

Das Werden und das Vergehen der Sterne

1. Sternentstehung - Das nukleare Feuer beginnt zu brennen.

Sterne entstehen aus interstellaren Gas und Staub - Wolken, die auch als Nebel bezeichnet werden. Bei genauerer Betrachtung von Aufnahmen heller Nebel findet man häufig kleine dunkle Blasen, die nach ihrem Entdecker, dem amerikanischen Astronomen Bart J. Bok, Bok-Globulen genannt werden. Sie senden Infrarot und Radiostrahlung aus, die uns anzeigt, dass sie die Geburtsstätten von Sternen sind.

Kurz nach Entstehung des Universums, als die Materie noch eine Temperatur von vielen Hunderttausend Grad hatte, konnten keine Sterne entstehen. Mit der zunehmenden Ausdehnung des Weltalls kühlte der Wasserstoff jedoch ab. Etwa zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall entstanden die Protogalaxien, in denen das Gas zu Nebelwolken kondensierte. An einigen Stellen stieg die Dichte des Gases auf eine Konzentration von Milliarden Molekülen pro Kubikmeter. Diese Dichte, obwohl immer noch weit geringer als die des besten je in einem Labor hergestellten Vakuums, gab der Schwerkraft die Möglichkeit, die Materie noch weiter zu verdichten.

Während dieses Geschehens heizten sich die Zentren jeder Globule auf, wie die Luft beim Aufpumpen eines Autoreifens. In allen Blasen erreichte die Temperatur Werte, bei denen zunächst die Moleküle zerlegt und später sogar durch den Verlust der äußeren Elektronen ionisiert wurden. Mit der Aufnahme neuer Materie stieg der Druck auf die Zentralregion noch weiter an.

Dieser Protostern produzierte bereits große Energiemengen, obwohl noch keine Kernreaktionen stattfanden. Doch kein sichtbares Licht konnte durch die Gas- und Staubhülle in seiner Umgebung entkommen, lediglich Infrarotstrahlung vermochte sie zu durchdringen. Gleichzeitig wurde die Lage im Kern des Protosterns kritisch. Hier hatte sich die Dichte milliardenmal verstärkt und die Temperatur Werte von 10 Millionen Kelvin und mehr erreicht. Die positiv geladenen Wasserstoffatome des Kerns, die nun keine Elektronen mehr besaßen, wurden so stark komprimiert, dass sie die hohen elektrischen Abstoßungskräfte überwinden und zusammenstießen. Aus dem Wasserstoff entstand Helium, aus dem Protostern wurde ein echter Stern.

Jeder Heliumkern besaß etwas weniger Masse als der Wasserstoff, aus dem er entstanden war. Die verschwundene Masse wurde entsprechend der von Einstein entdeckten Formel $E = mc^2$, in Energie umgesetzt. Beim Versuch dieser riesigen Energiemengen aus dem Kern zu entweichen, stieg die Temp dort noch weiter an. Nur seine große Masse verhinderte das er in diesem Stadium explodierte. Als die Strahlung schließlich den Weg nach außen gefunden hatte, setzte sie die Konvektion in Gang. Das tiefliegende Gas wurde aufgeheizt, stieg an die Oberfläche kühlte ab und sank wieder, um den Zyklus von neuem zu beginnen. Der junge Stern blies seine Hülle aus Gas und Staub fort und wurde somit für den Rest des Universums sichtbar.

Der gleiche Prozess der Sternentstehung findet auch heute noch unverändert statt. Die Radioastronomen glauben, Teile dieses Geschehens in einigen Nebeln, z.B. im Orion, kurz beobachtet zu haben. Doch nicht jede Gas und Staubwolke entwickelt sich zu einem Stern. Besitzt sie zu wenig Masse, genügt die Gravitationskraft nicht, um eine ausreichende Dichte zu schaffen. Die Temperatur steigt nicht über den kritischen Wert bei dem die Kernfusion beginnt. Ein "Stern", der unter diesen Bedingungen dennoch entsteht, wird kaum sichtbar, und nur aufgrund seiner Infrarotstrahlung zu finden sein.

