

Jagd nach den Vorläufern der Supernovae Ia

Sie sind eine wesentliche Stütze für die kosmische Entfernungsskala – dabei ist noch nicht einmal gesichert, welche Sterne hier in einer gigantischen Explosion vergehen. Sind es tatsächlich Weiße Zwerge, die als Supernovae Ia zerrissen werden? Das Röntgenteleskop Chandra hilft nun, diese Vermutung zu überprüfen.

Supernovae sind spektakuläre Sternexplosionen, die enorme Mengen von Sternmaterie und Energie in die Umgebung schleudern. Für wenige Wochen können sie die hellsten Objekte in ihrer Heimatgalaxie sein – und sogar heller strahlen als die gesamte Galaxie.

Den Mechanismus dieser Supernovae zu ergründen, ist für viele Wissenschaftler faszinierend. Sie analysieren die Explosion einerseits experimentell – das heißt: mit astronomischen Beobachtungen – und andererseits theoretisch mit numerischen Modellen, die sie an den größten Rechenanlagen berechnen. Solche Untersuchungen sind für viele Bereiche der Astronomie von Belang, weil in Supernovae die meisten schweren Elemente im Kosmos produziert werden. Ferner spielen

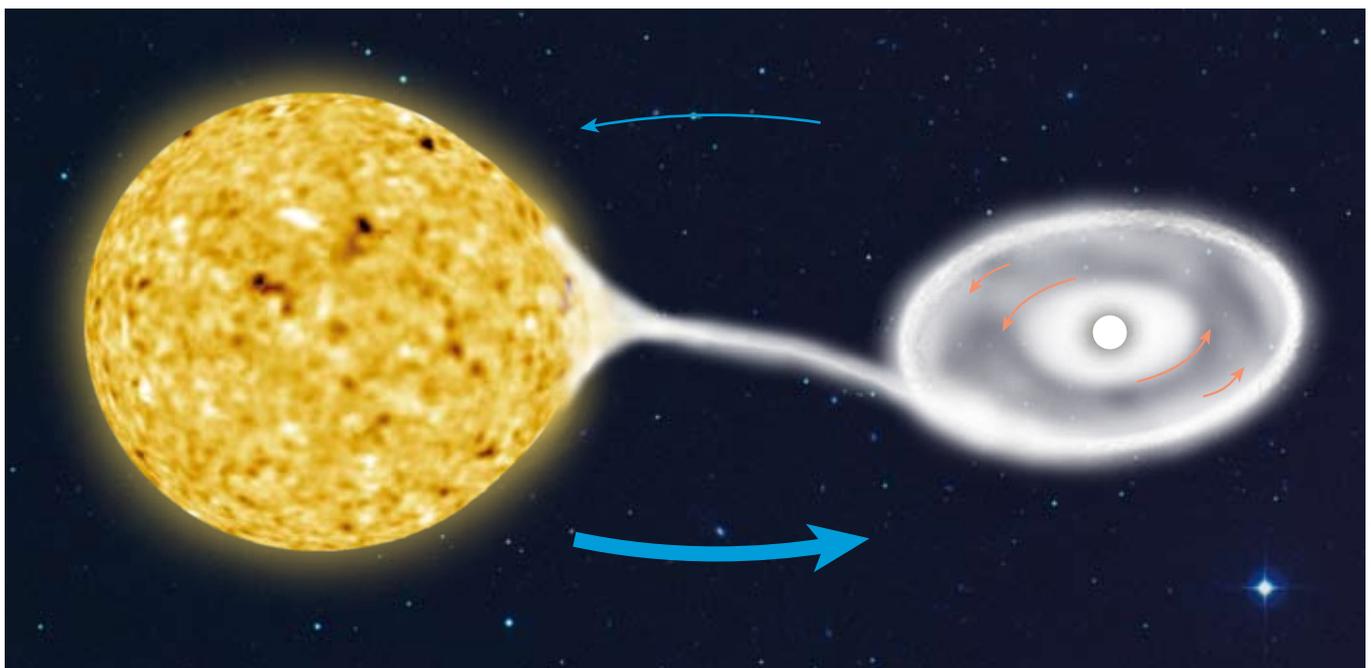
die energiereichen Explosionswellen für die Dynamik und die Entwicklung der Galaxien selbst eine bedeutende Rolle; denn Supernovae heizen ihre Galaxien auf.

Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Typen von Supernovae – einer davon, genannt Typ Ia, ist insbesondere für die Kosmologie bedeutsam. Das liegt daran, dass sich die absolute Helligkeit, also die Leuchtkraft, der Supernovae dieses Typs aus der Form ihrer Lichtkurve, das heißt aus dem zeitlichen Verlauf ihrer scheinbaren Helligkeit ableiten lässt. Der Vergleich der so gewonnenen absoluten Helligkeit mit der direkt gemessenen scheinbaren Helligkeit liefert dem Forscher eine Information über die Entfernung der Explosion von der Erde. Die enorme Helligkeit der Supernovae (absolut etwa $-19,7$ mag) gestattet

den Astronomen den Einsatz dieser »Standardkerzen« zur Distanzmessung bis zu einer Rotverschiebung von etwa $z=1,5$ (entsprechend einer Entfernung von mehr als acht Milliarden Lichtjahren). Mit Hilfe solcher Entfernungsmessungen können die Forscher auch Aussagen zur Struktur des Universums machen, beispielsweise wie viel Dunkle Materie und Dunkle Energie es enthält und wie die kosmische Expansion verläuft – gebremst oder beschleunigt. Im Jahre 1998 haben auf diese Weise zwei Forschungsgruppen die beschleunigte Expansion des Universums festgestellt.

Weiße Zwerge als Vorläufer?

Ursache der meisten Supernovae ist die Explosion eines massereichen Sterns: Sein ausgebrannter Kern kollabiert, und die



Axel M. Quetz/SuW-Grafik

Ein Weißer Zwerg verschlingt seinen benachbarten Riesenstern. Durch den Drehimpuls der Sternmaterie bildet sich eine heiße, rotierende Materiescheibe um den Zwerg aus.

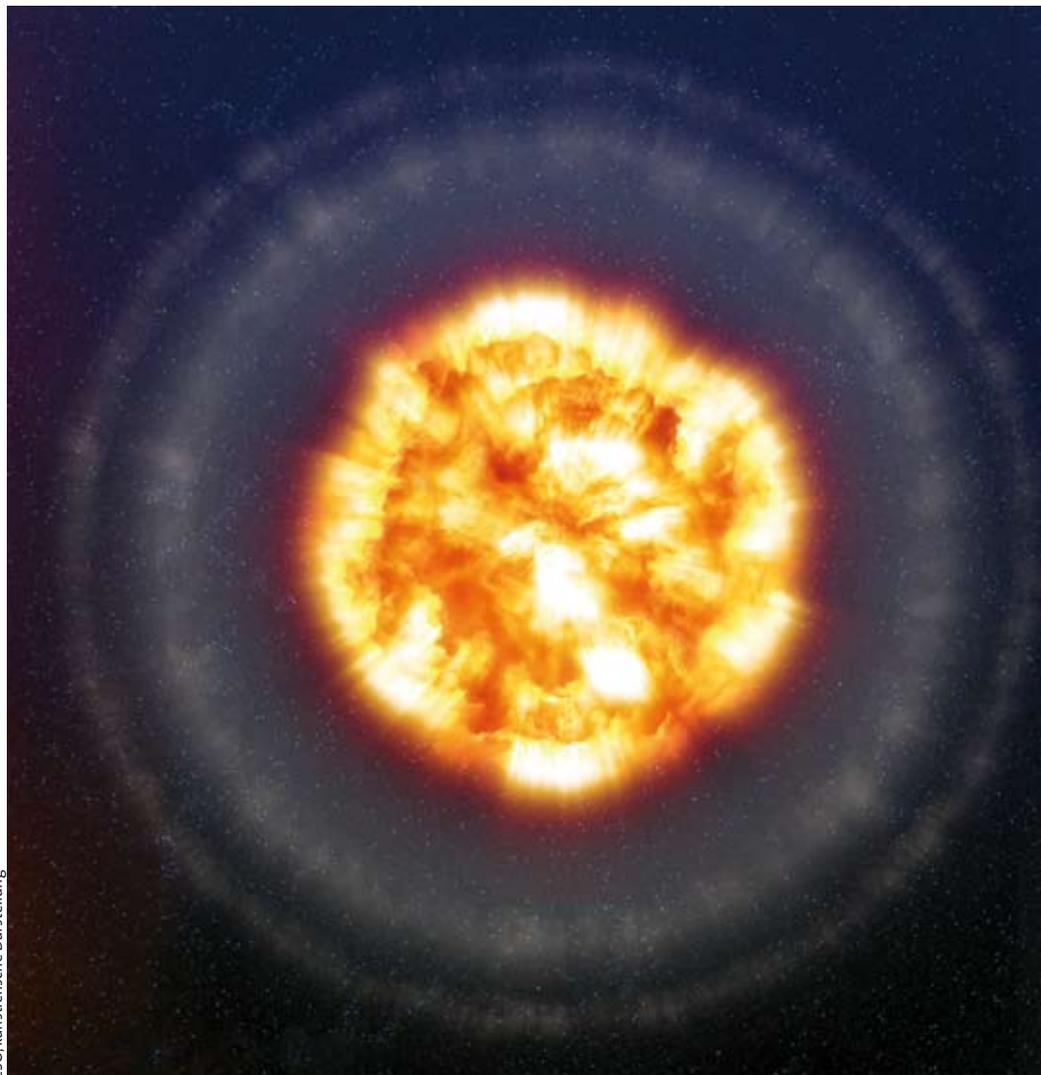
freigesetzte Gravitationsenergie sprengt seine äußeren, hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium bestehenden Schichten auseinander. Bei den Supernovae vom Typ Ia war schon lange klar, dass sie anders sind. Denn in ihren Spektren fehlen Spuren der Elemente Wasserstoff und Helium – stattdessen konnten die Astronomen Silizium, Kalzium und Eisen nachweisen.

