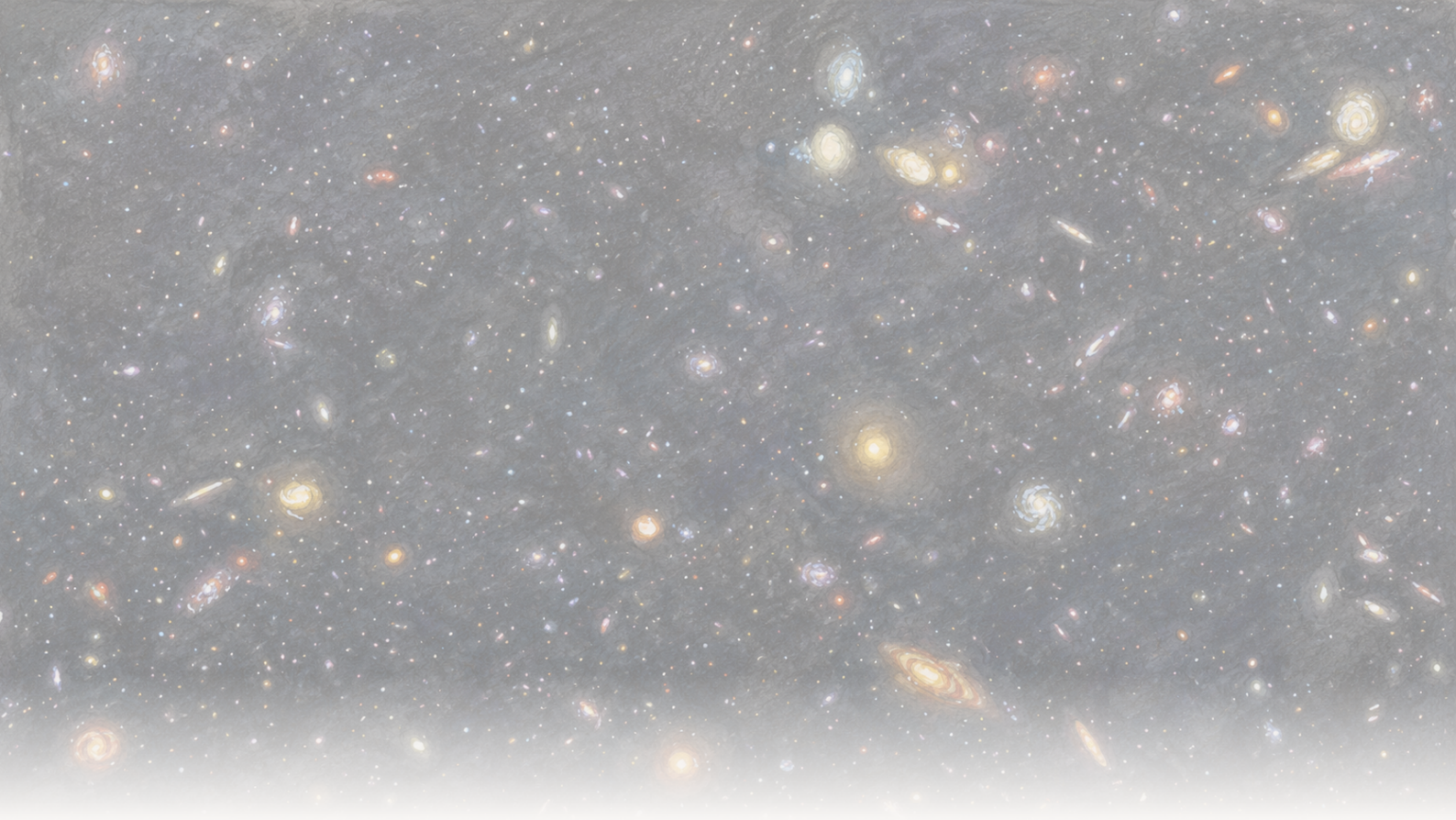


The Clean Paper

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

Najudaljenija galaksija iz koje je dosad izravno uhvaćena ionizirajuća svjetlost kako izlazi

