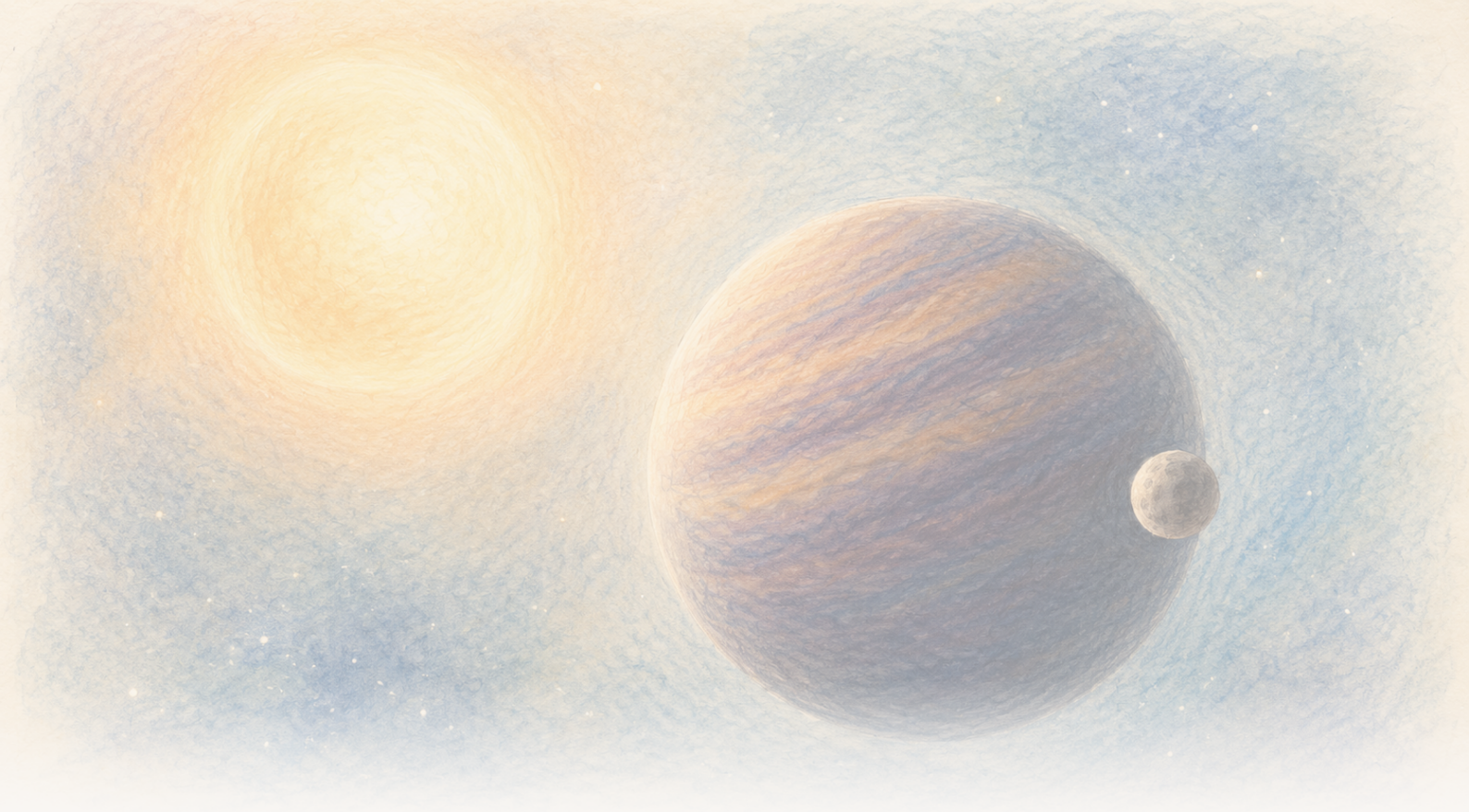


The Clean Paper

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

Rudoji nykštukė, regis, svyruoja kas 171 dieną. Ją gali traukti vienas paslėptas pasaulis, bet duomenys vis dar leidžia ir du

Dvidešimt trys aukštos kokybės spektrai atskleidžia stiprų periodinį CD-35 2722 B judėjimo poslinkį. Pageidaujamas modelis yra vienas ekscentrinis palydovas, kurio minimali masė artima Jupiterio masei, tačiau dviejų objektų modelis gali imituoti tą patį signalą, iš principo tebėra galimas lėtas rudosios nykštukės kintamumas, o žodžio „egzomėnulis“ riba šiuo atveju nėra nusistovėjusi.

