

Turbulenzen im kosmischen Kreißsaal

Extrasolare Planeten spielen nicht nur in der Science-Fiction eine Rolle, sondern sie beflügeln seit eineinhalb Jahrzehnten auch die Wissenschaft. So lernen die Astronomen viel über die Frage, wie diese Himmelskörper und ihre Zentralsterne entstehen. Damit beschäftigt sich die Gruppe um **Thomas Henning**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Astronomie** in Heidelberg.

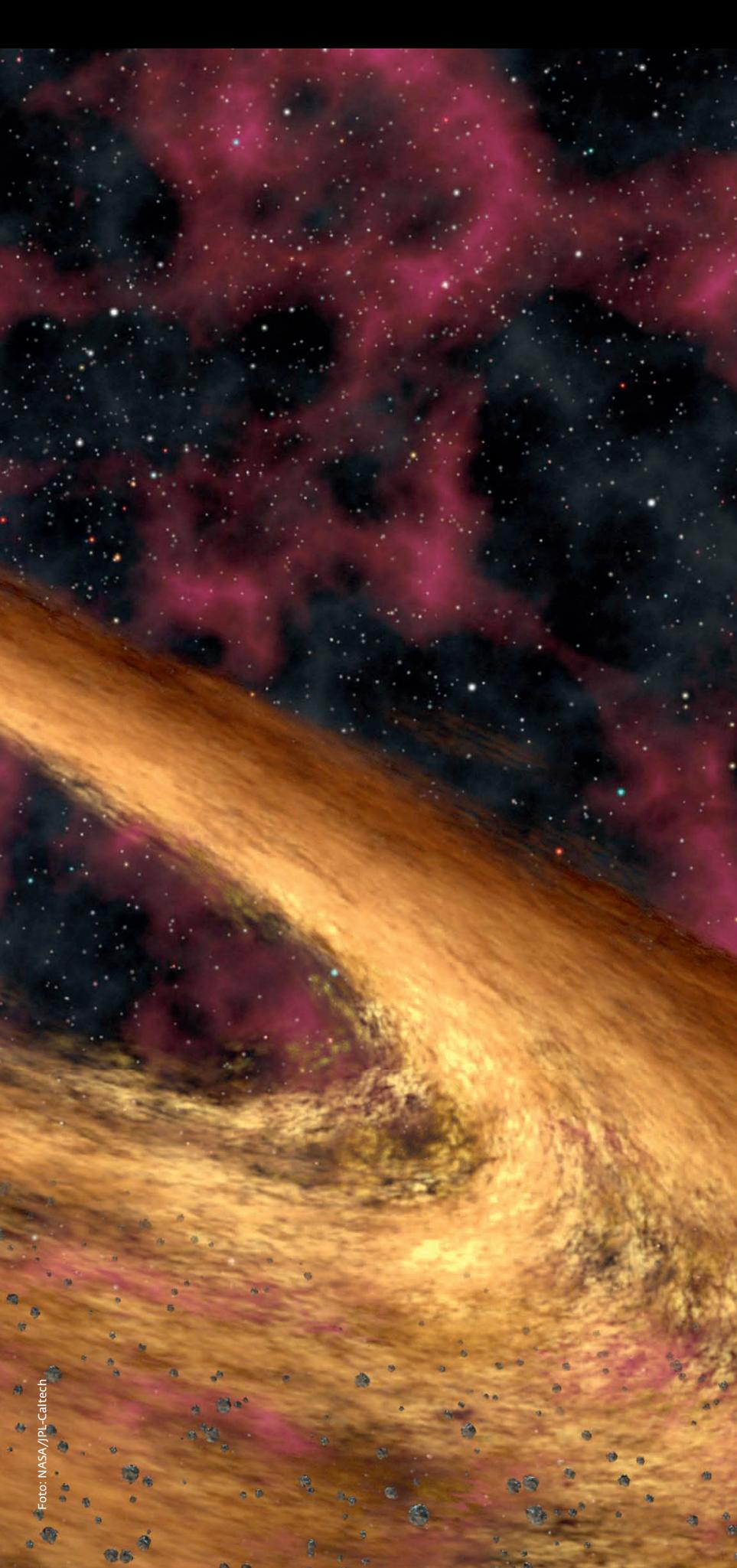


Foto: NASA/JPL-Caltech

TEXT **THOMAS BÜHRKE**

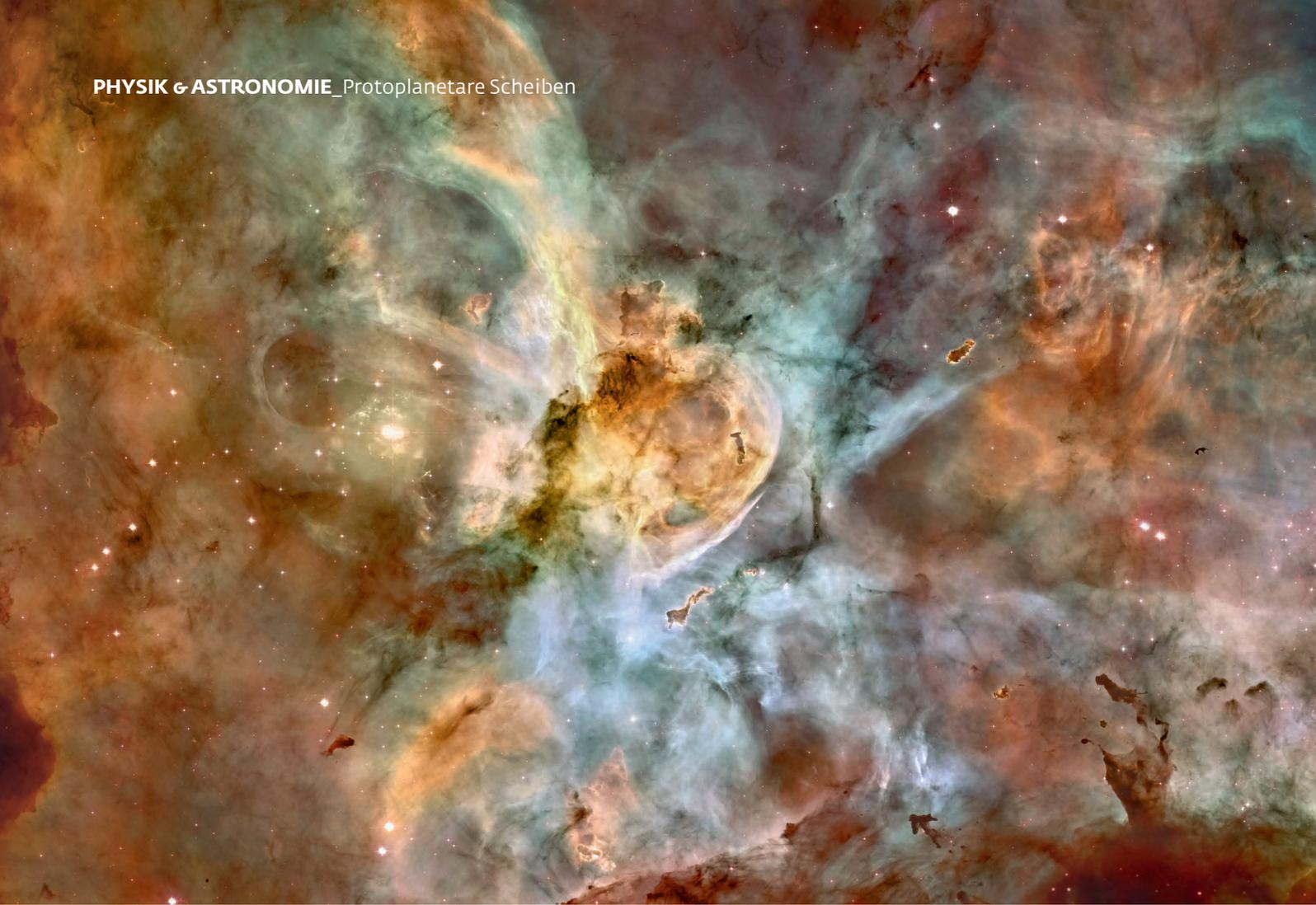
Am Anfang stehen Gas und Staub. In viele Lichtjahre großen Wolken durchziehen sie die gesamte Milchstraße und bilden seit Jahrmilliarden das Reservoir für die Entstehung von Sternen und Planeten. Die Grundzüge dieser kosmischen Geburten haben die Astronomen in den vergangenen Jahrzehnten herausgefunden.

