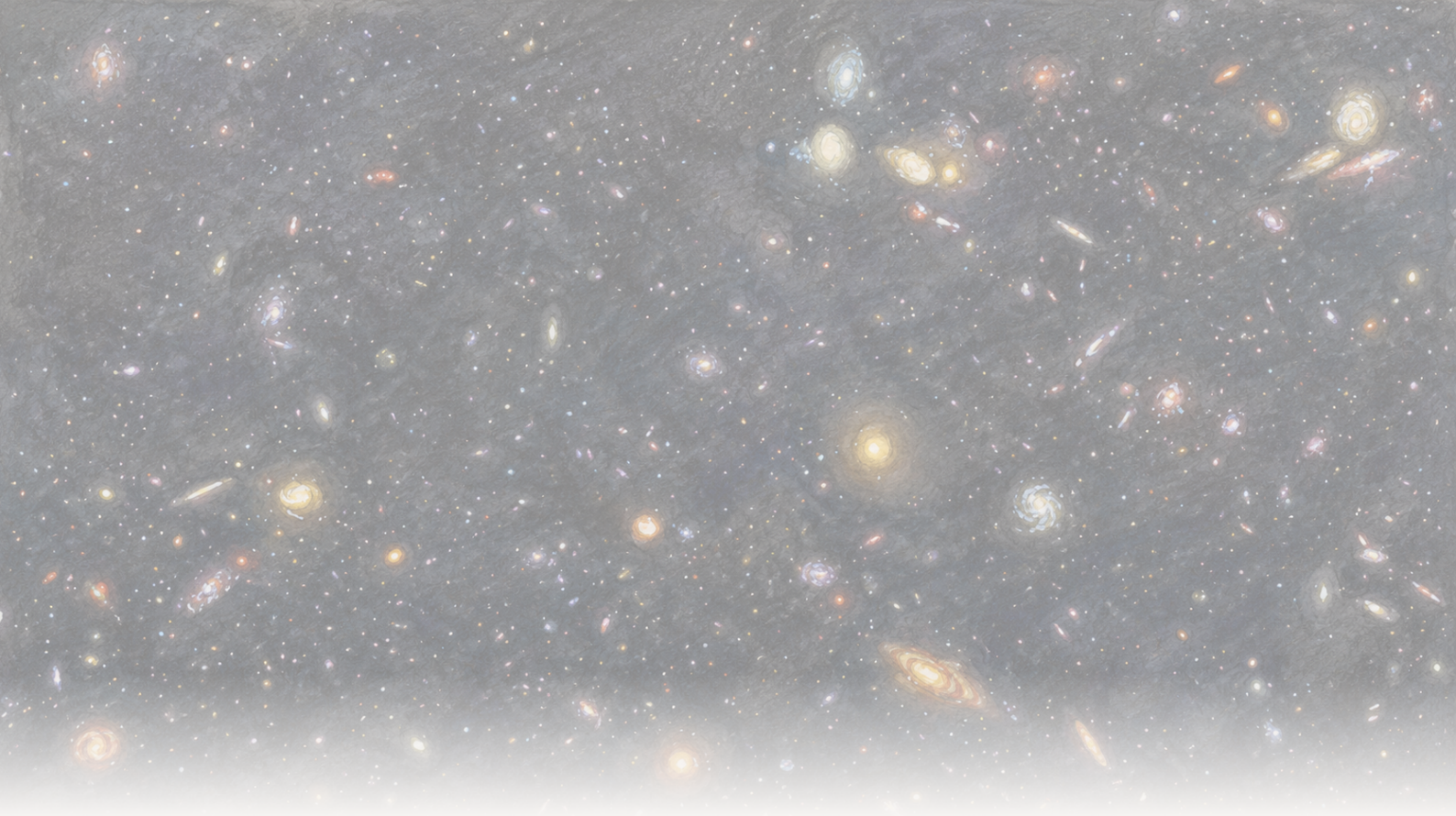




The CLEAN PAPER

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

הגלקסיה הרחוקה ביותר שנתפסה עד כה מדליפה את האור המינין שלה

אסטרונומים השתמשו ב-*JWST* וב-*Hubble* כדי לתפוס את האולטרה-סגול המינין הבורח מגלקסיה אחת כ-250 מיליון שנה לאחר ה-*reionization* הקוסמי — הדליפה הרחוקה ביותר מסוג זה שנראתה ישירות. ה-*fraction escape* הראשי של 50%–100% אמיתי אך משוחזר באמצעות מודלים, לא נמדד, התוצאה השקטה יותר היא מבחן ראשון ב-*redshift* גבוה לדרך שבה אפשר לזהות את הדליפה ברגע שכבר אי אפשר לראות אותה ישירות.

