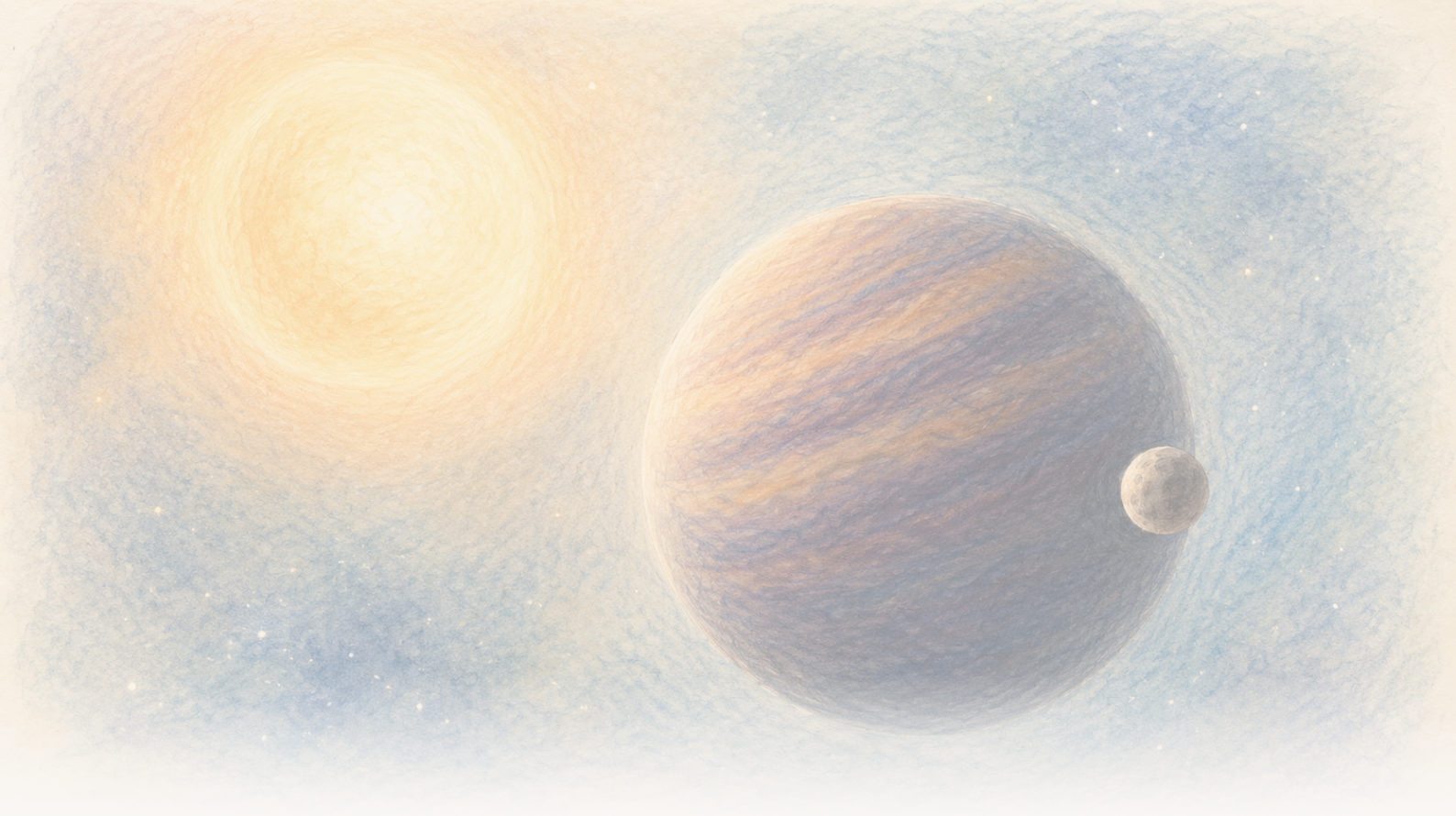




The CLEAN PAPER

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

נראה שננס חום מתנדנד כל 171 ימים. עולם נסתר אחד עשוי למשוך אותו, אבל הנתונים עדיין מאפשרים שניים

עשרים ושלושה ספקטרומים באיכות גבוהה חושפים הסטה מחזורית חזקה בתנועתו של *B. 2722 CD-35* המודל המועדף הוא בן לוויה אחד במסלול אקסצנטרי ובמסה מינימלית הקרובה למסת צדק, אך מודל של שני עצמים יכול לחקות את אותו אות, השתנות איטית של הננס החום עדיין אפשרית עקרונית, ולמונח "אקסו-ירח" אין כאן גבול מוסכם.