Wenn ein Teil einer solchen Wolke eine bestimmte Größe und Dichte überschreitet, dann zieht er sich unter dem Einfluss der Schwerkraft allmählich zusammen. Von Beginn an vollführen die Wolken eine langsame Drehung mit zufällig orientierter Rotationsachse. Während die Wolke weiter kontrahiert, setzen zwei physikalische Prozesse ein: Zunächst wird die Drehung immer schneller – wie bei Eiskunstläuferinnen, die bei einer Pirouette ihre Arme an den Körper ziehen. Drehimpulserhaltung nennen Physiker diesen Effekt. Und im selben Maße, wie die Rotationsgeschwindigkeit zunimmt, wächst auch die Fliehkraft; sie zieht die Wolke senkrecht zur Rotationsachse zu einer Scheibe auseinander.

DIE GEBURT FOLGT EINER FESTGELEGTEN CHOREOGRAFIE

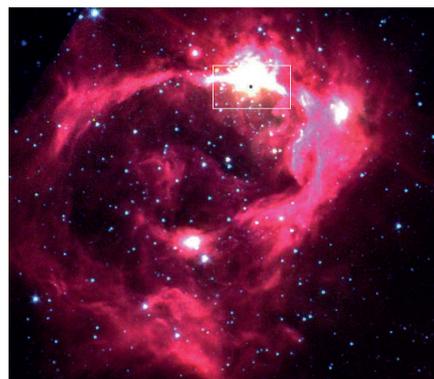
Die Schwerkraft sorgt dafür, dass sich im Zentrum dieser protoplanetaren Scheibe ein Stern bildet. In den anderen Bereichen stoßen immer wieder Staubteilchen zusammen. Sie bleiben aneinander haften und wachsen zu Gesteinskörpern an. Wenn diese einige Kilometer Größe erreicht haben, übernimmt die Schwerkraft ihre Arbeit und sorgt dafür, dass die Felsbrocken zu immer dickeren Körpern anwachsen – bis schließlich ein Planet wie die Erde entstanden ist.

An diesem Grundmuster der Geburt von Sternen und Planeten zweifelt niemand. Aber es gibt noch eine ganze Reihe ungeklärter Fragen, denen die Astronomen in jüngster Zeit mit neuen



Beobachtungsmöglichkeiten nachgehen. „Die Weltraumteleskope *Spitzer* und *Herschel* haben uns so viele neue Daten beschert, dass wir noch Jahre benötigen werden, um sie auszuwerten und astronomisch zu analysieren“, sagt Thomas Henning. Er ist Direktor am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie und leitet die Abteilung Planeten- und Sternentstehung.

Spitzer ist ein Observatorium der US-Raumfahrtbehörde NASA. Es wurde 2003 in eine Erdumlaufbahn gebracht



und hat sechs Jahre lang im infraroten Wellenlängenbereich gearbeitet. Als *Spitzer* im Mai 2009 das nötige Kühlmittel ausging, startete sein europäischer Nachfolger *Herschel*. Ein Spiegel mit 3,5 Meter Durchmesser sammelt das Infrarotlicht der Sterne und Nebel. Damit ist *Herschel* das größte jemals ins All beförderte Teleskop.

Das Max-Planck-Institut für Astronomie war maßgeblich am Bau von einem der drei *Herschel*-Instrumente beteiligt, der Ferninfrarotkamera PACS. Dieses Know-how der Heidelberger Forscher in der Infrarotastronomie, das sie schon mit dem *Herschel*-Vorgänger *ISO* begründeten, ermöglichte ihnen letztlich den großzügigen Zugang zu Beobachtungen mit *Spitzer* – wahrlich keine Selbstverständlichkeit bei einem rein amerikanischen Projekt. „Wir waren an einem Schlüsselprogramm zur Beobachtung von protoplanetaren Scheiben

beteiligt und haben darin praktisch die gesamte Auswertung der spektroskopischen Daten erledigt“, sagt Henning.

