



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Ingredients of the planet-formation puzzle: Gas substructures and kinematics in transition discs

Wölfer, L.B.

Citation

Wölfer, L. B. (2023, March 28). *Ingredients of the planet-formation puzzle: Gas substructures and kinematics in transition discs*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3589823>

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/1887/3589823>

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

Ihr Lichter, die ich nicht auf Erden satt kann schauen
Ihr Fackeln, die ihr stets das weite Firmament
Mit euren Flammen ziert, und ohn Aufhören brennt
Ihr Blumen, die ihr schmückt des großen Himmels Auen

Andreas Gryphius, An die Sterne

Deutsche Zusammenfassung

Seit den frühesten Anfängen ihrer Geschichte hat die Menschheit in den mit Sternen übersäten Nachthimmel geblickt und sich gefragt, wie diese wohl entstanden sind. Fragen wie die nach dem Ursprung der Erde oder ihrem Platz im Universum haben die Menschen dabei durch alle Jahrhunderte hinweg begleitet und schließlich zu der Entwicklung von Teleskopen geführt, die weit über das menschliche Auge hinausreichen. Diese Instrumente werden stetig verbessert und ermöglichen es den Wissenschaftler*innen alle Winkel des Kosmos immer genauer zu erforschen. Dabei bringen sie uns der Beantwortung derselben Fragen näher, die wir uns schon vor langer Zeit gestellt haben.

Eine besonders interessante Frage ist die nach dem Ursprung des Lebens. Bis heute kennen wir nur einen einzigen Ort im Universum, an dem Leben mit Sicherheit möglich ist: die Erde. Vor etwa 30 Jahren leitete die Entdeckung des ersten Planeten, der einen anderen Stern als unsere Sonne umkreist – eines Exoplaneten – jedoch eine neue Ära in der Astronomie ein und ließ die Möglichkeit von Leben auf anderen Welten zur Realität werden. Inzwischen sind mehr als 5000 Exoplaneten bekannt, eine Zahl, die täglich wächst, und die Statistik sagt uns, dass im Durchschnitt jeder Stern von mindestens einem Planeten umkreist wird. Planeten mögen zwar häufige Bewohner des Kosmos sein, dabei stellen sie jedoch keinesfalls eine homogene Gruppe dar. Vielmehr weisen sie eine große Vielfalt auf, sowohl in Bezug auf ihre Masse und Größe und die ihrer Heimatsterne, als auch in Bezug auf die Anzahl, Art oder Verteilung der Planeten im jeweiligen Sternsystem.

Um eine solche Vielfalt zu erklären - und letztlich die Frage zu beantworten, ob Leben auf anderen Planeten möglich ist - müssen wir zunächst verstehen, wie sich Planeten bilden und welche physikalischen sowie chemischen Prozesse dabei eine Rolle spielen. Dazu ist es sinnvoll die Orte zu betrachten, an denen Planeten geboren werden. Sie befinden sich im staub- und gasförmigen Material, das neugeborenen Sterne umgibt und werden auch protoplanetare oder planetenbildende Scheiben genannt. Diese Scheiben verändern sich im Laufe der Zeit, wobei die dort stattfindenden Mechanismen sowohl die Struktur der Scheibe als auch die Planetenbildung beeinflussen. Gleichzeitig interagieren auch die sich formenden Planeten mit ihrer Umgebung, während sie von winzigen Körnern zu Kieselsteinen, Planetesimalen und schließlich zu Gesteinsplaneten und Kernen von Gasriesen heranwachsen. Dabei verändern sie ebenfalls die Struktur der Scheibe und beein-



Abbildung 1: Aufnahme der sogenannten Säulen der Schöpfung, ein Sternentstehungsgebiet im Adler Nebel. Aufgenommen mit dem James Webb Space Telescope. Credits: NASA, ESA, CSA und STScI.

flussen wiederum deren Entwicklungsprozesse.

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Interpretation von Strukturen in protoplanetaren Scheiben im Kontext von Scheibenwinden und Wechselwirkungen zwischen Planeten und Scheiben. Die Modellierung der dynamischen Prozesse und Charakterisierung der beobachteten Strukturen in protoplanetaren Scheiben stellt dabei ein wichtiges Puzzleteil der Planetenentstehung dar. Diese Arbeit trägt dazu bei zu verstehen, mit welcher Häufigkeit Substrukturen auftreten und ob sie dabei bestimmten Mustern folgen.

