

RIESEN

UND ZWERGE

RIESEN UND ZWERGE

AUF DER SUCHE NACH EXTRASOLAREN PLANETEN

SABINE REFFERT & ANDREAS QUIRRENBACH

**Exo-
planeten sind
Planeten, die nicht
um unsere Sonne, sondern
um andere Sterne kreisen.
Mittlerweile sind mehr als 5.000
solcher extrasolaren Planeten be-
kannt – leicht aufzuspüren sind sie
nicht. Dazu benötigen die Astro-
nominnen und Astronomen raffi-
nierte Methoden, mit denen sie
winzige Vor- und Zurückbe-
wegungen der Himmels-
körper bestimmen
können.**

E

Es war eine Sensation: Im Jahr 1995 entdeckten die Schweizer Forscher Michel Mayor und Didier Queloz von der Universität Genf erstmals einen „Exoplaneten“, einen Planeten, der sich außerhalb unseres Sonnensystems befindet und dort einen sonnenähnlichen Stern umkreist – so wie unser Planet, die Erde, sich um seinen Heimatstern, die Sonne, bewegt. Heute sind mehr als 5.000 Exoplaneten bekannt. Auch unsere Forschergruppe von der Landessternwarte auf dem Königstuhl – einer von der Universität Heidelberg betriebenen Forschungssternwarte – sucht nach Exoplaneten. Dabei konzentrieren wir uns auf Planeten, die Sterne mit mehr als einer Sonnenmasse, sogenannte K-Riesen, und Sterne mit besonders geringer Masse, sogenannte M-Zwerg, umkreisen.

„Bei den heute bekannten mehr als 5.000 Exoplaneten handelt es sich vor allem um sehr kurzperiodische Planeten, zu denen es keine Entsprechung im Sonnensystem gibt.“

Sterne und Planeten

Sterne sind sehr viel massereicher als Planeten. Unsere Sonne beispielsweise hat 300.000 mal so viel Masse wie die Erde. Die Masse der Sterne ist derart groß, dass in ihrem Inneren mittels Kernfusion Wasserstoff zu Helium verbrennt. Dabei entsteht Energie: Sie lässt Sterne hell leuchten.

Planetensind sehr viel masseärmer. Sie machen keine Kernfusion und können nicht von selbst leuchten. Sie können das Licht ihres Heimatsterns lediglich reflektieren und – je nach Temperatur – im Infrarotbereich schwach glimmen. Deshalb ist es schwierig, einen Exoplaneten zu entdecken: Dicht neben einem viel helleren Stern sind Exoplaneten so gut wie nicht zu sehen. Es ist gleichsam so, als wolle man ein Glühwürmchen aus großer Entfernung in der Nähe eines Leuchtturms ausmachen.

Um einen Exoplaneten auf seiner Bahn um seinen Zentralstern nachzuweisen, bedarf es besonderer Methoden. Die Messung der „Radialgeschwindigkeit“, auch „Doppler-Spektroskopie“ genannt, war die erste und ist nach wie vor eine sehr erfolgreiche Methode zum Aufspüren von Exoplaneten. Mit diesem Verfahren haben Didier Queloz und Michel Mayor „51 Pegasi b“, den ersten Exoplaneten, nachgewiesen. Für ihre Entdeckung erhielten die beiden Schweizer Astronomen 2019 den Nobelpreis für Physik.

Vor und zurück

Den Gesetzen der Physik folgend zieht jeder Planet in einer sehr regelmäßigen Ellipsenbahn um seinen Zentralstern und kehrt nach einem Umlauf wieder zum Ursprung zurück, ähnlich den Zeigern einer Uhr. Betrachtet man das System „von oben“, sieht man eine Ellipse, die sich von einem Kreis oft kaum unterscheiden lässt. Betrachtet man das System von der Seite, also aus der Ebene der Planetenbahn, bewegt sich der Planet während eines Umlaufs um seinen Zentralstern von rechts nach links und von links wieder nach rechts. Er bewegt sich auf seiner Bahn auch auf uns zu und wieder von uns weg, also vor und zurück.