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

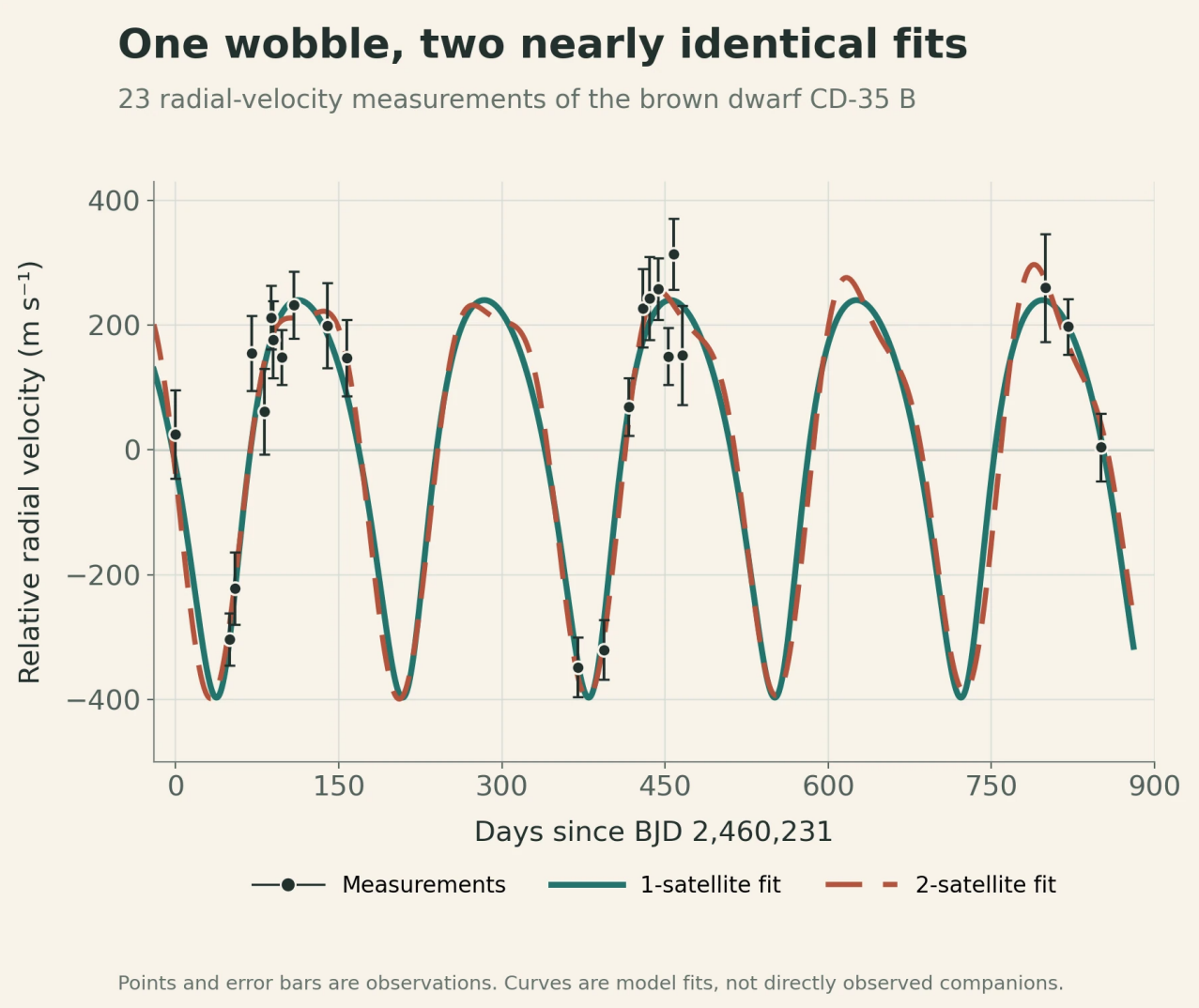
Rudoji nykštukė, regis, svyruoja kas 171 dieną. Ją gali traukti vienas paslėptas pasaulis, bet duomenys vis dar leidžia ir du

Astronomai gali matyti CD-35 2722 B kaip atskirą šviesos tašką, atsiskyrusį nuo žvaigždės, aplink kurią ji skrieja. Tai rudoji nykštukė — objektas masės diapazone tarp milžiniškų planetų ir žvaigždžių: maždaug 37 Jupiterių masių ji yra masyvesnė už tipinę milžinišką planetą, bet nėra įprasta vandenilį deginanti žvaigždė. Mažesnio objekto, kuris galbūt skrieja aplink pačią rudąją nykštukę, jie nemato. Jei toks objektas būtų patvirtintas, tai būtų pirmoji stebėta hierarchija, kur palydovas skrieja aplink didesnį subžvaigždinį objektą, kuris pats skrieja aplink žvaigždę.

Vietoj to matomas ritmas. Vienomis naktimis rudosios nykštukės šviesa nežymiai pasislenka, kai ji juda Žemės link. Kitomis — kai tolsta. Šis raštas kartojasi maždaug kas **171 dieną**.

Tokį pirmyn-atgal judėjimą gali sukelti nematomas palydovas: dviem objektams skriejant aplink bendrą masės centrą, mažesnis objektas juda aplink didesnį, tačiau ir didesnis pats atlieka daug mažesnę orbitinę kilpą. Jei šis ritmas yra orbitinis, naujame Nature straipsnyje vienas planetinės masės objektas pateikiamas kaip pageidautinas paaiškinimas CD-35 2722 B išmatuotam svyravimui.

