

# Die Physik der Typ Ia Supernova-Explosionen

VON WOLFGANG HILLEBRANDT UND FRIEDRICH RÖPKE

Neue Computermodelle und detaillierte Beobachtungen führen zu einem Durchbruch im Verständnis dieser Ereignisse, die in der Astronomie von fundamentaler Bedeutung sind.

► Abb. 1: Die Typ Ia Supernova SN 2002bo (Pfeil), entdeckt am 9. März in der Galaxie NGC 3190 von Paulo Caçella und Yoji Hirose. (Bild: ESC)

Die Beobachtung der Supernova des Jahres 1572 durch den dänischen Astronomen Tycho Brahe kann als Geburtsstunde der modernen Astronomie gelten. Als er am 11. November einen neuen Stern in der Nähe des Sternbildes Cassiopeia entdeckte, war das eine Sensation. Bis dahin hatte man in Europa an die Unveränderlichkeit des Fixsternhimmels geglaubt, und hier war jetzt ein neuer Stern mit bloßem Auge am Nachthimmel zu sehen!

Tycho Brahe bekam für diese das damalige Weltbild verändernde Entdeckung vom dänischen König die Insel Hven in der Ostsee mietfrei als Ort für seine astronomische Forschung zur Verfügung gestellt, sowie ein jährliches Forschungsstipendium von 500 Talern, eine wahrhaft königliche Belohnung! Auch Johannes Kepler beobachtete 1604 eine Supernova. Sie ist, neben einem etwa 350 Jahre alten Überrest einer anderen Sternexplosion im Sternbild Cassiopeia, wahrscheinlich die einzige Supernova in unserer Milchstraße in den letzten 400 Jahren.

Die moderne Geschichte der Supernovaforschung begann allerdings erst in der Nacht vom 17. zum 18. August 1885, als L. Gully an der Volkssternwarte in Rouen und E. Hartwig in Dorpat in Estland unabhängig voneinander eine »Nova« in der Nähe des Zentrums der Andromeda-Galaxie entdeckten. Ein Jahr zuvor hatte es an dieser Stelle keinen Stern gegeben, und 18 Monate später war er wieder unsichtbar. Doch erst als Knud Lundmark 1919 die Entfernung zur Andromeda-Galaxie mit etwa 700 000 Lichtjahren abschätzte (rund einen Faktor drei zu niedrig, wie wir heute wissen) war klar, dass S Andromedae keine normale Nova gewesen sein konnte.

Vielmehr musste sie mehrere tausend Mal heller gewesen sein. Der Schweizer Astronom Fritz Zwicky, der bis in die 1960er Jahre hinein selbst viele Supernovae entdeckte, prägte für sie schließ-

lich 1933 diesen Namen. Heute findet man mit Hilfe automatischer Suchprogramme mehr als hundert Supernovae in jedem Jahr, und es gibt für ihre Entdeckung keine Prämien mehr (Abb. 1). Warum interessieren sich dann Astronomen und Astrophysiker doch so sehr für sie, dass sie, als 1987 erstmals seit Kepler wieder eine Supernova von der Erde aus mit bloßem Auge beobachtet werden konnte, diesem »Jahrhundertereignis«, der Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke, Hunderte von wissenschaftlichen Veröffentlichungen widmeten?

## Energieausbrüche

Eine Antwort auf diese Frage ist leicht zu geben. Supernovae sind gewaltige Energieausbrüche: Für kurze Zeit erscheint ein einzelner Stern fast so hell wie eine ganze Galaxie von 100 Milliarden Sternen. Sie sind so hell, dass man sie noch in einer Entfernung von Milliarden Lichtjahren mit großen Teleskopen beobachten kann, was sie zu idealen Maßstäben für die »Vermessung« des Universums macht. In ihnen entstehen fast alle schweren chemischen Elemente, aus denen unsere Umwelt und auch wir bestehen, und sie sorgen durch ihren Tod für die Entste-

hung neuer Sterne in dichten interstellaren Gaswolken.

Diese Aufzählung ließe sich noch weiter fortsetzen, und es ist deshalb nur zu verständlich, dass Astronomen und Astrophysiker herausfinden wollen, was in solchen gigantischen kosmischen Explosionen passiert. Zwar glauben die Astrophysiker heute zu verstehen, wie sie zustande kommen, aber die Computermodelle geben nicht immer die gewünschten Ergebnisse.

## Zwei Ansätze

Im Prinzip gibt es zwei Wege, wie man herausfinden kann, was Supernovae sind und wie sie funktionieren. Im deduktiven Zugang konstruiert man aus allgemeinen Eigenschaften von beobachteten Supernovae ein astrophysikalisches Modell, versucht es in Computersimulationen umzusetzen und leitet aus diesen Simulationen Beobachtungsgrößen ab, die anschließend wieder mit Beobachtungen verglichen werden können. So ist es möglich, die Gültigkeit des theoretischen Modells zu überprüfen und gegebenenfalls seine physikalischen Grundlagen zu korrigieren oder zu vervollständigen.

Der induktive Ansatz geht von einzelnen beobachteten Supernovae aus und

## Die verschiedenen Typen von Supernovae

Aufgrund der spektralen Erscheinung werden verschiedene Untertypen von Supernovae unterschieden. Typ Ia Supernovae zeigen weder Wasserstoff- noch Heliumlinien und ermangeln somit der häufigsten Elemente im Universum. Ihr Explosionsmechanismus, die thermonukleare Verbrennung, ist fundamental verschieden von allen anderen Supernovae. Typ II Supernovae sind das Resultat eines Kernkollapses im Inneren eines massereichen Sternes. Diese Supernovae

zeigen in ihren Spektren ausgeprägte Wasserstoff- und Heliumlinien. Typ Ib Supernovae sind ähnlich, obwohl sie keine Wasserstofflinien zeigen, aber Helium vorhanden ist. Wie der Typ Ic, der weder Wasserstoff noch Helium, dafür aber Sauerstoff und Kalzium in den Spektren aufweist, sind auch sie Explosionen massereicher Sterne. Es gibt Hinweise, dass sie auch mit den Gammastrahlenausbrüchen assoziiert sind.

