



ASTROPHYSIK

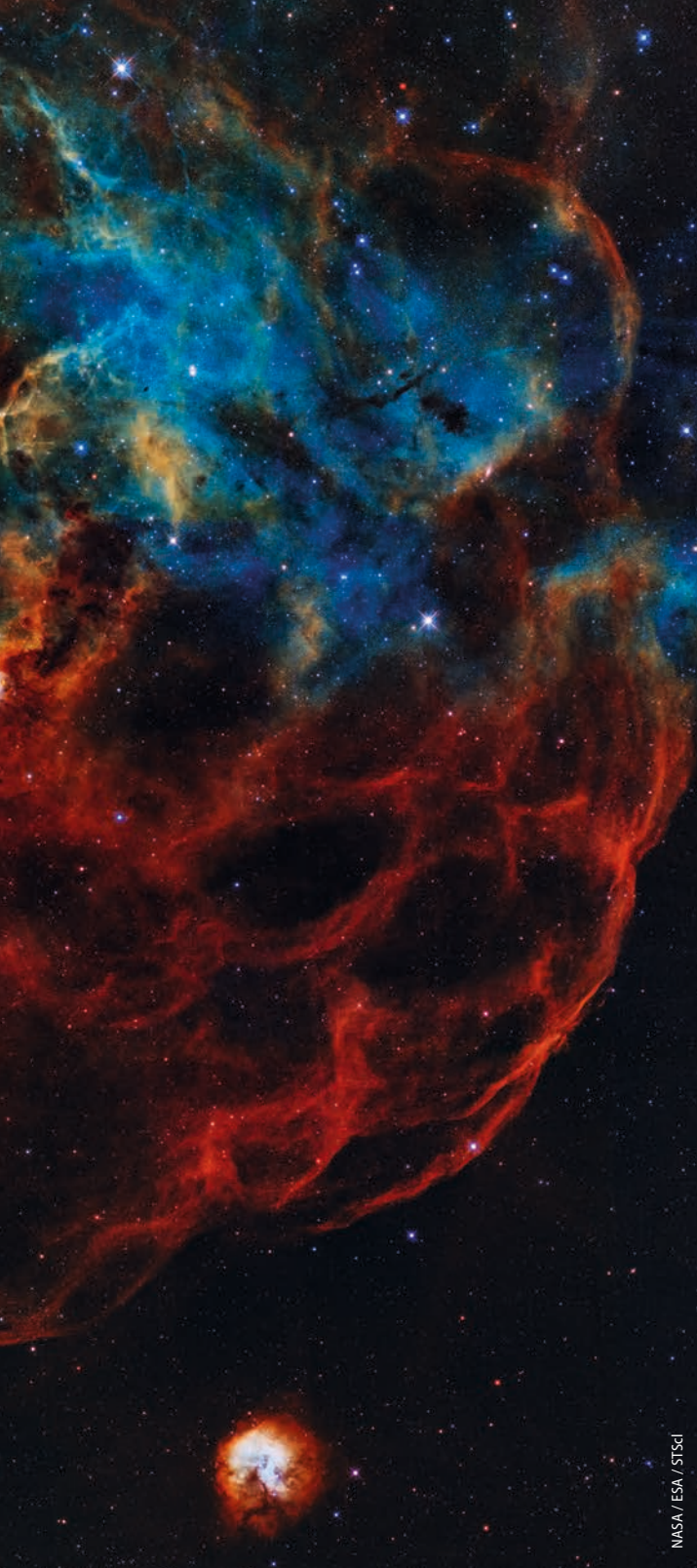
Vom Winde verweht

Die Winde heißer Sterne verändern kosmische Strukturen
und unser Bild vom Leben massereicher Sterne.

Andreas A. C. Sander

Neben Licht – oder allgemeiner: elektromagnetischer Strahlung – senden die Sterne am Nachthimmel auch einen Strom geladener Ionen aus, den Sternwind. Bei manchen Sternen fällt dieser so stark aus, dass sich der Lebensweg des Sterns fundamental verändert. Das gilt vor allem für heiße, massereiche Sterne: Ihr permanenter Massenverlust beeinflusst ihre unmittelbare Umgebung und stellt einen wichtigen Baustein im kosmischen Materiekreislauf dar. Sternwinde haben vermutlich einst unser Sonnensystem ermöglicht – sie beeinflussen die gesamte moderne Astrophysik.

Die Auswirkung eines besonderen Sternwinds lässt sich spektakulär in den Polarregionen beobachten: Jedes Jahr zieht es zahlreiche Menschen in den hohen Norden, um Polarlichter zu sehen. Sie entstehen, wenn der Sonnenwind mit dem Erdmagnetfeld wechselwirkt. Der Sonnenwind ist der wohl am besten studierte Sternwind und – zum Glück für uns auf der Erde – auch einer der harmloseren. Lediglich zehn Billionstel ihrer eigenen Masse ($10^{-14} M_{\odot}$) gibt die Sonne pro Jahr als Sternwind ab. Das reicht aus, um Satelliten in Bedrängnis zu bringen, aber nicht, um das eigene Schicksal maßgeblich zu beeinflussen.



