

Planeten

Exoplanetendetektion

Grundlagen aus dem ersten Semester:
[04-Erforschung der Exoplaneten \(Seite 5 - 7\)](#)

Exoplaneten sind schwer zu entdecken.

Einerseits aufgrund der Distanz: Wenn der Abstand zwischen Erde und Sonne nur ein Meter wäre, würde die Distanz zwischen Sonne und Alpha Centauri der Entfernung Wien-Salzburg entsprechen. Der Abstand zwischen Stern und Planet ist in dieser Entfernung kaum erkennbar.

Andererseits werden die Exoplaneten auch von ihrem Stern überstrahlt. Zum Vergleich: Wenn der Stern so hell wie eine Stadionbeleuchtung wäre, wäre der Planet nur so hell wie ein Glühwürmchen.

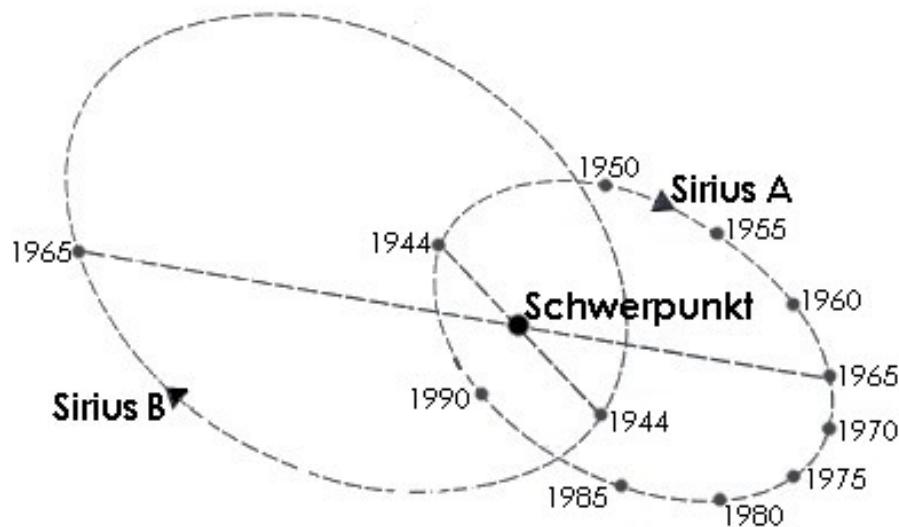
Deshalb werden nur die wenigsten Exoplaneten direkt beobachtet. Die meisten Exoplaneten werden durch die Beobachtung der Eigenschaften ihres Sterns entdeckt.

1 Gravitationsmessung

Bei den meisten Beobachtungsmethoden wird ausgenutzt, dass nicht nur der Stern auf den Planeten, sondern auch der Planet auf den Stern eine gravitative Anziehungschaft ausübt. Dadurch drehen sich Planet und Stern um einen gemeinsamen Schwerpunkt.

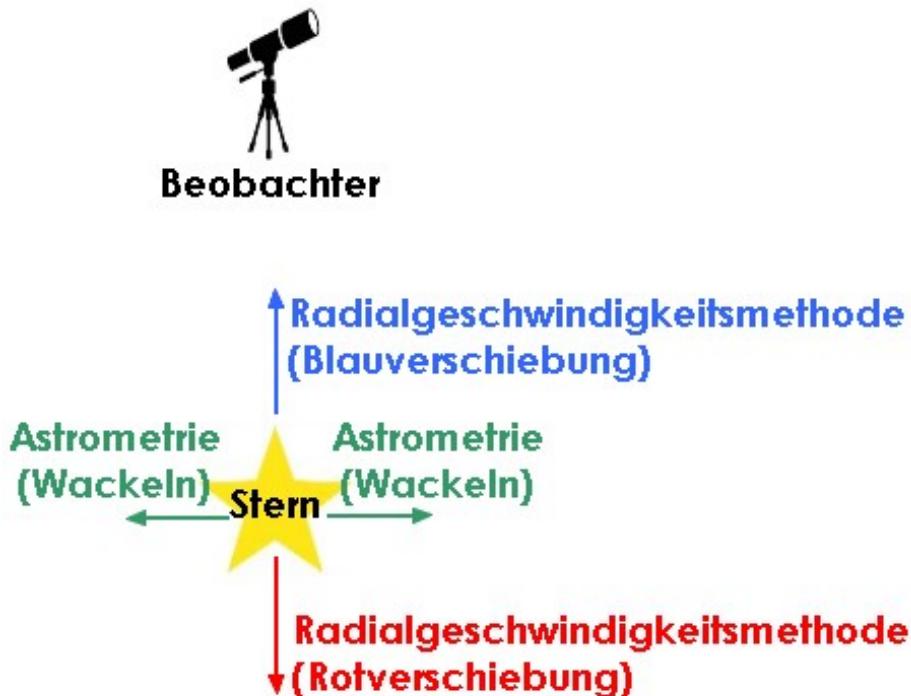
Diese Drehung ist analog zu der Drehbewegung von Doppelsternsystemen, nur dass hier der Schwerpunkt viel näher beim Stern, im Normalfall sogar innerhalb des Sterns liegt. Damit die Bewegung des Sterns überhaupt messbar ist, muss der Planet sehr massereich und sehr nah beim Stern sein.