Noch in anderer Hinsicht unterscheiden sich Supernovae Ia von anderen Typen: Sie treten nicht nur in jungen, sondern auch in alten Galaxien auf. Das spricht bereits gegen die Explosion eines massereichen Sterns, denn alte Galaxien sollten keine massereichen (weil kurzlebigen) Sterne mehr enthalten.

Diese Indizien führten die Astronomen zu dem Schluss, dass in Supernovae vom Typ Ia so genannte Weiße Zwerge explodieren. Das sind Überbleibsel von massearmen Sternen, die vor allem aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestehen. Weiße Zwerge sind sehr kompakt: Sie sind nur etwa so groß wie die Erde, enthalten aber trotzdem so viel Masse wie unsere Sonne. In ihrem Inneren findet keine Kernfusion mehr statt. Dennoch sind sie stabil, denn der Gravitationskraft, die den Weißen Zwerg zusammendrücken sucht, wirkt eine andere Kraft entgegen, die durch einen quantenmechanischen Effekt zu Stande kommt: Die Elektronen im Sternplasma lassen sich nicht beliebig komprimieren, denn infolge des Pauli-Prinzips können sich keine zwei Elektronen im gleichen Quantenzustand befinden. Aus diesem Grunde baut sich in der Materie des Weißen Zwergs ein Entartungsdruck auf, welcher dem Druck der Gravitation entgegenwirkt.

Ein-Zwerg- und Zwei-Zwerge-Szenario

Ein solches Gleichgewicht stellt sich jedoch nur bis zu einer gewissen Obergrenze der Masse ein: Oberhalb von 1,39 Sonnenmassen können die Kohlenstoff-Sauerstoff-Zwerge durch den Entartungsdruck nicht mehr stabilisiert werden. Die Gravitation gewinnt dann die Oberhand und führt zu einem Kollaps, in dem die mittelschweren Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff schlagartig zu Eisen fusioniert werden. Die plötzlich freigesetzte Fusionsenergie zerreißt den Weißen Zwerg. Im Gegensatz zu den Supernovae vom Typ II, in denen der Kollaps eines massereichen Sterns zu einem kompakten Relikt – einem Neu-



Schließlich wird der Weiße Zwerg zu massereich und explodiert in einer Supernova Ia.

tronenstern oder Schwarzen Loch – führt, bleibt nach einer Supernova Ia nichts übrig: Sie wird restlos auseinandergerissen.

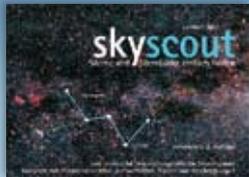
Wie kann es passieren, dass die Masse des Weißen Zwergs die kritische Grenze überschreitet? Grundsätzlich gibt es dafür zwei Möglichkeiten; beide erfordern die Anwesenheit eines Begleitsterns für den Weißen Zwerg.

