

Stefan Dreizler

Stellare und planetare Astrophysik



Stefan Dreizler, Professor für Astrophysik in Göttingen, O. Mitglied der Akademie seit 2016

Bedingt vor allem durch den Fortschritt in der Detektor-Technologie und in der Datenverarbeitung haben wir in den letzten Jahrzehnten ein sehr viel detaillierteres Verständnis der Prozesse erlangt, die zur Bildung von Galaxien, ihrer Sterne und deren Planeten führen. Unser Universum ist vor 13,8 Milliarden Jahre entstanden. Aus dem zuerst fast perfekt homogenen und isotropen Universum haben sich aus den anfänglichen kleinen Dichtestörungen durch die Gravitation in kurzer Zeit Strukturen herausgebildet, aus denen die Galaxien entstanden. In den Galaxien haben sich Sterne gebildet, die dann, ausgehend von dem ursprünglich vorhandenen Wasserstoff und Helium, den Rest der chemischen Elemente gebildet

haben, die dann der jeweils nächsten Generation von Sternen zur Verfügung standen. Mit den Sternen bildeten sich Planeten. Seit wenigen Jahren herrscht nun Gewissheit, dass Sterne wie unsere Sonne mit einem oder mehreren Planeten keine Ausnahmeerscheinung darstellen.

Meine Forschung ist in diesem Überlapp aus Sternentstehung und Entwicklung sowie der Untersuchung von Sternen und ihrer Planetensysteme angesiedelt. Die Forschung wird zum einen durch Beiträge in der Entwicklung und Bau von innovativen Instrumenten vorangetrieben. Unser Institut ist eines der wenigen deutschen Universitätsinstitute, die auf diesem sehr kompetitiven Gebiet international mithalten können. Die Beteiligung an Instrumentierungsprojekten erlaubt dann die Definition der wissenschaftlichen Ziele von Beginn an und ermöglicht so einen privilegierten Zugang zu den Beobachtungsdaten. Zum anderen benötigt die Interpretation der Beobachtungsdaten umfangreiche numerische Simulationen. Meine Gruppe ist hier zum einen im Bereich der Simulation von Sternspektren, zum anderen im Bereich der dynamischen Simulation von Planetensystemen aktiv. Im Folgenden möchte ich noch etwas ausführlicher auf aktuelle Projekte eingehen.

Stellare Populationen in Kugelsternhaufen

Mein Forschungsinteresse liegt zum einen im Bereich der stellaren Astrophysik. In den letzten Jahren habe ich mich auf Sterne in Kugelsternhaufen konzentriert. Kugelsternhaufen bestehen aus typischerweise 100.000 Sternen, die unterein-

ander gravitativ gebunden sind und so als stabile Substruktur in Galaxien über das bisherige Alter des Universums existieren können. Kugelsternhaufen und ihre Sterne sind sehr alt, sie haben sich in der Frühphase der Galaxienentstehung gebildet. Sie konservieren also die Bedingungen aus dieser Zeit und können somit Informationen über die frühen Phasen unseres Universums liefern. Lange Zeit galten Kugelsternhaufen als recht simple Objekte, mit Sternen einer einzigen Generation. Genauere Untersuchungen haben aber gezeigt, dass es unterschiedliche Populationen von Sternen in Kugelsternhaufen gibt, die sich eventuell auch dynamisch voneinander unterscheiden. Bei der Untersuchung von Kugelsternhaufen besteht nun das Problem, dass zwar prinzipiell sehr viele Sterne vorhanden sind, diese aber räumlich so eng stehen, dass man diese im Allgemeinen nicht einzeln spektroskopisch untersuchen kann.

