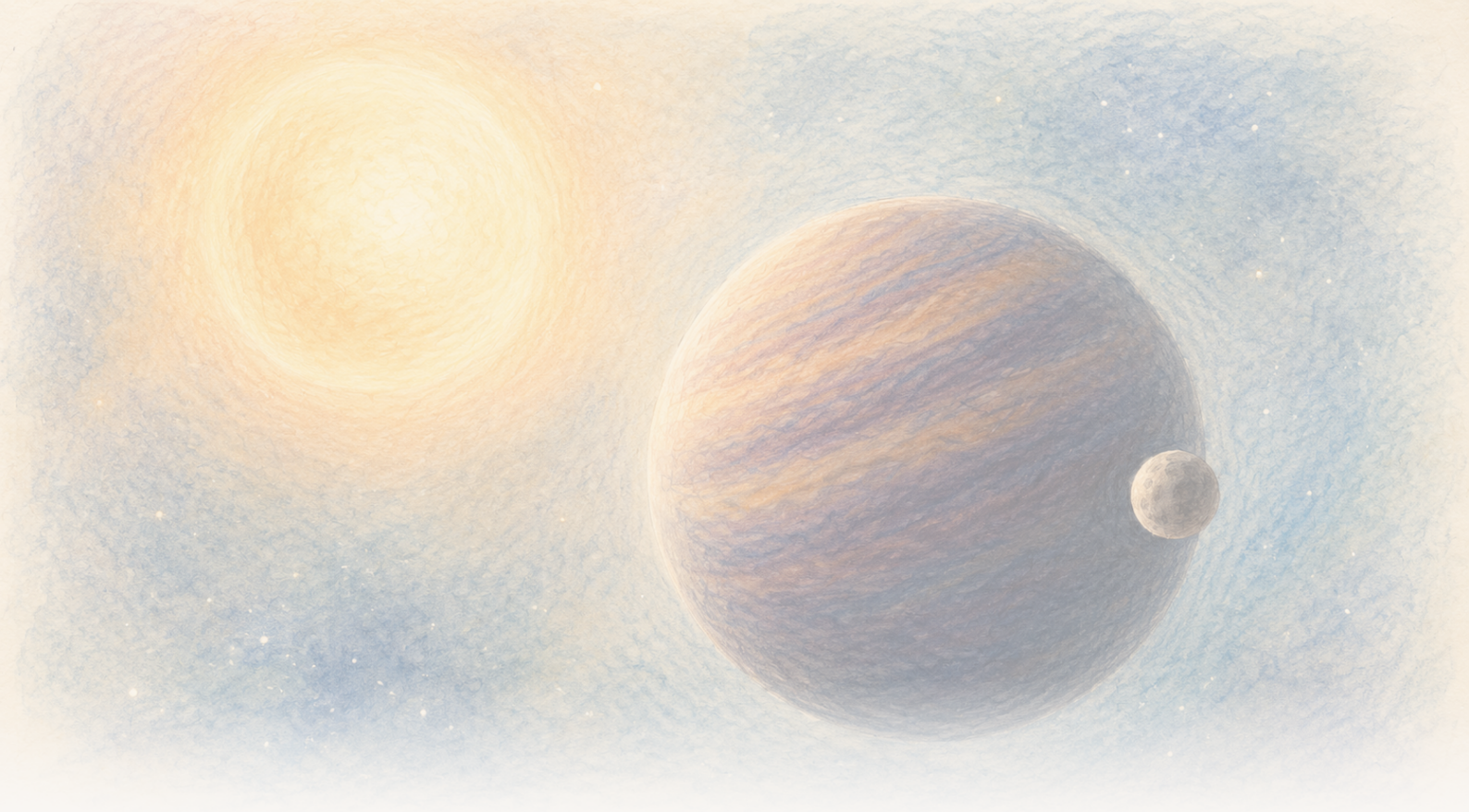


The Clean Paper

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

Sebuah katai cokelat tampak bergoyang setiap 171 hari. Satu dunia tersembunyi mungkin menariknya, tetapi data masih mengizinkan dua

Dua puluh tiga spektrum berkualitas tinggi mengungkap pergeseran periodik kuat dalam gerak CD-35 2722 B. Model yang lebih disukai adalah satu pendamping eksentrik dengan massa minimum dekat Jupiter, tetapi model dua objek dapat meniru sinyal yang sama, variabilitas lambat katai cokelat tetap mungkin pada prinsipnya, dan istilah "exomoon" tidak memiliki batas yang mapan di sini.

