

BEITRAG AUS DER REIHE:

Karl-Heinz Lotze, Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik Band 5 Naturphänomene und Astronomie

ISBN 3 - 7896 - 0666 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Werner Pfau

Der Nachweis von Planeten bei anderen Sternen als Messaufgabe

1 Einleitung

Fragestellungen aus dem Fachgebiet der Astronomie sprechen heute das Interesse von Schülern in besonderer Weise an und sind deshalb geeignet, das Erreichen von Lernzielen, z.B. in der Physik, zu unterstützen. Der derzeit in der astronomischen Forschung besonders aktuelle Nachweis von exosolaren Planeten ist ein hervorragendes Beispiel dafür. Die Frage, ob es außer uns noch an anderer Stelle im Weltall Leben gibt, hat die Menschheit über Jahrhunderte hinweg beschäftigt. Sieht man von den übrigen Planeten im Sonnensystem ab, so mündet das notwendig in die Frage nach der Existenz von Planeten um andere Sterne. Bewohnbare Welten außer der unseren und die Existenz anderer Zivilisationen sind bis heute der wohl beliebteste Gegenstand von Science-Fiction-Literatur und -Filmen. In der Wissenschaft sind beide Fragestellungen jedoch streng zu trennen! Sterne, die hinsichtlich ihrer Masse, Leuchtkraft und Oberflächentemperatur sonnenähnlich sind, überwiegend in ihrer Häufigkeit im Weltall bei weitem. Zusammen mit unserem Verständnis der Entstehung und frühen Entwicklungsphasen solcher Sterne folgt dann zwangsläufig, dass eine jedenfalls sehr große Zahl von Sternen von planetenähnlichen Begleitern umgeben sein wird. Das allein kann jedoch die Frage nach Leben außerhalb der Erde nicht klären. Leben stellt eine ganz andere Qualität dar und wir wissen noch viel zu wenig von den Voraussetzungen zu dessen Existenz, um hier allgemeine Überlegungen anstellen zu dürfen!

Der Nachweis planetenähnlicher Begleiter von Sternen hat die Wissenschaft während der vergangenen Jahrzehnte ernsthaft beschäftigt. Interessanterweise lassen sich die dabei angewendeten Methoden vom Grundsätzlichen her mit den Mitteln einfacher Physik und Messtechnik verstehen. Gravitationsgesetz und Zweikörperproblem reichen aus, um das Vorgehen bei der Suche nach extrasolaren Planeten deutlich zu machen. Diese, unser Interesse so stark ansprechende Aufgabe wird somit zu einem attraktiven Anwendungsbeispiel grundlegender Physik. Dringt man jedoch tiefer ein, so zeigen einfache numerische Abschätzungen sehr schnell, dass sich der Astronom aus Gründen der geforderten Messgenauigkeit immer an der Grenze des Machbaren bewegt.

Als sogenannte Doppel- oder auch Mehrfachsternsysteme sind gravitativ aneinander gebundene Sterne in der Astronomie seit langem bekannt. Ausgehend von der Kenntnis unseres Sonnensystems erwarten wir, dass die gesuchten extrasolaren Systeme aus nur einem in der Masse dominierenden Zentralstern und umlaufenden, wesentlich masseärmeren Begleitern aufgebaut sein werden. Wie le-

gen wir fest, um welche Art von Begleitern es sich handelt, wie definieren wir den Begriff Planet im Unterschied zu dem des Sternes? Ein Stern ist ein gasförmiges Objekt, dessen Stabilität und Strahlungsleistung während zeitlich bei weitem überwiegender Phasen durch den Ablauf von Kernfusions-Reaktionen in den Zentralbereichen gesichert wird. Die Theorie des inneren Aufbaus der Sterne fordert dafür eine Mindestmasse von etwa 0,08 Sonnenmassen, entsprechend 80 Jupitermassen (M_{jup}). Sterne entstehen in einem Kontraktionsprozess aus diffus verteiltem, interstellarem Material (Pfau 1996). Dieser Prozess wird jedoch auch zu masseärmeren Gebilden führen. Man spricht dann von „Braunen Zwergen“, weil wir es mit Oberflächentemperaturen unterhalb von 2500 K und äußerst geringer Leuchtkraft zu tun haben. Diese Objekte haben sternähnliche Eigenschaften, weisen in ihrem Inneren aber nur für begrenzte Zeiten die für eine nennenswerte Kernfusion ausreichend hohe Temperatur auf. Die wiederum untere Massegrenze dafür beträgt etwa $13 M_{\text{jup}}$ und kann als obere Grenze für die Masse planetarer Begleiter betrachtet werden. Interessanterweise liegt hier auch eine theoretische Grenze für den Entstehungsprozess: Die Kontraktion aus interstellarem Material funktioniert wohl nur bis hinunter zu 10 bis $20 M_{\text{jup}}$ während planetare Körper demgegenüber an die Bildung in zirkumstellaren Scheibenstrukturen, d.h. an die frühesten Phasen masseärmerer Sterne, gebunden scheinen. Auf solche sonnenähnlichen Sterne konzentriert sich deshalb die Suche nach Exoplaneten.