Junge Sternsysteme

Sterne entstehen in riesigen, langsam rotierenden Molekülwolken, welche große Ansammlungen von interstellarem Material darstellen, das überwiegend aus molekularem Gas und einigen kleinen Staubeilchen zusammengesetzt ist. Ein Beispiel für eine solche Sternentstehungsregion ist in Abb. 1 dargestellt. Unter bestimmten Bedingungen können die dichtesten und kältesten Regionen der Wolke (Wolkenkerne) unter ihrer eigenen Gravitation kollabieren. Die dabei ansteigende Dichte und Temperatur im Zentrum führen zu der Bildung eines jungen Protosterns. Außerdem verteilt sich aufgrund der Drehimpulserhaltung das Material mit dem größten Drehimpuls (welches den neu geformten Stern wieder zerreißen würde) in eine zirkumstellare Akkretionsscheibe, die den Stern in den ersten paar Millionen Jahren seiner Lebenszeit mit Nahrung versorgt.

Die Entwicklung junger stellarer Objekte ist in Abb. 2 dargestellt. Im An-

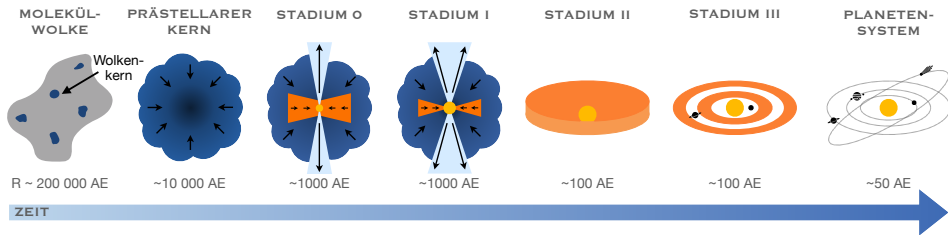


Abbildung 2: Schematische Übersicht der verschiedenen Stadien der Sternentstehung. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf Objekten des Stadiums II, die auch als protoplanetare Scheiben bezeichnet werden. Eine astronomische Einheit, hier AE, entspricht der durchschnittlichen Entfernung zwischen Erde und Sonne.

schluss an den Kollaps eines Molekülwolkenkerns und die Bildung eines prästellaren Kerns kollabiert dieser weiter zu einem Protostern, welcher von einer nach innen fallenden Hülle umgeben ist. Bereits zu diesem Zeitpunkt bildet sich eine - jedoch tief eingebettete - Scheibe um den Protostern (Stadium 0 und I). Akkretion und Ausströmungen führen in diesen Stadien dazu, dass sich die Hülle innerhalb von 100.000 bis einer Millionen Jahren auflöst. Es bleibt ein Stern übrig, der von einer gasreichen protoplanetaren Scheibe umgeben ist, die nun direkt beobachtet werden kann (Stadium II). Im Laufe von weiteren eine Millionen bis zehn Millionen Jahren wird das meiste Material der Scheibe entweder zerstreut oder zu Planeten und Kleinkörpern zusammengesetzt, der Stern bleibt mit einer gasarmen Trümmerscheibe zurück (Stadium III). Schlussendlich löst sich die Scheibe vollständig auf und ein neues Planetensystem, wie unser Sonnensystem eines ist, ist geboren. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Systemen des Stadiums II und ihren Gasstrukturen, welche mit dem Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) direkt beobachtet werden können.

Entwicklung von Scheiben

Damit sich eine zirkumstellare Scheibe entwickelt, muss Drehimpuls entweder gänzlich aus dem System verloren gehen oder sich neu in der Scheibe verteilen. Andernfalls würden die Teilchen den Stern bis in alle Zeit auf dem gleichen Orbit umkreisen. In diesem Zusammenhang wurden zwei, sich nicht ausschließende Mechanismen vorgeschlagen, hauptsächlich verantwortlich zu sein für die Verringerung des Drehimpulses und die Steuerung der Scheibenentwicklung: Scheibenwinde und Viskosität. In einer sich viskos entwickelnden Scheibe wird der Drehimpuls dadurch umverteilt, dass Reibung zwischen den Gasteilchen dazu führt, dass sich ein Teilchen nach innen bewegt, Drehimpuls an das andere Teilchen abgibt, welches sich infolgedessen nach außen bewegt. Die genaue Ursache der Viskosität ist nach wie vor Gegenstand aktiver Forschung, jedoch werden häufig Turbulenzen angenommen, um eine viskose Entwicklung zu erklären. Auf der anderen Seite bieten Winde, die die Scheibe verlassen, eine Möglichkeit ihr Drehimpuls zu entziehen, ohne dass sie dabei turbulent sein muss. Unter dem Einfluss eines Magnetfeldes