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

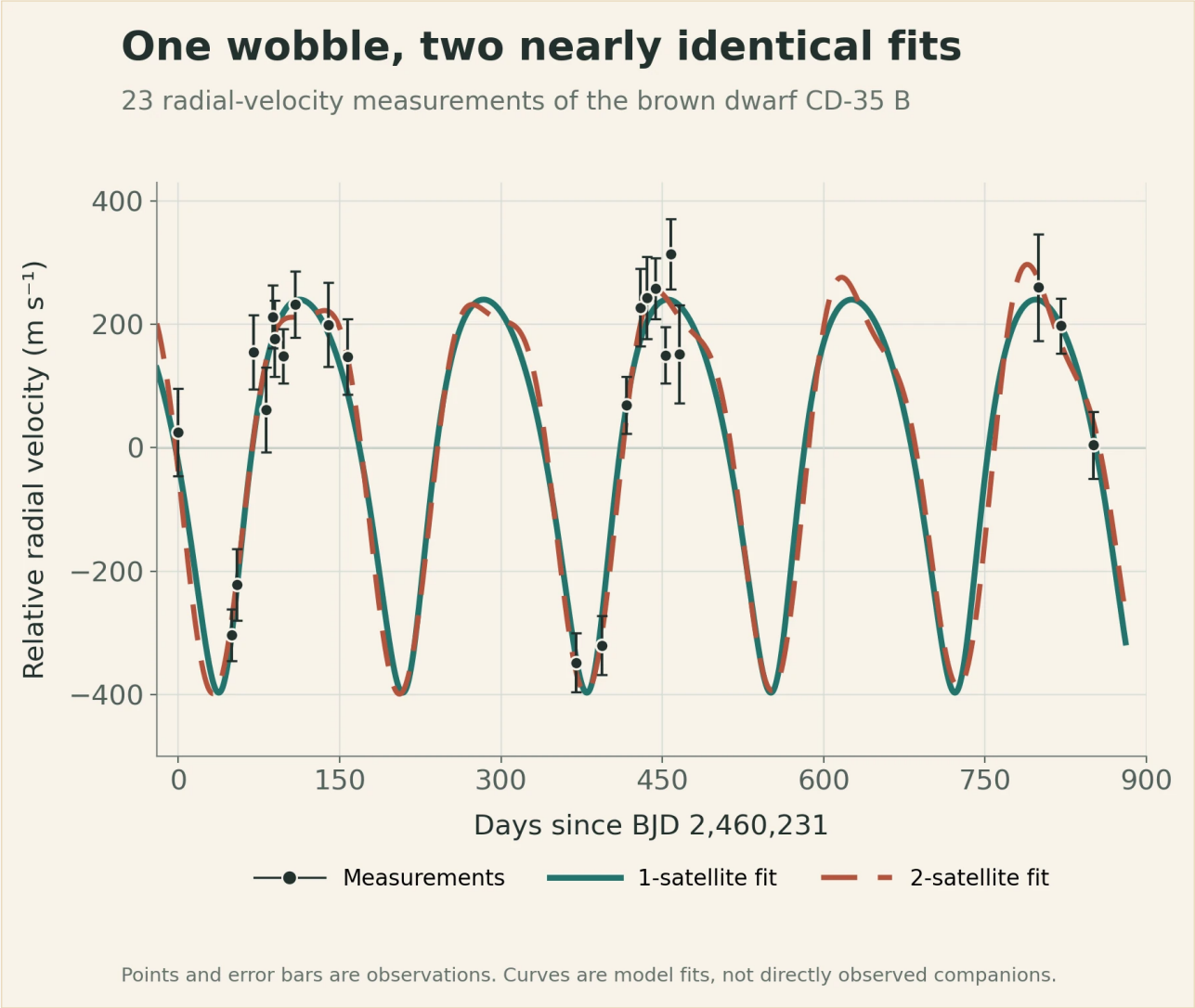
Sebuah katai cokelat tampak bergoyang setiap 171 hari. Satu dunia tersembunyi mungkin menariknya, tetapi data masih mengizinkan dua

Para astronom dapat melihat CD-35 2722 B sebagai titik cahayanya sendiri, terpisah dari bintang yang diorbitnya. Objek ini adalah katai cokelat, berada dalam rezim massa di antara planet raksasa dan bintang: dengan massa kira-kira 37 kali Jupiter, ia lebih masif daripada planet raksasa biasa tetapi bukan bintang normal yang membakar hidrogen. Mereka tidak dapat melihat objek lebih kecil yang mungkin mengorbit katai cokelat itu sendiri. Jika dikonfirmasi, objek terdalam ini akan menjadikan sistem tersebut hierarki pertama yang diamati dengan sebuah satelit mengorbit objek subbintang yang lebih besar, sementara objek subbintang itu sendiri mengorbit sebuah bintang.

Yang mereka lihat justru sebuah ritme. Pada beberapa malam, cahaya katai cokelat bergeser sedikit ketika objek itu bergerak menuju Bumi. Pada malam lain, cahayanya bergeser ketika katai cokelat bergerak menjauh. Pola tersebut berulang kira-kira setiap **171 hari**.