2 Der Nachweis extrasolarer Planeten

Würde ein gedachter Beobachter unser Sonnensystem aus der Entfernung von 4,2 Lichtjahren (L_j) = 4×10^{16} m aus anvisieren - in dieser Entfernung befindet sich Proxima Centauri, der uns nächstgelegene Fixstern - so erschienen ihm Sonne und Jupiter im optischen Spektralbereich als Sterne der Helligkeit 0,3 bzw. 21,5 Größenklassen, die um 4 Bogensekunden voneinander getrennt stehen. Der Stern „Sonne“ würde seinen Planeten überstrahlen und dieser wäre zunächst auch in keiner Weise von den unter Umständen zahlreichen Sternen der 21ten Größenklasse zu unterscheiden, die sich nur zufällig im gleichen Winkelbereich, aber in sehr viel größerer Sonnenentfernung befinden. So ist es ohne zusätzliche Messungen aussichtslos, ein entferntes Planetensystem auf dem Weg der direkten Abbildung entdecken zu wollen. In diesem Sinne entscheidende Informationen wird man zukünftig in der gemeinsamen Eigenbewegung an der Sphäre und dem Auftreten spektroskopischer Signaturen typischer Planetenatmosphären finden. Zunächst nutzt man jedoch indirekt den Nachweis periodischer Veränderungen, die sich infolge des Bahnlaufs der Begleiter beim Zentralstern äußern. Die Mess- und Auswerteverfahren dafür gehören in den Bereich der Astronomie der Doppelsterne und stellen dort ein schon seit langem bewährtes Werkzeug dar.

Die Lösung der Newtonschen Bewegungsgleichungen zeigt, dass sich zwei gravitativ gebundene Körper auf einander ähnlichen Ellipsen bewegen, und zwar so, dass jeweils einer der Brennpunkte mit dem gemeinsamen Schwerpunkt zusam-

menfällt. Für den außenstehenden Beobachter bleibt der Schwerpunkt in Ruhe oder ändert seine Position gleichförmig. Die beobachteten Lichtschwerpunkte beider Komponenten bewegen sich jedoch entsprechend der Umlaufzeit relativ zur Schwerpunktposition, der Entfernung und der an die Himmelskugel projizierten Bahngröße. Die Dimensionen der Bahnen, ausgedrückt z.B. durch die großen Halbachsen, verhalten sich umgekehrt wie die beiden Massen. In unserem Sonnensystem dominiert die Sonne massenmäßig gegenüber allen Planeten, der Schwerpunkt des Systems liegt somit in der Nähe der Sonnenoberfläche. Wie bereits erläutert, bleibt der Begleiter selbst für den gedachten äußeren Beobachter unsichtbar, das Bild der Sonne bewegt sich aber periodisch, wenn auch nur um sehr geringe Beträge. Der Übersichtlichkeit wegen vereinfachen wir für die folgenden Betrachtungen auf den Zentralstern mit nur einem Begleiter und wählen das Modell des Systems Sonne/Jupiter. Dieses soll später aus der oben genannten Entfernung von 4,2 Lj, d.h. von Proxima Centauri aus, beobachtet werden (Abb. 1).

