

Veränderliche Sterne als kosmische Informationsquellen (Teil 2 von 2)

Nach einem historischen Abriss der Entdeckung veränderlicher Sterne und einer Aufstellung der Klasseneinteilung im ersten Teil wird nachfolgend auf die Cepheiden näher eingegangen. Ein typisches Beispiel ist der 1784 im Sternbild Kepheus entdeckte Stern δ Cephei, nach dem die ganze Gruppe später benannt wurde. **Bild 1** zeigt die Lichtkurve dieses Sterns, d.h. die Helligkeit über der Pulsationsphase. Innerhalb einer Periode von 5 Tagen ändert der Stern seine Helligkeit um eine Größenklasse.

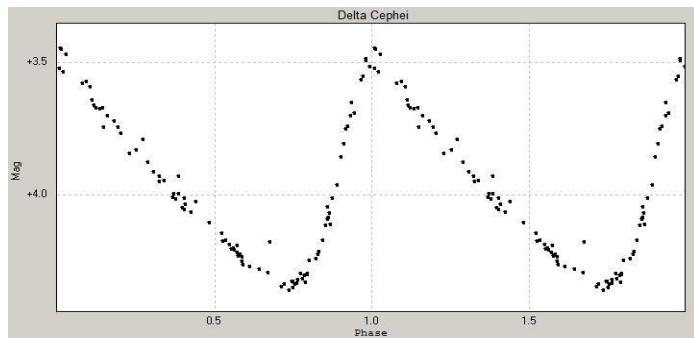


Bild 1 Lichtkurve von Delta Cephei¹

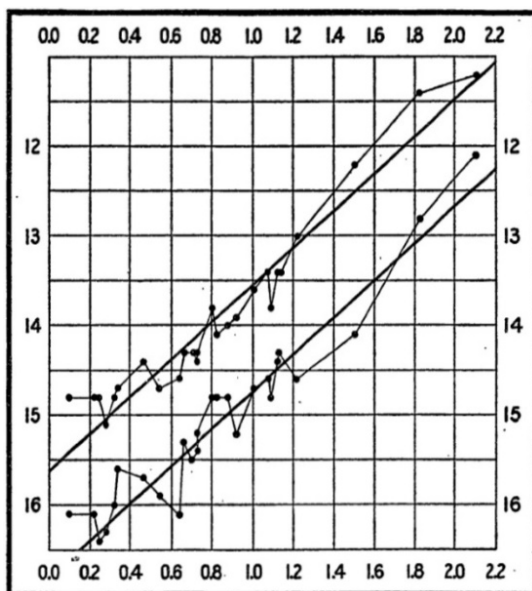


Bild 2 Perioden von 25 veränderlichen Sternen in der Kleinen Magellanschen Wolke²

Die amerikanische Astronomin Henrietta Swan Leavitt untersuchte im Jahre 1912 den Zusammenhang zwischen der scheinbaren Helligkeit und der Periodenlänge veränderlicher Sterne in der Kleinen Magellanschen Wolke. **Bild 2** zeigt die über der logarithmischen Periodenlänge aufgetragenen minimalen und maximalen Helligkeiten. Wie in einem früheren Newsletter³ näher erläutert, wurde hieraus die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung für Cepheiden ermittelt, die seitdem mit einigen Präzisierungen erfolgreich für Entfernungsbestimmungen angewendet wird.

Als Ursachen für den Leuchtkraftwechsel wurden periodische Temperatur- und Radiusänderungen des Sterns ausgemacht. Die Temperaturänderungen wurden an Hand von Farbänderungen ermittelt, da jeder Temperatur eine bestimmte Spektralfarbe zugeordnet werden kann. Die Radiusänderungen

wurden durch die Spektrallinierverschiebungen infolge des Dopplereffektes nachgewiesen. Dehnt sich der Stern aus, kommt seine Oberfläche auf uns zu und es erfolgt eine Farbverschiebung zu kürzeren Wellenlängen, d.h. in Richtung blau und umgekehrt bei der Kontraktion wegen der zunehmenden Wellenlänge in Richtung rot.

Wie der Kurvenvergleich in **Bild 3** verdeutlicht, hat die Temperatur einen deutlich höheren Einfluss auf die Strahlung als der Radius, da nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz für die Strahlungsleistung P eines schwarzen Strahlers mit dem Radius R und der absoluten Temperatur T gilt: $P \sim R^2 * T^4$

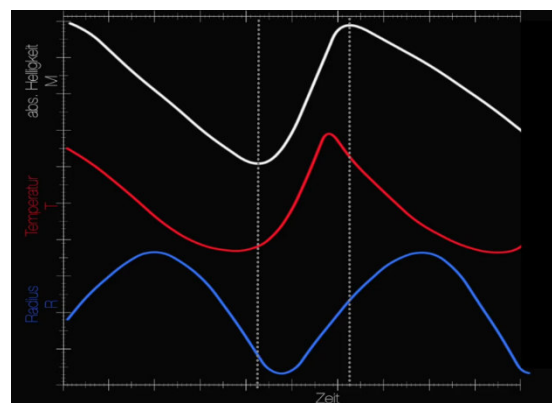


Bild 3 Zusammenhang zwischen Helligkeit (weiß), Temperatur (rot) und Radius (blau) von Cepheiden (schematisch)⁴

