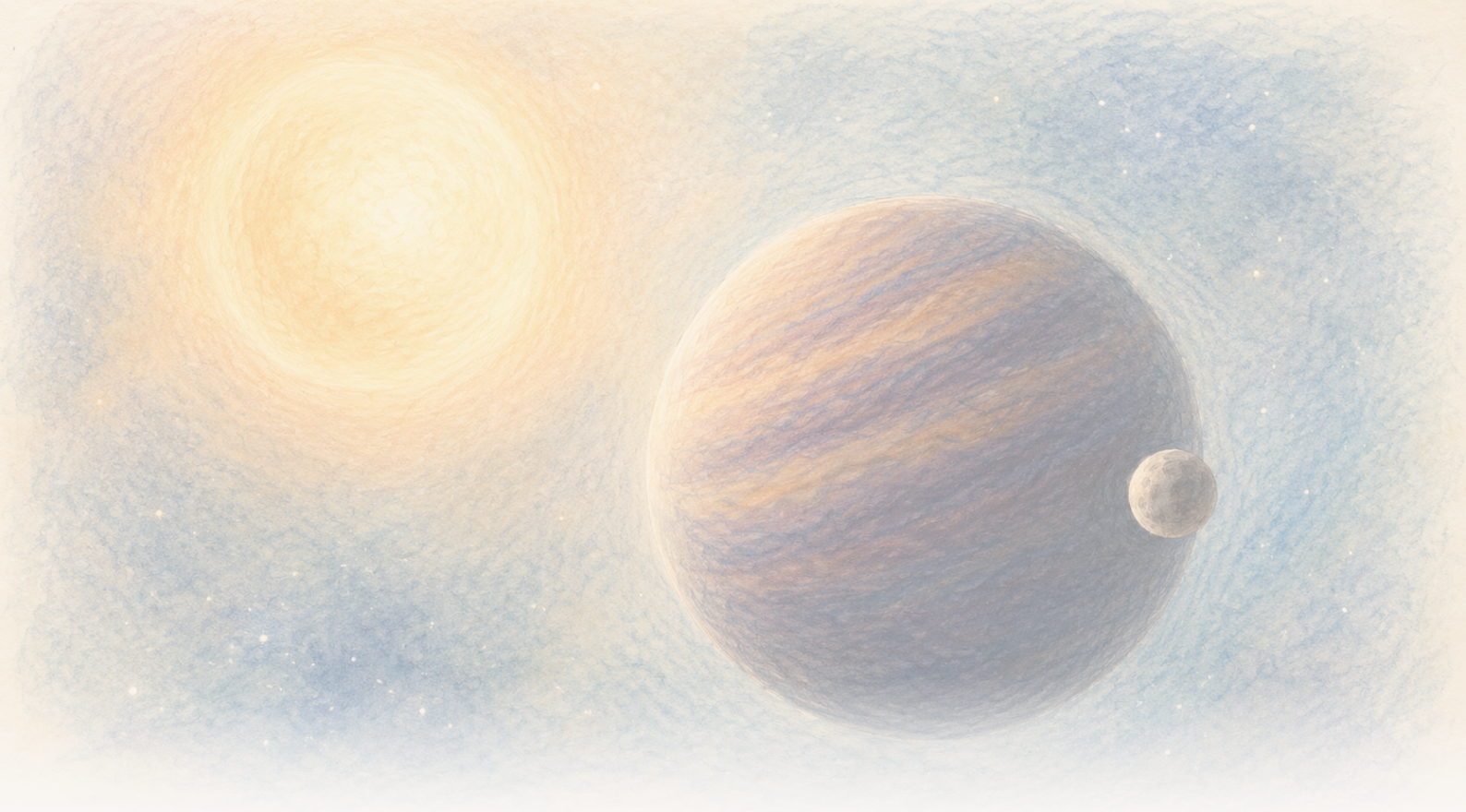


The Clean Paper

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

一颗褐矮星似乎每 171 天摆动一次：可能有一个隐藏天体在拉它，但现有数据仍容得下两个

23 个高质量夜晚的光谱显示，*CD-35 2722 B* 的运动存在很强的周期性变化。首选模型是一颗偏心轨道伴体，最低质量接近木星；但两个天体也能模拟出近似信号，原则上仍不能排除褐矮星自身的长期变化，而且这里“系外卫星”一词究竟该如何划界也没有公认标准。

