

Supernovae – Großes Finale und Neuanfang

In Bezug zum Beitrag „Zwei staubreiche Supernovae im Blick des JWST“ aus der Rubrik: „Blick in die Forschung: Nachrichten“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 12/2023, WIS-ID: 1571230, Zielgruppe: Oberstufe

Andreas Jørgensen

Manche Sterne explodieren am Ende ihrer Lebenszeit. Ein solches Ereignis bezeichnen AstrophysikerInnen als eine Supernova. Diese kurze Erklärung wirft zweifelsohne einige Fragen auf: Was sind die genauen Voraussetzungen dafür, dass ein Stern sich selbst in einem letzten, hellen Aufleuchten vernichtet? Wird die Sonne am Ende ihres Lebens auch zur Supernova? Welche Aussagen können WissenschaftlerInnen über Supernovae machen, und was können sie aus den Explosionen über den Kosmos lernen? Und was wird aus den Überresten der Explosion? Um Antworten auf diese und ähnliche Fragen zu bekommen, tauche mit diesem WIS-Beitrag ins Thema Supernovae ein.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Sterne, Kosmologie	Supernovae (Typ 1a, 1b, 1c, II) , Sternentwicklung , Neutronensterne , Weiße Zwerge , Standardkerzen
Physik	Thermodynamik, Quantenphysik	Schwerkraft , Druck , Auftrieb , Temperatur , Wasserstoffbrennen , Heliumbrennen , Kohlenstoffbrennen , Neonbrennen , Siliziumbrennen
Fächer- verknüpfung	Astronomie – Mathematik	Kugeloberfläche
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnisgewinnung, Kommunikation) Lehr-/ Sozialformen Unterrichtsmittel	Recherche , Projektarbeit , Aufgaben zum Thema Supernovae , Einzelarbeit , Partner- und Gruppenarbeit , Plenum , Diskussionsaufgaben , Ergebnisse beurteilen

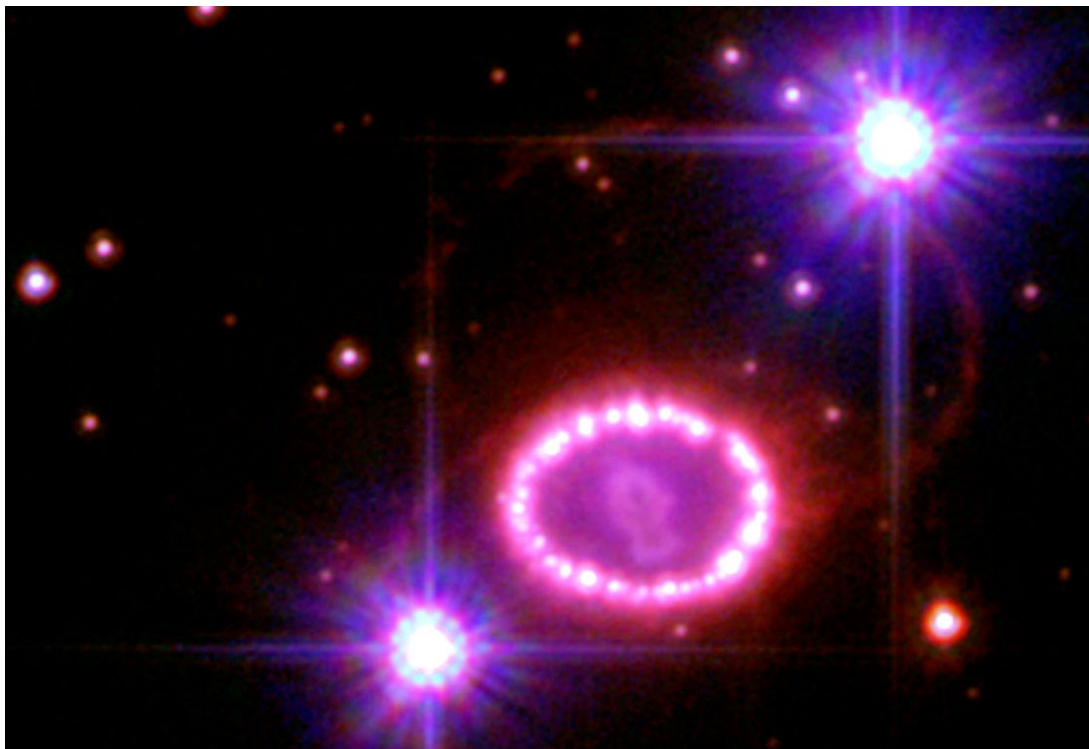


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt die Überreste der Supernova 1987A. Die Explosion war 1987 von der Erde aus zu beobachten und fand in der Großen Magellanschen Wolke statt, die sich rund 163.000 Lichtjahre von der Erde entfernt befindet. Das Bild wurde 2006 aufgenommen.

