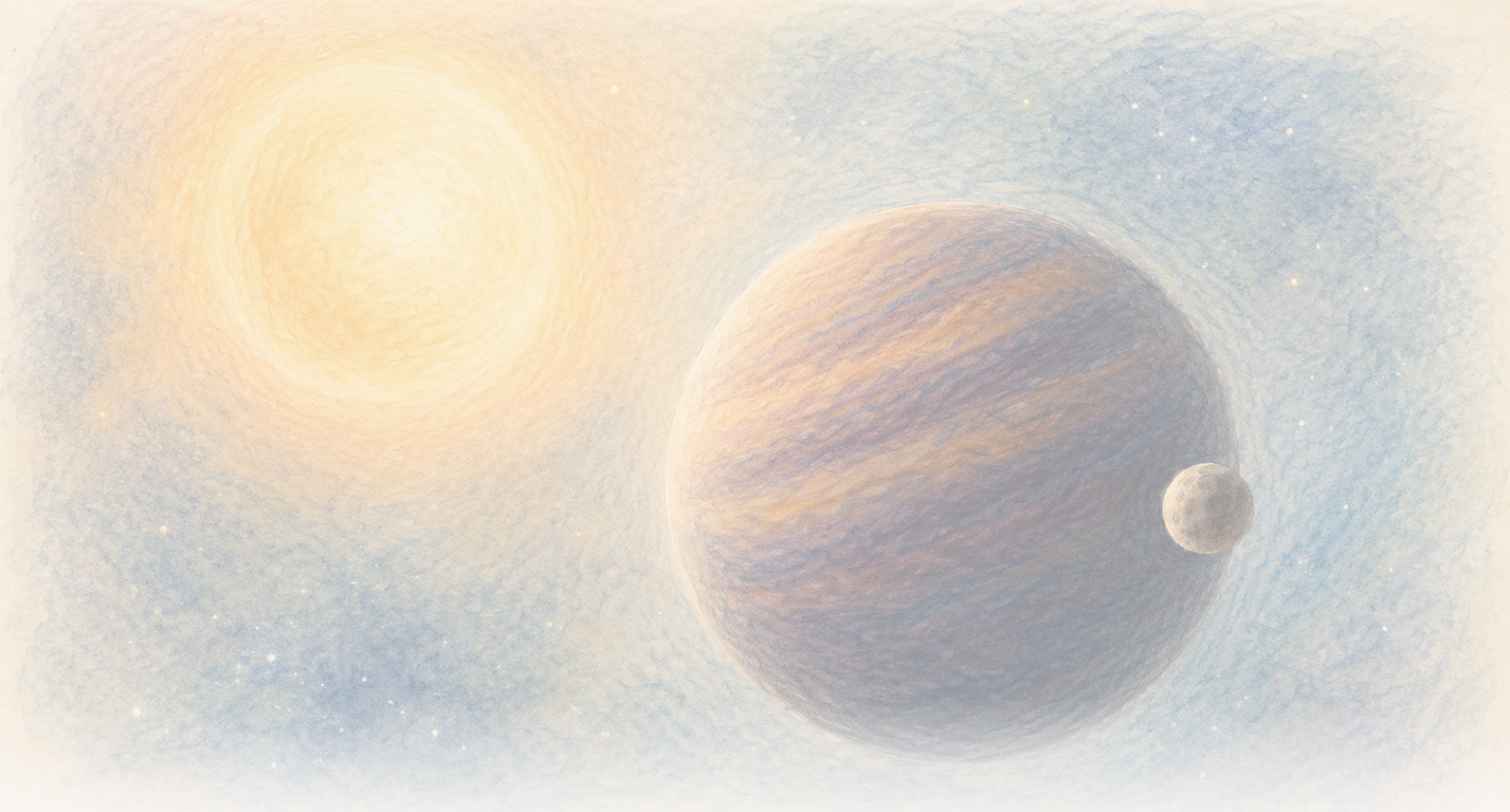




The CLEAN PAPER

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

갈색왜성의 171 일 흔들림이 행성질량 외계위성 후보를 가리킨다—하지만 아직 하나인지 둘인지도 확정되지 않았다

천문학자들은 직접영상된 갈색왜성 CD-35 2722 B의 시선속도에서 약 171 일 주기의 강한 신호를 발견했다. 신호가 궤도성이라면 신호 모델은 최소질량 약 0.92 목성질량의 하나의 이심 동반 천체지만, 두 개의 거의 원형 동반천체도 현재 데이터를 훔내 낼 수 있다. 제안된 위성은 직접 촬영되지 않았고, 장시간 갈색왜성 변동도 완전히 배제되지 않았다. 이는 흥미로운 행성질량 외계 위성 후보이지 확인된 외계달이 아니다.

