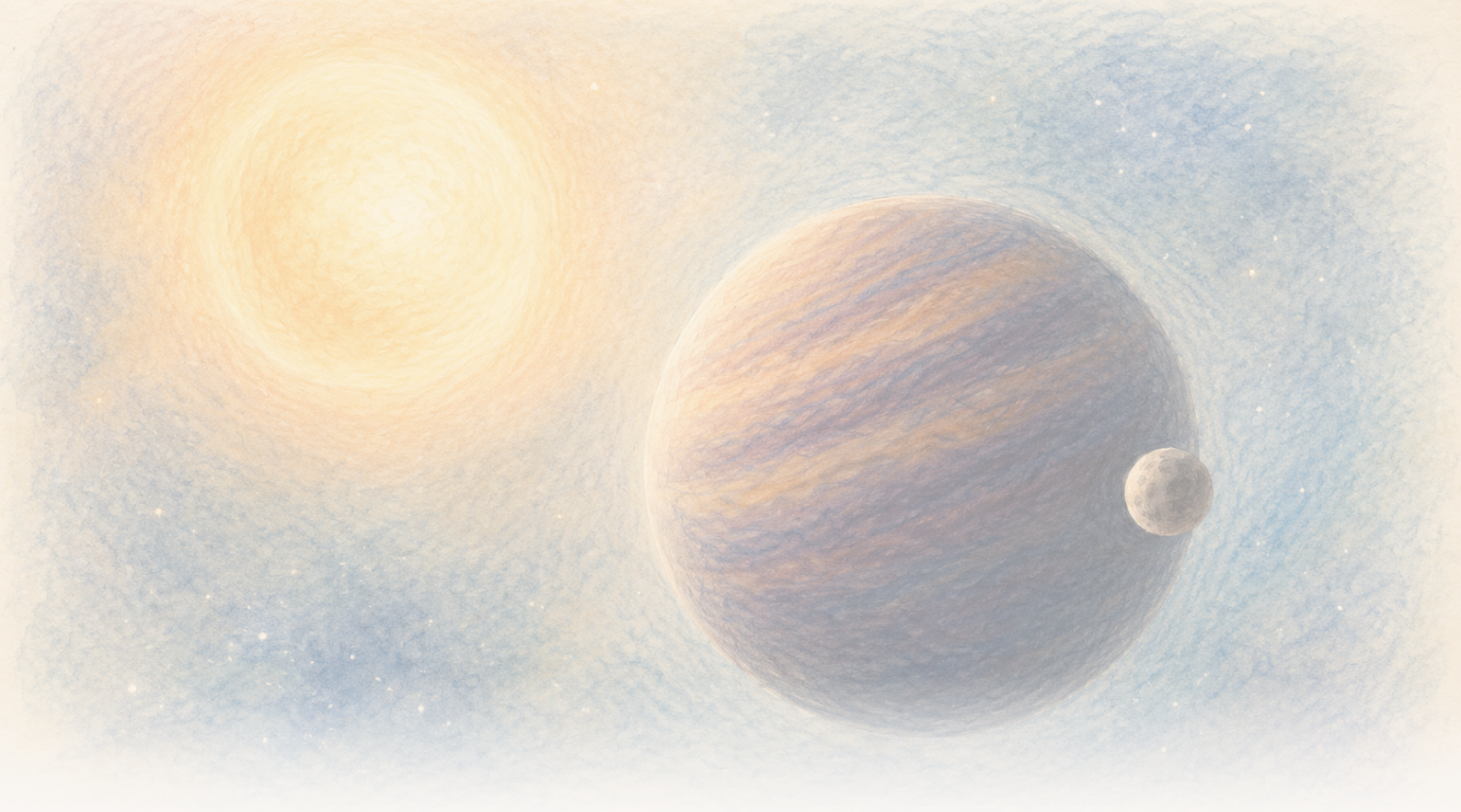


The Clean Paper

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

褐色矮星が 171 日ごとに揺れているように見える。引っ張る隠れた天体は 1 つかもしれないが、データは 2 つも許す

高品質な *23* 夜分のスペクトルから、*CD-35 2722 B* の運動に強い周期的変化が見つかった。最も好まれるモデルは、木星に近い最小質量をもつ *1* つの離心軌道伴星だが、*2* 天体モデルでも同じ信号を模倣できる。原理的には褐色矮星自身の長周期変動も残っており、ここで「系外衛星」と呼ぶ境界にも定説はない。

