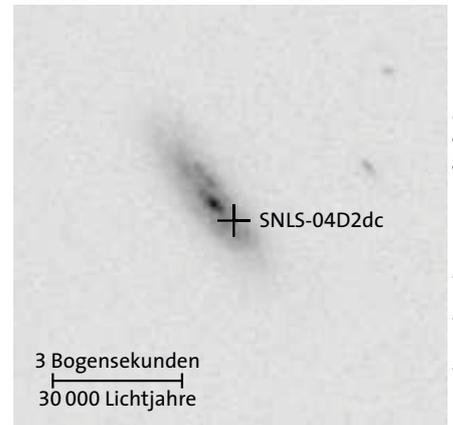


Auf der Aufnahme mit dem Weltraumteleskop Hubble lässt sich die Muttergalaxie der Supernova SNLS-04D2dc als Spiralgalaxie identifizieren.



Kevin Schawinski et al. / University of Oxford

# Eine Supernova baut sich auf

## Licht aus dem Innern eines Roten Überriesen

Bei der gezielten Durchforstung älterer Messungen mit dem Satelliten GALEX wurde eine britisch-deutsche Astronomengruppe fündig: Ihr gelang der Nachweis von ultraviolettem Licht, das einer Supernova-Explosion vorausging.

Noch nie konnten wir die letzten Tage im Leben eines Roten Riesen direkt beobachten. Unsere Vermutungen über deren Ablauf stützen sich allein auf Computersimulationen. Klar ist, dass der finale Kollaps des Kerns in vielen Fällen eine Supernova auslöst. Wird diese entdeckt, dann ist es schon zu spät, um den Vorgängern noch zu untersuchen.

Doch nun fanden Forscher im Datenarchiv des Ultraviolett-Satelliten *Galaxy Evolution Explorer* GALEX erste Hinweise auf das Geschehen rund um den Kollaps eines Kerns: Der Rote Riese leuchtete im UV-Licht rund fünf Stunden lang auf – heller als seine ganze Heimatgalaxie – noch bevor die Stoßwelle der inneren Explosion seine Oberfläche erreicht hatte.

Dieses UV-Flare wurde schon früher theoretisch vorhergesagt, aber es mitzuverfolgen, war bislang ein Traum der Astronomen. Sie hoffen, aus den Einzelheiten der Erscheinung Aufschlüsse über die inneren Vorgänge vom Kollaps bis zur anschließenden Explosion zu erhalten. Für diese Explosionen gibt es bislang zwar einige vage Theorien, aber keine stichhaltigen Beobachtungen. Das Thema kam vor ein paar Jahren an der Universität Oxford wieder zur Sprache. Eine schnelle Abschätzung ergab, dass es vom Zufall abhängt, ob man solche Ereignisse im Archiv der UV-Beobachtungen von GALEX eindeutig entdecken würde oder nicht. GALEX sollte schon zufällig hier und da UV-Flares abgeleuchtet haben, doch die zählen nur, wenn dann auch noch die folgende Supernova an der gleichen Stelle entdeckt wird. Neue, gezielte Beobachtungen kamen nicht in

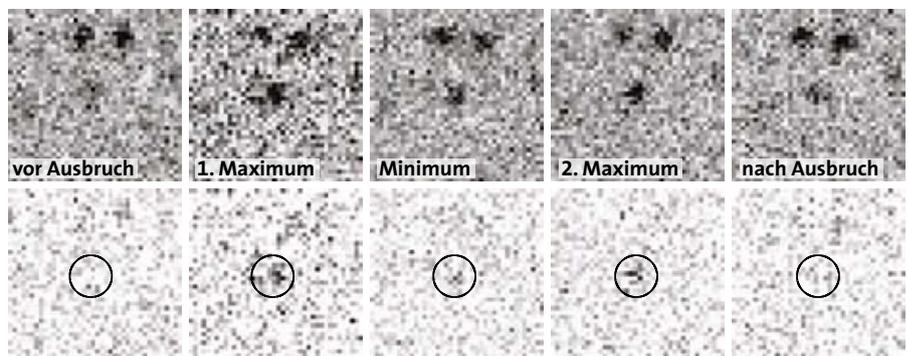
Frage, da der notwendige gewaltige Umfang diesen einzelnen Zweck nicht gerechtfertigt hätte: Mehrere Monate lang hätte GALEX auf einen Fleck am Himmel starren müssen, um die gesuchten UV-Flares zu erwischen – so es sie denn gibt.

