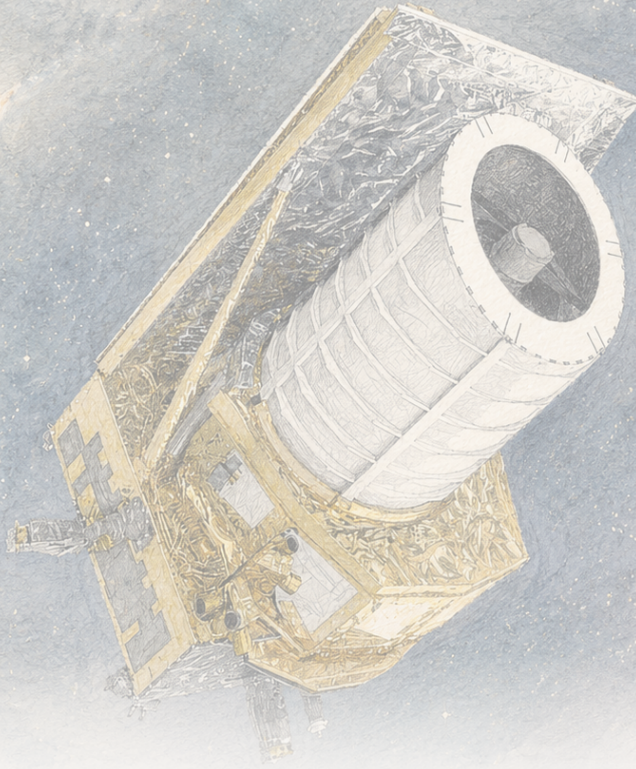




The CLEAN PAPER

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

Euclid יותר מהכפיל את המדגם הקטן של קוואזרים מעבר להסחה לאדום 7

בשנה וחצי הראשונות של *Survey, Wide Euclid* חיפוש על פני כ-3,000 מעלות רבועות מצא 31 קוואזרים חדשים בין הסחה לאדום 6.6 ל-7.8. שנים עשר מהם נמצאים ב-7 ומעלה, יותר מהכפלה של הקומץ שהיה ידוע שם לפני *Euclid*, ואחד ב-7.77. הוא כעת הקוואזר הרחוק ביותר שנרשם. ההתקדמות האמיתית אינה השיא היחיד, שרק מזיז מעט חזית שישבה סביב 7.5 במשך שנים. היא כוחו של הסקר למצוא את העצמים הנדירים ורובם החלשים האלה בכמויות, וזה מה שהופך אותם לגשושים שימושיים של היקום הצעיר. זו תוצאה ראשונית, והניתוח הסטטיסטי המלא וחלק גדול מן האישור הספקטרוסקופי עדיין לפנינו.

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

Paper: *Euclid: Discovery of 31 new quasars at $6.6 > z > 7.8$* , D. Yang, J. F. Hennawi, F. Guarneri et al. (Euclid Collaboration), Astronomy & Astrophysics · DOI: 10.1051/0004-6361/202658883