können Winde von der Scheibenoberfläche ausgehen, welche Drehimpuls mit sich tragen. Als Konsequenz muss das verbleibende Material Drehimpuls verlieren und bewegt sich folglich in Richtung des Sternes, wo es schließlich akkretiert werden kann.

Das einfache Konzept der viskosen Entwicklung sagt das Auflösen der Scheibe als lang anhaltenden Prozess voraus, bei dem die Scheibe kontinuierlich und homogen verblasst und schließlich verschwindet. Da jedoch keine Nachweise für solche sich langsam zerstreuenden Scheiben existieren, ist ein alternativer Mechanismus erforderlich, der in späteren Stadien zu einem schnellen Auflösen führt. In dieser Hinsicht könnte die sogenannte Photoevaporation - die Verdampfung durch Licht - eine wichtige Rolle spielen. Photoevaporation beschreibt einen Prozess, bei dem hochenergetische, stellare Photonen die oberen Schichten der Scheibe auf Energien aufheizen, welche die gravitative Bindungsenergie überschreiten und einen photoevaporativen Wind auslösen. Für einen Großteil ihrer Lebensdauer wird die Entwicklung der Scheibe durch Viskosität bestimmt, der Massenverlust durch Photoevaporation bleibt vernachlässigbar. Wenn allerdings mit der Zeit die Akkretion auf den Stern und die Oberflächendichte der Scheibe abnehmen, können die Photonen in immer tiefere Schichten der Scheibe eindringen. Sobald die Akkretionsrate unter die Rate des durch den Wind verursachten Massenverlustes sinkt, beginnt die Photoevaporation die Scheibenentwicklung zu dominieren. Nach innen strömende Teilchen werden nun mit dem Wind davongetragen anstatt akkretiert zu werden. Es bildet sich eine ringförmige Lücke, welche die inneren und äußeren Regionen voneinander trennt. Ohne Materienachschub aus der äußeren Scheibe wird die innere Scheibe in kurzer Zeit auf den Stern akkretiert und die äußere Scheibe, die nun direkt beleuchtet wird, erfährt eine schnelle, von innen nach außen gerichtete Auflösung.

Im Zusammenhang mit Lücken oder gar Löchern in protoplanetaren Scheiben ist der Begriff „Übergangsscheibe“ von besonderer Bedeutung. Übergangsscheiben zeichnen sich durch innere staub- und möglicherweise gasfreie Regionen aus. Sie wurden erstmals durch Beobachtungen junger stellarer Objekte identifiziert, deren spektrale Energieverteilung keinen Infrarotüberschuss aufwies. Da Übergangsscheiben eine natürliche Folge der Photoevaporation darstellen, wurde zunächst angenommen, dass sie kurz davor stehen sich aufzulösen und eine Übergangsphase zwischen einer gasreichen und einer Trümmerscheibe darstellen. Beobachtungen haben jedoch gezeigt, dass es sich bei den Übergangsscheiben um eine vielfältige Gruppe von Objekten handelt, die durch verschiedene Strukturen gekennzeichnet ist. Dies lässt auf unterschiedliche Entstehungsmechanismen schließen. Insbesondere jene Scheiben, die große Löcher und gleichzeitig eine starke stellare Akkretion aufweisen lassen sich kaum allein durch Photoevaporation erklären. Hier bieten Wechselwirkungen zwischen Planeten und der Scheibe eine alternative Erklärung. Es ist zu erwarten, dass zumindest einige der beobachteten Löcher eher das Ergebnis solcher dynamischen Prozesse sind, als dass sie einen evolutionären Zustand darstellen. Übergangsscheiben bieten uns großartige Laboratorien um die Scheibenentwicklung und Planetenentstehung zu untersuchen und letztere womöglich sogar in Aktion zu beobachten. In dieser Dissertation wird daher ein besonderer Schwerpunkt auf diese faszinierende Klasse von Objekten gelegt.

