

GEBURT

**UND
TOD**

**DER
STERNE**

ÜBER DIE ENTWICKLUNGSPHASEN DER GESTIRNE

CORNELIS DULLEMOND & RALF S. KLESSEN

100 Jahre – so lange lebt kaum ein Mensch, in der Astronomie jedoch ist diese Zeitspanne fast bedeutungslos: Nicht einen einzigen vollständigen Umlauf um die Sonne kann der Planet Neptun in einem Jahrhundert zurücklegen; und unser Sonnensystem vollzieht in dieser Zeit weniger als ein Millionstel seiner Bahn um das Zentrum der Milchstraße. Wenn Menschen über kosmische Objekte nachdenken, müssen sie sich auf Zeiträume von Jahrmillionen und Jahr-milliarden einlassen. Die Begriffe Jung und Alt erhalten dabei gänzlich andere Dimensionen.

W

Wie die Menschen durchlaufen auch Gestirne verschiedene Lebenszyklen – von der Geburt, über Kindheit, Jugend, Erwachsensein und Alter bis hin zum Tod. Geboren werden die Sterne unserer Galaxie aus dem Gas der Milchstraße. Danach erleben sie eine Phase relativer Ruhe und Stabilität. Und schließlich sterben sie. Der Tod eines Sterns geht oft mit einer gewaltigen Explosion einher, bei der große Mengen an Energie und Materie frei werden. Das angereicherte

Material vermischt sich mit dem Gas der Milchstraße und wird in neue Sterne eingelagert. So schließt sich der kosmische Kreislauf. Auch wir Menschen bestehen im Wesentlichen aus Sternenstaub – aus Material, das aufgrund des Lebens und Sterbens vieler verschiedener Sternengenerationen immer weiter angereichert und in der Milchstraße verteilt worden ist.

Von der genauen Bestimmung der Elemente in Meteoriten wissen wir, dass unser Sonnensystem vor 4,567 Milliarden Jahren entstanden ist. Unserer Heimatgalaxie, die Milchstraße, ist etwa zehn Milliarden Jahre alt. Der Urknall – und damit der Beginn der Zeit und die Geburt des Universums – hat sich vor etwas mehr als 13,7 Milliarden Jahren ereignet. Wie passen diese immensen Zeiträume in unsere Begriffskategorien Jung und Alt? Steckt etwa die Sonne mit ihren derzeit 4,567 Milliarden Jahren noch in den Kinderschuhen, oder ist sie bereits „in die Jahre gekommen“? Um diese Fragen zu beantworten, gilt es zu verstehen, wie Sterne und Planetensysteme entstehen, welche Entwicklungswege sie durchlaufen und was langfristig aus ihnen wird. Dieser Themenkomplex ist ein Schwerpunkt der astronomischen Forschung in Heidelberg – sowohl im Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg als auch in den Heidelberger Max-Planck-Instituten für Astronomie und Kernphysik.

Der kosmische Zyklus von Werden und Vergehen

Auf den Ursprung unserer Welt können wir nur indirekt schließen. Wichtige Informationsquellen sind die Meteoriten – Gesteinsbrocken, die aus dem Asteroidengürtel des Sonnensystems, dem Gebiet zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter, auf die Erde gefallen sind. Meteoriten lassen sich auf der Erdoberfläche einsammeln und im Labor untersuchen. Die Analyse ihrer Zusammensetzung und die Datierung radioaktiver Zerfallsprodukte ermöglichen es uns, auf die Entstehungsgeschichte der Erde und anderer Planeten zurückzublicken. Auch Teleskope und Raumsonden können dazu beitragen, unsere kosmische Herkunft zu verstehen. Moderne Großteleskope vermögen die Planeten und Monde des heutigen Sonnensystems sehr genau zu



PROF. DR. CORNELIS DULLEMOND forscht und lehrt seit dem Jahr 2011 am Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg. Zuvor war er als Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und als Postdoc am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching tätig. Cornelis Dullemond hat in den Niederlanden studiert und promoviert. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Entstehung der Planeten und Exoplaneten, die Struktur und Entwicklung planetarer Geburtsstätten sowie die Wechselwirkung von Strahlung und Materie in astrophysikalischen Systemen.