Astronomi su JWST-om i Hubbleom uhvatili ionizirajuće ultraljubičasto zračenje koje izlazi iz jedne galaksije približno 250 milijuna godina nakon kozmičke reionizacije — najudaljenije takvo „curenje" viđeno izravno. Naslovni udio bijega od 50-100% stvaran je, ali rekonstruiran modelima, ne izmjeren; tiši rezultat prvi je test pri velikom crvenom pomaku kako prepoznati curenje kada ga više neće biti moguće vidjeti izravno.

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

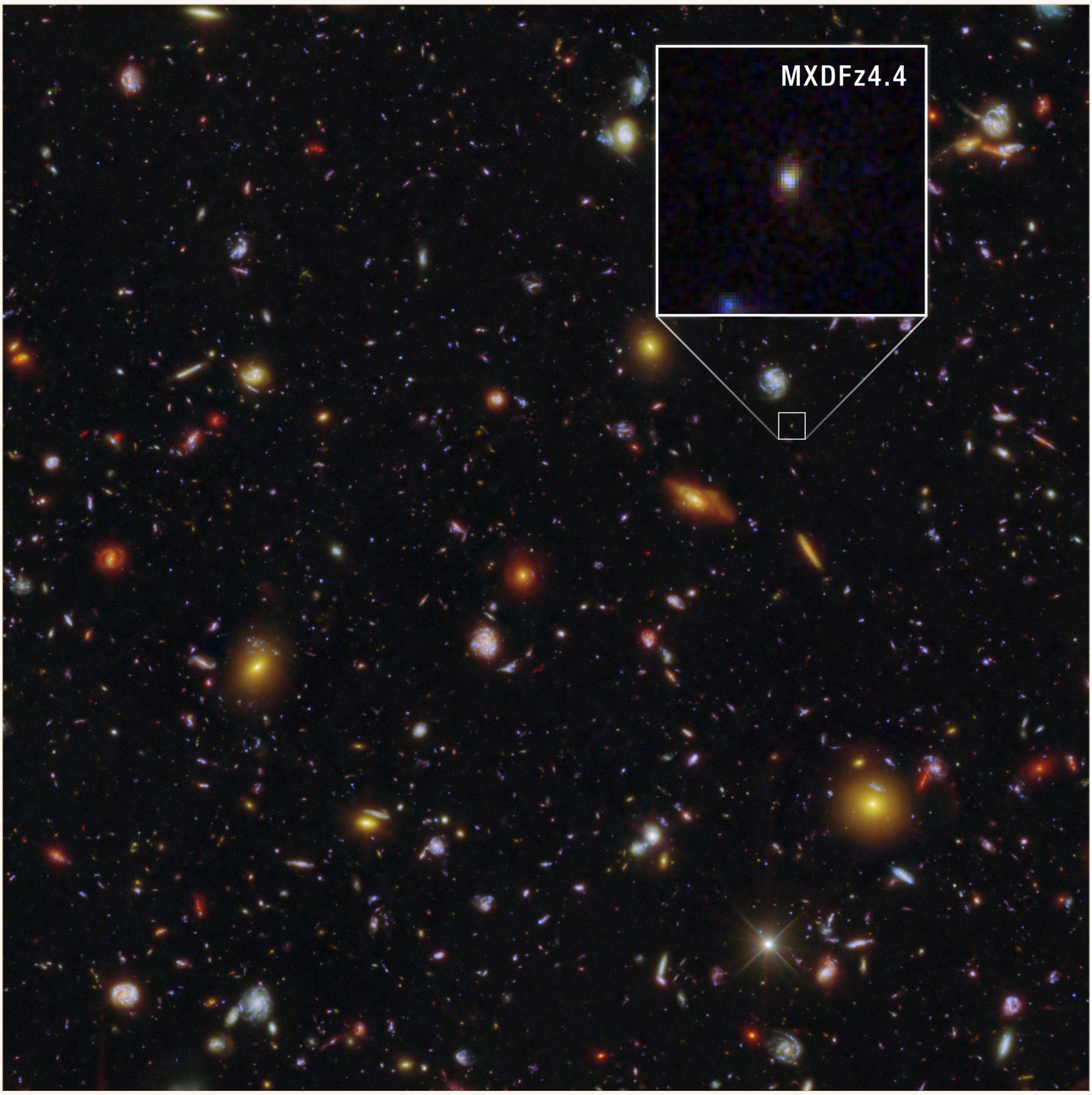
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