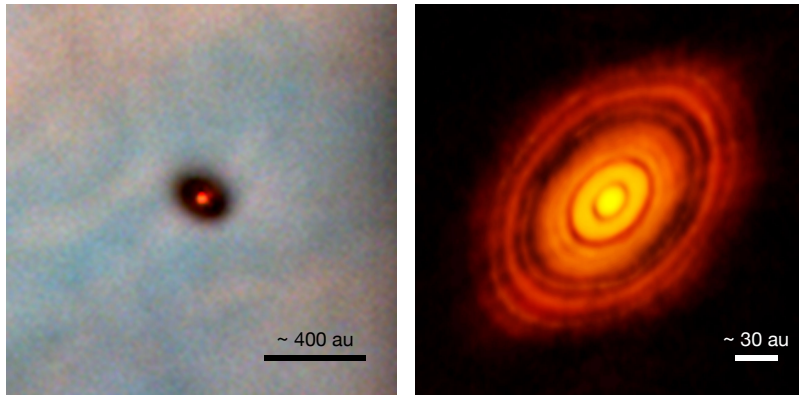


Abbildung 3: Links: Optische Aufnahme einer protoplanetaren Scheibe im Orion Nebel, beobachtet mit dem Hubble Space Telescope. Credit: Mark McCaughrean (MPIA), C. Robert O'Dell (Rice University) und NASA/ESA. Rechts: ALMA Aufnahme der HL Tau Scheibe im Millimeter-Wellenlängenbereich. Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

Beobachtungen von Scheiben

Bis noch vor einem Jahrzehnt konnte das zirkumstellare Material aufgrund der mangelnden Auflösung der früheren Teleskope nicht im Detail aufgenommen werden. Beobachtungen zeigten flache und homogene Strukturen, die symmetrisch um den Zentralstern angeordnet zu sein schienen. Erst mit der Entwicklung von ALMA oder dem Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch (SPHERE) am Very Large Telescope (VLT) der ESO konnten erstaunliche Substrukturen eingefangen werden (vgl. Abb. 3).

Der Millimeter-Wellenlängenbereich eignet sich besonders gut für die Untersuchung protoplanetarer Scheiben, da das kalte molekulare Gas vorwiegend bei diesen Wellenlängen emittiert und die Staubverteilung von millimetergroßen Teilchen dominiert wird. Das beste Instrument für die Beobachtung von Emissionen im Millimeterbereich stellt dabei das ALMA Teleskop dar, welches sowohl die Sensitivität als auch die spektrale und räumliche Auflösung bietet, die für eine detaillierte Untersuchung einzelner Scheiben erforderlich ist. Gleichzeitig ermöglicht es außerdem die Durchführung großer Populationsstudien. Insgesamt haben die bisherigen Beobachtungen gezeigt, dass protoplanetare Scheiben durch eine enorme Vielfalt an Substrukturen gekennzeichnet sind, darunter Lücken oder Löcher, Ringe, Spiralarme und azimuthale Asymmetrien. Der Schwerpunkt dieser Dissertation liegt auf dem Gasmaterial der Scheibe. Dies bietet den Vorteil, dass die Beobachtungen zusätzlich Informationen über die Dynamik - oder auch Kinematik - der Scheibe enthalten: Je nachdem, ob sich das rotierende Gas von uns weg oder auf uns zu bewegt, ist die Moleküllinienemission rot- oder blauverschoben.

