

KOSMISCHE

LEUCHTTÜRME

KOSMISCHE LEUCHTTÜRME



PROF. DR. FRIEDRICH RÖPKE ist seit März 2015 Professor für Theoretische Astrophysik am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg und gleichzeitig Leiter der neuen Gruppe „Physik Stellarer Objekte“ am Heidelberger Institut für Theoretische Studien. Von 2011 bis 2013 war er Professor für Astrophysik an der Universität Würzburg. Zuvor leitete er eine Emmy-Noether-Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching bei München. Seine Forschung konzentriert sich auf die theoretische Beschreibung von Prozessen in Sternen und Supernova-Explosionen, die mithilfe von Simulationen auf Supercomputern untersucht werden. Im Jahr 2010 erhielt er den ARCHES-Preis des BMBF.

Kontakt: friedrich.roepke@h-its.org

HELLER ALS MILLIARDEN SONNEN

FRIEDRICH RÖPKE

Heller als komplette Galaxien können einzelne Sterne aufleuchten – um kurz darauf zu erlöschen. Doch was lässt solche „Supernovae“ entstehen? Heidelberger Astrophysiker simulieren den spektakulären Sternentod mithilfe des Computers und geben neue überraschende Antworten.

M

Man nennt sie die „Leuchttürme des Universums“ – die Supernovae, die für einige Tage oder Wochen hell am Himmel aufscheinen. Wie die Seefahrtszeichen senden sie ein Lichtsignal aus, das sie über weite Entfernungen sichtbar macht und uns ihre Position erkennen lässt. Der Lichtblitz einer Supernova gehört zu den hellsten Ereignissen im heutigen Universum – fast alle anderen astrophysikalischen Objekte werden hiervon in den Schatten gestellt. Eine Supernova ist für kurze Zeit so hell wie die gesamte Galaxie, in der sie sich befindet. Die gängige Erklärung der Astrophysiker für dieses beeindruckende Ereignis ist die Explosion des Sterns: Während er stirbt, leuchtet er so hell wie die hundert Milliarden Sterne in seiner unmittelbaren kosmischen Nachbarschaft.

Supernovae sind nicht nur faszinierende astronomische Ereignisse, sondern auch wichtige Objekte der Kosmologie, dem Teilgebiet der Physik, das verstehen will, wie das Weltall aufgebaut ist, woraus es besteht und wie es sich entwickelt. Um Antworten auf diese Fragen zu finden, gilt es, das Universum zu vermessen. Dabei geht es jedoch nicht allein darum, die Position astronomischer Objekte in ihrer Projektion am Himmel zu bestimmen. Die weitaus schwierigere Aufgabe ist es, ihre räumliche Verteilung und deren Entwicklung zu rekonstruieren.

Den Abstand eines Sterns von uns zu bestimmen, ist eine große Herausforderung. Viele Messmethoden funktionieren nur in unserer nahen kosmischen Umgebung, also in der Milchstraße und in Nachbargalaxien. Will man das Universum auf großen Skalen vermessen, sind extrem leuchtstarke Objekte nötig – eben jene Supernovae, die über große kosmologische Distanzen beobachtet werden können. Von besonderer Bedeutung sind dabei Supernovae des Typs Ia, denn im Unterschied zu allen anderen Supernova-Typen zeichnen sie sich neben ihrer Helligkeit zusätzlich durch eine weitere, nicht minder bemerkenswerte Eigenschaft aus – ihre ungewöhnliche Homogenität. Dies macht sie zu einem der wichtigsten Werkzeuge der Kosmologen.

Aus der Leuchtkraft auf die Entfernung schließen
Von der Beobachtung naher Typ-Ia-Supernovae wissen wir, dass ihre maximale Leuchtkraft nur wenig schwankt.

„Supernovae werden als gewaltige Explosionen von Sternen am Ende ihrer Entwicklung gedeutet.“

Sobald die Helligkeit eines Objekts bekannt ist, lässt sich seine sogenannte Leuchtkraftentfernung bestimmen. Dabei macht man sich den Umstand zunutze, dass Lichtquellen dunkler erscheinen, wenn sie aus größerem Abstand betrachtet werden. Aus der scheinbaren Verdunkelung einer Supernova im Vergleich zu ihrer intrinsischen Helligkeit kann man folglich direkt ableiten, wie weit sie entfernt ist. Das Lichtsignal, das Typ-Ia-Supernovae aussenden, ermöglicht es uns also, das Universum zu vermessen.