©: NASA, ESA, und R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics), [CC BY 4.0](#).

Was explodiert da jetzt genau?

[Zurück zum Anfang](#)

Um zu verstehen, wie es zu einer Supernova kommt, müssen wir uns mit einigen Aspekten der **Sternentwicklung** auseinandersetzen. Betrachten wir dazu einen Stern, der zur Supernova wird, und fangen bei der entgegengesetzten Frage an: Wieso ist dieser Stern nicht schon lange vorher explodiert? Was hat den Stern, der ja aus heißem Plasma besteht, in den Jahrtausenden vor der Explosion davon abgehalten sich selbst zu vernichten? Die Antwort auf diese Frage lautet, dass in den vorangegangenen Jahrtausenden im Sterninneren größtenteils ein (hydrostatisches) Gleichgewicht zwischen der **Schwerkraft** und dem **Druckgradienten** geherrscht hat. Ohne die Schwerkraft seiner eigenen Masse wäre das heiße Plasma auseinandergestoben. Ohne den **Auftrieb**, der durch den Druckgradienten aufrecht gehalten wurde, wäre der Stern längst kollabiert.

Ein Stern strahlt während seines Lebens stetig Energie an seine Umgebung ab. Sterne wie die Sonne, die sich im sogenannten Hauptreihenstadium befinden, erzeugen die entsprechende Menge Energie dadurch, dass sie im Sterninneren Wasserstoff zu Helium fusionieren (Kernfusion). Ein Stern unterliegt somit Vorgängen, durch die sich auch seine chemische Zusammensetzung mit der Zeit verändert. Diese Veränderungen beeinflussen das oben erwähnte hydrostatische Gleichgewicht zwischen der Schwerkraft und dem Druckgradienten, was wiederum mit der Zeit Änderungen im Aufbau und somit beispielsweise in der Oberflächentemperatur, dem Radius und der Leuchtkraft des Sterns mit sich bringt (siehe [Übungsaufgabe 1](#)).

Am Ende der Hauptreihenphase geht der Wasserstoffvorrat im Kern des Sterns zur Neige. Durch das Aussetzen der Fusionsreaktionen fällt der Strahlungsdruck ab (siehe [Übungsaufgabe 2](#)). Der Stern befindet sich deshalb nicht länger im Gleichgewicht, wodurch der Kern in sich zusammenfällt und durch die freigesetzte Gravitationsenergie erhitzt wird. Bei einem sonnenähnlichen oder massereichen Stern werden bei diesem Kollaps Dichten und **Temperaturen** erreicht, die eine Umwandlung von Helium in Kohlenstoff und Sauerstoff ermöglichen. Der Stern kann dann wieder durch Fusion im Zentralbereich Energie erzeugen (siehe auch [Übungsaufgabe 3](#)). Ein neues Gleichgewicht stellt sich ein. Bis hierhin, ist es noch nicht zur Supernova gekommen.

Bei sehr massereichen Sternen spielt sich das oben skizzierte Szenario wiederholt von Neuem ab: Wenn der Kernbrennstoff erschöpft worden ist, stellt sich ein neues Gleichgewicht ein, bei dem neue Fusionsreaktionen im Kern stattfinden. Nachdem Helium somit in Kohlenstoff und Sauerstoff umgewandelt worden ist, wird aus Kohlenstoff Neon, woraus wiederum Magnesium wird. Aus Sauerstoff und Magnesium entsteht später Schwefel und Silizium. Als letzte Stufe zündet das **Siliziumbrennen**, welches in der Entstehung von Eisen (Fe-56) mündet. Der erneute Kollaps des Kerns bei der Erschöpfung des Brennmaterials wird danach nicht durch weitere Fusionsprozesse aufgehalten, da die Erschaffung noch schwererer Elemente Energie erfordert, statt sie freizusetzen. Stattdessen erhitzt und verdichtet sich der Zentralbereich immer weiter. Die dabei entstehende hochenergetische Gammastrahlung zerlegt die Eisenkerne im Zentralbereich. Freigesetzte Protonen fangen Elektronen ein und werden in Neutronen umgewandelt. Millisekunden, nachdem der Kollaps angefangen hat, besteht der kollabierende Kern ausschließlich aus Neutronen. Nun passiert etwas, das auf die quantenmechanischen Eigenschaften von Neutronen zurückzuführen ist: Die Neutronen stellen sich durch den sogenannten Entartungsdruck der weiteren Kompression des Kerns entgegen. Der Kollaps findet ein jähes Ende, welches eine nach außen gerichtete Schockwelle nach sich zieht, die durch freigesetzte Neutrinos verstärkt wird. Das Zentralgebiet des Sterns ist zum **Neutronensterne** geworden, während die Stoßwelle die darüber liegenden Sternschichten in Stücke reißt. Diese Explosion wird als Supernova des Typs II bezeichnet.

