

Der Soundcheck der Sterne

Anhand der Eigenschwingungen von Sternen lässt sich ihre innere Struktur erkunden.

Saskia Hekker

Die Asteroseismologie untersucht die innere Struktur von Sternen anhand ihrer Eigenschwingungen. Diese globalen Oszillationen treten in einem oder mehreren Resonanzräumen auf und enthalten Informationen über die dort vorliegenden physikalischen Bedingungen. Aus den beobachteten Signaturen der Schwingungen, beispielsweise Variationen der Oberflächenhelligkeit oder der Geschwindigkeit, lassen sich die Bedingungen und damit die stellare Struktur ableiten.

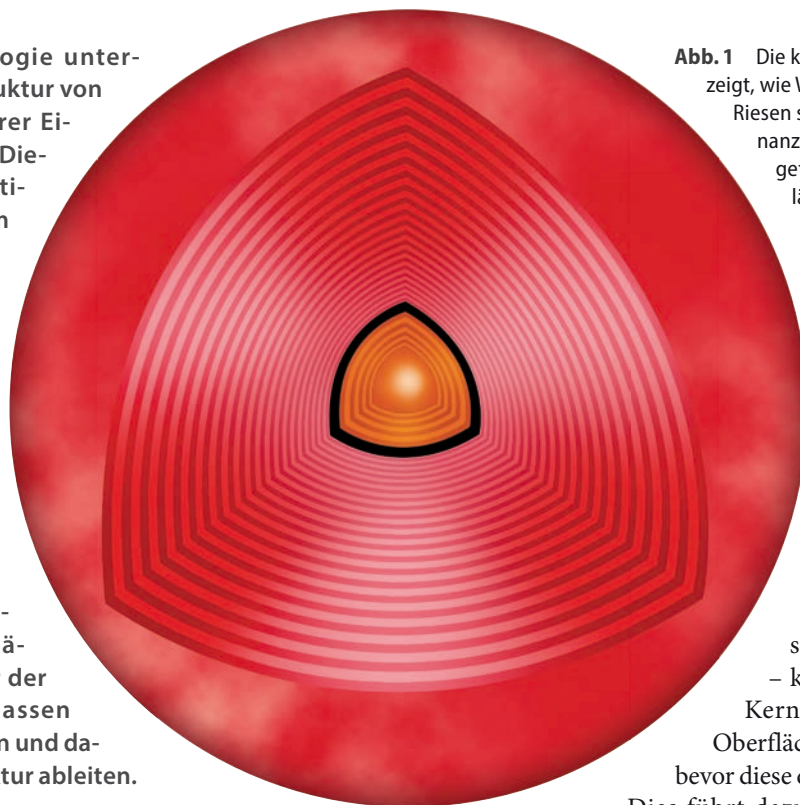


Abb. 1 Die künstlerische Darstellung zeigt, wie Wellen in einem Roten Riesen schwingen: in zwei Resonanzräumen (orange und rot), getrennt durch eine undurchlässige (evaneszente) Zone (schwarz).

Die Frage, warum und wie Sterne ihre innere Struktur verändern, beschäftigt die Astronomie seit über einem Jahrhundert. Arthur Eddington schrieb 1926 [1]: „Our telescopes may probe farther and farther into the depths of space; but how can we ever obtain certain knowledge of that which is hidden beneath substantial barriers? What appliance can pierce through the outer layers of a star and test the conditions within?“ Zunächst führte dies zu einem allgemeinen Verständnis von Sternen, das weitgehend auf gemessener Temperatur, chemischer Zusammensetzung und der Gravitation an der Oberfläche in Kombination mit mathematischen Modellen beruhte. Die Beobachtungen der sichtbaren äußeren Schichten von Sternen grenzten die Modelle zwar ein, gaben aber keinen Aufschluss über die innere Sternstruktur.

