

Rätselfhafte Supernova-

Die gewaltigen Kataklysmen, mit denen Sterne ihr spektakuläres Ende finden, haben sich als turbulente und hochkomplexe Vorgänge entpuppt. Nicht einmal aufwändigste Simulationsrechnungen konnten ihnen bisher alle Geheimnisse entreißen.

Von Wolfgang Hillebrandt,
Hans-Thomas Janka und Ewald Müller

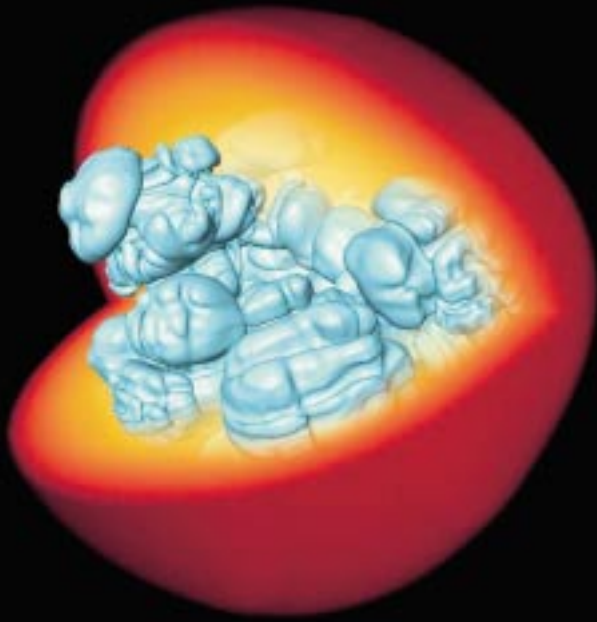
Als der dänische Astronom und Adlige Tycho Brahe am 11. November 1572 im Sternbild Cassiopeia einen neuen Stern entdeckte, der heller aufleuchtete als der Planet Jupiter, war das eine Sensation – mit Tychos Worten »ein Wunder, wie es seit Anbeginn der Welt nicht gesehen wurde«. Heute sind viele Wissenschaftshistoriker der Meinung, dass damals die moderne Astronomie begann.

Obwohl Tycho mit seiner Behauptung übertrieb – chinesische Astronomen hatten über solche neuen Sterne bereits mehr als 500 Jahre früher berichtet –, zeigt seine Begeisterung doch, wie wichtig diese Entdeckung für die neuzeitliche Wissenschaft war. Erstmals wurde offen-

bar, dass der Fixsternhimmel nicht unveränderlich ist, und diese Erkenntnis sollte unser Weltbild nachhaltig verändern. Tycho Brahes Beobachtungen, die er zwei Jahre später veröffentlichte, zeigten zweifelsfrei, dass der neue Stern zumindest weiter von der Erde entfernt sein musste als der Mond; also gehörte er zum Firmament der Sterne. Das Gleiche wurde einige Jahre später von Galileo Galilei für Johannes Keplers Supernova (SN 1604) bestätigt. Der dänische König war von Tycho Brahes Entdeckung so beeindruckt, dass er ihm die Mittel gab, auf der Ostseeinsel Hven eine neue Sternwarte zu erbauen, ausgestattet mit besonders großen und genauen Instrumenten.

Allerdings dauerte es dann noch mehr als 400 Jahre, bis man erkannte, dass einige dieser »Novae« – von lateinisch »neue« Sterne – außergewöhnlich

hell erstrahlen: Für einige Wochen erreichen sie fast die Leuchtkraft einer ganzen Galaxie mit vielen Milliarden Sternen. 1885 entdeckten Ludovic Gully in Rouen (Frankreich) und Ernst Hartwig in Dorpat (Estland) unabhängig voneinander in der Nähe des Zentrums des Andromeda-Nebels eine Nova (S Andromeda genannt). Sie erreichte ungefähr ein Zehntel der Helligkeit des Nebels. Da damals noch nicht bekannt war, dass der Andromeda-Nebel eine Galaxie sehr ähnlich unserer eigenen Milchstraße ist, fand die Entdeckung nur wenig Beachtung. Erst als Knut Lundmark 1919 die Entfernung zur Andromeda-Galaxie mit etwa 700 000 Lichtjahren abschätzte – etwa um den Faktor drei zu nahe, wie wir heute wissen –, war plötzlich klar, das S Andromeda einige tausend Mal heller gewesen sein musste als eine »nor-



Explosionen

ALLE COMPUTERSIMULATIONEN: MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK, GARCHING

male« Nova in unserer Milchstraße. Der schweizerisch-amerikanische Astrophysiker Fritz Zwicky prägte dann 1933 für sie den Namen Supernova.

Zwicky selbst war auch der Erste, der systematisch nach solchen heftigen Sternexplosionen zu suchen begann. Im Lauf seines sehr aktiven wissenschaftlichen Lebens entdeckte er 123 Supernovae – bis heute Weltrekord für einen einzelnen Astronomen.

Heller als Milliarden Sonnen

Sehr schnell wurde klar, dass nicht alle Supernovae gleich sind, sondern sich in mindestens zwei Hauptklassen aufteilen. Die Mitglieder der einen Klasse zeigen in ihren Spektren nicht einmal Spuren von Wasserstoff, während bei den anderen zu Beginn Wasserstoff sogar dominiert. Der deutsch-amerikanische Astronom Rudolf Minkowski schuf 1939 für sie die Namen Typ I und Typ II. Seither hat man diese grobe Klassifizierung verfeinert.

In den 1930er Jahren war der Grund für die gewaltigen Explosionen noch weitgehend unverstanden, doch erneut hatte Fritz Zwicky eine geniale Idee. Bereits 1938 spekulierte er, dass die Explosionsenergie von der Gravitation stamme.

Zu diesem Zweck »erfand« er so genannte Neutronensterne: Ein normaler Stern stürzt zusammen, bis in seinem Innern die Dichte so hoch ist wie in einem Atomkern. In diesem Zustand besteht die Materie überwiegend aus ungeladenen Kernteilchen, den Neutronen – daher der Name. Nach Zwicky treibt die beim Kollaps frei werdende Gravitationsenergie die Explosion der Sternhülle an. Ja, er vermutete sogar, der Krebs-Nebel im Sternbild Stier sei das Ergebnis der »chinesischen« Supernova von 1054, und der eigenartige Stern in seinem Zentrum sei der dabei entstandene Neutronenstern – eine großartige Vorhersage, wie wir heute wissen (siehe »Neutronensterne: ultradichte Exoten« von Jérôme Novak, Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 35).

Eine ganz andere Idee, wie Supernovae explodieren könnten, geht auf den englischen Astrophysiker Fred Hoyle und einen amerikanischen Kollegen, den späteren Nobelpreisträger Willy Fowler, zurück. 1960 argumentierten sie, thermonukleare Fusionsreaktionen im dichten Kern eines hoch entwickelten Sterns könnten diesen unter Umständen zerreißen. Die Idee konnte erklären, warum Supernovae so hell sind. Da das Innere

▲ Die dreidimensionale Simulation einer Supernova-Explosion vom Typ Ia zeigt in vier Schnappschüssen – zu Beginn der Zündung sowie nach 0,3, 0,6 und 10 Sekunden – die thermonukleare Explosion eines Weißen Zwergs. Die Dichte des Sterns ist farbkodiert dargestellt; die blaue Struktur gibt die thermonukleare »Flamme« wieder. Der Größenmaßstab expandiert mit der Supernova. Zum Vergleich: Das Kügelchen rechts unten im letzten Bild zeigt, wie groß der Weiße Zwerg anfangs war (Pfeil).

solcher Sterne überwiegend aus Kohlenstoff und Sauerstoff besteht, endet die nukleare Fusion beim am stärksten gebundenen Atomkern, der eine gleiche Anzahl von Neutronen und Protonen besitzt: dem radioaktiven Kern ^{56}Ni . Die Energie aus dem radioaktiven Zerfall von Nickel über Kobalt zu Eisen kann die Supernova monatelang zum Leuchten bringen, wie Stirling A. Colgate vom Lawrence Livermore National Laboratory und Chester R. McKee 1969 zeigten.

Heute glauben wir sicher zu sein, dass in der Natur beide Explosionsmechanis-

▷ men vorkommen. Für alle Supernovae vom Typ II ist der Kollaps eines massereichen Sterns zu einem Neutronenstern – oder eventuell zu einem Schwarzen Loch – der Auslöser, und wahrscheinlich gilt dies auch für die weiter unten beschriebenen Supernovae vom Typ Ib und Ic. Der erste Hinweis für die Richtigkeit dieser Hypothese kam 1968 mit der Entdeckung eines schnell rotierenden Neutronensterns im Zentrum des Krebs-Nebels, was Zwicky ja schon dreißig Jahre früher vorhergesagt hatte. Als endgültiger Beweis gilt der Nachweis von Neutrinos – extrem leichten ungeladenen Partikeln –, die von der Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke ausgesandt und in verschiedenen Laboratorien auf der Erde aufgefangen wurden.

