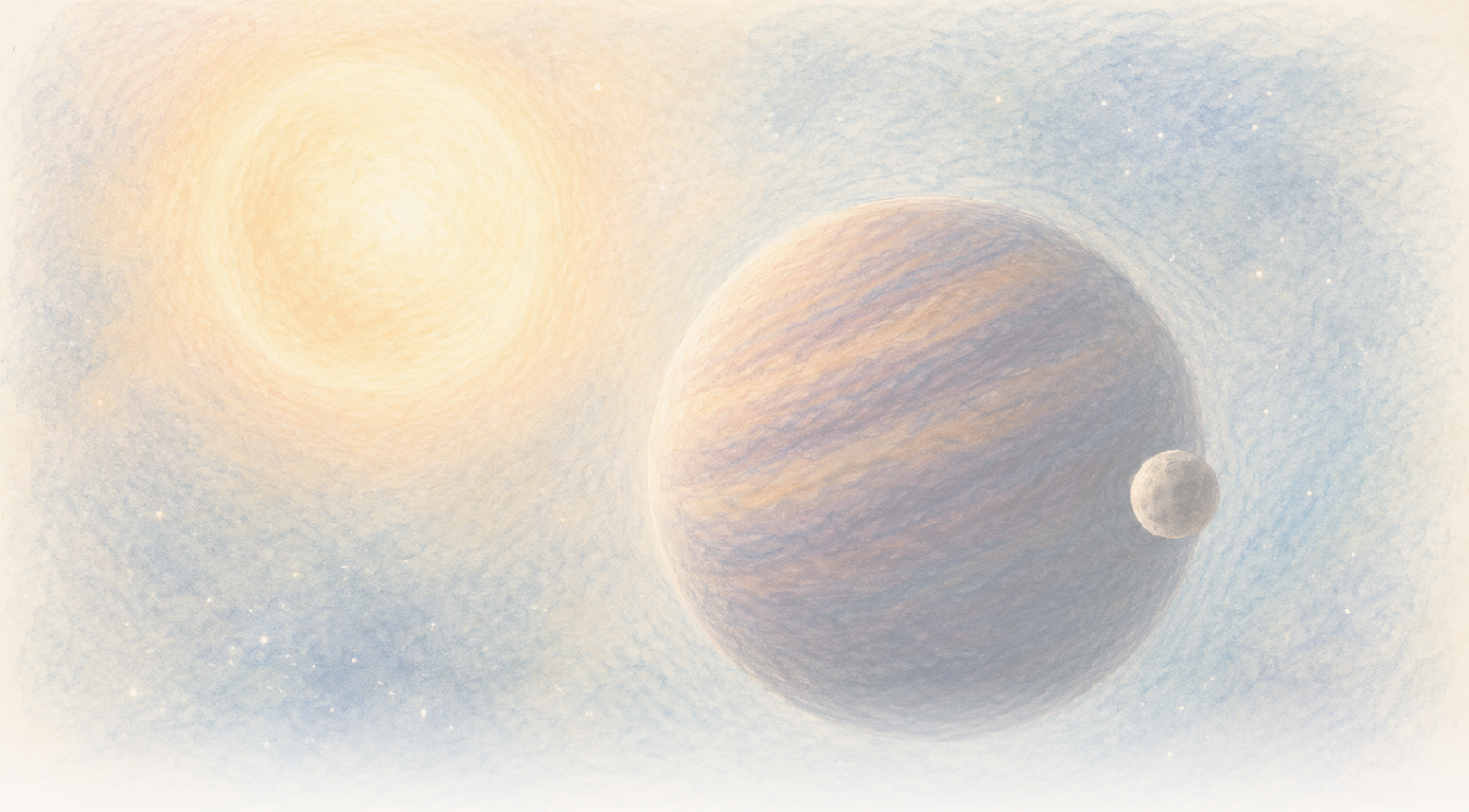


The Clean Paper

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

Qəhvəyi cırtdan hər 171 gündə yırğalanır kimi görünür. Onu gizli bir dünya çəkə bilər, amma məlumatlar hələ iki cismi də mümkün sayır

İyirmi üç yüksək keyfiyyətli spektr CD-35 2722 B-nin hərəkətində güclü periodik sürüşmə göstərir. Üstün tutulan model Yupiterə yaxın minimum kütləli, eksentrik orbitli bir yoldaşdır, amma iki cisimli model eyni siqnalı təqlid edə bilər, qəhvəyi cırtdanın uzunmüddətli dəyişkənliyi prinsipcə hələ mümkündür və burada "ekzomoon" sözünün qəbul olunmuş dəqiq sərhədi yoxdur.

