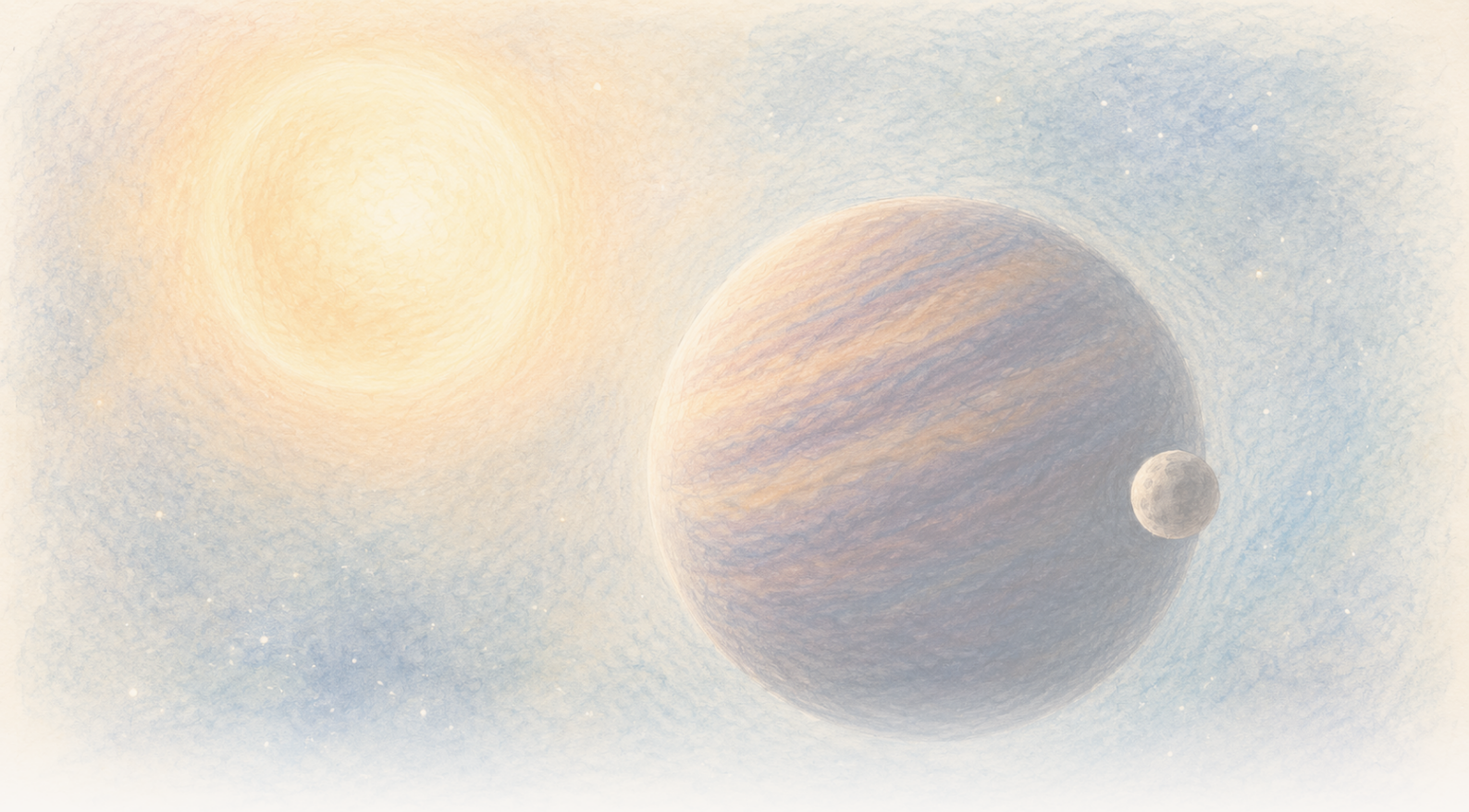


The Clean Paper

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

Brązowy karzeł zdaje się kołysać co 171 dni. Może ciągnąć go jeden ukryty świat, ale dane nadal dopuszczają dwa

Dwadzieścia trzy widma wysokiej jakości ujawniają silne okresowe przesunięcie ruchu CD-35 2722 B. Preferowany model obejmuje jednego ekscentrycznego towarzysza o minimalnej masie zbliżonej do masy Jowisza, lecz model dwóch obiektów może naśladować ten sam sygnał, powolna zmienność brązowego karła pozostaje w zasadzie możliwa, a słowo „egzoksiężyc" nie ma tutaj ustalonej granicy.