BRUNO LEIBUNDGUT



ermöglicht durch die detaillierte Analyse der Beobachtungsdaten Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse. Natürlich hofft man, dass letztlich beide Wege zu dem gleichen Bild führen. In diesem Artikel wollen wir beide Ansätze für die so genannten Typ Ia Supernovae, eine spezielle Klasse von Supernovae, vorstellen (siehe Kasten links); denn für dieses Beispiel waren die erwähnten Ansätze in den letzten Jahren besonders erfolgreich.

Besonders ausführlich werden wir uns dem induktiven Ansatz widmen. Bis vor wenigen Jahren haben die Typ Ia Supernovae unter Astrophysikern (aber auch in der Öffentlichkeit) ein eher geringes Interesse gefunden, wohl auch, weil sie nicht so exotisch zu sein schienen, wie die anderen Sorten. Sie produzieren weder Neutronensterne noch Schwarze Löcher, und auch bei der Entstehung der schweren Elemente spielen sie nur eine untergeordnete Rolle.

Die Situation hat sich jedoch dramatisch geändert, als sich herausstellte, dass man sie, wie bereits sehr früh vermutet worden war, als Entfernungsmaßstäbe in der Kosmologie verwenden kann. Wegen ihrer großen Leuchtkraft, sie sind die hellsten aller Supernovae, kann man selbst die noch beobachten, die explodierten, als das Universum weniger als halb so alt war wie heute, mit dem verblüffenden Ergebnis, dass sie alle etwas lichtschwächer erscheinen, als sie es im Rahmen des Standardmodells der Kosmologie dürften.

Die einzige mögliche Interpretation ist, dass das Universum heute beschleunigt expandiert. Das ist scheinbar eine absurde Vorstellung, denn die einzige Kraft, die zwischen den Galaxien wirkt, ist die Gravitation, und die ist universell attraktiv und sollte deshalb die Expansion nur bremsen! Der Ausweg aus diesem Dilemma ist die Annahme, dass das Universum eine bisher unbekannte Energieform enthält, die Dunkle Energie, die wie Materie mit negativem Druck wirkt (siehe hierzu den Artikel von Bruno Leibundgut ab Seite 30).

### Die Supernova im Computer

Im deduktiven Zugang stellt man sich zunächst folgende Fragen: Welches Bild kann man sich aus allgemeinen Erkenntnissen über Typ Ia Supernovae machen, und welche Forderungen für ein theoretisches Modell ergeben sich daraus? Wie bereits erwähnt wurde, sind Typ Ia Supernovaexplosionen enorm hell. Geht man davon aus, dass ein einzelner Stern explodiert, eine durchaus sinnvolle Annahme, kommen eigentlich nur zwei Energiequellen in Frage: Die Gravitation eines massereichen Sterns oder die nukleare Fusionsenergie eines Sterns, der zunächst aus leichten chemischen Elementen wie Kohlenstoff und Sauerstoff besteht. Erstere kann durch den Kollaps des Sterns zu einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch freigesetzt werden.

Heute glauben wir, dass so alle anderen Supernovatypen entstehen. Die größte Kernbindungsenergie haben Atomker-

ne wie Eisen und Nickel. Deshalb setzt Kernfusion von leichteren Elementen (wie z. B. Kohlenstoff und Sauerstoff) zu schwereren Elementen (Silizium, Schwefel, Kalzium, Eisen, Nickel) Energie frei. Da die Kernfusion immer zu sehr hohen Temperaturen führt, nennt man solche Sternexplosionen auch thermonukleare Supernovae. Die Frage ist nun: Warum wird der Typ Ia mit thermonuklearen Explosionen assoziiert?

Die Eigenschaft, die Typ Ia Supernovae von allen anderen unterscheidet (und die sie eigentlich erst definiert) ist das Fehlen von Wasserstoff und Helium in den Spektren – eine sehr ungewöhnliche Eigenschaft, wenn man bedenkt, dass die meisten Sterne hauptsächlich aus diesen Elementen bestehen. Also muss es sich bei den Vorläufern dieser Supernovae um Sterne am Ende ihrer Entwicklung handeln, wenn sie schon viel vom ursprünglichen Wasserstoff und Helium zu schwereren Elementen fusioniert (»verbrannt«, wie in der Astrophysik üblicherweise gesagt wird) haben und auch die äußeren Wasserstoff- und Heliumschichten noch verlorengegangen sind.

Die Kandidaten, die diese Forderungen am besten erfüllen, sind Weiße Zwergsterne. Für sie spricht auch, dass Typ Ia Supernovae – im Gegensatz zu den anderen Arten – sowohl in Elliptischen als auch in Spiralgalaxien beobachtet werden, also (auch) von einer alten Sternpopulation stammen müssen.

Die für die Astronomie überraschend große Ähnlichkeit aller bisher beobachte-

ter Typ Ia Supernovae bildet die Grundlage für ihren Nutzen als Entfernungsmaßstab für die Kosmologie. Aber man kann daraus auch Schlüsse für ein sinnvolles Modell ziehen. Einerseits muss immer der gleiche Energievorrat für die Explosion zur Verfügung stehen. Weiße Zwerge können diese Bedingung sehr natürlich erfüllen. Für sie existiert eine Grenzmasse – die nach ihrem Entdecker benannte Chandrasekhar-Masse –, oberhalb derer sie nicht mehr stabil sind.

Nur wenn ein Weißer Zwerg diese Masse erreicht, beispielsweise indem er von einem Begleitstern Masse aufnimmt, wird er im Inneren so dicht, dass die Fusion von leichten Atomkernen zu schwereren stattfinden kann. Die Zündung der Explosion erfolgt also immer bei einer festen Masse des Weißen Zwergs, und daher steht auch immer der gleiche Brennstoffvorrat zur Verfügung. Andererseits muss auch der Explosionsmechanismus immer in ähnlicher Weise ablaufen, so dass sichergestellt ist, dass immer vergleichbare Mengen des Materials verbrannt werden. Die physikalischen Prozesse müssen also weitgehend unempfindlich sein gegenüber kleinen Unterschieden im Zustand des Sterns vor der Explosion, die ja natürlich zu erwarten sind; und auch hier erfüllt die thermonukleare Fusion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Elementen der Eisengruppe weitgehend die Bedingung.

