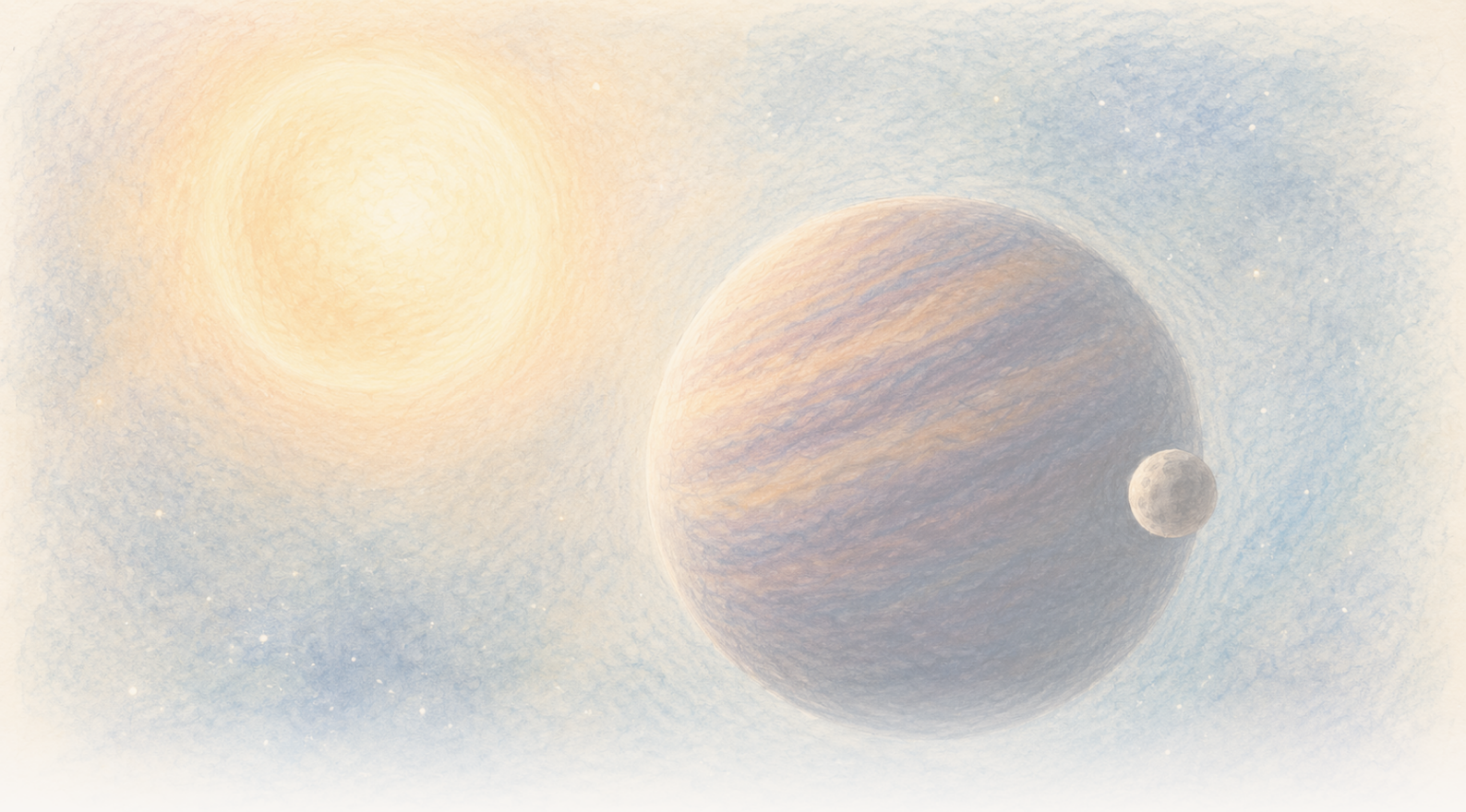


The Clean Paper

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

Kerdil perang kelihatan beroleng setiap 171 hari. Satu dunia tersembunyi mungkin menariknya, tetapi data masih membenarkan dua

Dua puluh tiga spektrum berkualiti tinggi mendedahkan anjakan berkala yang kuat dalam gerakan CD-35 2722 B. Model yang lebih digemari mempunyai satu pengiring eksentrik dengan jisim minimum hampir satu jisim Jupiter, tetapi model dua objek boleh meniru isyarat yang sama, kebolehubahan perlahan kerdil perang itu sendiri masih mungkin pada prinsipnya, dan istilah "eksobulan" belum mempunyai sempadan takrif yang mantap dalam kes ini.

