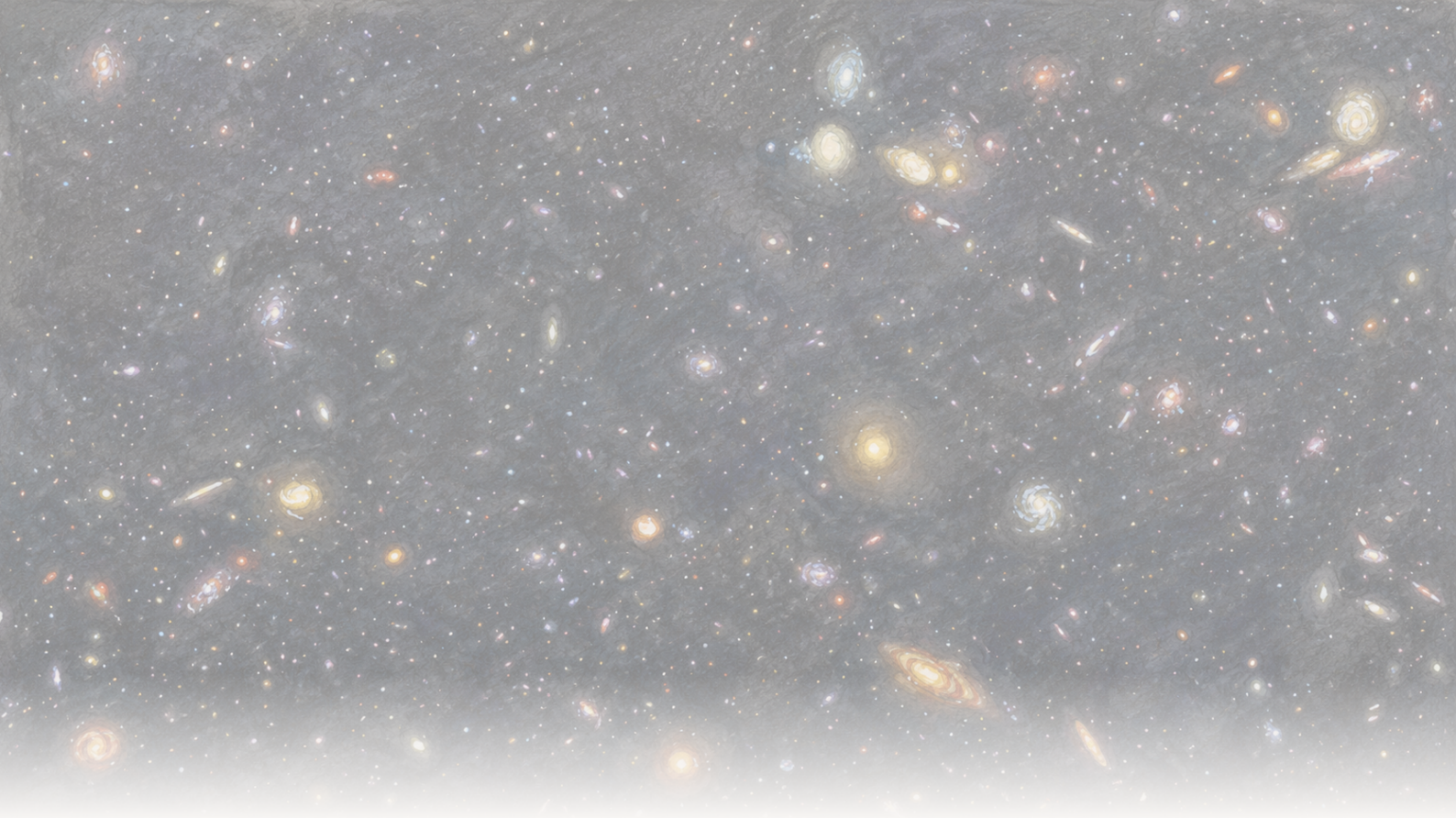


The Clean Paper

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

A legtávolabbi galaxis, amelyből eddig közvetlenül láttunk ionizáló fényt kiszökni

A csillagászok a JWST és a Hubble segítségével egyetlen galaxis kiszökő ionizáló ultraibolya sugárzását észlelték mintegy 250 millió évvel a kozmikus reionizáció befejeződése után — ez az eddigi legtávolabbi közvetlenül látott „szivárgás". A sokat idézhető 50–100%-os szökési hányad valós eredmény, de modellekből rekonstruálták, nem közvetlenül mérték; a csendesebb eredmény pedig az első nagy vöröseltolódású próba arra, hogyan ismerhető fel közvetetten a kiszökés, amikor közvetlenül már nem látható.

