

Furioses Finale

Supernovae künden von kosmischen Katastrophen. Wenn ein massereicher Stern am Ende seines Lebens in die Energiekrise schlittert oder eine bereits gestorbene Sonne mit Materie überfüttert wird, endet das in einer Explosion unvorstellbaren Ausmaßes. Was geschieht dabei im Einzelnen? **Hans-Thomas Janka** vom **Max-Planck-Institut für Astrophysik** in Garching will es genau wissen. Er simuliert Supernovae im Computer und bringt sie in der virtuellen Welt zum Bersten – mittlerweile sogar in drei Dimensionen.

TEXT **HELMUT HORNUNG**

24. Februar 1987. Kurz nach Mitternacht sitzt Ian Shelton in der Dunkelkammer des Las-Campanas-Observatoriums nahe der chilenischen Stadt La Serena. Der kanadische Astronom entwickelt Bilder der Großen Magellanschen Wolke, einer Nachbargalaxie unserer Milchstraße. Als die Aufnahmen im Fixierbad immer klarer hervortreten, erkennt er auf den ersten Blick einen hellen Stern, der dort nicht hingehört. Shelton geht nach draußen in die klare Nacht, sieht zum Himmel – und entdeckt das Lichtpünktchen in der Großen Magellanschen Wolke mit bloßem Auge. Dem Wissenschaftler ist sofort klar: Er beobachtet in diesem Moment eine Supernova, die nächstgelegene seit 383 Jahren.

„Die Supernova 1987A hat ein neues Kapitel in der Forschung aufgeschlagen“, sagt Hans-Thomas Janka. Seit vie-

len Jahren beschäftigt sich der Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Astrophysik mit dem astronomischen Phänomen. Dieses ist bei näherer Betrachtung unserem Alltag keineswegs so fern, wie mancher meinen mag. Denn das Kalzium in unseren Knochen oder das Eisen im Blut stammen aus den atomaren Schmelztiegeln tief im Innern der Sterne. Während vieler Supernovae wurden diese Elemente freigesetzt und vermischten sich mit anderen zu dem Stoff, aus dem letztendlich das irdische Leben entstand. So sind wir über die heftigsten Explosionen seit dem Urknall eng mit dem Kosmos verbunden.

Der Zoo der Supernovae ist vielfältig und für den Laien verwirrend. Etwa ein Dutzend unterschiedlicher Typen haben die Astronomen klassifiziert. Aber: „Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen thermonuklearen und Kernkollaps-Supernovae“, sagt Janka. Kriterien seien die in den Spektren – also im

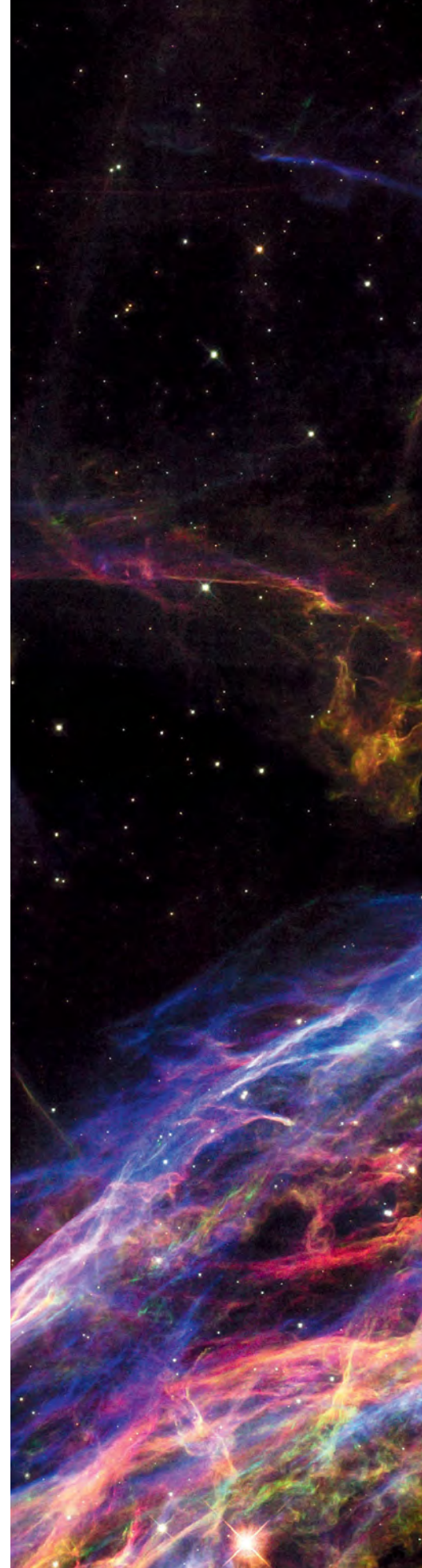




Foto: NASA/ESA/Hubble Heritage Team

Das Ende eines Sterns: Vor rund 18000 Jahren ging eine massereiche Sonne hoch. Am Ort der Katastrophe beobachten die Astronomen heute den Cirrusnebel – Gas, das einst bei der Supernova freigesetzt wurde. Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus diesem kosmischen Gespinnst.