Da so eine kleine Drehung in einer Grafik nicht erkennbar wäre, wird die Drehung im folgenden auch anhand eines Doppelsternsystems gezeigt.



Man erkennt, dass der Schwerpunkt stets auf der Verbindungsgeraden zwischen den zwei Sternen liegt. Dadurch ist auch die Rotationsperiode der beiden Sterne gleich groß und die Bewegungsrichtung genau entgegengesetzt.

Die Bewegung des Sterns kann auf drei unterschiedliche Arten gemessen werden: Die Pulsar-Timing-Methode, die Radialgeschwindigkeitsmethode und die Astrometrie:



Methode 1: Radialgeschwindigkeitsmethode

Mit der Radialgeschwindigkeitsmethode wurden bisher die zweitmeisten Exoplaneten gemessen. Bereits 1995 wurde so der erste Exoplanet entdeckt, der um einen sonnenähnlichen Stern kreist.

Bei dieser Methode misst man die Geschwindigkeit, die der Stern radial zur Erde besitzt. Wenn sich der Stern auf die Erde zubewegt erscheint er leicht blau-, wenn er sich weg bewegt leicht rot verschoben.

Methode 2: Astrometrie

Bei der Astrometrie wird die Bewegung des Sterns tangential zum Beobachter direkt beobachtet. Dieses Verfahren ist nur dann sinnvoll, wenn die Tangentialbewegung viel größer als die Radialbewegung des Sterns ist, weil die Messung der Rot- und Blauverschiebung viel genauer als die Positionsmessung des Sterns ist.

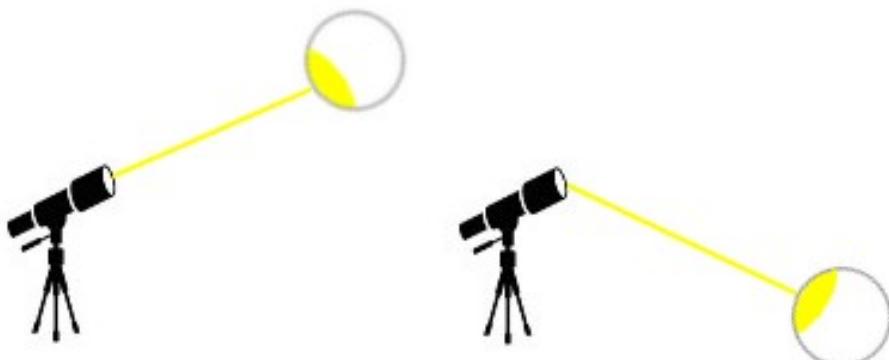
Deshalb wurde mit dieser Methode auch noch kein einziger Exoplanet sicher entdeckt. Die Bewegung war stets so klein, dass sie auch als Messungenauigkeit erklärt werden könnte und bei den meisten vermeintlichen Entdeckungen hat sich bereits herausgestellt, dass es sich um einen Messfehler gehandelt hat.

Methode 3: Pulsar-Timing-Methode

Mit der Pulsar-Timing-Methode kann man Exoplaneten entdecken, die um einen Pulsar kreisen.

Pulsare sind rotierende Neutronensterne, die an unterschiedlichen Stellen unterschiedlich hell leuchten. Im Laufe ihrer Rotation zeigen sie uns unterschiedlich hell leuchtende Stellen und ändern dadurch ihre scheinbare Helligkeit.