Wir bestehen aus Sternstaub

[Zurück zum Anfang](#)

Bevor die ersten Sterne nach dem Urknall gebildet wurden, waren nur wenige Elemente aus dem Periodensystem im Universum vorzufinden: Es gab Wasserstoff, Helium und Spuren anderer leichter Nuklide, vor allem Lithium. Seitdem haben Sterne in verschiedenen Phasen ihres Lebens Teile ihrer Materie an ihre Umgebung abgegeben (siehe Abbildung 2), was den interstellaren Raum mit den Elementen, die sie in ihrem Inneren erschaffen haben, bereichert hat. Aus diesen neu erschaffenen, schwereren Elementen wurden erst Staub und dann neue Sterne aber auch Planeten und alles, was darauf existiert, geformt. Der berühmte Astronom Carl Sagan drückte dies prägnant mit folgende Satz aus: „*We are made of star stuff*“.



Abbildung 2: Am Ende seines Lebens werden die äußeren Schichten eines sonnenähnlichen Sterns abgestoßen (nicht durch eine Supernova (!), sondern durch den starken Sternwind) und formen einen sogenannten planetarischen Nebel, in dessen Zentrum ein Weißer Zwerg, d.h. die kompakten Überreste des Kerns, zu finden sind. Durch das Abstoßen der Hülle bereichert der Stern den interstellaren Raum mit Spuren von Elementen, die im Inneren des Sterns entstanden sind. ©: ESA/Hubble & NASA, R. Wade et al., [CC BY 4.0](#).

Der Sauerstoff, den wir atmen, ist somit beim **Heliumbrennen** entstanden. Der Kohlenstoff auch. Jedoch nur C-12. Dahingegen ist C-13 ein Ergebnis einer besonderen Art des **Wasserstoffbrennens**. Wir können also bestimmte Isotope auf bestimmte Fusionsreaktionen zurückführen, die im Inneren der Sterne eine Energiequelle darstellen (siehe auch [3]). Aber wie steht es mit Elementen, die schwerer sind als Eisen? Diese Elemente können nicht auf die gleiche Art entstanden sein, da die nötigen Fusionsreaktionen keine Energie freisetzen, sondern welche benötigen.

Hier kommen Supernovae ins Spiel: Die Schockwelle, die den Stern auseinanderreißt, erhitzt das Gas auf mehrere Milliarden Kelvin und führt darüber hinaus Neutronen aus dem Zentralbereich mit sich. Unter diesen Umständen entstehen Elemente im Periodensystem jenseits des Eisens. Jeder Gegenstand, der beispielsweise aus Gold, Silber oder Kupfer besteht, wurde also aus einem Material geschmiedet, das in einer Supernova entstanden ist.

Wird die Sonne zur Supernova werden?

[Zurück zum Anfang](#)

Nein. Um das oben beschriebene Szenario einer Supernova des Typs II zu durchlaufen, muss ein Stern mit einer Masse von ungefähr 10 bis 25 Sonnenmassen in die Hauptreihenphase eintreten. Ist der Stern sehr viel massereicher, ändert sich das Szenario insoweit, als am Ende statt des Neutronensterns eventuell ein Schwarzes Loch herauskommt – und das unter gewissen Umständen sogar ohne eine Explosion. Liegt die Anfangsmasse des Sterns unterhalb von ungefähr 10 Sonnenmassen, reichen Dichte und Temperatur in seinem Inneren nicht aus, um alle Fusionsreaktionen bis zu Entstehung von Eisen durchzuführen. Liegt die Anfangsmasse des Sterns immer noch oberhalb von ungefähr 8 Sonnenmassen, wird es trotzdem zur gewaltsamen Explosion kommen.

