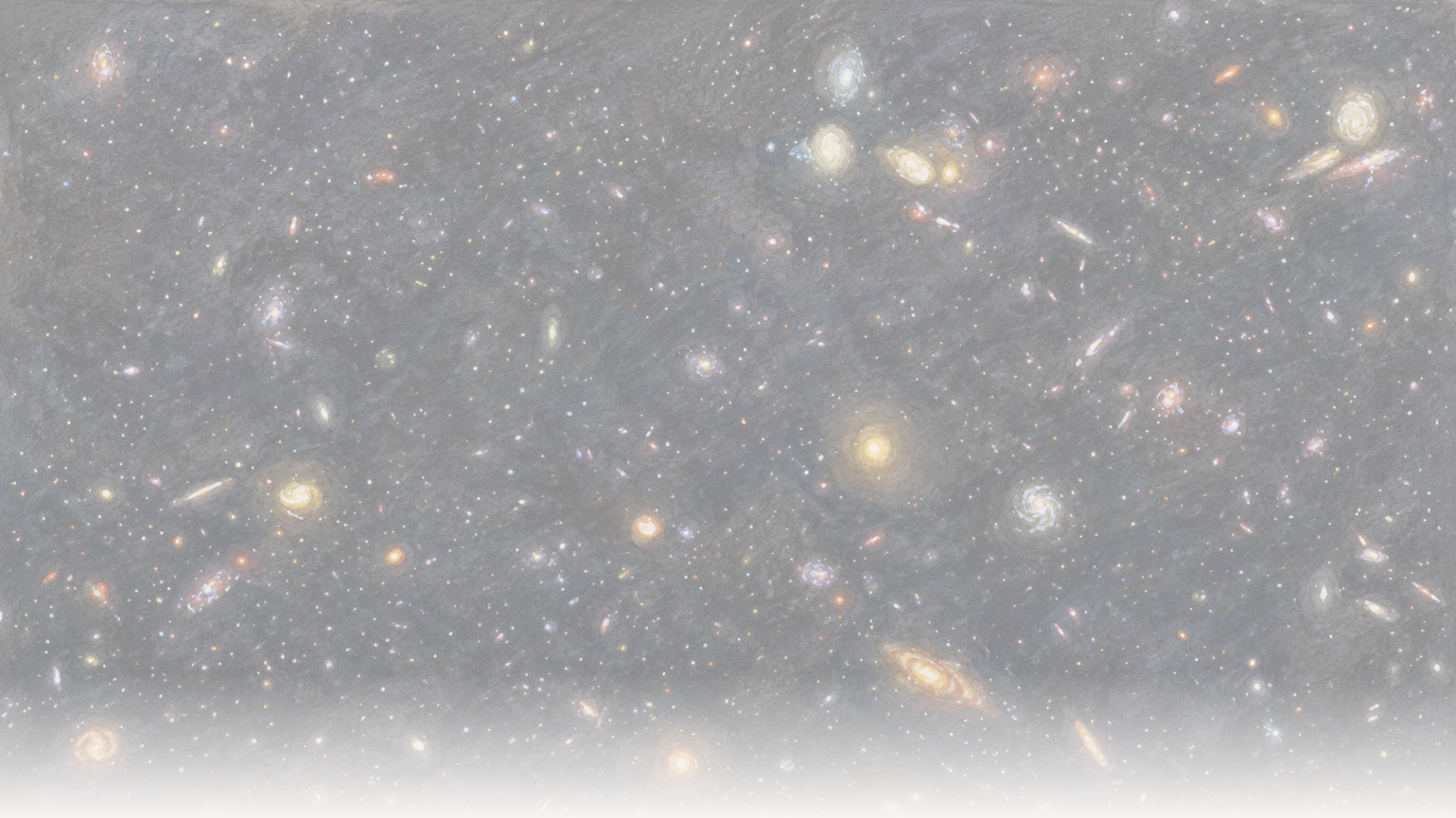


The Clean Paper

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

Najudaljenija galaksija iz koje je dosad direktno uhvaćena jonizujuća svetlost kako izlazi

Astronomi su JWST-om i Hubbleom uhvatili jonizujuće ultraljubičasto zračenje koje izlazi iz jedne galaksije približno 250 miliona godina nakon kozmičke reionizacije — najudaljenije takvo „curenje" viđeno direktno. Naslovni udeo izlaska od 50-100% stvaran je, ali rekonstruisan modelima, ne izmeren; tiši rezultat prvi je test pri velikom crvenom pomaku kako prepoznati curenje kada ga više neće biti moguće videti direktno.