NASA / ESA / STScl

Der Wind heißer, massereicher Sterne fällt deutlich dramatischer aus: Typischerweise brauchen sie nur wenige Millionen Jahre, um eine Sonnenmasse in den Weltraum abzustößen; bei besonders starken Winden passiert dies innerhalb von 10 000 bis 100 000 Jahren. Mit Effektivtemperaturen zwischen 10 000 und 60 000 K – teilweise sogar mehr als 100 000 K – sind diese Sterne um ein Vielfaches heißer als unsere Sonne mit ihren knapp 6000 K. Ein massereicher Stern ist bei seiner Entstehung mindestens achtmal so schwer wie die Sonne; die massereichsten Exemplare beginnen ihre Existenz mit weit über 100 Sonnenmassen.

◀ In der Großen Magellanschen Wolke räumen die UV-Strahlung und Winde der jungen Sterne im Sternhaufen NGC 2014 (Bildmitte) die Umgebung ihrer Geburtsstätte frei. Der blaue Nebel NGC 2020 (links unten) umgibt einen bereits weit entwickelten Stern: Dieser Wolf-Rayet-Stern verfügt über einen enormen Sternwind und hat seine Wasserstoff-Hülle bereits verloren.

Durch den starken Sternwind geben sie allerdings einen signifikanten Anteil im Laufe ihrer Entwicklung an die Umgebung ab. Ist der Wind so stark, dass der Massenverlust auf einer vergleichbaren Zeitskala stattfindet wie die Fusionsprozesse im Sterninneren, beeinflusst der Wind die weitere Entwicklung des Sterns und kann zum Beispiel verhindern, dass sich der Stern zu einem Roten Überriesen aufbläht.

Der Wind massereicher Sterne ist wegen ihrer höheren Leuchtkraft deutlich ausgeprägter als bei unserer Sonne. Mit höherer Masse steigen Druck und Temperatur im Sterninneren, sodass Fusionsprozesse schneller ablaufen: Die Leuchtkraft wächst überproportional im Verhältnis zur Sternmasse – und mit der Leuchtkraft skaliert der Strahlungsdruck. Während dieser für die Sonne und ihren Wind vernachlässigbar bleibt, stellt er für den Wind heißer, massereicher Sterne die alles entscheidende Größe dar, die den Gasdruck um ein bis zwei Größenordnungen übersteigt.

Eine universelle Eigenschaft heißer Sterne

Das besondere Phänomen starker Sternwinde ist schon lange bekannt. Charles Wolf und George Rayet entdeckten 1867 eine später nach ihnen benannte Klasse von Sternen, deren Spektren sich fundamental von typischen Sternspektren unterscheiden: Während beispielsweise unsere Sonne bei bestimmten Wellenlängen weniger Licht abstrahlt (Absorptionslinien), emittieren Wolf-Rayet-Sterne bei bestimmten Frequenzen deutlich mehr Licht (Emissionslinien, **Abb. 1**). Bereits 1929 erkannte der kanadische Astronom Carlyle Smith Beals, dass die breiten Emissionslinien als Produkt eines kontinuierlichen Sternwinds entstehen, bei dem diese Sterne Materie mit bis zu etwa 2500 km/s auswerfen [1]: Nur der Doppler-Effekt erklärte die enorme Breite der Emissionslinien. Da damals nur wenige Wolf-Rayet- und andere Emissionslinienstern bekannt waren, galten Sternwinde zunächst als Sonderfall, der die Sternentwicklung nicht sonderlich beeinflussen sollte.

Diese Perspektive änderte sich schlagartig, als Sterne im UV-Licht beobachtet wurden. Ein Blick in diesen Wellenlängenbereich – zunächst noch mit Instrumenten auf Raketen, später dann mittels geeigneter Satelliten – zeigte, dass fast alle heißen Sterne eine klare Windsignatur besitzen. Bei vielen heißen Sternen der Spektraltypen O und B (**Abb. 1**), die im sichtbaren Licht meist nur Absorptionslinien zeigen, treten sogenannte „P Cygni-Profile“ für bestimmte Übergänge im Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff auf (**Abb. 2**): ein deutliches Signal für einen signifikanten Sternwind und damit auch Massenausfluss.

Dieser spektrale Fingerabdruck liefert in der Regel auch die einzige Diagnostik, um die Stärke des Sternwinds zu

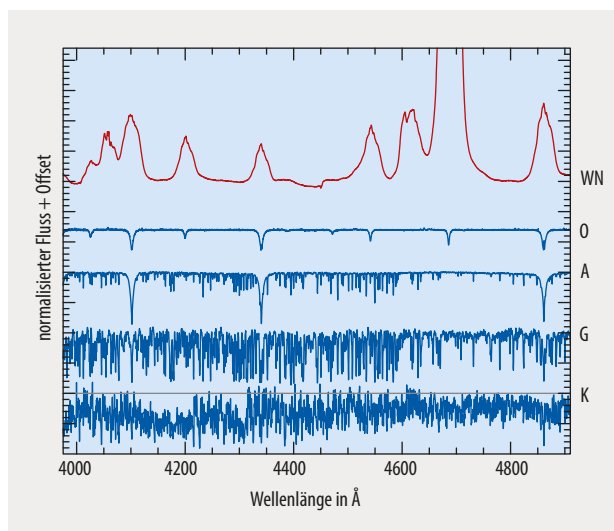


Abb. 1 Im sichtbaren Licht weisen die Spektren der meisten Sterne Absorptionslinien (blau) auf, die in der hydrostatischen Oberfläche entstehen. Die Spektralklassen O, A, G (sonnenähnlich) und K (kühl) korrelieren mit der Oberflächentemperatur der Sterne, wobei der Typ O zu den heißesten Sternen gehört. Wolf-Rayet-Sterne entziehen sich diesem Schema: So zeigt die Klasse WN ausschließlich Emissionslinien (rot), die alle im Sternwind entstehen.