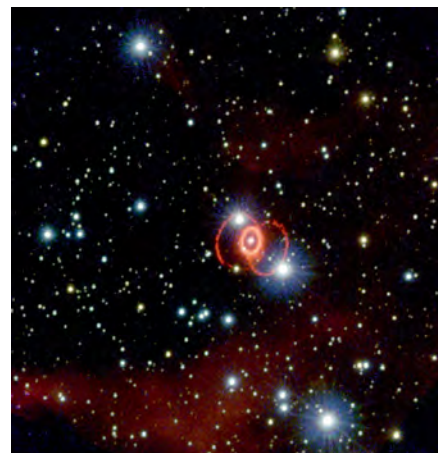


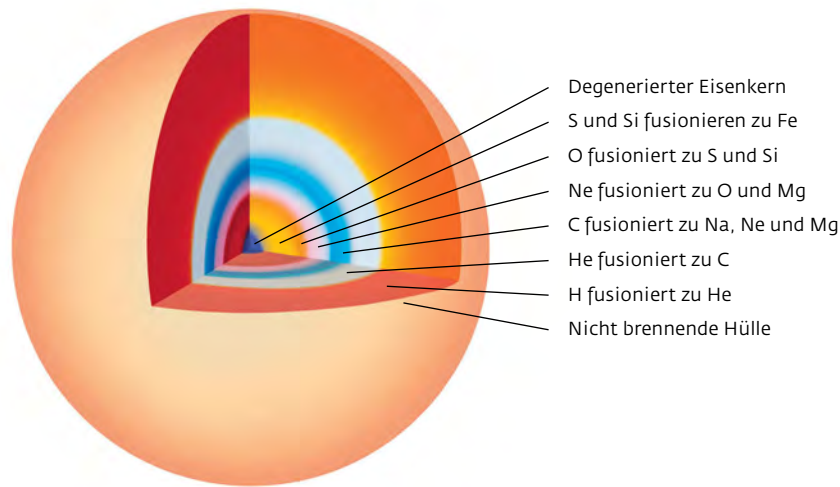
zerlegten Licht – auftretenden Linien von Wasserstoff, Helium und Silicium sowie die Form der Helligkeitskurven. So zeigen die Spektren von thermonuklearen Supernovae (Typ Ia) keine Wasserstoff- und keine Heliumlinien, aber starke Linien des Elements Silicium. Ursache der Explosion ist einem der denkbaren Szenarien zufolge die „Überfütterung“ eines weißen Zwergs, des ausgebrannten Kerns einer nicht allzu massereichen Sonne.

Gelegentlich besitzt eine solche stellare Leiche einen Partnerstern, an den sie durch Schwerkraftfesseln gebunden ist. Und die Gravitation ist es auch, die es dem weißen Zwerg ermöglicht, von der Oberfläche seines Begleiters jede Menge Gas abzuziehen. Die Materie fließt auf den weißen Zwerg und sammelt sich auf ihm an. Aufgrund dieses als Akkretion bezeichneten Vorgangs legt der Zwerg ständig an Masse zu. Irgendwann erreicht er den Wert von rund 1,4 Sonnenmassen.

Wird diese nach dem Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 bis 1995) benannte Grenze überschritten, so ist der GAU programmiert: Der weiße Zwerg beginnt, sich zusammenzuziehen. Diese Kontraktion setzt gravitative Energie frei, die das Gemisch des Kristalls aus Kohlenstoff und Sauer-

Lichtspiele am Himmel: Die Supernova 1987A (Pfeil), aufgenommen kurz nach ihrem Aufleuchten als heller Stern in der Großen Magellanschen Wolke. Das kleine Bild zeigt den Überrest der Explosion gut zehn Jahre später; deutlich zu sehen sind drei helle Ringe.





