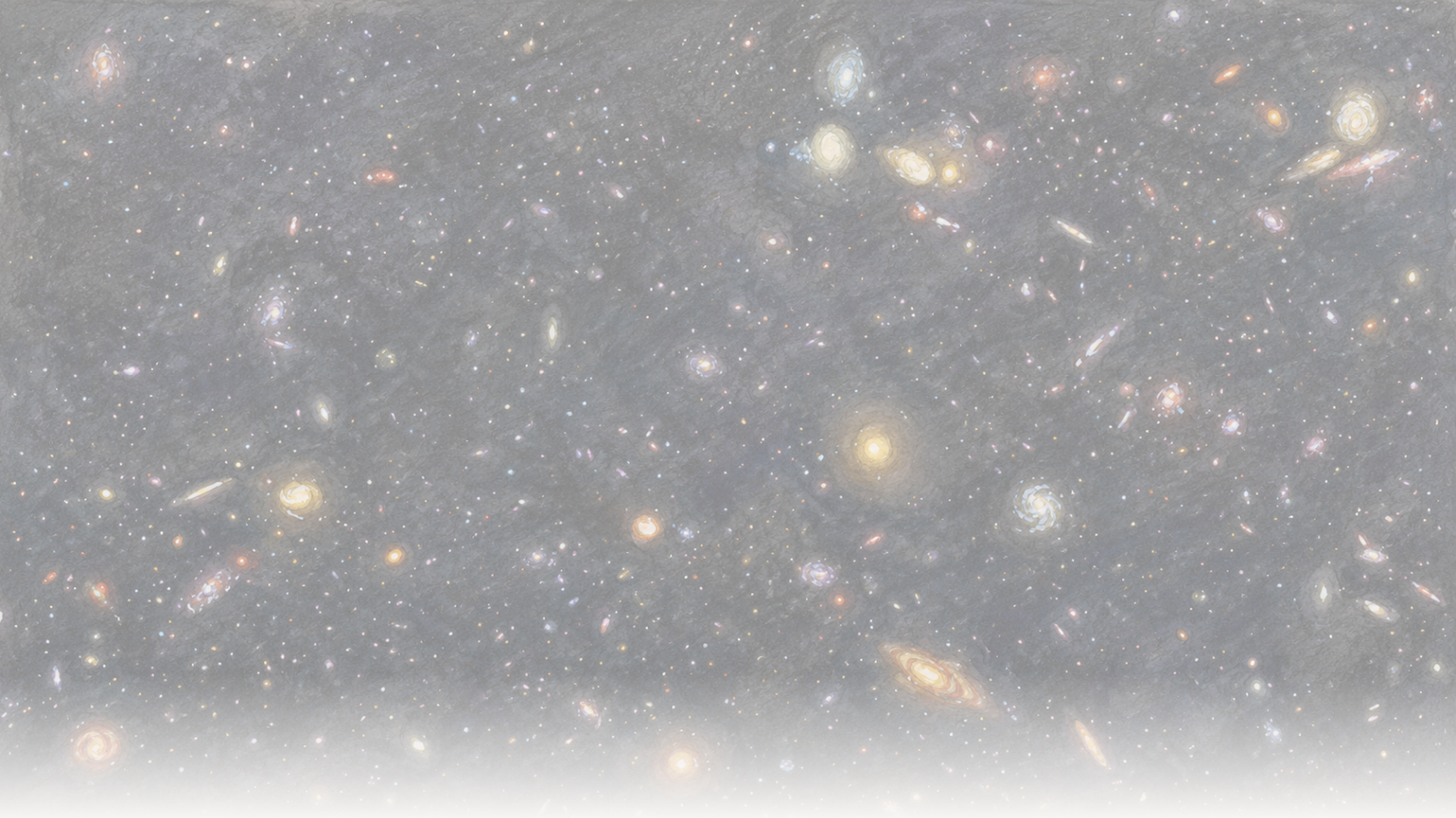


The Clean Paper

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

Kõige kaugem galaktika, mille ioniseeriva valguse lekkimist on seni tabatud

Astronoomid kasutasid JWST-d ja Hubble'it, et tabada umbes 250 miljonit aastat pärast kosmilise reionisatsiooni lõppu ühe galaktika põgenevat ioniseerivat ultraviolettkiirgust — kõige kaugem selline leke, mida on otse nähtud. Pealkirjaks sobiv 50–100% pääsemisfraktsioon on päris, kuid rekonstrueeritud mudelite abil, mitte mõõdetud; vaiksem tulemus on esimene suure punanihkega test sellele, kuidas leket märgata siis, kui seda ennast enam näha ei saa.