quantifizieren. Die Breite von Emissionslinien und sogenannten „Absorptionströgen“ in P Cygni-Profilen stellt einen Indikator für die (maximale) Windgeschwindigkeit dar. Aus Modellen zur Linienentstehung, dem Windverlauf und den wesentlichen Parametern des Sterns, wie Masse und Leuchtkraft, ergibt sich, wie viel Masse der Stern pro Jahr verliert. Überriesen vom Spektraltyp O geben typischerweise $10^{-6} M_{\odot}$ pro Jahr ab, Wolf-Rayet-Sterne ein bis zwei Größenordnungen mehr [2]. Diese Werte zu bestimmen und Sternparametern zuzuordnen, ist entscheidend, um die Entwicklung massereicher Sterne zu verstehen und korrekt zu simulieren. Das beruht jedoch stets auf Modellen, welche die komplexen physikalischen Bedingungen im Sternwind beschreiben. Sind die Winde optisch dicht

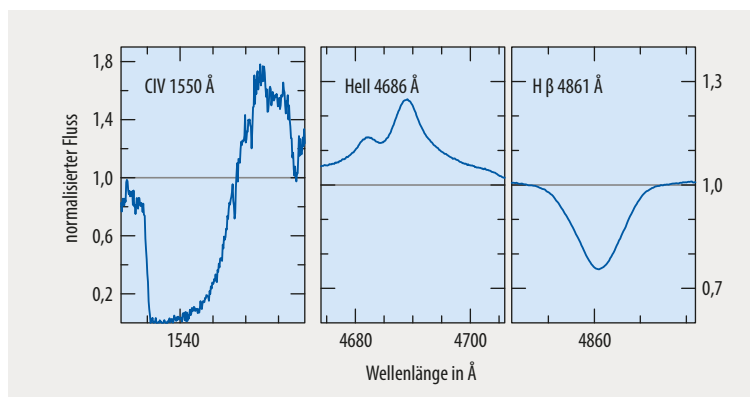


Abb. 2 Im UV-Licht (links) zeigt sich der Sternwind des O-Überriesen ζ Puppis als charakteristisches „P Cygni-Profil“ mit einem zentralen Emissionsanteil und einem Absorptionsanteil bei kleineren Wellenlängen. Dieser stärkere Sternwind hinterlässt auch im sichtbaren Licht Spuren wie das Emissionsprofil der He^+ -Linie (Mitte); die meisten Linien besitzen aber reine Absorptionsprofile, beispielsweise die $\text{H}\beta$ -Linie (rechts), und liefern keine Hinweise auf einen Sternwind.

genug, gibt es einen Exzess im Radiobereich, aus dem sich – sofern messbar – auf Basis weniger Annahmen der Massenverlust ergibt. Im Allgemeinen braucht es jedoch detaillierte Computermodelle, die unter anderem die Besetzung der quantenmechanischen Energieniveaus unter Berücksichtigung aller wichtigen Linien- und Stoßübergänge aller beteiligten Ionen berechnen und darüber hinaus den Strahlungstransport in einem expandierenden Medium außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts (**Abb. 3**). Dazu kombinieren die Simulationen mehrere physikalische Teilgebiete und benötigen detaillierte Daten der beteiligten Atome. Die Modellierung von Sternwinden weiterzuentwickeln, ist eine der großen Herausforderungen der modernen Astrophysik.

Was einen Sternwind antreibt

Die theoretischen Grundlagen der Winde heißer Sterne sind bis heute nur in den Grundzügen verstanden. Anders als beim Sonnenwind, dessen maßgeblicher Antrieb im Gasdruck liegt, sorgt bei heißen Sternen die Strahlungskraft für den Wind. Sie setzt sich aus der Streuung an freien Elektronen (Thomson-Streuung) und einem element- bzw. ionenspezifischen Teil zusammen (**Abb. 4**). Dabei leistet die Thomson-Streuung einen großen Beitrag, reicht aber allein nicht aus, um die beobachteten Winde zu erklären. Die zusätzliche Beschleunigung kommt aus der Absorption von Strahlung in einzelnen Linienübergängen, sodass der Wind heißer Sterne als „liniengetrieben“ bezeichnet wird. Die zunehmende Windgeschwindigkeit verschiebt kontinuierlich die Wellenlänge, bei der das Material im Wind Strahlung absorbieren kann. So können einzelne Linienübergänge einen größeren Strahlungsbereich absorbieren und das Material auf die beobachteten Geschwindigkeiten bringen. Verschiedene Elemente und Ionen steuern unterschiedliche Wellenlängen bei, sodass große Teile des Strahlungsmaximums der Sterne vom extremen bis zum nahen UV-Licht beitragen.