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

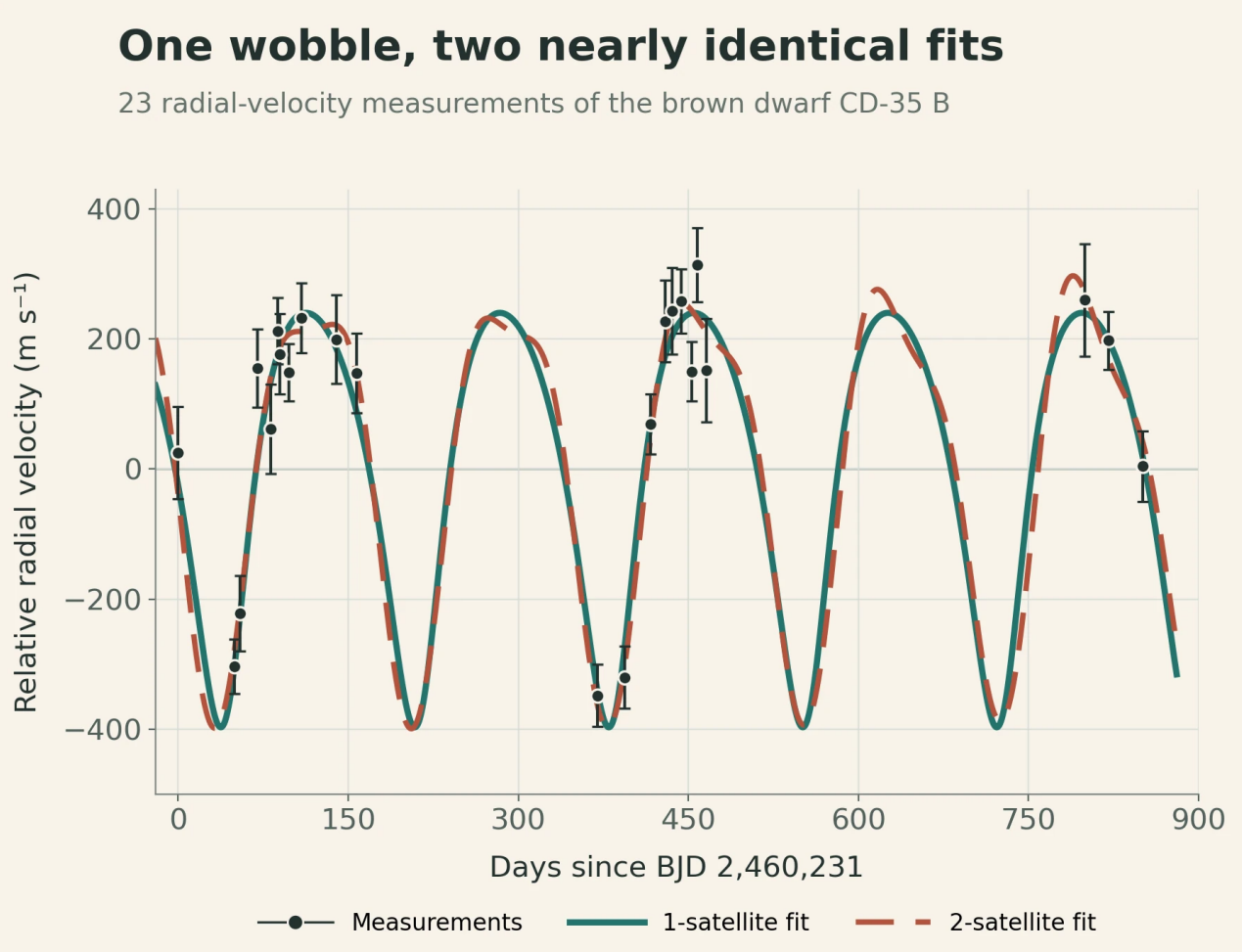
褐色矮星が 171 日ごとに揺れているように見える。引っ張る隠れた天体は 1 つかもしれないが、データは 2 つも許す

