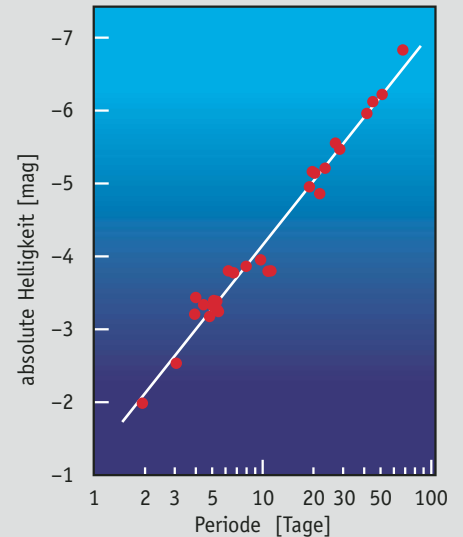


Cepheiden – Meilensteine im Universum

VON GERHARD MÜHLBAUER

Cepheiden sind eine Art periodisch veränderlicher Sterne, mit denen die Entfernungen im Weltall bestimmt werden können. Dadurch sind sie bis heute für viele Bereiche der Astronomie von großer Bedeutung. Wie funktioniert dies, und wie kommt die Veränderlichkeit der Cepheiden zustande? Neben diesem Überblick haben wir im Internet weiteres Material zu diesem Thema zusammengestellt.



▲ Abb. 1: Perioden-Leuchtkraft-Beziehung von nahen Cepheiden, deren Entfernungen mit unabhängigen Methoden bestimmt wurden. (Bild: Michael W. Feast und Alis-tair R. Walker, ARA&A 1987)

Die Bestimmung der Entfernung zu astronomischen Objekten ist eine zentrale Aufgabe der Astronomie, denn nur so können wir den dreidimensionalen Aufbau des Kosmos rekonstruieren. Eine einfache Möglichkeit der Entfernungsbestimmung bietet die Parallaxen-Methode. Sie macht sich die perspektivische Verschiebung naher Sterne vor dem fernerer Sternenhintergrund zu nutze, die sich infolge der unterschiedlichen Positionen der Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne ergeben. Dies ähnelt der Beobachtung, dass sich nahe Gegenstände beim abwechselnden Fixieren mit dem rechten oder linken Auge scheinbar verschieben. Die Bestimmung von Parallaxen ist die älteste Methode, um Entfernungen außerhalb des Sonnensystems zu bestimmen. Zugleich ist es die einzige, die wirklich absolute Entfernungsmaße liefert, sofern man den Durchmesser der Erdbahn kennt. Leider ist die Parallaxen-Methode nur für sehr nahe Sterne anwendbar, auch wenn die Grenzen mit Hilfe von Satellitenmissionen in den letzten Jahren weiter hinaus getrieben wurden und noch weiter getrieben werden

Eine andere wichtige Methode verwendet eine bestimmte Art von Veränderlichen Sternen, den nach ihrem Prototyp δ Cephei so bezeichneten Cepheiden. Die Helligkeit dieser Sterne weisen periodische Schwankungen auf (Abb. 2). Die Perioden sind je nach Stern verschieden und können zwischen wenigen Tagen und etwa 100 Tagen liegen. Es sind sehr helle Sterne, so genannte Überriesen, mit mittleren absoluten Helligkeiten

im Bereich von -3 bis -7 mag. So hell würden sie uns erscheinen, wenn sie zehn Parsec (32,6 Lichtjahre) von uns entfernt wären. Um diese, von Stern zu Stern unterschiedliche mittlere Helligkeit herum, erfolgen die Schwankungen, deren Amplituden meist zwischen 0,5 mag und 1,5 mag betragen.

Perioden-Leuchtkraft-Beziehung

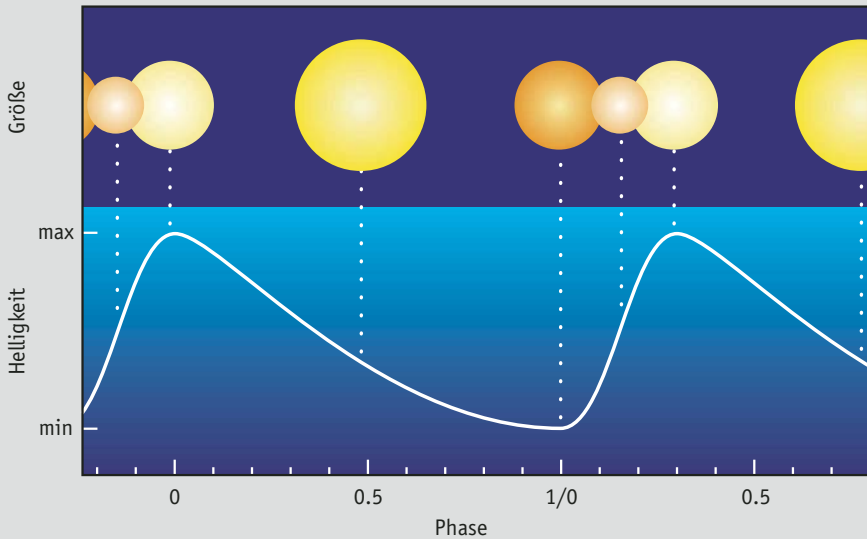
Entscheidend ist nun, dass die mittleren Helligkeiten dieser Sterne offenbar mit der Periode ihres Lichtwechsels in einem festen Zusammenhang stehen. Und zwar ist die Periode umso länger, je größer die mittlere absolute Helligkeit ist (Abb. 1). Henrietta Leavitt, eine Astronomin des Harvard College Observatoriums, hat diese Perioden-Leuchtkraft-Beziehung im Jahre 1912 entdeckt.

