

Pressemitteilung**Max-Planck-Institut für Astronomie****Dr. Markus Pössel**

02.10.2020

<http://idw-online.de/de/news755122>Forschungsergebnisse
Physik / Astronomie
überregional**Erste Messung von Masse und Helligkeit desselben Exoplaneten stellt klassisches Modell der Planetenentstehung in Frage**

Astronom*innen haben mit dem ESO-Instrument GRAVITY das erste Bild eines Exoplaneten aufgenommen, der zuvor nur indirekt über das Spektrum seines Sterns nachgewiesen werden konnte. Damit lassen sich erstmals sowohl die intrinsische Helligkeit eines Exoplaneten bestimmen als auch seine Masse abschätzen. Für den Planeten, beta Pictoris c, ist das Ergebnis überraschend: Bei einer ähnlichen Masse wie sein Schwesterplanet beta Pictoris b ist seine Helligkeit um den Faktor 6 geringer. Das stellt eine Herausforderung für das klassische Modell der Planetenentstehung durch sogenannte Scheibeninstabilität dar.

Neue Beobachtungen mit dem Instrument GRAVITY, welches das Licht aller vier 8-Meter-Teleskope des Paranal-Observatoriums der ESO in Chile kombiniert, haben zur ersten direkten Beobachtung eines Exoplaneten geführt – eines Planeten, der einen anderen Stern als die Sonne umkreist –, der zuvor mit der sogenannten Radialgeschwindigkeitsmethode nachgewiesen worden war. Jene Methode zieht aus Veränderungen im Spektrum eines Sterns Rückschlüsse auf Planeten, die den Stern umkreisen. Zusätzlich erlaubt sie eine Abschätzung der Massen der auf diese Weise entdeckten Planeten. Ein direktes Bild des Planeten wiederum enthält Informationen über die intrinsische Helligkeit des Planeten – also auf die Intensität desjenigen Lichts, das ein Planet selbst aufgrund der Abkühlung seines Inneren erzeugt, im Gegensatz zu reflektiertem oder absorbiertem und anschließend wieder abgestrahltem Sternenlicht. Die intrinsische Helligkeit kommt damit von der Wärmestrahlung des Planeten. Bei jungen Planeten wie in diesem Fall ist die Wärme ein Überrest aus ihrer Entstehungsphase.

Ein Planetenkatalog voller Lücken

Um die neue Messung richtig einzuordnen, muss man sich klarmachen, was über die mehr als 4300 bisher entdeckten Exoplaneten bekannt ist und was nicht. Eine Abschätzung für die Größe (den Durchmesser) haben Astronomen für 70% dieser Planeten, also mehr als zwei Drittel. So weit, so gut. Aber nur für jeden fünften Planeten gibt es eine Massenschätzung, und für nur rund 1 % fotografische Bilder, die Messungen der intrinsischen Helligkeit eines Planeten ermöglichen. Ein Katalog der Eigenschaften der bekannten Exoplaneten bleibt derzeit sehr lückenhaft.

Der Grund für diese Lücken liegt in den Eigenschaften der verschiedenen Methoden zur Erkennung und Untersuchung von Exoplaneten. Bei der Transitmethode wird ein Planet durch die periodische minimale Abdunklung des Lichts seines Sterns nachgewiesen, die sich ergibt, während der Planet von der Erde aus vor dem Stern vorbeiläuft. Sie erlaubt eine Abschätzung der Größe eines Planeten – je größer der Planet ist, desto größer ist die Lichtmenge, die der Planet abschirmt, wenn er sich zwischen uns und dem Stern befindet.

Mit Hilfe eines hinreichend genauen Spektrums des Sterns kann man Planeten mit der sogenannten Radialgeschwindigkeitsmethode nachweisen. Dass ein Planet "seinen Zentralstern umkreise" ist bei genauerer Betrachtung nicht richtig. In Wirklichkeit umkreisen sowohl der Planet als auch der Stern ihren gemeinsamen

Schwerpunkt. Bewegt sich der Stern während eines Umlaufs wiederholt ein Stückchen auf uns zu und später wieder von uns weg, führt das zu einer Verschiebung von klar erkennbaren Merkmalen ("Spektrallinien") im Spektrum des Sterns – der regenbogenartigen Zerlegung seines Lichts. Aus solchen sich regelmäßig wiederholenden Verschiebungen kann auf das Vorhandensein eines Exoplaneten geschlossen werden.