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

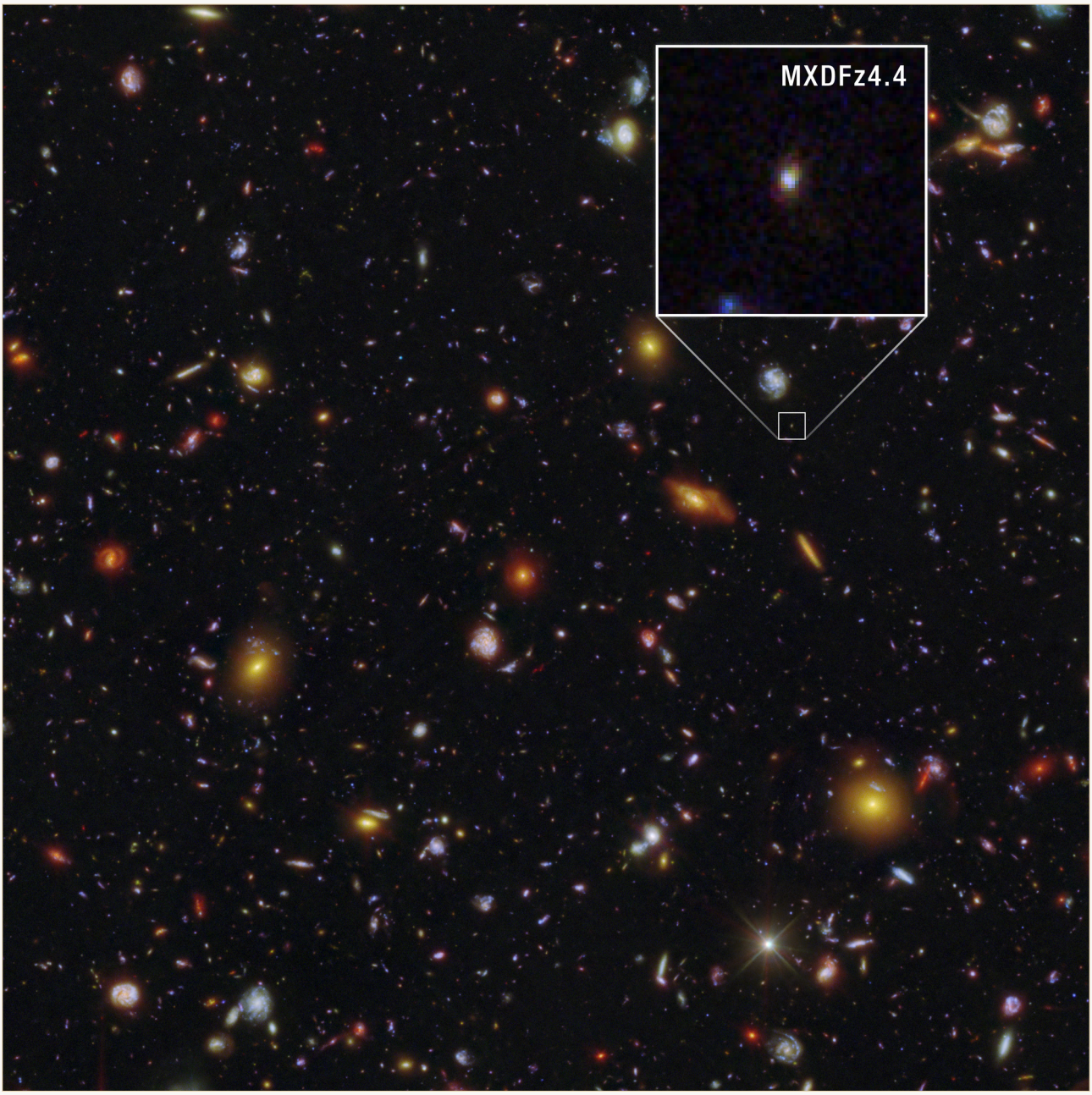
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

