

SUPERNOVAEXPLOSIONEN

Den RätseIn der Stern- explosionen auf der Spur

DIE GEWALTIGEN EXPLOSIONEN, MIT DENEN MANCHE STERNE IHR SPEKTAKULÄRES ENDE FINDEN, HABEN SICH ALS TURBULENTE UND HOCHKOMPLEXE VORGÄNGE ENTPUPPT. ES BENÖTIGT DIE AUFWÄNDIGSTEN SIMULATIONSRECHNUNGEN AUF SUPERCOMPUTERN, UM IHNEN WENIGSTENS EINEN TEIL IHRER GEHEIMNISSE ZU ENTREISSEN.

VON WOLFGANG HILLEBRANDT, JENS NIEMEYER, FRIEDRICH RÖPKE, WOLFRAM SCHMIDT

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; denn erstmals wurde offenbar, dass der Fixsternhimmel nicht unveränderlich ist, und diese Erkenntnis sollte unser Weltbild nachhaltig verändern. Allerdings dauerte es dann noch mehr als 300 Jahre, bis man erkannte, dass einige dieser „neuen“ Sterne außergewöhnlich hell erstrahlen – für einige Wochen erreichen sie fast die Leuchtkraft einer ganzen Galaxie mit vielen Milliarden Sternen – und es dauerte dann noch einmal fast 100 Jahre, bis man einigermaßen verstand, was die Ursachen dieser gewaltigen Lichtausbrüche sind, die man heute Supernovae nennt.

So glauben wir sicher zu sein, dass für etwa die Hälfte aller Supernovae der Kollaps eines massereichen Sterns zu einem Neutronenstern

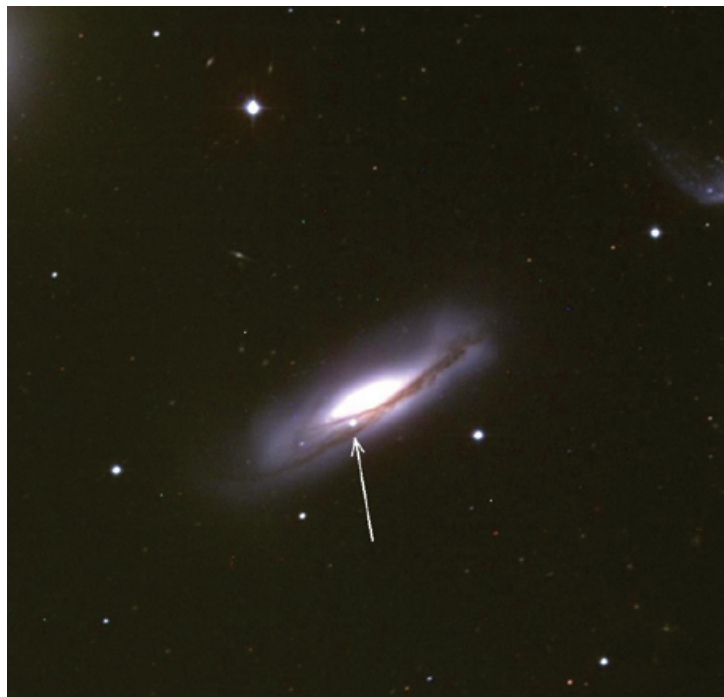


Abb. 1: Bild der Typ Ia Supernova SN 2002bo in der Galaxie NGC 3190. Diese Supernova wurde am 9. März 2002 fast zwei Wochen vor Erreichen des Maximums ihrer Helligkeit entdeckt und danach von der European Supernova Collaboration (ESC) mehrere Monate fast in jeder Nacht beobachtet. Die so gewonnenen Daten, auch anderer Supernovae, bilden die Basis für den Vergleich mit den numerischen Simulationen.