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

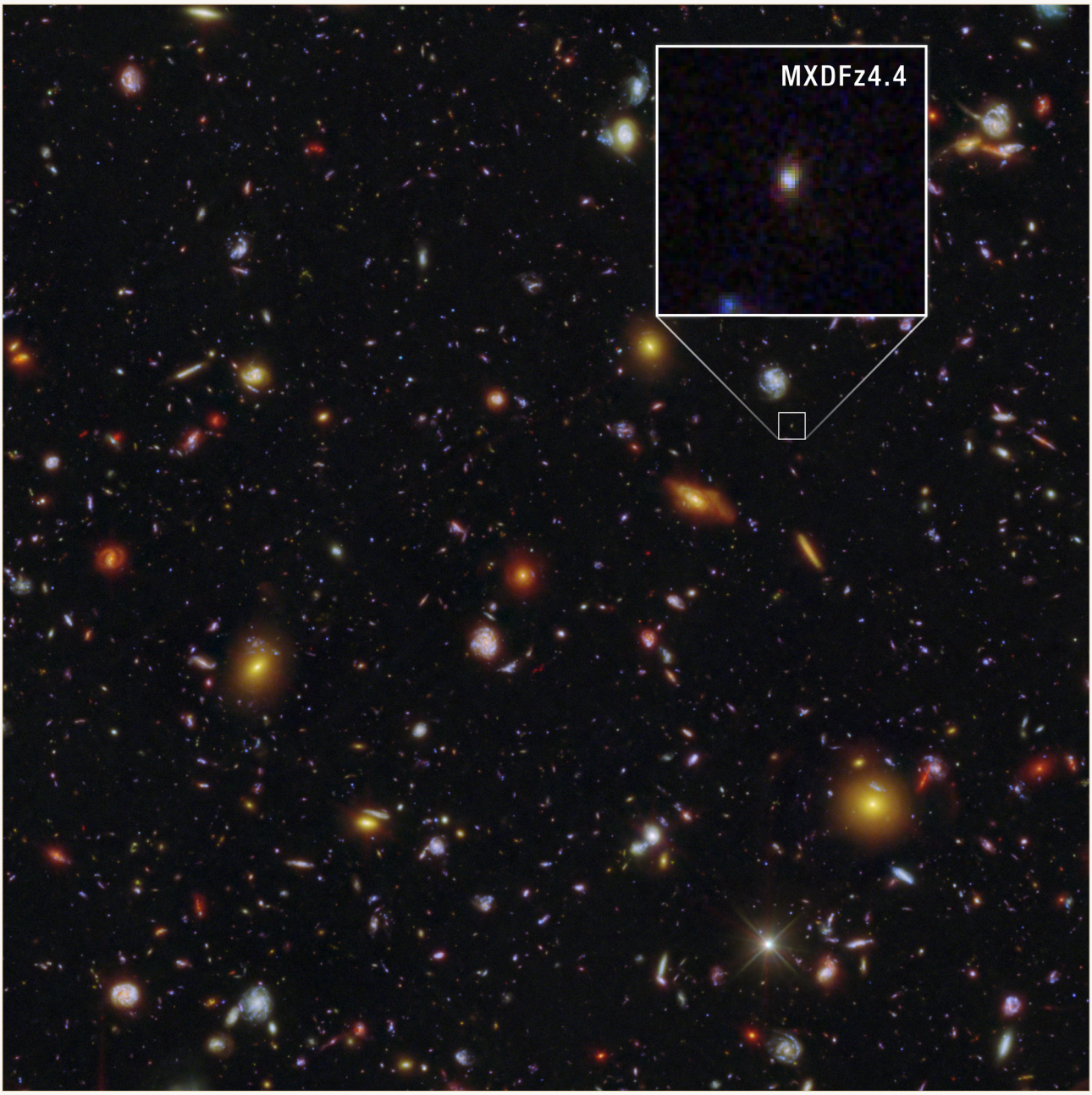
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