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

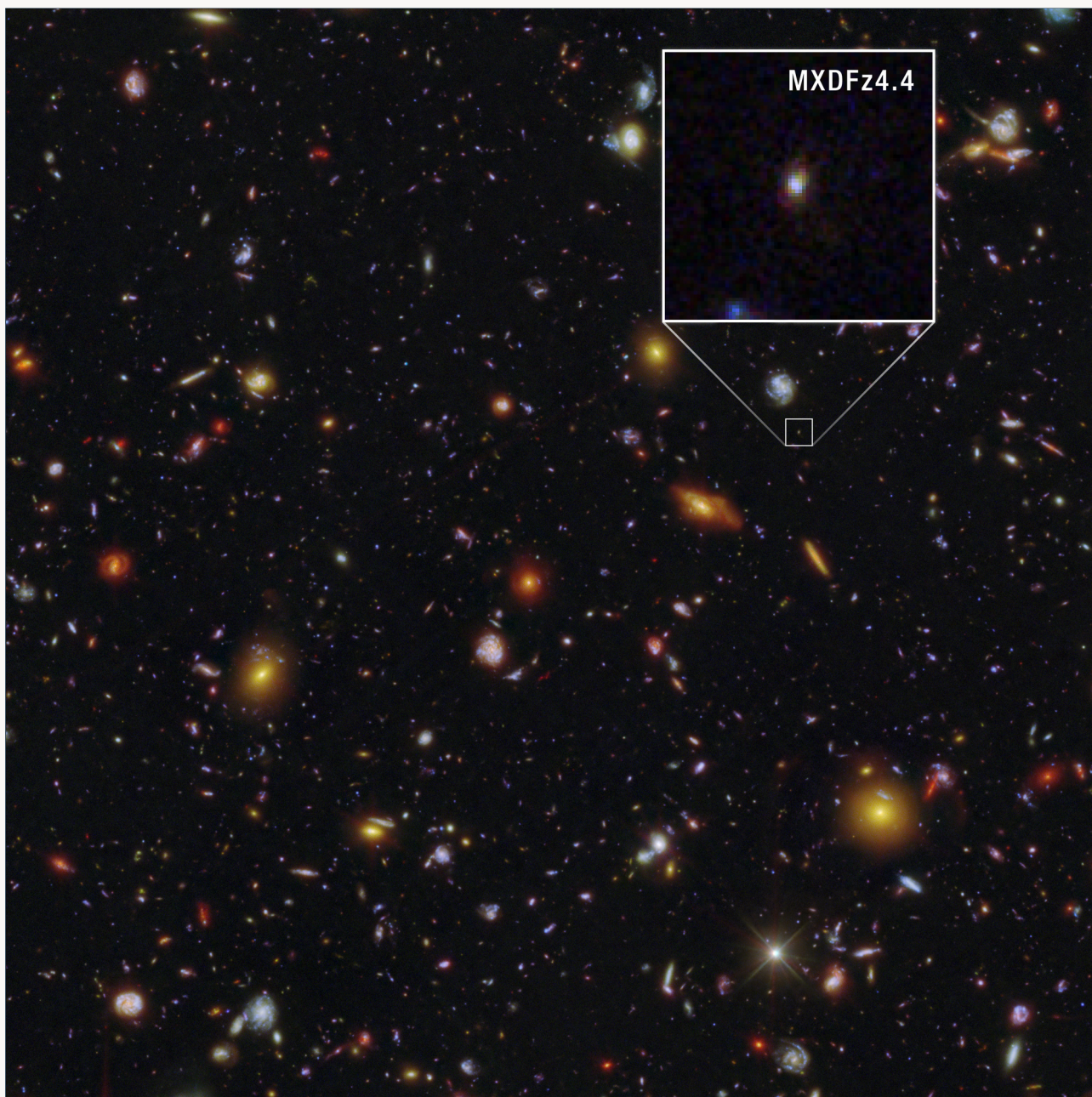
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M.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