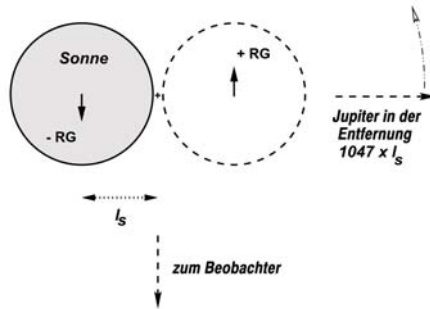


Abb. 1: In unserem Modellsystem Sonne/Jupiter ergibt sich bei Lage der Bahnebene in der Sichtlinie eine Variation in der Radialgeschwindigkeit von $+12,4\text{m/s}$ und, beobachtet von Proxima Centauri aus, eine Verschiebung an der Sphäre von $+0,004$ Bogensekunden gegenüber der mittleren Position. Entsprechend der Umlaufzeit von Jupiter erfolgen diese Veränderungen mit einer Periode von 11,9 Jahren. Das Kreuz zwischen den beiden Sonnenscheiben markiert die Lage des Systemschwerpunktes.

Unter Annahme von Kreisbahnen ergibt sich der lineare Abstand l_s der Hauptkomponente mit der Masse M_1 vom gemeinsamen Schwerpunkt zu

$$l_s = R M_2 / (M_1 + M_2) \quad (1)$$

(M_1 und M_2 sind die Massen in kg, R der Abstand der Komponenten in m). In solchen Fällen werden in der Astronomie die Entfernungen der Komponenten in Einheiten des mittleren Abstandes Erde-Sonne, den sogenannten Astronomischen Einheiten angegeben. Es gilt: $1 \text{ AE} = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$. Beobachtet aus der Entfernung r (in m) erscheint uns dieser geringe Abstand unter dem Winkel:

$$\Theta = 206265 \text{ l}_s / r \quad \text{in Bogensekunden.} \quad (2)$$

Entsprechend dem 3. Keplerschen Gesetz gilt für die Umlaufzeit

$$U = 7,7 \times 10^5 (R^3 / (M_1 + M_2))^{0,5} \quad \text{in s} \quad (3)$$

(Zur Umrechnung: 1 Jahr = $3,16 \times 10^7$ s).

Der Nachweis der periodischen Bewegung in unserem Modellsystem ist für den entfernten Beobachter grundsätzlich auf drei Wegen denkbar: 1) er kann versuchen, durch exakte Positionsmessungen relativ zum Hintergrund weit entfernter Sterne eine typische Ortsänderung des Lichtschwerpunktes zu erkennen, 2) er kann die Geschwindigkeitskomponente entlang der Sichtlinie zum sichtbaren Zentralstern mit Hilfe des Doppler-Effektes, d.h. mit spektroskopischen Mitteln, überwachen und auf eine periodische Veränderung hoffen. Ist die Bahnebene des Systems zufällig so orientiert, dass der Begleiter sein Zentralobjekt in der Sichtlinie passiert, dann sollte 3) ein kurzzeitiger Helligkeitsabfall infolge des Bedekungsvorganges eintreten. Bei unserem Modellsystem sind alle diese Effekte sehr klein. Während F. W. Bessel es im Jahre 1834 bei Sirius mit einer Ortsänderung von mehr als 10 Bogensekunden zu tun hatte und daraus auf die Existenz eines unsichtbaren Begleiters schloss - dieser wurde später als Weißer Zwerg erkannt - müssten wir bei unserem Modellsystem eine Ablage von weniger als 0.004 Bogensekunden um den mittleren Wert nachweisen. Tatsächlich hat die oben unter 1) aufgeführte astrometrische Methode bis heute zu keinem Nachweis eines exosolaren Planeten geführt. Viel günstiger sieht es dagegen bei den Radialgeschwindigkeiten (Methode 2) aus. Die beim Doppler-Effekt gemessene relative Verschiebung von Spektrallinien ist nur vom Verhältnis der Geschwindigkeitskomponente in der Sichtlinie zur Lichtgeschwindigkeit abhängig, funktioniert also unabhängig von der Entfernung. In unserem Fall ist bei günstiger Lage der Bahnebene eine Variation der mittleren Radialgeschwindigkeit um + 12,4 m/s zu erwarten (Abb. 1). Das bedeutet eine Linienverschiebung von nur $\Delta\lambda/\lambda = + 4 \times 10^{-8}$, entsprechend $\Delta\lambda = + 2 \times 10^{-5}$ nm im optischen Spektralbereich. Das stellt eine ungeheure Herausforderung an die Messtechnik dar! Normalerweise erfolgt die Wellenlängenkalibrierung in astronomischen Spektrographen mit Hilfe eines Vergleichsspektrums, das aus praktischen Gründen auf einem anderen optischen Weg als das Licht vom Messobjekt geführt wird. Um daraus resultierende Störeffekte zu vermeiden, ist bei den für die vorliegende Aufgabenstellung entwickelten Spektrographen eine mit Jod-Gas gefüllte Absorptionszelle in den direkten Strahlengang eingebracht. Sie prägt dem vom Stern kommenden Licht zahlreiche, sehr scharfe und stabile Spektrallinien auf, an die sich die stellaren Linien zur Wellenlängenkontrolle zuverlässig anschließen lassen. Abb. 2 zeigt im speziellen Fall einen Radialgeschwindigkeitshub von + 54 m/s, der deutlich über der Messgenauigkeit liegt. Die Parameter für das dargestellte System HD 75289 sind in Tab. 1