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

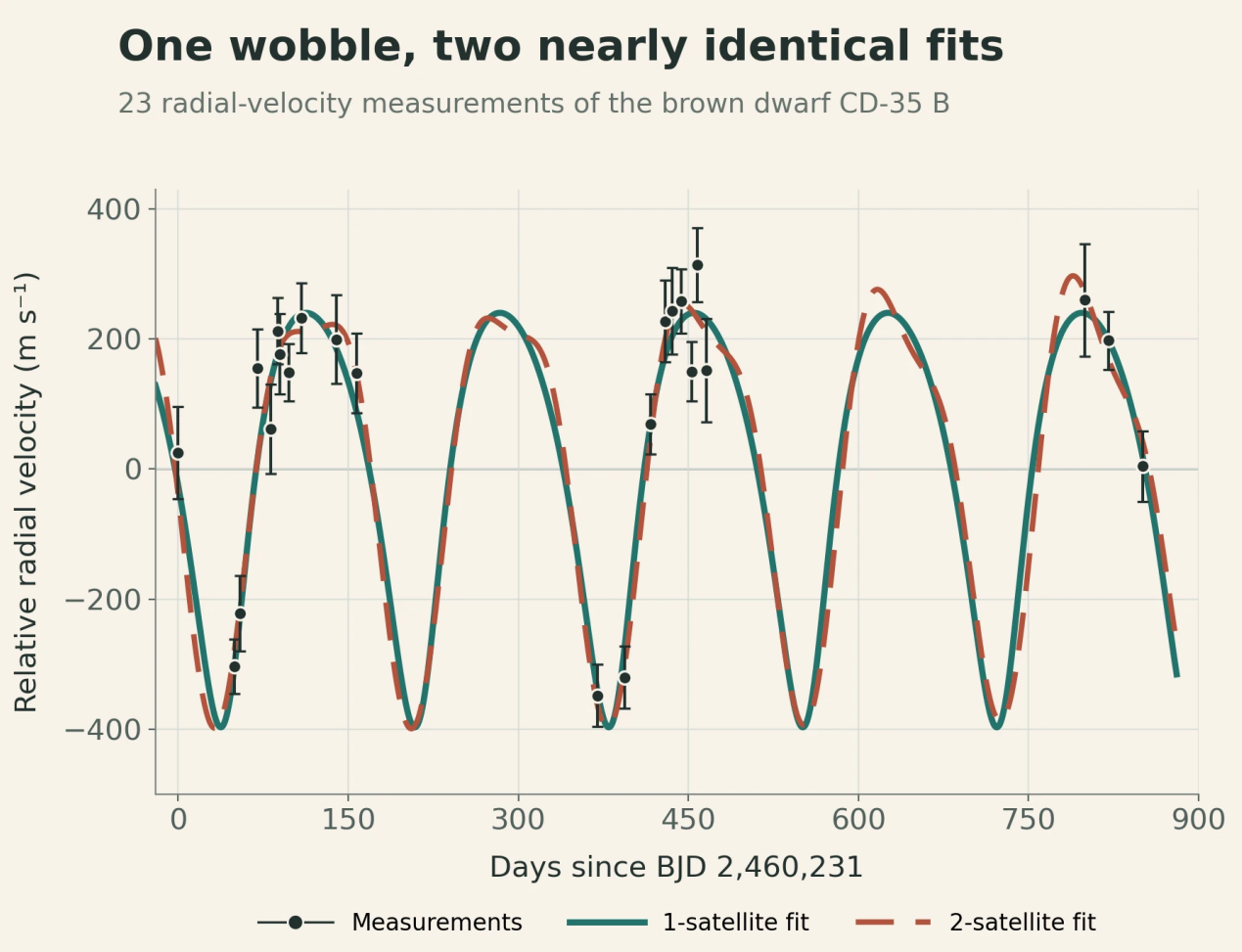
Brązowy karzeł zdaje się kołysać co 171 dni. Może ciągnąć go jeden ukryty świat, ale dane nadal dopuszczają dwa

Astronomowie widzą CD-35 2722 B jako osobny punkt światła, oddzielony od gwiazdy, wokół której krąży. Jest to brązowy karzeł, obiekt z przedziału mas między olbrzymimi planetami a gwiazdami: przy masie około 37 Jowiszów jest cięższy od typowej planety olbrzyma, lecz nie jest zwykłą gwiazdą spalającą wodór. Nie potrafią natomiast zobaczyć mniejszego obiektu, który być może krąży wokół samego brązowego karła. Gdyby został potwierdzony, byłaby to pierwsza zaobserwowana hierarchia, w której satelita krąży wokół większego obiektu podgwiazdowego, a ten z kolei wokół gwiazdy.

Zamiast tego astronomowie widzą rytm. W niektóre noce światło brązowego karła jest nieznacznie przesunięte, gdy obiekt porusza się ku Ziemi. W inne — gdy oddala się od niej. Wzorzec powtarza się mniej więcej co **171 dni**.

Taki ruch tam i z powrotem może powodować niewidoczny towarzysz: gdy dwa obiekty krążą wokół wspólnego środka masy, mniejszy obiega większy, ale większy również wykonuje znacznie mniejszą pętlę. Jeśli ten rytm jest orbitalny, nowa praca w Nature przedstawia jeden obiekt o masie planetarnej jako preferowane wyjaśnienie pętli zmierzonej wokół CD-35 2722 B.