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

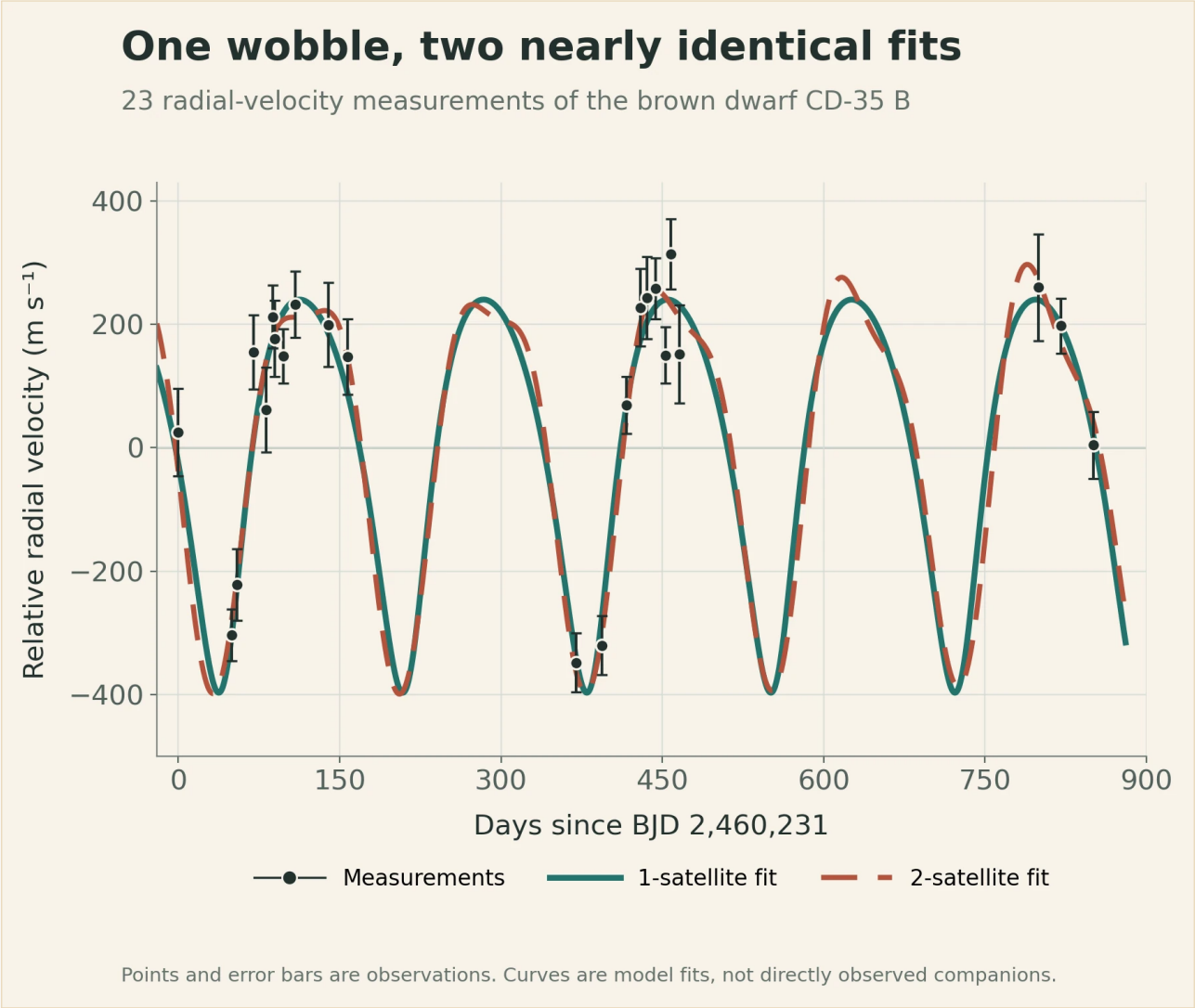
Qəhvəyi cırtdan hər 171 gündə yırğalanır kimi görünür. Onu gizli bir dünya çəkə bilər, amma məlumatlar hələ iki cismi də mümkün sayır

Astronomlar CD-35 2722 B-ni ətrafında dövr etdiyi ulduzdan ayrı, öz işıq nöqtəsi kimi görə bilirlər. Bu, kütləsinə görə nəhəng planetlərlə ulduzlar arasında yerləşən qəhvəyi cırtdandır: təxminən 37 Yupiter kütləsi ilə tipik nəhəng planetdən daha ağırdır, amma normal hidrogen yandıran ulduz deyil. Qəhvəyi cırtdanın öz ətrafında dövr edə biləcək daha kiçik cismi isə görə bilmirlər. Təsdiqlənərsə, bu ən daxili cisim özü ulduzun ətrafında dövr edən daha böyük sub-ulduz cismin ətrafındakı satellitdən ibarət müşahidə olunmuş ilk belə iyerarxiyanı yaradardı.

Onların gördüyü şey bunun əvəzinə ritmdir. Bəzi gecələr qəhvəyi cırtdan Yerə doğru hərəkət edərkən onun işığı azacıq sürüşür. Başqa gecələr qəhvəyi cırtdan bizdən uzaqlaşarkən əks istiqamətdə sürüşür. Nümunə təxminən hər **171 gündə** təkrarlanır.

Bu irəli-geri hərəkəti görünməyən yoldaş yarada bilər: iki cisim ortaq kütlə mərkəzi ətrafında dövr edəndə kiçik cisim böyüyün ətrafında hərəkət edir, amma böyük cisim də çox kiçik dövrə vurur. Bu ritm orbitaldırsa, yeni Nature məqaləsi CD-35 2722 B ətrafında ölçülən bu hərəkətin üstün tutulan izahı kimi planet kütləli bir cisim təqdim edir.