Bei sonst gleichen Bedingungen führt ein massereicherer Planet dazu, dass sich der Stern schneller bewegt und das Spektrum stärker verschiebt als bei einem massearmen Planeten. Die durch den Planeten induzierte Sternbewegung wird ebenfalls schneller sein, wenn ein Planet seinen Stern enger umkreist. Diese Zusammenhänge ermöglichen es, aus den Spektrumsänderungen die Masse der mit dieser Methode entdeckten Planeten abzuschätzen. Kann man (über Transitmethode oder direkte Beobachtung) außerdem die Neigung der Bahnebene des Planeten aus Sicht eines irdischen Beobachters bestimmen kann man die Masse aus den Radialgeschwindigkeitsdaten sogar direkt bestimmen.

Nicht zuletzt können einige wenige Planeten direkt beobachtet werden – durch Aufnahme eines Bildes, auf dem der Planet als kleiner Fleck erscheint. Das entspricht einer Messung der intrinsischen Helligkeit des Planeten. Der Zusatz "intrinsisch" besagt dabei, dass Licht gemeint ist, dass der Planet aufgrund seiner gespeicherten Wärme selbst ausstrahlt – nicht seine Helligkeit durch reflektiertes oder durch absorbiertes und anschließend wieder ausgestrahltes Sternenlicht. Die intrinsische Helligkeit lässt Rückschlüsse auf die Wärme zu, die der Planet aus seiner Entstehungszeit zurückbehalten hat.

Unterschiedliche Methoden, unterschiedliche Stärken

Wenn diese Methoden sich also ergänzen, warum nicht alle gleichzeitig anwenden und auf diese Weise Größe, intrinsische Helligkeit und Masse bestimmen? Das Problem ist, dass die verschiedenen Methoden für verschiedene Arten von Planeten unterschiedlich gut funktionieren.

Zum Beispiel funktioniert die Radialgeschwindigkeitsmethode besonders gut für Planeten, die näher an ihrem Stern kreisen, weil die Geschwindigkeitsänderung des Sterns während der Umlaufbahn des Planeten unter solchen Umständen größer ist. Transitbeobachtungen, bei denen ein Planet vor seinem Stern vorbeizieht, begünstigen ebenfalls Planeten in engen Umlaufbahnen, wodurch die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der Planet aus unserer Sicht direkt vor seinem Stern vorbeizieht. Infolgedessen verfügen die Astronomen über kombinierte Transit- und Radialgeschwindigkeitsmessungen für rund 800 Planeten, und können in diesen Fällen sowohl die Masse als auch die Größe, und damit sogar auch die Dichte des Planeten bestimmen.

Direkte Aufnahmen von Planeten sind dagegen sehr selten, da es enorm schwierig ist, einen Planeten neben seinem hellen Zentralgestirn zu fotografieren. Sterne sind in der Regel tausend- bis zehnmilliardenfach heller als Planeten, und die meisten Planeten werden durch ihre Sterne komplett überstrahlt. Diese Methode funktioniert am besten, wenn der Planet sehr weit von seinem Stern entfernt ist, typischerweise mehr als zehnmal so weit wie die Erde von der Sonne.

Von den 50 Planeten, von denen Bilder vorliegen, haben nur fünf eine Umlaufdauer von weniger als 20 Jahren. Die große Mehrheit dieser Planeten hat Perioden von mehr als hundert Jahren. Je länger die Umlaufzeit, desto schwieriger ist es, das "Wackeln" des Sterns über einen bestimmten Zeitraum hinweg nachzuverfolgen. Im Idealfall möchte man die Veränderungen des Spektrums über mindestens einen Umlauf hinweg verfolgen, um sich der Periodizität sicher zu sein.