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

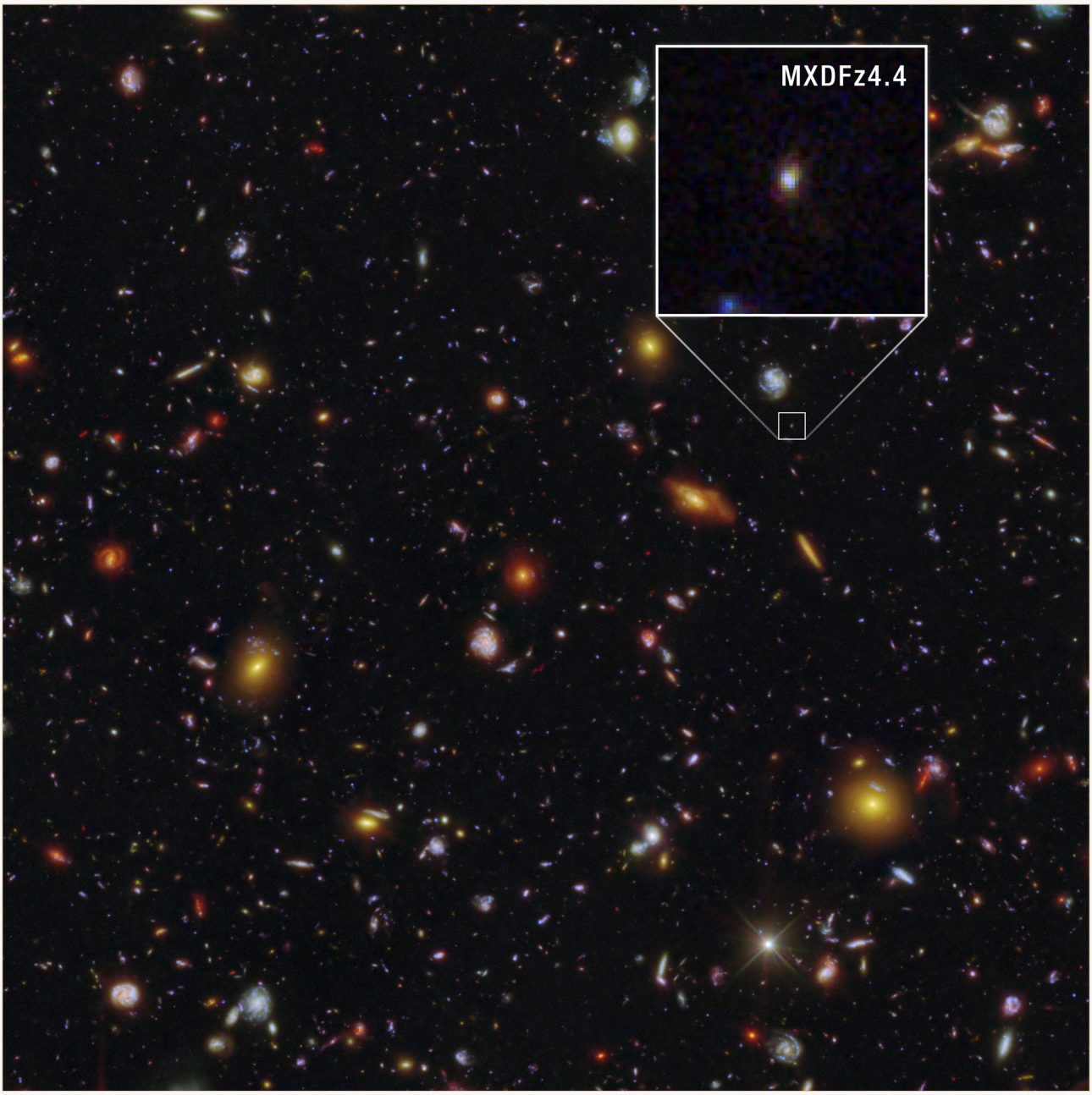
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