Hingegen sind Supernovae vom Typ Ia wahrscheinlich das Ergebnis thermonuklearer Explosionen Weißer Zwerge. Dafür spricht die ausgezeichnete Übereinstimmung der aus Modellen berechneten Spektren und Lichtkurven mit den Beobachtungen. Außerdem lässt sich für einige der historischen Supernovae ausschließen, dass sich im Zentrum der Explosionswolke ein Neutronenstern befindet – auch das ein Hinweis auf eine thermonukleare Explosion. Ende letzten Jahres schließlich wurde im Überrest von Tycho Brahes Supernova der Begleitstern des verschwundenen Weißen Zwergs gefunden. Er entfernt sich jetzt vom Zentrum der Explosion mit genau der Geschwindigkeit, mit der er einst den Weißen Zwerg umkreiste.

IN KÜRZE

- ▶ Traditionell werden **Supernovae**, die in ihrem Spektrum starke Wasserstoff-Linien aufweisen, als **Typ II** bezeichnet, solche ohne diese Linien als **Typ I**. Letztere unterteilt man heutzutage in drei **Untertypen Ia, Ib und Ic**. Sie ergeben sich großenteils aus den unterschiedlichen Eigenschaften, welche die Hüllen der explodierenden Sterne aufweisen.
- ▶ Supernovae vom Typ Ia sind **thermonukleare Explosionen Weißer Zwerge**. Hingegen gehen alle anderen Typen aus dem **Gravitationskollaps massereicher Sterne** hervor.
- ▶ Bei **Hypernovae** wird Gas mit enormer Geschwindigkeit ausgeschleudert. Teils kommt es zu starken Ausbrüchen von Gammastrahlung. In Hypernovae führt der Kollaps vermutlich zur Bildung eines Schwarzen Lochs.

Obwohl alle Beobachtungen die genannten Szenarien stützen, bleibt das Modellieren der Explosionen eine der größten Herausforderungen für Astrophysiker. Seit vielen Jahren werden die schnellsten Computer der Welt mit möglichst realistischen Simulationen gefüttert, aber die Ergebnisse sind meist enttäuschend: Die Modellsterne explodieren im Computer nicht so – wenn überhaupt – wie ihre realen Vorbilder. Erst vor Kurzem hat sich das geändert, und die neuesten Simulationen scheinen der Wirklichkeit immer näher zu kommen.

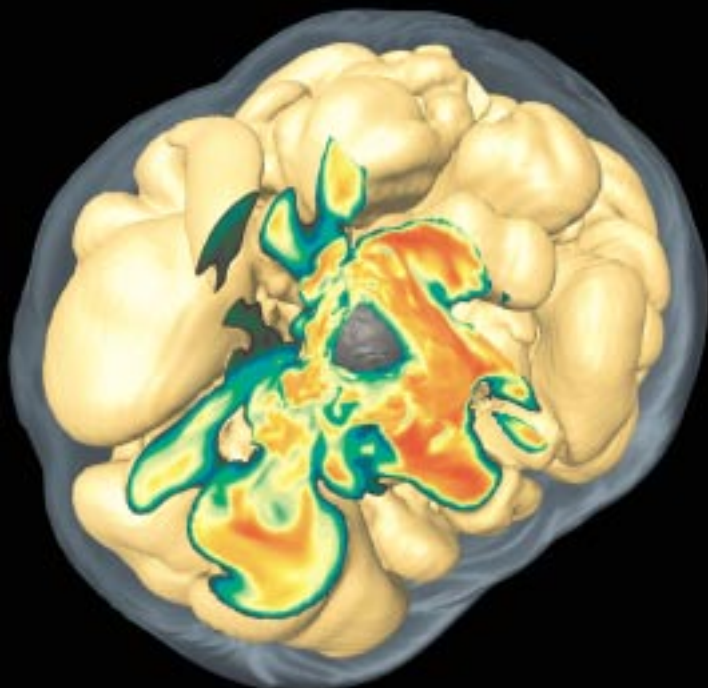
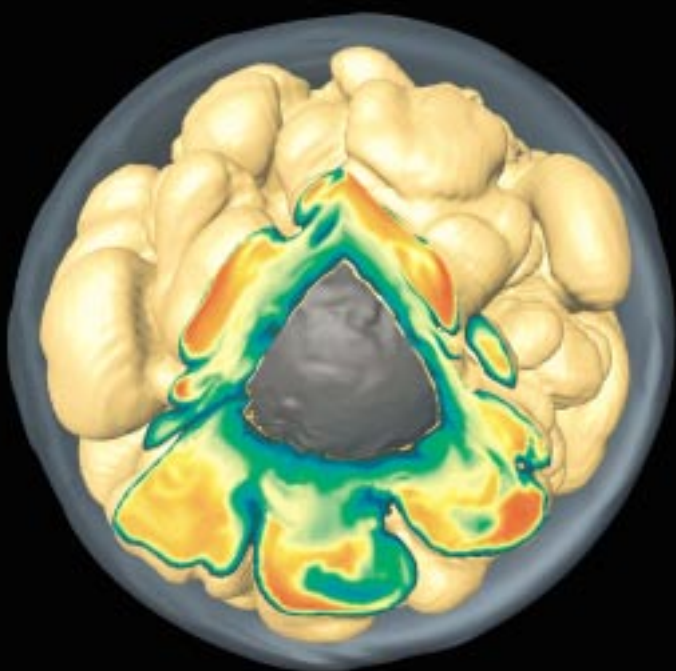
Standardkerzen für die kosmische Expansion

In den letzten Jahren ist das Interesse der Astronomen an den thermonuklearen Supernovae vom Typ Ia stark gewachsen. Diese Untergruppe enthält die hellsten aller Sternexplosionen, die darüber hinaus auch noch sehr ähnliche Lichtkurven

und Spektren aufweisen. Diese Eigenschaft legt den Versuch nahe, sie zur Messung kosmischer Entfernungen zu verwenden – wiederum eine Idee, die Fritz Zwicky zugeschrieben wird.

Im Prinzip ist das Verfahren einfach. Wenn die Helligkeit aller Typ-Ia-Supernovae identisch wäre, ließe sich aus dem Vergleich zwischen der gemessenen scheinbaren Helligkeit und der bekannten Helligkeit am Ort der Supernova ihre Entfernung bestimmen; und weil sie so hell sind, kann man sie auch noch in sehr großer Entfernung sehen und so die Geometrie des gesamten Universums untersuchen.

Leider sind in Wirklichkeit nicht alle Supernovae genau gleich hell. Man muss deshalb ihre Helligkeit eichen, um sie zu »Standardkerzen« zu machen. Hierzu benutzt man eine empirisch gefundene Beziehung zwischen ihrer Helligkeit und der Form ihrer Lichtkurve: Für die helle-





ren Explosionen wird das Licht etwas langsamer schwächer. Mit Hilfe dieser Methode ist es Astronomen gelungen, die Entfernungen von Supernovae zu messen, die explodierten, als das Universum nur etwa halb so alt war wie heute und das Sonnensystem noch nicht einmal entstanden war.

Als man die Daten auswertete, war die Überraschung perfekt: Das heutige Universum scheint beschleunigt zu expandieren – im Widerspruch zum bis dato gültigen kosmologischen Weltbild (siehe »Das Tempo der Expansion« von Adam G. Riess und Michael S. Turner, Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 42). Sollte sich dieser Befund bestätigen, hätte das Konsequenzen für die gesamte Physik. Das Universum würde heute und auch in Zukunft durch eine neue unbekannte Energieform dominiert, die so genannte Dunkle Energie. Was diese Energie mit negativem Druck ist, ob eine »kosmologische Konstante« – einst von Albert Einstein in die Allgemeine Relativitätstheorie eingeführt und bald wieder verworfen –, die Energiedichte des Quantenvakuums oder ein neues Kraftfeld, für das es noch keine Theorie gibt, ist zu einer der Schlüsselfragen der Physik geworden.

Bevor man jedoch so weit reichende Schlüsse zieht, muss man sicher sein, dass Supernovae auch wirklich als Standardkerzen taugen. Niemand kann zum Beispiel garantieren, dass die weit entfernten Explosionen die gleichen sind wie die, die wir für die Eichung benutzt

haben. Darum müssen wir die Explosionen verstehen sowie die Beziehungen, auf denen die Eichung beruht.