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

Paper: *Planetary-mass exosatellite detected around the substellar companion of a star*, Kevin Hoy, Alice Zurlo, Pablo A. Pena R., Jana Kohler, Silvano Desidera, Raffaele Gratton, Cecilia Lazzoni, Simon Petrus, Florian Rodler, Jonathan Smoker, Valentina D'Orazi, Ilaria Carleo and Ilaria Giovannini, *Nature*, 655 865-869 (2026) · DOI: 10.1038/s41586-026-10751-w

נראה שננס חום מתנדנד כל 171 ימים. עולם נסתר אחד עשוי למשוך אותו, אבל הנתונים עדיין מאפשרים שניים

אסטרונומים יכולים לראות את B 2722 CD-35 כנקודת אור בפני עצמה, נפרדת מן הכוכב שאותו הוא מקיף. זהו ננס חום, בתחום המסה שבין כוכבי לכת ענקיים לכוכבים: במסה של כ-37 מסות צדק, הוא מסיבי יותר מכוכב לכת ענק טיפוסי אך אינו כוכב רגיל שבו בוער מימן. הם אינם יכולים לראות את העצם הקטן יותר שאולי מקיף את הננס החום עצמו. אם יאושר, העצם הפנימי ביותר יהפוך את המערכת להיררכיה הנצפית הראשונה של לווין סביב עצם תת-כוכבי גדול יותר, שמקיף בעצמו כוכב.

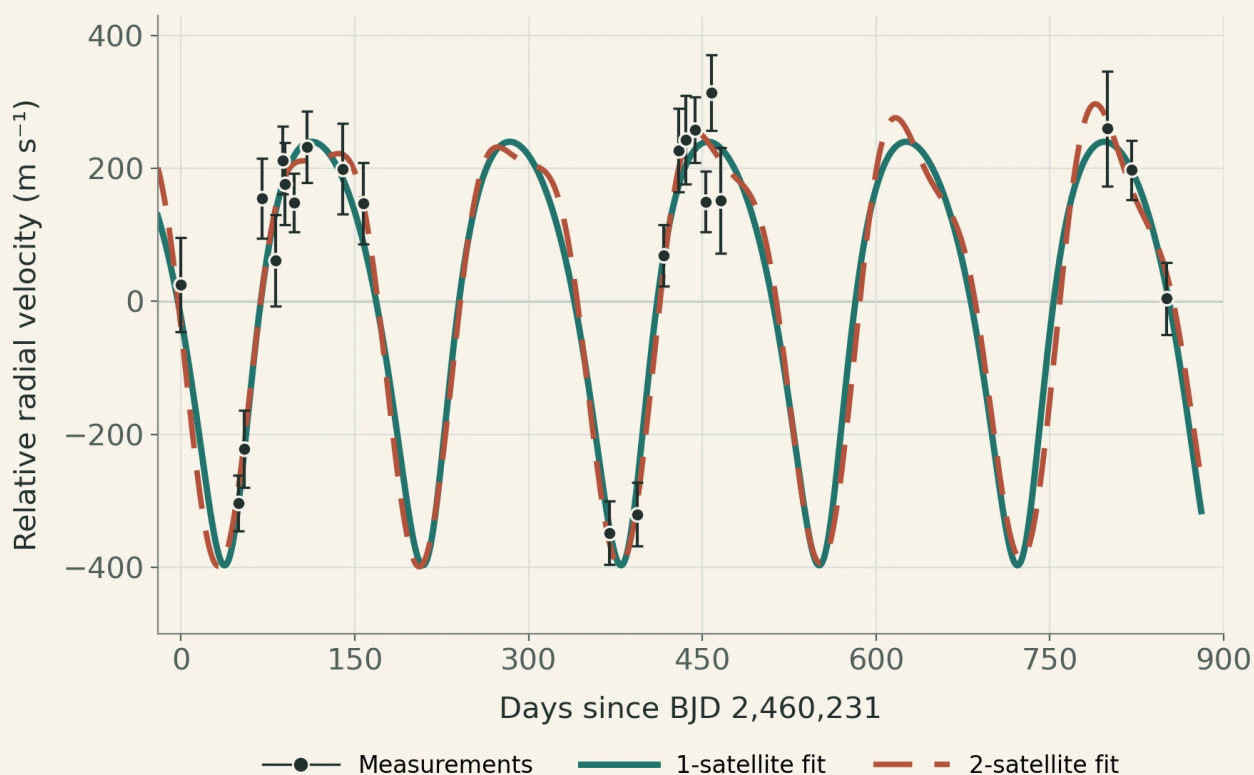
במקום זאת הם רואים קצב. בלילות מסוימים אורו של הננס החום מוסח מעט כאשר הוא נע לעבר כדור הארץ. באחרים הוא מוסח כאשר הננס החום מתרחק. הדפוס חוזר בערך כל 171 ימים.