In der ersten Variante, dem »Ein-Zwerg-Szenario«, ist der Begleitstern ein »normaler« Stern. Wenn der Begleitstern während seiner stellaren Entwicklung größer wird (siehe SuW 7/2008, Seite 42–48) und seine Oberfläche zu nahe an den Weißen Zwerg rückt, bewirkt die Gravitationskraft des Zwergs einen Massenüberfluss vom Begleitstern auf den Zwerg (siehe Bild links). Falls dieser Vorgang lange genug andauert, kann der Weiße Zwerg so viel an Masse gewinnen, dass er die kritische Grenze überschreitet, kollabiert und als Supernova explodiert (Bild oben).

In der zweiten Variante, dem »Zwei-Zwerge-Szenario«, besteht ein Doppelsternsystem aus zwei Weißen Zwergen, die sich gegenseitig umkreisen. Durch Abstrahlung von Gravitationswellen verliert das Doppelsternsystem im Laufe der Zeit Energie und Drehimpuls, so dass sich die beiden Zwerge näher und näher kommen, bis sie schließlich miteinander verschmelzen. Falls die Summe ihrer Massen überschreitet, explodieren sie nach der Verschmelzung als Supernova vom Typ Ia.

Derzeit ist nicht bekannt, welches dieser beiden Szenarien die Supernovae vom Typ Ia erklärt – im Prinzip sind beide möglich. Dies stellt für die Theorie der Sternexplosionen ein großes Problem dar, weil die Kenntnis der Vorgeschichte der Explosion wesentlich ist, um etwa den Supernova-Überrest und die nachfolgende Anreicherung mit chemischen Elementen

NEU BEI  **OCULUM**



Lambert Spix
■ Skyscout
 Sterne und Sternbilder
 einfach finden.

Eine praktische Orientierungshilfe für Sternfreunde, komplett mit Himmelsansichten, Auf-

suchhilfen, 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 Amateurastronomen finden eine kompakte und robuste Aufsuchhilfe für ihre Lieblingsobjekte.



Ronald Stoyan
■ Fernrohr Führerschein in 4 Schritten
 Eine Anleitung für Teleskop-Besitzer

Oculum Astroeinstieg, 4. Aufl. 2008, 144 S. m. 208 Abb., kart. m. Spiralbg., Oculum.

Bestell-Nr. 1484. € 16,90 (D), € 17,40

Dieses Buch bringt einsteigergerecht Antworten auf alle Fragen rund um die Optik, Mechanik und Benutzung eines astronomischen Teleskops.



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

Vorher-Nachher einer Supernova: Die Chandra-Beobachtung von vor vier Jahren zeigt am Ort der Supernova SN 2007on eine Röntgenquelle (oben). Das Zentrum der Wirtsgalaxie NGC 1404 der Supernova befindet sich am unteren Bildrand. Im Optischen wurde die Explosion eindeutig mit dem NASA-Satelliten Swift nachgewiesen (unten).



Chandra vor der Supernova



Swift im Optischen

← SN 2007on

NASA/CXC/IMPE/R. Voss et al.; NASA/Swift

in Galaxien zu verstehen. Ein Verständnis der Vorgeschichte ist auch entscheidend, um die Supernovae als möglichst genaue Werkzeuge für die Kosmologie nutzen zu können.

Suchstrategien

Das Rätsel um die Vorgeschichte der Explosion motiviert zu einer Suche nach dem Vorläufer. Wie könnte man vorgehen?

Der einfachste Weg für den Astronomen ist es abzuwarten, bis eine Supernova vom Typ Ia irgendwo aufleuchtet. Sobald ihre Position am Himmel bekannt ist, recherchiert der Forscher, ob auf älteren Aufnahmen an dieser Stelle ein Vorläuferstern zu erkennen ist. Diese Methode funktioniert gut bei den Supernovae vom Typ II, bei denen ein massereicher, heller Stern explodiert – er sollte auf den vor der Explosion aufgenommenen Bildern gut zu sehen sein. Bei Supernovae vom Typ Ia ist das Verfahren schwieriger, weil der vorangegangene Weiße Zwerg klein und leuchtenschwach ist. Bis vor Kurzem war es nicht gelungen, den Vorgänger einer Supernova vom Typ Ia auszumachen. Eine alternative Methode besteht darin, die Spektren der Sternexplosion nach Spuren des Vorläufersystems zu untersuchen. Dabei haben die Astronomen zwar Fortschritte gemacht, doch ist dieses Verfahren zu indirekt, um daraus überzeugende Schlüsse zu ziehen.