Schalen voll Energie: In einer massereichen Sonne laufen unterschiedliche Brennprozesse ab. Nach der Fusion von Schwefel und Silicium zu Eisen stoppt die Produktion. Die Eisenkugel im Kern kollabiert schließlich weiter zu einem kompakten Objekt – zu einem Neutronenstern oder einem schwarzen Loch.

stoff erhitzt; denn der Stern gleicht in dieser Phase einem extrem komprimierten Diamanten. So bilden sich in seinem Innern zunächst Inseln, in denen es zu thermonuklearen Reaktionen kommt. Silicium und Nickel entstehen. Die Brandherde pflanzen sich mit Unterschallgeschwindigkeit fort (Deflagration) und brennen vom Zentrum des Sterns in Richtung seiner Oberfläche.

Dabei treten Instabilitäten auf und führen zu Turbulenzen, die mit der thermonuklearen Flamme wechselwirken und schnell deren Oberfläche vergrößern. Schließlich baut sich eine Detonationswelle auf, die mit Überschallgeschwindigkeit dahinschwappt und den Gasball förmlich zerreißt – eine Supernova geht hoch. „Leider ließ sich bisher kein einziges Vorläufersystem einer solchen Explosion direkt beobachten, weshalb wir auch noch über andere Möglichkeiten spekulieren“, sagt Hans-Thomas Janka.

Die Vertreter dieses Typs Ia machen nur rund ein Viertel aller beobachteten Supernovae aus. Der überwiegende Teil des gewaltsamen stellaren Sterbens hingegen lässt sich auf einen einzelnen massereichen Stern zurückführen (Typ II). Das heißt, dass der Vorläuferstern mindestens acht- oder neunmal schwerer ist als unsere Sonne. Zunächst fusio-

niert der Gigant für einige Millionen Jahre ruhig und unspektakulär Wasserstoff zu Helium. Ist der Vorrat an Brennstoff erschöpft, bedeutet dies aber noch lange nicht das Ende. Zwar verliert der Stern aufgrund der starken Strahlung andauernd Energie; doch kompensiert er dieses Defizit durch die Kontraktion seines inneren Bereichs – was zu einer massiven Zunahme von Druck und Temperatur führt.

DER STERN BLÄHT SICH ZU EINEM GIGANTEN AUF

In dieser Phase vergrößert der Stern seine Oberfläche: Er bläht sich zu einem Riesen vom hundert- bis tausendfachen Sonnenradius auf. Auch seine Leuchtkraft legt beträchtlich zu, er scheint jetzt millionenmal heller als die Sonne. „Nun entscheidet sich das weitere Schicksal des Sterns“, sagt Janka. „Steigt die Temperatur im stellaren Kern genügend stark an, kann die Asche des letzten Brennprozesses zünden.“ So verbrennt Helium bei ungefähr 200 Millionen Grad Celsius zu Kohlenstoff und Sauerstoff.

Am Ende dieser Kette entwickeln Sterne mit den genannten acht oder neun Sonnenmassen in ihren Zentren Temperaturen von 800 Millionen Grad.

Der Kohlenstoff fusioniert zu Natrium, Neon und Magnesium; Neon zu Sauerstoff und Magnesium; Sauerstoff zu Schwefel und Silicium. Dem Stern wird es buchstäblich immer wärmer ums Herz. Jenseits von drei Milliarden Grad folgen die weiteren Fusionschritte zunehmend schneller aufeinander. Innerhalb von wenigen Monaten und später nur mehr einigen Tagen werden Nickel, Kobalt und schließlich Eisen geschmiedet.

Damit ist das Ende erreicht: Weil Eisen die höchste Bindungsenergie pro Kernbaustein besitzt, ließe sich aus seiner Fusion keine Energie mehr gewinnen. Der Aufbau des Sterns gleicht nun dem einer Zwiebel: Den Kern aus Eisenschlacke umgeben Schalen aus Silicium, Sauerstoff, Neon, Kohlenstoff und Helium; ganz außen sitzt die Hülle aus Wasserstoff.

Für den Fortgang der Geschichte spielt wiederum die oben erwähnte Chandrasekhar-Grenze eine Rolle, der sich der Eisenkern nun annähert. Seine Dichte ist auf 10000 Tonnen pro Kubikzentimeter gestiegen. Elektronen werden in die Protonen gequetscht und bilden Neutronen. Dadurch sinkt der Druck im Innern des Kerns, der nunmehr im Bruchteil einer Sekunde zu einem noch 10000-fach dichteren Ob-

jekt kollabiert: einem Neutronenstern. Aber es geht noch kompakter. Bei höherer Ausgangsmasse des Kerns bildet sich im Zentrum der sterbenden Sonne ein schwarzes Loch.

