

## 6. Aurora Sicilia-Aguilar: Die Bildung von Sternen und Planeten

### WAS ZEITMESSUNGEN ÜBER DEN RAUM SAGEN

Viele Abläufe der Planeten- und Sternentstehung finden auf Längenskalen statt, die selbst mit den leistungsstärksten Teleskopen nicht direkt messbar sind. Mit neuartigen Ansätzen und verhältnismäßig kleinen Teleskopen, die aber über längere Zeitabschnitte operieren, kann man die zeitlichen Änderungen von Messungen in räumliche Eigenschaften übersetzen. Dies erlaubt es, die Oberfläche von Sternen sowie Regionen erdähnlicher Planeten zu erkunden.

#### Wie groß sind neugeborene Sonnensysteme?

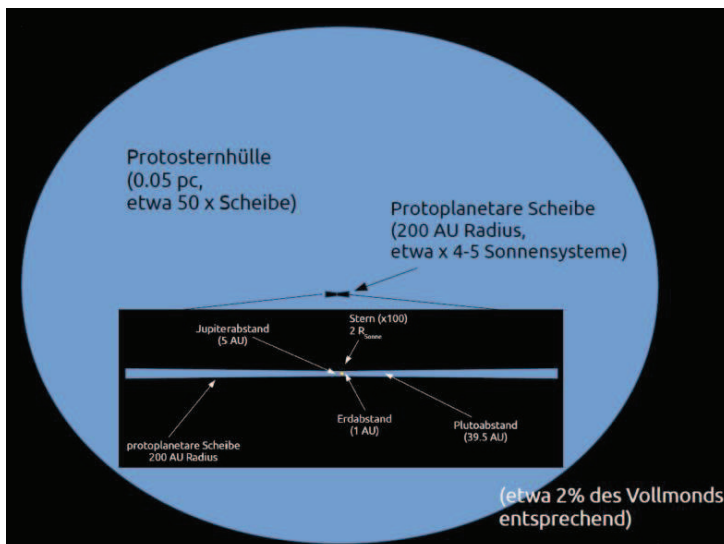


Abb. 1: Protostern (maßstabgetreu). Der blaue Bereich ist die Hülle. Die protoplanetarischescheibe mit einem Babysonnensystem liegt in der kleinen schwarzen Struktur in der Mitte. Für die nächstgelegenen Protosterne entspricht der gesamte gezeigte Bereich etwa 2% des scheinbaren Vollmonddurchmessers.

Ein neugeborenes Sonnensystem nennt man einen Protostern, und es besteht aus dem eigentlichen Stern sowie einer ihn umgebenden Hülle aus Gas und Staub, die sich wegen der Erhaltung des Drehimpulses in der Nähe des Sterns zu einer Scheibe verdichtet (Abb. 1). Aus dieser Scheibe, der protoplanetarischescheibe, entsteht in ein paar Millionen Jahren ein paar Planetensystem. Solche Scheiben sind sehr groß, normalerweise etwa 4 oder 5 mal größer als unser Sonnensystem, das bereits in seinem mittleren Alter ist, und die Hülle ist sogar bis 100 mal größer. Aber da sogar die näheren Babysonnensysteme 300 Lichtjahre entfernt sind, sind sie so klein, dass selbst die größten Teleskope sie nicht auflösen

können (Abb. 1). Eine protoplanetare Scheibe hat von der Erde gesehen eine ähnliche Größe wie ein Krater mit einem Durchmesser von 100 m auf dem Mond. Die Bahn eines erdähnlichen Planeten entspräche der Größe eines Rettungsrings in der Mitte des Kraters und der junge Stern einer 2-3 cm großen Murmel.

#### Farbe, Temperatur, Spektrum und Dopplerverschiebung

Die Auflösung der großen Teleskope, die es zur Zeit gibt (zum Beispiel das ALMA Interferometer in Atacama, Chile<sup>9</sup>), erlaubt es, Strukturen von etwa fünf Astronomischen Einheiten (AU, der mittlere Abstand Sonne-Erde) in den näheren Protosternen zu erkennen. Das ist etwa der Abstand zwischen

9 <http://www.almaobservatory.org/en/home/>

der Sonne und Jupiter und somit völlig ungenügend, um die Details jeglicher kleinerer Struktur abzubilden. Für letzteres brauchen wir folglich andere Methoden.

Jeder Körper sendet Licht aus, dessen Farbe (Wellenlänge) von der Temperatur des Körpers definiert ist. Messen wir dieses Licht, können wir die Existenz von Strukturen mit unterschiedlichen Temperaturen beweisen, auch wenn diese zu klein für die direkte Auflösung sind. Auf diese Art lässt sich zum Beispiel die warme, sogenannte „bewohnbare“ Zone getrennt von den kalten Regionen, in der Eisplaneten entstehen, untersuchen.

