

PLANETEN

Planeten um andere Sonnen

Die Suche nach extrasolaren Planeten und ihre Charakterisierung ist eines der aktivsten und zukunftsreichsten Forschungsgebiete der Astrophysik.

Joachim Wambsganß

Die Frage, ob es Planeten um andere Sterne gibt, beschäftigt die Menschen schon seit Jahrhunderten, aber erst seit Mitte der 90er-Jahre kennen wir die Antwort. Der Nachweis des ersten extrasolaren Planeten war – wie die Galileische Entdeckung der Jupitermonde – ein qualitativer Sprung vorwärts im Menschheitswissen. Inzwischen sind über 300 extrasolare Planeten bekannt, die meisten sind sehr verschieden von den Planeten in unserem Sonnensystem.

Schon seit den Hochkulturen der Antike interessieren sich die Menschen für Planeten. Die damals bekannten sieben „Wandelsterne“ – neben Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn zählten auch Sonne und Mond dazu – beeinflussen auch heute noch unsere Kultur: So sind etwa unsere Wochentage nach ihnen benannt. Mit der kopernikanischen Revolution entwickelte sich ein physikalisches Bild des Sonnensystems, und man verstand, dass auch die Erde dem Kreis der Planeten angehört, während die Sonne das Zentralgestirn ist und der Mond unser Satellit. In der Neuzeit wurden drei weitere Planeten entdeckt: Uranus durch William Herschel im Jahre 1781, Neptun durch Johann Galle 1846 und Pluto durch Clyde Tombaugh 1930.¹⁾

Wie sieht es nun aber mit Planeten um andere Sterne in der Milchstraße aus? Noch vor 15 Jahren war völlig unklar, ob solche extrasolaren Planeten existieren. So heißt es in einem 1995 erschienenen Artikel etwa: „However, the results to date are that no other planetary systems have been detected, and the absence of detection is becoming statistically significant“ [1]. In eben jenem Jahr wurde dann jedoch der erste Planet um einen sonnenähnlichen Stern entdeckt, und zwar mit einer spektroskopischen Methode, die den Doppler-Effekt ausnutzt [2]. In der Zwischenzeit sind andere Suchmethoden hinzu gekommen, die alle auf relativ einfachen physikalischen Prinzipien beruhen, aber mit enormen technischen Herausforderungen einhergehen. Der naheliegendste Nachweis, die direkte Fotografie, stellt in der Praxis die höchsten Anforderungen. Seit Jahren haben sich viele Gruppen weltweit darum bemüht und etwa ein halbes Dutzend (verschiedene) „Erstaufnahmen“ veröffentlicht, die jedoch alle mit gewissen Zweifeln behaftet sind. Die beiden im Dezember 2008 bekannt gegebenen direkten Aufnahmen des sonnennahen Sterns Fomalhaut im sichtbaren Licht (Abb. 1, [3])

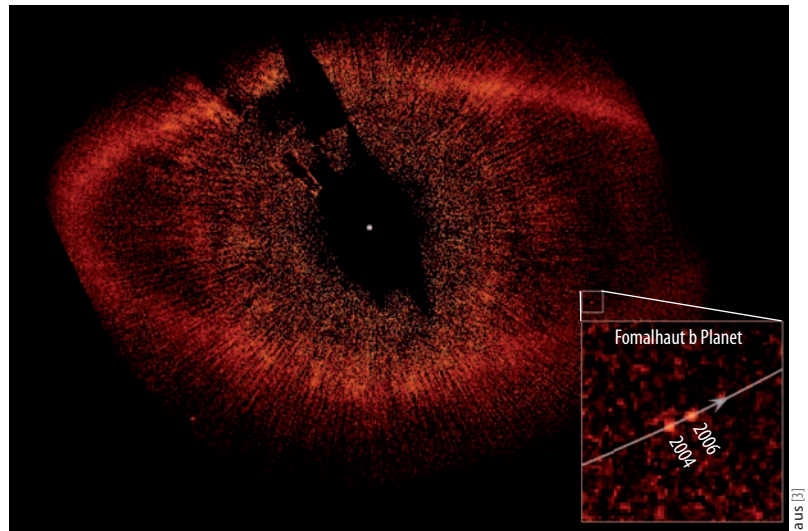


Abb. 1 Im sichtbaren Licht hat sich ein Planet um den sonnennahen Stern Fomalhaut (Zentrum) durch zwei kleine helle Fleckchen „verraten“: seine Positionen in den Jahren 2004 und 2006. Sein

Abstand zu Fomalhaut beträgt etwa die 120-fache Entfernung zwischen Erde und Sonne. Der hellrote Ring besteht aus Staub.

und von HR8799 im Infraroten [4] scheinen nun aber die meisten Skeptiker zufriedenzustellen und könnten sich als die ersten direkten Aufnahmen von Planeten um andere Sterne bestätigen.

Wobble à la Doppler

Die bis heute erfolgreichste Methode nutzt aus, dass sich in einem Zwei-Körper-System aus Stern und Planet beide um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Die Masse des Sterns ist üblicherweise um ein Vielfaches größer als die des Planeten. Folglich liegt der Schwerpunkt sehr nahe beim Stern, manchmal

KOMPAKT

- Astronomen suchen mit spektroskopischen, photometrischen, astrometrischen und fotografischen Methoden nach Exoplaneten.
- Die Massen der bislang entdeckten rund 300 Exoplaneten reichen von vielen Jupitermassen bis zu wenigen Erdmassen.
- Mit den erwarteten Entdeckungen der Satelliten-Missionen Kepler und Gaia werden wir bald Zehntausende Planeten um andere Sterne kennen.

1) Pluto wurde inzwischen der Planetenstatus wieder aberkannt, vgl. den einleitenden Artikel von M. Bartelmann.

Prof. Dr. Joachim Wambsganß, Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH), Astronomisches Rechen-Institut (ARI), Mönchhofstr. 12–14, 69120 Heidelberg

sogar innerhalb des Sterns. Der Radius der Bahn, die der Stern zurücklegt, ist also klein. Entsprechend ist auch seine Bahngeschwindigkeit klein, im Gegensatz zu Bahnradius und -geschwindigkeit des Planeten. Aus der Sicht eines beobachtenden Astronomen hat der Stern aber gegenüber dem Planeten einen großen Vorteil: Er ist sichtbar, und somit ist auch seine auf die Sichtlinie projizierte Radialgeschwindigkeit messbar.