Starke Sternwinde gibt es nicht nur bei heißen Sternen, obwohl erst ab Effektivtemperaturen von etwa 10 000 K genügend Linienübergänge für einen effizienten Windantrieb zur Verfügung stehen. Auch kühlere Sterne können in wenigen Millionen Jahren eine ganze Sonnenmasse verlieren. Unter den massereichen Sternen trifft dies vor allem auf Überriesen zu, wie Beteigeuze im Sternbild Orion mit einer Effektivtemperatur von etwa 3600 K. Der Mechanismus, der den Wind kühler Sterne antreibt, unterscheidet sich grundlegend von demjenigen heißer Sterne (**Infokasten**, S. 32). Die Sonne mit knapp 6000 K gehört zu keiner der beiden Gruppen, sodass für sie keiner der Mechanismen effizient greift. Daher fällt der Sonnenwind im Vergleich zu anderen Sternen recht schwach aus – zum Glück für uns auf der Erde.

Den Wind heißer Sterne quantitativ zu beschreiben, ist heute mehr denn je aktueller Forschungsgegenstand. In den 1970er-Jahren führten John I. Castor, David Abbott und Richard Klein das CAK-Modell als Beschreibung der Strahlungskraft mit wenigen Parametern ein [3]. Aufgrund seiner einfachen Implementierung kommt es bis heute in

Simulationen komplexerer astrophysikalischer Systeme zum Einsatz, auch wenn zentrale Annahmen mittlerweile als überholt gelten. So identifiziert das CAK-Modell die CNO-Elemente (Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff) dank ihres prominenten spektralen Fingerabdrucks als wichtigsten Beitrag für die Strahlungskraft. Neuere Modellierungen belegen aber, dass häufig Elemente der Eisengruppe am stärksten zur Beschleunigung des Sternwinds beitragen (Abb. 4). Zwar kommt Eisen viel seltener in Sternen vor als zum Beispiel Kohlenstoff; aufgrund der höheren Ordnungszahl stellt ein Eisen-Atom jedoch deutlich mehr Linienübergänge zur Verfügung. Diese zusätzlichen Absorptionsmöglichkeiten decken darüber hinaus Wellenlängen ab, bei denen Strahlung sonst fast ungehindert entweichen könnte. Daher sind Elemente wie Eisen und Nickel mit ihren komplexen Elektronenhüllen zentral, um den Wind eines heißen Sterns zu modellieren [4].

Diese und weitere Erkenntnisse machten es nötig, die CAK-Parametrisierung immer wieder anzupassen und zu ergänzen [5]. Für Wolf-Rayet-Sterne scheiterte das Modell dennoch komplett. Daher kam die Vermutung auf, dass diese Sterne eine zusätzliche, noch unbekannte Antriebskraft für den starken Wind haben müssten. Neuere Modelle deuten jedoch darauf hin, dass auch der starke Wind von Wolf-Rayet-Sternen strahlungsgetrieben ist [6]. Allerdings ist der Wind optisch sehr dicht, sodass einige inhärente Vereinfachungen der CAK-Parametrisierung für Wolf-Rayet-Sterne unzulässig sind [7]. Ein optisch dichter Wind mit viel absorbierendem Material kann unter anderem die Strahlung des Sterns mehrfach nutzen. So kann ein Stern gewissermaßen einen höheren „Wirkungsgrad“ beim Antreiben des Windes erzielen.

Es gibt aber auch Sterne, deren Wind nicht die gesamte zur Verfügung stehende Energie nutzt. Solche „weak wind

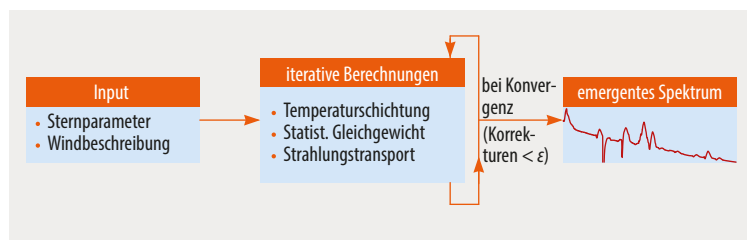


Abb. 3 Zum Modellieren von Sternatmosphären braucht es zunächst die Parameter des Sterns und Winds. Daraus ergeben sich radiatives und statistisches Gleichgewicht sowie der Strahlungstransport, um Temperaturschichtung, Besetzungszahlen und Strahlungsfeld zu bestimmen. Da diese Größen sich gegenseitig beeinflussen, wird ein iteratives Verfahren so lange fortgesetzt, bis die Korrekturen ausreichend klein sind. Erst dann liefert der letzte Schritt das emergente Spektrum des Modellsterns zum Vergleich mit Beobachtungen.

stars“ sollten aufgrund ihrer Energiebilanz einen viel stärkeren Wind besitzen, als sich aus ihrem Spektrum ablesen lässt. Möglicherweise hinterlässt bei ihnen der Massenverlust nicht die typischen Spuren im UV-Spektrum, obwohl ein stärkerer Wind vorhanden ist. Das könnte passieren, wenn der Sternwind aus (mindestens) zwei Komponenten besteht: einer kühleren, die sich im Spektrum zeigt, und einer deutlich heißeren, deren starker Ionisationsgrad verhindert, dass sie im sichtbaren oder UV-Bereich signifikante Spuren hinterlässt. Gut aufgelöste Linienspektren im Röntgenbereich konnten diese heiße Komponente bereits für einige Objekte belegen [8].