Atome und Moleküle senden auch direkt Licht aus, dessen farbliche Zusammensetzung, das Spektrum, uns erlaubt, einem Strichcode gleich das Atom oder Molekül und seine Temperatur eindeutig zu bestimmen. Indem wir das vom Protostern erhaltene Licht nach diesen Spektren analysieren, erhalten wir somit Aufschluss über die chemische Zusammensetzung. Diese kombinieren wir dann mit der Temperaturinformation und den unten beschriebenen Geschwindigkeiten, um räumliche und chemische Strukturen auf Skalen weit unter 1 AU (teilweise bis zu einem Sonnenradius hin) zu bestimmen.

Der Dopplereffekt erlaubt es uns, auch Geschwindigkeiten aus den atomaren und molekularen Spektren zu erhalten. Der Dopplereffekt beschreibt die Verkürzung der Wellenlängen der Signale, die von einem Objekt ausgesendet werden, das sich gegen uns bewegt (Blauverschiebung), und die Verlängerung der Wellenlängen, wenn sich das Objekt von uns weg bewegt (Rotverschiebung). Indem wir die gemessenen Spektrallinien der Spektren nach Blau- oder Rotverschiebungen untersuchen, schlüsseln wir die verschiedenen Regionen auch nach ihren Geschwindigkeiten auf. Wegen den Keplerschen Gesetzen rotiert die protoplanetarische Scheibe innen schneller als aussen. Das Licht, das von Materie ausgesendet wird, die auf den Stern fällt, unterliegt dann einer Rotverschiebung. Im Gegensatz dazu produziert der Sternwind, die Materie, die von der Oberfläche des Sterns ausgestoßen wird, eine Blauverschiebung. Eine Scheibe, die um einen Stern kreist, produziert eine Kombination von Blau- und Rotverschiebungen, da die Materie auf der einen Seite sich gegen uns und die Materie auf der anderen Seite von uns weg bewegt. Die betroffenen Spektrallinien trennen sich dann in eine Doppelspitze auf. Wenn die Scheibe nicht völlig rund oder gleichförmig ist, sind diese Linien zudem asymmetrisch. Dies hilft uns, auch irreguläre Strukturen in den protoplanetarischen Scheiben zu beobachten, die zum Beispiel durch sonst unsichtbare Planeten verursacht werden.

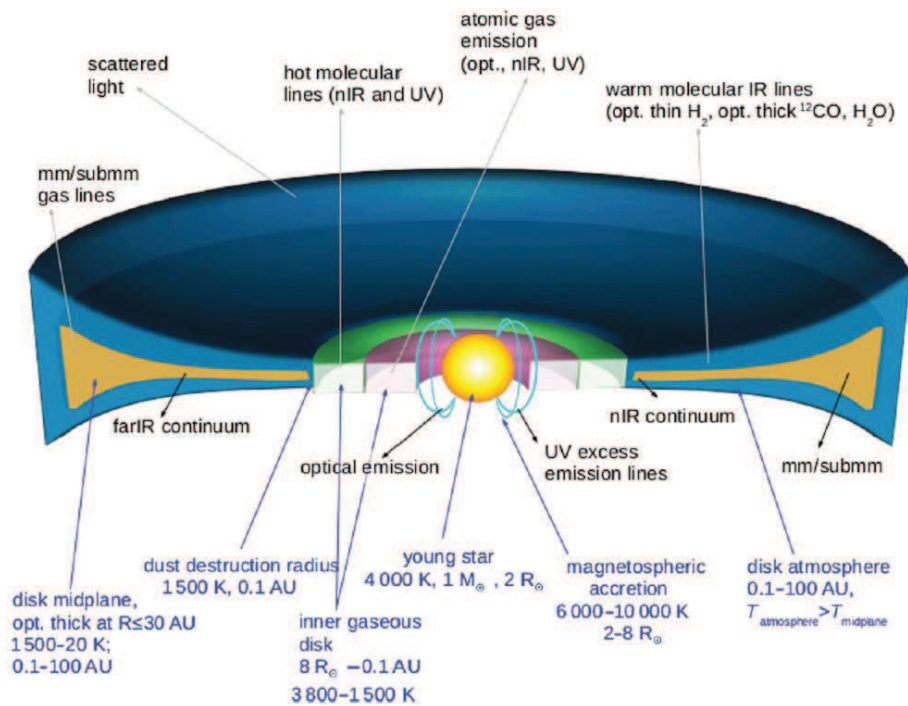


Abb. 2: Künstlerische Darstellung einer protoplanetarischen Scheibe (nicht maßstabgetreu) und worüber die verschiedenen Beobachtungstechniken Aufschluss geben. [Quelle: Sicilia-Aguilar et al., 2016]