Darüber hinaus funktioniert die direkte Abbildung am besten bei jüngeren Sternen, die weniger als 100 Millionen Jahre alt sind: Bei solchen jungen Systemen leuchten die Planeten, und insbesondere die Gasriesen, aufgrund der Restwärme aus ihrer Entstehungszeit noch besonders stark und sind damit leichter zu entdecken. Radialgeschwindigkeitsmessungen hingegen funktionieren am besten für ältere Sterne. Jüngere Sterne weisen typischerweise eine stärkere stellare Aktivität auf, wie Sternflecken oder Konvektion, die die notwendigen Vermessungen des Spektrums erschweren.

Von der Schwierigkeit, den richtigen Kandidaten zu finden

Astronomen, die auf der Suche nach einem Planeten waren, bei dem sie sowohl die Masse als auch die intrinsische Helligkeit messen konnten, hatten es daher von vornherein nicht leicht: Wie findet man einen Planeten um einen jungen, aber nicht zu jungen Stern, der weit genug entfernt ist für eine direkte Abbildung, aber nicht zu weit entfernt für die Anwendung der Radialgeschwindigkeitsmethode?

An dieser Stelle kamen mehrere Dinge zusammen. Im Jahr 2016 wurde am Paranal-Observatorium der ESO das Instrument GRAVITY in Betrieb genommen. GRAVITY kombiniert das Licht aus den vier 8-Meter-Teleskopen des Very Large Telescope (VLT) mit Hilfe einer als Interferometrie bezeichneten Methode. Interferometrie erlaubt es dem Instrument, so kleine Details zu unterscheiden, als ob die Beobachtungen mit einem einzelnen Teleskop mit 130 Metern Spiegeldurchmesser vorgenommen würden. Die Methode ist damit besonders gut geeignet, um zwei punktförmige Quellen, wie einen fernen Stern und einen seiner Planeten, zu beobachten und den Abstand zwischen ihnen zu bestimmen.

Seit 2019 wird das Instrument im Rahmen des ExoGRAVITY-Projekts eingesetzt, um die Eigenschaften bekannter Exoplaneten zu bestimmen, von denen bereits direkte Abbildungen existieren. Für einige Planeten wurden dabei auch Spektren aufgenommen, die Informationen über die Zusammensetzung der Planetenatmosphäre liefern können. Im Wissen um die Fähigkeiten seines Instruments und seine Fähigkeit, Bilder von Planeten zu machen, die ihren Sternen umlaufen, machte sich das ExoGRAVITY-Team auf die Suche nach einem geeigneten Kandidaten, der mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt wurde und von dem GRAVITY ein Bild liefern könnte.

Die erste Kombinations-Messung von Masse und Helligkeit

2019 veröffentlichte eine Gruppe von Astronomen unter der Leitung von Anne-Marie Lagrange am Observatorium von Grenoble die Entdeckung eines neuen Planeten im ϵ -Pictoris-System mit der Radialgeschwindigkeitsmethode. Der Nachweis basierte auf Spektren, die in den vorangegangenen 16 Jahren aufgenommen worden waren. Die daraus abgeleitete Entfernung des Planeten vom Stern ist fast dreimal so groß ist wie die Entfernung der Erde von der Sonne.

Als sie von der Entdeckung erfuhren, wurde den Mitgliedern des ExoGRAVITY-Teams klar, dass sie hier einen aussichtsreichen Kandidaten gefunden hatten. Insbesondere hatten die Entdecker mit ihren Radialgeschwindigkeitsmessungen bereits einen beträchtlichen Teil der Arbeit geleistet: Der Stern ϵ Pic ist nur 23 Millionen Jahre alt, und damit recht günstig für eine direkte Abbildung, aber kein einfaches Ziel für Radialgeschwindigkeitsmessungen. Die Astronomen, die die Spektren analysiert hatten, mussten die stellare Aktivität sorgfältig modellieren, um das Radialgeschwindigkeitssignal des Planeten zu finden.