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

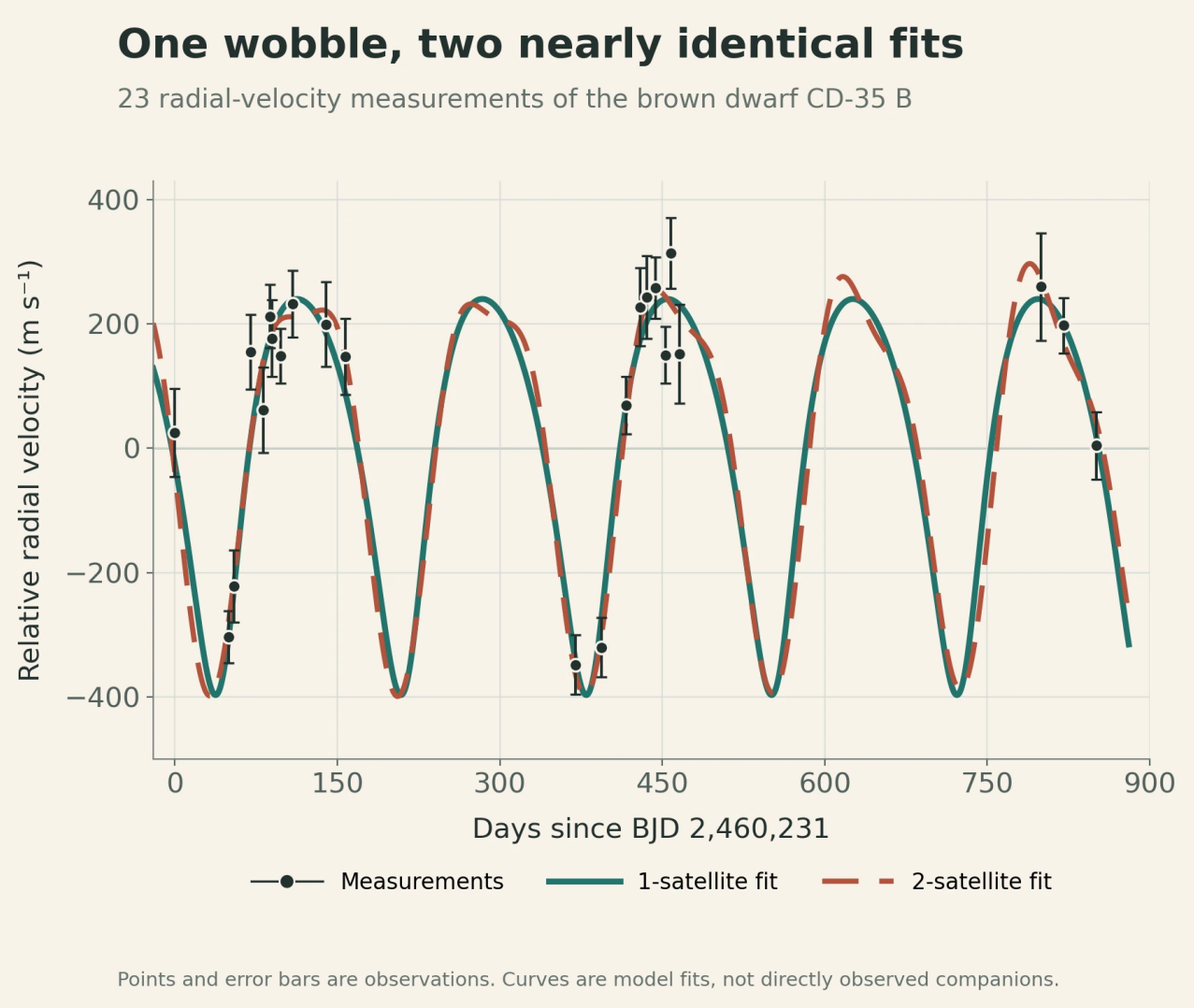
Sebuah kerdil perang kelihatan beroleng setiap 171 hari. Satu dunia tersembunyi mungkin menariknya, tetapi data masih membenarkan dua

Para astronom dapat melihat CD-35 2722 B sebagai titik cahayanya sendiri, berasingan daripada bintang yang diorbitnya. Objek ini adalah kerdil perang, berada dalam rejim jisim di antara planet raksasa dan bintang: dengan jisim 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 kerdil perang itu sendiri. Jika disahkan, objek terdalam ini akan menjadikan sistem tersebut hierarki pertama yang diperhatikan dengan sebuah satelit mengorbit objek subbintang yang lebih besar, sementara objek subbintang itu sendiri mengorbit sebuah bintang.

Yang mereka lihat malah sebuah rentak. Pada beberapa malam, cahaya kerdil perang beralih sedikit ketika objek itu bergerak menuju Bumi. Pada malam lain, cahayanya beralih ketika kerdil perang bergerak menjauh. Corak tersebut berulang kira-kira setiap **171 hari**.