INFRAROTSTRAHLUNG DRINGT ZUM KERN DER DINGE

Eine ideale Möglichkeit, Beobachtungen von *Spitzer* mit denen von *Herschel* zu erweitern, ergab sich kurz nach dessen Inbetriebnahme. Im Rahmen des *Herschel*-Programms „Frühe Phasen der Sternentstehung“ nahmen die Heidelberger Astronomen eine Wolke aus Gas und Staub mit dem wenig einprägsamen Namen G011.11-0.12, kurz G011, ins Visier. Frühere Beobachtungen hatten schon gezeigt, dass im Innern eine Reihe von Sternen entsteht, die sich in unterschiedlichen Stadien befinden. Das macht G011 zu einem Schlüsselobjekt, um die ersten Phasen dieses Vorgangs zu studieren.

Zwei Generationen in einem Nebel: Im Zentralbereich des 8000 Lichtjahre entfernten Objekts RCW 34 stehen ältere, am oberen Rand jüngere Sterne (weiß umrahmter Kasten). Die Infrarotaufnahme entstand mit dem Weltraumteleskop *Spitzer*.



Himmlische Pracht: Der rund 7500 Lichtjahre entfernte Carinanebel ist eines der schönsten Sternentstehungsgebiete in der Milchstraße. Er enthält mindestens ein Dutzend junge Sterne, von denen jeder 50- bis 100-mal so massereich ist wie die Sonne. Thomas Henning, Direktor am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie, erforscht die frühe Phase der Sterngeburt – allerdings nicht mit diesem Teleskop, mit dem er der Öffentlichkeit und vor allem Schülern die Faszination der Astronomie nahebringt.

An diesem Projekt wird auch klar, warum die Astronomen in den infraroten Wellenlängenbereich ausweichen müssen. Im sichtbaren Licht sind die Wolken undurchdringlich und erscheinen vor einem Sternenhintergrund schwarz. Infrarotstrahlung dagegen dringt bis ins Innere vor. Hierbei hängt es entscheidend von der Wellenlänge ab, was man in einer solchen Wolke erkennt.

Nach einem physikalischen Gesetz geben alle Körper Wärmestrahlung ab, bei Temperaturen zwischen dem absoluten Nullpunkt (0 Kelvin, entsprechend minus 273 Grad Celsius) und etwa Raumtemperatur ist das eben Infrarotstrahlung. Dabei gilt: je kühler ein Körper, desto größer die Wellenlänge der Strahlung.

Dieses Prinzip machten sich Henning und Kollegen zu eigen, als sie G011 beobachteten. *Spitzer* hatte be-

reits einige Aufnahmen bei relativ kleinen Wellenlängen geliefert. Bei acht Mikrometern erscheint die Wolke noch dunkel, doch je größer die Beobachtungswellenlänge gewählt wurde, desto tiefer schauten die Astronomen in die Wolke hinein – und umso mehr Details zeigten sich. Die einzigartigen, mit *Herschel* zwischen 70 und 350 Mikrometern gewonnenen Aufnahmen offenbarten, tief im Innern verborgen, 24 Staubverdichtungen.

Die aus den Infrarotdaten abgeleiteten Temperaturen dieser protostellaren Kerne variierten zwischen 16 und 26 Kelvin und waren so nur geringfügig wärmer als die Umgebung mit 12 Kelvin. Die Massen dieser Kondensationen betragen zwischen einer und 240 Sonnenmassen. Damit ist klar, dass sich hier in den nächsten Millionen Jahren ein Sternhaufen mit unterschiedlich

großen Mitgliedern bilden wird. „Wir können ganz detailliert die physikalischen Größen studieren, wie sie beim Beginn des Materiekollaps vorliegen“, sagt Thomas Henning.

EINE HEISSE GASBLASE BEHERBERGT 20 JUNGE STERNE

Ein weiteres interessantes Ergebnis: Die Sternentstehung verläuft sehr sparsam. Insgesamt werden nur rund zehn Prozent der vorhandenen Gasmasse in Sterne umgesetzt. Auf diese Weise bleibt noch genügend Material für nachfolgende Sternengenerationen übrig. In G011 haben sich also bereits einige Bereiche so weit verdichtet, dass sie sich zukünftig unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft weiter zusammenziehen werden. Bleibt die Frage, ob es einen äußeren Anlass geben