天文学者は CD-35 2722 B を、それが回る恒星とは別の光点として直接見ることができる。これは**褐色矮星**で、巨大惑星と恒星の間の質量域にある天体だ。推定約 37 木星質量で、典型的な巨大惑星より重いが、通常の水素燃焼星ではない。しかし、その褐色矮星自身の周囲を回っているかもしれない、さらに小さな天体は見えていない。もし確認されれば、恒星を回る大型の亜恒星天体の周囲をさらに衛星が回るという階層構造を、初めて観測した系になる。

代わりに見えているのは「リズム」だ。ある夜には褐色矮星が地球へ近づくため、その光がわずかにずれる。別の夜には、遠ざかるため逆向きにずれる。そのパターンがおよそ **171 日**ごとに繰り返される。

こうした往復運動は、見えない伴星が作りうる。2 天体が共通重心の周囲を回ると、小さい天体が大きい天体を回るだけでなく、大きい天体も小さな輪を描く。もしこのリズムが軌道運動なら、新しいNature 論文は、CD-35 2722 B で測られた揺れを説明する最有力候補として、1 つの惑星質量天体を提示している。

驚くべき可能性ではあるが、月を撮影した写真ではない。高品質な 23 夜分の観測から強い周期信号は出ている。しかし、その信号を「天体」に変えるにはモデルが必要で、現在のデータは複数の系構造をまだ許している。褐色矮星自身のゆっくりした変化も完全には排除されていない。



黒点と誤差棒は 23 夜分の視線速度測定。実線と破線は、それぞれ 1 衛星モデルと 2 衛星モデルの最良フィットである。ほとんど重なって見えることが、周期的な揺れを検出できても系の構造まではまだ決められない理由を示す。どちらの曲線も伴星の直接画像ではない。