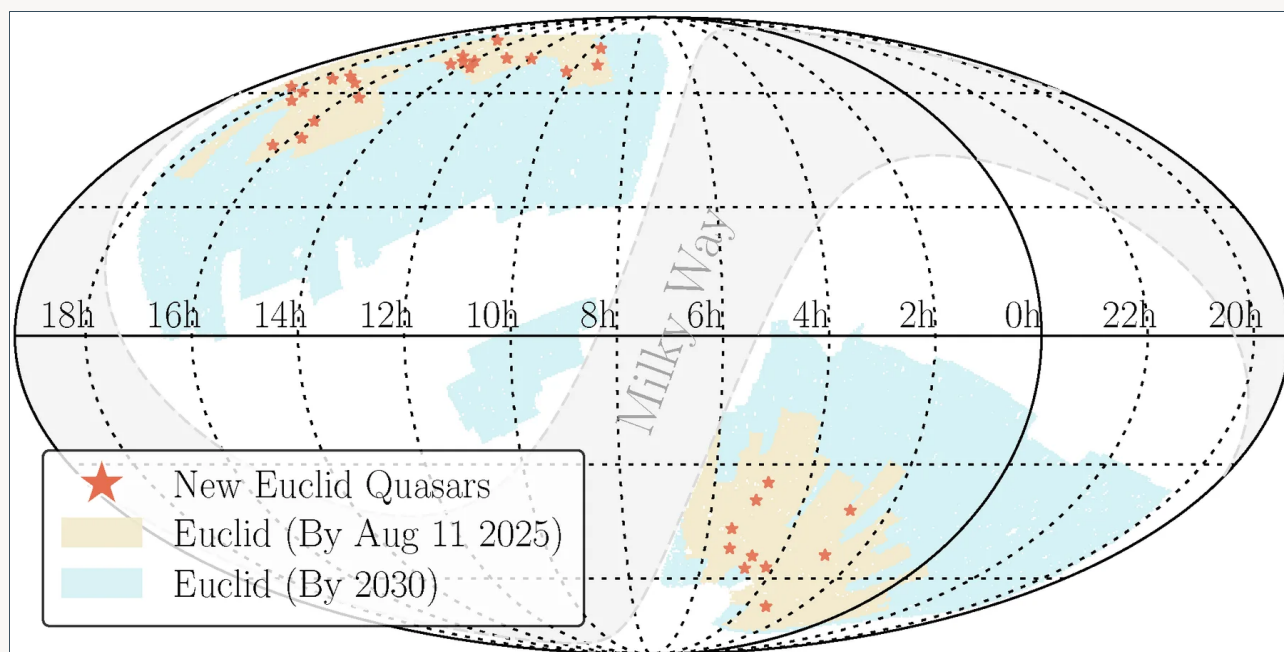
סקר שנבנה למציאת דברים נדירים מצא עכשיו קבוצה שלמה

מהם

קוואזר הוא חור שחור על-מסיבי שנתפס בזמן האכילה, זוהר בעוצמה כשהוא בולע גז עד שהוא יכול להאפיל על כל הגלקסיה המארחת שלו. מאחר שקוואזרים הם מן המקורות היציבים הבהירים ביותר ביקום, הם משמשים כמגדלורים: מוצאים אחד רחוק מספיק, והאור שלו נעשה כמו מנורה שמוחזקת מאחורי מיליארדי שנות מרחב שבינינו לבין.

הקוואזרים הרחוקים ביותר, אלה שהאור שלהם יצא לדרך כשהיקום היה בן פחות ממיליארד שנה, הם גם הנדירים ביותר. לפני שטלסקופ החלל Euclid החל בסקר המרכזי שלו, אושרו רק בערך תשעה מעבר להסחה לאדום 7 — מספר שהצטבר באיטיות מאז הגילוי הראשון מסוג זה ב-2011.

במאמר חדש ב-*Astrophysics & Astronomy*, שיתוף הפעולה Euclid מדווח על 31 קוואזרים חדשים בין הסחה לאדום 6.6 ל-7.8, שנמצאו רק בשנה וחצי הראשונות של הסקר. שנים-עשר מהם נמצאים בהסחה לאדום 7 ומעלה. ריצה מוקדמת אחת יותר מהכפילה את האוכלוסייה המוכרת באותם מרחקים. זה סיפור על כוחו של סקר, וכדאי לדייק מה זה אומר — ומה לא.



שטח Survey Wide Euclid שכבר כוסה, בבז', מול טביעת הרגל המלאה המתוכננת עד 2030, בתכלית, כאשר 31 הקוואזרים החדשים בהסחה גבוהה מסומנים באדום. הם מגיעים רק מן הפרוסה הראשונה של סקר שנועד בסופו של דבר למפות כ-14,000 מעלות רבועות — סיפור כוחו של הסקר בתמונה אחת.

