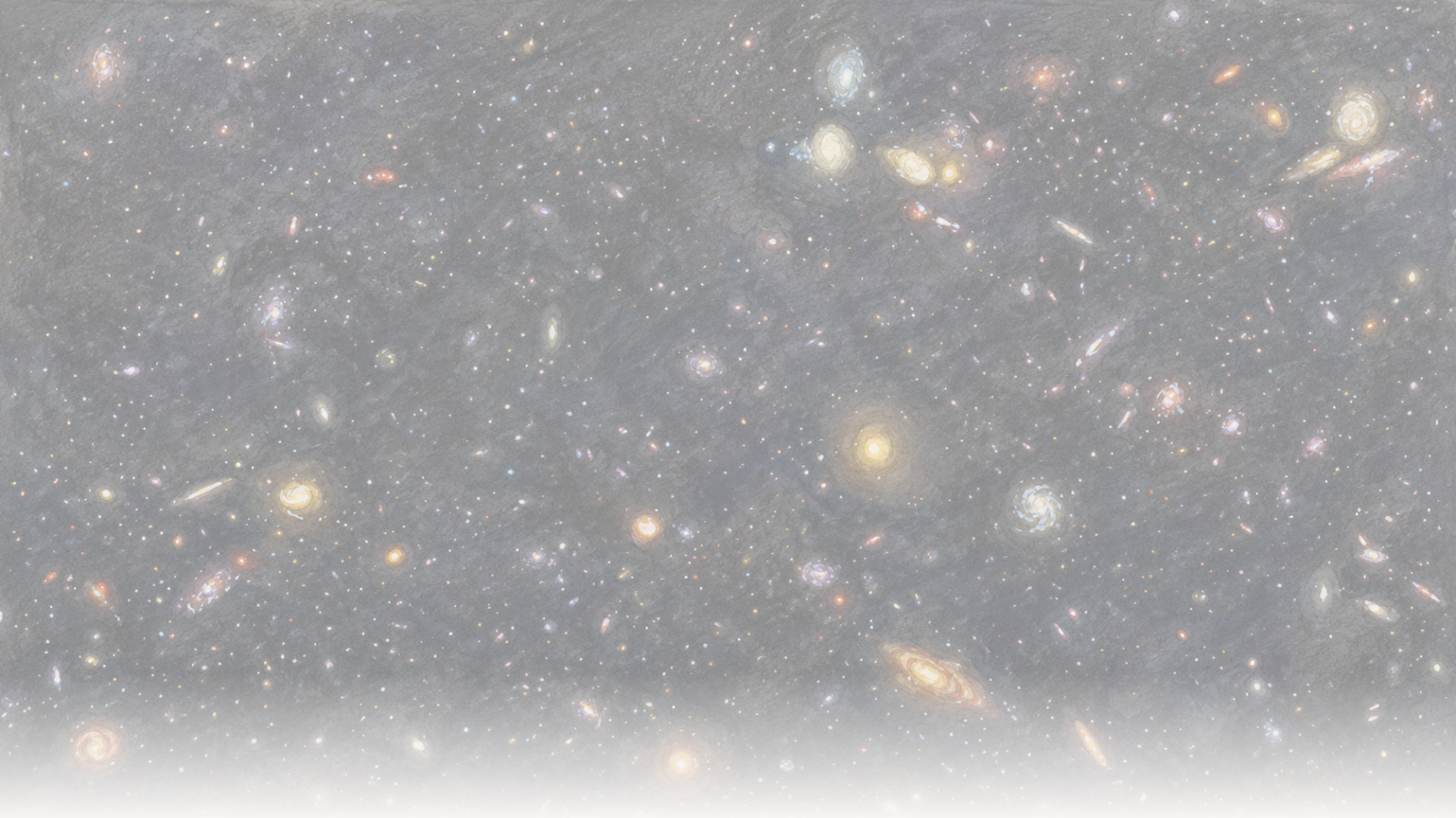


The Clean Paper

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

Kaukaisin galaksi, josta ionisoivaa valoa on nähty vuotavan suoraan

Tähtitieteilijät käyttivät JWST:tä ja Hubblea havaitakseen yksittäisestä galaksista karkaavaa ionisoivaa ultraviolettia noin 250 miljoonaa vuotta kosmisen reionisaation päättymisen jälkeen — kaukaisin tällainen suoraan nähty 'vuoto'. Otsikkoon helposti päätyvä 50–100%:n pakofraktio on todellinen tulos mutta mallien avulla rekonstruoitu, ei suoraan mitattu; hiljaisempi tulos on ensimmäinen näin suuren punasiirtymän testi sille, miten vuoto voidaan tunnistaa epäsuorasti sitten kun sitä ei enää voida nähdä.