Geschwindigkeiten von Sternen (oder Galaxien) entlang der Sichtlinie lassen sich messen, indem man ihre Spektrallinien untersucht. Dabei vergleicht man die Wellenlänge λ_1 der Spektrallinie eines bekannten Elementes im Spektrum der Galaxie mit der Wellenlänge λ_0 des gleichen Elementes im Labor. Die Relativgeschwindigkeit v lässt sich aus der Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ bestimmen, die proportional zur Geschwindigkeit ist (für $v \ll c_0$ mit der Lichtgeschwindigkeit c_0):

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = (\lambda_1 - \lambda_0)/\lambda_0 \approx v/c_0$$

Das ist der bekannte Doppler-Effekt. Wenn nun ein Stern in einem System mit einem Begleiter periodisch um den Schwerpunkt kreist, verschieben sich die Emissions- oder Absorptionslinien des Sterns periodisch (Abb. 2). Da der Stern sozusagen hin und her wackelt, heißt diese Radialgeschwindigkeitsmethode auch „Doppler-Wobble“. Das Ergebnis einer solchen Messreihe ist ein Diagramm der Radialgeschwindigkeit des Sterns als Funktion der Zeit. Im Idealfall einer kreisförmigen Planetenbewegung, die „von der Seite“ gesehen wird, wäre dies eine perfekte Sinuskurve.

Gemessen wird nur die Geschwindigkeitskomponente entlang des Sehstrahls. Bei einer Neigung der Bahnachse um den Winkel $i \neq 90^\circ$ – wenn wir das Stern-Planet-System nicht exakt „von der Seite“ sehen – lässt sich nur eine untere Grenze für die Masse

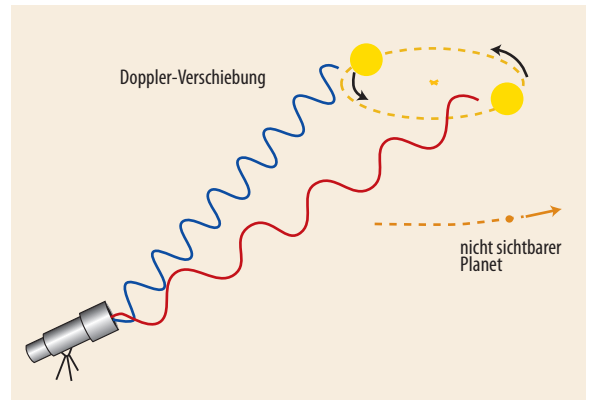


Abb. 2 Da Stern und Planet um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen, verschieben sich die Spektrallinien des Sterns zu längeren Wellenlängen (zum Roten), wenn sich der Stern von uns entfernt, zu kürzeren (zum Blauen), wenn er sich uns nähert.

bestimmen: Durch die Projektion kommt noch der (meist unbekannte) Faktor $1/\sin i \geq 1$ hinzu. Wenn die Bahn stark exzentrisch ist, gibt es eine weitere Abweichung von der idealen Sinuskurve.

Aus einer solchen Geschwindigkeitskurve lassen sich leicht Umlaufperiode P und Geschwindigkeitsamplitude V_\perp ablesen. Mithilfe des dritten Keplerschen Gesetzes und unter Kenntnis des Spektraltyps des Sterns folgt eine untere Grenze für die Planetenmasse (Infokasten „Radialgeschwindigkeitsmethode“). Bei mehreren Planeten überlagern sich die Kurven, aber mit genügend guten Beobachtungsdaten erlauben es numerische Anpassungsprogramme, auch zwei oder mehr Planeten nachzuweisen (Abb. 3).

Die Schwierigkeit in der Praxis liegt nun an den extrem kleinen zu messenden Geschwindigkeiten V_\perp . Um ein Beispiel zu geben: Die Maximalgeschwindigkeit der Sonne in unserem Planetensystem, die stark von Jupiter dominiert ist, liegt bei etwa 14 m/s (der Beitrag der Erde beträgt nur ca. 10 cm/s). Das ist die gleiche Geschwindigkeit, die Sprinter wie Usain Bolt erreichen! Aber solche Geschwindigkeiten muss man aus einer Entfernung von vielen Lichtjahren messen, und zwar im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit. Dies erfordert eine Messgenauigkeit von besser als $\Delta\lambda/\lambda = V_\perp/c_0 = 5 \times 10^{-8}$! Dies ist nur mit höchstem technischem Aufwand zu erreichen. Eine von den Genfer Entdeckern um Michel Mayor perfektionierte Technik baut eine Jod-Zelle in den Sehstrahl ein, die extrem viele scharfe Spektrallinien liefert [2]. Diese dienen dann als Wellenlängenstandard. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen unter günstigen Bedingungen bei unter 1 m/s.

Positionen bestimmen

Die Bewegung des Sterns um den Massenschwerpunkt des Stern-Planet-Systems hat neben der radialen Komponente auch eine tangentielle (Abb. 2). Locker gesprochen: Der Stern bewegt sich nicht nur periodisch auf uns zu und von uns weg, sondern er geht auch nach links und rechts. Das heißt, seine Position ändert sich ebenfalls. Damit liegt es nahe, die Position als Funktion

RADIALGESCHWINDIGKEITSMETHODE

Das 3. Keplersche Gesetz verknüpft die großen Bahnhalfachsen mit den Massen und der Periode (G ist die Gravitationskonstante):

$$a^3 = (a_* + a_{PL})^3 = \frac{G(M_* + M_{PL})}{4\pi^2} P^2$$

Da die große Halbachse des Sterns a_* sehr viel kleiner ist als die des Planeten a_{PL} , kann man setzen $a_{PL} \approx a$. Die Masse des Sterns M_* , die aus dem Spektraltyp folgt, ist sehr viel größer als die Planetenmasse M_{PL} ; deshalb kann letztere in der Summe entfallen. Damit gilt näherungsweise:

$$a_{PL}^3 \approx \frac{GM_*}{4\pi^2} P^2.$$

Die (Maximal-)Geschwindigkeit des Planeten folgt dann aus der Gleichheit von Fliehkraft und Gravitation:

$$V_{PL} = \sqrt{GM_*/a_{PL}}.$$

Mithilfe des Schwerpunktsatzes ($M_* a_* = M_{PL} a_{PL}$) und der Beziehung zwischen Bahngeschwindigkeit und großer Halbachse ($V_{PL} = a_{PL} (2\pi/P)$) bzw.