Wie erwähnt, erklären Astrophysiker die Typ-Ia-Supernovae als thermonukleare Explosionen Weißer Zwerge. Diese Sterne bestehen zu etwa gleichen Teilen aus Kohlenstoff und Sauerstoff, haben etwa die Masse der Sonne und ein Drittel des Erddurchmessers. Stabil gehalten werden sie durch den Druck eines dichten Gases extrem schneller Elektronen.

Warum explodieren Weiße Zwerge?

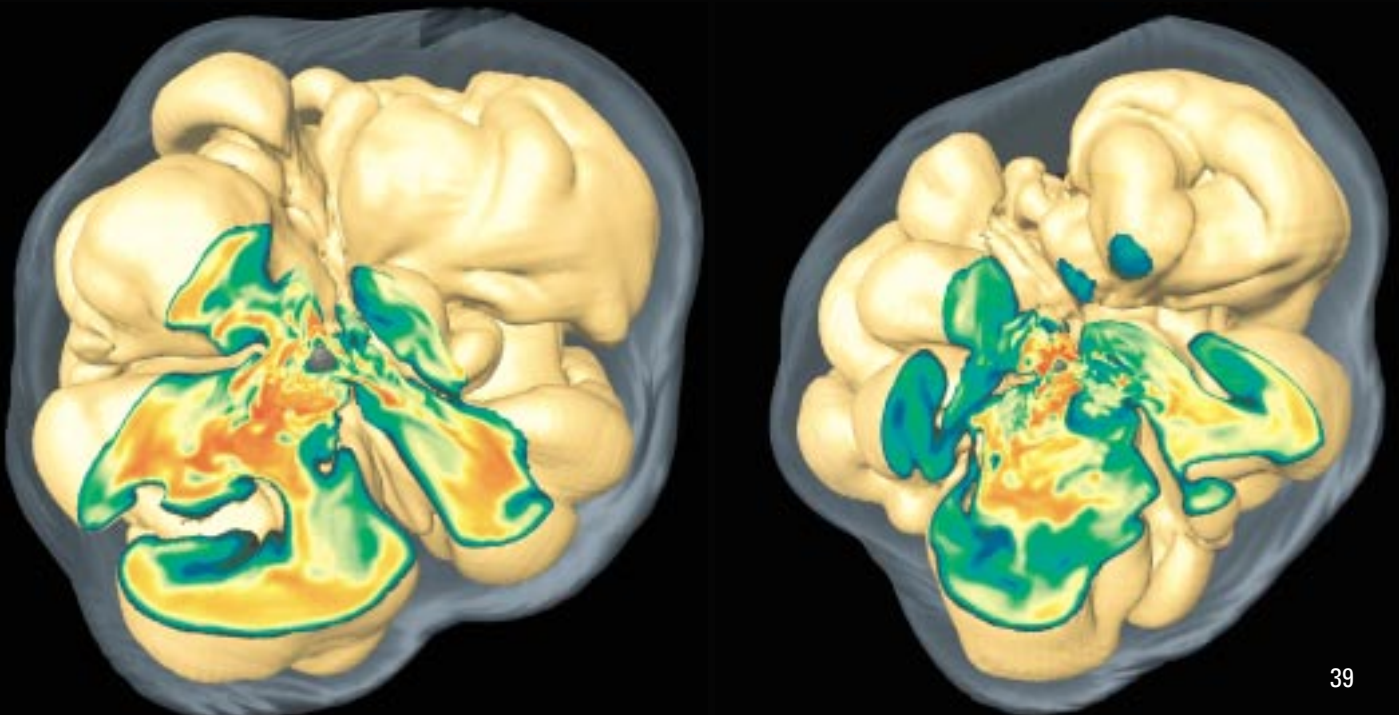
An sich würde ein Weißer Zwerg für alle Zeit in diesem Zustand verharren, denn er verbraucht keine Kernenergie, um stabil zu bleiben. Um aus ihm eine Supernova zu machen, muss es einen nahen Begleitstern geben, von dem Materie zu ihm strömt. Dadurch nimmt die Masse des Weißen Zwergs zu, und er wird zusammengepresst, bis schließlich Dichte und Temperatur die Zündbedingungen für die Fusion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu schwereren Elementen erreichen. Eine thermonukleare »Flamme« entsteht; die Fusionsreaktionen laufen in einem winzig kleinen Volumen ab, wahrscheinlich auf den Oberflächen von Blasen bereits »verbrannten« Materials, die tief im Innern des Weißen Zwergs treiben.

In den Spektren von Typ-Ia-Supernovae findet man starke Linien von mittelschweren chemischen Elementen wie Silizium, Schwefel und Kalzium. Demnach schreitet die Fusion nicht immer bis zum am stärksten gebundenen Kern

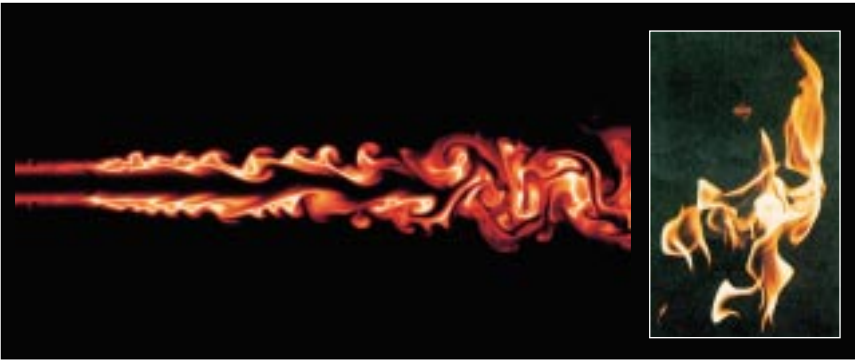
fort. Das bedeutet, dass die Temperatur in Teilen des Sterns einige Milliarden Grad nicht übersteigt – was wiederum ein Indiz dafür ist, dass sich die Flammen zumindest für einige Zeit nicht als überschallschnelle Detonation ausbreiten, sondern langsamer, als so genannte Deflagration. Durch eine Detonation würde fast der gesamte Stern vollständig zu Nickel und Eisen verbrannt, im Widerspruch zu den beobachteten Spektren. Ob die Deflagration letztlich dennoch in eine Detonation übergeht, wird derzeit unter Experten heiß diskutiert.

Eine thermonukleare Flamme, die sich durch Deflagration, das heißt allein durch Wärmediffusion ausbreitet, vermag den Stern nicht zur Explosion zu bringen. Nur ein kleiner Teil würde verbrannt, danach müsste der Stern sich

▼ Wenn massereiche Sterne unter der eigenen Schwerkraft kollabieren, explodieren sie durch so genanntes Neutrinoheizen als Supernovae. Die Simulationsfolge zeigt Anfangsphasen der Explosion. Die von Neutrinos geheizte Schicht um den entstehenden Neutronstern ist in heftiger Wallung; die expandierenden Blasen von heißem Plasma erscheinen in den Schnittflächen als rote und gelbe Regionen. Die verformte Stoßfront ist als transparente, einhüllende Oberfläche sichtbar. Sie hat nach einer halben Sekunde einen mittleren Radius von 2000 Kilometern erreicht.



LINKS: UNIVERSITY OF MINNESOTA, MECHANICAL ENGINEERING;
RECHTS: PAUL E. DIMOTAKIS, GALCIT / CALTECH



Physikalisch betrachtet ähneln manche Vorgänge bei der Kernfusion in einem Weißen Zwerg einer chemischen Verbrennung. Turbulente Flammen – hier Schnappschüsse im Labor – können sich auf zweierlei Weisen ausbreiten: durch Wärmediffusion mit Unterschallgeschwindigkeit (Deflagration) oder durch Verdichtung des Gemischs in einer überschall-schnellen Stoßwelle (Detonation). Auf welche dieser Arten ein Weißer Zwerg »verbrennt«, ist eine noch offene Frage.

▷ ausdehnen und abkühlen, und die nuklearen Flammen würden wieder verlöschen. Um den Stern zu zerreißen, muss die Brenngeschwindigkeit einige tausend Kilometer pro Sekunde erreichen statt nur ein paar hundert.

