DIE VERÄNDERLICHEN STERNE

Niederschrift eines öffentlichen Vortrags,
gehalten im Herbst 1972
von Prof. Dr. W. Strohmeier,
Remeis-Sternwarte Bamberg

Definition, Geschichte, Klassifikation

Veränderliche Sterne sind der Sonne ähnliche Himmelskörper, die dem irdischen Beobachter gegenüber ihre Helligkeit innerhalb kurzer Zeit meßbar ändern. Die Änderung erfolgt dabei nicht nur im optischen Spektralgebiet, sondern – wenn auch jeweils unterschiedlich in ihrer Größe – in allen mit Hilfe von Ballonen oder Satelliten erreichbaren Regionen elektromagnetischer Wellen. Da ist zunächst Algol im Perseus, der nach jeweils 69 Stunden eine starke Schwächung seines Lichtes erfährt, oder Mira im Walfisch, dem bloßen Auge monatelang unsichtbar und dann aber wochenlang gut sichtbar, alles in einer Periode von 330 Tagen. Auch Beteigeuze, der helle, rötliche linke Schulterstern des Orion, ist gering veränderlich, langsam und unregelmäßig; gleiches gilt für den hellsten Stern im Herkules. Zu besonderer Bedeutung ist der Stern Delta im Cepheus gelangt, der sein Licht streng periodisch im Rhythmus von 5.37 Tagen wechselt; ein ganz ähnlicher Stern, Eta im Adler, hat eine Periode von 7.18 Tagen. Diese und einige andere Veränderliche kann jedermann mit bloßem Auge oder durch einen Feldstecher beobachten. Es sind Schwankungen der „scheinbaren" Helligkeit, denen nicht in allen Fällen solche der „absoluten" Helligkeit, der tatsächlichen Leuchtkraft des Sterns, zu entsprechen brauchen.
Der relativ kurze Ablauf ist zunächst überraschend, denn die Entwicklung eines Sterns erstreckt sich über Milliarden von Jahren und läßt kurzfristige Änderungen seines Zustandes kaum erwarten. Doch heute weiß man, daß die Veränderlichkeit – von wenigen noch zweifelhaften Ausnahmen abgesehen – als ein normaler Durchgangszustand im Leben eines jeden Sternes betrachtet werden kann. Damit ist zwar nicht gesagt, daß auch jeder Stern diesen Zustand in derselben Weise durchlaufen wird, denn seine Entwicklung hängt von vorgegebenen Parametern ab, wie etwa von seiner Masse und seiner primären chemischen Zusammensetzung. Andererseits ist es ein Erfolg unserer Vorstellung über die Art der Prozesse, die in den Sternatmosphären stattfinden, auch unserer Vermutung über den inneren Aufbau der Sterne und über

den Beitrag der einzelnen Energiequellen, daß wir Fragen nach Entstehung und Dauer der Veränderlichkeit heute mehr oder weniger gut beantworten können.
Die ersten Entdeckungen von Veränderlichkeit beschränken sich naturgemäß auf sehr helle Sterne. Die Chinesen hatten bereits 1054 die Supernova im Stier, den heutigen Krabbennebel beobachtet und registriert; eine weitere Supernova fand Tycho Brahe im Jahre 1572, wenig später entdeckte man den Mira-Stern, den nova-ähnlichen Stern P im Schwan und die Supernova im Schlangenträger. Von da ab beginnt die Veränderlichen-Forschung, aber noch viele Jahrzehnte später galt die Veränderlichkeit des Sternlichts nach wie vor als eine seltene Ausnahme. Das ändert sich erst durch die Einführung der Photographie in die Astronomie. Die Zahl der 1970 als sicher bekannten Veränderlichen beträgt etwa 22 000, als vermutlich veränderlich können etwa 12 000 Sterne bezeichnet werden. Zu den veränderlichen Sternen zählen auch die 1960 entdeckten Quasare und die 1967 erstmals beobachteten Pulsare. Wollte man die Ergebnisse aus eng begrenzten Himmelsfeldern extrapolieren, so kommt man auf mehrere Millionen Veränderliche, was aber nur den Bruchteil eines Prozentes der Gesamtzahl der Sterne entspricht: Auf 1000 – 2000 normale Sterne entfällt *ein* veränderlicher.
Im Halo der Milchstraße, in den 80 untersuchten Kugelhaufen fand man 1800 Veränderliche, in den beiden Magellan'schen Wolken etwa 4000. Auch in den noch weiter draußen liegenden Sternsystemen, wie dem Andromedanebel, sind Veränderliche entdeckt worden. Eine Grenze ist nur durch die Reichweite der Instrumente gesetzt, denn selbst der 5-m-Spiegel auf dem Mount Palomar vermag im Andromedanebel die lichtschwachen Sterne schon nicht mehr zu erfassen.
Zunächst führte die ganze Vielfältigkeit in der Art des Lichtwechsels zu einer Klassifikation nach rein äußeren Merkmalen, nach Periode, Amplitude oder Form der Lichtkurve; später kamen entsprechend dem Ausbau der Spektroskopie die physikalischen und chemischen Merkmale der strahlenden Oberfläche hinzu. Die naheliegende Unterscheidung war die in physisch und in optisch Veränderliche. Bei der ersten Gruppe ist die Ursache des Lichtwechsels in der Änderung der Zustandsgrößen, verursacht im Innern des Sterns, zu suchen, bei der anderen Gruppe handelt es sich um geometrische Abschattungs- oder Verhüllungsvorgänge im Außenraum des Sterns. Die physisch Veränderlichen – soweit es sich nicht um die Untergruppe Ausbruchs-Veränderliche handelt – haben als gemeinsame Eigenschaft die Periode-Spektrum-Beziehung (je länger die Periode, um so niedriger die Oberflächentemperatur) und die Spektrum-Leuchtkraft-Beziehung (bestimmte Typen der Veränderlichkeit füllen konkrete Gebiete in einem Farben-Helligkeits-Diagramm aus, in einem nach den Astronomen Hertzsprung und Russell benannten Diagramm, das für die Theorie der Sternentwicklung von größter Bedeutung ist). Diese beiden Beziehungen gewinnen im Verein mit neueren Untersuchungen über die Raumverteilung und die Kinematik der veränderlichen Sterne besonderen Wert für die Erforschung von Struktur und Entwicklung ganzer Sternsysteme, allen voran unseres eigenen, der Milchstraße. Optisch Veränderliche sind meist enge Doppelsterne, deren Bahnebene nicht oder nur wenig gegen die Sichtlinie geneigt ist, oder Sterne, deren Licht auf dem Wege zum Beobachter absorbierende Materie von zeitlich unterschiedlicher optischer Dicke durchlaufen muß.
Seit einiger Zeit kennt man Brücken zwischen den physisch und optisch Veränderlichen: Viele der Novae (Untergruppe Ausbruchsveränderliche) erweisen sich etliche Jahre nach dem Ausbruch als enge Doppelsterne, oft als kurzperiodische Bedeckungspaare. Neben geometrischer Abschattung bleiben am Lichtwechsel nach wie vor physikalische Effekte beteiligt, z. B. Gasströme und Massenaustausch zwischen den Komponenten. Es ist schwer eine klare Trennungslinie zu ziehen, zumal sich die Methoden der Beobachtung völlig gleichen. Keine Klassifikation wird also die ganze Breite der die Veränderlichkeit charakterisierenden Prozesse und Erscheinungen beschreiben kön-