Die Kinematik von Scheiben

Um eine Verbindung zwischen den beobachteten Strukturen und sich bildenden Planeten nachzuweisen, ist es schlussendlich notwendig diese noch eingebetteten Planeten direkt zu beobachten. Aufgrund der dichten und undurchsichtigen Umgebung junger Planeten stellt sich eine solche Aufgabe jedoch als große Herausforderung dar. Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass die Entdeckung solcher jungen Planeten im PDS 70 System die bisher einzige robuste Beobachtung darstellt. Aus diesem Grund wurden andere, indirekte Nachweismethoden entwickelt, von denen eine besonders vielversprechende die der Untersuchung der Geschwindigkeit des rotierenden Gases ist, die über Moleküllinienbeobachtungen zugänglich gemacht werden kann. Dabei können Abweichungen von der Keplerschen Geschwindigkeit genutzt werden, um zu verstehen, welche Prozesse die Scheibe beeinflussen, da diese alle einen individuellen Fingerabdruck in der Kinematik hinterlassen. Besonders spannend sind kinematischen Signaturen, welche durch die Wechselwirkungen zwischen Planeten und der Scheibe hervorgerufen werden, wobei die Amplitude und die Morphologie dieser Störungen von der Position und der Masse des Planeten, aber auch von der Scheibenstruktur selbst abhängen. Obwohl bereits verschiedene Beobachtungen kinematischer Abweichungen, wie z.B. Spiralen, meridionale Strömungen oder sogenannte „Knickmerkmale“, mit der Anwesenheit von Planeten in Verbindung gebracht wurden, stellt es sich nach wie vor als schwierig dar, diese von anderen zugrunde liegenden Mechanismen zu unterscheiden. Um die individuellen Beiträge dieser Prozesse besser zu verstehen, sind sowohl gezielte Modelle als auch äußerst empfindliche Beobachtungen erforderlich, die eine hohe spektrale und räumliche Auflösung aufweisen. Solche Beobachtungen sind mit einem großen Zeitaufwand verbunden und daher ist die Scheibenkinematik bisher nur für wenige Objekte detailliert analysiert worden. Das Forschungsfeld der Kinematik protoplanetarer Scheiben steckt somit noch in den Kinderschuhen, bietet jedoch die Möglichkeit junge, sich noch bildende Planeten zu entdecken, welche den klassischen Nachweismethoden entgehen. Die Eigenschaften dieser Planeten haben wichtige Auswirkungen auf die Modelle der Planetenentstehung und der Planetenmigration sowie auf die Zeitskalen, innerhalb welcher diese Prozesse stattfinden können. Ihre Charakterisierung trägt dazu bei, junge Planeten in Verbindung zu den vielfältigen, voll geformten Exoplanetenpopulationen zu setzen.

Diese Dissertation

In der vorliegenden Arbeit wird das gasförmige Material protoplanetarer Scheiben und dessen Struktur im Zusammenhang mit Scheibenwinden und Wechselwirkungen zwischen Planeten und Scheiben untersucht. Die Vielfalt der beobachteten Strukturen, zusammen mit dem Fehlen eines direkten Nachweises vom Planeten in den Scheiben, hat folgenden Fragen aufgeworfen, welche in dieser Dissertation behandelt werden.

1. Sind die vielfältigen beobachteten Strukturen in protoplanetaren Scheiben das Ergebnis von Planet-Scheibe-Wechselwirkungen oder anderen Mechanismen?
2. Falls sie durch Planeten verursacht werden, was können wir dann über diese lernen, z.B. über ihre Masse oder ihren Orbit. Und falls sie nicht durch Planeten entstanden sind, was können wir dann über die Scheibe lernen?
3. Wodurch wird der Transport des Drehimpulses in der Scheibe sowie ihre Auflösung bestimmt, was sich wiederum auf ihre Lebensdauer und damit auf die mögliche Zeitspanne für die Bildung von Planeten auswirkt?

In den folgenden Abschnitten wird eine kurze Zusammenfassung der individuellen Kapitel und ihrer wichtigsten Ergebnisse gegeben.

Im zweiten Kapitel werden die Auswirkungen von Photoevaporation durch Röntgenstrahlen auf protoplanetare Scheiben untersucht, in denen die Menge an gasförmigem Kohlenstoff reduziert ist, eine Eigenschaft, die regelmäßig beobachtet wurde. Da gasförmiger Kohlenstoff einen großen Teil der Opazität gegenüber Röntgenstrahlung ausmacht, ist zu erwarten, dass eine Verringerung zu einer größeren Eindringtiefe der Photonen führt. Es wird untersucht, wie dies die Stärke des photoevaporativen Massenverlustes sowie die Ausbildung von Löchern beeinflusst. Zu diesem Zweck werden Rechnungen des Strahlungstransfers mit hydrodynamischen Simulationen verknüpft, bei denen die Scheibe interner Röntgen- und UV-Strahlung ausgesetzt ist, wobei verschiedene Abstufungen von reduziertem Kohlenstoff angenommen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Vergleich zu Scheiben solarer Metallizität stärkere photoevaporative Winde in Scheiben mit verringertem Kohlenstoffgehalt ausbilden. Dies führt zu einem gesteigerten Massenverlust und Massenverlustprofilen, die bis zu größeren Radien reichen. Diese Ergebnisse können möglicherweise einen größeren Teil der beobachteten Übergangsscheiben erklären. Darüber hinaus könnte ein sehr hoher Grad an Kohlenstoffverringerung ein Mechanismus für eine sehr schnelle Auflösung der Scheibe gegen Ende ihrer Lebensdauer darstellen.