Seit den ersten Versuchen, thermonukleare Supernovae auf Computern zu simulieren, hat dieses Problem die meisten Schwierigkeiten bereitet. Dabei war die Lösung eigentlich bekannt, und zwar vom Automotor. Das Zauberwort heißt Turbulenz. Auch Autos würden ohne Turbulenz nicht fahren. Sie vergrößert bei vorgemischten Flammen deren Oberfläche durch Falten und Dehnen. Daher wächst die Verbrennungsrate, die proportional zur Flammenoberfläche ist, stark an. Nur aus diesem Grund kann ein Automotor mit einigen tausend Umdrehungen pro Minute laufen.

Lassen sich physikalische Konzepte und numerische Methoden aus der technischen Verbrennung tatsächlich auf Supernova-Explosionen übertragen? Diese Frage ist in den letzten Jahren von einer Gruppe am Max-Planck-Institut (MPI)

für Astrophysik in Garching sowie von Teams an der University of California und der University of Chicago weitgehend beantwortet worden. Wie in der Verbrennungsforschung lassen sich auch in Supernovae nur die großen Längemaßstäbe direkt simulieren; die nicht aufgelösten kleinräumigen Prozesse müssen modelliert werden. Dieses Problem ist aus der Meteorologie vertraut: Man kann nicht gleichzeitig einen Ozean und einen Berg numerisch »auflösen«.

In Sekunden zerreißt der Stern

Solche Simulationen müssen in drei Raumdimensionen durchgeführt werden und sind dadurch extrem umständlich – denn Turbulenz ist nur in drei Raumdimensionen korrekt zu beschreiben. Die bislang aufwändigste Serie von Simulationen wurde kürzlich auf dem IBM-Supercomputer am Rechenzentrum des MPI in Garching durchgeführt.

Jede Simulation benutzte 512³ Gitterpunkte zur Beschreibung des Sterns, wodurch Längen bis hinunter zu wenigen Kilometern aufgelöst wurden. Der

Speicherbedarf betrug zehn Gigabyte und die Rechenzeit rund 15 000 Prozessorstunden pro Simulation. In gewissem Sinn waren die Simulationen parameterfrei: Nur physikalische Parameter wie die chemische Zusammensetzung und die Zündbedingungen wurden variiert; sie sind aber auch in der Natur von Supernova zu Supernova verschieden.

Eine typische Simulationsfolge zeigt die pilzartigen Strukturen der thermonuklearen Brennfront, wie sie auch von aufsteigenden heißen Gasblasen in einer Flüssigkeit bekannt sind (siehe die Bilder auf der ersten Doppelseite). Man sieht, wie im Verlauf der Explosion auf den Oberflächen der Blasen durch Turbulenz kleinräumige Strukturen entstehen.

Demnach war unsere Vermutung richtig. Das Anwachsen der Fusionsrate durch Turbulenz reicht aus, den Weißen Zwerg in wenigen Sekunden zu zerreißen. Die »Asche« der thermonuklearen Flammen expandiert mit einer Geschwindigkeit von mehr als 10 000 Kilometern pro Sekunde – in guter Übereinstimmung mit Supernova-Beobachtungen.

Dennoch bleiben viele offene Fragen. Wie sich ein Weißer Zwerg bis zum Zünden der nuklearen Fusion entwickelt, ist noch weitgehend unbekannt. In unseren Simulationen wurde der Anfang der Explosion etwas willkürlich eingeleitet. Auch die Physik der turbulenten Verbrennung unter extremen Bedingungen mag noch Überraschungen bereithalten. In der Tat gibt es aus Supernova-Daten Hinweise, dass das hier gezeichnete Bild noch unvollständig ist. Die bisherigen reinen Deflagrationsmodelle besagen, dass ein beträchtlicher Teil der Materie des Weißen Zwergs unverbrannt in den Raum geschleudert würde. Diesen Kohlenstoff und Sauerstoff sollte man spätestens nach einem Jahr in den Spektren sehen – aber man findet nichts davon. Zudem liegen die Explosionsenergien und





Helligkeiten der Modellsupernovae zwar im Bereich der Beobachtungen, aber doch etwas auf der niedrigen Seite. Und schließlich wissen wir immer noch nicht, woher die Unterschiede zwischen verschiedenen Typ-Ia-Supernovae kommen – und das war einer der Ausgangspunkte für die Simulationen.

Die Supernova-Explosionen massereicher Sterne zeigen wesentlich größere Unterschiede als die thermonuklearen Supernovae. Je mehr Beobachtungen hinzukommen und je besser wir diese Ereignisse verstehen, desto mehr Vielfalt entdecken wir.

Verräterische Spektrallinien

Die Eigenschaften des explodierenden Sterns bestimmen, wie hell eine Supernova ist und welche atomaren Linien in ihrem Strahlungsspektrum aufscheinen. Der Vorläuferstern ist aber nur bei Supernova 1987A und in wenigen anderen Fällen bekannt. Dennoch können Forscher aus der beobachteten Strahlung Rückschlüsse auf die bei der Explosion ausgeschleuderte Materiemenge und die Explosionsenergie ziehen. Auch geben die Spektren Aufschluss über die während der Explosion entstehenden chemischen Elemente.

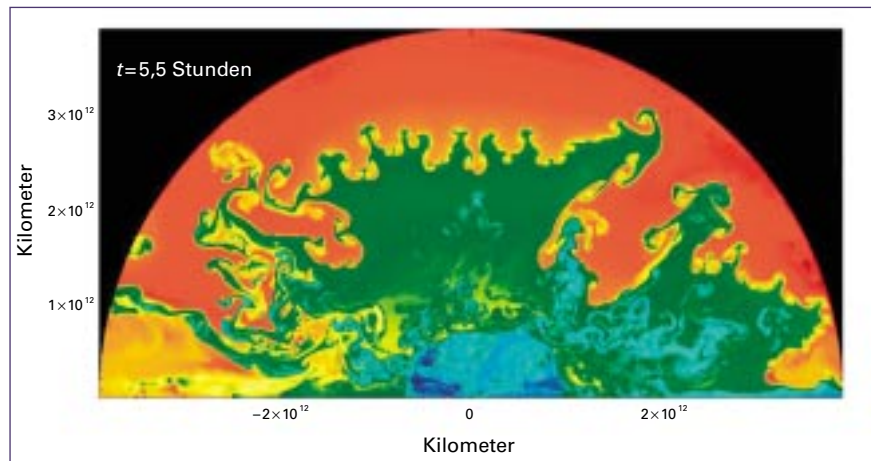
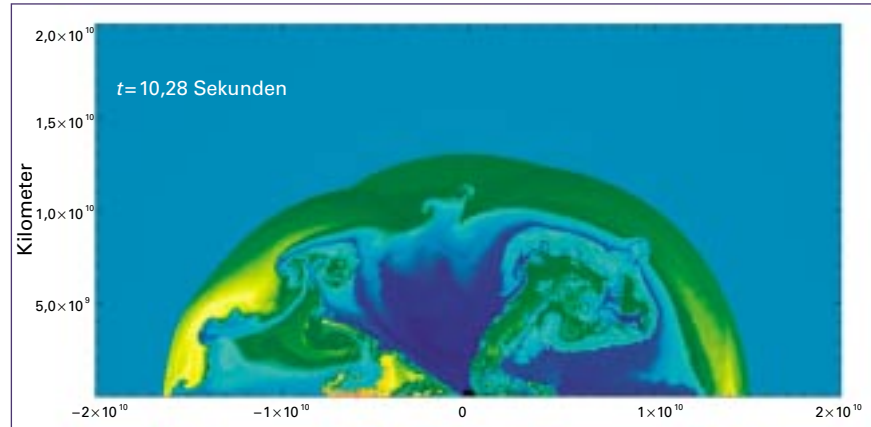
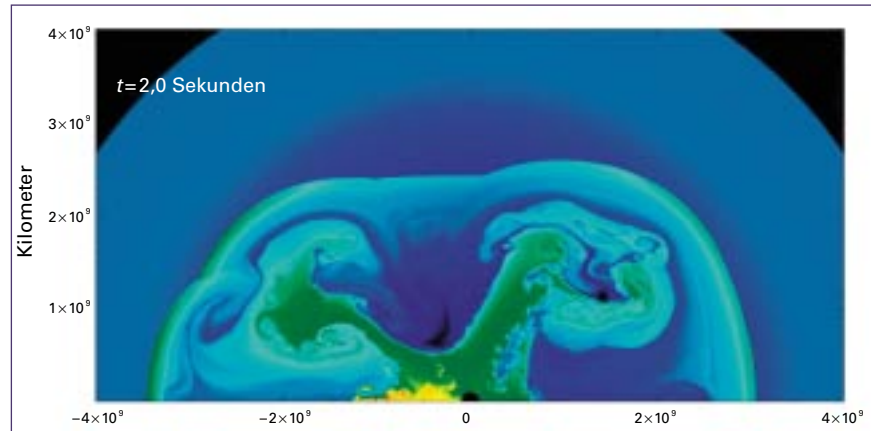
Wenn im Spektrum starke Wasserstofflinien auftauchen, dann hatte der explodierende Stern eine dicke Wasserstoffhülle. Die Astronomen sprechen dann von einer Typ-II-Supernova. Solche Ereignisse sind normalerweise sehr hell. Aber massereiche Sterne können ihre äußeren Schichten durch Sternwinde oder durch den Einfluss eines nahen Begleitsterns eingebüßt haben. In diesem Fall fehlen Spektrallinien von Wasser-

stoff, möglicherweise auch von Helium; das klassifiziert die Ereignisse als Supernovae vom Typ Ib oder Ic. Die Unterklassen tragen der Tatsache Rechnung, dass die Helligkeitsentwicklung einer Supernova je nach verbliebener Hüllenmasse unterschiedlich sein kann.