Neutronensterne haben eine exakt gleichmäßige Rotationsperiode. Wenn der Neutronenstern vom Exoplaneten bewegt wird, sehen wir aus einem anderen Blickwinkel auf den Neutronenstern und die Helligkeitsänderung erscheint messbar zeitversetzt.



Je masseärmer der Planet ist, desto geringer ist die Auslenkung des Pulsars und damit auch der zeitliche Unterschied.

Da die Zeitmessung besonders präzise ist und im Gegensatz zur Helligkeits- und Positionsmessung nicht durch äußere Einflüsse, wie das minimale Wackeln des Teleskops oder Licht anderer Leuchtquellen unterliegt, ist die Pulsar-Timing-Methode die genaueste Methode zur Exoplanetendetektion.

Deswegen konnte mit dieser Methode bereits 1992 durch Zufall der erste Exoplanet entdeckt werden. Auch besonders kleine Planeten kann man mit dieser Methode gut entdecken. So konnte mit dieser Methode auch der kleinste bisher bekannte Exoplanet gemessen werden, der nur doppelt so massereich wie unser Mond ist.

Massenbestimmung

Nachdem man mit der Pulsar-Timing-Methode, der Astrometrie oder der Radialgeschwindigkeitsmethode die Geschwindigkeit des Sterns gemessen hat, kann man die Masse des Planeten ausrechnen. Dafür verwendet man die Impulserhaltung

$$p_{\text{Stern}} + p_{\text{Planet}} = 0 \quad (1.1)$$

In dieser Formel kann man die Impulsformel $p=mv$ einsetzen und dann nach der Planetenmasse umformen:

$$M_{\text{Planet}} = \frac{M_{\text{Stern}} v_{\text{Stern}}}{v_{\text{Planet}}} \quad (1.2)$$

Da wir die Geschwindigkeit des Planeten nicht kennen, möchten wir diese nach der Periodendauer umformen. Dazu verwenden wir die Formeln 5.13. und 5.14 aus dem Skriptum über Newtonsche Mechanik

$$rv^2 = GM \quad (1.3)$$

$$v = \frac{2r\pi}{P} \quad (1.4)$$

Zunächst formen wir 1.3. nach der Geschwindigkeit und 1.4. nach dem Radius um

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (1.5)$$

$$r = \frac{Pv}{2\pi} \quad (1.6)$$

Durch Einsetzen von 1.6. in 1.5. erhält man

$$v = \sqrt{\frac{GM2\pi}{Pv}} \quad (1.7)$$

Umformen nach der Geschwindigkeit ergibt

$$v = \sqrt[3]{\frac{GM2\pi}{P}} \quad (1.8)$$

Einsetzen der Formel in 1.2. ergibt

$$M_{\text{Planet}} = \frac{M_{\text{Stern}} v_{\text{Stern}}}{\sqrt[3]{\frac{GM2\pi}{P}}} \quad (1.9)$$

Bei der Pulsar-Timing Methode kennt man die Geschwindigkeit des Sterns und kann mit dieser Formel die Masse des Planeten ausrechnen.

Bei der Radialgeschwindigkeitsmethode kennt man nur die radiale Geschwindigkeit und bei der Astrometrie nur die horizontale Geschwindigkeit. Welche Geschwindigkeiten man in diesen Fällen misst, hängt also vom Blinkwinkel i ab.

$$M_{\text{Planet}} = \frac{M_{\text{Stern}} v_{\text{Gemessen}}}{\sin(i) \sqrt[3]{\frac{GM2\pi}{P}}} \quad (1.10)$$

Den Blinkwinkel i kennt man nicht.

Man weiß nur, dass sich der Stern minimal mit der gemessenen Geschwindigkeit bewegt. Wenn man diese minimale Geschwindigkeit (bei $\sin(i)=1$) in die Formel einsetzt, erhält man die Mindestmasse, die der Planet besitzen muss.