האור שפינה את הערפל

במשך מאות מיליוני השנים הראשונות שלו, היקום היה מלא מימן ניטרלי — אטומים שהאלקטרונים שלהם עדיין קשורים אליהם — ומימן ניטרלי מצוין בבליעת אולטרה-סגול מיינן אור קצר-גל, מתחת ל-912 אנגסטרם (ה-*Lyman limit*), בעל מספיק אנרגיה כדי להעיף אלקטרון מאטום מימן. לא כל אולטרה-סגול עושה זאת — אור UV באורכי גל ארוכים יותר אינו נבלע באותה דרך, ואנחנו רואים ממנו הרבה בגלקסיות קדומות — ולכן דווקא האור המיין הזה נלכד ביקום הצעיר. ואז, לאורך בערך מיליארד השנים הבאות, משהו הציף את הקוסמוס בכמות מספקת ממנו כדי להסיר שוב את האלקטרונים, ליינן את המימן ולאפשר לאור לנוע בחופשיות. אסטרונומים קוראים לכך תקופת ה-reionization, והחשודות הברורות הן הגלקסיות הראשונות: הכוכבים החמים וקצרי-החיים שבהן פולטים כמויות אדירות של אולטרה-סגול מיינן, ואם מספיק ממנו ברח לחלל הבין-גלקטי, הם יכלו לבצע את העבודה.

הבעיה נמצאת במילה ברת. רוב האור המיין של גלקסיה לעולם אינו יוצא ממנה — הוא נבלע בידי אותו מימן בתוך הגלקסיה שהכוכבים מנסים ליינן. רק חלק מסוים דולף לחלל, והחלק הזה, *fraction escape*, הוא המספר הקשה ביותר לקביעה בכל הסיפור. גרוע מכך, בזמן ה-reionization עצמו כמעט בלתי אפשרי לתפוס את האור שדלף: הערפל הבין-גלקטי שהוא מסייע לפנות בולע אותו הרבה לפני שהוא מגיע אלינו. לכן, כדי לחקור את הדליפה, אסטרונומים צריכים להסתכל מיד אחרי שהערפל מתפזר, בגלקסיות קרובות מספיק לתקופה כדי לשמש תחליף.

צוות בראשות Goovaerts Ilias תפס כעת את הדליפה כמעט רחוק בזמן כפי שנראתה אי פעם. באמצעות דימות עמוק של Hubble ושל JWST הם מדווחים על גלקסיה חיוורת אחת — MXDFz4.4 — שהאולטרה-סגול המיין הבורח ממנה מופיע ככתם אור במסנן אחד של Hubble. הגלקסיה נמצאת ב-4.442 redshift, בערך 250 מיליון שנה לאחר שה-reionization הסתיים: ה"leaker" הרחוק ביותר שנצפה ישירות עד כה.



MXDFz4.4 (מוגדלת במסגרת) היא כתם חיוור בשדה העמוק הזה של Hubble ו-JWST — הגלקסיה הרחוקה ביותר עד כה שנתפסה ישירות מדליפה את האולטרה-סגול המיינן שלה, כפי שנראתה כ-250 מיליון שנה לאחר שה-reionization הקוסמי הסתיים.

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

המספר שייצא מן המאמר הוא fraction, escape והוא גבוה — בין מחצית לבין כמעט כל האור המיינן של הגלקסיה. המספר אמיתי, אבל כדאי להיות מדויקים לגבי המשמעות של "אמיתי". הוא לא נמדד ישירות מן התמונה; הוא שוחזר באמצעות שרשרת מודלים, והטווח רחב מסיבה כנה. הסיפור השימושי יותר כולל שני חלקים: מה דליפה אחת שנתפסה יכולה ולא יכולה ללמד אותנו, ותוצאה שקטה יותר — הניסיון הראשון, רחוק כל כך בזמן, לבדוק דרך עקיפה לאיתור הדליפה מול השיטה הישירה, רגע לפני שהשיטה הישירה מפסיקה לעבוד.