Gerakan bolak-balik seperti inilah yang dapat dihasilkan pendamping tak terlihat: ketika dua objek mengorbit pusat massa bersama, objek yang lebih kecil bergerak mengelilingi yang lebih besar, tetapi objek yang lebih besar juga melakukan lingkaran yang jauh lebih kecil. Jika ritme ini bersifat orbital, sebuah makalah Nature baru menyajikan satu objek bermassa planet sebagai penjelasan yang lebih disukai untuk gerak yang diukur pada CD-35 2722 B.

Kemungkinannya luar biasa, tetapi ini bukan foto sebuah bulan. Dua puluh tiga malam pengamatan berkualitas tinggi mengungkap sinyal periodik yang kuat. Mengubah sinyal itu menjadi sebuah dunia membutuhkan model, dan data saat ini masih memungkinkan lebih dari satu arsitektur. Data juga belum sepenuhnya menyingkirkan perubahan lambat pada katai cokelat itu sendiri.



Titik hitam dan batang galat adalah 23 pengukuran kecepatan radial per malam. Kurva penuh dan putus-putus adalah model terbaik dengan satu dan dua satelit. Tumpang tindihnya menunjukkan mengapa data dapat mengungkap goyangan periodik tetapi belum menentukan arsitektur sistem; tidak satu pun kurva merupakan citra langsung sebuah pendamping.

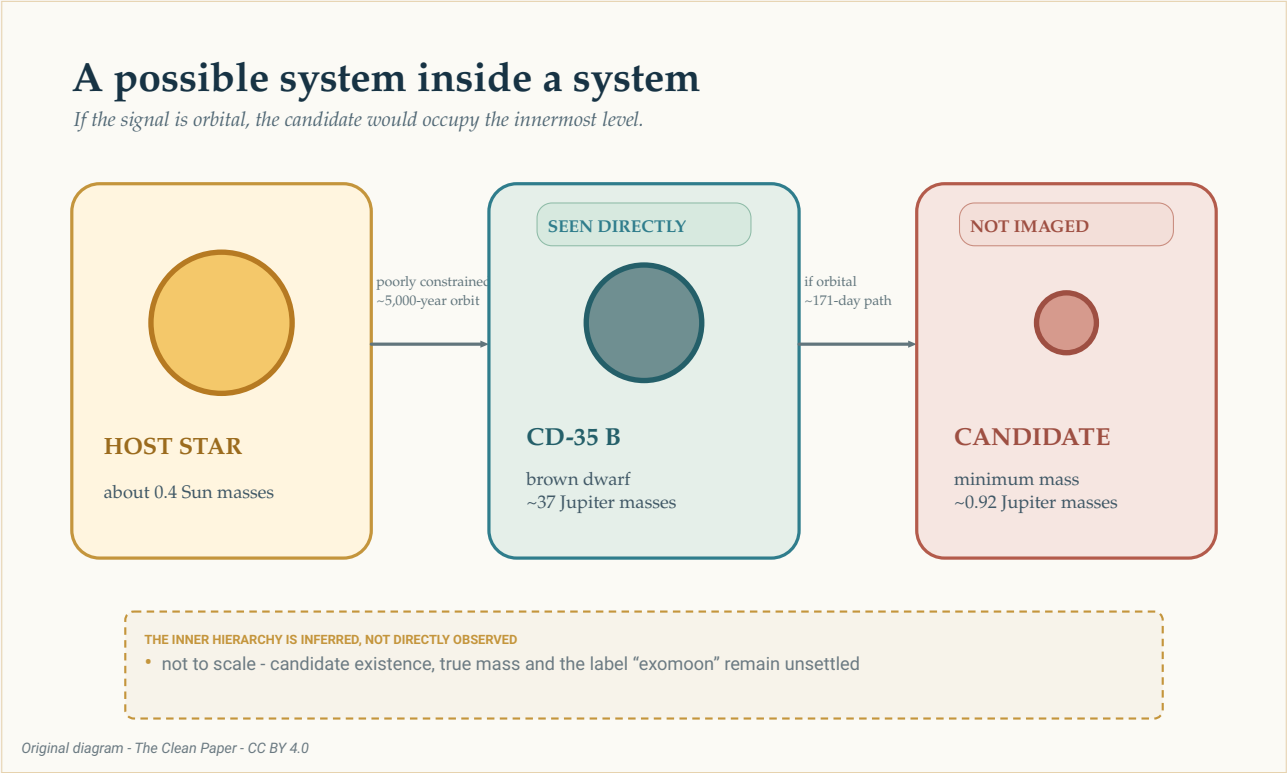
Original chart — The Clean Paper; data from Hoy et al., Nature (2026), Figure 1 source workbook CC BY 4.0

Sebuah sistem di dalam sistem

CD-35 2722 B adalah **katai cokelat**: objek di antara kategori yang biasa kita kenal. Ia lebih masif daripada planet raksasa tipikal tetapi tidak cukup masif untuk bersinar seperti bintang pembakar hidrogen normal. Makalah menggunakan estimasi massa sekitar **37 Jupiter**.