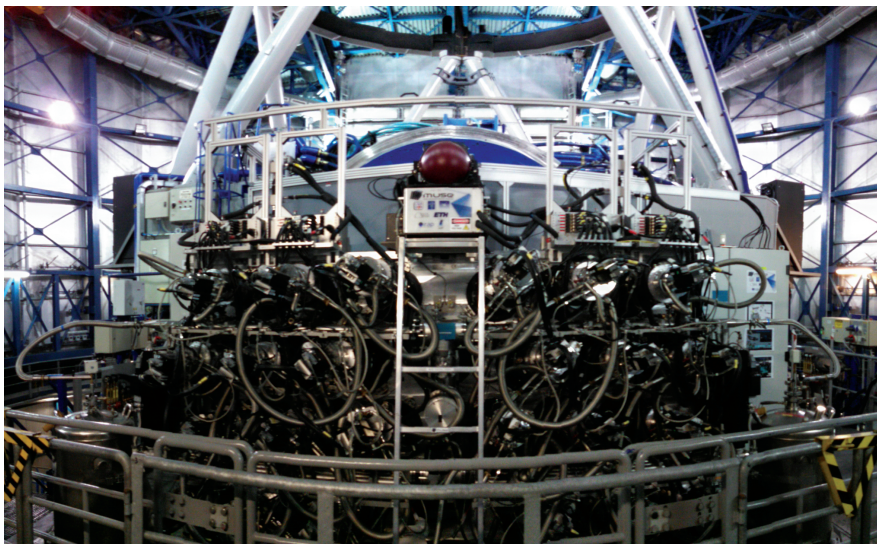


Abb.1: MUSE am *Very Large Telescope* der Europäischen Südsternwarte. Zu sehen sind die Kühlleitungen der 24 Detektoren für die 24 Spektrographen, die in einem Gesichtsfeld von einer Quadrat-Bogenminute 90.000 Spektren aufnehmen

Meine Gruppe hat sich über die letzten zehn Jahre an der Entwicklung und am Bau eines neuartigen Instruments beteiligt, das dieses Problem beseitigt. Als *Integral Field* Spektrograph ist der *Multi Unit Spectroscopic Explorer* (MUSE, Bild 1) in der Lage, simultan sowohl die räumliche als auch die spektroskopische Information eines Bildes zu liefern und nicht entweder das eine oder das andere. Anhand der räumlichen Information können wir somit die Beiträge der einzelnen Sterne zu

dem spektroskopischen Signal rekonstruieren. Das bisherige Problem der hohen Sterndichte verwandelt sich damit in einen Vorteil, wir können nun tausende von Sternen mit einer einzigen Beobachtung spektroskopieren.

MUSE ist seit Oktober 2014 bei der *Europäischen Südsternwarte* (ESO) in Chile in Betrieb. Der Entwicklungsaufwand, seit 2005 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert, wird seitens der ESO durch einen privilegierten Zugang zu Beobachtungszeit vergütet. Wir haben seit Beginn der Beobachtungen Spektren von mehr als einer Million Sterne in 25 Kugelsternhaufen gewonnen, gut 100 mal mehr als alle bisherigen Beobachtungen zusammen. In einem auf zehn Jahre angelegten Projekt sind wir nun dabei diese Daten auszuwerten, d. h. die spektroskopischen und dynamischen Eigenschaften der Sternpopulationen in Kugelsternhaufen zu untersuchen. Zur Auswertung benötigt man simulierte Spektren von Modellsternen, um aus dem Vergleich der beobachteten und simulierten Spektren die physikalischen Eigenschaften der Sterne erhalten zu können. Dazu haben wir in den letzten Jahren eine sehr umfangreiche Bibliothek von simulierten Spektren erstellt, die auch von vielen anderen Gruppen zur Spektralanalyse verwendet werden.

Im Laufe des Jahres 2017 wird *MUSE* durch eine *Adaptive Optik* Einheit (AO) erweitert. Die AO verwendet einen künstlichen Stern, der durch vier Natrium-Laser in der Hochatmosphäre projiziert wird, als Referenz, um die Turbulenz und damit die Bildstörungen der Erdatmosphäre (teilweise) zu korrigieren. Die dadurch verbesserte räumliche Auflösung wird es uns dann erlauben, auch die zentralen Bereiche in Kugelsternhaufen auflösen zu können. Damit wird sich die Frage klären lassen, ob in Kugelsternhaufen zentrale Schwarze Löcher ähnlich wie in den Zentren von Galaxien existieren. Wir vermuten, dass wir Kugelsternhaufen so von eingefangenen kleinen Galaxien unterscheiden zu können.

