Universiteit
Leiden
The Netherlands

Young suns and infant planets: probing the origins of solar systems

Bohn, A.J.

Citation
Bohn, A. J. (2021, September 22). *Young suns and infant planets: probing the origins of solar systems*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/3213465

Version:	Publisher's Version
License:	Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/3213465

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Zusammenfassung

Wie entstehen Planetensysteme? Ist unser Sonnensystem einzigartig oder gibt es viele andere solcher Systeme im Universum, die eventuell sogar erdähnliche Planeten beherbergen? Und könnte es auf solchen Erdzwillinge eventuell Leben geben? Seit tausenden von Jahren faszinieren solche Fragen die Menschheit – Fragen, auf welche es bislang meistens jedoch keine endgültige Antwort gibt.

Die letzten 30 Jahre haben unser Verständnis von Planetensystemen grundlegend verändert. Im Jahre 1992 wurde der erste Planet außerhalb unseres Sonnensystems entdeckt. Dieser erste extrasolare Planet (oder auch Exoplanet) ist gänzlich anders als die acht Planeten, welche die Menschheit zuvor gekannt hatte. Auch der Stern, den dieser Planet umkreist, hat nicht viel mit unsere Sonne gemein. PSR B1257+12, der Name dieses Sterns, ist ein sogenannter Pulsar: Ein schnell rotierendes Objekt, welches das Endstadium vieler Sterne darstellt, die schwerer als die Sonne sind. Aber auch der erste Planet, der 1995 um einen sonnenähnlichen Stern herum entdeckt wurde, ist nicht besonders lebensfreundlich. In der Tat unterscheidet sich dieser Planet eklatant von den acht Planeten, die bis anhin aus unserem Sonnensystem bekannt gewesen sind.

Zwar ist dieser Planet mit dem Namen 51 Peg b ein Gasriese wie Jupiter. Allerdings liegt seine Umlaufbahn viel näher um seinen Mutterstern herum. Mit einer großen Halbachse von gerade einmal 5 % der Erde-Sonne-Entfernung ist dieser Exoplanet sogar näher an seinem Mutterstern als Merkur an der Sonne. Aufgrund seiner Größe und der kurzen Umlaufdauer von wenigen Tagen wurde 51 Peg b zum ersten Exemplar einer neuen Gattung von Planeten – die sogenannten heißen Jupiter.

Basierend auf diesen ersten Entdeckungen begann eine Revolution der Exoplanetenforschung. Heutzutage kennen wir ungefähr 4'500 Planeten außerhalb unseres Sonnensystems und viele tausend neue Entdeckungen sind für die nächsten Jahre prognostiziert. Allerdings konnte bislang nur eine kleine Anzahl dieser Planeten direkt abgebildet werden (etwa 1 %). Dies beruht hauptsächlich auf dem großen Kontrast zwischen Stern und Planet. Der Stern ist millionenfach heller als der Planet, der abgelichtet werden soll. Außerdem ist der Abstand zwischen Stern und Exoplanet in der Regel sehr gering. Ein häufig bemühter Vergleich ist der eines kleinen Glühwürmchens, das direkt neben einem hellen Leuchtturm abgebildet werden soll. Selbstverständlich ist Letzterer, welcher den Stern repräsentiert, um ein vielfaches heller als das kleine Glühwürmchen, welches den Planeten darstellt. Selbst in einem Abstand von wenigen Metern scheint es unmöglich, das Glühwürmchen direkt neben dieser gigantischen Lichtquelle mit bloßen Augen zu erkennen. Allerdings sind extrasolare Planetensysteme um ein Vielfaches weiter entfernt.[5] Für den Leuchtturm-Glühwürmchen-Vergleich entspricht dies

[5] Übliche Distanzen sind in der Regel mehrere (hundert) Lichtjahre. Ein Lichtjahr ist eine Strecke von circa 9.4×10^{12} km, was ungefähr 9.4 Billionen Kilometern entspricht.

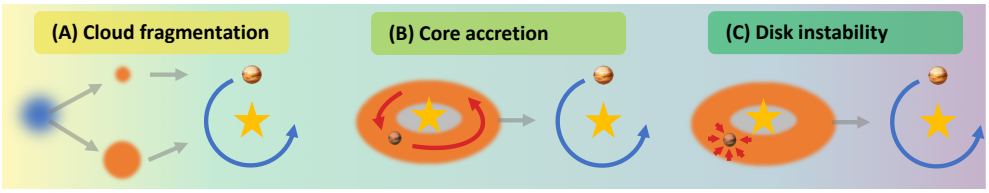

Abbildung 7: Mögliche Szenarien für die Entstehung weiter Gasriesen.

einer Strecke von mehr als 500 km, über die man beide Objekte unterscheiden und abbilden will.