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

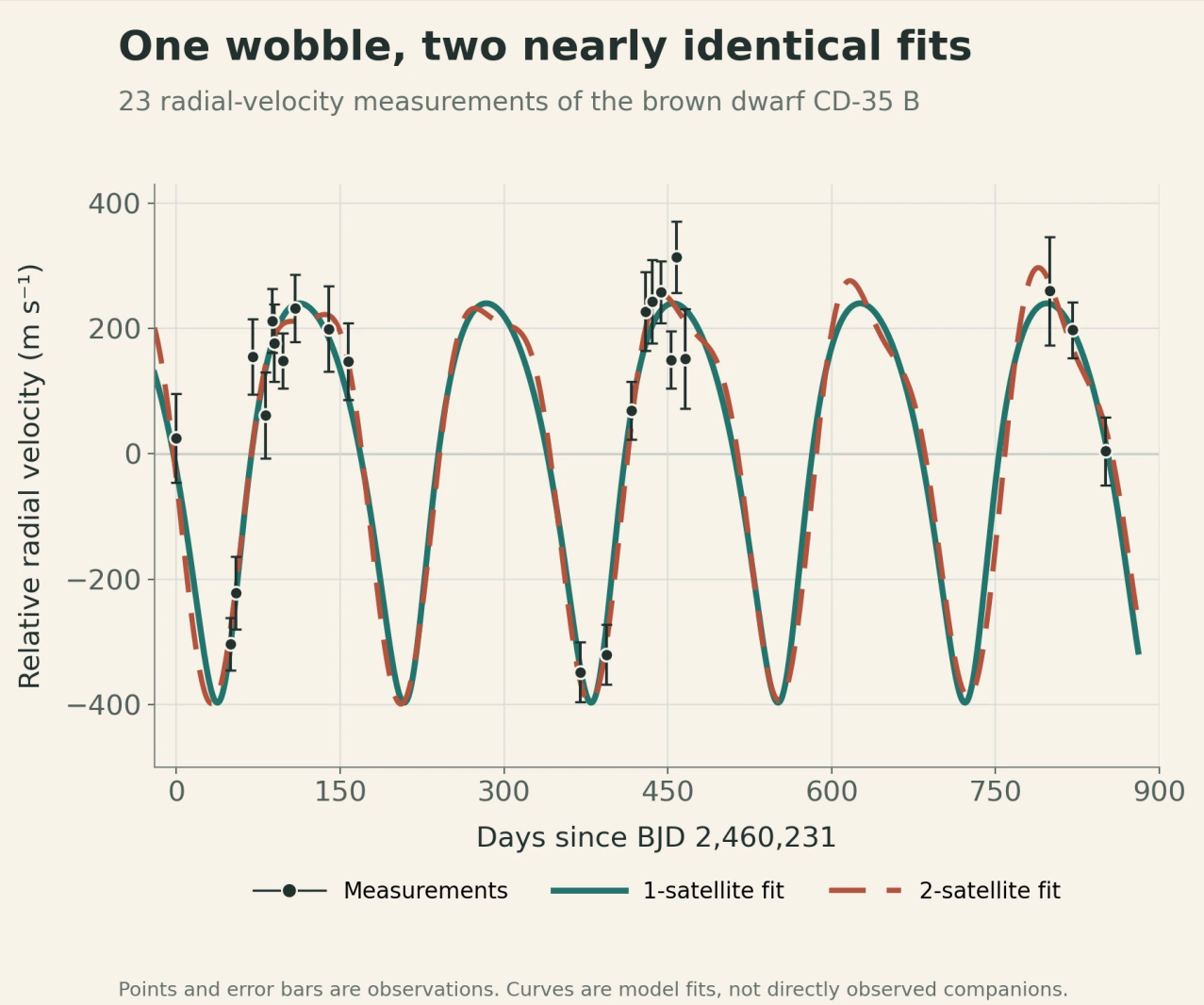
一颗褐矮星似乎每 171 天摆动一次。可能有一个隐藏天体在拉它，但现有数据仍容得下两个