Da die Entwicklung von Instrumenten von der ersten Idee bis zur Auswertung der Daten gut 20 Jahre dauert, haben wir parallel zur Fertigstellung von *MUSE* mit der Entwicklung des nächsten Instruments begonnen. *MICADO* wird das erste Instrument am neuen 39-Meter *Extremely Large Telescope* der ESO werden und voraussichtlich 2024 in Betrieb gehen. *MICADO* wird die bis dahin höchste räumliche Auflösung liefern. In Kugelsternhaufen werden wir damit die Bewegung der Sterne mit einer Genauigkeit von 100 m/s bestimmen können. Da diese Geschwindigkeitsmessung aus der Positionsänderung erfolgt, ist sie komplementär zur Geschwindigkeitsmessung mit *MUSE*, das aus der spektroskopischen Untersuchung die Geschwindigkeit in radialer Richtung liefert. Dies wird nochmal ein erheblicher Fortschritt in der Untersuchung der stellaren Dynamik in Kugelsternhaufen darstellen. Die Entwicklung und der Bau von *MICADO* wird ebenfalls vom BMBF gefördert. Wie bei *MUSE* ist unser Beitrag die Bereitstellung der mechanischen Struktur des Instruments, die die erforderliche Messgenauigkeit garantiert.

Extrasolare Planeten

Die Frage nach der Existenz von Planeten außerhalb unseres Sonnensystems hat die Menschheit seit Jahrtausenden fasziniert. Mit der Entdeckung des ersten extrasolaren Planeten vor gut 20 Jahren ist das keine rein philosophische Frage mehr. Die Suche nach Planeten und die Bestimmung ihrer Eigenschaften, vor allem von ihrem innerem Aufbau, ihren Atmosphären sowie ihrer Entwicklung ist seitdem exponentiell gewachsen. Meine Gruppe war Mitinitiator zum Bau und Betrieb von *CARMENES* (Bild 2), einem hochauflösenden Spektrographen zur Entdeckung und Charakterisierung von erdähnlichen Planeten massearmer Sterne.



Abb. 2: Aufbau von *CARMENES*

Planeten verraten sich unter anderem durch die Bewegung ihres Zentralsterns um den gemeinsamen Schwerpunkt ihres Planetensystems. Bei einem erdähnlichen Planeten um einen massearmen Stern erfordert das eine Genauigkeit in der Geschwindigkeitsmessung von etwa 1 m/s. Dies ist zurzeit die Grenze der Messgenauigkeit. Die Bewegung der Sonne aufgrund der Existenz der Erde ist um einen Faktor 10 kleiner und damit zurzeit noch unerreichbar, weswegen masseärmere Sterne als unsere Sonne bei der Suche nach erdähnlichen Planeten in

der habitablen, d. h. potentiell lebensfreundlichen, Zone um ihren Zentralstern bevorzugte Forschungsobjekte darstellen. Wir haben für *CARMENES* die Vakuumkammern und Vakuumtechnik bereitgestellt. Die erforderliche Genauigkeit in der Geschwindigkeitsmessung kann nur erreicht werden, wenn die Änderung der Lichtgeschwindigkeit aufgrund der Änderung des Brechungsindex der Luft praktisch ausgeschaltet wird. Der Spektrograph muss daher bei einem Druck von unter 10^{-3} mbar gehalten werden. Das Vakuum erleichtert auch die Temperaturstabilisierung auf ein Hundertstel Kelvin, die ebenfalls für die erforderliche Messgenauigkeit gebracht wird.

CARMENES ist seit Anfang 2016 in Betrieb. Die Auswertung der Daten aus den vorgesehenen 600 Beobachtungsnächten ist der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Förderung im Rahmen einer DFG-Forschergruppe zusammen mit Partnern aus Göttingen, Heidelberg, Hamburg und Tautenburg zur Förderung vorgeschlagen worden.

Neben der Beteiligung an der Suche nach Planeten gilt mein Interesse auch der dynamischen Stabilität von Planetensystemen. Bei vielen Beobachtungen gibt es mehrdeutige Lösungen zur Erklärung der Beobachtungsdaten, teilweise mit mehreren Planeten. In vielen Fällen sind die gefundenen Lösungen mit mehreren Planeten aber keine stabilen Konfigurationen, d. h. die dynamische Wechselwirkung würde die Systeme auf einer Zeitskala deutlich kürzer als das Alter der Systeme zerstören. Die gefundenen Lösungen müssen also auf Stabilität untersucht werden. Grundsätzlich ist das einfach, man muss hierzu nur die Newton'schen Bewegungsgleichungen integrieren. Numerisch aufwändiger wird das Problem aber durch die erforderliche Genauigkeit in der Energie- und Drehimpulserhaltung.