Leavitt erkannte, dass man diese Beziehung zur Entfernungsmessung heranziehen konnte. Wenn man die Beziehung nämlich erst einmal kalibriert hat, also den tatsächlichen Verlauf der Perioden-Leuchtkraft-Kurve kennt, so kann man aus einer Messung der Periode auf die absolute Helligkeit schließen. Damit kann man die Differenz zwischen der beobachteten und der absoluten Helligkeit berechnen. Aus dieser Differenz folgt unmittelbar die Entfernung, wobei gilt: Je weiter ein Stern entfernt ist, desto schwächer erscheint er. Eine Voraussetzung ist, dass man von der interstellaren Extinktion durch Staub absehen kann.

Um zum Beispiel die Entfernung der Andromeda-Galaxie mit Hilfe von Ce-

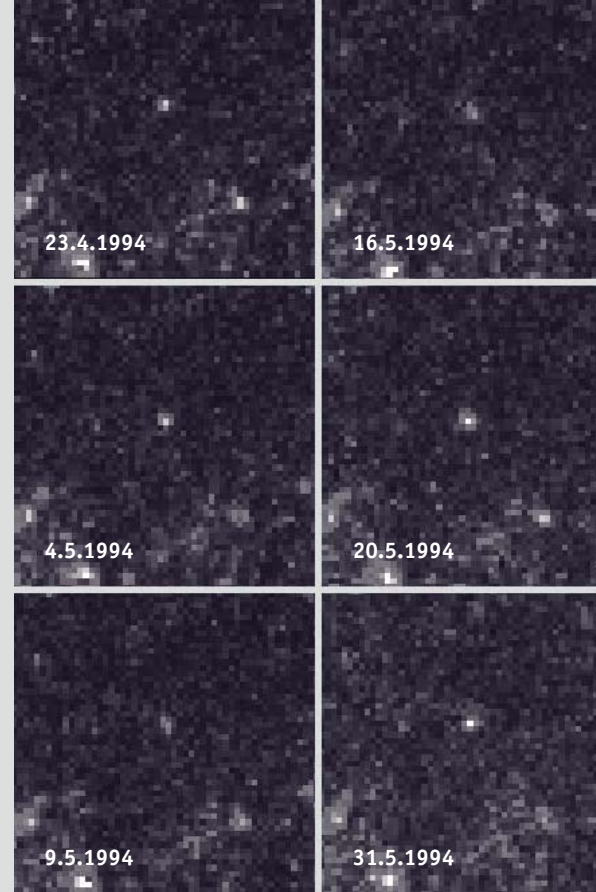
pheiden zu bestimmen, lautet das Rezept folgendermaßen: Man versuche, Cepheidensterne in der Galaxie auszumachen, bestimme ihre Perioden und messe zugleich ihre individuellen scheinbaren Helligkeiten. Dann rechne man jede Periode mittels der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung in eine absolute Helligkeit um. Aus der Differenz von absoluter und scheinbarer Helligkeit folgt dann die Entfernung.

Um die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung zu kalibrieren, muss man zumindest die Entfernung einiger Cepheiden kennen. Einen der ersten Versuche, diese Beziehung zu kalibrieren, machte Harlow Shapley, damals am Mount-Wilson-Observatorium, im Jahr 1918. Von da an waren Cepheiden die bevorzugte Methode zur Bestimmung extragalaktischer Entfernungen (Abb. 3). Dass Hubble im Andromeda-Nebel Cepheiden fand, trug zum Nachweis der extragalaktischen Natur dieses »Spiralnebel« entscheidend bei (siehe Seite 34). Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Methode ist natürlich, dass die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung universell ist, also von allen Cepheiden im Universum gleichermaßen befolgt wird. Dass diese Annahme nicht selbstverständlich ist, hat Walter Baade, ebenfalls am Mount-Wilson-Observatorium, in den 1950er Jahren gezeigt. Baade erkannte, dass Cepheiden, die besonders metallarmen Sternpopulationen angehören, um etwa 1,5 mag lichtschwächer sind als solche in der Sonnenumgebung. In der Folge mussten damals nahezu alle extragalaktischen Entfernungen auf rund das Doppelte korrigiert werden.