天文学家可以把 CD-35 2722 B 看成一个独立光点，与它所环绕的恒星分开。它是一颗褐矮星，质量介于巨行星和恒星之间：约为 37 个木星质量，比典型巨行星重得多，却还不是能够正常进行氢聚变的恒星。研究人员看不到的，是可能正在绕这颗褐矮星运行的那个更小天体。如果最终得到确认，这将成为首个被观测到的三级层级系统：一颗较大的亚恒星天体绕恒星运行，而它自己又拥有一个卫星级伴体。

研究人员实际看到的不是那颗伴体，而是一种节律。有些夜晚，褐矮星向地球运动，它的光谱会发生很小的位移；另一些夜晚，它远离地球，位移方向相反。这个模式大约每 **171 天**重复一次。

这种来回运动正是不可见伴体能够造成的：两个天体绕共同质心运行时，小天体绕大天体转，而大天体本身也会走一个小得多的环。如果这个周期确实来自轨道运动，一篇新的 Nature 论文认为，一颗行星质量天体是解释 CD-35 2722 B 这种摆动的首选方案。

这是一种非常引人注目的可能性，但它并不是一张“卫星照片”。23 个高质量观测夜晚揭示了一个很强的周期信号；要把这个信号解释成一个真实天体，还必须依赖模型，而目前的数据仍允许不止一种系统结构。它们也没有完全排除褐矮星自身发生缓慢变化的可能性。



黑点和误差条是 23 个夜晚的径向速度测量。实线和虚线分别是最佳单伴体与双伴体模型。两条曲线几乎重合，说明现有数据可以清楚显示周期性摆动，却还不足以确定系统究竟是什么结构；任何一条曲线都不是伴体的直接图像。

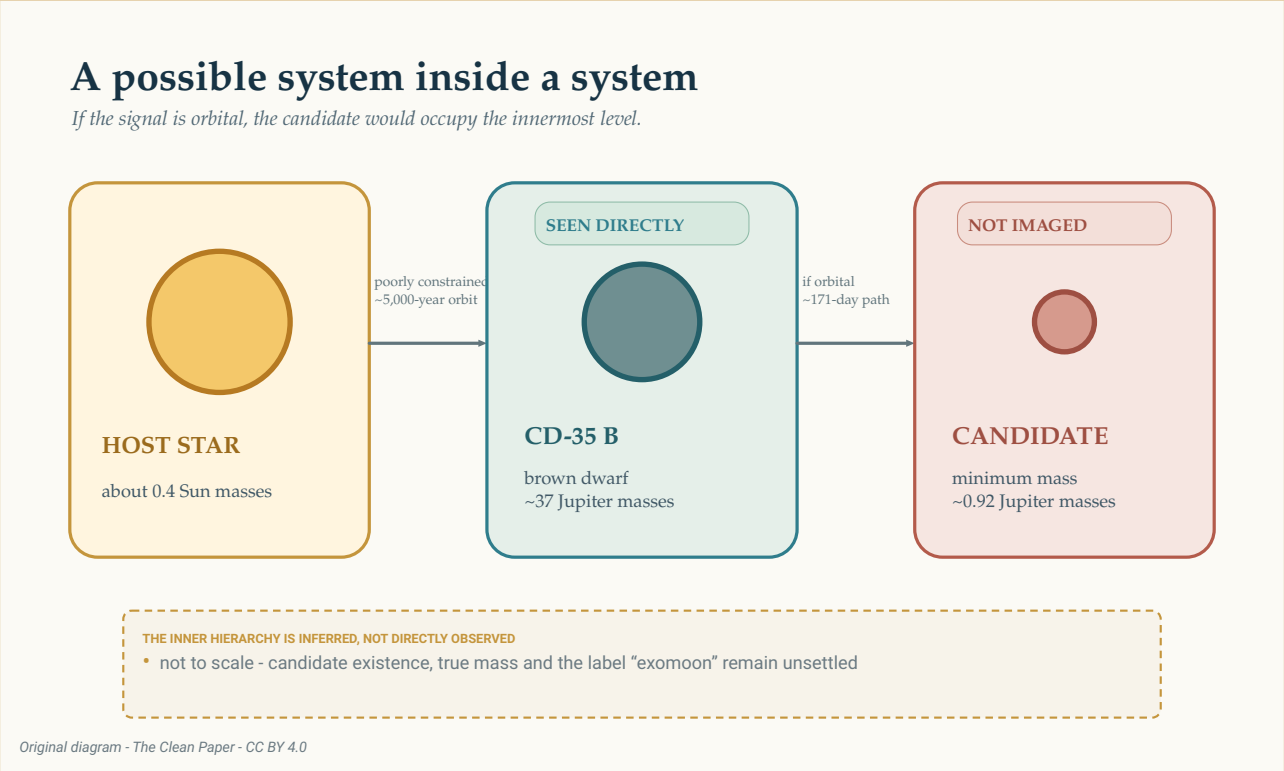
Original chart —The Clean Paper; data from Hoy et al., Nature (2026), Figure 1 source workbook CC BY 4.0