Euclid made the small $z \geq 7$ sample visibly larger

The point is not 'the first quasars'; it is a sparse high-redshift census getting less sparse.



Boundary: a bigger census of rare high-redshift quasars, not a claim about the first objects in the Universe.

לפני Euclid היו מוכרים בערך תשעה קוואזרים מעבר להסחה לאדום 7, שנמצאו בין 2011 ל-2024. הריצה המוקדמת הזאת הוסיפה עוד שנים-עשר — ה"הכפלה" בצורה קונקרטית, על מדגם שעדיין קטן.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

למה שווה להתאמץ בשביל קוואזרים רחוקים כל כך

הסחה לאדום מודדת עד כמה התפשטות היקום מתחה את האור של מקור בדרכו אלינו; הסחה גבוהה יותר פירושה אור ישן יותר ויקום מוקדם יותר. בהסחה לאדום 7 אנחנו מביטים לאחור אל פחות ממיליארד שנה לאחר המפץ הגדול, אל זנב עידן היינון מחדש, כשהעצמים הזוהרים הראשונים סילקו את ערפל המימן הנייטרלי שמילא את החלל המוקדם.

מהי הסחה לאדום, ולמה היא גם מדד מרחק וגם שעון

יותר ואדומים ארוכים גל לאורכי מקור אור של המתחה מידת היא לאדום הסחה לכם: חדשים המונחים אם במהירות נע אור ראשית, כך. כל לשימושי הזה היחיד המספר את הופכים דברים שני אלינו. מגיע שהוא עד שנית, בזמן. אחורה להביט הוא בחלל עמוק להביט — בעבר שהיה כפי גם נראה רחוק דבר כל ולכן קבועה, הסחה לכן יותר. נמתח האור כך יותר ארוך שהמסע ככל האור, של מסעו לאורך התפשט שהיקום מאחר לאדום הסחה יותר. צעיר היה כשהיקום יותר, רחוק ממקום יותר, מוקדם שיצא אור פירושה יותר גדולה לאדום הנוכחי מגילו מעשירית פחות הרבה — הגדול המפץ אחרי שנה ממיליארד פחות של מתקופה אור היא כאן 7 היקום. של

קוואזרים מן התקופה הזאת שימושיים משתי סיבות נפרדות. ראשית, כל אחד מהם כבר מארח חור שחור של מאות מיליוני עד מיליארדי מסות שמש. לגדל משהו כבד כל כך מוקדם זה קשה: תחת המגבלות הרגילות על קצב הספיחה של חור שחור, רק "זרעים" מסיביים למדי מקבלים מספיק זמן להגיע למסות האלה בכמה מאות מיליוני השנים שהיו

זמינות. לכן עצם הקיום והמפקד של העצמים האלה מגבילים את האפשרויות לאופן שבו נוצרו וגדלו החורים השחורים העל-מסיביים הראשונים. שנית, אור הקוואזר שעובר דרך התווך הבין-גלקטי שסביבו נושא חותם של מידת הנייטרליות של הגז, ולכן כל קוואזר משמש גשוש של היינון מחדש עצמו.

המלכוד הוא שהם נדירים מאוד וקשים לתפיסה. בהסחות האלה המאפיין החזק ביותר של קוואזר, שבירת לימן-אלפא, נמתח מן האופטי אל התת-אדום הקרוב, ולכן צריך דימות עמוק בתת-אדום הקרוב על שטח גדול כדי למצוא אותם — בערך קוואזר אחד לכל מאה מעלות רבועות עד הבהירויות הרלוונטיות. עמוק ורחב בתת-אדום הקרוב, מן הקרקע, הוא בדיוק השילוב שהיה קשה באופן כמעט בלתי-אפשרי. זה הפער ש-Euclid נבנה לסגור.