To niezwykła możliwość, nie zdjęcie księżyca. Dwadzieścia trzy noce obserwacyjne wysokiej jakości ujawniają silny sygnał okresowy. Zamiana tego sygnału w świat wymaga modelu, a obecne dane nadal dopuszczają więcej niż jedną architekturę. Nie wykluczają też całkowicie powolnych zmian zachodzących w samym brązowym karle.



Czarne punkty i słupki błędu to 23 nocne pomiary prędkości radialnej. Linie ciągła i przerywana przedstawiają najlepiej dopasowane modele z jednym i dwoma satelitami. Ich niemal całkowite nakładanie się pokazuje, dlaczego dane mogą ujawnić okresowe kołysanie, a jednocześnie nie rozstrzygać architektury układu; żadna z krzywych nie jest bezpośrednim obrazem towarzysza.

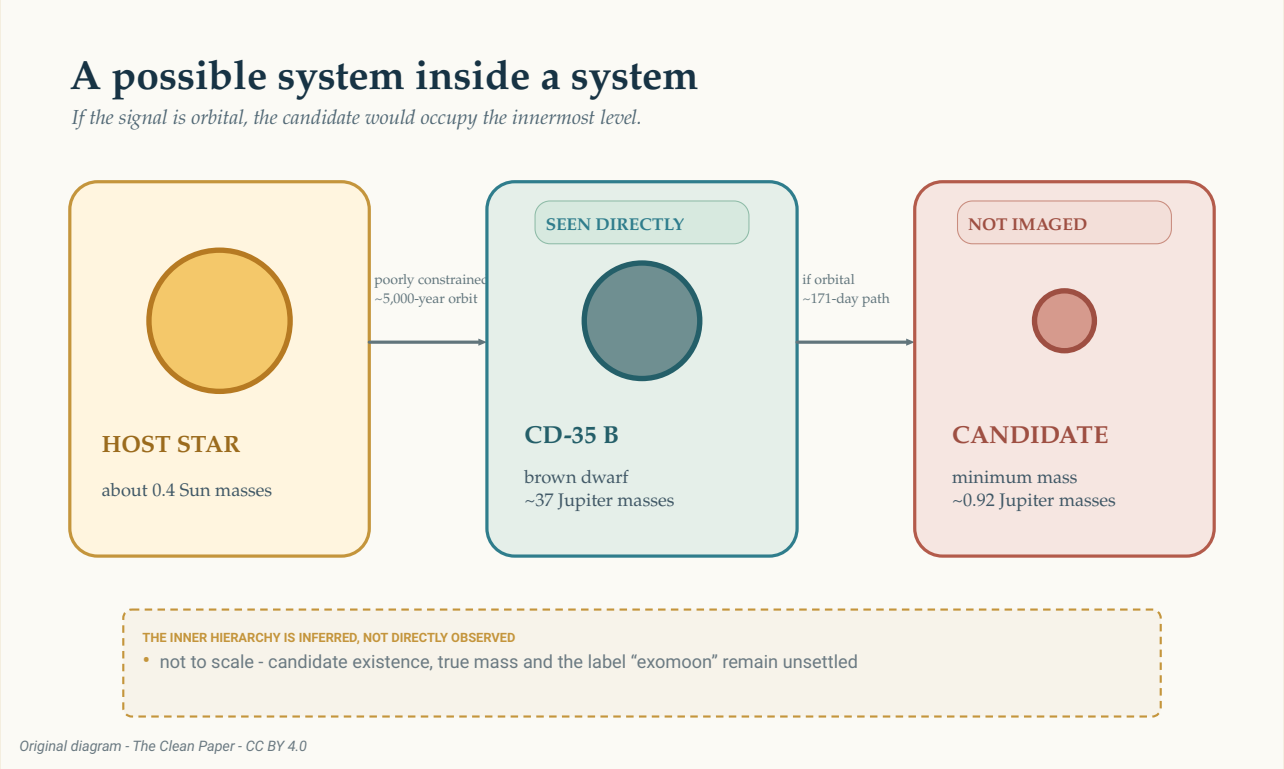
Original chart — The Clean Paper; data from Hoy et al., Nature (2026), Figure 1 source workbook CC BY 4.0

Układ wewnątrz układu

CD-35 2722 B jest **brązowym karłem**: obiektem pomiędzy dobrze znanymi kategoriami. Ma większą masę niż typowa planeta olbrzym, ale zbyt małą, by świecić jak zwykła gwiazda spalająca wodór. W pracy przyjęto oszacowaną masę około **37 Jowiszów**.

Brązowego karła odkryto dzięki obrazowaniu bezpośredniemu, czyli teleskopy rozdzieliły jego światło od światła gwiazdy macierzystej. Na niebie znajduje się około 2,8 sekundy łuku od gwiazdy. Szeroka orbita łącząca tę parę jest słabo poznana, lecz obecne oszacowania sugerują bardzo wydłużoną drogę o okresie około **5000 lat**.