A fény, amely eloszlatta a ködöt

Az első néhány százmillió évben a világegyetem átlátszatlan volt. A teret semleges hidrogén töltötte ki — olyan atomok, amelyekhez még kötődtek az elektronjaik —, a semleges hidrogén pedig nagyon hatékonyan nyeli el az *ionizáló* ultraibolya sugárzást: a 912 ångströmnél (a *Lyman-határnál*) rövidebb hullámhosszú, elég nagy energiájú fényt ahhoz, hogy elektront szakítson le egy hidrogénatomról. Nem minden ultraibolya fény ilyen — a hosszabb hullámhosszú UV-t nem ugyanígy nyeli el az anyag, és a korai galaxisokból bőségesen látunk is belőle —, vagyis a fiatal világegyetem kifejezetten ezt az ionizáló fényt tartotta fogva. A következő nagyjából egymilliárd év során aztán valami elegendő mennyiségű ilyen sugárzással árasztotta el a kozmoszt ahhoz, hogy újra leszakítsa ezeket az elektronokat: ionizálta a hidrogént, és szabaddá tette az utat a fény előtt. A csillagászok ezt a korszakot a reionizáció korának nevezik. A legkézenfekvőbb tettesek az első galaxisok: bennük a forró, rövid életű csillagok rengeteg ionizáló ultraibolya sugárzást bocsátanak ki, és ha ebből elég jutott ki az intergalaktikus térbe, elvégezhették a munkát.

A nehézség a *kijutott* szóban rejlik. Egy galaxis ionizáló fényének nagy része soha nem hagyja el a galaxist: ugyanaz a benne lévő hidrogén nyeli el, amelyet a csillagok ionizálni próbálnak. Csak egy része szivárog ki az űrbe. Ezt a hányadot *szökési hányadnak* nevezik, és az egész történetben talán ezt az egy számot a legnehezebb meghatározni. Ráadásul magában a reionizáció korában a kiszökött fényt szinte lehetetlen elcsípni: az az intergalaktikus köd, amelynek eloszlatásában részt vesz, jóval azelőtt elnyeli, hogy hozzánk érhetne. A szivárgás tanulmányozásához ezért a csillagászoknak közvetlenül a köd felszakadása *utáni* időszakot kell vizsgálniuk, olyan galaxisokkal, amelyek még elég közel vannak ehhez a korszakhoz ahhoz, hogy helyettesítőként szolgáljanak.

Az Ilias Goovaerts vezette kutatócsoport most nagyjából olyan messzir visszatekintve kapta el ezt a szivárgást, amilyen messzir eddig valaha sikerült. A Hubble és a JWST mélyfelvételei alapján egyetlen halvány galaxist — az MXDFz4.4 katalógusjelű objektumot — írnak le, amelynek kiszökő ionizáló ultraibolya sugárzása halvány foltként jelenik meg a Hubble egyik szűrőjében. A galaxis vöröseltolódása 4.442, vagyis körülbelül 250 millió évvel a reionizáció befejeződése utáni állapotában látjuk. Ez a legtávolabbi olyan galaxis, amelyből eddig közvetlenül észleltek kiszökő ionizáló sugárzást.



Az MXDFz4.4 (a kinagyított betétképen) alig látható folt ezen a mély Hubble- és JWST-felvételen. Ez a legtávolabbi galaxis, amelyből eddig közvetlenül észleltek kiszökő ionizáló ultraibolya sugárzást; mintegy 250 millió évvel a kozmikus reionizáció befejeződése után látjuk.

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

A tanulmányból várhatóan a szökési hányad száma fog leginkább terjedni, és ez valóban magas: a galaxis ionizáló fényének valahol a fele és egésze között lehet. A szám nem kitaláció, de érdemes pontosan érteni, mit jelent itt az, hogy „valós”. Nem egyszerűen leolvasták a képről: modellek láncolatával rekonstruálták, és a tartomány jó okból ilyen széles. A hasznosabb történet két részből áll. Egyrészt abból, hogy egyetlen elcsípett szivárgás mit árulhat el — és mit nem. Másrészt egy csendesebb második eredményből: ilyen nagy vöröseltolódásnál most először próbáltak közvetlen észlelésel ellenőrizni egy közvetett módszert, amelyre akkor lesz szükség, amikor a közvetlen módszer már nem működik.

Mi a „szökési hányad”, és miért olyan nehéz meghatározni?

A csillagok — különösen a legnagyobbak, legforróbbak és legfiatalabbak — olyan energiájú ultraibolya sugárzást bocsátanak ki, amely képes elektronokat leszakítani a hidrogénatomokról. A csillagászok ezt ionizáló sugárzásnak, a szóban forgó hullámhossztartományban pedig *Lyman-kontinuum* sugárzásnak nevezik. Ez a reionizáció „fizetőeszköze”: a világegyetem akkor vált átlátszóvá, amikor elegendő ilyen foton szabadult ki ahhoz, hogy az intergalaktikus hidrogént ionizált állapotban tartsa.

