

■ Schwere Geburt

Wenn Sterne durch einen sphärischen Kollaps entstehen, sollte ihre Masse auf zehn Sonnenmassen beschränkt sein. Computersimulationen zeigen, wie dennoch massereichere Sterne entstehen können.

Massereiche Sterne geben im Laufe ihrer Entwicklung extrem viel Energie in Form von Strahlung und Sternwinden an das interstellare Medium ab. Sie explodieren schließlich als Supernovae und reichern das Universum mit schweren Elementen an. Trotz ihrer Bedeutung für den kosmischen Materiekreislauf ist die Entstehung massereicher Sterne noch kaum verstanden. Ein konzeptionelles Problem dabei besteht in der starken Energieabgabe in der Frühphase ihrer Entwicklung. Zu Beginn kollabiert die Materie im Inneren der Gaswolken („Gaskerne“) unter ihrer eigenen Gravitation und setzt dabei Energie aus der Akkretion und sehr bald auch Kernfusion frei. Der damit einhergehende Strahlungsdruck wirkt dem weiteren Gas- und Staubeinfall entgegen. In einem sphärischen Kollaps sollte der Strahlungsdruck des zentralen Protosterns ab ungefähr zehn Sonnenmassen so groß sein, dass der weitere Einfall von Gas und Staub gestoppt wird und somit massereichere Sterne kaum entstehen könnten. Da aber Sterne mit bis zu 150 Sonnenmassen existieren,

muss es Auswege aus diesem Dilemma geben.

Beobachtungen und Theorie legen nahe, dass sich dieses Problem umgehen lässt, wenn asymmetrische Gasansammlungen und abgeflachte Akkretionsscheiben entstehen. Dann können senkrecht zu den Scheiben Drehimpuls und Energie aus dem System wieder ausströmen. **Abb. 1** zeigt eine massereiche Scheibe mit einer solchen Ausströmung (Jet), wie man sie bei Radiowellenlängen beobachten kann [1]. Dabei erkennt man eine Ausströmung mit Nord-Süd-Orientierung und senkrecht dazu einen Geschwindigkeitsgradienten im dichten und warmen Gas NH_3 , den die rotierende Akkretionsscheibe hervorruft. Da die Akkretionsscheibe in die einfallende Gashülle eingebettet ist und gegen unsere Sichtlinie gekippt ist, sieht man keine klare abgeflachte Struktur. Andere Beobachtungen zeigen die Ausströmung auch auf noch weit aus größeren Skalen.

Komplementär zu den Beobachtungen wird intensiv daran gearbeitet, den Kollaps massereicher Gaskerne und die Entstehung massereicher Sterne numerisch zu simulieren. Wissenschaftler von den Universitäten Santa Cruz und Berkeley in Kalifornien haben jetzt eine aufregende Arbeit über dreidimensionale Kollapsrechnungen eines ursprünglich 100 Sonnenmassen schweren Gaskernes veröffentlicht, die Untersuchungen aus dem Jahr 2007 fortführt [2, 3]. Die Simulation verfolgt die Entwicklung des anfänglich sphärischen Gaskerns über einen Zeitraum von 60 000 Jahren. Hierzu werden die Gleichungen der Hydrodynamik und des Strahlungstransports gekoppelt gelöst. Die Kopplung zwischen Strahlung und Gas ist einerseits direkt, da der berechnete Strahlungsdruck das Gas beeinflusst. Andererseits muss die korrekte Thermodynamik des Gases Kühl- und Heizprozesse berücksichtigen, welche sich gleich-

maßen aus Strahlungseffekten als auch aus der Gasdynamik ergeben. Ein adaptives Gitter erlaubt es, auch kleinskalige Strukturen aufzulösen. Der Gaskern besitzt Dichte-, Drehimpuls-, Temperatur und Turbulenzverteilungen, die ungefähr den zu erwartenden Anfangsbedingungen entsprechen. Allerdings sind die letztgenannten Anfangsbedingungen bislang aus Beobachtungen noch nicht mit großer Genauigkeit bekannt. Der Strahlungstransport ist für die Behandlung des Problems wichtig, um Rückkopplungsprozesse adäquat behandeln zu können. Ein weiterer wichtiger Fortschritt ist die Dreidimensionalität der Simulationen, da viele Prozesse, insbesondere Instabilitäten, sehr viel stärker auftreten als in früheren zweidimensionalen Näherungen.

Die Simulationen zeigen anstelle der Umkehrung des Einfallens durch Strahlungsdruck, dass die Akkretion durch nicht-axialsymmetrische Scheiben und Filamente kontinuierlich fortschreiten kann. Dabei lassen gravitative und Rayleigh-Taylor-Instabilitäten die Strahlung senkrecht dazu durch optisch dünne Gebiete entkommen, so dass sich der Strahlungsdruck auf das einfallende Gas reduziert. Ein Schnappschuss der Simulationen nach 51 000 Jahren zeigt sowohl die Dichteverteilung als auch den Gasfluss und die wirkenden Kraftrichtungen (**Abb. 2**). In diesen Simulationen entstehen aufgrund des eigenen Strahlungsdrucks „Aushöhlungen“, durch die die Strahlung entweichen kann. In der Realität ist dieser Effekt sogar noch stärker, da die oben beschriebenen bipolaren Jets noch früher in der Entwicklung durch magneto-hydrodynamische Prozesse entstehen und auf diese Weise schon Löcher senkrecht zu den Akkretionsscheiben in die einfallenden Gashüllen reißen. Diese Aushöhlungen kann man sich wie Ventile vorstellen, durch die der Strahlungsdruck entweichen kann.

