



Frühstadien massereicher Sterne

H. Beuther, P. Schilke, K.M. Menten, F. Bertoldi, J. Schmid-Burgk

Sterne sind stark selbstgravitierende Gasklumpen, in deren Innerem Dichten und Temperaturen herrschen, die Energieerzeugung durch Kernfusion ermöglichen. Die Mindestmasse eines solchen kosmischen Fusionsreaktors ist ungefähr 0.08 Sonnenmassen, ein Wert, der aus den für die einfachsten Fusionsreaktionen notwendigen Temperaturen folgt. Die maximal mögliche Masse eines Sterns ist unklar - bekannt sind Sterne mit bis zu 100 Sonnenmassen.

Je massereicher ein Stern ist, desto schneller verbrennt er seine nuklearen Energiereserven: ein "Durchschnittssterne" wie unsere Sonne lebt ca. 10 Milliarden Jahre, ein Stern mit der hundertfachen Sonnenmasse aber strahlt nur einige Millionen Jahre, bis seine Energiereserven erschöpft sind. Trotz ihrer Seltenheit sind massereiche Sterne für die Dynamik, Physik und Chemie des interstellaren Mediums von großer Bedeutung. Sie beeinflussen ihre Umwelt durch drei wichtige Effekte: Winde und Jets während der ungefähr 100.000 Jahre Entstehungszeit, harte ionisierende Strahlung während der 4 bis 40 Millionen Jahre Lebensdauer, und eine gewaltige (Supernova) Explosion als spektakuläres Ende. Da nur in massereichen Sternen schwere Elemente erzeugt und durch starke Winde sowie die abschließende Explosion freigegeben werden, sind hauptsächlich sie für die Anreicherung des interstellaren Gases mit diesen schweren Elementen verantwortlich. Daraus können dann weitere Sterne entstehen nebst dazugehörigen Planeten.

Entstehung massereicher Sterne: Die Bildung massereicher Sterne ist auch heute noch recht unklar. Für die Entstehung massearmer Sterne haben sich hingegen in den letzten Jahrzehnten Vorstellungen entwickelt, die sowohl mit den mittlerweile sehr detaillierten Beobachtungen konsistent als auch physikalisch-theoretisch schlüssig sind. Entsprechend ersten Konzepten von Kant und Laplace, nach denen Sterne durch gravitativen Kollaps rotierender Gasnebel entstehen, bilden sich massearme Sterne während einiger 100.000 Jahre aus sich verdichtenden Molekülwolkenkernen (**Abbildung 1a**). Dabei entsteht im Zentrum ein von einer Scheibe aus dichtem Gas und Staub umgebener Proto-Stern; auf die Scheibe fällt von der umgebenden Molekülwolke weiterhin Material (**Abbildung 1b**). Eine solche Scheibe muss sich bilden, weil die Ausgangswolke Drehimpuls besitzt und daher nicht einfach zu einem Punkt zusammenfallen kann. Der Stern wächst durch Akkretion von Gas aus der umgebenden Scheibe, wobei der Drehimpuls durch bipolare Ausflüsse sehr hoher Geschwindigkeiten (bis mehrere 100 km s^{-1}) abgegeben wird. Solche oft spektakulären Jets und das durch sie komprimierte und beschleunigte molekulare Gas der Umgebung lassen sich als ausgedehnte Objekte beobachten (**Abbildung 1c**). Unklar bleiben bis heute die Prozesse, die überhaupt zur Entstehung der dichten Molekülwolkenkerne führen.

