

Sterne in Symbiose

Streifzüge durch das Hertzsprung-Russell-Diagramm, Teil 5

Sterne entwickeln sich normalerweise völlig unabhängig voneinander – solange sie einzeln stehen. In engen Doppelsternsystemen verläuft jedoch alles anders. Hier tauschen die Partner Materie aus und beeinflussen sich wechselseitig in ihrer Entwicklung. Die teils heftig und dramatisch ablaufende Wechselwirkung führt zu einer ganzen Palette an unterschiedlichen Arten von veränderlichen Sternen.

Von Werner Pfau

Biologen bezeichnen das vorteilhafte Zusammenleben unterschiedlicher Arten als Symbiose. Die beteiligten Individuen profitieren gegenseitig voneinander und bilden gemeinsam eine neue Qualität.

In die Astronomie wurde der Begriff im Jahre 1941 durch Paul W. Merrill (1887–1961) am Mount Wilson Observatory in Kalifornien

eingeführt, um die komplexen, aus Emissions- und Absorptionslinien zusammengesetzten Spektren bestimmter Sterne zu charakterisieren. Das führt auf die Betrachtung von Doppelsternsystemen und erklärt überraschende Besonderheiten, die physisch eng miteinander verbundene Sterne im Hertzsprung-Russell-Diagramm aufweisen können.

Ein Stern fügt sich nicht ins HR-Diagramm

Der Stern Algol im Sternbild Perseus gehört zweifellos zu den bekanntesten Sternen am Himmel. Er steht für bestimmte Doppelsterne, bei denen sich die Komponenten während ihres Bahnlaufs periodisch gegenseitig bedecken. Die damit verbundenen Helligkeitsänderungen machen sie zu so genannten Bedeckungsveränderlichen. Der Lichtwechsel kommt allein dadurch zustande, dass der Beobachter zufällig genau in die Bahnebene des Systems blickt; die Ursache liegt also in der räumlichen Orientierung und ist physikalisch eher unspektakulär.

Trotzdem hielt das Algolsystem eine große Überraschung bereit und gibt immer noch Rätsel auf: Wie sich vor etwa fünfzig Jahren herausstellte, hat die massereichere Komponente eine vergleichsweise zu hohe Leuchtkraft und ist, entgegen aller Erfahrung, in ihrer gesamten Entwicklung weiter fortgeschritten als der massereichere Stern. Dieser – die heutige Primärkomponente des Algolsystems – ist vom Spektraltyp B8, befindet sich noch auf der Hauptreihe (bezieht seine Energie also aus der Fusion von Wasserstoff zu Helium)

IN KÜRZE

■ Das nach dem Dänen Ejnar Hertzsprung (1873–1967) und dem US-Amerikaner Henry Norris Russell (1877–1957) benannte HR-Diagramm verknüpft Beobachtungsgrößen von Sternen (wie absolute Helligkeit und Spektralklasse) oder ihre physikalischen Zustandsgrößen (wie Leuchtkraft und Oberflächentemperatur).

■ Jeder Stern wird im HR-Diagramm als Punkt repräsentiert. Im Zuge der Sternentwicklung durchlaufen die Bildpunkte verschiedene Bereiche des Diagramms.

■ In einer Artikelreihe stellt der Autor die Bedeutung des HR-Diagramms, die Eigenschaften verschiedener Sterntypen und unser heutiges Wissen über die Sternentwicklung vor.

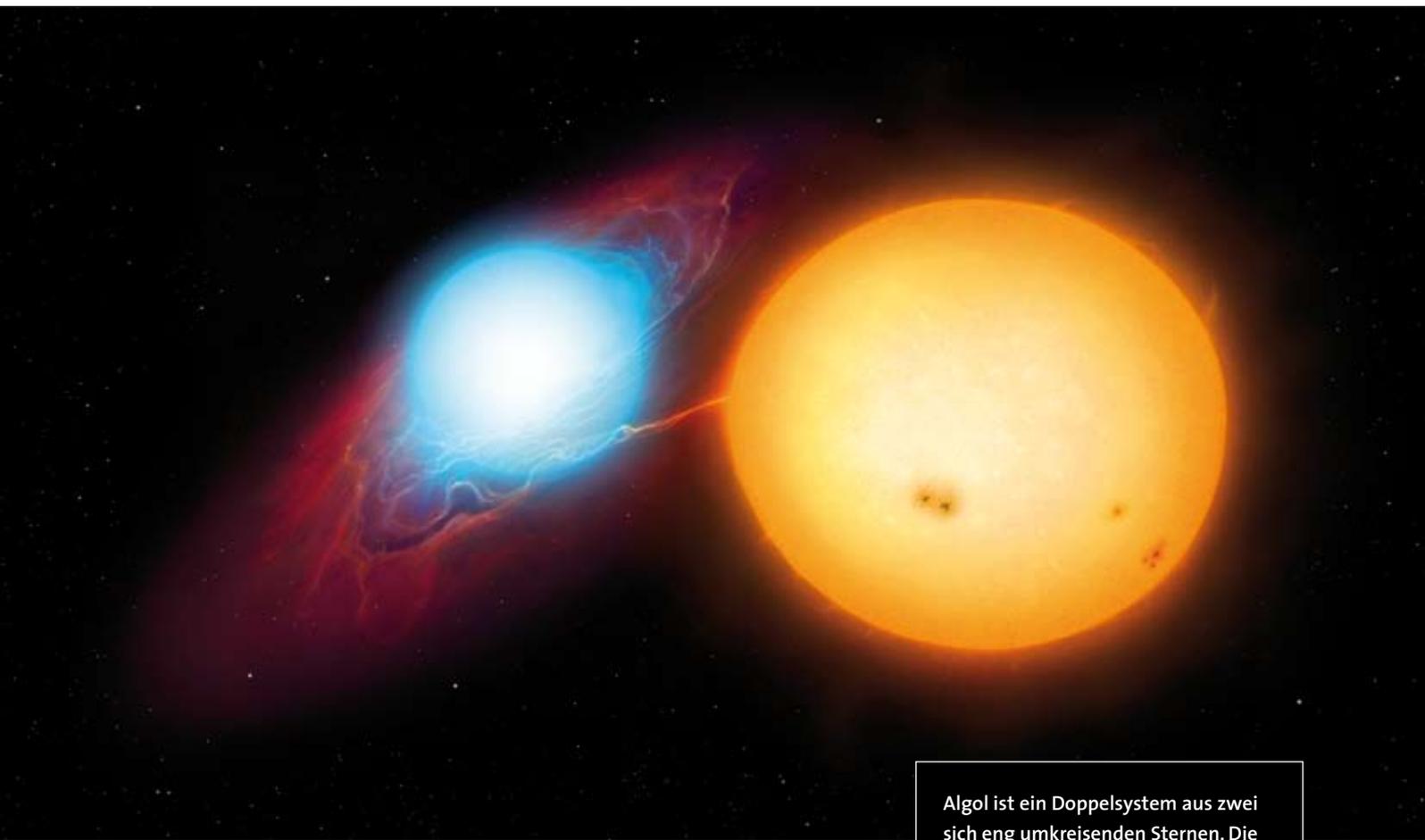
■ Bisher sind erschienen:

Teil 1: Von der Beobachtung zur Theorie der Sterne, SuW 6/2006, S. 32–40,

Teil 2: Das Diagramm als Abbild von innerem Aufbau und Entwicklung der Sterne, SuW 11/2006, S. 45–52,

Teil 3: Die Sternbevölkerungen in Galaxien, SuW 4/2007, S. 44–52,

Teil 4: Sterne – noch nicht auf der Hauptreihe, SuW 9/2007, S. 46–56.



Mark A. Garlick/space-art.co.uk

und weist die 3,7-fache Sonnenmasse auf. Der weitaus kühlere Begleiter dagegen fällt in den Bereich der Unterriesen, Spektraltyp K4 mit 0,8 Sonnenmassen (siehe Illustration oben und Grafik auf S. 38). Beide Sterne umkreisen einander mit einer Periode von nur etwa 2,9 Tagen. Die Bahn ist dementsprechend eng, und die Radien der Sterne machen 20 beziehungsweise 25 Prozent der großen Bahnhalbachse von lediglich 14 Sonnenradien aus.

Das vermeintlich so wenig interessante Algolsystem zeigt Strahlungsausbrüche sowie Kontinuums- und Linienemission im Röntgen- und Ultraviolettbereich des Spektrums. Der Ursprung der energiereichen Photonen liegt in der Korona des kühlen Sekundärsterns. Aus der Lichtkurve geht sogar hervor, dass die Oberfläche dieses Begleiters dunkle Sternflecke trägt.

Zur Vollständigkeit sei erwähnt, dass zum Algolsystem ein dritter Stern gehört. Dieser ist am Lichtwechsel nicht beteiligt. Er umläuft das Hauptpaar in 680 Tagen nahezu senkrecht zu dessen Bahnebene, seine Bahn hat eine große Halbachse von 2,75 Astronomischen Einheiten.

Um die Erklärung vorwegzunehmen: Die ungewöhnlichen Positionen dieser

und anderer Doppelsternkomponenten im Hertzsprung-Russell-Diagramm (siehe Grafik auf S. 38) lassen sich nur verstehen, wenn während der Sternentwicklung Masse von dem einen Partner zum anderen überströmt. Die Ursache liegt in der starken Ausdehnung im Verlauf der stellaren Entwicklung. Das hängt mit der Änderung der inneren Struktur als Folge des schwindenden Vorrats an Wasserstoff im Zentralgebiet zusammen: Das Zentralgebiet kontrahiert, die äußeren Zonen hingegen dehnen sich aus. Unsere Sonne zum Beispiel wird sich als roter Riesenstern bis zum 165-fachen ihrer heutigen Abmessungen aufblähen (siehe SuW 7/2008, S. 42).