Es ist ein bemerkenswerter Zufall und glücklicher Umstand, dass eine Klasse extrem leuchtstarker Ereignisse aufgrund ihrer gleichmäßigen Helligkeit geeignet ist, mit ihnen Abstände zu vermessen. Wegen der endlichen Geschwindigkeit, mit der sich Licht ausbreitet, ist es nun aber so: Wenn wir weit entfernte astronomische Quellen beobachten, sehen wir nicht nur weit in den Raum hinaus, sondern auch weit zurück in die Vergangenheit. Das Universum dehnt sich aus, wie der amerikanische Astronom Edwin Hubble bereits in den 1920er-Jahren zeigen konnte. Somit wird die Wellenlänge eines Lichtsignals auf dem Weg zu uns gestreckt. Der Fachmann spricht von der „kosmologischen Rotverschiebung“, die durch das Verschieben der Linien in Spektren gut bestimmt werden kann. Misst man den Abstand eines entfernten Objekts und bestimmt gleichzeitig seine Rotverschiebung, wird es möglich, die Geschichte der Expansion des Universums zu rekonstruieren.

Diese Messungen erfolgten bereits in den 1990er-Jahren mit großer Präzision. Die Astronomen beobachteten entfernte Typ-Ia-Supernovae und kamen zu dem überraschenden Befund, dass sich das Universum in beschleunigter Weise ausdehnt. Diese Erkenntnis stellte das herrschende Weltbild der Physik grundsätzlich infrage und wurde im Jahr 2011 mit dem Nobelpreis für Physik bedacht. Als ursächlich für die beschleunigte Expansion gilt nach heutigem Kenntnisstand die „Dunkle Energie“ – deren physikalische Natur aber ist noch völlig unklar.

Die Frage nach dem physikalischen Mechanismus

Die bisherigen Studien zur Vermessung des Universums basieren auf der Annahme, genau zu wissen, wie hell Supernovae vom Typ Ia sind. In der Tat variieren sie in ihrer maximalen Leuchtkraft weit weniger als andere Supernovae-Typen. Dennoch gibt es Schwankungen, aufgrund derer es unmöglich ist, den Abstand wirklich präzise zu messen. Die Astronomen behelfen sich hier mit einem Befund, der aus der Beobachtung naher Supernovae-Ereignisse stammt: Hellere Ereignisse fallen in ihrer Leuchtkraft langsamer ab als dunklere. Diese Erkenntnis verwenden die Wissenschaftler, um ihre Abstandsmessungen zu kalibrieren.

Eine Erklärung für den unterschiedlichen Abfall in der Leuchtkraft steht bislang noch aus. Sie ist aber wichtig, um begründen zu können, dass die Beziehung, die zur Kalibrierung

„Für die Dauer einiger Tage kann eine Supernova so hell sein wie die gesamte Galaxie, in der sie sich befindet.“

eingesetzt wird, für alle Typ-Ia-Supernovae gilt – nicht nur für die beobachteten nahen, sondern auch für sehr weit entfernte Objekte. Immerhin beziehen die kosmologischen Abstandsmessungen Supernovae-Ereignisse ein, die sich abspielten, als das Universum nur halb so groß war wie heute. Es stellt sich also die Frage nach dem genauen physikalischen Mechanismus, der der astronomisch definierten Klasse von Typ-Ia-Supernovae zugrunde liegt. Mit der Physik der Typ-Ia-Supernovae beschäftigen wir uns bereits seit vielen Jahren; auch in unserer neuen im Januar 2015 im Heidelberger Institut für Theoretische Studien, kurz HITS, etablierten Gruppe „Physik stellarer Objekte“ gehen wir dieser Frage gemeinsam mit Wissenschaftlern des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg nach.

Zwei große stellare Energiequellen

Grundsätzlich ist die enorme Freisetzung von Energie, zu der es bei den zerstörerischen Supernovae-Ereignissen kommt, nur durch zwei große Energiequellen erklärbar: die gravitative Bindungsenergie beziehungsweise die nukleare Energie des stellaren Materials. Gravitative Bindungsenergie wird frei, wenn der Kern eines massereichen Sterns nach Verbrauch seines nuklearen Brennstoffs in sich zusammenfällt und zu einem kompakten Objekt wird: einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch. Nukleare Energie wird frei, wenn Sternmaterial aus leichten Kernen im sogenannten thermonuklearen Brennen in schwere Elemente umgewandelt wird.