Aber bei einem Stern wie die Sonne verläuft das Ende ganz anders ab. Die Sonne wird nach der Hauptreihenphase zwar ins Heliumbrennen übergehen, aber das **Kohlenstoffbrennen** wird nachher nicht einsetzen. Stattdessen wird der entstandene Zentralbereich aus Kohlenstoff und Sauerstoff sich zusammenziehen, bis der Kollaps vom Entartungsdruck der Elektronen aufgehalten wird. Der Kern wird zum Weißen Zwerg, einer großen Kugel aus Kohlenstoff und Sauerstoff, die sehr langsam abkühlt. Die äußeren Schichten werden beim Kollaps abgestoßen und formen einen planetarischen Nebel (siehe Abbildung 2). Zu einer gewaltsamen Explosion kommt es bei einem sonnenähnlichen Stern also nicht. Es sei denn ...

Warum überhaupt „Typ II“?

[Zurück zum Anfang](#)

Wie schon erwähnt, wird die oben beschriebene Explosion am Ende des Lebens eines massereichen Sterns als Supernova des **Typs II** bezeichnet. Um eben solche Explosionen handelt es sich auch bei den Supernovae, die im SuW-Beitrag besprochen werden, auf den sich dieser WIS-Beitrag bezieht. Aber wieso überhaupt Typ II? Diese Bezeichnung hat ihren Ursprung in der Spektroskopie und kennzeichnet, dass im frühen Spektrum der Explosion Spektrallinien auftauchen, die auf Wasserstoff hindeuten: Der Stern hat zwar seinen Kern in Eisen umgewandelt, aber die äußere Hülle besteht immer noch größtenteils aus Wasserstoff (siehe auch [Übungsaufgabe 3](#)).

Dementsprechend sind Supernovae des **Typs I** solche, bei denen keine Wasserstofflinien zu beobachten sind. Was hat es mit diesen Sternen auf sich? Eine Möglichkeit besteht darin, dass der Stern während seiner Entwicklung vor seinem endgültigen Kollaps seine äußere Hülle abgestoßen hat (siehe [Übungsaufgabe 5](#)). Die Explosionen solcher Sterne werden als Supernovae des **Typs 1b** oder **1c** bezeichnet.

Es gibt aber noch den **Typ 1a**, bei dem es auf eine ganz andere Weise zur Explosion kommt, und zwar muss ein **Weißer Zwerg** aus Kohlenstoff und Sauerstoff hierzu nach seiner Entstehung weitere Materie anhäufen (siehe auch [Übungsaufgabe 6](#)). Ein **Weißer Zwerg** in einem Doppelsternsystem könnte beispielsweise seinen Partnerstern in so engen Bahnen umkreisen, dass der Weiße Zwerg dem anderen Stern Teile seiner Hülle entwenden kann. Sobald der Weiße Zwerg durch den Massenzuwachs 1,44 Sonnenmassen überschreitet, setzt Kohlenstoffbrennen als Folge der Dichtezunahme in seinem Inneren ein. Die Temperatur steigt und damit auch der thermische Druck. Bei einem normalen Stern würde ein Temperaturanstieg wegen des Druckanstiegs zur Expansion des Gases und deswegen zur Abkühlung führen. Mit anderen Worten laufen die Fusionsreaktionen in einem normalen Stern bei konstanter Temperatur ab, indem sie sich selbst regulieren. Es herrscht ein Gleichgewicht. Bei einem Weißen Zwerg findet eine solche Regulierung nicht statt, weil der Weiße Zwerg aus entarteter Materie besteht. Es baut sich deshalb immer weiter Druck auf. Irgendwann kommt es zur Explosion. „*The entire white dwarf becomes a fusion bomb*“ (Zitat aus [2]).

Wie die Supernova des Typs II bereichert eine Supernova des Typs 1 den interstellaren Raum mit schweren Elementen. Jedoch ist das Verhältnis zwischen den Elementen, die in den beiden Explosionen freigegeben werden, unterschiedlich. So entstehen bei den unkontrollierten Fusionsreaktionen, die zur Explosion des Typs 1a führen, insbesondere Eisen, Kobalt und Nickel.

Standardkerzen

[Zurück zum Anfang](#)

Supernovae des Typs II können stark voneinander abweichen. Manche der explodierenden Sterne haben eine Anfangsmasse von 10 Sonnenmassen. Andere von 25 Sonnenmassen. Andere irgendwas dazwischen. Supernovae des Typs Ia dahingegen sind sich alle relativ ähnlich, da sie alle explodieren, wenn ein Weißer Zwerg aus Kohlenstoff und Sauerstoff 1,44 Sonnenmassen erreicht hat. ForscherInnen können daher anhand der Lichtkurve mit ziemlicher Genauigkeit die Leuchtkraft (L) der Supernova festlegen.

