

■ Die Supernova im Superrechner

Die bislang detailliertesten Modellrechnungen erklären erstmals beobachtete Asymmetrien und die Geschwindigkeiten schneller Eisenklumpen.

Supernovae gehören zu den energiereichsten Phänomenen im Universum. Ihre maximale Helligkeit übersteigt die unserer Sonne um mehr als das Milliardenfache. Einige hundert Millionen Supernovae haben das Gas der Milchstraße seit ihrer Entstehung mit Kohlenstoff, Sauerstoff, Silizium, Kalzium, Eisen und schweren Elementen angereichert und damit letztlich die Voraussetzungen für Leben auf der Erde geschaffen [1]. Ihre durch das All pflügenden Explosionswellen verdichten das interstellare Gas und leiten so die Geburt neuer Sterne ein. Supernovae spielen deshalb eine zentrale Rolle im kosmischen Kreislauf der Materie. Bisher gelang es nur ansatzweise, die dabei ablaufenden Vorgänge mit Computersimulationen nachzuvollziehen, denn die Vielzahl an Faktoren macht das Problem äußerst komplex [2]. Forscher des Max-Planck-Instituts für Astrophysik in Garching (MPA) konnten nun mit ihren 3D-Modellen erstmals bestimmte Eigenschaften reproduzieren.

Wenn in einem massereichen Stern jenseits von etwa acht Sonnenmassen alle nuklearen Brennphasen abgeschlossen sind, kollabiert der stellare Kern unter seinem Gewicht zu einem Neutronenstern oder Schwarzen Loch. Die teilweise Umsetzung der dabei freigesetzten



Abb. 1 Die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke liegt nahe genug, um ringförmige Regionen zu zei-

gen, wo die schnellen Explosionswellen auf früheren Sternwind oder das interstellare Medium prallen.

potentiellen Energie in die Ejektion der außen liegenden Massenzonen bezeichnet man als Gravitationskollaps-Supernova. Wegen der undurchsichtigen äußeren Schichten des Sterns lässt sich die eigentliche Explosion nicht direkt beobachten. Lediglich wenn etwa alle 30 bis 50 Jahre eine Supernova in relativer Nähe stattfindet, können Neutrinos – wie bei SN 1987A (Abb. 1) – direkte Informationen über den zentralen Explosionsmechanismus liefern. Die elektromagnetische Strahlung der Supernova, die uns mit der Zeit aus immer tieferen Schichten des

Sterns erreicht, gibt Auskunft über die räumliche Verteilung der ausgeschleuderten Elemente sowie über deren Geschwindigkeitsprofile. Daraus lassen sich indirekte Informationen gewinnen.

Zu den erstaunlichen und unerwarteten Befunden bei der Supernova 1987A und den meisten anderen nahen Ereignisse gehört, dass Nickel und Eisen – schwere Elemente, die nahe am Zentrum der Explosion entstehen – als große Klumpen nach außen transportiert werden, wo sie sich mit der Wasserstoffhülle des zerstörten Sterns vermischen. Beobachtungen zeigen, dass sich diese Geschosse mit Geschwindigkeiten von bis zu 4000 km/s bewegen, viel schneller als von sphärisch-symmetrischen (1D-) Simulationen vorhergesagt. Auch die Helligkeitsentwicklung im Optischen, die Lichtkurve, und die Röntgen- und Gammastrahlung der SN 1987A und ähnlicher Gravitationskollaps-Supernovae lassen sich nur erklären, wenn große Mengen schwerer Elemente, insbesondere radioaktives ^{56}Ni , aus zentrumsnahen Gebieten nach außen transportiert und mit der Sternhülle vermischt werden. Gleichzeitig müssen die leichten

KURZGEFASST

■ Supraleitung wie durch Zauberei

Die Größe von Metallteilchen ist für das Einsetzen von Supraleitung ausschlaggebend. Dies konnten Forscher des Stuttgarter MPI für Festkörperforschung und Kollegen aus Regensburg und Lissabon experimentell bestätigen. An Zinn-Nanopartikeln beobachteten sie mit einem Rastertunnelmikroskop, wie sich je nach Größe und Form bei „magischen“ Elektronenzahlen Cooper-Paare bildeten und sich die kritische Temperatur erhöhte. Dieser Effekt zeigte sich erwartungsgemäß wesentlich stärker bei Zinn- als bei Bleipartikeln.