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

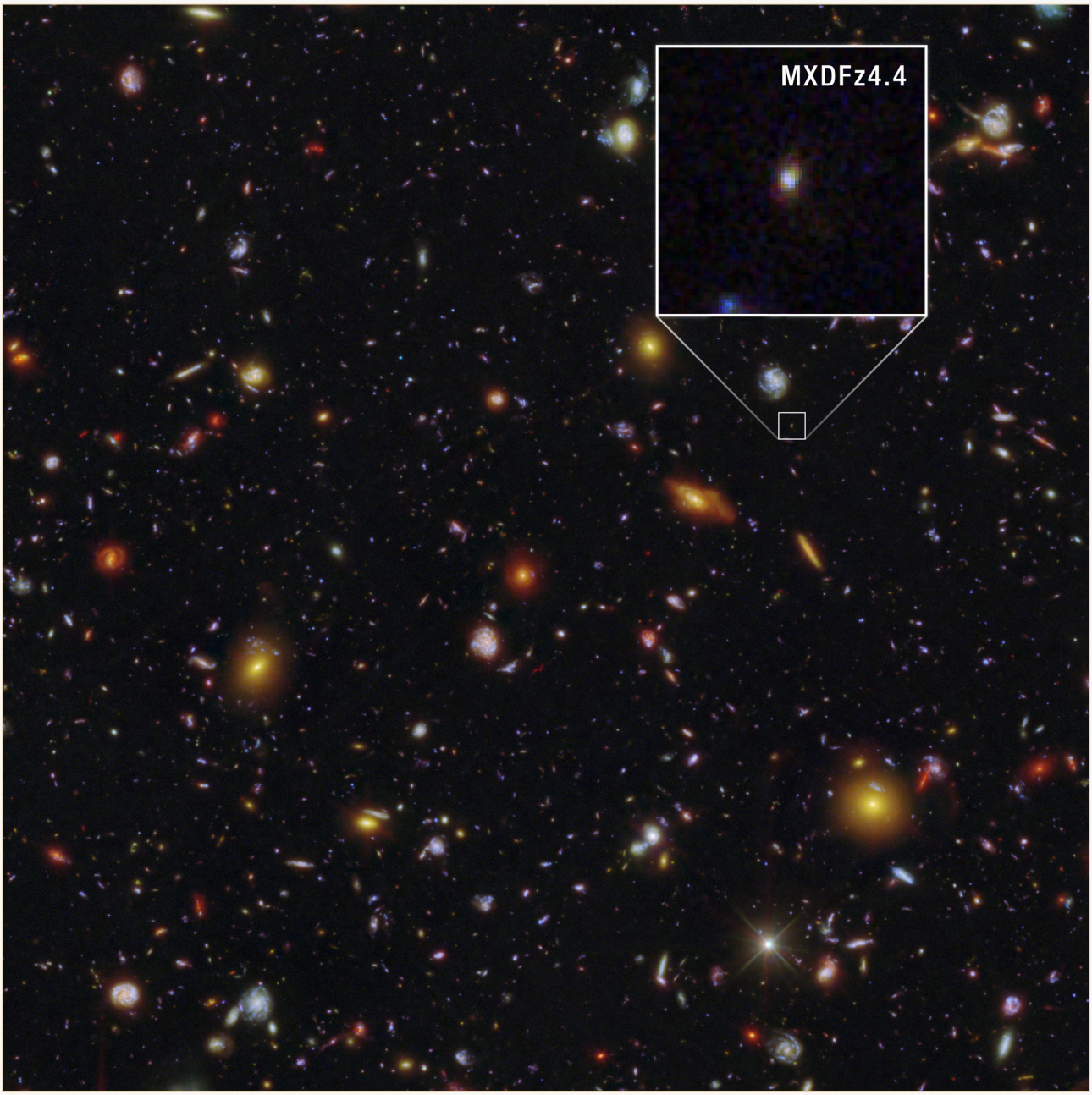
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

