jonizējoša ultravioletā starojuma, un, ja pietiekama tā daļa izkļuva starpgalaktiskajā telpā, tās varēja paveikt šo darbu.

Grūtības slēpjas vārdā *izkļuva*. Lielākā daļa galaktikā radītā jonizējošā starojuma to nekad neatstāj — to absorbē tas pats ūdeņradis galaktikas iekšienē, ko zvaigznes mēģina jonizēt. Kosmosā nonāk tikai daļa, un šī daļa — *izkļūšanas daļa* — ir visgrūtāk nosakāmais skaitlis visā stāstā. Turklāt pašas rejonizācijas laikā izbēgušo gaismu gandrīz nav iespējams uztvert: starpgalaktiskā migla, kuru šī gaisma palīdz izkliedēt, to absorbē ilgi pirms tā sasniedz mūs. Tāpēc, lai pētītu šo noplūdi, astronomiem jāskatās uz galaktikām tieši *pēc* miglas izzušanas — pietiekami tuvu attiecīgajam laikmetam, lai tās varētu kalpot par aizstājēju.

Iliasa Goovaertsa vadīta komanda tagad šo noplūdi ir uztvērusi gandrīz tik tālā pagātnē, cik līdz šim izdevies. Izmantojot dziļus Habla teleskopa un JWST attēlus, pētnieki ziņo par vienu blāvu galaktiku — katalogā MXDFz4.4 —, kuras izkļuvušais jonizējošais ultravioletais starojums vienā Habla filtrā parādās kā vājš gaismas plankums. Galaktikas sarkanā nobīde ir 4,442, tātad mēs to redzam aptuveni 250 miljonus gadu pēc rejonizācijas beigām. Tas ir vistālākais līdz šim tieši novērotais jonizējošās gaismas “nopludinātājs”.



MXDFz4.4 (palielināta ielaidumā) šajā dziļajā Habla un JWST laukā redzama kā blāvs plankums — vistālākā galaktika, no kuras līdz šim tieši uztverts izkļūstošs jonizējošais ultravioletais starojums, aptuveni 250 miljonus gadu pēc kosmiskās rejonizācijas beigām.

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

No šī darba visplašāk ceļos izkļūšanas daļas skaitlis, un tas ir liels — starp pusi un gandrīz visu galaktikas jonizējošo starojumu. Šis skaitlis nav izdomāts, taču vērts precizēt, ko šeit nozīmē “reāls”. Tas nav nolasīts tieši no attēla; tas rekonstruēts, izmantojot virkni modeļu, un plašais intervāls ir godīgs nenoteiktības atspoguļojums. Noderīgākais stāsts sastāv no divām daļām: ko viena tieši uztverta noplūde mums var un nevar pateikt, un klusāka otrā rezultāta — pirmā mēģinājuma tik lielā sarkanajā nobīdē pārbaudīt netiešu noplūdes pazīmi, kam jākļūst svarīgai tad, kad tiešā metode vairs nedarbosies.

Kas ir "izkļūšanas daļa", un kāpēc to tik grūti noteikt

Zvaigznes — īpaši lielākās, karstākās un jaunākās — izstaro ultravioleto starojumu ar pietiekamu enerģiju, lai izrautu elektronus no ūdeņraža atomiem. Astronomi to sauc par jonizējošo starojumu, bet konkrētajā viļņu garumu diapazonā — par *Laimana kontinuuma* gaismu. Tā ir rejonizācijas "valūta": Visums kļuva caurspīdīgs, kad tika atbrīvots pietiekami daudz šo fotonu, lai starpgalaktiskais ūdeņradis paliktu jonizēts.

Taču arī galaktika pati ir pilna ar ūdeņradi. Liela daļa tās radītā jonizējošā starojuma tiek absorbēta, vēl pirms tas izkļūst ārā — tas tiek iztērēts pašas galaktikas gāzes jonizēšanai. *Izkļūšanas daļa* ir tā starojuma proporcija, kas nonāk starpgalaktiskajā telpā un var palīdzēt rejonizēt plašāko Visumu. Tas ir visa jautājuma centrālais lielums, un to grūti izmērīt divu iemeslu dēļ.

