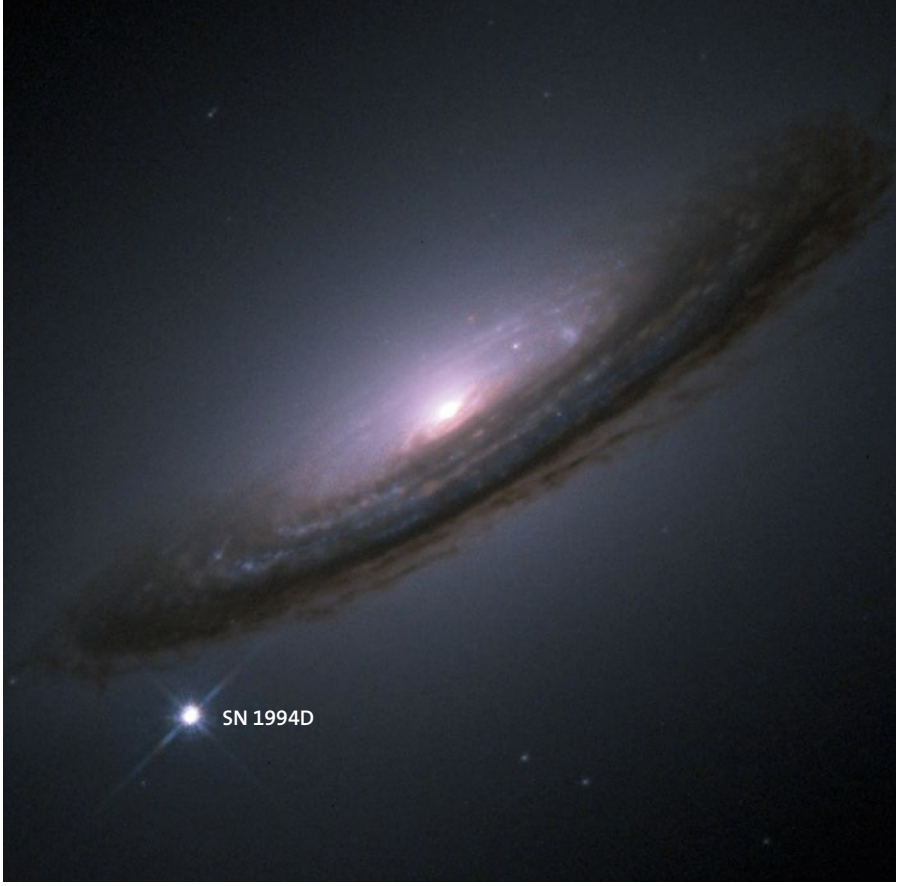


NASA / ESA, The Hubble Key Project Team and The High-Z Supernova Search Team (www.eso.org/public/switzerland-de/images/ann11014a/) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)

Fast so hell wie eine Galaxie: Die Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble zeigt die Supernova 1994D in der Galaxie NGC 4526. Diese Sternexplosion vom Typ Ia leuchtete außergewöhnlich hell und erreichte im Maximum eine scheinbare visuelle Helligkeit von 11,8 mag. Damit überstrahlte sie fast die Galaxie, in der sie sich befindet (9,6 mag). Das Sternsystem steht im Sternbild Jungfrau in einer Entfernung von rund 25 Millionen Lichtjahren.

Supernova nach doppelter Detonation

Nicht ein, sondern zwei Weiße Zwerge sollen einige Sternexplosionen erklären, die als Supernova vom Typ Ia klassifiziert werden. Forschende legten neue Computersimulationen vor, welche die Verhältnisse vor der Explosion realistischer beschreiben sollen.

Das klassische Szenario einer Supernova vom Typ Ia lautet: Ein Weißer Zwerg ist als Überrest eines massearmen Sterns nach dem Ende jeglicher Kernfusion in seinem Inneren erloschen. Seine geringe restliche Leuchtkraft rührt her von seiner anfänglich bei zehn Millionen Kelvin liegenden hohen Temperatur, während er sich über Jahrmilliarden langsam abkühlt. Woher also sollte er die Energie für eine Explosion nehmen, die kurzzeitig so hell strahlen kann wie die gesamte Galaxie, die ihn umgibt (siehe »Fast so hell wie eine Galaxie«)? Antwort: von einem Begleitstern. Von ihm könnte der Weiße Zwerg dank seiner Gravitation Masse anziehen und sich einverleiben. Überschreitet die Masse des Weißen Zwergs dann irgendwann das Chandrasekhar-Limit von rund 1,4 Sonnenmassen, wird die Schwerkraft zu stark, der Weiße Zwerg kollabiert, und es kommt zur Explosion. Radioaktive Element wie Nickel-56 zerfallen und liefern die Energie der für mehrere Monate strahlenden Supernova. Die Lichtkurve – also der Verlauf der Helligkeit mit der Zeit – folgt direkt dem radioaktiven Zerfall (siehe SuW 3/2020, S. 30, und SuW 4/2020, S. 40).