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

한 갈색왜성이 171 일마다 흔들리는 듯 보인다. 보이지 않는 천체 하나가 끌고 있을 수 있지만, 데이터는 아직 두 천체 가능성도 허용한다

천문학자들은 CD-35 2722 B 를 그 주위를 도는 별과 분리된 하나의 빛 점으로 직접 볼 수 있다. 이 천체는 갈색왜성이다. 거대행성과 별 사이의 질량 영역에 있으며, 약 목성 질량 37 배로 일반적인 거대행성보다 무겁지만 정상적인 수소 핵융합 별은 아니다. 그러나 갈색왜성 자체를 돌고 있을지 모르는 더 작은 천체는 보이지 않는다. 확인된다면 이 가장 안쪽 천체는 별을 도는 더 큰 준항성 천체 주위를 다시 위성이 도는 계층 구조가 관측된 첫 사례가 될 수 있다.

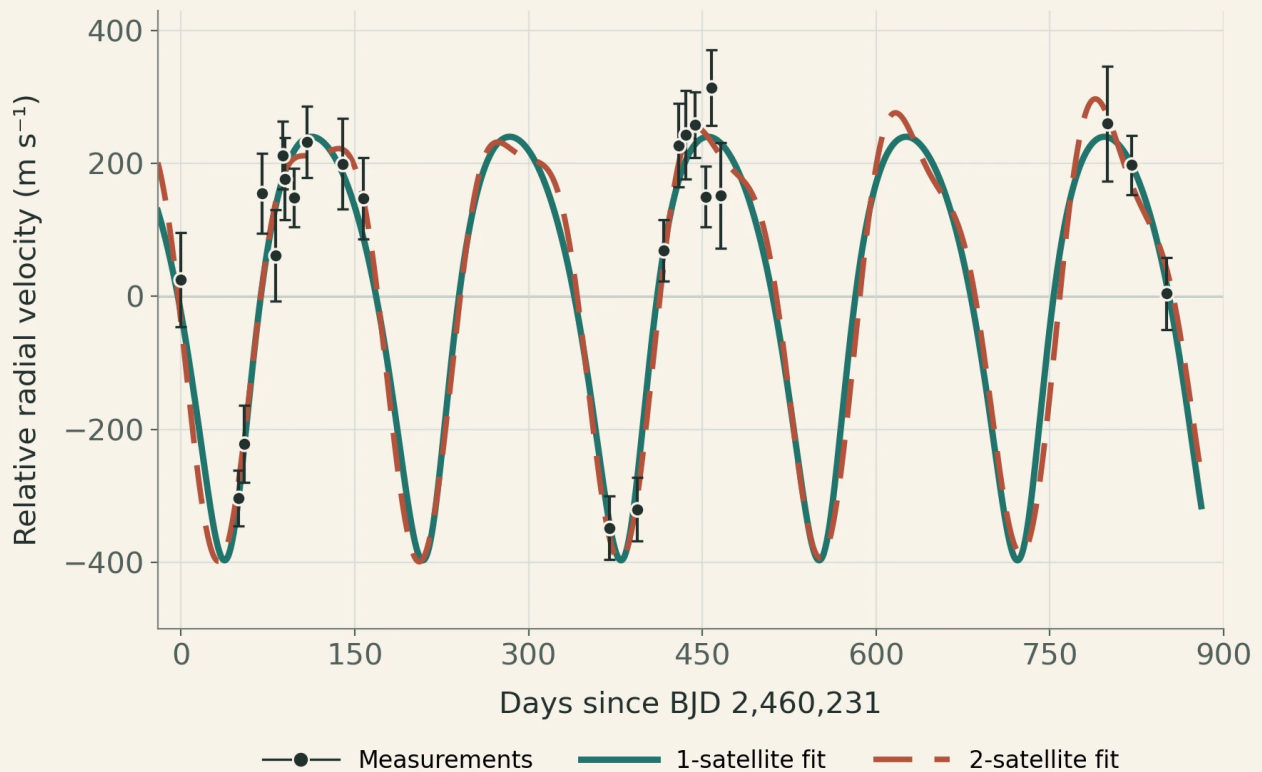
대신 연구진이 보는 것은 리듬이다. 어떤 밤에는 갈색왜성이 지구 쪽으로 움직이며 빛이 아주 조금 이동하고, 다른 밤에는 멀어지며 반대 방향으로 이동한다. 이 패턴은 약 **171** 일마다 반복된다.