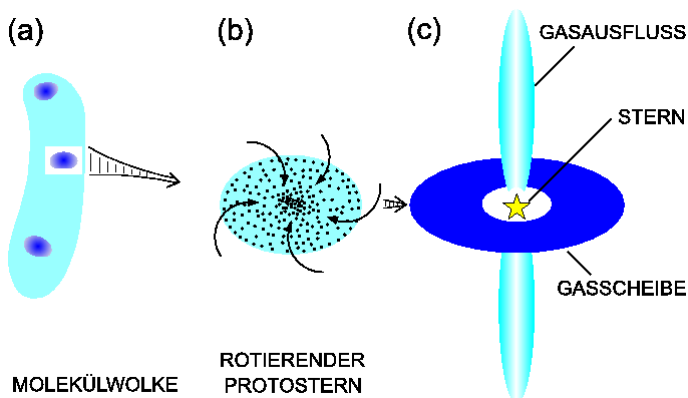


Abbildung 1: Das Standardmodell massereicher Sternentstehung: (a) Molekülwolke mit dichten Wolkenkernen; (b) Vergrößerung eines Molekülwolkenkerns mit Bildung eines zentralen Objektes und einer umgebenden Scheibe; (c) Aktive Akkretionsphase mit zentralem (Proto-) Stern, Akkretionsscheibe und bipolarem Ausfluss.

Aus mindestens zwei Gründen ist die Entstehung massereicher Sterne schwieriger zu verstehen:

Massereiche Sterne sind selten und kurzlebig: Im Gegensatz zu massearmen Sternen gibt es keine massereichen Regionen in der Nähe unseres Sonnensystems. Wegen ihrer großen Entfernung sind sie auch mit den größten Teleskopen nur schwer zu beobachten. Zudem entstehen massereiche Sterne schneller als masseärmere: während sich die Jugend eines sonnenähnlichen Sterns über einige Millionen Jahre hinzieht und so in unserer Nachbarschaft jugendliche Exemplare in den unterschiedlichsten Phasen ihrer Bildung zu beobachten sind, werden massereiche Sterne fast zehnmal schneller "erwachsen". Deshalb war es bisher schwierig, ausreichend viele massereiche junge Sterne zu finden, um deren spezifische Bildungsprozesse zu beobachten und mit denen der masseärmeren zu vergleichen.

Strahlungsdruck: Das zweite Problem ist eher theoretischer Natur. Die Zeit, nach der ein wachsender Proto-Stern beginnt durch Kernfusionen Energie zu erzeugen, ist um so kürzer je massereicher der Stern ist. Sterne über 8 Sonnenmassen strahlen schon während der Bildung in ihrer Ursprungswolke so große Energiemengen ab, dass der Strahlungsdruck auf das umgebende Material aus Gas und Staub den Kollaps abbremsen muss. Wären die Akkretionsraten für Sterne aller Massen gleich, dann würde dieser Strahlungsdruck die Entstehung massereicher Sterne völlig verhindern.

In den letzten Jahren sind verschiedene Vorschläge zur Vermeidung dieser Situation gemacht worden. Man könnte das Entstehungsschema massearmer Sterne im wesentlichen beibehalten, wenn die Akkretionsraten stark mit der Masse des sich bildenden Sterns zunehmen; dann würde der Strahlungsdruck das Wachstum des Sterns nicht bremsen. Ein alternativer Ansatz folgt aus der Beobachtung, dass massereiche Sterne immer in kompakten Haufen hunderter oder tausender Sterne niedrigerer Masse entstehen. Möglicherweise sind in solchen Sternhaufen die stellaren Dichten anfänglich so groß, dass Sterne mittlerer und kleiner Masse häufig kollidieren, verschmelzen und dabei massereichere Sterne bilden. In einem solchen Szenario könnten sich allerdings keine stabilen Scheiben um die anwachsenden Sterne halten.

Bipolare molekulare Ausflüsse: Am Institut wurde in den letzten Jahren versucht, durch gezielte Beobachtungen zwischen diesen beiden Szenarien zu entscheiden. Da die räumlichen Skalen, auf denen die eigentliche Akkretion stattfindet (einige astronomische Einheiten), bei den für massereiche Sternentstehungsregionen üblichen Distanzen (einige Kiloparsec) mit heutigen Instrumenten kaum aufzulösen sind, mussten indirekte Unterscheidungsindikatoren gesucht werden.