$V_* = a_* (2\pi/P)$) ergeben sich das Verhältnis zwischen den Geschwindigkeiten sowie die Planetenmasse:

$$M_{PL} = M_* V_* / V_{PL}.$$

Da man aber nicht wirklich V_* misst, sondern nur die Komponente senkrecht zum Sehstrahl, $V_\perp = V_* \sin i$, folgt aus den gemessenen Größen nur die Planetenmasse kombiniert mit der unbekanntem Bahnneigung:

$$M_{PL} \times \sin i = M_* V_\perp / V_{PL}.$$

Daher legt diese Methode immer nur eine untere Grenze für die Planetenmasse fest. Mit typischen Messwerten erhält man folgenden Ausdruck, der die Planeten-Masse direkt angibt:

$$M_{PL} \approx \frac{1}{\sin i} 0,003 M_\odot \times V_{100} M_1^{2/3} P_1^{1/3}.$$

Hier ist V_{100} die gemessene Maximalgeschwindigkeit in Einheiten von 100 m/s, M_1 die Sternmasse in Einheiten der Sonnenmasse und P_1 die Periode in Jahren.

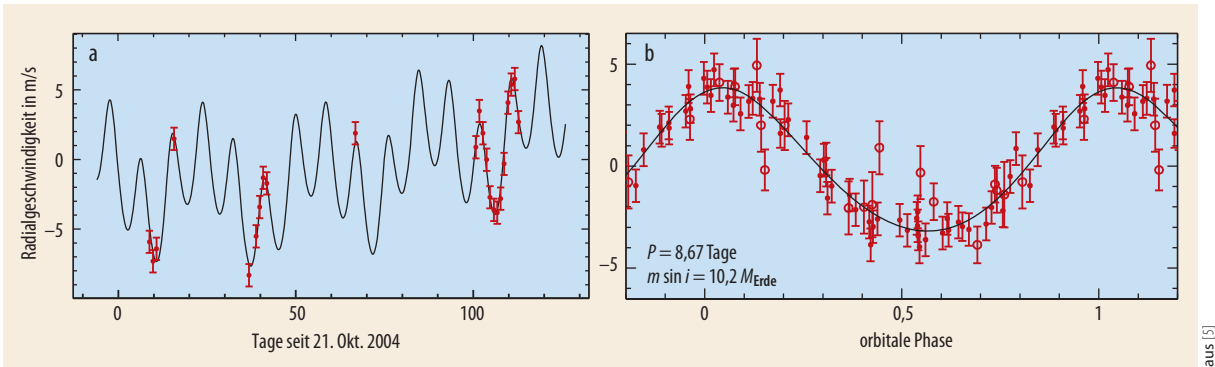


Abb. 3 An die über eine Zeit von 140 Tagen gemessenen Radialgeschwindigkeiten in dem System HD 69830 mit drei „Neptuns“

(a, rote Datenpunkte) lässt sich eine Modellkurve anpassen, aus der die Beiträge der einzelnen Planeten folgen (b).

der Zeit zu messen (Astrometrie), um Planeten zu finden. Aber auch hier ist die Präzision das Problem: Die Sternposition ändert sich nur um einen extrem kleinen Winkel, der selbst für nahe Sterne um ein Vielfaches unter der Auflösungsgrenze der besten Teleskope liegt. Und dieser Winkel verkleinert sich umgekehrt proportional zur Entfernung. Zur Veranschaulichung: Aus 32 Lichtjahren Entfernung würde sich die Position der Sonne durch die Planetenstörung um maximal eine Millibogensekunde verändern. Das ist ein Hundertstel der Auflösung des Hubble-Space-Teleskops. Und die Zeitskala wäre etwa zwölf Jahre.

Wenn es aber gelingt, diesen kleinen Winkel zu messen, lässt sich aus der Maximaländerung $\Delta\theta_*$ ebenfalls – unter Verwendung des Schwerpunktsatzes – die Planetenmasse M_{PL} bestimmen (Infokasten „Astrometrie“). Bei dieser Methode spielt der Sichtwinkel und damit der Faktor $\sin i$ keine wichtige Rolle. Er beeinflusst nur die Form der Positionsänderung, nicht die Maximalwerte $\Delta\theta_*$. Der Stern folgt immer einer Ellipsenbahn, im Extremfall „von oben“ ($\sin i = 0^\circ$) sehen wir die exakte Bahnkurve, im Fall „von der Seite“ ($\sin i = 90^\circ$) ist sie zu einer geraden Strecke entartet. Der Durchmesser ist immer gleich $2 \Delta\theta_*$.

Transits und Mikrolinsen

Bei zufällig im Raum ausgerichteten Planetensystemen kommt es gelegentlich vor, dass wir von der Erde aus eines fast perfekt „von der Seite“ sehen, wir schauen genau auf die Bahnebene. In einem solchen Fall kommt es regelmäßig vor, dass der Planet von uns aus betrachtet vor dem Stern vorbeiläuft (Abb. 4). Der Planet verdunkelt dabei einen Teil der Sternoberfläche. Für die Zeitdauer des Vorübergangs ist die Helligkeit des Sterns etwas schwächer als vor- und nachher (Infokasten „Transitmethode“).

Bei dieser photometrischen Methode ist die erwartete Lichtkurve des Sterns in erster Näherung trapezförmig: Die Helligkeit fängt an abzufallen, sobald die Planetenscheibe „ersten Kontakt“ zur Sternscheibe hat. Wenn der Planet vollständig innerhalb der Sternscheibe liegt, ist das untere Plateau der Lichtkurve erreicht. Da das Helligkeitsprofil eines Sterns aber nicht konstant ist, sondern eine Mitte-Rand-Verdunkelung

aufweist, ist die Lichtkurve während des Transits leicht U-förmig gekrümmt.