Kapitel 3 präsentiert hochauflösende Beobachtung der zirkumstellaren Scheibe im CQ Tau System, aufgenommen im Band 6 mit dem ALMA Teleskop. Drei CO-Isotopologe ^{12}CO , ^{13}CO und C^{18}O werden sowohl im Hinblick auf ihre Kinematik als auch auf ihre Helligkeitstemperaturen analysiert. Die Rotationsgeschwindigkeit wird mithilfe eines Keplerschen Scheibenmodells modelliert und es wird nach Abweichungen von der Keplerschen Rotation sowie nach Variationen in der Temperaturstruktur gesucht. Nachdem das Modell von den Daten subtrahiert wurde, ergeben sich signifikante spiralförmige Muster sowohl in der Geschwindigkeit als auch in der Helligkeitstemperatur des Gases. Die Geschwindigkeits- und Temperaturspiralen sind teilweise überlappend, was auf einen gemeinsamen Ursprung hindeutet. Die Morphologie, Anzahl und der Öffnungswinkel der Spiralen sprechen für ein dynamisches Entstehungsszenario. Zusammen mit den im nahen Infrarot beobachteten Spiralen und einem beobachteten, großen Gas- und Staubloch deuten sie auf einen massereichen Körper wie einen Planeten oder einen stellaren Begleiter hin, der sich innerhalb von etwa 25 AE befindet.

In Kapitel 4 wird die im vorigen Kapitel durchgeführte Analyse der Gaskinematik und der Helligkeitstemperaturen auf 36 Übergangsscheiben ausgedehnt, welche große innere Hohlräume aufweisen. Dabei werden die Möglichkeiten der verfügbaren ALMA-Beobachtungen an ihre Grenzen gebracht. Für die Analyse werden archivierte CO-Daten verwendet, die in verschiedenen ALMA-Zyklen im Band 6 und Band 7 aufgenommen wurden. Zum ersten Mal werden die in den Residuen der Kinematik und der Helligkeitstemperatur gefundenen Substrukturen mit anderen Indikatoren für das Vorhandensein von Planeten für eine große Anzahl an Objekten verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass signifikante Merkmale wie Bögen oder Spiralen, die möglicherweise mit der Anwesenheit von Planeten oder stellaren Begleitern in Zusammenhang stehen, in etwa 20 % der Scheiben vorhanden sind, während die Mehrheit der Objekte keine eindeutigen Strukturen aufweist. Fast alle Scheiben, die im nahen Infrarot Spiralen aufweisen, zeigen zumindest ansatzweise Merkmale in den CO-Daten.

Kapitel 5 präsentiert eine Studie mehrerer Emissionslinien, welche in der Scheibe um den Herbig-Stern HD 100546 beobachtet wurden. Mit Hinblick auf Planet-Scheibe-Wechselwirkungen handelt es sich dabei um ein besonders interessantes Beobachtungsobjekt. Es werden mehrere CO-Linien analysiert, welche mit einer hohen spektralen und räumlichen Auflösung mit dem ALMA Teleskop in den Bändern 6, 7 und 10 beobachtet wurden. Um die Linienemission für jeden Geschwindigkeitsdatensatz (genannt Channel) zu modellieren, wird eine sogenannte Channel-Map-Fitting Software verwendet. Die Analyse zeigt ausgedehnte spiralförmige Strukturen in den kinematischen Residuen aller Linien auf, deren globale Morphologie durch lineare und logarithmische Funktionen gut wiedergegeben werden kann. Diese Spiralen stimmen mit solchen überein, welche durch einen eingebetteten Planeten oder stellaren Begleiter erzeugt werden können, der sich innerhalb von etwa 50 AE befindet. Es finden sich außerdem Hinweise auf einen zweiten Begleiter, der sich weiter außen zwischen 90–150 AE befindet: Meridionale Strömungen in Richtung der Mittelebene der Scheibe und Druckminima sowie eine mögliche Lücke in den optisch dünneren Moleküllinien sind in dieser Region zu erkennen. Weiterhin findet sich eine Asymmetrie in den Emissionshöhen der blau- und rotverschobenen Seiten. Dies könnte auf einfallendes Material auf der rotverschobenen Seite der Scheibe oder auf eine verdrehte innere Scheibe, welche einen Schatten auf die äußere Scheibe wirft, hinweisen.