מה Euclid באמת עשה

Euclid הוא טלסקופ חלל בקוטר 1.2 מטר שמריץ סקר בן שש שנים שנועד למפות כ-14,000 מעלות רבועות של השמים באור אופטי ובתת-אדום הקרוב. היותו מעל האטמוספירה מאפשר לו להגיע לעומקים בשדה רחב שסקרי תת-אדום קרקעיים אינם יכולים להשתוות אליהם. המאמר משתמש בנתונים שזרמו במהלך בערך השנה וחצי הראשונות של הסקר — כ-3,000 מעלות רבועות שנצפו בין פברואר 2024 לאוגוסט 2025.



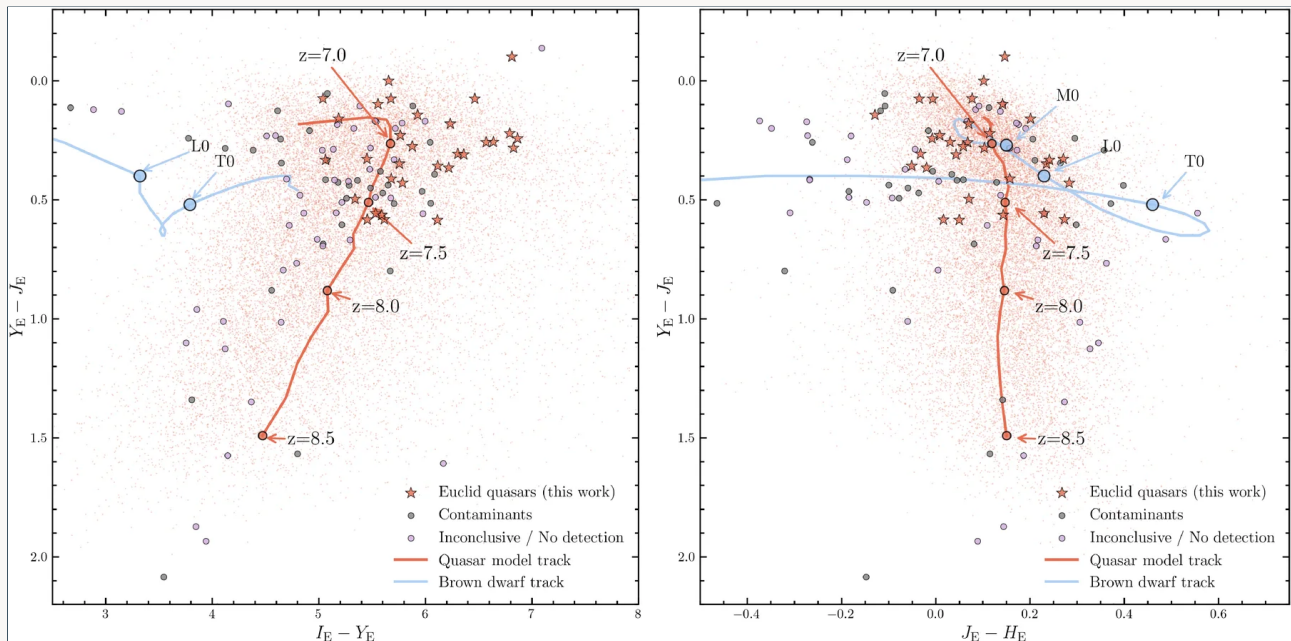
חללית Euclid בחדר נקי לפני השיגור. הטלסקופ בקוטר 1.2 מטר מביט לשמים דרך חלקו העליון של הגליל הלבן; מעל האטמוספירה, מצלמת התת-אדום רחבת השדה שלו מגיעה לעומקים על שטח גדול שסקרים קרקעיים אינם יכולים להשיג.