Inhomogenität und Instabilität

Die präzise quantitative Spektralanalyse eines heißen Sterns mit nicht zu vernachlässigendem Wind beruht in der Regel auf einer ganzen Serie von Simulationen, deren einzelne

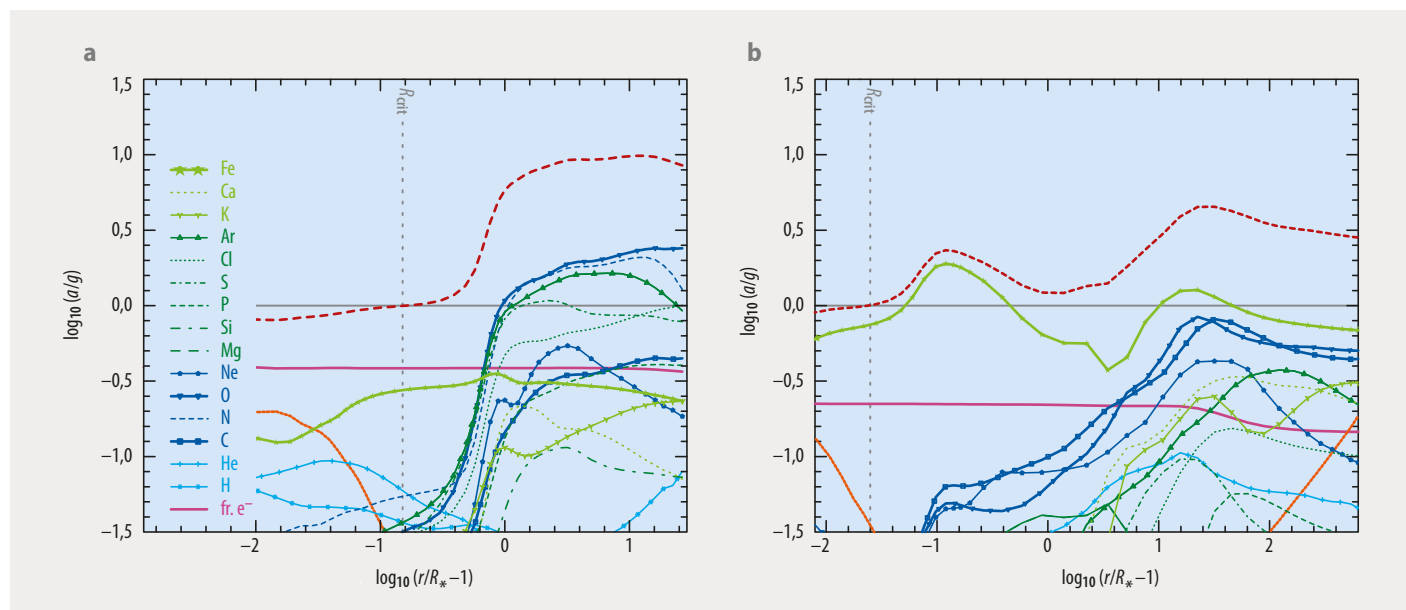


Abb. 4 Der Gasdruck (orange) trägt wenig zur Windbeschleunigung bei, während der Strahlungsdruck (rot) den Wind antreibt. Für verschiedene Sterne setzt er sich sehr unterschiedlich zusammen: Bei einem O-Stern (a) startet vor allem die Streuung an freien Elektronen (pink) den Wind. Die Linienopazitäten vieler Elemente (grün, blau) mit unterschiedlichen Häufigkeiten bringen den Wind gemeinsam auf die beobachtete Endgeschwindigkeit. Für einen Wolf-Rayet-Stern (b) dominieren dagegen die Linienopazitäten des Eisens (hellgrün), obgleich auch hier im äußeren Wind viele weitere Elemente beitragen; im dargestellten Spektraltyp WC finden sich starke Anteile von Kohlenstoff und Sauerstoff (dunkelblau).

Berechnung Stunden oder sogar Tage dauern kann. Die physikalische und numerische Komplexität macht es oft nötig, Sternwinde als stationär – also auf kurzen Zeitskalen gleichbleibend – und homogen anzunehmen [9]. Weitere Approximationen, zum Beispiel von Strahlungstransport und Massenverlust, braucht es, wenn Sternwinde nur ein Baustein von größeren Simulationen sind. Das trifft beispielsweise auf detaillierte Sternentwicklungsmodelle oder dreidimensionale, hydrodynamische Simulationen ganzer Sternhaufen zu. Dann ist es entscheidend, dass die Approximationen auch den Einfluss von Effekten berücksichtigen, die sich nur in detaillierteren Einzeluntersuchungen zeigen.

Sowohl Beobachtungen als auch theoretische Überlegungen zeigen, dass der Wind heißer Sterne weder stationär noch homogen ist [10, 11]. Zwar lassen sich die seit den 1980er-Jahren gemessenen, nicht-thermischen Radioemissionen massereicher Sterne fast immer dadurch erklären, dass ein massereicher Begleitstern vorhanden ist und die Winde beider Sterne kollidieren. Jedoch zeigen die Spektren der Sterne selbst einige Auffälligkeiten, die deutlich auf eine intrinsische Variabilität im Wind hinweisen. So lässt sich beim Vergleich von Modell und Beobachtung der Verlauf der Randbereiche bzw. Flügel starker Emissionslinien nur unter der Annahme erklären, dass ein inhomogener Wind vorliegt, der aus einem „geklumpten“ optisch dichteren Material in einem weniger optisch dichten Umgebungsmedium besteht. Für einige UV-Linien weist die Linienform auf sprunghafte Änderungen der Windgeschwindigkeit im Überschallbereich – also im äußeren Wind – hin. Darüber hinaus zeigen Serienaufnahmen von Spektrallinien aus dem Wind eine signifikante Variabilität im Laufe der Zeit.