תנועה הלך ושוב כזאת היא בדיוק מה שבן-לוויה בלתי נראה יכול ליצור: כאשר שני עצמים מקיפים מרכז מסה משותף, הקטן מקיף את הגדול, אך גם הגדול מבצע לולאה קטנה בהרבה. אם הקצב הזה מסלולי, מאמר חדש ב-Nature מציג עצם אחד בעל מסה פלנטרית כהסבר המועדף ללולאה שנמדדה סביב B. 2722 CD-35.

זו אפשרות מרשימה, לא צילום של ירח. עשרים ושלושה לילות תצפית באיכות גבוהה חושפים אות מחזורי חזק. הפיכת האות הזה לעולם דורשת מודל, והנתונים הנוכחיים עדיין מאפשרים יותר מארכיטקטורה אחת. הם גם אינם שוללים לחלוטין שינויים איטיים בננס החום עצמו.

One wobble, two nearly identical fits

23 radial-velocity measurements of the brown dwarf CD-35 B



Points and error bars are observations. Curves are model fits, not directly observed companions.

הנקודות השחורות ופסי השגיאה הם 23 מדידות המהירות הרדיאלית הליליות. העקומות הרציפה והמקווקוות הן ההתאמות הטובות ביותר למודלים של לוויין אחד ושני לוויינים. החפיפה הכמעט מלאה שלהן מראה מדוע הנתונים יכולים לחשוף תגובה מחזורית בלי לקבוע עדיין את ארכיטקטורת המערכת; אף עקומה אינה צילום ישיר של בן-לווייה.

Original chart — The Clean Paper; data from Hoy et al., Nature, (2026) Figure 1 source workbook CC BY 4.0

מערכת בתוך מערכת

הננס החום התגלה בדימות ישיר, כלומר טלסקופים הפרידו את אורו מאור הכוכב המארח. בשמים הוא נראה במרחק זוויתי של כ-2.8 שניות קשת מן הכוכב. המסלול הרחב המחבר את הזוג אינו מוכר היטב, אך ההערכות הנוכחיות מצביעות על מסלול מוארך מאוד שנמשך בערך 5,000 שנים.

אם האות המחזורי מסלולי, הארכיטקטורה המוסקת תמקם את המועמד רמה אחת פנימה: כוכב שמקיף אותו ננס חום, וסביב הננס החום מקיף בן-לווייה בעל מסה פלנטרית.

A possible system inside a system

If the signal is orbital, the candidate would occupy the innermost level.



THE INNER HIERARCHY IS INFERRED, NOT DIRECTLY OBSERVED

- not to scale - candidate existence, true mass and the label "exomoon" remain unsettled

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

אם האות מסלולי, המועמד יתפוס את הרמה הפנימית ביותר בהיררכיה האפשרית הזאת. רק הננס החום נצפה ישירות. המסלול החיצוני סביב הכוכב מוגבל בצורה גרועה, ואילו המסלול הפנימי של כ-171 ימים מוסק מן התנודה שנמדדה בננס החום. הגדלים והמרחקים אינם בקנה מידה.

The Clean Paper CC BY 4.0

קל לצייר היררכיה אפשרית כזאת. המציאות הפיזיקלית שלה ואוצר המילים לתיאורה עדיין אינם מוסכמים. האם גוף בעל מסה פלנטרית המקיף ננס חום הוא ירח, כוכב לכת או פשוט לוויין? לאסטרונומים אין כלל מוסכם שמכריע בשאלה. לכן המאמר משתמש במונח הרחב יותר **אקסו-לוויין**.