Grund für das Pulsieren ist der sogenannte Kappa-Mechanismus, benannt nach dem griechischen Buchstaben κ , der zur Bezeichnung der Opazität (Trübung oder Lichtundurchlässigkeit) verwendet wird. In diesem Zusammenhang ist wesentlich, dass die Opazität eines strahlungsdurchlässigen Mediums um so höher ist je höher die Anzahl der freien Elektronen ist. Diese Tendenz verstärkt sich mit steigender Temperatur. Normalerweise herrscht in einem Stern ein Kräftegleichgewicht zwischen der Gravitationskraft, die den Stern zusammenpresst und dem durch die Kernfusion erzeugten Strahlungsdruck, der den Stern auseinandertreibt. Treten Abweichungen von diesem Gleichgewichtszustand auf, kann es zum radialen Pulsieren kommen⁵. Bei den meisten Sternen (z.B. auch unserer Sonne) sind diese Pulsationen sehr klein. Pulsationen nach dem Kappa-Mechanismus können dann auftreten, wenn in der richtigen Tiefe unter der Sternoberfläche eine Schicht unvollständig ionisierten Heliums vorliegt. Dazu muss der Stern eine ganz bestimmte Temperatur und Leuchtkraft haben. Cepheiden und andere pulsierende Sterne sind im Hertzsprung-Russel-Diagramm⁶ in einem engen sogenannten Instabilitätsstreifen angeordnet (**Bild 4**).

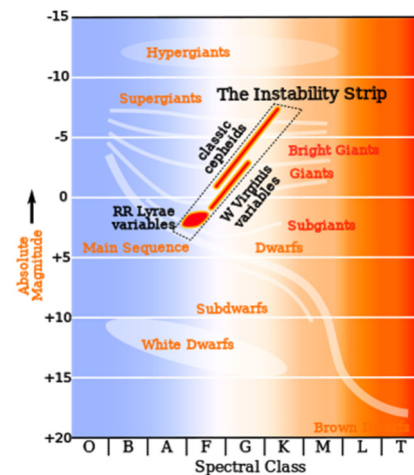


Bild 4 Hertzsprung-Russel-Diagramm mit eingefügtem Instabilitätsstreifen⁷

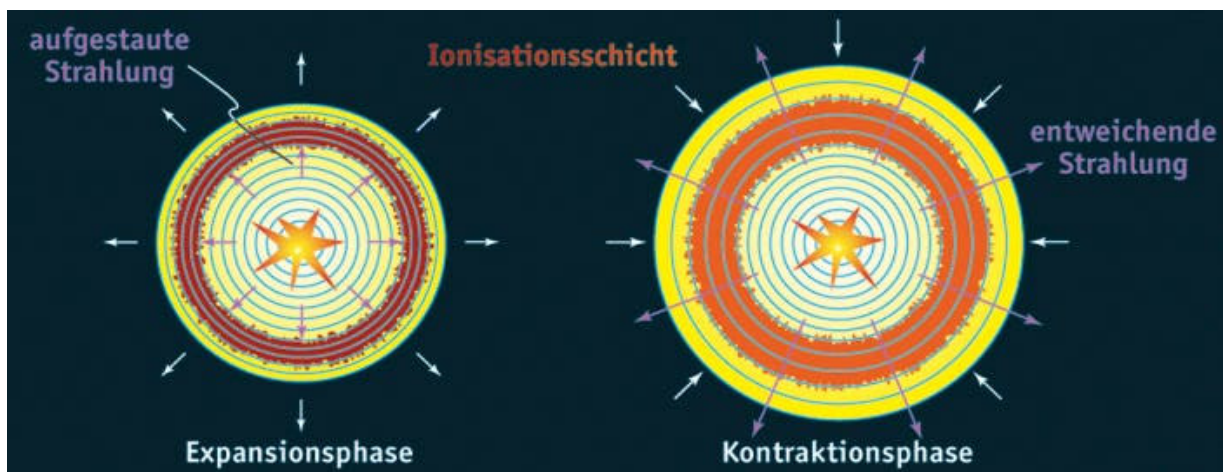


Bild 5 Schema der Pulsation eines Cepheiden⁸

Der Kappa-Mechanismus (**Bild 5**), der mit dem Verhalten einer Dampfmaschine vergleichbar ist (mit der Opazität als Entsprechung zu einem Ventil), läuft wie folgt ab^{8,9}:

- Wenn in einem kontrahierenden Stern die o.g. Schicht in Richtung Zentrum absinkt, verdichtet sie sich und heizt sich auf.
- Da diese Schicht unvollständig ionisiertes Helium enthält, wird dieses stärker ionisiert und die Opazität steigt („Das Ventil schließt.“).
- Unter der Schicht kommt es zum Strahlungstau und steigendem Druck, was eine Expansion der Schicht zur Folge hat.
- Dadurch kühlt die Schicht wieder ab - der Druck und die Opazität sinken.
- Durch die zunehmende Strahlungsdurchlässigkeit („Das Ventil öffnet.“) kann die angestaute Strahlung entweichen.
- Durch die entweichende Strahlung nimmt der Druck unterhalb der Schicht ab, wodurch diese unter dem Gravitationseinfluss in Richtung Sterninneres komprimiert wird. Damit beginnt der Zyklus wieder von vorn.

Der im Sterninneren ablaufende Kappa-Mechanismus kann natürlich nicht direkt beobachtet werden, sondern wurde aus dem Abgleich von Ergebnissen aus Modellrechnungen mit Beobachtungen hergeleitet.

Quellen

1	https://de.wikipedia.org/wiki/Cepheiden
2	https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Henrietta_Swan_Leavitt#/media/File:HSLeavittHSCr13Fig2_1912.jpg
3	https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter_2023_06.pdf
4	https://www.youtube.com/watch?v=GKoPbk_A7Kk
5	file:///C:/Users/User/Downloads/suw_2003_10_S48-2.pdf
6	https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter_2020_04.pdf
7	https://de.wikipedia.org/wiki/Ver%C3%A4nderlicher_Stern
8	https://www.spektrum.de/news/ein-cepheid-stoppt-seine-pulsation/1060891
9	https://de.wikipedia.org/wiki/Kappa-Mechanismus