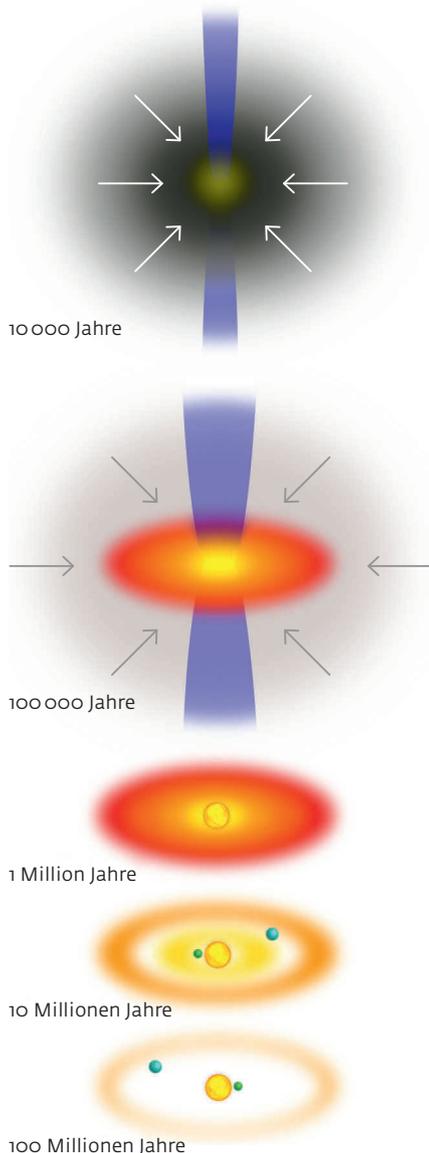
» Da die Wolken Größen von mehreren Lichtjahren besitzen, bewegen sich ihre Teile unterschiedlich schnell – was zu inneren Verwirbelungen von Gas und Staub führt.

muss, damit sich Wolkenteile überhaupt bis zu dieser kritischen Dichte zusammenfinden.

Die rund 8000 Lichtjahre entfernte Sternentstehungsregion RCW 34 scheint hier einen interessanten Hinweis auf Geburtshelfer zu geben. Sie besteht im Wesentlichen aus einer großen heißen Gasblase, in der sich rund 20 junge Sterne befinden. Diese könnten mit ihrer intensiven Strahlung und einem Teilchenwind die Blase um sich

herum erzeugt haben. Am oberen Rand sitzt eine Wolke aus Gas und Staub, in der weitere Sterne geboren wurden.

Die Astronomen studierten RCW 34 spektroskopisch und ermittelten auf diese Weise das Alter der Sterne. Erstaunlicherweise sind die Gasbälle im Innern der Blase einige Millionen Jahre älter als diejenigen am Rand. Die Forscher vermuten daher, dass die erste Sternengeneration in diesem Nebel die Materie am Rand aufgeschoben und verdichtet und so die Entstehung der zweiten Generation ausgelöst hat.



PROTOSTELLARE SCHEIBEN MIT GROSSEM LOCH IN DER MITTE

Da stellt sich die Frage, ob grundsätzlich äußere Einflüsse nötig sind, damit Sterne entstehen können. Auch die expandierenden Wolken explodierter Sterne, sogenannter Supernovae, könnten das bewirken. Thomas Henning ist jedoch davon überzeugt, „dass Turbulenz in den Wolken allein dafür sorgen kann, dass sich einige Gebiete bis zur kritischen Dichte zusammenziehen“. Der Max-Planck-Direktor sieht darin den wesentlichen Mechanismus für das Einleiten der Sternentstehung. Doch wie entsteht die Turbulenz?

Die Sterne und Nebel in unserer Milchstraße (Galaxis) kreisen um deren Zentrum. Dabei sind Körper auf Innenbahnen schneller als auf äußeren. Da die Wolken Größen von mehreren Lichtjahren besitzen, bewegen sich ihre Teile unterschiedlich schnell – was zu inneren Verwirbelungen von Gas und Staub führt.

In weniger als einer Million Jahren werden sich die protostellaren Kerne von G011 so weit verdichten, dass sich um die Zentralkörper protoplanetare Scheiben ausbilden, in denen Planeten entstehen können. In diesem Stadium befinden sich bereits viele andere junge Sterne in der Galaxis, deren Beob-

achtung gerade in den vergangenen Jahren neue Aufschlüsse gebracht hat.