Mit einer Entfernung von nur 63 Lichtjahren, im kleinen südlichen Sternbild "Maler" (lat. Pictor), ist das ϵ Pic-System eines der uns nächstgelegenen jungen Sternensysteme. Zum Zeitpunkt der neuen Beobachtungen waren darin bereits eine Trümmerscheibe (als Überbleibsel kollidierender Kleinkörper), ein Riesenplanet mit der Bezeichnung Beta Pictoris b und verdampfende Kometen entdeckt worden.

Eine Gruppe von Astronomen unter der Leitung von Mathias Nowak von der Universität Cambridge, zu der auch mehrere Forscher des Max-Planck-Instituts für Astronomie gehören, nahm ϵ Pictoris c daraufhin mit GRAVITY auf's Korn. Unter Ausnutzung der einzigartigen Fähigkeiten des Instruments, und orientiert an aktualisierten Positionsschätzungen aus den Radialgeschwindigkeitsdaten von Lagrange und ihren Kollegen (die heute parallel in einem separaten Fachartikel veröffentlicht werden), gelang es den Astronomen, insgesamt drei Stunden lang Bilder des neu entdeckten Planeten aufzunehmen, die auch eine direkte Messung seiner intrinsischen Helligkeit ermöglichen.

„Es ist erstaunlich, welche Detailgenauigkeit und Empfindlichkeit wir mit GRAVITY erreichen können“, sagt Frank Eisenhauer, der leitende Wissenschaftler des GRAVITY-Projekts am Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik.

„Wir fangen gerade erst an, atemberaubende neue Welten zu erforschen, vom supermassereichen Schwarzen Loch im Zentrum unserer Galaxie bis hin zu Planeten außerhalb des Sonnensystems.“

Auf diese Weise erhielten die Astronomen zum ersten Mal Auskunft sowohl über die Masse als auch über die intrinsische Helligkeit eines Exoplaneten. Die Masse ergab sich dabei aus den Messungen der Radialgeschwindigkeit, kombiniert mit ausgewählten Informationen aus der direkten Abbildung. Die intrinsische Helligkeit ergab sich durch direkte Messung aus den Bilddaten.

Hausaufgaben für alle, die Planetenentstehung erforschen

Die Ergebnisse der Helligkeitsmessung waren dabei eher überraschend. Im Vergleich zu β Pictoris b leuchtet der Planet β Pictoris c eher schwach. Beide Planeten haben etwa die gleiche Masse (Werte von 6 bis 15 Jupitermassen für b und 8 Jupitermassen für c), aber b leuchtet sechs Mal heller als c!

Im Allgemeinen erwarten Astronomen, dass Riesenplaneten wie β Pictoris b und c dann heller sind, wenn sie auch mehr Masse besitzen. Der genaue Zusammenhang zwischen Helligkeit und Masse hängt dabei davon ab, wie Planeten überhaupt entstehen. Riesenplaneten besitzen wahrscheinlich einen festen Kern, umgeben von einer dichten Gasschicht. Derzeit gibt es zwei konkurrierende Klassen von Modellen für ihre Entstehung: Die "Scheibeninstabilitätsmodelle" (die nicht zu einem solchen festen Kern führen) gehen davon aus, dass Riesenplaneten direkt aus der ursprünglichen Scheibe aus Gas und Staub entstanden sind, die den jungen Stern umgab – in einem Rutsch. Die "Kern-Akkretionsmodelle" dagegen gehen davon aus, dass sich zunächst ein Planetenkern aus festem Material in der anfänglichen Scheibe gebildet hat. Dieser Kern fing später das gesamte Gas ein, das zur Bildung der ausgedehnten Atmosphäre eines Gasriesen benötigt wird.

Die beiden konkurrierenden Modelle treffen dabei unterschiedliche Vorhersagen für das Verhältnis zwischen der Masse und der intrinsischen Helligkeit der Gasriesen. Insbesondere die klassischen Scheibeninstabilitätsmodelle führen bei gegebener Masse zu heißeren, helleren Planeten.

In diesem Zusammenhang können kombinierte Messungen der Masse und Helligkeit von Exoplaneten wichtige Hinweise liefern – anhand solcher Daten können Astronom*innen die Vorhersagen der Planetenentstehungsmodelle auf die Probe stellen.

