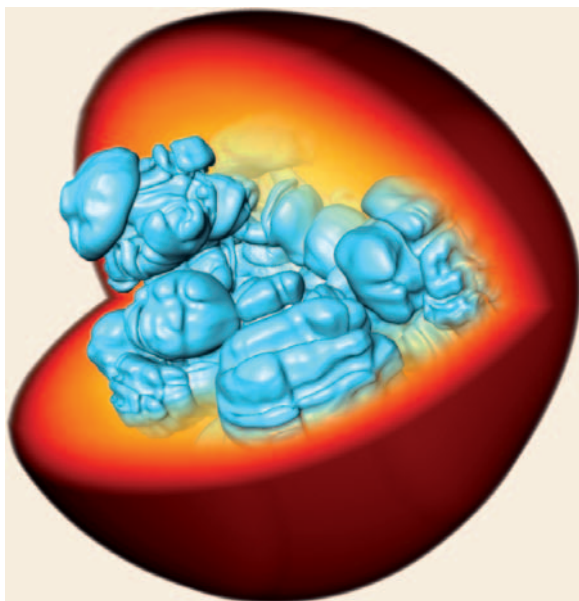


■ Supernovae als Standardkerzen

Aufwändige Simulationsrechnungen und detaillierte Spektroskopie haben gezeigt, dass Supernovae vom Typ Ia nach einem einheitlichen Mechanismus explodieren. Damit wird die kosmologische Interpretation dieser Sternexplosionen auf ein solides Fundament gestellt.

Zu den faszinierendsten Ereignissen im All gehören Supernova-Explosionen. Dabei leuchtet ein Stern in wenigen Tagen hell auf und strahlt etwa so viel Licht ab wie die gesamte Galaxie, die ihn beherbergt. Innerhalb von



Bei dreidimensionalen Simulationen von Typ-Ia-Supernovae wird angenommen, dass das nukleare Brennen bei ausreichend hoher Dichte an zufälligen Stellen im Kern eines weißen Zwergs zündet. Die entstehenden Brennfronten werden durch Turbulenz verformt und erweitert, breiten sich nach außen aus und bilden die charakteristischen Pilzstrukturen (aus [3]).

Monaten verlöscht die Supernova anschließend wieder. Supernovae werden durch thermonukleare Explosionen ausgelöst, in denen entweder der Kern eines massereichen Sterns ausbrennt und aufgrund seiner Schwerkraft kollabiert oder ein Weißer Zwerg durch äußere Einflüsse über die Massengrenze getrieben wird, die er noch stabilisieren kann. Letztere bilden Supernovae vom Typ Ia (SN Ia), der sich dadurch auszeichnet, dass man in seinem Spektrum Linien von Silizium, aber nicht von Wasserstoff findet.

Der Kern von Weißen Zwergen besteht aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Da die Masse nicht ausreicht, um die Zentraltemperatur hoch genug zu treiben, bricht

die nukleare Energieerzeugung über die Kernfusion ab. Durch die Gravitation wird der Stern dann so weit komprimiert, dass das Elektrogen gas in seinem Inneren entartet und ihn durch seinen Fermi-Druck stabilisiert. Das ist bis zur Chandrasekhar-Grenze von knapp 1,4 Sonnenmassen möglich. Kurz bevor ein Weißer Zwerg diese Grenze erreicht, wird durch die hohe Dichte in seinem Kern thermonukleares Brennen gezündet, das die Explosion in Gang setzt. Weiße Zwerge können über die Chandrasekhar-Masse getrieben werden, indem z. B. ein massereicher Begleitstern Masse an den Weißen Zwerg abgibt oder durch die Kollision zweier Weißer Zwerge.

Vereinfachend ausgedrückt, explodiert also bei einer SNIa immer dieselbe Menge an „Sprengstoff“. Also sollten diese Supernovae im Wesentlichen alle gleich hell sein. Da sich aus ihrer scheinbaren Helligkeit dann ihre Entfernung ergibt, eignen sie sich als „Standardkerzen“, um Entfernungen zu bestimmen. Gemeinsam mit der Rotverschiebung ihrer Spektren lässt sich daraus die Expansion des Universums rekonstruieren. Dies hat zu der spektakulären Erkenntnis geführt, dass sich das Universum seit etwa sieben Milliarden Jahren *immer schneller* ausdehnt. Weitreichende kosmologische Schlussfolgerungen wie die Existenz der dunklen Energie bauen darauf auf.