Theoretische Überlegungen zu strahlungsgetriebenen Sternwinden deuteten von Beginn an auf Instabilitäten hin, die spätere Untersuchungen auch belegten. Um die-

ses Verhalten besser zu verstehen, sind zeitabhängige und idealerweise dreidimensionale Simulationen nötig. Ihr immenser numerischer Aufwand erfordert es, andere Aspekte zu vereinfachen. So wird etwa auf eine detaillierte Berechnung der quantenmechanischen Besetzungszahlen verzichtet und entweder ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht angenommen oder die Rechnung gleich auf einzelne Linienübergänge zwischen zwei Energieniveaus beschränkt. Dennoch belegen die Resultate solcher Studien die „Verklumpung“ der Winde und zeigen beispielsweise, dass eine heiße Windkomponente beim Zusammenstoß von Material entstehen könnte. Inzwischen gilt unter anderem als gesichert, dass bei Überriesen vom Spektraltyp O die intrinsische Röntgenleuchtkraft einem Anteil von 10^{-7} ihrer Gesamtleuchtkraft entspricht [12].

Der Einfluss massereicher Sterne

Ein starker Sternwind stellt bei massereichen Sternen keine Ausnahme, sondern eher die Regel dar. Der Wind sehr massereicher Sterne ist vermutlich so stark, dass der Stern seine äußeren Hüllen in nur wenigen Millionen Jahren selbst abtragen kann. Das verändert sein Schicksal dramatisch. Bei den meisten Sternen sinkt die Effektivtemperatur im Verlauf ihrer Entwicklung. Auch unsere Sonne wird in ein paar Milliarden Jahren deutlich kühler sein als heute. Viele massereiche Sterne wie Beteigeuze sehen wir schon heute im Stadium eines kühlen Überriesen. Doch die kühle Schicht, die für die rote Erscheinung sorgt, entspricht nur der aufgeblähten äußeren Wasserstoffhülle des entwickelten Sterns. Ohne diese Hülle zeigt sich das deutlich heißere, Helium-fusionierende Innere des Sterns. Dann besitzt der Stern eine extrem hohe Effektivtemperatur und sendet gewaltige Mengen ionisierender Strahlung aus. Einige Typen

Winde kühler Sterne

Anders als bei heißen Sternen zeigen die Winde kühler Sterne keinen spektralen Fingerabdruck bei optischen Wellenlängen. Dagegen belegen Beobachtungen des Umfelds sowie Kohlenmonoxid-Emissionslinien im Radiobereich signifikante Massenverlustraten, deren Werte jedoch als recht unsicher gelten. So werden die ursprünglich angenommenen $10^{-4} M_{\odot}$ pro Jahr für Überriesen aktuell als etwas zu hoch angesehen. Dennoch ist die Massenverlustrate vergleichbar mit dem Wind heißer Sterne; die maximalen Windgeschwindigkeiten sind aber mit 20 bis 40 km s^{-1} um zwei Größenordnungen geringer.

Die physikalischen Bedingungen in den äußeren Schichten kühlerer Sterne unterscheiden sich deutlich von denen heißer Sterne, sodass man hier von „staubgetriebenen“ Winden spricht. Im Umfeld Roter Riesen und Überriesen sind die Temperaturen so niedrig, dass Staubkörner – typischerweise amorphe Silikate oder Carbonate – kondensieren. Deren Opazität ist deutlich höher als die verfügbare Gasopazität, sodass der auf den Staub wirkende Strahlungsdruck als dominierender Mechanismus für die Winde kühler Sterne gilt. Damit das Material aus den äußeren Schichten die nötige Distanz zum Stern erreicht, um Staub zu bilden, braucht es nach aktuellem Forschungsstand einen weiteren Mechanismus, vermutlich die in kühlen Sternen vorhandene Pulsation und großskalige Konvektion (PEDDRO-Szenario; Pulsation-Enhanced Dust-Driven Outflow). Während die äußeren Schichten heißer Riesen wie Rigel nur auf kleinen



ESO / L. Calçada Moment

Skalen fluktuieren, zeigen Simulationen und erste interferometrische Aufnahmen, dass kühle Überriesen wie Beteigeuze gigantischen, brodelnden Kochtöpfen ähneln und Konvektionszellen riesige Ausmaße annehmen können (Abb.). Diese Prozesse bilden auch die Grundlage, um die schlagzeilenträchtige Verdunklung Beteigeuzes Anfang 2020 zu erklären.

Vgl. S. Höfner und H. Olofsson, *Astron. Astrophys. Rev.* **26**, 1 (2018)



Im Carina-Nebel in unserer Milchstraße entstehen viele massereiche Sterne. Die Winde und UV-Strahlung dieser sehr jungen Sterne formen das umgebende Material, in dem sich weitere Generationen von Sternen bilden.

massereicher Sterne gelten daher als wichtiger Baustein für die Re-Ionisation des Universums, die für dessen heutige „Durchsichtigkeit“ verantwortlich ist.