Alle Klassen von Supernovae werden dem ersten Mechanismus zugeschrieben – mit Ausnahme der Typ-Ia-Supernovae.

Beobachtungen deuten darauf hin, dass diese aus der Explosion Weißer Zwergsterne hervorgehen und somit ihre Energie aus thermonuklearem Brennen beziehen. Weiße Zwergsterne sind die vorläufigen Endstadien von Sternen mittlerer und geringer Masse. Bei ihnen zündet das Kohlenstoffbrennen nach der Fusion von Helium zu Kohlenstoff nicht, weil ihre Masse zu klein ist. Da die Energiequelle fehlt, verliert der Stern seine Stabilität, die durch thermischen Druck zustande kommt: Er stürzt zusammen, bis er etwa so groß wie ein Planet ist. Seine Masse aber ist immer noch vergleichbar mit der eines großen Sterns – somit wird die Dichte des Zwergsterns extrem hoch. Hier bewirkt ein quantenmechanischer Effekt – die sogenannte Entartung der Elektronen des stellaren Materials – eine Stabilisierung. Diese Stabilität ist nicht mehr abhängig von endlichen Energievorräten wie beim thermonuklearen Brennen. Deshalb sind Weiße Zwergsterne im Prinzip stabil bis in alle Ewigkeit.

Eine ebenso aktuelle wie fundamentale Frage der Supernovae-Physik ist: Wann und wie kann so ein Weißer Zwergstern trotz seiner Stabilität einen Zustand erreichen, in dem eine Explosion zündet und eine Typ-Ia-Supernova entsteht? Brennstoff ist ausreichend vorhanden. Die Fusion des kohlenstoffreichen Materials des Sterns zu Elementen der Eisengruppe – deren Kerne am stabilsten gebunden sind und bei denen die Möglichkeit der Energiegewinnung durch Fusion endet – kann prinzipiell eine Energiemenge freisetzen, die ausreichen würde, um die Sonne auf die Geschwindigkeit von 10.000 Kilometer pro Sekunde zu beschleunigen.

Das Rätsel der Weißen Zwerge

Bislang gibt es keine direkte Beobachtung eines explodierenden Weißen Zwergsterns, aus dem eine Typ-Ia-Supernova hervorgeht – dennoch können wir uns diesem Phänomen theoretisch nähern. Dies tun wir, indem wir mithilfe der weltweit derzeit leistungsstärksten Computer simulieren, unter welchen Voraussetzungen die Explosion eines Weißen Zwergsterns zustande kommen könnte und wie die thermonukleare Verbrennung im Detail abläuft.

Wir wissen beispielsweise, dass der Stern in einem engen binären System mit einem Begleiter wechselwirken muss, damit die Explosion zündet. Das gängige Modell besagt, dass Material von einem normalen Stern auf den Weißen Zwergstern hinüberströmt. Die Folge ist, dass die Masse des Weißen Zwergsterns stetig anwächst, bis sie sich schließlich der sogenannten Chandrasekhar-Grenze nähert. Bei noch höheren Massen können die entarteten Elektronen den Zwergstern nicht mehr stabilisieren. Nahe der Chandrasekhar-Grenze wächst die Dichte in seinem Zentrum gewaltig an, und letztendlich kommt es zur thermonuklearen Explosion.

Dieses Szenario wurde lange Zeit als Standard angesehen – auch deshalb, weil es die Homogenität der Beobachtungsgrößen von Typ-Ia-Supernovae erklären kann: Es ist immer die gleiche Menge an Brennstoff verfügbar, festgelegt durch die Chandrasekhar-Grenze auf rund 1,4 Sonnen-Massen. Mit aufwendigen dreidimensionalen Simulationen ist es der neuen Heidelberger Gruppe zusammen mit einem weltweiten Team von Mitarbeitern erstmals gelungen, systematisch und konsistent synthetische Beobachtungsgrößen vorherzusagen. Das erlaubt es nun, die theoretischen Modelle zu den Typ-Ia-Supernovae im direkten Vergleich mit astronomischen Daten zu überprüfen.