Derzeit ist allerdings nur die Massenschätzung für β Pictoris c zuverlässig. Sie deutet auf einen heißen Ursprung des Planeten hin, aber kühler als es den Scheibeninstabilitätsmodellen nach zu erwarten wäre. Der Planet ist auch etwas heißer, als es die klassischen Kernakkretions-Modelle vorhersagen – allerdings gibt es neuere Versionen jener Modelle, die eine solche heißere Entwicklung zulassen würden. Davon abgesehen ist die derzeitige Umlaufbahn von β Pictoris c viel zu nahe an seinem Stern, als dass der Planet in jener Entfernung durch Scheibeninstabilität entstanden sein könnte. Falls doch, müsste der Planet nach seiner Entstehung deutlich nach innen gewandert sein – eine weitere Komplikation. Zusammengenommen favorisieren die Forscher*innen daher die Kernakkretion als Entstehungsmechanismus für β Pictoris c.

Paul Mollière, Postdoktorand am Max-Planck-Institut für Astronomie und Koautor des Fachartikels, in dem die neuen Ergebnisse jetzt veröffentlicht werden, sagt: "Bereits aus früheren Messungen, bei denen wir mit GRAVITY für andere Exoplaneten Spektren bestimmt haben, konnten wir Rückschlüsse auf die Entstehungsprozesse der Planeten ziehen. Aber diese Kombination aus Helligkeitsmessung und Massenbestimmung für β Pictoris c ist ein besonders wichtiger Schritt, um die Modelle der Planetenentstehung auf die Probe zu stellen."

Nächste Schritte

Als nächstes wollen die Astronom*innen ihre Aufmerksamkeit auf β Pictoris b lenken. Wenn zukünftige Beobachtungen, die sowohl die Position des Planeten als auch die Radialgeschwindigkeit des Sterns über einen längeren Zeitraum verfolgen, zu einer zuverlässigen Massenschätzung für diesen Planeten führen, werden die Astronomen einen zusätzlichen Datenpunkt haben, um Planetenentstehungsmodelle zu testen.

Alles in allem wird erwartet, dass Planeten, bei denen sowohl die Masse als auch die intrinsische Helligkeit gemessen werden kann, selten bleiben werden. Immerhin hat das ExoGRAVITY-Team noch einen weiteren Kandidaten in einem anderen Planetensystem ins Auge gefasst, der sich für diese Art von kombinierter Messung eignen könnte.

Parallel dazu arbeitet das Team an einer anderen interessanten Art von Messung: GRAVITY ermöglicht auch die Messung eines Spektrums eines Exoplaneten, also die Aufspaltung des vom Planeten empfangenen Lichts in verschiedene Wellenlängen. Solche Spektren enthalten Informationen über die Zusammensetzung der Atmosphäre der betreffenden Planeten. Für β Pictoris c hat GRAVITY bereits Spektren aufgenommen, die derzeit ausgewertet werden – und die für die Astronom*innen etwas ganz Besonderes sind: Es handelt sich um den bisher einzigen Fall, in dem es gelungen ist, ein Spektrum für einen Planeten in einer Jupiter-ähnlichen Umlaufbahn innerhalb seines Systems aufzunehmen. Andere direkt abgebildete Planeten sind viel weiter von ihrem Stern entfernt als β Pictoris c, während Spektren, die während Planetentransits aufgenommen werden, von Planeten stammen, die ihrem Stern deutlich näher sind.

wissenschaftliche Ansprechpartner:

Dr. Paul Mollière

E-Mail: molliere@mpia.de

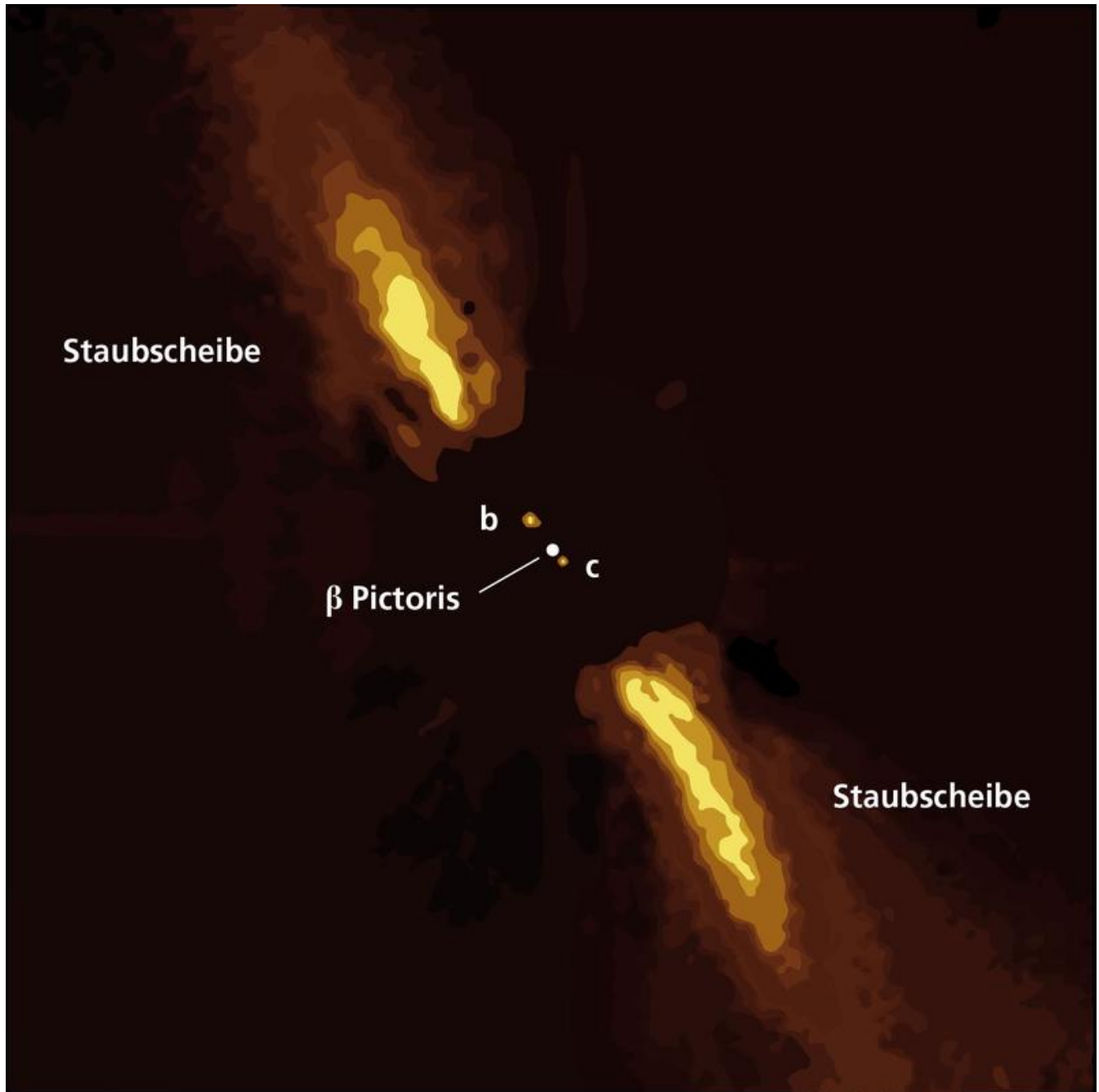
Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

Originalpublikation:

Die hier beschriebene Arbeit wurde als M. Nowak et al. 2020, "Direct confirmation of the radial-velocity planet β Pic c" in der Zeitschrift *Astronomy and Astrophysics* veröffentlicht.

<https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/202039039>

URL zur Pressemitteilung: <http://www.mpia.de/aktuelles/wissenschaft/2020-15-beta-pictoris> - Online-Version der Pressemitteilung, mit hochaufgelöstem Bildmaterial



Künstlerische Darstellung des Sterns β Pictoris und der zwei in die staubige Scheibe eingebetteten Planeten, basierend auf früheren Beobachtungen

GRAVITY Collaboration / Axel M. Quetz, MPIA-Graphikabteilung