nen, doch sollte eine mehr dimensional aufgebaute – die Theorie einschließende – Klassifikation mehr Klarheit schaffen können als eine weitgehend nur morphologische.
Das Ergebnis der ersten, groben Klassifikation: 60 % physisch Veränderliche, 20 % optisch Veränderliche (Bedeckungsveränderliche), 6 % Ausbruchsveränderliche; der Rest bedarf noch ergänzender Beobachtung.

Bedeckungsveränderliche (Untergruppen je nach Form der Lichtkurve oder Länge der Periode)

Den optisch Veränderlichen war – wegen der geometrischen Effekte – lange Zeit hindurch die Berechtigung abgesprochen worden, sich zu den „echten" Veränderlichen zu zählen. Heute denkt man nicht mehr so, da auch sie in der Entwicklungsgeschichte der Sterne eine wichtige Rolle spielen. Die räumliche Verteilung zeigt eine Bevorzugung der Spiralarme der Milchstraße (Sternpopulation I, die jüngere) und die Meidung ihres Halos – einschließlich der in ihm ruhenden Kugelhaufen – die Meidung der Sternpopulation II, der älteren. Nach der von W. Baade 1952 begründeten Populationslehre unterscheiden sich die verschiedenen Bauteile der Milchstraße, Kern, Kernscheibe, Spiralarme, Halo grundsätzlich nach ihrer Sternbevölkerung. Da es sich dabei um Altersunterschiede handelt, ist die Beziehung zur Sternentwicklung hergestellt. Der Anteil der einzelnen Typen der Veränderlichkeit an der sie umgebenden Sternbevölkerung macht die veränderlichen Sterne zu „Leitfossilien" der Astronomie.
Bei den wenigen Doppelsternen der älteren Population, bei den roten Riesensternen, sind die längeren Umlaufzeiten, die kleineren Bahngeschwindigkeiten, häufiger als bei Systemen der jüngeren Population, bei den normal großen, weißen Sternen. Neben dem zahlenmäßig so hohen Anteil der Bedeckungsveränderlichen an der Gesamtzahl veränderlicher Sterne kann dieser Befund die Vermutung bestärken, enge Doppelsterne seien der Normalzustand, Einzelsterne dagegen anormal. Eine vage, in ihren kosmogonischen Konsequenzen kaum übersehbare Vermutung! Sicher wird die Aufspaltung eines Muttersterns in zwei in ihrer Masse nicht sehr verschiedene Komponenten für die Entstehung von Doppelsternsystemen die größte Wahrscheinlichkeit für sich haben.
Die mehr praktische Bedeutung der Bedeckungsveränderlichen liegt in der Möglichkeit, mit Hilfe der Himmelsmechanik brauchbare Werte für die Massen und Radien der Sterne abzuleiten. Auch eine Aussage über die Leuchtkräfte ist möglich. Die lichtelektrische Photometrie erlaubt infolge ihrer hohen Genauigkeit, aus der beobachteten Lichtkurve bereits Systemgrößen – wenn auch nur relative – abzuleiten. Aber erst die Kombination mit der Spektroskopie (Messung von Radialgeschwindigkeiten mit Hilfe des Doppler-Effektes) erlaubt die Umwandlung in *absolute* Werte. Fünf Parameter kommen in Frage: Die Bahnneigung gegen die Sichtlinie, das Radienverhältnis, der Radius der größeren Komponente (in Einheiten des mittleren Abstandes beider Komponenten), die Leuchtkraft der kleineren Komponente (Gesamtleuchtkraft = 1) und die Randverdunklung (ähnlich wie bei der Sonnenscheibe). Die Messungen lassen auf komplizierte Vorgänge in den Atmosphären und Außenhüllen schließen. In der Diskussion stehen spezielle Fragen der Stabilität, des Massenaustausches zwischen den Komponenten, der Elliptiztät bzw. Abplattung der Komponenten und der Reflexion der gegenseitigen Anstrahlung.
Der Spielraum der auf diese Weise ermittelten Massen erstreckt sich von 0.14 bis 400 Sonnenmassen; jedoch sind die Sterne großer Massen sehr selten, die weitaus überwiegende Mehrzahl streut nur über den Bereich von 0.4 bis 4 Sonnenmassen (1 Sonnenmasse = 2×10^{33} g). Die Massen*verhältnisse* der Doppelsternkomponenten

liegen mit nur wenigen Ausnahmen nahe 1. Der Durchmesser der Komponenten von Bedeckungsveränderlichen liegt zwischen 0.5 und 2000 Sonnendurchmesser (1 Sonnendurchmesser = 1.2×10^{11} cm).