보이지 않는 동반천체가 있으면 이런 앞뒤 운동이 생길 수 있다. 두 천체가 공통 질량중심을 돌 때 작은 천체가 큰 천체 주위를 도는 동시에 큰 천체도 훨씬 작은 원을 그리기 때문이다. 이 리듬이 궤도 운동이라면 새로운 Nature 논문은 CD-35 2722 B 에서 측정된 흔들림의 가장 선호되는 설명으로 하나의 행성질량 천체를 제시한다.

놀라운 가능성이지만 달을 찍은 사진은 아니다. 고품질 관측 23 밤에서 강한 주기 신호가 나타난다. 그 신호를 하나의 세계로 바꾸려면 모델이 필요하고, 현재 데이터는 여전히 하나보다 많은 구조를 허용한다. 또한 갈색왜성 자체의 느린 변화 가능성도 완전히 배제하지 못한다.

One wobble, two nearly identical fits

23 radial-velocity measurements of the brown dwarf CD-35 B



Points and error bars are observations. Curves are model fits, not directly observed companions.

검은 점과 오차막대는 23 밤의 시선속도 측정값이다. 실선과 점선은 가장 잘 맞는 1 위성 및 2 위성 모델이다. 두 곡선이 거의 겹친다는 사실은 데이터가 주기적 흔들림을 보여 주면서도 아직 계의 구조를 결정하지 못하는 이유를 보여 준다. 어느 곡선도 동반천체를 직접 찍은 영상이 아니다.

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

계 안의 또 다른 계

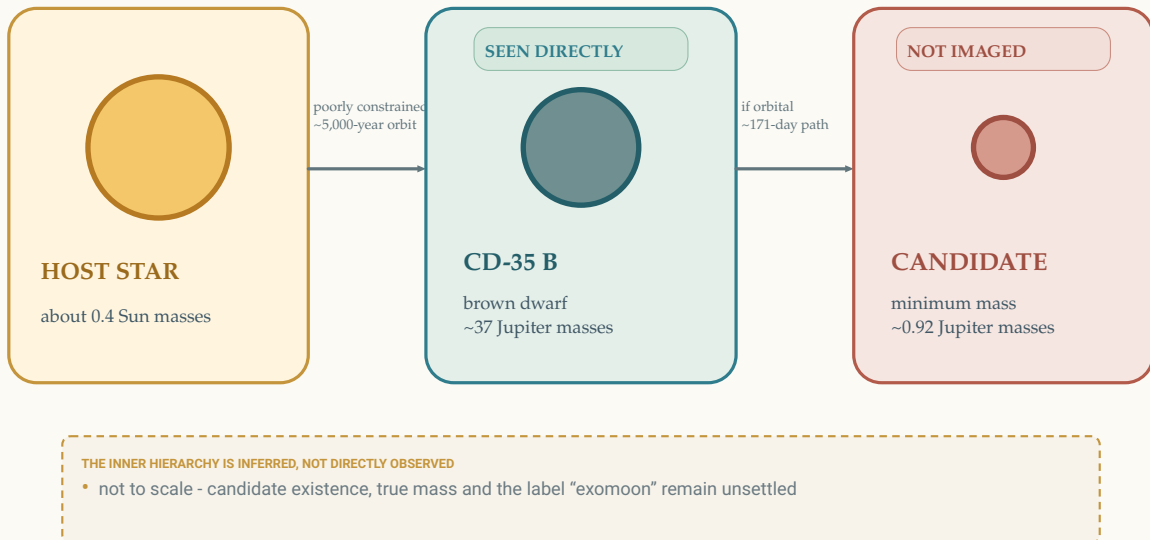
CD-35 2722 B는 익숙한 범주 사이에 놓인 **갈색왜성**이다. 일반적인 거대행성보다 무겁지만 정상적인 수소 핵융합 별처럼 빛날 만큼 무겁지는 않다. 논문은 약 **목성 37 개 질량**을 사용한다.

갈색왜성은 직접영상으로 발견됐다. 즉 망원경이 모항성과 분리해 그 빛을 따로 분해했다. 하늘에서 별과 약 2.8 각초 떨어져 보인다. 두 천체를 잇는 넓은 궤도는 잘 알려져 있지 않지만 현재 추정으로는 약 **5,000 년**이 걸리는 매우 길쭉한 경로일 가능성이 있다.