Valgus, mis udu hajutas

Oma esimeste sadade miljonite aastate jooksul oli universum läbipaistmatu. Kosmos oli täis neutraalset vesinikku — aatomeid, mille elektronid olid endiselt seotud — ning neutraalne vesinik neelab väga tõhusalt *ioniseerivat* ultraviolettkiirgust: lühikese lainepikkusega valgust alla 912 ongströmi (*Lymani piir*), millel on piisavalt energiat, et vesinikuaatomilt elektron lahti lüüa. Kõik ultraviolettvalgus seda ei tee — pikema lainepikkusega UV-d ei neelata samamoodi ja varastest galaktikatest näeme seda küllaga — seega püüdis noor universum kinni just ioniseeriva valguse. Järgmise umbes miljardi aasta jooksul täitis miski kosmose seda valgust piisavalt suure hulga footonitega, et elektronid uuesti vesinikust eemaldada, ioniseerida gaas ja lasta valgusel vabalt liikuda. Astronoomid nimetavad seda reionisatsiooni ajastuks ning ilmsed kahtlusalused on esimesed galaktikad: nende kuumad ja lühiealised tähed kiirgavad tohutult ioniseerivat ultravioletti ning kui sellest pääses piisavalt galaktikatevahelisse ruumi, võis see töö ära teha.

Probleem on sõnas *pääses*. Enamik galaktika ioniseerivast valgusest ei jõua kunagi välja — selle neelab sama galaktikasisene vesinik, mida tähed ioniseerida püüavad. Ainult mingi osa lekib kosmosesse ning see osa, *pääsemisfraktsioon*, on kogu loo kõige raskemini kindlakstehtav arv. Veel hullem: reionisatsiooni ajal on lekkivat valgust peaaegu võimatu tabada, sest galaktikatevaheline udu, mida see ise aitab hajutada, neelab valguse ammu enne, kui see meieni jõuab. Seetõttu peavad astronoomid leket uurima vahetult *pärast* udu hajumist, vaadates galaktikaid, mis on sellele ajastule piisavalt lähedal, et seda esindada.

Ilias Goovaertsi juhitud töörühm on nüüd tabanud selle lekke peaaegu nii kauges minevikus, kui seda üldse on nähtud. Hubble'i ja JWST süvakaadrite abil teatavad nad ühest nõrgast galaktikast kataloogitähisega MXDFz4.4, mille põgenev ioniseeriv ultraviolett ilmub ühes Hubble'i filtris valguslaiguna. Galaktika punanihe on 4,442, mis tähendab umbes 250 miljonit aastat pärast reionisatsiooni lõppu: kõige kaugem seni otse tuvastatud „lekitaja".



MXDFz4.4 (suurendatuna lisapildil) on selles sügavas Hubble'i ja JWST väljas nõrk laik — kõige kaugem galaktika, mille ioniseeriva ultraviolettvalguse lekkimist on otse nähtud, umbes 250 miljonit aastat pärast kosmilise reionisatsiooni lõppu.

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

Arv, mis sellest artiklist kõige tõenäolisemalt ringi läheb, on pääsemisfraktsioon — ja see on suur, kusagil poole ja kogu galaktika ioniseeriva valguse vahel. See arv on päris, kuid tasub olla täpne selles, mida „päris" siin tähendab. Seda ei loetud otse pildilt; see rekonstrueeriti mudelite ahela kaudu ning lai vahemik on ausal põhjusel lai. Kasulikum lugu koosneb kahest osast: mida üks tabatud leke meile ütleb ja mida mitte, ning vaiksemast teisest tulemusest — esimesest nii kauges ajas tehtud katsest kontrollida kaudset lekkemärki ajal, mil otsene meetod veel napilt töötab.

