



Denkschrift 2017

Perspektiven der Astrophysik in Deutschland 2017-2030

Von den Anfängen des Kosmos bis zu Lebensspuren
auf extrasolaren Planeten

Matthias Steinmetz, Marcus Brüggen, Andreas Burkert, Eva Schinnerer, Jürgen Stutzki,
Linda Tacconi, Joachim Wambsganz, Jörn Wilms (Redaktionskomitee des Rats deutscher Sternwarten)

IMPRESSUM

Denkschrift 2017

Perspektiven der Astrophysik in Deutschland 2017–2030

Von den Anfängen des Kosmos bis zu Lebensspuren auf extrasolaren Planeten

Herausgeber:

Astronomische Gesellschaft (AG)

c/o

Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam

An der Sternwarte 16

14482 Potsdam

GERMANY

Redaktionskomitee:

Matthias Steinmetz, Marcus Brüggem, Andreas Burkert, Eva Schinnerer, Jürgen Stutzki,

Linda Tacconi, Joachim Wambsganz, Jörn Wilms

(Redaktionskomitee des Rats deutscher Sternwarten)

Redaktion:

Stefanie Hardick, Janine Fohlmeister

Gestaltung:

medienlabor GmbH Potsdam

Auflage:

3.000 Exemplare

ISBN:

978-3-00-057645-4

Potsdam, September 2017

VORWORT



Wenige Forschungsgebiete faszinieren die Menschen so sehr wie die Astronomie und Astrophysik. Die Fragen, die wir uns stellen, sind grundlegend: Sind wir allein im Weltall? Wie entstand unser heutiges Universum? Wie bilden sich Schwarze Löcher? Astronomie und Astrophysik sind moderne physikalische Forschungsfelder. Astronomische Forschung führt regelmäßig zu neuen Erkenntnissen in anderen Bereichen der Physik, etwa der Elementarteilchenphysik. Schon seit Tycho Brahe und Galileo Galilei ist die Astronomie auch ein Technologietreiber. Fortschritt beruht neben der Neugier der besten Köpfe auch auf dem Zugang zu modernsten Großgeräten: Höchstleistungsrechnern, Teleskopen und Satelliten.

Die vorliegende *Denkschrift 2017* steht in der Tradition ihrer drei Vorgängerinnen von 1962, 1987 und 2003. Sie fasst die Ergebnisse der Forschung der vergangenen Jahre zusammen. Sie stellt die aktuellen Fragen der Astrophysik vor und skizziert die Erkenntnisse, die wir im kommenden Jahrzehnt zu gewinnen erhoffen. Sie schließt mit Empfehlungen zur Beteiligung an den wichtigsten, überwiegend internationalen Infrastrukturen und Beobachtungseinrichtungen auf der Erde und im Weltraum. Die *Denkschrift 2017* adressiert aber auch Fragen der Vernetzung zwischen den verschiedenen Forschungsinstitutionen, der Finanzierungsstrukturen, der Nachwuchsförderung und der Personalentwicklung in Deutschland. Damit richtet sich die Denkschrift an Universitäten, an Forschungs- und Förderorganisationen wie auch an politisch verantwortliche Stellen beim Bund und bei den Ländern.

Das Verfassen einer solchen Denkschrift ist ein konzertiertes Vorhaben einer ganzen Fachgemeinschaft. Dank gilt hier insbesondere den Autorinnen und Autoren der 20 Strategiepapiere, die dieser Denkschrift zugrunde liegen, und den zahlreichen Beiträgen von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Institute des Rats deutscher Sternwarten. Wir danken der Journalistin Stefanie Hardick, die das Verfassen des Textes aktiv begleitete, der Generalsekretärin des Rats deutscher Sternwarten Dr. Janine Fohlmeister und dem Team der medienlabor GmbH für ihren unermüdlichen Einsatz bei der Gestaltung und Drucklegung.

Für das Redaktionskomitee

Potsdam, im August 2017

Prof. Dr. Matthias Steinmetz

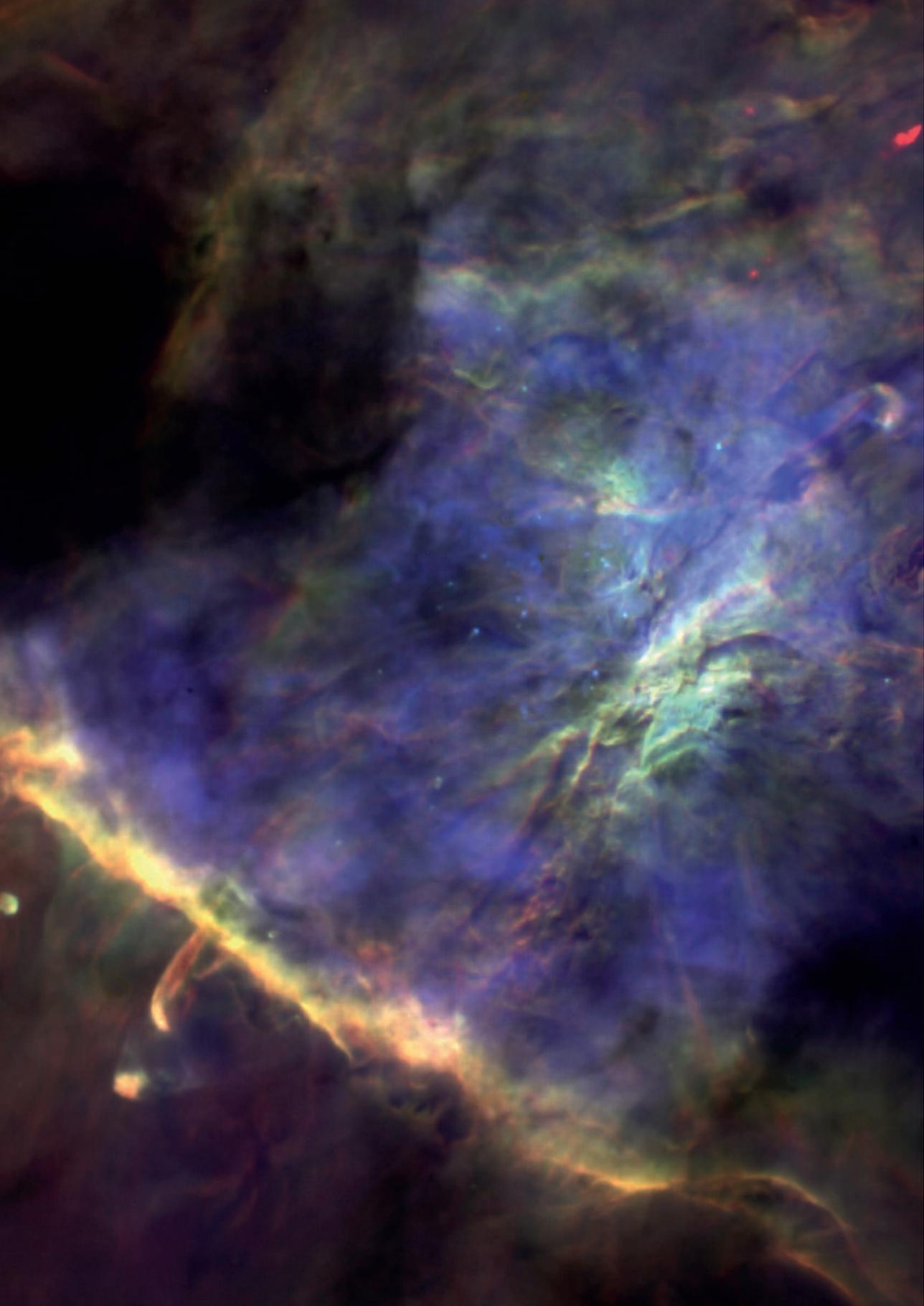
Präsident der Astronomischen Gesellschaft