כיצד 23 לילות הפכו לתנודה

הצוות צפה ב-CD-35 2722 B (ראו את הערך שלו ב-Exoplanets on Eyes NASA) באמצעות CRISP+ ספקטרוגרף ברזולוציה גבוהה המותקן ב-Telescope Large Very של המצפה האירופי הדרומי. בין אוקטובר 2023 לפברואר 2026 הם השיגו 26 אפוקות תצפית. באחת היה מעט מדי אות, ושתיים שנלקחו במזג אוויר גרוע נדחו וחזרו עליהן, כך שנותרו 23 לילות באיכות גבוהה.

ספקטרוגרף מפזר את האור לתבנית מפורטת של קווים. כאשר המקור נע לעבר כדור הארץ או ממנו והלאה, הקווים האלה מוסחים בכמות זעירה. מדידות חוזרות של התנועה הזאת לאורך קו הראייה נקראות מהירויות רדיאליות. הן אינן מראות את הגוף הנסתר. הן מראות כיצד הגוף הנצפה עשוי לנוע תחת משיכה שאינה נראית.

המחזוריות החזקה ביותר במדידות נמצאת בסביבות 170 ימים. היא עוברת את סף הסתברות אזהקת השווא של 0.1% של המחקר. הסף הזה שואל באיזו תדירות רעש, תחת הנחות המבחן, ייצור שיא בפרודוגרמה שחזק לפחות באותה מידה. אין פירושו הסתברות של 99.9% שקיים לוויין, והוא כשלעצמו אינו אומר אם יש בן-לוויה אחד או שניים.

מה יכול אות של מהירות רדיאלית לבסס?

וממנו. הצופה לעבר תנועה של למדידות ספקטרליים קווים של חוזרות הסטות הופכת רדיאלית מהירות ואת הנמדדת התנועה גודל את המחזור, את להסיק וכך מסלול של למשוואות חוזר דפוס להתאים אפשר בן-הלוויה. של המינימלית המסה אבל השיטה אינה מצלמת ישירות את בן-הלוויה. גם אטמוספירה כוכבית או תת-כוכבית יכולה להסיט קווים ספקטרליים, לוחות זמנים של תצפיות יכולים ליצור מקצבים מטעים, וסידורים מסלוליים שונים יכולים לחקות זה את זה. האות, ההסבר הפיזיקלי שלו והשם שניתן לעצם המוסק הם שאלות נפרדות.

כדאי לשים לב לדגימה לפני שמקבלים את התשובה המסלולית. ארבע מדידות מהירות רדיאלית נמוכות במיוחד נושאות משקל משמעותי בדפוס. הן התרחשו בשני זוגות, בתנאים שדווחו כטובים, ואף אחת מהן לבדה לא יצרה את האות כאשר המחברים חזרו על הניתוח והסירו בכל פעם נקודה אחת. למרות זאת, נדגם רק חלק מן הפאזות המסלוליות האפשריות. עשרים ושלושה לילות הפזורים על פני יותר משנתיים אינם שקולים לכיסוי רציף.

המחברים בדקו גם ארטיפקט אפשרי של חצי שנה. תיקון לא מושלם של תנועת כדור הארץ המשתנה או של פרופיל המכשיר יכול ליצור אות שנתי כוזב שהדגימה מקפלת לחצי שנת ארץ, כלומר 182.5 ימים. המחזור המועדף שלהם הוא 171.11 ימים, עם אי-ודאות של $+0.53/-0.36$ ימים; המחברים מדווחים שזה מרוחק בכ-20 סטיות תקן מ-182.5 ימים. הם גם אינם מדווחים על מתאם עם תנועת כדור הארץ המשתנה, תנאי ה-seeing, אדי מים אטמוספריים או תכונות המכשיר שנבדקו. אלה בקורות חשובות. הן הופכות הסבר מסלולי למשכנע מספיק כדי למדל אותו, אך אינן מזהות את העצם בעצמן.

התשובה המסלולית הפשוטה ביותר: בן-לוויה אחד

במודל המועדף, עצם אחד נע במסלול אקסצנטרי, כלומר מעט מוארך, סביב הננס החום אחת ל-171.11 ימים. למסלול המותאם אקסצנטריות של כ-0.27 וחצי ציר ראשי של כ-0.200 יחידות אסטרונומיות — בערך חמישית מן המרחק הממוצע בין כדור הארץ לשמש.

לתנועה הנמדדת משרעת של כ-318 מטר לשנייה. מן התנועה הזאת נותן המודל לבן-הלוויה מסה מינימלית של כ-0.92 ממסת צדק.