S. Bose et al., *Nature Materials*, doi:10.1038/nmat2768 (2010)

■ Quanten- trifft Relativitätstheorie

Der Fallturm des Bremer Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) diente einmal mehr als „Einsteinscher Fahrstuhl“. Passagier war diesmal ein Quantenobjekt: In der Kapsel erzeugten die Physiker während des Falls ein Bose-Einstein-Kondensat aus Rubidiumatomen und beobachteten es. Während seiner etwa eine Sekunde dauernden Expansion bildete es eine gigantische kohärente Materiewelle. Aufbauend auf diese neue Methode lassen sich künftig z. B. die de-Sitter- und Lense-Thirring-Effekte sowie das Äquivalenzprinzip präzise untersuchen.

T. van Zoest et al., *Science* **328**, 1540 (2010)

Elemente Wasserstoff und Helium aus der Hülle nach Innen zum Kern hin wandern [3].

Wegen der Komplexität der physikalischen Prozesse konnten Astrophysiker bisher nur einen Teil dieser Vorgänge simulieren, und das auch nur unter einschränkenden Annahmen über die Symmetrie der Explosion [4, 1]. Ein Problem dabei sind die unterschiedlichen Zeit- und Längenskalen, die in den Computermodellen aufzulösen sind. Sie reichen von etwa 10^2 m und Bruchteilen von Millisekunden beim Zentrum bis zu rund 10^{11} m und Stunden nahe der Sternoberfläche. Bis heute existieren keine Modelle, die eine Supernova-Explosion komplett und adäquat beschreiben.

Simulationen des eigentlichen Explosionsmechanismus, welche die Wechselwirkung von Neutrinos und dichter Supernova-Materie möglichst genau behandeln und die ersten Sekunden der Explosion sowie die Vorgänge in den innersten 1000 km des Sterns abdecken, hatten bisher stets einen axialsymmetrischen Ansatz. 3D-Modelle existieren bislang nur mit stark vereinfachter Neutrinophysik, da sie, was die erforderliche Rechenzeit betrifft, wesentlich aufwändiger sind als entsprechende 2D-Modelle [4, 1]. Weitere Simulationsschritte beschreiben die anschließende Propagation der während der Explosion nahe am Sternzentrum entstehenden Stoßwelle durch die Sternhülle. Dabei kann zur Vereinfachung das Sternzentrum ausgeschnitten und durch eine innere Randbedingung ersetzt werden. Solche Berechnungen zeigen, dass die kugelförmige Schalenstruktur des Sterns zerstört wird und eine großskalige Vermischung stattfindet. Allerdings konnten die grob aufgelösten 3D- und axialsymmetrischen 2D-Rechnungen bislang nicht die in der Supernova 1987A beobachteten großen Geschwindigkeiten der Metallgeschosse wiedergeben [5].

MPA-Wissenschaftlern gelang es nun erstmals, anhand hochauflösender 3D-Simulationen nachzuvollziehen, wie die bei Sternexplo-