Svjetlost koja je raščistila maglu

Prvih nekoliko stotina milijuna godina svemir je bio neproziran. Prostor je bio ispunjen neutralnim vodikom — atomima koji su još imali svoje elektrone — a neutralni vodik vrlo dobro apsorbira *ionizirajuće* ultraljubičasto zračenje: svjetlost kratkih valnih duljina, ispod 912 ångström (tzv. *Lymanove granice*), dovoljno energetsku da izbije elektron iz atoma vodika. Ne čini to svako UV zračenje — ultraljubičasta svjetlost duljih valnih duljina ne apsorbira se na isti način i iz ranih galaksija vidimo je mnogo — pa je mladi svemir zadržavao upravo ovu ionizirajuću svjetlost. Tijekom sljedećih otprilike milijardu godina nešto je preplavilo kozmos dovoljnom količinom takve svjetlosti da ponovno ukloni te elektrone, ionizira vodik i dopusti svjetlosti da slobodno putuje. Astronomi to zovu epohom reionizacije, a očiti osumnjičenici su prve galaksije: njihove vruće, kratkoživuće zvijezde stvaraju obilje ionizirajućeg UV zračenja i, ako ga je dovoljno pobjeglo u međugalaktički prostor, mogle su obaviti posao.

Problem je riječ *pobjeglo*. Većina ionizirajuće svjetlosti neke galaksije nikada ne izađe iz nje — apsorbira je isti vodik unutar galaksije koji zvijezde pokušavaju ionizirati. Samo dio procuri u svemir, a taj udio, *udio bijega* (*escape fraction*), najteži je broj za odrediti u cijeloj priči. Još gore, tijekom same reionizacije procurjelu svjetlost gotovo je nemoguće uhvatiti: međugalaktička magla koju pomaže raščistiti apsorbira je mnogo prije nego što stigne do nas. Zato astronomi, žele li proučiti curenje, moraju gledati neposredno *nakon* što se magla raziđe, prema galaksijama dovoljno bliskima toj epohi da je mogu zastupati.

Tim koji vodi Ilias Goovaerts sada je to curenje uhvatio gotovo najdalje u prošlost gdje je ikad viđeno. Dubokim snimkama Hubblea i JWST-a opisuju jednu slabu galaksiju — katalogiziranu kao MXDFz4.4 — čije se odbjeglo ionizirajuće UV zračenje pojavljuje kao mrljica svjetlosti u jednom Hubbleovu filtru. Galaksija je na crvenom pomaku 4.442, približno 250 milijuna godina nakon završetka reionizacije: najudaljeniji izravno otkriveni “izvor curenja” do sada.



MXDFz4.4 (uvećana u umetku) slaba je mrljica u ovom dubokom polju Hubblea i JWST-a — najudaljenija galaksija iz koje je dosad izravno uhvaćeno ionizirajuće ultraljubičasto zračenje kako izlazi, viđena približno 250 milijuna godina nakon završetka kozmičke reionizacije.

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

Broj koji će se najviše prenositi iz ovog rada jest udio bijega, i visok je — negdje između polovice i gotovo sve ionizirajuće svjetlosti galaksije. Taj je broj stvaran, ali vrijedi paziti što ovdje znači “stvaran”. Nije očitan sa slike; rekonstruiran je kroz lanac modela, a raspon je širok iz poštenog razloga. Korisnija priča ima dva dijela: što nam jedan uhvaćeni slučaj curenja može i ne može reći te tiši drugi rezultat — prvi pokušaj, ovako duboko u prošlosti, da se neizravna metoda pronalaženja curenja provjeri prije nego što izravna metoda prestane djelovati.