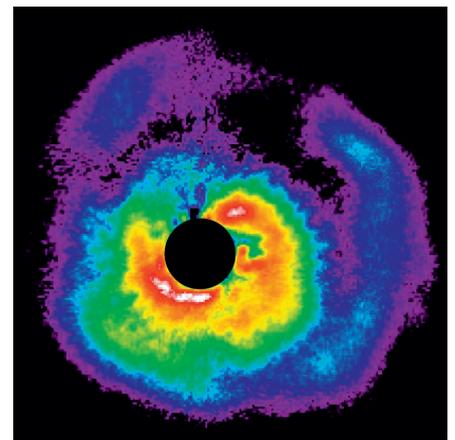
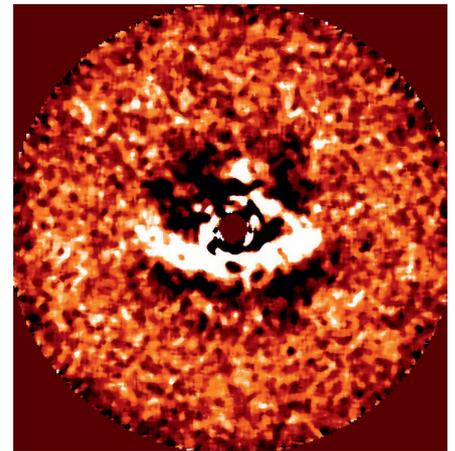
In sehr vielen Fällen lässt sich die Existenz dieser Scheiben nur indirekt über die von den Staubteilchen ausgesandte Infrarotstrahlung herausfinden. Da die Scheiben vom Zentralkörper erwärmt werden, nimmt ihre Temperatur von innen nach außen ab. Nach dem oben erwähnten Gesetz besitzt deshalb die Infrarotstrahlung aus dem Innenbereich eine kürzere Wellenlänge als die aus den Außenbezirken. Sehr häufig fehlt jedoch die kurzwellige Emission. Die Astronomen schlossen daraus, dass diese Scheiben ein großes zentrales Loch besitzen.

Zweifelsfrei beweisen ließ sich diese Theorie bis vor Kurzem jedoch nicht. Das gelang im vergangenen Jahr internationalen Forschergruppen um Christian Thalmann und Johan Olofsson vom Max-Planck-Institut für Astronomie. Thalmann und Kollegen beobachteten mit einer speziellen Kamera am japanischen *Subaru*-Teleskop auf Hawaii den jungen Stern LkCa 15. Die Aufnahme zeigte eine zentrale Lücke in der Scheibe, die so groß ist, dass die Umlaufbahnen aller Planeten unseres Sonnensystems bequem darin Platz fänden.

In einer zweiten Beobachtungsrunde mit *Subaru*, an der die Heidelberger Astronomen ebenfalls beteiligt waren, entdeckten sie um den 470 Lichtjahre entfernten Stern AB Aurigae eine kleinere Scheibe, die etwa so groß ist wie unser Sonnensystem. Sie besteht aus ineinander verschachtelten Ringen, die zudem asymmetrisch um den Stern herum liegen.

Max-Planck-Forscher Olofsson und seine Kollegen wurden außerdem bei dem 330 Lichtjahre entfernten, jungen Stern T Chamaeleontis (T Cha) fündig. Mit dem *Very Large Telescope* der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile fanden sie heraus, dass ein Teil des Schei-

Stellare Entwicklungsstufen: Zunächst verdichtet sich eine nahezu sphärische Wolke. Da sie sich dreht, zieht die Zentrifugalkraft sie zu einer Scheibe auseinander. In deren Zentrum wiederum ballt sich die Materie zum Stern, in den Außenbezirken formieren sich die Planeten.



Einblicke: Mit dem japanischen *Subaru*-Teleskop auf Hawaii gelangen Heidelberger Max-Planck-Astronomen und ihren Kollegen erstaunliche Aufnahmen von protoplanetaren Scheiben, wie der ringförmigen von LkCa 15 (oben) und der eher scheibenförmigen um den Stern AB Aurigae.

benmaterials einen dünnen Stauring in einem Abstand von nur 20 Millionen Kilometern vom Stern gebildet hat; das entspricht etwas einem Drittel des Bahnradius des sonnennächsten Planeten Merkur in unserem Sonnensystem. Hinter diesem Ring erstreckt sich ein weiter staubfreier Bereich, bis etwa 1,1 Milliarden Kilometer vom Stern. Dort beginnt der äußere Teil der Scheibe.