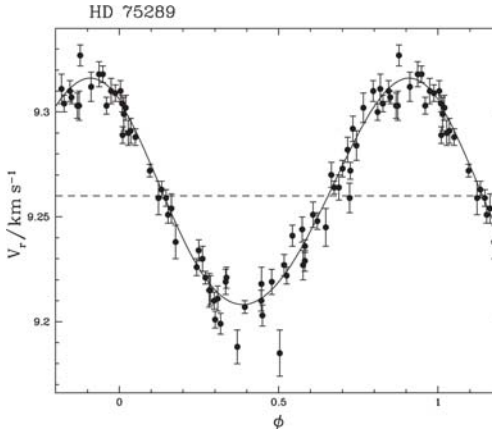


Abb. 2: Der Nachweis eines Planeten um den Stern HD 75289 gelang der Gruppe um M. Mayor am 1. Februar 1999 im Rahmen des „Geneva Extrasolar Planet Search Programme“ am Schweizer 1,2m -Teleskop „Leonhard Euler“ auf La Silla/Chile (Udry et al. 2000). Dargestellt ist die über mehrere Perioden gemessene und entsprechend übereinandergeschobene Radialgeschwindigkeitskurve. (Die Bezeichnung des Sternes bedeutet die laufende Nummer in dem nach Henry Draper - HD - benannten Spektralkatalog).

Entfernung: 95.26 Lj (gemessen durch den Satelliten HIPPARCOS)

Stern:	Spektraltyp	G0V
	visuelle Helligkeit	6,35 mag
	Leuchtkraft	1,99 L_Sonne
	Masse	1,05 M_Sonne
Planet:	Umlaufzeit	3,51 Tage
	Bahnexzentrizität	0,054 *)
	M sin i	0,42 M _{jup}
	Große Bahnhalbachse	0,046 AE
	Oberflächentemperatur	ca. 1260 K
	*) Quelle: Schneider 1999	

Tabelle 1: Parameter des Systems HD 75289 (Daten unter Mayor et al. 2000)

gegeben. Die gezeigte Kurve ist sehr symmetrisch und lässt so auf eine Kreisbewegung des Zentralsterns um den Schwerpunkt schließen. In weiteren Fällen wurden auch Lichtkurvenformen gefunden, wie sie aus elliptischen Bahnen resultieren. Diese sprechen überzeugend gegen eine Erklärung der gemessenen Variation der Radialgeschwindigkeiten als im vorliegenden Zusammenhang uninteressante Pulsation des Hauptsternes und für eine tatsächliche Bahnbewegung.

Die Präsenz weiterer Begleiter in einem System würde sich übrigens in einer zusätzlichen Modulation der Radialgeschwindigkeitskurve äußern, die nach Anpassung einer Hauptperiode als Rest verbleibt. Im akustischen Analogon ist ein Unterrichtsexperiment zur Illustration der Radialgeschwindigkeitsänderung bei einem Exoplaneten-System von Engstedt (2000) beschrieben worden. Betrachtet man schließlich (Methode 3) die erwartete Helligkeitsänderung als Folge eines Vorübergangs, so kommt man auf eine Abnahme der Gesamthelligkeit um 1% (0,01 Größenklassen im astronomischen Maßsystem) während einer Zeitspanne von knapp 30 Stunden, wenn in unserem Modellsystem „Jupiter“ vor der „Sonne“ vorüberwandert. Die stark einschränkende Voraussetzung für einen solchen Effekt ist allerdings, dass die Bahnebene des Systems auf 0.1° genau mit der Sichtlinie zusammenfallen muss! Die Chancen für einen Zufallsnachweis sind somit nur gering. Die gezielte photometrische Überwachung des Sternes HD 209458, für den ein Begleiter von oberhalb $0,7 M_{\text{Jup}}$ aus Radialgeschwindigkeitsmessungen bereits nachgewiesen war, zeigte tatsächlich eine Lichtschwächung um 0,02 Größenklassen jeweils während einer Spanne von etwa drei Stunden. Später ließen