– oder eventuell zu einem Schwarzen Loch – der Auslöser ist. Diese nennen die Astronomen Typ II, Typ Ib und Typ Ic. Die andere Hälfte, die Supernovae vom Typ Ia, sind dagegen wahrscheinlich das Ergebnis thermonuklearer Explosionen weißer Zwergsterne (Abb. 1). Für diese Interpretation spricht die gute Übereinstimmung der aus Modellen berechneten Spektren und Lichtkurven mit den Beobachtungen. Obwohl also Beobachtungen die genannten Szenarien stützen, bleibt dennoch das Modellieren der Explosionen eine der größten

Herausforderungen für die Astrophysik. Seit vielen Jahren werden die jeweils schnellsten Computer der Welt mit möglichst realistischen Simulationen gefüttert, aber erst die neuesten Simulationen scheinen der Wirklichkeit nahe zu kommen.

Standardkerzen für die kosmische Expansion

In den letzten Jahren ist das Interesse der Astronomen an den thermonuklearen (Typ Ia) Supernovae stark gewachsen; denn man konnte sie erfolgreich zur Messung

Abb. 2: 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 Weise 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.



kosmischer Entfernungen verwenden. So ist es 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, fand man überraschend, dass das heutige Universum beschleunigt zu expandieren scheint – im Widerspruch zum gängigen kosmologischen Weltbild. Das Universum würde danach heute und auch in der 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.

Abb. 3: Die dreidimensionale Simulation einer Supernova-Explosion vom Typ Ia zeigt in vier Schnappschüssen – Beginn der Zündung sowie 0,3 Sekunden, 0,6 und etwa 10 Sekunden danach – die thermonukleare Explosion eines Weißen Zwergs. Die Dichtestruktur des Sterns ist farbkodiert dargestellt; die blaue Struktur gibt die thermonukleare „Flamme“ wieder. Der Größenmaßstab expandiert mit der Supernova.

Bevor man jedoch so weitreichende 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

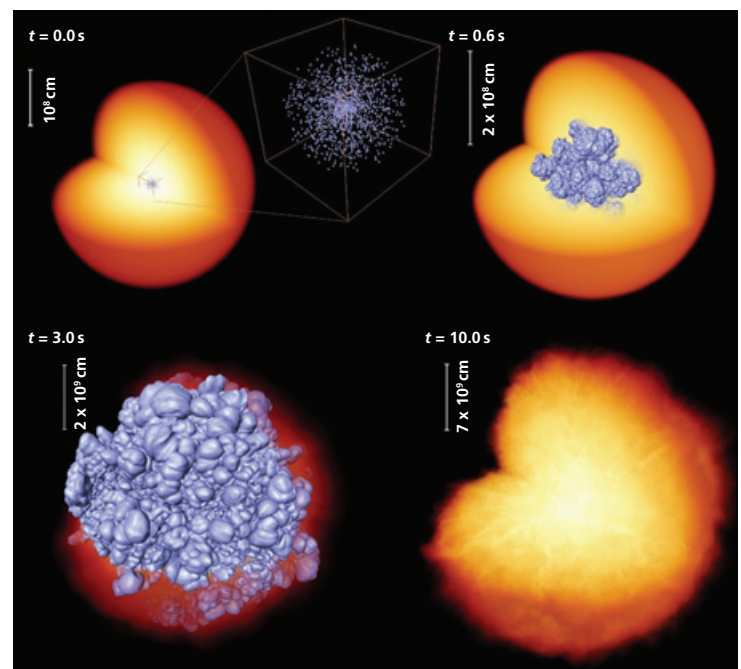
benutzt haben. Darum müssen wir die Explosionen verstehen sowie die Beziehungen, auf denen die Eichung beruht.

Warum explodieren Weiße Zwerge?

Wie erwähnt erklärt man Typ-Ia-Supernovae als thermonukleare Explosionen Weißer Zwerge. Diese Sterne bestehen zu etwa gleichen Teilen aus Kohlenstoff und Sauerstoff, haben ungefähr die Masse der

Sonne und ein Drittel des Erddurchmessers. Stabil gehalten werden sie durch den Druck eines dichten Gases sich extrem schnell bewegend Elektronen. 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 chemischen Elementen erreichen. Eine thermonukleare „Flamme“ entsteht, über deren Natur uns Beobachtungen Informationen liefern.