Kontakt:
dullemond@uni-heidelberg.de

vermessen. Raumsonden sammeln Materialien im Weltall ein, die dann auf der Erde analysiert werden können. Vor wenigen Jahren ist es etwa einer Raumsonde gelungen, durch den Schweif des Kometen „Wild-2“ zu fliegen und dort Staubteilchen einzufangen. Die Daten dieser „Stardust Mission“ haben uns wichtige Informationen geliefert, wie sich der solare Urnebel, der Ursprung unseres Planetensystems, zusammensetzte. Dieser Erkenntnisprozess hat jedoch nicht erst mit der modernen Raumfahrt begonnen; seine Ursprünge liegen sehr viel weiter zurück: Schon Immanuel Kant (1724–1804) und Pierre-Simon Laplace (1749–1827) haben aus der Tatsache, dass alle Planeten in einer Ebene und in derselben Richtung um die Sonne kreisen, geschlossen, dass es diesen gemeinsamen rotierenden Urnebel gegeben haben muss.

Mit großen Teleskopen können wir sogar direkt in die „Kinderstuben“ gerade geborener Sterne schauen. Ungefähr 1500 Lichtjahre entfernt von unserer Erde – für astronomische Verhältnisse keine Distanz – befindet sich der Orion-Nebel.

Mit großen Teleskopen können wir sogar direkt in die „Kinderstuben“ gerade geborener Sterne schauen. Ungefähr 1500 Lichtjahre entfernt von unserer Erde – für astronomische Verhältnisse keine Distanz – befindet sich der Orion-Nebel. Er ist am winterlichen Nachthimmel mit bloßem Auge zu sehen: als schwacher Lichtfleck im Schwert des Sternbilds Orion. Dort entdeckt man eine Momentaufnahme der Geburt etwa 2000 junger Sterne. Andere nahe gelegene

„Kinderstuben“ finden sich in den Konstellationen Stier und Wasserträger. Mit Teleskopen wie dem „Very Large Telescope“ oder dem „Atacama Large Millimeter Array“ der Europäischen Südsternwarte in Chile können wir diese Gebiete mit hoher Auflösung untersuchen und das Werden neuer Sterne und ihrer Planeten in seinen verschiedenen Phasen beobachten.

Die Geburt der Sterne

Setzt man alle Beobachtungen und Berechnungen zu einem Bild zusammen, zeigt sich, dass neue Sterne immer dort entstehen, wo die Dichte des galaktischen Gases – der Rohstoff der Sterne – besonders hoch und die Temperatur besonders niedrig ist. Diese Gebiete nennt man Molekülwolken, da sie vor allem aus molekularem Wasserstoffgas bestehen. Die Eigenschaften der Wolken werden von dem komplexen Wechselspiel zweier gegensätzlicher Phänomene bestimmt: zum einen durch die Eigengravitation des Wasserstoffgases, die bewirkt, dass sich das Material immer weiter verdichtet; zum anderen durch die Überschallturbulenz, die im Verbund mit dem thermischen Gasdruck und dem interstellaren Magnetfeld bestrebt ist, das Wolkengas in alle Richtungen zu zerstreuen. Die Stärke dieser Prozesse schwankt innerhalb der Wolkengebilde. Sterne entstehen an solchen Orten, an denen die nach innen gerichtete Schwerkraft über die nach außen gerichteten Kräfte dominiert. Wie bei der irdischen Wetterprognose ist es uns dabei nicht möglich, genau vorherzusagen, wann und wo sich einzelne Sterne bilden und welche Masse sie haben werden. Dazu können wir nur statistische Aussagen machen.

Wenn einzelne Wolkengebiete – sogenannte prästellare Kerne – schließlich aufgrund ihres Eigengewichtes in sich zusammenfallen, bildet sich in ihrem Zentrum ein junger Protostern. In optischen Frequenzen ist er unsichtbar. Nur aufgrund seiner Wärmestrahlung ist er zu beobachten. Anfangs kann diese Strahlung noch rasch entweichen, und die Temperatur der Gase ändert sich kaum. Nach einigen Tausend Jahren jedoch wird das Zentrum für Strahlung undurchlässig. Temperatur und Druck steigen an, bis ein Gleichgewichtsähnlicher Zustand erreicht ist. Der rapide Kollaps kommt zum Erliegen, von außen aber fällt weiterhin neues Gas ein. Der Protostern im Zentrum sammelt dieses Material auf und gewinnt so an Masse. Einige Hunderttausend Jahre später ist das vorhandene Gasreservoir weitgehend aufgebraucht, und die dynamische Phase der Sternbildung beendet. Damit ist der Geburtsvorgang abgeschlossen – erwachsen ist der Stern aber noch lange nicht.