In diesem Zusammenhang erhebt sich die Frage, ob die aus Doppelsternsystemen errechneten Massen und Radien auch für Einzelsterne repräsentativ sein können. Diese Frage kann nur durch einen Indizienbeweis beantwortet werden, gestützt auf folgende Beobachtungstatsachen: Doppelsterne unterscheiden sich in keiner Weise von Einzelsternen. Ihre Verteilung am Himmel ist fast die gleiche, ihre systematischen und zufälligen Bewegungen sind dieselben, ihre Spektren unterscheiden sich durch nichts voneinander, und ihre Farben-Helligkeits-Beziehung deckt sich, soweit das die Beobachtungsergebnisse jeweils erkennen lassen. Auf Grund dieser Übereinstimmungen ist es wohl berechtigt, gleiche Massen und Radien für Doppelsternkomponenten und Einzelsterne anzunehmen.

Die Sternmasse steht in enger Korrelation zur absoluten Helligkeit. Diese sowohl für die theoretische wie auch für die praktische Astrophysik gleich wichtige Beziehung eröffnet die Möglichkeit, aus den viel leichter der Messung zugänglichen absoluten Helligkeiten die entsprechenden Massen abzuleiten. Fehlen spektroskopische Beobachtungen bei einem Bedeckungsveränderlichen, so kann man die Massen der Komponenten trotzdem mit guter Annäherung aus deren Helligkeitsunterschied bestimmen. Ist der Helligkeitsunterschied gleich 0, so entspricht das naturgemäß einem Massenverhältnis 1.00, selbst bei einem Intensitätsverhältnis 100 bleibt das Massenverhältnis noch 0.62. Die Massen*summe* ist noch mit der aus der Lichtkurve ermittelten Bahnneigung als Faktor behaftet, die Kombination mit dem Massen*verhältnis* liefert dann die Werte für die Einzelmassen. In Anbetracht der Gleichheit von Doppel- und Einzelsternen ist das mit von Bedeutung für die Dynamik des Milchstraßensystems, indem die dafür unentbehrliche Kenntnis der Massenverteilung aus der Verteilung der Leuchtkräfte erschlossen werden kann.

In den absoluten Helligkeiten und in den Spektraltypen verhalten sich die Komponenten derart, daß der Hauptstern immer einem jüngeren Entwicklungsstadium entspricht als der Begleiter; dieser Befund ist nichts weiter als eine Selbstverständlichkeit, da in einem auf beliebige Weise entstandenem System der massereichere und absolut hellere Stern gemäß den Gesetzen der Himmelsmechanik die Rolle des Hauptsterns übernehmen muß.

Sorgfältige Beachtung findet die Verlagerung der Helligkeitsminima, die Zeitmomente der beiden gegenseitigen Abdeckungen während eines Umlaufs um den gemeinsamen Schwerpunkt, und die Frage nach der Konstanz der Umlaufsperiode. Im ersten Fall handelt es sich um eine entgegengesetzte Verschiebung der beiden Minima innerhalb der Lichtkurve, verursacht durch die Rotation der Apsidenlinie, der großen Achse einer elliptischen Bahn. Drehung der Apsidenlinie ist im Sonnensystem keine Seltenheit, die Himmelsmechanik bringt sie mit der inneren Massenverteilung der Himmelskörper in Zusammenhang. Im anderen Fall ist die Richtung der Verlagerung der beiden Minima die gleiche, von Periode zu Periode in ihrem Betrag sich steigernd oder abnehmend. Wenn ein sinusförmiger Verlauf der Differenz zwischen tatsächlicher Beobachtung und rechnerischer Erwartung erkennbar ist, so ist noch mit einer dritten, periodisch störenden Komponente zu rechnen. Treten plötzliche Sprünge in der zeitlichen Auftragung dieser Differenzen auf, dann sind hierfür instabile Sternoberflächen oder lokal begrenzte Materie-Ausbrüche verantwortlich zu machen. In neuester Zeit versucht man gewisse Feinheiten im Verlauf der Lichtkurve, die mit den bisherigen Vorstellungen nicht zu erklären sind, durch die Annahme von heißen oder kalten Flecken auf der Sternoberfläche – in Anlehnung an Beobachtungen auf der Sonnenscheibe – verständlich zu machen. Oder: Quasiperiodische Helligkeitsminima wechselnder Tiefe und Gestalten lassen auf

zirkumstellare Wolken aus Partikeln von cm-Größe schließen, die das Sternlicht in statistischer Folge abschwächen; damit wären auch die verschiedentlich nachgewiesenen Infrarot-Exzesse erklärbar.

Die Komponenten eines Doppelsterns weisen oft gleichen, oft aber auch sehr unterschiedlichen Entwicklungszustand auf. Zwei interessante Beispiele für den letzten Fall: Sirius mit einem kompakten weißen Zwerg als Begleiter und das System Epsilon im Fuhrmann mit einer nicht leuchtenden dritten Komponente, bestehend etwa aus einer Globule interstellaren Staubs oder aus einem „schwarzen Loch", eine Konzentration von Materie so hoher Dichte, daß gemäß der Relativitätstheorie Lichtstrahlen die Oberfläche nicht verlassen können, sie werden durch die Schwerkraft festgehalten.

Physisch Veränderliche

a) *Ausbruchsveränderliche* (Untergruppen je nach Intensität des Ausbruchs). Gestaffelt nach der Größe der aufgewandten Energie spricht man von Supernovae, Novae und Zwergnovae. Bei allen explosionsartigen Ausbrüchen wird dem interstellaren Raum Materie „zurückgegeben", die für die Entstehung von Sternen dann neu zur Verfügung steht. Der Name „Neue Sterne" ist insofern irreführend, als es sich nicht um neu entstandene Sterne handelt, sondern um bereits vorhandene, aber meist um sehr lichtschwache.