Vor weniger als zwei Jahrzehnten gelang das erste Bild eines solchen planetenähnlichen Objekts mithilfe des Very Large Telescopes (VLT) der Europäischen Südsternwarte (ESO). Gewaltige Fortschritte in Instrumentation, Observationsstrategien und Datenverarbeitungsalgorithmen ermöglichten, dass man große Exoplaneten, die weit von ihren Muttersternen entfernt sind, wirklich abbilden kann. Bis heute gelang dies für etwa 50 jupiterähnliche Gasriesen. Die meisten dieser direkt abgebildeten Exoplaneten sind deutlich weiter von ihrem Mutterstern entfernt als die Erde von der Sonne. Für viele sind diese Abstände sogar noch deutlich größer als für alle bekannten Objekte in unserem Sonnensystem. Insbesondere die Entstehung solcher weiten Gasriesen ist weiterhin unklar. Wie in Abbildung 7 skizziert, gibt es drei konkurrierende Theorien, die diesen Prozess beschreiben können.

(A) Objekte mit Planetenmassen könnten ein Nebenprodukt der Entstehung von Sternen sein. Eine in sich kollabierende molekulare Wolke kann in verschiedene Teile gerissen werden. Manche dieser Fragmente könnten dann Massen aufweisen, die zu gering sind, um Wasserstoff oder Deuterium zu Helium zu fusionieren.[6] Falls diese Fragmente weniger als 13 Jupitermassen wiegen, haben diese Objekte planetare Eigenschaften.

(B) Das Kernwachstumsszenario ist die wahrscheinlichste Erklärung für die Entstehung der Planeten in unserem Sonnensystem. Junge Sterne sind üblicherweise von einer Scheibe aus Gas und Staub umgeben. Durch Kollisionen kleiner Partikel in dieser Scheibe können größere Klumpen entstehen, die zu kilometergroßen Planetesimalen heranwachsen können. Falls solch ein Protoplanet eine kritische Masse überschreitet, kann eine Gasreiche Atmosphäre akkretiert werden, ähnlich der von Jupiter in unserem Sonnensystem.

(C) Die gravitative Scheibeninstabilität postuliert, dass Regionen in circumstellaren Scheiben unter dem Einfluss ihrer Selbstgravitation in sich zusammenfallen können. Dieser Prozess formt große Planeten, die weiteres Material akkretieren können.

All diese möglichen Entstehungsprozesse haben charakteristische Zeitskalen, Planetenumlaufbahnen und -häufigkeiten. Um den wichtigsten Mechanismus für die Entstehung weiter Gasriesen ausmachen zu können, ist es deshalb üblich, simulierte Planetenpopulationen mit Beobachtungsresultaten zu vergleichen. Allerdings wurde eine solche Studie noch nie mit einer großen und homogenen Menge junger, sonnenähnlicher Sterne durchgeführt. Da diese Kategorie von Sternen die Anfangsbedingungen unseres eigenen Sonnensystems widerspiegelt, ist eine solche Studie von großem Interesse. Deshalb starteten wir die Young Suns Exoplanet Survey (YSES), deren vorläufige Ergebnisse in dieser Arbeit präsentiert werden.

[6] Planeten sind Objekte, die nicht in der Lage sind, selbstständig Energie durch nukleare Fusion zu erzeugen. Grund hierfür ist, dass die Masse von Planeten zu gering ist, um im Kern Temperaturen zu erzeugen, die hoch genug sind, um die Fusion in Gang zu setzen. Objekte, die mehr als 13 Mal so schwer sind wie Jupiter, können Deuterium zu Helium fusionieren und sind deswegen keine Planeten mehr. Diese Objekte nennt man Braune Zwerge. Falls ein Objekt eine Masse von 80 Jupitermassen überschreitet, ist die Kerntemperatur hoch genug, um Wasserstoff zu Helium zu fusionieren. Dies ist die notwendige Bedingung, um ein Objekt als Stern bezeichnen zu können.