DAS FRAGILE GLEICHGEWICHT IST EMPFINDLICH GESTÖRT

In jedem Fall stürzen die inneren Schichten des Sterns kontinuierlich auf das massive zentrale Objekt herab. Längst nämlich ist das diffizile hydrostatische Gleichgewicht empfindlich gestört – das Wechselspiel zwischen dem Gas- und dem Strahlungsdruck, der nach außen wirkt, und dem nach innen gerichteten Gravitationsdruck. Letzterer presst den Stern unweigerlich weiter zusammen. Der Aufprall der Materie mit Überschallgeschwindigkeit geht allerdings nicht lange gut: Eine

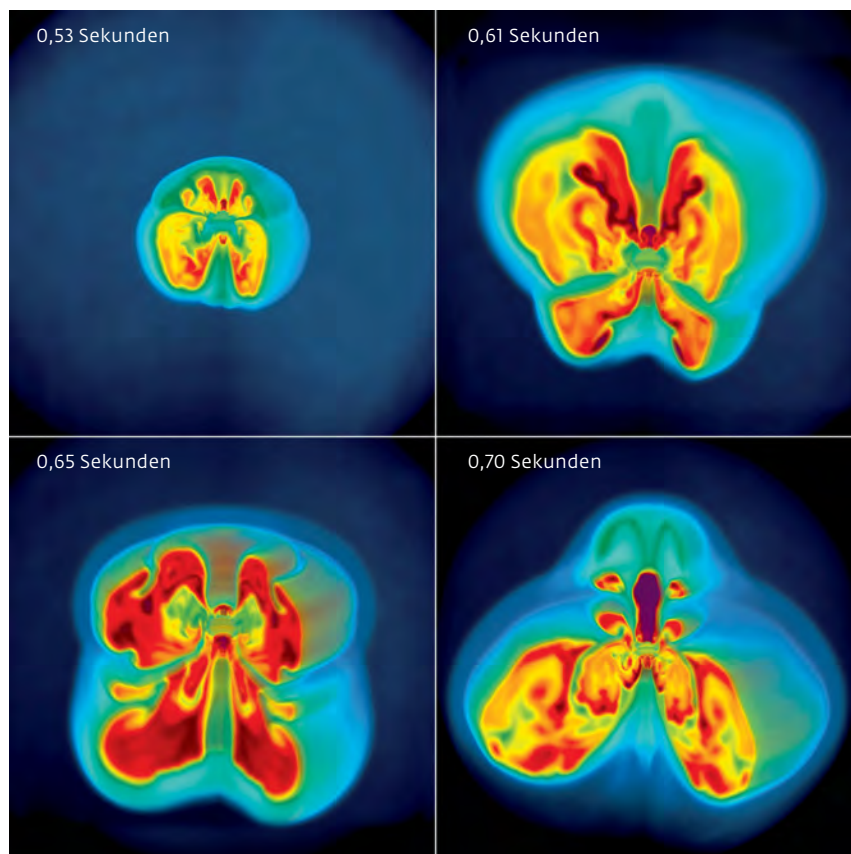
Stoßwelle läuft von innen nach außen und reißt die stellare Gashülle mit Geschwindigkeiten von mehreren 10000 Kilometern pro Sekunde auseinander – eine Supernova leuchtet auf.

Oder doch nicht? „Wenn es nur so einfach wäre“, sagt Hans-Thomas Janka. Denn als sich die Astronomen mit dem Szenario näher befassten, stellten sie fest, dass die Stoßwelle keineswegs in einem rein hydrodynamischen Rückprallmechanismus direkt die Explosion verursachen kann. „Ein solcher Stoß allein erweist sich als viel zu schwach. Er schafft es nicht, den massiven Energieverlust vom Zentrum auf dem langen Weg durch die einstürzenden Sternschichten auszugleichen“, erklärt der Max-Planck-Forscher. Kurz: „Nach nur 100 bis 200 Kilometern geht dem Stoß die Kraft aus, er bleibt im stellaren Eisenkern stecken.“

