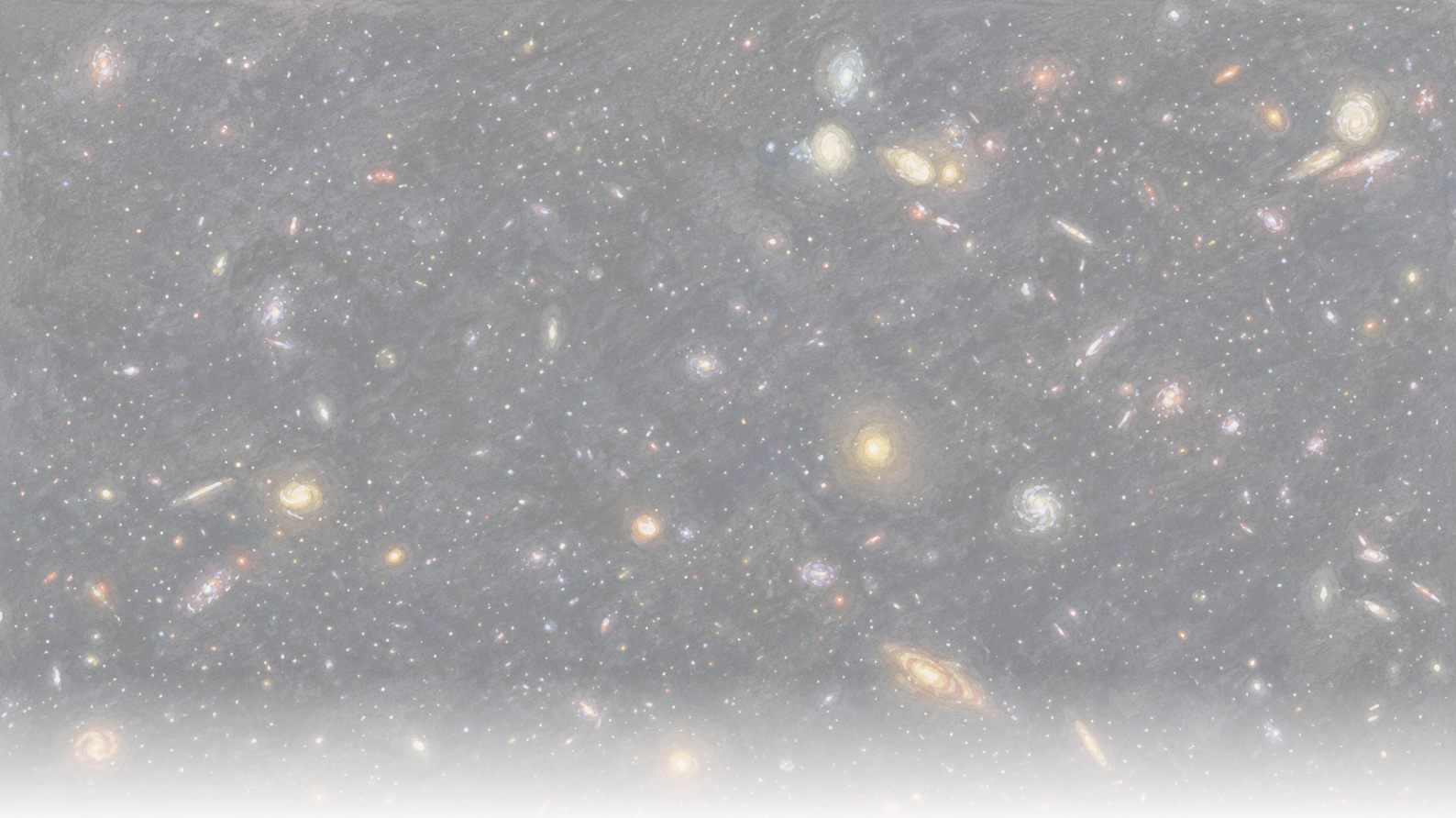


The Clean Paper

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

# Ljósið sem ruddi þokunni burt

*JWST og Hubble greindu beint jónandi útfjólublátt ljós sem sleppur úr einni vetrarbraut um 250 milljón árum eftir lok endurjónunar — fjarlægasta beina greining slíks leka til þessa. Slepptihlutfallið 50–100% er ekki bein mæling heldur endurgerð úr líkönum. Mikilvægara er að þetta veitir snemma próf á því hvernig finna má leka þegar ljós hans verður sjálft ósýnilegt.*

