

Die Frage des Brennstoffs

Kürzlich wurde sogenanntes Heliumbrennen auf einem Weißen Zwergstern entdeckt.

Jan-Uwe Ness

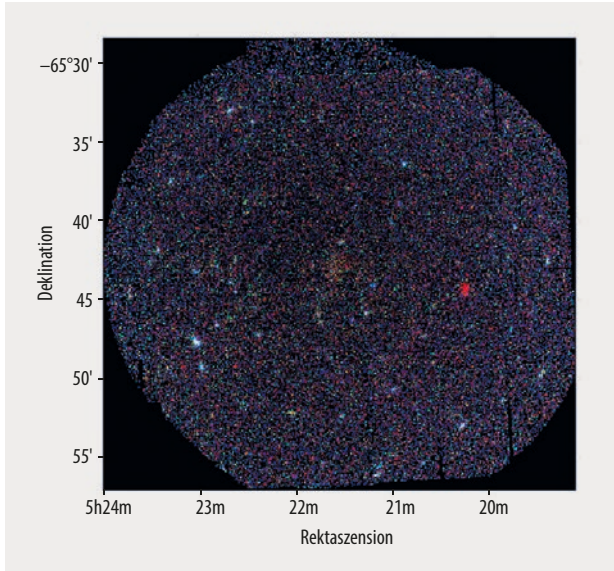


Abb. 1 Die Falsch-Farben-Abbildung zeigt die Röntgenaufnahme von XMM-Newton, die kürzlich ausgewertet wurde. Die Helligkeit in jedem Pixel skaliert mit der Anzahl der Röntgenphotonen, die an der jeweiligen Himmelsposition gemessen wurden, während die Farbe mit der Photonenenergie skaliert: rot bedeutet niedrige Photonenenergie (weiche Röntgenstrahlung) bis zu blau, was für hohe Energie steht (harte Röntgenemission). Die Position der extrem weichen Quelle (05h20m15,1s -65° 44' 26") sticht dadurch hervor, dass alle Photonen rot, d. h. niederenergetisch, sind.

In einem Doppelsternsystem in der großen Magellanschen Wolke transferiert ein Stern heliumreiches Material auf einen Weißen Zwergstern, auf dessen Oberfläche das Helium zu schwereren Elementen fusioniert. Diese Entdeckung machte kürzlich eine Gruppe vom Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching [1]. Dieser Vorgang ist ungewöhnlich, da Wasserstoff das häufigste Element im Universum ist und daher in solchen Systemen normalerweise wasserstoffhaltiges Material übertragen und verbrannt wird. Diese Entdeckung leistet einen wichtigen Beitrag, um die Bestimmung großer Entfernungen zu kalibrieren.

Eine solche Entfernungsbestimmung spielt eine zentrale Rolle für eine der bedeutendsten Fragen der Astronomie – nämlich die nach der Dunklen Energie, die auch der ESA-Satellit Euclid untersucht. Auf deren Existenz lässt sich schließen, weil sich das Universum schneller auszuweiten scheint, als es die Gravitation aller Materie erlaubt. Die Messung der Expansion des Universums gelingt über die Entfernung hochrotverschobener Galaxien. Die Rotverschiebung

skaliert mit der Entfernung, was mit Supernovae vom Typ Ia kalibrierbar ist. Hierbei kollabiert ein Weißer Zwergstern, der durch vorheriges Massenwachstum eine kritische Masse überschreitet. Für dieses Wachstum ist ein Doppelsystem erforderlich, das entweder aus zwei miteinander verschmelzenden Weißen Zwergsternen besteht oder einem Weißen Zwerg und einem regulären Begleitstern. In beiden Szenarien gibt es Ungereimtheiten, um die es im Folgenden gehen soll. Der entscheidende Beitrag der aktuellen Arbeit liegt darin, eine dieser Ungereimtheiten aufzulösen.