Wie sich in den vergangenen Jahren allerdings herausgestellte, sind die genauen Umstände einer derartigen Explosion komplizierter als gedacht. Nicht ein, sondern zwei Weiße Zwerge können im Spiel sein. Darauf deuten auch die Ergebnisse einer Studie von Ken J. Shen, University of California, Berkeley, USA, hin, die im Fachmagazin »The Astrophysical Journal Letters« erschien.

Wie er und sein Team darin berichten, zieht ein Weißer Zwerg von einem anderen Weißen Zwerg Materie ab, bis er schließlich in einer doppelten Detonation explodiert. Zunächst zerbricht die Hülle aus Helium, die den Weißen Zwerg umgibt. Diese erste Detonation soll dann die Explosion des Kerns aus Kohlenstoff auslösen. Und: Jene Art von Supernova-Explosionen würde knapp unterhalb der Chandrasekhar-Massengrenze stattfinden. Die Grundidee ist zwar schon rund 40 Jahre alt, aber die Details des Modells wurden nun verfeinert. Die Heliumschalen können unter anderem viel masseärmer sein.

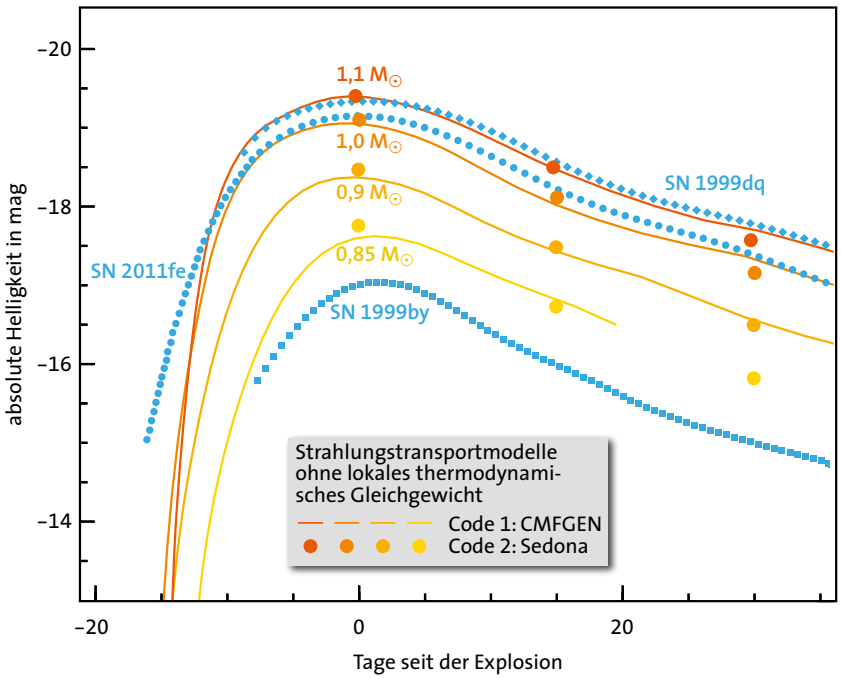
Eine Supernova kann helfen, Distanzen zu messen

Supernovae sind heftige Explosionen, die in mehreren Ausführungen daherkommen. Wartete man darauf, dass ein massereicher Stern – wie Beteigeuze – am Ende seiner Entwicklung explodiert, dann ergäbe das eine Supernova vom Typ II. Einer Supernova vom Typ Ia hingegen liegt eine andere Ursache zu Grunde: Hier explodiert häufig ein ausgebrannter, kompakter Überrest eines sonnenartigen und damit eher massenarmen Sterns, der größtenteils nur noch aus Kohlenstoff und Sauerstoff besteht: ein Weißer Zwerg.

Astronominnen und Astronomen schätzen an Supernovae vom Typ Ia nicht

Theoretische und gemessene Lichtkurven

Die blauen Datenpunkte geben den Helligkeitsverlauf von drei beobachteten Supernovae SN 1999by, SN 1999dq und SN 2011fe wieder. Diese Lichtkurven können mit Modellen berechnet werden (orangefarbene und gelbliche Linien). Für die Weißen Zwerge wurde ein Kohlenstoff-Sauerstoff-Verhältnis von 50:50 angenommen. Die Massen der Weißen Zwerge variieren in den Berechnungen zwischen 0,85 und 1,1, Sonnenmassen, bleiben also unter der Chandrasekhar-Grenze. Die Simulationen ohne Annahme eines lokalen thermodynamischen Gleichgewichts passen gut zu den beobachteten Supernovae.