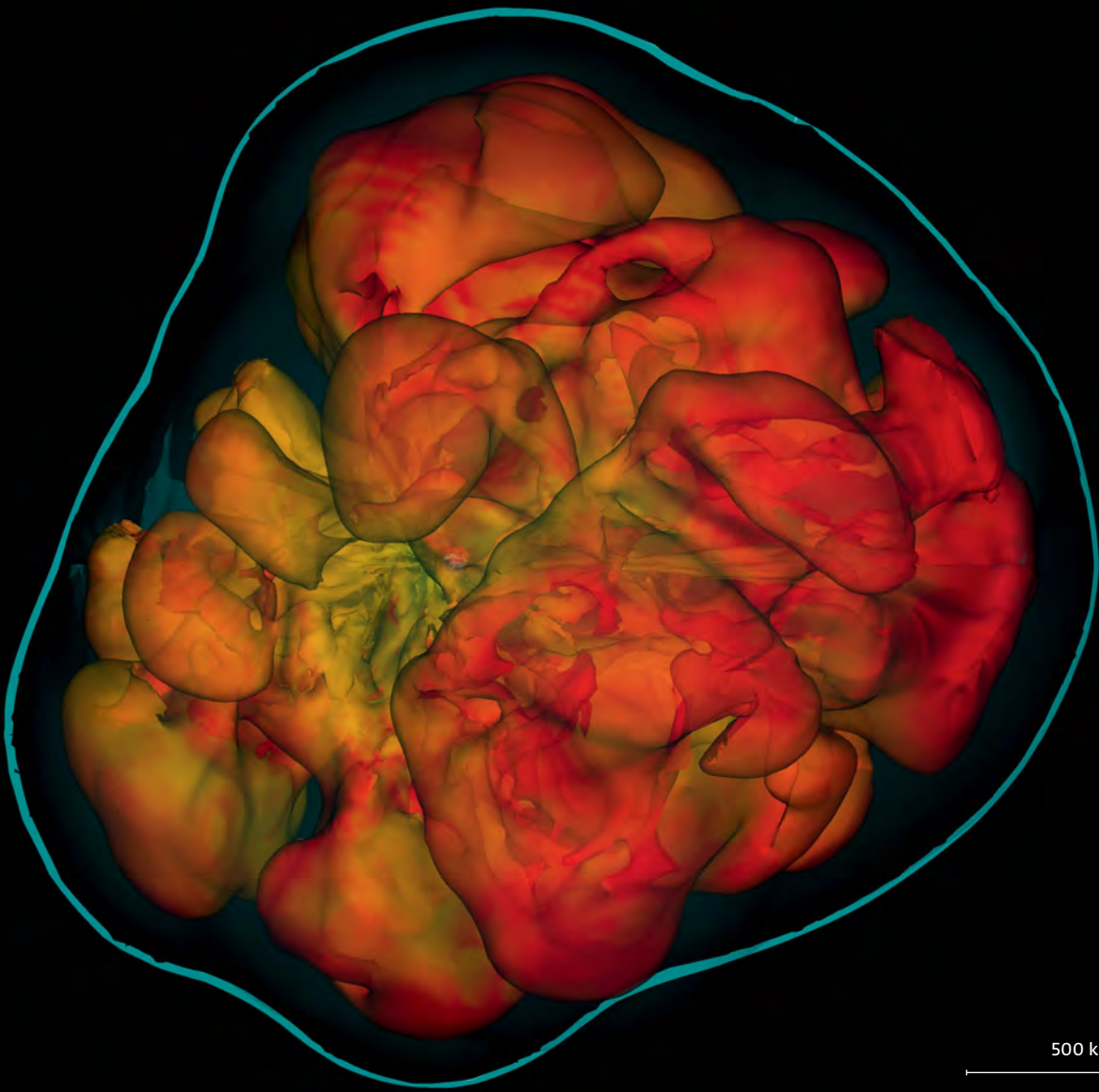
Was also wirkt als treibende Kraft? Schon Mitte der 1960er-Jahre brachten die Wissenschaftler einen Motor ins Spiel: Neutrinos. Diese nahezu masselosen Teilchen durchdringen praktisch mühelos alles Irdische, was ihnen in den Weg kommt. So auch den Nagel unseres Daumens, durch den pro Sekunde mehr als 66 Milliarden dieser flüchtigen Phantome flitzen. Dass sie auch bei Supernovae eine Rolle spielen, weiß man seit dem Ereignis vom 24. Februar 1987. Damals war der 15 bis 20 Sonnenmassen schwere Stern namens Sanduleak –69° 202 in etwa 166000 Lichtjahren Entfernung hochgegangen. Rund drei Stunden vor dem sichtbaren Lichtblitz aus der Großen Magellanschen Wolke registrierten mehrere Neutrino-Observatorien weltweit zwei Dutzend dieser Geisterteilchen.

Obwohl alle späteren Supernovae viel zu weit entfernt waren, um derartige Neutrinos zu messen, untermauert dieser Fund doch die theoretische Annahme. „Nach einem Jahrzehnt Entwicklungsarbeit gelang es in den 1980er-Jahren, den Mechanismus des Neutrinotransports zu beschreiben“, sagt Janka. Demnach schaffen es die Teilchen, nach einem sekundenlangen Irrweg das Sterninnere mit Lichtgeschwindigkeit zu verlassen. Und sie sind Janka zufolge in der Lage, eine immense Energie mitzuschleppen.