Eine internationale Forschergruppe am Max-Planck-Institut für extraterrestrische

Physik in Garching und am Exzellenzcluster Universe der Technischen Universität München hat nun zusammen mit dem Autor einen neuen Weg gefunden, um die Vorläufer der Supernovae Ia direkt zu beobachten. Es gelang ihnen, viel weiter entfernte Vorläufer von Sternexplosionen zu untersuchen, als es bislang mit optischen Beobachtungen möglich war. Ihre Methode basiert auf Folgendem:

Wenn im Ein-Zwerg-Szenario der Weiße Zwerg Materie vom Nachbarstern aufammelt, dann bildet sich bei diesem Vorgang, Akkretion genannt, um den Zwerg eine Materiescheibe aus (Bild S. 20), die sich auf sehr hohe Temperaturen aufheizt. Dadurch strahlt sie energiereiche Röntgenstrahlung ab. Derartige Strahlungsquellen gehören zu den hellsten Röntgenstrahlern in einer Galaxie: Mit einem empfindlichen Röntgenteleskop können sie noch in einer Entfernung von etwa 50 Millionen Lichtjahren beobachtet werden.

Die Beobachtungsmethode hat nur zwei Haken: Erstens explodieren innerhalb dieser Entfernung pro Jahr nur wenige Supernovae Ia; zweitens gibt es zur Zeit nur ein Röntgenteleskop, das hinreichend empfindlich ist, nämlich das US-amerikanische Röntgenobservatorium Chandra, das auf einem Satelliten um die Erde kreist. Mit Chandra können nur so wenige Galaxien beobachtet werden, dass in ihnen allen zusammen pro Jahr mit höchstens einer Supernova Ia zu rechnen ist. Die Wissenschaftler haben lange darauf

gewartet, dass sie mit Chandra einen Weißen Zwerg kurz vor der Explosion entdecken.

Am 5. November 2007 war es dann so weit: Die Supernova mit der Katalogbezeichnung SN2007on explodierte in einer elliptischen Galaxie namens NGC 1404 in einer Entfernung von 60 Millionen Lichtjahren (siehe Bild links). Vier Jahre vor der Explosion hatte Chandra den Ort der Supernova einen ganzen Tag lang beobachtet. Die Beobachtung war empfindlich genug, um in so großer Entfernung einen akkretierenden Weißen Zwerg entdecken zu können. Und in der Tat stand am Ort der späteren Supernova eine Röntgenquelle, deren Eigenschaften mit dem Ein-Zwerg-Szenario konsistent waren! Dies schien der erste eindeutige Nachweis des Vorläufers einer Supernova Ia zu sein. Das Zwei-Zwerg-Szenario schied als Erklärung aus, weil bei zwei umeinander rotierenden Weißen Zwergen keine starke Röntgenquelle zu erwarten ist.

Als jedoch die Astronomen bessere Bilder von der SN2007on gemacht hatten, wurden Zweifel an der Interpretation angemeldet. Sie stellten fest, dass die Röntgenquelle nicht exakt an der gleichen Position stand, wie die später optisch beobachtete Supernova. Somit war ebenfalls nicht klar, ob die Röntgenquelle wirklich verschwunden war. Die Beobachtungsdaten könnten auch so ausgelegt werden, dass sich zwei unterschiedliche Quellen am Himmel zufällig sehr nahe gekommen waren.

Warten auf das Heureka-Erlebnis

Dennoch sprechen die Daten eher dafür, dass die erste Interpretation mit dem »Ein-Zwerg-Szenario« richtig ist. Weitere Röntgenbeobachtungen werden zeigen, ob das Modell mit dem akkretierenden Weißen Zwerg wirklich Bestand hat und ob vielleicht auch das »Zwei-Zwerg-Szenario« bei Supernovae vom Typ Ia vorkommt.

Auch wenn im Fall von SN2007on der vermeintliche Vorläufer keiner sein sollte, so verspricht doch die Methode große Fortschritte im Verständnis der Supernovae Ia. Die Röntgenbeobachtungen mit Chandra laufen weiter, es werden immer mehr Galaxien beobachtet. Irgendwann werden die Astronomen ein weiteres »Heureka«-Erlebnis haben und möglicherweise eine Supernova Ia entdecken, von deren heißem, akkretierenden Vorläufer eindeutige, aussagekräftige Röntgenbeobachtungen vorliegen.