Vorsitzender des Rats deutscher Sternwarten



INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung / Executive Summary	7
1. Einführung	13
1.1 Intention, Adressaten und Autoren der Denkschrift 2017	13
1.2 Zur Entstehung der Denkschrift 2017	14
1.3 Inhalt und Wirkung der Astronomischen Denkschriften	15
1.4 Internationale Perspektive	18
2. Entwicklung der Astronomie und Astrophysik in Deutschland	21
2.1 Astronomie und Astrophysik – ein goldenes Zeitalter	21
2.2 Ein dynamisches Forschungsfeld	25
2.3 Astronomie und Astrophysik in den Einrichtungen des RDS	31
3. Astronomie und Gesellschaft	33
3.1 Industriepartnerschaften	33
3.2 Wissens- und Technologietransfer	34
3.3 Öffentlichkeitsarbeit	35
3.4 Wissenschaftlicher Nachwuchs in den MINT-Fächern	36
4. Aktuelle Forschungsthemen der Astronomie und Astrophysik	39
4.1 Sonne, Sterne und ihre Planetensysteme	40
4.2 Der kosmische Materiekreislauf	45
4.3 Die Milchstraße und andere Galaxiensysteme	50
4.4 Kosmologie und junges Universum	56
4.5 Extremzustände des Kosmos, fundamentale Astrophysik	61
5. Herausforderungen für das kommende Jahrzehnt	67
5.1 Astronomische Forschungsinfrastrukturen im kommenden Jahrzehnt	67
5.1.1 Die großen erdgebundenen Teleskope	67
5.1.2 Die mittelgroßen erdgebundenen Teleskope	69
5.1.3 Kleinere erdgebundene Teleskope	70
5.1.4 Große Weltraummissionen – Das Cosmic-Vision-Programm der ESA	71
5.1.5 Mittelgroße Weltraummissionen – Das nationale Weltraumprogramm des DLR	74
5.1.6 Laborastrophysik	76
5.1.7 Großskalige massiv-parallele Computersimulationen	76
5.1.8 Big Data, Data-Mining und Virtuelles Observatorium	78
5.2 Strategische Beendigungen	79
5.3 Förderung der Beteiligung an Aufbau und Betrieb von Infrastrukturen	80
5.4 Wissenschaftlicher Nachwuchs und Führungskräfte von morgen	82
6. Empfehlungen	85
Anhang	92
Das Redaktionskomitee des Rats deutscher Sternwarten	101



Zusammenfassung

Seit den 1960er-Jahren verfasst der Rat deutscher Sternwarten (RDS) alle 15 bis 20 Jahre eine *Denkschrift Astronomie*, um die Öffentlichkeit und die Vertreterinnen und Vertreter der Forschungspolitik über die Ergebnisse des Forschungsfelds zu informieren und Perspektiven für das kommende Jahrzehnt darzulegen. Diese Denkschriften formulierten auch jeweils Empfehlungen zur Förderung von Projekten mit nationaler oder internationaler Bedeutung sowie zu notwendigen Fördermechanismen. In der Folge wurden die Forschungsinfrastrukturen wesentlich verbessert und die Möglichkeiten sich an ihnen zu beteiligen für deutsche Institute deutlich erweitert.

Die *Denkschrift 2017 „Perspektiven der Astrophysik in Deutschland 2017-2030: Von den Anfängen des Kosmos bis zu Lebensspuren auf extrasolaren Planeten“* konstatiert eine beeindruckende Entwicklung des Forschungsfelds in den vergangenen 15 Jahren – weltweit und insbesondere auch in Deutschland. Forschende in Deutschland waren an zahlreichen wissenschaftlichen Durchbrüchen beteiligt, oft in führender Rolle. Folglich hat das Forschungsgebiet innerhalb des Wissenschaftsprogramms an deutschen Universitäten und Forschungsinstituten sowohl qualitativ als auch quantitativ deutlich an Bedeutung gewonnen, wie zahlreiche Kennzahlen zeigen. Maßgeblich für diesen Erfolg war die zentrale Rolle, die deutsche Einrichtungen beim Bau des Forschungsinstrumentariums gespielt haben.

Astronomie und Astrophysik spielen auch eine wichtige Rolle bei der Entwicklung neuer Technologien. Die Beteiligung deutscher Institute an Großteleskopen und Satellitenmissionen haben zu zahlreichen Kooperationen mit industriellen Partnern geführt. Über die große Wirkung der Astronomie in der Öffentlichkeit trägt das Fach auch maßgeblich dazu bei, wissenschaftlichen Nachwuchs für die mathematischen, naturwissenschaftlichen und technischen Fächer zu gewinnen.

Basierend auf 20 Strategiepapieren fasst die astronomische Fachgemeinschaft in dieser *Denkschrift*

2017 die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsfelds seit der letzten Denkschrift zusammen und gibt einen Ausblick bis zum Ende des kommenden Jahrzehnts. Die Themen gruppieren sich in folgende Bereiche:

- die Sonne, andere Sterne und ihre Planetensysteme,
- der kosmische Materiekreislauf,
- die Milchstraße und andere Galaxiensysteme,
- das frühe Universum,
- Extremzustände des Kosmos, fundamentale Astrophysik.

Diese Themen sind eng mit benachbarten Forschungsfeldern verknüpft, insbesondere mit der Planetenforschung, der Astroteilchenphysik und der Fundamentalphysik.

Um die gute Position der astronomischen und astrophysikalischen Forschung in Deutschland im kommenden Jahrzehnt weiter zu stärken, hat der RDS mit der *Denkschrift 2017* eine Reihe von Empfehlungen erarbeitet. Diese Empfehlungen lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen. Die **Empfehlungsgruppe 1** betrifft die Forschungsinfrastrukturen am Boden (Empfehlungen B1-B5), im Weltraum (Empfehlungen W1 und W2) und für Höchstleistungsrechnen und Big-Data-Wissenschaft (Empfehlungen H1 und H2). Die **Empfehlungsgruppe 2** widmet sich der Vernetzung und der gemeinsamen Förderung (Empfehlungen V1-V3). Die **Empfehlungsgruppe 3** schließt die *Denkschrift 2017* mit Überlegungen zu Know-how und Personalentwicklung (Empfehlungen K1-K5).