주기 신호가 궤도라면 후보 천체는 한 단계 더 안쪽에 위치한다. 별을 갈색왜성이 돌고, 그 갈색왜성을 행성질량 동반천체가 도는 구조다.

A possible system inside a system

If the signal is orbital, the candidate would occupy the innermost level.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

신호가 궤도성이라면 후보는 이 가능한 계층 구조의 가장 안쪽에 놓인다. 직접 본 것은 갈색왜성뿐이다. 별 주위의 바깥 궤도는 제약이 약하고, 약 171 일의 안쪽 경로는 갈색왜성에서 측정된 흔들림으로 추론한다. 크기와 거리는 축척에 맞지 않는다.

The Clean Paper CC BY 4.0

이런 계층 구조는 그림으로 그리기 쉽다. 하지만 물리적 실재와 용어는 아직 정해지지 않았다. 갈색왜성을 도는 행성질량 천체는 달일까, 행성일까, 아니면 그냥 위성일까? 천문학에는 이 질문을 정리해 주는 합의된 규칙이 없다. 그래서 논문은 더 넓은 표현인 **외계위성 (exosatellite)** 을 사용한다.

23 밤의 관측이 어떻게 흔들림이 됐나

연구팀은 유럽남방천문대 Very Large Telescope 의 고분해능 분광기 CRIRES+ 로 CD-35 2722 B 를 관측했다 (NASA Eyes on Exoplanets 항목 참고). 2023 년 10 월부터 2026 년 2 월까지 26 회 관측했다. 한 번은 신호가 너무 약했고, 약천후에 얻은 두 번은 제외한 뒤 재관측해 최종적으로 **고품질 23 밤** 을 남겼다.

분광기는 빛을 세밀한 스펙트럼 선 패턴으로 펼친다. 광원이 지구 쪽으로 오거나 멀어지면 그 선들이 아주 조금 이동한다. 이런 시선방향 운동을 반복 측정한 것이 **시선속도 (radial velocity)** 다. 숨은 천체를 직접 보여 주는 것이 아니라, 보이지 않는 끌림 때문에 관측하는 천체가 어떻게 움직일 수 있는지를 보여 준다.

측정에서 가장 강한 주기는 170 일 근처다. 연구가 정한 **0.1% 오경보확률 (false-alarm probability)** 임계값을 넘었다. 이 임계값은 검정의 가정 아래에서 잡음만으로 이 정도 이상 강한 주기도 피크가 얼마나 자주 나오는지를 묻는다. 위성이 존재할 확률이 99.9% 라는 뜻이 아니며, 동반천체가 하나인지 둘인지도 그 자체로 말해 주지 않는다.

시선속도 신호로 무엇을 확립할 수 있을까?

시선속도는 스펙트럼 선의 반복적인 이동을 관측자 쪽 또는 반대쪽 운동으로 바꿔 측정한다. 반복 패턴을 궤도 방정식에 맞추면 주기, 측정된 흔들림 크기, 동반천체의 최소질량을 추론할 수 있다. 하지만 동반천체를 직접 촬영하지는 않는다. 별 또는 준항성 천체의 대기도 스펙트럼 선을 이동시킬 수 있고, 관측 일정이 가짜 리듬을 만들 수 있으며, 서로 다른 궤도 구조가 비슷한 신호를 낼 수도 있다. 신호 자체, 물리적 설명, 추론된 천체에 붙이는 이름은 서로 다른 질문이다.

궤도 해석 전에 관측 표본화 자체도 볼 필요가 있다. 특히 낮은 시선속도 네 측정점이 패턴에 상당한 영향을 준다. 이들은 보고된 조건이 좋은 두 쌍의 밤에 나왔고, 저자들이 한 점씩 빼고 분석을 반복했을 때 어느 한 점이 혼자 신호를 만든 것은 아니었다. 그래도 가능한 궤도 위상의 일부만 표본화했다. 2년이 넘는 기간에 흩어진 23 밤의 관측은 연속 관측과 같지 않다.

저자들은 반년짜리 인공 신호 가능성도 시험했다. 지구의 움직임이나 기기 프로파일을 불완전하게 보정하면 1년 주기의 가짜 신호가 생기고, 관측 표본화 때문에 지구 1년의 절반인 **182.5 일**로 에일리어싱될 수 있다. 신호 주기는 **171.11 일**, 불확실성은 $+0.53/-0.36$ 일이다. 저자들은 이 값이 182.5 일에서 약 20 표준편차 떨어져 있다고 보고한다. 또한 지구 운동 변화, 시상, 대기 수증기, 조사한 기기 특성과의 상관관계도 발견하지 못했다. 중요한 대조 실험들이다. 궤도 설명을 모델링할 만큼 설득력 있게 만들지만, 그 자체로 천체를 식별하지는 않는다.