In seltenen Fällen werden extreme Expansionsgeschwindigkeiten und bisweilen sehr hohe Leuchtkräfte gemessen. Die Explosionsenergien können dabei bis zu zehnmal höher liegen als bei gewöhnlichen Supernovae. Solche »Hypernovae« sind zumindest in einigen Fällen

mit so genannten kosmischen Gammastrahlungsblitzen verknüpft.

Gammablitz wurden bereits in den 1960er Jahren entdeckt, doch ihre Quellen blieben über dreißig Jahre lang rätselhaft. Erst in den späten 1990er Jahren gelangen genauere Ortsbestimmungen am Himmel, und dadurch wurden auch schnelle Beobachtungen bei anderen Wellenlängen möglich. Dabei entdeckten die Forscher ein »Nachglühen« der Quellen bei Radiofrequenzen sowie im sichtbaren und im Röntgenbereich. Die endgültige Aufklärung des Rätsels glück-



Die großen aufsteigenden Blasen aus neutrinoergeheiztem Gas führen zu einer unsymmetrischen Explosion und vermischen chemisch unterschiedliche Sternschichten. Die zweidimensionale Computersimulation zeigt drei Schnappschüsse: zwei Sekunden, zehn Sekunden und fünfzehn Stunden nach Explosionsbeginn. Zu diesen Zeiten hat die Stoßfront Radien von 30000, 150000 und 30 Millionen Kilometern erreicht. Im unteren Bild bedeutet Rot Wasserstoff, Grün Helium; die blauen Regionen enthalten hauptsächlich schwerere Elemente, die nahe dem Zentrum der Explosion entstanden sind.

Asymmetrische Sternexplosionen – im Computer schwer zu simulieren

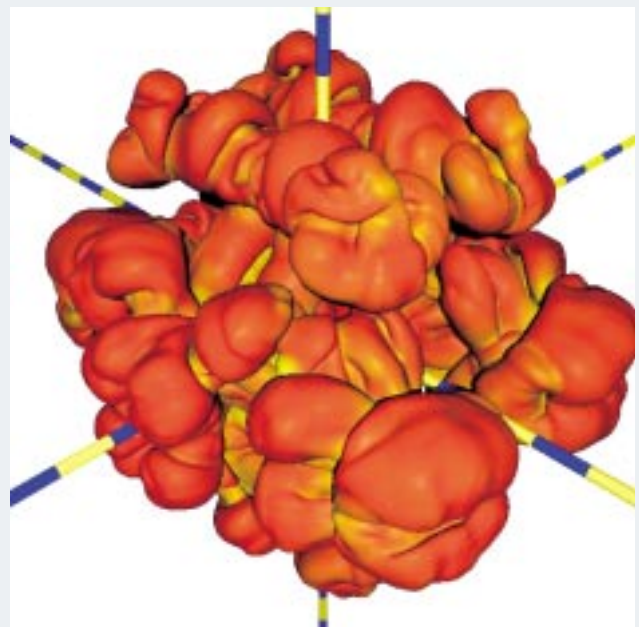
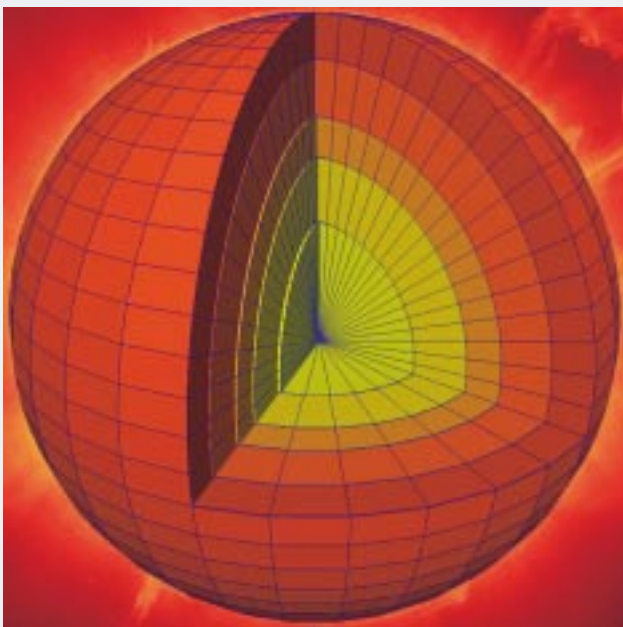
Für Simulationsrechnungen wird der Stern in verschiedene Zellen zerlegt (links) und seine Entwicklung durch eine Folge von »diskreten« Zeitschritten verfolgt. In jeder Zelle und für jeden Zeitschritt wird die Änderung physikalischer Größen wie Dichte und Temperatur aus hydrodynamischen Gleichungen berechnet.

Das Modell ist umso genauer, je mehr Zellen zur Beschreibung der Supernova verwendet werden – doch damit steigt auch der Rechenaufwand. Die Anforderungen an Rechengeschwindigkeit und Speicherplatz sind enorm: Eine detaillierte Simulation umfasst etwa 10^{20} Fließkommaoperationen und benötigt bis zu mehreren Terabyte (10^{12} Byte) an Speicherplatz. Selbst die heutzutage schnellsten Rechner mit mehreren tausend Einzelprozessoren vermögen nur etwa 10^{12} Fließkommaoperationen pro Sekunde durchzuführen. Das heißt, ein solcher Superrechner müsste einige Jahre ununterbrochen arbeiten, um eine einzige detaillierte Supernova-Simulation durchzuführen.

Hinzu kommt, dass bei Sternexplosionen Längen- und Zeitmaßstäbe zu modellieren sind, die sich über einen Größenord-

nungsbereich von zehn Millionen erstrecken. Die Turbulenz der Strömung gestattet keine vereinfachenden Symmetrieanahmen, und die physikalischen Prozesse – thermonukleare Brennvorgänge, Transport von Neutrinos, Eigenschaften der Materie bei extremen Dichten und Temperaturen – sind ungeheuer komplex.

In einem Supernova-Modell, das keinerlei räumliche Symmetrie aufweist, hängen alle Strömungsgrößen – beispielsweise die Dichte – von allen drei Raumkoordinaten und der Zeit ab (rechts). Will man auch noch den Transport von Neutrinos modellieren, wird dieses vierdimensionale Strömungsproblem zu einem siebendimensionalen. Denn in jeder diskreten Zelle des Modells hängen die Größen, die den Transport der Neutrinos bestimmen – zum Beispiel der Fluss der Neutrinos –, von der Energie und der Bewegungsrichtung der Neutrinos ab, wobei Letztere durch zwei Winkelkoordinaten gegeben ist. Außerdem ist noch zu beachten, dass der Transport dreifach, nämlich für drei in der Natur vorkommende Neutrinosorten, berechnet werden muss.



▷ te schließlich mit der Beobachtung des Gammablitzes GRB030329 vom 29. März 2003. Er war nicht nur einer der bislang hellsten und nächstgelegenen, sondern ereignete sich auch gleichzeitig und an gleicher Stelle wie die ungewöhnliche Supernova SN 2003dh. Dadurch wurde zweifelsfrei ein Zusammenhang zwischen dem Tod massereicher Sterne und zumindest einigen Gammablitzten bestätigt. Vermutlich besitzen diese sterbenden Sterne so große Kerne aus Eisen, dass beim Kollaps Schwarze Löcher statt Neutronensterne entstehen.

Generationen von massereichen Sternen haben das Universum mit Kohlenstoff, Sauerstoff, Silizium und Eisen angereichert und so unter anderem die Entstehung von Planeten und Leben ermöglicht. Sie spielen daher eine zentrale Rolle im kosmischen Kreislauf von Werden und Vergehen.