Svetlost koja je raščistila maglu

Prvih nekoliko stotina miliona godina svemir je bio neproziran. Prostor je bio ispunjen neutralnim vodonikom — atomima koji su još imali svoje elektrone — a neutralni vodonik vrlo dobro apsorbuje *jonizujuće* ultraljubičasto zračenje: svetlost kratkih talasnih dužina, ispod 912 ångström (tzv. *Lymanove granice*), dovoljno energetsku da izbije elektron iz atoma vodonika. Ne čini to svako UV zračenje — ultraljubičasta svetlost dužih talasnih dužina ne apsorbuje se na isti način i iz ranih galaksija vidimo je mnogo — pa je mladi svemir zadržavao upravo ovu jonizujuću svetlost. Tokom sledećih otprilike milijardu godina nešto je preplavilo kozmos dovoljnom količinom takve svetlosti da ponovo ukloni te elektrone, jonizuje vodonik i dozvoli svetlosti da slobodno putuje. Astronomi to zovu epohom reionizacije, a očiti osumnjičenici su prve galaksije: njihove vruće, kratkoživuće zvezde stvaraju obilje jonizujućeg UV zračenja i, ako ga je dovoljno izašlo u međugalaktički prostor, mogle su obaviti posao.

Problem je reč *izašlo*. Većina jonizujuće svetlosti neke galaksije nikada ne izađe iz nje — apsorbuje je isti vodonik unutar galaksije koji zvezde pokušavaju jonizovati. Samo deo procuri u svemir, a taj udeo, *udeo izlaska* (*escape fraction*), najteži je broj za odrediti u celoj priči. Još gore, tokom same reionizacije procurilu svetlost gotovo je nemoguće uhvatiti: međugalaktička magla koju pomaže raščistiti apsorbuje je mnogo pre 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 gde je ikad viđeno. Dubokim snimkama Hubblea i JWST-a opisuju jednu slabu galaksiju — katalogiziranu kao MXDFz4.4 — čije se izlazeće jonizujuće UV zračenje pojavljuje kao mrljica svetlosti u jednom Hubbleovu filtru. Galaksija je na crvenom pomaku 4.442, približno 250 miliona godina nakon završetka reionizacije: najudaljeniji direktno 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 direktno uhvaćeno jonizujuće ultraljubičasto zračenje kako izlazi, viđena približno 250 miliona 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 je udeo izlaska, i visok je — negde između polovine i gotovo sve jonizujuće svetlosti galaksije. Taj je broj stvaran, ali vredi paziti šta ovde znači “stvaran”. Nije očitan sa slike; rekonstruisan je kroz lanac modela, a raspon je širok iz poštenog razloga. Korisnija priča ima dva dela: što nam jedan uhvaćeni slučaj curenja može i ne može reći te tiši drugi rezultat — prvi pokušaj, ovako duboko u prošlosti, da se indirektna metoda pronalaženja curenja proveri pre nego što direktna metoda prestane delovati.

Šta je “udeo izlaska” i zašto ga je tako teško odrediti

zvezde — naročito najveće, najvruće i najmlađe — emituju ultraljubičastu svetlost dovoljno energetsku da izbije elektrone iz atoma vodonika. Astronomi to zovu jonizujućim zračenjem ili, na ovim konkretnim valnim dužinama, svetlošću *Lymanova kontinuuma*. To je valuta reionizacije: svemir je postao proziran kada je oslobođeno dovoljno tih fotona da međugalaktički vodonik ostane jonizovan.

Ali i galaksija je puna vodonika. Velik deo jonizujuće svetlosti koju proizvede apsorbuje se pre nego što izađe — potroši se na ionizaciju gasa same galaksije. *Udeo izlaska* je deo koji uspe izići u međugalaktički prostor, gde zaista može pomoći reionizirati širi svemir. To je centralni broj celog pitanja i teško ga je izmeriti iz dva razloga.

Prvo, tokom reionizacije međugalaktički medij još je pun neutralnog vodonika koji apsorbuje upravo svetlost koju pokušavate otkriti — pa izlazeća svetlost obično uopšte ne stigne do nas. Drugo, čak i kada je *možete* videti (neposredno nakon te epohe, duž neuobičajeno prozirnog smera), pretvaranje detekcije u udeo izlaska znači podeliti uočenu količinu s onim što je galaksija proizvela — a ni to se ne može direktno videti. Mora se modelirati iz druge svetlosti galaksije, zaključene istorije stvaranja zvezda i pretpostavki o samim zvezdama.