So wandelt sich etwa beim Kollaps zu einem Neutronenstern die Gravitationsenergie in innere Energie seiner Materie um, die wiederum Unmengen an Neutrinos erzeugt. Diese heizen das elektrisch leitende Gas (Plasma) um den Neutronenstern auf und verleihen der



Explosion im Computer: Ein Stern von 15 Sonnenmassen birst und entwickelt dabei heftige Turbulenzen. Im Zentrum existiert bereits ein Neutronenstern, die Sekundenangaben in den vier Teilbildern beziehen sich auf die Zeit nach seiner Bildung. Die Explosion verläuft asymmetrisch und wird durch die Energieübertragung von Neutrinos angetrieben. Die Durchmesser der Materieblasen (gelb, orange, rot) reichen von 300 im ersten über 600, 800 bis 1500 Kilometer im letzten Bild.



500 km

Brodelnder Gasball: Diese Computersimulation aus dem Jahr 2015 zeigt das Ende eines Sterns von 20 Sonnenmassen in drei Dimensionen – und damit gleichzeitig den Fortschritt in der Forschung. Denn die etwa zehn Jahre ältere Sequenz auf Seite 22 wurde noch zweidimensional gerechnet. Die äußere bläuliche Linie in diesem Bild deutet die Stoßwelle der Supernova an.

Stoßwelle dadurch neuen Schwung. Die Effizienz dieses Prozesses ist erstaunlich: „Die amerikanischen Astrophysiker Stirling Colgate und Richard White haben argumentiert, dass schon ein Prozent der Energie aus dieser Neutrinoheizung ausreicht, um eine Supernova zu zünden“, sagt Hans-Thomas Janka.

In den 1980er-Jahren gingen die Theoretiker erstmals daran, Supernovae im Computer nachzustellen – und wurden enttäuscht. Die Sterne wollten einfach nicht richtig explodieren. War die Neutrinoheizung doch ineffizient? Bald kam die Vermutung auf, dass der Misserfolg vielmehr von den verwendeten Modellen herrühren könnte, Jankas Spezialgebiet: „Die waren damals noch sphärisch-symmetrisch, also eindimensional.“ Und dann kam die Supernova

1987A. „Aus Beobachtungen lernten wir, dass bei der Explosion eine starke Asymmetrie vorhanden sein musste“, erinnert sich der Wissenschaftler.

GAMMALICHT WIRD NACH WENIGEN WOCHEN SICHTBAR

Offensichtlich musste bei der Explosion eine starke Durchmischung stattgefunden haben. Das heißt: Elemente, die tief im Innern des sterbenden Sterns steckten, kamen plötzlich nach außen. So etwa Nickel, das weit in die äußerste Schale hineingeschleudert wurde und radioaktiv zu Kobalt zerfiel. „Eigentlich hätten wir erwartet, dass wir Gammaquanten, die aus dem Zerfall von Kobalt stammen, erst viele Monate nach der Explosion sehen. Sie tauch-

ten aber schon nach wenigen Wochen auf“, sagt Janka. Damit stand fest: So einfach wie die Annahme von Zwiebel-schalen, die wegfliegen, ist das in der Praxis nicht.

Mit fortschreitender Rechnerleistung wurden auch die theoretischen Szenarien zunehmend komplexer: Anfang der 2000er-Jahre tüftelten Janka und seine Kollegen an zweidimensionalen Modellen, die Sterne waren darin axialsymmetrisch. Die Forscher berücksichtigten jetzt Wechselwirkungen der Neutrinos mit dem Sternplasma in hoher Genauigkeit sowie konvektive Umwälzströmungen und Turbulenzen. „Tatsächlich“, so Hans-Thomas Janka, „wird in diesen Simulationen schon zu Beginn der Explosion die Symmetrie gebrochen. Es kommt zu hydrodynamischen

schen, turbulenten Fluktuationen, ähnlich wie bei Strömungsbewegungen in der Erdatmosphäre.“

Das erste vollständige zweidimensionale Supernovamodell am Max-Planck-Institut für Astrophysik generierte Jankas damaliger Doktorand Andreas Marek in den Jahren von 2003 bis 2006. Das Institut schaffte dafür eigens einen 128-Prozessor-Rechner an und stellte ihn am benachbarten Garching Rechenzentrum auf, wo er nur für diese Simulation genutzt wurde – mit Erfolg: „Die Supernova explodierte!“, sagt Janka. Der Aufwand hatte sich gelohnt. Auch der, den Janka zusammen mit seinem Doktoranden Markus Rapp betrieb: Die Forscher schrieben die für die Computersimulationen enorm aufwendigen Programmcodes. Diese Algorithmen sollten den Neutrinotransport optimieren. Janka will nicht ins Detail gehen. Aber wenn er von „dreidimensionalen Gleichungen mit Ortskoordinate und Impulsraum“ spricht, wird auch dem Laien schnell klar, dass die Sache einigermaßen kompliziert ist.