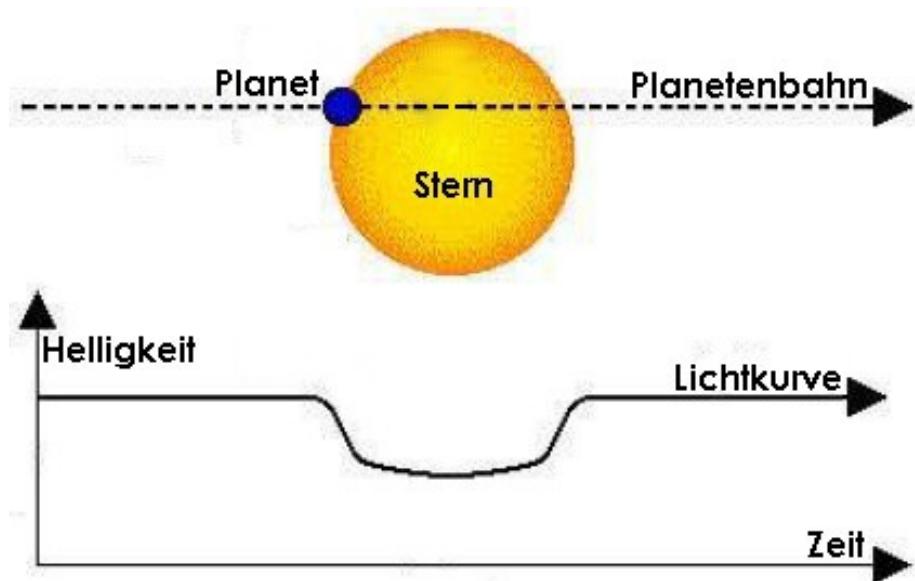
Wenn man die Massenverteilung der Exoplaneten bestimmen will, kann man davon ausgehen, dass die Blinkwinkel zufällig verteilt sind. Im Schnitt beträgt der Blinkwinkel also 45° ($\sin(i)=0,79$). Setzt man diesen Wert bei einer großen Anzahl von Exoplaneten ein, schätzt man gleich viele Planeten zu schwer wie zu leicht ein und im Mittel gleicht sich das aus.

2 Transitmethode

Die Aufschlussreichste Methode zur Erforschung der Exoplaneten ist die Transitmethode.

Um die Transitmethode anwenden zu können, muss man das Glück haben, dass der Planet genau durch die Sichtlinie zwischen Erde und Stern durchläuft. Die Wahrscheinlichkeit, dass das passiert, ist bei großen Planeten nahe des Sterns am höchsten.

Es ist zwar insgesamt unwahrscheinlich, dass ein Planet genau durch die Sichtebene durchzieht, dennoch ist die Transitmethode jene Methode, mit der bisher die meisten Exoplaneten gemessen wurden.



Wenn sich der Planet vor seinem Stern befindet (Position 3), verschluckt er einen Teil des Sternlichtes und der Stern erscheint dünker als wenn er nicht vor dem Stern steht (Position 1). Wenn der Planet den Stern nur streift, verschluckt er weniger Licht (Position 2). Da der Planet viel kleiner als der Stern ist, dauert diese Phase immer nur kurz.

Bei langen Abdunklungen kann man darauf schließen, dass der Planet den Stern zur Gänze bedeckt. Aus der maximalen Stärke der Abdunklung kann man auf den Radius des Planeten schließen.

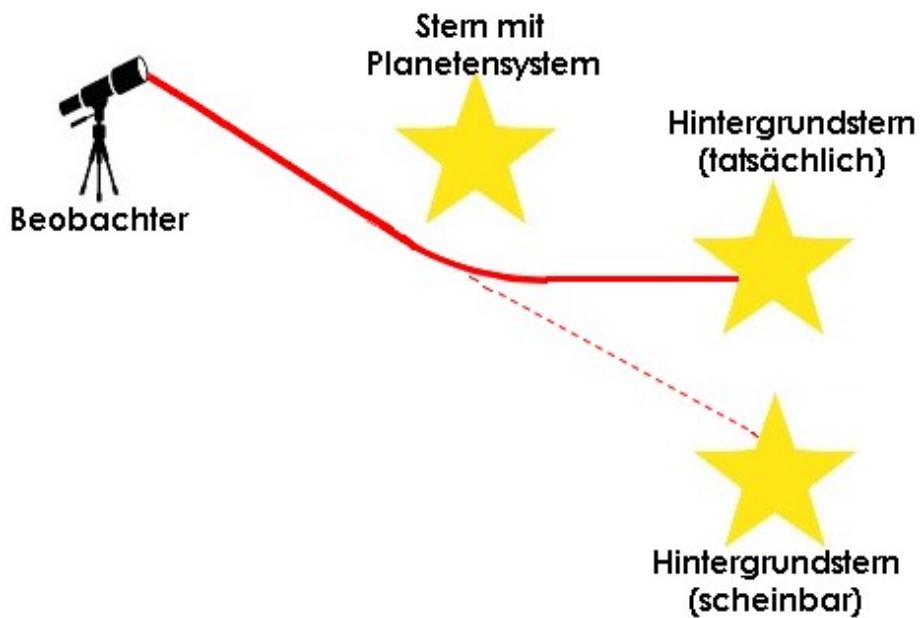
$$\frac{V - v}{V} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (2.1)$$

In dieser Formel steht V für die normale Helligkeit des Sterns, v für die Helligkeit des Sterns, wenn er vom Planeten verdeckt wird, R für den Sternradius und r für den Planetenradius. Bei kleinen Planeten ist die Abdunklung so schwach, dass sie nicht messbar ist.