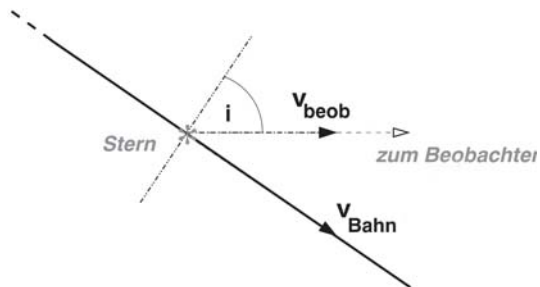


Abb. 3: Veranschaulichung von Bahnlage und Richtung zum Beobachter.

sich sogar Veränderungen in den Profilen der Spektrallinien erkennen und als die schrittweise Bedeckung von Oberflächenelementen des Zentralsternes interpretieren. Zur richtigen Einschätzung dieser Zahlenwerte sind noch zwei Bemerkungen zu machen. Die räumliche Dichte sonnenähnlicher Sterne ist in unserer Umgebung so gering, dass wir bis zu einer Entfernung von 40 Lj gehen müssen, um auf 100 Kandidaten-Sterne für Exoplaneten zu treffen. Alle Helligkeiten, Winkelabstände und Positionsänderungen werden dementsprechend noch wesentlich kleiner. Tatsächlich sind viele dieser Sterne bisher erfolglos überwacht worden. Das kann bedeuten, dass sie entweder wirklich keinen Begleiter haben, oder aber, dass sich dieser einem Nachweis aus Gründen der Messgenauigkeit noch entzieht. Es ist nämlich auch zu beachten, dass eine gemessene Dopplerverschiebung immer nur die Geschwindigkeitskomponente in der Sichtlinie liefert. Das wirkt sich in dem Sinne aus, dass die nach Methode 2 ermittelten Massen nur

untere Grenzwerte darstellen. Die Messung selbst liefert nicht die Masse M selbst, sondern $M \sin i$, wobei i die Neigung der Bahnnormalen zur Sichtlinie darstellt (Abb. 3). Nur wenn man die Bahnneigung auf irgendeinem Wege eingrenzen kann, z.B. auf $i=90^\circ$ im Falle einer Bedeckung, lässt sich auf den Betrag der Masse selbst schließen. In zwei weiteren Fällen (ρ Cancri und ϵ Eridani) ist die Staubscheibe als Relikt der Sternentstehung beobachtet und gibt Hinweis auf die Orientierung dieser Systeme.

Bei der hohen Priorität, die die Suche nach Planeten anderer Sterne heute in der Wissenschaft hat, ist es nicht erstaunlich, dass weitere Such- und Nachweismethoden entwickelt worden sind. Besonders interessant ist dabei die Nutzung des Gravitationslinsen-Effektes in Form von microlensing (Wambsganz 1997, 2000). Hierbei wird im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie - Stichwort Lichtablenkung - das Licht eines entfernten Sternes beim Passieren eines zufällig in dessen Vordergrund, sehr nahe der Sichtlinie stehenden Sternes durch eine Art Linseneffekt verstärkt. Der Verstärkungsbetrag ist abhängig von der geometrischen Anordnung beider Massen und somit zeitlich veränderlich, da sich die Objekte relativ zueinander bewegen werden. Steht als „Linse“ im Vordergrund ein Einzelstern, so zeigt dieser eine symmetrische Lichtkurve, ist aber das Gravitationsfeld durch einen engen Begleiter gestört, so markiert sich das in einer zeitlich asymmetrischen Helligkeitsänderung. Der erwartete Effekt wird wenige hundertstel Größenklassen betragen, mit einer die Zeitskala der Veränderung von einigen Stunden bis zu Tagen. Statistisch gesehen handelt es sich wieder um ein eher unwahrscheinliches Ereignis. Das Verfahren wird jedoch aussichtsreich, wenn regelmäßig und über möglichst lange Zeiträume hinweg Regionen mit sternreichem Hintergrund überwacht werden. Die dazu laufenden Programme zielen auf den Zentralbereich unseres Milchstraßensystems und auf die Magellanschen Wolken, zwei an unserem Südhimmel stehende Galaxien. Die letzteren sind Begleiter des Milchstraßensystems in nur etwa 200000 Lj Entfernung. Sie haben somit eine beträchtliche Winkelausdehnung und gestatten die Überwachung eines relativ großen Winkelbereichs im galaktischen Vordergrund.