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Typ Ia Supernovae sind Spektrallinien von »mittelschweren Elementen« wie Kalzium, Silizium, Magnesium und Schwefel während der ersten Wochen nach der Explosion. Sie sind ein wichtiger Hinweis auf die Art der thermonuklearen Verbrennung, die ja die Grundlage der Explosion bilden soll, und sie geben uns Informationen über die physikalischen Bedingungen, die während der Explosion im Weißen Zwerg herrschten.

## Brennfronten

Im Prinzip wissen wir recht genau, wie chemische Verbrennung auf der Erde funktioniert. Es gibt »vorgemischte Flammen«, zum Beispiel im Verbrennungsmotor, in denen der Brennstoff und der Sauerstoff bereits vor dem Zünden gut gemischt werden, und es gibt »Diffusionsflammen«, etwa eine Kerze, in denen die Vermischung erst während des Brennens geschieht. Außerdem gibt es Flammen (»Brennfronten«), die sich mit Überschallgeschwindigkeit ausbreiten (»Detonationen«), und solche mit Unterschallgeschwindigkeit (»Deflagrationen«).

Bei Detonationen erfolgt das Zünden des Brennstoffs durch seine Kompression, bei Deflagrationen übernimmt die Wär-

meileitung diese Rolle. Diffusionsflammen und vorgemischte chemische Flammen kann man inzwischen mit Computern recht gut simulieren, und die verwendeten Verfahren können an Experimenten geeicht werden.

Physikalisch betrachtet entspricht die thermonukleare Fusion im Weißen Zwerg den vorgemischten chemischen Flammen auf der Erde. Reine Detonationen können die Explosionen nicht sein; denn dann würde die Fusion ausschließlich Elemente der Eisengruppe bilden, im Widerspruch zu den beobachteten Spektren. Langsame Deflagrationsfronten geben dem Stern dagegen genug Zeit, sich auszudehnen, und bei der dann niedrigeren Dichte endet die Fusion bereits bei leichteren Atomkernen. Die Folgerung ist also, dass die Kernfusion im Weißen Zwerg überwiegend in Form solcher »Flammen« geschieht.

## Ein Modell, das alle Bedingungen erfüllt

Die Schlussfolgerungen des letzten Abschnitts können wir nun in einem Modell zusammenfassen, das beschreibt, wie eine thermonukleare Supernova verlaufen könnte. Ein Weißer Zwergstern, bestehend aus Kohlenstoff und Sauerstoff, akkretiert von einem Begleitstern Materie (siehe Abb. 2), bis er die Chandrasekhar-Masse (etwa 1.4 Sonnenmassen) erreicht. Dann zündet in seinem Zentrum eine thermonukleare Flamme, die sich zunächst durch Wärmeleitung ausbreitet. Die typische Geschwindigkeit der Flamme beträgt dabei nur etwa ein halbes Prozent der Schallgeschwindigkeit, also etwa hundert Kilometer pro Sekunde.

Jetzt kommt ein wichtiger Effekt ins Spiel, den wir bisher außer Acht gelassen haben: die Turbulenz. Auch der Motor eines Autos würde ohne Turbulenz, also die Verwirbelung des Luft-Brennstoff-Gemischs, nicht laufen. Sie bewirkt, dass die

Oberflächen der Flammen größer werden, also in einer gegebenen Zeit mehr Brennstoff verbraucht wird.

So gewinnt der Ottomotor seine Leistung. Auch im Weißen Zwergstern benötigt die nukleare Verbrennung Turbulenz, um ihn als Supernova zu zerreißen. Die Ursache der Turbulenz sind jetzt hydrodynamische Instabilitäten in der Sternmaterie. Sie entstehen beim Verbrennungsprozess selbst. Heiße und leichte Verbrennungsprodukte bewegen sich in relativ kaltem und dichtem unverbranntem Material. Eine solche Schichtung ist instabil: Im Gravitationsfeld des Sterns steigen Blasen aus heißen Verbrennungsprodukten auf. Die sich ausbildenden Strukturen ähneln jenen, die man beobachtet, wenn man Milch in Kaffee gießt oder den Pilz einer Bombenexplosion verfolgt. So entstehen turbulente Geschwindigkeitsfluktuationen, die, wie im Fall des Automotors, die Flammengeschwindigkeit vergrößern.