Pergerakan bolak-balik seperti inilah yang dapat dihasilkan pengiring tak kelihatan: ketika dua objek mengorbit pusat jisim bersama, objek yang lebih kecil bergerak mengelilingi yang lebih besar, tetapi objek yang lebih besar juga melakukan lingkaran yang jauh lebih kecil. Jika rentak ini bersifat orbital, sebuah makalah Nature baharu membentangkan satu objek berjisim planet sebagai penjelasan yang paling disokong untuk gerak yang diukur pada CD-35 2722 B.

Kemungkinan itu luar biasa, tetapi ini bukan foto sebuah bulan. Dua puluh tiga malam pemerhatian berkualiti tinggi mendedahkan isyarat periodik yang kuat. Mengubah isyarat itu menjadi sebuah dunia memerlukan model, dan data ketika ini masih membolehkan lebih daripada satu seni bina. Data juga belum sepenuhnya menyingkirkan perubahan lambat pada kerdil perang itu sendiri.



Titik hitam dan palang ralat adalah 23 pengukuran halaju jejarian per malam. Lengkung penuh dan putus-putus adalah model terbaik dengan satu dan dua satelit. Tumpang tindihnya menunjukkan mengapa data dapat mendedahkan goyangan periodik tetapi belum menentukan seni bina sistem; tidak satu pun lengkung merupakan imej langsung sebuah pengiring.

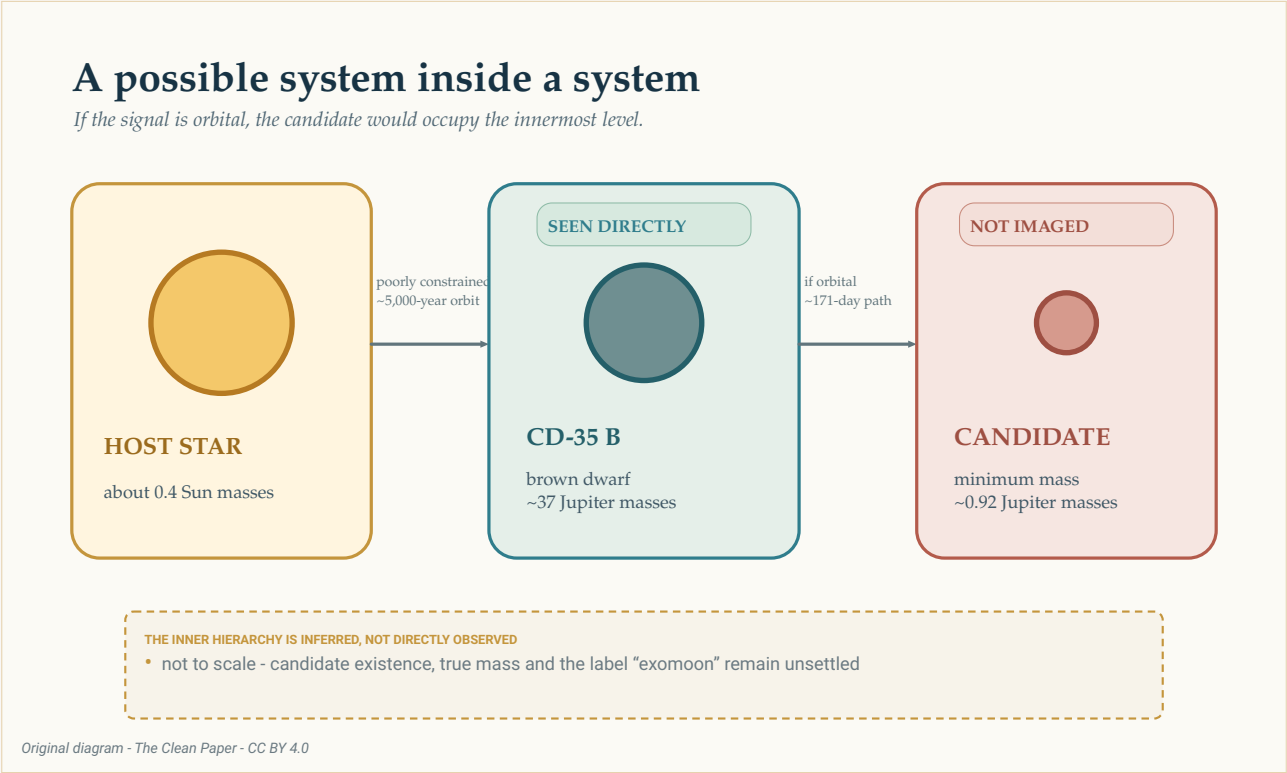
Original chart — The Clean Paper; data from Hoy et al., Nature (2026), Figure 1 source workbook CC BY 4.0

Sebuah sistem di dalam sistem

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

Kerdil perang ditemui dengan pengimejan langsung, ertinya teleskop memisahkan cahayanya dari cahaya bintang induk. Di langit, kedudukannya kelihatan sekitar 2,8 detik busur daripada bintang. Orbit lebar yang menghubungkan kedua-duanya belum diketahui dengan baik, tetapi anggaran sekarang menunjukkan lintasan sangat lonjong yang memerlukan kira-kira **5.000 tahun**.