Pirmkārt, rejonizācijas laikā starpgalaktiskajā vidē vēl ir daudz neitrāla ūdeņraža, kas absorbē tieši to gaismu, kuru mēģinām konstatēt, tāpēc noplūdusī gaisma parasti līdz mums nemaz nenonāk. Otrkārt, pat tad, ja daļu no tās *var* redzēt — tūlīt pēc šā laikmeta un pa neparasti caurspīdīgu redzes līniju —, lai no detektētā signāla iegūtu izkļūšanas daļu, novērotais daudzums jādala ar to, cik daudz galaktika sākotnēji saražoja. Arī šo saražoto daudzumu tieši neredzam. Tas jāmodelē, izmantojot galaktikas pārējo starojumu, secināto zvaigžņu veidošanās vēsturi un pieņēmumus par pašām zvaigznēm.

Tāpēc izkļūšanas daļām ir plaši kļūdu intervāli, un, kad jāmodelē arī starpgalaktiskā absorbcija, viens un tas pats signāls var atbalstīt diezgan plašu vērtību diapazonu. Tas ir rekonstruēts lielums, nevis tiešs mērījums.

Ko autori darīja

- Galaktikas attālumu apstiprināja ar dziļu spektroskopiju, izmantojot MUSE instrumentu uz VLT. Tika uztverta viena emisijas līnija — Laimana-alfa — ar tai lielā sarkanajā nobīdē raksturīgo asimetrisko profilu, nosakot z = 4,442. Varbūtību, ka signālu izraisa nejauša priekšplāna objekta sakritība, autori lēš 0,0076%.
- Dziļā Habla F435W attēlā konstatēja izkļūstošo jonizējošo (Laimana kontinuuma) gaismu. Pie šīs sarkanās nobīdes filtrs uztver tikai starojumu zem 912 ångstrēmu robežas, kas atbilst "izkļuvušajai" jonizējošajai gaismai. Signāls sasniedz 5,2–5,3σ (sigma norāda, cik tālu signāls atrodas virs sagaidāmā trokšņa; 5σ ir ļoti stingrs statistiskais slieksnis, taču tas pats par sevi nepierāda interpretācijas pareizību — ceļvedis). To pārbaudīja, salīdzinot ar plūsmu miljonā tukšu debess apertūru, lai pārliecinātos, ka tas nav troksnis.
- Izslēdza klasisko slazdu šāda veida pētījumos — iespēju, ka šķietami "izkļūstošā" gaisma patiesībā nāk no zemākas sarkanās nobīdes galaktikas, kas nejauši atrodas priekšā. Tam izmantoja avota telpisko formu un īpaši izstrādātu blakus esoša blāva objekta atdalīšanu.
- Modelēja galaktikas zvaigžņu populāciju, pielāgojot tās pilno Habla un JWST krāsu kopumu (ar CIGALE kodu un vairākiem zvaigžņu populāciju modeļiem). Rezultāts norāda uz nesenu, pirms dažiem miljoniem gadu notikušu intensīvas zvaigžņu veidošanās epizodi.
- Modelēja, cik daudz jonizējošās gaismas starpgalaktiskā vide būtu absorbējusi ceļā līdz mums, izmantojot 10 000 simulētu redzes līniju, un apvienoja šo informāciju, lai iegūtu izkļūšanas daļu.

- Pirmoreiz tik lielā sarkanajā nobīdē pārbaudīja *netiešu* noplūdes pazīmi — Laimana-alfa līnijas formu un telpisko izplatību (tās "halo daļu") — salīdzinot ar tiešo detekciju.

Ko viņi atklāja

- Vistālāko līdz šim tieši konstatēto Laimana kontinuuma starotāju, z = 4,442.
- Reālu izkļūstošās jonizējošās gaismas detekciju — nevis secinājumu no citiem rādītājiem, bet 5,2–5,3σ signālu attēlā.
- Lielu izkļūšanas daļu — 50–100% diapazonā atkarībā no pieņēmumiem. Tā ir liela, bet modeļatkarīga. (Atsevišķs *relatīvais* novērtējums ir vēl lielāks un pārsniedz 100%. Tas izriet no šā lieluma definīcijas: izkļuvušo jonizējošo gaismu salīdzina ar galaktikas ultravioleto starojumu, vispirms nekoriģējot putekļu ietekmi. Tas nenozīmē, ka izkļūst vairāk gaismas, nekā zvaigznes saražo.)
- No zvaigžņu gaismas modeļiem iegūtus pierādījumus, ka nesena zvaigžņu veidošanās epizode veicina gan jonizējošā starojuma ražošanu, gan tā izkļūšanu.
- Autorupiesardzīgi formulētu atbalstu tam, ka Laimana-alfa līnijas forma varētu kalpot par jonizējošās gaismas izkļūšanas indikatoru lielā sarkanajā nobīdē.