Eine Möglichkeit bietet die genaue Untersuchung bipolarer Ausflüsse, da diese noch auf großen Skalen Aufschlüsse über die im Akkretionsbereich wirksamen Mechanismen erlauben. Für nahe Gebiete massearmer Sterne sind solche Untersuchungen weit fortgeschritten. Wenn auch die genauen Prozesse der Beschleunigung bipolarer Ausflüsse noch immer unklar sind, scheint es doch wahrscheinlich, dass diese sehr kollimierten Ausflüsse nur durch die Wechselwirkung eines Sterns mit seiner Akkretionsscheibe entstehen können. Daher geben Beobachtungen von kollimierten Ausflüssen aus massereichen (d.h. sehr hellen) noch tief in ihre "Urwolke" eingebetteten Sternen Hinweise auf die Existenz von Akkretionsscheiben, und damit auf einen für alle Sterne einheitlichen Entstehungsmechanismus.

Frühe Beobachtungen geringer räumlicher Auflösung von molekularen Ausflüssen aus massereichen Sternentstehungsregionen schienen anzudeuten, dass diese Ausflüsse schwächer kollimiert sind als die aus Gebieten massearmer Sternentstehung, dass sie gar an Explosionen erinnern. Dies wurde als starkes Indiz dafür gewertet, dass ihre physikalischen Mechanismen andere sein müssten als in massearmen Sternentstehungsregionen.

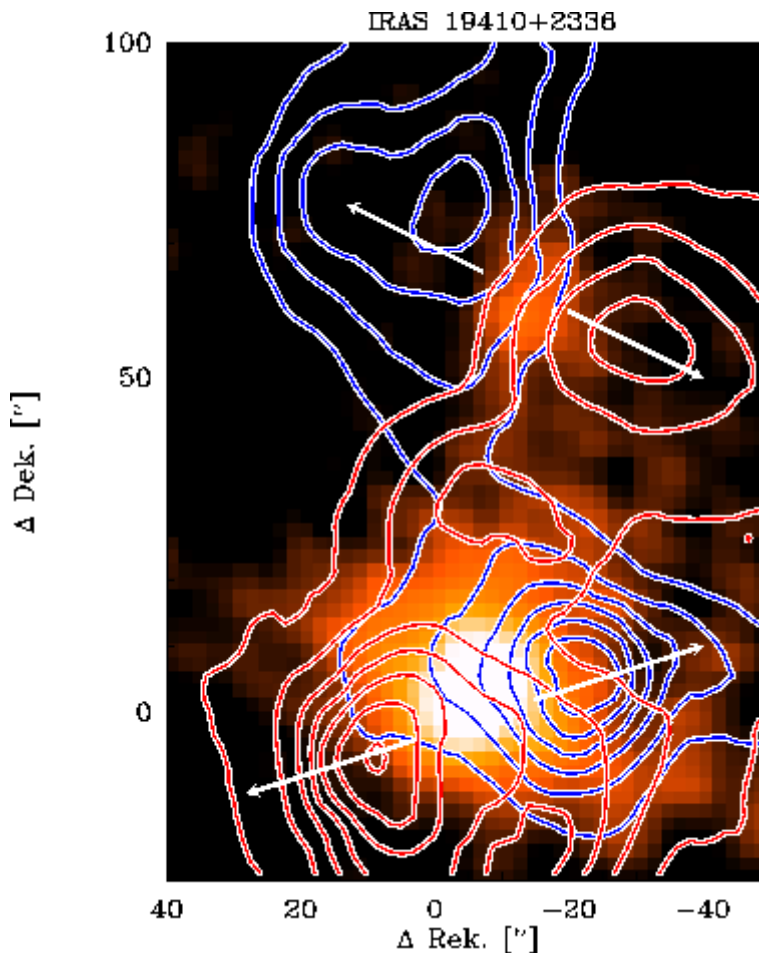


Abbildung 2: Bipolare Ausflüsse in der massereichen Sternentstehungsregion IRAS 19410+2336. Die orange Farbe zeigt Kontinuumsmission bei 1,2 mm, die von Staubkörnern emittiert wird und somit die Massenverteilung anzeigt. Die blauen und roten Konturen zeigen die in (2-1)-Linien von CO erkennbaren molekularen Ausflüsse. Die Beobachtungen wurden mit dem IRAM 30m-Teleskop durchgeführt. Die Pfeile deuten die beiden großräumigen molekularen Ausflüsse an.