ESA / NASA Science fair-use

למצוא 31 מחטים בערמת השחת הזאת לא היה עניין של פשוט להסתכל. הצוות בנה פוטומטריה מותאמת והריץ עליה כמה מסווגים של למידת מכונה ומודלים הסתברותיים — מודל צפיפות, extreme-deconvolution מסווג gradient

boosting והתאמות מבוססות תבניות — כדי להעריך עבור כל מקור חלש ונקודתי את ההסתברות שהוא קוואזר בהסחה גבוהה ולא אחד המזהמים הרבים הרבה יותר, בעיקר ננסים חומים קרים שצבעיהם מחקים קוואזר רחוק. מועמדים הוצלבו בין השיטות, נבדקו בעין וקיבלו עדיפות לתצפיות המשך. התמונות של Euclid עצמן בוחרות את המועמדים; האישור מגיע מספקטרומים שנלקחים בטלסקופים קרקעיים גדולים — כולל Binocular Large-1 Magellan Telescope — שמפרקים את האור מספיק כדי לראות את השבירה וקווי הפליטה האופייניים.

שלב האישור הזה הוא עבודה בתהליך, באופן גלוי. המעקב הספקטרוסקופי נמשך, ולפי מילות המאמר עצמו עדיין לא הגיע לשלמות מלאה, במיוחד בשמים הדרומיים. מתוך המועמדים שנבדקו אך לא הפכו לאחד מ-31 הקוואזרים המאושרים, המאמר נותן דין וחשבון ברור: רבים היו מזהמים, חלק גדול מהם כנראה ננסים חומים; חלק היו לא חד-משמעיים; ובחלק לא זוהה אות. קבוצה של קוואזרים מאושרים היא הכותרת; החשבונאות המלאה של מה שתהליך הבחירה תופס ומפספס נדחית למאמרים מאוחרים יותר.



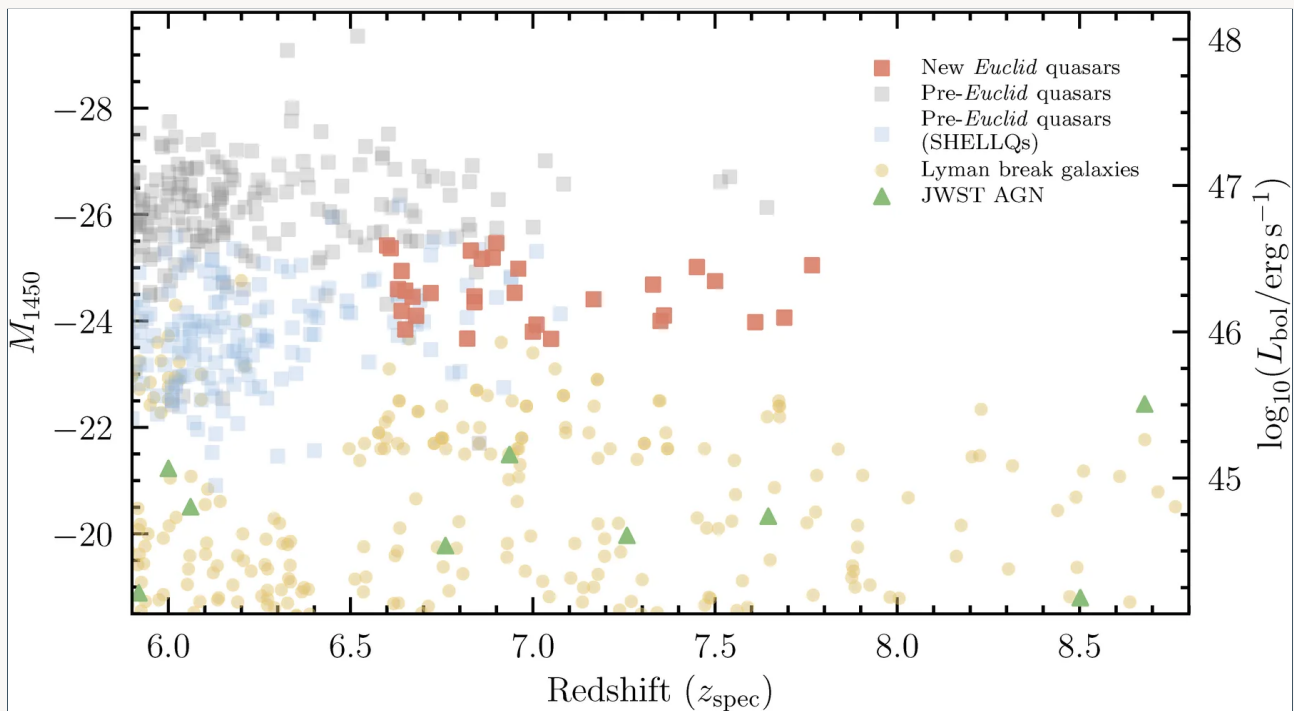
דיאגרמת צבע-צבע: כיצד Euclid מבדיל קוואזר רחוק מננס חום קרוב. כל ציר מראה את ההפרש בין בהירות העצם בשני מסנני Euclid, ולכן לוכד את צבע האור ולא את עוצמתו המוחלטת. העקומה האדומה עוקבת אחר המקום שבו צפויים להימצא קוואזרים בהסחה גבוהה, עם תוויות הסחה 7.0 עד 8.5; העקומה התכלת מייצגת ננסים חומים קרים — המתחזים העיקריים — המסומנים לפי סוג מ-0 עד T0. 31 הקוואזרים החדשים, כוכבים אדומים, מסתדרים לאורך מסלול הקוואזרים; מזהמים מאושרים באפור ומועמדים לא חד-משמעיים או ללא גילוי בסגול נופלים ממנו. במקום שבו שני המסלולים קרובים, צבע לבדו אינו יכול להכריע — ולכן כל קוואזר עדיין זקוק לאישור ספקטרוסקופי.