一个系统套在另一个系统里面

CD-35 2722 B 是一颗**褐矮星**，正处在我们熟悉的分类边界之间。它比典型巨行星更重，却又没有足够质量像普通恒星那样靠氢聚变发光。论文采用的估计质量约为 **37 个木星质量**。

这颗褐矮星最初由直接成像发现，也就是说，望远镜能够把它的光与主星的光分辨开来。在天空中，它与主星相距约 2.8 角秒。两者之间的宽轨道约束很差，但现有估计认为，这是一条高度拉长的轨道，周期约 **5,000 年**。

如果周期信号确实来自轨道运动，那么候选天体会再向系统内部深入一级：恒星外面绕着一颗褐矮星，而这颗褐矮星本身又被一个行星质量伴体环绕。



如果信号来自轨道运动，候选天体会位于这个可能层级系统的最内层。只有褐矮星本身已经被直接看见。它绕恒星的外轨道约束很差，而约 171 天的内部轨道则是根据褐矮星测得的摆动推断出来的。图中大小和距离均不按比例。

The Clean Paper CC BY 4.0

这样的层级很容易画出来，但它是否真实存在、应该叫什么，却都还没有定论。一颗行星质量天体绕褐矮星运行，到底算卫星、行星，还是只应统称为伴体？天文学界并没有一个公认规则可以解决这个

问题。因此，论文采用了更宽泛的 **exosatellite（系外伴体/卫星体）**一词。

23 个夜晚如何变成一个 “摆动”

团队使用欧洲南方天文台甚大望远镜上的高分辨率光谱仪 CRIRES+ 观测 CD-35 2722 B（也可参见它在 NASA Eyes on Exoplanets 中的条目）。从 2023 年 10 月到 2026 年 2 月，他们一共获得 26 个观测时期。其中一个信号太弱，另外两个因天气不佳被剔除并重做，最终留下 **23 个高质量夜晚**。

光谱仪会把光拆成精细的谱线图样。当光源朝地球靠近或远离时，这些谱线会发生极其微小的位移。反复测量这种沿视线方向的运动，就得到**径向速度**。径向速度并不会直接显示隐藏天体；它显示的是我们真正观测到的天体是否受到某个看不见的引力源拉扯。

测量中最强的周期出现在约 170 天附近，并跨过了研究设定的 **0.1% 假警报概率阈值**。这个阈值问的是：在检验本身的假设成立时，纯噪声有多常见会产生至少这么高的周期图峰值。它并不等于 “有 99.9% 概率存在一颗卫星”，更不能单独告诉我们到底是一颗伴体还是两颗。

> **径向速度信号能确定什么？**
>
> 径向速度把光谱线反复发生的微小位移，转换成天体朝向或远离观察者运动的测量。如果这种模式反复出现，可以用轨道方程进行拟合，从而推断周期、被观测天体摆动的幅度，以及伴体的最低质量。
> 但这种方法不会直接给伴体拍照。恒星或亚恒星大气本身也可能改变谱线；观测时间安排可能制造误导性的周期；不同轨道结构还可能互相模仿。因此，“存在一个信号”“这个信号由什么物理过程产生”“应该怎样给推断出的天体分类”，是三个不同问题。