Jeśli sygnał okresowy jest orbitalny, wnioskowana architektura umieszczałaby kandydata o jeden poziom głębiej: gwiazda okrążana przez brązowego karła, którego z kolei okrąża towarzysz o masie planetarnej.



Jeśli sygnał jest orbitalny, kandydat zajmowałby najbardziej wewnętrzny poziom tej możliwej hierarchii. Bezpośrednio zobaczono tylko brązowego karła. Zewnętrzna orbita wokół gwiazdy jest słabo ograniczona, natomiast wewnętrzna ścieżka o okresie około 171 dni jest wnioskowana z mierzonego kołysania brązowego karła. Rozmiary i odległości nie są w skali.

The Clean Paper CC BY 4.0

Taką możliwą hierarchię łatwo narysować. Jej fizyczna rzeczywistość i słownictwo nie są rozstrzygnięte. Czy ciało o masie planetarnej krążące wokół brązowego karła jest księżycem, planetą czy po prostu satelitą? Astronomowie nie mają uznanej reguły, która rozstrzygałaby tę kwestię. Praca używa więc szerszego określenia **egzosatelita**.

Jak 23 noce stały się kołysaniem

Zespół obserwował CD-35 2722 B — zobacz jego wpis w NASA Eyes on Exoplanets — za pomocą CRIRES+, spektrografu wysokiej rozdzielczości na Very Large Telescope Europejskiego Obserwatorium Południowego. Między październikiem 2023 a lutym 2026 roku uzyskano 26 epok obserwacyjnych. Jedna miała zbyt słaby sygnał, a dwie wykonane przy złej pogodzie odrzucono i powtórzono, pozostawiając **23 noce wysokiej jakości**.

Spektrograf rozkłada światło na szczegółowy wzór linii. Gdy źródło porusza się ku Ziemi lub od niej,

linie przesuwają się o bardzo małą wartość. Powtarzane pomiary tego ruchu wzdłuż linii widzenia nazywa się **prędkościami radialnymi**. Nie pokazują ukrytego ciała. Pokazują, jak obserwowany obiekt może poruszać się pod wpływem niewidocznego przyciągania.

Najsilniejsza okresowość w pomiarach leży w pobliżu 170 dni. Przekracza przyjęty w badaniu **próg prawdopodobieństwa fałszywego alarmu 0,1%**. Próg ten pyta, jak często szum — przy założeniach testu — wytworzyłby szczyt periodogramu co najmniej tak silny. Nie oznacza 99,9-procentowego prawdopodobieństwa istnienia satelity i sam w sobie nic nie mówi o tym, czy towarzysz jest jeden, czy jest ich dwóch.

> **Co może ustalić sygnał prędkości radialnej?**
>
> Metoda prędkości radialnych zamienia powtarzane przesunięcia linii widmowych w pomiary ruchu ku obserwatorowi i od niego. Powtarzalny wzorzec można dopasować równaniami orbity, co pozwala wnioskować okres, rozmiar mierzonego kołysania i minimalną masę towarzysza.
> Metoda nie fotografuje jednak bezpośrednio towarzysza. Atmosfera gwiazdy lub obiektu podgwiazdowego może również przesuwać linie widmowe, harmonogram obserwacji może tworzyć mylące rytmy, a różne układy orbit mogą się wzajemnie naśladować. Sam sygnał, jego wyjaśnienie fizyczne i nazwa nadana wnioskowanemu obiektowi to odrębne pytania.

Zanim przyjmie się odpowiedź orbitalną, należy zwrócić uwagę na próbkowanie. Cztery szczególnie niskie pomiary prędkości radialnej mają duży wpływ na wzorzec. Wystąpiły w dwóch parach, przy dobrych zgłoszonych warunkach, a żaden pojedynczy punkt nie tworzył sygnału samodzielnie, gdy autorzy powtarzali analizę, kolejno usuwając po jednym pomiarze. Mimo to zbadano tylko część możliwych faz orbitalnych. Dwadzieścia trzy noce rozłożone na ponad dwa lata nie są tym samym co ciągłe pokrycie.

Autorzy sprawdzili również potencjalny artefakt półroczny. Niedoskonała korekta zmiennego ruchu Ziemi lub profilu instrumentu mogłaby stworzyć fałszywy sygnał roczny, który przez próbkowanie zostałby zaliasowany do połowy ziemskiego roku, czyli **182,5 dnia**. Preferowany okres wynosi **171,11 dnia**, z niepewnością +0,53/-0,36 dnia; autorzy podają, że różni się od 182,5 dnia o około 20 odchyleń standardowych. Nie znaleźli też korelacji ze zmiennym ruchem Ziemi, seeingiem, atmosferyczną parą wodną ani badanymi właściwościami instrumentu. Są to ważne kontrole. Czynią wyjaśnienie orbitalne dostatecznie przekonującym, by je modelować, ale same nie identyfikują obiektu.