Jika isyarat periodik sememangnya orbital, seni bina yang disimpulkan akan meletakkan calon itu satu tingkat lebih dalam: sebuah bintang yang diorbit kerdil perang, dengan pengiring berjisim planet yang mengorbit kerdil perang tersebut.



Jika isyarat bersifat orbital, calon itu akan berada pada tingkat paling dalam dalam hierarki yang mungkin ini. Hanya kerdil perang yang telah dilihat secara langsung. Orbit luar mengelilingi bintang masih kurang terkekang, manakala lintasan dalam sekitar 171 hari disimpulkan dari goyangan kerdil perang yang boleh diukur. Saiz dan jarak tidak berskala.

The Clean Paper CC BY 4.0

Hierarki yang mungkin ini mudah digambar. Realiti fizikal dan perbendaharaan katanya belum mantap. Adakah objek berjisim planet yang mengorbit kerdil perang perlu disebut bulan, planet, atau sekadar satelit? Astronom belum mempunyai peraturan yang diterima luas untuk menyelesaikannya. Oleh itu, makalah menggunakan istilah yang lebih luas: **eksosatelit**.

Bagaimana 23 malam menghasilkan satu olengan

Pasukan memerhati CD-35 2722 B (lihat catatan NASA Eyes on Exoplanets) dengan CRIRES+, spektrograf resolusi tinggi di Very Large Telescope kepunyaan European Southern Observatory. Antara Oktober 2023 dan Februari 2026 mereka memperoleh 26 epok pemerhatian. Satu mempunyai isyarat terlalu lemah, dan dua yang diambil dalam cuaca buruk ditolak lalu diulang, menyisakan **23 malam berkualiti tinggi**.

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

atau menjauh daripada Bumi, garis-garis itu beralih sedikit. Pengukuran berulang pergerakan sepanjang garis pandang ini disebut **halaju jejari**. Pengukuran itu tidak menunjukkan objek tersembunyi. Ia menunjukkan bagaimana objek yang sedang diperhatikan mungkin bergerak akibat tarikan yang tak kelihatan.

Keberkalaan terkuat dalam pengukuran berada sekitar 170 hari. Isyarat ini melepasi **ambang kebarangkalian penggera palsu 0,1%** dalam kajian. Ambang itu menganggarkan berapa kerap hingar semata-mata, di bawah andaian ujian, boleh menghasilkan puncak periodogram sekurang-kurangnya sekuat ini. Itu bukan kebarangkalian 99,9% bahawa sebuah satelit ada, dan dengan sendirinya tidak menyatakan adakah ada satu pengiring atau dua.

> **Apa yang dapat ditetapkan isyarat halaju jejari?**
>
> Halaju jejari mengubah anjakan berulang garis spektrum menjadi pengukuran pergerakan menghampiri dan menjauhi pemerhati. Corak berulang boleh dipadankan dengan persamaan orbit, sehingga penyelidik boleh menganggar tempoh, magnitud olengan yang boleh diukur, dan jisim minimum pengiring.
> Namun kaedah ini tidak memotret pengiring secara langsung. Atmosfera bintang atau objek subbintang juga boleh mengalihkan garis spektrum, jadwal pemerhatian dapat mewujudkan rentak menyesatkan, dan tetapan orbit berbeza dapat meniru satu sama lain. Isyarat, penjelasan fisiknya, dan nama yang diberikan kepada objek yang disimpulkan adalah tiga persoalan berasingan.

Sebelum menerima jawapan orbital, corak pengambilan sampel perlu diperhatikan. Empat pengukuran halaju jejari yang sangat rendah membawa bobot besar dalam corak. Keempatnya muncul dalam dua pasangan, di bawah keadaan yang dilaporkan baik, dan tiada satu titik pun yang sendiri mewujudkan isyarat ketika penulis mengulang analisis dengan membuang titik satu per satu. walaupun sedemikian, hanya sebahagian fasa orbit yang mungkin telah diperhatikan. Dua puluh tiga malam yang tersebar lebih daripada dua tahun bukanlah skop berterusan.

Para penulis juga menguji artifak potensial setengah tahunan. Pembetulan yang tidak sempurna terhadap gerak Bumi yang berubah atau profil instrumen dapat mewujudkan isyarat tahunan palsu yang oleh pensampelan muncul sebagai alias setengah tahun Bumi, atau **182,5 hari**. Tempoh yang mereka sukai adalah **171,11 hari**, dengan ketidakpastian +0,53/-0,36 hari; penulis melaporkan bahawa nilai ini sekitar 20 sisihan piawai dari 182,5 hari. Mereka juga tidak mendapati korelasi dengan perubahan gerak Bumi, seeing, uap air atmosfera, atau sifat instrumen yang diperiksa. Ini kawalan yang penting. Kawalan tersebut membuat penjelasan orbital cukup meyakinkan untuk dimodelkan, tetapi tidak dengan sendirinya mengenal pasti objek.