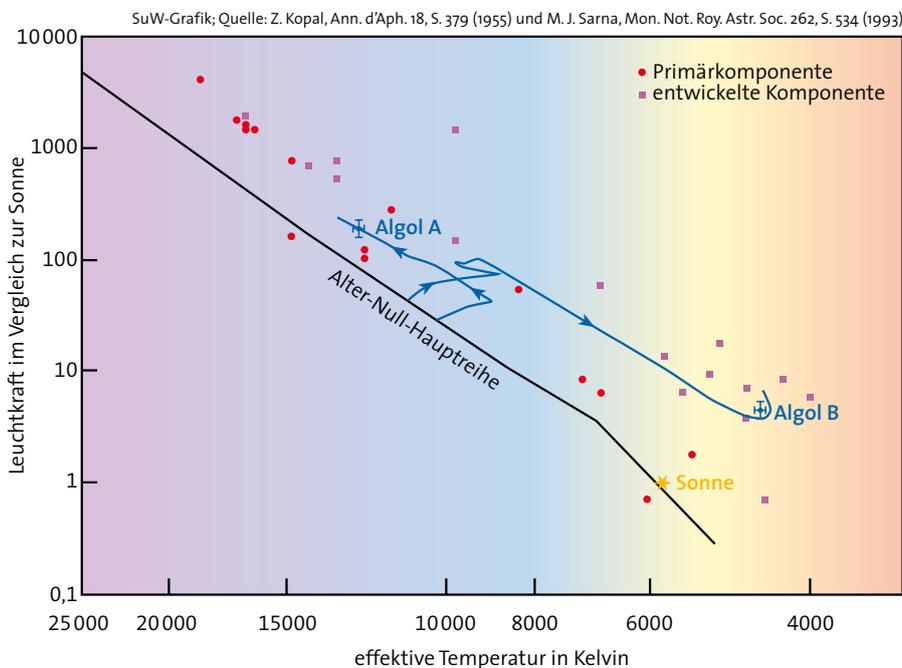
Algol ist ein Doppelsystem aus zwei sich eng umkreisenden Sternen. Die sekundäre Komponente, ein Unterriese (rechts), verliert Materie, die auf die massereichere Primärkomponente (links) überströmt. Dort, wo der Gasstrom auf den Hauptstern trifft, entsteht ein *hot spot* mit einer Temperatur von einigen hunderttausend Kelvin.



Wissenschaft in die Schulen!

und Schüler an Wissenschaft und Technik fördern und den fächerverknüpfenden Unterricht stärken. Das Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig unterstützt.

Zu diesem Beitrag stehen Ihnen didaktische Materialien auf unserer Internetseite www.wissenschaft-schulen.de kostenlos zur Verfügung. Damit möchten wir das Interesse der Schülerinnen



Trägt man die Zustandsgrößen Leuchtkraft und Temperatur von halbgetrennten Doppelsternsystemen in ein HR-Diagramm ein, so zeigt sich, dass sich nicht nur die entwickelten Sekundärkomponenten (lila Punkte), sondern auch bereits die Primärkomponenten (rote Punkte) von der Hauptreihe fort entwickelt haben. Die Entwicklungswege der Komponenten A und B des Algolsystems sind eingezeichnet. Unsere Sonne (gelb) befindet sich noch auf der Hauptreihe.

Eine solche Entwicklung zieht normalerweise keinen Nachbarn in Mitleidenschaft – dafür ist die räumliche Sterndichte in Galaxien viel zu gering. In Doppelsternsystemen, bei denen zwei Sterne durch ihre Gravitation aneinander gekoppelt und zum gegenseitigen Umlauf gezwungen sind, hängt es vom Abstand der Komponenten im Verhältnis zu ihren Radien ab, wie stark sich die Expansion eines Sterns auf den Begleiter auswirkt.

Enge Doppelsternsysteme

Man spricht von visuellen Doppelsternen, wenn der Winkelabstand der Komponenten so groß ist, dass beide im Teleskop getrennt abgebildet werden. In solchen Fällen sind auch die geometrischen Abstände groß, und es machen sich kaum gegenseitige Auswirkungen bemerkbar. Engere Systeme lassen sich in der Regel nur spektroskopisch über den Dopplereffekt nachweisen: Infolge der Bahnbewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt verschieben sich die Spektrallinien periodisch. Nur bei geeigneter Orientierung der Bahnebene kommt es – wie bei Algor – zu Bedeckungseffekten.

Für die engeren Systeme hat Zdeněk Kopal (1914–1993) im Jahre 1955 die Systemparameter bekannter Doppelsterne umfassend diskutiert und eine Klassifikation auf der Basis der beiderseitigen Raumerfüllung eingeführt (Grafik rechts).

Bei getrennten Systemen macht sich als milde Form der Beeinflussung die Deformation der Sternoberflächen durch den gravitativen Einfluss des Begleiters bemerkbar. Es können periodische Hellig-

keitsänderungen auftreten, wenn der nicht mehr kugelförmige Stern im Laufe seines Bahnumlaufs dem Beobachter unterschiedliche Flächen zuwendet. In der Klassifikation veränderlicher Sterne spricht man von einem Rotationslichtwechsel.

Es gibt jedoch enge Doppelsternsysteme, bei denen der Abstand der Komponenten nicht wesentlich – wenn überhaupt – größer ist als ihre Radien. In solchen Fällen gerät ein stark expandierender Stern in direkte Kollision mit seinem Begleiter. Es handelt sich dann um ein halbgetrenntes System oder, falls beide Sterne weit auseinander sind, um ein Kontaktsystem.

Welche Folgen sich aus diesen speziellen Geometrien ergeben, sei anhand des Potentials im Doppelsternsystem illustriert (Grafik rechts oben). Aus dem räumlichen Verlauf der Potenzialfläche lässt sich die Kraft ableiten, mit der ein in das System eingebrachtes Testteilchen an die beiden umlaufenden Sterne gebunden ist. In der nahen Umgebung einer der großen Massen dominiert deren Gravitationsanteil. Hier befindet sich das Teilchen tief in einem Potenzialtopf und kann sich stabil um den zugehörigen Stern bewegen. Expandiert der Stern jedoch und das Teilchen wird in wachsenden Abstand geschoben, so gelangt es in einen Bereich mit flacherem Potenzialverlauf, die Bindung sinkt.

Auf der Verbindungslinie beider Sterne hat die Potenzialfläche einen Sattelpunkt. Dort kompensieren sich alle Kräfteinflüsse auf das Teilchen. Dieser hervorgehobene Punkt trägt die Bezeichnung L_1 und ist einer der fünf für die Himmelsmechanik so bedeutsamen Librationspunkte.

Sie werden oft auch als Lagrangepunkte bezeichnet, zu Ehren des Mathematikers Joseph Louis Lagrange (1736–1813), der sie im Jahre 1772 in seiner Behandlung eines vereinfachten Dreikörperproblems gefunden hat. Wenn das Testteilchen als dritter Körper neben den beiden Sternen exakt in einen dieser Gleichgewichtspunkte gesetzt wird, so könnte es theoretisch dort ruhen und sich in unveränderlicher Konstellation mit den beiden Sternen um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Tatsächlich ist das Gleichgewicht in L_1 jedoch instabil, und die kleinste Lageänderung oder Störung der rivalisierenden Anziehungskräfte ließe es in den Einzugsbereich eines der beiden Sterne abwandern.

Die fünf Lagrangepunkte spielen auch in der Dynamik von Körpern des Sonnensystems eine interessante Rolle. L_1 und L_2 auf der Verbindungslinie von Sonne und Erde werden als Arbeitspositionen von Raumfahrtmissionen genutzt (zum Beispiel das Sonnenobservatorium SOHO in L_1 , künftig das James Webb Space Telescope in L_2). Die Punkte L_4 und L_5 , in Dreiecksanordnung mit Sonne und Jupiter, sind durch zahlreiche Planetoiden der Jupitergruppe, die Trojaner, besetzt.

Unsere Kenntnis des Potenzialverlaufs im Dreikörperproblem ist mit dem Namen des US-amerikanischen Mathematikers George W. Hill (1838–1914) verbunden. Er hatte die Bewegung des Mondes als einem »Testteilchen« im System Sonne–Erde himmelsmechanisch untersucht. Im Jahre 1878 konnte er zeigen, dass die beiden großen Massen in der Bahnebene von einer 8-förmigen Kurve gleichen Potentials,

einer Art Lemniskate, umschlossen sind. Sie schränkt die im System möglichen Bewegungen ein. Der Schnittpunkt des Kurvenzuges liegt in L_1 , die Ausdehnung der beiden Zweige der Grenzkurve richtet sich nach den Massen der großen Körper. Nur im Falle gleicher Massen ist der Punkt L_1 identisch mit deren Schwerpunkt.

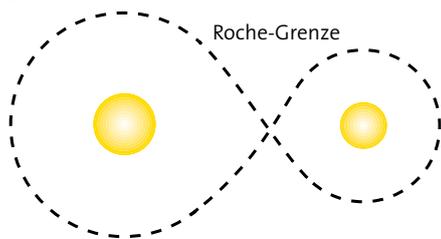
Die Arbeit von Hill steht in Verwandtschaft zu dem vom französischen Astronomen Édouard A. Roche (1820–1883) dreißig Jahre früher formulierten Problem der Stabilität eines Trabanten unter der Gravitationswirkung seines Mutterobjekts. Üblicherweise, wenn auch nicht korrekt, wird im Zusammenhang mit Masseströmen in engen Doppelsternsystemen von Roche-Grenze und -Volumen gesprochen.

Ein Stern läuft über

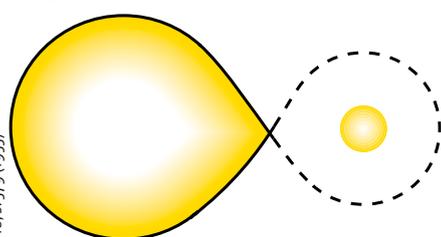
Solange die beiden Komponenten eines Doppelsternsystems ihr Grenzvolumen nicht weitgehend ausfüllen, ist es gerechtfertigt, den inneren Aufbau wie beim einzelnen Stern zu modellieren. Dann sind die Sternmasse und die chemische Zusammensetzung eindeutig bestimmend auch für die im HR-Diagramm eingetragenen Zustandsgrößen effektive Oberflächentemperatur und Leuchtkraft.