가장 단순한 궤도 해답: 동반천체 하나

신호 모델에서는 하나의 천체가 갈색왜성 주위를 171.11 일마다 이심률이 있는, 즉 다소 길쭉한 궤도로 돈다. 적합된 이심률은 약 **0.27**, 장반경은 약 **0.200 AU**, 즉 평균 지구-태양 거리의 약 5분의 1이다.

측정된 흔들림 진폭은 약 **초당 318 미터**다. 이 운동으로부터 모델은 동반천체의 최소질량을 약 **목성 질량의 0.92 배**로 얻는다.

최소라는 단어가 중요하다. 시선속도는 궤도 운동 중 우리 쪽 또는 반대쪽으로 향하는 성분만 측정한다. 궤도를 옆에서 보면 대부분의 운동이 그 시선 방향에 나타난다. 더 정면에 가깝게 보면 많은 운동이 하늘면을 가로지르므로 같은 측정 흔들림을 만들려면 더 무거운 동반천체가 필요하다.

천문학자들은 이를 $m \sin(i)$ 로 쓴다. 질량에 알 수 없는 궤도 경사각, 즉 관측 각도의 사인을 곱한 값이다. 데이터가 제한하는 것은 이 곱이지 실제 질량 그 자체가 아니다. 약 0.92 목성질량은 정확한 질량 측정이 아니라 하한이다.

왜 관측 각도가 질량을 숨길까?

원형 트랙을 옆에서 본다고 상상해 보자. 달리는 사람은 반복해서 우리 쪽으로 왔다가 멀어지므로 그 운동 성분을 쉽게 측정할 수 있다. 같은 트랙을 위에서 내려다보면 사람은 대부분 시야를 가로질러 움직이고 우리 쪽으로 오거나 멀어지는 운동은 거의 없다.

시선속도는 첫 번째 성분만 본다. 수학적 인자 $\sin(i)$ 는 궤도 운동 중 시선 방향으로 향하는 비율을 나타낸다. 경사각 i 를 알기 전까지 추론한 질량은 최소값으로 남는다.

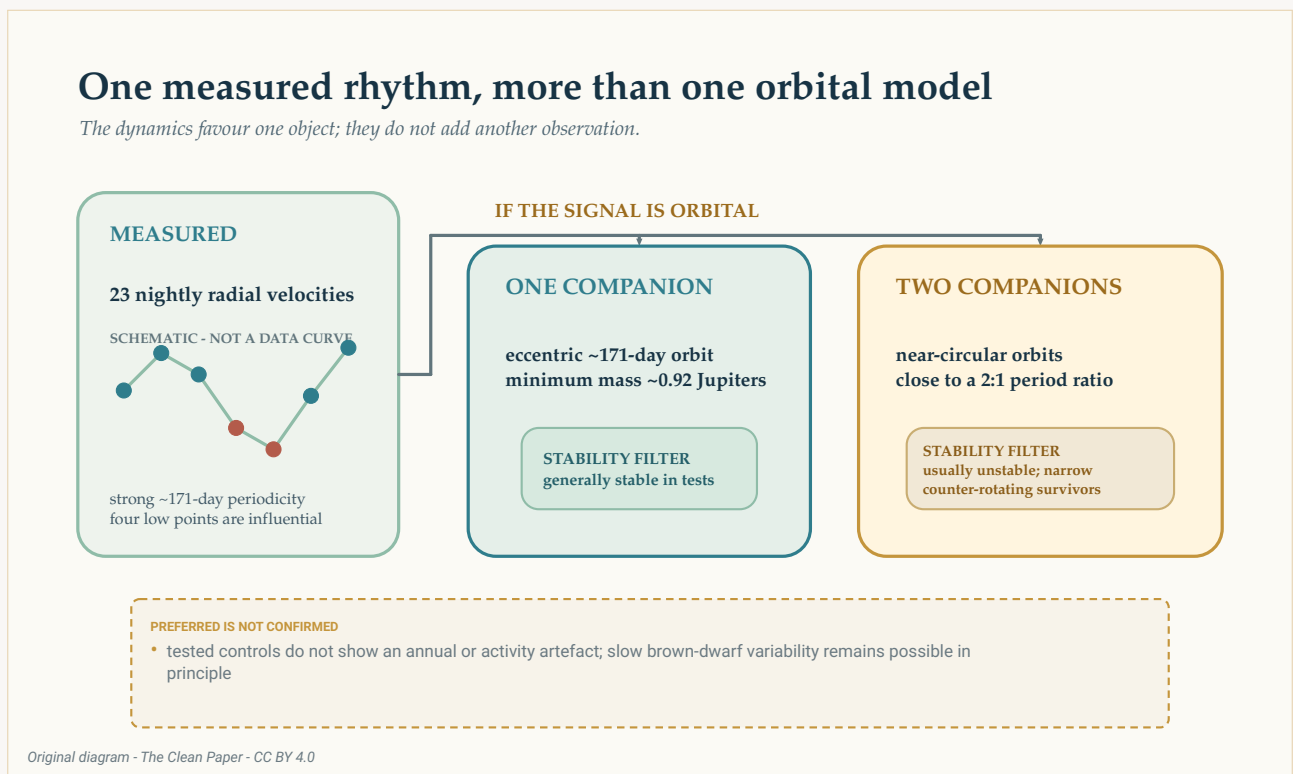
저자들은 이어 이 궤도가 빠르게 붕괴하지 않고 유지될 수 있는지 시험했다. 수치실험에서는 1 동반천체 모델이 대체로 안정적이었다. 따라서 신호에 대한 물리적으로 가능한 해석이다. 하지만 별도의 두 번째 검출이 된 것은 아니다.