Najprostsza odpowiedź orbitalna: jeden towarzysz

W preferowanym modelu jeden obiekt porusza się wokół brązowego karła po orbicie ekscentrycznej, czyli nieco wydłużonej, co 171,11 dnia. Dopasowana orbita ma mimośród około **0,27** i półoś wielką około **0,200 jednostki astronomicznej** — mniej więcej jedną piątą średniej odległości Ziemia–Słońce.

Mierzone kołysanie ma amplitudę około **318 metrów na sekundę**. Na podstawie tego ruchu model daje towarzyszowi minimalną masę około **0,92 masy Jowisza**.

Słowo *minimalna* ma znaczenie. Prędkość radialna mierzy tylko tę część ruchu orbitalnego, która jest skierowana ku nam lub od nas. Jeśli orbitę ogląda się z boku, większość ruchu przypada na ten kierunek. Jeśli jest ustawiona bardziej frontalnie, znaczna część ruchu przebiega w poprzek nieba i do wytworzenia tego samego mierzonego kołysania potrzebny byłby masywniejszy towarzysz.

Astronomowie zapisują wynik jako **m sin(i)**: masa pomnożona przez sinus nieznanego nachylenia orbity, czyli kąta widzenia. Dane ograniczają ten iloczyn, a nie samą prawdziwą masę. Około 0,92 masy Jowisza jest więc dolną granicą, a nie pomiarem dokładnej masy obiektu.

> **Dlaczego kąt widzenia ukrywa masę?**
>
> Wyobraź sobie okrągłą bieżnię oglądaną z boku. Biegacz wielokrotnie porusza się ku tobie i od ciebie, więc tę składową ruchu łatwo zmierzyć. Teraz spójrz na tę samą bieżnię z góry. Biegacz porusza się głównie w poprzek pola widzenia, a prawie wcale ku tobie ani od ciebie.
> Prędkość radialna widzi tylko pierwszą składową. Matematyczny czynnik `sin(i)` opisuje, jaka część ruchu orbitalnego jest skierowana wzdłuż naszej linii widzenia. Dopóki nachylenie `i` nie jest znane, wnioskowana masa pozostaje minimalna.

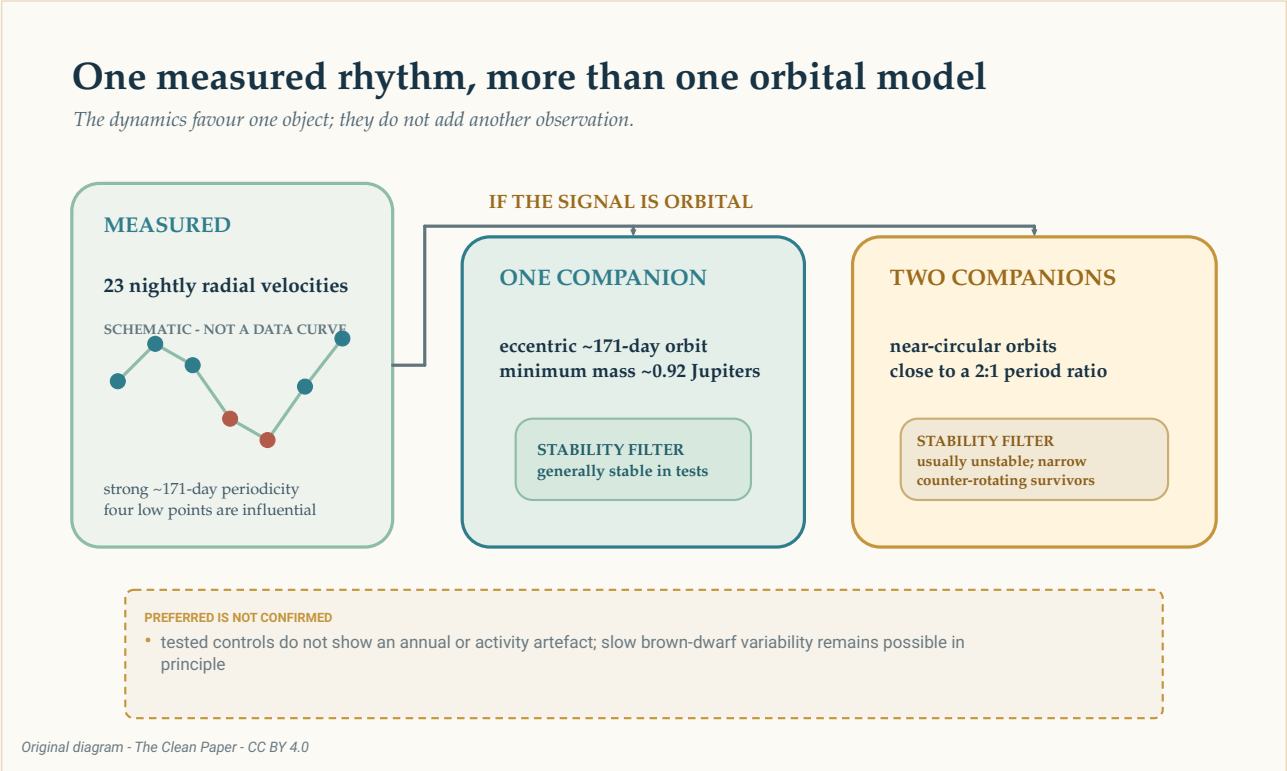
Autorzy zapytali następnie, czy taka orbita mogłaby się utrzymać, zamiast szybko ulec zniszczeniu. Ich testy numeryczne wykazały, że model z jednym towarzyszem jest na ogół stabilny. Czyni go to fizycznie wiarygodną interpretacją sygnału. Nie stanowi jednak drugiego wykrycia.