Ko tas nepierāda

- Tas **neidentificē "galaktikas, kas rejonizēja Visumu"**. Šis ir viens objekts, un tas atrodas apmēram 250 miljonus gadu *pēc* rejonizācijas beigām, nevis pašas rejonizācijas laikā. Tas ir solis tuvāk attiecīgajam laikmetam, nevis paša notikuma attēls.
- Izkļūšanas daļa **nav tiešs mērījums**. To rekonstruē, dalot novēroto gaismu ar *modelētu* saražotās gaismas daudzumu un pēc tam koriģējot ar *modelētu* starpgalaktisko absorbciju. Autori apzināti izmanto labvēlīgu redzes līniju, jo galaktikai, kuras noplūdusī gaisma vispār sasniedz mūs, jāatrodas caurspīdīgākā nekā vidēji virzienā. Plašais diapazons (50–100% un relatīvajā novērtējumā vēl augstāk) godīgi parāda šo modeļatkarību.
- Tas **neapstiprina** jauno Laimana-alfa indikatoru. "Piesardzīgs atbalsts" no viena objekta ir pirmais tests, nevis validācija.
- Tas pats par sevi **nepierāda**, ka rejonizāciju virzīja saraustīta, epizodiska zvaigžņu veidošanās. Tā ir saprātīga interpretācija, kas balstās uz vienu galaktiku un indikatoru analīzi, nevis demonstrēts likums.

Cik pārliecinoši ir pierādījumi?

- **Spēcīgi tur, kur rezultāts ir tiešs:** sarkanā nobīde (raksturīgas formas Laimana-alfa līnija ar 0,0076% priekšplāna piesārņojuma iespēju) un izkļūstošās gaismas detekcija (5,2–5,3σ,

pārbaudīta pret miljonu tukšu apertūru, rūpīgi izslēdzot priekšplāna objekta scenāriju, kas iepriekš ir sagrāvis citus lielas sarkanās nobīdes noplūdes apgalvojumus).
- **Vājāki — un atklāti tā atzīti — tur, kur rezultāts ir modelēts:** konkrētā izkļūšanas daļas *vērtība* (atkarīga no zvaigžņu modeļa un izvēlētās starpgalaktiskās redzes līnijas), secinājumi par rejonizācijas nozīmi (viens objekts plus interpretācija) un jaunais indikators (pirmais piesardzīgais tests).
- Darba godīgums redzams tā intervālos. Autori sniedz diapazonus, nevis vienu skaitli, sava indikatora atbalstu sauc par "piesardzīgu" un pat atsakās uzticēties vienam no pašu starpgalaktiskās caurlaidības novērtējumiem. Tas ir rūpīgs pētījums, kas pats sevi nepārdod pārāk skaļi; pārspīlējuma risks rodas galvenokārt ārpus tā.

Kāpēc tas ir svarīgi

Tiešās izkļūstošās jonizējošās gaismas detekcijas tagad ir aizstumtas gandrīz tik tuvu rejonizācijas laikmetam, cik vien iespējams — līdz robežai, kur šī gaisma vēl tik tikko spēj izkļūt līdz mums. Tas pats par sevi ir vērtīgi. Taču klusākais rezultāts var izrādīties vēl svarīgāks: *rejonizācijas iekšienē* tiešā metode pilnībā pārstāj darboties, un tad viss balstīsies uz netiešiem indikatoriem, kas kalibrēti ar tuvākām, vieglāk novērojamām galaktikām. Pārbaudīt vienu šādu indikatoru šeit — vietā, kur to vēl var salīdzināt ar īstu tiešu detekciju — ir veids, kā nopelnīt tiesības tam uzticēties vēlāk, kad pārbaude vairs nebūs iespējama. MXDFz4.4 vērtība nav tik daudz "mēs atradām galaktiku, kas rejonizēja Visumu", cik "mēs mācāmies atpazīt noplūdi un sākam pārbaudīt instrumentus laikam, kad tā pati vairs nebūs redzama".