BEOBSACHTUNGEN AN DER NACHWEISGRENZE

Noch vor diesen direkten Sichtungen der Scheiben diskutierten Astronomen über die mögliche Ursache solcher Lücken. Denkbar erscheint es, dass die Sternstrahlung die Staubteilchen verdampfen lässt oder ein unentdeckter, sehr naher Stern den Staub aufammelt. Am stärksten favorisiert wird aber die These, dass sich ein Planet gebildet

hat. Er könnte Gas und Staub aufgesammelt und als Baumaterial für sich selbst verwendet haben. „Das ist natürlich die spannendste Möglichkeit“, sagt Thomas Henning.

Tatsächlich fand ein internationales Team zu Beginn dieses Jahres bei T Cha am äußeren Rand der großen Lücke einen mutmaßlichen Begleiter. Er befindet sich etwa eine Milliarde Kilometer von seinem Zentralstern entfernt, was etwas mehr als dem Abstand Jupiters von der Sonne entspricht. Mit diesen Beobachtungen bewegen sich die Astronomen jedoch am Rand des technisch Machbaren. Daher konnten sie nicht zweifelsfrei feststellen, worum es sich bei diesem Objekt handelt. Möglicherweise ist es ein neu entstandener Planet.

Dass in den protoplanetaren Scheiben Planeten heranwachsen, ist indes unbestritten. Mittlerweile haben die

Wissenschaftler bei älteren Sternen auch einige Exoplaneten direkt beobachtet. In wenigen Fällen war es sogar möglich, in deren Atmosphären Stoffe wie Wasser, Natrium, Methan und Kohlendioxid nachzuweisen. Doch das evolutionäre Bindeglied – nämlich den jungen Planeten in seiner Geburtscheibe dingfest zu machen – gelang noch nicht.

Bis vor Kurzem haben die Astronomen in den protoplanetaren Scheiben lediglich den Staub beobachtet. In der Gesamtmasse macht er jedoch nur etwa ein Hundertstel aus. Den überwiegenden Teil liefert Gas. Doch das ließ sich bisher nur sehr schwer beobachten, weil die von den Atomen und Molekülen ausgesandte Strahlung so außerordentlich schwach ist.

Das Gas spielt indes eine wesentlich Rolle bei der Entwicklung der gesamten Scheibe und der Entstehung



Im Heidelberger Max-Planck-Institut entwickeln und bauen die Astronomen auch neue Instrumente, etwa adaptive Optiken. Diese korrigieren die Auswirkungen der Luftunruhe und sorgen so für ein scharfes Bild. Sie spielen deswegen bei der Suche nach extrasolaren Planeten und Scheiben eine große Rolle.

entstehung sehr enge Grenzen“, erläutert Henning das Ergebnis. Hierbei muss man sich stets im Klaren darüber sein, dass all diese Aussagen genauso auf die Entstehung unseres eigenen Sonnensystems zutreffen müssen.

150 MOLEKÜLSORTEN IN INTERSTELLAREN WOLKEN

Und nicht zuletzt gibt es noch einen anderen Aspekt der Gasanalyse, der bei der Frage nach Leben eine Rolle spielen könnte. In den großen interstellaren Wolken haben Astronomen bisher rund 150 Molekülsorten gefunden, darunter komplexe organische Substanzen. In den protoplanetaren Scheiben gelang dies noch nicht. Gerade hier wäre es sehr spannend zu sehen, ob diese komplexen Vorläufermoleküle des Lebens die Entwicklungsphasen der Scheiben überstehen und womöglich unbeschadet auf die Oberflächen der jungen Planeten gelangen können.

Mit den derzeitigen Teleskopen lassen sich diese Bausteine des Lebens nicht aufspüren. Mit einigen empfindlichen Radioteleskopen und auch mit *Spitzer* und *Herschel* gelang es den Forschern des Max-Planck-Instituts für Astronomie aber immerhin schon, einfache Spezies wie Kohlenmonoxid und Wasser zu beobachten. Nun hoffen sie auf die nächste Generation von Teleskopen, wie das *Atacama Large Millimeter Array* (ALMA), eine aus etwa 50 fahrbaren Radioteleskopen bestehende Anlage, die derzeit in Chile gebaut wird und in den kommenden Jahren sukzessive in Betrieb gehen wird.