Jawapan orbital paling ringkas: satu pengiring

Dalam model yang digemari, satu objek mengikuti orbit eksentrik, atau agak lonjong, mengelilingi kerdil perang setiap 171,11 hari. Orbit hasil padanan mempunyai eksentrisiti sekitar **0,27** dan paksi

semi-mayor sekitar **0,200 unit astronomi** — kira-kira seperlima jarak purata Bumi-Matahari.

Goyangan boleh diukur mempunyai amplitudo sekitar **318 meter per detik**. Dari pergerakan itu, model memberi pengiring jisim minimum sekitar **0,92 kali jisim Jupiter**.

Kata *minimum* penting. Halaju jejari hanya mengukur bahagian gerak orbit yang menuju atau menjauh dari kita. Jika orbit kelihatan dari bahagian, sebahagian besar geraknya muncul sepanjang garis tersebut. Jika orbit lebih face-on, sebahagian besar gerak melintas di bidang langit, sehingga pengiring yang lebih masif diperlukan untuk menghasilkan goyangan boleh diukur yang sama.

Astronom menuliskan hasil ini sebagai **m sin(i)**: jisim didarabkan sinus kecondongan orbit, atau sudut pandang, yang tidak diketahui. Data mengehadkan produk tersebut, bukan jisim sebenarnya sendiri. Jadi sekitar 0,92 jisim Jupiter merupakan had bawah, bukan pengukuran tepat jisim objek.

> **Mengapa sudut pandang menyembunyikan jisim?**
>
> 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 sebahagian besar bergerak melintasi bidang pandang dan hampir tidak bergerak menuju atau menjauh dari Anda.
> Halaju jejari hanya melihat komponen pertama. Faktor matematik `sin(i)` menggambarkan sejauh mana banyak gerak orbit menuju sepanjang garis pandang kita. Hingga kecondongan `i` diketahui, jisim yang disimpulkan tetap merupakan nilai minimum.

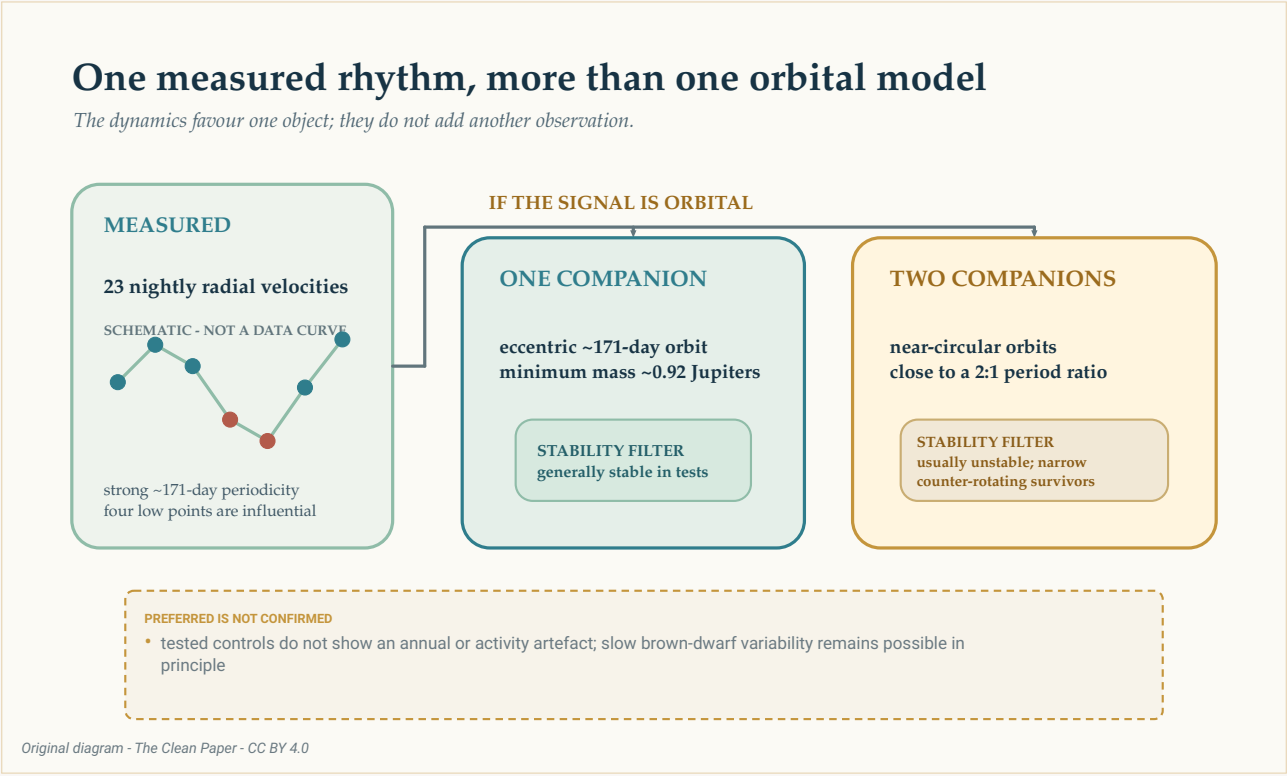
Para penulis kemudian bertanya adakah orbit tersebut dapat bertahan, bukannya cepat menghancurkan dirinya. Ujian numerik mereka mendapati model satu-pengiring umumnya stabil. Itu membuatnya menjadi tafsiran fizikal yang munasabah. Bukan pengesanan kedua.