Valo, joka raivasi sumun

Ensimmäiset useat sadat miljoonat vuodet maailmankaikkeus oli läpinäkymätön. Avaruus oli täynnä neutraalia vetyä — atomeja, joiden elektronit olivat yhä kiinni — ja neutraali vety absorboi erittäin tehokkaasti *ionisoivaa* ultraviolettia: lyhytaaltoista valoa alle 912 ångströmin eli *Lyman-rajan*, jolla on riittävästi energiaa irrottamaan elektroni vetyatomista. Kaikki ultravioletti ei tee tätä — pidempiaaltoinen UV ei absorboidu samalla tavalla, ja sitä näemme runsaasti varhaisista galakseista — joten nuori maailmankaikkeus vangitsi nimenomaan ionisoivan valon. Seuraavan noin miljardin vuoden aikana jokin kuitenkin tulvi kosmokseen niin paljon tällaista valoa, että elektronit irtosivat uudelleen, vety ionisoitui ja valo pääsi kulkemaan vapaasti. Tätä kutsutaan reionisaation aikakaudeksi, ja ilmeiset epäillyt ovat ensimmäiset galaksit: niiden kuumat ja lyhytikäiset tähdet tuottavat valtavasti ionisoivaa ultraviolettia, ja jos riittävä osa siitä pääsi galaksien ulkopuolelle, ne saattoivat tehdä työn.

Ongelma on sana *pääsi*. Suurin osa galaksin ionisoivasta valosta ei karkaa lainkaan, vaan absorboituu samaan galaksin sisäiseen vetyyn, jota tähdet yrittävät ionisoida. Vain osa vuotaa avaruuteen, ja tämä osuus — *pakofraktio* — on koko tarinan vaikeimpia lukuja. Vielä pahempaa on, että itse reionisaation aikana vuotanut valo on lähes mahdoton havaita: tähtienvälinen sumu, jota se yrittää raivata, absorboi sen kauan ennen kuin valo saavuttaa meidät. Vuodon tutkimiseksi tähtitieteilijöiden on siis katsottava aivan sumun hälvenemisen jälkeiseen aikaan, galakseihin jotka ovat riittävän lähellä aikakautta toimimaan sen sijaisina.

Ilias Goovaertsin johtama ryhmä on nyt napannut tämän vuodon niin kaukaa menneisyydestä kuin sitä on käytännössä koskaan nähty. Hubblen ja JWST:n syväkuvauksilla he raportoivat yhden himmeän galaksin, luettelonimeltään MXDFz4.4, jonka karkaava ionisoiva ultravioletti näkyy pienenä valoläikkänä yhdessä Hubblen suodattimessa. Galaksi sijaitsee punasiirtymällä 4.442, noin 250 miljoonaa vuotta reionisaation päättymisen jälkeen: kaukaisin suoraan havaittu ”vuotaja”.



MXDFz4.4 (suurennettuna pikkukuvassa) on himmeä läikkä tässä Hubblen ja JWST:n syvässä kentässä — kaukaisin galaksi, josta on suoraan havaittu ionisoivan ultravioletin vuotoa, noin 250 miljoonaa vuotta kosmisen reionisaation päättymisen jälkeen.

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

Tästä artikkelista leviävä luku on pakofraktio, ja se on suuri: jostain puolikkaan ja koko galaksin tuottaman ionisoivan valon väliltä. Luku on todellinen, mutta kannattaa tarkentaa mitä ”todellinen” tässä tarkoittaa. Sitä ei luettu kuvasta, vaan se rekonstruoitiin malliketjun avulla, ja laaja vaihteluväli on rehellinen seuraus epävarmuudesta. Hyödyllisemmässä tarinassa on kaksi osaa: mitä yksi suoraan havaittu vuoto voi ja ei voi kertoa, sekä hiljaisempi toinen tulos — ensimmäinen näin kaukaa tehty testi epäsuoralle vuodon tunnistusmenetelmälle, jota tarvitaan kun suora havainto lakkaa toimimasta.