Katai cokelat ditemukan dengan pencitraan langsung, artinya teleskop memisahkan cahayanya dari cahaya bintang induk. Di langit, posisinya tampak sekitar 2,8 detik busur dari bintang. Orbit lebar yang menghubungkan keduanya belum diketahui dengan baik, tetapi estimasi sekarang menunjukkan lintasan sangat lonjong yang memerlukan kira-kira **5.000 tahun**.

Jika sinyal periodik memang orbital, arsitektur yang diinferensikan akan menempatkan kandidat satu tingkat lebih dalam: sebuah bintang yang diorbit katai cokelat, dengan pendamping bermassa planet yang mengorbit katai cokelat tersebut.



Jika sinyal bersifat orbital, kandidat akan menempati tingkat terdalam dari hierarki yang mungkin ini. Hanya katai cokelat yang telah dilihat secara langsung. Orbit luar mengelilingi bintang masih dibatasi dengan buruk, sedangkan lintasan dalam sekitar 171 hari diinferensikan dari goyangan katai cokelat yang terukur. Ukuran dan jarak tidak berskala.

The Clean Paper CC BY 4.0

Hierarki yang mungkin ini mudah digambar. Realitas fisik dan kosakatanya belum mapan. Apakah benda bermassa planet yang mengorbit katai cokelat harus disebut bulan, planet, atau sekadar satelit? Astronom belum memiliki aturan yang diterima luas untuk menyelesaikannya. Karena itu, makalah menggunakan istilah yang lebih luas: **eksosatelit**.

Bagaimana 23 malam berubah menjadi sebuah goyangan

Tim mengamati CD-35 2722 B (lihat entri NASA Eyes on Exoplanets) dengan CRIRES+, spektrograf resolusi tinggi di Very Large Telescope milik European Southern Observatory. Antara Oktober 2023 dan Februari 2026 mereka memperoleh 26 epoch pengamatan. Satu memiliki sinyal terlalu lemah, dan dua yang diambil dalam cuaca buruk ditolak lalu diulang, menyisakan **23 malam berkualitas tinggi**.

Spektrograf menyebarkan cahaya menjadi pola garis yang rinci. Ketika sumber bergerak menuju

atau menjauh dari Bumi, garis-garis itu bergeser sedikit. Pengukuran berulang gerakan sepanjang garis pandang ini disebut **kecepatan radial**. Pengukuran itu tidak menunjukkan benda tersembunyi. Ia menunjukkan bagaimana objek yang sedang diamati mungkin bergerak akibat tarikan yang tak terlihat.

Periodisitas terkuat dalam pengukuran berada dekat 170 hari. Sinyal ini melewati **ambang probabilitas alarm palsu 0,1%** dalam studi. Ambang itu menanyakan seberapa sering noise, di bawah asumsi uji, menghasilkan puncak periodogram setidaknya sekuat ini. Itu bukan probabilitas 99,9% bahwa sebuah satelit ada, dan dengan sendirinya tidak mengatakan apakah ada satu pendamping atau dua.

> **Apa yang dapat ditetapkan sinyal kecepatan radial?**
>
> Kecepatan radial mengubah pergeseran berulang garis spektrum menjadi pengukuran gerakan menuju dan menjauh dari pengamat. Pola berulang dapat dicocokkan dengan persamaan orbit, sehingga peneliti dapat menginferensikan periode, besar goyangan yang terukur, dan massa minimum pendamping.
> Namun metode ini tidak memotret pendamping secara langsung. Atmosfer bintang atau objek subbintang juga dapat menggeser garis spektrum, jadwal pengamatan dapat menciptakan ritme menyesatkan, dan pengaturan orbit berbeda dapat meniru satu sama lain. Sinyal, penjelasan fisiknya, dan nama yang diberikan kepada objek yang diinferensikan adalah tiga pertanyaan terpisah.

Sebelum menerima jawaban orbital, pola pengambilan sampel perlu diperhatikan. Empat pengukuran kecepatan radial yang sangat rendah membawa bobot besar dalam pola. Keempatnya muncul dalam dua pasangan, di bawah kondisi yang dilaporkan baik, dan tidak ada satu titik pun yang sendirian menciptakan sinyal ketika penulis mengulang analisis dengan membuang titik satu per satu. Meski demikian, hanya sebagian fase orbit yang mungkin telah teramati. Dua puluh tiga malam yang tersebar lebih dari dua tahun bukanlah cakupan kontinu.

Para penulis juga menguji artefak potensial setengah tahunan. Koreksi yang tidak sempurna terhadap gerak Bumi yang berubah atau profil instrumen dapat menciptakan sinyal tahunan palsu yang oleh sampling muncul sebagai alias setengah tahun Bumi, atau **182,5 hari**. Periode yang mereka sukai adalah **171,11 hari**, dengan ketidakpastian +0,53/-0,36 hari; penulis melaporkan bahwa nilai ini sekitar 20 simpangan baku dari 182,5 hari. Mereka juga tidak menemukan korelasi dengan perubahan gerak Bumi, seeing, uap air atmosfer, ataupun sifat instrumen yang diperiksa. Ini kontrol yang penting. Kontrol tersebut membuat penjelasan orbital cukup meyakinkan untuk dimodelkan, tetapi tidak dengan sendirinya mengidentifikasi objek.