Um zu verstehen, wie ForscherInnen sich diesen Umstand zunutze machen können, nehmen wir an, dass eine Supernova ihr Licht gleichmäßig in alle Richtungen ausstrahlt. Wir können uns daher die Lichtwellenfront, die zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgestrahlt wird, als Kugeloberfläche vorstellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausdehnt. Der Bruchteil dieses Lichts, der am Detektor auf der Erde ankommt, entspricht dem Bruchteil der **Oberfläche dieser Kugel**, den das Areal des Detektors ausmacht. Damit hängt die Energiemenge pro Zeit und Areal (der Fluss, f), die vom Detektor gemessen wird, vom Abstand (d_L , die sogenannte Leuchtkraftentfernung) zur Supernova, d.h. vom Radius der Lichtkugel, ab (siehe auch Abbildung 3):

$$f = \frac{L}{4\pi d_L^2}$$

Wenn ForscherInnen für einige nahe Supernovae den Abstand anhand anderer Messungen bestimmen können, können sie L anhand von f ziemlich genau ermitteln. Der Clou ist nun, dass die Leuchtkraft wie erwähnt für alle Supernovae des Typs Ia relativ gleich ist. Wenn ForscherInnen nach einer solchen Kalibrierung eine Supernova beobachten und f messen, können sie den Abstand (d_L) zu dieser neuen Supernova ermitteln, indem sie sich einfach auf die ermittelte Leuchtkraft anderer Supernovae mit einer ähnlichen Lichtkurve beziehen. Die durchschnittliche Supernova hat übrigens eine Leuchtkraft von Viermilliarden Sonnen. Eine einzige Supernova strahlt somit heller als so manche Galaxie.

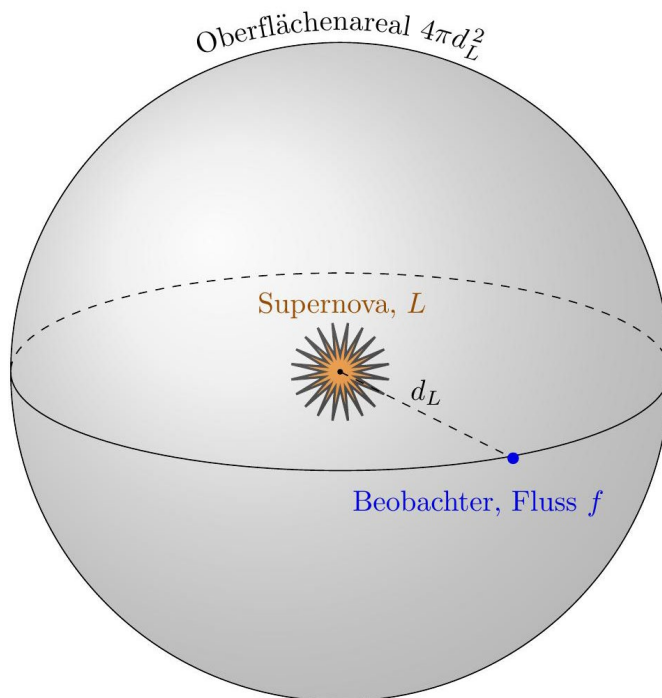


Abbildung 3: Ein Stern, der sich in einem Abstand d_L von der Erde befindet, wird zur Supernova. Die Leuchtkraft der Supernova wird als L bezeichnet. Nur ein Bruchteil des Lichts kommt jedoch beim Beobachter an, da das Licht der Explosion gleichmäßig in alle Richtungen ausgestrahlt wird. Wenn Licht beim Detektor ankommt, ist das Licht, das gleichzeitig von der Supernova ausgestrahlt wurde, daher gleichmäßig auf einer Oberfläche von $4\pi d_L^2$ verteilt.

©: Andreas Jørgensen, CC0.

Da stellt sich natürlich folgende Frage: Wieso möchte man Abstände im Universum so genau festlegen? Genaue Abstandsmessungen sind wichtig, um auf die Expansionsgeschichte des Kosmos Schlüsse ziehen zu können. So gilt für kleine Werte der sogenannten Rotverschiebung (z):

$$d_L \approx \frac{c}{H_0} z \left(1 + \frac{1-q_0}{2} z \right).$$

Hier bezeichnen H_0 die Hubble-Konstante (den gegenwärtigen Wert des Hubble-Parameters) und q_0 ist ein Parameter, der Veränderungen in der Expansionsrate des Universums beschreibt. Diese Gleichung mag euch auf den ersten Blick nicht bekannt vorkommen, aber ihr habt eine vereinfachte Form vielleicht schon im Astronomieunterricht gesehen: Setzen wir q_0 gleich null, erhalten wir das Hubble-Gesetz.