המילה מינימלית חשובה. מהירות רדיאלית מודדת רק את חלק התנועה המסלולית המכוון לעברנו ומאיתנו. כאשר רואים מסלול מן הצד, רוב התנועה שלו מופיעה לאורך הקו הזה. כאשר רואים אותו יותר מלמעלה, חלק גדול מן התנועה חוצה את השמים במקום זאת, ונדרש בן-לוויה מסיבי יותר כדי לייצר את אותה תנועה נמדדת.

אסטרונומים כותבים את התוצאה כ- $\sin(i)$ m: המסה כפול הסינוס של נטיית המסלול הלא ידועה, כלומר זווית הצפייה. הנתונים מגבילים את המכפלה הזאת, לא את המסה האמיתית לבדה. לכן כ-0.92 מסות צדק הוא חסם תחתון, לא מדידה של המסה המדויקת של העצם.

מדוע זווית הצפייה מסתירה מסה?

רכיב את למדוד קל ולכן ומכם, לעברכם ושוב שוב נע הרץ הצד. מן מעגלי במסלול צופים שאתם דמיינו לעברכם לא וכמעט הראייה שדה לרוחב בעיקר נע הרץ מלמעלה. מסלול אותו על הביטו כעת הזה. התנועה מכם. או

מהירות רדיאלית רואה רק את הרכיב הראשון. הגורם המתמטי $\sin(i)$ מתאר כמה מן התנועה המסלולית מכון לאורך קו הראייה שלנו. כל עוד הנטייה i אינה ידועה, המסה המוסקת נשארת מסה מינימלית.

לאחר מכן שאלו המחברים אם המסלול הזה יכול להתמיד במקום להרוס את עצמו במהירות. הבדיקות המספריות שלהם מצאו שמודל בן-הלוויה היחיד יציב בדרך כלל. הדבר הופך אותו לפרשנות פיזיקלית סבירה של האות. הוא אינו מהווה גילוי שני.

התשובה המסורבלת: שני בני-לוויה יכולים לחקות אחד

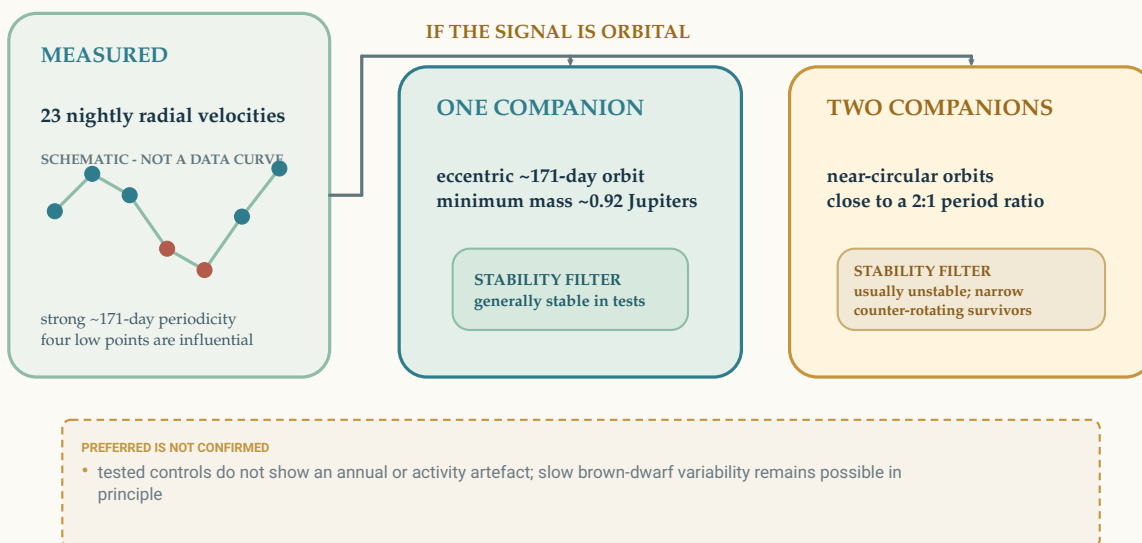
לאות מהירות רדיאלית אקסצנטרי יש עמימות מוכרת. בתנאים מסוימים, שני עצמים במסלולים כמעט מעגליים, כאשר לאחד לוקח בערך פי שניים זמן להשלים מסלול מן האחר, יכולים לייצר יחד דפוס הדומה לעצם יחיד במסלול מוארך.