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

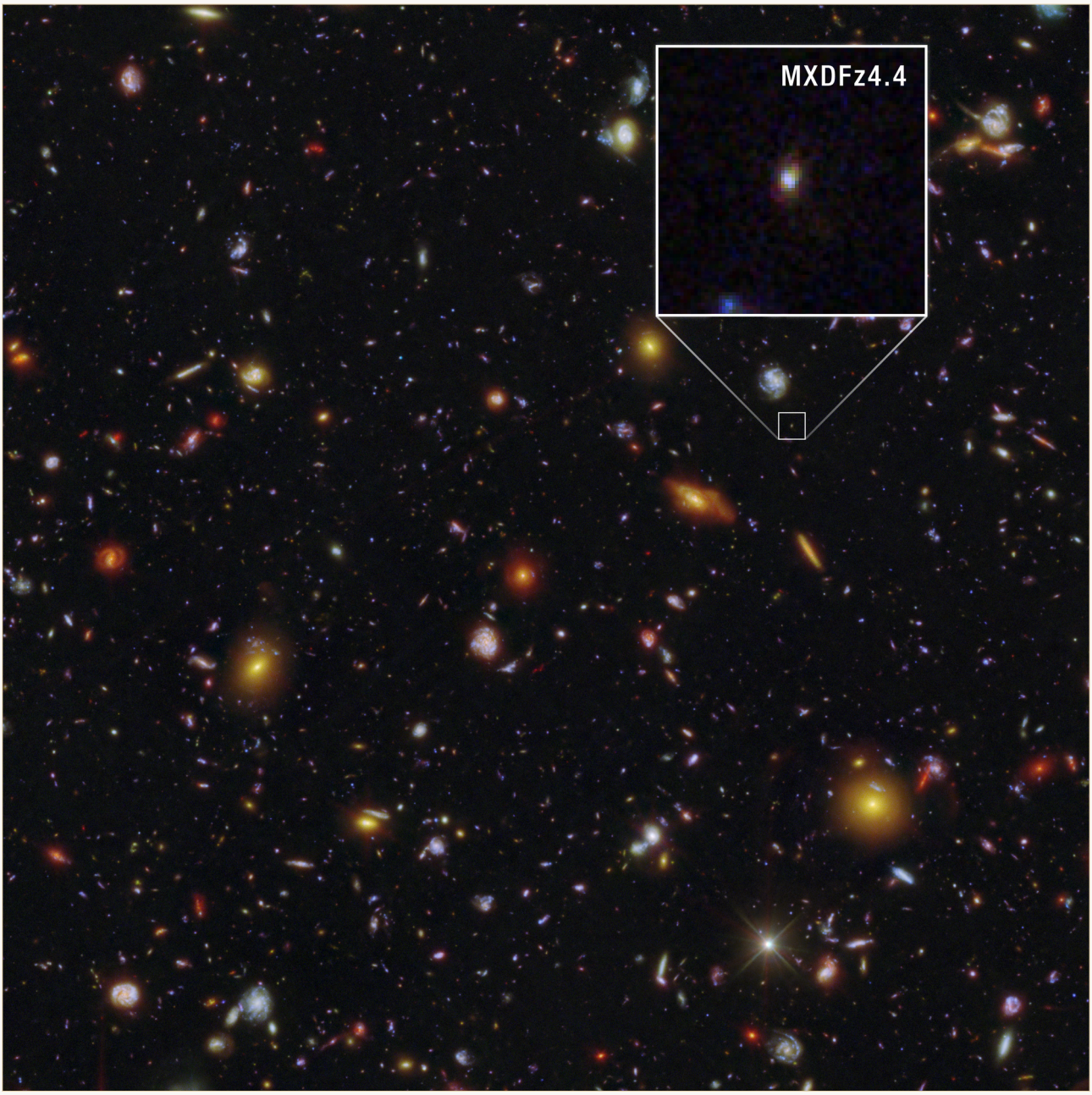
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