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

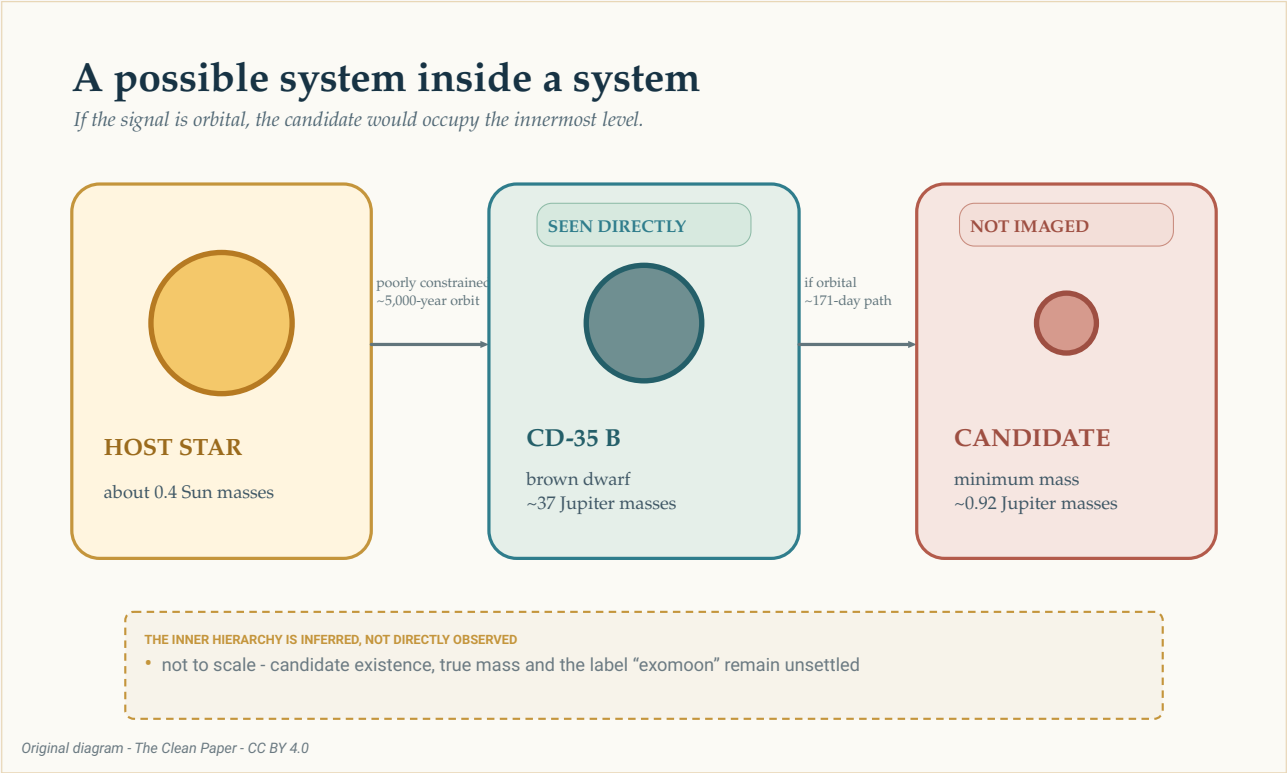
系の中にさらに系がある

CD-35 2722 B は**褐色矮星**、つまり馴染みのある分類の間に位置する天体だ。典型的な巨大惑星より重いが、通常の水素燃焼星のように輝くほど重くはない。論文では質量を約 **37 木星質量**と見積もっている。

この褐色矮星は直接撮像で発見された。つまり、望遠鏡が主星の光とは分離してその光を解像した。空の上では主星から約 2.8 秒角離れて見える。2 天体を結ぶ外側軌道は十分には分かっていないが、現在の推定ではかなり細長く、1 周におよそ **5,000 年**かかる。

周期信号が軌道由来なら、推定される構造では候補天体はさらに一段内側に置かれる。恒星を褐色

矮星が回り、その褐色矮星を惑星質量の伴星が回る。



信号が軌道運動なら、候補はこの階層構造の最内層に位置する。直接見えているのは褐色矮星だけ。主星を回る外側軌道はよく制約されておらず、約 171 日の内側軌道は褐色矮星の測定された揺れから推定される。大きさと距離は縮尺どおりではない。

The Clean Paper CC BY 4.0

この可能な階層構造を図に描くのは簡単だ。しかし物理的実在性も名称も決着していない。褐色矮星を回る惑星質量天体は「月」なのか、「惑星」なのか、それとも単に「衛星」なのか。天文学には、この問いを決める合意済みの規則がない。そのため論文は、より広い**系外衛星（exosatellite）**という語を使う。

23 夜分の観測が「揺れ」になるまで

研究チームは、ヨーロッパ南天天文台 Very Large Telescope の高分散分光器 CRIRES+ で CD-35 2722 B（NASA Eyes on Exoplanets の項目）を観測した。2023 年 10 月から 2026 年 2 月までに 26 観測エポックを得た。1 回は信号が弱すぎ、悪天候で得た 2 回は棄却して再観測したため、最終的に**高品質な 23 夜分**が残った。

分光器は光を細かなスペクトル線のパターンへ分解する。光源が地球へ近づいたり遠ざかったりすると、それらの線はごくわずかにずれる。この視線方向の運動を繰り返し測ったものが**視線速度**だ。見えない天体そのものを示すのではない。観測している天体が、見えない引力によってどう動いている可能性があるかを示す。

測定中で最も強い周期性は約 170 日にある。これは研究で設定した**偽警報確率 0.1% のしきい値**を超えた。このしきい値が問うのは、検定の仮定のもとでノイズが少なくともこれほど強い周期グラムのピークを生む頻度だ。衛星が存在する確率が 99.9% という意味ではないし、伴星が 1 つか 2 つかについても、それ自体では何も言わない。

> **視線速度信号から何が分かるのか？**
>
> 視線速度法は、スペクトル線の反復するずれを、観測者へ近づく・遠ざかる運動の測定へ変換する。繰り返すパターンを軌道方程式にフィットすれば、周期、観測された揺れの大きさ、伴星の最小質量を推定できる。
> しかし伴星を直接撮影する方法ではない。恒星や亜恒星天体の大気もスペクトル線を動かしうるし、観測スケジュールが誤解を招く周期を作ることもある。異なる軌道配置が互いを模倣する場合もある。信号があること、その物理的説明、推定天体に付ける名称は、それぞれ別の問いだ。

軌道解を語る前に、サンプリングにも注意が必要だ。特に低い 4 つの視線速度測定がパターンにかなり大きく効いている。それらは 2 組に分かれて現れ、報告上はいずれも良好な条件で得られた。著者らが 1 点ずつ除いて解析をやり直しても、単独の 1 点が信号を作っていたわけではない。それでも、可能な軌道位相の一部しか観測されていない。2 年以上に散らばる 23 夜分は、連続観測とは違う。