Bu, heyrətamiz ehtimaldır, ayın fotosu deyil. İyirmi üç yüksək keyfiyyətli müşahidə gecəsi güclü periodik siqnal göstərir. Siqnalı dünyaya çevirmək üçün model lazımdır və indiki məlumatlar hələ birdən çox arxitekturaya imkan verir. Onlar qəhvəyi cırtdanın özündəki yavaş dəyişiklikləri də tam istisna etmir.



Qara nöqtələr və xəta çubuqları 23 gecəlik radial-sürət ölçmələridir. Bütöv və kəsik əyrilər ən yaxşı uyğunlaşan bir- və iki-satellit modelləridir. Onların demək olar üst-üstə düşməsi məlumatların sistemin arxitekturasını hələ müəyyən etmədən periodik yırğalanmanı necə göstərə bildiyini izah edir; heç bir əyri yoldaşın birbaşa görüntüsü deyil.

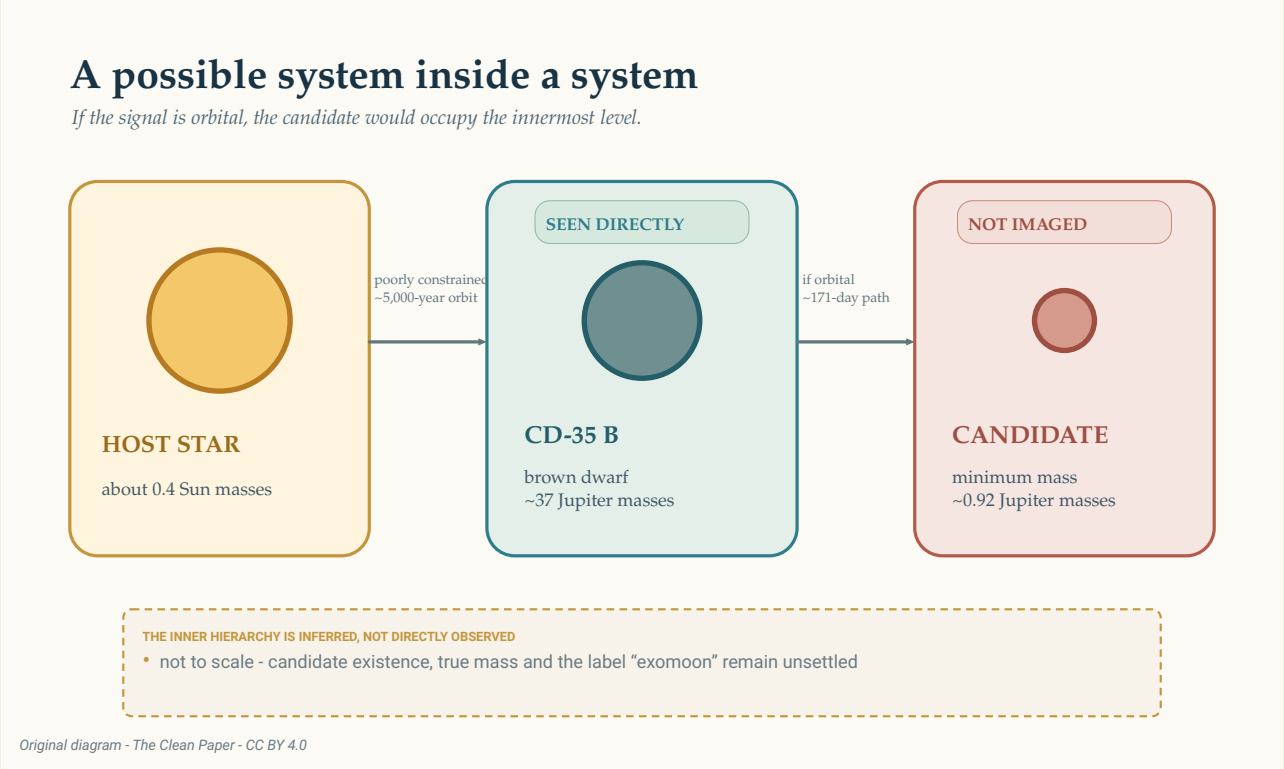
Original chart — The Clean Paper; data from Hoy et al., Nature (2026), Figure 1 source workbook CC BY 4.0

Sistem içində sistem

CD-35 2722 B **qəhvəyi cırtdandır**: tanış kateqoriyalar arasında qalan cisimdir. Tipik nəhəng planetdən daha ağırdır, amma normal hidrogen yandıran ulduz kimi parlamaq üçün kifayət qədər kütləli deyil. Məqalə təxminən **37 Yupiter** kütləsi qiymətləndirməsindən istifadə edir.

Qəhvəyi cırtdan birbaşa görüntüləmə ilə kəşf edilib, yəni teleskoplar onun işığını ana ulduzun işığından ayrıca ayırd edə bilib. Göydə ulduzdan təxminən 2,8 bucaq saniyəsi uzaqda görünür. Cütü birləşdirən geniş orbit zəif məlumdur, amma indiki qiymətləndirmələr təxminən **5.000 il** çəkən çox uzanmış yol təklif edir.

Periodik siqnal orbitaldırsa, çıxarılan arxitektura namizədi bir səviyyə daha dərin yerləşdirərdi: ulduzun ətrafında qəhvəyi cırtdan, qəhvəyi cırtdanın ətrafında isə planet kütləli yoldaş.