Rasmus Voss

ZUM NACHDENKEN



Supernovae vom Typ Ia

Der voranstehende Bericht schildert Fortschritte bei der Suche nach den Vorläufern von Supernovae vom Typ Ia. Zwar deuten die neuen Beobachtungen mit Hilfe des Röntgensatelliten Chandra auf das »Ein-Zwerg-Szenario« hin, bei dem ein Stern, der sein maximales Volumen ausfüllt, und ein Weißer Zwerg einander umkreisen. Dennoch mag in anderen Fällen auch das »Zwei-Zwerg-Szenario« zutreffen, bei dem zwei Weiße Zwerg umeinander kreisen.

Im Folgenden sollen ein paar Energiebetrachtungen zu solchen Supernova-Explosionen und ihren Vorgängern angestellt werden.

Aufgabe 1: Bei der Supernova-Explosion wird ein großer Teil der Sternmaterie weggeschleudert. Man bestimme die in der expandierenden Hülle steckende kinetische Energie E_{kin} für einen Vorläuferstern von zwei Sonnenmassen ($m = 2 M_{\odot}$), der die Hälfte seiner Materie bei der Explosion verliert. Die Expansionsgeschwindigkeit der abgeworfenen Hülle betrage typische $v_s = 10\,000$ km/s, die Sonnenmasse ist $M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30}$ kg.

Aufgabe 2: Durch Vergleich mit unserer Sonne bestimme man die Leuchtkraft L_{SN} einer Supernova, deren absolute Helligkeit im Maximum $M_{\text{SN}} = -19,7$ mag erreicht. Die absolute Helligkeit der Sonne ist $M_{\text{Sonne}} = 4,83$ mag, ihre Leuchtkraft ist: $L_{\odot} = 3,826 \times 10^{26}$ W. Der Zusammenhang zwischen Helligkeit und Leuchtkraft ist durch $L_{\text{SN}}/L_{\odot} = \text{dex}[-(M_{\text{SN}} - M_{\text{Sonne}})/2,5 \text{ mag}]$ gegeben, mit der Abkürzung $\text{dex } \alpha = 10^{\alpha}$.

Aufgabe 3: Welche Energie emittiert die Supernova nach ihrer Explosion innerhalb **a)** von einem Tag beziehungsweise **b)** von einem Jahr, wenn man konstante Leuchtkraft voraussetzt und dazu den Wert des Helligkeitsmaximums verwendet? Man vergleiche mit dem Ergebnis von Aufgabe 1.

Aufgabe 4: Beim Zwei-Zwerg-Szenario umkreisen einander vor der Supernova-Explosion zwei Weiße Zwerg. Dieses System emittiert Gravitationswellen. Sie entstehen auf andere Weise als elektromagnetische Wellen. Diese lassen sich bereits durch zwei entgegengesetzte Ladungen erzeugen, die einen elektrischen Dipol bilden. Jedoch gibt es bei der Schwerkraftwechselwirkung keine negative Masse, mit deren Hilfe sich ein Gravitationsdipol aufbauen ließe. Die Emission von Gravitationswellen erfordert eine kompliziertere Verteilung, ein periodisch veränderliches Quadrupolmoment. Die durch Gravitationswellen abgestrahlte Leistung L_G , analog zur elektromagnetischen Strahlung ebenfalls Leuchtkraft genannt, lässt sich abschätzen mit:

$$L_G = \frac{64}{5} \frac{G^4}{c^5} \left(\frac{m}{r} \right)^5.$$

Dabei ist $G = 6,6743 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ die Gravitationskonstante und $c = 2,998 \times 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit. Die mittlere Masse der Weißen Zwerg betrage $m = 1 M_{\odot}$ und $r = 0,003$ AE, etwas mehr als die Entfernung Erde-Mond, sei ihr Abstand vom Schwerezentrum. Die Astronomische Einheit ist $1 \text{ AE} = 149,6$ Millionen km. Man vergleiche mit der Leuchtkraft der Sonne.

Aufgabe 5: Offenbar verliert das Sternpaar durch die Abstrahlung der Gravitationswellen Energie, die ihren Abstand voneinander verringert. Um welchen Faktor ändert sich das Ergebnis, wenn der Abstand der beiden Weißen Zwerg auf **a)** die Hälfte bzw. **b)** ein Viertel geschrumpft ist? Axel M. Quetz

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **15. August** an:

Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: (+49)0 62 21–52 82 46.

Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern Preise verlost: siehe Seite 125.