Niewygodna odpowiedź: dwa obiekty mogą udawać jeden

Ekscentryczny sygnał prędkości radialnej ma znaną niejednoznaczność. W pewnych warunkach dwa obiekty na niemal kołowych orbitach, z których jeden obiega układ mniej więcej dwa razy wolniej od drugiego, mogą tworzyć łączny wzorzec przypominający jeden obiekt na wydłużonej orbicie.

Ta niejednoznaczność pojawia się tutaj. Model dwóch towarzyszy może dopasować obecne pomiary z zewnętrznym sygnałem bliskim 171 dniom i krótszym sygnałem wewnętrznym. Ponieważ czasy obserwacji nie próbkują równomiernie każdej fazy, krótszy sygnał ma kilka aliasów. Ponieważ 23 wybrane noce pozostawiają długie przerwy, różne okresy próbne mogą zawierać różną liczbę niewidocznych cykli między wizytami, a mimo to zgadzać się z tymi samymi pomiarami. Okresy kandydackie w pobliżu 14, 70, 88 i 115 dni są więc alternatywnymi dopasowaniami jednego słabo próbkowanego krótszego sygnału, a nie czterema niezależnie wykrytymi rytmami.

Autorzy odrzucają słabo ograniczone okno 13–17 dni. W tym obszarze dopasowanie nie izoluje jednego przekonującego okresu: wiele blisko położonych rozwiązań poniżej około 20 dni może odtworzyć pomiary o małej częstości, przez co całe okno jest prawdopodobnie artefaktem próbkowania. Spośród pozostałych okien rozwiązanie około 88 dni pasuje lepiej niż alternatywy około 70 i 115 dni, ale nie na tyle, by praca twierdziła, że znany jest drugi okres. W tabelarycznym najlepszym dopasowaniu minimalna masa obiektu zewnętrznego wynosi około 0,87 masy Jowisza, a wewnętrznego około 0,22 masy Jowisza. Liczby te opisują model uznany za mniej prawdopodobny; nie są pomiarami dwóch ustalonych światów.



Jeśli sygnał o okresie około 171 dni jest orbitalny, ten sam ogólny wzorzec prędkości radialnej można przedstawić za pomocą jednego ekscentrycznego towarzysza lub dwóch prawie kołowych towarzyszy o stosunku okresów bliskim dwa do jednego. Testy stabilności przemawiają za interpretacją z jednym obiektem, ale nie zamieniają modelu w obraz ani nie wykluczają każdej formy powolnej zmienności brązowego karła.

The Clean Paper CC BY 4.0

Obliczenia stabilności wyostrzają porównanie. Większość testowanych układów z dwoma towarzyszami wyrzucała jeden obiekt w ciągu kilkuset symulowanych lat. Ocalałe konfiguracje zajmowały wąski i nietypowy obszar, w którym orbity leżały blisko jednej płaszczyzny, lecz biegły w przeciwnych kierunkach. Gwiazda macierzysta wprowadzała kolejne obszary niestabilności.

Jest to powód, by preferować jednego ekscentrycznego towarzysza zamiast testowanych układów podwójnych. Nie dowodzi, że natura wybrała prostszy model. Stabilność filtruje możliwe interpretacje po zmierzeniu prędkości radialnych; nie dodaje kolejnego zaobserwowanego punktu do krzywej.

Jak jedna ekscentryczna orbita może wyglądać jak dwie kołowe?

