



Aus der unmittelbaren Nähe des rund 2800 Lichtjahre entfernten Sterns HD 49 798 entweichen Röntgenstrahlen. Messungen des Röntgensatelliten XMM-Newton der ESA belegen, dass sie von einem Weißen Zwerg stammen, der mit dem 8,3 mag hellen leuchtkräftigen O6-Stern ein enges Doppelsternsystem bildet. Die Akkretions-scheibe des Weißen Zwergs speist sich aus dem Sternwind des weitaus größeren, in dieser künstlerischen Darstellung im Hintergrund stehenden Partners. In wenigen Millionen Jahren wird an dieser Stelle des Himmels eine Supernova aufleuchten.

Wie Weiße Zwerge wachsen – und explodieren

Nur fünf Prozent aller Supernovaexplosionen vom Typ Ia in elliptischen Galaxien gehen auf Materie aufsammlende Weiße Zwerge zurück. Zu diesem Ergebnis kommen Astronomen vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching bei München. Sie maßen dazu die von diesen Galaxien ausgehende Röntgenstrahlung. Offenbar wird der größte Teil der gewaltigen Sternexplosionen durch die Vereinigung zweier Weißer Zwerge verursacht.

Supernovae von Typ Ia dienen als wichtige Entfernungsindikatoren am oberen Ende der kosmischen Entfernungsleiter. Sie sind deshalb für die Kosmologie von besonderer Bedeutung. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Expansionsrate des Universums mit sehr weit entfernten Galaxien messen, denn durch die ungeheure Leuchtkraft der Explosionen sind sie selbst dort noch zu beobachten, wo andere Methoden zur Entfernungsbestimmung versagen (siehe Kasten rechts).

Ende der 1990er Jahre führten eben solche Messungen zu der überraschenden Entdeckung, dass sich die Expansion des Universums zu beschleunigen scheint. Diesen Beobachtungsbefund versuchen die Astronomen mit der Existenz einer abstoßend wirkenden Energieform zu er-

klären, die rund 70 Prozent der Materie-Energiedichte des Universums ausmachen soll: der Dunklen Energie. Die Materie-Energiedichte berücksichtigt gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie, dass wegen der Äquivalenz von Masse und Energie ($E = m c^2$, m ist die Masse, c ist die Lichtgeschwindigkeit) auch Energiemengen E eine gravitative Wirkung entfalten.

Standardkerzen

Ihre Eigenschaft als Standardkerze der Kosmologen verdanken die Supernovae vom Typ Ia der Tatsache, dass die Rate, mit der ihre Helligkeit nach der Explosion abnimmt, mit ihrer maximalen Helligkeit kurz nach der Explosion eng korreliert ist. Auf diese Weise lässt sich ihre absolute Leuchtkraft bestimmen. Aus dem Ver-

gleich mit der gemessenen scheinbaren Helligkeit lässt sich dann ihr Abstand zu uns berechnen.

Über den genauen Entstehungsmechanismus der Typ-Ia-Supernovae besteht jedoch bis heute Unklarheit. Neuen Erkenntnissen zufolge ist das populärste Szenario eines Supernova-Ia-Vorläufers, in dem ein Weißer Zwerg Materie von einem Begleitstern aufammelt, nur für einen geringen Teil aller Supernovaexplosionen verantwortlich!

Unstrittig ist, dass es explodierende Weiße Zwerge sind, die als Typ-Ia-Supernovae in Erscheinung treten. Dies ergibt sich zum einen aus der hohen Gleichförmigkeit ihrer Maximalhelligkeiten und Helligkeitskurven. Zum anderen folgt dies aus der Beobachtung, dass in den Spek-

tren der SN Ia keine Absorptionslinien von Wasserstoff oder Helium auftreten. Stattdessen herrschen die Linien von Silizium, Kalzium und Eisen vor – die Bausteine Weißer Zwerge. Im Gegensatz dazu kollabiert bei den Supernovae des Typs II ein massereicher Stern am Ende seines Lebenszyklus zu einem Neutronenstern oder Schwarzen Loch und sprengt seine äußeren Hüllen ab.