Siqnal orbitaldırsa, namizəd bu mümkün iyerarxiyanın ən daxili səviyyəsində olardı. Yalnız qəhvəyi cırtdan birbaşa görülüb. Ulduz ətrafındakı xarici orbit zəif məhdudlaşdırılıb, təxminən 171 günlük daxili yol isə qəhvəyi cırtdanın ölçülmüş yırğalanmasından çıxarılıb. Ölçülər və məsafələr miqyasa uyğun deyil.

The Clean Paper CC BY 4.0

Bu mümkün iyerarxiyanı çəkmək asandır. Onun fiziki reallığı və terminologiyası isə hələ həll olunmayıb. Qəhvəyi cırtdanın ətrafında dövr edən planet kütləli cismi ay, planet, yoxsa sadəcə satellit saymaq lazımdır? Astronomiyada bu sualı həll edən qəbul olunmuş qayda yoxdur. Buna görə məqalə daha geniş **ekzosatellit** sözündən istifadə edir.

23 gecə necə yırğalanmaya çevrildi?

Komanda CD-35 2722 B-ni (onun NASA Eyes on Exoplanets səhifəsinə baxın) Avropa Cənub Rəsədxanasının Very Large Telescope teleskopundakı yüksək ayırdetməli CRIRES+ spektroqrafı ilə müşahidə edib. 2023-cü ilin oktyabrından 2026-cı ilin fevralına qədər 26 müşahidə epoxası əldə edilib. Birində siqnal çox zəif olub, pis hava şəraitində götürülən ikisi rədd edilərək təkrar çəkilib və nəticədə **23 yüksək keyfiyyətli gecə** qalıb.

Spektroqraf işığı xətlərin detallı naxışına ayırır. Mənbə Yerə doğru və ya Yerdən uzağa hərəkət edəndə bu xətlər çox az sürüşür. Görmə xətti boyunca bu hərəkətin təkrar ölçmələri **radial**

sürətlər adlanır. Onlar gizli cismi göstərmir. Müşahidə olunan cismin görünməyən dartının təsiri altında necə hərəkət edə biləcəyini göstərir.

Ölçmələrdə ən güclü periodiklik təxminən 170 gün yaxınlığındadır. O, tədqiqatın **0,1% yanlış həyəcan ehtimalı həddini** keçir. Bu hədd testin fərziyyələri daxilində səs-küyün ən azı bu qədər güclü periodoqram zirvəsi yaratmasının nə qədər tez-tez baş verəcəyini soruşur. Bu, satellitin mövcudluğuna 99,9% ehtimal demək deyil və öz-özlüyündə bir yoldaşın, yoxsa iki yoldaşın olduğunu demir.

> **Radial-sürət siqnalı nəyi müəyyən edə bilər?**
>
> Radial sürət spektral xətlərin təkrarlanan sürüşmələrini müşahidəçiyə doğru və ondan uzaq hərəkət ölçmələrinə çevirir. Təkrarlanan nümunə orbit tənlikləri ilə uyğunlaşdırıla bilər və tədqiqatçılar bundan periodu, ölçülən yırğalanmanın ölçüsünü və yoldaşın minimum kütləsini çıxara bilərlər.
> Amma metod yoldaşın şəklini birbaşa çəkmir. Ulduz və ya subulduz atmosferi də spektral xətləri sürüşdürə bilər, müşahidə cədvəli aldadıcı ritmlər yarada bilər və müxtəlif orbital quruluşlar bir-birini təqlid edə bilər. Siqnal, onun fiziki izahı və çıxarılan cismə verilən ad ayrı suallardır.

Orbital cavaba keçməzdən əvvəl nümunələməyə diqqət yetirmək lazımdır. Xüsusilə aşağı radial-sürətə malik dörd ölçmə nümunədə ciddi çəki daşıyır. Onlar yaxşı olduğu bildirilən şəraitdə iki cüt halında baş verib və müəlliflər hər dəfə bir nöqtəni çıxarıb təhlili yenidən etdikdə heç biri təkbaşına siqnalı yaratmayıb. Buna baxmayaraq mümkün orbital fazaların yalnız bir hissəsi nümunələnib. İki ildən çox müddətə səpələnmiş 23 gecə fasiləsiz örtük deyil.

Müəlliflər mümkün yarımillik artefaktı da sınaqdan keçiriblər. Yerin dəyişən hərəkətinə və ya cihaz profilinə qeyri-dəqiq düzəliş illik yalan siqnal yarada, müşahidə nümunələməsi isə onu yarım Yer ili, yəni **182,5 gün** kimi göstərə bilərdi. Onların üstün tutduğu period **171,11 gün**, qeyri-müəyyənliyi +0,53/-0,36 gündür; müəlliflər bunun 182,5 gündən təxminən 20 standart sapma uzaqda olduğunu bildirirlər. Həmçinin Yerin dəyişən hərəkəti, seeing, atmosfer su buxarı və araşdırdıqları cihaz xüsusiyyətləri ilə korrelyasiya tapmayıblar. Bunlar vacib nəzarətlərdir. Onlar orbital izahı modelləşdirməyə kifayət qədər inandırıcı edir, amma özləri cismi müəyyən etmir.