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

Šta su autori uradili

- 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 $z = 4.442$. Verovatnoća slučajnog poravnanja s objektom u prvom planu procenili su na 0.0076%.
- Otkrili su izlazeće jonizujuće zračenje (Lymanov kontinuum) na dubokoj Hubbleovoj snimci F435W — filtru koji pri ovom crvenom pomaku vidi samo svetlost ispod 912 ångström, dakle onu koja se računa kao “izašla”. Detekcija je na 5.2–5.3σ (sigma meri koliko signal leži iznad očekivane buke; 5σ je vrlo strog statistički prag, ne dokaz da je interpretacija tačna — vodič), a dodatno je proverena prema toku svetlosti u milion praznih područja neba kako bi se isključio šum.
- Isključili su klasičnu zamku takve tvrdnje — mogućnost da je “izlazeća” svetlost zapravo galaksija niskog crvenog pomaka koja se slučajno nalazi u prvom planu — koristeći razdvojeni oblik izvora i prilagođeno razdvajanje slabe susedne galaksije.
- Modelirali su zvezde galaksije prilagodbom njenih celovitih Hubble+JWST boja (kodom CIGALE i s nekoliko modela zvezdanih populacija), što je upućivalo na nedavni nalet stvaranja zvezda pre nekoliko miliona godina.
- Modelirali su koliko bi jonizujuće svetlosti međugalaktički medij apsorbovao na putu, na 10,000 simuliranih pravaca gledanja, i sve spojili kako bi izveli udeo izlaska.
- Prvi put ovako daleko u prošlosti testirali su *indirektan* način prepoznavanja curenja — oblik i prostornu raširenost Lyman-alfa linije (njen “halo fraction”) — prema direktnoj detekciji.

Šta su pronašli

- Najudaljeniji dosad direktno otkriveni izvor Lymanova kontinuuma, pri z = 4.442.
- Stvarnu detekciju same izlazeće jonizujuće svetlosti — ne zaključak, nego signal na slici pri 5.2–5.3σ.
- Visok udeo izlaska, u rasponu 50–100%, zavisno o pretpostavkama — velik, ali zavisan o modelu. (Zasebna *relativna* procena ide još više, iznad 100%. To je posledica načina na koji je definisana — upoređuje odbjeglu jonizujuću svetlost s ultraljubičastom svetlošću galaksije pre korekcije na prašinu — a ne znak da izlazi više svetlosti nego što je zvezde stvaraju.)
- Dokaze iz prilagođenog zvezdanog svetla da nedavni nalet stvaranja zvezda pokreće i proizvodnju i izlazak jonizujuće svetlosti.
- "Opreznu podršku", rečima autora, upotrebi oblika Lyman-alfa linije kao pokazatelja izlaska pri velikom crvenom pomaku.

Šta ovo ne dokazuje

- **Ne** identifika "galaksije koje su reionizirale svemir". Ovo je jedna galaksija, i to približno 250 miliona godina *nakon* završetka reionizacije, ne tokom nje. Ona je korak prema toj epohi, ne slika samog događaja.
- Udeo izlaska **nije** merenje. rekonstruisa se deljenjem uočene svetlosti *modeliranom* procenom proizvedene svetlosti, a zatim korekcijom za *modeliranu* količinu međugalaktičke apsorpcije — pri čemu autori namerno biraju povoljan pravac gledanja, jer galaksija čija procurila svetlost uopšte stiže do nas mora ležati u prozirnijem smeru od prosečnog. Širok raspon (50–100%, a relativno i više) pošten je potpis te ovisnosti o modelu.
- **Ne** potvrđuje novi Lyman-alfa pokazatelj. "Oprezna podrška" iz jednog objekta prvi je test, ne potvrda.
- Sam za sebe **ne** utvrđuje da je naletno stvaranje zvezda pokrenulo reionizaciju. To je razumno tumačenje zasnovano na jednoj galaksiji i analizi pokazatelja, ne demonstrirani zakon.