Mit dem IRAM 30m-Teleskop wurden deshalb 26 molekulare Ausflüsse in massereichen Sternentstehungsregionen mit hoher räumlicher Auflösung im Rotationsübergang $J=2-1$ des Kohlenmonoxid-Moleküls (CO) beobachtet (**Abbildung 2**). Dabei zeigte sich im Gegensatz zu früheren Untersuchungen, dass der Kollimationsgrad von massearmen und massereichen Ausflüssen sehr ähnlich ist. Auch die kinetischen Energien und Akkretionsraten der Ausflüsse hängen kontinuierlich mit der Masse der umgebenden Molekülwolke und mit dem Energieausstoß des Sterns zusammen (**Abbildung 3**). Der hohe Grad der Kollimation massereicher Ausflüsse und die Kontinuität der Skalierungen sind starke Indikatoren dafür, dass die den Ausflüssen zugrundeliegenden Beschleunigungsmechanismen für Sterne aller Massen ähnlich sind.

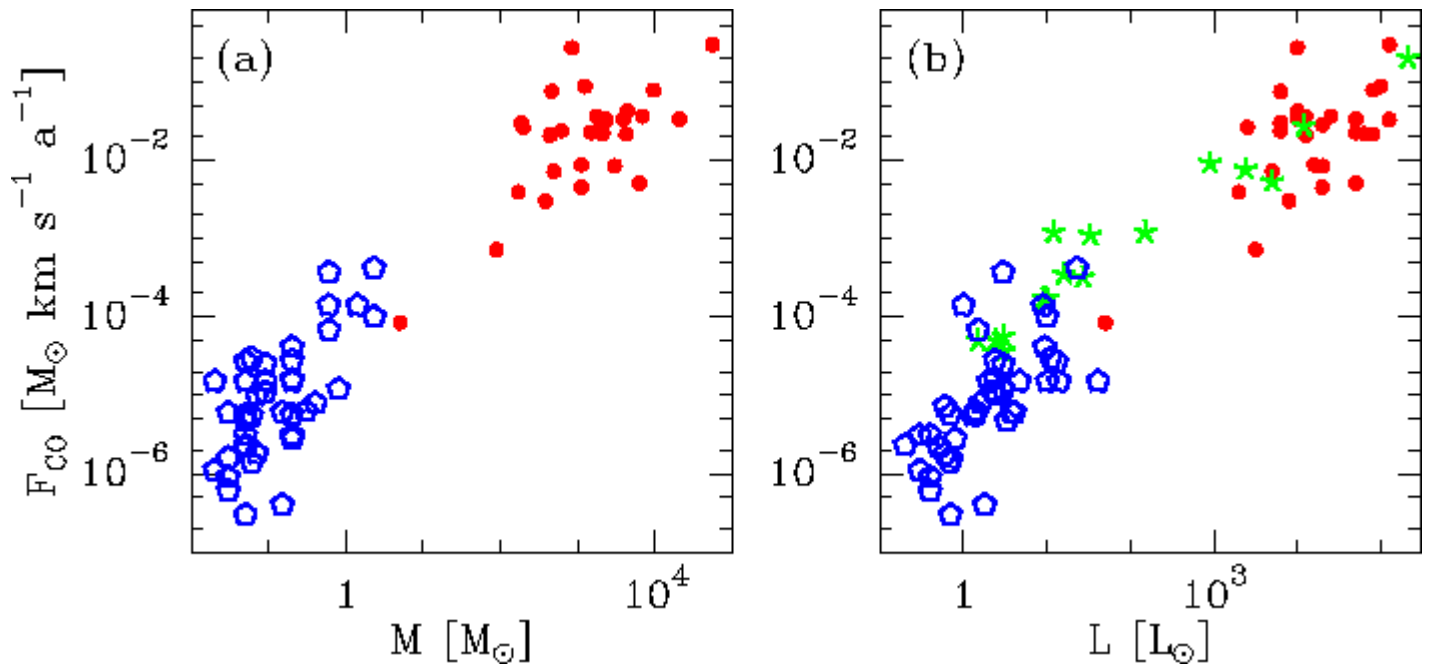


Abbildung 3: Die mechanischen Kräfte der molekularen Ausflüsse in Abhängigkeit von der Wolkenmasse, M , (links) und der Gesamtleuchtkraft, L , der Region (rechts). Die blauen Fünfecke sowie die grünen Sterne zeigen Daten aus der Literatur, die roten Punkte sind eigene Daten.