In unserem Bereich der Milchstrasse, besonders in den Spiralarmen, scheint es viele derartige Objekte zu geben. Sie heissen braune Zwerge. Einige der misslungenen Sterne besitzen nur die Grosse des Planeten Jupiter und heissen folglich auch Jupiters. Fertige Sterne tragen Merkmale der Aera, aus der sie stammen. Die ersten nach dem Urknall entstandenen Sterne bestanden aus Urmaterie, Wasserstoff mit einer Beimengung von Helium. Spaetere Sternengenerationen entstanden aus Urmaterie, die sich mit den Resten explodierter Sterne vermischt hatte. Sie enthalten auch schwerere Elemente, als Helium, die vor der Explosion im Inneren alter Sterne entstanden waren. Da auch in der Sonne diese Elemente zu finden sind, gehoert sie offensichtlich nicht zu den Sternen der ersten Generation.

Wenn sich an einem Ort mehrere Protosterne entwickeln, entstehen Sterne nicht einzeln sondern in Gruppen. Sie bilden einen von der Gravitation zusammengehaltenen Sternenhaufen mit einer gemeinsamen Bewegung sowie einer Einzelbewegung, die der gemeinsamen ueberlagert ist.

2. Lebenslauf der Sterne - Wege der Sternentwicklung

Der komplexe Lebenszyklus eines Sterns wird von der Kernreaktion bestimmt. Kurz nach seiner Geburt aus einer Bok- Globule und mit Beginn der Kernfusion in seinem Inneren erscheint jeder Stern in der Nahe der Hauptreihe. Der genaue Ort ist abhaengig von seiner Masse. Sehr kleine Sterne mit etwa einem Viertel Sonnenmasse treten als rote Zwerge vom M Typ auf. Die massereichere Sonne begann ihr Leben auf der Hauptreihe weiter oben, noch schwerere Sterne sogar erst an deren Ende. Alle Sterne verbringen den grossten Teil ihres Lebens auf der Hauptreihe, dabei veraendern sie, solange ihr Wasserstoffvorrat anhalt, ihre Position nur geringfueig. Im Sterninneren entsteht derweil ein grosser Kern aus nicht reaktionsfahiger "Heliumasche". Waehrend die aeusserere Wasserstoffhuelle noch "brennt", zieht sich dieser Kern zusammen, seine Temperatur steigt. Jetzt verlaesst der Stern die Hauptreihe.

~ ~ Die Lebenserwartung eines Sterns sowie seine Position auf der Hauptreihe haengen von seiner Masse ab. Ein schwacher roter Zwerg entwickelt sich so langsam, dass er 200 Milliarden Jahre braucht, bis er die Hauptreihe verlaesst; die Sonne wird sie nach etwa 10 Milliarden Jahren verlassen. Hat seine Entwicklung einen sonnenahnlichen Stern von der Hauptreihe weggefuehrt, expandiert er bis zum 50fachen seiner bisherigen Grosse. Ab dann kuehlt er ab, wird roeter und bewegt sich im HRD daher nach rechts. Mit zunehmender Grosse strahlt er heller, so dass er seine Position im HRD nach oben verlaert. Es entsteht ein roter Riese. Zu dieser Zeit besteht das Sterninnere hauptsachlich aus Kohlenstoff und Sauerstoff, die aus der Verbrennung von Helium hervorgingen (S. 82-83). Der Stern erreicht seinen letzten Lebensabschnitt. Zunachst nimmt der Energieausstoss ab, und der Stern schrumpft. Das Sterninnere dehnt sich jedoch nochmals aus, so dass der Stern fuer kurze Zeit abermals zu einem roten Riesen wird. Doch ploetzlich tritt eine Veraenderung ein: Die in Kernnahe entstandene Energie stoesst die aeusserere Huelle ab, der Stern wird voruebergehend von einem Gasmantel umgeben: Ein planetarischer Nebel ist entstanden. Anschliessend beginnt der Stern zu schrumpfen, bis nur noch ein superdichter Kern uebrigbleibt, in dessen aeusseren Bereichen immer noch Kernfusion stattfindet. Der Stern endet als weisser Zwerg, der langsam auskuehlt und verblasst (S. 88-89). Nach dem Eintritt in die Hauptreihe braucht ein sonnenahnlicher Stern etwa zehn Milliarden Jahre, um das Stadium eines roten Riesen zu erreichen. Massereichere Sterne leben kuertzer, da die Kernfusion hier mit hoeherer Intensitaet ablauft. Sterne mit fuemffacher Sonnenmasse brauchen nur 70 Millionen Jahre, Sterne mit 1,5facher Sonnenmasse sogar nur zehn Millionen Jahre, um sich zu roten Riesen zu entwickeln.