Erreicht der massereichere und deshalb in seiner Entwicklung vorausgehende Stern sein Grenzvolumen, setzt ein schnell

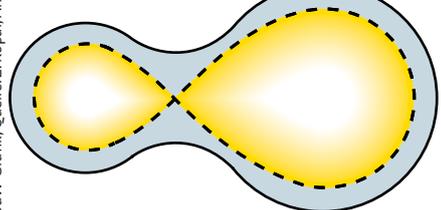
getrenntes Doppelsternsystem



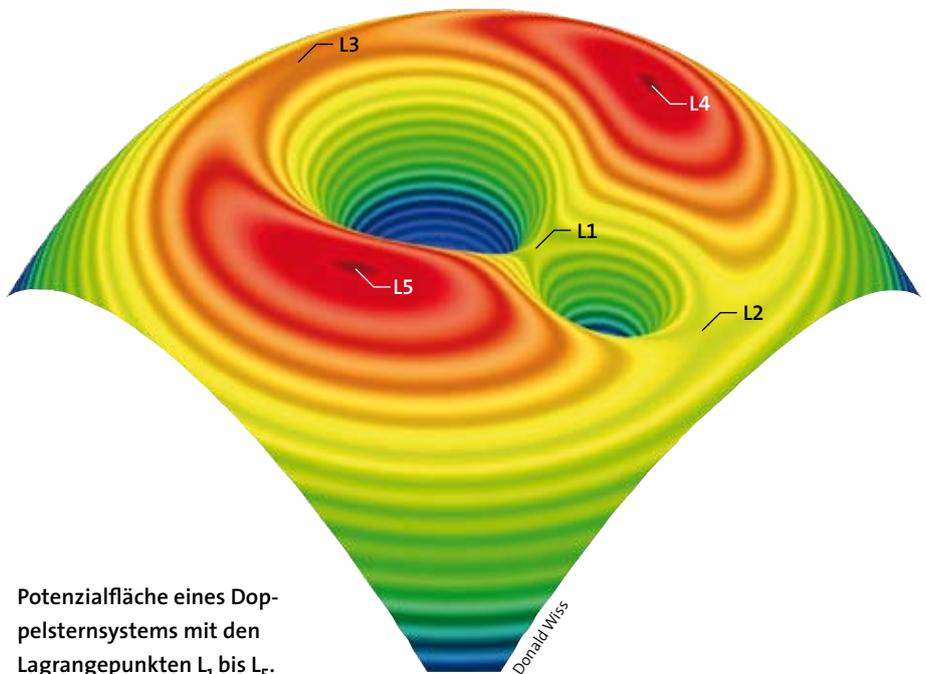
halbgetrenntes Doppelsternsystem



Kontaktsystem



SuW-Grafik; Quelle: Z. Kopal, Ann. d'Aph. 18, S. 379 (1955)



Potentialfläche eines Doppelsternsystems mit den Lagrangepunkten L_1 bis L_5 .

ler Massetransport zum Begleiter ein. Innerhalb von höchstens wenigen Millionen Jahren – einer kurzen Zeitspanne im Vergleich zu sonstigen Entwicklungszeitskalen – verliert er so viel Hüllenmaterial, dass sich das Masseverhältnis zwischen beiden Sternen umkehrt, der bisher masseärmere also zum neuen Primärstern wird. Der Vorgang kommt erst dann zum Halten, wenn der Stern wieder in sein Grenzvolumen hineinpasst und erneut Stabilität findet.

Ein solcher Massetransfer ist von fundamentaler Bedeutung für beide Sterne und geht insbesondere mit einer Änderung der Zustandsgrößen und folglich mit einer Wanderung im HR-Diagramm einher (Grafik links oben). Mit der Umschichtung von Masse im System ändern sich auch die große Bahnhalbachse und die Umlaufzeit.

Für das Algolsystem hat Marek J. Sarna ein Gitter von Entwicklungsmodellen unterschiedlicher Eingangsparameter gerechnet. Damit lässt sich der Entwicklungsweg im HR-Diagramm, von den derzeit beobachteten Positionen ausgehend, zeitlich rückwärts verfolgen und die Anfangskonfiguration ermitteln. Die beiden Komponenten A und B des Algolsystems begannen demnach ihr Dasein vor 455 Millionen Jah-

In der schematischen Klassifikation enger Doppelsternsysteme nach Zdenek Kopal unterscheidet man zwischen getrennten, halbgetrennten und Kontaktsystemen. Die Ausdehnung der Komponenten ist in Relation zu ihren Roche-Volumina zu sehen. Das Kontaktsystem ist zudem von einer gemeinsamen Gashülle umgeben.

ren auf der ursprünglichen, der Alter-Null-Hauptreihe mit Massen von 2,81 und 2,5 Sonnenmassen; die Umlaufzeit betrug 1,61 Tage. 452 Millionen Jahre später hatte sich die massereichere Komponente auf etwa das Doppelte ausgedehnt. Das reichte, das Roche-Volumen auszufüllen und den Massetransfer zum Begleiter auszulösen. Der zentrale Wasserstoffvorrat war in dieser Phase völlig aufgebraucht, die Fusion hatte sich in eine den Kern umgebende Zone verlagert. Als Folge des Masseabstroms reduzierte sich die Masse des »Spenders« innerhalb von nur drei Millionen Jahren um zwei Sonnenmassen auf den heutigen Wert von 0,81 Sonnenmassen.

Des Weiteren verdeutlichen die Modellrechnungen, dass die Entwicklung nicht unter Erhalt der Gesamtmasse beider Sterne und des Drehimpulses erfolgt sein kann. Von der dem Spenderstern verlorengegangenen Materie sind nur 1,2 Sonnenmassen beim Empfänger angekommen, der Rest hat sich in den interstellaren Raum verflüchtigt.

Wie die Beobachtungen zeigen, hält der Massetransfer zum jetzigen Hauptstern weiterhin an, inzwischen allerdings in reduziertem Maße. Die Verlustrate liegt mit jetzt nur etwa 10^{-11} Sonnenmassen pro Jahr weit unter derjenigen, die vor wenigen Millionen Jahren das Masseverhältnis beider Sterne umkehrte. Emissionslinien im ultravioletten Spektrum und die H-alpha-Linie lassen eine zeitweilige Akkretions-scheibe erkennen, und ein »hot spot« mit hoher Teilchendichte und der Temperatur von 10^5 Kelvin dicht am Stern markiert den Auftreffpunkt des Gasstroms.

Doppelsterne mit längeren Umlaufperioden bewegen sich auf entsprechend weiten Bahnen. Die Roche-Grenze wird dann, wenn überhaupt, erst in einem späteren Entwicklungsstadium erreicht. In solchen Fällen kann der Spenderstern seine Hülle bis tief nach innen zum heißen, chemisch entwickelten Kern verlieren. Das Ergebnis ist dann ein Wolf-Rayet-Stern oder ein heliumreicher Weißer Zwerg. Andererseits entwickelt sich aus einem engen halbgetrennten System ein Kontaktpaar, falls sich der Empfängerstern hinreichend schnell ausdehnt und dann seinerseits den Grenzradius erreicht.

Abgesehen vom Grundprinzip der Entwicklung in engen Doppelsternsystemen, ist der Verlauf des Massetransfers im Einzelnen noch nicht vollständig verstanden. Durch Beobachtungen in einem breiten Wellenlängenspektrum ist aber gesichert, dass der Massestrom beim empfangenden Stern und in seiner Umgebung energiereiche Strahlungsprozesse auslöst. Wenn Material den inneren Lagrangepunkt L_1 passiert, gelangt es in den Gravitationsbereich des Partnersterns und bewegt sich im nahezu freien Fall in dessen Richtung. Es werden Geschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern pro Sekunde erreicht, der Energieumsatz beim Auftreffen in der nahen Umgebung des Sterns oder auf diesem direkt führt zu einer starken Aufheizung und infolgedessen zu einer Emission von kurzweiliger Strahlung. Die Akkretionsleuchtkraft kann die Leuchtkraft des Sterns selbst weit übertreffen.

Das in L_1 übertretende Gas strömt wegen der Wirkung der Corioliskraft nicht direkt in radialer Richtung zum Stern. Im Koordinatensystem der umlaufenden Sterne erfährt es vielmehr eine seitliche Auslenkung. So hängt es vom Verhältnis von Sternradius zur großen Halbachse ab, ob der Gasstrom den Stern direkt trifft oder zunächst an ihm vorbei gelenkt wird und in eine Akkretionsscheibe einmündet. Dort wirken Reibungskräfte, die das Gas schließlich entlang spiraliger Bahnen auf den Stern gelangen lassen.

Kataklysmische Sterne

Die Auswirkungen des Masseaustauschs in engen Doppelsternsystemen werden mit zunehmendem Gravitationspotenzial – das heißt bei vor allem kleinerem Radius des Empfängersterns – heftiger. Algol als Kombination eines Unterriesen mit einem Hauptreihenstern stellt insofern einen

recht harmlosen Vertreter der Art dar. Die Wechselwirkungen können in bestimmten Fällen katastrophale Züge annehmen. Der Generalkatalog der veränderlichen Sterne (GCVS) fasst explosive und Nova-ähnliche Sterne in der Gruppe der kataklysmischen Veränderlichen zusammen. Die Bezeichnung leitet sich von dem griechischen Wort für »Sintflut« her.

Die Gruppe der kataklysmischen Veränderlichen ist bei Weitem nicht homogen definiert. Mit ihrer Vielfalt an Erscheinungsformen, den unterschiedlichen physikalischen Ursachen von Variabilität und der Variationsbreite der stellaren Parameter stellt sie eine eher verwirrende Sammlung von Typen dar. Ein Merkmal allerdings ist den meisten der kataklysmischen Veränderlichen gemeinsam: Es handelt sich um wechselwirkende Doppelsternsysteme. Die unterschiedlichen Bahngeometrien, Massen und Leuchtkräfte der Komponenten und die zeitliche Rate des Massetransfers bestimmen die Erscheinungsformen im Einzelnen.

Eine Ausnahme von der Regel bilden die Supernovae. Sie werden im genannten Katalog alle zur Gruppe der kataklysmischen Veränderlichen gezählt, wenngleich sie nur teilweise Doppelsternnatur haben.