# Ljósið sem ruddi þokunni burt

Fyrstu nokkur hundruð milljón ár alheimsins var hann ógegnsær. Geimurinn var fylltur hlutlausu vetni — atómum sem höfðu enn rafeindir sínar — og hlutlaust vetni gleypir mjög vel **jónandi útfjólublátt ljós**: stuttbylgjuljós undir 912 ångström, *Lyman-mörkunum*, með næga orku til að slá rafeind af vetnisatómi. Ekki allt UV-ljós gerir þetta; lengri bylgjulengdir gleypast öðruvísi og við sjáum mikið af þeim frá fyrstu vetrarbrautunum. Það er sérstaklega jónandi ljósið sem ungi alheimurinn lokaði inni. Síðan, á næsta u.þ.b. milljarði ára, fylltist alheimurinn af nógu mörgum slíkum ljóseindum til að rífa rafeindirnar aftur af vetninu, jóna gasið og gera ljósinu kleift að ferðast frjálst. Stjörnufræðingar kalla þetta **endurjónunarskeiðið**, og augljósustu grunaðir eru fyrstu vetrarbrautirnar: heitar, skammlífar stjörnur þeirra framleiða mikið jónandi UV, og ef nægilega mikið slapp út í geiminn milli vetrarbrauta gætu þær hafa unnið verkið.

Vandamálið er orðið *slapp*. Mest jónandi ljós vetrarbrautar sleppur aldrei út — það gleypist af vetninu inni í vetrarbrautinni sjálfri. Aðeins hluti lekur út í geiminn, og sá hluti, **sleppihlutfallið**, er erfiðasta talan í allri sögunni. Enn verra er að á endurjónunarskeiðinu sjálfu er nánast ómögulegt að sjá leka ljósið: millivetrarbrautaþokan sem það er að hjálpa til við að eyða gleypir það löngu áður en það nær til okkar. Til að rannsaka lekann þurfa stjörnufræðingar því að horfa rétt *eftir* að þokan hverfur, á vetrarbrautir nógu nálægt tímabilinu til að þjóna sem staðgenglar.

Teymi undir stjórn Ilias Goovaerts hefur nú náð þessum leka svo langt aftur í tíma sem næstum hefur tekist. Með djúpmyndum frá Hubble og JWST greina þau frá einni daufri vetrarbraut — MXDFz4.4 — þar sem jónandi UV sem sleppur út birtist sem ljósblettur í einni Hubble-síu. Vetrarbrautin er við rauðvik 4,442, um 250 milljón árum **eftir** að endurjónun lauk: fjarlægasta vetrarbrautin þar sem slíkur leki hefur verið greindur beint.




MXDFz4.4 (stækkuð í innskoti) er daufur ljósblettur á þessu djúpa Hubble- og JWST-sviði — fjarlægasta vetrarbrautin sem hefur verið séð beint leka jónandi útfjólublá ljósi, um 250 milljón árum eftir lok endurjónunar alheimsins.

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

Talan sem líklegust er til að ferðast úr greininni er sleppihlutfallið, og það er hátt — einhvers staðar á milli helmings og alls jónandi ljóss vetrarbrautarinnar. Talan er raunveruleg niðurstaða, en mikilvægt er að skilja hvað „raunveruleg“ merkir hér. Hún var ekki lesin beint af mynd. Hún var endurgerð með röð líkana, og breitt bilið er breitt af heiðarlegri ástæðu. Gagnlegri saga hefur tvo hluta: hvað ein bein lekaathugun getur og getur ekki sagt okkur, og rólegri seinni niðurstöðu — fyrstu tilraun svona langt aftur í tíma til að prófa óbeina leið til að greina leka, áður en beina leiðin hættir að virka alveg.