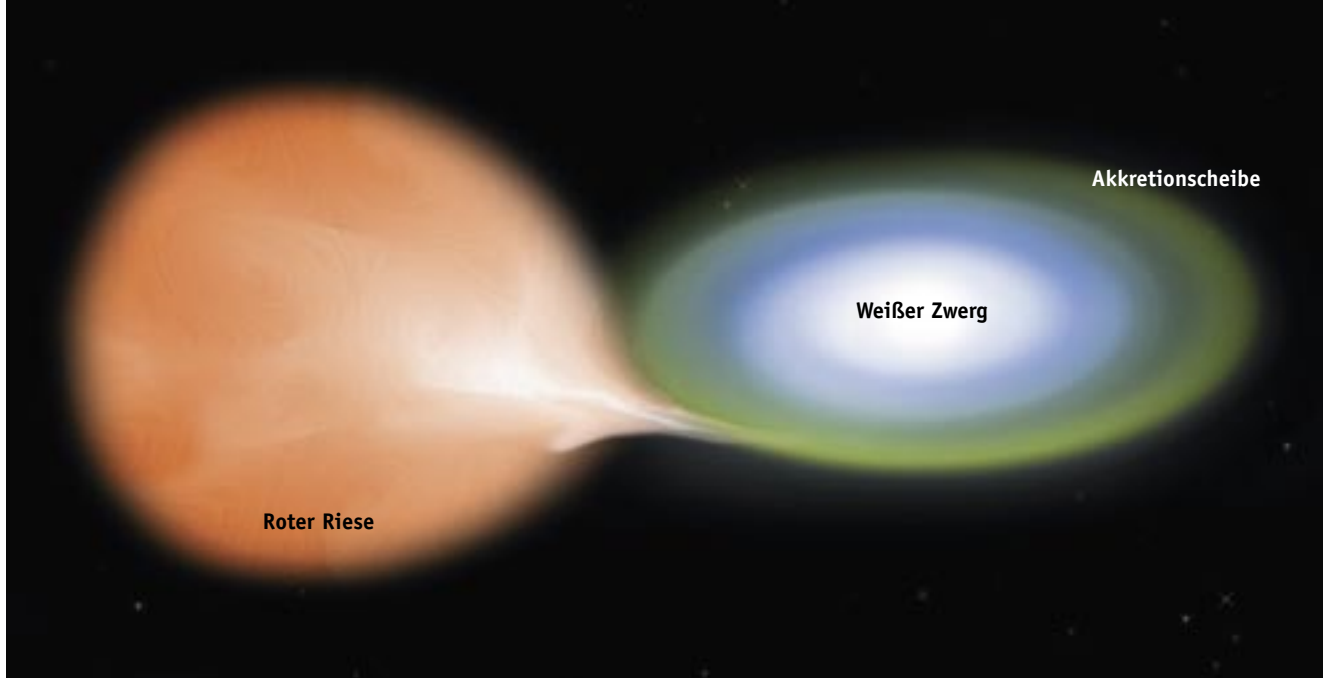
Letzlich spielt die Wärmeleitung keine Rolle mehr, und die Turbulenz bestimmt allein die Brenngeschwindigkeit, die jetzt einige Tausend Kilometer pro Sekunde erreichen kann. Die Materie des Weißen Zwergsterns wird zunächst bei hoher Dichte von mehr als einer Milliarde Tonnen pro Kubikmeter zu Eisengruppenelementen und später, wenn die Expansion die Dichte gesenkt hat, zu mittelschweren Elementen verbrannt. Die dabei freigesetzte Energie wird hauptsächlich zur Überwindung der gravitativen Bindung des Sterns und zur Beschleunigung der Explosionsprodukte in den interstellaren Raum aufgewendet. Zurück bleibt nur eine diffuse Wolke aus gasförmigen Explosionsprodukten.

## Helligkeitsabfall

Sollte dieses Bild richtig sein, so muss es auch erklären, warum man eine solche Supernova mehrere Monate lang leuch-

## Literaturhinweise

- [1] **T. Montemerle, N. Prantzos:** Explodierende Sonnen, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1991
- [2] **H.-Th. Janka, E. Müller:** Supernovaexplosionen massereicher Sterne, Physik in unsere Zeit, Heft 5 [2001].
- [3] **F. K. Röpkke, W. Hillebrandt:** Fullstar type Ia supernova explosion models, Astronomy and Astrophysics, im Druck [2005].
- [4] Aktuelle Forschung am Max-Planck-Institut für Astrophysik, Oktober 2004: [http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/research/current\\_research/hl2004-10/hl2004-10-de.html](http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/research/current_research/hl2004-10/hl2004-10-de.html)
- [5] **M. Stehle, P.A. Mazzali, S. Benetti, W. Hillebrandt:** Abundance Tomography of Type Ia Supernovae: I. The Case of SN 2002bo, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, im Druck [2005].
- [6] **G. Pignata, und andere:** Photometric Observations of the Type Ia SN2002er in UGC10743, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, im Druck (2005)



▲ Abb. 2: Schematische Darstellung der Akkretion von Materie des Begleitsterns (links im Bild) auf den Weißen Zwergstern im Zentrum der sich herausbildenden Akkretionsscheibe.

ten sieht. Die Antwort auf diese Frage ist nicht trivial. Im Prinzip würde ein Gasball, der mit mehreren Tausend Kilometern pro Sekunde auseinander fliegt, sehr schnell abkühlen und dann nicht mehr leuchten. Die richtige Idee, wie es doch gehen könnte, hatte der amerikanische Physiker Stirling Colgate bereits vor 35 Jahren.

Die bei der thermonuklearen Verbrennung von Kohlenstoff und Sauerstoff gebildeten Eisengruppenelemente bestehen zum größten Teil aus dem radioaktiven Nickelisotop  $^{56}\text{Ni}$ . Dieses zerfällt unter Aussendung von Gammastrahlung, die dann nach Steuerung an den Explosionsprodukten zu sichtbarem Licht wird. In der Lichtkurve einer Typ Ia Supernova kann man diesen Prozess genau verfolgen. Zunächst steigt die Leuchtkraft der Supernova einige Tage lang sehr steil an, weil immer mehr Licht aus dem Zerfall des  $^{56}\text{Ni}$  aus dem sich durch die Expansion verdünnenden Stern entweichen kann. Nach Erreichen des Maximums etwa zwei Wochen nach der Explosion fällt sie dann über Monate hinweg ab, zunächst im Wesentlichen auf der Zeitskala des Zerfalls von  $^{56}\text{Ni}$  zu radioaktiven  $^{56}\text{Co}$  (etwa 6 Tage), und danach auf der des  $^{56}\text{Co}$  zu stabilem  $^{56}\text{Fe}$  (ungefähr 77 Tage).

### Vielfalt der Längenskalen

Der letzte Schritt ist jetzt, das im vorigen Abschnitt beschriebene Modell in Computersimulationen zu testen. Das ist eine sehr schwierige Aufgabe; denn alle wichtigen Prozesse laufen in Zeiten ab, die sehr unterschiedlich sind, oder müssen

auf Längenskalen beschrieben werden, die sich oft um viele Größenordnungen unterscheiden. So dauert das Aufammeln von Masse durch den Weißen Zwerg (bis er die Chandrasekhar-Masse erreicht hat) Milliarden von Jahren, und die eigentliche Explosion dauert nur Sekunden.