Die Transit-Methode erlaubt es sogar, die Zusammensetzung der Planeten-Atmosphäre zu entschlüsseln. Wenn der Planet vor der Sternscheibe steht, können Gasmoleküle in der transparenten Planetenatmosphäre Photonen des Sterns absorbieren, die auf dem Weg zu uns sind. Während eines Transits ändert sich somit nicht nur die scheinbare Helligkeit des Sterns, sondern möglicherweise auch das Spektrum. Solche winzigen differentiellen Unterschiede in einer Spektrallinie haben Hinweise auf das „Abdampfen“ einer Planetenatmosphäre gegeben [6]. Jüngst ist es durch Präzisions-Spektroskopie im Nahinfrarot bei HD 189733b sogar gelungen, Methan und Wasserdampf nachzuweisen [7, 8].

Eine weitere photometrische Methode nutzt den Mikrogravitationslinseneffekt, sie unterscheidet sich sehr deutlich von den bisher beschriebenen. Dabei wird die Helligkeit eines weit entfernten Hintergrundsterns (der nichts mit dem Planetensystem zu tun hat) immer wieder gemessen. „Weit“ heißt in diesem Fall etwa 20 000 Lichtjahre (im Gegensatz dazu werden die anderen Methoden in Sonnennähe angewandt, bis zu etwa 500 Lichtjahren Entfernung). Wenn nun ein anderer Stern, der zwischen uns und diesem Hintergrundstern steht, sehr nahe an der Sichtlinie vorbeigeht, wird das Licht des Hintergrundsterns durch den Gravitationslinseneffekt in sehr charakteristischer Weise verstärkt. Hat der als Linse wirkende Vordergrund-

2) Eine Astronomische Einheit (1 AE) entspricht dem mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne von 150 Millionen km.

ASTROMETRIE

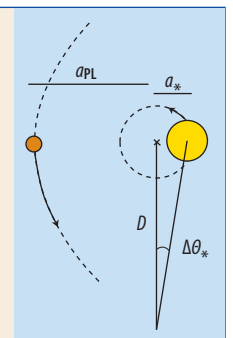
Aus der Dreiecks-Geometrie (Abb.) folgt für den Winkelradius der Bahn des umkreisten Sterns:

$$\Delta\theta_* = \frac{a_*}{D} = \frac{a_{PL} M_{PL}}{M_* D} = \frac{M_{PL}}{D} \left(\frac{GP^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} M_*^{-2/3},$$

wobei D der Abstand des Sterns von uns ist, und sich die große Bahnhalbachse wie im ersten Infokasten aus der Periode und dem 3. Keplerschen Gesetz ableiten lässt (wiederum sei $a_{PL} \approx a$). In „praktischen“ Einheiten führt das zu einer Planetenmasse von

$$M_{PL} \approx 0,003 M_\odot \times \Delta\theta_{0,001} M_1 D_{10}/a_1,$$

wobei der Winkel in Tausendstel Bogensekunden, die Masse des Sterns in Sonnenmassen, der Abstand des Systems in Einheiten von 10 Lichtjahren und die große Bahnhalbachse in Astronomischen Einheiten²⁾ ausgedrückt sind.



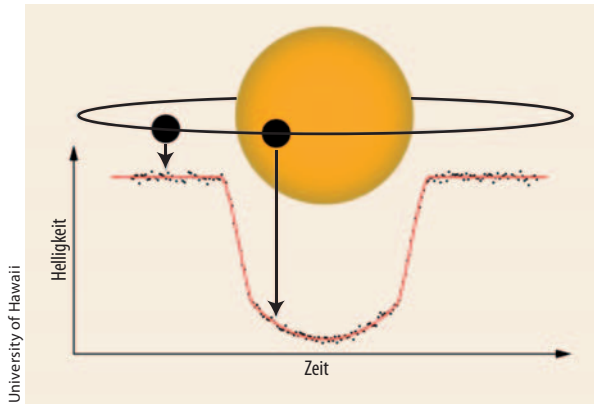


Abb. 4 Bei der Transitmethode beträgt die Bedeckungsdauer maximal $t_{\text{occult}} = 2 R_{\text{P}}/V_{\text{PL}}$. Befindet sich der Beobachter nicht exakt in der Bahnebene, kann die Dauer geringer sein. Ist er zu weit weg von der Bahnebene, funktioniert die Methode nicht.

stern nun einen Planeten, dann kann die Verstärkungs-Lichtkurve von der idealen zeitlich symmetrischen Mikrolinsen-Kurve abweichen und charakteristische Signaturen eines Planeten zeigen (Abb. 5).

Es ist nicht ganz einfach, aus der Messung einer solchen Abweichung die Masse des „störenden“ Planeten zu bestimmen, in der Praxis geschieht das durch numerische Modellierung der Lichtkurve. Das Problem: Die Messung lässt sich nicht wiederholen: Wenn das Planetensystem vor dem Hintergrundstern durchgezogen ist, ist das Ereignis vorbei. Insofern erscheint diese Methode zunächst nicht ganz so attraktiv wie die bereits erwähnten. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit, ein Mikrolinsenereignis zu beobachten, sehr gering: Nur etwa einer unter einer Million Sternen im Zentralbereich der Milchstraße wird jeweils durch einen Vordergrundstern verstärkt. Und selbst wenn jeder dieser „Linsen-Sterne“ ein Planetensystem hat, sind nur ein paar Prozent dieser Lichtkurven stark genug beeinflusst, um eine deutliche Planeten-Signatur zu zeigen.