**Hvað er „sleppihlutfall“ og hvers vegna er það svona erfitt?**

Stjörnur — sérstaklega stærstu, heitustu og yngstu — gefa frá sér UV með næga orku til að losa rafeindir úr vetni. Stjörnufræðingar kalla þetta jónandi geislun eða, á þessum sérstöku bylgjulengdum, *Lyman-continuum* ljós. Þetta eru gjaldmiðlar endurjónunar: alheimurinn varð gegnsær þegar nógu mörgum slíkum ljóseindum var sleppt til að halda vetninu milli vetrarbrauta jónuðu.

En vetrarbraut er sjálf full af vetni. Mikið af jónandi ljósi stjarnanna gleypist áður en það kemst út — orkan fer í að jóna gas vetrarbrautarinnar sjálfrar. *Sleppihlutfallið* er sá hluti sem sleppur út í millivetrarbrautageiminn og getur því lagt sitt af mörkum til endurjónunar stærri alheimsins. Þetta er lykiltalan, og hún er erfið að mæla af tveimur ástæðum.

Í fyrsta lagi er millivetrarbrautaefnið á endurjónunarskeiðinu enn fullt af hlutlausu vetni sem gleypir einmitt ljósið sem maður vill mæla — þannig að leki nær venjulega aldrei til okkar. Í öðru lagi, jafnvel þegar hluti hans sést rétt eftir tímabilið og eftir óvenju tærri sjónlínu, þarf að deila því sem mælist með því sem vetrarbrautin **framleiddi**. En framleiðsluna sjáum við ekki beint heldur. Hana þarf að líkana út frá öðru ljósi vetrarbrautarinnar, áætlaðri stjörnumyndunarsögu og forsendum um stjörnurnar.

Þess vegna hafa sleppihlutföll stór skekkjumörk. Þegar gleypni millivetrarbrauta þarf einnig að líkana getur sama beina greiningin stutt breitt svarbil. Talan er endurgerð, ekki aflestur.

# Hvað gerðu höfundarnir?

- Staðfestu fjarlægð vetrarbrautarinnar með djúpri litrófsmælingu MUSE á VLT. Þar fannst ein útgeislunarlína — Lyman-alfa — með einkennandi ósamhverfu sniði við hátt rauðvik og rauðvikið var fest við z = 4,442. Líkurnar á tilviljunarkenndri framlínustöðu voru metnar **0,0076%**.
- Greindu jónandi Lyman-continuum ljós sem sleppur út í djúpri Hubble F435W-mynd. Við þetta rauðvik sér sú sía aðeins ljós neðan 912 ångström sem telst jónandi leki. Merkið er **5,2–5,3**$\sigma$ og var borið saman við flæði í einni milljón tómra himinopna til að ganga úr skugga um að það væri ekki hávaði.
- Útilokuðu klassíska gildruna í slíkum fullyrðingum — að „lekinn“ sé í raun lágröuðviks vetrarbraut fyrir framan skotmarkið — með upplausn á lögun uppsprettunnar og sérsmíðaðri aðgreiningu daufra nágranna.
- Líkönuðu stjörnurnar með því að aðlaga öll Hubble+JWST litagögnin með CIGALE og nokkrum stjörnustofnlíkönum. Það benti til nýlegs stjörnumyndunarkasts fyrir fáeinum milljónum ára.
- Líkönuðu hversu mikið jónandi ljós millivetrarbrautaefnið hefði gleypt á leiðinni með **10.000 hermdum sjónlínum** og sameinuðu það við hitt til að reikna sleppihlutfallið.
- Prófuðu, í fyrsta sinn svona langt aftur, *óbeina* aðferð til að finna leka — lögun og útbreiðslu Lyman-alfa-línunnar, hlutfall geislabaugsins („halo fraction“) — gegn beinu greiningunni.