Jawaban orbital paling sederhana: satu pendamping

Dalam model yang disukai, satu objek mengikuti orbit eksentrik, atau agak lonjong, mengelilingi katai cokelat setiap 171,11 hari. Orbit hasil fit memiliki eksentrisitas sekitar **0,27** dan sumbu semimayor sekitar **0,200 satuan astronomi** — kira-kira seperlima jarak rata-rata Bumi-Matahari.

Goyangan terukur memiliki amplitudo sekitar **318 meter per detik**. Dari gerakan itu, model memberi pendamping massa minimum sekitar **0,92 kali massa Jupiter**.

Kata *minimum* penting. Kecepatan radial hanya mengukur bagian gerak orbit yang menuju atau menjauh dari kita. Jika orbit terlihat dari sisi, sebagian besar geraknya muncul sepanjang garis tersebut. Jika orbit lebih face-on, sebagian besar gerak melintas di bidang langit, sehingga pendamping yang lebih masif diperlukan untuk menghasilkan goyangan terukur yang sama.

Astronom menuliskan hasil ini sebagai **m sin(i)**: massa dikalikan sinus kemiringan orbit, atau sudut pandang, yang tidak diketahui. Data membatasi produk tersebut, bukan massa sebenarnya sendiri. Jadi sekitar 0,92 massa Jupiter merupakan batas bawah, bukan pengukuran tepat massa objek.

> **Mengapa sudut pandang menyembunyikan massa?**
>
> Bayangkan menonton lintasan melingkar dari samping. Pelari berulang kali bergerak menuju dan menjauh dari Anda, sehingga komponen gerak itu mudah diukur. Sekarang lihat lintasan yang sama dari atas. Pelari sebagian besar bergerak melintasi bidang pandang dan hampir tidak bergerak menuju atau menjauh dari Anda.
> Kecepatan radial hanya melihat komponen pertama. Faktor matematika `sin(i)` menggambarkan seberapa banyak gerak orbit mengarah sepanjang garis pandang kita. Sampai kemiringan `i` diketahui, massa yang diinferensikan tetap merupakan nilai minimum.

Para penulis kemudian menanyakan apakah orbit tersebut dapat bertahan, bukannya cepat menghancurkan dirinya. Uji numerik mereka menemukan model satu-pendamping umumnya stabil. Itu membuatnya menjadi interpretasi fisik yang masuk akal. Bukan deteksi kedua.

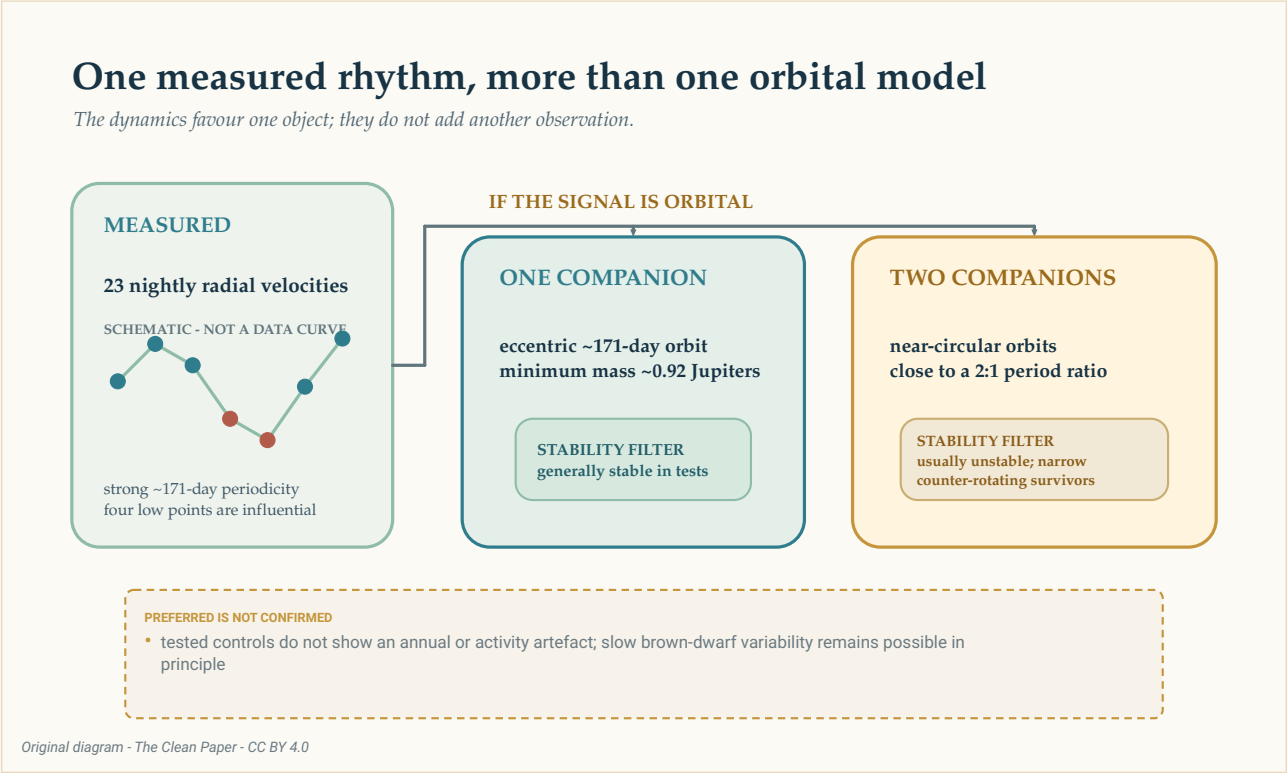
Jawaban yang merepotkan: dua pendamping dapat meniru satu