Der Radius eines Weißen Zwergs zu Beginn der Explosion ist etwa zweitausend Kilometer, aber die Dicke einer thermonuklearen Flamme ist selten größer als ein Millimeter. All dies in einer einzigen Computersimulation zu berücksichtigen ist natürlich unmöglich. Deshalb werden der Akkretionsprozess, die Zündung der Flamme und schließlich die Explosion in gesonderten Simulationen untersucht. Hier wollen wir nur die Simulation der eigentlichen Explosion, das heißt die turbulente Ausbreitung der Flammen und der Verbrennung, die Expansion und das Auseinanderreißen des Weißen Zwergs, diskutieren.

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 den Brennstoff von den Brennprodukten 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.

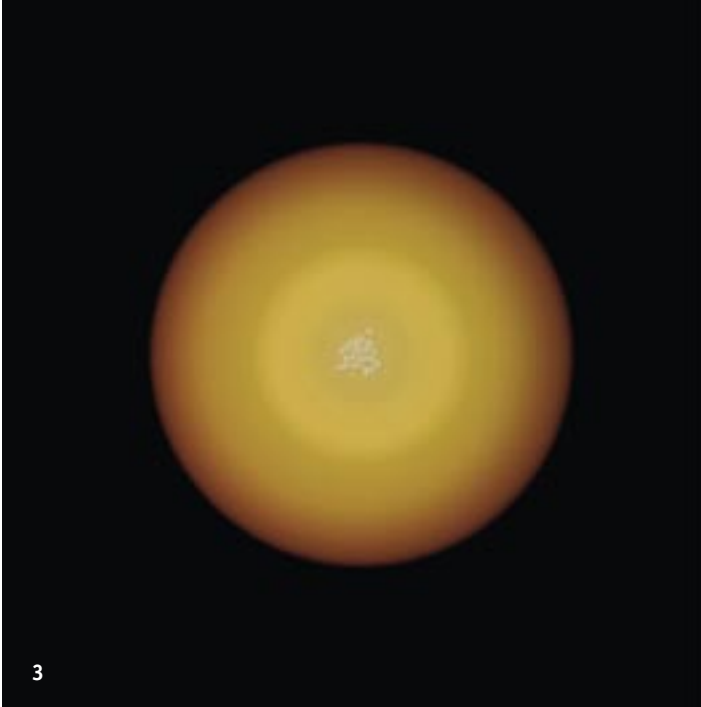
### Die Supernova im Supercomputer

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.

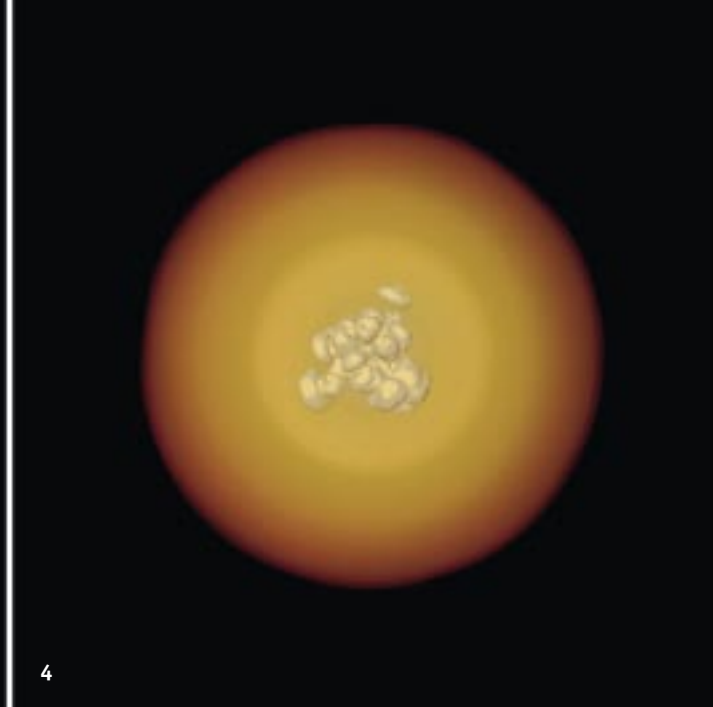
Den Schlüssel zur Simulation der turbulenten Verbrennung bildet der sogenannte »Large Eddy«-Ansatz. Hier wird nur die großskalige turbulente Verwirbelung direkt auf dem Rechengitter aufgelöst. Mit Hilfe eines sogenannten »subgrid-scale«-Modells werden dann aus den turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen auf der Länge der Rechenzellen die Effekte der Turbulenz auf kleineren nicht aufgelösten Skalen abgeleitet. Entsprechende Verfahren zur numerischen Simulation von thermonuklearen Supernovaexplosionen wurden in den letzten Jahren am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching bei München entwickelt.

Die Simulationen wurden und werden auf dem massiv parallelen Höchstleistungsrechner der Max-Planck-Gesellschaft durchgeführt. Sie gehören zu den Aufwändigsten, die bisher auf Supercomputern gelaufen sind. Ein Beispiel soll nun genauer vorgestellt werden. Abb. 3 zeigt den Beginn der Simulation. Über das Rechengebiet, also den Hauptteil des Weißen Zwergs, wurde ein gleichmäßiges rechtwinkliges (kartesisches) Rechengitter von  $512 \times 512 \times 512$  Zellen gelegt. Die Gitterlänge und somit die Auflösung





3



4

- ▲ Abb. 3: Beginn der Simulation.
- Abb. 4: Nach 0.3 Sekunden.
- Abb. 5: Nach 0.6 Sekunden.
- Abb. 6: Nach 2 Sekunden.

zu Anfang der Simulation beträgt 7.9 Kilometer. In diesen Rechenzellen wurden die Zustandsgrößen diskretisiert, die den Weißen Zwerg repräsentieren, zum Beispiel die Dichte an diesem Ort, die Temperatur und die chemische Zusammensetzung. Seine Dichte im Zentrum beträgt 2900 Tonnen pro Kubikzentimeter und fällt nach außen schnell ab.