D. Yang et al. / Euclid Collaboration / Astronomy & Astrophysics CC BY 4.0

השיא, בפרופורציה

אחד מ-31 העצמים, EUCL J1729+6410, נמצא בהסחה לאדום של בערך 7.77 והוא כיום הקוואזר הרחוק ביותר הידוע. זה שיא אמיתי, וכדאי לומר בפשטות מה גודל הצעד. במשך שני עשורים של חיפושים ייעודיים נדחף הגבול לכ-7.5, כאשר מחזיק השיא הקודם היה סביב 7.64. המעבר ל-7.77 הוא התקדמות אמיתית אך מצטברת — המאמר מציב את התוספת על כ-0.13 בהסחה לאדום, בערך 15 מיליון שנה של זמן קוסמי. דחיפה קטנה, לא קפיצה.

המספר המשמעותי יותר הוא האחר: הכפלת המדגם מעל הסחה לאדום 7 בריצה מוקדמת יחידה. מחזיק שיא הוא עצם אחד, ועצם אחד הוא נקודת נתונים. אוכלוסייה מוכפלת שעדיין גדלה מאפשרת לעשות סטטיסטיקה — למדוד כמה החורים השחורים האלה היו נפוצים, כמה היו בהירים וכיצד היו מקובצים — והסטטיסטיקה היא המקום שבו המדע על היקום המוקדם באמת חי. רוב הקוואזרים החדשים גם חלשים יחסית, במגניטודה אחת עד שתיים פחות בהירים מן הקוואזרים הזוהרים שנמצאו לפני Euclid. קשה יותר להגיע לקצה החלש הזה, אבל למחקרי היינון מחדש הוא יקר יותר: קוואזרים חלשים יותר יוצרים סביבם בועות מיוננות קטנות יותר, ולכן האור שלהם דוגם יותר מן הגז שעדיין נייטרלי.