Anhand von Abstandsmessungen zu Supernovae des Typs Ia haben WissenschaftlerInnen in den Neunzigerjahren des letzten Jahrhunderts die Expansion des Universums mit großer Genauigkeit untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass sich die Expansion des Universums im Laufe seiner Geschichte beschleunigt hat, was unser Verständnis vom Kosmos grundlegend änderte: Ein Universum, dessen Expansion beschleunigt, enthält Dunkle Energie (siehe auch [Übungsaufgabe 7](#)). Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt und Adam G. Riess erhielten 2011 den Nobelpreis der Physik für diese Messungen.

Supernovae in die Karten schauen

[Zurück zum Anfang](#)

Wissenschaftliche Zweige wie die Physik können Experimente durchführen, um Hypothesen und Theorien zu testen, und um mehr über ein Phänomen in Erfahrung zu bringen. AstrophysikerInnen können sich auch auf solche Experimente beziehen. Man kann beispielsweise viel über die Thermodynamik oder Plasmen im Labor in Erfahrung bringen und sich dann auf dieses Wissen stützen, wenn man Sterne verstehen möchte. Weder mit Sternen noch mit Supernovae lassen sich jedoch Experimente durchführen. Wie können WissenschaftlerInnen dann überhaupt so genaue Aussagen über die einzelnen Schritte einer Supernova Explosion machen?

AstronomInnen können zwar keine Experimente, aber dafür sehr genaue Beobachtungen anstellen (siehe [Übungsaufgaben 13 und 14](#)). Um diese Beobachtungen zu interpretieren, vergleichen AstrophysikerInnen ihre Messungen mit theoretischen Überlegungen, die sich wie schon erwähnt auf Experimente aus dem Labor stützen. Dafür arbeiten AstrophysikerInnen mit und an sehr detaillierten Computermodellen, die über viele Jahrzehnte von etlichen WissenschaftlerInnen geprüft, verfeinert und entwickelt wurden, um alle wesentlichen Fakten miteinzubeziehen. Anders ausgedrückt simulieren AstrophysikerInnen Supernovae am Computer und vergleichen ihre Vorhersagen mit den erhobenen Daten, um Rückschlüsse auf die Prozesse machen zu können, die sich während einer Supernova abspielen.

Literatur und Internetquellen

[Zurück zum Anfang](#)

- [1] Peter Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology*, 2006, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN-13 978-3-540-33174-2
- [2] Barbara Ryden, *Introduction to Cosmology*, 2003, Pearson Education, Addison Wesley, ISBN 0-8053-8912-1
- [3] Norbert Langer, *Nucleosynthesis*, Bonn University, SS 2012. Das Dokument ist als PDF auf https://astro.uni-bonn.de/~nlangers/siu_web/nucscript/Nucleo.pdf zu finden.

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2011/press-release/>

Auch auf Wikipedia gibt es zu diesem Thema interessante Beiträge

<https://de.wikipedia.org/wiki/Supernova>

https://de.wikipedia.org/wiki/Supernova_vom_Typ_Ia

Übungsaufgaben

[Zurück zum Anfang](#)