Die Forschung im Bereich der extrasolaren Planeten wird auch in den nächsten Jahren noch enorme Fortschritte machen. Bedingt durch eine Vielzahl von neuen Instrumenten wird es voraussichtlich bald möglich sein, die Atmosphären von potentiell bewohnbaren, erdähnlichen Planeten zu untersuchen und so die Frage nach der Entstehung von Leben auf eine neue Stufe heben.

Astronomie in der Schule

Die Faszination für Astronomie eignet sich hervorragend, um Schülerinnen und Schüler für naturwissenschaftliche und technische Berufe zu begeistern. Zum einen liegt das an dem Thema selbst, zum anderen aber auch an der Tatsache, dass Astronomie Anwendungen aus vielen Natur- und Ingenieurwissenschaften vereint. Meine Gruppe betreibt zwei kleinere Teleskope (das *Monitoring Network of Robotic Telescopes MONET*, Bild 3), gefördert durch die Alfred Krupp von

Bohlen und Halbach-Stiftung, in Texas und Südafrika. Schülerinnen und Schüler weltweit können diese Teleskope über ein Web-Interface nutzen, um eigene Projekte durchzuführen. Unter anderem haben wir in einem Schulprojekt die Suche nach Planeten in Doppelsternen betrieben, was mit dem Robert-Bosch-Preis *School Meets Science* 2010 ausgezeichnet wurde.

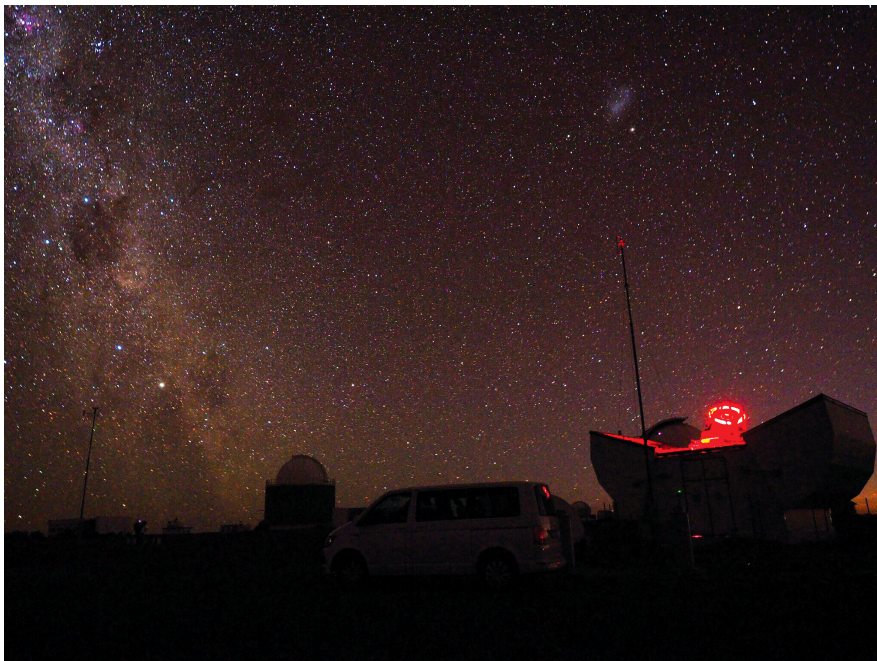


Abb. 3: Das MONET-Teleskop in Südafrika vor dem südlichen Sternhimmel. Links im Bild ist das Band der Milchstraße, rechts oben die große Magellansche Wolke

Das Teleskop in Südafrika ist auch Anlaufpunkt einer bisher dreimal durchgeführten Exkursion für Studierende der Physik (Master of Science sowie Master of Education) der Universitäten Göttingen und kürzlich auch Kassel. Ziel der Exkursion ist zum einen ein Einblick in den naturwissenschaftlichen Unterricht in Südafrika, vor allem in Schulen in unterprivilegierten Gegenden. Hier entwickeln die Studierenden physikalische Experimente unter Zuhilfenahme von Alltagsgegenständen. Während der Demonstrationen bzw. Durchführung durch Schülerinnen und Schüler vor Ort wird der Bezug zur Astronomie hergestellt. Zum anderen verwenden wir unser Teleskop während der Exkursion, um den Studierenden die Möglichkeit zu geben, eigene Beobachtungen durchzuführen.