Im Bereich der **erdgebundenen Observatorien** empfiehlt der RDS:

- B1 Die Beteiligung am Bau des 39-m-Extremely Large Telescope (ELT) der Europäischen Südsternwarte in Chile und seiner Instrumentierung.
- B2 Die Förderung der nächsten Generation von Detektoren, Empfängern und Spektrografen

für das La-Silla-Paranal-Observatorium und für das Antennenfeld ALMA in Chile.

B3 Eine Beteiligung Deutschlands bei der Errichtung des Radio-Observatoriums Square Kilometre Array (SKA) in Südafrika und Australien.

B4 Die Weiterentwicklung von Großobservatorien auf der Nordhalbkugel durch die betreibenden Institutionen, beispielsweise dem Large Binocular Telescope in Arizona (LBT), dem Antennenfeld NOEMA auf dem Plateau de Bure, dem Antennenfeld LOFAR in Mitteleuropa und dem Radioteleskop Effelsberg.

B5 Die Beteiligung Deutschlands am Europäischen Sonnenteleskop EST.

Im Bereich der **weltraumgestützten Astrophysik** sieht der RDS die folgenden Prioritäten:

W1 Die Umsetzung des Cosmic-Vision-Programms der ESA mit seinen verschiedenen Satellitenmissionen sowie des NASA/ESA-Weltraumteleskops JWST.

W2 Die Fortführung und Weiterentwicklung des nationalen Weltraumprogramms mit der fliegenden Sternwarte SOFIA und dem Röntgenobservatorium eRosita sowie der Beteiligung an künftigen binationalen Missionen mit Weltraumagenturen anderer Länder.

Eine überregionale Infrastruktur für **Höchstleistungsrechnen und Big Data** ist notwendig für die Vorbereitung und Analyse der astronomischen Großvorhaben am Boden und im Weltraum sowie für Simulationsrechnungen, die unabdingbar für das theoretische Verständnis sind. Der RDS empfiehlt:

H1 Den Ausbau der nationalen und europäischen Zentren für Hoch- und Höchstleistungsrechnen und deren systematische Vernetzung mit regionalen und lokalen Hochleistungsrechnern und Cloudstrukturen.

H2 Die Weiterentwicklung von Hoch- und Höchstleistungsrechenzentren zu einer eng vernetzten Hochleistungsdateninfrastruktur.

Im Rahmen der **Empfehlungsgruppe 2** empfiehlt der RDS für die **Vernetzung und Internationalisierung der Forschungslandschaft und ihrer Infrastrukturen**:

V1 Eine stärkere Vernetzung beim gemeinsamen Bau und Betrieb internationaler Großvorhaben.

V2 Die nachhaltige Förderung von Zentren für die technische Unterstützung von Software und Instrumenten sowie von weiteren unterstützenden Infrastrukturen, zum Beispiel im Bereich der Laborastrophysik, des Höchstleistungsrechnens und der e-Science.

V3 Die verstärkte Koordinierung von Infrastrukturvorhaben am Boden mit Vorhaben im Weltraum.

Die Förderung von **Know-how und die Personalentwicklung** stehen im Fokus der **Empfehlungsgruppe 3**. Der RDS empfiehlt:

K1 Die Etablierung von Universitätsprofessuren zu astronomischen Schlüsselthemen des kommenden Jahrzehnts.

K2 Die Weiterführung und den Ausbau der „Extraterrestrischen Verbundforschung Astronomie/Astrophysik“ zur wissenschaftlichen Auswertung von Weltraummissionen.

K3 Die Etablierung von Big-Data-Analytics-Laboren zur Entwicklung von Algorithmen für das Maschinenlernen und für künstliche Intelligenz, sowohl für die Analyse astronomischer Daten wie auch zur Übertragung des Know-hows in andere Forschungsbereiche.

K4 Die Etablierung geeigneter Förderprogramme für die wissenschaftliche Analyse von großen Beobachtungsprogrammen am Boden und im Weltraum.

K5 Die Etablierung längerer Förderzyklen für den Bau astronomischer Instrumentierung und astronomischer Satelliten.

Die vorgestellten Empfehlungen beziehen sich vorwiegend auf das Forschungsfeld Astronomie und Astrophysik. Allgemeingültige Themen der Personalentwicklung für Wissenschaft und Forschung sind zu ergänzen. Die *Denkschrift 2017* thematisiert hier den Bedarf an klaren Karriereperspektiven für den wissenschaftlichen Nachwuchs, etwa über Tenure-Track-Modelle. Sie stellt zudem fest, dass Wissenschaftlerinnen in der Astronomie und Astrophysik nach wie vor unterrepräsentiert sind, insbesondere in Leitungsfunktionen. Diese grundsätzlichen Themen müssen im Gesamtkontext der universitären wie außeruniversitären Nachwuchs- und Personalplanung gelöst werden.

Mit den in der *Denkschrift 2017* formulierten Vorhaben und Maßnahmen sehen sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an den Forschungsinstituten in Deutschland hervorragend positioniert, um gemeinsam mit ihren internationalen Partnern neue Erkenntnisse über unseren Kosmos entscheidend voranzutreiben.

Die *Denkschrift 2017* wurde am 3. Juli 2017 vom Rat deutscher Sternwarten einstimmig verabschiedet.

Executive Summary

Since the 1960s every 15-20 years the Council of German Observatories (Rat deutscher Sternwarten, RDS) has published a *Denkschrift* (Position Document) to inform the public and policy makers of the results of their field as well as to present perspectives for the next decade. In these position documents, recommendations were given for the funding of projects with national or international scope, and vital support mechanisms were proposed. As a result, substantial progress has been made to develop research infrastructures and to ensure the participation of German research institutes.

The *Denkschrift 2017 „Perspectives of astrophysics in Germany 2017-2030: From the beginnings of the cosmos to clues for life on extrasolar planets“* bears testament to an impressive development of the research field in the past 15 years - both worldwide and in particular in Germany. Researchers in Germany have been involved in numerous scientific breakthroughs, often in

leading roles. As a result, the research field has gained importance within the scientific programme at German universities and research institutes, both qualitatively and quantitatively. This is reflected in a number of key figures. The decisive factor for this success has been the central role played by German institutions in the construction of a wide portfolio of research facilities.

Astronomy and astrophysics also play an important role in the development of new technologies. The participation of German institutes in large telescope projects and satellite missions has led to numerous cooperations with industrial partners. Thanks to the great public impact of astronomy, it has become invaluable for the recruitment of young academics in the fields of mathematics, natural sciences and engineering.

Based on 20 strategy papers, the astronomical community has summarised the main findings of the field in the last decade and has charted the future course up until the end of the next decade. The topics are divided into the following areas:

- the Sun, other stars, and their planetary systems,
- the cosmic cycle of matter
- the Milky Way and other galaxies,
- the early Universe,
- extreme states of the cosmos, fundamental astrophysics.

Links to neighbouring research fields are emphasized, in particular to planetary research, astroparticle physics and fundamental physics.