Ən sadə orbital cavab: bir yoldaş

Üstün tutulan modeldə bir cisim qəhvəyi cırtdanın ətrafında hər 171,11 gündə eksentrik, yəni bir qədər uzanmış orbitlə hərəkət edir. Uyğunlaşdırılmış orbitin eksentrisiteti təxminən **0,27**, böyük yarımoxu isə təxminən **0,200 astronomik vahiddir** — Yer–Günəş orta məsafəsinin təxminən beşdə biri.

Ölçülən yırğalanmanın amplitudası təxminən **saniyədə 318 metrdir**. Model bu hərəkətdən

yoldaş üçün təxminən **0,92 Yupiter kütləsi** minimum kütlə çıxarır.

Minimum sözü vacibdir. Radial sürət orbital hərəkətin yalnız bizə doğru və bizdən uzağa yönəlmiş hissəsini ölçür. Orbit kənardan görünürsə, hərəkətin böyük hissəsi bu xətt boyunca olur. Daha üstdən, üzbəüz istiqamətdə görünürsə, hərəkətin çoxu göy müstəvisində gedir və eyni ölçülən yırğalanmanı yaratmaq üçün daha ağır yoldaş lazım olar.

Astronomlar nəticəni **m sin(i)** kimi yazırlar: kütlə vurulsun orbitin naməlum meyl bucağının, yəni baxış bucağının sinusu. Məlumatlar həqiqi kütlənin özünü yox, həmin hasili məhdudlaşdırır. Buna görə təxminən 0,92 Yupiter kütləsi cismin dəqiq kütləsi yox, aşağı həddir.

> **Baxış bucağı kütləni niyə gizlədir?**
>
> Dairəvi qaçış yoluna yandan baxdığınızı təsəvvür edin. Qaçan insan təkrar-təkrar sizə doğru və sizdən uzaq hərəkət edir, buna görə bu hərəkət komponentini ölçmək asandır. İndi eyni yola yuxarıdan baxın. Qaçan insan əsasən baxışınız boyunca yan tərəfə hərəkət edir, sizə doğru və ya sizdən uzağa isə çox az.
> Radial sürət yalnız birinci komponenti görür. `sin(i)` riyazi amili orbital hərəkətin nə qədərinin bizim görmə xəttimiz boyunca yönəldiyini təsvir edir. Meyl `i` məlum olmayana qədər çıxarılan kütlə minimum olaraq qalır.

Sonra müəlliflər bu orbitin özünü tez dağıtmaq əvəzinə davam edə bilib-bilməyəcəyini soruşublar. Onların ədədi sınaqları bir-yoldaş modelinin ümumiyyətlə sabit olduğunu göstərib. Bu, onu siqnalın fiziki cəhətdən ağlabatan şərhinə çevirir. İkinci aşkarlanma demək deyil.

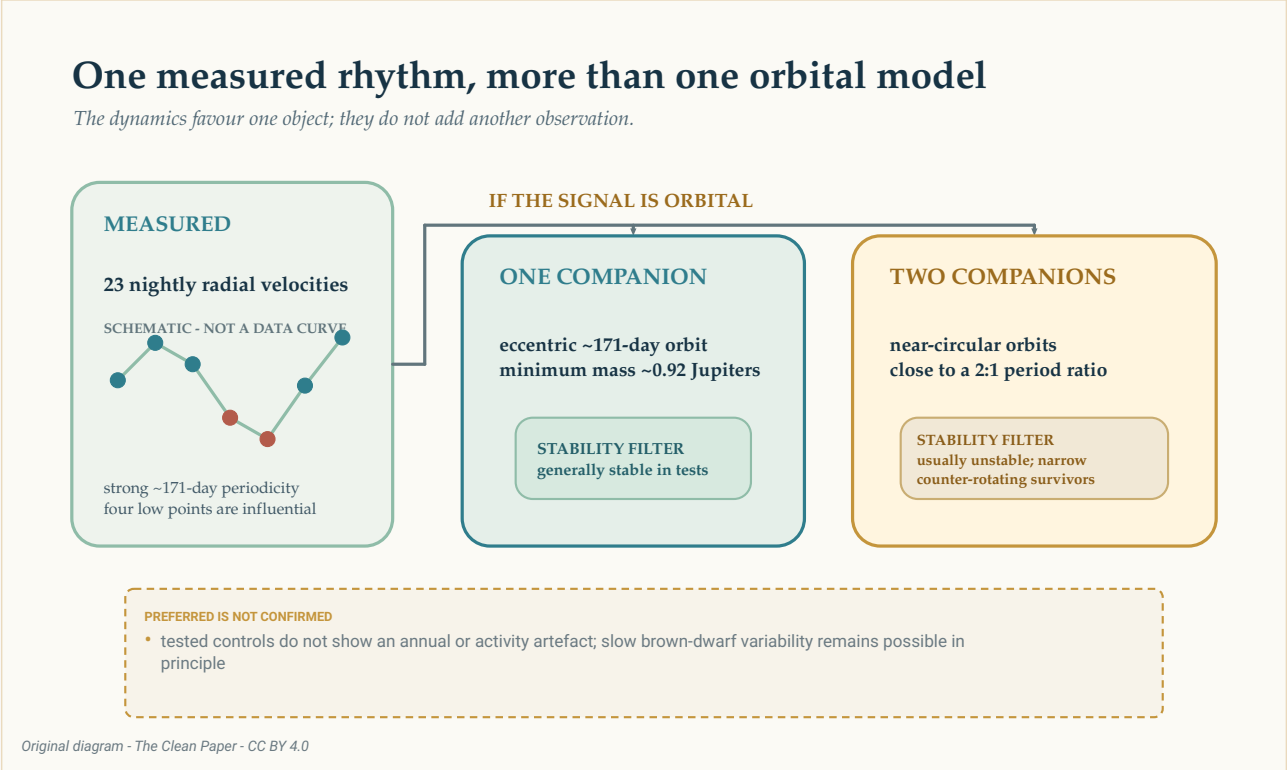
Narahat cavab: iki yoldaş birini təqlid edə bilər