Wenn Supernovae in ausreichend nahen Galaxien stattfinden, lässt sich ihre Entfernung auch auf unabhängige Weise bestimmen. Dabei stellt sich jedoch irritierenderweise heraus, dass die Helligkeit von Supernovae dieses Typs trotz gleicher Entfernung beträchtlich schwanken kann. Diese Streuung lässt sich durch eine empirische Korrektur erheblich verringern, der zufolge diese SN umso heller sind, je langsamer ihre Helligkeit nach dem Maximum wieder abfällt.

Demnach sind SN vom Typ Ia keine „Standardkerzen“, sondern „standardisierbare Kerzen“. So lange man die Ursache der empirischen Korrektur nicht versteht, fällt es schwer, die weitreichenden kosmologischen Konsequenzen zu glauben, die sich letztlich darauf gründen.

Wie verläuft die Explosion?

Damit drängen sich zwei einfache Fragen auf: Wie verläuft die Explosion im Inneren Weißer Zwerge wirklich? Und was bekommen wir davon zu sehen, nachdem die bei der Explosion freigesetzte Strahlung die abgestoßene Hülle des Weißer Zwergs durchquert hat? Diesen beiden Fragen widmet sich die Arbeitsgruppe von Wolfgang Hillebrandt am MPI für Astrophysik in Garching seit Jahren [1]. Dazu haben die Wissenschaftler einerseits die Verbrennungs- und Explosionsphysik in Weißen Zwergen und der Strahlungstransport in der expandierenden Gashülle im Detail modelliert und die Ergebnisse dieser Simulationen andererseits mit einer genauen Spektralanalyse zahlreicher SN über Zeiträume bis zu etwa einem Jahr nach der Explosion verglichen.

Die theoretische Modellierung beginnt mit der stochastischen Zündung des thermonuklearen Kohlenstoff-Sauerstoff-Brennens im Kern des Weißer Zwergs. Die Brennfront breitet sich aus und wird durch Turbulenz erheblich vergrößert. Da sie sehr dünn im Vergleich zu den Abmessungen des Weißer Zwergs ist, sind zu ihrer korrekten Beschreibung aufwändige numerische Verfahren notwendig. Außerdem spielt die Turbulenz eine wesentliche Rolle, sodass dreidimensionale Simulationsrechnungen notwendig sind (Abb.).

Um die Spektren zu verstehen, muss die zunächst unterschallschnelle Verbrennung (Deflagration) in eine (überschallschnelle)

Explosion übergehen. Wie dies geschieht, ist noch ungeklärt. In den Simulationen der Garching Gruppe wird der Deflagrations-Deflagrations-Übergang ad hoc eingeleitet, wenn sich die Brennfront genügend weit nach außen ausgebreitet hat. Anschließend wird die freigesetzte Strahlungsenergie durch eine Modellatmosphäre transportiert, um synthetische Lichtkurven und Spektren zu erzeugen, die direkt mit den Beobachtungen vergleichbar sind.

Die kürzlich veröffentlichten Ergebnisse sind vielversprechend und reproduzieren den empirischen Zusammenhang zwischen Dauer und Helligkeit der SN sehr genau [2]. Er wird dadurch erklärt, dass zwar die gesamte Menge verbrannten Materials weitgehend konstant ist, sich

aber je nach dem Verlauf der Explosion verschieden auf die Verbrennungsprodukte verteilt. Wenn der Deflagrations-Deflagrations-Übergang bei hoher Dichte stattfindet, verläuft die Verbrennung vollständiger, und mehr Material wird zu Kernen der Eisengruppe fusioniert. Findet er dagegen bei niedriger Dichte statt, erzeugt die dann unvollständigere Verbrennung mehr Kerne mittlerer Masse wie z. B. das im Spektrum auffällige Silizium. Die vollständigere Verbrennung setzt mehr Energie frei und sorgt für metallreichere Gashüllen, deren höhere Opazität den Energietransport verlangsamt und damit den Helligkeitsabfall der Supernova verzögert. Außerdem zeigen die Daten, dass zumindest fast alle Supernovae vom Typ Ia Chandrasekhar-Masse

haben, sodass die Verschmelzung zweier Weißer Zwerge offenbar keine Rolle spielt.