Shen, K.J. et al.: Non-local thermodynamic equilibrium radiative transfer simulations of sub-Chandrasekhar-mass white dwarf detonations. The Astrophysical Journal Letters 909, 2021, fig. 2, links oben; Bearbeitung: SuW-Grafik

nur das Himmelsspektakel, das sie bieten, sondern auch die Tatsache, dass im Gegensatz zum Typ II einige dieser Typ-Ia-Supernovae auf sehr ähnliche Weise und daher quer durch das Universum hinweg mit der gleichen absoluten Helligkeit explodieren sollten. Kosmologen verwenden deshalb einige gut geeignete Supernovae vom Typ Ia als Standardkerzen, mit denen sich sehr große Entfernungen ausloten lassen. Im Jahr 1998 gelang mit diesen Standardkerzen ein Durchbruch in der Kosmologie, welcher die beschleunigte Expansion des entwickelten Universums offenlegte (siehe SuW 7/2020, S. 26).

Explosion ohne lokales thermisches Gleichgewicht

Supernovaforschende simulieren die Vorgänge in der Explosion auf dem Computer mit hydrodynamischen Modellen unter Berücksichtigung von Strahlungstransport. Sie berechnen also, wie sich die Teilchen im Kollaps und während der Explosion bewegen und auch wie sich Strahlung in diesem Material ausbreitet.

In bisherigen Simulationen derartiger Explosionen gingen die Theoretiker in der Regel von der Vereinfachung aus, dass sich die strahlende Materie in einem lokalen, thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Die Partikel haben dann die Gelegenheit, durch Stöße mit umgebender Materie Energie abzugeben und einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Es gibt auch Nichtgleichgewichtszustände, bei denen diese »Abregung« nicht erfolgt, zum Beispiel in einem Laser.

Die Annahme eines lokalen thermodynamischen Gleichgewichts vereinfacht zwar die aufwändigen Computersimulationen von Supernova-Explosionen; doch nun wollte die Gruppe um Shen die Nichtgleichgewichtseffekte untersuchen. Das Team benutzte dabei zwei verschiedene Computercodes. Generell passt ein Modell immer dann gut, wenn die simulierten Vorgänge auf Spektren und Lichtkurven führen, die denen echter Supernova-Explosionen ähneln oder sogar gleichen.

Die neuen Ansätze führten zum Erfolg: Simulierte und beobachtete Lichtkurven von echten Supernovae des Typs Ia stimmten gut überein (siehe »Theoretische und gemessene Lichtkurven«). Das Modell reproduzierte auch die so genannte Phillips-Relation (siehe SuW 3/2020, S. 37). Sie beschreibt einen Zusammenhang zwischen der absoluten Helligkeit einer Supernova vom Typ Ia und dem anschließenden Helligkeitsabfall und besagt: Je höher die Blauhelligkeit der Supernova ist, umso breiter ist ihre Lichtkurve. Leider gilt diese Beziehung jedoch nicht für alle Typ-Ia-Supernovae.

Vollständig geklärt sind die Vorgänge in den Supernovae vom Typ Ia nach wie vor nicht. Eine Vereinfachung des Modells von Shen und seinem Team besteht zum Beispiel darin, dass die Supernovaforscher in den Simulationen räumlich eindimensionale Modelle verwendeten – die Natur ist natürlich dreidimensional. Aber so etwas zu simulieren, ist sehr aufwändig.

Jedenfalls sind die Theoretiker einen Schritt weiter und können zumindest in einigen Fällen sagen: Es handelt sich um eine Doppeldetonation eines Doppelsystems zweier Weißer Zwerge knapp unter dem Chandrasekhar-Limit im nichtlokalen thermodynamischen Gleichgewicht.

Das klingt zwar weitaus sperriger als das vereinfachte klassische Szenario, dürfte dafür aber ein Stück näher an der Realität liegen. Als kosmische Distanzmesser können die Supernovae vom Typ Ia damit auch weiterhin dienen.

FRANZISKA KONITZER studierte Physik und Astrophysik an der University of York in Großbritannien und ist in München als Journalistin tätig.

Literaturhinweis

Shen, K.J. et al.: Non-local thermodynamic equilibrium radiative transfer simulations of sub-Chandrasekhar-mass white dwarf detonations. The Astrophysical Journal Letters 909, 2021

WIS Didaktische Materialien: www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051528