In order to further strengthen the position of astronomical and astrophysical research in Germany in the coming decade, the RDS has developed a series of recommendations. These recommendations can be divided into three groups. The **first group of recommendations** concerns ground-based research infrastructures (recommendations B1-B5), space-based infrastructure (recommendations W1 and W2), and infrastructure for high-performance computing and big data science (recommendations H1 and H2). The **second group of recommendations** is devoted to networking and coordination (recommendations V1-V3). Finally, the **third group of recommendations** lays out proposals regarding the transfer of knowledge and human resource development (recommendations K1-K5).

In the area of ground-based observatories, the RDS recommends:

- B1 The participation in the construction of the 39m Extremely Large Telescope (ELT) of the European Southern Observatory in Chile and its instrumentation programme.
- B2 The funding of the next generation of detectors, receivers, and spectrographs, for the La Silla Paranal Observatory and for the antenna array ALMA in Chile.

B3 German participation in the construction of the radio observatory Square Kilometre Array (SKA) in South Africa and Australia.

B4 The further development of major observatories in the Northern Hemisphere such as the Large Binocular Telescope (LBT) in Arizona, the antenna array NOEMA on the Plateau de Bure, the antenna array LOFAR in Central Europe and the Effelsberg radio telescope.

B5 A German participation in the European Solar Telescope (EST).

In the area of space-based astrophysics, the RDS prioritizes the following:

W1 The implementation of the Cosmic Vision programme of the European Space Agency (ESA) and its various satellite missions and the NASA/ESA James Webb Space Telescope (JWST).

W2 The continuation and advancement of the national space programme with the airborne observatory SOFIA and the X-ray observatory eRosita as well as participation in future bi-national missions with other space agencies.

A national infrastructure for high-performance computing and big data is instrumental for the preparation and analysis of major astronomical projects on the ground and in space. It is equally important for numerical simulations that have become an indispensable part of theory. The RDS recommends:

H1 The development of national and European centres for high-performance computing and their sustainable integration into a network of regional and local computing centres and cloud architectures.

H2 The further development of high-performance computing centres into a closely linked network of high-performance data infrastructure.

The second group of recommendations concern networking and the internationalisation of research landscape and its infrastructures:

V1 Enhanced collaboration and networking in the construction and operation of major international research projects.

V2 Sustainable funding for supporting infrastructures, such as in the field of laboratory astrophysics or high-performance computing and e-Science as well as for software and instrument support centers.

V3 Increased coordination between ground-based infrastructure projects and those in space.

Knowledge transfer and personnel development are the focus of the third group of recommendations:

K1 The establishment of university professorships in key areas of astronomical research of the next decade.

K2 The continued development of the federally funded *Verbundforschung* „Extraterrestrial Astronomy / Astrophysics“ that facilitates the scientific analysis of space missions.

K3 The establishment of big data analytics laboratories for the development of algorithms for machine learning and artificial intelligence. This is important, both, for the analysis of astronomical data as well as for the transfer of knowledge into other research areas.

K4 The establishment of suitable funding schemes for the scientific analysis of large observing programmes from, both, the ground and space.

K5 The establishment of longer funding cycles for the construction of astronomical instrumentation and astronomical satellites.

The recommendations presented here primarily refer to specific aspects of the field of astronomy and astrophysics. They are to be supplemented by more general proposals for career development in science and research. These include improved career perspectives for the next generation of scientists, such as via tenure-track positions. Female scientists are still underrepresented in astrophysics, in particular in leadership functions. These more fundamental issues will have to be solved in the wider context of university and non-university personnel planning.

With the projects and recommendations laid out in this document astronomers at German research institutes believe they are well-positioned to unravel together with their international partners the mysteries of the Universe.

The *Denkschrift 2017* was unanimously adopted by the Council of German Observatories on 3 July 2017.

1 Einführung

1.1 Intention, Adressaten und Autoren der *Denkschrift 2017*

Die Astronomie ist die älteste aller Wissenschaften.¹ Sie sucht Antworten auf Fragen, die sich die Menschheit seit ihren Anfängen stellt: Wo kommen wir her? Und sind wir allein? Neue Erkenntnisse der Astronomie zu den Ursprüngen der Welt und bei ihrer Suche nach anderen bewohnbaren Planeten im All werden in der Öffentlichkeit mit besonderem Interesse verfolgt. Astronomische Forschung wird als hohes Kulturgut wahrgenommen.

Astronominen und Astronomen wollen das Universum räumlich von seinen kleinsten Teilchen bis in seine Gesamtheit und zeitlich vom Urknall bis in unsere Gegenwart verstehen. Als Naturwissenschaft basiert die Astronomie auf der Beobachtung unserer Welt. Beobachtungsdaten gewinnt sie vor allem durch die Messung von Licht aus dem Weltraum in verschiedenen Wellenlängenbereichen: als optisches Licht, als ultraviolettes oder infrarotes Licht, als Radio-, Röntgen- und Gammastrahlung. Unsere Atmosphäre filtert Teile der Strahlung heraus. Auf der Erde können Störquellen wie künstliche Lichtquellen oder Rundfunk die Beobachtungsdaten verfälschen. Deshalb werden hochtechnisierte Teleskope an den abgelegensten Orten unserer Erde, auf Ballonplattformen, in Flugzeugen und auf Satelliten im Weltraum betrieben. Die Astronomie ist zur Großgeräteforschung geworden.

Auch bei der Auswertung der Daten ist leistungsstarke Technik nötig. Die Messkampagnen erfolgen parallel über verschiedene Wellenlängenbereiche, von Radiowellen bis zur Gammastrahlung. Die gewonnenen Daten werden mit modernsten Methoden durchforstet und analysiert. Doch die Datenmengen sind so groß, dass die Informati-

onstechnologie immer wieder an ihre Grenzen stößt und weiterentwickelt werden muss. Um die Beobachtungsdaten physikalisch zu verstehen, müssen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler außerdem auf theoretische Modelle zurückgreifen können. Dafür werden atomare und nukleare Eigenschaften und Vorgänge im Labor untersucht. In umfassenden multidimensionalen Simulationsrechnungen werden die theoretischen Modelle mit den Beobachtungsdaten verglichen. Die entsprechenden Hochleistungsrechner sind in der Lage, Modelle für das Aussehen kosmischer Objekte bei verschiedenen Wellenlängenbereichen und über einen weiten Bereich an Längenskalen zu erstellen. Mit ihnen lassen sich große Zeiträume mit sehr feiner Zeitauflösung verfolgen.

Wissenschaftliche Entdeckungen und Fortschritt in der Astrophysik sind also nur möglich, wenn Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler modernste Forschungseinrichtungen nutzen können. Um eine maximale wissenschaftliche Ausbeute zu ermöglichen, müssen die verfügbaren Ressourcen gezielt und optimal eingesetzt werden. Eine strategische Planung ist also unabdingbar: Wo und wie kann sich Deutschland als wissenschaftsstarkes europäisches Land in den Wettbewerb und in die Suche nach Erkenntnis einbringen?