### Zeit und Raum

Zeit und Raum sind auch verbunden. Prozesse mit hohen Geschwindigkeiten decken über längere Zeiten sehr große Räume ab (Abb. 3). Wenn wir unsere Beobachtungen jede Stunde, jeden Tag, jede Woche oder sogar alle Jahrzehnte wiederholen, betrachten wir, was in Regionen in aufsteigender Größe passiert. Die Messung des Dopplersignals über mehrere Umlaufzeiten von einem Stern mit Planeten gibt Blau- und Rotverschiebungen, die uns die Existenz der Planeten aufzeigt. Die Beobachtung eines jungen Sterns, der noch Materie von seiner Scheibe aufnimmt, über mehrere Monate oder Jahre hinweg zeigt uns, ob der Prozess der Sternbildung normal oder ungewöhnlich ist. Beobachten wir einen jungen Stern über mehrere Eigendrehperioden (Sterntage), können wir bestimmen, ob der Stern wie unsere Sonne kalte und heiße Flecken hat, die aber im Gegensatz zu den Sonnenflecken in der Regel viel größer sind. Das gibt auch Aufschluss über die stellaren Magnetfelder, denn diese kanalisieren das Einströmen von Materie auf den Stern, was die Sternflecken erzeugt. Es besteht eine große Wahrscheinlichkeit, dass wir mit solchen Methoden in den nächsten Jahren magnetische Zyklen in jungen Sternen beobachten werden können.

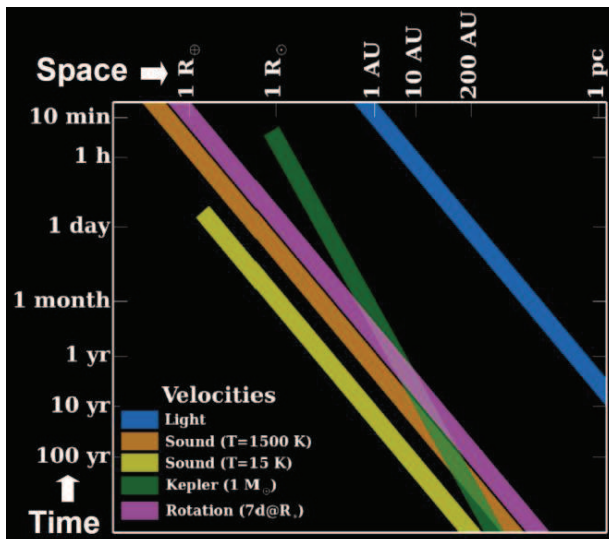


Abb. 3. Die Abhängigkeit zwischen Zeit und Raum für ein paar wichtige Geschwindigkeiten für junge Sterne, protoplanetare Scheiben und Sterngruppen.

### Neue und alte Beobachtungsmethoden

Indem wir all diese Techniken intelligent kombinieren, erhalten wir Aufschluss über die Struktur und Zusammensetzung der protoplanetarischen Scheiben mit einer Auflösung, die höher ist als diejenige, die irgendein einzelnes Instrument je erreichen könnte (siehe Abb. 2). Diese Methoden sind tomographisch, da sie auf vielen einzelnen Messungen beruhen, die für sich selbst genommen ungenügend wären, aber in ihrer Gesamtheit ein Potential haben, das wir erst wirklich zu nutzen begonnen haben.

Da auch kleine Teleskope hier eine wichtige Rolle spielen, verfügen wir bereits seit etwa 40 Jahren über recht gute Beobachtungen von jungen Sternen und protoplanetarischen Scheiben. Das entspricht mehreren Umlaufzeiten von Planeten wie Jupiter. Diese Daten wurden

noch nie nach diesen Kriterien analysiert. Zusammen mit neuen gezielten Messungen werden sie uns erlauben, einen großen Sprung vorwärts in der Rekonstruktion des Raum- und Zeitverhaltens von neugeborenen Sternsystemen zu machen. Das beinhaltet die Wechselwirkung zwischen der protoplanetarischen Scheibe, neugeborenen Planeten und dem Stern. Junge Doppelsternsysteme zeichnen sich auch durch eine hohe Dynamik aus, die wir so entschlüsseln können. All das ist nur ein Teil der Möglichkeiten, und Forschung in diese Richtung hat erst in den letzten Jahren richtig angefangen.

### Bibliographie

„The 2014-2017 outburst of the young star ASASSN-13db. A time resolved picture of a very low-mass star between EXors and FUors“, Sicilia-Aguilar, Oprandi, Froebrich, et al. 2017, *Astronomy & Astrophysics*, 607, 127

„A Rosetta Stone for protoplanetary disks: The synergy of multi-wavelength observations“, Sicilia-Aguilar, Banzatti, Carmona, et al., 2016, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 33, 55

„Accretion dynamics of EX Lupi in quiescence: The star, the spot, and the accretion column“, Sicilia-Aguilar, Fang, Roccatagliata, et al. 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 580, 82

„GW Orionis: Inner disk readjustments in a triple system“, Fang, Sicilia-Aguilar, Roccatagliata, et al. 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 570, 118

„A Herschel view of IC 1396A: Unveiling the different sequences of star formation“, Sicilia-Aguilar, Roccatagliata, Getman, et al. 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 562, 131

„Optical spectroscopy of EX Lupi during quiescence and outburst: Infall, wind, and dynamics in the accretion flow“, Sicilia-Aguilar, Kóspál, Setiawan, et al. 2012, *Astronomy & Astrophysics*, 544, 93