Interferometrische Beobachtungen: Schon mit der Auflösung des IRAM 30m-Teleskops konnten einige der komplexen Mehrfachstrukturen von Ausflüssen massereicher Sternentstehungsgebiete in Einzelkomponenten zerlegt werden. Beobachtungen mit weit höherer Auflösung sind mit Radiointerferometern wie dem Plateau de Bure-Interferometer von IRAM möglich. Als Beispiel soll hier die Region IRAS 05358+3543 in den Rotationsübergängen CO (1-0), SiO (2-1) und H^{13}CO^+ (1-0) gezeigt werden.

Bei einer räumlichen Auflösung von 3 Bogensekunden lassen sich mindestens drei bipolare Ausflüsse separieren (**Abbildung 4**), die sich qualitativ nicht von Ausflüssen um Sterne niedriger Masse unterscheiden. Besonders besticht der östliche Ausfluss (links im Bild), der bislang am schärfsten kollimierte massive Ausfluss, der beobachtet wurde.

Diese hochauflösenden Untersuchungen molekularer Ausflüsse liefern indirekte Indizien dafür, dass auch massereiche Sterne qualitativ ähnlich zu massearmen Sternen durch Akkretion entstehen, nur mit entsprechend größeren Akkretionsraten und Ausflussmassen.