Supernovae: Wenn im Sterninnern aller Wasserstoff verbrannt ist – zu Helium und schwereren Elementen – treten die für einen extrem starken Ausbruch verantwortlichen thermonuklearen Prozesse in Aktion, im späten Entwicklungsstadium des Sterns. Die Temperatur im Innern beträgt dann so hohe Grade, daß selbst schwere Elemente (wie etwa Eisen) durch Kernprozesse wieder zerstört werden, wobei Energie nunmehr verbraucht wird. Wegen der benötigten großen Energiemenge kontrahieren die innersten Gebiete plötzlich, innerhalb weniger Sekunden, einem Kollaps gleichkommend. Auch die äußeren Teile des Sterns werden kontrahieren; die dabei gewonnene Gravitationsenergie verwandelt sich in Wärmeenergie, wodurch eine starke Temperaturerhöhung eintritt, die hier weitere Kernprozesse zur Energieerzeugung zum Ablauf bringt. Diese große, zusätzliche Energiemenge führt zu einer Druckerhöhung, die einen explosionsartigen Ausbruch der Außenhüllen des Sterns – hinaus in den interstellaren Raum – zur unmittelbaren Folge hat. Die ausströmenden Gase haben Geschwindigkeiten bis zu 10 000 km/sec. Die Explosionswolke z. B. der Supernovae 1054 ist jetzt in Gestalt des Krabbennebels noch zu sehen; mitten in dieser Wolke steht der kleine dichte „Rest", ein Pulsar.

Die absolute Helligkeit solch überdimensionaler Ausbrüche entspricht der Leuchtkraft von Millionen Sonnen, die Temperatur erreicht dabei viele Millionen Grad. Daraus erkennt man die enorme Bedeutung dieser leuchtstarken Marken für die Entfernungsbestimmung, speziell bei extragalaktischen Sternsystemen. Die aus der Differenz zwischen scheinbarer und absoluter Helligkeit errechnete Entfernung reicht mit Hilfe der Supernovae bis etwa 100 Millionen Lichtjahre. Leider sind die Supernovae so selten, in unserem Sternsystem (Milchstraße) z. B. sind im abgelaufenen Jahrtausend nur drei beobachtet worden. Auf alle Systeme verteilt sind es über 200, die heute für Entfernungsbestimmungen zur Verfügung stehen. Trotz der oft geringen scheinbaren Helligkeit und der nicht voraussehbaren Stelle am Himmel darf das maximale Aufleuchten einer Supernova, der genaue Zeitpunkt des Ausbruchs, nicht verpaßt werden.

Novae: Die Lichtkurven der „einfachen" Ausbrüche unterscheiden sich kaum von denen der Supernovae, außer in ihrer Amplitude und einem gelegentlichen Flakkern im Verlauf ihres mehr oder minder steilen Abstiegs zur ursprünglichen Helligkeit. Der Abstieg kann sich über Monate bis Jahre erstrecken. 50 Novae flammen jährlich allein in der Milchstraße auf, aber nur eine oder zwei werden tatsächlich beobachtet; bekannt sind bis heute etwa 150 Novae, außerdem 30 im Andromedanebel und 10 in den Magellan'schen Wolken. Das sind Zahlen, die um mehrere Zehnerpotenzen höher liegen als bei den Supernovae: Der Novavorgang gehört eben weit mehr zur schrittweisen Entwicklung der Sterne; unentschieden bleibt, ob er für alle Sterne gilt oder nur für einen Teil.

Auch hier ist die physikalische Deutung der gewaltigen Erscheinungen noch recht unsicher, da man die Eigenschaften so dichter, „entarteter" Materie nicht genau genug berechnen kann. Kernprozesse und Stoßwellen – hier in ihrer Wirkung zwar vermindert – sind in Aktion.

Hier einiges zum Stoßwellen-Mechanismus: Er ist die Folge des Zusammenspiels von Gas und Strahlung, von Kollisionen und Rekombinationen. Voraussetzung ist nach E. Schatzmann (ab 1946) ein kritischer, massenmäßig hoher Anteil von Helium-3-Kernen an der inneren Sternmaterie (etwa $^1/_{100}$), also eine hohe Dichte. Das ist der Anstoß zur Explosion, zur Abhebung der äußeren Schichten des Sterns. Bei Wahrung der Totalenergie als bestimmender Faktor entsteht eine nach außen und auch eine nach innen gerichtete Welle, eine primäre und eine sekundäre, in ihrer Bewegung bedingt durch Temperatur und Geschwindigkeit der explosiven Außenteile. Wenn eine solche Stoßwellenfront in ihrer Eigenschaft als Energieträger von innen her bis zur Sternoberfläche vordringt, so tritt eine Temperatursteigerung bis zu Millionen Grad in ihrem unmittelbaren Gefolge ein, verursacht durch einen Sprung in der Entropie bzw. durch die Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme. So eine Region erscheint dann dem Astronomen als ein Ausbruch oder heller Fleck, unterschiedlich in der Intensität je nach Höhe der Temperatur direkt hinter der Stoßwellenfront. Gemäß dieser theoretischen Vorstellung spielen Stoßwellen bei Supernovae, Novae und selbst bei Pulsationsveränderlichen die ausschlaggebende Rolle, zumal auch Wiederholungen ihre Erklärung finden können.

Das Auftreten von „verbotenen" Linien im Spektrum läßt auf eine sehr dünne Hülle schließen, deren Dichte im weiteren Verlauf immer geringer wird. Die Novae sind offenbar rekurrierend, d. h. der Ausbruch wiederholt sich mit einer um so längeren Zwischenzeit, je größer der Helligkeitsanstieg war. So leuchtet z. B. die Novae in der nördlichen Krone von 1866 im Jahre 1946 erneut auf, wenn auch mit verminderter Größe aller typischen Merkmale.

Immer mehr ehemalige Novae werden als enge Doppelsterne, alle mit ungewöhnlich kurzen Umlaufszeiten (Bruchteile eines Tages) erkannt, ein wichtiger Befund für die Theorie. Die Novae zeigen eine bemerkenswerte Konzentration zur Hauptebene der Milchstraße und zur Umgebung ihres Zentrums; relativ große Geschwindigkeiten senkrecht zur galaktischen Hauptebene sind häufig. Beides spricht dafür, daß die Novae einer Population zwischen I und II angehören.