Die Oxforder Astronomen Stephen Justham, Philipp Podsiadlowski und der Autor dieses Beitrags erkannten, dass es schon einer gehörigen Portion Glück bedurfte, um im GALEX-Archiv auf ein solches UV-Flare zu treffen und ließen die Sache wegen dringenderer Arbeiten erst einmal liegen.

### Archivarbeit

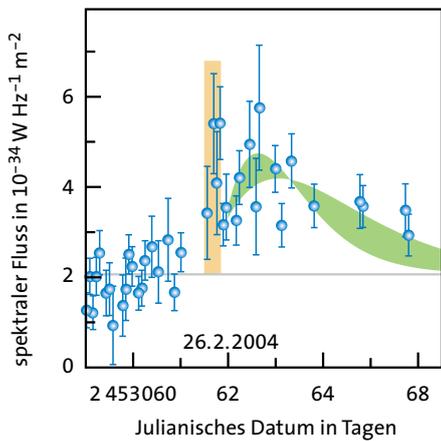
Ein Jahr später griff ihr frisch promovierter Kollege Kevin Schawinski die Sache auf, der sich nach dem arbeitsintensiven Abschluss seiner Doktorarbeit nicht an den Alltag gewöhnen konnte. Einige

Wochen nahm die Programmierung automatischer Suchskripte in Anspruch, die das GALEX-Archiv durchkämmen sollten. Die beste Chance bestand bei den Daten des so genannten COSMOS-Felds, ein zwei Quadratgrad großes Himmelsfeld, das von verschiedenen Observatorien gemeinsam untersucht worden war. GALEX hatte dieses Feld besonders lange angestarrt und über einige Wochen hinweg fast 100 Stunden Belichtung für die bislang tiefste UV-Aufnahme gesammelt, eigentlich zur Untersuchung ferner Galaxien. Zudem hatten Teleskope auf dem Mauna Kea in Hawaii dieses Feld mit dem »Supernova Legacy Survey« (SNLS) drei Jahre lang im Auge behalten, speziell um Supernovae vom Typ Ia in unterschiedlichen Entfernungen zu finden und mit diesen die Ausdehnung des Weltalls auf Spuren der Dunklen Energie hin zu untersuchen.



Kevin Schawinski et al. / University of Oxford

Die fünf Aufnahmen im nahen ultravioletten Spektralbereich entstanden mit dem Weltraumobservatorium GALEX. Sie zeigen den zeitlichen Verlauf der UV-Helligkeit vor der eigentlichen Explosion der Supernova SNLS-04D2dc. In der unteren Reihe ist zur besseren Sichtbarkeit die Helligkeitsverteilung im Feld vor der Explosion subtrahiert.



Die Lichtkurve der von GALEX gemessenen Helligkeiten im nahen Ultravioletten zeigt eine erste Spitze (orange hinterlegt), auf die ein zweites flacheres Maximum folgt. Der aus Modellen für die Entwicklung der Expansion nach der Explosion folgende Helligkeitsverlauf ist grün dargestellt.

All dies hat noch nichts direkt mit den Kernkollaps-Supernovae (Typ II) der Roten Riesen und dem dabei vermuteten UV-Flare zu tun. Interessant wird es aber, weil sich die Beobachtungen von GALEX und dem SNLS zeitlich überlappen. Denn es kommt vor, dass der SNLS ab und zu Typ-II-Supernovae registriert und deswegen genauer beobachtet, weil die Supernova in der Frühphase fälschlich dem Typ Ia zugeordnet wurde. Der Beobachtung eines UV-Flare würde doch viel Gewicht verliehen, sollte die Supernova nachweislich zum Kernkollaps-Typ zählen.