Das gilt erst recht für dreidimensionale Simulationen, die seit wenigen Jahren zum Repertoire der Wissenschaftler zählen. Der Aufwand ist gewaltig, 16000 Prozessoren müssen für ein Modell parallel rechnen. Ein ein-

zelner, moderner Personal Computer wäre 8000 Jahre lang damit beschäftigt. Die Quintessenz laut Janka: Auch in 3-D kommt es zu Neutrino-getriebenen Explosionen. Der Astrophysiker formuliert aber noch zwei klare Ziele, die er und seine Kollegen mit den dreidimensionalen Rechnungen zukünftig anstreben: „Mit voll selbstkonsistenten Simulationen und aller relevanten Mikrophysik wollen wir den Explosionsmechanismus quantitativ für viele Sternmassen bestätigen. Und wir möchten die Modelle mit den Beobachtungen vergleichen.“

ULTRAHELLE STRAHLER LASSEN DIE ASTRONOMEN RÄTSELN

Vielleicht lässt sich dann auch ein Rätsel lösen, das in den vergangenen Jahren zunehmend in den Vordergrund der Forschungen gerückt ist: die ultrahellen Supernovae, im Fachjargon *superluminous supernovae* genannt. Den ersten Vertreter dieses Typs beobachteten die Wissenschaftler im Jahr 2010. Obwohl sie jährlich insgesamt mehr als 1000 Sternexplosionen sichten, sind bis heute lediglich einige Dutzend dieser gigantisch hellen Strahler bekannt, die im Maximum bis zu 100-fach stärker leuchten als gewöhnliche Superno-

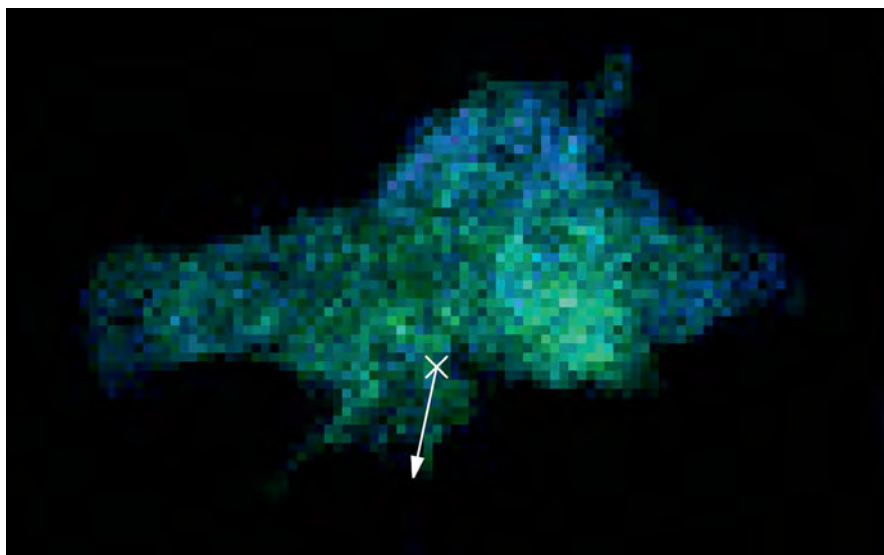
vae vom Typ II. Das Problem: „Diese Objekte sind allesamt extrem weit entfernt. Wir können nur die Lichtkurven registrieren, die Spektren hingegen sind stark verrauscht“, meint Hans-Thomas Janka.

Was verbirgt sich hinter diesen Supernovae? Die Forscher können nur spekulieren. Nach einer ersten Explosion könnte etwa ein Magnetar – ein Neutronenstern mit extrem starkem Magnetfeld (MAXPLANCKFORSCHUNG 4/2016, Seite 26 ff.) – ins Spiel kommen, diese Explosion weiter antreiben und massiv verstärken. Als zweite Möglichkeit könnte die nach außen laufende Stoßwelle der Supernova mit dichter Materie wechselwirken, die der Stern vor der Explosion abgestreift hat.

Als weitere Alternative denken die Wissenschaftler über die sogenannte Paarinstabilität nach. Dieser Theorie zugrunde liegt ein Stern mit 100 bis 300 Sonnenmassen oder sogar mehr. Ein solches Schwergewicht hat ein kurzes Leben und kollabiert bereits nach dem Erreichen des zentralen Kohlenstoffbrennens. Bei Temperaturen von einer Milliarde Grad beginnen sich spontan Lichtteilchen sehr hoher Energie in Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, zu verwandeln. Diese „Paarbildung“ führt zu einem rapiden Abfall des Strahlungsdrucks – die Gravitation gewinnt die Oberhand, das nukleare Brennen von Kohlenstoff und Sauerstoff beschleunigt sich explosionsartig, und der Stern wird zur Supernova.

