1 Radialgeschwindigkeit

Die bis heute erfolgreichste Suchmethode nach substellaren Begleitern ist die Messung der Radialgeschwindigkeit. Mit ihr war es erstmals möglich, Planeten um Sterne herum aufzuspüren.

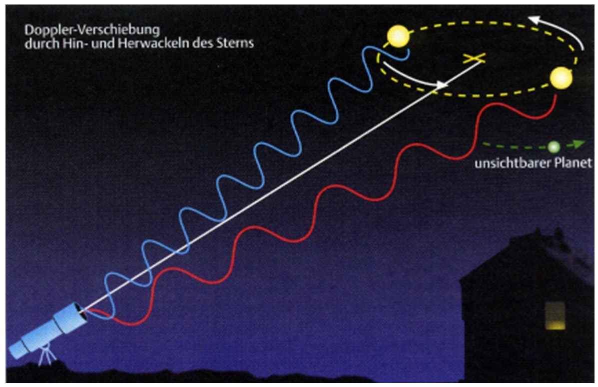

Abb. 1: Skizze zur Radialgeschwindigkeitsmethode: Durch die Bewegung des Sterns um das Massenzentrum tritt eine periodische Dopplerverschiebung im Sternspektrum auf.

Umkreist ein Begleiter einen Stern, so bewegen sich beide Körper um ihren gemeinsamen Schwerpunkt im Raum. Diese Bewegung kann gemessen werden. Durch die Rotation des Sterns ums Baryzentrum bewegt er sich mal auf den Beobachter zu, mal entfernt er sich. Dabei wird das Licht des Sterns blau bzw. rot verschoben. Die Stärke dieser Wellenlängenverschiebung ist als Dopplereffekt bekannt und berechnet sich zu:

$$\Delta\lambda \approx \frac{v_R \cdot \lambda}{c} \tag{1}$$

v_R ist die Radialgeschwindigkeit ; c die Lichtgeschwindigkeit ; λ Wellenlänge des Lichtes

Aus der Messung der Radialgeschwindigkeit des Sterns können nun die Orbitparameter des Begleiters abgeleitet werden. Dies soll im Folgenden an einer kreisförmigen Umlaufbahn gezeigt werden.

Ein Begleiter umkreist seinen Stern auf einem kreisförmigen Orbit mit der großen Halbachse $a_{Begleiter}$ und benötigt dafür die Zeit T. Das 3. Keplerische Gesetz liefert die Bahngleichung für das Zweikörpersystem Stern-Begleiter:

$$(a_{Stern} + a_{Begleiter})^3 = \frac{GT^2(M_{Stern} + M_{Begleiter})}{4\pi^2} \tag{2}$$

M Masse ; a große Halbachse ; G Gravitationskonstante ; T Umlaufzeit

Man kann im weiteren die sinnvollen Näherungen $M_{Stern} > M_{Begleiter}$ und $a_{Stern} < a_{Begleiter}$ verwenden. Letztere ergibt sich sofort aus dem Schwerpunktsatz (3), da die Sternenmasse viel größer als die Begleitermasse ist.

$$a_{Stern} \cdot M_{Stern} = a_{Begleiter} \cdot M_{Begleiter} \tag{3}$$

So erhält man die große Halbachse des Begleiters:

$$a^3_{Begleiter} = \frac{M_{Stern} G T^2}{4\pi^2} \tag{4}$$

Die große Halbachse des Begleiters ist eine Funktion der Sternenmasse und der Umlaufperiode des Sterns. Die Sternenmasse kann bestimmt werden, indem der Sterntyp klassifiziert wird. Die Umlaufzeit ergibt sich aus der gemessenen Periode der Dopplerverschiebung im Sternspektrum. Berücksichtigt man nun noch, dass sich der Stern im Abstand a_{Stern} in der Zeit T einmal um das Massenzentrum dreht ($\rightarrow T v_{Stern} = 2\pi a_{Stern}$ wobei v_{Stern} die Umlaufgeschwindigkeit des Sterns ist), so folgt unter Verwendung des Schwerpunktsatzes (3):

$$M_{Begleiter} = \frac{M_{Stern}}{a_{Begleiter}} \cdot \frac{v_{Stern} T}{2\pi} \tag{5}$$

Die Masse des Begleiters hängt also nur von der Umlaufperiode und Umlaufgeschwindigkeit des Sterns ab. Die Bestimmung der Umlaufgeschwindigkeit des Sterns auf seiner Bahn ist nicht direkt möglich. Aus der Messung der Dopplerverschiebung folgt nur der radiale Anteil der Umlaufgeschwindigkeit. Wie aus Abb.2 hervorgeht gilt:

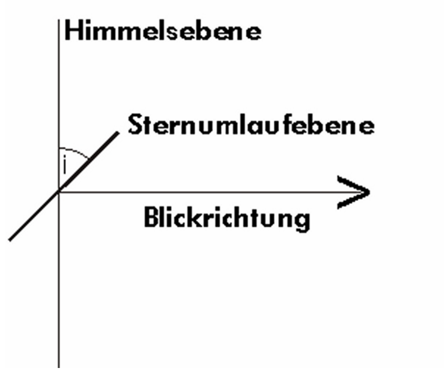

Abb. 2: Die Definition des Inklinationswinkel i

$$v_{Stern} \sin(i) = v_{radial} \tag{6}$$

Nimmt man nun die Gleichung (4)(5)(6) zusammen, so folgt schließlich für die Begleitermasse:

$$M_{Begleiter} \sin(i) = \left(\frac{M^2_{Stern} T}{2\pi G} \right)^{1/3}$$

Die Masse kann dabei nicht genau bestimmt werden. Nur eine minimale Massengrenze kann durch Messung von v_{radial} angegeben werden. Aus Gleichung (7) ist ersichtlich, dass die Radialgeschwindigkeit besonders groß ist für Begleiter hoher Masse in einem engen Orbit. Der Jupiter erzeugt bei der Sonne eine Änderung in der Radialgeschwindigkeit von 12.5 m/s, die Erde dagegen nur 0.04 m/s. Im Vergleich dazu beträgt sie beim ersten, entdeckten Exo-Planet um 51 Peg $\sim$50 m/s.

Die heute besten Spektrographen liefern eine Auflösung von $\lambda/\Delta\lambda \sim 10^8$, was eine Messung der Radialgeschwindigkeit von bis zu 2 m/s ermöglicht. Das vom Stern kommende Licht wird dazu zuerst durch eine Gas-Absorptionszelle geschickt, bevor es in den Spektrographen fällt. Dabei werden dem Sternenspektrum die Absorptionslinien des Gases (z.B. HF bzw. I-Gas) überlagert. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das Sternenlicht mit dem Licht einer Referenzquelle (z.B. Thoriumstrahler) zu mischen. Dazu wird das Licht des Sterns und der Referenzquelle mit Hilfe von Glasfaserkabeln getrennt in den Spektographen geleitet und dort überlagert. Die genau bekannten Linien dienen als Referenzpunkte bei der Vermessung des Sternenspektrums.

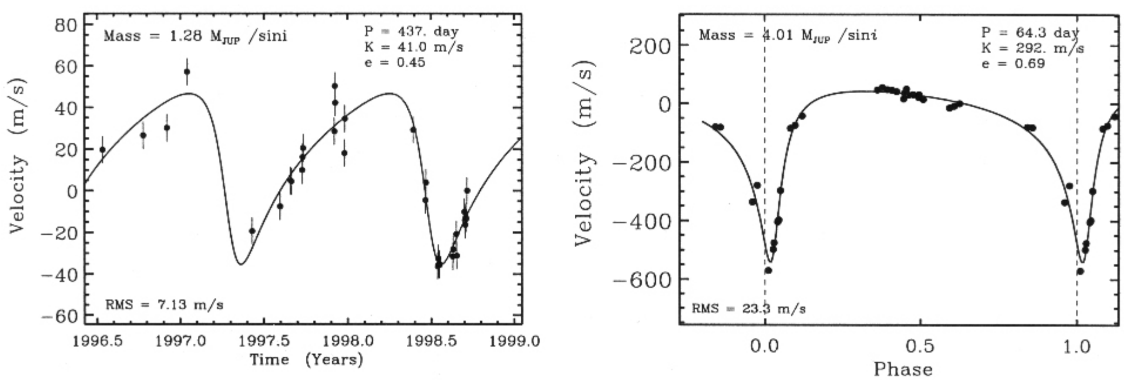

Abb. 3: Beispiel zur Messung der Radialgeschwindigkeit: HD210277 (links) und HD168443 (rechts). Die durchgezogene Linie zeigt den besten Fit an die Messwerte. Die jeweiligen Bahnparameter der Begleiter sind im Diagramm angegeben.

Die erwartete maximale Messgenauigkeit von ca. 1m/s ist heute fast schon erreicht. Genauer wird die Radialgeschwindigkeit nicht messbar sein, da z.B. Sonnenflecken einen Effekt dieser Größenordnung erzeugen können. Geht der Fleck für den Beobachter auf der Sonnenscheibe auf, so verdunkelt er Teile der auf den Beobachter zulaufenden Sonnenatmosphäre. Die Folge ist eine geringfügige Rotverschiebung des Spektrums, da sich nun mehr leuchtende Sonnenatmosphäre vom Beobachter entfernt, als auf ihn zukommt.

Alle bis heute entdeckten extrasolaren Planeten sind mit dieser Methode gefunden worden. Was die Messgenauigkeit betrifft, lassen sich Körper der Jupitermasse bei sonnenähnlichen Sternen aufspüren. Bei masseärmeren Sternen können bei gleicher Messgenauigkeit Planeten geringerer Masse detektiert werden.
(v. Markus Mugrauer)