Mikä pakofraktio on ja miksi sitä on niin vaikea mitata

Tähdet — erityisesti suurimmat, kuumimmat ja nuorimmat — tuottavat ultraviolettia, jolla on tarpeeksi energiaa irrottamaan elektronit vetyatomeista. Tähtitieteilijät kutsuvat tätä ionisoivaksi säteilyksi tai näillä aallonpituuksilla *Lyman-jatkumon* valoksi. Se on reionisaation valuuttaa: maailmankaikkeus muuttui läpinäkyväksi, kun tarpeeksi näitä fotoneita pääsi vapaaksi pitämään galaksienvälisen vedyn ionisoituneena.

Myös galaksi itse on täynnä vetyä. Suuri osa sen tuottamasta ionisoivasta valosta imeytyy ennen kuin se poistuu galaksista — se kuluu galaksin oman kaasun ionisoimiseen. *Pakofraktio* on se osuus, joka pääsee galaksienväliseen avaruuteen ja voi siten auttaa ionisoimaan laajempaa maailmankaikkeutta. Se on koko kysymyksen ydin ja vaikea mitata kahdesta syystä. Ensinnäkin reionisaation aikana galaksienvälinen aine sisältää yhä paljon neutraalia vetyä, joka absorboi juuri sitä valoa jota yrität havaita — vuotanut valo ei siis yleensä koskaan pääse meille. Toiseksi silloinkin kun sitä *voidaan* nähdä hieman aikakauden jälkeen poikkeuksellisen kirkasta näkölinjaa pitkin, havainto pitää muuttaa pakofraktioksi jakamalla nähty määrä sillä määrällä, jonka galaksi tuotti. Tuotettua määrää ei myöskään nähdä suoraan. Se täytyy mallintaa galaksin muun valon, päätellyn tähtienmuodostushistorian ja tähtiä koskevien oletusten perusteella.

Siksi pakofraktioilla on leveät virherajat ja — kun myös galaksienvälinen absorptio täytyy mallintaa — sama havainto voi tukea laajaa vastausaluetta. Luku on rekonstruktio, ei suora lukema.

Mitä tutkijat tekivät

- He vahvistivat galaksin etäisyyden VLT:n MUSE-instrumentin syvällä spektroskopialla. Siinä näkyi yksi emissioviiva, Lyman-alpha, jonka epäsymmetrinen profiili on tyypillinen suuren punasiirtymän kohteelle. Näin punasiirtymäksi saatiin z = 4.442. Satunnaisen etualan kohdistumisen todennäköisyydeksi arvioitiin 0.0076%.
- He havaitsivat karkaavan ionisoivan eli Lyman-jatkumon valon syvässä Hubblen F435W-kuvassa. Tällä punasiirtymällä suodatin näkee vain alle 912 ångströmin valon, joka lasketaan ”karanneeksi”. Havainto on tasolla 5.2–5.3σ (sigma kertoo kuinka kaukana signaali on odotetusta kohinasta; 5σ on erittäin tiukka tilastollinen kynnys, ei todiste tulkinnan oikeellisuudesta — opas). Se tarkistettiin miljoonan tyhjän taivasaukon vuota vastaan sen varmistamiseksi, ettei kyse ollut kohinasta.
- He sulkivat pois tämänkaltaisten väitteiden klassisen ansan: sen, että ”karkaava” valo olisi oikeasti sattumalta edessä oleva matalan punasiirtymän galaksi. Apuna olivat kohteen erotettu muoto ja heikon naapurikohteen räätälöity de-blending.
- He mallinsivat galaksin tähdet sovittamalla koko Hubble+JWST-värijakauman CIGALE-koodilla ja useilla tähtipopulaatiomalleilla. Tulokset viittasivat muutama miljoona vuotta sitten tapahtuneeseen tuoreeseen tähtienmuodostuspurskeeseen.
- He mallinsivat, kuinka paljon ionisoivaa valoa galaksienvälinen aine olisi absorboinut matkalla, käyttäen 10,000 simuloitua näkölinjaa, ja yhdistivät tiedot pakofraktion johtamiseksi.
- Ensimmäistä kertaa näin kaukana he testasivat *epäsuoraa* tapaa tunnistaa vuoto — Lyman-alpha-

viivan muotoa ja laajuutta eli sen ”halo fraction” -ominaisuutta — suoraa havaintoa vasten.