Aber die Mikrolinsen-Methode bietet einige gewichtige Pluspunkte: Die Abhängigkeit von der Planetenmasse ist viel geringer als bei anderen Methoden; sogar Planeten mit Erdmassen liegen im Bereich des Möglichen, was bei anderen bodengebundenen Methoden gegenwärtig noch extrem schwierig ist. Dar-

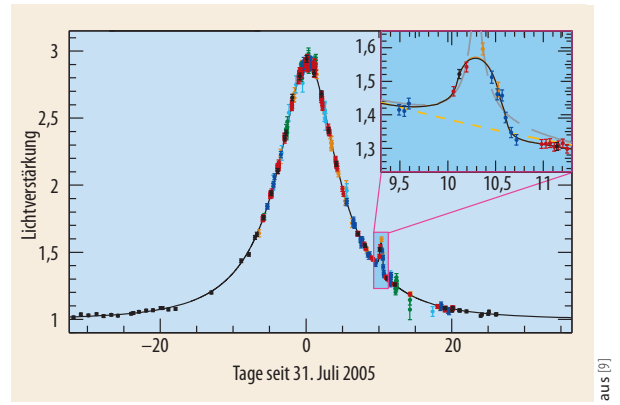


Abb. 5 Bei der Mikrogravitationslinsenmethode macht sich ein Planet durch einen kleinen Peak (rechts) bemerkbar, der der Lichtkurve durch einen Einzelstern überlagert ist.

über hinaus ist dieses Verfahren empfindlich für Planeten in der „habitablen Zone“, das ist der Bereich, in dem die erwarteten Planeten-Temperaturen flüssiges Wasser zulassen, sodass dort Leben, wie wir es kennen, denkbar ist. Schließlich ist die Mikrolinsenmethode am besten geeignet, um Exoplaneten statistisch zu analysieren: Die galaktische Planeten-Population lässt sich aus der Häufigkeit, mit der Exoplaneten-Systeme verschiedener Masse vor den „Hintergrundlampen“ vorbeiziehen, ableiten. Die „Nicht-Wiederholbarkeit“ ist – wie auch bei Supernovae oder Gamma-Ray-Bursts – kein wirkliches Problem: Bei 1000 oder mehr Messpunkten pro Lichtkurve, oft gesammelt von verschiedenen Teams und mit verschiedenen Teleskopen, ist die Überzeugungskraft der Entdeckung nur eine Frage des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses. Abb. 5 zeigt die gemessene Mikrolinsen-Lichtkurve des Sterns OGLE-2005-BLG-390 mit einem „erdähnlichen“ Exoplaneten von etwa 5,5 Erdmassen (aus [9]).

Direkt im Bild

Die eingangs bereits erwähnte direkte Fotografie eines extrasolaren Planeten geht mit zwei großen Schwierigkeiten einher. Zum einen ist der Helligkeitsunterschied enorm: Im sichtbaren Licht ist der Stern etwa eine Milliarde mal heller als ein großer Planet, im Infraroten ist das Verhältnis „nur“ 10^7 bis 10^8 . Zum anderen ist der Winkelabstand zwischen Stern und Planet sehr klein. Der Erdbestand von einer Astronomischen Einheit entspricht bei einer Entfernung von einem Parsec ($1 \text{ pc} = 3,26 \text{ Lichtjahre}$) genau einer Bogensekunde und verringert sich umgekehrt proportional mit zunehmender Entfernung. Aber selbst der sonnennächste Stern ist mehr als 1 pc entfernt, „typische“ Sterne, bei denen man nach Planeten sucht, befinden sich in Entfernungen bis zu 50 pc . Diese Schwierigkeiten machen die direkte Abbildung zu einer extremen technischen Herausforderung, die mit interferometrischen und koronografischen Techniken angegangen wird, meist kombiniert mit adaptiver Optik. Sie lassen sich am ehesten für Systeme von jungen massereichen Planeten

TRANSITMETHODE

Die Sternhelligkeit wird während des Transits um einen Anteil f_{occult} abgeschwächt, der aus dem Verhältnis zwischen den Flächen von Planeten- und Sternscheibe (R_{PL} und R_{S} sind die Radien von Planet und Stern) folgt:

$$f_{\text{occult}} = (R_{\text{PL}}/R_{\text{S}})^2.$$

Die maximale Beobachtungsdauer einer solchen Lichtschwächung ist die Zeit, die der Planet braucht, um eine Strecke zurückzulegen, die dem Stern-durchmesser entspricht:

$$t_{\text{occult}} = 2 R_{\text{S}}/V_{\text{PL}} = 2 R_{\text{S}} \sqrt{a_1/M_*}.$$

In praktischen Einheiten (Sternradius und -masse in Einheiten der Sonne,

große Halbachse in Astronomischen Einheiten) heißt das:

$$t_{\text{occult}} \approx 13 \text{ Stunden} \times R_1 \sqrt{a_1/M_*}.$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein beliebiges Planetensystem gerade so orientiert ist, dass wir diesen Helligkeitsabfall sehen können, ist gegeben durch das Verhältnis zwischen Sternradius und großer Bahnhalbachse des Planeten:

$$p_{\text{occult}} = R_{\text{S}}/a.$$

Angewandt auf das Sonnensystem ist $f_{\text{occult}} \approx 10^{-4}$ für Erde bzw. 4×10^{-2} für Jupiter, t_{occult} beträgt 13 bzw. 30 Stunden und p_{occult} ist 5×10^{-3} bzw. 10^{-3} .

mit großen Bahnhalbachsen im nahen Infrarotbereich überwinden: Die thermische Strahlung des Planeten ist relativ groß, die Planck-Strahlungskurve des Sterns bereits abgefallen. Bahnradien von etwa 100 AE oder mehr entsprechen bei nahen Sternen Winkeln von mehr als einer Bogensekunde.

Wenn schließlich ein schwaches Lichtfleckchen neben einem hellen Stern als real entdeckt wurde, muss man noch nachweisen, dass es keine zufällige Projektion entlang der Sichtlinie ist, sondern dass sich der potenzielle Begleiter idealerweise mit dem Stern mit- bzw. um ihn herum bewegt. Zudem ist darzulegen, dass es sich bei dem Begleiter nicht etwa um einen Braunen Zwerg handelt. Eine Massenbestimmung ist bei jungen Planeten nur möglich im Vergleich von gemessener Helligkeit und abgeleitetem Alter mit theoretischen Modellen.

