

■ Planeten als Geisterfahrer

Transitbeobachtungen von Exoplaneten deuten auf eine große Variation der Bahnneigungen hin und bringen Astrophysiker in Erklärungsnot.

Wie schon von Kant und Laplace vermutet und mittlerweile vielfältig durch Beobachtungen und Theorie bestätigt, entstehen Planeten innerhalb einer abgeflachten Scheibe, die den sich bildenden Stern umgibt. Die Flachheit der Scheibe und ihre Kepler-Rotation um den Stern führen direkt zu einem Planetensystem mit Bahneigenschaften ähnlich zu denen unseres eigenen. Die Planeten bewegen sich alle in einer Ebene – der Ekliptik – und laufen prograd nahezu auf Kreisbahnen um die Sonne. Deren Drehimpuls und der der Sonne sind nur um 7° gegeneinander gekippt.

Zusätzlich zu den dynamischen Eigenschaften des Sonnensystems folgt aus der Massen- und Temperaturverteilung in der Scheibe, dass sich feste (terrestrische) Planeten näher am Stern, die Gasriesen dagegen weiter entfernt befinden sollten. Schon die allerersten Entdeckungen von Exoplaneten haben diesen Vorhersagen allerdings widersprochen. Zum einen wurden viele massereiche Planeten dicht am Stern gefunden („heiße Jupiter“), und zum anderen sind die Bahnen mitnichten kreisförmig, sondern zeigen eine mittlere Exzentrizität von $e \approx 0,3$. Die Existenz von heißen Jupitern wird üblicherweise mit der Wanderung (Migration) von Gasriesen durch die Scheibe

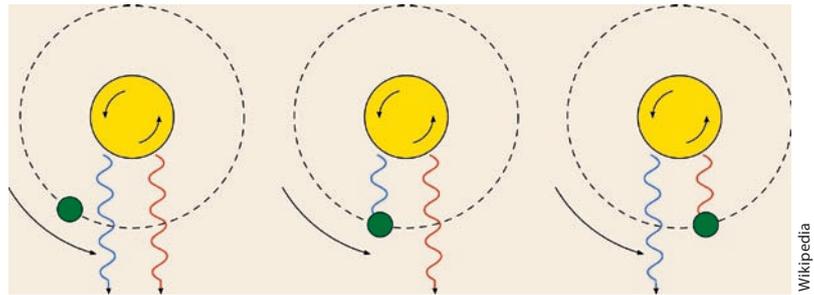


Abb. 1 Rotiert ein Stern (gelb), sind die Linien seines Spektrums doppler-verteilt (links). Läuft nun ein Begleiter (grün) durch die Sichtlinie, tritt der Rossiter-McLaughlin-Effekt auf: Durch die Bedeckung von Teilen der Oberfläche

schwächt sich nacheinander blau- (Mitte) und rotverschobene Strahlung ab (rechts), die Linie verändert das Profil und ihr Maximum verschiebt sich. Dieses Phänomen ist der Bewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt überlagert.

von den weiter entfernt liegenden Bereichen bis hin in Sternnähe erklärt. Dies kennt man auch von den kleinen Monden, die innerhalb der Saturnringe ihre Bahnen ziehen. Sie erzeugen spiralwellenförmige Dichtestörungen, die Gezeitenkräfte auf sie ausüben und die Wanderung nach innen bewirken.

Die hohen Exzentrizitäten dagegen können damit erklärt werden, dass sich zwei Planeten während ihrer Wanderung zu nahe kommen und sich gegenseitig aufschaukeln, teilweise unterstützt durch Resonanzeffekte. Das Herausschleudern eines Planeten ließe den anderen auf einer sehr exzentrischen Bahn zurück.

Die Zahl der bekannten extrasolaren Planeten steuert mittlerweile rasant auf die 500er-Marke zu. Die meisten von ihnen wurden

mithilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt: Besitzt ein Stern Planeten, führt er eine Bewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt aus. Hat dieses „Zittern“ eine Komponente entlang der Sichtlinie, verzeichnet der Beobachter eine Doppler-Verschiebung der Spektrallinien.