Jawapan yang menyusahkan: dua pengiring boleh meniru satu

Isyarat halaju jejari dari orbit eksentrik mempunyai ambiguitas yang telah dikenali. Dalam keadaan tertentu, dua objek pada orbit hampir bulat, dengan satu memerlukan masa kira-kira dua kali objek lain, dapat menghasilkan corak gabungan yang menyerupai satu objek pada orbit lonjong.

Di sinilah ketidakpastian itu muncul. Model dua-pengiring dapat memadankan pengukuran sekarang dengan isyarat luar dekat 171 hari dan isyarat dalam dengan tempoh yang lebih pendek. Kerana masa pemerhatian tidak merangkumi setiap fasa secara sekata, isyarat yang lebih pendek mempunyai beberapa alias. Kerana 23 malam terpilih meninggalkan jurang masa yang panjang, tempoh ujian berbeza dapat mengira jumlah kitaran tak diperhatikan yang berbeza di antara kunjungan namun tetap sejajar dengan pengukuran yang sama. Tempoh calon dekat 14, 70, 88, dan 115 hari oleh itu ialah padanan alternatif terhadap satu isyarat pendek yang disampel buruk, bukan empat rentak yang dikesan secara bebas.

Para penulis menolak tetingkap 13 hingga 17 hari yang dihadkan buruk. Di kawasan tersebut, padanan tidak mengasingkan satu tempoh meyakinkan: banyak penyelesaian yang berdekatan di bawah sekitar 20 hari dapat menghasilkan semula pengukuran dengan kekerapan pensampelan rendah, sehingga keseluruhan tetingkap kemungkinan merupakan artifak pensampelan. Di antara tetingkap yang berbaki, penyelesaian kira-kira 88 hari sepadan dengan data lebih baik daripada alternatif sekitar 70 dan 115 hari, tetapi tidak cukup meyakinkan untuk membolehkan makalah mendakwa tempoh kedua yang diketahui. Dalam padanan terbaik yang ditabulasikan, jisim minimum objek luar sekitar 0,87 Jupiter dan objek dalam sekitar 0,22 Jupiter. Angka tersebut menggambarkan model yang kurang digemari; bukan pengukuran dua dunia yang telah terbukti.



Jika isyarat sekitar 171 hari bersifat orbital, corak halaju jejari yang sama secara umum dapat diwakili oleh satu pengiring eksentrik atau dua pengiring hampir bulat dekat nisbah tempoh dua-banding-satu. Ujian kestabilan lebih menyokong tafsiran satu objek, tetapi tidak mengubah model menjadi imej atau menyingkirkan setiap bentuk kebolehubahan lambat kerdil perang.

The Clean Paper CC BY 4.0

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

Ini alasan untuk lebih menyukai satu pengiring eksentrik daripada sistem dua-pengiring yang diuji. Bukan bukti bahawa alam memilih model yang lebih ringkas. Kestabilan menyaring tafsiran yang mungkin selepas halaju jejari diukur; ia tidak menambahkan titik pemerhatian baru pada lengkung.

Bagaimana satu orbit eksentrik dapat kelihatan seperti dua orbit bulat?