在接受轨道解释之前，观测采样本身值得仔细看。四个特别低的径向速度测量对整体模式影响很大。它们分成两对出现，论文报告当时观测条件良好；作者还逐点删除数据重新分析，没有任何单独一个数据点能独自制造整个信号。即便如此，可能的轨道相位仍只采样了一部分。两年多里分散的 23 个夜晚，与连续覆盖完全不是一回事。

作者还检验了一种 “半年伪信号” 的可能。如果对地球自身运动变化或仪器线型的校正不够完善，可能产生一个假的年度信号，而不均匀采样又可能把它混叠成半个地球年，也就是 **182.5 天**。

他们首选的周期是 **171.11 天**，不确定度为 +0.53/-0.36 天；作者报告称，这与 182.5 天相差约 20 个标准差。他们还没有发现这个信号与地球运动、视宁度、大气水汽或所检查的仪器参数存在相关。这些都是重要的控制检验，使轨道解释足够有说服力，值得进一步建模；但这些控制本身还不能确定隐藏天体是什么。

最简单的轨道答案：一个伴体

在首选模型中，一个天体每 171.11 天沿一条偏心、也就是略微拉长的轨道绕褐矮星运行。拟合得到的轨道偏心率约为 **0.27**，半长轴约 **0.200 天文单位**——大约是地球与太阳平均距离的五分之一。

测得的摆动振幅约为 **每秒 318 米**。根据这段运动，模型给出的伴体最低质量约为**木星质量的 0.92 倍**。

这里的 “最低” 非常重要。径向速度只能测量轨道运动中朝向或远离我们的那一部分。如果轨道几乎侧面对着我们，大部分运动都会投影到视线方向；如果轨道更接近正面对着我们，大量运动就发生在天空平面上，为了产生同样大小的径向速度摆动，真实伴体就必须更重。

天文学家把结果写成 **m sin(i)**：质量乘以未知轨道倾角（观察角度）的正弦。数据约束的是这个乘积，而不是质量本身。因此，约 0.92 个木星质量是一个下限，不是对天体真实质量的精确测量。

> **为什么观察角度会把质量藏起来?**
>
> 想象你从侧面看一条圆形跑道。跑步者会不断朝你靠近、又离你远去，这个方向的运动很容易测量。现在改为从正上方俯视同一条跑道：跑步者主要是在你的视野中横向移动，朝你靠近或远离的成分就很小。
> 径向速度只能看到第一种运动分量。数学因子 `sin(i)` 描述轨道运动中有多少投影到我们的视线方向。在倾角 `i` 尚未知时，由径向速度推断出的质量只能是最低质量。

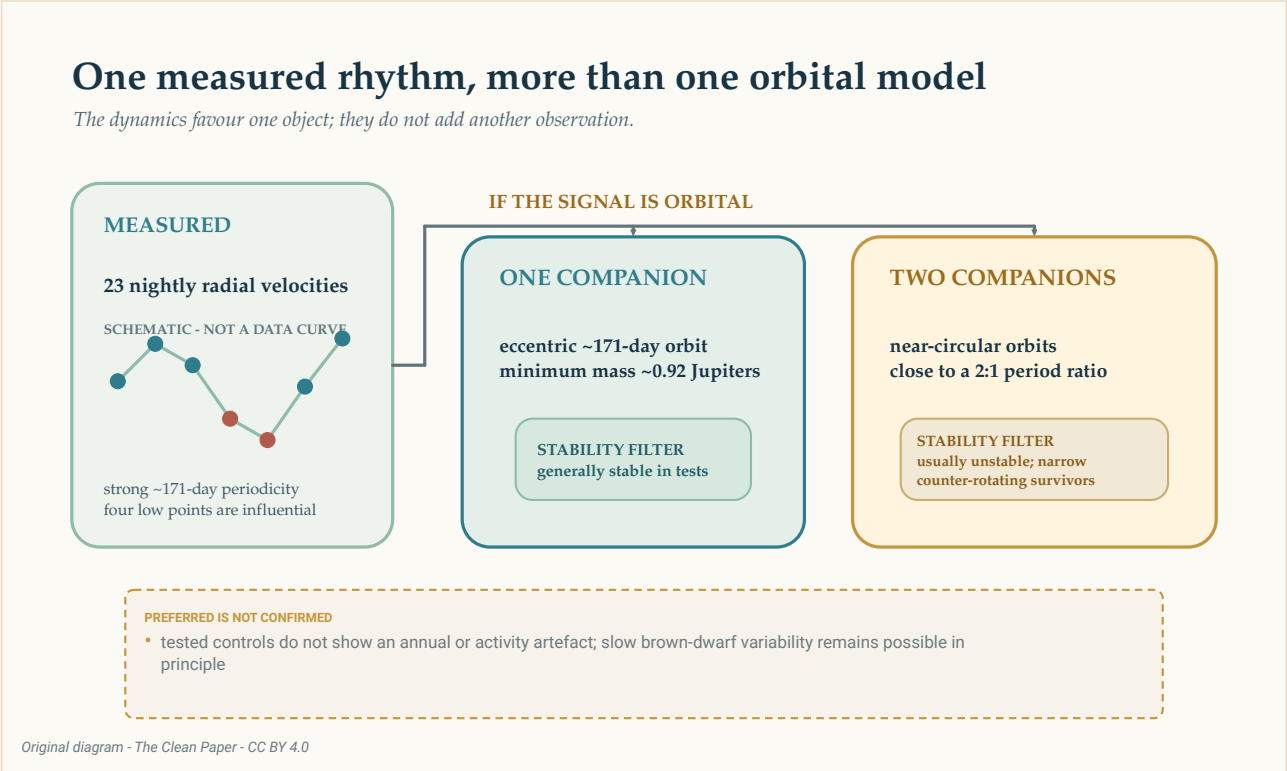
随后，作者检验这种轨道是否能长期存在，而不是很快因动力学不稳定而破坏。数值测试发现，单伴体模型总体上是稳定的。这说明它是对信号的一种物理上可行的解释，但并不构成 “第二次探测”。