著者らは半年周期のアーティファクトの可能性も試した。地球の運動変化や装置プロファイルの補正が不完全なら、偽の年周信号ができ、サンプリングによって地球年の半分、**182.5 日**にエイリアスされる可能性がある。

最良周期は **171.11 日**で、不確かさは +0.53/-0.36 日。著者らによれば 182.5 日から約 20 標準偏差離れている。また、地球の運動変化、シーイング、大気中水蒸気、調べた装置特性との相関も報告されていない。重要な対照試験だ。軌道解釈をモデル化するだけの説得力は高めるが、それだけで天体を特定するわけではない。

最も単純な軌道解：伴星 1 つ

好まれるモデルでは、1 つの天体が 171.11 日ごとに、褐色矮星の周囲を離心した、つまりやや細長い軌道で回る。フィットした離心率は約 **0.27**、軌道長半径は約 **0.200 天文単位** —— 地球–太陽平均距離のおよそ 5 分の 1 だ。

測定された揺れの振幅は約 **318 m/s**。この運動から、モデルは伴星の最小質量を**木星質量の約 0.92 倍**とする。

ここでは最小という言葉が重要だ。視線速度が測るのは、軌道運動のうち私たちへ近づく・遠ざかる成分だけである。軌道を真横から見れば、その運動の多くが視線方向に現れる。より正面から見れば、運動の多くは空の面を横切るため、同じ測定揺れを生むにはより重い伴星が必要になる。

天文学者はこれを **m sin(i)** と書く。質量に、未知の軌道傾斜角、つまり見込み角の正弦を掛けたも

のだ。データが制約するのはその積であり、真の質量そのものではない。したがって約 0.92 木星質量は下限であって、天体の正確な質量測定ではない。

> **なぜ見る角度で質量が隠れるのか？**
>
> 円形トラックを横から見ると想像しよう。走者は何度もこちらへ近づき、遠ざかるため、その成分を測りやすい。同じトラックを真上から見れば、走者はほとんど視野を横切るだけで、こちらへはほぼ近づかない。
> 視線速度が見えるのは前者の成分だけだ。数学的な `sin(i)` は、軌道運動のどれだけが視線方向を向くかを表す。傾斜角 `i` が分かるまで、推定質量は最小値のままである。

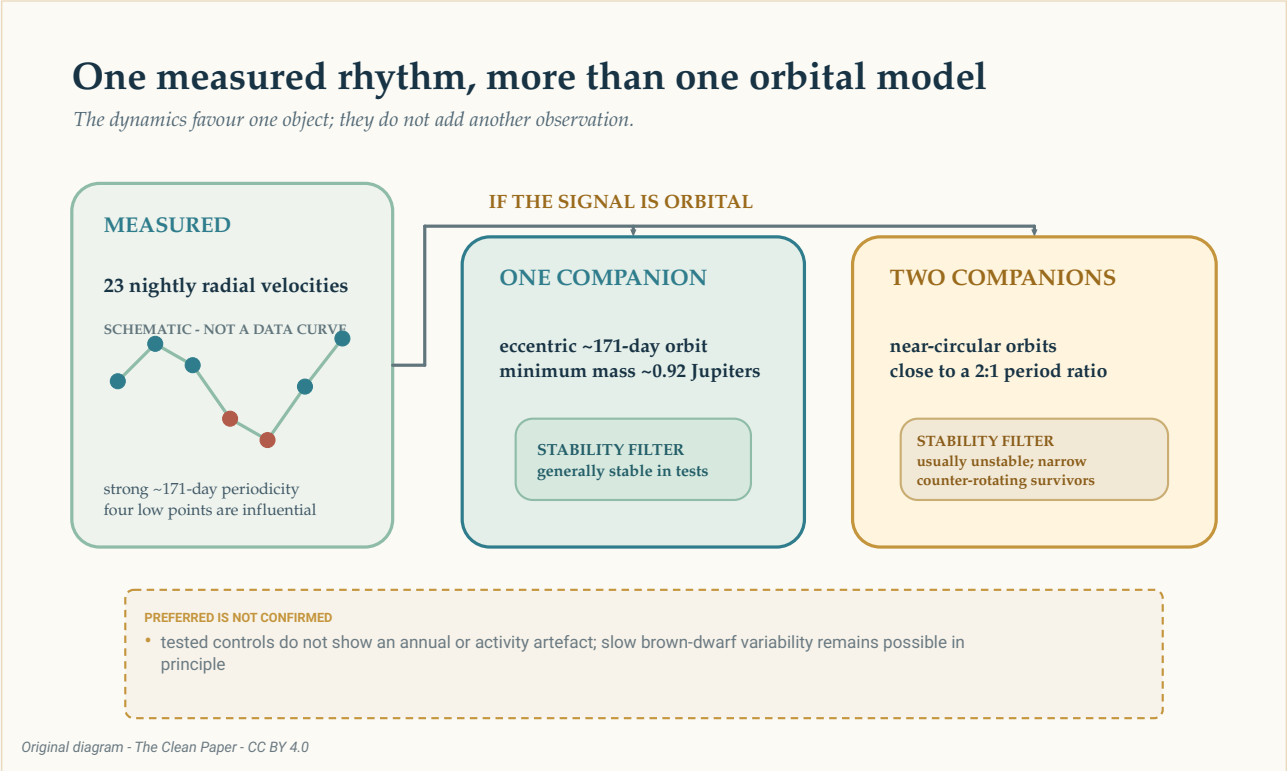
著者らは次に、この軌道が短期間で崩壊せず持続できるかを調べた。数値試験では 1 伴星モデルは概して安定だった。これは信号の物理的に妥当な解釈であることを意味する。しかし、2 回目の検出をしたことにはならない。