In Weißen Zwerge, den Endzuständen sonnenähnlicher Hauptreihensterne, wird die Schwerkraft der Sternmaterie durch den so genannten Entartungsdruck der Elektronen ausbalanciert. Dieser Entartungsdruck rührt von quantenmechanischen Effekten her, die bei den enormen Drücken, Dichten und Temperaturen im Sternzentrum eine Rolle spielen. Solche Sternleichen sind klein, sehr dicht und nur bis zu einer gewissen Masse stabil. Die maximale Masse eines Weißen Zwerge wird als Chandrasekhar-Grenzmasse bezeichnet, sie beträgt etwa 1,4 Sonnenmassen. Überschreitet der Zwergstern diese Grenze, so vermag der Elektronenentartungsdruck der Gravitation nicht weiter standzuhalten – die Temperatur im Innern des Zwerge steigt an und eine unkontrollierte, explosionsartige Fusion der dort vorhandenen Atomkerne setzt ein. Das überlebt der Weiße Zwerg nicht – er wird in einer gewaltigen thermonuklearen Explosion vollständig zerstört: einer Supernova.

Grenzmasse

Wie aber vermag der Weiße Zwerg diese Grenzmasse zu erreichen? Die meisten Weißen Zwerge enthalten bei ihrer Entstehung nicht mehr als 0,6 bis 1,2 Sonnenmassen. Um bis an die Chandrasekhar-Grenze zu wachsen und zur Supernova zu werden, muss durch irgendeinen Mechanismus Materie auf den Zwergstern transferiert werden. Zwei mögliche Szenarien kommen hierfür in Frage: das Akkretionsmodell und das Modell der sich vereinigenden Weißen Zwerge.

Im Akkretionsmodell befindet sich der Zwerg in einem Doppelsternsystem mit einem Hauptreihenstern (siehe Bild). Wird Letzterer zum Ende seiner Hauptreihenphase hin zu einem Roten Riesen, so gelangt von diesem Materie über eine Akkretionsscheibe auf die Oberfläche des Weißen Zwerge. Dabei handelt es sich vorwiegend um Wasserstoff und Helium aus der äußeren Hülle des Riesensterns. Ob

der Weiße Zwerg durch diese Massenakkretion die Chandrasekhar-Grenze erreicht und damit zur Supernova wird, hängt entscheidend von der Geschwindigkeit dieses Massentransfers ab: Nur wenn diese den Wert von 10^{-7} Sonnenmassen pro Jahr überschreitet, kann eine stabile, stetige Kernfusion der sich bildenden Wasserstoff-Helium-Hülle des Zwergsterns einsetzen, die den Stern dabei langsam wachsen lässt. Ist die Rate hingegen zu klein, dann zündet die Fusion explosionsartig und bläst die akkretierte Hülle in den Raum. Der Stern wird zu einer wiederkehrenden – die Astronomen sagen: rekurrierenden – Nova, ohne dabei an Masse zu gewinnen. Ist umgekehrt die Rate zu groß, so bewirken die einsetzen-

den heftigen Fusionsreaktionen starke Sternwinde, die den weiteren Einfall von Materie auf den Zwergstern verhindern.

Zwei Weiße Zwerge

Ist der Partner im Doppelsternsystem ebenfalls ein Weißer Zwerg, so findet keine Akkretion statt, da die Sternmaterie zu kompakt ist. Stattdessen können die beiden Weißen Zwerge durch das Aussenden von Gravitationswellen immer näher rücken und sich schließlich vereinigen (siehe Bilder auf S. 26). Falls ihre gemeinsame Masse größer als die Chandrasekhar-Masse ist, entsteht in diesem Vereinigungsszenario ebenfalls eine Supernova vom Typ Ia. Damit dies innerhalb einer Zeitskala geschieht, die kleiner als das Alter des Uni-

Die kosmische Entfernungsleiter

Die Vermessung des Weltalls fußt auf einer Reihe unterschiedlicher Methoden, die bei unterschiedlichen Distanzbereichen und Reichweiten funktionieren. Die Astronomen hangeln sich von Sprosse zu Sprosse hin zu immer größeren Entfernungen. Dabei nehmen die Ungenauigkeiten mit wachsenden Distanzen immer mehr zu.

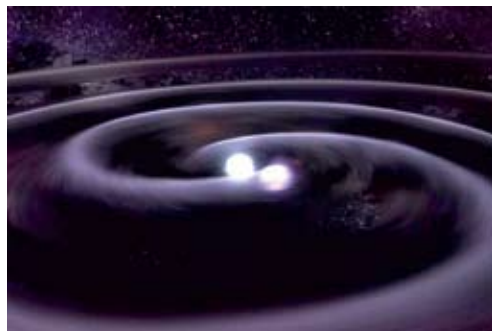
So beruht die Kenntnis der Abstände innerhalb unseres Sonnensystems auf der Laufzeitmessung von Radarechos zu den inneren Planeten, Mond und Mars, sowie der Erde nahe kommender Kleinplaneten.