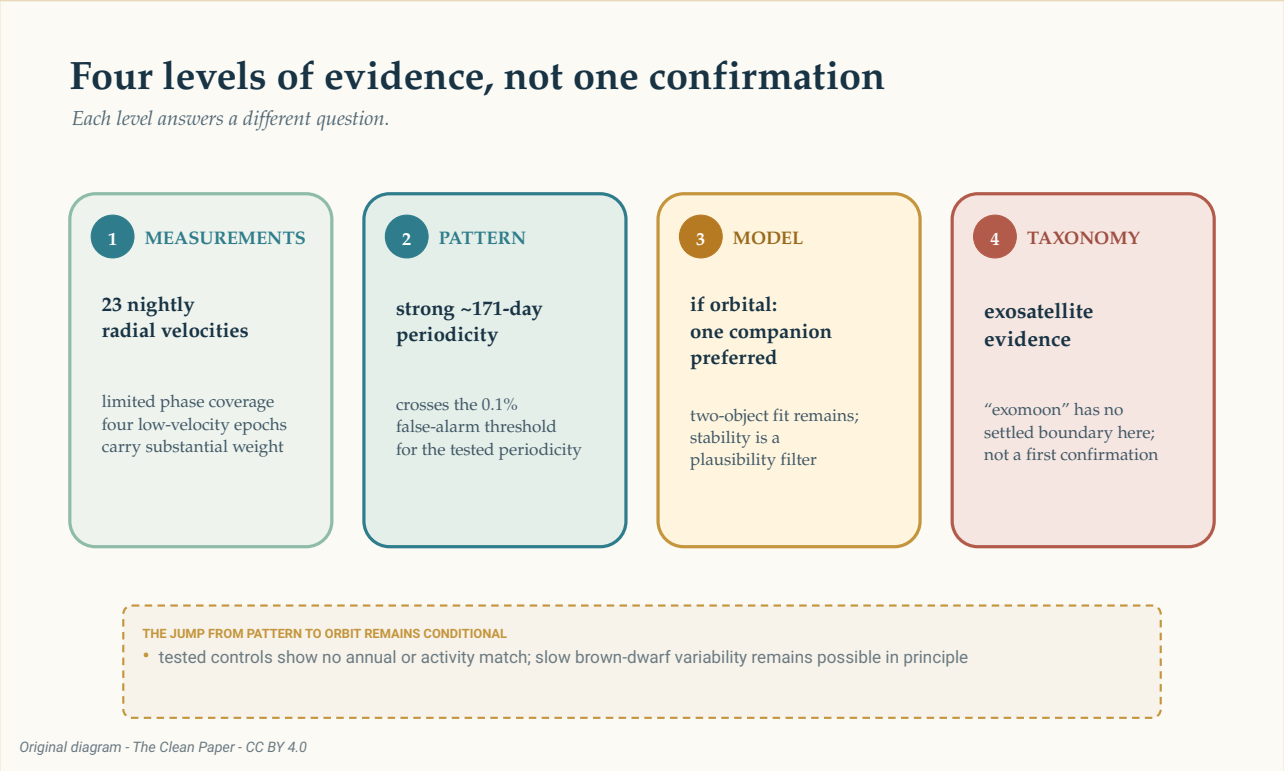
Idealna orbita kołowa wytwarza prostą, powtarzalną falę prędkości radialnej. Orbita ekscentryczna dodaje do tej fali zniekształcenia. Dwie orbity kołowe o okresach bliskich stosunkowi dwa do jednego mogą się złożyć tak, że jeden sygnał dostarcza głównego rytmu, a drugi podobnego zniekształcenia.
Jest to **degeneracja orbitalna**: różne układy fizyczne tworzą podobne pomiary. Więcej obserwacji w chwilach, gdy modele przewidują różne prędkości, może rozstrzygnąć spór. Test dynamiki pomaga, pytając, czy każdy proponowany układ mógłby przetrwać, lecz nie zastąpi tych obserwacji.

Czy rytm może pochodzić od brązowego karła?

Brązowy karzeł nie jest niemą masą testową. Jego atmosfera wiruje, tworzy chmury i może wykazywać aktywność magnetyczną. Zmieniające się wzory powierzchniowe mogą przekształcać linie widmowe i naśladować ruch.

Oszacowany maksymalny okres rotacji CD-35 2722 B wynosi około **0,65 dnia**, znacznie mniej niż 171 dni. Zespół nie odzyskał silnego krótkiego sygnału rotacji ani przekonującego sygnału podobnego do chmur lub granulacji w testowanych modelach aktywności. Zbadano także roczne próbkowanie i wielkości instrumentalne, nie znajdując odpowiednika rytmu 171-dniowego.

Kontrole te zawężają alternatywy, lecz praca nie twierdzi, że wyeliminowano całą zmienność wewnętrzną. W zasadzie nie można wykluczyć długookresowej aktywności magnetycznej lub cyrkulacji atmosferycznej w brązowym karle. Ta pozostała możliwość powinna stać obok modeli orbitalnych, a nie być po nich ukryta.



Dowody przechodzą przez odrębne poziomy: 23 nocne pomiary prędkości radialnej z ograniczonym pokryciem faz, silna okresowość około 171 dni, preferowany model z jednym towarzyszem, jeśli sygnał jest orbitalny, a na końcu nierozstrzygnięta etykieta „egzoksiężyca". Drabina oddziela pomiar, wzorzec statystyczny, interpretację fizyczną i taksonomię; nie jest strzałką potwierdzenia.

The Clean Paper CC BY 4.0

Czy to egzoksiężyc?

W Układzie Słonecznym księżyc krąży wokół planety. CD-35 2722 B jest brązowym karłem, a prawdziwa masa wnioskowanego towarzysza nie jest jeszcze znana. Znane nazwy zaczynają się rozmywać, gdy jeden obiekt leży blisko granicy planeta–brązowy karzeł, a drugi blisko granicy księżyc–planeta.