### Ausgangspunkt Weißer Zwerg

In Abb. 3 ist die Dichte farbcodiert dargestellt. Die Anfangstemperatur wurde – für einen Weißen Zwerg relativ kalt – auf 50 000 Kelvin gesetzt. Es wurde angenommen, dass der Weiße Zwerg aus einer Mischung von gleichen Teilen Kohlenstoff und Sauerstoff besteht. Im Zentrum der Sterns wurden nun künstlich mehrere Flammen gezündet, für die wir vereinfacht Kugeln annehmen, die sich

überlappen dürfen. Das müssen wir tun; denn das Zünden dauert sehr viel länger als die eigentliche Explosion, und wir können es derzeit noch nicht simulieren. Die Flammenoberfläche ist ebenfalls in Abb. 3 dargestellt.

Die Ausbreitung der Flamme ist in Abb. 4 und 5 zu verfolgen. Sie zeigen die Flamme und den Weißen Zwerg 0.3 und 0.6 Sekunden nach der Zündung. Im Vergleich der Anfangsflamme in Abb. 3 mit der Flammenform nach 0.3 Sekunden sind deutlich die Auswirkungen der Kernfusion zu erkennen. Das verbrannte Material hinter der Flamme besteht zu diesem Zeitpunkt aus Eisengruppenelementen und hat durch die bei der Kernfusion freigesetzte Energie sehr hohe Temperaturen erreicht.

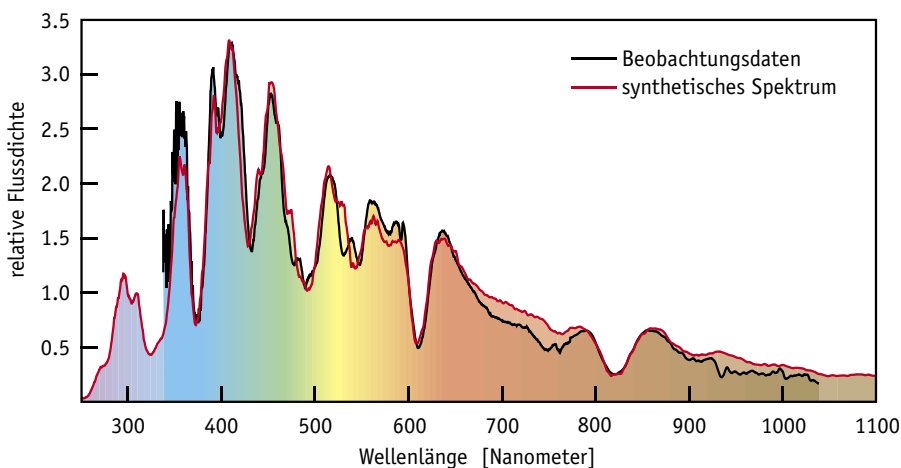
Da verbrannte und unverbrannte Materie den gleichen Druck haben, ist die Dichte der »Asche« niedriger: Im Schwerkfeld des Sterns steigt sie deshalb auf, und die bereits erwähnte charakteristische Pilzform entsteht. Später bilden sich aus den Pilzen kleinere Substrukturen (Abb. 5), mit dem Effekt, dass sich die Oberfläche der Flammen vergrößert und die Verbrennungsrate erhöht. Daneben

gibt es an den Grenzflächen zwischen aufsteigenden brennenden Blasen und dazwischen herabsinkendem Brennstoff Scherströmungen, welche die Flammen verwirbeln. Eine Animation der Entwicklung der Flammenfront in unserem Modell findet sich im Internet unter [4].

### Turbulente Flammenflächen

Die Simulationen zeigen also, dass unsere Vermutung richtig war. Durch die turbulente Vergrößerung der Flammenfläche wird der Verbrennungsprozess so stark beschleunigt, dass der Stern explodiert. Der physikalische Grund dafür ist der gleiche, der ein Auto von München nach Heidelberg bewegt. In Abb. 6 ist das Supernova-Explosionsmodell nach zwei Sekunden dargestellt.

Während in den vorherigen Abbildungen der Größenmaßstab beibehalten wurde, ist dies nun wegen der Expansion des Sterns nicht mehr möglich. Zum Größenvergleich wird in der linken unteren Ecke von Abb. 6 noch einmal der Stern vor der Explosion gezeigt. Um die Expansion in der Simulation verfolgen zu können, wurde eine spezielle Technik verwendet, bei der die Rechenzellen so vergrößert werden, dass sich das Simulationsgebiet mit dem Stern ausdehnt. Im hier gezeigten Stadium der Explosion ist die Dichte durch die Expansion bereits sehr stark abgefallen, so dass kein merk-



▶ Abb. 7: Ein Spektrum der SN 2002bo, aufgenommen in der Nähe des optischen Maximums am 23. März 2002. Das gemessene Spektrum (die durchgezogene schwarze Linie) reicht bis ins nahe Infrarot. Ein berechnetes (»synthetisches«) Spektrum ist in rot gezeigt. (Bild: M. Stehle et al.)



liches thermonukleares Brennen mehr stattfindet.

Es ist deutlich zu sehen, dass ein erheblicher Anteil des Sternmaterials verbrannt ist und dass die turbulenten Flammen bis fast an die Oberfläche heranreichen. Der größte Teil der freigesetzten Energie ist bereits in kinetische Energie umgewandelt. Verbrennungsprodukte und unverbranntes Material erreichen Geschwindigkeiten in der Größenordnung von Zehntausend Kilometern pro Sekunde. Sie haben die gravitative Bindung des Sterns überwunden und expandieren unter fortschreitender Verdünnung.