Īss kopsavilkums

Astronomi ar Habla teleskopu un JWST tieši konstatējuši jonizējošo ultravioleto starojumu, kas izkļūst no vienas galaktikas ar sarkano nobīdi z = 4,442 — vistālākā šāda detekcija līdz šim, apmēram 250 miljonus gadu pēc kosmiskās rejonizācijas beigām. Pati detekcija ir pārliecinoša. Plaši citējamais 50–100% izkļūšanas daļas skaitlis nav izmērīts tieši, bet rekonstruēts no galaktikas zvaigžņu un starpgalaktiskās absorbcijas modeļiem pa apzināti labvēlīgu redzes līniju, tāpēc diapazons ir tik plašs. Līdztekus tiešajai detekcijai komanda veica pirmo lielas sarkanās nobīdes testu netiešam noplūdes indikatoram — Laimana-alfa līnijas formai — un atrada tam "piesardzīgu atbalstu". Tas ir rūpīgs viena objekta rezultāts: īsta noplūdes detekcija, godīgi nenoteikts skaitlis par tās apjomu un pirmais solis pretī instrumentiem, kas astronomiem būs vajadzīgi tad, kad noplūdi vairs nevarēs redzēt tieši.

Bez pārspīlējumiem

Ko pētījums parāda: tiešu 5,2–5,3σ izkļūstošās jonizējošās (Laimana kontinuuma) gaismas detekciju no galaktikas ar z = 4,442 — lielākajā sarkanajā nobīdē līdz šim —, rūpīgi izslēdzot priekšplāna

piesārņojumu.

Kas ir ticams, bet nav pierādīts: ka galaktikas izkļūšanas daļa ir 50–100%. Detekcija ir reāla; pati daļa rekonstruēta ar zvaigžņu populāciju un starpgalaktiskās absorbcijas modeļiem pa labvēlīgu redzes līniju, tāpēc diapazons ir tik plašs. Tāpat ticams, bet nepierādīts ir secinājums, ka Laimana-alfa līnijas forma tik lielā sarkanajā nobīdē darbojas kā noplūdes indikators — pētījums piedāvā tikai "piesardzīgu atbalstu" no viena objekta.

Ko tas neparāda: ka šī ir galaktika, "kas rejonizēja Visumu" (tā atrodas pēc attiecīgā laikmeta, un tas ir viens objekts), vai ka rejonizāciju virzīja epizodiska zvaigžņu veidošanās (interpretācija, nevis demonstrācija).

Galvenie ierobežojumi: viens objekts; izkļūšanas daļa, kas atkarīga no modeļu izvēles un apzināti skaidras redzes līnijas; pirmais, piesardzīgais jaunā indikatora tests; un ļoti lielās grūtības pētīt izkļūstošo jonizējošo gaismu tik tuvu laikmetam, kurā tā kļūst neredzama.

Cik lielai pārliecībai vajadzētu būt vispārīgam lasītājam? Augstai par to, ka izkļūstošā gaisma patiešām tika konstatēta un ka šis ir vistālākais šāds novērojums līdz šim. Zemai līdz vidējai par precīzo izkļūšanas daļu — "50–100%" jāuztver kā modelēts diapazons, nevis mērījums. Vidējai par jauno indikatoru: daudzsološs pirmais pārbaudes punkts, nevis nostiprināts instruments.

Atjauninājumi pēc publikācijas

- **Labojums · 2026-07-28**

  Pēc raksta autora Ilias Goovaerts atsauksmes teksts jau ievadā runā par jonizējošo gaismu, nevis ultravioleto starojumu vispār, skaidri norādot, ka jonizējošs ir tikai īsviļņu ultravioletais starojums zem 912 ångstrēmu Laimana robežas, bet garāku viļņu ultravioletais starojums nav jonizējošs un no lielas sarkanās nobīdes galaktikām tiek regulāri novērots.

Avoti

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