# Hvað fundu þeir?

- Fjarlægasta beint greinda Lyman-continuum uppsprettu til þessa, við z = 4,442.
- Raunverulegt merki frá jónandi ljósinu sem sleppur út — ekki aðeins álykt un heldur merki í myndinni á **5,2–5,3$\sigma$**.
- Hátt sleppihlutfall, **50–100%** eftir forsendum — stórt, en líkanháð. Sérstakt *hlutfallslegt* mat fer jafnvel yfir 100%; það er afleiðing skilgreiningarinnar, sem ber jónandi leka saman við UV-ljós án fyrri rykleiðréttingar, ekki merki um að meira ljós sleppi en stjörnurnar framleiða.
- Vísbendingar úr stjörnulíkönunum um að nýlegt stjörnumyndunarkast knýi bæði framleiðslu og leka jónandi ljóssins.
- „Varfærinn stuðning“, með orðum höfundanna, við að nota lögun Lyman-alfa sem vísbendingu um leka við hátt rauðvik.

# Hvað sýnir þetta ekki?

- Það finnur **ekki „vetrarbrautirnar sem endurjónuðu alheiminn“**. Þetta er ein vetrarbraut og hún er um 250 milljón árum *eftir* að endurjónun lauk, ekki á tímabilinu sjálfu. Hún er skref í átt að því, ekki mynd af atburðinum.
- Sleppihlutfallið er **ekki bein mæling**. Það er endurgert með því að deila mældu ljósi með *líkanaðri* framleiðslu og leiðrétta síðan fyrir *líkanaðri* gleypni millivetrarbrauta. Höfundarnir nota jafnframt vísvitandi tiltölulega tærri sjónlínu, því vetrarbraut sem við sjáum leka frá hlýtur að vera á hagstæðari sjónlínu en meðaltal. Breiða bilið 50–100% er heiðarlegt merki um þessa líkanháðni.
- Greinin **staðfestir ekki** nýja Lyman-alfa-vísinn. „Varfærinn stuðningur“ frá einu fyrirbæri er fyrsta próf, ekki fullgild staðfesting.
- Hún sýnir **ekki ein og sér** að köstótt stjörnumyndun hafi knúið endurjónun. Það er sanngjörn túlkun byggð á einni vetrarbraut og vísagreiningu, ekki staðfest lögmál.

# Hversu sterk eru gögnin?

- **Sterk þar sem mælingin er bein:** rauðvikið, sem byggist á einkennandi Lyman-alfa-línu með aðeins 0,0076% líkum á framlínublöndun, og ljóslekagreiningin, 5,2–5,3$\sigma$, prófuð gegn milljón tómum opum með framlínugildruna vandlega útilokaða.
- **Veikari, og sagt hreint út, þar sem líkan kemur inn:** nákvæmt *gildi* sleppihlutfallsins, sem veltur á stjörnulíkani og millivetrarbrautasjónlínu; merking fyrir endurjónun, þar sem aðeins eitt fyrirbæri er skoðað; og nýi vísirinn, sem fær aðeins fyrsta varfærna prófið.
- Heiðarleiki greinarinnar sést í bilunum. Hún gefur svið fremur en eina tölu, kallar stuðning við vísinn „varfærinn“ og hafnar jafnvel einu eigin mati á gegndræpi millivetrarbrauta. Þetta er vönduð grein sem ofselur sig ekki; hættan á hype er utan hennar.

# Hvers vegna skiptir þetta máli?

Beinar greiningar á jónandi ljósi sem sleppur úr vetrarbrautum hafa nú verið ýttar næstum eins nálægt endurjónunarskeiðinu og hægt er — að mörkunum þar sem ljósið kemst enn naumlega í gegn. Það er mikilvægt eitt og sér. En rólegri niðurstaðan getur skipt meira máli: **innan** endurjónunarskeiðsins bregst beina aðferðin alveg, og þá byggist allt á óbeinum vísum sem þarf að kvarða á nærri og auðveldari vetrarbrautum. Að prófa einn slíkan vísi hér, þar sem enn er hægt að bera hann saman við raunverulega beina greiningu, er hvernig maður byggir upp traust áður en farið er þangað sem beina ljósið hverfur.