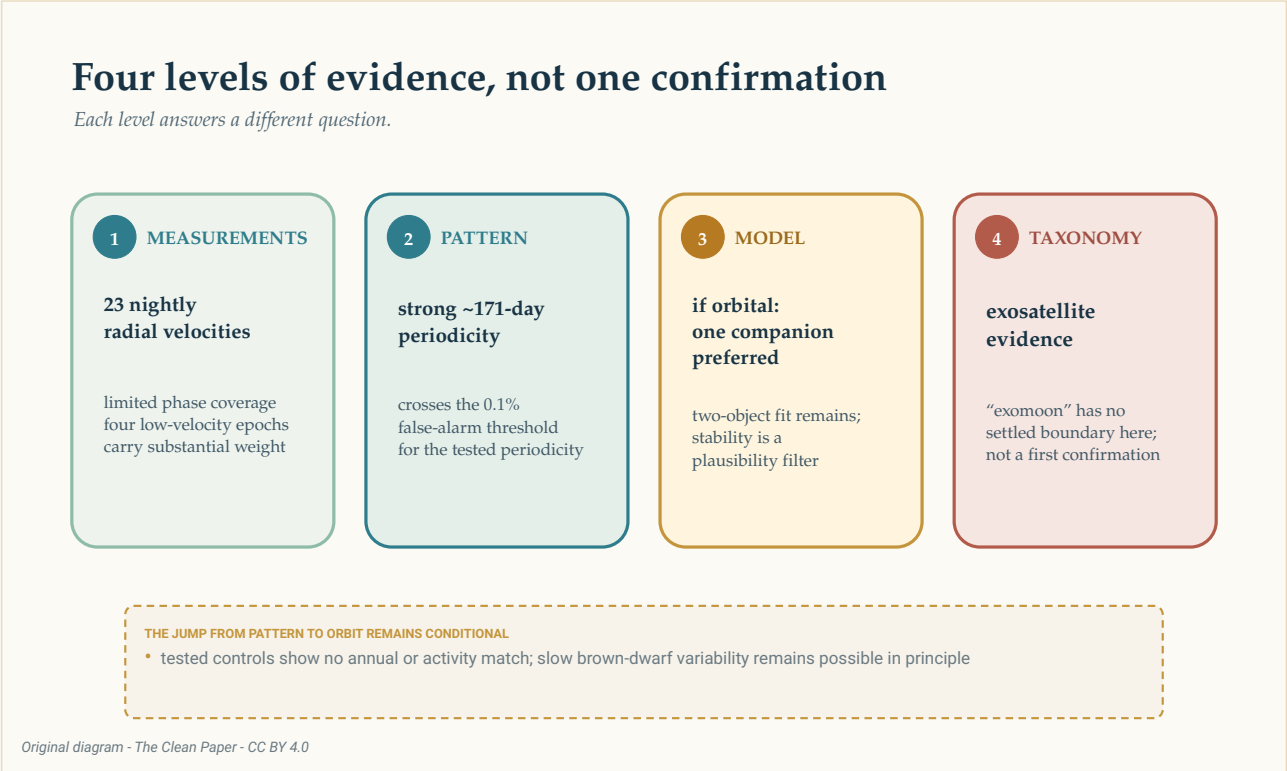
Orbit bulat sempurna menghasilkan gelombang halaju jejari berulang yang ringkas. Orbit eksentrik menambahkan distorsi pada gelombang tersebut. Dua orbit bulat dengan tempoh dekat nisbah dua-banding-satu dapat bergabung sehingga satu isyarat menghasilkan rentak utama dan yang lain menghasilkan distorsi serupa.
Ini adalah **degenerasi orbital**: sistem fizikal berbeza menghasilkan pengukuran yang serupa. Lebih banyak pemerhatian pada masa ketika model meramalkan kelajuan berbeza dapat memutus kebuntuan. Ujian dinamik membantu dengan bertanya adakah tiap sistem yang dicadangkan dapat bertahan, tetapi tidak dapat menggantikan pemerhatian tersebut.

Mungkinkah rentak berasal daripada kerdil perang itu sendiri?

Kerdil perang bukan jisim ujian yang diam. Atmosfernya berotasi, membentuk awan, dan mungkin mempunyai aktiviti magnetik. Corak permukaan yang berubah dapat membentuk ulang garis spektrum dan meniru pergerakan.

Tempoh putaran maksimum CD-35 2722 B dianggarkan sekitar **0,65 hari**, jauh lebih pendek dari 171 hari. Pasukan tidak mendapati isyarat putaran pendek yang kuat, atau isyarat menyerupai awan atau granulasi yang meyakinkan, dalam model aktiviti yang diuji. Mereka juga memeriksa pensampelan tahunan dan kuantiti instrumen tanpa mendapati padanan dengan rentak 171 hari.

Pemeriksaan ini mempersempit alternatif, tetapi makalah tidak mendakwa keseluruhan kebolehubahan intrinsik telah dihapuskan. Aktiviti magnetik jangka panjang atau peredaran atmosfera kerdil perang pada prinsipnya belum dapat disingkirkan. Kemungkinan berbaki itu perlu ditempatkan bersebelahan dengan model orbital, bukan disembunyikan setelahnya.



Bukti naik melalui tahap yang berbeza: 23 halaju jejari malam dengan skop fasa terhad, keberkalaan yang kuat sekitar 171 hari, model satu-pengiring yang digemari jika isyarat orbital, dan akhirnya label "exomoon" yang belum mantap. Tangga ini memisahkan pengukuran, corak statistik, tafsiran fizikal, dan taksonomi; bukan anak panah pengesahan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Adakah ini eksobulan?