Nahezu die Hälfte unter den kataklysmischen Veränderlichen machen die nach dem Prototypen U Geminorum benannten Sterne aus. Sie stellen die Verbindung eines kühlen Sterns, Spektraltyp K oder M, der sich auf oder nahe der Hauptreihe befindet, mit einem Weißen Zwerg dar. Der kühle Stern füllt seine Roche-Grenze aus und transferiert Gas zu dem kompakten

Die überströmende Materie löst beim empfangenden Stern energiereiche Strahlungsprozesse aus.

Primärstern, der in den meisten Fällen von einer Akkretionsscheibe umgeben ist. An der Auftreffstelle in der Scheibe ruft der Gasstrom einen heißen, hellen Fleck, den Hot Spot, hervor. Die Umlaufzeiten der U-Geminorum-Sterne liegen unter zwölf Stunden, ihre Lichtwechselbeiträge stammen aus verschiedenen Quellen. Bei günstiger Orientierung der Bahnebene kommt es für den Beobachter zu periodischen Bedeckungseffekten der Komponenten und der Scheibe.

Erst kürzlich hat Jörg Schirmer am Beispiel des Sterns U Geminorum die Möglichkeiten und den Nutzen von Amateurbeobachtungen solcher Sterne

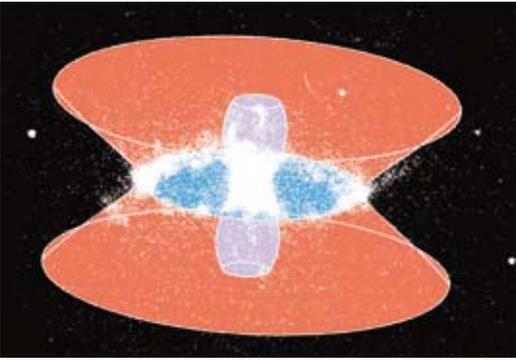


überzeugend demonstriert (siehe SuW 3/2008, S. 76). Seine CCD-Messungen zeigen, dass die Bedeckung des heißen Flecks einen Helligkeitsverlust von etwa 0,8 mag bewirkt. Die Umlaufperiode im System beträgt 4,2 Stunden.

Charakteristisch für alle U-Geminorum-Sterne sind Ausbrüche in Zeitabständen von Wochen bis Monaten. Die Helligkeitsanstiege betragen mehrere Größenklassen und halten jeweils einige Tage an. Dieses Verhalten hat den U-Geminorum-Sternen die rein phänomenologische Bezeichnung als Zwergnovae eingebracht. Im Zeitmuster unterscheiden sich die Objekte im Einzelnen. Ursächlich für die Ausbrüche ist der weitgehend regelmäßige Wechsel zwischen zwei bistabilen Zuständen der Scheibe. Der vom Begleiter kommende Gasstrom wird im äußeren Scheibenbereich zunächst gespeichert, bis sich dort eine Instabilität einstellt und große Teile der Scheibe von einem zunächst relativ kühlen Zustand bei einigen 10^4 Kelvin in einen im inneren Scheibenbereich zehnfach heißeren umkippen. Das im Außenbereich überschüssige Gas gelangt dann

sehr schnell durch die Scheibe hindurch nach innen und auf den Weißen Zwerg. Der Strahlungsausbruch stammt primär aus der Scheibe; entsprechend der hohen Temperatur ist die Auswirkung im Kurzwelligen viel stärker bemerkbar als bei optischen Wellenlängen.

Die nach dem Prototypen AM Herculis benannten Sterne gleichen als Doppelsysteme den kataklysmischen Sternen, unterscheiden sich aber im Akkretionsprozess. Der Empfängerstern gehört zu denjenigen Weißen Zwergen, die sich durch ein extrem starkes bipolares Magnetfeld auszeichnen. Es sind Werte der magnetischen Flussdichten von 10^4 Tesla und mehr gemessen wor-



SuW-Grafik; Quelle: J. Solf, H. Ulrich, A&A 148, S. 274

Der symbiotische Veränderliche R Aquarii ist umgeben von zirkumstellarem Gas in Form eines langgestreckten Ovals, überlagert von einer kleineren keilförmigen Struktur (links). Das Bild lässt sich als Resultat zweier bipolarer Ausströmungen interpretieren (rechts). Die Strahlung stammt jeweils aus einer dünnen Oberflächenschicht beider Blasen und ist nur nahe der Äquatorebene intensiv genug für den Nachweis.

den. Unter diesem Einfluss wird das in das Roche-Volumen einströmende Gas aus der Bahnebene des Systems gelenkt, zu einer Bewegung entlang der magnetischen Feldlinien gezwungen und stürzt in Form von zwei Akkretionssäulen in der Umgebung der beiden Magnetpole auf den Stern. An den Auftreffstellen wird die mechanische Energie des Gasstroms umgesetzt in Wärme- und Strahlungsenergie. Die lokal hohen Temperaturen machen die Sterne zu Quellen einer weichen Röntgenstrahlung. Auffällig wurde der Stern AM Herculis durch die starke Polarisation der Strahlung – dies ist ein Zeichen von Zyklotronstrahlung und ein Beleg für das Vorhandensein eines starken Magnetfelds. Die Geometrie der Akkretion macht verständlich, weshalb diese Sterne auch unter der Bezeichnung »Polare« geführt werden.

Zu den kataklysmischen Veränderlichen zählen auch die symbiotischen Sterne. Sie zeigen, dass der innere Lagrangeunkt L_1 nicht den einzigen Weg für einen Massetransfer in engen Doppelsternsystemen eröffnet. Die eigentlichen Vertreter der Gruppe bestehen aus einem kühlen Riesen oder Überriesen in Verbindung mit einem Weißen Zwerg. Begleiter kann auch ein heißer Stern auf dem Weg zum Stadium eines Weißen Zwergs, ein Hauptreihen- oder sogar ein Neutronenstern sein. Der kühle Stern füllt sein Grenzvolumen nicht aus, da die Komponenten weit getrennt, die Roche-Volumina also entsprechend ausgedehnt sind. Im Sinne der Klassifikation von Kopal hat man es mit getrennten Systemen zu tun. Der Massetransfer erfolgt in diesem Fall als intensiver Sternwind, der den Anziehungsbereich des Riesensterns mit mehr als der Entweichgeschwindigkeit allseitig verlässt und teilweise vom Begleiter eingefangen wird.

Ein Beispiel ist das System Z Andromedae, bei dem ein Riesenstern vom Spektraltyp M4 und der zweifachen Sonnenmasse mit einem massearmen Stern von

0,6 Sonnenmassen verbunden ist. Dieser Begleiter hat jedoch eine Oberflächentemperatur von 60 000 Kelvin und befindet sich im HR-Diagramm weit unterhalb der Hauptreihe am heißen Ende der Sequenz der Weißen Zwerge. Die Umlaufperiode des Systems beträgt 759 Tage, die Rate des Massetransfers 2×10^{-7} Sonnenmassen pro Jahr. Ein Eindruck von den Dimensionen lässt sich durch den Vergleich mit dem Algol-System gewinnen: Hat die große Bahnhalbachse dort eine Abmessung von nur 14 Sonnenradien, so kommt diese bei

In symbiotischen Sternen erfolgt der Massetransport durch einen intensiven Sternwind.

Z Andromedae auf etwa den Erdbahnradius. Es ist übrigens kein Bedeckungssystem; Francis C. Fekel und seinen Koautoren gelang es im Jahre 2000, eine Periode aus der mit dem Umlauf variierenden Reflexion von Strahlung des Weißen Zwergs an der Oberfläche des Riesensterns zu ermitteln.

Der Begriff eines symbiotischen Sterns war im Jahre 1941 durch Paul W. Merrill geprägt worden, um die komplexen Spektren bestimmter Sterne zu charakterisieren. Diese zeigen gleichzeitig Signaturen einer kühlen Sternatmosphäre, zum Beispiel Molekülbanden von Titanoxid, wie auch das kontinuierliche Spektrum eines heißen Sterns zusammen mit Spektrallinien mehrfach ionisierter Atome und des ionisierten Heliums. Als dritter Anteil kommt das typische Spektrum von ionisiertem Gas aus einer gemeinsamen Hülle hinzu. Das Gas stammt vom Riesenstern und wird auf der dem heißen Begleiter zugewandten Seite zum Leuchten gebracht.

Ein interessantes Beispiel ist R Aquarii, bei dem der Sternwind eines pulsierenden Veränderlichen in den Einflussbereich des kleinen, heißen Begleiters kommt. Die Lichtkurve ist vor allem geprägt durch die Periode des Mirasterns von 387 Tagen, und

die visuellen Helligkeiten wechseln normalerweise zwischen etwa 6 und 12 mag. Diese Amplitude von bis zu sechs Größenklassen reduziert sich für Zeiträume von einigen Jahren auf nur noch eine Größenklasse. Solche Phasen sind mit spektroskopischen Änderungen verbunden, die auf Bedeckungseffekte durch eine mit dem heißen Begleiter verbundene Gaswolke hinweisen. Das gesamte System des symbiotischen Veränderlichen ist umgeben von gasförmiger Materie, aus deren Struktur und Bewegungsverhalten auf einen Ursprung in zwei novaähnlichen Ausbrüchen des heißen Sterns vor 640 Jahren und noch einmal vor 185 Jahren geschlossen werden kann. Radioastronomisch und im Röntgenbereich fällt eine jetartige Struktur auf, die mit der Akkretionsscheibe um den heißen Stern zusammenhängt. Vom Satelliten Chandra gewonnene Daten lassen aus den zeitlichen Veränderungen der knotigen Jet-Struktur auf eine Bewegungsgeschwindigkeit von 600 Kilometern pro Sekunde schließen. Josef Solf untersuchte das Ge-

biet spektroskopisch und konnte zusammenfassend die beobachteten Emissionen zwei bipolaren, keulenförmigen Schalen zuordnen, die auf die damaligen Ausbrüche zurückgehen (Bild auf dieser Seite).