3 Die Ergebnisse

Die erfolgreichen Entdeckungen planetenähnlicher Begleiter bei anderen Sternen begannen im Jahre 1995, als zwei Autoren vom Observatorium Genf beim Stern 51 Pegasi ein Objekt von 4,2 Tagen Umlaufzeit und einer Masse $M > 0,47 M_{\text{jup}}$ entdeckten (mit dem Zeichen $>$ soll die oben erwähnte Unsicherheit in der Massebestimmung infolge Unkenntnis der Bahnneigung Berücksichtigung finden). Seitdem wächst dank gezielter Projekte mehrerer internationaler Forschergruppen die Zahl der Sterne mit Exoplaneten rasch an und hatte bis Mitte des Jahres 2000 etwa 40 erreicht. Die Systeme liegen dabei zwischen 10 und 200 Lj Sonnenentfernung. Alle sind auf dem Wege der Radialgeschwindigkeitsvariationen aufgefunden worden, bei einem System konnte nachträglich auch der Helligkeitsabfall beim

Vorübergang des Begleiters vor dem Zentralstern gemessen werden. Für zwei Sterne ist bisher die Existenz von mehr als einem planetaren Begleiter nachgewiesen worden (α Andromedae und 55 Cancri), zwei weitere sind sehr wahrscheinlich ebenfalls Mehrfachsysteme. Die Massen der Begleiter überstreichen den Bereich von $> 0,2 M_{\text{jup}}$ (70fache Erdmasse) bis zur definierten oberen Grenze von $13 M_{\text{jup}}$. Betrachtet man die Statistik der großen Bahnhalbachsen ($0,4 \text{ AE} < a < 3,2 \text{ AE}$) bzw. Umlaufzeiten ($3 \text{ Tage} < U < 7 \text{ Jahre}$) und der Bahnexzentrizitäten (numerische Exzentrizitäten $0 < e < 0,7$, d.h. rein kreisförmige bis sehr stark exzentrische Bahnen), dann zeigt sich, dass keines der bisher gefundenen Systeme wirkliche Ähnlichkeit mit unserem Planetensystem hat (Abb. 4).

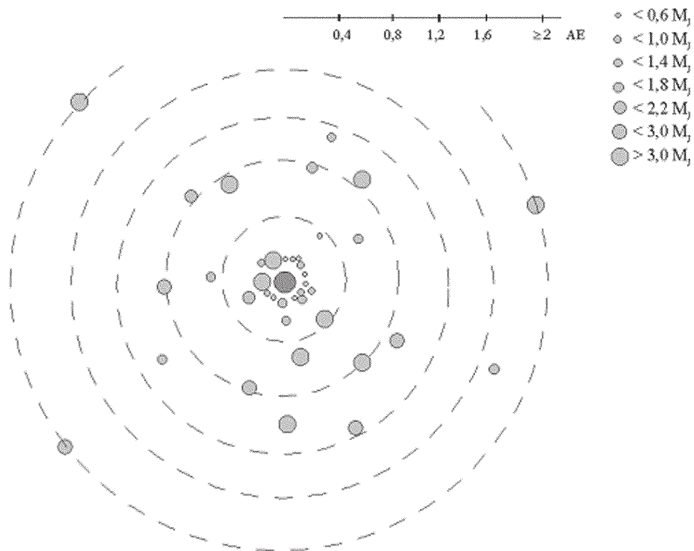


Abb. 4: Die bisher nachgewiesenen Systeme extrasolarer Planeten sind in der Darstellung übereinander gezeichnet. Die Abstände von den Zentralsternen sind in AE aufgetragen, unterschiedlich große Symbole zeigen die Masse der jeweiligen Begleiter an. Zum Vergleich ist am oberen Rand die Abstandsverteilung von Merkur bis Mars im Sonnensystem gegeben (Die Darstellung ist nicht maßstäblich! Graphik A. Dannhauer, Jena).