Csakhogy egy galaxis maga is tele van hidrogénnel. Az általa termelt ionizáló fény nagy része még azelőtt elnyelődik, hogy kijutna: a galaxis saját gázának ionizálására fordítódik. A *szökési hányad* azt adja meg, mekkora rész jut ki az intergalaktikus térbe, ahol már valóban hozzájárulhat a tágabb világegyetem reionizációjához. Ez az egész kérdés egyik kulcsa, és két okból is nehéz mérni.

Először is, a reionizáció idején az intergalaktikus közeg még tele van semleges hidrogénnel, amely éppen azt a fényt nyeli el, amelyet észlelni szeretnénk — így a kiszökött sugárzás rendszerint egyáltalán nem ér el hozzánk. Másodszor még akkor is, amikor *látunk* belőle valamennyit — közvetlenül a korszak után, egy szokatlanul tiszta látóirány mentén —, az észlelést csak úgy alakíthatjuk szökési hányaddá, ha a megfigyelt mennyiséget elosztjuk azzal, amennyit a galaxis eredetileg termelt. Ezt az eredeti mennyiséget azonban szintén nem látjuk közvetlenül. Modelleznünk kell a galaxis más hullámhosszú fényéből, a kikövetkeztetett csillagkeletkezési történetéből és a csillagokra vonatkozó feltételezésekből.

Ezért járnak a szökési hányadok nagy hibahatárokkal, és ezért férhet össze ugyanazzal az észleléssel válaszok széles tartománya, ha az intergalaktikus elnyelést is modellezni kell. A szám rekonstrukció, nem műszerleolvasás.

Mit csináltak a szerzők?

- A galaxis távolságát a VLT MUSE műszerével végzett mély spektroszkópiával erősítették meg. Egyetlen emissziós vonalat, a Lyman-alfát észlelték, mégpedig a nagy vöröseltolódású Lyman-alfa-vonalra jellemző aszimmetrikus profillal; ebből z = 4.442 vöröseltolódást határoztak meg. Annak valószínűségét, hogy véletlenül egy előtérbeli objektum igazodik ugyanabba a látóirányba, 0.0076%-ra becsülték.
- A kiszökő ionizáló, vagyis Lyman-kontinuum sugárzást egy mély Hubble F435W képen észlelték. Ennél a vöröseltolódásnál ez a szűrő csak a 912 ångström alatti, valóban „kiszököttnek” számító fényt látja. A jel 5.2–5.3σ szignifikanciájú (a szigma azt fejezi ki, milyen messze van a jel a várható zajtól; az 5σ nagyon szigorú statisztikai küszöb, de önmagában nem bizonyítja, hogy az értelmezés igaz — útmutató). A kutatók egymillió üres égterület fluxusával is összevetették, hogy ellenőrizzék, nem pusztán zajról van-e szó.
- Kizárták az ilyen állítások klasszikus csapdáját: hogy a „kiszökő” fény valójában egy véletlenül előtérbe került, kis vöröseltolódású galaxisból származik. Ehhez a forrás térben felbontott alakját és egy halvány szomszéd egyedi szétválasztását használták.
- A galaxis csillagpopulációját a teljes Hubble+JWST színeloszlás illesztésével modellezték, a CIGALE kóddal és több csillagpopulációs modellel. Az eredmények néhány millió évvel ezelőtti,

friss csillagkeletkezési kitörésre utaltak.
- 10,000 szimulált látóirányon modellezték, mennyi ionizáló fényt nyelt volna el útközben az intergalaktikus közeg, majd az összes összetevőből meghatározták a szökési hányadot.
- Ennél a nagy vöröseltolódásnál először teszteltek a közvetlen észleléshez képest egy *közvetett* módszert is: a Lyman-alfa-vonal alakját és térbeli kiterjedését, az úgynevezett „halofrakciót" használták a kiszökés jelzőjeként.

Mit találtak?