厄介な答え：2 つの伴星でも 1 つを模倣できる

離心した視線速度信号には、よく知られた曖昧さがある。ある条件では、ほぼ円軌道を回る 2 天体が、一方の周期がもう一方のおよそ 2 倍になると、その合成パターンが、細長い軌道を回る 1 天体に似る。

ここでもその曖昧さが現れる。2 伴星モデルは、外側に約 171 日の信号、内側により短周期の信号を置くことで現在の測定をフィットできる。観測時刻がすべての位相を均等にサンプリングしていないため、短周期信号には複数のエイリアスがある。選ばれた 23 夜の間に長い空白があるため、異なる試行周期でも、観測の間に見えない周期を異なる回数だけ挟みながら同じ測定点に合わせられる。したがって約 14、70、88、115 日という候補周期は、独立に検出された 4 つのリズムではなく、サンプリングの悪い 1 つの短周期信号に対する代替フィットだ。

著者らは 13〜17 日の十分に制約されない窓を退けた。この領域では一つの説得力ある周期に収束せず、約 20 日未満の多くの近接解が低頻度測定を再現できるため、窓全体がサンプリング由来の可能性が高い。残る窓のうち約 88 日の解は約 70 日・115 日の代替より良いが、第 2 周期が既知だと主張するほどではない。表に示した最良フィットでは、外側天体の最小質量は約 0.87 木星質量、内側は約 0.22 木星質量となる。しかしこれは好まれないモデルを記述する数字であり、2 つの確立済み天体の測定値ではない。



約 171 日の信号が軌道由来なら、同じ大まかな視線速度パターンを、1 つの離心伴星でも、周期比が約 2 対 1 の 2 つのほぼ円軌道伴星でも表せる。安定性試験は 1 天体解釈を支持するが、モデルを画像へ変えるものでも、あらゆる長周期の褐色矮星変動を排除するものでもない。

The Clean Paper CC BY 4.0

安定性計算は比較をもう少し絞る。試した 2 伴星配置の大半は、シミュレーション上数百年以内に一方を放出した。生き残った配置は狭く特殊な領域にあり、2 軌道はほぼ同一平面だが逆向きに回っていた。主星を加えるとさらに不安定領域が生じた。

これは、試した 2 伴星系より 1 つの離心伴星を好む理由になる。しかし、自然が単純なモデルを選んだ証明ではない。安定性は視線速度を測った後で可能な解釈をふるいにかけるものであり、曲線へ新しい観測点を追加するわけではない。