麻烦的答案：两个伴体也能模仿一个

偏心轨道的径向速度信号存在一种已知歧义。在某些条件下，两颗沿近圆轨道运行的天体，如果其中一颗的周期大约是另一颗的两倍，它们叠加后的信号会很像一颗天体沿偏心轨道运行。

这里就出现了这种歧义。双伴体模型同样可以拟合当前数据：外侧信号约 171 天，内侧还有一个较短周期信号。由于观测时间没有均匀覆盖所有相位，较短周期存在多个混叠解。23 个被选中的夜晚之间有很长空档，因此不同试探周期可以在两次观测之间容纳不同数量的 “看不见的完整周期”，却仍然与同一组数据对齐。于是，约 14、70、88 和 115 天这些候选周期，并不是四个独立检测出的节律，而只是同一个采样不足的短周期信号的不同拟合方案。

作者排除了约 13–17 天这个约束很差的窗口。在这个区间里，拟合无法锁定一个有说服力的周期：20 天以下有很多彼此接近的解都能重现低频采样数据，因此整个窗口更可能只是采样伪影。在剩余窗口中，约 88 天的方案比约 70 天和 115 天方案拟合得更好，但还远不足以让论文声称发现了第二个已知周期。在表格中的最佳双伴体拟合里，外侧天体最低质量约为 0.87 个木星质量，内侧约为 0.22 个木星质量。这些数字描述的是一个不受青睐的模型，并不是对两个已确认天体的测量。



如果约 171 天的信号来自轨道运动，同一种大体径向速度模式既可以由一颗偏心轨道伴体表示，也可以由两颗周期接近 2:1 的近圆轨道伴体表示。稳定性测试更支持单天体解释，但它不会把模型变成图像，也不能排除所有形式的褐矮星长期变化。

The Clean Paper CC BY 4.0

稳定性计算进一步拉开了两种解释的差距。大多数测试过的双伴体结构都会在几百个模拟年内把其中一个天体弹出系统。能够存活的结构只占一个狭窄而反常的区域：两条轨道几乎在同一平面，却朝相反方向运行。主星的存在还会带来额外的不稳定区域。

因此，这是偏好“一颗偏心伴体”而不是这些已测试双伴体系统的一个理由。但它并不能证明大自然一定选择了更简单的模型。稳定性分析是在径向速度已经测得之后，用来筛掉部分可能解释；它不会在曲线上增加新的观测点。