- Az eddig közvetlenül észlelt legtávolabbi Lyman-kontinuum-kibocsátót, z = 4.442 vöröseltolódásnál.
- Magát a kiszökő ionizáló fényt valóban észlelték: ez nem következtetés, hanem 5.2–5.3σ erősségű jel a képen.
- A feltételezésektől függően 50–100%-os, tehát magas, de modellfüggő szökési hányadot kaptak. (Egy külön számolt *relatív* becslés még 100% fölé is megy. Ez a definíció sajátossága — a kiszökő ionizáló fényt a galaxis ultraibolya sugárzásához hasonlítja úgy, hogy előbb nem korrigál a por hatására —, nem pedig annak jele, hogy több fény jutna ki, mint amennyit a csillagok egyáltalán létrehoznak.)
- Az illesztett csillagfény arra utal, hogy egy közelmúltbeli csillagkeletkezési kitörés hajtja mind az ionizáló fény termelését, mind annak kiszökését.
- A szerzők saját megfogalmazásával „óvatos támogatást" találtak ahhoz, hogy nagy vöröseltolódásnál a Lyman-alfa-vonal alakját a kiszökés nyomjelzőjeként lehessen használni.

Mit nem bizonyít ez?

- **Nem** azonosítja „azokat a galaxisokat, amelyek reionizálták a világegyetemet". Egyetlen galaxisról van szó, ráadásul olyasmiről, amelyet körülbelül 250 millió évvel a reionizáció befejezése *utáni* állapotában látunk, nem a folyamat közben. Ez egy lépcsőfok a korszak felé, nem magának az eseménynek a képe.
- A szökési hányad **nem közvetlen mérés**. Úgy rekonstruálják, hogy a megfigyelt fényt elosztják a termelt fény *modellezett* becslésével, majd korrigálnak az intergalaktikus elnyelés *modellezett* mértékével. A szerzők ráadásul szándékosan kedvező látóirányt választanak, hiszen ha egy galaxisból kiszökött fény egyáltalán eljut hozzánk, akkor az irányának az átlagosnál tisztábbnak kell lennie. A széles tartomány — 50–100%, relatív értelemben pedig még magasabb — ennek a modellfüggésnek az őszinte lenyomata.
- **Nem** igazolja az új Lyman-alfa-nyomjelzőt. Egyetlen objektumtól származó „óvatos támogatás" első próba, nem megerősítés.
- Önmagában **nem** dönti el, hogy a szakaszos, kitörésszerű csillagkeletkezés hajtotta-e a reionizációt. Ez egyetlen galaxis és a nyomjelző elemzése alapján felépített ésszerű értelmezés, nem bizonyított törvényszerűség.

Mennyire erős a bizonyíték?

- **Erős** ott, ahol közvetlen: a vöröseltolódásnál (egy jellegzetes alakú Lyman-alfa-vonal, mindössze 0.0076% becsült eséllyel előtérbeli szennyezésre) és a kiszökő fény észlelésénél (5.2–5.3σ, egymillió üres apertúrával ellenőrizve, miközben gondosan kizárták azt az előtérbeli objektumos csapdát, amely korábban már több nagy vöröseltolódású kiszökési állítást megdöntött).
- **Gyengébb — és ezt nyíltan kezelik is — ott, ahol modellezésre támaszkodik:** a szökési hányad *értéke* (amely a csillagmodelltől és a választott intergalaktikus látóiránytól függ), az eredmény reionizációra vonatkozó „jelentősége” (egy objektum plusz értelmezés), valamint az új nyomjelző (egy első, óvatos próba).
- A tanulmány korrektsége éppen a megadott tartományokban látszik. Egyetlen szám helyett intervallumokat közöl, a nyomjelző támogatását „óvatosnak” nevezi, és még az intergalaktikus áteresztés egyik saját becslésében sem bízik meg eléggé ahhoz, hogy felhasználja. Ez egy gondos tanulmány, amely nem adja el túl nagyra a saját eredményét; a túlzó hírverés veszélye kívülről jön.

Miért fontos?

A kiszökő ionizáló fény közvetlen észleléseit mostanra nagyjából olyan közel sikerült kitolni a reionizáció korához, amennyire csak lehet: egészen addig a határig, ahol a fény még éppen átjut. Ez már önmagában is értékes. A csendesebb eredmény azonban még fontosabb lehet. Ha belépünk *magába* a reionizáció korszakába, a közvetlen módszer teljesen használhatatlanná válik, és minden olyan közvetett nyomjelzőkre támaszkodik majd, amelyeket közelebbi, könnyebben vizsgálható galaxisokon kalibráltunk. Egy ilyen nyomjelzőt itt tesztelni — ahol még össze lehet vetni valódi közvetlen észleléssel — ad alapot arra, hogy később ott is bízzunk benne, ahol ez már nem lehetséges. Az MXDFz4.4 jelentősége kevésbé az, hogy „találtunk egy galaxist, amely reionizálta a világegyetemet”, és inkább az, hogy „tanuljuk olvasni a kiszökő fény jeleit, és elkezdjük ellenőrizni a műszereinket arra az időre, amikor sötétben kell dolgozniuk”.