Koliko su dokazi jaki

- **Jaki** tamo gde su direktni: crveni pomak (prepoznatljivo oblikovana Lyman-alfa linija, uz 0.0076% verovatnoće kontaminacije iz prvog plana) i detekcija izlazeće svetlosti (5.2–5.3σ, proverena prema milion 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, tamo gde su modelirani:** *vrednost* udela izlaska (zavisi o modelu zvezda i odabranom međugalaktičkom pravcu gledanja), "značenje" za reionizaciju (jedan objekat plus tumačenje) i novi pokazatelj (prvi, oprezan test).
- Poštenje rada vidi se u rasponima. Navodi raspone umesto jednog broja, podršku pokazatelju naziva "opreznom" i čak odbija verovati jednoj sopstvenoj proceni međugalaktičke transmisije.

To je pažljiv rad koji se sam ne prenapuhuje; rizik od prenaglašavanja dolazi izvana.

Zašto je važno

Direktne detekcije izlazeće jonizujuće svetlosti sada su potisnute otprilike onoliko blizu eri reionizacije koliko je moguće — do ruba na kojem svetlost još jedva prolazi. To već samo po sebi nešto vredi. Ali tiši rezultat možda je važniji: kada uđemo *unutar* reionizacije, direktna metoda potpuno prestaje raditi i sve se oslanja na indirektne pokazatelje kalibrirane na bližim, lakšim galaksijama. Testirati jedan od tih pokazatelja ovde, gde ga još možete uporediti sa stvarnom detekcijom, način je da zaslužite pravo verovati mu kasnije, kada ga više ne možete proveriti. Vrednost MXDFz4.4 manje je u "pronašli smo galaksiju koja je reionizirala svemir", a više u "učimo čitati curenje i počinjemo proveravati alate pre mraka".

Kratak rezime

Astronomi su Hubbleom i JWST-om direktno otkrili jonizujuće ultraljubičasto zračenje koje izlazi iz jedne galaksije na crvenom pomaku 4.442 — najudaljeniju takvu detekciju dosad, približno 250 miliona godina nakon završetka kozmičke reionizacije. Sama detekcija je čvrsta. Često citirani udeo izlaska od 50–100% nije izmeren nego rekonstruisan modelima zvezda galaksije i međugalaktičke apsorpcije duž namerno povoljnog pravca gledanja, zbog čega je raspon tako širok. Uz detekciju tim je proveo prvi visokoredshiftni test indirektne metode za prepoznavanje izlazeće svetlosti — oblika Lyman-alfa linije — i našao "opreznu podršku". 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 direktno videti.

Provera bez ulepšavanja

Šta rad pokazuje: direktnu detekciju izlazeće jonizujuće svetlosti (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.

Šta je moguće, ali nije dokazano: Da je udeo izlaska galaksije 50–100%. Detekcija je stvarna; udeo je rekonstruisan kroz modele zvezdane populacije i međugalaktičke apsorpcije (duž povoljnog pravca gledanja), zbog čega ima tako širok raspon. Takođe je moguće, ali nedokazano, da oblik Lyman-alfa linije radi kao pokazatelj izlaska ovako daleko u prošlost — rad nudi "opreznu podršku" na osnovu jednog objekta.

Šta ne pokazuje: Da je ovo galaksija "koja je reionizirala svemir" (nalazi se nakon te epohe i samo je jedan objekat) niti da je naletno stvaranje zvezda pokrenulo reionizaciju (tumačenje, ne demon-

stracija).

Glavna ograničenja: Uzorak od jednog objekta; udeo izlaska zavisan o izboru modela i namerno prozirnom pravcu gledanja; prvi, oprezni test novog pokazatelja; i sama teškoća proučavanja izlazeće jonizujuće svetlosti tako blizu periodu u kojem postaje nevidljiva.

Koliko poverenja treba imati opšti čitalac? Visoko da je izlazeća svetlost zaista detektovana i da je ovo najudaljeniji takav slučaj dosad. Nisko do srednje za tačnu vrednost udela izlaska — "50–100%" treba tretirati kao modelirani raspon, ne merenje. Srednje za novi pokazatelj: obećavajuća prva provera, ne potvrđen alat.

Ažuriranja nakon objavljivanja

- **Ispravka · 2026-07-28**

  Nakon povratne informacije Iliasa Goovaertsa, autora rada, članak sada od samog početka uvodi jonizujuću svetlost umesto ultraljubičaste svetlosti uopšteno, jasno navodeći da je jonizujuće samo kratkovalno ultraljubičasto zračenje — ispod Lymanove granice od 912 ångström — dok je UV dužih talasnih dužina neionizirajući i redovno 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