Die hieraus gewonnene Kenntnis des präzisen Werts der Astronomischen Einheit (AE) ermöglicht die Bestimmung der Parallaxe nicht allzu weit entfernter Sterne. Dabei nutzen die Astronomen die von der Erde im Verlauf ihrer Sonnenumrundung aufgespannte Basislänge von zwei AE zur Messung der kleinen Winkel aus, um die der nahe Stern vor den weit entfernten Hintergrundobjekten hin- und herschwingt. Das Prinzip lässt sich beim abwechselnden Schließen und Öffnen der Augen erkennen, die auf den hochgereckten Daumen am ausgestreckten Arm blicken und diesen dabei vor dem Hintergrund hin und her hüpfen sehen.

Mit dieser Methode lotete der Astrometriesatellit Hipparcos mehrere hunderttausend Sterne in der Sonnenumgebung präzise aus. Gegen Ende 2011 soll sein Nachfolger Gaia gestartet werden, der die unglaubliche Menge von einem Prozent des kompletten Bestands der 100 Milliarden Sterne in unserem Milchstraßensystem vermessen soll – also eine Milliarde Sternörter in allen drei Dimensionen.

Ein Entfernungsindikator, mit dem sich die Abgründe zwischen den Galaxien überbrücken lassen, steht uns mit den Cepheiden zur Verfügung. Dieser spezielle Sterntyp befindet sich in einer Entwicklungsphase, bei der sich der Sterndurchmesser rhythmisch verändert. Die Pulsationsperiode ist durch die physikalischen Gegebenheiten eng mit der jeweiligen Helligkeit verknüpft. So lässt sich einfach durch Messung der Pulsationsperiode und der scheinbaren Helligkeit eines Cepheiden seine wahre Helligkeit ermitteln und daraus dessen Distanz bestimmen. Einziges Problem: Der Cepheide muss sich natürlich von anderen Sternen unterscheiden lassen. Und das gelingt wegen der begrenzten Auflösung auch weltraumgestützter Teleskope nur bis zu einer gewissen Maximaldistanz.

Zu den geschilderten Methoden gesellen sich weitere, mit denen sich einige Sprossen der kosmischen Entfernungsleiter besser ausloten oder sogar zusätzliche Sprossen einbinden lassen. Den Entfernungsrekord bei diesen Methoden halten die Supernovae mit ihren unvergleichlich hellen Explosionen, die sie bis in die hintersten Ecken des zugänglichen Universums sichtbar machen.



versums ist, darf die anfängliche Orbitaldauer des Systems nicht länger als zwölf Stunden sein. Tatsächlich wurden in der Vergangenheit solche engen Zwergsysteme in der Milchstraße entdeckt, allerdings enthält keines davon die erforderliche Masse zur Erzeugung einer Supernova.

Sehr wahrscheinlich kommen beide Modelle in der Natur vor. Während sich aber ein Doppelsternsystem aus zwei Weißen Zwergen in unserer Milchstraße aufgrund der geringen Leuchtkraft der Weißen Zwerge mit den heutigen Mitteln nur schwer, in anderen Galaxien überhaupt nicht beobachten lässt, sollte bei der Massenakkretion im Gravitationsfeld des Zwergs Röntgenstrahlung entstehen. In diesem Spektralbereich wäre das Sternsystem mehr als 10 000 Mal so hell wie die

Sonne und deshalb mit Hilfe von Röntgensatelliten auch in entfernten Galaxien aufzuspüren.

Tatsächlich gelang im Februar 2008 die Entdeckung eines solchen Röntgensignals. Es wurde nachträglich auf einer Archivaufnahme der Galaxie NGC 1404 entdeckt, die das Röntgenteleskop Chandra im Jahr 2003 gewonnen hatte. Genau an dieser Position erschien vier Jahre später die Typ-Ia-Supernova 2007on. Die erstmalige Entdeckung einer Röntgenquelle als Vorläufer einer Typ-Ia-Supernova schien die Waagschale in Richtung des Akkretionsmodells zu neigen. Erstaunlich aber war, dass es sich bei NGC 1404 um eine elliptische Galaxie handelt, deren alte Sternpopulation eigentlich nur wenige akkretierende Systeme enthalten sollte. Im Jahr

2009 entdeckten Forscher eine weitere Röntgenquelle, RX J0648.0–4418. Ihre Messungen deuten darauf hin, dass es sich um einen akkretierenden Zwerg handelt, der auf dem Weg zur Supernova ist.