Mitä he löysivät

- Tähän mennessä kaukaisimman suoraan havaitun Lyman-jatkumon emitterin, z = 4.442.
- Todellisen havainnon itse karkaavasta ionisoivasta valosta — ei päätelmää vaan kuvasignaalin tasolla 5.2–5.3σ.
- Suuren, oletuksista riippuen 50–100%:n pakofraktion — suuren mutta malliriippuvaisen. Erillinen *suhteellinen* arvio nousee jopa yli 100%:n. Tämä johtuu määritelmästä: siinä karkaavaa ionisoivaa valoa verrataan galaksin ultraviolettiin ennen pölykorjausta, eikä se tarkoita että galaksista karkaisi enemmän valoa kuin tähdet tuottavat.
- Sovitetun tähtivalon perusteella näyttöä siitä, että tuore tähtienmuodostuspurske ajaa sekä ionisoivan valon tuotantoa että sen karkaamista.
- Tutkijoiden sanoin ”varovaista tukea” Lyman-alpha-viivan muodon käyttämiselle suuren punasiirtymän vuodon merkkiaineena.

Mitä tämä ei todista

- Se **ei** tunnista ”galakseja, jotka reionisoivat maailmankaikkeuden”. Tämä on yksi galaksi, ja se sijaitsee noin 250 miljoonaa vuotta reionisaation *päättymisen jälkeen*, ei sen aikana. Se on askel kohti aikakautta, ei kuva itse tapahtumasta.
- Pakofraktio **ei ole suora mittaus**. Se rekonstruoidaan jakamalla havaittu valo *mallinnetulla* tuotetun valon määrällä ja korjaamalla sitten *mallinnettu* galaksienvälinen absorptio. Tutkijat käyttävät tarkoituksella suotuisaa näkölinjaa, sillä galaksin jonka vuotanut valo ylipäätään pääsee meille täytyy sijaita keskimääräistä kirkkaampaan suuntaan. Laaja 50–100%:n vaihteluväli — ja vielä suuremmat suhteelliset arvot — on malliriippuvuuden rehellinen jälki.
- Se **ei** validoi uutta Lyman-alpha-merkkijää. Yhden kohteen ”varovainen tuki” on ensimmäinen testi, ei vahvistus.
- Se **ei** yksin ratkaise, ajoiko purskeinen tähtienmuodostus reionisaatiota. Se on järkevä tulkinta yhden galaksin ja merkkiaineanalyysin perusteella, ei osoitettu laki.

Kuinka vahvaa näyttö on

- **Vahvaa** siellä missä havainto on suora: punasiirtymässä (tunnusomaisesti muotoutunut Lyman-alpha-viiva ja 0.0076%:n mahdollisuus etualan kontaminaatioon) sekä karkaavan valon havainnossa (5.2–5.3σ, tarkistus miljoonaa tyhjää apertuuria vasten ja etualan sekoittujan ansan huolellinen sulkeminen — saman ansan, joka on aiemmin kaatanut suuren punasiirtymän vuotoväitteitä).
- **Heikompaa ja avoimesti niin** siellä missä tulos mallinnetaan: pakofraktion *arvo* riippuu tähti-

mallista ja valitusta galaksienvälisestä näkölinjasta; reionisaation kannalta merkitys perustuu yhteen kohteeseen ja tulkintaan; uusi merkkiaine on vasta ensimmäinen varovainen testi.
- Tutkimuksen rehellisyys näkyy vaihteluväleissä. Se raportoi alueita yhden luvun sijasta, kutsuu merkkiaineen tukea ”varovaiseksi” ja jopa kieltäytyy luottamasta yhteen omaan arvioonsa galaksienvälisestä läpäisevyydestä. Tutkimus itse ei ylikauppaa tulosta; hype-riski on sen ulkopuolella.

Miksi tällä on merkitystä

Karkaavan ionisoivan valon suorat havainnot on nyt työnnetty suunnilleen niin lähelle reionisaation aikakautta kuin mahdollista — reunalle, jossa valo vielä juuri ja juuri pääsee läpi. Sillä on arvoa jo itsessään. Hiljaisempi tulos saattaa kuitenkin olla tärkeämpi: kun mennään *reionisaation sisään*, suora menetelmä lakkaa täysin toimimasta ja kaikki riippuu epäsuorista merkkiaineista, jotka kalibroidaan lähempiin ja helpompiin galakseihin. Yhden tällaisen merkkiaineen testaaminen tässä, missä sitä voidaan vielä verrata todelliseen suoraan havaintoon, on tapa ansaita oikeus luottaa siihen myöhemmin, missä vertailua ei enää voi tehdä. MXDFz4.4:n arvo ei ole niinkään ”löysimme galaksin joka reionisoi maailmankaikkeuden” vaan ”opimme lukemaan vuotoa ja alamme tarkistaa välineitämme pimeää varten”.