Dieselbe scheinbare und räumliche Verteilung am Himmel haben auch die 150 Planetarischen Nebel der Milchstraße, ring- oder kreisförmige Nebelflecke, in deren Zentrum meist ein schwacher Stern steht. Daher ist die Annahme naheliegend, daß sich unter diesen Objekten sicherlich Postnovae befinden, zumal absolute Helligkeit und Spektrum nahezu miteinander übereinstimmen. Obwohl die Expansionsgeschwindigkeit der Nebelmassen bei den Planetarischen Nebeln bedeutend geringer ist, füllen sie eine größere Fläche aus, und sind im allgemeinen stärker ausgebildet als die der Postnovae. Planetarische Nebel haben vielleicht

ein höheres Alter, was in neuester Zeit zu der Hypothese führte, ihre Zentralsterne seien die heißen Kerne von alten Riesensternen, die bereits aus schwereren Elementen bestehenden Reste nach erfolgtem Abstoßen der Außenhüllen.

Zwergnovae: Man kann diese Untergruppe als rekurrierende Novae in verkleinertem Maßstab bezeichnen, wobei die Reduzierung sowohl die Zwischenzeiten als auch die Amplituden betrifft. Ob diese äußere Ähnlichkeit auch einer inneren Verwandtschaft entspricht, darüber besteht noch keine Klarheit. Unterschiede gibt es jedenfalls im Spektrum (arm an Einzelheiten) und in der Ursache des Lichtwechsels (veränderliche Temperatur der Photosphäre); Anzeichen für eine Expansion lassen sich nicht erkennen. Gemeinsam andererseits ist die statistische Beziehung zwischen mittlerem Zeitintervall und Helligkeitsamplitude; Doppelsternsysteme von sehr kurzer Umlaufperiode sind auch hier die Regel. Die hierdurch mögliche Bestimmung der Massen führt zu Werten ähnlich einer Sonnenmasse je Komponente, während ihre Leuchtkraft weit unterhalb der der Sonne liegt (lichtschwache Zwerge).
Diese 3 Untergruppen der Ausbruchsveränderlichen stellen sich als wohldefinierte Typen mit klarer Zuordnung im Einzelfall dar, während es andererseits eine größere Anzahl von Objekten gibt, die irgendwie von diesen Normaltypen abweichen.

b) *Pulsationsveränderliche* (Untergruppen je nach Dauer der Pulsation und Zugehörigkeit zu einer der Sternpopulationen)
Die Helligkeitsänderungen erfahren bei diesen Sternen ihre Erklärung durch Schwingungsvorgänge innerhalb ihrer obersten Schichten, einschl. ihrer Atmosphären; das beweisen die der Beobachtung zugänglichen Radialgeschwindigkeiten und die Form der Lichtkurven. Letztere lassen neben der Grundschwingung auch das Vorhandensein von Oberschwingungen erkennen. Die Periode der sich auf etwa 10 % des Sternradius erstreckenden Pulsation ist äußerst regelmäßig, über Jahrzehnte hinweg; sie kann aber auch – ähnlich wie bei den Bedeckungsveränderlichen – kleinsten Schwankungen unterliegen, plötzlich, oder solchen, die die Periode durch ständige Summierung der Beträge zu einer langsamen Zu- bzw. Abnahme veranlassen.
Pulsationsveränderliche zeigen bemerkenswerte Korrelationen zwischen ihren charakteristischen Merkmalen, zwischen Periode und Radius, Periode und Temperatur, Periode und mittlere Dichte, vor allem zwischen der Periode und der Leuchtkraft. Gerade diese Beziehung, zunehmende Periodenlänge entspricht wachsender absoluter Helligkeit, bietet die beste Möglichkeit, Entfernungen zu bestimmen. Leider ist die absolute Helligkeit, die Leuchtkraft der Pulsationssterne im Vergleich mit den Supernovae und Novae wesentlich geringer, so daß man mit ihrer Hilfe nur zu Entfernungen von einigen Millionen Lichtjahren in den Raum vorstoßen kann. Dafür ist die Genauigkeit größer. In beiden Fällen verbleibt eine beträchtliche Unsicherheit durch unsere nicht ausreichende Kenntnis der Stärke und Wellenlängenabhängigkeit interstellarer Absorption.
Es läßt sich an Hand der Theorie der Sternenentwicklung übersehen, weshalb Sterne gegebener Leuchtkraft nur in einem bestimmten schmalen Bereich der effektiven Temperatur *in*stabil sein können. Dazu bedarf es aber einer kurzen Schilderung des Ablaufs eines Sternenlebens: Man weiß heute mit ziemlicher Sicherheit, daß die Sterne in großen Wolken von Wasserstoff und Staub entstehen, durch Zusammenziehung der Partikel unter Wirkung der Schwerkraft (gravitierende Kontraktion). Dabei wird der innere Teil so aufgeheizt, daß die atomaren Kernprozesse mit Wasserstoff als Grundlage der Bildung schwererer Elemente ab-