Eksentrik radial-sürət siqnalının məlum qeyri-müəyyənliyi var. Bəzi şərtlərdə demək olar dairəvi orbitlərdə olan iki cisimdən birinin periodu digərindən təxminən iki dəfə uzun olduqda onların birləşmiş nümunəsi uzanmış orbitdəki bir cismin siqnalına bənzəyə bilər.

Bu qeyri-müəyyənlik burada da görünür. İki-yoldaş modeli indiki ölçmələrə xarici siqnal təxminən 171 gün, daxili siqnal isə daha qısa period olmaqla uyğunlaşa bilər. Müşahidə vaxtları bütün fazaları bərabər nümunələmədiyinə görə qısa siqnalın bir neçə aliası var. Seçilmiş 23 gecə arasında uzun boşluqlar olduğuna görə müxtəlif sınaq periodları səfərlər arasında görünməyən dövrlərin fərqli sayını hesablaya və yenə eyni ölçmələrə uyğun gələ bilər. Buna görə 14, 70, 88 və 115 gün yaxınlığındakı namizəd periodlar dörd müstəqil aşkarlanmış ritm yox, zəif nümunələnmiş bir qısa siqnalın alternativ uyğunlaşmalarıdır.

Müəlliflər zəif məhdudlaşdırılmış 13–17 günlük pəncərəni rədd edirlər. Bu sahədə uyğunlaşdırma inandırıcı tək period ayırmır: təxminən 20 gündən aşağı çoxsaylı bir-birinə yaxın həllər aşağı kadensli ölçmələri təkrar yarada bilir və bütün pəncərəni nümunələmə artefaktı kimi göstərir. Qalan pəncərələr arasında təxminən 88 günlük həll 70 və 115 günlük

alternativlərdən daha yaxşı uyğunlaşır, amma məqalənin məlum ikinci period iddia etməsinə yetəcək qədər yox. Cədvəldəki ən yaxşı uyğunlaşmada xarici cismin minimum kütləsi təxminən 0,87 Yupiter kütləsi, daxili cismin isə təxminən 0,22 Yupiter kütləsidir. Bu rəqəmlər üstün tutulmayan modeli təsvir edir; iki müəyyən edilmiş dünyanın ölçmələri deyil.



Təxminən 171 günlük siqnal orbitaldırsa, eyni geniş radial-sürət nümunəsi bir eksentrik yoldaşla və ya period nisbəti ikiyə-birə yaxın iki demək olar dairəvi yoldaşla təsvir oluna bilər. Sabitlik sınaqları bir-cisimli şərhi üstün tutur, amma modeli şəklə çevirmir və qəhvəyi cırtdanın bütün növ yavaş dəyişkənliyini istisna etmir.

The Clean Paper CC BY 4.0

Sabitlik hesablamaları müqayisəni kəskinləşdirir. Sınaqdan keçirilmiş iki-yoldaş quruluşlarının əksəriyyəti simulyasiya olunan bir neçə yüz il ərzində cisimlərdən birini sistemdən atıb. Sağ qalan konfiqurasiyalar orbitlərin demək olar eyni müstəvidə, amma əks istiqamətlərdə hərəkət etdiyi dar və qeyri-adi sahədə yerləşirdi. Ana ulduz əlavə qeyri-sabit sahələr də yaratdı.

Bu, sınaqdan keçirilmiş iki-yoldaş sistemləri ilə müqayisədə bir eksentrik yoldaşı üstün tutmaq üçün səbəbdir. Təbiətin daha sadə modeli seçdiyinin sübutu deyil. Sabitlik radial sürətlər ölçüldükdən sonra mümkün şərhləri filtrdən keçirir; əyriyə yeni müşahidə nöqtəsi əlavə etmir.

> **Bir eksentrik orbit necə iki dairəvi orbitə bənzəyə bilər?**
>
> Mükəmməl dairəvi orbit sadə təkrarlanan radial-sürət dalğası yaradır. Eksentrik orbit bu dalğaya təhriflər əlavə edir. Periodları təxminən ikiyə-bir nisbətində olan iki dairəvi