Beim Erforschen des Sterninneren hilft die Asteroseismologie, welche die intrinsischen globalen Schwingungen der Sterne untersucht. Sterne lassen sich in gewisser Weise als Musikinstrumente auffassen. Je nach Form und Größe des Resonanzraumes ändert sich der Klang eines Musikinstruments, etwa einer Posaune. Sterne besitzen ebenfalls natürliche Resonanzen, d. h. stehende Wellen, die in einem Resonanzraum schwingen. Betrachten wir Sterne

als Instrumente, so lösen intrinsische Mechanismen die Eigenresonanzen aus: Eine Schicht – in der aufgrund von Druck und Temperatur Eisen oder Helium teilweise ionisiert vorliegen – kann Energie, die vom Kern des Sterns zu seiner Oberfläche fließt, einschließen, bevor diese die Oberfläche erreicht. Dies führt dazu, dass sich der Stern ausdehnt. Dabei wird die teilweise ionisierte Schicht für den Energiefluss wieder durchlässiger, und der Stern zieht sich zusammen [1, 2]. Wirkt dieser sogenannte κ -Mechanismus in einer angemessenen Tiefe des Sterns, so kann er dessen globale Schwingungen wie in einem Resonanzraum antreiben.

Sterne senden allerdings keinen Schall aus – dafür wäre ein Medium zur Wellenausbreitung nötig. Da die Wellen das Sternmaterial komprimieren und ausdehnen, können wir jedoch ihre Auswirkungen sehen, deren Eigenschaften von der inneren Struktur des Sterns abhängen: Im Lauf der Zeit ändern sich Helligkeit oder Geschwindigkeit an der Oberfläche. Diese Variationen können aus photometrischen Daten oder anhand der Doppler-Verschiebung aus spektroskopischen Zeitreihendaten gewonnen werden. Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Empfindlichkeit für die Schwingungsamplitude, die von mehreren Größenordnungen von Magnituden bzw. km/s bis zu Mikromagnituden bzw. cm/s reicht. Die Variationen lassen sich aufgrund der Oszillationen messen, wenn einerseits die Beobachtungsfrequenz für die Oszillationsperiode des Sterns geeignet ist. Diese reicht für verschiedene Sterne von Sekunden über Minuten bis hin zu Stunden und Tagen. Andererseits

muss die Dauer der Zeitreihe mindestens eine Periode der Oszillationen abdecken und einzelne Frequenzen auflösen, falls mehrere vorhanden sind. Die gemessenen Variationen dienen gewissermaßen als Soundcheck des Sterns, mit dem sich auf die Form und Größe des Resonanzraums schließen lässt. Die zeitlichen Variationen liefern zusätzliche Informationen zu den typischen spektroskopischen und photometrischen Messungen von effektiver Temperatur, Gravitation und chemischer Zusammensetzung an der Sternoberfläche.

Atmende Sterne und solare Oszillationen

Die Beobachtungen veränderlicher Sterne begannen bereits vor einigen Jahrhunderten, zunächst anhand von Helligkeitsschätzungen mit dem Auge, später mithilfe photometrischer Platten. Der Ursprung der Veränderlichkeit war zu dieser Zeit noch unbekannt. Erst nach Beginn des 20. Jahrhunderts war man in der Lage, zwischen Sternen mit periodischen Helligkeitsvariationen, die von einem intrinsischen Mechanismus herrühren, und Sternen, bei denen eine externe Quelle wie ein Begleitstern die Variation verursacht, zu unterscheiden. Meist zeigen intrinsische und extrinsische Variabilität unterschiedliche Merkmale, d. h. die Lichtkurve einer Verfinsternung sieht anders aus als die einer Oszillation. In einigen Fällen, in denen die Zeitreihenbeobachtungen nicht auf den Ursprung der Variabilität schließen lassen, können zusätzliche Beobachtungen helfen, wie die Variation von Spektrallinienprofilen, oder die Kombination verschiedener Techniken, wie Photometrie und Spektroskopie, aber auch Astrometrie und immer mehr Interferometrie.

Die ersten Sterne, bei denen sich bestätigte, dass die Helligkeitsvariationen intrinsisch angetrieben sind, zeigen große „atmende“ Oszillationen, durch die sich der Radius eines Sterns auf kohärente Weise um einige Prozent ändern kann, während gleichzeitig seine Oberflächentemperatur um einige 100 Kelvin und seine Helligkeit um bis zu eine Größenordnung schwankt. Dazu zählen die Cepheiden, bei denen sich eine charakteristische Beziehung zwischen der Periode der Helligkeitsschwankungen und der Leuchtkraft als absolute Helligkeit ergab (Abb. 2). Diesen Zusammenhang entdeckte Henrietta Swan Leavitt, die als eine der „Harvard-Computer“ in den frühen 1900er-Jahren für Edward Pickering arbeitete, während sie Sterne in der Kleinen Magellanschen Wolke untersuchte. Die Cepheiden können als Standardkerzen für eine genaue Bestimmung kosmischer Entfernungen dienen, etwa von Galaxien und Sternhaufen, und trugen dazu bei, die Expansion des Universums zu entdecken. Obwohl die Perioden-Leuchtkraft-Relation selbst keine Aufschlüsse über die inneren Strukturen von Sternen gibt, brachte sie eine wichtige Erkenntnis für das Verständnis der stellaren Struktur: Sterne können Oszillationen zeigen. Daraus entwickelte sich das Gebiet der Asteroseismologie.