Brutstätten schwerer Elemente

In vielen Millionen Jahren ruhiger Entwicklung erbrütet ein massereicher Stern diese schweren chemischen Elemente aus Wasserstoff und Helium, die im Urknall

gebildet wurden. Zum Zeitpunkt seines Kollapses ist der stellare Kern aus Eisen von zwiebelartigen Schalen umgeben, welche die Asche früherer nuklearer Brennphasen enthalten. Wenn die Supernova die Sternhülle absprengt, schleudert sie diese Elemente in den interstellaren Raum – vermengt mit radioaktivem Material, das dem Höllenfeuer der Explosion entstammt.

Supernovae sind auch die besten Kandidaten für den immer noch mysteriösen Ursprung der schwersten Elemente. Gold, Blei, Thorium und Uran kön-

nen nur unter ganz besonderen Bedingungen entstehen. Noch weiß niemand, ob solche Bedingungen im Innern einer Supernova herrschen.

Schon die Suche nach dem Grund für die Explosion massereicher Sterne erwies sich als unvermutet schwierig. Wie kommt es dazu, dass die äußeren Schichten eines Sterns abgesprengt werden, während sein Kern zu einem Neutronenstern oder Schwarzen Loch kollabiert? Obwohl die zu Grunde liegende Idee einfach klingt – gravitative Bindungsenergie wird freigesetzt und treibt die Explosion an –, sind die Details äußerst kompliziert.

Neutrinos heizen ein

Wie schafft es der zusammenstürzende Stern, die Implosion in eine Explosion umzukehren? Wie vermag die kollabierende Materie sich aus den Fesseln der Schwerkraft zu befreien? Eigentlich ist dafür genügend Energie vorhanden: rund hundert Mal mehr als zur Explosion benötigt. Aber diese Energie wird beinahe vollständig in Form extrem flüchtiger Neutrinos abgestrahlt, die bei den hohen Dichten und Temperaturen im Neutronenstern in riesiger Zahl entstehen. Der Mechanismus, der einen kleinen Teil dieser Energie für die Explosion nutzbar macht, harrt seit mehr als vierzig Jahren seiner Entdeckung. Das ist das notorische »Supernova-Problem«.

Obwohl es den Theoretikern nicht an Ideen mangelte, erwiesen sich alle bisherigen Vorschläge als unzureichend. Der wachsende Zoo von Supernovae mit schwachen, energiereichen und sogar hyperenergetischen Ereignissen besagt, dass die erfinderische Natur offenbar mehr als einen Weg gefunden hat, dieses Problem zu lösen. In kollabierenden Sternen stehen die unterschiedlichsten Prozesse im Wettstreit – einige für die Explosion hilfreich, andere hinderlich. Insbesondere gilt es, Modelle für die Wechselwirkungen der Neutrinos in dichter Supernova-Materie zu entwickeln.

In einer Pionierarbeit schlugen Stirling A. Colgate und Richard White vom Lawrence Livermore National Laboratory bereits 1966 vor, Neutrinos aus dem heißen Neutronenstern könnten die Energie liefern, mit der die äußeren Schichten des explodierenden Sterns abgesprengt werden. Die ersten Supernova-Modelle, in denen dieser Effekt auftauchte, wurden in den 1980er Jahren

von Jim Wilson am Lawrence Livermore National Laboratory berechnet. Hans Bethe und Jim Wilson zeigten danach, dass rund zehn Prozent der vom Neutronenstern abgestrahlten Neutrinos hinter der Supernova-Stoßfront absorbiert werden und dort die Materie aufheizen.

Aber reicht dieser Energieübertrag aus, den stagnierenden Stoß wieder zu beleben und eine verzögerte Explosion auszulösen? Sehr genaue Computerberechnungen des Energietransports durch Neutrinos offenbaren ein ernsthaftes Problem. Das diskutierte Szenario reagiert höchst empfindlich auf zwei gegenläufige Einflüsse: einerseits das Neutrinoheizen und andererseits den Energieverlust durch Neutrino-Emission in der kollabierenden Materie. Für Vorläufersterne mit mehr als zehn Sonnenmassen sind diese Energieverluste so gravierend, dass der neutrinogetriebene Explosionsmechanismus nicht funktioniert.

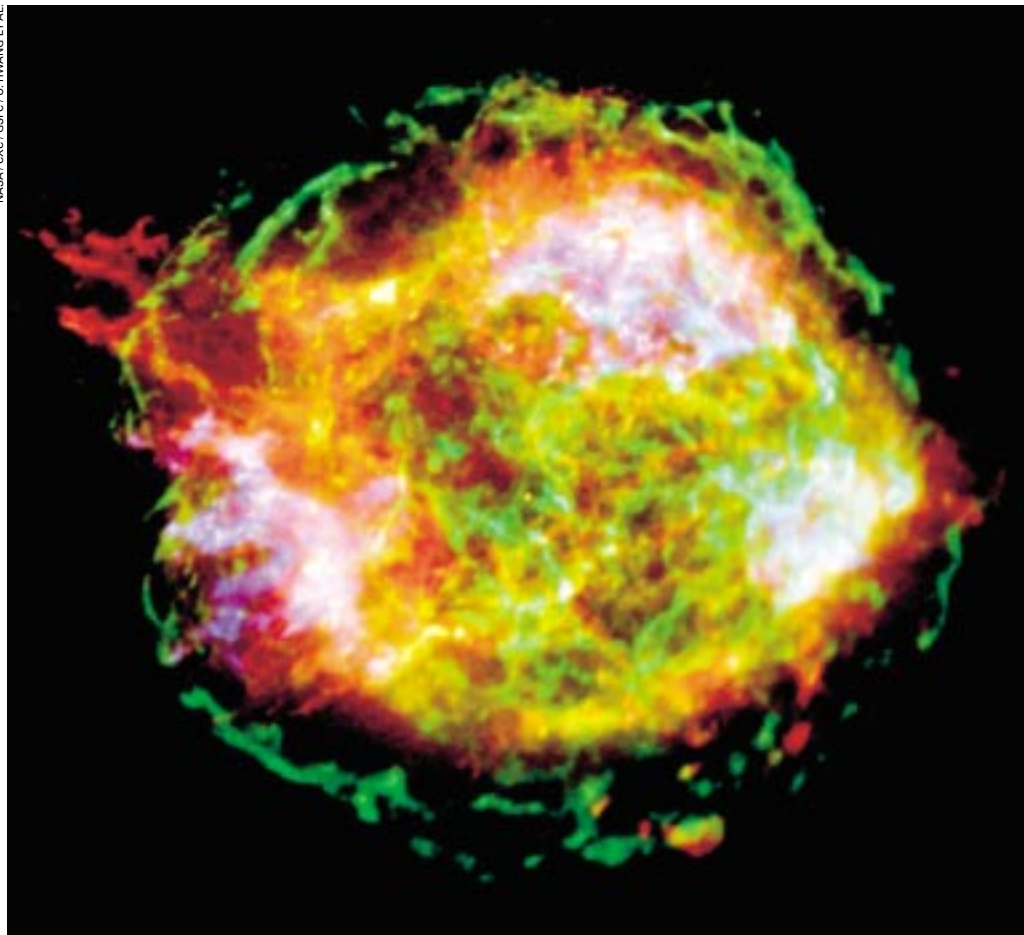
Doch die Modelle beruhen auf einer radikalen Vereinfachung: Der Stern wird als kugelsymmetrisch betrachtet, das heißt, in allen Richtungen sollen dieselben Bedingungen gelten. Damit werden aber wichtige mehrdimensionale Phänomene ignoriert, beispielsweise Konvektion und Rotation. Beobachtungen von Supernovae und deren Überresten liefern viele Hinweise, dass die Zwiebelschalen-