העמימות הזאת מופיעה כאן. מודל של שני בני-לוויה יכול להתאים למדידות הנוכחיות עם אות חיצוני בסביבות 171 ימים ואות פנימי קצר יותר. מכיוון שזמני התצפית אינם דוגמים כל פאזה באופן אחיד, לאות הקצר יש כמה aliases. מכיוון ש-23 הלילות שנבחרו משאירים פערים ארוכים, תקופות ניסיון שונות יכולות לכלול מספר שונה של מחזורים בלתי נצפים בין ביקורים ועדיין להסתדר עם אותן מדידות. לכן התקופות המועמדות סביב 14, 70, 88 ו-115 ימים הן התאמות חלופיות לאות קצר אחד שנדגם בצורה גרועה, לא ארבעה מקצבים שהתגלו באופן עצמאי.

המחברים דוחים את החלון של 13 עד 17 ימים, שאינו מוגבל היטב. באזור הזה ההתאמה אינה מבדדת תקופה משכנעת אחת: פתרונות רבים וצפופים מתחת ל-20 ימים יכולים לשחזר את המדידות בתדירות הדגימה הנמוכה, ולכן סביר שכל החלון הוא ארטיפקט של הדגימה. בין החלונות הנוותרים, הפתרון של כ-88 ימים מתאים טוב יותר מן החלופות של כ-70 ו-115 ימים, אך לא מספיק כדי שהמאמר יטען שנקבע מחזור שני. בהתאמה הטובה ביותר שבטבלה, המסה המינימלית של העצם החיצוני היא כ-0.87 מסות צדק ושל הפנימי כ-0.22 מסות צדק. המספרים האלה מתארים מודל שאינו מועדף; הם אינם מדידות של שני עולמות מבוססים.

One measured rhythm, more than one orbital model

The dynamics favour one object; they do not add another observation.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

אם האות של כ-171 ימים מסלולי, אפשר לייצג את אותו דפוס כללי של מהירות רדיאלית באמצעות בן-לוויה אחד במסלול אקסצנטרי או שני בני-לוויה במסלולים כמעט מעגליים הקרובים ליחס תקופות של שניים לאחד. בדיקות יציבות מעדיפות את פרשנות העצם היחיד, אך אינן הופכות מודל לתמונה ואינן שוללות כל צורה של השתנות איטית בנגס החום.

The Clean Paper CC BY 4.0

חישובי היציבות מחדדים את ההשוואה. רוב הסידורים שנבדקו עם שני בני-לוויה פלטו אחד מן העצמים בתוך כמה מאות שנים מדומות. התצורות ששרדו תפסו אזור צר ויוצא דופן שבו המסלולים היו כמעט באותו מישור אך נעו בכיוונים מנוגדים. הכוכב המארח הוסיף אזורים לא יציבים נוספים.

זו סיבה להעדיף בן-לוויה יחיד במסלול אקסצנטרי על פני מערכות שני בני-הלוויה שנבדקו. זו אינה הוכחה שהטבע בחר במודל הפשוט יותר. יציבות מסננת פרשנויות אפשריות לאחר שנמדדו המהירויות הרדיאליות; היא אינה מוסיפה נקודת תצפית נוספת לעקומה.

כיצד מסלול אקסצנטרי אחד יכול להיראות כמו שני מסלולים מעגליים?

הזה. לגל עיוותים מוסיף אקסצנטרי מסלול פשוט. מחזורי רדיאלית מהירות גל מייצר מושלם מעגלי מסלול מספק אחד שאות כך להשתלב יכולים לאחד שניים של ליחס הקרובות תקופות עם מעגליים מסלולים שני דומה. עיוות מספק והאחר הראשי הקצב את זוהי דגנרציה מסלולית: מערכות פיזיקליות שונות מייצרות מדידות דומות. תצפיות נוספות בזמנים שבהם המודלים מנבאים מהירויות שונות יכולות לשבור את השוויון. בדיקת דינמיקה עוזרת בכך שהיא שואלת אם כל מערכת מוצעת יכולה לשרוד, אך אינה יכולה להחליף את התצפיות האלה.

האם הקצב יכול להגיע מן הננס החום עצמו?