3. Der Tod eines Sterns - Wenn der Brennstoff ausgeht

Einige Sterne beenden ihr Leben auf eindrucksvolle Weise: Eine gewaltige Explosion reisst Sie auseinander. Andere erleiden weniger gewaltsame Ruhestoerungen, und werden im Laufe im

Laufe der Jahrtausende einfach unsichtbar. Welche Faktoren bestimmen die Todesart eines Sterns?

Sobald im Lebenslauf eines Sternes in seinem Inneren die Heliumverbrennung beginnt, verlässt der Stern die Hauptreihe und fängt an, sich auszudehnen. Er entwickelt sich zu einem Roten Riesen, oder - wenn er sehr massereich ist - zu einem Superriesen. Später verwandelt er sich in einen veränderlichen Stern. Er stösst seine äusseren Hüllen ab; und damit entsteht ein planetarischer Nebel, der bereits den nahen Tod ankündigt.

Der einfachste Fall ist der eines Sterns, wie der Sonne deren Grösse etwa in der Mitte zwischen den Extremen liegt. Ein "normaler" wie sie führt ein gemächliches Leben. Zu Beginn seiner Entwicklung zum planetarischen Nebel ist er sehr klein und sehr heiss da er sein Helium bereits verbraucht hat. Nach der Entstehung des Nebels wird der Zentralstern noch kleiner und kühlt ab.

Etwa um 1920 untersuchte der indische Astrophysiker Chandrasekhar wie sich ein solcher Zentralstern weiterentwickelt und entwarf die Theorie der weissen Zwerge. Er schoss aus der Schrumpfung des Sterns auf eine gewaltige Zunahme der Gravitation im Zentrum und somit auf eine höhere Materiedichte als normal. Derartige Materie bezeichnet man als degeneriert.

Degenerierte Materie war vor der Quantentheorie unbekannt. Normale Materie ist aus Atomen aufgebaut, deren Kerne jeweils von einem oder mehreren Elektronen umkreist werden. Die Anzahl der Elektronen hängt von der Art des Atoms ab. Das Pauli-Prinzip besagt dass sich in einem gegebenen Raum keine zwei Elektronen in dem selben Zustand befinden, Energie, Spin usw. also nicht gleich sein können. Die Elektronen sind daher gezwungen verschiedene Energieniveaus einzunehmen; damit sorgen sie für ihre räumliche Trennung und verhindern gleichzeitig den Kollaps der Atome sowie den Anstieg der Materiedichte, auf mehr als um den 90fachen Wert des Wassers. Im Sterninneren sind die Atome aufgrund der extrem hohen Temperaturen vollständig ionisiert - in Atomkern und Elektronen zerlegt - und können daher stärker zusammengepresst werden. Im Inneren eines schrumpfenden Sterns wird die Materie noch mehr komprimiert. Doch nach dem Pauliprinzip befinden sich hier auch keine 2 Elektronen im dem selben Zustand. Da die Elektronen immer dichter zusammengepresst werden, müssen sie ihre Geschwindigkeit unablässig steigern, so bauen sie einen Druck auf, der dem Druck der Gravitation entgegenwirkt.

Bei Sternen mittlerer Masse (bis zu 1.4 Sonnenmassen), wird der Elektronendruck hoch genug um im Zentrum eine Verdichtung auf mehr als eine Tonne pro Kubikzentimeter (10000 x dichter als dichteste Materie auf der Erde) zu verhindern. Dieser Zustand ist das erste Stadium der Entartung, der Druck im Sterninneren heisst Entartungsdruck.

Zu diesem Zeitpunkt hat der Stern seine Hülle bereits in den Raum geschleudert. Das Innerer liegt frei, und ist so heiss dass es weiss leuchtet. Der Stern lebt nun als weisser Zwerg weiter dessen Temp. nicht mehr für den Ablauf komplexer Kernreaktionen ausreicht. Er leuchtet nur durch Abgabe der in seinem Inneren noch vorhanden Energie, so dass er langsam abkühlt, erblasst und sich schliesslich zu einem schwarzen Zwerg entwickelt.