Neue kosmische Perspektiven verspricht außerdem der *Hubble*-Nachfolger, das Weltraumteleskop *James Webb*. Auch hieran sind die Heidelberger Max-Planck-Forscher beteiligt, entwickeln sie doch das Instrument MIRI, das im mittleren Infrarot arbeiten – und sicher die eine oder andere überraschende Entdeckung liefern wird. ◀

von Planeten. So übt es auf die winzigen Staubpartikel eine Reibung aus, wodurch diese, abhängig von der Größe, unterschiedlich stark abgebremst werden. Die Teilchen erhalten dadurch unterschiedliche Geschwindigkeiten, was die Wahrscheinlichkeit für Zusammenstöße erhöht und damit das Teilchenwachstum beschleunigt.

Außerdem sammeln die Riesenplaneten, wie bei uns Jupiter und Saturn, das Gas auf und bauen so ihre riesigen Atmosphären auf. Deswegen ist die Frage interessant, wie lange diese Scheiben überhaupt existieren. Denn das gibt die Zeitskala vor, in der sich die Planeten bilden müssen.

Die Heidelberger Astronomen haben diese Frage in der Praxis recht trickreich angepackt. In mehreren Sternhaufen mit Mitgliedern im Alter zwischen etwa einer und 20 Millionen Jahren bestimmten sie die Staub- und Gasmenigen in den Scheiben. Das Ergebnis war verblüffend: Gas und Staub nahmen ziemlich genau parallel zueinander ab, und das ziemlich rasch: Innerhalb von maximal zehn Millionen Jahren ist die Materie weitgehend verschwunden. „Das setzt der Zeitskala der Planeten-

GLOSSAR

Galaxis

Das Sternsystem, dem unser Planetensystem angehört. Die Galaxis (von dem griechischen Wort *galax* für Milch) besteht aus 150 bis 200 Milliarden Sonnen sowie interstellaren Gas- und Staubwolken. Das System besitzt mehrere Spiralarme und hat einen Durchmesser von etwa 100000 Lichtjahren. Von der Seite betrachtet, ähnelt die Galaxis einem Frisbee, das am Rand 5000 Lichtjahre dünn ist. Im Herzen der Milchstraße sitzt ein gigantisches schwarzes Loch. Die zentrale Verdickung ist von einem sphärischen Bereich (Halo) aus mindestens 150 Kugelsternhaufen umgeben.

Very Large Telescope (VLT)

Eine Anlage aus vier Teleskopen mit jeweils acht Meter Spiegeldurchmesser. Das VLT ist für Beobachtungen im sichtbaren Licht bis hin zum mittleren Infrarot ausgerichtet. Die Teleskope lassen sich zu einem einzigen virtuellen Teleskop mit großer Detailauflösung zusammenschalten – dem *Very Large Telescope Interferometer* (VLTi). Das Observatorium steht auf dem 2635 Meter hohen Cerro Paranal in den chilenischen Anden; betrieben wird es von der Europäischen Südsternwarte (ESO).

Protostellare Kerne

Sterne entstehen innerhalb von interstellaren Gas- und Staubwolken, die unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren. Im Zentrum einer solchen Wolke bildet sich schließlich eine massereiche Verdichtung heraus. Auf diesen protostellaren Kern regnet weiterhin Materie. Während er sich weiter langsam zusammenzieht, setzt er Gravitationsenergie in Wärme um. Diese strahlt der so entstandene Protostern in Form von Infrarotstrahlung ab. Um Protosterne können sich diskusförmige Scheiben ausbilden, in denen sich kleinere Himmelskörper entwickeln. Diese Vorläufer von Planetensystemen heißen protoplanetare Scheiben.

Weltraumteleskop James Webb

Das *James Webb Space Telescope* (JWST) soll das erfolgreiche Weltraumobservatorium *Hubble* ablösen. Mit seinem 6,5-Meter-Spiegel wird es im Infrarotlicht noch tiefer ins Universum blicken als sein Vorgänger. Allerdings wurde das Projekt der US-Raumfahrtbehörde NASA aus finanziellen Gründen kürzlich vorerst gestoppt. Ob das JWST, wie geplant, im Jahr 2018 starten kann, ist fraglich.