Tai nepaprasta galimybė, bet ne mėnulio nuotrauka. Dvidešimt trys aukštos kokybės stebėjimo naktys atskleidžia stiprų periodinį signalą. Norint iš signalo padaryti pasaulį, reikia modelio, o dabartiniai duomenys vis dar leidžia daugiau nei vieną sistemos architektūrą. Jie taip pat nevisiškai atmeta lėtus pačios rudosios nykštukės pokyčius.



Juodi taškai ir paklaidų juostos yra 23 naktiniai radialinio greičio matavimai. Ištisinė ir punktyrinė kreivės rodo geriausiai tinkančius vieno ir dviejų palydovų modelius. Beveik sutampančios kreivės parodo, kodėl duomenys gali atskleisti periodinį svyravimą, bet dar negali nustatyti sistemos architektūros; nė viena kreivė nėra tiesioginis palydovo vaizdas.

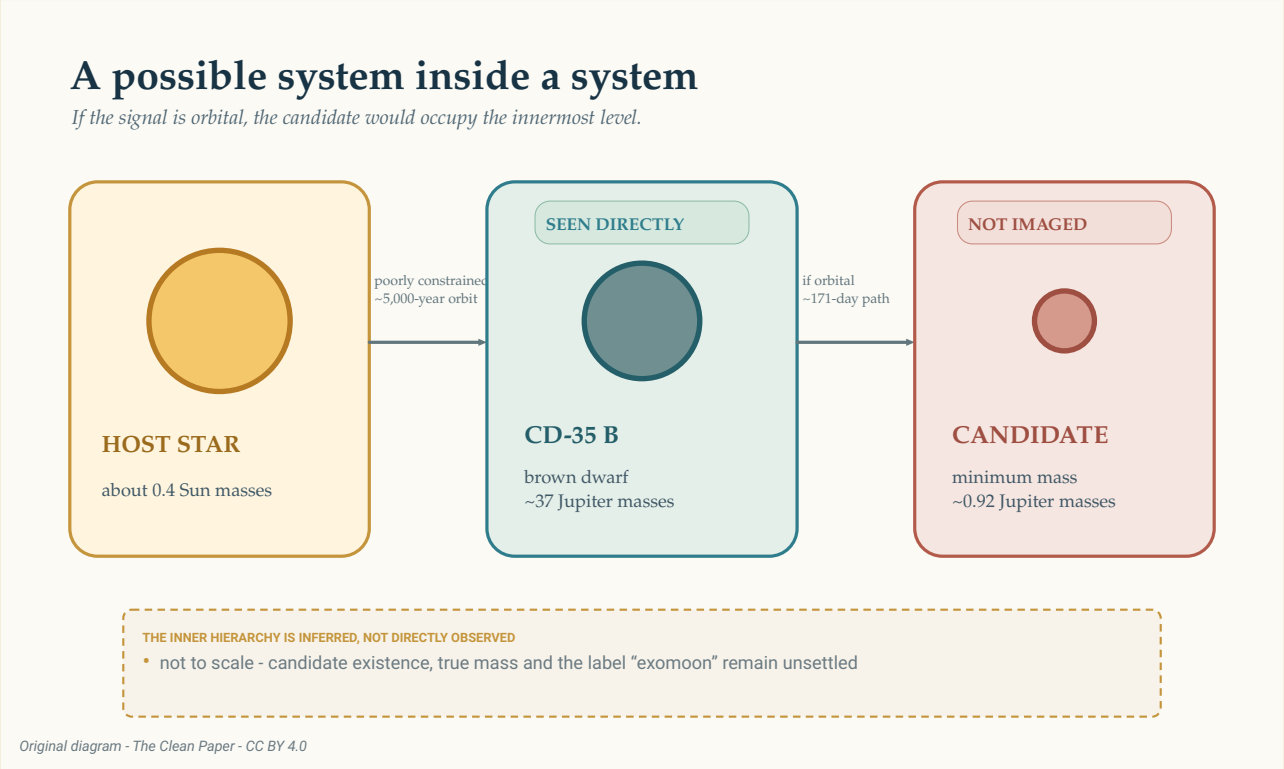
Original chart — The Clean Paper; data from Hoy et al., Nature (2026), Figure 1 source workbook CC BY 4.0

Sistema sistemoje

CD-35 2722 B yra **rudoji nykštukė** — objektas tarp įprastų kategorijų. Ji masyvesnė už tipinę milžinišką planetą, bet nepakankamai masyvi, kad šviestų kaip normali vandenilį deginanti žvaigždė. Straipsnyje naudojamas maždaug **37 Jupiterių** masės įvertis.

Rudoji nykštukė buvo atrasta tiesioginio vaizdinimo būdu, t. y. teleskopai išskyrė jos šviesą nuo pagrindinės žvaigždės šviesos. Danguje ji matoma maždaug 2,8 lanko sekundės atstumu nuo žvaigždės. Plati porą jungianti orbita menkai žinoma, tačiau dabartiniai įverčiai rodo labai ištęstą trajektoriją, kurios periodas maždaug **5 000 metų**.