Ein Weißer Zwerg steht am Ende der Entwicklung sonnenähnlicher Sterne, deren ursprünglicher Vorrat an Wasserstoff zu Helium und schwereren Elementen fusioniert ist. Damit fehlt ihnen die Energiequelle, um das hydrostatische Gleichgewicht aufrechtzuerhalten. Der Stern kollabiert unter der eigenen Gravitation, bis nur noch das Pauli-Prinzip dem totalen Kollaps auf atomarer Ebene Einhalt gebietet. Sind alle Atome im Grundzustand und die Materie damit maximal kondensiert, stellt das Pauli-Prinzip einen Widerstand gegen wei-

tere Kompression dar. Dieser Extremzustand des Materials heißt entartet („degenerate“). Ein Weißer Zwerg ist demnach ein entarteter Stern, der aus schwereren Elementen wie Helium, Kohlenstoff oder Sauerstoff besteht und eine Gesamtmasse von maximal 1,4 Sonnenmassen besitzt (je nach Masse des Vorgängersterns), die komprimiert ist auf das Volumen der Erde. Bei höherer Masse kann es aufgrund des hohen Drucks zu Kernverschmelzungsreaktionen schwerer Elemente kommen, die genug Energie für eine Explosion erzeugen.

Da kollabierende Weiße Zwerge immer die gleiche Masse besitzen, ist die absolute Helligkeit der Explosion immer gleich. Daher eignen sich Supernovae Ia als „Standardkerzen“: Aus der gemessenen scheinbaren Helligkeit leitet sich die Entfernung genau ab. Für diese Erkenntnis erhielt Subrahmanyan Chandrasekhar 1983 den Physik-Nobelpreis. Da Supernovae Ia sehr hell sind, eignen sie sich, um die Entfernungen weit entfernter Galaxien zu bestimmen. Die Rotverschiebung resultiert aus der Expansion des Universums in alle Richtungen. Ihre Skala ist zur Bestimmung von Entfernungen in der Kosmologie kalibrierbar.

Eine Vielzahl spektroskopischer Beobachtungen von Supernovae Ia deutet darauf hin, dass diese keinen Wasserstoff enthalten, aber reich an Helium sind (z. B. [2]). Dies überrascht zunächst nicht, da Weiße Zwerge ihren Wasserstoff im Vorgängerstern zu Helium verbrannt haben und damit grundsätzlich arm an Wasserstoff sind. Jedoch ist unklar, wie der Weiße Zwerg arm an Wasserstoff bleiben kann, wenn er Masse aus seiner Umgebung aufnimmt. Denn Wasserstoff ist das mit Abstand häufigste Element im Universum. Betrachtet man zwei Weiße Zwerge, die miteinander verschmelzen („double-degenerate“), löst

dies zunächst elegant das Wasserstoffproblem. Allerdings ist die beobachtete Rate von Supernovae Ia deutlich höher, als es Doppelsysteme von Weißen Zwergen gibt, die ihren Bahndrehimpuls effizient genug abgeben können, um schnell genug zu verschmelzen.

Systeme aus einem Weißen Zwerg und einem regulären Begleitstern („single-degenerate“) sind deutlich häufiger. Allerdings ist die äußere Hülle regulärer Begleitsterne meist wasserstoffreich, sodass ein Mechanismus nötig ist, um den aufgenommenen Wasserstoff rechtzeitig vor der Explosion loszuwerden. Eine Möglichkeit besteht darin, dass sich der Wasserstoff durch Kernbrennprozesse auf der Oberfläche allmählich in Helium verwandelt, bevor es zur Supernova-Explosion kommt. Da bei dieser Fusion viel Energie entsteht, kann aber auch Massenverlust durch Strahlungsdruck auftreten, was das Wachstum des Weißen Zwerges behindern kann.

Seit den 1980er-Jahren kennen wir eine kleine Klasse von Objekten, die als superweiche Röntgenquellen bekannt sind [3]. Sie wurden später identifiziert als Weiße Zwergsterne, auf deren Oberfläche Kernbrennreaktionen zu den beobachteten hohen Temperaturen und Leuchtkräften führen [4]. In einer Beobachtung durch das Röntgenteleskop XMM-Newton, die nun ausgewertet wurde [1], sticht eine Quelle als auffällig rot hervor (Abb. 1). Dies illustriert die extreme Weichheit dieser Quellen. Gemeinhin besteht die Annahme, dass diese Quellen ihre Energie aus Wasserstoffbrennen beziehen. Allerdings zeigen einige Modelle, dass sehr ähnliche Röntgenbeobachtungen aus Heliumbrennen resultieren (z. B. [5]). Die Röntgenbeobachtungen alleine beantworten also nicht eindeutig, ob es sich um Helium- oder Wasserstoffbrennen handelt. Die Antwort lieferte ein optisches Spektrum des SALT-Observatoriums in Südafrika (Abb. 2). Dieses Spektrum zeigt ausschließlich Helium-Emissionslinien, die in dem Material gebildet werden, das sich auf dem Weg vom Begleitstern zum Weißen Zwerg befindet – genauer gesagt in der Akkretionsscheibe.