In der Schule haben wir gelernt, dass die Sonne unbeweglich im Zentrum steht, aber das ist nicht ganz richtig. Gemäß den Newton'schen Gesetzen der Mechanik gehört zu jeder Kraft eine Gegenkraft. Das heißt: So, wie der Heimatstern am Planeten zieht, zieht auch der Planet an seinem Stern. Daher bewegen sich beide – Planet und Stern – um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Weil der Stern aber so viel mehr Masse hat als der Planet, liegt der Schwerpunkt sehr nah am Stern oder sogar innerhalb des Sterns. Für das System Erde-Sonne etwa ist der gemeinsame Schwerpunkt nur 500 Kilometer vom Zentrum der Sonne entfernt. Die Bahn des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt ist also viel kleiner als die Bahn des Planeten.

Tatsächlich ist es möglich, die elliptische Bahn des Sterns am Himmel oder die Bewegungen von rechts nach links zu messen, die uns verraten, dass der Stern einen Begleiter hat, der an ihm zieht. Diese Bewegungen sind jedoch so klein, dass sie erst seit Kurzem mit den besten Weltraumteleskopen zu erkennen sind. Der periodische Wechsel der Geschwindigkeit auf uns zu und wieder von uns weg lässt sich dagegen leichter messen: mit der Radialgeschwindigkeitsmethode.

Der Doppler-Effekt

Um die Radialgeschwindigkeit zu messen, nutzen Astronomen und Astronominen einen Effekt, der zuerst von dem österreichischen Physiker Christian Doppler beschrieben wurde. Der Doppler-Effekt tritt immer dann auf, wenn sich die Sender oder Empfänger von Wellen relativ zueinander bewegen. Beim akustischen Doppler-Effekt ändert sich die Frequenz, also die wahrnehmbare Tonhöhe, wenn sich die Tonquelle auf den Hörer oder die Hörerin zu- oder von ihm oder ihr wegbewegt – man kennt das beispielsweise vom Signalhorn eines vorbeifahrenden Krankenwagens. Aber nicht nur bei Schallwellen tritt der Doppler-Effekt auf, sondern auch bei Licht – einer elektromagnetischen Welle.

Bei der Bewegung eines Sterns vor und zurück ändert sich mit der Radialgeschwindigkeit auch die Frequenz. Und mit der Frequenz ändert sich die mit ihr eng verbundene Wellenlänge, die „Farbe“ des auf der Erde beobachtbaren Sternlichts. Das von einem Teleskop auf der Erde eingesammelte Licht wird mit einem Spektrographen wie bei einem Regenbogen in seine spektralen Anteile zerlegt. Kleinste Verschiebungen der Wellenlänge lassen sich auf diese Weise präzise bestimmen. Dabei macht man sich zunutze, dass Sternspektren viele scharfe dunkle Linien enthalten. Sie rühren her von Atomen und Molekülen in der Sternatmosphäre, die Licht ganz bestimmter charakteristischer Wellenlängen absorbieren. Verschiebungen dieser Absorptionslinien können wir heute mit einer Genauigkeit von etwa einem Meter pro Sekunde messen.

Dies gelingt nur mit einer ausgeklügelten Analyse der aufgenommenen Spektren. Hierfür muss man die Geschwindigkeit der Erde sehr genau kennen, die von den Positionen aller anderen Objekte im Sonnensystem beeinflusst wird. Auch weitere Störeffekte müssen korrigiert werden. Die Spektrographen müssen hochauflösend sein und einzelne Spektrallinien gut voneinander trennen können. Darüber hinaus müssen sie extrem stabil sein, weshalb man sie mit einem Vakuumtank umschließt, dessen Temperatur man auf $\frac{1}{400}$ Grad genau regeln kann. Als Referenz für die zu messende Geschwindigkeit wird eine mit Jod gefüllte Gaszelle, eine spezielle Emissionslinien-Lampe oder ein Laser-Frequenzkamm verwendet. Für die Beobachtungen benötigt man sehr viel Teleskopzeit über Zeiträume hinweg, die idealerweise um einiges länger sind als die Perioden der zu beobachtenden Planeten. Das können viele Jahre oder gar Jahrzehnte sein.



PRIVATDOZENTIN DR. SABINE REFFERT ist seit 2006 als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Landessternwarte, einem Teil des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg, tätig. Nach ihrem Studium der Physik, Astronomie und Mathematik sowie ihrer Promotion in Astronomie an der Universität Heidelberg absolvierte sie Postdoc-Aufenthalte an der University of California in San Diego (USA) und der Universität Leiden (Niederlande). Ihre Forschungsschwerpunkte liegen in der stellaren Astrophysik und der Erforschung extrasolarer Planeten, wobei sie Methoden wie Astrometrie und Spektroskopie anwendet.