Mis on „pääsemisfraktsioon“ ja miks seda nii raske tabada on

Tähed — eriti kõige suuremad, kuumemad ja nooremad — kiirgavad ultraviolettvalgust, millel on piisavalt energiat, et vesinikuaatomitelt elektrone eemaldada. Astronoomid nimetavad seda ioniseerivaks kiirguseks või nende konkreetsete lainepikkuste puhul *Lymani kontiinumi* valguseks. See on reionisatsiooni „valuuta“: universum muutus läbipaistvaks siis, kui neid footoneid pääses vabadusse piisavalt palju, et hoida galaktikatevaheline vesinik ioniseerituna. Kuid ka galaktika ise on vesinikku täis. Suur osa galaktika toodetud ioniseerivast valgusest neeldub enne väljumist — see kulub galaktika enda gaasi ioniseerimisele. *Pääsemisfraktsioon* on osa, mis jõuab galaktikatevahelisse ruumi, kus see saab tõepoolest aidata laiemat universumit reioniseerida. See on kogu küsimuse keskne suurus ning seda on raske mõõta kahel põhjusel.

Esiteks on reionisatsiooni ajal galaktikatevaheline keskkond endiselt täis neutraalset vesinikku, mis neelab just seda valgust, mida püüad tuvastada — seega ei jõua lekkinud valgus tavaliselt meieni üldse. Teiseks, isegi kui mingit osa *saab* näha (vahetult pärast ajastut, ebatavaliselt läbipaistva vaatejoone kaudu), tuleb pääsemisfraktsiooni saamiseks jagada nähtud valgus galaktika toodetud valgusega — aga ka viimast ei näe me otse. Seda tuleb modelleerida galaktika muu valguse, järeldatud tähetekkeajaloo ja tähtede endi kohta tehtud eelduste põhjal.

Seepärast on pääsemisfraktsioonidel laiad veapiirid ning kui tuleb modelleerida ka galaktikatevahelist neeldumist, võib sama tuvastus toetada üsna laia vastuste vahemikku. Arv on rekonstruktsioon, mitte näidiku näit.

Mida autorid tegid

- Kinnitasid galaktika kauguse VLT MUSE instrumendi süvaspektroskoopiaga, mis tabas ühe emissioonijoone — Lymani alfa — kõrgele punanihkele omase ebasümmeetrilise profiiliga ja fikseeris punanihkeks z = 4.442. Juhusliku esiplaanilise kattumise tõenäosuseks hindasid nad 0,0076%.
- Tuvastasid põgeneva ioniseeriva (Lymani kontiinumi) valguse sügavas Hubble’i F435W pildis — filtris, mis selle punanihke korral näeb ainult alla 912 ongströmi valgust, mis loetakse „pääsenuks“. Tuvastus on tasemel 5,2–5,3σ (sigma näitab, kui kaugel asub signaal eeldatavast mürast; 5σ on väga range statistiline lävi, mitte tõend, et tõlgendus on õige — juhend); seda kontrolliti miljoni tühja taevaava voo vastu, et veenduda, et tegemist pole müraga.
- Välistas klassikalise lõksu: et „põgenev“ valgus tuleb tegelikult juhuslikult ette sattunud väikse punanihkega galaktikast. Selleks kasutati allika lahutatud kuju ja nõrga naabri spetsiaalset deblending’ut.
- Modelleerisid galaktika tähepopulatsiooni, sobitades kogu Hubble’i+JWST värviinformatsiooni CIGALE koodi ja mitme tähepopulatsioonimudeliga; tulemus viitas mõne miljoni aasta tagusele hiljutisele tähetekkepuhangule.
- Modelleerisid 10 000 simuleeritud vaatejoone põhjal, kui palju ioniseerivat valgust oleks galaktikatevaheline keskkond teel neelanud, ning ühendasid kõik komponendid pääsemisfraktsiooni tuletamiseks.
- Testisid esimest korda nii suures punanihkes *kaudset* lekkemärki — Lymani alfa joone kuju ja

ulatust („halofraktsiooni“) — otsese tuvastuse vastu.