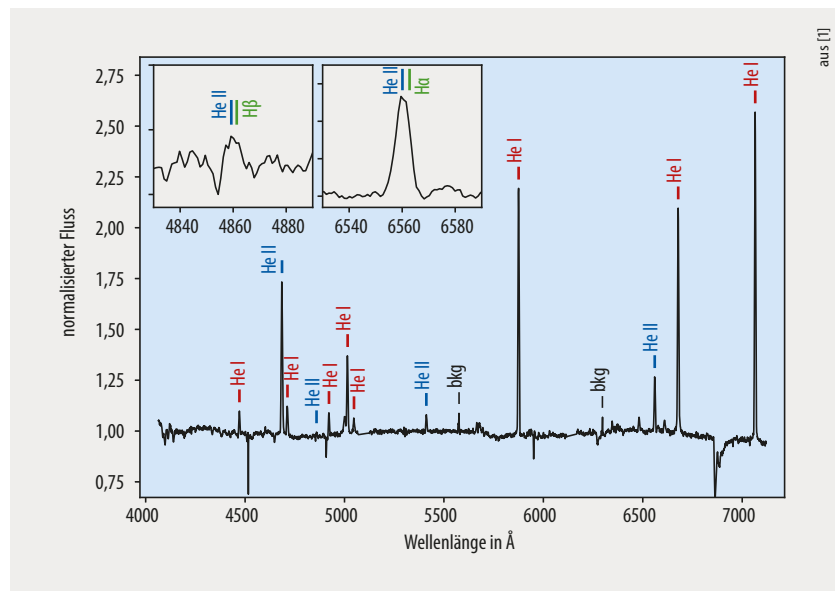


Abb. 2 Der SALT/RSS-Spektrograph in Südafrika nahm dieses optische Spektrum im August 2020 auf. Die stärksten Emissionslinien sind markiert und gehen ausschließlich auf Helium zurück. Rot markierte Linien gehören zu Helium im neutralen Zustand, blaue zu einfach ionisiertem Helium. Die kleinen Insets zeigen, dass die Emissionslinien bei 4860 Å und 6560 Å von He II stammen, nicht von Wasserstoff (grün).

Somit ist bereits das akkretierte Material arm an Wasserstoff, da der Begleitstern den meisten Wasserstoff verbrannt hat und entsprechend heliumreich ist. Dies beantwortet die Frage des hohen Heliumanteils im Single-degenerate-Szenario: Der Weiße Zwerg nimmt wasserstoffarmes Material auf, weswegen die Supernovae Ia keinen Wasserstoff mehr enthalten.

Noch offen ist, wie häufig solche Heliumsterne als Begleitsterne von Weißen Zwergen vorkommen und ob diese Anzahl konsistent ist mit der Rate von Supernova-Ia-Explosionen, um als Vorgängersysteme infrage zu kommen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass nicht alle Weißen Zwerge als Supernova Ia explodieren können. Enthält ein Weißer Zwerg nämlich zu viele schwere Elemente (etwa Ne, Mg, Si), genügt die gesamte Kernbindungsenergie nicht, um ihn zu zerreißen. Bei Erreichen von 1,4 Sonnenmassen kollabiert der Weiße Zwerg in dem Fall recht unauffällig zu einem Neutronenstern. Bei den Single-degenerate-Systemen kommt das sehr häufig vor, da der Vorgängerstern des Weißen Zwerges aufgrund der Sternentwicklung massereicher gewesen sein muss als der Begleitstern, und massereichere Sterne er-

zeugen schwerere Elemente. Somit besteht noch weiterer Klärungsbedarf zu den Single-degenerate-Vorgängermodellen.

- [1] J. Greiner et al., *Nature* **615**, 605 (2023)
- [2] A. V. Filippenko, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **35**, 309 (1997)
- [3] K. S. Long, D. J. Helfand und D. A. Grabelsky, *ApJ* **248**, 925 (1981)
- [4] E. P. J. van den Heuvel et al., *A&A* **262**, 97 (1992)
- [5] I. Iben, Jr., und A. V. Tutukov, *ApJ* **431**, 264 (1994)

Der Autor

Dr. Jan-Uwe Ness, European Space Agency (ESA), European Space Astronomy Centre, Camino Bajo del Castillo s/n, Villanueva de la Cañada, 28692 Madrid, Spanien