Sinyal kecepatan radial dari orbit eksentrik memiliki ambiguitas yang sudah dikenal. Dalam kondisi tertentu, dua objek pada orbit hampir sirkular, dengan satu memerlukan waktu kira-kira dua kali objek lain, dapat menghasilkan pola gabungan yang menyerupai satu objek pada orbit lonjong.

Ambiguitas itu muncul di sini. Model dua-pendamping dapat mencocokkan pengukuran sekarang dengan sinyal luar dekat 171 hari dan sinyal dalam berperiode lebih pendek. Karena waktu pengamatan tidak mengambil sampel setiap fase secara merata, sinyal yang lebih pendek memiliki beberapa alias. Karena 23 malam terpilih menyisakan celah panjang, periode uji berbeda dapat menghitung jumlah siklus tak teramati yang berbeda di antara kunjungan namun tetap sejajar dengan pengukuran yang sama. Periode kandidat dekat 14, 70, 88, dan 115 hari karena itu adalah fit alternatif terhadap satu sinyal pendek yang disampel buruk, bukan empat ritme yang terdeteksi secara independen.

Para penulis menolak jendela 13 hingga 17 hari yang dibatasi buruk. Di wilayah tersebut, fit tidak

mengisolasi satu periode meyakinkan: banyak solusi yang berdekatan di bawah sekitar 20 hari dapat mereproduksi pengukuran dengan cadence rendah, sehingga seluruh jendela kemungkinan merupakan artefak sampling. Di antara jendela yang tersisa, solusi kira-kira 88 hari mencocokkan data lebih baik daripada alternatif sekitar 70 dan 115 hari, tetapi tidak cukup kuat untuk membuat makalah mengklaim periode kedua yang diketahui. Dalam fit terbaik yang ditabulasikan, massa minimum objek luar sekitar 0,87 Jupiter dan objek dalam sekitar 0,22 Jupiter. Angka tersebut menggambarkan model yang kurang disukai; bukan pengukuran dua dunia yang sudah terbukti.



Jika sinyal sekitar 171 hari bersifat orbital, pola kecepatan radial yang sama secara umum dapat direpresentasikan oleh satu pendamping eksentrik atau dua pendamping hampir sirkular dekat rasio periode dua-banding-satu. Uji kestabilan lebih mendukung interpretasi satu objek, tetapi tidak mengubah model menjadi citra atau menyingkirkan setiap bentuk variabilitas lambat katai cokelat.

The Clean Paper CC BY 4.0

Perhitungan kestabilan memperjelas perbandingan. Sebagian besar pengaturan dua-pendamping yang diuji mengeluarkan salah satu objek dalam beberapa ratus tahun simulasi. Konfigurasi yang bertahan menempati wilayah sempit dan tidak biasa, tempat orbit hampir berada di bidang yang sama tetapi bergerak dalam arah berlawanan. Bintang induk menambahkan wilayah tidak stabil lain.

Ini alasan untuk lebih menyukai satu pendamping eksentrik daripada sistem dua-pendamping yang diuji. Bukan bukti bahwa alam memilih model yang lebih sederhana. Kestabilan menyaring interpretasi yang mungkin setelah kecepatan radial diukur; ia tidak menambahkan titik observasi baru pada kurva.

Bagaimana satu orbit eksentrik dapat terlihat seperti dua orbit sirkular?