Kontakt: sreffert@
lsw.uni-heidelberg.de



PROF. DR. ANDREAS QUIRRENBACH ist seit 2006 als Professor an der Fakultät für Physik und Astronomie sowie als Leiter der Landessternwarte an der Universität Heidelberg tätig. Nach dem Studium der Physik in Bonn und Heidelberg entwickelte er im Zusammenhang mit seiner Dissertation, die am Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie entstand, seinen Schwerpunkt in astronomischen Präzisionsmessungen. Als Feodor-Lynen-Stipendiat der Alexander von Humboldt-Stiftung forschte er am US Naval Observatory in Washington, D.C. (USA); anschließend war er Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching. 1997 erhielt er einen Ruf an die University of California in San Diego (USA), von wo er 2002 an die Universität Leiden (Niederlande) wechselte.

Kontakt: a.quirrenbach@
lsw.uni-heidelberg.de

„Um einen Exoplaneten auf seiner Bahn um seinen Zentralstern nachzuweisen, bedarf es besonderer Methoden.“

Damit noch immer nicht genug: Es gilt, das sehr regelmäßige, von einem umlaufenden Planeten verursachte Vor und Zurück des Sterns von anderen Phänomenen zu unterscheiden, die ebenfalls zu Verschiebungen der Spektrallinien führen können. Das sind vor allem konvektive Strömungen des heißen Gases an der Sternoberfläche, Flecken, wie sie auch auf unserer Sonne vorkommen, oder Pulsationen im Stern. Diese „stellaren Aktivitäten“ hängen stark vom Sterntyp ab; meist sind sie unregelmäßiger als die von umlaufenden Planeten verursachte Bewegung. Von den Eigenschaften der beobachteten Variationen der Radialgeschwindigkeit kann man oft auf deren Ursache zurückschließen. Es gibt aber auch Fälle, in denen man zusätzliche Daten benötigt, beispielsweise präzise Messungen der Helligkeitsvariationen des Sterns, um entscheiden zu können: Hat man einen neuen Planeten entdeckt – oder wurde man von stellarer Aktivität genarrt?

Weitere Suchmethoden

Neben der Radialgeschwindigkeitsmethode gibt es noch weitere Methoden, um Exoplaneten aufzuspüren. Die erfolgreichste von ihnen ist die „Transitmethode“. Dabei misst man, wie sich ein Stern verdunkelt, während ein Planet vor ihm vorbeizieht und dabei einen Teil der Sternscheibe verdeckt. Bei der „Mikrolinsenmethode“ nutzt man aus, dass Licht von Gravitationsfeldern abgelenkt wird – dies wurde von Albert Einstein im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie berechnet. Das Schwerefeld von Sternen kann damit als Brennglas wirken, welches das Licht eines anderen, weit dahinter liegenden Sterns verstärkt. Besitzt der vordere Stern einen Planeten, wirkt dieser wie ein Kratzer im Brennglas, der einen zusätzlichen Reflex erzeugt. Die „Astrometriemethode“ ist verwandt mit der Radialgeschwindigkeitsmethode. Hierbei misst man ebenfalls die kleine Bahn, die der Stern aufgrund der Präsenz des Planeten um den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems beschreibt, und vermisst anstelle der Geschwindigkeit in radialer Richtung sehr genau die periodischen Änderungen der Position des Sterns in der Himmelsebene.

Alle bislang beschriebenen Methoden sind indirekte Methoden: Nicht der Exoplanet selbst wird beobachtet, sondern sein Einfluss auf seinen Heimatstern oder auf das Licht eines weit entfernten Hintergrundsterns. In einigen Fällen ist es mittlerweile auch möglich, einen Exoplaneten direkt abzubilden, indem man das von ihm emittierte Infrarotlicht detektiert. Dazu muss man das helle Licht des Heimatsterns mit technischen Kniffen unterdrücken. Die direkte Methode ist in ihrer Anwendung noch sehr limitiert. Sie kommt vor allem für den Nachweis von Exoplaneten infrage, die vergleichsweise hell sind und ihren Heimatstern nicht allzu eng umkreisen. Alle genannten Methoden werden von Forschungsgruppen in Heidelberg angewendet, um Exoplaneten aufzuspüren. Detektiert man einen Planeten mit mehr als einer Methode, ergeben sich daraus weitreichende Synergien: Man kann den Planeten dann weitaus besser charakterisieren als nur mit einer Nachweismethode allein.