Es sollte rund 50 Jahre dauern bis zu einem wichtigen Meilenstein Anfang der 1960er-Jahre: der Entdeckung nicht-kohärenter Oszillationen mit geringen Amplituden deutlich unter einem Prozent. Solche Oszillationen ließen sich bei der Sonne durch die Messung von Doppler-Ver-

schiebungen nachweisen [4]. Turbulente Konvektion in den äußeren Schichten der Sonne regt diese Schwingungen stochastisch (d. h. zufällig) an. Dabei wird effektiv ein Teil der Konvektionsenergie in die Energie der globalen Oszillationen umgewandelt, die allgemein als sonnenähnlich bezeichnet werden. Die in der Sonne detektierten Oszillationen schwingen jeweils in leicht unterschiedlichen Resonanzräumen. Dies erlaubt es uns, die Sonnenstruktur in unterschiedlichen Tiefen zu beobachten und physikalische Prozesse in stellaren Modellen zu berücksichtigen, die zu diesen Beobachtungen passen.

Auf diese Weise lieferten die Sonnenschwingungen neuartige und detaillierte Einblicke ins Sterninnere. Wir wissen nun, dass die Sonne in ihrem Inneren bis zu etwa 70 Prozent ihres Gesamtradius starr wie ein fester Körper rotiert. Die äußeren Schichten rotieren dagegen am Äquator schneller als an den Polen (differentielle Rotation). An der Grenze zwischen starrer und differentieller Rotation existiert eine dünne Scherschicht. Vermutlich spielt diese sogenannte Tachocline eine wichtige Rolle bei der Bildung der Magnetfelder in der Sonne.

Entwicklung und innerer Aufbau der Sterne

Die Sonne befindet sich derzeit in der Hauptreihenphase, d. h. sie fusioniert in ihrem inneren Kern Wasserstoff zu Helium (zwischen Punkt A und B in Abb. 3). Schwingungsperioden in solchen Sternen betragen einige Minuten, d. h. die Frequenzen liegen zwischen 2000 und 4000 μHz . Sobald die Sonne ihren zentralen Wasserstoffvorrat erschöpft hat, verschiebt sich das Wasserstoffbrennen in eine konzentrische Schale um den Kern. Diese fügt dem wachsenden, trägen Heliumkern weiteres Material hinzu (zwischen Punkt B und G in Abb. 3). Die Oszillationsperioden erreichen eine

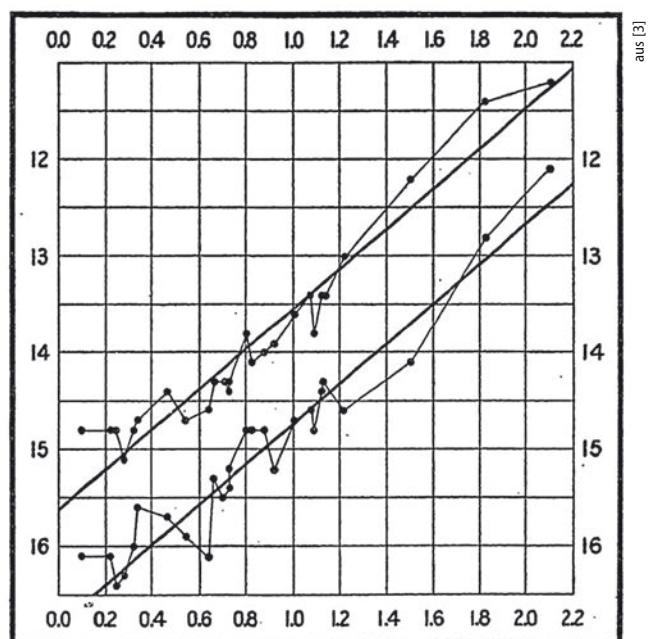


Abb. 2 Henrietta Leavitt entdeckte 1912 die Periode-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden-Sterne.