Mida nad leidsid

- Seni kõige kaugema otse tuvastatud Lymani kontiinumi kiirgaja, z = 4.442.
- Päris tuvastuse põgenevast ioniseerivast valgusest endast — mitte järelduse, vaid 5,2–5,3σ signaali pildis.
- Suure, sõltuvalt eeldustest **50–100%** pääsemisfraktsiooni — suur, kuid mudelist sõltuv. (Eraldi *suhteline* hinnang läheb isegi üle 100%. See on definitsiooni eripära — võrdlus põgeneva ioniseeriva valguse ja galaktika ultraviolettvalguse vahel enne tolmukorrektsiooni — mitte märk sellest, et välja pääseb rohkem valgust, kui tähed üldse toodavad.)
- Sobitatud tähevalgusest tõendeid, et hiljutine tähetekkepuhang juhib nii ioniseeriva valguse tootmist kui ka selle väljumist.
- Autorite sõnul „ettevaatlikku toetust“ Lymani alfa joone kuju kasutamisele lekke jälgijana suure punanihke korral.

Mida see ei tõesta

- See **ei tuvasta „galaktikaid, mis reioniseerisid universumi“**. Tegemist on ühe galaktikaga, mis asub umbes 250 miljonit aastat *pärast* reionisatsiooni lõppu, mitte selle ajal. See on astmelaud ajastu poole, mitte pilt sündmusest endast.
- Pääsemisfraktsioon **ei ole mõõtmine**. See rekonstrueeritakse, jagades vaadeldud valguse *modelleeritud* toodetud valgusega ja parandades tulemust seejärel *modelleeritud* galaktikatevahelise neeldumise võrra — ning autorid kasutavad teadlikult soodsat vaatejoont, sest galaktika, mille lekkinud valgus üldse meieni jõuab, peab asuma keskmisest läbipaistvamas suunas. Lai vahemik (50–100% ja suhtelises definitsioonis kõrgemgi) on selle mudelisõltuvuse aus tunnus.
- See **ei valideeri** uut Lymani alfa jälgijat. „Ettevaatlik toetus“ ühe objekti põhjal on esimene test, mitte kinnitus.
- See **ei lahenda** üksi küsimust, kas puhanguline täheteke juhtis reionisatsiooni. See on mõistlik tõlgendus ühe galaktika ja jälgijaanalüüsi põhjal, mitte demonstreeritud seaduspära.

Kui tugev on tõendusmaterjal

- **Tugev** seal, kus tulemus on otsene: punanihe (iseloomuliku kujuga Lymani alfa joon, esiplaanisaaste tõenäosus 0,0076%) ning põgeneva valguse tuvastus (5,2–5,3σ, kontrollitud miljoni tühja ava vastu ja hoolikalt suletud esiplaanilise sissetungija lõks — probleem, mis on varasemaid suure punanihke lekkekandidaate kukutanud).
- **Nõrgem, ja avalikult nii, seal, kus tulemus on modelleeritud:** pääsemisfraktsiooni *väärtus* (sõltub tähemudelist ja valitud galaktikatevahelisest vaatejoonest), reionisatsiooni „tähendus“ (üks

objekt pluss tõlgendus) ja uus jälgija (esimene ettevaatlik test).
- Artikli ausus on tema vahemikes. See esitab ühe arvu asemel vahemikke, nimetab jälgijale saadud tuge „ettevaatlikuks“ ja keeldub isegi usaldamast üht enda hinnangut galaktikatevahelisele läbilaskvusele. See on ettevaatlik artikkel, mis ennast üle ei müü; haibirisk tuleb väljastpoolt.