Di Sistem Suria, bulan mengorbit planet. CD-35 2722 B adalah kerdil perang, dan jisim sebenarnya dari pengiring yang disimpulkan belum diketahui. Nama-nama biasa mulai terasa sempit ketika satu objek berada dekat had planet-katai-cokelat dan objek lain dekat had bulan-planet.

Makalah tidak mendakwa bahawa ini ialah exomoon pertama yang telah disahkan. Ia menyatakan bahawa belum ada exomoon yang dikesan dengan keyakinan tinggi, membentangkan bukti untuk sebuah **eksosatelit** berjisim planet, dan menyatakan sistem ini ialah satu langkah menuju pengesanan yang tidak kontroversial. Pembahasannya tentang kemungkinan kebaruan dimulakan secara bersyarat: *jika* isyarat terbukti sah.

Kehati-hatian itu tidak membuat hasilnya kosong. Mengukur halaju jejari secara langsung dari pengiring kerdil perang yang redup sangat sukar. Jika pemerhatian lanjutan mengekalkan isyarat, sistem ini akan menunjukkan bahawa kaedah pencarian planet dapat menjangkau satu tahap lebih dalam lagi dalam hierarki objek langit.

Musim pemerhatian tambahan dapat melakukan lebih daripada sekadar menambah titik. Model

satu dan dua pengiring meramalkan kelajuan berbeza pada masa depan tertentu. Pengukuran yang mengisi fasa orbit yang hilang dapat menguji adakah rentak 171 hari bertahan, mengurangkan pengaruh empat titik rendah, dan membuat lengkung yang bersaing semakin berasingan.

Untuk sekarang, gambaran paling jujur bukanlah bulan baru yang bergantung di samping kerdil perang. Ia adalah spektrum, diulang malam demi malam, yang membawa anjakan periodik kecil. Mungkin ada sebuah dunia di dalam rentak itu. Prestasinya adalah belajar sejauh mana banyak yang dapat disimpulkan tanpa berpura-pura bahawa inferensinya telah lengkap.

Ringkasan utama

Ahli astronomi mengukur halaju jejari kerdil perang CD-35 2722 B yang telah diimej secara langsung pada 23 malam berkualiti tinggi antara Oktober 2023 dan Februari 2026. Garis spektrumnya menunjukkan anjakan berkala yang kuat sekitar 171 hari. Model orbital yang digemari mengandungi satu pengiring eksentrik dengan jisim minimum sekitar 0.92 jisim Jupiter, tetapi jisim sebenarnya tidak diketahui kerana kecondongan orbit tidak diketahui. Dua pengiring hampir bulat dapat meniru isyarat umum yang sama, walaupun sebahagian besar konfigurasi dua objek yang diuji tidak stabil secara dinamik. Empat epok berhalaju rendah mempengaruhi besar dan liputan fasa orbit masih terhad: pemerhatian hanya merangkumi bahagian tertentu dari kemungkinan kitaran 171 hari, bukan menjejakinya secara berterusan melalui setiap fasa. Ujian tidak mengenal pasti putaran, pensampelan tahunan, cuaca, atau sifat instrumen yang diperiksa sebagai sumber isyarat, tetapi kebolehubahan kerdil perang jangka panjang belum dapat disingkirkan pada prinsipnya. Objek yang tidak kelihatan itu tidak diimej secara langsung, model satu objek lebih digemari dan bukannya disahkan, dan tiada peraturan mantap yang menyatakan bahawa objek berjisim planet yang mengorbit kerdil perang adalah exomoon.

Semakan tanpa sensasi

Apa yang diperhatikan: Dua puluh tiga pengukuran halaju jejari per malam dari CD-35 2722 B mengandungi keberkalaan yang kuat sekitar 171 hari. Katai cokelatnya sendiri diimej secara langsung; pengiring yang dicadangkan tidak.

Apa yang lebih digemari penulis: Jika isyarat orbital, satu pengiring eksentrik dengan jisim minimum dekat Jupiter memberi tafsiran paling ringkas yang munasabah secara dinamik untuk data sekarang.

Apa yang masih terbuka: Dua pengiring dapat memadankan halaju jejari, walaupun sistem yang diuji biasanya tidak stabil; kebolehubahan kerdil perang jangka panjang tidak dikecualikan pada prinsipnya; dan sudut pandang yang tidak diketahui membuat jisim sebenarnya tetap tidak ditentukan.

Apa yang tidak ditetapkan makalah: Exomoon disahkan pertama, satelit yang dilihat langsung,

tepat satu objek pengorbit, jisim sebenarnya 0,92 Jupiter, atau kebarangkalian 99,9% bahawa model fizikal yang digemari benar.

Apa yang akan meningkatkan keyakinan: Pengukuran halaju jejari lanjutan yang merangkumi lebih banyak fasa orbit, menguji adakah isyarat 171 hari bertahan, dan mengambil data pada masa ketika model satu dan dua pengiring membuat ramalan berbeza.

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