laufen können. Der „junge" Stern ist zunächst instabil, er zeigt starke Lichtänderungen in Tagen und Stunden. Nach etlichen tausend Jahren wird er stabil und verweilt für einige Milliarden Jahre in einem Zustand, der unserer Sonne weitgehend entspricht. Große Massen entwickeln sich rasch, kleine langsamer. Zur Deckung der ausgestrahlten Energie dient allein der Wasserstoff, der jedoch schließlich erschöpft, d. h. ganz in Helium umgewandelt sein wird, was bedeutet, daß die Energieerzeugung aussetzt und eine neue Instabilität sich bemerkbar macht. Der Gleichgewichtszustand zwischen der Schwerkraft und dem ihr entgegenwirkenden Gas- und Strahlungsdruck ist gestört, der Stern bricht zusammen, wird dabei durch Kontraktion neu erhitzt, und andere atomare Prozesse auf der Grundlage von Helium beginnen zu wirken, die eine sehr große Energieausbeute liefern. Der Stern dehnt sich aus zu einem Riesen, durchläuft dabei aber wieder einen Zustand der Instabilität, indem er zu pulsieren beginnt. Nach der Theorie wird dieser letzte Bereich der Instabilität in verhältnismäßig sehr kurzer Zeit durchlaufen, bevor der Stern sein Leben als weißer Zwerg (ein lichtschwacher Stern aus entarteter Materie) oder als Nova (durch eine Explosion) beschließt. Problematischer ist die Deutung der Veränderlichkeit bei den roten Riesen und Überriesen, wie es die langperiodischen Sterne vom Mira-Typ oder Objekte wie Beteigeuze im Orion sind. Sie sind Gaskugeln sehr *geringer* Dichte und einem Durchmesser, der etwa der Marsbahn vergleichbar ist: 400 bis 500 Millionen Kilometer; sie liegen damit nahe der Stabilitätsgrenze, so daß kleine Ursachen große Wirkungen haben können. Zur Gewährleistung der Stabilität muß nach der Theorie die mittlere Dichte einer sich in einem zentralsymmetrischen Gravitationsfeld befindlichen Massenansammlung größer sein als ein bestimmter kritischer Wert. Der Grundvorgang ist aber sicher auch eine Pulsation, die in periodischer Wiederkehr die Bewegung der Sternatmosphäre steuert; daneben spielen Durchlässigkeits- bzw. Opazitätsänderungen der äußersten Schichten, bestehend aus Kohlenstoff, Titanoxyd und Zirkonoxyd, eine wichtige Rolle. Bedeutungsvoll ist, daß die Durchmesser der langperiodischen roten Riesensterne (Perioden von mehreren hundert Tagen) ihr Minimum zur Zeit des Maximums der Helligkeit aufweisen und die Amplitude ihrer Extrema im Mittel 18 % beträgt, also bei diesen Sternen nur *ähnliche* Verhältnisse herrschen wie bei den „klassischen" Pulsationssternen, deren Perioden von nur wenigen Tagen Dauer sind. Gemeinsam ist die Periode-Temperatur-Beziehung, während eine Periode-Leuchtkraft-Beziehung nicht oder nur andeutungsweise existiert.

In dem letzten Jahrzehnt zeigte sich, daß Änderungen der Magnetfeldstärke der Sterne gekoppelt sind mit Helligkeitsänderungen, ein Zusammenhang, den zu finden ein Höchstmaß an Genauigkeit erfordert. Eine interessante Hypothese: Die Pulsationssterne sind als periodisch eruptive Veränderliche zu betrachten, die Helligkeitsminima stellen also den Normalzustand dar. Die Eruptionen erfolgen in zwei dem magnetischen Äquator symmetrisch zugeordneten Zonen. Falls die magnetische Achse nicht mit der Rotationsachse des Sterns zusammenfällt, ändert sich unsere Blickrichtung zu den Eruptionszonen im Laufe der Rotation, was wiederum eine Änderung der Amplitude und der Gestalt der Lichtkurve bedingt. Gleichzeitige Polarisationsmessungen könnten hier nähere Aufschlüsse geben. Da die Veränderlichkeit infolge Pulsation meist an den Riesencharakter gebunden ist, Riesensterne aber verhältnismäßig seltene Erscheinungen darstellen, kann es nicht überraschen, daß sich kein Veränderlicher unter den sonnennahen Sternen, in unserer unmittelbaren Umgebung bis 100 Lichtjahren Entfernung, finden läßt, abgesehen von einem Bedeckungsveränderlichen, einem roten Zwergstern.

Weitere physisch Veränderliche: (Es handelt sich um relativ seltene Fälle oder um solche Objekte, die wegen ihrer geringen Lichtwechsel-Amplitude erst durch die verbesserten instrumentellen Möglichkeiten die erforderliche Beachtung finden konnten).

Flackersterne: Kehren wir zurück zum ersten Stadium der Instabilität im Leben eines Sterns. Junge Sterne, noch auf dem Wege zu einem „normalen" Stern, weisen infolge dieser Instabilität unregelmäßige, kurzlebige Helligkeitsschwankungen auf, ein alle Teilbereiche des Spektrums des Sterns erfassendes Flackern. Es kann nicht überraschen, wenn wir diese Gruppe von Veränderlichen in räumlicher Nähe vom Ausgangsmaterial der Sterne antreffen, in direkter Verbindung mit der interstellaren Materie. Das Spektrum weist einige Eigentümlichkeiten auf, einen beträchtlichen Helligkeitsexzeß im Infraroten und Emissionslinien, deren Konturen darauf hinweisen, daß Gas in großen Beträgen ständig von der Sternoberfläche abströmt. Es muß sich um eine Parallele zum Sonnenwind, hier um einen Sternwind handeln, der aber in seiner Mächtigkeit die solare Korpuskularstrahlung um das vieltausend- oder sogar millionenfache übertrifft. Der Stern würde in wenigen Millionen Jahren einen erheblichen Teil seiner Masse verlieren, falls er so lange in dem gegenwärtig beobachteten Zustand verbleibt. Schließlich haben radioastronomische Beobachtungen ergeben, daß einige Moleküle, z. B. Wasserdampf und Hydroxyl sehr stark im Radiofrequenzbereich emittieren. Der Mechanismus dieser Emissionen ist noch weitgehend ungeklärt, erhebliche Mengen dieser Moleküle können jedenfalls in den dichten interstellaren Wolken mit Recht vermutet werden.
Der erwähnte Intensitätsexzeß im Infraroten herunter bis zum gewohnten optischen Spektralbereich läßt sich als die Wirkung einer den Stern umgebenden Staubwolke deuten, die das Licht des Sterns zwar merklich schwächt, aber nicht vollständig absorbiert. Dann wird die absorbierte Sternstrahlung im Infraroten remittiert, so daß im Extremfall der Stern überhaupt nur im Infrarot beobachtet werden kann, wofür es bereits Beispiele gibt.
Gruppenbezeichnung nach dem Stern T im Stier (T Tauri Sterne).