Die Young Suns Exoplanet Survey

Im Rahmen von YSES beobachteten wir ein einmaliges Sample von 70 sonnenähnlichen Sternen, die sich in der Scorpius-Centaurus Assoziation befinden. Diese Gruppe ist etwa 400 Lichtjahre von der Erde entfernt – ein Katzensprung in astronomischen Distanzen. Alle Sterne von YSES sind sehr jung im Vergleich zu unsere Sonne mit einem Alter von 4,6 Milliarden Jahren. Da die YSES-Sterne lediglich 15 Millionen Jahre alt sind, beobachten wir diese Systeme nur kurze Zeit nach ihrer Entstehung. Auch die Entstehung von Planeten sollte zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen sein. Da Planeten nach ihrer Entstehung abkühlen, sind solche jungen Systeme besonders gut geeignet, um nach weiten Gasriesen zu suchen. Wir haben alle Sterne mit dem SPHERE-Instrument beobachtet, welches am Unit Telescope 3 von ESOs VLT angebracht ist. Dieses Instrument ist eines der fortschrittlichsten Geräte zum Abbilden extrasolarer Planeten. Eine interne adaptive Optik korrigiert das Verschwimmen des Sterns, welches durch unsere eigene Atmosphäre verursacht wird. Ein solches System ist erforderlich, um scharfe Bilder mit einem Teleskop aufzunehmen, das einen Spiegeldurchmesser von 8,2 m besitzt. Ein anderes technisches Hilfsmittel ist ein sogenannter Koronograf. Diese undurchsichtige Maske reduziert die Helligkeit des Sterns, wodurch dunkle Planeten um diesen herum sichtbar werden (siehe Abbildung 9).

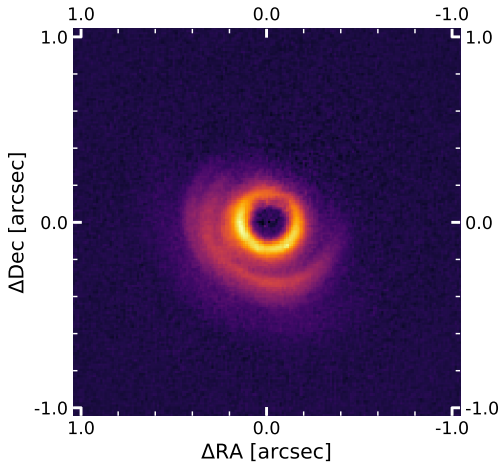

Abbildung 8: Eine circumstellare Scheibe um Wray 15-788 herum. Nur eine Seite der Scheibe ist sichtbar. Eine zusätzliche innere Scheibe könnte einen Schatten auf den äußeren, verborgenen Teil im oberen rechten Bildrand werfen. Die Intensität des Sterns ist mit einem Koronografen abgeschwächt.

Obwohl das Primärziel von YSES die direkte Detektion von Planeten waren, so war das erste Resultat von unserer Studie die Entdeckung einer circumstellaren Scheibe um Wray 15-788 herum. Diese Scheibe ist riesig. Der helle äußere Ring, der in Abbildung 8 zu sehen ist, ist mehr als 50 Mal weiter von seinem Mutterstern entfernt als die Erde von der Sonne. Außerdem sieht die Scheibe sonderbar aus, als wäre die obere rechte Hälfte verborgen. Dies kann nicht mit der Geometrie erklärt werden, die wir in der Abbildung sehen. Deshalb stellten wir die Vermutung auf, dass es eine weitere Scheibe um den Stern herum gibt, die jedoch zu nahe an diesem ist, um sie mit SPHERE auflösen zu können. Falls diese innere Scheibe anders ausgerichtet wäre als die äußere, so könnte dies zu einem Schattenwurf und der beobachteten Verdunklung führen. Diese abweichende Ausrichtung könnte von einem Planeten verursacht werden, der um den Stern kreist. Dieser Planet konnte bislang aber noch nicht gefunden werden.

Das erste Planetensystem, das wir im Rahmen unser Studie entdeckten, erhielt den Namen YSES 1 (siehe linke Seite von Abbildung 9). Diesen Stern umkreisen zwei Gasriesen auf sehr weit entfernten Bahnen. Es war das erste Mehrplanetensystem, das um einen sonnenähnlichen Stern herum abgebildet werden konnte. Der nähere Planet YSES 1b hat eine große Halbachse von mindestens 160 Mal der Erde-Sonne-Entfernung und der äußere Planet YSES 1c ist sogar 320 Mal weiter von seinem Mutterstern entfernt als die Erde von der Sonne. Auch die Masse beider Planeten ist deutlich größer als bei bekannten Objekten in unserem Sonnensystem. YSES 1c ist sechsmal so schwer wie Jupiter, der schwerste Planet in unserem Sonnensystem, und YSES 1b ist sogar 14 Mal so schwer. Daher ist noch ungewiss, ob YSES 1b ein Planet