불편한 해답: 두 동반천체도 하나처럼 보일 수 있다

이심률이 있는 시선속도 신호에는 잘 알려진 모호성이 있다. 어떤 조건에서는 거의 원형 궤도 두 개, 한쪽 주기가 다른 쪽의 약 두 배인 두 천체가 합쳐져 하나의 길쭉한 궤도를 가진 천체와 비슷한 패턴을 만들 수 있다.

여기서도 그 모호성이 나타난다. 2 동반천체 모델은 바깥쪽 약 171 일 신호와 더 짧은 안쪽 신호로 현재 측정을 맞출 수 있다. 관측 시간이 모든 위상을 고르게 표본화하지 않았기 때문에 짧은 신호에는 여러 에일리어스가 생긴다. 선택된 23 밤 사이에 긴 공백이 있어 서로 다른 시험 주기들이 방문 사이에 보이지 않은 주기를 서로 다른 횟수만큼 넣고도 같은 측정값에 정렬될 수 있다. 따라서 약 14, 70, 88, 115 일 후보는 독립적으로 검출된 네 리듬이 아니라, 표본화가 부족한 하나의 짧은 신호에 대한 대안 적합들이다.

저자들은 제약이 약한 13~17 일 구간을 제외한다. 그 영역에서는 적합이 하나의 설득력 있는 주기를 고르지 못한다. 약 20 일 미만에서 서로 가까운 많은 해가 낮은 빈도의 관측을 재현할 수 있어 전체 구간이 표본화 인공물일 가능성이 높다. 남은 구간에서는 약 88 일 해가 약 70 일과 115 일 대안보다 더 잘 맞지만, 두 번째 주기를 알고 있다고 주장할 만큼 차이가 크지는 않다. 표에 제시된 최적 적합에서 바깥 천체의 최소질량은 약 0.87 목성질량, 안쪽 천체는 약 0.22 목성질량이다. 이는 선호되지 않는 모델을 설명하는 숫자이지, 확인된 두 세계의 측정값이 아니다.



약 171 일 신호가 궤도성이라면 같은 넓은 시선속도 패턴을 하나의 이심 동반천체 또는 주기가 거의 2:1 인 두 개의

거의 원형 동반천체로 표현할 수 있다. 안정성 시험은 1 천체 해석을 선호하지만, 모델을 이미지로 바꾸지도 않고 모든 형태의 느린 갈색왜성 변동을 배제하지도 않는다.

The Clean Paper CC BY 4.0

안정성 계산은 비교를 더 날카롭게 만든다. 시험한 2 동반천체 구조 대부분은 시뮬레이션에서 수백 년 안에 한 천체를 방출했다. 살아남은 구조는 궤도면이 거의 같지만 서로 반대 방향으로 도는 좁고 특이한 영역에 있었다. 모항성은 추가적인 불안정 영역도 만들었다.

이는 시험한 2 동반천체 시스템보다 하나의 이심 동반천체를 선호할 이유가 된다. 자연이 더 단순한 모델을 선택했다는 증명은 아니다. 안정성은 시선속도를 측정한 뒤 가능한 해석을 걸러 주는 필터이지, 곡선에 새로운 관측점을 추가하지 않는다.