In den Spektren von Typ-Ia-Supernovae findet man starke Linien von mittelschweren chemischen Elementen wie Silizium, Schwefel und Kalzium. Dies zeigt, dass die Fusion nicht immer bis zum am stärksten gebundenen Kern fortschreitet. Das bedeutet aber auch, 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. Natürlich ist nicht ausgeschlossen, dass im Verlauf der Explosion aus der Deflagration noch eine Detonation wird; diese Möglichkeit wird derzeit unter Experten heiß diskutiert. Doch eine thermonukleare Flamme, die sich allein durch Wärmediffusion ausbreitet, vermag den Stern nicht zur Explosion zu bringen. Nur ein kleiner Teil würde verbrannt, danach würde der Stern sich 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 von Automotoren. 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 zu der Flammenoberfläche ist, stark an. Nur aus diesem Grund kann ein Automotor mit einigen tausend Umdrehungen pro Minute laufen. Im Prinzip sollte das in Supernovae ähnlich funktionieren (Abb. 2).

Supernova als Verbrennungsmotor

Lassen sich physikalische Konzepte und numerische Methoden aus der technischen Verbrennung tatsäch-

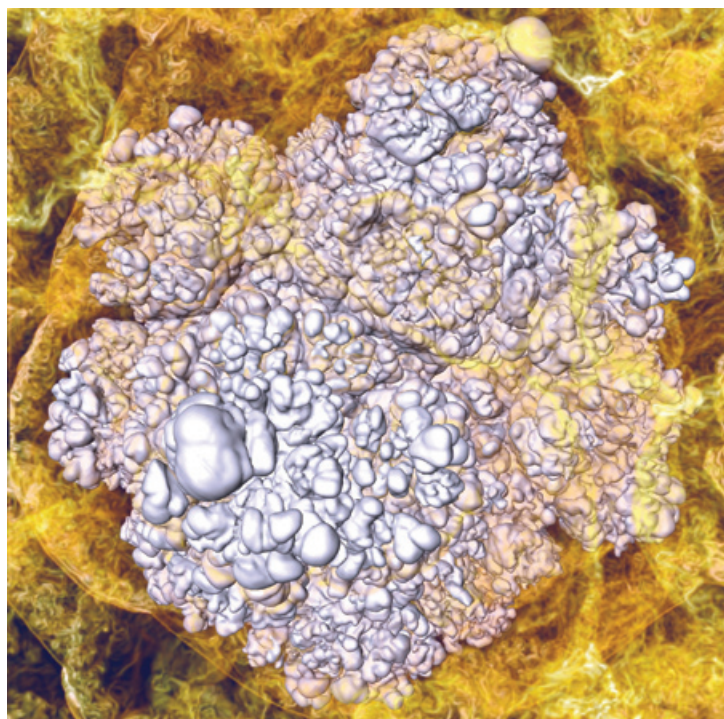


Abb. 4: Thermonukleare „Flammen“ (in blau) und Turbulenz (dargestellt durch die Vortizität). Das Bild zeigt, dass die Supernovamaterie bereits eine halbe Sekunde nach dem Zünden der Fusion hochgradig turbulent ist, in Übereinstimmung mit unseren Erwartungen.

lich 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 Universität Würzburg, der University of California und der University of Chicago weitgehend beantwortet worden. Wie in der technischen Verbrennung kann man auch in Supernovae nur die großen Längenmaßstäbe direkt simulieren; die nicht aufgelösten kleinräumigen Prozesse müssen modelliert werden.