Kohlenstoffsterne: Diese Gruppe ist sehr klein; sie besteht aus Riesensternen fortgeschrittener Entwicklung. Der Lichtwechsel zeigt als charakteristisches Verhalten ein helles Normallicht, das durch langanhaltende tiefe Minima mit sehr unregelmäßigem Kurvenverlauf unterbrochen wird. Die Mehrzahl der zugeordneten Sterne sind laut Septrum überreich an Kohlenstoff und ungewöhnlich arm an Wasserstoff. Über die Ursache des Lichtwechsels ist wenig bekannt, vielleicht ist er durch unterschiedliche Wolkenbildung aus „Ruß" bedingt oder durch Pulsation, in Anbetracht des Auftretens von Helium in Emission. Für die Existenz einer um den Stern gelagerten Kohlenstoffwolke spricht der Infrarot-Exzeß, der immer bei absinkender Helligkeit auftritt. Der Lichtverlust im Visuellen und Violetten wird durch eine entsprechend verstärkte Emission im Infraroten kompensiert, so daß die bolometrische Helligkeit, die Helligkeit des *gesamten* Spektrums, nahezu konstant bleibt. Aber auch die Beteiligung von Pulsationserscheinungen ist denkbar, da nach theoretischer Vorstellung für Heliumsterne bestimmter Masse, Leuchtkraft und Temperatur das Vorhandensein von Pulsationen möglich wird.
Gruppenbezeichnung nach dem Stern R in der Nördlichen Krone (R Coronae Borealis Sterne).

Hüllensterne: Vermutet werden weitausgedehnte Hüllen um Einzelsterne oder um Doppelsternsysteme. Erstere sind heiße, blaue Sterne mit nur geringer Amplitude ihres Lichtwechsels; das Spektrum offenbart Emissionslinien des Wasserstoffs und des ionisierten Heliums, aus deren komplexer Gestalt auf einen Gasring in der Äquatorebene oder auf eine den Stern völlig umschließenden Hülle gefolgert werden kann. Die Systeme nennt man „symbiotische Sterne", entsprechend der Symbiose aus der Biologie, einem Begriff für das Zusammenleben zum gegenseitigen Vorteil. Das Kennzeichen ist das Vorhandensein eines heißen, blauen Sterns und eines kühlen, roten Begleiters im gemeinsamen Spektrum. Die auftretenden Emissionslinien haben ihren Ursprung wieder in einer ausgedehnten, das Paar oder nur die heiße Komponente umfassenden Hülle. Vielgestaltig dokumentieren sich die Lichtkurven, überlagert von mehr oder weniger regelmäßigen Effekten, bedingt durch Aktivität auch der kühlen Komponente, durch Bedeckungen und durch nahezu periodische Eruptionen – einer Zwergnova ähnlich – des heißen Sterns, mit Intervallen von etwa 50 Tagen und einer Dauer von einigen Tagen; alle Anteile können von Paar zu Paar sehr verschiedene Amplituden aufweisen. Ein Modell neueren Datums: Der heiße Stern, oft bereits ein weißer Zwerg, ist von einem Ring (oder Scheibe) dünnen Gases umschlossen, der laufend von Material getroffen wird, das ihm von dem roten Begleiter in Gestalt eines einseitigen Massenaustauschs zuströmt. Unter der Anziehungskraft des massereichen Hauptsterns wird dieses zufließende Material beschleunigt und kollidiert mit dem äußeren Rand des Ringes. Dort entsteht jeweils ein blitzartiges Aufleuchten, das sich durch eine Spitze in der gemeinsamen Lichtkurve bemerkbar macht. Insgesamt ist es nur ein Flimmern, mit Frequenzen von Minuten und auch weniger. Die Bedeckungen weisen sich außer den üblichen Einsenkungen innerhalb der Lichtkurve durch ein zeitweises Nachlassen oder Aufhören des Flimmerns aus, weil die Auftreffstellen, die hellen Flecke vom großen, aber massearmen Begleiter partiell oder total abgedeckt werden.

Zu symbiotischen Sternen (als Gruppe oft auch nach dem Stern U in den Zwillingen, U Geminorum Sterne benannt) entwickeln sich schon nach kurzer Zeit fast alle ehemaligen Novae; da es sich dann meist um sehr enge Doppelsysteme handelt, sind gegenseitige Bedeckungen die Regel. Damit ist die bereits erwähnte Brücke zwischen den beiden Hauptarten der veränderlichen Sterne hergestellt, zwischen den optisch und den physisch Veränderlichen.

Blinksterne: Vor einigen Jahren fiel es auf, daß es Stellen am Himmel gibt, die eine Radiostrahlung mit einer Pulsperiode von Sekunden und einer Pulsdauer von nur einigen tausendstel Sekunden „blinken", die Pulsare. Die zu geringe Auflösung der Apparatur erlaubte noch keine Identifikation mit optisch wahrnehmbaren Sternen; das gelingt aber heute immer öfter, jedenfalls ganz eindeutig beim Pulsar mitten im Krabbennebel.

Man beobachtet an fast allen Pulsaren eine Zunahme der Pulsperiode, mit der auch eine Zunahme der Pulsdauer einhergeht. Das hat zu der heute bevorzugten Theorie geführt, die die Pulsare als rotierende, extrem dichte Neutronensterne deutet. Wenn die Pulsarstrahlung als Emission relativistischer Elektronen aus dem Magnetfeld von Neutronensternen aufgefaßt werden kann, so müßte sich auf Grund des strahlungsbedingten Verlustes von stellarer Rotationsenergie eine damit parallel laufende Zunahme der Pulsperiode ergeben – wie das ja auch die Beobachtung erkennen läßt.