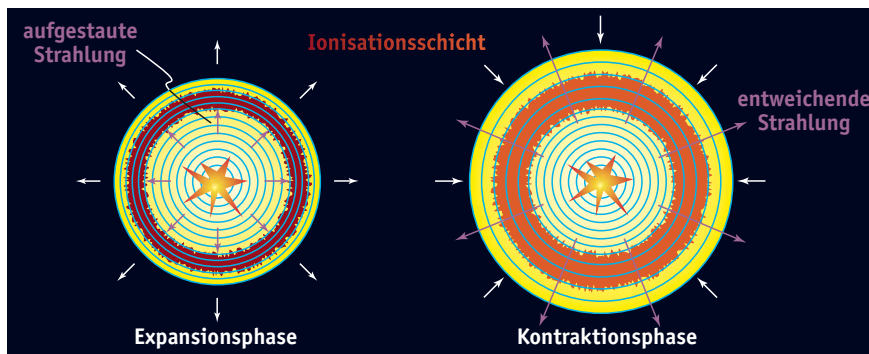


▲ Abb. 2: Schematische Darstellung der Lichtkurve eines Cepheiden. Im Verlauf einer Periode variieren neben der Helligkeit sowohl die Größe als auch die Farbe des Sterns.

▼ Abb. 4: Pulsation von Sternen nach dem Kappa-Mechanismus. Eine äußere Schicht des Sterns wirkt dabei zeitweise als Ventil für die aus seinem Inneren kommende Strahlung.



▲ Abb. 3: Cepheide in M 100, einer Spiralgalaxie des Virgo-Galaxienhaufens. Auf diesen Aufnahmen, die mit dem Weltraumteleskop HUBBLE belichtet wurden, ist deutlich die Helligkeitsschwankung des Sterns zu erkennen. Aus Beobachtungen von insgesamt 20 Cepheiden in dieser Galaxie wurde die Entfernung zu M 100 zu 56 Millionen Lichtjahren bestimmt. (Bild: NASA)



Pulsierende Sterne

Die Helligkeitsveränderungen der Cepheiden beruhen auf radialen Schwingungen, d.h. der Radius dieser Sterne wird abwechselnd größer und kleiner. Man weiß dies, weil man die Geschwindigkeit der Sternoberfläche auf uns zu oder von uns weg durch Doppler-Verschiebungen ihres Spektrums messen kann. Woher aber kommen diese rhythmischen Änderungen der Radien?

Eine einfache Erklärung für Pulsationen von Sternen ist der so genannte Epsilon-Mechanismus (siehe SuW 2/2003, S. 40). Dieser beruht darauf, dass bei Kontraktion eines Sterns die Kernfusionsprozesse im Inneren intensiver ablaufen, und dadurch den Stern wieder expandieren lassen. Es scheint aber, dass dieser Mechanismus bei keiner der bekannten Arten pulsierender Sterne relevant ist.

Die Pulsationen von Cepheiden und anderen, ähnlich pulsierenden Sternen, verlaufen hingegen nach einem Schema, das Kappa-Mechanismus genannt wird. Dieser Mechanismus ähnelt dem Verhal-

ten einer Dampfmaschine: Unter bestimmten Umständen kann die Sternmaterie die im Zentralbereich in Form von Gammastrahlung erzeugte Energie wie ein Ventil aufstauen und dann plötzlich freigeben. Ähnlich wie bei der Dampfmaschine (siehe SuW 2/2003, Seite 40) entsteht daraus eine periodische Bewegung. Im Gegensatz zum Epsilon-Mechanismus werden aber nur die äußeren Sternschichten von der Pulsation erfasst.

Diese Ventilwirkung kommt nur unter ganz speziellen Bedingungen zustande. Sinkt in einem kontrahierenden Stern eine Schicht in Richtung des Zentrums, so wird sie verdichtet und aufgeheizt. Normalerweise sollte dadurch ihre Durchlässigkeit für Strahlung steigen. Wenn aber die Schicht beispielsweise unvollständig ionisiertes Helium enthält, so wird dieses dabei stärker ionisiert. Die Schicht wird in diesem Fall weniger durchlässig für Strahlung. Astrophysiker sagen, dass ihre »Opazität«, also ihre Undurchsichtigkeit, steigt. Unterhalb der Schicht wird sich Strahlung aufstauen,

deren steigender Druck schließlich zu einer erneuten Expansion führt. Wenn dadurch die Temperatur der Schicht wieder sinkt, nimmt auch der Ionisationsgrad des Heliums wieder ab und die Strahlungsdurchlässigkeit wird rasch größer: Das Ventil öffnet sich (Abb. 4).

Pulsationen nach dem Kappa-Mechanismus können nur dann funktionieren, wenn eine Schicht unvollständig ionisierten Heliums vorhanden ist, und diese muss in genau der richtigen Tiefe unterhalb der Sternoberfläche liegen. Diese Verhältnisse liegen nur in Sternen vor, die ganz bestimmte Temperaturen und Leuchtkräfte besitzen.

Im Hertzsprung-Russell-Diagramm liegen die Cepheiden alle in einem Gebiet, das Instabilitätsstreifen genannt wird. Darin befinden sich nicht nur die Cepheiden, sondern auch die im Beitrag von Sidney van den Bergh (S. 40) erwähnten RR-Lyrae-Sterne. □

Weitere Informationen: www.suw-online.de, Rubrik »Astronomie in der Schule«.