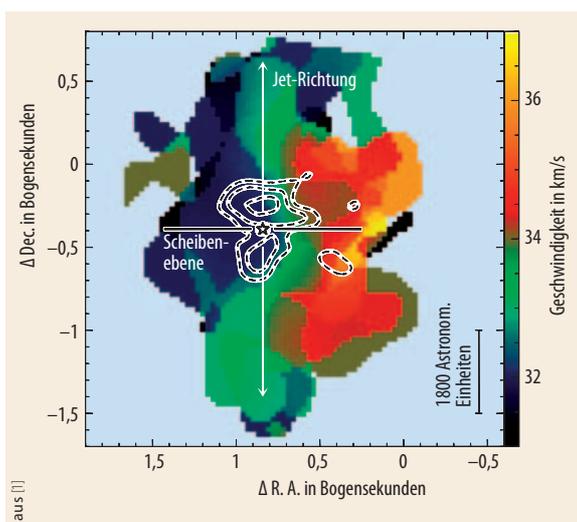
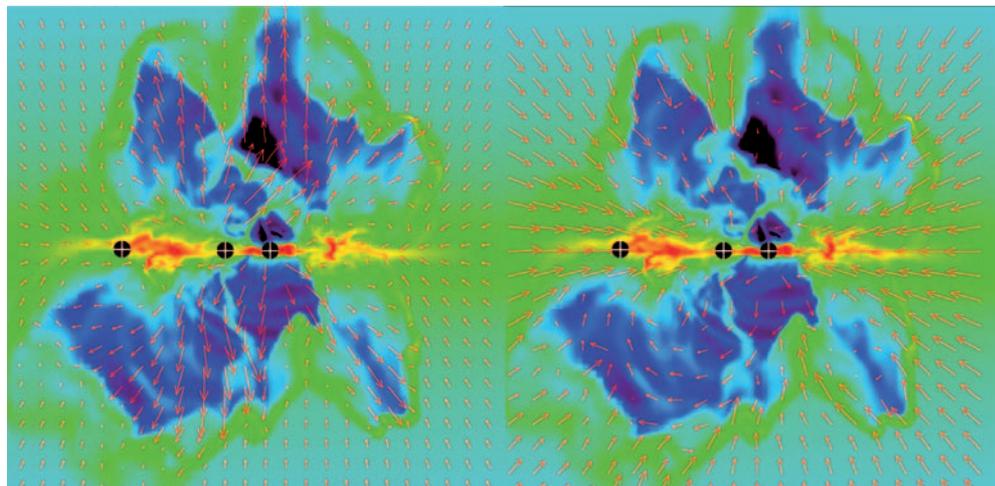


Abb. 1 Das massereiche Scheiben-Jet-System IRAS 18089-1732: Die Farbskala zeigt die Geschwindigkeitsverteilung des dichten warmen Gases, beobachtet bei cm-Wellenlängen im Inversionsübergang des Ammoniak. Die gestrichelten Konturen zeigen die Ausrichtung des senkrechten zentralen bipolaren Jets. Die Position des Protosterns ist durch den Stern markiert.

Die Akkretionsscheibe selber ist ebenfalls gravitativ instabil. Sie fragmentiert daher und lässt weitere Sterne in ihr entstehen. Die ersten so in der Scheibe entstandenen Sterne bewegen sich durch dynamische Reibungsprozesse zum zentralen Objekt und verschmelzen mit diesem. Allerdings ist der Massenzuwachs des zentralen Sterns durch Verschmelzen vernachlässigbar gering, verglichen mit dem Massenzuwachs durch normale Akkretion. Nach ca. 35 000 Jahren bildet sich innerhalb der Scheibe durch Kollisionen ein weiterer Stern, der nun massereich genug ist, um der dynamischen Reibung zu widerstehen. Während diese Doppelsternkomponente anfangs sehr viel masseärmer ist als der zentrale Primärstern, fängt er nun einen signifikanten Anteil des Gases in der Scheibe ab, sodass er schneller wächst als der Primärstern, bis das Massenverhältnis zwischen Primär- und Sekundärstern ca. 2:1 ist. Zu diesem Zeitpunkt fragmentiert die Scheibe weiter, und die Akkretion teilt sich ungefähr gleichmäßig zwischen beiden Objekten auf. Die Simulationen wurden nach 60 000 Jahren gestoppt, da keine qualitativen Veränderungen mehr auftraten. Zu diesem Zeitpunkt sind 70 % der anfänglichen Gasmasse in zwei Sterne mit einem Abstand von 1600 Astronomischen Einheiten¹⁾ verwandelt worden (ca. 41 und 29 Sonnenmassen für Primär- und Sekundärkomponente).