Jei periodinis signalas orbitinis, numanoma architektūra kandidatą patalpintų dar vienu lygiu giliau: žvaigždė, aplink kurią skrieja rudoji nykštukė, o aplink rudąją nykštukę — planetinės masės palydovas.



Jei signalas orbitinis, kandidatas užimtų vidinį šios galimos hierarchijos lygį. Tiesiogiai matyta tik rudoji nykštukė. Išorinė orbita aplink žvaigždę menkai apribota, o maždaug 171 dienos vidinis kelias išvedamas iš išmatuoto rudosios nykštukės svyravimo. Dydžiai ir atstumai nėra mastelio.

The Clean Paper CC BY 4.0

Tokią galimą hierarchiją lengva nupiešti. Jos fizinė tikrovė ir terminologija dar nenusistovėjusi. Ar planetinės masės kūnas, skriejantis aplink rudąją nykštukę, yra mėnulis, planeta ar tiesiog palydovas? Astronomijoje nėra priimtos taisyklės, kuri tai galutinai nuspręstų. Todėl straipsnyje vartojamas platesnis žodis **egzopalydovas**.

Kaip 23 naktys virto svyravimu

Komanda stebėjo CD-35 2722 B (žr. jos NASA Eyes on Exoplanets įrašą) naudodama CRIRES+ — didelės skiriamosios gebos spektrografą Europos pietų observatorijos Very Large Telescope. Nuo 2023 m. spalio iki 2026 m. vasario jie surinko 26 stebėjimo epochas. Vienos signalo buvo per mažai, o dvi, atliktos blogu oru, buvo atmestos ir pakartotos, todėl liko **23 aukštos kokybės naktys**.

Spektrografas išskaido šviesą į detalų linijų raštą. Kai šaltinis juda Žemės link ar nuo jos, šios linijos labai nežymiai pasislenka. Pakartotiniai tokio judėjimo regėjimo linija matavimai vadinami **radialiniais greičiais**. Jie nerodo paslėpto kūno. Jie rodo, kaip stebimas kūnas gali judėti veikiamas

nematomos traukos.

Stipriausias matavimų periodiškumas yra apie 170 dienų. Jis viršija tyrimo **0,1% klaidingo pavojaus tikimybės slenkstį**. Šis slenkstis klausia, kaip dažnai triukšmas, esant testo prielaidoms, sukurtų bent tokio stiprumo periodogramos piką. Tai nėra 99,9% tikimybė, kad palydovas egzistuoja, ir savaime nieko nepasako, ar palydovas vienas, ar jų du.

> **Ką gali nustatyti radialinio greičio signalas?**
>
> Radialinis greitis pakartotinius spektro linijų poslinkius paverčia judėjimo stebėtojo link ir nuo jo matavimais. Pasikartojantis raštas gali būti pritaikytas orbitos lygtims, leidžiant įvertinti periodą, išmatuoto svyravimo dydį ir minimalią palydovo masę.
> Tačiau šis metodas tiesiogiai nefotografuoja palydovo. Žvaigždės ar subžvaigždinio objekto atmosfera taip pat gali stumdyti spektro linijas, stebėjimų grafikas gali sukurti klaidinančius ritmus, o skirtingos orbitinės konfigūracijos gali viena kitą imituoti. Signalas, jo fizinis paaiškinimas ir numanomam objektui suteikiamas pavadinimas yra atskiri klausimai.

Prieš priimant orbitinį paaiškinimą, verta pažvelgti į duomenų atranką. Keturi ypač maži radialinio greičio matavimai turi didelę įtaką bendram raštui. Jie įvyko dviem poromis, nurodytomis geromis stebėjimo sąlygomis, ir nė vienas atskiras taškas vienas pats nesukūrė signalo, kai autoriai pakartojo analizę paeiliui pašalindami po vieną matavimą. Vis dėlto išmatuota tik dalis galimų orbitos fazių. Dvidešimt trys naktys per daugiau nei dvejus metus nėra tas pats, kas nenutrūkstamas stebėjimas.

Autoriai taip pat tikrino galimą pusmečio artefaktą. Netobula Žemės kintančio judėjimo ar instrumento profilio korekcija galėtų sukurti klaidingą metinį signalą, kurį atranka peraliasintų į pusę Žemės metų, arba **182,5 dienos**. Jų pageidautinas periodas yra **171,11 dienos**, su +0,53/-0,36 dienos paklaida; autoriai nurodo, kad tai maždaug 20 standartinių nuokrypių nuo 182,5 dienos. Jie taip pat nerado koreliacijos su Žemės kintančiu judėjimu, matomumu, atmosferos vandens garais ar tirtomis instrumento savybėmis. Tai svarbios kontrolės. Jos daro orbitinį paaiškinimą pakankamai įtikinamą modeliuoti, tačiau pačios objekto neidentifikuoja.