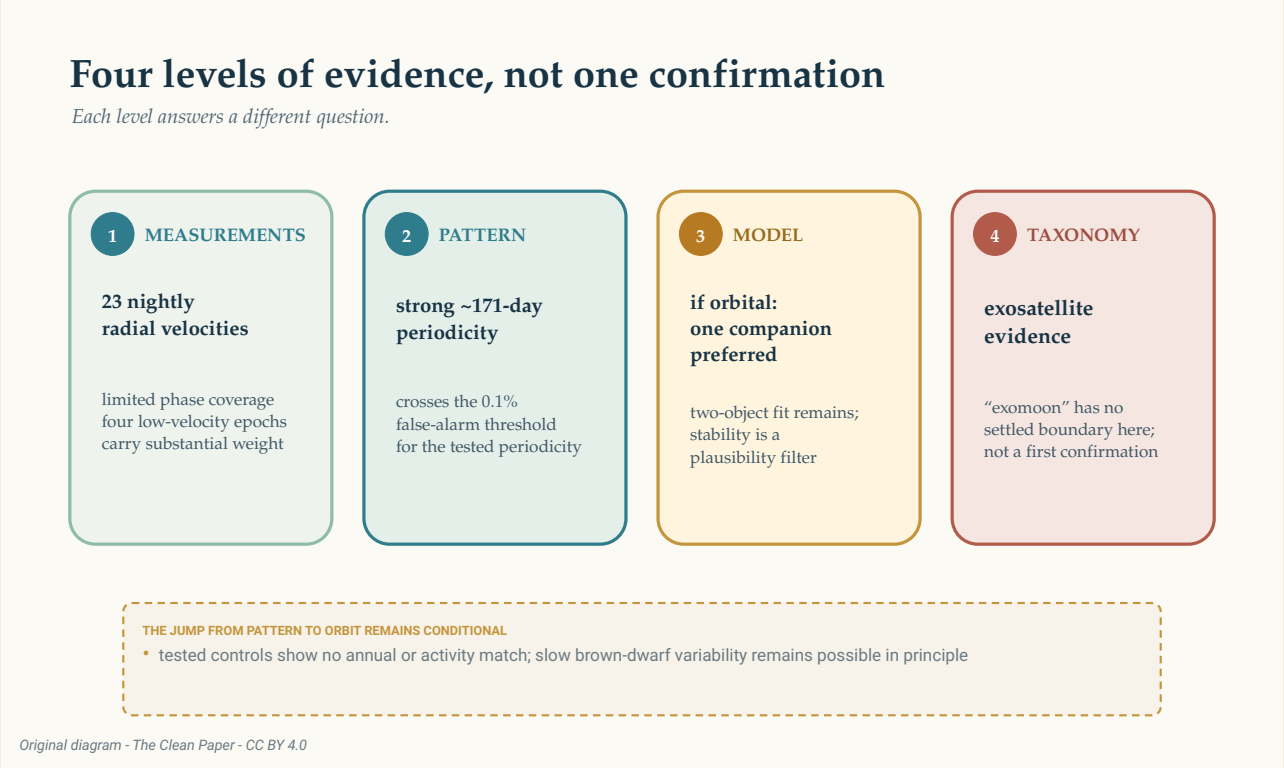
> **为什么一条偏心轨道会看起来像两条圆轨道？**
>
> 理想圆轨道会产生简单、重复的径向速度波形。偏心轨道会在这个波形上增加一些畸变。如果两条圆轨道的周期接近 2:1，它们的信号叠加后，可以由一个提供主要节律、另一个提供近似的畸变。
> 这叫作**轨道简并**：不同的物理系统会产生相似的测量结果。在那些不同模型预言速度不同的时间点继续观测，就有机会打破这种平局。动力学测试可以进一步问每种候选系统能否长期存活，但它不能替代新的观测。

这个节律会不会来自褐矮星自己?