Ausblick

Aufgrund von ALMA wurde unsere Sicht auf planetenbildende Scheiben verändert und eine Fülle von Substrukturen enthüllt. Dabei haben Wissenschaftler*innen gerade erst damit begonnen, die verschiedenen Mechanismen, welche die Scheibe beeinflussen, zu entschlüsseln: Der Ursprung der Substrukturen stellt nach wie vor eine der wichtigsten offenen Frage dar. Gleichzeitig eröffnen sich nun neue und aufregende Möglichkeiten für Beobachtungen mit ALMA und JWST, welche eine Empfindlichkeit und Auflösung bieten, die alle bisherigen Beobachtungen übertrifft.

ALMA-Beobachtungen von Molekülgasemissionen bieten den Vorteil, dass der Gasfluss durch die Scheibe kartiert werden kann. Bei ausreichender Empfindlichkeit und Auflösung eröffnet dies eine einzigartige neue Möglichkeit Planeten in der Scheibe zu entdecken und physikalische Prozesse zu untersuchen. Das Gebiet der Scheibenkinematik ist dabei erst kürzlich entstanden. Tief reichende Linienbeobachtungen werden es uns in Zukunft ermöglichen, auch Planeten mit kleineren Massen, welche sich auf engeren Orbits um ihren Stern drehen, zu entdecken.

Schlussendlich ist es das Ziel, die Eigenschaften von Scheiben und ihren jungen Planeten in den Kontext derer der äußerst vielfältigen Populationen fertig geformter Exoplaneten zu setzen. Dazu sind systematische und umfassende Beobachtungen einer großen Anzahl von Scheiben erforderlich, welche in Ergänzung zu den massereichen und hellen Scheiben, die normalerweise im Detail untersucht werden, auch kleineren Scheiben enthalten, von denen man im Allgemeinen annimmt, dass sie weniger strukturiert sind. Dies stellt einen wesentlichen Schritt dar, um zu verstehen, ob es systematische Unterschiede zwischen diesen Gruppen gibt und ob insbesondere Herbig-Ae/Be- und T-Tauri-Scheiben verschiedenen Mustern folgen. Kinematische Studien haben sich bisher hauptsächlich auf die helleren CO-Linien konzentriert. Um jedoch die Mechanismen hinter den beobachteten Substrukturen wirklich zu entschlüsseln, ist es entscheidend, sie über die gesamte radiale und vertikale Ausdehnung der Scheibe zu untersuchen. Dies erfordert die Beobachtung vieler verschiedener Moleküle, was wiederum auch die Möglichkeit bietet, die chemischen Eigenschaften der sich bildenden Planeten zu verstehen.

Um die Beobachtungen zu interpretieren ist auch auf der theoretischen Seite grundlegende Forschung erforderlich: Gezielte Modellierungsansätze sind nötig, um zu verstehen, welche Spuren die Wechselwirkungen zwischen Planeten und Scheiben, aber auch andere Mechanismen wie Scheibenwinde oder gravitative Instabilitäten, in der Kinematik oder der Temperaturstruktur hinterlassen. Dies ist von entscheidender Bedeutung, um zu verstehen, welche Rolle die einzelnen Prozesse im sogenannten Puzzle der Planetenbildung spielen. Weiterhin kann so besser beurteilt werden, welche Objekte sich am besten für direkte Beobachtungen mit JWST und dem zukünftigen Extremely Large Telescope (ELT) eignen. Zusammen mit ALMA ermöglichen es diese bahnbrechenden Einrichtungen, die bisher nicht vollständig verstandene Verbindung der Strukturen in den inneren und äußeren Scheibenregionen zu erforschen. Sie ebnen den Weg für eine umfassende Charakterisierung der jüngsten Exoplaneten.