Što je "udio bijega" i zašto ga je tako teško odrediti

Zvijezde — osobito najveće, najvruće i najmlađe — emitiraju ultraljubičastu svjetlost dovoljno energetsku da izbije elektrone iz atoma vodika. Astronomi to zovu ionizirajućim zračenjem ili, na ovim konkretnim valnim duljinama, svjetlošću *Lymanova kontinuuma*. To je valuta reionizacije: svemir je postao proziran kada je oslobođeno dovoljno tih fotona da međugalaktički vodik ostane ioniziran.

Ali i galaksija je puna vodika. Velik dio ionizirajuće svjetlosti koju proizvede apsorbira se prije nego što izađe — potroši se na ionizaciju plina same galaksije. *Udio bijega* jest dio koji uspije izići u međugalaktički prostor, gdje doista može pomoći reionizirati širi svemir. To je središnji broj cijelog pitanja i teško ga je izmjeriti iz dva razloga.

Prvo, tijekom reionizacije međugalaktički medij još je pun neutralnog vodika koji apsorbira upravo svjetlost koju pokušavate otkriti — pa odbjegla svjetlost obično uopće ne stigne do nas. Drugo, čak i kada je *možete* vidjeti (neposredno nakon te epohe, duž neuobičajeno prozirnog smjera), pretvaranje detekcije u udio bijega znači podijeliti opaženu količinu s onim što je galaksija proizvela — a ni to se ne može izravno vidjeti. Mora se modelirati iz druge svjetlosti galaksije, zaključene povijesti stvaranja zvijezda i pretpostavki o samim zvijezdama.

Zato udjeli bijega dolaze sa širokim rasponima nesigurnosti i zato — kada se mora modelirati i međugalaktička apsorpcija — ista detekcija može podupirati širok raspon odgovora. Broj je rekonstrukcija, ne očitanje.

Što su autori učinili

- Potvrdili su udaljenost galaksije dubokom spektroskopijom instrumentom MUSE na VLT-u, koji je uhvatio jednu emisijsku liniju — Lyman-alfa — s asimetričnim profilom tipičnim za tu liniju pri velikom crvenom pomaku, čime je crveni pomak određen na $z = 4.442$. Vjerojatnost slučajnog poravnanja s objektom u prvom planu procijenili su na 0.0076%.
- Otkrili su odbjeglo ionizirajuće zračenje (Lymanov kontinuum) na dubokoj Hubbleovoj snimci F435W — filtru koji pri ovom crvenom pomaku vidi samo svjetlost ispod 912 ångström, dakle onu koja se računa kao "pobjegla". Detekcija je na 5.2–5.3σ (sigma mjeri koliko signal leži iznad očekivane buke; 5σ je vrlo strog statistički prag, ne dokaz da je interpretacija točna — vodič), a dodatno je provjerena prema toku svjetlosti u milijun praznih područja neba kako bi se isključio šum.
- Isključili su klasičnu zamku takve tvrdnje — mogućnost da je "odbjegla" svjetlost zapravo galaksija niskog crvenog pomaka koja se slučajno nalazi u prvom planu — koristeći razlučeni oblik izvora i prilagođeno razdvajanje slabe susjedne galaksije.
- Modelirali su zvijezde galaksije prilagodbom njezinih cjelovitih Hubble+JWST boja (kodom CIGALE i s nekoliko modela zvjezdanih populacija), što je upućivalo na nedavni nalet stvaranja zvijezda prije nekoliko milijuna godina.
- Modelirali su koliko bi ionizirajuće svjetlosti međugalaktički medij apsorbirao na putu, na 10,000 simuliranih pravaca gledanja, i sve spojili kako bi izveli udio bijega.
- Prvi put ovako daleko u prošlosti testirali su *neizravan* način prepoznavanja curenja — oblik i

prostornu raširenost Lyman-alfa linije (njezin “halo fraction”) — prema izravnoj detekciji.