Die ionisierende Strahlung massereicher Sterne kann entweder entweichen oder durch ihre Absorption in der Sternatmosphäre den Sternwind antreiben: Darüber entscheidet die Zusammensetzung des Sterns, insbesondere der Anteil schwerer Elemente wie Eisen und Nickel. Beide entstehen erst am Ende der Entwicklung von massereichen Sternen in deren Innerstem. Sobald eine Supernova-Explosion das Material verteilt, steht es für eine neue Generation von Sternen zur Verfügung, die dann auch in ihren äußeren Schichten Eisen und Nickel enthalten. Dieser Anteil wächst von Generation zu Generation, sodass die Stärke von strahlungsgetriebenen Sternwinden im Laufe der Entwicklung des Universums stetig zugenommen hat. Tatsächlich treten in Galaxien mit einem geringeren Anteil schwerer Elemente als in der Milchstraße auch schwächere Sternwinde auf, zum Beispiel in den benachbarten Magellanschen Wolken. Diesen Trend präzise zu quantifizieren, also den Zusammenhang zwischen der Stärke des Winds und dem Anteil schwerer Elemente zu beschreiben, ist aktuell ein wichtiger Forschungsgegenstand.

Unterschiedlich starke Sternwinde haben noch eine Reihe weiterer Auswirkungen: So kann der Stern durch den permanenten Massenverlust Drehimpuls verlieren, sodass ein starker Wind eine gegebenenfalls hohe Anfangsrotation abbremst. Dies beeinflusst nicht nur die Interpretation von Spektren, sondern schließt auch gewisse Entwicklungswege aus, die im frühen Universum noch möglich sind. Darüber hinaus reichert der Stern sein Umfeld mit Material aus dem Wind an. Je nach Entwicklungsstadium des Sterns und der Durchmischung seiner Schichten kann dazu frisch erbrüteter Kohlenstoff gehören. Eine spezielle Klasse von Doppelsternsystemen, bei denen der Wind eines kohlenstoffreichen Wolf-Rayet-Sterns auf den Wind eines heißen

Begleitsterns trifft, stellt eine bisher noch wenig erforschte Produktionsstätte für kosmischen Staub dar: Das Umfeld massereicher Sterne bietet interessante Bedingungen für die Entstehung neuer Sterne und Planeten. Auch unsere Sonne ist kein Stern der ersten Generation, sondern enthält einen aus astrophysikalischer Sicht beträchtlichen Anteil schwerer Elemente – Material aus vorherigen Sternenerationen. Tatsächlich erklären einige Modelle, wie unser Sonnensystem am Rand einer Materieverdichtung entstanden sein könnte, die der Sternwind eines – inzwischen längst vergangenen – Wolf-Rayet-Sterns erzeugt hat [13].

Von Sternwinden zu Gravitationswellen

Am Ende ihrer Entwicklung kollabieren massereiche Sterne zu einem kompakten Objekt – abhängig von der verbliebenen Masse zu einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch. Entsprechend entscheidet der Massenverlust durch den Sternwind mit darüber, welches Endprodukt entsteht. Der Nachweis von Gravitationswellen-Ereignissen hat unser Wissen über diese Endprodukte enorm gesteigert. Die Massen der Schwarzen Löcher, die sich aus den beobachteten Gravitationswellen ergeben, überraschten zunächst, weil sie deutlich größer sind als aus der Milchstraße bekannt [14].

Das lässt sich jedoch mit dem Wissen über Sternwinde erklären. Da es Milliarden Jahre dauert, bis zwei Schwarze Löcher verschmelzen, messen wir mit Gravitationswellen vor allem Ereignisse aus dem noch jungen Universum. Damals war der Anteil schwerer Elemente viel geringer als in der Milchstraße heute, und die Sterne konnten weniger Material durch einen Wind verlieren. Daher kollabierten sie auch zu deutlich schwereren Schwarzen Löchern. Aktuelle Fragen sind daher, wie viel geringer der Einfluss von Sternwinden war und ob für alle Typen heißer Sterne der Wind auf dieselbe Weise skaliert. Letzteres erscheint

unwahrscheinlich, weil sich der Wind von Wolf-Rayet-Sternen anders verhält als derjenige von Überriesen des Spektraltyps O [15]. Das alles in genauere Zahlen zu kleiden, erfordert komplexe Simulationen verschiedener Sterne und ihrer Winde.

Unser Erblinden für UV-Strahlung

Wie eingangs beschrieben, befindet sich das Strahlungsmaximum heißer Sterne im ultravioletten Bereich, sodass dort auch die wichtigsten spektralen Diagnostiken für Sternwinde vorliegen. Die Spektroskopie des UV-Lichts von Sternen stellt daher das wichtigste empirische Werkzeug dar, um den Wind heißer Sterne verlässlich zu beobachten. Dieses Werkzeug dürfte allerdings nicht mehr allzu lange zur Verfügung stehen: Das berühmte Hubble-Weltraumteleskop erreicht in den kommenden Jahren das Ende seiner Lebensdauer; eine Wartung ist seit dem Wegfall der Space Shuttles nicht mehr möglich. Das im Dezember letzten Jahres gestartete James-Webb-Weltraumteleskop hat keinen UV-Spektrographen an Bord, und die Erdatmosphäre ist für UV-Strahlung undurchsichtig. Mit dem Wegfall des Hubble Space Telescope erblindet die Menschheit zumindest spektroskopisch gesehen für ultraviolette Strahlung. Dabei bräuchte es dringend ein neues UV-Auge, um die theoretischen Vorhersagen für Schlüsselbausteine der Sternwinde, etwa ihre Skalierung mit dem Anteil schwerer Elemente, gegen Beobachtungen abzugleichen.