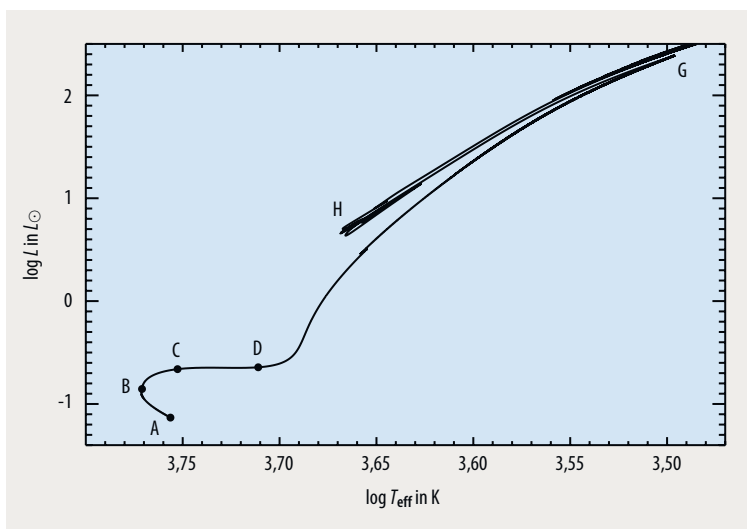


Abb. 3 Dieses Hertzsprung-Russell-Diagramm zeigt die Entwicklungslinie eines Sterns von einer Sonnenmasse mit solarer chemischer Zusammensetzung, berechnet mit dem MESA-Sternentwicklungs-Code (B. Paxton et al., *ApJS* **234**, 34 (2018)). Die Buchstaben kennzeichnen die Entwicklungsphasen des Sterns: Hauptreihe (A – B), Wasserstoff-Schalenbrennen (B – G), Helium-Kernbrennen (H).

Größenordnung von etwa 10 Minuten am Ende der Hauptreihe bis zu ein paar Stunden in der Nähe von G. Die Frequenzen liegen also zwischen etwa 1 mHz und 1 μ Hz. Während dieser Phase des Schalenbrennens wird sich die Sonne bis zum hundertfachen ihrer derzeitigen Größe ausdehnen. Ihre Oberflächentemperatur sinkt vom jetzigen Wert von 5777 K auf etwa 2000 K: Die Sonne wird zu einem Roten Riesen. Bei Sternen mit einer Gesamtmasse unter etwa 1,8 Sonnenmassen ist der inaktive Heliumkern während des größten Teils der Schalenbrennphase entartet. Er befindet sich in einem hochdichten Zustand, in dem quantenmechanische Effekte eine signifikante Rolle spielen und Druck und Temperatur nicht mehr gekoppelt sind.

Bei einer Kerntemperatur von etwa 10^8 K kann Helium zu Kohlenstoff fusionieren. Im hochgradig entarteten Kern des Sterns hängt der Druck nicht von der Temperatur ab. Daher gibt es keine thermostatische Steuerung zur Expansion und Kühlung des Kerns. Das Einsetzen der Heliumfusion in Sternen führt zu einem thermischen Runaway-Prozess, dem sogenannten Heliumblitz („helium flash“, Punkt G in **Abb. 3**). Dieser Prozess erzeugt für eine sehr kurze Zeit in der Größenordnung von wenigen Stunden einen enormen Überschuss an Kernenergie: In kurzen Episoden entsteht um Größenordnungen mehr Kernenergie als bei der Fusion während der thermischen Gleichgewichtsphasen. Diese Kernenergie wird durch die Expansion der nicht entarteten Schichten außerhalb des Kerns absorbiert und erreicht daher nicht die Sternoberfläche. In Sternmodellen ist dieser Heliumblitz eigentlich ein Anfangsblitz in einer konzentrischen Schale um das Zentrum des entarteten Kerns. Darauf folgt eine Reihe von Teilblitzen, wobei jeder nachfolgende sich näher am Zentrum befindet, wo die Materie noch entartet ist, sodass die Entartung im Zentrum schließlich vollständig aufgehoben wird. Dann befindet sich der Stern wieder im thermodynamischen Gleichgewicht, wobei Helium in einem konvektiven Kern und Wasserstoff in einer

Schale um den Heliumkern fusionieren. Es ist sehr unwahrscheinlich, einen Stern zu beobachten, der den Blitz durchläuft, weil dieser in einer kurzen Zeitspanne auftritt und weder seine Energie noch diejenige der Teilblitze die Sternoberfläche erreichen. Teilblitze konnten bisher nicht in realen Sternen beobachtet werden – sie könnten Artefakte der Sternmodelle sein.