In den letzten Jahren sind zunehmend Zweifel an der Allgemeingültigkeit des Standardmodells aufgekommen. Systeme, in denen es tatsächlich möglich ist, einen Weißen Zwergstern zur Chandrasekhar-Masse zu bringen, sind in ihren Parametern sehr eingeschränkt. Sie sind deshalb wohl auch zu selten, um die beobachtete Anzahl von etwa einer Supernova vom Typ Ia pro Jahrhundert in einer milchstraßenähnlichen Galaxie – einem für kosmologische Verhältnisse recht häufigen Ereignis – zu erklären.

Bereits vor rund fünf Jahren konnte unsere Gruppe mithilfe komplexer Computersimulationen zeigen, dass es auch andere Erklärungsmöglichkeiten gibt, etwa Systeme aus zwei Weißen Zwergsternen in einem engen Binärsystem, die aufgrund der Abstrahlung von Gravitationswellen und durch Gezeitenkräfte miteinander verschmelzen. Auch dann kann eine thermonukleare Explosion zünden. Es stehen also mehrere Modelle bereit, die erklären können, wie es zu einer Typ-Ia-Supernova kommt. Die

„Zwei Drittel des Eisens im Universum – und damit auch des Eisens auf unserer Erde – wurde von Supernovae des Typs Ia gebildet.“

Grundlagenforschung zur Interpretation großer Datenmengen

Das Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS gGmbH) wurde 2010 von SAP-Mitgründer Klaus Tschira und der Klaus Tschira Stiftung als private, gemeinnützige Forschungseinrichtung ins Leben gerufen. Das HITS betreibt Grundlagenforschung in den Naturwissenschaften, der Mathematik und der Informatik, dabei werden große Datenmengen verarbeitet, strukturiert und analysiert. Die Forschungsfelder reichen von der Molekularbiologie bis zur Astrophysik.

Die Gesellschafter der HITS gGmbH sind die HITS Stiftung, die Universität Heidelberg und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Das HITS arbeitet außerdem mit weiteren Universitäten und Forschungsinstituten sowie mit industriellen Partnern zusammen. Die größte Unterstützung erhält das HITS über die HITS Stiftung von der Klaus Tschira Stiftung, die wichtigsten externen Mittelgeber sind das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und die Europäische Union.

www.h-its.org/de

COSMIC LIGHTHOUSES

BRIGHTER THAN A BILLION STARS

FRIEDRICH RÖPKE

Supernovae of Type Ia are the lighthouses of the universe. The bright signals emitted by these stars allow us to survey the history of cosmic expansion. This led to the discovery of the accelerated expansion of the universe – a finding that was rewarded with the 2011 Nobel Prize in Physics. The measurement of distances to Type Ia supernovae is based on our assumed knowledge of their intrinsic luminosity. Although these objects are more homogeneous in their peak brightness than other celestial bodies, some variation remains that must be calibrated out by empirical means to achieve a precise calculation of distance. This calls for a better understanding of the physical mechanism leading to Type Ia supernovae.

Supernovae of Type Ia are believed to be thermonuclear explosions of a class of extremely compact stars – so-called white dwarfs. Their brightness outshines that of an entire galaxy consisting of 100 billion stars. This is due to the decay of one of the prime nucleosynthesis products in the explosion, radioactive nickel. This decay heats up the ejecta cloud and thus generates the bright optical emission. It is still unclear, however, how white dwarf stars reach the state that triggers an explosion. Our research group at the Heidelberg Institute for Theoretical Studies performs comprehensive and detailed simulations of several possibilities on some of the world's fastest supercomputers. For the first time, we were able to derive synthetic observables from these models that permit a direct comparison with astronomical data. This provides new insight into the physical nature of Type Ia supernovae. ●

PROF. DR FRIEDRICH RÖPKE accepted the Chair of Theoretical Astrophysics at the Centre for Astronomy of Heidelberg University in March 2015. He also heads the new research group 'Physics of Stellar Objects' at the Heidelberg Institute for Theoretical Studies. From 2011 to 2013, he was Professor of Astrophysics at the University of Würzburg. Prior to that, he headed an Emmy Noether research group at the Max Planck Institute for Astrophysics in Garching, close to Munich. Prof. Röpke's research focuses on the theoretical description of processes in stars and supernovae explosions, which he investigates by means of simulations on supercomputers. In 2010 he received the ARCHES award of the German Ministry of Education and Research.