Bemerkenswerte Vielfalt

Bei den heute bekannten mehr als 5.000 Exoplaneten handelt es sich vor allem um sehr kurzperiodische Planeten mit Umlaufzeiten von wenigen Tagen oder Wochen, zu denen es keine Entsprechung im Sonnensystem gibt. Das ist allerdings auch ein Auswahleffekt. Er beruht darauf, dass kurzperiodische Planeten leichter zu detektieren sind als Planeten, die ihren Stern in größerer Entfernung mit längeren Perioden umkreisen. Dennoch ist die Vielfalt der bisher beobachteten Exoplaneten bemerkenswert: Sie unterscheiden sich stark in Größe, Dichte, Temperatur und in der Zusammensetzung ihrer Atmosphäre. Noch erlauben es unsere eingeschränkten Möglichkeiten nicht, auch masseärmere Planeten auf langen Bahnen zu detektieren. Es lässt sich aber schon jetzt sagen, dass nahezu alle Sterne Planeten besitzen und dass es Planetentypen und Konfigurationen gibt, die bei uns im Sonnensystem nicht vorkommen.

Dazu zählen Jupiter-ähnliche Gasplaneten mit Umlaufzeiten von nur wenigen Tagen oder Planeten in Doppelsternsystemen, bei denen der Planet entweder nur einen oder beide Sterne umkreist. Es gibt auch Paare von Planeten, deren Umlaufperioden ganzzahlige Vielfache voneinander sind, wodurch sie sich auf ihren Bahnen gegenseitig stabilisieren. Zudem gibt es viele „Super-Erden“ beziehungsweise „Mini-Neptune“ in einem Massenbereich, in dem keine entsprechenden Planeten im Sonnensystem existieren. Andere der detektierten Exoplaneten wiederum sind in ihrer Masse der Erde ähnlich. Sie befinden sich in der „habitablen Zone“. Sie kennzeichnet den Abstand vom Heimatstern, in dem Temperaturen herrschen, die flüssiges Wasser auf der Oberfläche ermöglichen.

An der Landessternwarte haben wir uns auf die Suche nach Planeten um relativ massereiche Sterne (K-Riesen) und um besonders massearme Sterne (M-Zwerg) spezialisiert. Beide Sterntypen bringen ihre eigenen Herausforderungen als Heimatsterne von Planeten mit sich. Denn beide Sterntypen sind stark von den Prozessen betroffen, die zu Variationen der Radialgeschwindigkeit führen. Nichtsdestoweniger ist es uns in vielen Fällen gelungen, Planeten um diese Art von Sternen nachzuweisen. Wir haben etwa „Iota Draconis b“ gefunden, den ersten Planeten um einen K-Riesen. Als Mitglied des deutsch-spanischen CARMENES-Konsortiums hat unsere Gruppe die meisten massearmen Planeten um M-Zwerg detektiert. Das Bestimmen der Anzahl von Planeten, die um verschiedene Sterntypen kreisen, hilft uns, besser zu verstehen, wie die Entstehung und die Charakteristika von Planetensystemen von der Masse und anderen Eigenschaften ihrer Heimatsterne abhängen.

In Heidelberg sind wir zudem in der besonders günstigen Situation, auf Spektrographen und Teleskope zugreifen zu können, die gut für die Planetensuche geeignet sind – nicht zuletzt deshalb, weil sich die Landessternwarte mit ihrem

THE SEARCH FOR EXTRASOLAR PLANETS

SABINE REFFERT & ANDREAS QUIRRENBACH

The aim of the exoplanet group at the Heidelberg observatory (Landessternwarte), located on top of the Königstuhl mountain, is to discover planets orbiting stars beyond our solar system. This is done by indirect methods, since planets are much less massive and significantly fainter than their host stars and cannot, in most cases, be observed directly through a telescope. A planet does not orbit a stationary host star; rather, they both orbit their common centre of mass, which is very close to the star due to the huge mass ratio between star and planet. This makes it possible to detect the planet's presence by observing the subtle motion of the star as it moves around the centre of mass.