Kindheit und Jugend der Sterne

Der junge Stern leuchtet sehr hell und verliert deshalb an seiner Oberfläche kontinuierlich Energie. Unsere Sonne etwa strahlt im Moment mit rund 4×10^{26} Watt. Auf der Erdoberfläche kommen davon pro Quadratmeter durchschnittlich 1400 Watt an – diese Energie ist die Vorausset-

Dort entdeckt man eine Momentaufnahme der Geburt etwa 2000 junger Sterne.

CORNELIS DULLEMOND AND RALF KLESSEN

THE LIFE AND DEATH OF STARS

ON THE DEVELOPMENT STAGES OF CELESTIAL BODIES

“Young” and “old” are terms that one would not intuitively associate with stars. When we look at the night sky, the stars and constellations appear completely static. They look the same now as they looked when we were kids. Yet each star has a life story, albeit one that spans billions of years. Stars are born from giant interstellar gas clouds, and often their formation is associated with the birth of planetary systems.

After a few million years they are “grown up” and remain relatively stable until, many billions of years later, they die, either with a bang – a supernova explosion – or with a whimper – as a white dwarf star. In this article we follow this life story and relate it to our daily (and lifetime) experience. ●

PROF. DR. CORNELIS DULLEMOND has been teaching and conducting research at the Institute of Theoretical Astrophysics of Heidelberg University since 2011. Before that he was a research group leader at the Max-Planck Institute for Astronomy in Heidelberg and a postdoc at the Max-Planck Institute for Astrophysics in Garching. Cornelius Dullemond studied and earned his doctorate in the Netherlands. His main areas of research include the formation of planets and exoplanets, the structure and development of planetary birthplaces, and the interaction between radiation and matter in astrophysical systems.

Contact:
dullemond@uni-heidelberg.de

PROF. DR. RALF KLESSEN was appointed professor at the Centre for Astronomy of Heidelberg University in 2006 and is currently Executive Director of the Institute of Theoretical Astrophysics. After spending his postdoc years at the observatory in Leiden (Netherlands) and the University of California at Santa Cruz (USA), he conducted research at the Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam, where he headed an Emmy Noether group working on the theory of star formation. In 2002 Klessen received the Ludwig Biermann Award from the German Astronomical Society.

Contact:
klessen@uni-heidelberg.de

Using large telescopes we can see right into the “nurseries” of new-born stars. The Orion Nebula is located approximately 1,500 light years from our Earth – not far at all in astronomical terms. There we can find snapshots of the moment of birth of approximately 2,000 young stars.



PROF. DR. RALF S. KLESSEN wurde im Jahr 2006 an das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg berufen und ist zurzeit geschäftsführender Direktor des Instituts für Theoretische Astrophysik. Nach Postdoc-Jahren an der Sternwarte im niederländischen Leiden und an der University of California in Santa Cruz, USA, forschte er zuvor am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam, wo er eine Emmy-Noether-Gruppe zum Thema „Theorie der Sternentstehung“ leitete. 2002 erhielt Ralf Kleszen den Ludwig-Biermann-Preis der Astronomischen Gesellschaft.

Kontakt:
klessen@uni-heidelberg.de

zung für das Leben auf unserem Planeten. Den Verlust an Energie versucht ein junger Stern auszugleichen, indem er schrumpft. Dadurch setzt er Gravitationsenergie frei. Während des langsamen Verdichtens nehmen Temperatur und Druck im Innern des Sterns stetig zu. Bei unserer Sonne hat dieser Vorgang etwa 30 Millionen Jahre gedauert.

Herrscht infolge der Verdichtung im Zentrum des heranreifenden Sterns schließlich eine Temperatur von rund 15 Millionen Grad, setzen Kernfusionsprozesse ein, bei denen Wasserstoff über verschiedene Kernreaktionsnetzwerke zu Helium verbrennt. Die Kernfusion als Energiequelle ermöglicht es dem System, ein neues Gleichgewicht zu finden. Erst jetzt ist der Stern „erwachsen“. Seine Hauptlebensphase beginnt. Ein Stern wie unsere Sonne verbringt etwas mehr als neun Milliarden Jahre in diesem Stadium der relativen Ruhe und Stabilität. Mit ihren derzeit 4,567 Milliarden Jahren hat unsere Sonne also ziemlich genau die Halbwertszeit ihres Lebens erreicht und ist „in ihren besten Jahren“.