Selbstverständlich sind die Dimensionen der einschlägigen Doppelsternsysteme viel zu klein, als dass die Abbildung selbst mit Methoden der Interferometrie möglich wäre. Zur bildlichen Darstellung der Strukturen müssen deshalb andere Verfahren zum Einsatz kommen. Sie werden oft summarisch Tomografie genannt und laufen darauf hinaus, die Bahnbeziehung des Objekts zu nutzen, um es bei unterschiedlichen Blickwinkeln zeitaufgelöst zu untersuchen. Angewendet werden dabei photometrische wie auch spektroskopische Verfahren. Zum Beispiel lässt der periodische Anteil der Lichtkurve, der Ausdruck des Bedeckungsvorgangs ist, auf die Struktur der Strahlungsquelle schließen. Dazu wird von einem ersten räumlichen Modell des Systems ausgegangen, der dementsprechende Lichtwechsel abgeleitet und durch schrittweise Änderungen im Modell eine immer bessere Anpassung an die konkreten Beobachtungsergebnisse versucht. Der notwendige Rechenaufwand

ist beträchtlich, das Verfahren aber im Grundsatz erfolgreich. Verfeinerungen sind möglich, wenn statt integraler Daten die Photometrie bei den Wellenlängen spezieller Spektrallinien erfolgt.

Ein noch allgemeiner wirksames Verfahren ist die Dopplertomografie. Dabei werden zu verschiedenen Umlaufphasen hochauflösende Emissionslinienspektren des Gesamtsystems aufgenommen. Jedes einzelne von ihnen liefert die Stärke der Emissionsanteile in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zum Beobachter, und zwar in einer bestimmten Schnitttrichtung durch das Objekt.

Ein Stern explodiert

Die Kombination von kühlem Hauptreihenstern und Weißem Zwerg in einem engen Doppelsternsystem kann nicht nur zum Phänomen der U-Geminorum-Sterne, auch Zwergnovae genannt, führen, sondern gilt auch als Ursache für die viel heftigeren klassischen Novae. Der Begriff Nova ist gebildet als Verkürzung des lateinischen *nova stella*, neuer Stern, und bringt in historischer Sicht die Entdeckung eines vorher nicht beobachteten Sterns zum Ausdruck, erstmalig vielleicht in Tycho Brahes Schrift zur (Super-)Nova des Jahres 1572.

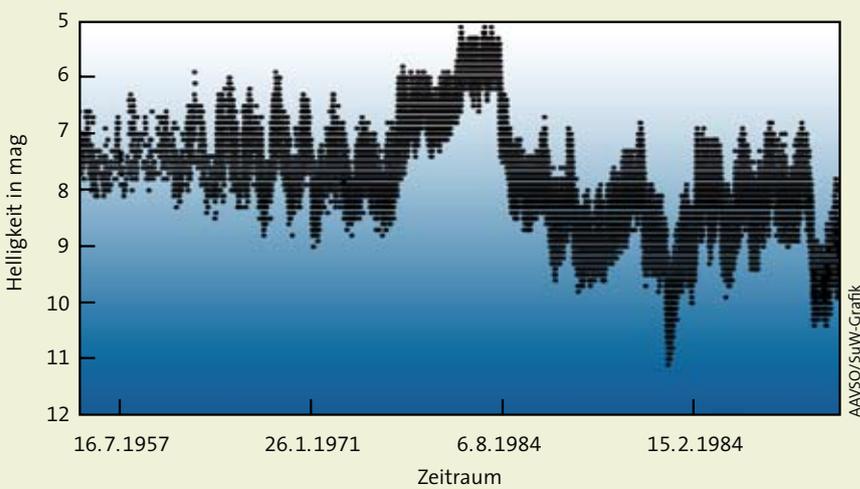
Der Generalkatalog der veränderlichen Sterne (GCVS) listet 282 Novae auf, die im Milchstraßensystem entdeckt worden sind. Im visuellen Spektralbereich kann der Helligkeitsanstieg einer Nova bis zu 15 mag, ausnahmsweise sogar mehr betragen. Der zeitliche Verlauf nach dem Maximum unterscheidet sich von Objekt zu Objekt. Die Novae werden im Katalog zu den kataklysmischen Veränderlichen gezählt. Ein Beleg für ihre Doppelsternnatur ist der Bedeckungslichtwechsel mit Perioden im Bereich weniger Stunden, der bei einer ganzen Reihe ehemaliger Novaerscheinungen nachgewiesen werden konnte. Der physikalische Unterschied zum Verhalten der U-Geminorum-Sterne liegt in der zeitlichen Rate, mit der unverbrauchtes Gas vom Begleitstern letztlich auf den Weißen Zwerg gelangt.

Als Stern hat ein Weißer Zwerg eigentlich ein stabiles Endstadium erreicht. Die Radien solcher Sterne übertreffen kaum denjenigen der Erde, die Leuchtkraft ist demgemäß nur gering. Im HR-Diagramm besiedeln die Weißen Zwerge einen Streifen weit unterhalb der Hauptreihe. Es ist eine Abkühlsequenz, die den Entwick-

Der Stern CH Cygni

Ein schönes Beispiel für die komplexen Helligkeitsänderungen symbiotischer Veränderlicher liefert der Stern CH Cygni. Bis ins Jahr 1976 zeigte sich der Lichtwechsel ziemlich periodisch. Danach erfuhr der Veränderliche einen Anstieg auf die Helligkeit von 5,6 mag, bald gefolgt von einem schnellen Abfall. Seitdem zeigen sich unvorhersagbare Schwankungen um einen mittleren Wert von 9 mag. Die American Association of Variable Star Observers (AAVSO) empfiehlt die Beobachtung des Sterns dringend. Viele Amateurastronomen verfügen heute über die Ausrüstung zur Gewinnung zuverlässiger Messdaten, so dass sie wesentlich zur Langzeitüberwachung symbiotischer Sterne beitragen können.

Eine umfassende Datensammlung ist erforderlich, um den Lichtwechsel solcher Objekte genauer kennenzulernen und Verknüpfungen mit dem spektroskopischen Verhalten und sonstigen Erscheinungen der Sterne erkennen zu können.



Lichtkurve nach Daten der AAVSO

lungsweg im Verlauf einiger weiterer Milliarden Jahre vorzeichnet.

Ein Weißer Zwerg hat die entsprechend seiner ursprünglichen Masse möglichen Fusionsreaktionen des Wasserstoff- und Heliumbrennens durchlaufen, das Sterninnere ist bei der Mehrzahl von ihnen mit Kohlenstoff und Sauerstoff als den Produkten der Fusion von Helium angereichert. Die Teilchendichte im Inneren ist so hoch, dass man von einem »entarteten Gas« sprechen muss. Dessen Druck kann den Stern in einem stabilen Gleichgewicht halten – vorausgesetzt, die Sternmasse ist nicht größer als etwa 1,4 Sonnenmassen. Dieser Wert ist bestimmend für den späten Entwicklungsweg von Sternen und ist bekannt als Chandrasekhar-Grenze, benannt nach dem Physiker Subrahmanyan Chandrasekhar. Oberhalb des entarteten Sterninneren liegt eine ganz dünne Schicht von restlichem Wasserstoffgas, das die Temperatur- und Dichtevoraussetzungen für den Ablauf von Fusionsprozessen bis dahin nicht erreicht hat. Eingebunden in ein enges Doppelsternsystem kann dem

Weißen Zwerg wasserstoffreiches Gas vom Begleiter zugeführt und die Masse seiner Atmosphäre vergrößert werden. Diese Wiederbelebung als Stern kann ein kritisches Stadium einleiten.

Wird im Akkretionsprozess Gas auf den Weißen Zwerg deponiert, dann führt das wegen der Umwandlung potenzieller Energie zu einem Temperaturanstieg in der Übergangsschicht zwischen entartetem Kern und Hülle. Ist der Massetransfer hinreichend groß, so steigt die Temperatur in der Schale in deutlichem Maße. Der Grad der Entartung sinkt, es ist stabiles Wasserstoffbrennen in einer dünnen Schale möglich, und die ganze Hülle dehnt sich aus. Der Weiße Zwerg kann sich auf die Dimension von Hauptreihensternen oder Unterriesen aufblähen. Verstärkter Verbrauch des Wasserstoffs oder auch ein eigener Sternwind des mutierten Objekts können dann irgendwann die Episode beenden, der Stern geht unspektakulär in den Zustand eines Weißen Zwergs zurück.

Voraussetzung für einen derart ruhigen Ablauf ist die Zufuhr von mindestens 10^{-7}

Sonnenmassen pro Jahr. Eine so hohe Transferrate wird im Doppelsternsystem im Allgemeinen nicht erreicht. Unter weniger ergiebigen Verhältnissen kann sich nur ein instabiles Brennen einstellen, das zwischenzeitlich »verhungern« muss. Jetzt erfährt der Weiße Zwerg lediglich zeitlich isolierte Strahlungsausbrüche, die aber umso heftiger verlaufen, je geringer die Akkretionsrate ist. Die Ausbrüche können immer dann auftreten, wenn sich genügend Wasserstoff angesammelt hat, doch bis dahin gerät das Gas bei steigender Dichte immer stärker in den entarteten Zustand und verhält sich kritisch gegen jede Art von Energiezufuhr.

Die Beschreibung eines Novaausbruchs durch Modellbildung, dem typischen Werkzeug astrophysikalischer Forschung, ist mit hohem theoretischen und numerischen Aufwand verbunden. Hier geht es nicht um die statische Beschreibung des inneren Aufbaus eines Sterns. Jetzt muss das ganze System von Gleichungen formuliert und gelöst werden, das die Energieerzeugungs- und -transportprozesse, die Gasströmungen, Akkretions- und Masseverlustprozesse gleichzeitig beschreibt, und das auch während des explosiven Vorgangs mit seinem zeitlich schnellen Ablauf der Ereignisse.

Der mit dem Akkretionsprozess verbundene langsame Temperaturanstieg nahe der Oberfläche des Weißen Zwergs reicht schließlich zur Zündung der Wasserstofffusion in einer dünnen Schale. Der Energiebeitrag bleibt zunächst vergleichsweise gering, ist unter den Bedingungen des entarteten Gases aber nicht mit einem Druckanstieg, sondern lediglich mit immer schneller wachsender Temperatur verbun-

mit starkem Druckanstieg. Es bildet sich eine Stoßwelle, die nach außen durch die Hülle läuft und zusammen mit den energiereichen Photonen aus dem heißen »Reaktor« Impuls auf das Gas überträgt. Dem kann die Gravitation als Gegenkraft nicht standhalten, es kommt zur Expansion und Ablösung einer Oberflächenschicht des Sterns mit der Geschwindigkeit von einigen tausend Kilometern pro Sekunde.