Diese Denkschrift fasst die strategischen Überlegungen der astronomischen Fachgemeinschaft in Deutschland zusammen. Sie informiert über aktuelle Entwicklungen in der astronomischen und astrophysikalischen Forschung und über die Perspektiven für das nächste Jahrzehnt. Die Denkschrift stellt Forschungsinfrastrukturen vor, die aus Sicht der Fachgemeinschaft für die optimale

¹ Die Begriffe Astronomie und Astrophysik werden oft synonym verwendet. Die Disziplinen unterscheiden sich vor allem im Hinblick auf ihre historischen Ursprünge. Die Astronomie entwickelte sich aus dem Zeit- und Kalenderwesen und der Navigation. Die Astrophysik hat ihre Wurzeln in der Spektroskopie, die Mitte des 19. Jahrhunderts aufkam.

Weiterführung ihrer Forschung notwendig sind. Sie verdeutlicht Deutschlands Potenzial bei Bau und Nutzung dieser Infrastrukturen und betont die Wirkung, die davon auf andere Bereiche der Forschung und Entwicklung, auf die Ausbildung von Fachkräften und auf die Öffentlichkeit ausgeht. Die Denkschrift möchte Empfehlungen für die Förderung dieser Infrastrukturen zur Diskussion stellen, aber auch Empfehlungen für die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und von Wissenschaftlerinnen in der Astronomie und Astrophysik.

Die *Denkschrift 2017* richtet sich in erster Linie an wissenschaftliche und wissenschaftspolitische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger an den Universitäten, in den Wissenschaftsorganisationen sowie in den Parlamenten und den zuständigen Landes- und Bundesministerien. Sie steht in der Tradition einer Reihe von Denkschriften, die von der astronomischen Gemeinschaft in Deutschland seit den 1960er-Jahren herausgegeben wurden. Die Denkschriften der Jahre 1962, 1987 und 2003 haben eine effiziente strategische Planung der astronomischen Forschung ermöglicht und wichtige Entwicklungen angestoßen. Sie werden im Abschnitt 1.3 vorgestellt.

Herausgeber der *Denkschrift 2017* ist der Rat deutscher Sternwarten (RDS). Er ist ein Zusammenschluss von 38 Forschungseinrichtungen in

Deutschland, die sich mit Astronomie und Astrophysik befassen. Unter ihnen sind Universitätsinstitute, Landesinstitute und Einrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft, der Leibniz-Gemeinschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft. Kapitel 2.3 sowie Anhang B und C geben eine Übersicht der RDS-Institute.

Der RDS wurde ursprünglich 1959 als Rat westdeutscher Sternwarten gegründet, um den Bau einer deutschen Sternwarte auf der Südhalbkugel anzustoßen. Schnell etablierte er sich als Gremium zur Koordinierung der astrophysikalischen Forschungsaktivitäten in Deutschland. Seit 2012 ist der Rat deutscher Sternwarten als Organ in die Astronomische Gesellschaft integriert. Sie ist der Fachverband der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die in Deutschland in der Astronomie und Astrophysik forschen.

Der RDS berät Ministerien und Forschungsorganisationen zu strategischen Fragen im Bereich der astrophysikalischen Forschung. Außerdem schlägt er Kandidatinnen und Kandidaten für das Fachkollegium 311 „Astrophysik und Astronomie“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) vor sowie für die Gremien der Europäischen Südsternwarte (ESO), für den Gutachterausschuss für die Verbundforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und für weitere Gremien.

schaftler. Ergänzend wurden Forschungsmethoden und -technologien, Infrastrukturen, Messinstrumente für Licht in den verschiedenen Wellenlängen und Höchstleistungsrechner präsentiert, die für die jeweiligen Forschungsprogramme notwendig sind.

Im Laufe des Jahres 2016 verfassten die verschiedenen Fachgebiete des RDS basierend auf den Ergebnissen der Potsdamer Tagung 20 englischsprachige Strategiepapier, die die aktuellen Forschungsfragen und das dafür notwendige Instrumentarium aus Sicht der jeweiligen Fachgruppe darstellen. Eine Übersicht bietet Tabelle 4.1

in Kapitel 4. Die Strategiepapier können auf der Website <http://www.denkschrift2017.de> heruntergeladen werden.

Ein Autorenteam des RDS fasste danach die wesentlichen Punkte dieser Strategiepapier zur vorliegenden *Denkschrift 2017* zusammen. Im Frühjahr 2017 wurde sie mit den 38 Einrichtungen des RDS diskutiert und abgestimmt. Am 3. Juli

2017 wurde die *Denkschrift 2017* auf einer Sondersitzung des RDS in Potsdam einstimmig verabschiedet.

1.3 Inhalt und Wirkung der früheren Astronomischen Denkschriften

Bereits 1962, 1987 und 2003 erschienen Denkschriften der astronomischen Fachgemeinschaft, die jeweils die nationalen und internationalen Entwicklungen in der Astronomie und Astrophysik darstellten und daraus Handlungsempfehlungen ableiteten. Wie in der *Denkschrift 2017* standen auch bei diesen früheren Veröffentlichungen notwendige Investitionen in die Forschungsinfrastrukturen und in deren Förderung im Verbund der deutschen Forschungs- und Förderinstitutionen² an zentraler Stelle.

Viele der Empfehlungen in den früheren Denkschriften wurden umgesetzt. Insbesondere die Infrastrukturen haben sich dadurch deutlich verbessert, aber auch die Förderstrukturen selbst. Die internationale Wettbewerbsfähigkeit der astrophysikalischen Forschung in Deutschland konnte nachhaltig gesteigert werden. Die überproportional erfolgreiche Entwicklung von Astronomie und Astrophysik im Vergleich zu anderen Disziplinen belegt eindrucksvoll eine 2010 im Auftrag des BMBF veröffentlichte Studie zum *Impact* der Forschung in Deutschland über einen Zeitraum von 20 Jahren.³

Denkschrift 1962: Anstoß zu Bau und Betrieb von Observatorien

Zu Beginn der 1960er-Jahre bot sich der Astronomie in der Bundesrepublik Deutschland ein ernüchterndes Bild: Optische Großteleskope mit mehr als 2 Metern Durchmesser befanden sich ausschließlich in den USA und zum neuen 2-Meter-Teleskop in Thüringen hatten bundesdeutsche Astronominnen und Astronomen spätestens seit dem Mauerbau keinen Zugang mehr. Das neue Gebiet der Radioastronomie wurde von Australien, Großbritannien, Schweden und den Niederlanden dominiert. In der Weltraumforschung hatten die USA mit der NASA in der westlichen Hemisphäre eine Alleinstellung. Die Denkschrift 1962 zielte darauf, diese unzulängliche Situation grundsätzlich zu verbessern.