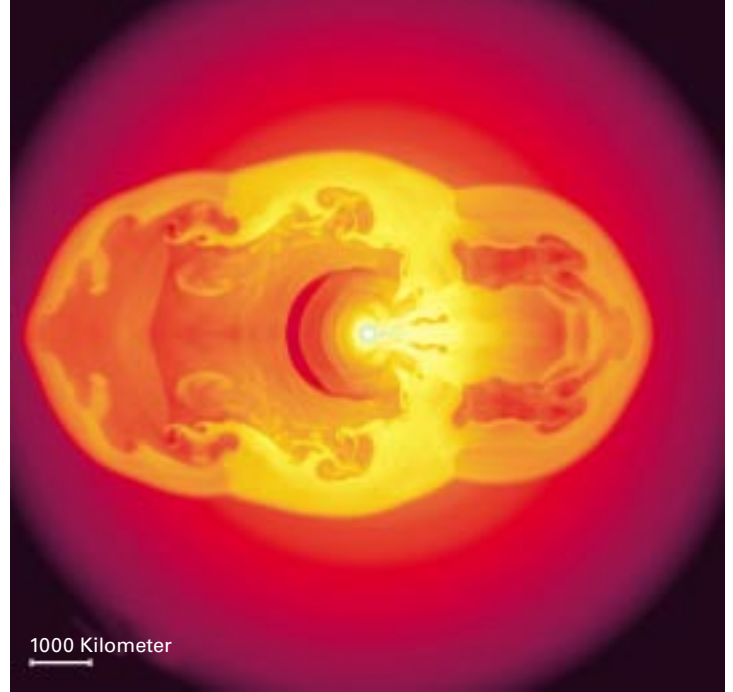
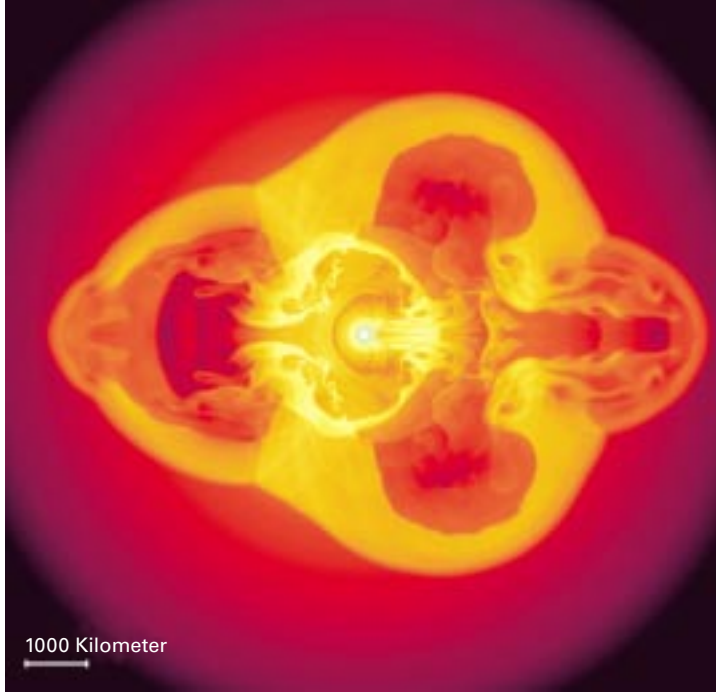
struktur des Supernova-Vorläufers bei der Explosion zerstört wird. Die Trümmer der Sternhülle expandieren unterschiedlich schnell, und die während der Explosion gebildeten Elemente sind ungleichmäßig verteilt. In der Supernova 1987A wurden sie in der Wasserstoff- und Heliumschale entdeckt, mit unerwartet hohen Geschwindigkeiten.

In den ersten mehrdimensionalen Simulationen zeigte sich dann, dass die von Neutrinos geheizte Region im Zentrum einer Supernova von starken konvektiven Strömungen umgewühlt wird, ähnlich heftig kochendem Wasser in einem Topf. Es entwickeln sich pilzförmige Blasen, in denen heißes Plasma aufsteigt. ▷

▼ Cassiopeia A ist der Überrest eines massereichen Sterns, der vor rund 320 Jahren als Supernova explodierte. Die Stoßwelle erscheint als äußerer grüner Ring. Ihr Durchmesser beträgt etwa zehn Lichtjahre. Rot, Grün und Blau bedeuten Röntgenstrahlen niedriger, mittlerer und hoher Energie – was unterschiedliche Konzentrationen von Silizium und Eisen im ausgeschleuderten Gas kennzeichnet. Die hellen, blauen, fingerartigen Strukturen nahe der Stoßwelle bestehen fast vollständig aus Eisen.

NASA/CXC/GBPC/J.U. HWANG ET AL.





▲ In zweidimensionalen Simulationen wachsen zufällige Anfangsstörungen in der ersten Sekunde der Explosion zu höchst unterschiedlichen Strömungsmustern des expandierenden Gases an. Wenn Supernovae stark richtungsabhängig explodieren, kann der resultierende Neutronenstern einen Rückstoß von mehr als 1000 Kilometer pro Sekunde erleiden. Stark gerichtete Explosionen erzeugen Rückstoßgeschwindigkeiten von mehr als 300, weniger richtungsabhängige von nicht mehr als 200 Kilometer pro Sekunde. Tatsächlich beobachten Astronomen Pulsare – rotierende Neutronensterne –, die sich mit solch unterschiedlichen Geschwindigkeiten am Himmel bewegen.

▷ Dabei wird die Energie, die das Gas von den Neutrinos aufgenommen hat, zur Supernova-Stoßfront transportiert. Der dort wachsende Druck schiebt den Stoß weiter nach außen und verursacht selbst dann eine Explosion, wenn kugelsymmetrische Modelle versagen. Simulationen in drei Raumdimensionen, die Christopher Fryer und Michael Warren am Los Alamos National Laboratory und nun auch unsere Supernova-Gruppe am MPI für Astrophysik in Garching durchführten, bestätigen den hilfreichen Einfluss der Konvektion (siehe die Bildfolge auf der Doppelseite 38/39).

Wie unsere Simulationen zeigen, wachsen anfänglich kleine Blasen aus neutrinoergeheiztem expandierendem Gas zu immer größeren Strukturen, die sich, falls die Explosion hinreichend langsam

einsetzt, miteinander vereinigen können. Aus vielen kleinen Zellen, die durch trichterartige Ströme kühlerer, zum Neutronenstern stürzender Materie getrennt sind, entstehen einige heiße Blasen, umgeben von absinkendem kühlerem Gas.

Die Expansion dieser neutrinoergeheizten Blasen führt zu einer asymmetrischen Explosion, in deren Verlauf die räumliche Verteilung des Eisens und verwandter Elemente stark richtungsabhängig wird. Die Inhomogenitäten, die aus der ersten Sekunde der Explosion stammen, regen zunächst Strömungsinstabilitäten an und letztlich eine großräumige Durchmischung in den äußeren Schichten der ausgeschleuderten Sternhülle (siehe Bilder S. 41). Hierdurch werden schwere Elemente und Helium in die Wasserstoffhülle und gleichzeitig Wasserstoff in tiefere Schichten verfrachtet. Das Resultat ähnelt den Röntgenbildern des 300 Jahre alten Supernova-Überrests Cassiopeia A.

Zweierlei rasende Pulsare

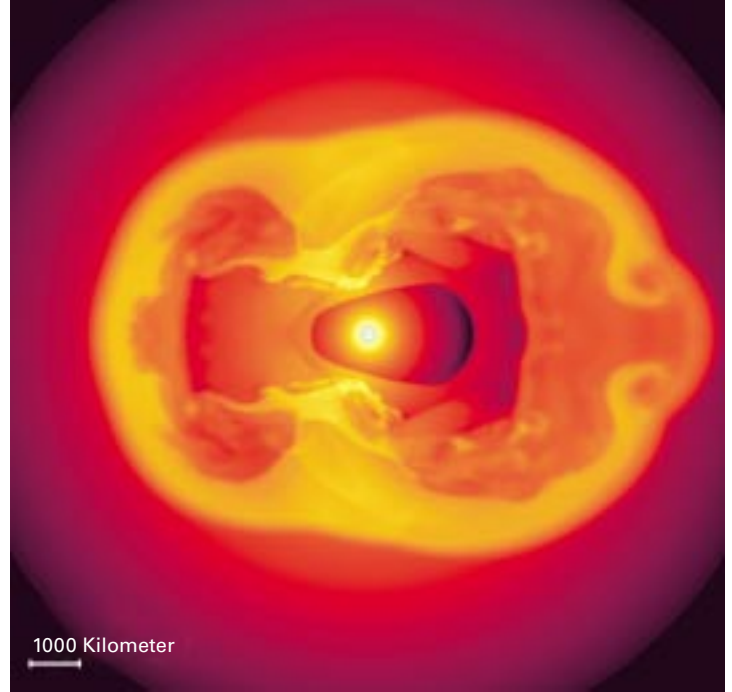
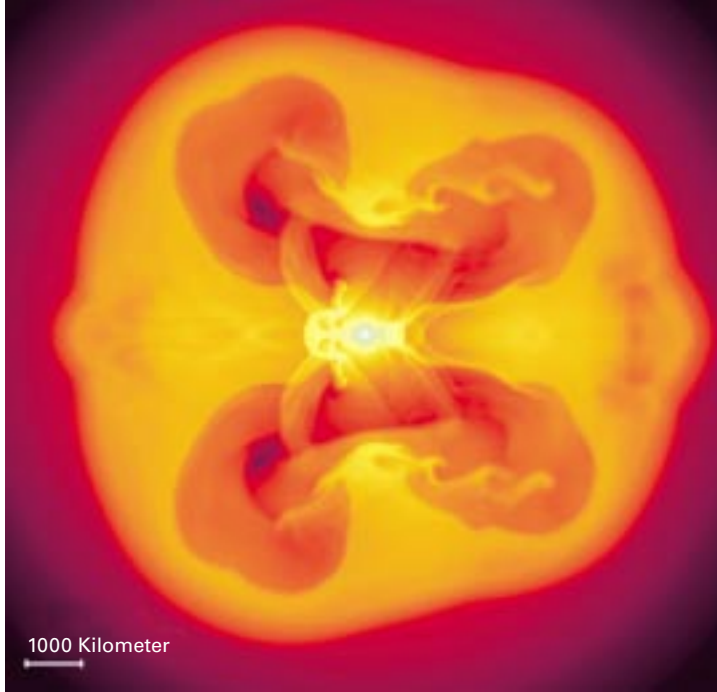
Eine Folge der großen Wucht, mit der die Sternmaterie in eine Vorzugsrichtung weggeschleudert wird, ist ein Rückstoß, den der Neutronenstern in die entgegengesetzte Richtung erleidet. In einer Serie von zweidimensionalen Simulationen fand das Team am MPI für Astrophysik Rückstoßgeschwindigkeiten der Neutronensterne von bis zu 1000 Kilometern pro Sekunde. Das passt gut zu den beobachteten Bewegungen der meisten Pulsare – rotierender Neutronensterne – durch den interstellaren Raum.

