

Die Chandrasekhar-Grenze

Wenn ein Stern sozusagen sein Leben aushaucht, geschieht dies auf unterschiedliche Weise, je nach Masse des Sterns. Hat ein Stern seinen primären Kernbrennstoff, also seinen gesamten Wasserstoff in Helium umgewandelt, beginnt das sogenannte Heliumbrennen. Ist auch das erloschen, folgen später weitere Kernfusionen zu schwereren Elementen, und zwar bis zum Eisen und Nickel. Dabei steigen Temperatur und Druck stetig an bis der Stern sozusagen "ausgebrannt" ist. Danach kollabiert er zu einem **Neutronenstern** oder gar **Schwarzen Loch**. Dies gilt allerdings nur für massereiche Sterne. Die masseärmeren, wie z. B. die Sonne, verenden hingegen vergleichsweise friedlich, indem sie sich zunächst zu einem Roten Riesen aufblähen, um dann unter Abstoßung der äußeren Hülle zu einem **Weißem Zwerg** zu degenerieren. Das Ganze ist ein Wechselspiel zwischen dem sich in den verschiedenen Fusionsphasen im Stern aufbauenden Strahlungsdruck und der ihm entgegenwirkenden Gravitation, die von der Masse des Sterns abhängt. Normalerweise bleibt also nach dem Tod eines regulären Sterns immer eine "Leiche" übrig. Allerdings gibt es eine Ausnahme.

Erreicht nämlich ein nicht sehr massereicher Stern durch Ansammeln von Materie die sogenannte **Chandrasekhar-Grenze von $\approx 1,46$ Sonnenmassen**, dann kann dieser Stern unter bestimmten Bedingungen als **Ia-Supernova** schlagartig explodieren, ohne dass auch nur die Spur einer Sternleiche übrigbleibt. Diese Grenze wird nach dem indischen Astrophysiker *Subrahmanyan Chandrasekhar* (1910 – 1995) benannt, der das seinerzeit völlig unerwartete Schicksal eines Sterns mit 1,46 Sonnenmassen erstmalig beschrieb. Dieses Phänomen lässt sich, wie folgt, erklären, wenn man die Energiebilanz des Sterns betrachtet.

Die Dauer der Existenz von Sternen, also ihre "Lebenserwartung" und die Art ihres Sterbens wird durch den ständigen Kampf zwischen dem, durch die verschiedenen Phasen der Kernfusion (Wasserstoff \rightarrow Helium, \rightarrow Kohlenstoff, Sauerstoff \rightarrow bis zu Eisen, Nickel) verursachten Strahlungsdruck und der Gravitation seiner Masse bestimmt. Dabei ergibt sich folgende Energiebilanz: Gesamtenergie des Sterns $E_{\text{Str}} = E_{\text{kin}} - E_{\text{grav}}$.

Stirbt nun ein Stern, d. h. erlischt die Kernfusion, so ergeben sich die o. g. Stadien seiner Überreste:

$$E_{\text{Str}} > 0 \Rightarrow \text{Reststern : weißer Zwerg}$$

$$E_{\text{Str}} < 0 \Rightarrow \text{Reststern : Neutronenstern, schwarzes Loch}$$

Nun gibt es aber auch noch die Möglichkeit, dass die kinetische Energie exakt der Gravitationsenergie entspricht. Also $E_{\text{Str}} = 0$. Das hat zur Folge, dass der Stern bei Erreichen dieses Zustandes als Ia-Supernova spontan explodiert und sein gesamtes Material in den Raum schleudert ohne einen Reststern zu hinterlassen. Dieser Punkt, an dem die Masse des Sterns den Wert von genau 1,457 Sonnenmassen erreicht, ist, wie gesagt, die Chandrasekhar-Grenze bzw. Chandrasekhar-Masse.

Der Ablauf der Explosion ergibt sich daraus, dass die Vorläufersterne von Ia-Supernovae je einen Kohlenstoff-Sauerstoff-Kern bereits als Weißem Zwerg unterhalb der Chandrasekhar-Masse in sich tragen (Zentralsterne Planetarischer Nebel). Dieser Kern ist nichts Anderes als ein, unter extrem hohem Druck stehendes, hoch-explosives Kohlenstoff-Sauerstoffgemisch,

dessen Temperatur aber zunächst **nicht** für eine weitere Kernfusion ausreicht. Drumherum haben diese Vorläufersterne eine Hülle aus Wasserstoff und Helium, die dem Kern durch nukleares Schalenbrennen immer mehr Materie in Form von Kohlenstoff zuführen, bis die Chandrasekhar-Masse des Kerns erreicht wird und somit schlagartig das nukleare Kohlenstoffbrennen einsetzt. Sobald dies der Fall ist, explodiert der Stern. Die bei der Explosion frei werdende Strahlungsenergie ist bei allen Ia-Supernovae so gut wie gleich, das heißt, alle Ia-Supernovae haben bis auf geringfügige Abweichungen immer die gleiche Leuchtkraft. Die spontane Explosion des Sterns selbst beruht auf sehr komplexen Vorgängen, die im Wesentlichen durch die Quantenphysik bestimmt werden.

Für die Astronomen ist dieses Ereignis ein Glücksfall, weil aus der Leuchtkraft eines strahlenden Objekts über dessen scheinbare Helligkeit, die wir messen können, auf seine Entfernung zu uns geschlossen werden kann. Allerdings sind Ia-Supernovae äußerst selten. So ist im statistischen Mittel nur eine Ia-Supernova pro Galaxie und Jahrhundert zu erwarten, sodass sie erst in jüngerer Zeit durch den Fortschritt der Großteleskope-Technik als "Leuchttürme" / Standardkerzen zur Entfernungsbestimmung genutzt werden können.

Peter Steffen