1. Während seiner Entwicklung verändern sich beispielsweise Leuchtkraft und Oberflächentemperatur eines Sterns. Versucht herauszufinden, wie sich die Sonne in groben Zügen entwickeln wird. Untermauert eure Erklärung mit konkreten Werten. Ihr könnt hierzu Recherchen im Internet anstellen (z.B. auf <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonne>). Wie würdet ihr euer Wissen an eure Mitschüler weitergeben?
2. Elektromagnetische Strahlung übt Druck auf seine Umgebung aus. Wenn Licht beispielsweise auf eine Oberfläche scheint, übt das Licht eine Kraft auf diese Oberfläche aus. Mit anderen Worten, wenn wir genügend Licht auf einen geeigneten Gegenstand scheinen würden, könnte das Licht den Gegenstand *in Bewegung* setzen. Das klingt erstmals merkwürdig, da wir keine solchen Erfahrungen im Alltag sammeln, und trotzdem liefert dieses Phänomen einen wichtigen Beitrag zu dem Druck im Inneren der Sonne und hat verschiedene wissenschaftliche Anwendungen. Zum Beispiel könnte man mithilfe des Strahlungsdrucks sogenannte Sonnensegel herstellen. Was hat es damit auf sich? Recherchiert Antriebe, die in der Raumfahrt Verwendung finden oder finden könnten.
3. Im Haupttext dieses Beitrags wird die Struktur massereicher Sterne nur insoweit besprochen, als Supernovae erklärt werden können. Hierfür kommt der Text ausschließlich auf die Fusionsreaktionen im Zentralbereich des Sterns während seiner Entwicklung zu sprechen. Während in der Hülle keine Fusionsreaktionen stattfinden, können in tieferen Regionen außerhalb des Kerns sehr wohl Fusionsprozesse ablaufen, die Brennmaterial verbrauchen, das im Kern schon längst versiegt ist. Bei einem Stern, der Heliumbrennen im Zentralbereich betreibt, findet Wasserstoffbrennen immer noch in einer Schicht außerhalb des Kerns statt. Man spricht von Schalenbrennen. Recherchiert zu diesem Thema (z.B. auf <https://de.wikipedia.org/wiki/Schalenbrennen>).
4. Weiße Zwerge bestehen aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Sollte ein solches Objekt irgendwie große Mengen seiner Materie an seine Umgebung verlieren und auf die Größe der Erde schrumpfen, bliebe ein planetengroßer Diamant zurück. Der Exoplanet PSR J1719-1438b könnte ein solcher Himmelskörper sein. Wenn ihr mehr über Exoplaneten lernen wollt, taucht mit WIS tiefer ins Thema ein.
WissenschaftlerInnen haben viele Exoplaneten gefunden, die in unserem Sonnensystem kein Äquivalent haben. Lerne mit WIS mehr über solche kuriosen Planeten:

- <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/wasser-im-umfeld-der-sterne/1571216>
- <https://www.spektrum.de/alias/material/exoplaneten-es-liegt-was-in-der-luft/1571220>

Wie entstehen Planeten?

- <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/das-projekt-alma-mater/1285836>

Wie können wir Planeten um fremde Welten aufspüren?

- <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/auf-der-suche-nach-fernen-welten/1421052>
- <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/auf-der-jagd-nach-exoplaneten-anwendung-der-transitmethode-mit-originaldaten-des-spitzer-weltraumtel/1571204>

Was wissen wir über das Leben auf Planeten außerhalb des Sonnensystems?

- <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/erdaehnliche-planeten-in-der-milchstrasse-auf-der-suche-nach-leben/1421049>
- <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/astro-biochemie-in-der-schule/1571140>

5. Supernovae des Typs 1b und 1c wurden kurz im Text erwähnt. Es handelt sich bei den Sternen, die zu solchen Supernovae werden, um sogenannte Wolf-Rayet-Sterne. Findet heraus, was es mit diesen Sternen auf sich hat, und recherchiert auch zu den Themen Sternwinde und Riesensterne.
6. Wenn die Sonne am Ende ihrer Entwicklung steht, wird sie zu einem Weißen Zwerg aus Kohlenstoff und Sauerstoff werden. Nach dem Kohlenstoffbrennen hören bei der Sonne somit die Fusionsreaktionen auf. Es gibt aber auch andere Arten von Weißen Zwergen, die aus anderen Elementen bestehen. Wie kommt das? Und aus welchen Elementen bestehen diese Weißen Zwerge?
7. Was hat es mit Dunkler Materie und Dunkler Energie auf sich? Recherchiert zu diesen Themen.
8. Erklärt Abbildung 3 und die Argumente hinter der dazugehörigen Gleichung im Text mit eigenen Worten.
9. Erklärt, wie es zu einer Supernova des Typs II kommt. Erstellt hierfür Skizzen der einzelnen Schritte in der Sternentwicklung, dem Kollaps und der Explosion. Schreibt zu jeder Skizze einen kurzen beschreibenden Text.
10. Wiederholt Übungsaufgabe 11 für Supernovae des Typs 1a.
11. Tycho Brahe beobachtete 1572 eine Supernova des Typs 1a. Im vorherrschenden, kirchlich geprägten Weltbild der damaligen Zeit war ein solches Himmelsphänomen undenkbar, da man der Überzeugung war, dass das Himmelszelt unveränderlich sei, weshalb Tychos Beobachtung zum Fall des alten Weltbilds beitrug. Er bezeichnete den neuen Lichtpunkt genau so, als neu, im lateinischen Nova, woraus sich der Name „Supernova“ herleitet. Welche anderen Beobachtungen, Personen, und Gedanken trugen damals zum Übergang vom alten (Ptolemäischen) zum neuen (Kopernikanischen) Weltbild bei?
12. Die Leuchtkraft einer Supernova des Typs 1a entspricht der Leuchtkraft von Viermilliarden Sonnen. Gebt diese Leuchtkraftangabe in einer Einheit, die euch geläufiger ist, an.
13. Wie hat die Astrophysikerin Jocelyn Bell Burnell zum wissenschaftlichen Verständnis von Neutronensternen beigetragen?
14. Wie hat die Astronomin Henrietta Swan Leavitt zum Konzept von Standardkerzen beigetragen?