Röntgenfluss der Galaxien

Marat Gilfanov und Ákos Bogdán vom Max-Planck-Institut für Astrophysik gingen nun einen anderen Weg, um eine Abschätzung von der Häufigkeit der beiden Modelle zu erhalten. Statt nach einzelnen Supernovaereignissen und deren Vorläufersternen zu suchen, verglichen sie den gesamten gemessenen Röntgenstrahlungsfluss von verschiedenen Galaxien und verglichen diese Werte mit den Erwartungen für den Fall, dass für die Mehrzahl der Typ-Ia-Supernovae das Akkre-

ZUM NACHDENKEN

Die Steifheit des Kontinuums

Die Verkrümmung des Raum-Zeit-Kontinuums durch Gravitationswellen sollte es ermöglichen, ihren Durchgang mit einem Gravitationswellendetektor nachzuweisen. Der messbare Effekt ist wegen der Steifheit der Raumzeit allerdings ungeheuer winzig.

In der klassischen Mechanik beschreibt das Hooksche Gesetz $\Delta l = \frac{1}{D} \cdot F$, wie die von einer Feder ausgeübte Kraft F mit ihrer Auslenkung Δl zusammenhängt. Darin ist D die Federkonstante. Je härter – steifer – die Feder konstruiert ist, je größer also D ausfällt, umso geringer gerät die Auslenkung bei gegebener Kraft. In der allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben ganz ähnlich die einsteinschen Feldgleichungen $G = \frac{1}{\kappa} \cdot T$ den Zusammenhang zwischen den Gravitationsquellen T und der Geometrie der Raumzeit G (hier muss nicht interessieren, dass es sich dabei um einen

Satz von zehn gekoppelten, nichtlinearen, partiellen Differenzialgleichungen handelt). G und T sind Tensoren aus jeweils 4×4 Elementen. In T stecken alle Arten von Gravitationsquellen. Wegen der Masse-Energie-Äquivalenz sind dies Energie, etwa elektromagnetische, aber auch Drücke, Impulse und Scherspannungen. Die Elemente von T haben die Dimension Energie pro Volumen. Der Proportionalitätsfaktor enthält nur Naturkonstanten (Lichtgeschwindigkeit: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, Gravitationskonstante $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$):

$$\kappa = \frac{c^4}{8\pi G}$$

Aufgabe 1: Wie groß ist die Steifheit κ des Raum-Zeit-Kontinuums?

Aufgabe 2: Welche physikalische Einheit besitzen die Geometrie beschreibenden Terme des Einsteintensors G ?

Aufgabe 3: Die von einem $D = 7$ kpc entfernten System zweier einander eng mit der Periode $P = 4$ Stunden umkreisender kompakter Sterne ausgesandte typische Gravitationsleuchtkraft sei $L_G = 3 \cdot 10^{27}$ J/s. Sie verursacht auf der Erde eine (dimensionslose) Amplitude:

$$h = \sqrt{L_G \frac{c}{4\pi\kappa} \cdot \frac{P}{2\pi D}}$$

Lässt sich die Quelle nachweisen, wenn die Nachweisgrenze des Gravitationswellenobservatoriums bei $h = 10^{-21}$ liegt?

AXEL M. QUETZ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **17. Mai 2010** 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 S. 115.





Diese Sequenz zweier Weißer Zwerge, die sich zunehmend enger umkreisen, führt schließlich zum Verschmelzen der beiden Sterne und der damit verbundenen Supernova-Explosion. Beim Umkreisen verlieren sie Bahndrehimpuls durch das Aussenden von Gravitationswellen (vergleiche auch S. 10). Die komplette Animation findet man bei den Weblinks.

tionsmodell verantwortlich ist. Ihr Ergebnis: Der gesamte Röntgenstrahlungsfluss ist um einen Faktor 30 bis 50 zu gering, als dass die in diesen Galaxien beobachtete Rate von Supernova-Ia-Explosionen durch akkretierende Sternsysteme verursacht werden könnte. Allenfalls fünf Prozent aller Supernovae von Typ Ia könnten demzufolge auf diese Weise entstehen, bei dem Rest müsste es sich demnach um verschmelzende Weiße Zwerge handeln!

Dabei ist bereits berücksichtigt, dass der beobachtete Röntgenfluss eine Obergrenze für die von akkretierenden Doppelsternsystemen ausgesendete Strahlung darstellt. Neben ihnen tragen noch eine Reihe weiterer Quellen zum gesamten Röntgenstrahlungsfluss einer Galaxie bei. Sind die Abschätzungen korrekt, dann dürfte der Anteil des Akkretionsszenarios an der Gesamtrate der Supernovae vom Typ Ia gering sein.