Die Simulationen zeigen, dass massereiche Sterne durch qualitativ ähnliche physikalische Prozesse entstehen können wie ihre massearmen Geschwister und dass das Entweichen der Strahlung durch bipolare „Aushöhlungen“ den Strahlungsdruck auf das Umgebungsmaterial signifikant verringern kann.

Was bleibt auf numerischer Seite zu tun? Zum einen ist es notwendig, den Parameterraum der Anfangsbedingungen besser zu untersuchen, und zum anderen müssen zukünftige Simulationen weitere wichtige physikalische Prozesse berücksichtigen. Dazu gehört zuerst eine magneto-hydrodynamische



M. Krumholz, aus [3]

Abb. 2 Dieser Schnappschuss der Simulation zeigt einen 6000 Astronomischen Einheiten¹⁾ großen Schnitt entlang der Rotationsachse nach 51 000 Jahren. Die Farbskala zeigt die Dichte, die von blau über gelb, grün und rot zunimmt. Der Stern im Zentrum (Plus-Symbol) ist der Primärstern, während die Plus-

Symbole weiter außen sekundäre Sterne zeigen, die erst innerhalb der fragmentierenden Scheibe entstanden sind. Im linken Bild symbolisieren die Pfeile die Richtungen der Gasströme, während sie rechts die Summe aus Strahlung und Gravitation verdeutlichen, die zum Großteil einwärts gerichtet ist.

Erweiterung, da kollimierte Jets beobachtet werden, die sich nur durch die Existenz von Magnetfeldern erklären lassen. In dem Zusammenhang sei auch betont, dass die Sternentstehungseffizienz (d. h. das Umwandeln von Gas in Sterne) dieser Simulationen mit mehr als 70 % zu hoch ist. Optimistische Schätzungen gehen eher von 30 % aus. Es ist sehr gut möglich, dass magneto-hydrodynamische Ausströmungen mit dafür verantwortlich sind, dass die Umgebungswolke zerstört wird und somit die Sternentstehung früher endet. Von Beobachtungsseite sei erwähnt, dass das nächste Jahrzehnt mit unterschiedlichen

neuen erdgebundenen und welt-raumbasierten Teleskopen eine Flut neuer Daten erwarten lässt. Somit sollte die Kombination von Beobachtungen und Simulationen in nicht allzu ferner Zukunft das Verständnis der physikalischen und chemischen Prozesse, die zur Bildung der massereichsten Sterne führen, drastisch verbessern.

Henrik Beuther und Thomas Henning

- [1] H. Beuther und A. J. Walsh, *ApJ* **673**, L55 (2008)
- [2] M. R. Krumholz, R. I. Klein und C. F. McKee, *C. F. 2007, ApJ* **656**, 959 (2007)
- [3] M. R. Krumholz, R. I. Klein, C. F. McKee, S. S. R. Offner und A. J. Cunningham, *Science* **323**, 754 (2009)

¹⁾ Eine Astronomische Einheit entspricht dem Abstand zwischen Erde und Sonne.

Priv.-Doz. Dr. Henrik Beuther und Prof. Dr. Thomas Henning, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg

KURZGEFASST

■ **Wolkiger Kern**

Einzelne Isotope von Helium, Lithium oder Beryllium widersprechen der gängigen Vorstellung eines kompakten Kerns aus Protonen und Neutronen, denn sie besitzen einen „Halo“ aus Neutronen um den Kern. Ein Team um Mainzer und Heidelberger Physiker hat nun erstmals den Kernladungsradius des „Halo-Kerns“ ¹¹Be präzise laserspektroskopisch gemessen und mit „normalen“ Be-Isotopen verglichen. Demnach ist das Halo-Nukleon 7 fm vom Kern entfernt, dessen Radius nur 2,5 fm beträgt. Diese Experimente und frühere zu den Halos von ¹¹Li und ¹⁷Ne versprechen u. a. neue Erkenntnisse über die Kernbindungskräfte. *W. Nörtershäuser et al., Phys. Rev. Lett.* **102**, 062503 (2009)

■ **Teleportation atomarer Zustände**

Amerikanische Physiker von der University of Maryland konnten erstmals den Quantenzustand von einem Ytterbium-Ion (Yb⁺) auf ein anderes über eine Entfernung von einem Meter übertragen. Beide Ionen befanden sich in Fallen. Eine solche Quantenteleportation ist bislang nur mit Photonenzuständen gelungen, bei denen sich auch wesentlich größere Entfernungen erreichen lassen. Die Teleportation der Quantenzustände von Yb⁺ gelang durch Verschränkung mit Photonenzuständen, welche über Glasfasern und ein spezielles Interferometer zwischen den Ionenfallen übertragen wurden. In etwa 90 Prozent aller Fälle war die Quantenteleportation erfolgreich. *S. Olmschenk et al., Science* **323**, 486 (2009)