Paprasčiausias orbitinis atsakymas: vienas palydovas

Pageidaujamame modelyje vienas objektas kas 171,11 dienos juda ekscentrine, arba kiek ištęsta, orbita aplink rudąją nykštukę. Pritaikytos orbitos ekscentricitetas yra apie **0,27**, o didžioji pusašė — apie **0,200 astronominio vieneto**, maždaug penktadalis vidutinio Žemės ir Saulės atstumo.

Išmatuoto svyravimo amplitudė yra apie **318 metrų per sekundę**. Iš šio judėjimo modelis palydovui suteikia minimalią maždaug **0,92 Jupiterio masės** reikšmę.

Žodis *minimali* svarbus. Radialinis greitis matuoja tik tą orbitinio judėjimo dalį, kuri nukreipta mūsų link ar nuo mūsų. Jei orbita matoma iš krašto, dauguma jos judėjimo projektuojasi į šią kryptį. Jei ji matoma labiau „iš viršaus“, didelė judėjimo dalis vyksta skersai dangaus, todėl tam pačiam išmatuotam svyravimui sukelti reikėtų masyvesnio palydovo.

Astronomai rezultatą užrašo kaip **m sin(i)**: masė padauginta iš nežinomo orbitos posvyrio, arba stebėjimo kampo, sinuso. Duomenys apriboja šią sandaugą, o ne tikrąją masę atskirai. Todėl maždaug 0,92 Jupiterio masės yra apatinė riba, o ne tikslios objekto masės matavimas.

> **Kodėl stebėjimo kampas paslepia masę?**
>
> Įsivaizduokite, kad apvalų bėgimo taką stebite iš šono. Bėgikas nuolat juda jūsų link ir nuo jūsų, todėl šią judėjimo dalį lengva išmatuoti. Dabar pažvelkite į tą patį taką iš viršaus. Bėgikas daugiausia juda skersai jūsų vaizdo ir beveik nejuda link jūsų ar nuo jūsų.
> Radialinis greitis mato tik pirmąją komponentę. Matematinis daugiklis `sin(i)` nusako, kiek orbitinio judėjimo nukreipta išilgai mūsų regėjimo linijos. Kol posvyris `i` nežinomas, išvesta masė lieka minimali.

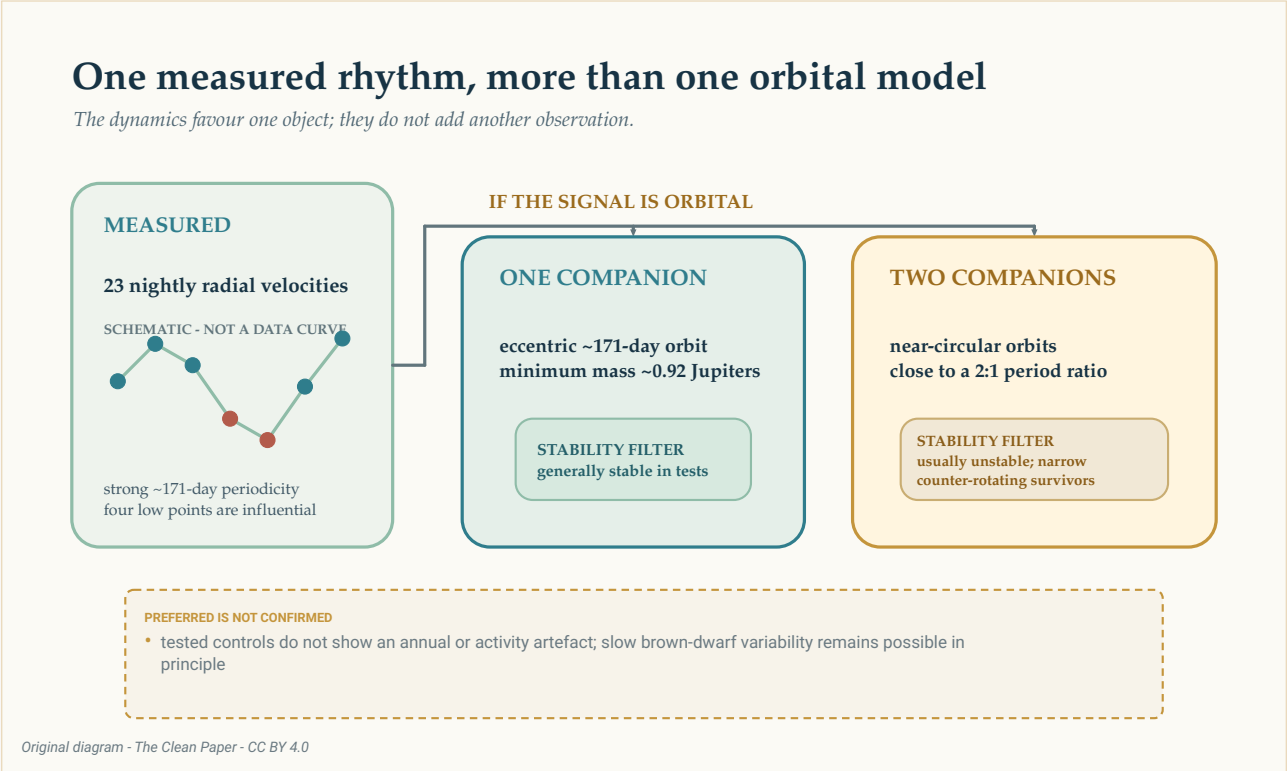
Tada autoriai klausė, ar tokia orbita galėtų išlikti, o ne greitai save suardyti. Jų skaitmeniniai bandymai parodė, kad vieno palydovo modelis apskritai stabilus. Tai daro jį fiziškai tikėtina signalo interpretacija. Tačiau tai nėra antras nepriklausomas aptikimas.