Und die Oxforder Gruppe hatte Glück, denn bei einer vom SNLS entdeckten Supernova wurden sie fündig! Sie fanden tatsächlich UV-Signale nahe dem vermuteten Zeitpunkt des Kollaps, also mehrere Tage vor der optischen Entdeckung. Die Supernova ereignete sich in einer Distanz von etwa 2,4 Milliarden Lichtjahren entsprechend ihrer Rotverschiebung  $z = 0,185$ . Das Weltraumteleskop Hubble zeigt ihre Heimatgalaxie klar als Spiralgalaxie (siehe Bild links oben), während das kleinere UV-Teleskop GALEX mit seiner schlechteren Auflösung nur einen zarten Schimmer erkennen lässt.

Zur Freude der Astronomen startete GALEX jedoch in mehreren Dutzend Aufnahmen auf die Supernova und lieferte gleich eine ganze Lichtkurve des UV-Flares (siehe Bilderreihe links). Die Belichtungen folgten dem Rhythmus der etwa 1,5-stündigen Umlaufzeit des Satelliten um die Erde. Die Lichtkurve gab sofort Anlass zur Begeisterung, als sie zwei separate Maxima zeigte: Einem scharfen Maximum mit fünf Stunden Dauer folgte zuerst ein Tief und dann ein sanft an- und abklingendes Aufleuchten, das mehrere Tage lang dauerte (siehe Grafik oben). Das erste Maximum ist das hier erstmalig gesehene UV-Flare noch vor dem Auseinanderstreben der äußeren

Sternschichten. Letzteres erzeugt später das bekannte Leuchten der Supernova, bei dem sich die Photosphäre, die Schicht aus der wir sichtbares Licht erhalten, bereits weit draußen in den auseinanderfliegenden Schichten des ehemaligen Sterns befindet. Qualitativ waren diese beiden Komponenten erwartet worden – aber konnte man daraus vielleicht noch mehr über den Vorgängerstern lernen?

### Fusion zum Eisen und Explosion

Nach wie vor ist unklar, welcher physikalische Mechanismus eine Kraft aus dem kollabierenden Kern heraus auf die Hülle des Sterns überträgt. Einig sind sich die Astronomen zunächst nur über folgendes Szenario: Der hoch verdichtete Kern besteht einige Tage vor der Supernova-Explosion aus mehr als einer Sonnenmasse Silizium und Eisen. Schnell ansteigende Temperaturen heizen die Kernfusion aller Materie zu Eisen an, bis schließlich alle leichteren Elemente aufgebraucht sind: Nun stürzt der schwere Eisenkern unter seinem eigenen Gewicht in Sekunden zu einem gewaltigen soliden Atomkern

### *Der rote Riese zeigt sich noch als kühler Stern, doch auf halbem Weg zur Oberfläche rast bereits eine Stoßwelle.*

zusammen. Der Gasdruck der schnellen leichten Elektronen kann diesen Prozess nicht aufhalten. Freiwillig würden die im üblichen Stern gas vorkommenden Elektronen, Protonen und Neutronen ihre Identität niemals aufgeben, doch die Schwerkraft überwindet die atomaren Bestandteile: Zwar kostet es sehr viel Energie, ein Elektron mit einem Proton zu einem Neutron zu verschmelzen, da sich die beiden elektrisch abstoßen. Doch die Schwerkraft bringt nun ausreichend Energie mit, um die Umwandlung der gesamten Kernmaterie in Neutronen zu erzwin-

gen, die sich nicht mehr gegenseitig abstoßen und so eng wie ein Atomkern packen lassen. Wo kurz zuvor noch ein großer Eisenkern war, befindet sich jetzt ein rund zehn Kilometer kleiner Neutronenstern mit mehr als einer Sonnenmasse.