Die Denkschrift 1962 förderte Bestrebungen, die zur Gründung der ESO führten und der europäischen Astronomie den Zugang zum Südhimmel öffneten. Im Bereich der Weltraumforschung unterstützte die Denkschrift 1962 die Gründung der heutigen Europäischen Weltraumorganisation ESA. Die Weltraumforschung wurde später fest im Ressort des Bundesministeriums für Forschung und Technologie etabliert. Auf die Gründung des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn 1966 folgte der Bau des 100-m-Teleskops in Effelsberg. Damit wurde ein Radioteleskop der Weltklasse

1.2 Zur Entstehung der *Denkschrift 2017*

Diese Denkschrift wurde in einem dreistufigen Verfahren erstellt:

Vom 7. bis 9. Dezember 2015 trafen sich 150 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus allen Einrichtungen des Rats deutscher Sternwarten auf einem dreitägigen Kongress in Potsdam. Hier wurden die aktuellen Themen der astrophysikalischen Forschung vorgestellt und die wesentlichen Fragen für die nächste Dekade aus Sicht der Fachgemeinschaft formuliert. Im Vordergrund standen Beiträge deutscher Einrichtungen und in Deutschland forschender Wissenschaftlerinnen und Wissen-

² Heute sind dies die DFG, Max-Planck-Gesellschaft, Leibniz-Gemeinschaft und Helmholtz-Gemeinschaft sowie die Projektförderung des BMBF.

³ Vgl. Abbildung 2.1 in Kapitel 2.

installiert. Durch das neue Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg und das von ihm betriebene Observatorium auf dem Calar Alto in Spanien bekamen bundesdeutsche Astronomen und Astronomen Zugang zu wettbewerbsfähigen optischen Teleskopen auf der Nordhalbkugel.

Die Nutzung dieser Teleskope durch die Fachgemeinschaft, insbesondere auch durch die Universitäten, hat die Entwicklung der Astronomie in Deutschland sehr stark beflügelt. Beobachtungsaufenthalte am Calar-Alto-Observatorium oder am Effelsberg-Teleskop sind für viele Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler der Einstieg in die professionelle Astronomie. Noch heute ermöglichen diese Teleskope großartige wissenschaftliche Entdeckungen, zum Beispiel den Nachweis von Wasser im Kosmos bis in kosmologische Entfernungen und von Gasausflüssen, sogenannten Jets, von jungen Sternen.

Denkschrift 1987: Einführung der Verbundforschung Astronomie/Astrophysik

In den 1980er-Jahren wandelte sich der Bedarf an Beobachtungsmöglichkeiten. Die astronomische Forschung benötigte größere Teleskope, mit Spiegeldurchmessern von 8 Metern und mehr. Sie konnten nur gebaut werden, wenn sich große, meist internationale Konsortien liierten. In der Weltraumforschung hatte sich die ESA mittlerweile neben der NASA positionieren können. Aber die Förderstrukturen in Deutschland reichten nicht mehr aus, um sicherzustellen, dass die Ausbeute dieser Weltraumobservatorien auch tatsächlich vollständig wissenschaftlich ausgewertet werden konnte. Das betraf besonders Projekte zur Grundlagenforschung an den Universitäten, die sich allein auf die Förderung durch die DFG stützten.

Die Denkschrift 1987 empfahl eine deutsche Beteiligung an den vier 8-Meter-Teleskopen des Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte. Das war auch der Anlass für einen neuen Fördermechanismus, der direkt am damaligen Bundesministerium für Forschung und Technologie angesiedelt wurde. Die Ver-

bundforschung „Erdegebundene Astrophysik und Astroteilchenphysik“ fördert seitdem die Grundlagenforschung mit Großgeräten. Sie ermöglicht deutschen Universitätsinstituten, sich aktiv am Bau von Kameras und Spektrografen für Großteleskope zu beteiligen. Beispiele für solche Projekte sind die UV-visuellen Kamera-Spektrografen-Systeme FORS1 und FORS2 für das VLT. FORS2 ist bis heute das meistgenutzte Instrument am VLT. Die Mitarbeit an Instrumentierungsprogrammen löste einen Sprung in der Technologieentwicklung aus. Außerdem erhielten die am Bau beteiligten Institute garantierte Beobachtungszeiten an den Observatorien. Damit bekamen sie Zugang zu Messkampagnen, die im Antragsverfahren außerhalb ihrer Möglichkeiten gelegen hätten. Forscherinnen und Forscher aus Deutschland erzielten seitdem zahlreiche wissenschaftliche Durchbrüche. Zum Beispiel trugen sie dazu bei zu verstehen, wie sich in der Frühphase des Kosmos Galaxien entwickelt haben.

In Kombination mit der außeruniversitären Forschung der Max-Planck-Gesellschaft und der Leibniz-Gemeinschaft⁴ hat die Verbundforschung die internationale Sichtbarkeit deutscher Forschungsbeiträge enorm gesteigert. Heute sind die Teleskope des VLT mit einem exquisiten Portfolio an Instrumenten verschiedenster Fähigkeiten ausgerüstet. Zu vielen haben deutsche Institute wichtige Anteile beigetragen, in einigen Fällen wurden sie unter deutscher Leitung realisiert.

Auch die wissenschaftliche Ausbeute von Weltraummissionen wurde durch die Verbundforschung nachhaltig gefördert. Heute ist sie als „Extraterrestrische Verbundforschung Astronomie/Astrophysik“ Teil des nationalen Raumfahrtprogramms und im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie angesiedelt. Sie wird durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt Bonn-Oberkassel (DLR) verwaltet. Beispiele für besonders erfolgreiche Projekte sind der deutsche Röntgensatellit ROSAT, das Hubble-Weltraumteleskop der NASA/ESA und die ESA-Missionen SOHO, XMM-Newton und ISO.

Neben der Beteiligung an Großteleskopen und Weltraummissionen empfahl die Denkschrift 1987 auch ein deutsches Engagement in einer damals neuen Methode der Astrophysik. Sie sprach sich für eine Beteiligung bei der Interferometrie in der Millimeter-Radioastronomie aus. Die sogenannte *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) kombiniert mehrere Radioteleskope, um Messungen mit höchster räumlicher Auflösung und Positionsgenauigkeit durchzuführen. Außerdem empfahl die Denkschrift 1987 den Beginn der Forschung in der Hochenergieastrophysik, der Neutrinoastrophysik und der Gravitationswellenastrophysik.

Denkschrift 2003: Deutsche Beteiligung an der nächsten Generation der Großgeräte in der Astronomie

Für die optische Astronomie stand in der Denkschrift 2003⁵ der Bau des European Extremely Large Telescope (ELT) als langfristiges Ziel im Vordergrund. Basierend auf der Denkschrift empfahl der Rat deutscher Sternwarten dem BMBF im Jahr 2009 den Vorzug des ELT als technologisch hinreichend fortgeschrittenes Projekt vor dem damals noch in seiner Frühphase befindlichen Square Kilometre Array (SKA). Im Dezember 2014 beschlossen die Mitgliedsländer der Europäischen Südsternwarte den Bau des Teleskops, mit dem mittlerweile begonnen wurde. Deutsche Institute sind führend an der Instrumentierung beteiligt. Das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching (MPE) leitet zum Beispiel die Entwicklung und den Bau der astrometrischen Infrarotkamera MICADO als *First Light Instrument*, also der Kamera, die als erstes Instrument bei der Inbetriebnahme des ELT zur Verfügung stehen wird. Das Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg ist verantwortlich für die adaptive Optik und das Kamerasystem des Instruments METIS für den mittleren Infrarotbereich.