Wenige Stunden nach dem eigentlichen Ausbruch erreicht die abgestoßene Hülle eine Abmessung von hundert Sonnenradien und die Novaerscheinung damit ihre maximale Helligkeit; das Spektrum gleicht demjenigen eines Überriesensterns der Spektralklasse A. Die Hülle ist geometrisch so weit ausgedehnt, dass sie beide Komponenten im Doppelsternsystem einschließt, ihre Masse umfasst wenig mehr als 10^{-6} Sonnenmassen und ist angereichert mit chemischen Isotopen aus dem Fusionsprozess. Die Ausbrüche klassischer Novae bilden für einige Isotope die Hauptquelle in unserem Milchstraßensystem.

Auch nach dem Maximum bleibt die Leuchtkraft der Nova noch monatelang hoch. Allerdings verlagert sich die Ausstrahlung in den ultravioletten Bereich, die visuelle Helligkeit erreicht nun den absteigenden Teil der Lichtkurve. Langsam, mit einer Zeitskala von 10 000 Jahren, und unter ständiger Abnahme der Leuchtkraft als Folge von Abkühlung und Kontraktion, kehrt der Weiße Zwerg zu seiner Ruheleuchtkraft zurück. Damit gewinnt der geringe Energiebeitrag aus dem anhaltenden Akkretionsstrom wieder an Bedeutung – ein neuer Zyklus beginnt und der Novaausbruch des Weißen Zwergs wird sich wiederholen.

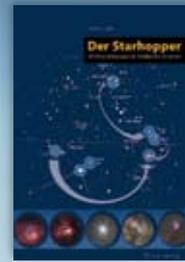
Binnen Minuten kann ein Weißer Zwerg als Zwergnova ausbrechen – und dies viele Male wiederholen.

den. Konvektion und Durchmischung der chemischen Elemente tragen dazu bei, dass sich die Brennschale ausweitet, der nukleare Anteil an der Energieerzeugung steigt exponentiell an.

Da das Hüllengas nicht durch Expansionsarbeit abkühlt, gerät es in eine thermonukleare Havarie: Innerhalb von Minuten erreicht die Temperatur in der Schale 2×10^8 Kelvin, viel mehr als die Zentraltemperatur des Weißen Zwergs beträgt. Bei solch hoher Temperatur wird die Entartung aufgehoben, das Gas nähert sich dem uns gewohnten Verhalten und reagiert

Zeitskalen dieser Größenordnung entziehen sich der direkten Beobachtbarkeit. Dennoch ist bei einigen Novae mindestens ein zweiter großer Ausbruch nachgewiesen worden. Sie werden als wiederkehrende oder rekurrende Novae bezeichnet und zeichnen sich wahrscheinlich durch eine größere Massetransportrate und eine nahe der Obergrenze liegende Masse des Weißen Zwergs aus. Bisherige Rekordhalter sind die Systeme U Scorpii und RS Ophiuchi, bei denen von zehn beziehungsweise sechs beobachteten Ausbrüchen berichtet wird.

NEU BEI OCULUM



■ Der Starhopper

20 Himmelstouren für Hobby-Astronomen

2008, 156 S. m. 76 Ktn., 149 Fotos u. Zeichn., kart., Oculum Astro-Praxis.

Bestell-Nr. 2556.

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Glitzernde Sternhaufen, leuchtende Nebel, ferne Galaxien:

Deep-Sky-Objekte sind faszinierend, doch mit dem eigenen Teleskop oft gar nicht leicht zu finden. Dieses Buch beschreibt leicht verständlich wie man am Himmel navigiert, ohne vom Weg abzukommen. Dabei werden sowohl Aufsuchmethoden für moderne Computer-Steuerungen als auch für herkömmliche Teleskope beschrieben. Die Himmelstouren des Starhoppers erschienen von 1994 bis 2006 in der Astronomiezeitschrift *interstellarum*. Aus insgesamt 30 Touren wurden die schönsten ausgewählt und für dieses Buch neu aufbereitet.



Lambert Spix

■ Skyscout

Sterne und Sternbilder einfach finden.

Eine praktische Orientierungshilfe für Sternfreunde, komplett mit Himmelsansichten,

Aufsuchhilfen, Karten und Beschreibungen.

2., verb. Aufl. 2008, o. Pag., m. 4 Jahreszeiten-, 4 Übersichts-, 8 Detailkarten, kart., Oculum.

Bestell-Nr. 2109. € 9,90 (D), € 10,20 (A)

Der Skyscout ist als »Immer-dabei-Werkzeug« für Sternfreunde konzipiert. Einsteiger lernen einfach, Sterne und Sternbilder zu finden und Amateur-astronomen finden eine kompakte und robuste Aufsuchhilfe für ihre Lieblingsobjekte.



Stefan Binnewies, Wolfgang Steinicke, Jens Moser

■ Sternwarten

95 astronomische Observatorien in aller Welt

2008, 304 S. m. 217 meist farb. Abb., geb., Oculum.

Bestell-Nr. 2558.

€ 49,90 (D), € 51,30 (A)

Sternwarten sind als »Fenster zum Himmel« ganz besondere Orte – wissenschaftlich, architektonisch und historisch. Sie symbolisieren die Sehnsucht des Menschen, seinen Platz im Kosmos richtig einordnen zu können. Der einzigartige Bildband fängt diesen Geist auf. 95 Sternwarten auf fünf Kontinenten werden in Wort und Bild vorgestellt: von den großen Refraktoren des 19. Jahrhunderts über die riesigen Spiegel des 20. Jahrhunderts bis hin zu den gigantischen Astronomie-Tempeln heutiger Zeit.

Mehr Informationen finden Sie unter:
www.science-shop.de/oculum



Bequem bestellen: → per E-Mail info@science-shop.de
→ telefonisch 06221 9126-841

Bestellungen in D & A unter € 20,- sowie Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir mit € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsges. mbH



Al Kelly/Arne Henden/US Naval Observatory

Die Nova GK Persei erreichte im Jahre 1901 innerhalb von zwei Tagen die scheinbare visuelle Helligkeit $m_{\text{vis}} = 0,2 \text{ mag}$. Vor dem Ausbruch erschien sie als 13 mag heller Stern. Mit einem Helligkeitsabfall um 3 mag bereits in den ersten 13 Tagen gehört GK Persei zu einem sehr schnellen Typ von Novae. Die Strukturen des mit 1200 Kilometer pro Sekunde abströmenden Gases verdeutlichen die Wechselwirkung mit dem umgebenden interstellaren Material.

Zu den schnellen Novae gehört GK Persei 1901 (Bild oben). Seit einigen Jahrzehnten fällt dieser Stern durch quasiperiodische, etwa alle drei Jahre auftretende Ausbrüche um bis zu drei Größenklassen auf, ähnelt also zurzeit den U-Geminorum-Sternen. Bereits sechs Monate nach dem großen Ausbruch waren diffuse Emissionen entdeckt worden, die offensichtlich mit dem Novaausbruch in Verbindung standen, sich aber mit unerklärlich hoher Geschwindigkeit zu bewegen schienen. Tatsächlich waren damals nur Lichtechos an vorgelagerter interstellarer Materie beobachtet worden. Später hielt GK Persei eine weitere Überraschung bereit: Im Jahre 1980 wurde bei der ehemaligen Nova Röntgenstrahlung nachgewiesen und sie als magnetischer kataklysmischer Stern erkannt. Die bisher hellste Nova (V603 Aql) konnte 1918 beobachtet werden und erreichte mit $m_{\text{vis}} = -1,1 \text{ mag}$ die Helligkeit von Sirius.

Doppelsterne als Quelle von Röntgenstrahlung

Die vom Akkretionsstrom an der Oberfläche der Weißen Zwerge in engen Doppelsystemen gespeisten Fusionsreaktionen sind mit hohen Temperaturen und der Emission energiereicher Strahlung verbunden. Es entstehen Röntgenphotonen mit Maximalenergien von rund 500 Elektronvolt. Das sind für die Röntgenastronomie recht geringe Werte, und die kataklysmischen und symbiotischen Doppelsterne fallen unter diesem Gesichtspunkt in eine Kategorie von so genannten superweichen Röntgenquellen.

Mit dem Satelliten Rosat waren Messungen in zwei unterschiedlichen Energiebändern des Röntgenbereichs möglich, und es wurde deutlich, dass andere Punktquellen sehr viel härtere Strahlung abgeben. Dazu gehören die ausgesprochenen Röntgen-Doppelsterne. Sie stellen insofern

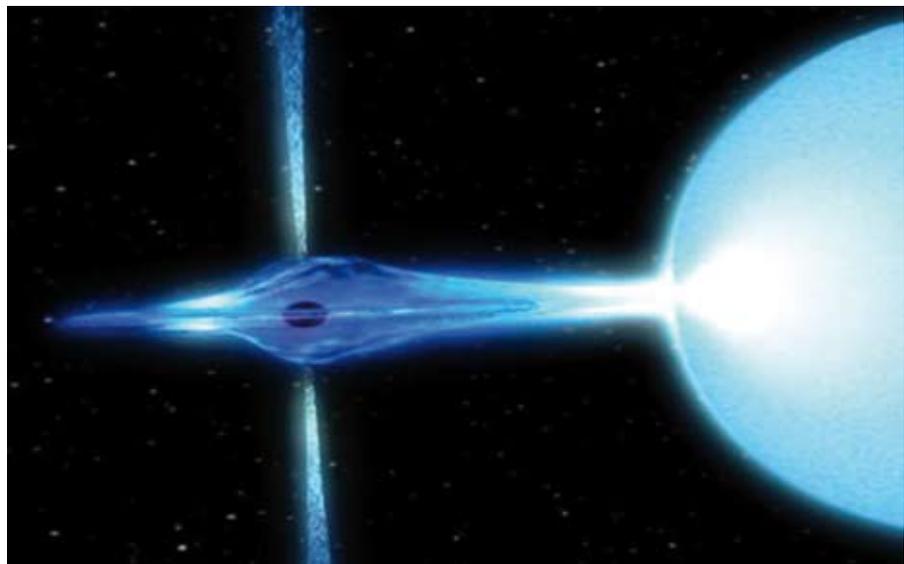
eine extreme Konfiguration dar, als der von einem entwickelten Stern kommende Gasstrom nicht von einem Weißen Zwerg, sondern von einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch als Begleiter aufgefangen wird. Das bewirkt einen weit höheren Gewinn an Strahlungsenergie.