Wir können diese Systeme vielmehr in drei Gruppen einteilen:

- jupiterähnliche Massen auf kreisförmigen Bahnen in geringem Abstand vom Zentralstern ($< 0,1 \text{ AE}$, d.h. im Vergleich deutlich innerhalb der Bahn von Merkur),
- sehr stark exzentrische Bahnen mit $e > 0,3$ (im Sonnensystem zeigen von den großen Planeten nur Merkur und Pluto Werte $e > 0,2$, alle anderen haben $e < 0,1$)

- und schließlich das System 47 Ursae Majoris, das unseren Verhältnissen bisher am nächsten kommt: ein Begleiter von $M > 2,4 M_{\text{jup}}$ im Abstand 2,1 AE (Mars 1,5 AE, Jupiter 5,2 AE) und mit geringer Bahnexzentrizität.

Die weit innen kreisenden massereichen Planeten und diejenigen mit großer Bahnexzentrizität sind mit dem heutigen Verständnis der Planetenentstehung nicht vereinbar und versprechen somit einen wissenschaftlichen Fortschritt. Die bisher beobachtete Konzentration der Werte auf den Bereich von Jupitermassen und Umlaufzeiten von höchstens wenigen Jahren unterliegt einem verfälschenden Auswahleffekt, da die bisher angewendeten Nachweisverfahren gerade für diese Parameterbereiche empfindlich sind.

Im August 2000 wurde nach langjähriger Suche ein Planet beim Stern ϵ Eridani entdeckt ($a = 3,2$ AE, $e = 0,6$, $U = 7$ Jahre, $0,8 < M/M_{\text{jup}} < 1,6$). Seit langem weiß man, dass dieser Stern von einer Staubscheibe umgeben und in seinen geometrischen Abmessungen insgesamt dem Sonnensystem sehr ähnlich ist. ϵ Eridani befindet sich in einer Entfernung von nur 10.5 Lj und ist somit bisher das uns am nächsten stehende Exoplanetensystem. Hier besteht Hoffnung, einen Exoplaneten in sehr absehbarer Zeit mit leistungsfähigen Teleskopen direkt abbilden und untersuchen zu können!

4 Ausblick

Die Suche nach Planeten bei anderen Sternen stellt eine der großen Herausforderungen an die moderne Astronomie dar. Dementsprechend konzentrieren sich hier große Forschungsaktivitäten und sind beeindruckende Zukunftsprojekte in der Planungsphase. In der erdgebundenen Beobachtung ist der große Durchbruch durch Steigerung des Winkelauflösungsvermögens von Teleskopen zu erwarten. Dabei werden interferometrische Messeinrichtungen zum Einsatz kommen. Diese ermöglichen es dann insbesondere, durch geeignete Wahl von Phasenunterschieden in den Strahlengängen zu einer destruktiven Interferenz zu kommen, die den sonst alles überstrahlenden Zentralstern praktisch „ausblendet“ und den Planeten messbar werden lässt (nulling interferometry). Unter den Satellitenprojekten sind der weitere Einsatz des Hubble Space Telescope, HST, bzw. seines Nachfolgers, des New Generation Space Telescope, NGST, (geplant für etwa das Jahr 2009) zu nennen. Wichtige Meilensteine werden ferner die ESA-Missionen GAIA (2009) und IRSI/DARWIN (nach 2012) sein. Bei GAIA handelt es sich um das Projekt eines Astrometrie-Satelliten zum Nachweis von Positionsänderungen an der Sphäre infolge des Umlaufs eines planetaren Begleiters, und IRSI/DARWIN wird als Interferometer im infraroten Spektralbereich arbeiten und soll erdähnliche Planeten auf dem Wege der hochauflösenden Abbildung und Spektroskopie entdecken. Die Weichen sind also gestellt und im Laufe des kommenden Jahrzehnts werden wir einen gewaltigen Fortschritt im Verständnis von Entstehung und Entwicklung des Planetensystems als unserer kosmischen Heimat verzeichnen können.

5 Weiterführende Literatur und Internet-Adressen

- ENGSTEDT, J.: <http://hands-on-universe.physto.se/doppler.html> (2000)
- MAYOR, M. ET AL.: <http://obswww.unige.ch/~udry/planet/planet.html> (2000)
- PFAU, W.: Praxis d. Naturwissenschaften - Physik 45 (1996), 23
- SCHNEIDER, J.: <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html> (2000)
- UDRY, S. ET AL.: Astron.Astrophys. 356 (2000) 590
- WAMBSGANSS, J.: Sterne und Weltraum 36 (1997) 742
- WAMBSGANSS, J.: Praxis d. Nat.wiss/Physik 49 (2000) 28