**Vergleich mit Beobachtungen**

Aus Modellen wie dem hier vorgestellten wurden inzwischen auch beobachtbare Eigenschaften von Supernovae berechnet, und die Ergebnisse sind sehr ermutigend. Die berechneten Explosionsenergien entsprechen sehr gut denen von »echten« Supernovae, und auch die berechneten Lichtkurven stimmen (eigentlich überraschend gut) mit den beobachteten überein. Ein kleines Problem besteht noch im Vergleich mit gemessenen Spektren: Die Modelle scheinen zu viel unverbranntem Kohlenstoff und Sauerstoff und zu wenig mittelschwere Elemente zu enthalten. Hier scheinen die Beobachtungen uns einen Hinweis darauf zu geben, dass wir

die Physik der Explosion vielleicht doch noch nicht vollständig verstanden haben. Deshalb ist es natürlich auch wichtig, sich nochmals die explodierenden Sterne genauer anzusehen.

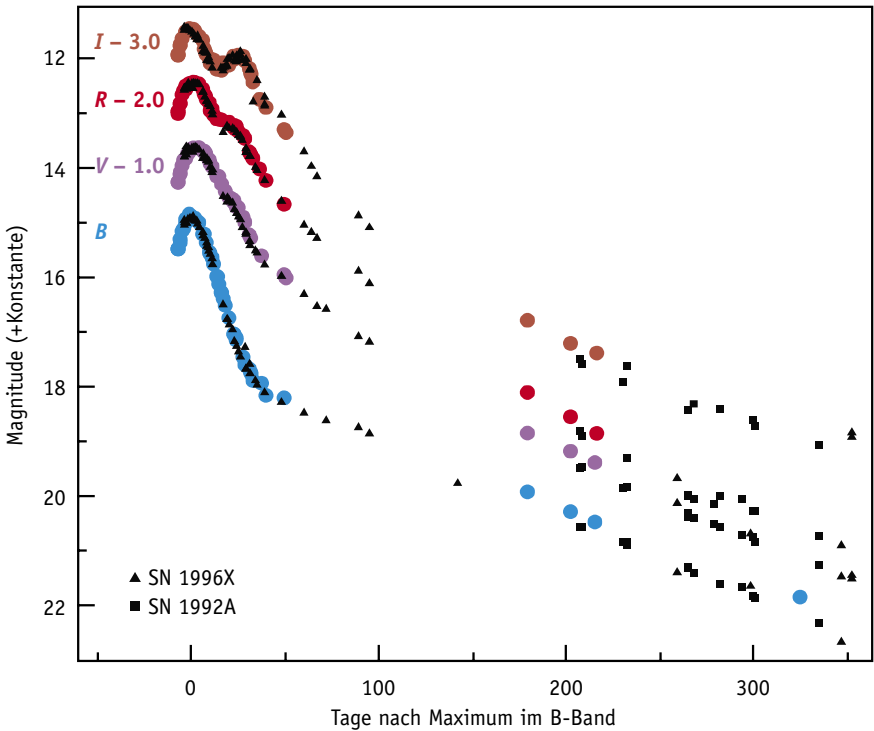
**Der induktive Ansatz**

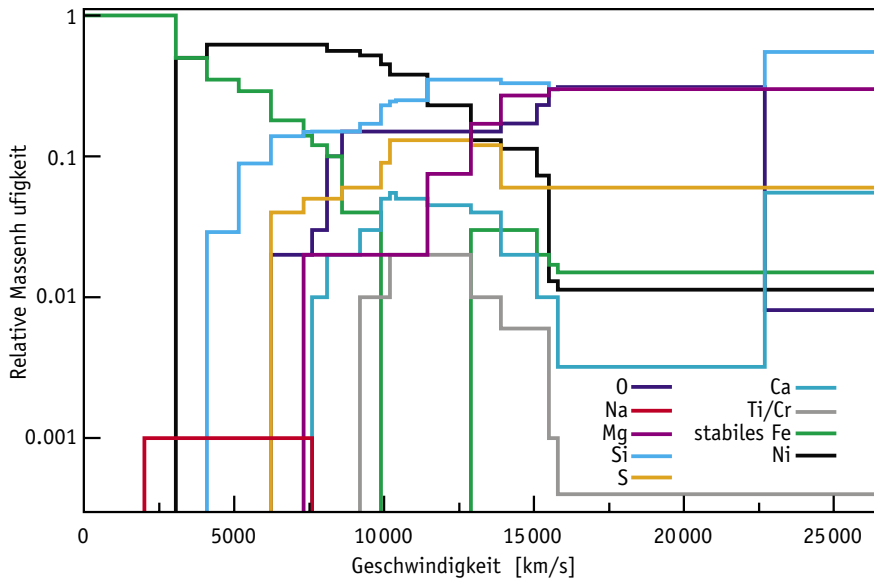
Bevor wir Typ Ia Supernovae in der Kosmologie als Entfernungsmesser verwenden, benötigen wir die Sicherheit, dass wir die Ursachen für die Unterschiede in ihrer Helligkeit verstehen und damit eliminieren können, und auch jetzt noch sind unsere immer noch beschränkten Kenntnisse der Physik der Supernova-Explosionen das schwächste Glied in der benötigten Kette von Argumenten. Die Supernovae, die man für die Kosmologie beobachtet, explodierten, als unser Sonnensystem gerade entstand

oder noch früher. Es gibt deshalb keine Garantie, dass es die gleichen Explosionen sind wie die nahen Supernovae, für die wir die Lichtkurven geeicht haben. Um mögliche systematische Unterschiede ausschließen zu können, müssen wir deshalb die Explosionen sehr gut verstehen, und das geht nicht ohne genaue Beobachtungsdaten.

Um hier Fortschritte zu erzielen, sowohl in Bezug auf die Beobachtungen als auch auf theoretische Modelle, hat sich unter der Koordination des Max-Planck-Instituts für Astrophysik eine Gruppe von europäischen Astronomen und Astrophysikern zusammengeschlossen, die »European Supernova Collaboration« (ESC). Sie hat das Ziel, durch detaillierte Beobachtungen einer möglichst großen Zahl relativ naher Typ Ia Supernovae sowie

▶ Abb. 8: Die Lichtkurven der SN 2002er in den Filtern B, V, R und I (Kreise). Zum Vergleich sind die Lichtkurven der SN 1992A und 1996X gezeigt. Während der ersten sechs Wochen wurde die SN 2002er fast jede Nacht beobachtet, zum Teil mit verschiedenen Teleskopen und Instrumenten (Bild: G. Pignata et al.)