מיקום הקוואזרים החדשים: בהירות מול מרחק קוסמי. הציר האופקי הוא הסחה לאדום — ימינה יותר פירושו מוקדם יותר בהיסטוריה הקוסמית. הציר האנכי הוא הבהירות האולטרה-סגולה הפנימית של כל קוואזר, המסומנת M_{1450} לפי המוסכמה הישנה של מגניטודות אסטרונומיות הסולם הפוך, ולכן גבוה יותר פירושו בהיר יותר. הסולם הימני מציג את אותו דבר כלומינוזיות כוללת, או בולומטרית. כך נקרא הגרף כמפקד. הקוואזרים הבהירים שהיו מוכרים קודם, באפור, מתקבצים בהסחות נמוכות יותר; סקר עמוק יותר, SHELLQs בתכלת, הגיע לעצמים חלשים יותר אך לא הרבה יותר אחורה בזמן. 31 קוואזרי Euclid החדשים באדום מאריכים את האוכלוסייה הזוהרת הזאת אל ההסחות הגבוהות ביותר — הימני ביותר הוא מחזיק השיא ב-7.77 — ובו בזמן יושבים בערך אחת עד שתי מגניטודות מתחת לקוואזרים הבהירים הקלאסיים. מתחתיהם נמצא תחום שרק סקרים עמוקים וצרים מגיעים אליו: ים של גלקסיות Lyman-break בצהוב וכמה חורים שחורים סופחים חלשים מאוד ש-JWST זיהה במשולשים ירוקים. התרומה של Euclid נראית כקבוצה נבדלת — קוואזרים בהירים יחסית, מוקדמים מאוד, על שטח רחב — שמגשרת בין המדגם הבהיר הישן לאוכלוסייה החלשה שרק מכשירים ממוקדים יכולים כרגע להגיע אליה.

D. Yang et al. / Euclid Collaboration / Astronomy & Astrophysics CC BY 4.0

מה עדיין לא ודאי

שלוש הסתייגויות מגיעות עם התוצאה הזאת, והמאמר מציין את כולן בעצמו.

ראשית, זו תוצאה ראשונית, לא מדידה סופית. המחברים דוחים במפורש את הניתוח הסטטיסטי המקיף של פונקציית הבחירה ושל אוכלוסיית הקוואזרים לפרסומים עתידיים. המגבלות על פונקציית הבהירות כאן הן מבט ראשון, לא

המילה האחרונה.

שנית, לא כל "קוואזר" חלש מובטח להיות כזה. בקצה החלש, חלק מן העצמים שמזוהים כקוואזרים יכולים להיות במקום זאת גלקסיות מוקדמות קומפקטיות, במיוחד אם חסר להם קו לימן-אלפא מורחב מאוד. הצוות נותן בדיקה ראשונית שהעצמים תואמים למקורות נקודתיים ולא לגלקסיות מורחבות, אך מכנה אותה ראשונית: ספקטרוסקופיה עמוקה בתת-אדום הקרוב מ-JWST ומתקנים דומים היא שתכריע לגבי טבעם האמיתי של החלשים ביותר.

שלישית, העצמים עצמם חלשים וקרובים לגבול של מה שספקטרוסקופיה קרקעית מסוגלת לאפיין. כדי לקבוע את מסות החורים השחורים, סביבתם ותפקידם בסיפור היינון מחדש יידרשו, ALMA JWST ו-Euclid.NOEMA מצוין בלמצוא את הדברים האלה; את רוב המחקר המפורט הוא מעביר למכשירים אחרים.

למה זה חשוב

הערך של העבודה הזאת הוא דמוגרפי. במשך עשור, מיליארד השנים הראשונות של היקום הציעו לאסטרונומים קומץ זעום של קוואזרים להסיק מהם. Euclid, בפרוסה מוקדמת אחת של הסקר, הוסיף מספיק כדי לשנות את זה מרשימה למדגם — והוא נמצא במסלול שתואם את התחזיות שלפני השיגור להמשיך בכך.