If we were to observe the planetary system from above, we would see both the star and the planet tracing elliptical, nearly circular orbits. From a side view, however, we notice a periodic change in the star's velocity along the line of sight. This motion alternately brings the star towards us and pushes it away, creating a regular back-and-forth motion. The velocity variations lead to changes in the wavelengths of atomic and molecular absorption lines in the stellar spectrum, a phenomenon called “Doppler effect”. These changes can be measured using stable, high-resolution spectrographs attached to telescopes, which disperse the light as a function of wavelength.

As of today, more than 5,000 exoplanets have been discovered. Our research group focuses on finding exoplanets around specific low- and high-mass stars, which present unique challenges as Doppler targets due to their intrinsic stellar activity. Heidelberg is ideally positioned for this research, as we have access to a range of spectrographs well suited for exoplanet detection. The lab and workshop at the observatory have been designing and building high-resolution spectrographs for many decades. Additionally, the historic Waltz Telescope on Königstuhl has been equipped with its own high-resolution spectrograph. ●

ASSOCIATE PROFESSOR DR SABINE REFFERT has been a research assistant at the Heidelberg observatory (Landessternwarte), which is part of Heidelberg University's Centre for Astronomy, since 2006. She studied physics, astronomy and mathematics and earned her doctorate in astronomy at Heidelberg University, and held postdoc positions at the University of California in San Diego (USA) and at Leiden University (Netherlands). Her research interests include stellar astrophysics and the search for extrasolar planets using such methods as astrometry and spectroscopy.

Contact: sreffert@
lsw.uni-heidelberg.de

PROF. DR ANDREAS QUIRRENBACH has held a professorship at Heidelberg University's Faculty of Physics and Astronomy and headed the Heidelberg observatory since 2006. He studied physics in Bonn and Heidelberg and developed his field of specialisation – astronomical precision measurements – while preparing his dissertation at the Max Planck Institute for Radio Astronomy in Bonn. As a Feodor Lynen Fellow of the Alexander von Humboldt Foundation, he conducted research at the U.S. Naval Observatory in Washington, D.C., USA, then transferred to the Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics in Garching. He has held professorships at the University of California in San Diego, USA (from 1997) and at Leiden University in the Netherlands (from 2002).

Contact: a.quirrenbach@
lsw.uni-heidelberg.de

“Of the more than 5,000 exoplanets known today, the vast majority are short-period planets that have no equivalent in the solar system.”

optischen Labor und ihrer Werkstatt im Laufe der Jahrzehnte einen exzellenten Ruf im Bau von hochauflösenden, stabilen Spektrographen erworben hat. Die Landessternwarte hat die wissenschaftliche Federführung im CARMENES-Konsortium inne, und sie hat entscheidend zum Bau des CARMENES-Spektrographen beigetragen, der auf dem Calar-Alto-Observatorium in Südspanien installiert ist. Auch das im Jahr 1906 in Betrieb genommene historische Waltz-Teleskop der Landessternwarte wurde modernisiert und mit einem Spektrographen ausgestattet, der es erlaubt, Exoplaneten zu beobachten. Das ermöglicht es Studierenden, auf dem Königstuhl praktische Erfahrungen in allen Aspekten des Vor und Zurück der Himmelskörper sammeln zu können. ●

Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg

Das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) ist die größte universitäre Einrichtung für astronomische Forschung und Lehre in Deutschland. Es wurde im Jahr 2005 als Zusammenschluss der bisherigen Landesforschungseinrichtungen Astronomisches Rechen-Institut (ARI) und Landessternwarte Königstuhl (LSW) mit dem bereits existierenden universitären Institut für Theoretische Astrophysik (ITA) gegründet. Die Forschung am ZAH umfasst einen breiten Themenbereich von Kosmologie und Gravitationslinsen über Galaxienentwicklung und Stelardynamik bis hin zu Sternentstehung, Astrometrie und Satellitenmissionen.

„Schon heute lässt sich sagen, dass ein hoher Prozentsatz aller Sterne Planeten besitzt und dass es Konfigurationen gibt, die bei uns im Sonnensystem nicht vorkommen.“