Što su pronašli

- Najudaljeniji dosad izravno otkriveni izvor Lymanova kontinuuma, pri z = 4.442.
- Stvarnu detekciju same odbjegle ionizirajuće svjetlosti — ne zaključak, nego signal na slici pri 5.2–5.3σ.
- Visok udio bijega, u rasponu 50–100%, ovisno o pretpostavkama — velik, ali ovisan o modelu. (Zasebna *relativna* procjena ide još više, iznad 100%. To je posljedica načina na koji je definirana — uspoređuje odbjeglu ionizirajuću svjetlost s ultraljubičastom svjetlošću galaksije prije korekcije na prašinu — a ne znak da izlazi više svjetlosti nego što je zvijezde stvaraju.)
- Dokaze iz prilagođenog zvjezdanog svjetla da nedavni nalet stvaranja zvijezda pokreće i proizvodnju i bijeg ionizirajuće svjetlosti.
- “Opreznu potporu”, riječima autora, uporabi oblika Lyman-alfa linije kao pokazatelja bijega pri velikom crvenom pomaku.

Što ovo ne dokazuje

- **Ne** identificira “galaksije koje su reionizirale svemir”. Ovo je jedna galaksija, i to približno 250 milijuna godina *nakon* završetka reionizacije, ne tijekom nje. Ona je korak prema toj epohi, ne slika samog događaja.
- Udio bijega **nije** mjerenje. Rekonstruira se dijeljenjem opažene svjetlosti *modeliranom* procjenom proizvedene svjetlosti, a zatim korekcijom za *modeliranu* količinu međugalaktičke apsorpcije — pri čemu autori namjerno biraju povoljan pravac gledanja, jer galaksija čija procurjela svjetlost uopće stiže do nas mora ležati u prozirnijem smjeru od prosječnog. Širok raspon (50–100%, a relativno i više) pošten je potpis te ovisnosti o modelu.
- **Ne** potvrđuje novi Lyman-alfa pokazatelj. “Oprezna potpora” iz jednog objekta prvi je test, ne potvrda.
- Sam za sebe **ne** utvrđuje da je naletno stvaranje zvijezda pokrenulo reionizaciju. To je razumno tumačenje temeljeno na jednoj galaksiji i analizi pokazatelja, ne demonstrirani zakon.

Koliko su dokazi jaki

- **Jaki** ondje gdje su izravni: crveni pomak (prepoznatljivo oblikovana Lyman-alfa linija, uz 0.0076% vjerojatnosti kontaminacije iz prvog plana) i detekcija odbjegle svjetlosti (5.2–5.3σ, provjerena prema milijun praznih otvora, uz pažljivo zatvorenu zamku objekta u prvom planu — problem koji je ranije srušio tvrdnje o curenju pri velikom crvenom pomaku).
- **Slabiji, i otvoreno tako opisani, ondje gdje su modelirani:** *vrijednost* udjela bijega (ovisi o modelu zvijezda i odabranom međugalaktičkom pravcu gledanja), “značenje” za reionizaciju (jedan objekt

plus tumačenje) i novi pokazatelj (prvi, oprezan test).
- Poštenje rada vidi se u rasponima. Navodi raspone umjesto jednog broja, potporu pokazatelju naziva "opreznom" i čak odbija vjerovati jednoj vlastitoj procjeni međugalaktičke transmisije. To je pažljiv rad koji se sam ne prenapuhuje; rizik od prenaglašavanja dolazi izvana.