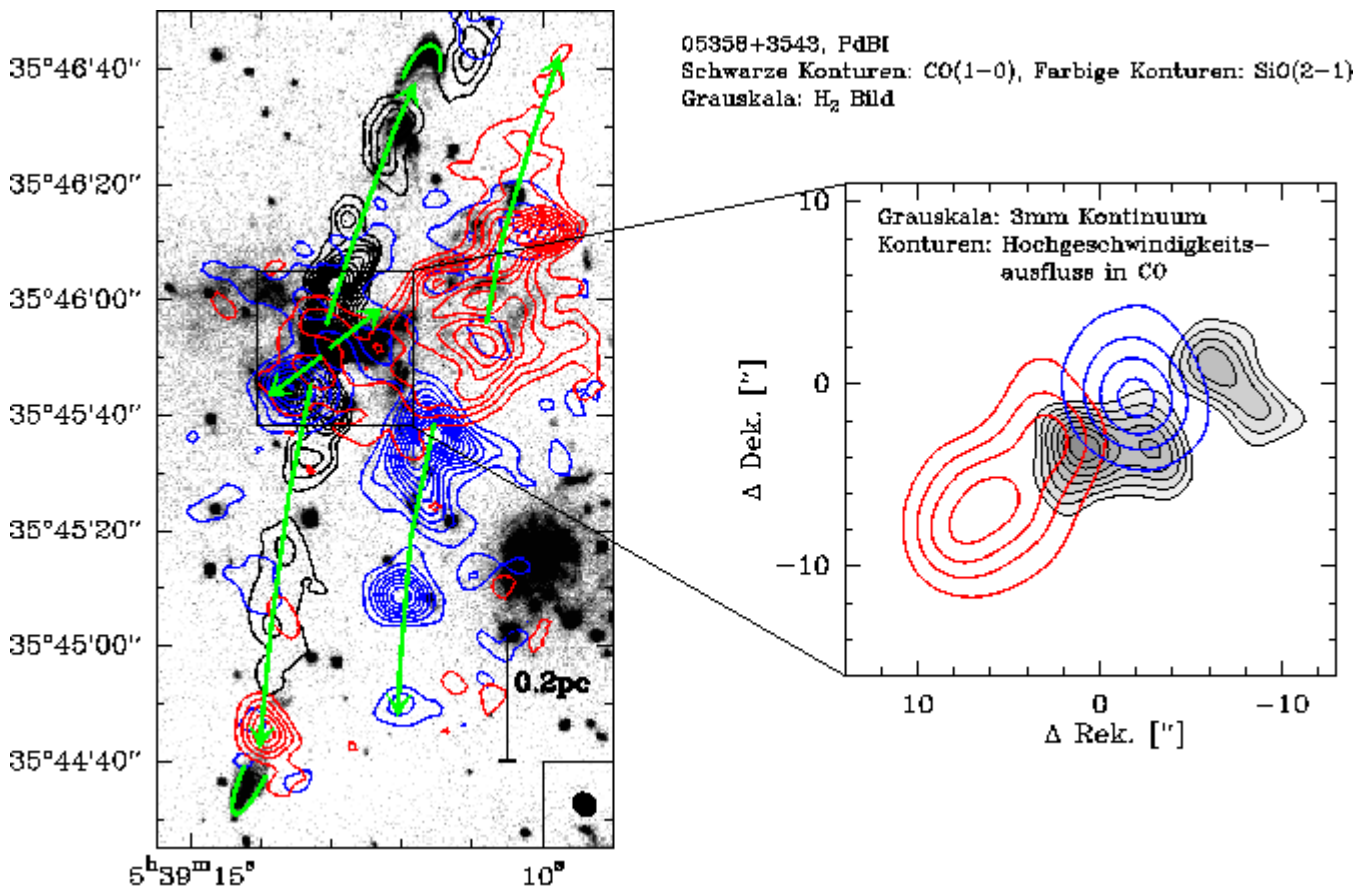


Abbildung 4: Die massereiche Sternentstehungsregion IRAS 05358+3543. Links: Grautöne zeigen die geschockte H_2 Emission, die schwarzen Konturen CO (1–0)-Beobachtungen, die roten und blauen Konturen die jeweilige Hochgeschwindigkeitsemission von SiO (2–1). Die grünen Pfeile verdeutlichen die verschiedenen molekularen Ausflüsse. Rechts: In Grau sieht man das 3 mm Kontinuum der drei massereichsten Wolkenkerne, während blaue und rote Konturen die CO-Linienflüßemission bei hohen Geschwindigkeiten darstellen.

Blick in die Zukunft: Auch wenn der Kenntnisstand über massereiche Ausflüsse in den letzten Jahren stark zugenommen hat, bleiben viele Details ungeklärt. Gerade mit hoher räumlicher Auflösung fehlt bislang eine statistische Basis, um die ersten Ergebnisse besser zu quantifizieren. Darum werden nun weitere Sternentstehungsregionen mit dem Plateau de Bure-Interferometer beobachtet, und diese Untersuchungen sollen in den folgenden Jahren auch auf den Submillimeter-Wellenlängenbereich mit dem Sub-Millimeter-Array (SMA) auf Hawaii ausgedehnt werden. Dieser Wellenlängenbereich ist von besonderem Interesse, da sich dort die molekularen Ausflüsse leichter vom Umgebungsmaterial unterscheiden lassen, da die bei Submillimeter-Wellenlängen liegenden, höher angeregten CO-Linien empfindlicher für warmes Gas sind, das wahrscheinlich stärker im inneren Teil der Ausflüsse zu finden ist. Ab ca. 2007 wird das in der chilenischen Atacama-Wüste geplante Atacama Large Millimeter Array (ALMA) für die Untersuchung der Sternentstehungsmechanismen von großer Bedeutung sein. Die extrem hohe räumliche Auflösung und die um Größenordnungen bessere Empfindlichkeit von ALMA versprechen erstmalig detaillierte direkte Einblicke in die Akkretionsregionen entstehender Sterne.

Bisherige Untersuchungen massereicher Sternentstehungsregionen waren durch Selektionseffekte auf bestimmte Stadien der Sternentwicklung beschränkt, was kaum Aussagen über die Entwicklungschronologie erlaubte. Um verschiedene Evolutionsstadien ohne Auswahl effekte beobachten zu können, sind großräumige Kartierungen von Sternentstehungsgebieten nötig. Das sich im Bau befindliche Atacama Pathfinder Experiment-Teleskop (APEX) des Instituts wird mit seiner großformatigen Bolometerkamera erstmalig solche großflächigen, unvoreingenommenen Suchen nach massereichen Proto-Sternen erlauben.

Max-Planck-Gesellschaft Jahrbuch 2002. Copyright © 2002 Max-Planck-Institut f. Radioastronomie.

▲MPIfR-Home

ute_at_mpifr-bonn.mpg.de