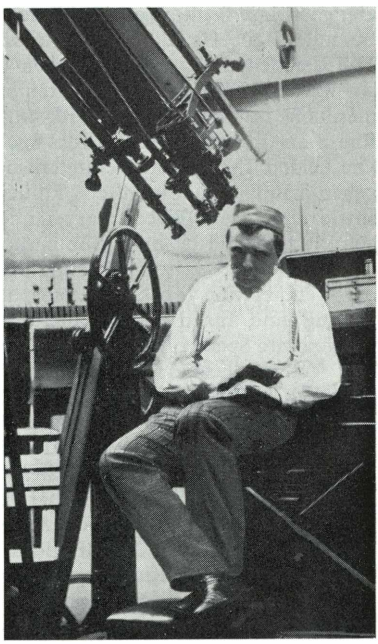
Die Pulsare verteilen sich im Raum mehr oder weniger zufällig bis zu Distanzen von 10 000 Lichtjahren, aber doch mit einer Konzentration zur Milchstraßenebene, ähnlich den jungen Sternen der Population I.

Quasare, Kompaktgalaxien, Seyfert-Galaxien (solche mit Emissionslinien) und Kerne von normalen Galaxien weisen neben Intensitätsschwankungen ihrer Radiowellen oft auch solche ihrer Lichtwellen auf. Aber alle diese Objekte sind nicht veränderliche Sterne im eigentlichen Sinne, auf sie soll daher nicht weiter eingegangen werden. Wie überhaupt unsere Aufzählung verschiedener Gruppen und Arten von veränderlichen Sternen eine Auswahl darstellt, aus Gründen der angestrebten Beschränkung auf das Wichtigste.

Ausblick

Abschließend sollen die Möglichkeiten genannt werden, die sich durch Benutzung von astronomischen Satelliten für die Veränderlichen-Forschung eröffnen. Beobachtungen im fernen Ultraviolett versprechen, gerade bei Veränderlichen mit Oberflächen hoher Temperatur, ein besseres Verständnis der physikalischen Prozesse: die Lichtkurven sind zu vergleichen mit denen von der Erdoberfläche aus erhaltenen. Auch der Mechanismus der Pulsation oder der des Massenverlustes läßt sich durch die Untersuchung von ultravioletten Spektrallinien bestimmter Elemente deutlicher darlegen. Bei den roten Riesen und Überriesen – wohl alle in irgend einer Weise veränderlich – eignen sich z. B. die Resonanzlinien des einfach ionisiertem Magnesiums bei 2800 Å besonders gut für die Untersuchung ihrer Chromosphären. Da ein beträchtlicher Teil der Bedeckungsveränderlichen Systeme sind mit blauen, heißen Komponenten, so werden Reflexionseffekt, Randverdunklung und Massenaustausch im Zusammenhang mit der Sternentwicklung und dem Massenverlust in dem interstellaren Raum im ultravioletten Teil des Spektrums besser zu studieren sein.
Die beiden Typen von Veränderlichen, für die der *infrarote* Teil näheren Aufschluß geben kann, sind die roten, kühlen Sterne aller Altersstufen und Größenklassen, sowie diejenigen Bedeckungsveränderlichen, die von einer dichten Staubwolke eingehüllt sind und deshalb eine zusätzliche Rotverfärbung aufweisen. Eine ultraviolett und infrarot erweiterte Spektralphotometrie gestattet eine genauere Bestimmung der Temperatur von Sternatmosphären und von bolometrischen Korrekturen, die wichtig sind für die Extrapolation der spektral so beschränkten Beobachtung auf das gesamte Spektrum elektromagnetischer Wellen.
Die Veränderlichkeit von Gamma- und X-Strahlungsquellen ist heute selbst im optischen Spektralgebiet bekannt, doch handelt es sich meist um Objekte, die weniger einem Stern als einer winzigen diffusen Fläche ähneln.
Zum Schluß etwas Nachdenkliches und ein wenig Fortschrittliches: Ermöglicht wurde alle Beobachtung der Sterne und die Entdeckung ihrer Helligkeitsschwankungen durch den wohl glückhaften Umstand, daß der enge spektrale Empfindlichkeitsbereich des menschlichen Auges sich mit seinem Maximum fast genau deckt mit dem Maximum des ähnlich engen Durchlaßbereichs der Erdatmosphäre für optische Wellen. In einem weniger günstigen Fall hätte erst die Satellitentechnik von heute uns in die Lage versetzt, von der Existenz der Sternenwelt und ihrer Geheimnisse Kenntnis zu nehmen. Welch verspätetes Kompliment für unser so schul-

bares Auge, ausgesprochen in einer Zeit, wo es in Bezug auf absolute Meßgenauigkeit mit der photographischen Platte oder lichtelektrischen Zelle nicht mehr konkurrieren kann. Kaum günstiger fällt der Vergleich bezüglich der *Dauer* einer Helligkeitsmessung aus. Weitentwickelte Technik im Gerätebau erlaubt jetzt pro Stunde die Registrierung von vielen tausend Helligkeitswerten. Eine solche „Schnelligkeit" macht die Feststellung kürzester und kleinster Schwankungen möglich, die entweder dem normalen Lichtwechsel veränderlicher Sterne überlagert sind oder die eine Veränderlichkeit überhaupt erst zu Tage treten lassen. Der vermehrte Einsatz größter Instrumente fördert in einem kaum übersehbaren Ausmaß die Anzahl der Informationen, was erhöhte Automation von Beobachtung und ihrer Reduktion unbedingt erforderlich macht. Wo ist das Bild, wo der Astronom am Fernrohr sitzend mit würdigem Gehabe seine mit dem Auge wahrgenommenen Beobachtungen nur handschriftlich zu Protokoll bringt? Ein berechtigtes Kompliment auch der *technischen* Entwicklung!



Prof. Dr. E. Hartwig, 1886–1923 Direktor der Remeis-Sternwarte Bamberg

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Bericht der Naturforschenden Gesellschaft Bamberg

Jahr/Year: 1974

Band/Volume: 49

Autor(en)/Author(s): Strohmeier W.

Artikel/Article: Die veränderlichen Sterne 1-14