Für die mittelfristige Planung betonte die Denkschrift 2003 unter anderem die Bedeutung einer Beteiligung an der zweiten Generation der Instrumentierung des Very Large Telescopes und dessen Interferometer VLTI, die mittlerweile in Betrieb sind. Die Verbundforschung konnte die Teilnahme

technisch orientierter Universitätsgruppen sichern. Mehrere deutsche Institute engagierten sich zudem an 8- bis 10-Meter-Teleskopen in den USA, insbesondere am Large Binocular Telescope in Arizona und am Hobby-Eberly Telescope in Texas. Die deutsche Fachgemeinschaft bekam so Zugang zu Weltklasse-Teleskopen auf der Nordhalbkugel.

Das in der Denkschrift 2003 empfohlene Radio-Interferometer Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) konnte über die ESO mit Beteiligung ostasiatischer und nordamerikanischer Partner realisiert werden. Unter Leitung des MPIfR wurde dafür das Submillimeter-Einzelteleskop APEX entwickelt. Dieses neuartige Instrument zur Untersuchung chemischer und physikalischer Bedingungen in Molekülwolken erfüllte seine Rolle als Wegbereiter hervorragend.

Im Bereich der Weltraummissionen rückten in der Denkschrift 2003 Empfehlungen für das Forschungsprogramm der ESA in den Vordergrund, insbesondere die deutsche Beteiligung an den Satellitenteleskopen Herschel, Planck, INTEGRAL, Solar Orbiter und Gaia. Damals befanden sich internationale Weltraummissionen zur Röntgenastronomie und zur Gravitationswellendetektion noch in Vorstudien. Mittlerweile sind die Missionen als Athena und LISA fest unter den großen L-Klasse-Missionen (L2 und L3) im Cosmic-Vision-Programm der ESA verankert. Als Mission des nationalen Weltraumprogramms wurde bereits 1987 das US-amerikanisch-deutsche Stratosphärenobservatorium für Infrarotastronomie (SOFIA) mit Priorität empfohlen. Die „fliegende Sternwarte“ hat mittlerweile den Beobachtungsbetrieb aufgenommen und sichert den kontinuierlichen Zugang zum ferninfraroten Spektralbereich. Zwei deutsche Instrumente tragen erfolgreich zum Beobachtungsprogramm bei. Hinzu kommt das Röntgenteleskop eROSITA auf dem russischen Satelliten Spektrum-Röntgen-Gamma.

Die Denkschrift 2003 empfahl die Erweiterung der Mess- und Beobachtungseinrichtungen mit Geräten der Neutrinoastrophysik, Gammaastronomie und Gravitationswellenastronomie. Zwischen Astronomie und Elementarteilchenphysik etablierte sich die

⁴ Damals noch unter der Bezeichnung „Institute der Blauen Liste“.

⁵ Die Denkschrift 2003 kann unter dem Link http://www.denkschrift2017.de/denkschrift_2003-16.pdf heruntergeladen werden.

Astroteilchenphysik als eigenständiges Fachgebiet. Es bearbeitet astrophysikalische Themen mit den Methoden der Elementarteilchen- und Kernphysik.

Nicht zuletzt richtete die Denkschrift 2003 den Blick auf die Ausbildung und Karriereförderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Sie empfahl etwa eine stärkere Vernetzung zwischen den Forschungsorganisationen und Universitäten. Dies wurde über die Einrichtung von gemeinsamen

Graduiertenschulen und durch Maßnahmen der Exzellenzinitiative inzwischen teilweise umgesetzt. Die Denkschrift 2003 griff auch kritische Themen auf, zum Beispiel, dass für den wissenschaftlichen Nachwuchs oft nur unklare Karriereperspektiven bestehen und dass Wissenschaftlerinnen insbesondere in Führungspositionen deutlich unterrepräsentiert sind. Beide Problemfelder sind nach wie vor aktuell, nicht nur in der Astrophysik.

1.4 Internationale Perspektive

Strategische Überlegungen und Ausblicke für die Astrophysik sind seit vielen Jahren auch in anderen Ländern üblich, etwa in Australien, der Schweiz, Frankreich und Großbritannien. Zwei viel beachtete Beispiele sind die entsprechenden Dokumente der Europäischen Union und der USA.

Europäische Union

Die wissenschaftlichen Förderinstitutionen der Europäischen Union gründeten 2006 das Konsortium ASTRONET. Sein Ziel ist, eine koordinierte astrophysikalische Forschungsplanung in der EU zu etablieren. ASTRONET wurde durch das 6. und 7. EU-Forschungsrahmenprogramm gefördert. Von deutscher Seite sind das BMBF, die DFG, die Max-Planck-Gesellschaft sowie der Projektträger DESY beteiligt. Zahlreiche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Deutschland sind Mitglieder der jeweiligen Arbeitsgruppen. Die Ergebnisse von ASTRONET wurden in zwei Dokumenten veröffentlicht, der Science Vision (2007) und der Infrastructure Roadmap (2009), die 2013 beziehungsweise 2014 aktualisiert wurden.

Die Science Vision umfasst die wesentlichen Fragestellungen zu vier Themenkomplexen:

- Extremzustände des Kosmos und deren Physik,

- Entstehung und Entwicklung von Galaxien von der Frühphase des Kosmos bis heute,
- Entstehung von Sternen und ihren Planetensystemen, Leben auf anderen Welten,
- unsere Sonne und das Sonnensystem.

Die Infrastructure Roadmap empfiehlt für die Beantwortung dieser Forschungsfragen die wichtigsten Infrastrukturen:

- als große erdgebundene Observatorien das optische 39-m-Extremely Large Telescope der ESO und das Square Kilometre Array im Radiobereich,
- als mittelgroße erdgebundene Forschungsinfrastrukturen das Europäische 4-m-Sonnenteleskop (EST) und das Gammastrahlenobservatorium Cherenkov Telescope Array (CTA),
- als große Weltraummission das Gravitationswellenobservatorium LISA und das Röntgenobservatorium Athena⁶,
- unter den mittelgroßen Missionen insbesondere den Astrometriesatelliten Gaia, die ESA-M-Klasse-Missionen Solar Orbiter (Sonnenphysik) und Euclid (extragalaktische Astrophysik und Kosmologie) sowie später die PLATO-Mission (stellare Astrophysik und Exoplaneten).

Außerdem wurde die Bedeutung der Laborastrophysik, von Virtuellen Observatorien (VO) sowie von



Die Spiralgalaxie NGC 6744.

komplexer Computersimulationssoftware im Bereich der theoretischen Forschung hervorgehoben. Im Herbst 2016 verlängerten die Mitglieder die ASTRONET-Vereinbarung für die Periode 2015-2025.

USA

Alle zehn Jahre gibt der National Research Council einen Decadal Report heraus, der die Ziele der astronomischen Forschung in den USA spezifiziert.