어떻게 하나의 이심 궤도가 두 원형 궤도처럼 보일 수 있을까?

완전한 원형 궤도는 단순한 반복 시선속도 파형을 만든다. 이심 궤도는 그 파형에 왜곡을 더한다. 주기가 약 2:1 인 두 원형 궤도의 신호를 합치면 하나가 주된 리듬을 만들고 다른 하나가 비슷한 왜곡을 만들어 낼 수 있다.

이는 **궤도 퇴화 (orbital degeneracy)** 다. 서로 다른 실제 물리계가 비슷한 측정을 만든다. 두 모델이 서로 다른 속도를 예측하는 시점에 더 관측하면 구분할 수 있다. 동역학 시험은 제안된 계가 오래 살아남을 수 있는지 묻는 데 도움을 주지만 관측을 대신할 수는 없다.

리듬이 갈색왜성 자체에서 나올 수도 있을까?

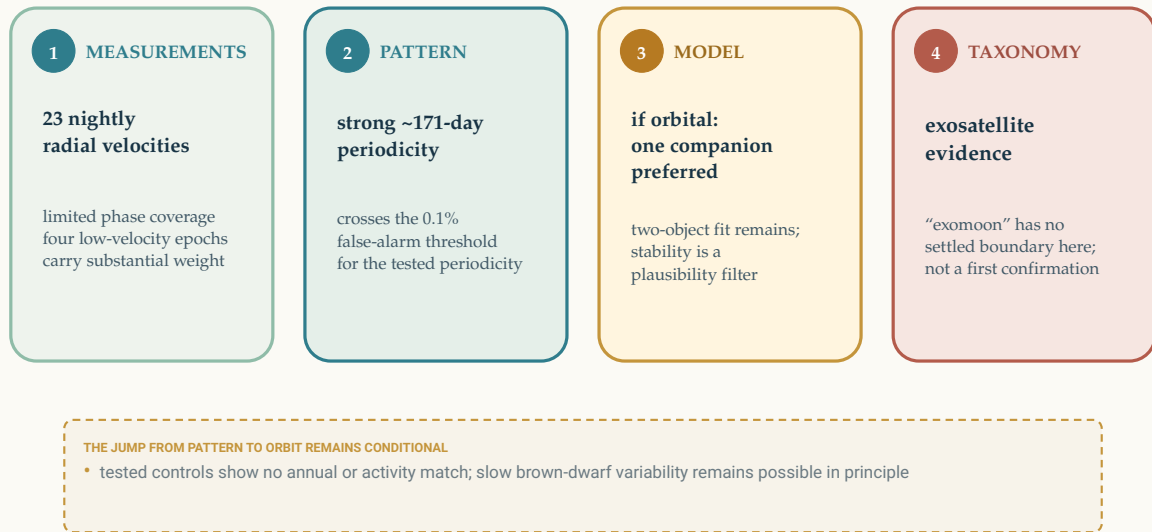
갈색왜성은 아무 변화 없는 시험 질량이 아니다. 대기가 회전하고 구름이 생기며 자기활동도 있을 수 있다. 변하는 표면 패턴은 스펙트럼 선 모양을 바꿔 운동처럼 보이게 할 수 있다.

CD-35 2722 B 의 추정 최대 자전주기는 약 **0.65 일**로 171 일보다 훨씬 짧다. 연구팀은 시험한 활동 모델에서 강한 짧은 자전 신호나 설득력 있는 구름·과립화 유사 신호를 찾지 못했다. 연간 표본화와 기기 변수도 조사했지만 171 일 리듬과 맞지 않았다.

이 점검은 대안들을 좁히지만, 논문은 모든 고유 변동을 제거했다고 주장하지 않는다. 갈색왜성의 장시간 자기활동이나 대기 순환은 원칙적으로 배제할 수 없다. 이 남은 가능성은 궤도 모델 옆에 함께 놓아야지 뒤에 숨겨서는 안 된다.

Four levels of evidence, not one confirmation

Each level answers a different question.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

증거는 서로 다른 단계로 올라간다. 위상 범위가 제한된 23 밤의 시선속도, 강한 약 171 일 주기, 신호가 궤도성일 경우 선호되는 1 동반천체 모델, 마지막으로 아직 정리되지 않은 "외계달"이라는 이름이다. 이 사다리는 측정, 통계 패턴, 물리적 해석, 분류학을 구분하기 위한 것이지 확인을 향한 화살표가 아니다.

The Clean Paper CC BY 4.0

외계달인가?