Der Neutronenkern ist möglicherweise von einem Beinahe-Vakuum umgeben, denn die dünnen, weiter außen liegenden Sternschichten des Roten Riesen fühlen etwa so wenig Schwerkraft vom Kern wie die Erde von der Sonne. Sie dehnen sich nur langsam nach innen aus, getrieben von mäßigem Gasdruck, um den rapide entstandenen Hohlraum zu füllen. Irgendwie entsteht aber aus dem Kern eine explosive Druckwelle, die nach außen drängt und auf ihrem Weg die Sternschichten mitnimmt. Mit etwa 15 000 Kilometer pro Sekunde rast eine Gaswand ständig zunehmender Masse von innen auf die Oberfläche des Sterns zu, die noch gar nichts gemerkt hat, und komprimiert so die ganze Sternhülle vor sich her.

Das Tempo der Druckwelle ist weit jenseits der Schallgeschwindigkeit, so dass wir von einer Stoßfront sprechen. Die Sternhülle an der Front heizt sich im Stoß der Kompression auf und will die Hitze auch wieder abstrahlen. Doch anfangs sind die Schichten noch undurchsichtig, und die Hitze kann sich gar nicht so schnell ausbreiten, wie die Stoßwelle alles vor sich her drängt und weiter zusammenschiebt. Deshalb weiß auch die Oberfläche noch nichts von ihrem Schicksal, und die Sternhülle wird Schicht für Schicht von der Explosion überrascht.

Der Rote Riese zeigt sich von außen immer noch als kühler Stern mit dem rund vierfachen Radius der Erdbahn. Doch auf

etwa halbem Weg vom Zentrum zur sichtbaren Oberfläche erreicht die Stoßwelle dünnere und etwas lichtdurchlässigere Schichten: Hier kommt die Strahlung schneller vorwärts und lässt bald die Stoßfront hinter sich. Das ist die entscheidende Wende, denn nun sickert die Hitze zur Oberfläche durch. Die Hitze der Stoßwelle kann sich in der UV-Strahlung des ersten Maximums zum großen Teil entladen. Erreicht die Stoßwelle die Oberfläche, dann ist der Spuk der hitzigen Tiefenstrahlung erst einmal vorbei.

Eine neue Phase beginnt, in der sich die Sternhülle mit mehr als 10 000 Kilometer pro Sekunde ausdehnt. Die Karten sind neu gemischt, und ein neues Zusammenspiel zwischen der Dichte der Schichten und ihrer nun auftretenden radioaktiven Heizung bestimmt das Aufleuchten der optischen Supernova, das schon so oft gesehen wurde, aber jetzt nicht im Vordergrund steht.

Der Clou ist vielmehr die fünfständige Dauer des ersten Maximums in der Lichtkurve, die anzeigt, wie lange die Stoßwelle benötigte, um die Sternhülle zu durchqueren. Die Form der Lichtkurve hängt vom genauen Dichteprofil des Sterns ab, doch diese Details lassen sich in einem Computermodell der Stoßwelle simulieren und so lange variieren, bis sie der Beobachtung entsprechen. An dieser kritischen Stelle half der Plasmaphysiker Tony Bell mit. Die Modellierung von Strahlungstransport in einem stoßwellen-komprimierten ionisierten Gas ist eine herausfordernde Aufgabe. Das Ergebnis war, dass der Stern zum Zeitpunkt des Kollaps ein Überriese mit rund 500 bis 1000 Sonnenradien gewesen sein sollte.

### Stoßwelle durch den Stern

Genauer ließ sich die Analyse in diesem Fall leider nicht durchführen, weil die Supernova einfach viel zu weit von uns entfernt und daher die gemessene Lichtkurve zu verrauscht war. Aus 2,4 Milliarden Lichtjahren Entfernung kam eben zu wenig Licht bei uns an, um noch über Details zu berichten. Immerhin erzielte das Forscherteam aber einen qualitativen Durchbruch: Zum ersten Mal wurde ein UV-Flare aus dem Inneren eines Sterns nachgewiesen und untersucht, wie sich die werdende Supernova aufbaut. Schön wäre es, wenn das noch häufiger geschehen könnte. Besonders attraktiv wäre eine Supernova in geringerer Distanz mit präziseren Beobachtungen.