Eine Erfolgsgeschichte

Die Suche nach extrasolaren Planeten und ihre Charakterisierung gehören inzwischen zu den aktivsten und zukunftsreichsten Forschungsgebieten in der Astrophysik. Mitte April 2009 waren 344 extrasolare Planeten bekannt, darunter sind 35 Systeme mit zwei oder mehr Planeten.³⁾ Die Radialgeschwindigkeitsmethode ist bisher die erfolgreichste (272 Planetensysteme, 307 Planeten, davon 33 Mehrfachsysteme), die Transitmethode hat in den letzten Jahren stark aufgeholt (58 Nachweise, bisher alles Einzelplaneten), und auch die Mikrolinsenmethode ist inzwischen kompetitiv (8 Entdeckungen, dabei ein Doppelsystem). Die Parameter der bekannten Exoplaneten überdecken weite Bereiche in Masse, Bahnhalbachse und Entfernung (Abb. 6).

Die bisher gefundenen Planeten sind nicht repräsentativ für die Planetenpopulation der Milchstraße. Durch die Empfindlichkeitsbereiche der verschiedenen Methoden kommen teilweise starke Auswahleffekte zum Tragen. Generell lassen sich Planeten großer Masse mit allen Techniken leichter nachweisen als massearme. Ansonsten kann man mit der Radialgeschwindigkeitsmethode Planeten mit kleiner Bahnhalbachse und kurzen Umlaufperioden am leichtesten messen. Das astrometrische Signal wiederum ist am größten, wenn der Planet weit entfernt vom Stern ist. Bei Transits erzeugt ein großer Planet einen deutlicheren Helligkeitsabfall. Kurze Perioden und kleine Bahnhalbachsen erleichtern die periodische Bestätigung des Signals. Die Mikrolinsenmethode ist besonders empfindlich für (instantane, projizierte) Abstände von einigen Astronomischen Einheiten und kann auch Planeten mit wenigen Erdmassen noch nachweisen. Bei der direkten Abbildung hilft ein großer Abstand und ein junger/heller Planet.

Von Hot Jupiters und Super-Erden

Unter den zuerst entdeckten Exoplaneten waren viele mit extrem kurzen Umlaufzeiten von nur wenigen

Tagen oder Wochen. Wegen der großen Massen und ihrer Nähe zu den Muttersternen werden sie „Hot Jupiters“ genannt. Diese waren zunächst eine große Herausforderung für Theorie und Simulationen: So nah am Stern können keine Planeten entstehen. „Migration“, die über einen langen Zeitraum anhaltende Wanderung nach innen, ist die wahrscheinliche Erklärung. Durch die hohen Temperaturen (einige Planeten sind nur wenige Sternradien entfernt von der Sternoberfläche) dampft die Planetenatmosphäre mit der Zeit vermutlich ab. Die kurzen Bahnperioden sind in erster Linie auf den bereits genannten Auswahleffekt zurückzuführen. Mit längeren zeitlichen Basislängen wurden in den letzten Jahren auch Exoplaneten mit Umlaufzeiten von einigen Jahren gefunden (und dabei auch ein Kandidat aus den 80er-Jahren bestätigt).

Bei gut zwei Drittel aller bekannten Exoplaneten liegt die Masse bei der Jupitermasse ($1 M_{\text{Jup}} \approx 333 M_{\text{Erde}}$) oder darüber. Da die mit der Radialgeschwindigkeitsmethode abgeleiteten Werte nur untere Grenzmassen angeben, könnte der Anteil auch höher liegen. In den letzten Jahren wurden allerdings auch mehr und mehr Objekte mit Massen deutlich unter M_{Jup} entdeckt, eine ganze Reihe „Neptuns“ ($17 M_{\text{Erde}}$). Insgesamt variieren die abgeleiteten Massen zwischen etwa 4 und $8000 M_{\text{Erde}} = 24 M_{\text{Jup}}$.

3) Eine aktuelle Darstellung mit viel Hintergrundinformation ist *J. Schneider, The Extrasolar Planets Encyclopedia*; <http://exoplanet.eu>. Die Seite führt auch mehr als 70 bodengebundene und 20 Satelliten-Programme und -Projekte auf.

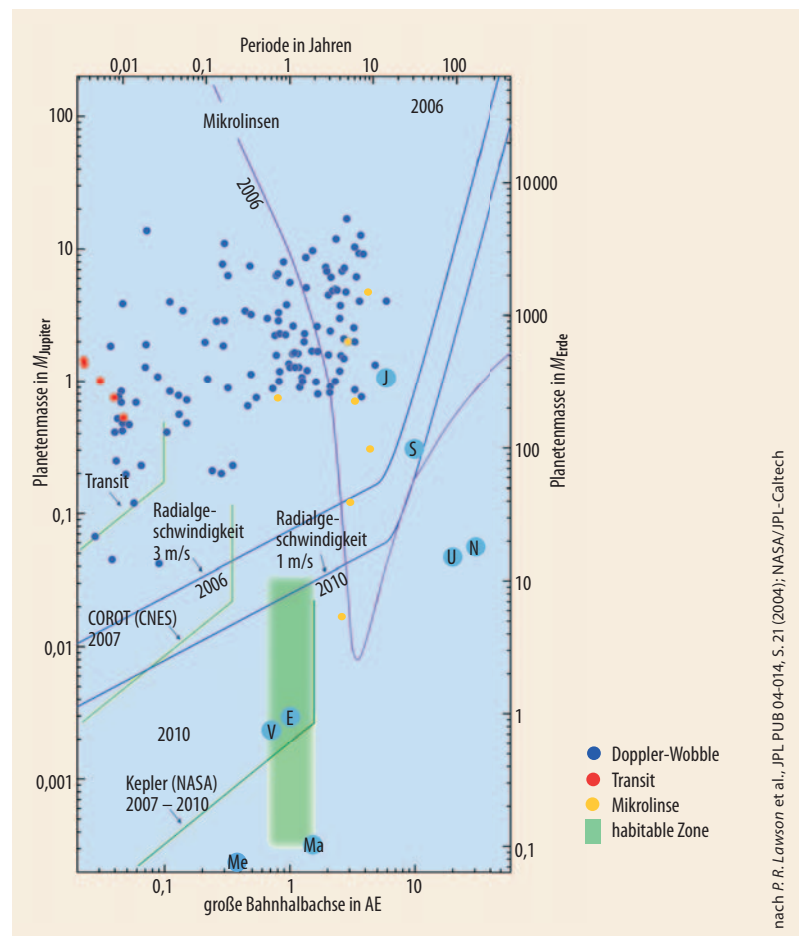


Abb. 6 Masse-Abstand-Diagramm für einige der bisher bekannten Exoplaneten nach ihrer Entdeckungsmethode. Die acht solaren Planeten (hellblau, mit Anfangsbuchstaben gekennzeichnet) dienen zum Vergleich. Die Linien markieren die gegenwärtigen Grenz-Empfindlichkeiten der Methoden sowie die Möglichkeiten, die zukünftige Satellitenmissionen bieten.