Praca nie ogłasza pierwszego potwierdzonego egzoksiężyca. Stwierdza, że żadnego egzoksiężyca nie wykryto dotąd z dużą pewnością, przedstawia dowody na **egzosatelitę** o masie planetarnej i nazywa układ krokiem w stronę niebudzącego sporów wykrycia. Dyskusję możliwej nowości rozpoczyna warunkowo: jeśli sygnał okaże się prawdziwy.

Ta ostrożność nie czyni wyniku pustym. Pomiar prędkości radialnych bezpośrednio z bladego brązowego karła będącego towarzyszem jest trudny. Jeśli dalsze obserwacje zachowają sygnał, układ pokaże, że metody poszukiwania planet mogą zejść o kolejny poziom w hierarchii ciał niebieskich.

Kolejny sezon obserwacyjny może zrobić więcej niż tylko dodać punkty. Modele z jednym i dwoma towarzyszami przewidują różne prędkości w konkretnych przyszłych chwilach. Pomiary wypełniające brakujące fazy orbitalne mogą sprawdzić, czy rytm 171-dniowy się utrzymuje, zmniejszyć wpływ czterech niskich punktów i sprawić, że konkurencyjne krzywe zaczną się rozchodzić.

Na razie najuczciwszym obrazem nie jest nowy księżyc wiszący obok brązowego karła. Jest nim widmo, powtarzane noc po nocy, niosące niewielkie okresowe przesunięcie. W tym rytmie może kryć się świat. Osiągnięciem jest nauczenie się, jak wiele można z niego wywnioskować bez udawania, że wnioskowanie jest już zakończone.

Zwięzłe podsumowanie

Astronomowie zmierzyli prędkość radialną bezpośrednio zobrazowanego brązowego karła CD-35 2722 B podczas 23 nocy wysokiej jakości między październikiem 2023 a lutym 2026 roku. Jego linie widmowe wykazują silne okresowe przesunięcie bliskie 171 dniom. Preferowany model orbitalny zawiera jednego ekscentrycznego towarzysza o minimalnej masie około 0,92 masy Jowisza, lecz prawdziwa masa jest nieznana, ponieważ nieznane jest nachylenie orbity. Dwa prawie kołowe towarzysze mogą naśladować ten sam ogólny sygnał, chociaż większość testowanych konfiguracji dwuciałowych była dynamicznie niestabilna. Cztery epoki o niskiej prędkości mają duży wpływ, a pokrycie faz orbitalnych pozostaje ograniczone: obserwacje próbkują jedynie wybrane części możliwego cyklu 171-dniowego, zamiast śledzić go ciągle przez wszystkie fazy. Testy nie wskazały rotacji, rocznego próbkowania, pogody ani badanych właściwości instrumentu jako źródła sygnału, ale w zasadzie nie można wykluczyć długookresowej zmienności brązowego karła. Niewidocznego obiektu nie zobrazowano bezpośrednio, model z jednym obiektem jest preferowany, a nie potwierdzony, i nie istnieje uznana reguła, według której ciało o masie planetarnej krążące wokół brązowego karła jest egzoksiężycem.

Kontrola bez upiększeń

Co zaobserwowano: Dwadzieścia trzy nocne pomiary prędkości radialnej CD-35 2722 B zawierają silną okresowość około 171 dni. Bezpośrednio zobrazowano samego brązowego karła; proponowanego towarzysza nie.

Co autorzy preferują: Jeśli sygnał jest orbitalny, najprostszą dynamicznie wiarygodną interpretacją obecnych danych jest jeden ekscentryczny towarzysz o minimalnej masie zbliżonej do masy Jowisza.

Co pozostaje otwarte: Dwa obiekty mogą dopasować prędkości radialne, choć testowane układy są zazwyczaj niestabilne; długookresowa zmienność brązowego karła nie jest w zasadzie wykluczona; nieznany kąt widzenia pozostawia prawdziwą masę towarzysza nieustaloną.

Czego praca nie ustala: Pierwszego potwierdzonego egzoksiężyca, bezpośrednio zobaczonego satelity, dokładnie jednego obiektu orbitalnego, prawdziwej masy 0,92 masy Jowisza ani 99,9-procentowego prawdopodobieństwa poprawności preferowanego modelu fizycznego.

Co zwiększyłoby pewność: Dalsze pomiary prędkości radialnej obejmujące więcej faz orbitalnych, sprawdzające trwałość sygnału 171-dniowego i wykonywane w chwilach, gdy modele z jednym i dwoma towarzyszami dają różne przewidywania.

Źródła

Hoy et al., Planetary-mass exosatellite detected around the substellar companion of a star, Nature 655, 865-869 (2026)
https://doi.org/10.1038/s41586-026-10751-w

Hoy et al., reduced data and analysis code for Nature_Hoy-2026
https://github.com/kevinmhoy/Nature_Hoy-2026