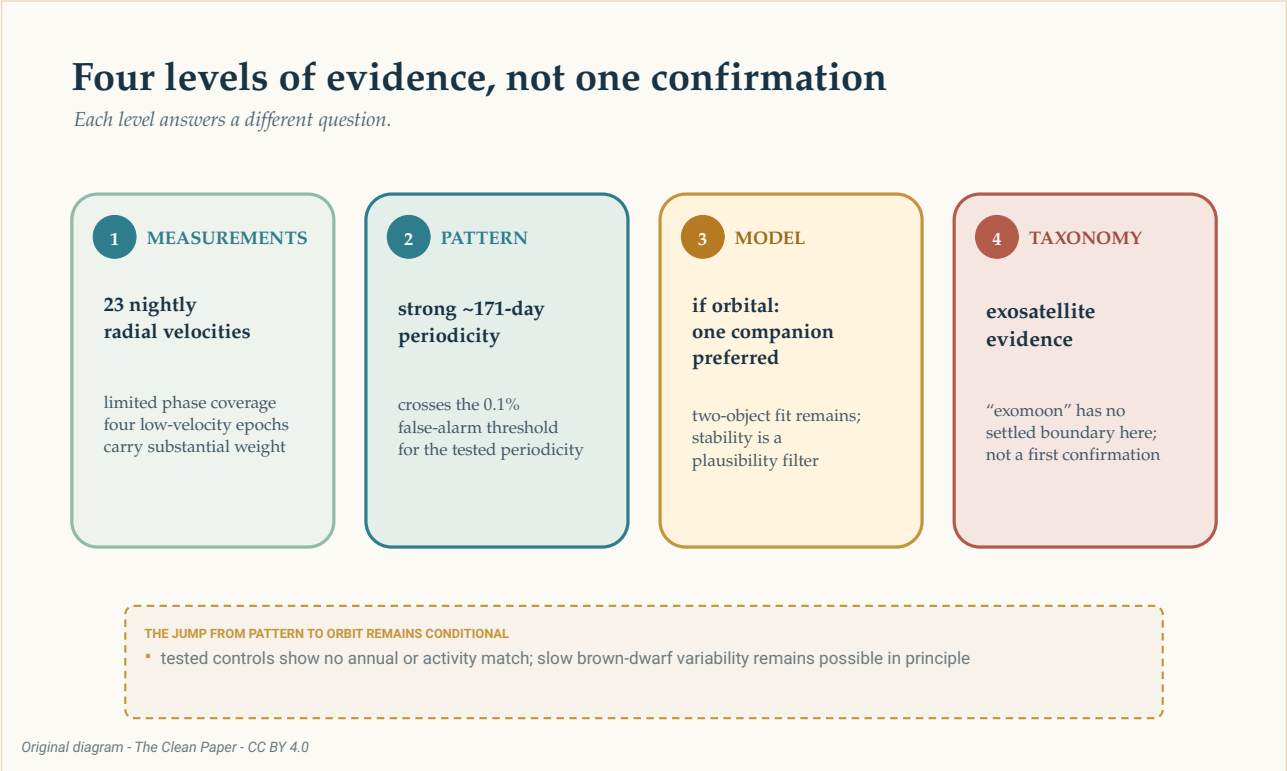
Orbit sirkular sempurna menghasilkan gelombang kecepatan radial berulang yang sederhana. Orbit eksentrik menambahkan distorsi pada gelombang tersebut. Dua orbit sirkular dengan periode dekat rasio dua-banding-satu dapat bergabung sehingga satu sinyal menghasilkan ritme utama dan yang lain menghasilkan distorsi serupa.
Ini adalah **degenerasi orbital**: sistem fisik berbeda menghasilkan pengukuran yang mirip. Lebih banyak observasi pada waktu ketika model memprediksi kecepatan berbeda dapat memutus kebuntuan. Uji dinamika membantu dengan menanyakan apakah tiap sistem yang diusulkan dapat bertahan, tetapi tidak dapat menggantikan observasi tersebut.

Mungkinkah ritme berasal dari katai cokelat itu sendiri?

Katai cokelat bukan massa uji yang diam. Atmosfernya berotasi, membentuk awan, dan mungkin memiliki aktivitas magnetik. Pola permukaan yang berubah dapat membentuk ulang garis spektrum dan meniru gerakan.

Periode rotasi maksimum CD-35 2722 B diperkirakan sekitar **0,65 hari**, jauh lebih pendek dari 171 hari. Tim tidak menemukan sinyal rotasi pendek yang kuat, atau sinyal menyerupai awan atau granulasi yang meyakinkan, dalam model aktivitas yang diuji. Mereka juga memeriksa sampling tahunan dan besaran instrumen tanpa menemukan kecocokan dengan ritme 171 hari.

Pemeriksaan ini mempersempit alternatif, tetapi makalah tidak mengklaim seluruh variabilitas intrinsik telah dihilangkan. Aktivitas magnetik jangka panjang atau sirkulasi atmosfer katai cokelat pada prinsipnya belum dapat disingkirkan. Kemungkinan tersisa itu harus ditempatkan berdampingan dengan model orbital, bukan disembunyikan setelahnya.



Bukti naik melalui tingkat yang berbeda: 23 kecepatan radial malam dengan cakupan fase terbatas, periodisitas kuat sekitar 171 hari, model satu-pendamping yang disukai jika sinyal orbital, dan akhirnya label "exomoon" yang belum mapan. Tangga ini memisahkan pengukuran, pola statistik, interpretasi fisik, dan taksonomi; bukan panah konfirmasi.