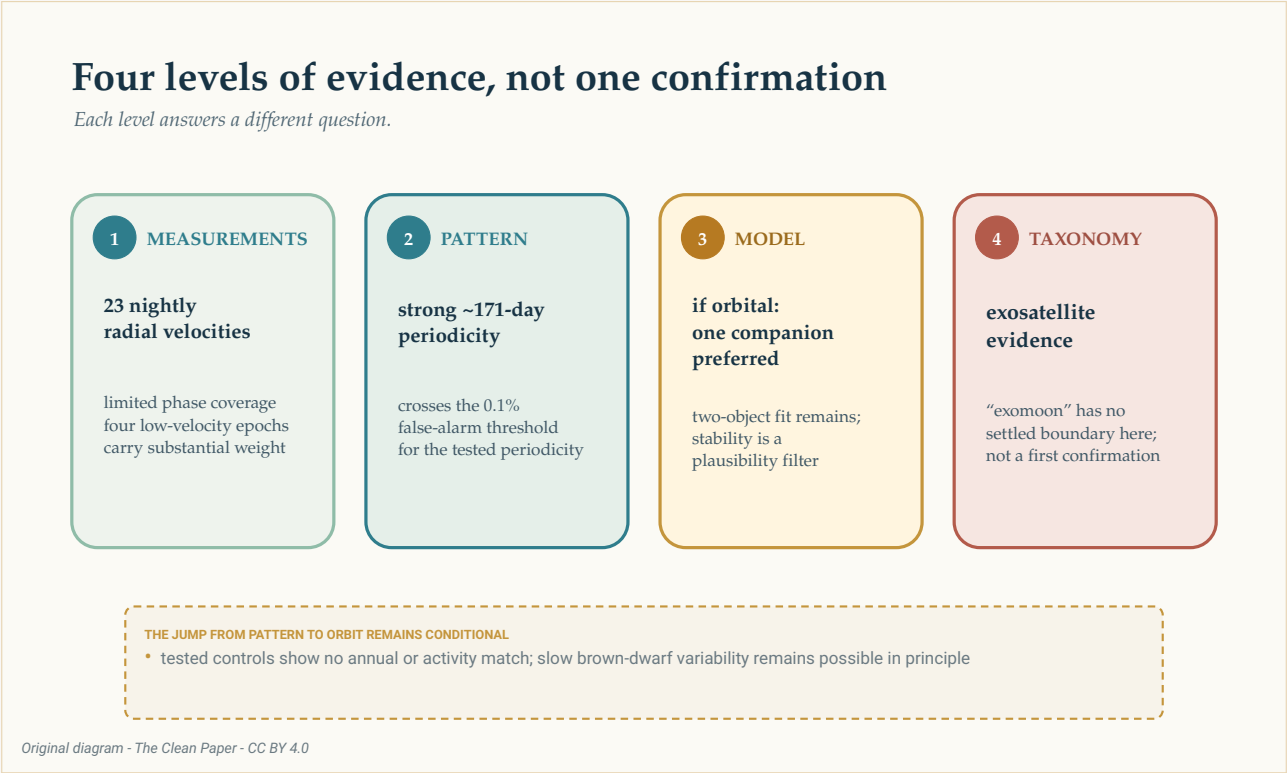
> orbit elə birləşə bilər ki, bir siqnal əsas ritmi, digəri isə oxşar təhrifi təmin etsin. Bu, **orbital degenerasiyadır**: fərqli fiziki sistemlər oxşar ölçmələr yaradır. Modellərin fərqli sürətlər proqnozlaşdırdığı vaxtlarda daha çox müşahidə bu bərabərliyi poza bilər. Dinamika sınağı hər təklif olunan sistemin yaşaya bilib-bilməyəcəyini soruşmaqla kömək edir, amma həmin müşahidələri əvəz edə bilməz.

Ritm qəhvəyi cırtdanın özündən gələ bilərmi?

Qəhvəyi cırtdan səssiz sınaq kütləsi deyil. Atmosferi fırlanır, buludlar yaradır və maqnit aktivliyi ola bilər. Dəyişən səth naxışları spektral xətlərin formasını dəyişdirərək hərəkəti təqlid edə bilər.

CD-35 2722 B-nin qiymətləndirilmiş maksimum fırlanma periodu təxminən **0,65 gündür**, 171 gündən çox qısadır. Komanda sınaqdan keçirdiyi aktivlik modellərində güclü qısa fırlanma siqnalı və ya inandırıcı bulud və qranulyasiya tipli siqnal tapmayıb. Onlar həmçinin illik nümunələməni və cihaz kəmiyyətlərini yoxlayıb, 171 günlük ritmə uyğunluq aşkar etməyiblər.

Bu yoxlamalar alternativləri daraldır, amma məqalə bütün daxili dəyişkənliyin aradan qaldırıldığını iddia etmir. Qəhvəyi cırtdandakı uzunmüddətli maqnit aktivliyi və ya atmosfer dövranı prinsipcə istisna edilə bilməz. Bu qalan ehtimal orbital modellərin yanında göstərilməlidir, arxalarında gizlədilməməlidir.



Sübut ayrı səviyyələr üzrə yüksəlir: məhdud faza örtüyü olan 23 gecəlik radial sürət, təxminən 171 günlük güclü

periodiklik, siqnal orbitaldırsa üstün tutulan bir-yoldaş modeli və nəhayət qeyri-müəyyən “ekzomoon” etiketi. Pilləkən ölçməni, statistik nümunəni, fiziki şərhi və taksonomiyanı ayırır; təsdiq oxu deyil.

The Clean Paper CC BY 4.0

Bu ekzomoon-durmu?