מהו "escape fraction", ולמה כל כך קשה למדוד אותו

להעיף כדי אנרגיה מספיק בעל אולטרה-סגול פולטים — ביותר והצעירים החמים הגדולים, במיוחד — כוכבים אור המעורבים, המסוימים הגל באורכי או מייננת, קרינה לכך קוראים אסטרונומים מימן. מאטומי אלקטרונים שוחררו האלה הפוטונים מן מספיק כאשר שקוף נעשה היקום reionization: של המטבע 12. *Lyman-continuum*. מיון. הבין-גלקטי המימן את לשמור כדי

אבל גם גלקסיה מלאה במימן. הרבה מן האור המיין שהיא מייצרת נספג עוד לפני שהוא יוצא — "מתבזבז" על יינון הגז של הגלקסיה עצמה. *fraction Escape* הוא החלק שמצליח לצאת לחלל הבין-גלקטי, שם הוא באמת יכול לעזור ליינן את היקום הרחב יותר. זה לב השאלה, וקשה למדוד אותו משתי סיבות. ראשית, בזמן reionization התווך הבין-גלקטי עדיין מלא במימן ניטרלי, שסופג בדיוק את האור שמנסים למדוד — כך שהאור שדלף בדרך כלל לא מגיע אלינו כלל. שנית, אפילו כשכך אפשר לראות חלק ממנו (מיד אחרי התקופה, לאורך קו ראייה צלול באופן חריג), כדי להפוך את הגילוי ל-*fraction escape* צריך לחלק את מה שנצפה בכמות האור שהגלקסיה ייצרה — ואת הכמות הזאת גם אי-אפשר לראות ישירות. צריך למדל אותה: מן האור האחר של הגלקסיה, מהיסטוריית היווצרות הכוכבים המוסקת ומהנחות על הכוכבים עצמם. לכן ל-*fractions escape* יש פסי שגיאה רחבים, וכאשר צריך למדל גם את הבליעה הבין-גלקטית, אותה תצפית יכולה לתמוך בטווח רחב של תשובות. המספר הוא שחזור, לא קריאה ישירה.

מה עשו המחקרים

- הם אישרו את מרחק הגלקסיה באמצעות ספקטרוסקופיה עמוקה ממכשיר MUSE ב-VLT, שתפס קו פליטה יחיד — Lyman-alpha — עם הפרופיל הא-סימטרי האופייני לקו הזה ב-redshift גבוה, וקבע $z = 4.442$. הם העריכו את ההסתברות לצירוף מקרים עם עצם קדמי ב-0.0076%.
- הם זיהו את האור המיין הבורח (*Lyman-continuum*) בתמונת Hubble עמוקה במסנן F435W — מסנן שב-redshift הזה רואה רק אור מתחת ל-912 אנגסטרם, כלומר האור שנחשב "בורח". הגילוי הוא ברמת $\sigma 5.2$ – $\sigma 5.3$ (מודדת כמה אות נמצא מעל הרעש הצפוי; $\sigma 5$ הוא סף סטטיסטי מחמיר מאוד, לא הוכחה שהפרשנות נכונה — מדריך), ונבדק מול השטף במיליון אזורים ריקים בשמים כדי לוודא שאינו רעש.
- הם שללו את המלכודת הקלאסית בטענה מסוג זה — שהאור "הבורח" הוא בעצם גלקסיה ב-redshift נמוך שיושבת במקרה לפניה — באמצעות הצורה המרזולבת של המקור ו-deblending מותאם של שכן חיוור.
- הם מידלו את הכוכבים בגלקסיה באמצעות התאמת כל צבעי Hubble+JWST שלה (עם CIGALE וכמה מודלי אוכלוסיות כוכבים), שהצביעו על פרץ היווצרות כוכבים לפני כמה מיליוני שנים.
- הם מידלו כמה מן האור המיין היה התווך הבין-גלקטי בולע בדרך, על פני 10,000 קווי ראייה מדומים, ושילבו הכול כדי לגזור את *fraction. escape*.
- הם בדקו, לראשונה רחוק כל כך בזמן, דרך עקיפה לאיתור escape — הצורה וההיקף של קו Lyman-alpha (ה-"halo" *fraction* שלו) — מול הגילוי הישיר.