Miks see oluline on

Põgeneva ioniseeriva valguse otsesed tuvastused on nüüd viidud umbes nii reionisatsiooniajastu lähedale, kui võimalik — piirile, kus valgus veel napilt läbi pääseb. Juba see on väärtuslik. Kuid vaiksem tulemus võib olla olulisem: kui minna *reionisatsiooni sisse*, ebaõnnestub otsene meetod täielikult ja kõik sõltub kaudsetest jälgijatest, mis on kalibreeritud lähemate ja lihtsamate galaktikate peal. Sellise jälgija testimine siin, kus seda saab veel päris tuvastuse vastu kontrollida, on viis teenida usaldus hilisemaks ajaks, kus otsest kontrolli enam teha ei saa. MXDFz4.4 väärtus pole niivõrd „leidsime universumit reioniseerinud galaktika“, vaid „õpime leket lugema ja hakkame oma instrumente pimeduse jaoks kontrollima“.

Lühidalt

Hubble’it ja JWST-d kasutavad astronoomid on otse tuvastanud ioniseeriva ultraviolettvalguse, mis pääseb ühest z = 4.442 punanihkega galaktikast — seni kõige kaugem selline tuvastus, umbes 250 miljonit aastat pärast kosmilise reionisatsiooni lõppu. Tuvastus ise on tugev. Sageli tsiteeritav 50–100% pääsemisfraktsioon pole mõõdetud, vaid rekonstrueeritud galaktika tähtede ja soodsalt valitud vaatejoone galaktikatevahelise neeldumise mudelite kaudu, mistõttu ongi vahemik nii lai. Koos tuvastusega tegid teadlased esimese suure punanihkega testi kaudsele lekkemärgile — Lymani alfa joone kujule — ning leidsid sellele „ettevaatlikku toetust“. See on hoolikas ühe objekti tulemus: päris tabatud leke, ausalt ebakindel arv selle küljes ning esimene samm nende tööriistade suunas, mida astronoomid vajavad siis, kui leket ennast enam üldse näha ei saa.

Kaine hinnang

Mida artikkel näitab: Otsest, 5,2–5,3σ tuvastust z = 4.442 galaktikast põgenevast ioniseerivast (Lymani kontiinumi) valgusest — seni suurima punanihkega selline tuvastus — kus esiplaanilise saaste lõks on hoolikalt välistatud.

Mis on usutav, kuid tõestamata: Et galaktika pääsemisfraktsioon on 50–100%. Tuvastus on päris; fraktsioon rekonstrueeritakse tähepopulatsiooni- ja galaktikatevahelise neeldumise mudelite kaudu (soodsal vaatejoonel), mistõttu ulatubki see nii laiasse vahemikku. Samuti usutav, kuid tõestamata: et Lymani alfa joone kuju toimib nii kauges ajas lekke jälgijana — artikkel pakub ühe objekti põhjal „ettevaatlikku toetust“.

Mida see ei näita: Et tegemist on galaktikaga, „mis reioniseeris universumi“ (see asub pärast ajastut ja on üks objekt), ega et puhanguline täheteke juhtis reionisatsiooni (tõlgendus, mitte demonstratsioon).

Peamised piirangud: Ühe objekti valim; pääsemisfraktsioon sõltub mudelivalikutest ja teadlikult läbipaistvast vaatejoonest; uue jälgija esimene ettevaatlik test; ning põgeneva ioniseeriva valguse uurimise üldine äärmuslik raskus nii lähedal ajastule, kus see muutub nähtamatuks.

Kui kindel võiks tavalugeja olla? Väga kindel, et põgenev valgus tõesti tuvastati ja see on seni kõige kaugem selline tabamus. Madal kuni keskmine kindlus täpse pääsemisfraktsiooni osas — „50–100%“ tuleb käsitleda modelleeritud vahemiku, mitte mõõtmisena. Keskmine kindlus uue jälgija suhtes: paljulubav esimene kontroll, mitte kinnistunud tööriist.

Avaldamisjärgsed uuendused

- **Parandus · 2026-07-28**

  Pärast artikli autori Ilias Goovaertsi tagasisidet tutvustab tekst ioniseerivat valgust juba algusest, mitte ultraviolettvalgust üldiselt, ning teeb selgeks, et ioniseeriv on ainult lühikese lainepikkusega ultraviolett — alla 912 ongströmi Lymani piiri — samal ajal kui pikema lainepikkusega ultraviolett on mitteioniseeriv ja seda vaadeldakse suure punanihkega galaktikates tavaliselt.

Allikad

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