Zašto je važno

Izravne detekcije odbjegle ionizirajuće svjetlosti sada su potisnute otprilike onoliko blizu eri reionizacije koliko je moguće — do ruba na kojem svjetlost još jedva prolazi. To već samo po sebi nešto vrijedi. Ali tiši rezultat možda je važniji: kada uđemo *unutar* reionizacije, izravna metoda potpuno prestaje raditi i sve se oslanja na neizravne pokazatelje kalibrirane na bližim, lakšim galaksijama. Testirati jedan od tih pokazatelja ovdje, gdje ga još možete usporediti sa stvarnom detekcijom, način je da zaslužite pravo vjerovati mu kasnije, kada ga više ne možete provjeriti. Vrijednost MXDFz4.4 manje je u "pronašli smo galaksiju koja je reionizirala svemir", a više u "učimo čitati curenje i počinjemo provjeravati alate prije mraka".

Sažetak bez prenaglašavanja

Astronomi su Hubbleom i JWST-om izravno otkrili ionizirajuće ultraljubičasto zračenje koje izlazi iz jedne galaksije na crvenom pomaku 4.442 — najudaljeniju takvu detekciju dosad, približno 250 milijuna godina nakon završetka kozmičke reionizacije. Sama detekcija je čvrsta. Često citirani udio bijega od 50–100% nije izmjeren nego rekonstruiran modelima zvijezda galaksije i međugalaktičke apsorpcije duž namjerno povoljnog pravca gledanja, zbog čega je raspon tako širok. Uz detekciju tim je proveo prvi visokoredshiftni test neizravne metode za prepoznavanje odbjegle svjetlosti — oblika Lyman-alfa linije — i našao "opreznu potporu". To je pažljiv rezultat na jednom objektu: stvarno uhvaćeno curenje, pošteno nesiguran broj vezan uz njega i prvi korak prema alatima koji će astronomima trebati kada curenje više neće biti moguće izravno vidjeti.

Provjera bez uljepšavanja

Što rad pokazuje: Izravnu detekciju odbjegle ionizirajuće svjetlosti (Lymanov kontinuum) na 5.2–5.3σ iz galaksije pri z = 4.442 — najvišem crvenom pomaku takve detekcije dosad — uz pažljivo isključenu kontaminaciju objektom u prvom planu.

Što je moguće, ali nije dokazano: Da je udio bijega galaksije 50–100%. Detekcija je stvarna; udio je rekonstruiran kroz modele zvjezdane populacije i međugalaktičke apsorpcije (duž povoljnog pravca gledanja), zbog čega ima tako širok raspon. Također je moguće, ali nedokazano, da oblik Lyman-alfa linije radi kao pokazatelj bijega ovako daleko u prošlost — rad nudi "opreznu potporu" na temelju jednog objekta.

Što ne pokazuje: Da je ovo galaksija “koja je reionizirala svemir” (nalazi se nakon te epohe i samo je jedan objekt) niti da je naletno stvaranje zvijezda pokrenulo reionizaciju (tumačenje, ne demonstracija).

Glavna ograničenja: Uzorak od jednog objekta; udio bijega ovisan o izboru modela i namjerno prozirnom pravcu gledanja; prvi, oprezni test novog pokazatelja; i sama teškoća proučavanja odbjegle ionizirajuće svjetlosti tako blizu razdoblju u kojem postaje nevidljiva.

Koliko povjerenja treba imati opći čitatelj? Visoko da je odbjegla svjetlost doista detektirana i da je ovo najudaljeniji takav slučaj dosad. Nisko do srednje za točnu vrijednost udjela bijega — “50–100%” treba tretirati kao modelirani raspon, ne mjerenje. Srednje za novi pokazatelj: obećavajuća prva provjera, ne potvrđen alat.

Ažuriranja nakon objave

- **Ispravak · 2026-07-28**

  Nakon povratne informacije Iliasa Goovaertsa, autora rada, članak sada od samog početka uvodi ionizirajuću svjetlost umjesto ultraljubičaste svjetlosti općenito, jasno navodeći da je ionizirajuće samo kratkovalno ultraljubičasto zračenje — ispod Lymanove granice od 912 ångström — dok je UV duljih valnih duljina neionizirajući i redovito se opaža iz galaksija visokog crvenog pomaka.

Izvori

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