なぜ 1 つの離心軌道が 2 つの円軌道に見えるのか？

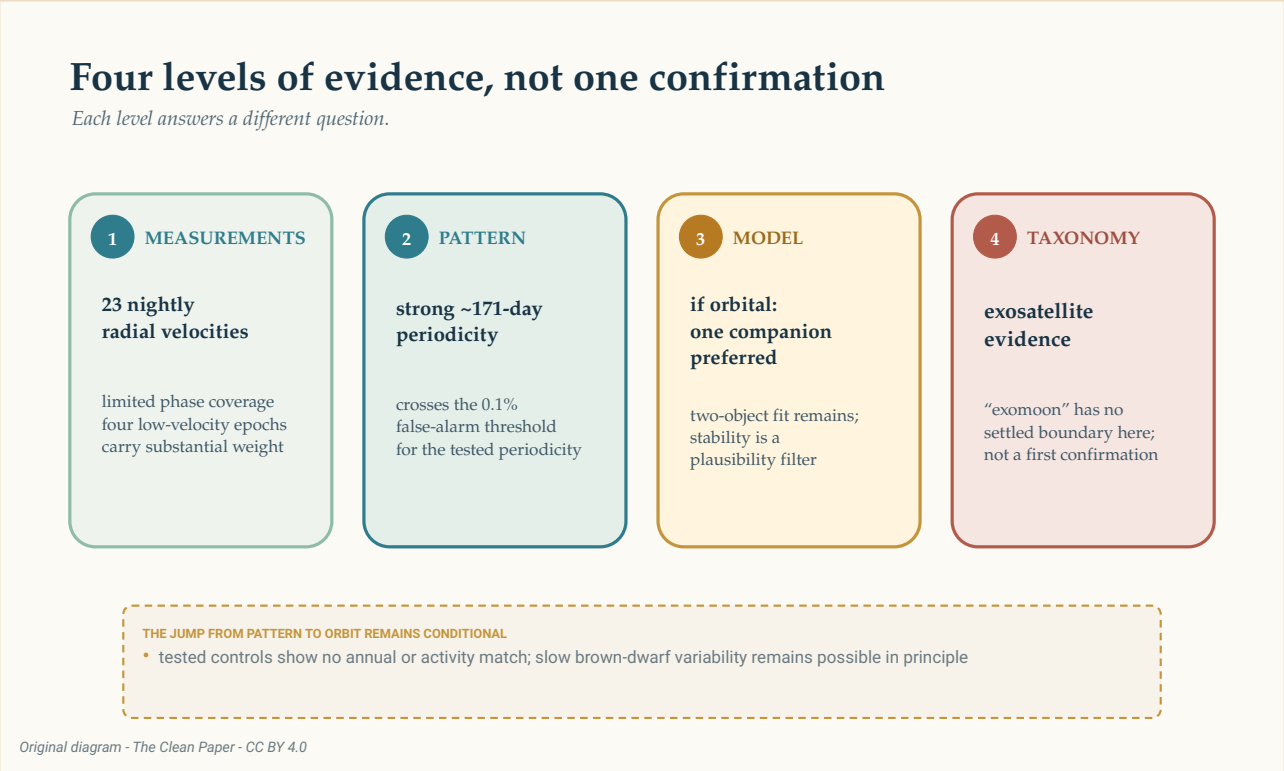
完全な円軌道は単純な反復視線速度波を作る。離心軌道はその波を歪める。周期がほぼ 2 対 1 の 2 つの円軌道は、一方が主リズムを作り、もう一方が似た歪みを加えることで、合成信号を離心軌道に似せられる。
これは**軌道縮退**、つまり異なる物理系が似た測定を生む現象だ。モデル同士が異なる速度を予測する時刻で観測を増やせば決着できる。力学試験は提案系が存続できるかを調べる助けになるが、観測の代わりにはならない。

リズムは褐色矮星自身から来ている可能性は？

褐色矮星は無言の試験質量ではない。大気は自転し、雲を作り、磁気活動を持つ可能性がある。表面パターンの変化はスペクトル線形状を変え、運動のように見せることがある。

CD-35 2722 B の推定最大自転周期は約 **0.65 日**で、171 日よりはるかに短い。研究チームが試した活動モデルでは、強い短周期自転信号や、説得力ある雲・粒状斑様の信号は回収されなかった。また年周サンプリングや装置量も調べたが、171 日のリズムと一致しなかった。