Nach Einsetzen der Heliumfusion im Kern ist der Stern wieder im Gleichgewicht und pendelt sich am horizontalen Ast („red clump“, Punkt H in **Abb. 3**) ein. Die Schwingungsperioden liegen nun in der Größenordnung von ein paar Stunden, d. h. es treten Frequenzen zwischen etwa 20 und 50 μ Hz auf, wobei der Radius des Sterns etwa dem Zehnfachen des Sonnenradius entspricht. Da alle Sterne, die einen Heliumblitz durchlaufen, aufgrund der vorangehenden Entartung des Heliumkerns ähnliche Kernmassen besitzen, ähneln sich ihre Kernmassen auch nach dem Blitz. Sie weisen ähnliche Leuchtstärken und nur eine geringe Streuung der Oberflächentemperatur aufgrund der Unterschiede in Gesamtmasse und Zusammensetzung auf [5]. Trotz der Ähnlichkeit der Red-Clump-Sterne auf ihren Oberflächen erwartet man, dass die Blitze Spuren in den inneren Strukturen der Sterne hinterlassen. Diese Spuren zu finden und die Prozesse, die während des Heliumblitzes ablaufen, zu beobachten, ist eine typische Aufgabe der Asteroseismologie. Dabei schränken die zusätzlichen Informationen der intrinsischen globalen Oszillationen Sternmodelle weiter ein.

Asteroseismische Revolution

Es dauerte bis etwa 1995, sonnenähnliche Oszillationen, die stochastisch durch die Turbulenz in den äußeren Schichten des Sterns angeregt werden, auch in anderen Sternen sicher nachzuweisen [6]. Bis 2009 kamen Nachweise für eine Handvoll weiterer Sterne hinzu. Erst dann machten dedizierte Weltraumteleskope wie CoRoT und Kepler die Beobachtung von sonnenähnlichen Oszillationen in Tausenden von Roten Riesen sowie Hunderten von sonnenähnlichen Sternen möglich.

Für die Asteroseismologie sonnenähnlicher Oszillatoren sind kontinuierliche und hochpräzise Beobachtungen der Helligkeit oder der Radialgeschwindigkeit mit schneller Wiederholungszahl erforderlich. Die photometrischen Beobachtungen müssen vom Weltraum aus erfolgen, um Einflüsse der Erdatmosphäre zu vermeiden. Die wichtigsten Missionen sind CoRoT (Convection Rotation and planetary Transit, ESA) und Kepler (NASA). Beide beobachteten lange (80 Tage bis 4 Jahre) denselben Himmelsausschnitt, um die intrinsischen Helligkeitsschwankungen von Tausenden von Sternen zu messen. Die Beobachtungen dieser speziellen Weltraumteleskope führten zu einer asteroseismischen Revolution. Sowohl die CoRoT- als auch die Kepler-Mission sind inzwischen im Ruhestand. 2018 wurde der Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) erfolgreich gestartet und liefert asteroseismische Zeitreihendaten.

Aus den bisher beschriebenen Erkenntnissen über die Struktur und Entwicklung von Sternen ergeben sich in den Modellen Sterne, die aus zwei Resonanzräumen bestehen, in denen Schwingungen auftreten können. Für die Son-

ne bzw. Hauptreihensterne schwingen die beobachtbaren Oszillationen in der Regel in einem Resonanzraum, der die äußeren Schichten des Sterns umfasst. Bei Roten Riesen befindet sich der eine der beiden Resonanzräume im tiefen Inneren und der andere in den äußeren Schichten (**Abb. 1**). Die stehenden Wellen decken einen ähnlichen Frequenzbereich ab, und die nicht mitschwingende (evaneszente) Zone zwischen den Resonanzräumen ist relativ dünn. Dadurch können Wellen diese Zone durchdringen und den inneren und äußeren Resonanzraum „koppeln“. Informationen über den inneren Resonanzraum gelangen so zur Sternoberfläche und sind in den gemessenen Helligkeits- oder Geschwindigkeitsvariationen enthalten. Die Untersuchung dieser Variationen entspricht einem „Hinhinhören“ in die tiefen inneren Regionen von Roten Riesen [5].