Kenneth Sembach, Direktor des Space Telescope Science Institute, das für die NASA unter anderem das Hubble- und das James-Webb-Weltraumteleskop betreut, hat die Ultraviolet Legacy Library of Young Stars as Essential Standards (ULLYSES) ins Leben gerufen, um das Problem fehlender Beobachtungsdaten zumindest ein Stück weit zu beheben. Aus den Beobachtungen von heißen Sternen in den Magellanschen Wolken entsteht dabei aktuell eine Bibliothek von UV-Spektren. Als wichtige Blaupausen heißer Sterne können diese beispielsweise in Sternpopulationsmodelle der nächsten Generation eingehen. Doch die ULLYSES-Daten bilden nur einen kleinen Ausschnitt aus der Welt der heißen Sterne ab. Besonders fehlen aktuell die Signaturen einzelner heißer Sterne in Galaxien, die einen noch geringeren Anteil schwerer Elemente besitzen als die Magellanschen Wolken. Umso wichtiger werden hier die Simulationen von Modellatmosphären und ihre synthetischen Spektren als theoretische Ergänzung der verfügbaren Beobachtungsdaten.

Zusammenfassung

Der Wind heißer Sterne stellt einen Schlüsselbaustein der modernen Astrophysik dar. Dass die Absorption ihrer eigenen Strahlung den Wind antreibt, macht die theoretische Beschreibung und Modellierung kompliziert. Weil das Strahlungsmaximum heißer Sterne im UV-Bereich liegt, sind Weltraumteleskope mit UV-Spektrographen für die Beobachtung und Analyse von Sternwinden unerlässlich. Obwohl die theoretische Beschreibung der Winde unser Bild von der Sternentwicklung bereits revolutioniert hat, bleiben viele wichtige Details bis heute unverstanden: Er-

klärungen könnte eine neue Generation von Simulationen liefern. Der Impuls und die chemische Zusammensetzung des Winds heißer Sterne verändert deren Umgebung und ermöglicht, dass neue Generationen von Sternen und Planeten entstehen. Diese vielfältige Rückkopplung mit dem kosmischen Materiekreislauf sorgt dafür, dass eine akkurate Beschreibung des Winds heißer Sterne über unser Verständnis fundamentaler astrophysikalischer Fragen mitentscheidet, beispielsweise wie die massereichen Schwarzen Löcher in Gravitationswellenereignissen entstehen oder wie sich die chemische Zusammensetzung von Galaxien entwickelt hat.

Literatur

- [1] C. S. Beals, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **90**, 202 (1929)
- [2] P. A. Crowther, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 177 (2007)
- [3] J. I. Castor, D. C. Abbott und R. I. Klein, *Astrophys. J.* **195**, 157 (1975)
- [4] J. S. Vink, A. de Koter und H. J. G. L. M. Lamers, *Astron. Astrophys.* **369**, 574 (2001)
- [5] J. Puls, J. S. Vink und F. Najarro, *Astron. Astrophys. Rev.* **16**, 209 (2008)
- [6] G. Gräfener und W.-R. Hamann, *Astron. Astrophys.* **432**, 633 (2005)
- [7] A. A. C. Sander, J. S. Vink und W.-R. Hamann, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **491**, 4406 (2020)
- [8] D. P. Huenemoerder et al., *Astrophys. J. Lett.* **756**, L34 (2012)
- [9] A. A. C. Sander, *IAUS* **329**, 215 (2017)
- [10] L. B. Lucy und P. M. Solomon, *Astrophys. J.* **159**, 879 (1970)
- [11] S. P. Owocki und G. B. Rybicki, *Astrophys. J.* **284**, 337 (1984)
- [12] T. W. Berghoefer et al., *Astron. Astrophys.* **322**, 167 (1997)
- [13] V. V. Dwarkadas et al., *Astrophys. J.* **851**, 147 (2017)
- [14] B. P. Abbott et al., *Astrophys. J. Lett.* **882**, L24 (2019)
- [15] A. A. C. Sander und J. S. Vink, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **499**, 873 (2020)

Der Autor



Andreas A. C. Sander studierte Physik an der U Potsdam, wo er 2016 promovierte. In seiner Arbeit widmet er sich vorrangig der Weiterentwicklung von Modellen für expandierende Sternatmosphären zur quantitativen Spektralanalyse und theoretischen Beschreibung von Sternwinden. Nach Stationen als Postdoc und Öpik Research Fellow am Armagh Observatory in Nordirland leitet er seit 2021 eine Emmy Noether-Nachwuchsgruppe am Astronomischen Rechen-Institut (ARI) des Zentrums für Astronomie der U Heidelberg.

Dr. Andreas A. C. Sander, Astronomisches Rechen-Institut (ARI), Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, Mönchhofstr. 12 – 14, 69120 Heidelberg