nach P. R. Lawson et al., JPL PUB 04-014, S. 21 (2004); NASA/JPL-Caltech

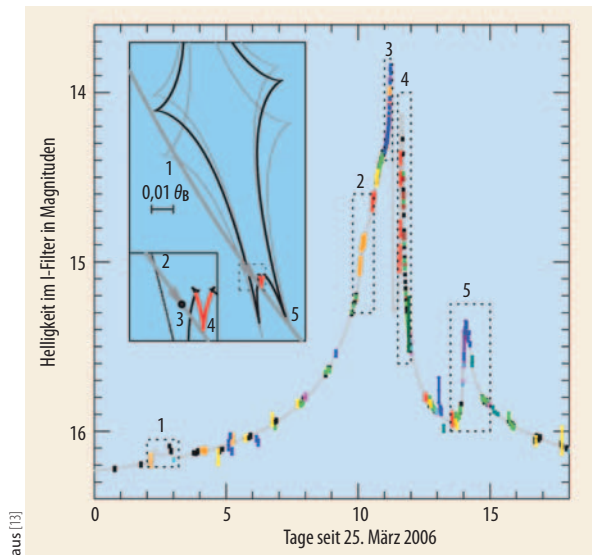


Abb. 7 Datenpunkte und modellierte Lichtkurve des Mikrolinseneignisses OGLE-2006-BLG-109Lb. Die farbigen Datenpunkte entsprechen verschiedenen Observatorien. Die mit den Zahlen 1 bis 5 gekennzeichneten Bereiche entsprechen charakteristischen „features“, die Insets zeigen die Bewegung des Hintergrundsterns über die sog. Kaustik-Linien, die für hohe Verstärkung sorgen. Die Lichtkurve lässt sich nur mit zwei Planeten erklären.

Die Transitmethode ermöglicht es, die Größe des Planeten zu bestimmen. Wenn zusätzlich Doppler-Daten vorliegen, kann man – nun unter Kenntnis des Neigungswinkels $i \approx 90^\circ$ – neben der Masse auch die Dichte des Planeten bestimmen. Dies ist bei einem guten Dutzend Exoplaneten gelungen, deren Dichtewerte meist bei etwa der halben Jupiterdichte liegen. Allerdings gibt es auch zwei überraschende Extremwerte, die mit $\rho \approx 0,2 \text{ g cm}^{-3}$ [10] bzw. $12,5 \text{ g cm}^{-3}$ [11] etwa fünfmal niedriger als die Jupiterdichte ($\rho_{\text{Jup}} \approx 1,3 \text{ g cm}^{-3}$) bzw. doppelt so hoch wie die Dichte der Erde ($\rho_{\text{Erde}} \approx 5,6 \text{ g cm}^{-3}$) sind. Genau verstanden sind diese Ergebnisse noch nicht.

In den letzten drei Jahren wurde sogar eine Handvoll Planeten entdeckt, deren Massen bei $(3 - 10) M_{\text{Erde}}$ liegen. Diese haben möglicherweise eine feste Oberfläche, sodass sie der Erde vermutlich relativ ähnlich sind. Die Gravitationslinsenmethode ist in diesem Massenbereich besonders erfolgreich, in jüngster Zeit auch die Doppler-Wobble-Technik. Da trotz der großen technischen Schwierigkeiten schon einige Planeten mit solch geringer Masse gefunden wurden, sind solche Planeten vermutlich viel zahlreicher als die Gas-Giganten. Nach den bisherigen Daten ist es nicht ausgeschlossen, dass quasi jeder Stern einen solchen Begleiter hat.

Die Planeten im Sonnensystem lassen sich alle relativ gut durch eine Kreisbahn beschreiben. Mit einer Bahnexzentrizität von $e = 0,21$ weicht Merkur am stärksten davon ab, bei allen anderen Planeten gilt $e < 0,10$. Unter den Exoplaneten gibt es viele mit deutlich größeren Exzentrizitäten, einige sogar mit $0,7 \leq e \leq 0,97$. Vermutlich ist es kein Zufall, dass die Planeten im Sonnensystem relativ kleine Exzentrizitäten haben: eine solche dynamisch „ruhige“ Umgebung ist sicherlich für die Entwicklung von Leben günstig.⁴⁾

Mehrfachplaneten und Muttersterne

Es gibt 35 Sterne, um die bereits zwei oder mehr Planeten entdeckt wurden. Besonders spektakulär sind dabei das Doppler-Wobble-System 55 Cancri mit inzwischen fünf (!) entdeckten Planeten [12] sowie das mit der Mikrolinsmethode kürzlich nachgewiesene Zweifach-System OGLE-2006-109Lb,c [13] (Abb. 7), das sich als herunterskalierte Version des Sonnensystems, als ein Jupiter-Saturn-Analog erweist. Die Autoren betonen, dass eine solche Entdeckung unter gerade sechs Mikrolinsen-Planeten darauf hindeutet, dass solche Systeme häufig sind.