Günəş sistemində ay planetin ətrafında dövr edir. CD-35 2722 B qəhvəyi cırtdandır və çıxarılan yoldaşın həqiqi kütləsi hələ məlum deyil. Bir cisim planet–qəhvəyi cırtdan sərhədinə, digəri isə ay–planet sərhədinə yaxın olanda tanış adlar çətinləşir.

Məqalə ilk təsdiqlənmiş ekzomoon iddiası etmir. O deyir ki, hələ heç bir ekzomoon inamla aşkarlanmayıb, planet kütləli **ekzosatellit** üçün sübut təqdim edir və sistemi mübahisəsiz aşkarlanmaya doğru addım adlandırır. Mümkün yenilik barədə müzakirə şərti başlayır: siqnal həqiqi çıxarsa.

Bu ehtiyat nəticəni boş etmir. Zəif qəhvəyi cırtdan yoldaşdan radial sürətləri birbaşa ölçmək çətindir. Davam edən müşahidələr siqnalı qoruyarsa, sistem planet axtarış metodlarının səma iyerarxiyasının daha bir səviyyəsinə enə bildiyini göstərə bilər.

Növbəti müşahidə mövsümü sadəcə əlavə nöqtələr verməkdən çox şey edə bilər. Bir- və iki-yoldaş modelləri müəyyən gələcək vaxtlarda fərqli sürətlər proqnozlaşdırır. Çatışmayan orbital fazaları dolduran ölçmələr 171 günlük ritmin qalıb-qalmadığını yoxlaya, dörd aşağı nöqtənin təsirini azalda və rəqib əyriləri bir-birindən ayıra bilər.

Hələlik ən dürüst təsvir qəhvəyi cırtdanın yanında asılmış yeni ay deyil. Gecədən-gecəyə təkrarlanan və kiçik periodik sürüşmə daşıyan spektrdir. Həmin ritmin içində bir dünya ola bilər. Nailiyyət çıxarış hələ tamamlanmadan ondan nə qədər məlumat çıxarmağın mümkün olduğunu öyrənməkdir.

Təmiz xülasə

Astronomlar 2023-cü ilin oktyabrından 2026-cı ilin fevralına qədər 23 yüksək keyfiyyətli gecədə birbaşa görüntülənmiş CD-35 2722 B qəhvəyi cırtdanının radial sürətini ölçüblər. Onun spektral xətləri təxminən 171 gün yaxınlığında güclü periodik sürüşmə göstərir. Üstün tutulan orbital model minimum kütləsi təxminən 0,92 Yupiter kütləsi olan bir eksentrik yoldaşı ehtiva edir, amma orbital meyl məlum olmadığından həqiqi kütlə məlum deyil. İki demək olar dairəvi yoldaş eyni geniş siqnalı təqlid edə bilər, baxmayaraq ki sınaqdan keçirilmiş iki-cisimli konfiqurasiyaların çoxu dinamik qeyri-sabit idi. Dörd aşağı radial-sürət epoxası təsirlidir və orbital faza örtüyü məhdud olaraq qalır: müşahidələr mümkün 171 günlük dövrün yalnız seçilmiş hissələrini nümunələyir, bütün fazaları fasiləsiz izləmir. Sınaqlar fırlanmanı, illik nümunələməni, havanı və araşdırılmış cihaz xüsusiyyətlərini mənbə kimi müəyyən etmədi, amma qəhvəyi cırtdanın uzunmüddətli dəyişkənliyi prinsipcə istisna

edilə bilməz. Görünməyən cisim birbaşa görüntülənməyib, bir-cisim modeli təsdiqlənmiş yox, üstün tutulan modeldir və qəhvəyi cırtdanın ətrafında dövr edən planet kütləli cismin ekzomoon sayılması barədə qəbul olunmuş qayda yoxdur.

No-BS yoxlaması

Nə müşahidə olunub: CD-35 2722 B-nin 23 gecəlik radial-sürət ölçməsində təxminən 171 günlük güclü periodiklik var. Qəhvəyi cırtdanın özü birbaşa görüntülənib; təklif olunan yoldaş yox.

Müəlliflər nəyi üstün tutur: Siqnal orbitaldırsa, minimum kütləsi Yupiterə yaxın bir eksentrik yoldaş indiki məlumatların ən sadə və dinamik cəhətdən ağlabatan izahını verir.

Nə açıq qalır: İki yoldaş radial sürətlərə uyğunlaşa bilər, baxmayaraq ki sınaqdan keçirilmiş sistemlər adətən qeyri-sabitdir; qəhvəyi cırtdanın uzunmüddətli dəyişkənliyi prinsipcə istisna edilməyib; naməlum baxış bucağı yoldaşın həqiqi kütləsini qeyri-müəyyən saxlayır.

Məqalə nəyi müəyyən etmir: İlk təsdiqlənmiş ekzomoonu, birbaşa görülmüş satelliti, dəqiq olaraq bir orbit edən cismi, həqiqi 0,92 Yupiter kütləsini və ya üstün tutulan fiziki modelin doğru olmasına 99,9% ehtimalı.

İnamı nə artırardı: Daha çox orbital fazanı əhatə edən, 171 günlük siqnalın qalıb-qalmadığını yoxlayan və bir- və iki-yoldaş modellərinin fərqli proqnoz verdiyi vaxtları nümunələyən davamlı radial-sürət ölçmələri.

Mənbələr

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