Auch Sterne sterben

Was aber passiert in der Endphase der Sternentwicklung, wenn der Brennstoff im Zentrum aufgebraucht ist? Woher nimmt der Stern nun die Energie, um weiter zu leuchten? In dieser Phase setzt erneut ein Verdichtungsvorgang ein. Er umfasst aber nicht mehr den gesamten Stern, sondern nur noch den dichten Kern. Die äußere Hülle des Sterns beginnt sich infolgedessen aufzublähen und kühlt gleichzeitig ab. Die Temperatur fällt von 6000 °C auf ungefähr 4000 °C. Jetzt leuchtet der Stern nicht mehr gelblich weiß, sondern rötlich – daher auch die Bezeichnung „Rote Riesen“ für Sterne, die sich ihrem Lebensende nähern.

Wenn unsere Sonne in diese Phase ihres Lebenszyklus gelangt, wird ihre maximale Ausdehnung irgendwo zwischen der Umlaufbahn von Venus und Erde liegen. Das bedeutet, Merkur und Venus, die inneren Planeten unseres Sonnensystems, werden von der Riesensonne verschluckt – unsere Erde wird gerade noch einmal davonkommen. Das aber wird etwaigen Erdenbewohnern wenig nutzen, denn die Sonnenoberfläche ist der Erde jetzt so nahe, dass die Temperatur auf der Erde stark ansteigt. Alle Ozeane verdampfen, die Atmosphäre verflüchtigt sich und alles Leben erlischt. Zurück bleibt ein unbewohnbarer Gesteinsbrocken wie der Planet Merkur oder der Mond.

Im Gleichgewicht für alle Ewigkeit?

Die bereits sehr ausgedehnte Hülle eines sterbenden Sterns wird sich nach einigen Millionen Jahren erneut um viele Größenordnungen aufblähen. Die äußeren Schichten entkoppeln sich dann von der Schwereanziehung und können ungehindert entweichen. Dabei kann es – abhängig von der Masse eines Sterns – zu einer spektakulären Explosion und einem plötzlichen Aufleuchten kommen, das die ursprüngliche Leuchtkraft des Sterns um das Milliardenfache über-

steigt. Dieses als Supernova bezeichnete Ereignis markiert den Tod eines sehr massereichen Sterns.

Was aber passiert in der Endphase der Sternentwicklung, wenn der Brennstoff im Zentrum aufgebraucht ist? Woher nimmt der Stern nun die Energie, um weiter zu leuchten?

Massearme Sterne wie unsere Sonne explodieren jedoch nicht. Das abfließende Gas des erlöschenden Sterns wird immer weiter verdünnt und schließlich durchsichtig. Wir erhalten einen freien Blick auf den zurückbleibenden Kern, den „Weißen Zwerg“. Weiße Zwerge sind extrem heiß und leuchten vor allem im ultravioletten Wellenlängenbereich. Ihre Strahlung vermag das zuvor ausgeworfene Material zu ionisieren, also Elektronen aus den Atomen herauszuschlagen. Finden diese Elektronen wieder zurück zu ihren Atomen, entsteht weitere Strahlung, diesmal von einer sehr charakteristischen Frequenz. Sind viele verschiedene Atome an diesem Vorgang beteiligt, entsteht ein wunderschön vielfarbiger „Planetarischer Nebel“.

Ein Weißer Zwerg ist sehr kompakt und verfügt nur noch über etwa die Hälfte der Masse des ursprünglichen Sterns. Er hat ein neues Gleichgewicht gefunden und wird vom „Entartungsdruck“ der Elektronen stabilisiert. Die moderne Quantentheorie erklärt, dass Elementarteilchen wie die Elektronen nicht zur gleichen Zeit und am gleichen Ort identische Quantenzustände annehmen können. Die Elektronen versuchen deshalb, sich möglichst weit voneinander zu entfernen und bewirken einen nach außen gerichteten Druck. Da dabei kein Material verloren geht, kann ein Weißer Zwerg in diesem Zustand sehr lange verharren. Seine Stabilität wird nur durch möglicherweise ablaufende quantenmechanische Zerfälle begrenzt. Alle gängigen Modelle sagen den Weißen Zwergen eine Lebenszeit von mindestens 10^{40} Jahren vorher – das ist Milliarden Milliarden Milliarden mal länger als das heutige Alter des Universums. Die Grabstätte unserer Gestirne ist also nahezu für die Ewigkeit angelegt. ●