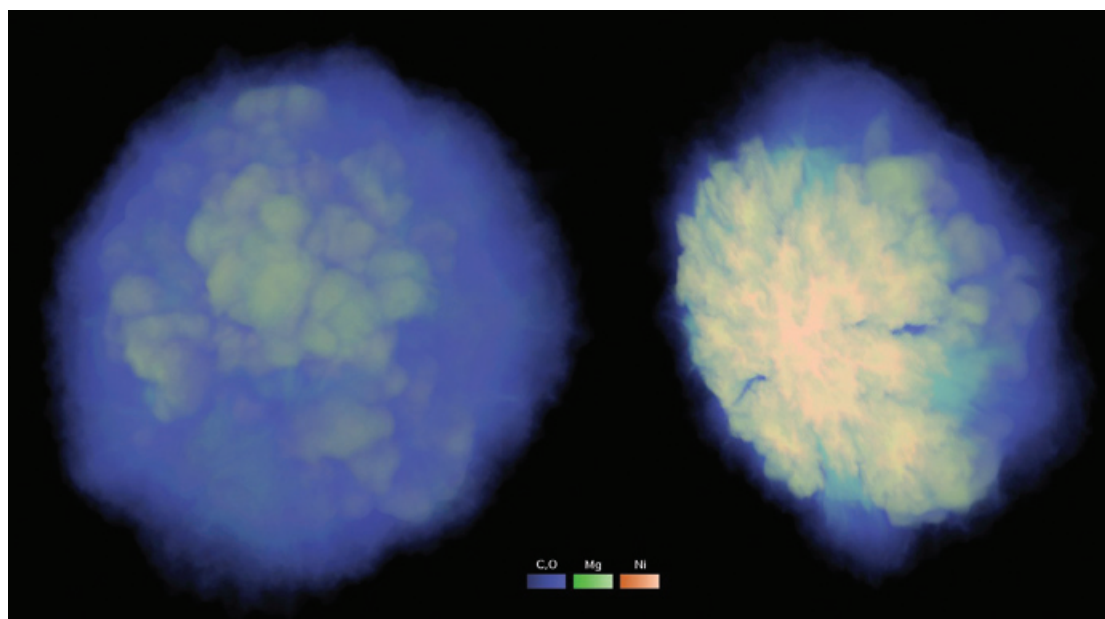
Bei der Simulation der Wechselwirkung von Flammenausbreitung und Turbulenz nutzt man den Umstand, dass, verglichen mit dem Durchmesser des Sterns die Flammen beliebig dünn erscheinen. Das heißt, man kann sie mathematisch als Diskontinuität auffassen, die Brennstoff von den Brennpunkten trennt. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist fast während der gesamten Supernovaexplosion ausschließlich durch die Turbulenz bestimmt, die in einem sehr großen Skalenraum mit der Flamme wechselwirkt. Um diese – in der Computersimulation nicht auflösbare

– Turbulenz zu modellieren, greift man auf ein Konzept zurück, das ursprünglich in der Meteorologie entwickelt wurde und in letzter Zeit auch erfolgreich zur Simulation von chemischen Verbrennungsprozessen angewendet wird. Die große Ähnlichkeit der turbulenten thermonuklearen Verbrennung in der Supernovaexplosion mit chemischer Verbrennung in einem Otto-Motor wird hierbei ausgenutzt. Wir haben es mit einem für die Astrophysik ungewöhnlichen Umstand zu tun: Während die meisten numerischen Modelle der Astrophysik wegen der dort herrschenden extremen Bedingungen nicht in Laborexperimenten überprüft werden können, kommen bei der Simulation von thermonuklearen Supernovaexplosionen Methoden zum Einsatz, die in irdischen Verbrennungsexperimenten getestet worden sind.

Den Schlüssel zur Simulation der turbulenten Verbrennung bildet der sogenannte Large Eddy-Ansatz. Hier wird nur die großskalige turbulente Verwirbelung direkt auf dem Rechengitter aufgelöst. Mit Hilfe eines sogenannten subgrid scale-Modells

werden dann aus den turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen auf der Länge der Rechenzellen die Effekte der Turbulenz auf kleineren nicht aufgelösten Skalen abgeleitet. Die bislang aufwändigste Serie von Simulationen wurde kürzlich auf dem IBM-Supercomputer am Rechenzentrum des MPI in Garching und auf dem Hitachi SR8000-Rechner des LRZ durchgeführt. Typische Simulationen benutzten zwischen 512^3 und 1024^3 Gitterpunkte zur Beschreibung des Sterns, wodurch Längen bis hinunter zu weniger als einem