Strukturabhängige Obertöne

Schwingungen werden meist in Form eines Fourier-Leistungsspektrums dargestellt. Ein Beispiel für ein solches Spektrum eines sonnenähnlichen Sterns zeigt **Abb. 4**: Jede markante Spitze in dieser Abbildung entspricht einer Oszillation mit einer bestimmten Frequenz. Jede Oszillationsmode besitzt eine bestimmte räumliche Konfiguration, die durch die Anzahl der Knotenlinien auf der Sternoberfläche, ihren Grad, charakterisiert ist. Jeder Satz aufeinanderfolgender Moden mit Grad $\{0, 1, 2\}$ ist ein Oberton mit einer bestimmten Anzahl von Knotenlinien im Inneren. Obwohl man erwartet, dass auch Schwingungsmoden höheren Grades angeregt werden, kann man im Allgemeinen aufgrund von Auslöschungseffekten im integrierten Licht nur Schwingungen mit einer begrenzten Anzahl von Knotenlinien bis zu 2 oder 3 auf der Oberfläche beobachten. Bei Schwingungen mit mehr Knotenlinien auf der Oberfläche teilt sich der sichtbare Oberflächenbereich so auf, dass sich die Netto-Hellfläche und die Netto-Dunkelfläche im Wesentlichen nicht verändern und keine Helligkeitsschwankungen im gesamten beobachteten Licht sichtbar sind.

Dank ihrer Empfindlichkeit gegenüber der inneren Struktur der Sterne können die Oszillationen in Kombination mit den Oberflächeneigenschaften (Temperatur und chemische Zusammensetzung) Aufschlüsse über die Sternmasse, den Radius und das Alter des Sterns mit bisher unerreichter Genauigkeit geben. Für den Sternradius lässt sich dies dadurch erklären, dass die Wellen bei größeren Sternen länger brauchen, um den ganzen Stern zu durchlaufen, was zu Schwingungen mit kleineren Frequenzen führt. Außerdem ist die typische Frequenzdifferenz zwischen aufeinanderfolgenden radialen Obertönen (in **Abb. 4** mit 0 gekennzeichnet) ein direktes Maß für die mittlere Dichte des Sterns. Mit dem bekannten Radius ist es möglich, die Sternmasse direkt abzuleiten.

Weder die Asteroseismologie noch andere Beobachtungsmethoden können das Alter eines Sterns direkt messen. Die zusätzlichen Informationen, die asteroseismische Messungen zur Verfügung stellen, liefern jedoch weitere Einschränkungen beim Vergleich der beobachteten Parameter mit denen, die aus Sternmodellen stammen. Dank

der genaueren Kenntnis der Sternmasse und des Sternradius ist die Asteroseismologie bei Altersbestimmungen genauer als andere remote-space-after-Verfahren, die z. B. nur auf Modellanpassung der Oberflächeneigenschaften beruhen.

Bei Roten Riesen koppeln die Moden mit dem Grad 1 am stärksten zwischen den Resonanzräumen und enthalten die meisten Informationen über das tiefe Innere des Sterns. Aus ihnen lassen sich sowohl Erkenntnisse über den Kern von Roten Riesen als auch über die Kopplung zwischen dem inneren und äußeren Resonanzraum ableiten. So bietet der Wert des charakteristischen Periodenabstands zwischen den verschiedenen Moden mit Grad 1 (**Abb. 4** unten) die Möglichkeit, zwischen Sternen mit einem inerten Heliumkern und Sternen, in deren Kern Heliumfusion stattfindet, zu unterscheiden. Ein Wert von etwa 100 Sekunden weist auf einen inerten Heliumkern hin, während größere Werte zwischen etwa 150 und 300 Sekunden bedeuten, dass Helium fusioniert [7, 8]. Dieser Unterschied entsteht, weil Sterne mit Heliumfusion einen konvektiven Kern besitzen, der die Form des inneren Resonanzraums verändert und damit größere Werte des charakteristischen Periodenabstands verursacht. Damit lassen sich erstmals gezielt Rote Riesen mit und ohne Heliumfusion untersuchen: Trotz sehr ähnlicher Oberflächeneigenschaften können sich ihre inneren Strukturen, Prozesse und ihr Alter deutlich voneinander unterscheiden.