Man vergleiche den freigesetzten Energiebetrag aus der Kernfusion von einem Kilogramm Wasserstoff zu Helium einerseits mit der Umsetzung von potenzieller Energie andererseits, wenn das gleiche Kilogramm Masse aus großer Entfernung auf einen typischen Neutronenstern stürzt. Es lässt sich leicht ausrechnen, dass der im zweiten Fall gewonnene Betrag etwa 30-mal größer ist, als sich durch Wasserstofffusion am Weißen Zwerg erzielen lässt!

Beleg für die Anwesenheit von Neutronensternen in Doppelsystemen sind die Röntgenpulsare. Das vielleicht bekannteste Beispiel ist HZ Herculis. Der Stern war nach seiner fotografischen Entdeckung zunächst als schnell und irregulär veränderlich klassifiziert worden, konnte später aber mit der Röntgenquelle Herculis X-1 identifiziert werden.

Schon der Veränderlichen-Katalog GCVS weist etwa zwanzig solcher Systeme aus; insgesamt ist die Anzahl bekannter Röntgenpulsare in unserem und in extragalaktischen Sternsystemen weit größer. Das Pulsarphänomen hängt bei einem Teil dieser Objekte damit zusammen, dass der vom Begleiter kommende Akkretionsstrom unter der Wirkung des mit dem Empfängerstern verbundenen starken Magnetfelds kollimiert wird und durch sein Auftreffen in einem eng begrenzten Oberflächenareal Temperaturen von 10^8 Kelvin erzeugt. Der Anteil von Röntgenstrahlung

Die Röntgenquelle Cygnus X-1 ist ein Doppelsystem aus einem heißen, blauen Überriesen und einem kompakten, unsichtbaren Begleiter. Anfang der 1970er Jahre lieferte dieses System den ersten Hinweis auf Schwarze Löcher von stellarer Größe und Masse. In dieser künstlerischen Darstellung strömt Materie von dem Überriesen ab, die sich in einer Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch sammelt. Starke Magnetfelder lassen zwei Materiestrahlen in Richtung der Rotationsachse der Scheibe ins All hinaus schießen.



NASA/Honeywell Max-Q Digital Group/Dana Berry

übertrifft dementsprechend die Emission in anderen Spektralbereichen in hohem Maße, die Röntgenleuchtkraft erreicht in einigen Fällen das 20 000-Fache der Sonnenleuchtkraft.

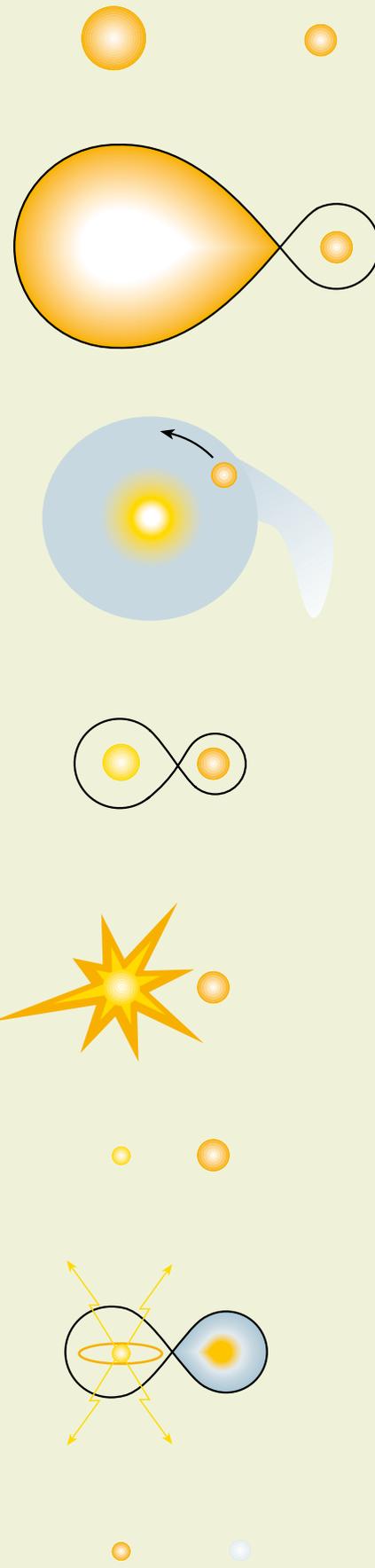
Da die Pole des Magnetfelds im Allgemeinen nicht mit den Rotationspolen zusammenfallen, empfängt der Beobachter die Röntgenstrahlung zeitlich moduliert und in Form von Strahlungspulsen. Es sind Rotationszeiten im Bereich von Millisekunden bis zu wenigen Minuten nachgewiesen worden. Das weist eindeutig auf rotierende Neutronensterne als Strahlungsquelle hin. Das Eintreffen der Pulse unterliegt zudem periodischen Schwankungen, in einigen Fällen bleiben sie in regelmäßigen Abständen ganz aus. Das lässt die Bindung des Neutronensterns an einen Begleiter erkennen. Bei dem Beispiel HZ Herculis beträgt die Rotationsperiode des Neutronensterns 1,24 Sekunden, der Bahnlauf um einen Hauptreihenstern der Spektralklasse B oder A 1,7 Tage (siehe SuW 10/2006, S. 38).

Entwicklungsweg

Der Entwicklungsweg eines Doppelsternsystems, ursprünglich bestehend aus zwei Hauptreihensternen, hängt von den Massen und dem Abstand der beiden Komponenten ab. Bei beiden verläuft die individuelle Entwicklung zunächst ungestört, bis das Erreichen der Roche-Grenze auf der einen Seite eine massive Beeinflussung auf der anderen auslöst. Der Entwicklungsweg erfährt einen Einschnitt, es findet Masseverlust und -austausch statt, Drehimpuls wird umverteilt oder geht dem System ganz verloren. Auch ein Röntgenpulsar stellt in diesem Sinne das Zwischenstadium der Entwicklung eines Doppelsternsystems geeigneter Parameter dar.

Im Bild rechts ist ein solcher Entwicklungsweg skizziert. Die Modellrechnungen starten mit einer Konfiguration von zwei Sternen der Massen 15 und 1,6 Sonnenmassen in einer Bahn mit der Umlaufzeit von 1500 Tagen. Dem entspricht ein gegenseitiger Abstand von 1400 Sonnenradien. Wegen des großen Unterschieds in den Sternmassen ist das Roche-Volumen des Primärsterns sehr ausgedehnt und übertrifft in seinem Durchmesser den Abstand beider Sterne deutlich. Die ungestörte Entwicklung des massereichen Sterns wird deshalb erst weit fortgeschritten auf dem Asymptotischen Riesenast im Zustand des Helium-

Die Entwicklung eines engen Doppelsternsystems



Als Beispiel betrachten wir zwei Hauptreihensterne mit ursprünglich 15 und 1,6 Sonnenmassen, die sich mit einer Umlaufzeit von 1500 Tagen umkreisen.

Nach 13,9 Millionen Jahren hat sich die Primärkomponente so weit entwickelt, dass sie ihr Roche-Volumen ausfüllt.

Der heftige Abstrom von Gas bildet schnell eine beide Sterne umfassende Hülle. Durch Reibungseffekte verliert der Sekundärstern Bahndrehimpuls, der Abstand beider Sterne reduziert sich erheblich.

Die gemeinsame Hülle hat sich im Raum zerstreut, der Primärstern hat noch eine Masse von 4,9 Sonnenmassen, seine wasserstoffreiche Atmosphäre ist verloren, und er zeigt die Merkmale eines Heliumsterns (Umlaufzeit 0,75 Tage).

Der Primärstern wird im Alter von 15 Millionen Jahren zur Supernova vom Typ Ib.

Übrig bleibt ein System aus Neutronen- und Hauptreihenstern von 1,3 und 1,6 Sonnenmassen; Primär- und Sekundärstern haben ihre Rollen vertauscht.

Im Alter von 2,2 Milliarden Jahren wird das System zum Röntgen-Doppelstern mit einem massearmen Primärstern (Umlaufzeit 1,4 Tage).

Nach insgesamt 2,6 Milliarden Jahren ist durch Akkretion und Masseverlust ein System aus Neutronenstern und einem massearmen Weißen Zwerg von 1,5 und 0,3 Sonnenmassen entstanden.

SuW-Grafik: Quelle: T. M. Tauris und E. P. J. van den Heuvel

Schalenbrennens, unterbrochen. Danach vollzieht sich der Abstrom von nahezu zehn Sonnenmassen sehr schnell, der Begleitstern kann davon jedoch keinen nennenswerten Teil aufnehmen; vielmehr bildet sich eine beide Sterne umfassende Hülle. Das führt zu Reibungsverlusten bei der Bahnbewegung, vermindert den Drehimpuls im System, und der Abstand beider Sterne reduziert sich in dieser Phase ganz erheblich.

Im Zuge der weiteren Entwicklung durchläuft der massereichere Stern einen Supernova-Ausbruch vom Typ Ib und endet als Neutronenstern. Inzwischen ist aber auch die Entwicklung des massearmeren Sterns so weit fortgeschritten, dass er sein Grenzvolumen ausfüllt und, sofern das Magnetfeld nicht zu stark ist, eine Akkretionsscheibe um den Neutronenstern speist. Entsprechende spektrale Signaturen werden beobachtet.

Zudem ist das auf den kompakten Stern einstürzende Gas Ursache von Fusionsepisoden, die sich mit Abständen von Monaten bis zu Jahrzehnten an der Oberfläche des Neutronensterns wiederholen können. Sie äußern sich jeweils als Strahlungsausbrüche bei Röntgenenergien. Der Akkretionsprozess ist zudem Quelle von Drehimpuls für den Neutronenstern und erhöht dessen Rotationsfrequenz.