Genau genommen beobachtet man eine Gruppe von vergleichsweise langsa-

men sowie eine zweite Population von schnellen Pulsaren. Das hier skizzierte Szenario legt nahe, dass die langsame Gruppe mit dem Auftreten vieler relativ kleiner konvektiver Strukturen verknüpft ist, während hohe Geschwindigkeiten entstehen, wenn in der konvektiven Schicht um den Neutronenstern wenige große Strukturen dominieren. Somit zeichnet sich ein einheitliches Bild ab, das viele Supernova-Eigenschaften auf einem gemeinsamen Ursprung erklärt.

Doch all diese Modelle haben noch schwer wiegende Mängel. Nur durch bessere Simulationen in mehreren Raumdimensionen wird das Supernova-Problem zu lösen sein. Große Kollaborationen in den USA – die TeraScale Supernova Initiative und das SciDAC Supernova Science Center, beide vom Department of Energy gefördert – stehen dabei im Wettstreit mit Gruppen am MPI für Astrophysik sowie in Japan.

Der Rechenaufwand ist enorm. Wenn Neutrinos durch einen Stern ohne einschränkende Symmetrien strömen, handelt es sich um ein siebendimensionales Problem (siehe Kasten auf der vorigen Doppelseite). Während bei hohen Dichten Neutrinos stark an das bewegte stellare Gas gekoppelt sind, beginnen sie sich mit wachsendem Abstand vom Zentrum allmählich ungehindert auszubreiten. Die Entwicklung der Supernova muss dabei über viele hunderttausend Zeitschritte verfolgt werden, wofür gut 10^{20} Rechenoperationen nötig sind. Kein heute existierender Supercomputer vermag eine solche Zahl von Operationen in vernünftiger Zeit zu bewältigen. Selbst Rechner der nächsten Generation



werden eine Aufgabe von diesem Umfang erst anpacken können, wenn neuartige Programme entwickelt werden.

Ein erster Schritt in diese Richtung gelang kürzlich am MPI für Astrophysik. Dort wurden erstmals mehrdimensionale Simulationen durchgeführt, bei denen der Transport der Neutrinos in Abhängigkeit von der Energie behandelt wird. Obwohl die Modelle nach wie vor Achsensymmetrie besitzen, berücksichtigt der Transport fünf Dimensionen: die Zeit, den Abstand vom Zentrum, einen Raumwinkel, einen Winkel zur Beschreibung der Neutrino-energie. Jedes Modell erfordert weit mehr als 10^{17} Fließkommaoperationen – vergleichbar mit den größten Strömungssimulationen, die in der Astrophysik heute möglich sind.

Viele Wege zur Explosion

Diese bislang besten Computerrechnungen bestätigen, wie außerordentlich empfindlich die Supernova-Dynamik auf die Behandlung der Neutrinos reagiert. Außerdem beginnt sich die stagnierende Stoßfront zu verbiegen, die bevorzugt Beulen in Achsenrichtung entwickelt. Dies unterstreicht, dass letztlich Modelle nötig sein werden, die ohne einschränkende Symmetrieanahmen auskommen.

Die wachsende Vielfalt von Supernovae-Beobachtungen deutet an, dass es mehr als einen Explosionsmechanismus geben könnte. So wurden Magnetfelddefekte vorgeschlagen, die gleichsam die Rotationsenergie eines schnell rotierenden Neutronensterns anzapfen. Dabei wird das Magnetfeld, das einen kollabierten stellaren Kern durchzieht, durch Auf-

wickeln der Kraftlinien verstärkt und drückt Materie gewaltsam in zwei polaren Gasströmen – so genannten Jets – nach außen. Auf diese Weise wird die Explosion stark richtungsabhängig. In Vorläufersternen gewöhnlicher Supernovae sind Rotation und Magnetfelder vermutlich zu schwach, sodass dieser Effekt keine Rolle spielt. Hypernovae hingegen zeigen Hinweise auf starke Abweichungen von der Kugelgestalt und haben höhere Explosionsenergien, als sich durch Neutrinoheizen allein erklären ließe.

Insbesondere Gammablitzescheine von extrem gebündelten Gasströmungen zu stammen, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Diese relativistischen Jets verlieren ihre Bewegungsenergie in Teilchenstößen und erzeugen dabei intensive Gammastrahlung.

Der nun durch Beobachtungen erhärtete Zusammenhang mit dem Tod massereicher Sterne war bereits von Stan Woosley von der University of California in Santa Cruz vorhergesagt worden. Sein »Kollapsar«-Modell nimmt an, dass beim Kollaps eines sehr schnell rotierenden massereichen Sterns im Zentrum ein Schwarzes Loch entsteht. Es verschlingt anschließend das Gas aus der Sternhülle, das sich wegen der schnellen Rotation zunächst in einem ringförmigen Wulst um das Schwarze Loch ansammelt. Bei dieser Akkretion des Gases werden riesige Energien freigesetzt und zwei gebündelte Jets erzeugt, die sich fast lichtschnell längs der Rotationsachse des Schwarzen Lochs ausbreiten. Sie durchdringen alle Sternschichten und erzeugen dann weit außerhalb den Gammablitz. In der Nähe des Schwarzen Lochs entstehen außerdem ge-

waltige Mengen an radioaktivem Nickel. Die dabei frei werdende Energie zersprengt die Sternhülle in einer Hypernova-Explosion.

Überraschende Beobachtungen haben uns Hand in Hand mit raffinierten Computersimulationen eine ungeahnte Vielfalt von Supernova-Phänomenen eröffnet. In diesem ständig wachsenden Puzzle müssen viele Teile noch ihren endgültigen Platz finden. Die Astrophysiker haben erst begonnen, mit immer besseren Modellen zahlreiche Möglichkeiten auszuloten; für kommende Generationen bleibt also noch viel zu tun. ◀



Wolfgang Hillebrandt kam 1978 an das Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, wo er seit 1997 einer der Direktoren ist. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Nuklear- und Teilchen-Astrophysik, Sternentwicklung und Supernova-Explosionen. **Hans-Thomas Janka** erforscht in Garching Neutrino-Astrophysik, Neutronensterne und kosmische Gammablitzes. **Ewald Müller** ist Forschungsgruppenleiter in Garching. Sein Spezialgebiet ist die numerische Simulation relativistischer Phänomene in der Astrophysik.



Supernovae vom Typ Ia. Von W. Hillebrandt und F. Röpke in: *Sterne und Weltraum*, S. 22, 5/2005

Supernovae im Superrechner. Von W. Hillebrandt und E. Müller in: *Physik Journal*, S. 49, Mai 2004

Wenn Sterne explodieren: Die Theorie von Supernovae. Von H.-T. Janka und E. Müller in: *Physik in unserer Zeit*, Bd. 32, S. 202, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