Über die Neigung der Planetenbahnen gegen den Äquator des Zentralsterns konnte bis vor kurzem jedoch keine Aussage getroffen werden. Dies hat sich in den letzten Jahren durch die Zunahme der großen Zahl an Transit-Planetensystemen geändert, die auf ihrem Bahndurchlauf direkt vor dem Sternscheibchen herziehen und zu einer Bedeckung führen. Diese Minifinsternisse führen zu einer Abschwächung des Sternlichts. Da die fernen Sonnen aber

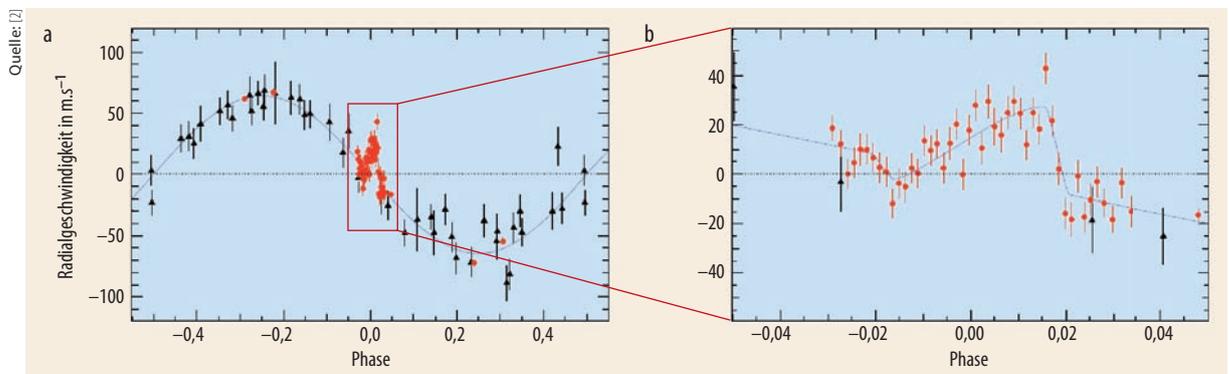


Abb. 2 Die Radialgeschwindigkeitskurve des Sterns WASP-15 (a) aus Daten der Spektrographen CORALIE (schwarze Dreiecke) und HARPS (rote Punkte) zeigt um den Nullpunkt der Phase (Transit) eine Abweichung vom Sinusverlauf. Da die Kurve zunächst in den Bereich negativer Radialgeschwindigkeit

sinkt (b), wird die sich vom Beobachter weg bewegende (rotverschobene) Seite des Sterns zuerst vom Planeten bedeckt. Es liegt also ein retrograder Orbit vor – der umgekehrte Fall wie in Abb. 1 gezeigt. Hier ergibt der Fit an die Daten eine (projizierte) Bahnneigung von 139° .

1) Wide-Angle Search for Planets, www.super-wasp.org

rotieren und somit dopplerverbreiterte Linien aufweisen, sollte sich der seit langem bekannte Rossiter-McLaughlin-Effekt einstellen. Dieses von den Autoren zunächst Rotationseffekt genannte Phänomen kommt in Doppelsternen zustande, wenn im Laufe eines Transits, z. B. zunächst die rechte und anschließend die linke Seite des helleren Sterns, also wechselseitig die auf uns zukommende und die sich entfernende Seite, durch den Begleiter bedeckt wird (Abb. 1). Die Spektrallinie ändert dadurch während des Transits die Form, ihr Maximum verschiebt sich und der Beobachter misst eine veränderte Radialgeschwindigkeit.

Einer Gruppe von Astronomen, gelang es jetzt, den von Doppelsternen bekannten Rossiter-McLaughlin-Effekt auch bei Transitplaneten nachzuweisen. Sie untersuchten sechs Exoplaneten der WASP-Kollaboration¹⁾ [2]. Bei drei Systemen zeigt sich – wie erwartet –, dass die Rotationsachse des Sterns senkrecht auf der Bahnebene des Planeten steht. Bei den anderen drei deutet die Asymmetrie in der RG-Kurve auf eine sehr große Neigung sogar mit retrograden Orbits hin (Abb. 2). In allen Systemen bewegen sich die Planeten näherungsweise auf Kreisbahnen. Diese hohe Zahl „falsch“ orientierter Bahnen stellt

die Exoplanetenforschung sozusagen auf den Kopf.