Es ist eine Tatsache, dass die Pulsare mit den kürzesten Rotationsperioden alle als Komponenten in Doppelsternsystemen existieren und offensichtlich von den Akkretionsströmen »aufgedreht« worden sind. Auf der anderen Seite hat der anhaltende Massetransfer den Begleiter zum Weißen Zwerg werden lassen. Die Ausgangsdaten des hier skizzierten Entwicklungsablaufs sind so gewählt worden, dass im Modell ein konkretes System mit Millisekunden-Pulsar in seinen beobachteten Eigenschaften reproduziert wird.

Stellare Schwarze Löcher

Als herausragendes Ergebnis hat die Untersuchung von Röntgen-Doppelsternen zur Entdeckung von Schwarzen Löchern in solchen Systemen geführt. Mit Hilfe des dritten keplerschen Gesetzes können im Prinzip die Parameter eines Doppelsternsystems, wie zum Beispiel die Massen der Komponenten, abgeleitet werden. Bei den engen Doppelsternen ist von der spektroskopischen Bestimmung periodischer Variationen der Radialgeschwindigkeit auszugehen, praktische Einschränkungen

bringen es allerdings mit sich, dass die Einzelmassen nicht getrennt, sondern zunächst nur miteinander verknüpft in einer so genannten Massefunktion abgeleitet werden können. Die sorgfältige Interpretation solcher Daten zeitigte die Erkenntnis, dass der Akkretionsprozess bei einer ganzen Reihe von bekannten Röntgen-Doppelsternen durch kompakte Objekte gesteuert wird, denen eine Masse von mehr als etwa drei Sonnenmassen zugeschrieben werden muss. Das schließt Neutronensterne als Quelle der Gravitationswirkung aus.

Die Schlussfolgerung ist, dass sich in derartigen Fällen Schwarze Löcher als singuläre Objekte bemerkbar machen. Eine solche Vermutung wurde erstmalig im Jahre 1972 für die Röntgenquelle Cygnus X-1 geäußert. Die mit ihr verbundene optisch sichtbare Komponente ist ein Überriesenstern vom Typ Bolb. In sehr sorgfältiger Diskussion aller Daten und der Sternentwicklung konnte Janusz Ziółkowski diesem eine Masse um 40 Sonnenmassen, dem Schwarzen Loch zwischen 15 und 25 Sonnenmassen zuschreiben. Das System ist nur wenige Millionen Jahre alt.

Dank solcher Arbeiten gilt die Existenz Schwarzer Löcher von stellarer Masse heute als gesichert. Die anfangs in der Fachwelt geäußerte Skepsis ist weitgehend verfliegen.

In ihren ganz unterschiedlichen Erscheinungsformen spannen die engen Doppelsterne einen weiten Bogen von den Algol-ähnlichen Systemen über magnetische Veränderliche bis zu den Röntgen-Doppelsternen. Die Bindung verschiedener stellarer sowie »exotischer« Komponenten, ein Variationsbereich an Systemparametern und spezifische Auswirkungen von Massetransfer lassen symbiotische Sterne einerseits, wie Quellen intensiver Röntgenstrahlung andererseits entstehen.

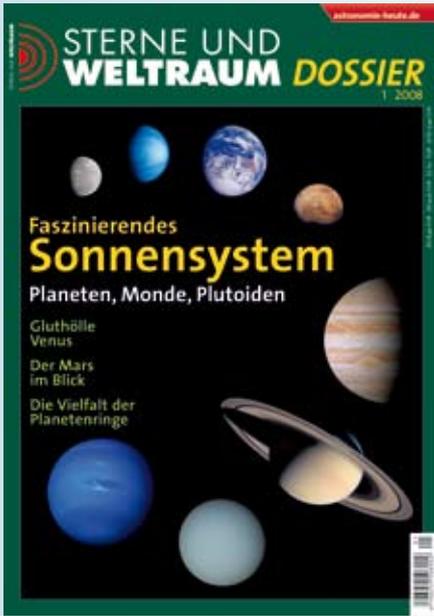
Die Vielfalt der einschlägigen physikalischen Prozesse bis hin zum Auslösen von Gravitationswellen bei Systemen mit kompakten Komponenten machen das Gebiet zu einem reichen Arbeitsfeld. Lückenlose Überwachung und zeitlich hochauflösende Photometrie und Spektroskopie der Objekte, vor allem aber die Möglichkeit von Satellitenmessungen im Ultraviolett- und Röntgenbereich, bilden die Grundlage für den gerade während der vergangenen Jahre erzielten Erkenntnisfortschritt auf dem Gebiet. ©



WERNER PFAU war bis zu seiner Emeritierung Direktor des Astrophysikalischen Instituts der Friedrich-Schiller-Universität Jena und von 1996 bis 1999 Vorsitzender der Astronomischen Gesellschaft.

Literaturhinweise

- Fekel, F. C. et al.:** Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. II. Orbits for Five S-Type Systems with Two-Year Periods. In: *Astronomical Journal* 120, S. 3255–3264, 2000.
- Felten, J. E.:** Light Echos of Nova Persei 1901. In: *Sky & Telescope* 81, S. 153–157, 1991.
- Kholopov, P. N. et al.:** General Catalogue of Variable Stars, 4. Ausgabe. Sternberg Astronomical Institute, Moskau 1988. Online: www.sai.msu.su/gcvs/.
- Kraus, U.:** Röntgenpulsare. In: *Sterne und Weltraum* 10/2006, S. 38–45.
- Prialnik, D.:** The Evolution of a Classical Nova Model Through a Complete Cycle. In: *Astrophysical Journal* 310, S. 222–237, 1986.
- Sarna, M. J.:** The Evolutionary Status of Beta Per. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 262, S. 534–542, 1993.
- Schirmer, J.:** Einer Zwergnova auf die Scheibe geblickt. In: *Sterne und Weltraum* 3/2008, S. 76–79.
- Solf, J., Ulrich, H.:** The structure of the R Aquarii nebula. In: *Astronomy & Astrophysics* 148, S. 274–288, 1985.
- Solf, J.:** High-resolution spectroscopy of the inner R Aquarii nebula: evidence for bow shock excitation by collimated wind from the symbiotic system. In: *Astronomy & Astrophysics* 257, S. 228–244, 1992.
- Tauris, T. M., van den Heuvel, E. P. J.:** Formation and Evolution of Compact Stellar X-ray Sources. In: *Compact Stellar X-ray Sources* (W. Levin & M. van der Klis, Hrsg.), Cambridge University Press 2006.
- Ziółkowski, J.:** Evolutionary constraints on the masses of the components of the HDE 2226868/Cyg X-1 binary system. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 358, S. 851–859, 2005. Weblinks: www.astronomie-heute.de/artikel/972326



« SUW-DOSSIER » FASZINIERENDES SONNENSYSTEM «

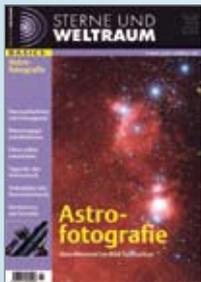
Unser Planetensystem unterliegt einer ständigen Beobachtung von dutzenden automatischen Sphären. Ihre zahlreichen Messdaten sind Basis unseres enormen Wissenszuwachses über die Welten im Sonnensystem. Das Dossier »Faszinierendes Sonnensystem« stellt die wichtigsten Beiträge der letzten drei Jahre zum Thema Planetenforschung aus der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« neu überarbeitet zusammen. Zudem lassen attraktive Bildgalerien den Leser staunen; € 8,90.



- > Die 200 schönsten Galaxien in Bildern der besten Astrofotografen
 - > Wie Amateurastronomen mit einem 20-cm-Teleskop die Entdeckungen von Hubble nachvollziehen können
- € 7,90



- > Vom Kometenring zur Welteninsel
 - > Scheibe, Staub und Schwarzes Loch
 - > Die Nische, in der wir leben
 - > Supernovae und »lokale Blase«
- € 8,90



- > Sternaufnahmen mit Fotoapparat
 - > Planetenjagd mit Webcams
 - > Filme selbst entwickeln
 - > Tipps für den Astrourlaub
 - > Die Kamera am Fernrohr
- € 8,90



- > Grundlagen der Kosmologie
 - > Der Querdenker Fred Hoyle
 - > Quasare und Schwarze Löcher
 - > Mit Supernovae das Universum vermessen
- € 8,90



- > Die Bausteine der Planeten
 - > Was ist ein Planet?
 - > Aufbruch zu fremden Erden
 - > Wie sucht man Planeten?
- € 8,90



- > Neutrinojagd am Nordpol
 - > Entdeckungsmaschinen der Superlative
 - > Teilchenbeschleuniger mit Plasmawellen
 - > 5 Ziele für die Raumfahrt
- € 8,90



- > Magische Quadrate
 - > Pflasterungen der Ebene
 - > Ausflüge in höhere Dimensionen
 - > Spiele auf Quadrat- und Sechseckgittern
- € 8,90



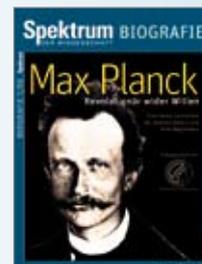
- > Prägen und Gießen von Molekülen
 - > Neue künstliche Schadstoffkiller
 - > Der heiße Ursprung des Lebens
 - > Umweltgifte aus der Natur
- € 8,90



- > Nebra: der geschmiedete Himmel
 - > Jungsteinzeitliches Sonnenobservatorium
 - > Die Weltkarte des Ptolemäus
 - > Muslimische Astronomie
- € 8,90



- > Kann man den Zufall überlisten?
 - > Wozu dienen Funktionen
 - > Streng geheim! – Mathematik und vertrauliche Nachrichtenübermittlung
 - > Fraktale in der Natur
- € 8,90



- > Gesprengte Rahmen – Entdeckungen mit Tragweite
 - > Springende Quanten – Was entdeckte Planck?
 - > Planck und seine Umwelt
 - > Was machen Plancks Erben?
- € 8,90

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter

www.spektrum.com/sonderhefte