Doch es wird wohl reiner Zufall sein, wenn GALEX oder ein zukünftiges UV-Teleskop noch einmal rechtzeitig hinschauen sollte. Denn angesichts kosmisch langer Zeiträume im Leben der Sterne bleibt die Herausforderung: Wie sollen wir das nächste Opfer erkennen, noch bevor das Leuchten der expandierenden Sternfetzen entdeckt wird? Ein Netzwerk aus großen UV-Teleskopen, die den ganzen Himmel kontrollieren, wäre eine Lösung, aber ob sich die Astronomen solch ein Projekt jemals leisten können, das steht nun wirklich in den Sternen.

CHRISTIAN WOLF

# Die Scheibe von 51 Ophiuchi

## Ein Zwilling von Beta Pictoris?

*Die ausgefeilte Technik der Nulling-Interferometrie ermöglichte Astronomen am Keck-Observatorium den Nachweis einer Scheibe um den heißen B-Stern 51 Ophiuchi.*

**S**trahlt ein Stern im Infrarotbereich heller, als sein Spektraltyp vermuten lässt, dann ist er Kandidat für ein im Entstehen begriffenes Planetensystem. 51 Ophiuchi im Sternbild Schlangenträger ist ein solcher Stern. Er zeigt einen deutlichen Überschuss an Infrarotstrahlung in der spektralen Energieverteilung, was auf Silikatkörner im Umfeld des Sterns hinweist.

51 Ophiuchi besitzt den Spektraltyp B9,5Ve. Demgemäß übertrifft seine Leuchtkraft diejenige der Sonne um den Faktor 260. Er ist 427 Lichtjahre von uns entfernt und von einer mit Gas angereicherten Staubscheibe umgeben, in der sich vermutlich gerade Planeten bilden. In ihr hat die ursprünglich vorhandene Gasmenge schon deutlich abgenommen. Spektroskopische Untersuchungen offenbaren eine Gasscheibe, auf deren Kante wir blicken: Die H-alpha-Linie zeigt ein Doppelmaximum, ein Hinweis darauf, dass das Gas um den Zentralstern rotiert. Aus der Analyse der CO-Banden im Spektrum leiteten Astronomen für das Gas innerhalb des Sublimationsradius der Staubkomponente eine Temperatur von 2000 bis 4000 Kelvin ab. Der Sublimationsradius beschreibt jene Grenze, innerhalb derer die Staubkörnerchen im Strahlungsbad des Sterns verdampfen (siehe »Zum Nachdenken«).

### Der Prototyp

Beta Pictoris im südlichen Sternbild Maler ist ein Stern vierter Größenklasse. Der ansonsten unscheinbare Stern zog im Jahr 1983 starkes Interesse auf sich, als der Infrarot Astronomical Satellite IRAS bei diesem Stern und auch bei Wega, Fomalhaut und Epsilon Eridani einen Infrarotüberschuss feststellte. IRAS war das erste im mittleren und fernen infraroten Spektralbereich arbeitende Satellitenobservatorium und beobachtete an den vier Sternen bei diesen Wellenlängen eine größere Helligkeit, als sie von den Sternen selbst erwartet wird. Dieser Befund wird Infrarotexzess genannt und ist das erste Signal, durch das sich zirkumstellare Scheiben verraten. Der Staub der Scheiben absorbiert nämlich einen Teil des Lichts seines Zentralsterns und strahlt es bei längeren Wellenlängen ab. Beta Pictoris und die drei anderen Sterne gerieten sofort unter

**Diese Simulation zeigt die aus Modellrechnungen abgeleitete Helligkeitsverteilung der zirkumstellaren Scheibe von 51 Oph bei einer Wellenlänge von zehn Mikrometern. Die innere Scheibe reicht bis 30 Millibogensekunden vom Stern, die äußere Scheibe bis 9,2 Bogensekunden und damit weit über den gezeigten Bereich hinaus.**