Contact: friedrich.roepke@h-its.org

“Supernovae are believed to be immense explosions of stars at the end of their life. For a few days, they shine as bright as the entire galaxy surrounding them.”

Aufgabe künftiger Forschungsarbeiten wird es sein, mit verbesserten Simulationen und Beobachtungen zu erforschen, welches der derzeitigen Szenarien die meisten Supernova-Ereignisse beschreiben kann beziehungsweise ob verschiedene Erklärungsmodelle zu diesem astronomischen Phänomen beitragen.

Das Licht der Leuchttürme

Und woher stammt nun das Licht, das Typ-Ia-Supernovae aussenden? Eine thermische Emission infolge der thermonuklearen Explosion scheidet als Erklärung aus: Die Explosionswolke fliegt mit sehr hoher Geschwindigkeit auseinander und kühlt zu schnell ab, um über Tage und Wochen für eine derart helle Erscheinung sorgen zu können. Die durch das detaillierte Beobachten des Lichtabfalls in Typ-Ia-Supernovae belegte Theorie geht von einem Effekt der Nukleosynthese in der thermonuklearen Explosion aus. Der Brennstoff besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff und Sauerstoff, deren Hauptisotope im Kern die gleiche Anzahl von Protonen und Neutronen aufweisen. Dementsprechend wird während des nuklearen Brennens das stabilste Eisengruppen-Isotop mit gleicher Protonen- und Neutronenzahl bevorzugt gebildet. Es handelt sich dabei um das Nickelisotop ^{56}Ni . Allgemein benötigen schwerere Kerne für ihre Stabilität einen leichten Überschuss an Neutronen. Deshalb zerfällt ^{56}Ni über ^{56}Co zum stabilen ^{56}Fe , wobei Gammastrahlen und Positronen frei werden. Diese heizen das noch relativ dichte Material der Explosionswolke auf – und bedingen so die Emission

von optischer Strahlung. Um die Helligkeit der meisten Typ-Ia-Supernovae zu erklären, ist der Zerfall von etwa einer halben Sonnenmasse ^{56}Ni zu ^{56}Fe nötig.

Das ist auch der Grund dafür, warum Eisen auf der Erde ein relativ häufiges Element ist: Es ist das Zerfallsprodukt von radioaktivem Nickel, das in Supernova-Explosionen gebildet wird. Man nimmt an, dass etwa zwei Drittel des Eisens im Universum – und damit auch des Eisens auf unserer Erde – von Typ-Ia-Supernovae synthetisiert worden sind. Somit fungieren Supernovae nicht nur als kosmische Leuchttürme – sie tragen auch wesentlich zur chemischen Entwicklung von Galaxien bei. Diese ist ein weiteres hochaktuelles Forschungsgebiet der Astrophysik. In Heidelberg wird es derzeit von mehreren Gruppen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 881 „The Milky Way System“ bearbeitet. ●

„Supernovae tragen wesentlich zur chemischen Entwicklung von Galaxien bei.“

Die Erforschung der Milchstraße

Der Sonderforschungsbereich „The Milky Way System“ (SFB 881) untersucht die Entwicklung unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, sowie fundamentale Fragen der Galaxienbildung und -entwicklung. Mit den Arbeiten am SFB 881 ist zugleich das Ziel verbunden, Vorhersagen kosmologischer Modelle zur Galaxienentstehung im Detail zu überprüfen und die kleinskalige Verteilung Dunkler Materie zu untersuchen. Der 2011 eingerichtete Forschungsverbund ist am Zentrum für Astronomie der Ruperto Carola angesiedelt; beteiligt sind Wissenschaftler des Astronomischen Rechen-Instituts, des Instituts für Theoretische Astrophysik und der Landessternwarte Königstuhl der Universität. Als außeruniversitäre Forschungseinrichtungen wirken zudem das Max-Planck-Institut für Astronomie und das Heidelberger Institut für Theoretische Studien mit. Ende 2014 hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft die Förderung des SFBs für weitere vier Jahre verlängert und hierfür Mittel in Höhe von gut neun Millionen Euro bewilligt.

<http://sfb881.zah.uni-heidelberg.de>