Wie kann man dieses Ergebnis trotzdem im Rahmen der bisherigen Vorstellungen über die Planetenentstehung interpretieren? Zunächst ist festzustellen, dass es einen Dissipationsmechanismus geben muss, der die Planeten in Sternnähe bringt. Das Problem des einfachen, oben erläuterten Migrationsmodells liegt darin, dass die Planet-Scheibe-Wechselwirkung die Exzentrizität und Inklination der Bahnen verringert. Es sei denn, eine Migration zweier Planeten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten findet statt: Bei gegenseitiger Annäherung kann dann ein resonanter Einfang stattfinden. Dieser vergrößert die Exzentrizitäten und auch Inklinationen, und nach dem Auflösen der Scheibe bewirken gravitative Streuprozesse eine weitere Erhöhung der Bahnneigung [3]. Hierbei ist aber fraglich, ob der beobachtete hohe Anteil an stark geneigten oder gar retrograden Bahnen zustande kommt.

Eine sehr interessante Alternative bietet der Kozai-Effekt, der dynamische Eigenschaften im Asteroidengürtel erklärt [4]. Umkreist ein Planet einen der beiden Sterne in einem Doppelsternsystem und ist die Bahn des Planeten hinreichend gegen die Ebene des Binärsterns geneigt, kann seine Bewegung

periodisch große Exzentrizitäten ($e \approx 1$) und Neigungen annehmen. Dieser Prozess kann auch bei relativ großen Abständen der Sterne voneinander ablaufen wie beim System HD 80606, wo der Begleitstern in einer Entfernung von mehr als 1000 AE liegt. Bei hohen e kommt der Planet seinem Zentralstern sehr nahe, sodass Gezeitenkräfte zu einem Energieverlust des Planeten und damit zu einer Verengung seiner großen Halbachse führen. Kozai-Effekt und der Einfluss von Gezeitenreibung führen also zu einer Migration des Planeten nach innen [5]. Gleichzeitig vergrößert sich die Inklination unter Umständen so weit, dass die Bahn retrograd wird.

Die neuesten Entdeckungen bei den Exoplaneten haben also interessante, vielleicht schon etwas in Vergessenheit geratenen Effekten der Astronomie wieder neues Leben eingehaucht, und man darf gespannt sein, wie schnell die Vielfalt an Sonnensystemen wächst.

Wilhelm Kley

- [1] R. A. Rossiter, *Astrophys. J.* **60**, 15 (1924), D. B. McLaughlin, *Astrophys. J.* **60**, 22 (1924)
- [2] A. H. M. J. Triaud et al., *Astron. Astrophys.*, in Druck (2010), DOI: 10.1051/0004-6361/201014525
- [3] F. C. Adams und G. Laughlin, *Icarus*, **163**, 290 (2003)
- [4] Y. Kozai, *Astron. J.*, **67**, 591 (1964)
- [5] D. Fabrycky und S. Tremaine, *Astrophys. J.*, **669**, 1298 (2007)

Prof. Dr. Wilhelm Kley, Institut für Astronomie und Astrophysik, Universität Tübingen, Auf der Morgenstelle 10, 72070 Tübingen

NAH AM ORIGINAL

Nach knapp einem Jahr „Bauzeit“ enthielt die ATLAS-Kollaboration am Genfer CERN ein Wandgemälde. Es zielt das dreistöckige Gebäude, unter dem sich in rund 100 Metern Tiefe einer der Detektoren des Large Hadron Colliders befindet. Da dieser für die Öffentlichkeit nicht mehr zugänglich ist, können sich Besucher jetzt anhand der Illustration ein Bild machen. Auch wenn das Gemälde beeindruckt – ATLAS ist dreimal so groß.

Der US-amerikanische Künstler Josef Kristofoletti entdeckte in Italien die Faszination der Fresken. Die religiös-mythologischen Themen ersetzt er in seinen Werken gerne durch Motive aus der Wissenschaft. Hier hat er beides – in gewissem Sinne – verbunden: In der dargestellten Teilchenkollision nimmt er die Entdeckung des Higgs-Bosons vorweg, Spitzname „Gottespartikel“. (OD)