Gildi MXDFz4.4 er því síður „við fundum vetrarbraut sem endurjónaði alheiminn“ og frekar „við erum að læra að lesa lekann og byrja að prófa verkfærin áður en myrkrið tekur við“.

# Í stuttu máli

Stjörnufræðingar með Hubble og JWST hafa beint greint jónandi útfjólublátt ljós sem sleppur frá einni vetrarbraut við rauðvik 4,442 — fjarlægasta slíka greiningin til þessa, um 250 milljón árum eftir að endurjónun alheimsins lauk. Greining ljóssins sjálfs er traust. Hið auðtilvitnaða sleppihlutfall **50–100%** er hins vegar ekki mælt beint heldur endurgert með líkönum af stjörnum vetrarbrautarinnar og gleypni millivetrarbrauta eftir vísvitandi hagstæðri sjónlínu, sem skýrir breiða bilið. Samhliða greiningunni gerði teymið fyrsta prófið við svo hátt rauðvik á óbeinni aðferð til að finna leka — lögun Lyman-alfa-línunnar — og fann „varfærinn stuðning“. Þetta er vönduð niðurstaða úr einu fyrirbæri: raunverulegur leki, heiðarlega óviss tala sem sett er á hann og fyrsta skref í átt að verkfærunum sem þarf þegar ekki verður lengur hægt að sjá lekann beint.

# Raunhæf yfirferð

**Það sem greinin sýnir:** Beina **5,2–5,3**$\sigma$ greiningu á jónandi Lyman-continuum ljósi frá vetrarbraut við z = 4,442 — hæsta rauðvik slíkrar beinnar greiningar til þessa — eftir vandlega útilokun á framlínubliöndun.

**Það sem er líklegt en ekki sannað:** Að sleppihlutfall vetrarbrautarinnar sé 50–100%. Ljósið er raunverulega greint; hlutfallið er endurgert með stjörnustofn- og millivetrarbrautalíkönum eftir hagstæðri sjónlínu og þess vegna er bilið breitt. Einnig er líklegt en ekki staðfest að lögun Lyman-alfa virki sem lekavísir svona langt aftur; greinin veitir „varfærinn stuðning“ úr einu fyrirbæri.

**Það sem greinin sýnir ekki:** Að þetta sé vetrarbraut „sem endurjónaði alheiminn“ — hún er eftir tímabilið og aðeins eitt fyrirbæri — eða að köstótt stjörnumyndun hafi knúið endurjónun í heild.

**Helstu takmarkanir:** Úrtak af einu; sleppihlutfall sem veltur á líkanavali og vísvitandi tærri sjónlínu; fyrsta og varfærna próf á nýjum vísi; og sjálfur erfiðleikinn við að rannsaka jónandi leka svo nálægt tímabilinu þar sem hann verður ósýnilegur.

**Hversu mikið traust ætti almennur lesandi að bera til niðurstöðunnar?** Mikið traust á því að jónandi ljósið hafi í raun greinst og að þetta sé fjarlægasta slíka beina greiningin. Lítið til miðlungs traust á nákvæmu sleppihlutfalli — lesa skal „50–100%“ sem líkanað svið, ekki beina mælingu. Miðlungs traust á nýja vísinum: lofandi fyrsta próf, ekki staðfest verkfæri.

**Uppfærslur eftir birtingu**

- **Leiðrétting · 2026-07-28**

  Eftir ábendingu frá Ilias Goovaerts, einum höfunda greinarinnar, hefst greinin nú á jónandi ljósi fremur en útfjólubláu ljósi almennt. Þar er tekið skýrt fram að aðeins stuttbylgju-UV undir 912 ångström Lyman-mörkunum er jónandi, en lengri UV-bylgjulengdir eru ójónandi og sjást reglulega frá vetrarbrautum við hátt rauðvik.

## Heimildir

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