Nepatogus atsakymas: du palydovai gali imituoti vieną

Ekscentrinis radialinio greičio signalas turi žinomą dviprasmybę. Tam tikromis sąlygomis du objektai beveik apskritomis orbitomis, kurių vieno periodas maždaug dvigubai ilgesnis už kito, gali sukurti bendrą raštą, panašų į vieną objektą ištęstoje orbitoje.

Ši dviprasmybė pasirodo ir čia. Dviejų palydovų modelis gali atitikti dabartinius matavimus su išoriniu maždaug 171 dienos signalu ir trumpesnio periodo vidiniu signalu. Kadangi stebėjimų laikai nevienodai apima visas fazes, trumpesnis signalas turi kelis aliasus. Kadangi 23 atrinktos naktys palieka ilgų tarpų, skirtingi bandomieji periodai gali suskaičiuoti skirtingą nematytų ciklų skaičių tarp vizitų ir vis tiek sutapti su tais pačiais matavimais. Todėl kandidatiniai periodai apie 14, 70, 88 ir 115 dienų yra alternatyvūs vieno menkai imtuoto trumpesnio signalo pritaikymai, o ne keturi nepriklausomai aptikti ritmai.

Autoriai atmeta menkai apribotą 13–17 dienų langą. Šiame intervale pritaikymas neišskiria vieno įtikinamo periodo: daug glaudžiai išsidėsčiusių sprendinių trumpiau nei apie 20 dienų gali atkurti mažo dažnio matavimus, todėl visas langas greičiausiai yra atrankos artefaktas. Tarp likusių langų maždaug 88 dienų sprendinys tinka geriau nei maždaug 70 ir 115 dienų alternatyvos, tačiau ne tiek geriau, kad straipsnis galėtų teigti žinantis antrą periodą. Lentelėje pateiktame geriausiame pritaikyme išorinio objekto minimali masė yra apie 0,87 Jupiterio masės, o vidinio — apie 0,22 Jupiterio masės. Šie skaičiai aprašo mažiau pageidaujamą modelį; tai nėra dviejų nustatytų pasaulių masių matavimai.



Jei maždaug 171 dienos signalas orbitinis, tą patį bendrą radialinio greičio raštą galima pavaizduoti vienu ekscentriniu palydovu arba dviem beveik apskritais palydovais, kurių periodų santykis artimas dviem su vienu. Stabilumo bandymai palaiko vieno objekto interpretaciją, tačiau jie nepaverčia modelio vaizdu ir neatmeta visų lėtos rudosios nykštukės kintamumo formų.

The Clean Paper CC BY 4.0

Stabilumo skaičiavimai palyginimą dar labiau paryškina. Dauguma tirtų dviejų palydovų konfigūracijų per kelis šimtus simuliuotų metų išmetė vieną objektą iš sistemos. Išlikusios konfigūracijos užėmė siaurą ir neįprastą sritį, kur orbitos buvo beveik toje pačioje plokštumoje, bet judėjo priešingomis kryptimis. Pagrindinė žvaigždė pridėjo dar daugiau nestabilių sričių.

Tai priežastis teikti pirmenybę vienam ekscentriniam palydovui, o ne tirtiems dviejų palydovų variantams. Tačiau tai neįrodo, kad gamta pasirinko paprastesnį modelį. Stabilumas filtruoja galimas interpretacijas po radialinio greičio matavimų; jis neprideda dar vieno stebėto taško prie kreivės.

Kaip viena ekscentrinė orbita gali atrodyti kaip dvi apskritos?

Idealiai apskrita orbita sukuria paprastą pasikartojančią radialinio greičio bangą. Ekscentrinė orbita į šią bangą prideda iškraipymų. Dvi apskritos orbitos, kurių periodai artimi santykiui du su vienu, gali susidėti taip, kad vienas signalas suteikia pagrindinį ritmą, o kitas — panašų iškraipymą.