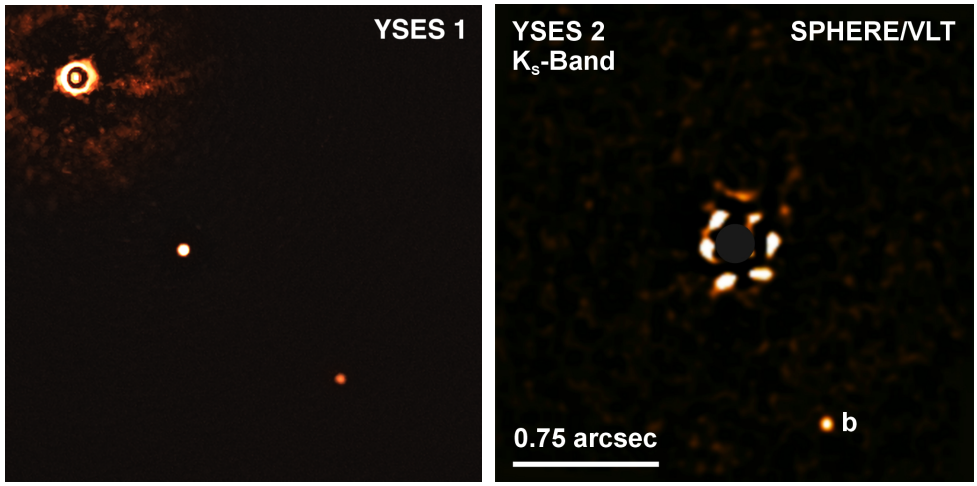

Abbildung 9: Die Planetensysteme YSES 1 und YSES 2. *Linke Seite*: Das Mehrplanetensystem um YSES 1 herum. Der Stern befindet sich oben links und ist hinter einem Koronografen verborgen. Zwei weite Gasriesen kreisen um diesen sonnenähnlichen Stern. Der innere und äußere Planet haben ein Gewicht von 6, beziehungsweise 14 Jupitermassen. Quelle: ESO/Bohn et al. *Rechte Seite*: Der Gasriese YSES 2b. Der Stern ist in der Bildmitte und hinter einem Koronografen verborgen.

oder eher ein Brauner Zwerg ist. Weitere Beobachtungen dieses spannenden Systems sollten dazu beitragen, diese offene Frage zu beantworten. Insbesondere eine detaillierte Charakterisierung der Planetenatmosphären könnte helfen, den wahrscheinlichsten Entstehungsprozess herauszufinden.

Die neueste Entdeckung unsere Studie ist YSES 2b – ein Gasriese, der sechsmal so schwer wie Jupiter ist (siehe rechte Seite von Abbildung 9). Auch dieser Planet ist mit 110 Erde-Sonne-Entfernungen recht weit von seinem Mutterstern entfernt. Es ist unklar, wie YSES 2b entstanden ist. Seine Masse ist niedriger als für Szenarien (A) und (C) postuliert und außerdem kann er nicht durch das Kernwachstumsszenario (B) so weit entfernt vom Stern entstanden sein. Eine mögliche Erklärung könnte ein noch unentdeckter Planet sein. Dieser zusätzliche Planet könnte näher um den Stern kreisen und durch Gravitationswechselwirkungen YSES 2b zu seiner jetzigen Position befördert haben. Weitere Beobachtungen von diesem System sollten helfen, dieses potentielle Szenario zu überprüfen.

Ausblick

Da einige Beobachtungen von YSES immer noch ausgeführt werden müssen, steht die finale statistische Analyse der Studie noch aus. Dadurch sollte sich der wichtigste Entstehungsprozess von weiten Gasriesen um sonnenähnlichen Sterne herum ermitteln lassen. Zukünftige Teleskope so wie das James Webb Space Telescope werden komplett neue Einblicke in die chemischen Eigenschaften dieser Planetenatmosphären generieren. Auch diese könnten Hinweise auf die zugrundeliegenden Entstehungsprozesse liefern. Insbesondere die nächste Generation riesiger, terrestrischer Observatorien, wie zum Beispiel das Extremely Large Telescope, das Thirty Meter Telescope oder das Giant Magellan Telescope, wird einen wichtigen Beitrag zur Suche weiterer Planeten zu den Sternen aus unserer Studie leisten. Aufgrund des raschen Fortschritts bei der Erforschung von Exoplaneten ist es nicht unwahrscheinlich, dass einige Antworten auf die anfänglichen Fragen – inklusive der Entdeckung von Leben außerhalb unseres Sonnensystems – bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gefunden werden können.