Beobachtungen haben die Existenz weisser Zwerge tatsächlich bestätigt. 1844 führte man die Taumelbewegung des Sirius auf einen unsichtbaren Begleiter zurück, dieser Begleiter Sirius B wurde 1862 entdeckt. Aus seiner Anziehungskraft auf Sirius berechnete man seine Masse die etwa der Sonne entsprach. Da Untersuchungen des Lichts von Sirius B jedoch max. auf einen 100fachen Erddurchmesser schliessen liessen handelt es sich hier um einen weissen Zwerg. Seither wurde 100derte weisser Zwerge entdeckt. Wie oben bereits dargestellt läuft dieser Vorgang bei allen Sternen mit max. 1.4 facher Sonnenmasse ab (diese Zahlen nennt man Chandrasekharlimit). Liegt der Stern über dieser Grenze steigt die Temperatur in seinem Kern so hoch dass neue

komplexere Kernreaktionen ablaufen, in deren Verlauf selbst so schwere Elemente wie Eisen entstehen. Sobald der Kern jedoch vollständig in Eisen umgewandelt ist, sind keine weiteren Kernreaktionen zur Energiegewinnung mehr möglich. Der Druck, der den Zusammenbruch verhindert, kann nicht länger aufrecht erhalten werden. Die Gravitationskraft eines solchen Sterns überwindet sogar den Entartungsdruck der Elektronen; es kommt zu einem katastrophalen Zusammenbruch; nachdem der Kern eine vielfach höhere Dichte aufweist als ein weißer Zwerg. Elektronen und Protonen prallen zusammen und bilden Neutronen; es entsteht Neutronengas.

Der Kern schrumpft solange bis die Geschwindigkeit der Neutronen einen ausreichenden Entartungsdruck aufgebaut hat und einen weiteren Zusammensturz verhindert. Da Neutronen etwa 2000mal schwerer sind als Elektronen, kann Neutronengas einen wesentlich höheren Druck aushalten als Elektronengas. Der Kern befindet sich jetzt in einem superdichten Zustand.

Der Zusammenbruch des Kerns löst eine Supernovaexplosion aus, es gibt jedoch ein weiteres Kollapsstadium, das nur die massereichsten Sterne mit über 5facher Sonnenmasse erreichen. Bei ihrem Zusammenbruch durchschlägt die Gravitationskraft der äußeren Materie sogar den dichten Neutronenkern. Auch wenn ihre Hülle in einer Supernovaexplosion weggeschleudert wird, bleibt ein dunkler Rest des Kerns übrig. Da sich weder Materie noch Energie von diesem Stern entfernen können, entsteht ein schwarzes Loch. Im Jahre 1054 beobachteten chinesische Astronomen das plötzlich ein neuer Stern im Sternbild Stier aufgetaucht war. Er leuchtete so hell, dass er sogar am Taghimmel sichtbar blieb. Es handelt sich hier um die erste aufgezeichnete Explosion einer Supernova, deren Reste heute den Krebsnebel bilden. Seit 1604 konnte in unserer Milchstraße keine so helle Supernova mehr beobachtet werden. In anderen Galaxien hat man jedoch schon 100erlei entdeckt.

Supernova Typ 1 tritt auf, wenn ein Mitglied eines Doppelsternsystems ein weißer Zwerg ist. Der weiße Zwerg nimmt die Materie aus den äußeren Schichten seines Begleiters auf, die beim Aufprall verbrennt. Der weiße Zwerg wird dadurch vernichtet.

Eine Supernova vom Typ 2 tritt auf, wenn ein Einzelstern plötzlich zusammenbricht. Aus Berechnungen weiß man, dass der Stern am Ende seines Lebens im Kern Eisen produziert. Der Eisenkern zerfiel wieder in leichtere Elemente, und Elektronen und Protonen verbanden sich zu Neutronen. Der Kern entwickelte sich zu einem Neutronenstern. Aufgrund des Eigengewichts stürzt der Rest der Sternmaterie auf den Kern und strahlt Energie ab.