Obwohl wichtige Fragen wie die nach dem Deflagrations-Deflagrations-Übergang noch unbeantwortet bleiben, markiert die Arbeit der Garching Gruppe einen wesentlichen Fortschritt im Verständnis dieser Supernovae. Die dramatischen Schlussfolgerungen, die mit ihnen begründet werden, sind damit erheblich glaubwürdiger geworden.

Matthias Bartelmann

- [1] W. Hillebrandt und E. Müller, *Physik Journal* Mai 2004, S. 49
- [2] P. A. Mazzali et al., *Science* **315**, 825 (2007)
- [3] F. K. Röpkke und W. Hillebrandt, *Astron. & Astrophys.* **431**, 635 (2005)

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Institut für Theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg, Albert-Überle-Straße 2, 69120 Heidelberg

■ Ununterscheidbare Kondensate

Dass Quantenteilchen als ununterscheidbar betrachtet werden müssen, selbst wenn sie räumlich getrennt sind, ist jetzt in einem Experiment mit zwei Bose-Einstein-Kondensaten nachgewiesen worden. Das ist nicht unerwartet, aber dennoch beeindruckend.

Im Grundkurs Quantenmechanik lernt man, dass Teilchen derselben Sorte ununterscheidbar sind: Die Wellenfunktion, die ein Ensemble von ihnen beschreibt, ist stets eine Überlagerung von jedem einzelnen Teilchen in jedem möglichen Zustand. Streng genommen bedeutet das z. B., dass wir nicht von einem Elektron auf der Erde sprechen können, ohne im gleichen Atemzug alle Elektronen auf dem Mond zu erwähnen. Glücklicherweise hat die Existenz weiterer Teilchen des gleichen Typs an räumlich entfernten Orten praktisch keine Konsequenz und wir können sie beruhigt ignorieren. Dass Teilchen dennoch ihre Ununterscheidbarkeit offenbaren können, selbst wenn sie über makroskopische Abstände getrennt sind, hat jetzt Lene Hau mit Mitarbeitern an der Harvard University in einem Experiment mit zwei Bose-Einstein-Kondensaten gezeigt [1].

In dem Experiment bedienen sich Hau und Kollegen einer vor einigen Jahren entwickelten Technik, mit der sich Lichtpulse in einem

Atomgas „speichern“ lassen [2, 3]. Hierbei wird ein Probe-Laserpuls in ein atomares Ensemble eingestrahlt, und zwar nahe der Resonanz eines Übergangs vom Grundzustand zu einem angeregten Zustand. Ein zweiter Laser, der als Kontroll-Laser fungiert, koppelt den angeregten Zustand in einem Raman-Prozess an einen ursprünglich unbesetzten, meta-stabilen Zustand in Zwei-Photonen-Resonanz. Diese Kopplung führt zur sog. elektromagnetisch induzierten Transparenz des Probe-Pulses und einer reduzierten Gruppengeschwindigkeit. Mit dieser Reduktion geht ein partieller Transfer der Kohärenz des Laserpulses auf eine Raman-Kohärenz der Atome einher. Schaltet man den Kontroll-Laser ab, noch während sich der Probe-Puls im Ensemble befindet, wird dieser vollständig absorbiert. Da diese Absorption ein kohärenter Prozess ist, geht die räumliche Phaseninformation des Probe-Pulses nicht verloren, sondern bleibt in Form einer räumlichen Phase der Raman-Kohärenz

der Atome erhalten. Wird der Kontroll-Laser wieder angeschaltet, kehrt sich der Prozess um [4]: Die Atome strahlen kohärent und in Phase, analog zu einem Array aus Antennen, und gemäß der Phase des Originalpulses. Licht verlässt das Atomensemble wieder als kohärenter Puls mit einer wohldefinierten Form und Richtung.

Quantenmechanisch ist die Raman-Kohärenz eine Überlagerung des Grundzustands mit einem spin-angeregten Zustand der Atome. Die Speicherung der räumlichen Phaseninformation setzt das gleichzeitige Vorhandensein von beiden Zustandskomponenten am selben Ort voraus, das daher entscheidend für die Kohärenz des Ausleseprozesses ist. Wären nur die spin-angeregten Zustände besetzt, so würden die atomaren Dipole bei Wiederanschalten des Kontroll-Lasers mit zufälligen Phasen oszillieren, und inkohärente und ungerichtete spontane Raman-Streuung wäre die Folge.

Bei den extrem niedrigen Temperaturen der Atome in einem