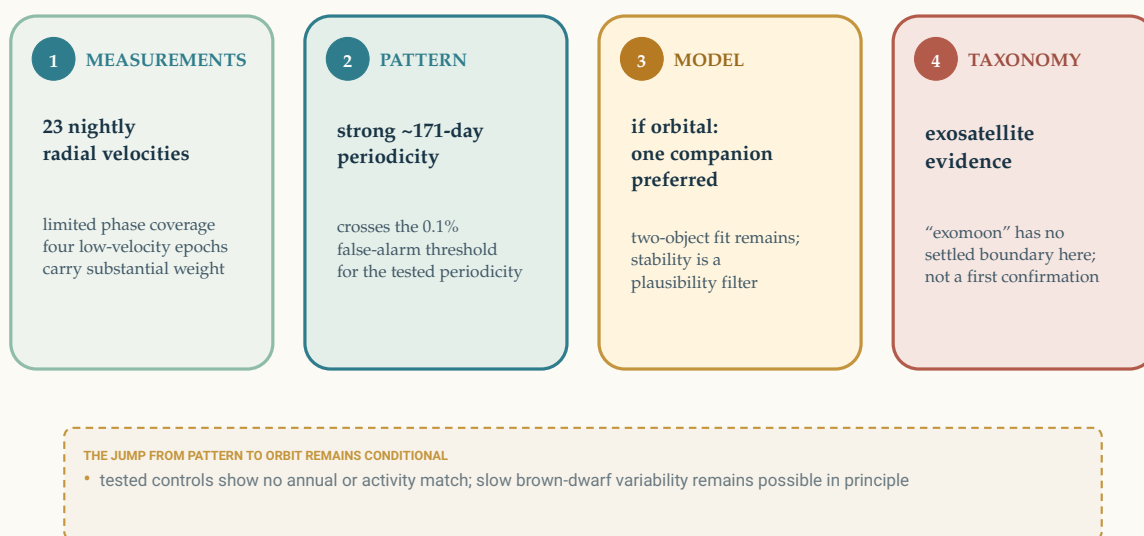
ננס חום אינו מסת מבחן שקטה. האטמוספירה שלו מסתובבת, יוצרת עננים ועשויה להיות פעילה מגנטית. דפוס שטח משתנים יכולים לעצב מחדש קווים ספקטראליים ולחקות תנועה.

תקופת הסיבוב המרבית המוערכת של B 2722 CD-35 היא כ-0.65 ימים, קצרה בהרבה מ-171 ימים. הצוות לא שחזר אות סיבוב קצר חזק, או אות משכנע דמוי-עננים או גרנולציה, במודלי הפעילות שבדק. הם בדקו גם דגימה שנתית וכמויות מכשיריות מבלי למצוא התאמה לקצב של 171 ימים.

הבדיקות האלה מצמצמות את החלופות, אך המאמר אינו טוען שכל ההשתנות הפנימית הוסרה. אי אפשר לשלול עקרונית פעילות מגנטית ארוכת טווח או מחזוריות אטמוספרית בננס החום. האפשרות שנותרה צריכה להופיע לצד המודלים המסלוליים, לא להיות מוסתרת אחריהם.

Four levels of evidence, not one confirmation

Each level answers a different question.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

הראיות עולות דרך רמות נפרדות: 23 מהירויות רדיאליות ליליות עם כיסוי פאזה מוגבל, מחזוריות חזקה של כ-171 ימים, מודל מועדף של בן-לוויה אחד אם האות מסלולי, ולבסוף תווית "אקסו-ירח" שאינה מוסכמת. הסולם מפריד בין מדידה, דפוס סטטיסטי, פרשנות פיזיקלית וטקסונומיה; הוא אינו חץ של אישור.

The Clean Paper CC BY 4.0

האם זה אקסו-ירח?

במערכת השמש, ירח מקיף כוכב לכת. B 2722 CD-35 הוא ננס חום, והמסה האמיתית של בן-הלוויה המוסק עדיין אינה ידועה. שמות מוכרים מתחילים להימתח כאשר עצם אחד נמצא סמוך לגבול כוכב-לכת-ננס-חום ואחר סמוך לגבול ירח-כוכב-לכת.

המאמר אינו טוען לאקסו-ירח המאושר הראשון. הוא מציין שעדיין לא זוהה אקסו-ירח בביטחון, מציג ראיות לאקסו-לוויין בעל מסה פלנטרית, ומכנה את המערכת צעד לקראת גילוי שאינו שנוי במחלוקת. הדיון שלו בחידוש האפשרי מתחיל בתנאי: אם האות יתברר כאמיתי.

הזהירות הזאת אינה מרוקנת את התוצאה מתוכן. מדידת מהירויות רדיאליות ישירות מבן-לווייה חיוור שהוא ננס חום קשה. אם תצפיות המשך ישמרו על האות, המערכת תראה ששיטות לחיפוש כוכבי לכת יכולות לרדת עוד שלב אחד בהיררכיה שמימית.