褐矮星不是一个沉默的试验质量。它的大气会自转、形成云层，也可能存在磁活动。表面结构随时间变化，可以改变谱线形状，从而伪装成运动。

CD-35 2722 B 的估计最大自转周期约为 **0.65 天**，远短于 171 天。团队在所测试的活动模型中，没有恢复出很强的短期自转信号，也没有找到有说服力的云层或颗粒对流类似信号。他们还检查了年度采样和多项仪器量，同样没有发现与 171 天节律相匹配的来源。

这些检查缩小了替代解释的空间，但论文并没有宣称所有内禀变化都已排除。原则上，褐矮星内部长期尺度的磁活动或大气环流仍不能被排除。这个剩余可能性应该和轨道模型一起摆在桌面上，而不是藏在结论之后。



证据分成清楚的几个层级：23 个夜晚、轨道相位覆盖有限的径向速度；一个很强的约 171 天周期；如果信号来自轨道运动，则首选单伴体模型；最后，“系外卫星” 这个分类标签本身仍没有定论。这个阶梯区分了测量、统计模式、物理解释和分类学，并不是一支指向 “已确认” 的箭头。

The Clean Paper CC BY 4.0

它算是一颗系外卫星吗?

在太阳系里，卫星绕行星运行。CD-35 2722 B 是褐矮星，而推断伴体的真实质量还不知道。当一个天体靠近 “行星—褐矮星” 边界，另一个又靠近 “卫星—行星” 边界时，我们熟悉的名称开始显得勉强。

论文没有宣称发现了第一颗已确认系外卫星。它指出目前还没有任何系外卫星得到令人信服的探测，随后给出一颗行星质量 **exosatellite** 的证据，并把这个系统称为走向无争议探测的一步。论文讨论 “是否可能是首次” 时也始终带着条件：前提是这个信号最终证明真实可靠。

这种谨慎并不会让结果失去意义。直接从一个暗淡的褐矮星伴体本身测量径向速度非常困难。如果后续观测继续保留这一信号，它将说明常用于寻找行星的方法可以再深入天体层级一层。

再增加一个观测季，不只是 “多几个点” 而已。单伴体和双伴体模型在未来某些特定时间会预言不同速度。在缺失轨道相位上补测，可以检验 171 天节律是否持续存在，降低那四个低速度点的影响，并让彼此竞争的曲线真正分开。

因此，现在最诚实的图像并不是 “一颗新卫星挂在褐矮星旁边”。它是一份又一夜重复测量的光谱，其中带着一个很小却周期性的位移。这个节律里可能藏着一个世界。真正的成果，是我们已经能从中推断出这么多，同时还不假装推断已经完成。

简明总结

天文学家在 2023 年 10 月至 2026 年 2 月之间的 23 个高质量夜晚，对直接成像发现的褐矮星 CD-35 2722 B 测量了径向速度。它的光谱线显示一个很强的约 171 天周期位移。首选轨道模型包含一颗偏心轨道伴体，最低质量约为木星的 0.92 倍，但由于轨道倾角未知，真实质量也未知。两颗近圆轨道伴体可以模仿同样的大体信号，不过测试过的大多数双天体结构都在动力学上不稳定。四个低速度观测时期影响较大，轨道相位覆盖仍然有限：这些观测只采到了可能的 171 天周期中的部分区间，并没有连续追踪完整相位。测试没有把自转、年度采样、天气或所检查的仪器参数识别为信号来源，但原则上仍不能排除褐矮星的长期变化。隐藏天体没有被直接成像；单天体模型只是首选而不是已确认；而 “行星质量天体绕褐矮星运行是否应该叫系外卫星”，也没有统一规则。

不绕弯检查

实际观测到了什么： CD-35 2722 B 的 23 个夜晚径向速度测量中存在一个很强的约 171 天周期。褐矮星本身是直接成像看到的；假设中的伴体不是。

作者首选什么解释：如果信号来自轨道运动，那么一颗最低质量接近木星、沿偏心轨道运行的伴体，是当前数据最简单、动力学上也可行的解释。

什么仍然没有解决：两颗伴体也能拟合径向速度，尽管测试过的系统通常不稳定；原则上没有排除褐矮星长期变化；未知的观察倾角也使伴体真实质量无法确定。

论文没有确立什么：第一颗已确认的系外卫星；一颗被直接看见的卫星；系统中恰好只有一个轨道天体；真实质量就是 0.92 个木星质量；或者首选物理模型有 99.9% 的概率正确。

什么会提高信心：继续做径向速度测量，覆盖更多轨道相位，检验 171 天信号是否持续，并在单伴体与双伴体模型预言不同的时间点进行观测。

来源

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