The Clean Paper CC BY 4.0

Apakah ini sebuah exomoon?

Di Tata Surya, bulan mengorbit planet. CD-35 2722 B adalah katai cokelat, dan massa sebenarnya dari pendamping yang diinferensikan belum diketahui. Nama-nama familiar mulai terasa sempit ketika satu objek berada dekat batas planet-katai-cokelat dan objek lain dekat batas bulan-planet.

Makalah tidak mengklaim exomoon terkonfirmasi pertama. Ia menyatakan bahwa belum ada exomoon yang terdeteksi dengan keyakinan tinggi, menyajikan bukti untuk sebuah **eksosatelit** bermassa planet, dan menyebut sistem ini langkah menuju deteksi yang tidak kontroversial. Pembahasannya tentang kemungkinan kebaruan dimulai secara bersyarat: *jika* sinyal terbukti sah.

Kehati-hatian itu tidak membuat hasilnya kosong. Mengukur kecepatan radial secara langsung dari pendamping katai cokelat yang redup sangat sulit. Jika pengamatan lanjutan mempertahankan sinyal, sistem ini akan menunjukkan bahwa metode pencarian planet dapat menjangkau satu tingkat lebih dalam lagi dalam hierarki benda langit.

Musim pengamatan tambahan dapat melakukan lebih dari sekadar menambah titik. Model satu dan

dua pendamping memprediksi kecepatan berbeda pada waktu masa depan tertentu. Pengukuran yang mengisi fase orbit yang hilang dapat menguji apakah ritme 171 hari bertahan, mengurangi pengaruh empat titik rendah, dan membuat kurva yang bersaing semakin terpisah.

Untuk sekarang, gambaran paling jujur bukanlah bulan baru yang tergantung di samping katai cokelat. Ia adalah spektrum, diulang malam demi malam, yang membawa pergeseran periodik kecil. Mungkin ada sebuah dunia di dalam ritme itu. Prestasinya adalah belajar seberapa banyak yang dapat diinferensikan tanpa berpura-pura bahwa inferensinya sudah lengkap.

Singkatnya

Astronom mengukur kecepatan radial katai cokelat CD-35 2722 B yang telah dicitrakan langsung pada 23 malam berkualitas tinggi antara Oktober 2023 dan Februari 2026. Garis spektrumnya menunjukkan pergeseran periodik kuat dekat 171 hari. Model orbital yang disukai berisi satu pendamping eksentrik dengan massa minimum dekat 0,92 massa Jupiter, tetapi massa sebenarnya tidak diketahui karena kemiringan orbit tidak diketahui. Dua pendamping hampir sirkular dapat meniru sinyal umum yang sama, walaupun sebagian besar konfigurasi dua objek yang diuji tidak stabil secara dinamis. Empat epoch berkecepatan rendah berpengaruh besar dan cakupan fase orbital masih terbatas: observasi hanya mengambil sampel bagian tertentu dari kemungkinan siklus 171 hari, bukan menelusurinya terus-menerus melalui setiap fase. Pengujian tidak mengidentifikasi rotasi, sampling tahunan, cuaca, atau sifat instrumen yang diperiksa sebagai sumber sinyal, tetapi variabilitas katai cokelat jangka panjang belum dapat disingkirkan pada prinsipnya. Objek tak terlihat itu tidak dicitrakan langsung, model satu objek lebih disukai alih-alih terkonfirmasi, dan tidak ada aturan mapan yang menyatakan bahwa benda bermassa planet yang mengorbit katai cokelat adalah exomoon.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang diamati: Dua puluh tiga pengukuran kecepatan radial per malam dari CD-35 2722 B mengandung periodisitas kuat sekitar 171 hari. Katai cokelatnya sendiri dicitrakan langsung; pendamping yang diusulkan tidak.

Apa yang lebih disukai penulis: Jika sinyal orbital, satu pendamping eksentrik dengan massa minimum dekat Jupiter memberi interpretasi paling sederhana yang masuk akal secara dinamis untuk data sekarang.

Apa yang masih terbuka: Dua pendamping dapat mencocokkan kecepatan radial, walaupun sistem yang diuji biasanya tidak stabil; variabilitas katai cokelat jangka panjang tidak dikecualikan pada prinsipnya; dan sudut pandang yang tidak diketahui membuat massa sebenarnya tetap tidak ditentukan.

Apa yang tidak ditetapkan makalah: Exomoon terkonfirmasi pertama, satelit yang dilihat langsung, tepat satu objek pengorbit, massa sebenarnya 0,92 Jupiter, atau probabilitas 99,9% bahwa model fisik yang disukai benar.

Apa yang akan meningkatkan keyakinan: Pengukuran kecepatan radial lanjutan yang mencakup lebih banyak fase orbit, menguji apakah sinyal 171 hari bertahan, dan mengambil data pada waktu ketika model satu dan dua pendamping membuat prediksi berbeda.

Sumber

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