מה הם מצאו

- את פולט ה-*Lyman-continuum* הרחוק ביותר שזוהה ישירות עד כה, ב- $z = 4.442$.
- גילוי אמיתי של האור המיין הבורח עצמו — לא הסקה, אלא אות בתמונה ברמת $\sigma 5.2$ – $\sigma 5.3$.
- *fraction escape* גבוה, בטווח 50%–100%, בהתאם להנחות — גדול, אבל תלוי מודל. (אומדן יחסי נפרד גבוה אפילו

- יותר ועובר 100%. זו תוצאה של האופן שבו הוא מוגדר — הוא משווה את האור המיין הבורח לאולטרה-סגול של הגלקסיה בלי לתקן קודם לאבק — לא סימן שיותר אור בורח ממה שהכוכבים מייצרים בפועל).
- ראיות, מהתאמת אור הכוכבים, שפרץ טרי של היווצרות כוכבים מניע גם את ייצור האור המיין וגם את בריחתו.
- “תמיכה זהירה”, בניסוח המחברים, בשימוש בצורת קו Lyman-alpha כ-tracer של escape ב-redshift גבוה.

מה זה לא מוכיח

- הוא לא מזהה “את הגלקסיות שיינו מחדש את היקום”. זו גלקסיה אחת, והיא נמצאת כ-250 מיליון שנה אחרי שה-reionization הסתיים, לא בתוכו. זו אבן דרך לעבר התקופה, לא תמונה של האירוע.
- ה-fraction escape אינו מדידה ישירה. הוא משוחזר על ידי חלוקת האור הנצפה באומדן ממודל של האור שיוצר, ואז תיקון לפי כמות ממודלת של בליעה בין-גלקטית — והמחברים בוחרים בכוונה קו ראייה נוח, משום שגלקסיה שאור דולף ממנה בכלל מגיע אלינו חייבת להימצא בכיוון צלול מהממוצע. הטווח הרחב (50–100%), ואף גבוה יותר במונחים יחסיים) הוא הסימן הכנה לתלות הזאת במודל.
- הוא לא מאמת את ה-tracer החדש של Lyman-alpha “תמיכה זהירה” מעצם יחיד היא מבחן ראשון, לא אישור.
- הוא לא מכריע לבדו שפרצי היווצרות כוכבים הניעו את ה-reionization. זו פרשנות סבירה שנבנית מגלקסיה אחת ומניתוח ה-tracer, לא חוק שהודגם.

עד כמה הראיות חזקות?

- חזקות במקום שבו הן ישירות: ה-redshift (קו Lyman-alpha בעל צורה אופיינית, עם הסתברות של 0.0076% לזיהום מעצם קדמי) וגילוי האור הבורח ($\sigma_{5.2-5.3}$, נבדק מול מיליון apertures ריקים, כאשר מלכודת העצם הקדמי — שכבר הפילה בעבר טענות ל-escape ב-redshift גבוה — נסגרה בזירות).
- חלשות יותר, ובגלוי, במקום שבו מדובר במודל: ערך ה-fraction escape (שתלוי במודל הכוכבים ובקו הראייה הבין-גלקטי שנבחר), “המשמעות” ל-reionization (עצם אחד + פרשנות) וה-tracer החדש (מבחן ראשון וזהיר).
- הכנות של המאמר נמצאת בטווחים. הוא מדווח spans ולא מספרים יחידים, מכנה את התמיכה ב-tracer “זהירה”, ואפילו נמנע מלסמוך על אחד האומדנים של עצמו להעברה הבין-גלקטית. זה מאמר זהיר שאינו מוכר את עצמו יתר על המידה; סיכון ההייפ נמצא כולו בחוץ.

למה זה חשוב

גילויים ישירים של אור מיין בורח נדחפו כעת כמעט קרוב ככל שאפשר לתקופת ה-reionization — אל הקצה שבו האור עדיין, בקושי, מצליח לעבור. זה בעל ערך בפני עצמו. אבל התוצאה השקטה יותר אולי חשובה יותר: ברגע שנכנסים לתוך reionization, השיטה הישירה נכשלת לחלוטין, והכול תלוי ב-tracers עקיפים שמכילים על גלקסיות קרובות ונוחות יותר. לבדוק tracer כזה כאן, במקום שבו עדיין אפשר להשוות אותו לגילוי אמיתי, זו הדרך להרוויח את הזכות לסמוך עליו מאוחר יותר, במקום שבו כבר אי-אפשר לבדוק. הערך של MXDFz4.4 הוא פחות “מצאנו גלקסיה שייננה מחדש את היקום” ויותר “אנחנו לומדים לקרוא את הדליפה, ומתחילים לבדוק את הכלים שלנו לקראת החושך”.