▲ Abb. 9: Verteilung der chemischen Elemente in der SN 2002bo. Die Elementhäufigkeiten sind in Abhängigkeit von ihrer Geschwindigkeit aufgetragen. Dabei bedeuten niedrige Geschwindigkeit, dass diese Elemente mehr im Inneren der Supernova entstanden sind. Die hohen Geschwindigkeiten sind den äußeren Schichten zugeordnet. Wie auch in einigen anderen Supernovae konnte unmittelbar nach der Explosion kein Kohlenstoff nachgewiesen werden, was für einen Weißen Zwerg, der aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestand, nur schwer zu erklären ist. (Bild: M. Stehle et al.)

durch genaue theoretische Modelle ihre Natur zu verstehen. Damit ließen sich mögliche systematische Unterschiede, die ihren Nutzen als Standardkerzen in Frage stellen würden, ermitteln und kontrollieren. Dieses Projekt wird seit nunmehr zwei Jahren auch durch die Europäische Union gefördert und hat inzwischen erste spektakuläre Ergebnisse erzielt.

Dem Netzwerk gehören Gruppen aus Deutschland, England, Italien, Frankreich, Spanien und Schweden an. Das koordinierte Beobachtungsprogramm wird an allen größeren europäischen Observatorien durchgeführt, und auch die Teleskope auf dem Calar Alto in Spanien spielen dabei eine wichtige Rolle. So hat die ESC-Kollaboration bereits jetzt sehr genaue Daten für sieben nahe Typ Ia Supernovae, darunter SN 2002bo (Abb. 1) und SN 2002er, gesammelt. Die meisten dieser Supernovae scheinen weitgehend typisch zu sein. Ein Spektrum der SN 2002bo in der Nähe des Maximums ihrer Helligkeit ist in Abb. 7 zu sehen. Es ist möglich, viele atomare Linien im

Spektrum zu identifizieren, wie etwa Eisen-, Silizium-, Schwefel- und Kalziumlinien. Die Photometrie der SN 2002er (Abb. 8) ist die wahrscheinlich beste und genaueste, die je für eine solche Supernova gemessen wurde.

### Blicke ins Innere der Supernova

Noch sind nicht alle Daten ausgewertet, doch wir hoffen, aus solchen und ähnlichen Beobachtungsreihen viel lernen zu können. Hierzu wird zu unserem Verständnis der Physik der Explosionen beitragen, dass, während sich die Supernova entwickelt, wir immer tiefer in sie hinein sehen können. Die Spektren werden uns deshalb die Geschwindigkeiten und die chemische Zusammensetzung der Sternmaterie in unterschiedlichen Tiefen enthüllen, und wir werden herausfinden können, wodurch die Unterschiede in den Lichtkurven individueller Supernovae stammen, etwas worüber wir bisher nur vage Vorstellungen haben.

In Abb. 9 ist ein Beispiel für diese »Häufigkeitsstomographie« dargestellt, und zwar wieder für die Supernova SN 2002bo, für die alle Daten bereits ausgewertet wurden. Die Sequenz der Spektren, sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Licht, die für die Analyse verwendet wurden, beginnt bereits zwei Wochen vor dem Maximum, und die letzten stammen aus der Zeit mehr als ein Jahr nach der Explosion. Während für die ersten Spektren Teleskope mit Durchmessern von zwei bis vier Metern ausreichen, mussten für die späten Spektren sehr große Teleskope wie das VLT der ESO benutzt werden.

Alle Spektren müssen photometrisch kalibriert werden, so dass für eine solche Beobachtungskampagne typischerweise zehn oder mehr verschiedene Teleskope benötigt werden. Mit Ausnahme der sehr späten Beobachtungen können sie

nicht vorhergeplant werden: Wir wissen ja nicht, wann und wo die nächste Supernova explodiert. Die Beobachtungen müssen deshalb im so genannten »target-of-opportunity« Modus durchgeführt werden, das heißt, die Beobachtungen macht ein Astronom, der zufällig am Teleskop Dienst tut und seine eigenen Arbeiten für uns unterbrechen muss. Das macht das Programm bei unseren Kollegen nicht sonderlich beliebt!

Die Ergebnisse, wie in Abb. 9, scheinen den Aufwand aber zu rechtfertigen. Wir wissen inzwischen, dass Typ Ia Supernovae, deren Lichtkurven ähnlich sind, sich doch in ihren Elementhäufigkeiten deutlich unterscheiden können. Es scheint also mehr als einen Parameter zu geben, der für ihre Kalibrierung wichtig ist. Auch für andere wichtige Fragen, wie die nach der Schwächung des Lichts der Supernova durch die Galaxie, in der sie explodierte, können wohl bald sehr viel genauer beantwortet werden.

Und auch für die Computersimulationen gibt es neue Herausforderungen. Woher kommen die sehr hohen Geschwindigkeiten, die man in den sehr frühen Spektren einiger Supernovae findet? Warum scheint die Supernovamaterie doch noch einigermaßen geschichtet zu sein, obwohl die Modelle eine gute Durchmischung vorhersagen? »Mit dem Wissen wächst der Zweifel« – Wahrscheinlich stimmt dieser Satz auch für die Untersuchung der Typ Ia Supernovae. □



**Wolfgang Hillebrandt** (links) hat in Köln Physik studiert und dort auch promoviert. Über die Technische Universität Darmstadt kam er 1978 an das Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA), wo er seit 1997 einer der Direktoren ist. Seine Hauptarbeitsgebiete sind die Nukleare und Teilchen-Astrophysik, die Sternentwicklung und Supernovaexplosionen.

**Friedrich Röpke** (rechts) studierte Physik an der Universität Jena und der University of Virginia. Seit seiner Zeit als Doktorand am MPA untersucht er Supernovaexplosionen mit Hilfe numerischer auf Großrechnern und promovierte darüber im Jahr 2003 an der Technischen Universität München. Seither ist er Postdoktorand am MPA.