Es gibt aber eine wichtige Einschränkung bei der Interpretation dieses Ergebnisses. Gilfanov und Bogdán wählten für ihre Untersuchungen fünf Galaxien des Hubbletyps E beziehungsweise S0 sowie die zentrale Aufwölbung, den *Bulge*, der Andromedagalaxie M 31 aus. In diesen gemäß ihrer Position im historischen Klassifikationsschema von Edwin Hubble so genannten »frühen« Galaxientypen finden sich vor allem ältere Sternpopulationen und nur wenige Sternentstehungsgebiete. Die Wahrscheinlichkeit, dort noch ausreichend massereiche Hauptreihensterne zu finden, die als Spendersterne für Weiße Zwerge dienen, ist daher geringer als in den »späten« Galaxientypen, insbesondere in Spiralgalaxien mit aktiver Sternentstehung. Zwar zeigte die Entdeckung des Vorläufers von SN 2007on in NGC 1404, dass es auch in solchen Sternsystemen akkretierende Doppelsternsysteme gibt, doch sollte dies eher die Ausnahme sein. Die Begriffe »früh« und »spät« bezeichnen hierbei nur die Lage innerhalb der Hubble-Klassifizierung, nicht aber das Alter der Galaxien.

Gilfanov und Bogdán liefern somit ein weiteres wichtiges Puzzlestück zur Enttarnung der Typ-Ia-Supernovae. Die unterschiedlichen Massen der Weißen Zwerge bei ihrer Verschmelzung könnten die Verwendung der Supernovae vom Typ Ia als Standardkerzen erschweren, denn nun ist eine Streuung der Lichtkurven und der Maximalhelligkeiten zu erwarten, was allerdings die Existenz der Dunklen Energie nicht in Frage stellt, zumal sie unabhängig auch aus den Messungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds gefolgert wird. Spannend ist auch, ob und wie sich die Resultate ändern, wenn die Untersuchung auf späte Galaxientypen ausgeweitet wird. Hier, so die Forscher, könnte das Akkretionsszenario doch noch eine signifikante Rolle spielen.

JAN HATTENBACH

Literaturhinweise

Voss, R.: Jagd nach den Vorläufern der Supernovae Ia. In: *Sterne und Weltraum* 8/2008, S. 20–23.

Gilfanov, M., Bogdán, A.: An upper limit on the contribution of accreting white dwarfs to the type Ia supernova rate. In: *Nature* 463, S. 924–925, 2010.

Voss, R., Nelemans, G.: Discovery of the progenitor of the type Ia supernova 2007 on. In: *Nature* 451, S. 802–804, 2008.

Mereghetti, S., et al.: An ultramassive, fast-spinning white dwarf in a peculiar binary system. *Science*, 325, S. 1222–1223, 2009.

Hillebrandt, W., Niemeyer, J. C.: Type Ia supernova explosion models. In: *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 38, S. 191–230, 2000.

Livio, M.: The progenitors of type Ia supernovae. In: *Type Ia supernovae, theory and cosmology* (Hrsg.: Niemeyer, J. C., Truran, J. W.) S. 33–48. Cambridge University Press 2000.

Weblinks zum Thema:

www.astronomie-heute.de/artikel/1026085

Vixen®

**Astronomische Teleskope
und Zubehör aus Japan**

Frühlingsaktion

(bis 31.05.2010)

**Die perfekte Astrofotografie-Lösung
mit AX103S ED-Apochromaten**

Neu!

A103S Triplet ED Apo plus Field-Flattener
Öffnung: 103mm
Brennweite: 825mm, f/8
Backfokus: 165mm
ID: 60mm ohne Reducer

Gratis 1 LV-Okular LV18 oder 20mm

AX103S+SXD GoTo-Montierung

Art-Nr. 25038: UVP €6.704,00 → €6.249,00

Neu!

Gratis 1 LV-Okular LV18 oder 20mm

AX103S Triplet Apo + Field-Flattener

Art-Nr. 5867: UVP €3.239,00 → €2.859,00

Neu!

825mm (F8) auf 578mm (F5,6)
* Für Fokal-Fotografie

Fokal-Reducer AX103S (für APS-C)

Art-Nr. 37228: UVP €239,00 → €199,00

Parallaktische Präzisions-Montierung mit STAR BOOK-GoTo-Controller und einer max. Zuladung von 32,5kg inkl. Gegengewichte.

New ATLUX-Montierung mit STAR BOOK

Art-Nr. 3690: UVP €5.899,00 → €4.999,00

Vixen Europe GmbH
<http://www.vixen-europe.com/>

Anniversary

60th
Vixen since 1949

Kleinhülsen 16/18,
40721 Hilden, Germany
Telefon 02103 / 89787-0
F a x 02103 / 89787-29

<http://vixen-shop.eu/>

Neu! Restposten