Lyhyesti

Hubblea ja JWST:tä käyttävät tähtitieteilijät ovat havainneet suoraan ionisoivaa ultraviolettia karkaamassa yksittäisestä galaksista punasiirtymällä 4.442 — kaukaisin tällainen havainto, noin 250 miljoonaa vuotta kosmisen reionisaation päättymisen jälkeen. Itse havainto on vahva. Helposti siteerattava 50–100%:n pakofraktio ei ole mitattu vaan rekonstruoitu galaksin tähtiä ja tarkoituksella suotuisaa näkölinjaa pitkin tapahtuvaa galaksienvälistä absorptiota koskevilla malleilla, minkä vuoksi vaihteluväli on niin leveä. Samalla ryhmä teki ensimmäisen suuren punasiirtymän testin epäsuoralle vuodon tunnistusmenetelmälle — Lyman-alpha-viivan muodolle — ja sai sille ”varovaista tukea”. Kyse on huolellisesta yhden kohteen tuloksesta: todellinen suora vuoto, siihen liitetty rehellisen epävarma luku ja ensimmäinen askel kohti työkaluja, joita tähtitieteilijät tarvitsevat sitten kun vuotoa ei voi nähdä lainkaan.

Ei-hölynpölyä-tarkistus

Mitä tutkimus osoittaa: Suora 5.2–5.3σ:n havainto galaksista z = 4.442 karkaavasta ionisoivasta Lyman-jatkumon valosta — tähän mennessä suurimman punasiirtymän tällainen havainto — ja etualan kontaminaation ansa on huolellisesti suljettu pois.

Mikä on uskottavaa mutta todistamatta: Että galaksin pakofraktio on 50–100%. Havainto on todellinen; fraktio rekonstruoidaan tähtipopulaatio- ja galaksienvälisten absorptiomallien avulla suotuisaa

näkölinjaa pitkin, minkä vuoksi vaihteluväli on leveä. Samoin uskottavaa mutta todistamatta on Lyman-alpha-viivan muodon toimivuus vuodon merkkiaineena näin kaukana: tutkimus antaa ”varovaista tukea” yhdestä kohteesta.

Mitä tutkimus ei osoita: Että kyseessä olisi galaksi ”joka reionisoi maailmankaikkeuden” — se sijaitsee aikakauden jälkeen ja on yksi kohde — tai että purskeinen tähtienmuodostus ajoi reionisaatiota, mikä on tulkinta eikä osoitettu tulos.

Tärkeimmät rajoitukset: Yksi kohde; pakofraktio riippuu mallivalinnoista ja tarkoituksella kirkkaasta näkölinjasta; uuden merkkiaineen ensimmäinen varovainen testi; ja ionisoivan valon vuodon tutkimisen äärimmäinen vaikeus aivan sen aikakauden vieressä, jossa valo muuttuu näkymättömäksi.

Kuinka paljon yleislukijan kannattaa luottaa tulokseen? Korkealla varmuudella karkaava valo todella havaittiin ja tämä on kaukaisin tällainen suora havainto. Matalalla tai kohtalaisella varmuudella tarkkaan pakofraktioon — ”50–100%” on mallinnettu alue, ei mittaus. Kohtalaisella varmuudella uuteen merkkiaineeseen: lupaava ensimmäinen tarkistus, ei vakiintunut työkalu.

Julkaisemisen jälkeiset päivitykset

- **Korjaus · 2026-07-28**

  Artikkelin tekijän Ilias Goovaertsin palautteen jälkeen teksti puhuu alusta lähtien ionisoivasta valosta eikä ultraviolettivalosta yleisesti. Nyt siinä todetaan selvästi, että vain lyhytaaltoinen ultravioletti — 912 ångströmin Lyman-rajan alapuolella — on ionisoivaa, kun taas pidempiaaltoinen ultravioletti ei ole ionisoivaa ja sitä havaitaan rutiininomaisesti suuren punasiirtymän galakseista.

Lähteet

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