בקצרה

אסטרונומים המשתמשים ב-Hubble וב-JWST זיהו ישירות אולטרה-סגול מיינן הבורח מגלקסיה אחת ב- $z = 4.442$ — הגילוי הרחוק ביותר מסוגו עד כה, כ-250 מיליון שנה לאחר שה-reionization הקוסמי הסתיים. הגילוי עצמו מוצק. ה-fraction escape המצוטט של 50%–100% אינו מדוד אלא משוחזר, באמצעות מודלים של כוכבי הגלקסיה ושל בליעה בין-גלקטית לאורך קו ראייה נוח במכוון, ולכן הטווח רחב כל כך. לצד הגילוי, הצוות ערך את המבחן הראשון ב-redshift גבוה לדרך עקיפה לאתר אור בורח — צורת קו Lyman-alpha — ומצא לה "תמיכה זהירה". זו תוצאה זהירה של עצם יחיד: תפיסה אמיתית של הדליפה, מספר לא-ודאי בכנות שמוצמד אליה, וצעד ראשון לעבר הכלים שאסטרונומים יצטרכו ברגע שהדליפה כבר לא תהיה נראית בכלל.

בדיקה מפוכחת

מה המאמר מראה: גילוי ישיר ברמת $z = 5.2$ – 5.3 של אור מיינן בורח (Lyman-continuum) מגלקסיה ב- $z = 4.442$ — הגילוי ב-redshift הגבוה ביותר עד כה — עם שלילה זהירה של זיהום מעצם קדמי.

מה סביר אך לא הוכח: ש-fraction escape של הגלקסיה הוא 50%–100%. הגילוי אמיתי; השבר משוחזר באמצעות מודלים של אוכלוסיית הכוכבים ושל בליעה בין-גלקטית (לאורך קו ראייה נוח), ולכן הוא משתרע על טווח רחב. סביר אך לא מוכח גם שצורת Lyman-alpha עובדת כ-tracer של escape רחוק כל כך בזמן — המאמר מציע "תמיכה זהירה" מעצם יחיד.

מה הוא לא מראה: שזו גלקסיה "שייננה מחדש את היקום" (היא נמצאת אחרי התקופה והיא עצם יחיד), או שפרצי היווצרות כוכבים הניעו את ה-reionization (פרשנות, לא הדגמה).

המגבלות העיקריות: מדגם של אחד; fraction escape שתלוי בבחירות מודל ובקו ראייה צלול במכוון; מבחן ראשון וזהיר של ה-tracer החדש; והקושי העצום לחקור אור מיינן בורח קרוב כל כך לתקופה שבה הוא נעשה בלתי נראה.

כמה ביטחון צריך להיות לקורא כללי? גבוה בכך שהאור הבורח באמת זוהה ושזהו הגילוי הרחוק ביותר מסוגו. נמוך-בינוני לגבי ה-fraction escape המדויק — יש לקרוא "50%–100%" כטווח ממודל, לא כמדידה. בינוני לגבי ה-tracer החדש: בדיקה ראשונה מבטיחה, לא כלי מוכח.

עדכונים לאחר הפרסום

• תיקון · 2026-07-28

לאחר משוב מ-Goovaerts, Ilias ממחברי המאמר, המאמר מציג כבר מן הפתיחה אור מיינן ולא אולטרה-סגול באופן כללי, ומבהיר שרק אולטרה-סגול קצר-גל — מתחת ל-Lyman limit של 912 אנגסטרם — הוא מיינן, בעוד שאולטרה-סגול באורכי גל ארוכים יותר אינו מיינן ונצפה באופן שגרתי מגלקסיות ב-redshift גבוה.

מקורות

Journal) Astrophysical The in (accepted arXiv:2603.04517 al., et Goovaerts
<https://arxiv.org/abs/2603.04517>

10.3847/1538-4357/ae75b0 DOI ,(2026) Journal Astrophysical The
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae75b0>