これらの検査は代替説明を狭めるが、論文はあらゆる固有変動を除いたとは主張していない。褐色矮星の長時間スケールの磁気活動や大気循環は、原理的には排除できない。この残る可能性は軌道モデルと同列に記しておくべきで、後ろに隠すものではない。



証拠は別々の段階を上る。位相カバレッジの限られた 23 夜の視線速度、強い約 171 日の周期性、信号が軌道由来なら好まれる 1 伴星モデル、最後に未決着の「系外衛星」という名称。これは測定、統計パターン、物理解釈、分類を区別する階段であり、確認へ向かう矢印ではない。

The Clean Paper CC BY 4.0

これは「系外月」なのか？

太陽系では月は惑星を回る。CD-35 2722 B は褐色矮星で、推定伴星の真の質量もまだ分からない。一方の天体が惑星–褐色矮星境界付近にあり、もう一方が月–惑星境界付近にあると、馴染みの名称は苦しくなる。

論文は「初の確認された系外月」とは主張していない。確信をもって検出された系外月はまだないと述べ、惑星質量の**系外衛星**の証拠を提示し、この系を議論の余地のない検出へ向かう一歩と呼ぶ。新規性についての議論も条件付きで始まる —— この信号が正当なものだと証明されたなら、という形だ。

この慎重さは、結果が空虚という意味ではない。暗い褐色矮星伴星そのものから視線速度を測るのは難しい。今後の観測で信号が維持されれば、惑星探索法が天体階層のさらに一段下まで届くことを示す。

次の観測シーズンは点を増やすだけではない。1 伴星モデルと 2 伴星モデルは、将来の特定時刻に異なる速度を予測する。欠けている軌道位相を埋める測定は、171 日のリズムが持続するかを試し、低速度 4 点の影響を減らし、競合する曲線を分離できる。

今のところ最も正直なイメージは、褐色矮星の横に新しい月が浮かぶ姿ではない。夜ごと繰り返したスペクトルに、小さな周期ずれが入っているという姿だ。そのリズムの中に一つの世界があるかもしれない。成果は、推論が完成したふりをせずに、そこからどこまで読み取れるかを学んだことにある。

要点

天文学者は 2023 年 10 月から 2026 年 2 月までの高品質な 23 夜に、直接撮像済みの褐色矮星 CD-35 2722 B の視線速度を測定した。そのスペクトル線には約 171 日の強い周期的ずれがある。好まれる軌道モデルは、最小質量約 0.92 木星質量の 1 つの離心伴星を含むが、軌道傾斜角が不明なので真の質量は分からない。2 つのほぼ円軌道伴星でも同じ大まかな信号を模倣できるが、試した 2 天体系の大半は力学的に不安定だった。低速度の 4 エポックが強く効いており、軌道位相のカバレッジも限られる。観測は 171 日周期のすべての位相を連続追跡したのではなく、選ばれた部分だけをサンプリングしている。自転、年周サンプリング、天候、調べた装置特性が原因だという証拠は得られなかったが、長時間スケールの褐色矮星変動は原理的に排除できない。見えない天体は直接撮像されておらず、1 天体モデルは「好まれる」のであって確認済みではない。また褐色矮星を回る惑星質量天体を系外月と呼ぶ合意ルールもない。

冷静に見ると

観測されたこと： CD-35 2722 B の 23 夜分の視線速度測定に、約 171 日の強い周期性がある。褐色矮星そのものは直接撮像されているが、提案された伴星はされていない。

著者らが好む解釈：信号が軌道由来なら、木星に近い最小質量をもつ 1 つの離心伴星が、現在のデータに対する最も単純で力学的に妥当な解釈である。

未解決のこと： 2 伴星でも視線速度をフィットできるが、試した系は通常不安定。長周期の褐色矮星変動は原理的に除外されていない。未知の見込み角のため真の伴星質量も未確定。

論文が確立していないこと：初の確認済み系外月。直接見えた衛星。軌道天体が正確に 1 つである

こと。真の質量が 0.92 木星質量であること。好まれる物理モデルが正しい確率が 99.9% であること。

信頼を高めるには：さらに多くの軌道位相を覆い、171 日信号が持続するかを試し、1 伴星モデルと 2 伴星モデルが異なる予測をする時刻を狙った継続的な視線速度測定が必要だ。

出典

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