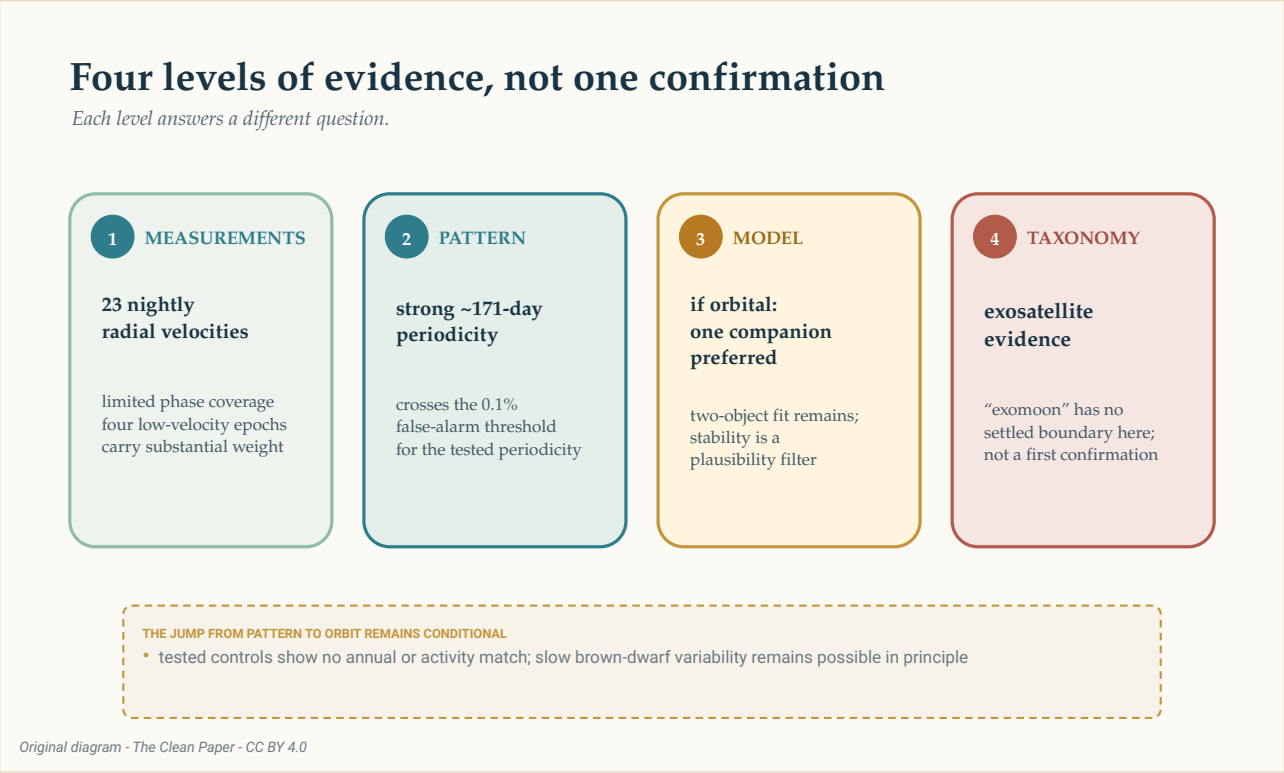
Tai **orbitinė degeneracija**: skirtingos fizinės sistemos sukuria panašius matavimus. Daugiau stebėjimų tuo metu, kai modeliai numato skirtingus greičius, gali išspręsti dviprasmybę. Dinamikos testas padeda paklausdamas, ar kiekviena siūloma sistema galėtų išlikti, bet jis negali pakeisti šių stebėjimų.

Ar ritmas gali kilti iš pačios rudosios nykštukės?

Rudoji nykštukė nėra tylus bandomasis kūnas. Jos atmosfera sukasi, formuoja debesis ir gali turėti magnetinį aktyvumą. Kintantys paviršiaus raštai gali pakeisti spektro linijų formą ir imituoti judėjimą.

Apskaičiuotas maksimalus CD-35 2722 B sukimosi periodas yra apie **0,65 dienos**, gerokai trumpesnis nei 171 diena. Komanda nerado stipraus trumpo sukimosi signalo ar įtikinamo debesų ar granuliacijos pobūdžio signalo aktyvumo modeliuose, kuriuos išbandė. Jie taip pat tikrino metinę duomenų atranką ir instrumento dydžius, bet nerado atitikmens 171 dienos ritmui.

Šie patikrinimai susiaurina alternatyvas, tačiau straipsnis neteigia pašalinęs visą vidinį kintamumą. Iš principo negalima atmesti ilgalaikio magnetinio aktyvumo ar atmosferos cirkuliacijos rudojoje nykštukėje. Ši likusi galimybė turi būti minima šalia orbitinių modelių, o ne paslepiama po jų.



Įrodymai kyla atskirais lygiais: 23 naktiniai radialinio greičio matavimai su ribotu fazių padengimu, stiprus maždaug 171 dienos periodiškumas, pageidaujamas vieno palydovo modelis, jei signalas orbitinis, ir galiausiai nenusistovėjusi „egzomėnulio“ etiketė. Kopėčios atskiria matavimą, statistinį raštą, fizinę interpretaciją ir taksonomiją; tai nėra patvirtinimo rodyklė.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ar tai egzomėnulis?