Lösungen zu den Übungsaufgaben

[Zurück zum Anfang](#)

- Zu 1.** Diese Aufgabe lädt zu Recherchen und zu Diskussionen in kleinen Gruppen oder im Plenum ein. Man könnte beispielsweise die Entwicklung der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm darstellen.
- Zu 2.** Diese Aufgabe lädt zu selbständigen Projekten und Präsentationen ein.
- Zu 3.** Diese Aufgabe lädt zu selbständigen Projekten und Präsentationen ein.
- Zu 4.** Diese Aufgabe lädt zu vielen selbständigen Projekten und Präsentationen ein.
- Zu 5.** Diese Aufgabe lädt zu selbständigen Projekten und Präsentationen ein.
- Zu 6.** Bei einem Stern, der wesentlich masseärmer als die Sonne ist, kommt es nach dem Wasserstoffbrennen nicht zum Heliumbrennen. Stattdessen verbraucht der Stern seinen gesamten Wasserstoff als sogenannter blauer Zwerg. Übrig bleibt am Ende ein Weißer Zwerg, der aus Helium-4 besteht. Wiederum kann es bei Sternen, die wesentlich massereicher sind als die Sonne, nach dem Heliumbrennen zum Kohlenstoffbrennen kommen. Wenn es danach nicht zum **Neonbrennen** reicht, bleibt unter gewissen Umständen dann ein Weißer Zwerg aus Sauerstoff, Neon und Magnesium zurück. Es kann aber auch zur Supernova kommen.
- Zu 7.** Diese Aufgabe lädt zu selbständigen Projekten und Präsentationen ein.
- Zu 8.** Diese Aufgabe lädt zu Diskussionen in kleinen Gruppen oder im Plenum ein.
- Zu 9.** Diese Aufgabe lädt zu Diskussionen in kleinen Gruppen oder im Plenum ein.
- Zu 10.** Diese Aufgabe lädt zu Diskussionen in kleinen Gruppen oder im Plenum ein.
- Zu 11.** Bei dieser Projektaufgabe könnte man sich auch beispielsweise eine Zusammenarbeit mit den Fächern Geschichte und Deutsch vorstellen. Hierzu ist das Theaterstück *Das Leben des Galilei* von Bertolt Brecht als Diskussionsvorlage sehr zu empfehlen. Man kann auf die konkreten Geschehnisse und Personen eingehen, aber auch den Fokus auf die Frage lenken, was Wissenschaft ausmacht: Ein wissenschaftliches Weltbild steht und fällt mit seiner Fähigkeit Beobachtungen zu erklären.
- Zu 12.** Die Leuchtkraft der Sonne entspricht $3,846 \cdot 10^{26}$ W, eine unvorstellbare Zahl. Auf ein Jahr gerechnet entspricht das einer Energieproduktion von $1,21 \cdot 10^{34}$ J. Im Vergleich dazu betrug der Primärenergieverbrauch Deutschlands im Jahr 2018 nur $1,31 \cdot 10^{16}$ J. Die Sonne könnte also den Energieverbrauch von Deutschland ungefähr neunhundertzwanzig Millionen Milliarden Mal decken.
- Zu 13.** Jocelyn Bell Burnell entdeckte 1967 den ersten Pulsar, und lieferte damit die ersten Beobachtungen eines Neutronensterns.
- Zu 14.** Henrietta Swan Leavitt beobachtete Cepheiden, eine Art pulsierender Sterne, und entdeckte einen Zusammenhang zwischen ihrer absoluten Leuchtkraft und der Periode ihrer Helligkeitsschwankungen. Dieser Zusammenhang bedeutet, dass Cepheiden als Standardkerzen eingesetzt werden können.