Daran anknüpfend können wir nun aus dem Periodenabstand auf die Größe der Kerne schließen. Der Periodenabstand zwischen den Moden, die von Wellen im äußeren Resonanzraum dominiert werden, unterscheidet sich von demjenigen der Moden, die von Wellen im inneren Resonanzraum dominiert werden. Daraus lässt sich die Stärke der Kopplung zwischen den beiden Resonanzräumen ableiten und mithilfe von Phasenänderungen die Grenzen zwischen den Resonanzräumen und der evaneszenten Zone untersuchen [9]. Diese Informationen ermöglichen weitere Erkenntnisse über die stellare Struktur Roter Riesen. Das

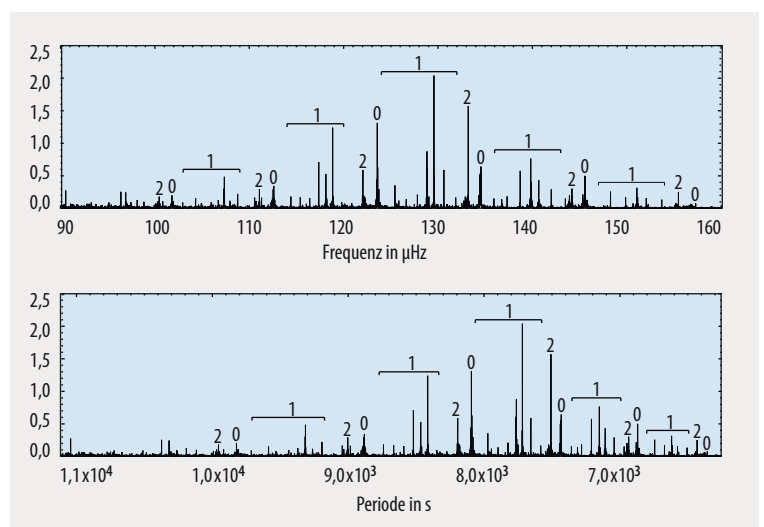


Abb. 4 Das Fourier-Spektrum eines Roten Riesen ließ sich aus einer etwa vierjährigen Zeitreihe des Weltraumteleskops Kepler bestimmen – als Funktion der Frequenz (oben) und der Periode (unten). Die Zahlen geben den Grad der Moden an (siehe Text für weitere Details).



Abb. 5 Die PLATO-Mission (PLANetary Transits and Oscillations of stars), deren Start für 2026 geplant ist, soll Sterne asteroseismologisch beobachten.

führt zu einer genaueren Modellierung und Altersbestimmung der von uns beobachteten Sterne sowie zu einem besseren Verständnis des langfristigen Schicksals unserer Sonne.

Asteroseismologie und darüber hinaus

Die Leistungsfähigkeit der Asteroseismologie reicht weit über die Struktur und die Eigenschaften von Sternen hinaus. Die Bestimmung von Masse, Radius und Alter von Exoplaneten hängt entscheidend davon ab, wie genau wir diese Größen des Zentralsterns kennen. Im Falle eines Transits, bei dem ein Planet vor dem Stern vorbeizieht und diesen dadurch leicht verdunkelt, ist zum Beispiel die Menge des blockierten Lichts ein Indikator für den Planetenradius, ausgedrückt durch den Sternradius. Daher hängt die Bestimmung des Planetenradius von der Kenntnis des Sternradius ab. Ebenso lässt sich die Masse eines über Dopplerverschiebungen nachgewiesenen Planeten nur in Abhängigkeit von der Sternmasse ableiten. Tatsächlich war es dank der Asteroseismologie möglich, Planeten mit erdähnlicher Masse in der habitablen Zone zu entdecken [10].

Für das Verständnis der Entstehung und Entwicklung der Milchstraße ist es unabdingbar, Alter und Massen der Sterne zu kennen. Mit der Asteroseismologie wird es nun möglich, diese Größen mit einer Genauigkeit abzuleiten, wie man sie für die galaktische Archäologie benötigt.