זה חשוב מפני שהשאלות הפתוחות כאן הן שאלות על אוכלוסיות. כיצד חורים שחורים גדלו כל כך מהר וכל כך מוקדם? עד כמה הגז הבין-גלקטי היה טלאי ועד כמה נייטרלי בזמנים שונים? שום עצם מרהיב יחיד לא עונה עליהן; עונים עליהן באמצעות ספירה, השוואה ומיפוי של רבים. מה ש-Euclid הדגים הוא היכולת לבנות את המפקד הזה — גם בקצה החלש, שמתחבר לאוכלוסייה המסתורית של חורים שחורים סופחים ש-JWST מוצא באותה תקופה. המאמר הזה אינו פותר כיצד נוצרו החורים השחורים הראשונים ואינו מודד בפני עצמו את היינון מחדש. הוא מספק בכמות גדולה את חומר הגלם שהמדידות האלה צריכות, ומציב חזית ברורה למסעות המעקב שכבר בעיצומם.

בקצרה

באמצעות כ-3,000 המעלות הרבועות הראשונות של Survey, Wide Euclid שיתוף הפעולה Euclid גילה 31 קוואזרים חדשים בין הסחה לאדום 6.6 ל-7.8, מהם שנים-עשר בהסחה 7 ומעלה — יותר מהכפלה של האוכלוסייה המוכרת שם — כולל אחד ב-7.77 שהוא כעת הקוואזר הרחוק ביותר שנרשם. החשיבות היא בכוח המוכח של הסקר למצוא עצמים נדירים ורובם חלשים בכמויות, לא בשיא ההסחה המצטבר. אלה תוצאות ראשוניות: הניתוח הסטטיסטי המלא, חלק גדול מן האישור הספקטרוסקופי והאפיון המפורט של העצמים עדיין לפנינו.

בדיקה מפוכחת

מה המאמר מראה: שבשנה וחצי הראשונות של Survey, Wide Euclid על כ-3,000 מעלות רבועות, ניתן למצוא קוואזרים בהסחה גבוהה במספרים שאף סקר קודם לא הצליח — 31 מאושרים בין 6.6 ל-7.8, שנים-עשר ב-7 ומעלה, בערך הכפלה של המספר הידוע שם, כאשר הרחוק ביותר נמצא סביב 7.77.

מה סביר אך אינו העיקר: שיא ההסחה עצמו. הוא אמיתי, אבל מזיז את החזית רק בכ-0.13 בהסחה — משיא קודם ליד 7.64 ל-7.77, בערך 15 מיליון שנה של זמן קוסמי. הכותרת שתזדקק טוב יותר היא המדגם המוכפל, הגדל והחלש

יחסית, לא מחזיק השיא היחיד.

מה הוא לא מראה: כיצד נוצרו החורים השחורים העל-מסיביים הראשונים, או מדידה של היינון מחדש. הקוואזרים האלה הם הכלים לשאלות האלה, לא התשובות. זה גם אינו מפקד האוכלוסייה הסופי — הניתוח הסטטיסטי המלא נדחה במפורש למאמרים מאוחרים יותר.

המגבלות העיקריות לקורא כללי: המעקב הספקטרוסקופי אינו שלם, במיוחד בדרום; תוצאות פונקציית הבהירות ראשוניות; וחלק מן העצמים החלשים ביותר המסומנים כקוואזרים עשויים להתברר כגלקסיות מוקדמות עד שספקטרוסקופיה ברמת JWST תאשר אותם.

כמה ביטחון צריך להיות לקורא כללי? גבוה בכך ש-Euclid שינה את מה שאפשר למצוא בהסחות האלה, וגבוה לגבי האישור שעבר ביקורת עמיתים של העצמים הבהירים יותר. נמוך יותר, בהתאם למסגור של המחברים עצמם, לגבי המספרים המדויקים של אוכלוסיית הקצה החלש וטבעם של המועמדים החלשים ביותר — אלה תוצאות ראשוניות, לא סופיות.

מקורות

DOI , (2026) A104 ,711 Astrophysics & Astronomy Collaboration), (Euclid al. et Guarneri F. Hennawi, F. J. Yang, D.
10.1051/0004-6361/202658883
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202658883>