Welches der drei geschilderten Szenarien zutrifft, steht noch in den Sternen. Die Astronomen wissen allerdings aus Untersuchungen der Lichtkurven, dass *superluminous supernovae*

Stellarer Kick: Durch die asymmetrische Explosion erfährt der übrig gebliebene Neutronenstern (weißes Kreuz) einen Stoß in eine bestimmte Richtung (Pfeil). Elemente wie Titan und Nickel (blau und grün) werden in jener Hemisphäre verstärkt produziert, die der Flugrichtung entgegengesetzt liegt. Diese Verteilung beobachten die Astronomen bei Supernova-Überresten im All – in perfekter Übereinstimmung mit theoretischen Modellen wie dieser Simulation.





Supernovae im Fokus: Hans-Thomas Janka beschäftigt sich am Garching Max-Planck-Institut für Astrophysik mit den größten Explosionen im Universum seit dem Urknall. Um deren Physik zu erforschen, schreibt Janka unter anderem aufwendige Computerprogramme.

anscheinend nicht in allen Fällen die unvorstellbar großen Mengen an Nickel freisetzen – etliche zehn Sonnenmassen –, die man von Paarinstabilitäts-Supernovae erwartet. Diese Tatsache muss eine brauchbare Theorie hinreichend erklären.

Um Nickel dreht sich auch Jankas jüngste Arbeit, die in diesen Tagen im *ASTROPHYSICAL JOURNAL* erschienen ist. Sie befasst sich mit dem, was sterbende Sterne hinterlassen – Supernova-Überreste. Beobachtungen und Messungen von hochenergetischer Strahlung im Röntgen- und Gammabereich mit Satellitenteleskopen wie NuSTAR und Integral zeigen, dass sich im Auswurfmaterial radioaktive Elemente, etwa ⁴⁴Titan oder ⁵⁶Nickel, nicht symmetrisch um den zurückgebliebenen Neutronenstern verteilen.

Denn die Sternleiche hat der Theorie zufolge durch die asymmetrische Explosion einen Kick in eine bestimmte Richtung bekommen – mit Folgen für die unmittelbare kosmische Umgebung: „Die Elemente sollten in jener Hemisphäre der massiv deformierten Überreste verstärkt explosiv produziert worden sein, die entgegengesetzt zur Flug-

richtung des Neutronensterns liegt“, sagt Hans-Thomas Janka. Das prognostizieren die theoretischen 3-D-Modelle. Und genau das haben die Teleskope zur Freude der Forscher in der Natur beob-

achtet: im Überrest Cassiopeia A und in der Hinterlassenschaft der Supernova 1987A. Letztere erweist sich damit 30 Jahre nach ihrem Ausbruch immer noch als Glücksfall für die Wissenschaft. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Manche Sterne enden spektakulär als Supernovae. Die ungefähr ein Dutzend unterschiedlichen beobachteten Typen lassen sich in zwei theoretische Klassen einteilen.
- Bei Supernovae vom Typ Ia explodiert vermutlich ein weißer Zwerg, der von einem Partner gefüttert wird; bei allen anderen Typen ist es ein massereicher Stern, dessen Kern kollabiert.
- Die Forscher haben herausgefunden, dass bei Kernkollaps-Supernovae der Mechanismus des Neutrino-Transports eine entscheidende Rolle für die Explosion spielt.
- Mit aufwendigen dreidimensionalen Modellen stellen Astronomen heute die physikalischen Prozesse in Supernovae nach und können einige Aspekte der Theorie durch praktische Beobachtungen überprüfen.

GLOSSAR

Antiteilchen: Soweit bekannt, existiert zu jedem Teilchen ein Antiteilchen, das in Bezug auf Masse, Lebensdauer und Spin identisch ist. Entgegengesetzt gleich sind hingegen elektrische Ladung, magnetisches Moment und alle ladungsartigen Quantenzahlen. So etwa besitzt das Positron, das Antiteilchen des Elektrons, eine positive Ladung.

Plasma: Ein Gemisch aus neutralen und geladenen Teilchen (teilweise ionisiert) oder nur aus geladenen Teilchen wie Elektronen und Atomkernen (vollständig ionisiert), das auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet wird. Ein Plasma tritt häufig bei hohen Temperaturen auf. So etwa bestehen Sterne aus heißem Gas und Plasma.