Abb. 5:
Räumliche Verteilung der chemischen Elemente in der Supernova am Ende der Simulation im „volume rendering“ (links) und im Schnitt. Man sieht, dass außen im Stern noch die „unverbrannten“ Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff dominieren (blaue Farbe) und weiter im Inneren hauptsächlich die Produkte der Kernfusion (mittelschwere Elemente in grün und Elemente der Eisen-Gruppe in orange) zu finden sind. Dies entspricht grob auch der Verteilung, die man in Supernovaspektren findet.



Kilometer aufgelöst wurden. Der Hauptspeicherbedarf betrug bis zu einem Terabyte und die Rechenzeit für die aufwändigste Simulation mehr als 500 000 Prozessorstunden. 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 komplexen pilzartigen Strukturen der thermonuklearen

Brennfront, wie sie auch von aufsteigenden heißen Gasblasen in einer Flüssigkeit bekannt sind (Abb. 3). Man sieht, wie im Verlauf der Explosion auf den Oberflächen der Blasen durch Turbulenz kleinräumige Strukturen entstehen (Abb 4).

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

Zwergs so verändert werden, wie es wahrscheinlich auch die Natur tut. Diese Weißen Zwerge können aus unterschiedlichen Mengen von Kohlenstoff und Sauerstoff bestehen, oder sie können, in Abhängigkeit von ihrer Entstehungsgeschichte, mit unterschiedlicher Dichte explodieren. In einem weiteren Schritt müssen für die Modelle Lichtkurven und Spektren berechnet werden, die man dann direkt mit beobachteten Daten vergleichen kann. Auch dazu sind sehr aufwändige Rechnungen erforderlich, die einen Höchstleistungscom-

puter mit riesigem Hauptspeicher erfordern wie er jetzt mit dem SGI Altix-Rechner am LRZ in Betrieb genommen wird.

Was noch zu tun bleibt

Natürlich wüsste man gerne, wie gut die Simulationen auch quantitativ mit beobachteten Supernovaexplosionen übereinstimmen, auch um die eingangs gestellte Frage nach dem zukünftigen Schicksal unseres Universums sicherer beantworten zu können. Hierzu ist eine große Zahl von ähnlichen Simulationen nötig, in denen die physikalisch relevanten Eigenschaften des Weißen

puter mit riesigem Hauptspeicher erfordern wie er jetzt mit dem SGI Altix-Rechner am LRZ in Betrieb genommen wird. Daneben gibt es aber auch noch 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 eingeleitet, indem zu Beginn der Simulation „per Hand“ einige Blasen aus heißer, verbrannter Materie in die Nähe des Sternzentrums gesetzt wurden. Die Anzahl und der Ort

dieser „Zündkerzen“ wurden nach einer Kombination aus deterministischen und stochastischen Gesichtspunkten ausgewählt und gingen als freie Parameter in die Simulationen ein. Erst in einer kürzlich am LRZ durchgeführten Studie wurde die Zeitabhängigkeit der Zündung berücksichtigt und auch nach dem Beginn der Explosion weitere Zündpunkte im heißen Sterninneren erzeugt (Bild 6).