Saulės sistemoje mėnulis skrieja aplink planetą. CD-35 2722 B yra rudoji nykštukė, o numanomo palydovo tikroji masė dar nežinoma. Įprasti pavadinimai pradeda strigti, kai vienas objektas yra arti planetos ir rudosios nykštukės ribos, o kitas — arti mėnulio ir planetos ribos.

Straipsnis neteigia atradęs pirmą patvirtintą egzomėnulį. Jame sakoma, kad iki šiol nė vienas egzomėnulis nebuvo patikimai aptiktas, pateikiami planetinės masės **egzopalydovo** įrodymai ir sistema vadinama žingsniu link neginčijamo aptikimo. Diskusija apie galimą naujumą prasideda sąlygiškai: jei paaiškės, kad signalas tikras.

Toks atsargumas nereiškia, kad rezultatas tuščias. Tiesiogiai išmatuoti radialinius greičius iš blankios rudosios nykštukės palydovės yra sunku. Jei tolesni stebėjimai išsaugos signalą, sistema parodytų, kad planetų paieškos metodai gali pasiekti dar vieną dangaus hierarchijos lygį.

Dar vienas stebėjimo sezonas gali ne tik pridėti taškų. Vieno ir dviejų palydovų modeliai tam tikrais būsimais laikais numato skirtingus greičius. Matavimai, užpildantys trūkstamas orbitos fazes, gali patikrinti, ar 171 dienos ritmas išlieka, sumažinti keturių mažų reikšmių įtaką ir priversti konkuruojančias kreives išsiskirti.

Kol kas sąžiningiausias vaizdas nėra naujas mėnulis, kabantis šalia rudosios nykštukės. Tai spektras, kartojamas naktį po nakties, su nedideliu periodiniu poslinkiu. Tame ritme gali slypėti pasaulis. Pasiekimas yra išmokti, kiek galima iš jo išvesti neapsimetant, kad išvada jau baigta.

Trumpa santrauka

Astronomai 23 aukštos kokybės naktimis nuo 2023 m. spalio iki 2026 m. vasario matavo tiesiogiai vaizdintos rudosios nykštukės CD-35 2722 B radialinį greitį. Jos spektro linijos rodo stiprų periodinį poslinkį maždaug kas 171 dieną. Pageidaujamame orbitiniame modelyje yra vienas ekscentrinis palydovas, kurio minimali masė apie 0,92 Jupiterio masės, tačiau tikroji masė nežinoma, nes nežinomas orbitos posvyris. Du beveik apskriti palydovai gali imituoti tą patį bendrą signalą, nors dauguma tirtų dviejų objektų konfigūracijų buvo dinamiškai nestabilios. Keturi mažo greičio stebėjimai turi didelę įtaką, o orbitos fazių padengimas ribotas: duomenys apima tik pasirinktas galimo 171 dienos ciklo dalis, o ne nenutrūkstamai seka visas fazes. Patikrinimai nenustatė sukimosi, metinės atrankos, oro ar tirtų instrumento savybių kaip signalo šaltinio, tačiau iš principo negalima atmesti ilgalaikio rudosios nykštukės kintamumo. Nematomas objektas nebuvo tiesiogiai vaizdintas, vieno objekto modelis yra pageidaujamas, o ne patvirtintas, ir nėra nusistovėjusios taisyklės, pagal kurią planetinės masės kūnas, skriejantis aplink rudąją nykštukę, automatiškai būtų egzomėnulis.

Be pagražinimų

Kas buvo stebėta: Dvidešimt trys naktiniai CD-35 2722 B radialinio greičio matavimai turi stiprų maždaug 171 dienos periodiškumą. Pati rudoji nykštukė tiesiogiai vaizdinta; siūlomas palydovas — ne.

Kam autoriai teikia pirmenybę: Jei signalas orbitinis, vienas ekscentrinis palydovas, kurio minimali masė arti Jupiterio, yra paprasčiausia dinamiškai tikėtina dabartinių duomenų interpretacija.

Kas lieka atvira: Du palydovai gali atitikti radialinius greičius, nors išbandytos sistemos dažniausiai nestabilios; ilgalaikis rudosios nykštukės kintamumas iš principo neatmestas; o nežinomas stebėjimo kampas neleidžia nustatyti tikros palydovo masės.

Ko straipsnis nenustato: Pirmo patvirtinto egzomėnulio; tiesiogiai matyto palydovo; tiksliai vieno orbitinio objekto; tikros 0,92 Jupiterio masės; ar 99,9% tikimybės, kad pageidaujamas fizinis modelis teisingas.

Kas padidintų pasitikėjimą: Tęstiniai radialinio greičio matavimai, apimantys daugiau orbitos fazių, tikrinantys, ar 171 dienos signalas išlieka, ir atliekami tais laikais, kai vieno ir dviejų palydovų modeliai pateikia skirtingas prognozes.

Šaltiniai

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