עונת תצפיות נוספת יכולה לעשות יותר מאשר להוסיף נקודות. מודלי בן-הלווייה האחד והשניים מנבאים מהירויות שונות בזמנים עתידיים מסוימים. מדידות שימלאו את הפאזות המסלוליות החסרות יוכלו לבדוק אם הקצב של 171 ימים נמשך, להפחית את ההשפעה של ארבע הנקודות הנמוכות ולגרום לעקומות המתחרות להיפרד.

לעת עתה, התמונה הכנה ביותר אינה ירח חדש התלוי לצד ננס חום. זו ספקטרום, החוזר לילה אחר לילה, ובתוכו הסטה מחזורית קטנה. ייתכן שיש עולם בתוך הקצב הזה. ההישג הוא ללמוד כמה אפשר להסיק ממנו בלי להעמיד פנים שההסקה כבר הושלמה.

בקצרה

אסטרונומים מדדו את המהירות הרדיאלית של הננס החום B, 2722 CD-35 שנצפה ישירות, ב-23 לילות באיכות גבוהה בין אוקטובר 2023 לפברואר 2026. הקווים הספקטראליים שלו מציגים הסטה מחזורית חזקה סביב 171 ימים. המודל המסלולי המועדף כולל בן-לווייה אחד במסלול אקסצנטרי עם מסה מינימלית של כ-0.92 מסות צדק, אך המסה האמיתית אינה ידועה משום שנטיית המסלול אינה ידועה. שני בני-לווייה במסלולים כמעט מעגליים יכולים לחקות את אותו אות כללי, אף שרוב תצורות שני העצמים שנבדקו היו בלתי יציבות דינמית. ארבע אפוקות של מהירות נמוכה משפיעות במיוחד וכיסוי הפאזה המסלולית נשאר מוגבל: התצפיות דוגמות רק חלקים נבחרים מן המחזור האפשרי של 171 ימים במקום לעקוב אחריו ברציפות בכל פאזה. הבדיקות לא זיהו סיבוב, דגימה שנתי, מזג אוויר או תכונות המכשיר שנבדקו כמקור, אך אי אפשר לשלול עקרונית השתנות ארוכת טווח של הננס החום. העצם הבלתי נראה לא צולם ישירות, מודל העצם היחיד מועדף ולא מאושר, ואין כלל מוסכם הקובע שגוף בעל מסה פלנטרית המקיף ננס חום הוא אקסו-ירח.

בדיקה מפוכחת

מה נצפה: עשרים ושלוש מדידות מהירות רדיאלית לילות של B 2722 CD-35 מכילות מחזוריות חזקה של כ-171 ימים. הננס החום עצמו צולם ישירות; בן-הלווייה המוצע לא.

מה המחברים מעדיפים: אם האות מסלולי, בן-לווייה אקסצנטרי אחד עם מסה מינימלית הקרובה למסת צדק מספק את הפרשנות הפשוטה והסבירה דינמית ביותר לנתונים הנוכחיים.

מה נשאר פתוח: שני בני-לווייה יכולים להתאים למהירויות הרדיאליות, אף שהמערכות שנבדקו בדרך כלל אינן יציבות; השתנות ארוכת טווח של הננס החום אינה נשללת עקרונית; זווית הצפייה הלא ידועה משאירה את המסה האמיתית של בן-הלווייה בלתי קבועה.

מה המאמר אינו מבסס: אקסו-ירח מאושר ראשון, לוויין שנצפה ישירות, בדיוק עצם אחד במסלול, מסה אמיתית של 0.92 מסות צדק, או הסתברות של 99.9% שהמודל הפיזיקלי המועדף נכון.

מה יגדיל את הביטחון: מדידות מהירות רדיאלית נוספות שיכסו יותר פאזות מסלוליות, יבדקו אם האות של 171 ימים נמשך וידגמו זמנים שבהם מודלי בן-הלוויה האחד והשניים מנבאים תוצאות שונות.

מקורות

865-869 ,655 Nature star, a of companion substellar the around detected exosatellite Planetary-mass al., et Hoy (2026)

<https://doi.org/10.1038/s41586-026-10751-w>

Nature_Hoy-2026 for code analysis and data reduced al., et Hoy

https://github.com/kevinmhoy/Nature_Hoy-2026