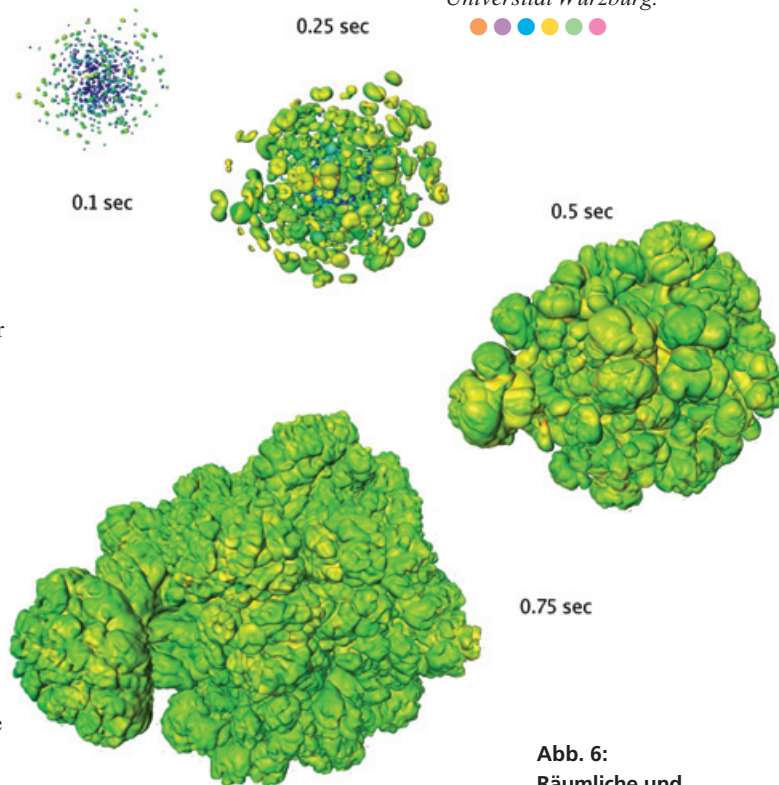
Damit konnte die Energieausbeute in manchen Fällen deutlich erhöht werden. Es scheint so, als könnten nicht nur die „typischen“ sondern auch einige etwas hellere Supernovae durch die Modelle erklärt werden. Allerdings stellte sich auch heraus, dass die resultierende Bandbreite an Explosionsstärken zwar größer war als in den bisherigen Studien, aber sie dennoch auch weiterhin zu begrenzt ist. Aber vielleicht sind wir doch dem Ursprung der beobachteten Supernova-Vielfalt ein wenig näher gekommen.

In die gleiche Richtung zielt eine weitere Untersuchung, in der die Rolle der Rotation des Sterns vor und während der Explosion unter die Lupe genommen wurde. Durch den stetigen Gasstrom, der den Stern auf die kritische Masse anwachsen lässt und schließlich zur Explosion bringt, wird dieser wie ein Jojo zu immer schnelleren Umdrehungen um die eigene Achse angetrieben. In den Simulationen konnten wir nun verfolgen, wie stark die thermonukleare Verbrennung durch die Eigenrotation des Sterns beeinflusst wird. Tatsächlich steigen die heißen Ascheblasen bevorzugt entlang der Rotationsachse auf und führen damit zu Explosionsüberresten, deren Erscheinungsbild stark vom Blickwinkel des Betrachters abhängt. Solche Effekte lassen sich möglicherweise mit aktuellen Supernovabeobachtungen identifizieren.

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 Hellig-

terentwicklung der Methode, die wir zur Modellierung der Deflagrationen einsetzen, nun auch Detonationen und ihre Wechselwirkung mit bereits verbranntem Material simulieren. Damit wird ein neues Feld für zukünftige Simulationen eröffnet, an dessen Ende wir die Natur der Typ Ia-Supernovae hoffentlich weitgehend verstanden haben.

Prof. Hillebrandt und Dr. Röpke arbeiten am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, Dr. Niemeyer und Dr. Schmidt am Lehrstuhl für Astronomie der Universität Würzburg.



keiten der Modellsupernovae zwar im Bereich der Beobachtungen, aber doch etwas auf der niedrigen Seite. Als Erweiterung des Deflagrationsmodells wurde zur Lösung dieser Probleme schon vor einigen Jahren ein spontaner Übergang zu einer Überschallverbrennung (Detonation) in der Spätphase der Explosion vorgeschlagen. Wir können dank einer am LRZ durchgeführten Wei-

Abb. 6:
Räumliche und zeitliche Verteilung der thermonuklearen „Flammen“ in einer Supernova. Etwas früher gezündete Flammen sind grün gefärbt, die später gezündeten blau. Auch in diesem Fall haben sich nach sehr kurzer Zeit die typischen Explosionsstrukturen gebildet.