태양계에서 달은 행성을 돈다. CD-35 2722 B 는 갈색왜성이고, 추론된 동반천체의 실제 질량도 아직 모른다. 한 천체가 행성-갈색왜성 경계 근처에 있고 다른 천체가 달-행성 경계 근처에 놓이면 익숙한 이름들이 흔들리기 시작한다.

논문은 최초로 확인된 외계달이라고 주장하지 않는다. 아직 자신 있게 검출된 외계달은 없다고 말하며, 행성질량 **외계위성**의 증거를 제시하고, 논란 없는 검출을 향한 한 걸음으로 표현한다. 새로운 점을 논의할 때도 조건부로 시작한다. 이 신호가 실제로 확인된다면 그렇다는 식이다.

이런 신중함 때문에 결과가 빈 것은 아니다. 희미한 갈색왜성 동반체에서 직접 시선속도를 측정하는 것은 어렵다. 후속 관측에서도 신호가 유지된다면 행성 탐색 기법이 천체 계층 구조의 한 단계 더 아래까지 내려갈 수 있음을 보여 줄 것이다.

다음 관측 시즌은 단지 점을 더하는 것 이상의 일을 할 수 있다. 1 동반천체와 2 동반천체 모델은 특정 미래 시점에 서로 다른 속도를 예측한다. 빠진 궤도 위상을 채우는 측정은 171 일 리듬이 유지되는지 시험하고, 낮은 네 점의 영향력을 줄이며, 경쟁 모델 곡선들이 실제로 갈라지는 구간을 관측할 수 있다.

지금 가장 정직한 이미지는 갈색왜성 옆에 떠 있는 새 달이 아니다. 밤마다 반복해 얻은 스펙트럼 속의 작은 주기적 이동이다. 그 리듬 안에 하나의 세계가 있을 수 있다. 성과는 추론이 아직 완성되지 않았다는 사

실을 숨기지 않으면서 그 신호에서 얼마나 많은 것을 알아낼 수 있는지를 보여 준 데 있다.

핵심 요약

천문학자들은 2023 년 10 월부터 2026 년 2 월 사이 고품질 23 밤에 직접영상된 갈색왜성 CD-35 2722 B 의 시선속도를 측정했다. 스펙트럼 선에는 약 171 일의 강한 주기적 이동이 있다. 신호 궤도 모델은 최소질량 이 약 0.92 목성질량인 하나의 이심 동반천체를 포함하지만 궤도 경사각을 모르므로 실제 질량도 모른다. 거의 원형 궤도 두 개도 같은 넓은 신호를 흉내 낼 수 있지만, 시험한 2 천체 구조 대부분은 동역학적으로 불안정했다. 낮은 시선속도 네 관측점의 영향이 크고 궤도 위상 범위도 제한적이다. 관측은 가능한 171 일 주기의 일부만 선택적으로 표본화했지 모든 위상을 연속 추적하지 않았다. 자전, 연간 표본화, 날씨, 조사 한 기기 특성은 신호원으로 확인되지 않았지만 장시간 갈색왜성 변동은 원칙적으로 배제할 수 없다. 보이지 않는 천체는 직접 촬영되지 않았고 1 천체 모델은 확인된 것이 아니라 선호되는 모델이며, 갈색왜성을 도는 행성질량 천체를 외계달이라고 부를 합의된 규칙도 없다.

과장 없이 보면

관측된 것: CD-35 2722 B 의 23 밤 시선속도 측정에서 강한 약 171 일 주기가 나타난다. 갈색왜성 자체는 직접영상됐지만 제안된 동반천체는 그렇지 않다.

저자들이 선호하는 것: 신호가 궤도성이라면 목성에 가까운 최소질량을 가진 하나의 이심 동반천체가 현재 데이터의 가장 단순하고 동역학적으로 가능한 해석이다.

열려 있는 것: 두 동반천체도 시선속도를 맞출 수 있지만 시험한 시스템은 대체로 불안정하다. 장시간 갈색 왜성 변동은 원칙적으로 배제되지 않았다. 관측 각도를 모르므로 실제 동반천체 질량도 결정되지 않았다.

논문이 확립하지 않는 것: 최초로 확인된 외계달, 직접 본 위성, 정확히 하나의 궤도 천체, 실제 질량 0.92 목성질량, 선호하는 물리 모델이 맞을 확률 99.9%.

신뢰를 높이려면: 더 많은 궤도 위상을 채우고 171 일 신호가 유지되는지 시험하며, 1 천체와 2 천체 모델 이 서로 다른 예측을 하는 시점을 관측하는 추가 시선속도 측정이 필요하다.

출처

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