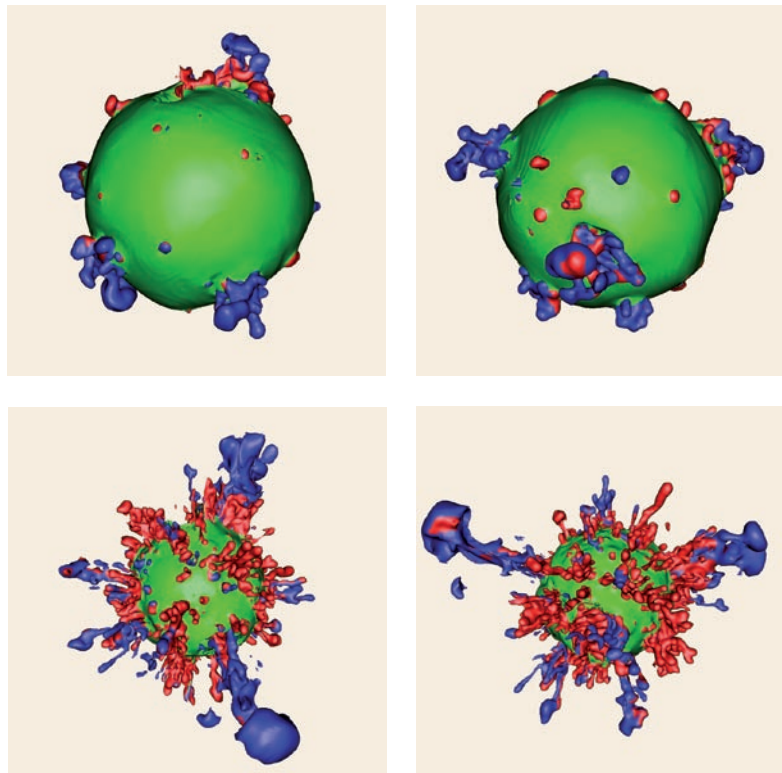


Abb. 2 Elementverteilung jeweils aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln (links/rechts) nach 350 s (oben) bzw. nach etwa 9000 s (unten), kurz nachdem die Stoßwelle die Sternoberfläche durch-

sionen beobachteten Asymmetrien und die schnellen eisenreichen Klumpen entstehen [6]. Ihre Modelle beschreiben die Entwicklung von der ersten Sekunde nach dem Auslösen der Explosion im Zentrum bis zu dem Zeitpunkt, wenn die Stoßwelle nach drei Stunden aus dem Vorläuferstern hervorbricht (**Abb. 2**). In diesen 3D-Simulationen haben die metallreichen Klumpen deutlich größere Geschwindigkeiten als bei den älteren 2D-Modellen. Sie breiten sich viel schneller aus und überholen Material aus den äußeren Schichten. Die genauen Zahlenwerte dürften stark von der Struktur des Vorläufersterns, der Explosionsenergie und der anfänglichen Asymmetrie abhängen. Eine solche konnten die Forscher in ihrem 3D-Modell vorgeben, denn es ist davon auszugehen, dass sphärisch-symmetrische Explosionen die Beobachtungen prinzipiell nicht erklären können. Diese Annahme wird derzeit in weiteren Simulationen mit einer gewissen Bandbreite an Vorläufersternen und Anfangsbedingungen überprüft.

brochen hat. Die farbigen Filamente entsprechen dabei den am weitesten außen liegenden Orten, an denen Kohlenstoff (grün), Sauerstoff (rot) und Nickel (blau) vorliegen.

Wie treffend sich auch weitere beobachtete Charakteristika von SN 1987A wie deren Lichtkurve mit den Garching Codes modellieren lassen, muss sich zeigen. Auch diese Supernova-Simulationen liefern noch ein vereinfachendes Bild der Vorgänge, aber die Astrophysiker sind offensichtlich auf dem richtigen Weg.

Friedrich Thielemann

- [1] Special Issue on Nuclear Astrophysics, Nucl. Phys. A 777 (2006)
- [2] W. Hillebrandt und E. Müller, Physik Journal, Mai 2004, S. 49; W. Hillebrandt, H.-Th. Janka und E. Müller, Spektrum der Wissenschaft, Juli 2005, S. 36
- [3] W. D. Arnett, J. N. Bahcall, R. P. Kirshner und S. E. Woosley, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 27, 629 (1989); R. McCray, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 31, 175 (1993)
- [4] A. Mezzacappa, Ann. Rev. Nuc. Part. Sci. 55, 467 (1995); H.-Th. Janka, K. Langanke, A. Marek, G. Martinez-Pinedo und B. Müller, Phys. Rep. 442, 38 (2007)
- [5] K. Kifonidis, T. Plewa, L. Scheck, H.-Th. Janka und E. Müller, Astron. Astrophys. 453, 661 (2006)
- [6] N. J. Hammer, H.-Th. Janka und E. Müller, Astrophys. J. 714, 1371 (2010); <http://iopscience.iop.org/0004-637-X/714/2/1371>

Prof. Dr. Friedrich-K. Thielemann, Departement Physik, Universität Basel, Klingelbergstr. 82, 4056 Basel, Schweiz

MPI für Astrophysik