In der Zeit, in der der Stern verdunkelt ist, verändert sich auch das Spektrum des Sterns, weil der Planet je nach Zusammensetzung manche Wellenlängen stärker und andere weniger stark schluckt. Aus der Differenz der Stärke der Absorptionslinien während des Transits und der normalen Absorptionslinien des Sterns, kann man auf die chemische Zusammensetzung des Planeten schließen.

3 Gravitationslinseneffekt

Bei großen Gravitationsquellen (zum Beispiel Sterne mit Planetensystemen) wird das Licht abgelenkt (Je massereicher, desto stärker). Dadurch sieht man die dahinterliegenden Sterne an einer anderen Stelle, als sie tatsächlich sind.



Um den Gravitationslinseneffekt zu messen, benötigt man einen Hintergrundstern, der tangential zum Beobachter hinter der Gravitationslinse vorbeifliegt. Wenn er das macht, fliegt er scheinbar nicht mehr mit der vorausberechneten Geschwindigkeit, sondern vor der Gravitationslinse schneller und hinter der Gravitationslinse langsamer.

Aus der Differenz zwischen der beobachteten und der vorausberechneten Geschwindigkeit kann man die Masse des Planetensystems berechnen. Wenn man davon die Masse des Sterns abzieht, erhält man die Gesamtmasse aller Planeten des Planetensystems.

Dieses Verfahren funktioniert nur für sehr große Planeten: Die Sternmasse ist immer nur sehr ungenau bekannt und die Ablenkung durch die Masse der Planeten ist nur minimal.

Da sich nur sehr selten ein Hintergrundstern hinter der Gravitationslinie vorbeibewegt, kann man mit diesem Verfahren jeden Planeten nur einmal messen. Das ist gleich aus mehreren Gründen ein Nachteil: Erstens kann man nicht durch mehrmaliges Messen die Wahrscheinlichkeit eines Messfehlers reduzieren und zweitens kann man nicht später mit einem besseren Teleskop genauere Messungen erreichen.

4 Transitzeitmethode

Für die Anwendung der Transitzeitmethode ist es notwendig, bereits von einem anderen Planeten desselben Sternsystems die Periodendauer gemessen zu haben.

Die Periode eines Planeten dauert normalerweise immer gleich lang. Durch die gravitative Ablenkung eines anderen Planeten, die je nach seiner Gravitation auf der Umlaufbahn immer an einer anderen Stelle wirkt, kann es zu leichten Unregelmäßigkeiten kommen.

Durch Messung dieser Unregelmäßigkeiten kann man auf den Planeten schließen. Aus der Stärke der Abweichung kann man auf eine Mindestmasse schließen, die der Planet benötigt, um den anderen Planeten so stark abzulenken ohne so nah zu sein, dass einer der Planeten von seiner Umlaufbahn gezogen wird.

Da diese Abweichungen nur schwach sind, funktioniert diese Nachweismethode nur für massereiche Planeten, deren Bahn nahe des bereits entdeckten Planeten ist.

5 Direkte Abbildung

Bei der direkten Abbildung wird das Licht gemessen, das der Planet von seinem Stern reflektiert. Diese Messung ist am Besten im optischen oder im Infrarotbereich möglich.

Ein Problem bei dieser Messung ist, dass man nur sehr schlecht erkennen kann, wo der Stern aufhört. Es wird nämlich auch eine große Umgebung des Sterns beleuchtet, die man fast genauso hell sieht. Das vom Planeten reflektierte Licht geht darin unter, weil es nur einen sehr kleinen Teil ausmacht. Deshalb schafft man es nur, Planeten mit großem Abstand zu ihrem Stern zu erkennen.

Damit der Planet ausreichend Licht reflektiert, um überhaupt gemessen werden zu können, ist es notwendig, dass es sich um einen sehr großen Planeten handelt.