Um das Potenzial der Asteroseismologie voll ausschöpfen zu können, ist es unerlässlich, alle Schwingungsmerkmale vollständig zu verstehen, die in den Daten durch die Peaks im Fourier-Spektrum repräsentiert sind. Dazu gehört auch ihr physikalischer Ursprung. Es würde unser Wissen über die stellare Struktur und damit auch der galaktischen Evolution und von extrasolaren Planeten revolutionieren, wenn wir beispielsweise das Ausmaß des „Overshoot“ bestimmen könnten. Dieser Effekt entsteht in der Übergangszone endlicher Dicke zwischen einer konvektiven und einer radiativen Region, wo Energie durch Strahlung transportiert wird, da die Geschwindigkeit der konvektiven Materie an der Grenze nicht instantan auf null sinken kann. Daher kann ein Teil der Konvektion in den Strahlungsbereich „überschießen“ und zusätzlichen Brennstoff (Wasserstoff oder Helium,

je nach Entwicklungsphase) für die Region mit Kernfusion liefern. Dies zu berücksichtigen, könnte die Genauigkeit der stellaren Altersbestimmung deutlich verbessern. Solche Informationen lassen sich prinzipiell aus asteroseismischen Messungen gewinnen, was allerdings weitere vertiefte Studien der derzeit verfügbaren langen Zeitreihendaten von Kepler und in Zukunft von PLATO (**Abb. 5**) erfordert, die hochauflösende Fourier-Spektren liefern. Die kürzer gemessenen Datensätze von CoRoT, K2 und TESS liefern Daten für mehr Sterne in verschiedenen Regionen.

Mit der verbesserten Kenntnis der Sternstruktur, die sich aus den langen Datensätzen gewinnen lässt, ergeben sich genauere Massen, Radien und Alter für die kürzeren Datensätze, was der galaktischen Archäologie und der Forschungen zu Exoplaneten zugute kommt. Zusätzlich helfen bodengebundene Beobachtungen eines Netzwerks hochauflösender Spektrographen wie SONG (Stellar Oscillation Network Group) beim Verständnis der Sternstruktur weiter. Sie erlauben es, verfälschte Frequenzen auszuschließen und Oszillationen dritten Grades, die stärker ausgeprägt sind in der Radialgeschwindigkeit, zu messen. Allerdings kann das Netzwerk derzeit immer nur einen Stern beobachten. Dagegen ermöglicht es Weltraumphotometrie, gleichzeitig und ohne Unterbrechung Hunderttausende von Sternen zu untersuchen.

Literatur

- [1] A. S. Eddington, *The Internal Constitution of the Stars*, Cambridge University Press, Cambridge (1926), deutsch: *Der innere Aufbau der Sterne*, Springer, Berlin (1928)
- [2] C. Aerts, J. Christensen-Dalsgaard und D. W. Kurtz, *Asteroseismology*, Springer Science Media (2010)
- [3] H. S. Leavitt und E. C. Pickering, *Harvard College Observatory Circular* **173**, 1 (1912)
- [4] R. B. Leighton, R. W. Noyes und G. W. Simon, *ApJ* **135**, 474 (1962)
- [5] S. Hekker und J. Christensen-Dalsgaard, *Astron. Astrophys. Rev.* **25**, 1 (2017)
- [6] H. Kjeldsen, T. R. Bedding, M. Viskum und S. Frandsen, *AJ* **109**, 1313 (1995)
- [7] T. Bedding et al., *Nature* **471**, 608 (2011)
- [8] B. Mosser et al., *A&A* **572**, L5 (2014)
- [9] S. Hekker, Y. Elsworth und G. C. Angelou, *A&A* **610**, A80 (2018)
- [10] W. J. Borucki et al., *ApJ* **745**, 120 (2012)

Die Autorin



Prof. Dr. Ir. Saskia Hekker promovierte 2007 an der U Leiden (Niederlande). Danach forschte sie an der Königlichen Sternwarte von Belgien, an der U Birmingham (UK) und am Anton Pannekoek-Institut für Astronomie der U Amsterdam. 2013 wechselte sie ans Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen

mit einem ERC Starting Grant, wo sie 2014 Leiterin einer unabhängigen Max-Planck-Forschungsgruppe wurde. Seit 2020 leitet Saskia Hekker die neue HITS-Forschungsgruppe „Theory and Observations of Stars“ und ist Professorin für Theoretische Astrophysik an der U Heidelberg.

Prof. Dr. Ir. Saskia Hekker, Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS), Schloss-Wolfsbrunnengasse 35, 69118 Heidelberg