Röviden

A Hubble és a JWST segítségével a csillagászok közvetlenül észlelték egy z = 4.442 vöröseltolódású galaxisból kiszökő ionizáló ultraibolya sugárzást. Ez az eddigi legtávolabbi ilyen észlelés, mintegy 250 millió évvel a kozmikus reionizáció befejeződése után. Maga az észlelés szilárd. A könnyen idézhető 50–100%-os szökési hányad viszont nem mérés, hanem rekonstrukció: a galaxis csillagainak és egy szándékosan kedvező látóirány mentén fellépő intergalaktikus elnyelésnek a modelljeiből származik, ezért ilyen széles a tartománya. A közvetlen észlelés mellett a csoport elvégezte egy közvetett kiszökés-jelző — a Lyman-alfa-vonal alakja — első nagy vöröseltolódású próbáját, amelyhez „óvatos támogatást” talált. Ez egy gondos, egyetlen objektumon alapuló eredmény: valóban sikerült elcsípni a kiszökő fényt, őszintén bizonytalan számot rendeltek hozzá, és megtették az első lépést azoknak az

eszközöknek az ellenőrzése felé, amelyekre akkor lesz szükség, amikor ezt a fényt már egyáltalán nem lehet közvetlenül látni.

Tárgyilagos mérleg

Amit a tanulmány megmutat: Egy z = 4.442 vöröseltolódású galaxisból kiszökő ionizáló, Lyman-kontinuum sugárzás közvetlen, 5.2–5.3σ szignifikanciájú észlelését — ez az eddigi legnagyobb vöröseltolódású ilyen észlelés —, miközben az előtérbeli szennyezés klasszikus csapdáját gondosan kizárták.

Ami valószínű, de nincs bizonyítva: Hogy a galaxis szökési hányada 50–100%. Az észlelés valós; a hányadot azonban csillagpopulációs és intergalaktikus elnyelési modellekből rekonstruálták egy kedvező látóirány mentén, ezért ilyen széles az intervallum. Szintén valószínű, de nem bizonyított, hogy a Lyman-alfa-vonal alakja ilyen nagy vöröseltolódásnál is működik kiszökési nyomjelzőként: a tanulmány ehhez egyetlen objektumból származó „óvatos támogatást” kínál.

Amit nem mutat meg: Nem bizonyítja, hogy ez egy olyan galaxis, „amely reionizálta a világegyetemet” — az objektumot a korszak után látjuk, és csak egyetlen galaxisról van szó —, és azt sem, hogy kitörésszerű csillagkeletkezés hajtotta a reionizációt. Utóbbi értelmezés, nem demonstrált eredmény.

Fő korlátok: Egyetlen objektumból álló minta; modellválasztásoktól és szándékosan tiszta látóiránytól függő szökési hányad; az új nyomjelző első, óvatos próbája; valamint az ionizáló fény kiszökésének vizsgálatával járó alapvető nehézség ilyen közel ahhoz a korszakhoz, ahol ez a fény már láthatatlanná válik.

Mekkora bizalommal kezelje ezt egy általános olvasó? Nagy bizalommal azt, hogy a kiszökő fényt valóban észlelték, és hogy ez az eddigi legtávolabbi ilyen észlelés. Alacsony-közepes bizalommal a pontos szökési hányadot: az „50–100%” modellezett tartományként, ne mérésként kezelendő. Közepes bizalommal az új nyomjelzőt: ígéretes első ellenőrzés, nem kiforrott eszköz.

Megjelenés utáni frissítések

- **Javítás · 2026-07-28**

  Ilias Goovaerts, a tanulmány egyik szerzőjének visszajelzése után a cikk már a bevezetéstől kezdve kifejezetten az ionizáló fényről beszél, nem általában az ultraibolya sugárzásról. Egyértelművé teszi, hogy csak a rövid hullámhosszú, a 912 ångströmes Lyman-határ alatti ultraibolya sugárzás ionizáló; a hosszabb hullámhosszú UV nem ionizáló, és nagy vöröseltolódású galaxisokból rutinszerűen megfigyelhető.

Források

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