Interessant ist auch die Frage, welche Eigenschaften die Muttersterne der bisher gefundenen Exoplaneten aufweisen. Die ersten wurden aufgrund eines Auswahl effekts um sonnenähnliche Sterne gefunden (Spektraltyp G und F): Zum einen sind G-Sterne wegen ihrer relativ kühlen Oberflächen ($T_{\text{Sonne}} \approx 5800 \text{ K}$) und entsprechend vielen und schmalen Spektrallinien besonders gut geeignet für die Doppler-Methode. Zum anderen wusste man, dass mindestens ein G-Stern Planeten trägt, und suchte entsprechend zunächst bei Sternen ähnlichen Spektraltyps. Inzwischen gibt es aber auch Entdeckungen um massereichere und heißere Sterne (A- und F-Sterne) sowie um masseärmere M-Zwerg.

Bei ein paar Hundert Planeten kann man auch bereits gewisse statistische Schlussfolgerungen ziehen und Korrelationen betrachten: Demnach existieren Planeten häufiger um metallreiche Sterne als um metallarme (Astronomen bezeichnen alle Elemente jenseits von Helium als „Metalle“). Dies ist plausibel, da in der Frühphase der Planetenbildung schwere Elemente in Form von Staub essenziell sind für das Wachstum von mikroskopischen zu makroskopischen Strukturen in der protoplanetaren Scheibe. Darüber hinaus zeigt sich ein Trend, dass massereiche Planeten bevorzugt um massereiche Sterne zu finden sind. Das lässt sich durch die Entstehungsgeschichte leicht nachvollziehbar: Die Massen protoplanetarer Scheiben skalieren vermutlich mit der Sternmasse.

Ausblick

Das Forschungsthema „extrasolare Planeten“ hat in kurzer Zeit eine ganze Generation von Astrophysikern in ihren Bann geschlagen: Sehr viele Forschergruppen weltweit beschäftigen sich mit allen Aspekten der Suche nach Exoplaneten und ihrer Charakterisierung und Entstehungsgeschichte.³⁾

Bereits im Orbit ist der europäische COROT-Satellit. Bisher lieferte er vier Transitplaneten mit Perioden von einigen Tagen und Transittiefen von etwa einem Prozent [14]. Seine Kamera ist für jeweils fünf Monate auf ein Feld fixiert, er misst dabei quasi ununterbrochen die Helligkeit von 12 000 Sternen und ist damit empfindlich für Transits mit Perioden von bis zu einigen Wochen. In den kommenden Monaten ist mit weiteren interessanten Ergebnissen zu rechnen.

4) vgl. den Artikel von W. Kley in diesem Heft.

Die amerikanische Kepler-Mission ist im März 2009 gestartet und soll von 100 000 Sternen 3,5 Jahre lang immer wieder die Helligkeit messen. Einige Tausend Transits sind zu erwarten, mit Perioden von bis zu einem Jahr. Der Gaia-Satellit der europäischen Raumfahrtorganisation ESA soll Ende 2011 starten und häufige höchst-präzise Positionsmessungen von Sternen durchführen. Er soll bis zu 20 000 (!) astrometrische Planeten-Entdeckungen liefern. Schließlich soll im Jahre 2013 das James Webb Space Telescope als Hubble-Nachfolger im infraroten Wellenlängenbereich viele Exoplaneten direkt abbilden. Darüber hinaus gibt es eine Reihe noch weit ambitionierterer Satelliten-Pläne.

Ganz ohne Zweifel werden wir in den nächsten Jahren und Jahrzehnten viele Überraschungen erleben. Neue Daten werden helfen, die statistischen Aspekte zu verstehen und Fragen zu beantworten wie: Wieviele Sterne haben Planeten? Sind Planeten „der Normalfall“? Wie entstehen Planetensysteme? Wie entwickeln sie sich? Zu den aufregendsten Aspekten extrasolarer Planeten gehören Fragen nach Biomarkern, Bewohnbarkeit und potenziellem Leben. Auf welchen Planeten können sich Lebensformen entwickeln? Was sind potenzielle Indikatoren von biologischen Substanzen oder Leben? Wie kann man diese nachweisen? Ist es möglich, daraus zweifelsfrei auf die Existenz von Leben auf anderen Planeten zu schließen?

Die Chancen stehen gut, dass in weiter Zukunft die Entdeckung und die Erforschung extrasolarer Planeten zu den wichtigsten wissenschaftlichen Errungenschaften des 20. und 21. Jahrhunderts zählen werden.

Literatur

- [1] D. C. Black, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **33**, 359 (1995)
- [2] M. Mayor und D. Queloz, *Nature* **378**, 355 (1995)
- [3] P. Kalas et al., *Science* **322**, 1345 (2008)
- [4] C. Marois et al., *Science* **322**, 1348 (2008)
- [5] C. Lovis et al., *Nature* **441**, 305 (2006)
- [6] A. Vidal-Madjar et al., *Nature* **422**, 143 (2003)
- [7] M. R. Swain et al., *Nature* **452**, 329 (2008)
- [8] G. Tinetti et al., *Nature* **448**, 169 (2007)
- [9] J.-P. Beaulieu et al., *Nature* **439**, 437 (2006)
- [10] G. Mandushev et al., *Astrophysical Journal* **667**, L195 (2007)
- [11] B. Loeillet et al., *Astron. & Astrophysics* **481**, 529 (2008)
- [12] D. A. Fischer et al., *Astrophysical Journal* **675**, 790 (2008)
- [13] B. S. Gaudi et al., *Science* **319**, 927 (2008)
- [14] P. Barge et al., *Astronomy & Astrophysics* **482**, L17 (2008)

DER AUTOR

Joachim Wambsganß (FV Extraterrestrische Physik) studierte Physik und Astronomie in Heidelberg, München und Princeton. Nach Diplom und Promotion (1990) am MPI für Astrophysik in Garching verbrachte er Postdoc-Jahre in Princeton, Garching und Potsdam (AIP). Im Jahre 1999 wurde er Professor an der Universität Potsdam, 2004 erhielt er einen Ruf an die Universität Heidelberg, wo er seit 2005 Direktor des neugegründeten Zentrums für Astronomie (ZAH) ist. Schwerpunkte seiner wissenschaftlichen Arbeit sind verschiedene Anwendungen des starken Gravitationslinseneffekts. Zurzeit verbringt er sein Forschungsfreisemester an der Princeton University, die ihm die erste „Bohdan-Paczynski-Visitorship“ zuerkannt hat.