In der aktuellen Fassung von 2010, „New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics“, wird bei den erdgebundenen Vorhaben die Umsetzung des Large Synoptic Survey Telescope (LSST) mit höchster Priorität empfohlen, bei den Weltraumprojekten die Weltraumdurchmusterung mit dem Wide Field Infrared Survey Telescope (WFIRST). LSST ist derzeit im Bau, WFIRST befindet sich in der aktiven Implementierungsphase. Mit Nachdruck wurde auch eine Beteiligung der National Science Foundation (NSF) am geplanten 25-m-Klasse-Submillimeterteleskop Cerro Chajnantor Atacama Telescope (CCAT)

in Chile empfohlen, außerdem Programme zur Technologieentwicklung, zur Förderung des Baus astronomischer Instrumentierung und ein Theorieprogramm.

Wurde der Decadal Report 2010 noch unter der haushälterischen Vorgabe eines moderat wachsenden Budgets erstellt, musste das Programm mittlerweile an die Vorgaben eines auf absehbare Zeit nicht wachsenden Budgets angepasst werden, mit weitreichenden Folgen: Das begrenzte Budget der NSF wird durch die beiden großen Teleskopprojekte ALMA und LSST so stark beansprucht, dass viele der bestehenden NSF-geförderten Observatorien nicht mehr unterstützt werden und, wie im Fall des Green Bank Telescope und des Very Long Baseline Array, abgewickelt oder in private Förderorganisationen überführt wurden (sogenanntes *Divestment*). Die im Decadal Report 2010 empfohlene Entwicklung des CCAT-Teleskops wird derzeit nur im Rahmen eines Pilotprojekts (CCAT-prime) verfolgt, mit deutscher Beteiligung.

Im Moment laufen in den USA die ersten Vorbereitungen für den Decadal Report 2020.

⁶ Bis 2010 XEUS/IXO.



2 Entwicklung der Astronomie und Astrophysik in Deutschland

2.1 Astronomie und Astrophysik – ein goldenes Zeitalter

2003 stellten die Verfasser der DFG-Denkschrift „Status und Perspektiven der Astronomie in Deutschland 2003-2016“ fest, dass die Astronomie am Beginn eines goldenen Zeitalters stehe. Aus heutiger Sicht hat sich die Prognose erfüllt. Diese Einschätzung lässt sich an drei Beispielen verdeutlichen:

Exoplaneten: 1995 wurde der erste Planet entdeckt, der um einen anderen Stern als die Sonne kreist. Heute sind mehr als 3000 extrasolare Planeten bekannt, sogenannte Exoplaneten. Immer häufiger finden wir auch Planeten mit ähnlicher Masse wie die Erde. Besondere Beachtung finden Exoplaneten in der sogenannten bewohnbaren Zone, auf denen prinzipiell günstige Bedingungen für die Entstehung von Leben herrschen. Inzwischen haben wir sogar erste Informationen, wie sich die Atmosphären einiger Exoplaneten zusammensetzen. Der Fokus der Forschung hat sich deutlich erweitert. Astronominnen und Astronomen suchen Planetensysteme heute nicht nur, sondern charakterisieren sie und bestimmen ihre Demografie, indem sie versuchen herauszufinden, wie oft Exoplaneten verschiedener Masse und Komposition vorkommen. Es zeichnet sich ab, dass unser Sonnensystem mit seinen spezifischen Eigenschaften eher die Ausnahme als die Regel zu sein scheint.

Schwarze Löcher: Zu den faszinierendsten Objekten im Kosmos zählen die Schwarzen Löcher. Sie sind so massereich und kompakt, dass ihnen nicht einmal Licht entweichen kann. Wir konnten mittlerweile nachweisen, dass sich in den Zentren vieler Galaxien Schwarze Löcher befinden, deren Massen mehrere Millionen Mal so groß sind wie die Masse unserer Sonne. Das am besten untersuchte Beispiel befindet sich in unserer Milchstraße. Um das Galaktische Zentrum kreisen Sterne mit extrem hohen Geschwindigkeiten.

Plausibel erklären lässt sich das nur durch ein Schwarzes Loch im Zentrum mit einer Masse von 4,4 Millionen Sonnenmassen. Ebenso spektakulär war 2016 der Nachweis des Verschmelzens zweier Schwarzer Löcher über das von ihnen ausgesandte Gravitationswellensignal.

Präzisionskosmologie: Noch in den 1990er-Jahren waren die Werte der verschiedenen kosmologischen Parameter nicht genau bekannt. Heute haben sich das Forschungsfeld der Präzisionskosmologie und ein Standardmodell der Kosmologie etabliert. Dieses Modell ist überaus erfolgreich darin, die Entwicklung des Kosmos, seiner großräumigen Strukturen und der Galaxien von der frühesten Phase (10^{-11} Sekunden nach dem Urknall) bis heute (13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall) zu beschreiben. Die unmittelbare Konsequenz des Modells ist jedoch, dass 95 Prozent des Kosmos aus sogenannter Dunkler Materie und Dunkler Energie bestehen müssen. Diese Annahme lässt sich nicht mehr im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik beschreiben. Die Fragen nach Ursprung und Eigenschaften von Dunkler Materie und Dunkler Energie rütteln somit an den Grundfesten unseres physikalischen Weltbilds und führen zu neuen Gebieten der Physik.

Preisträgerinnen und Preisträger von hochrangigen nationalen und internationalen Forschungspreisen (Auswahl)



Immo Appenzeller

2015 Karl-Schwarzschild-Medaille
LSW/ ZAH Heidelberg



Karsten Danzmann

2017 Körber-Preis
AEI Hannover



Rudolf Kippenhahn

2007 Karl-Schwarzschild-Medaille
MPA Garching
Universität Göttingen



Rolf-Peter Kudritzki

2009 Karl-Schwarzschild-Medaille
IfA Hawaii
MPA Garching
LMU München



Reinhard Genzel

2008 Shaw-Preis
2011 Karl-Schwarzschild-Medaille
2012 Crafoord-Preis
2012 Tycho-Brahe-Preis
MPE Garching
UC Berkeley



Eva Grebel

2015 Hector Wissenschaftspreis
ARI/ ZAH Heidelberg



Karl-Heinz Rädler

2013 Karl-Schwarzschild-Medaille
AIP Potsdam



Volker Springel

2010 Klung-Wilhelmy-Weberbank-Preis
HITS & ARI / ZAH Heidelberg



Günther Hasinger

2004 Leibniz-Preis
IfA Hawaii
MPE Garching



Guinevere Kauffmann

2007 Leibniz-Preis
MPA Garching



Rashid Sunyaev

2003 Gruber-Kosmologie-Preis
2008 Crafoord-Preis
2008 Karl-Schwarzschild-Medaille
MPA Garching



Joachim Trümper

1994 Karl-Schwarzschild-Medaille
2016 Tycho-Brahe-Preis
MPE Garching



Simon White

2011 Gruber-Kosmologie-Preis
2017 Shaw-Preis
MPA Garching



Richard Wielebinski

2017 Karl-Schwarzschild-Medaille
MPIfR Bonn

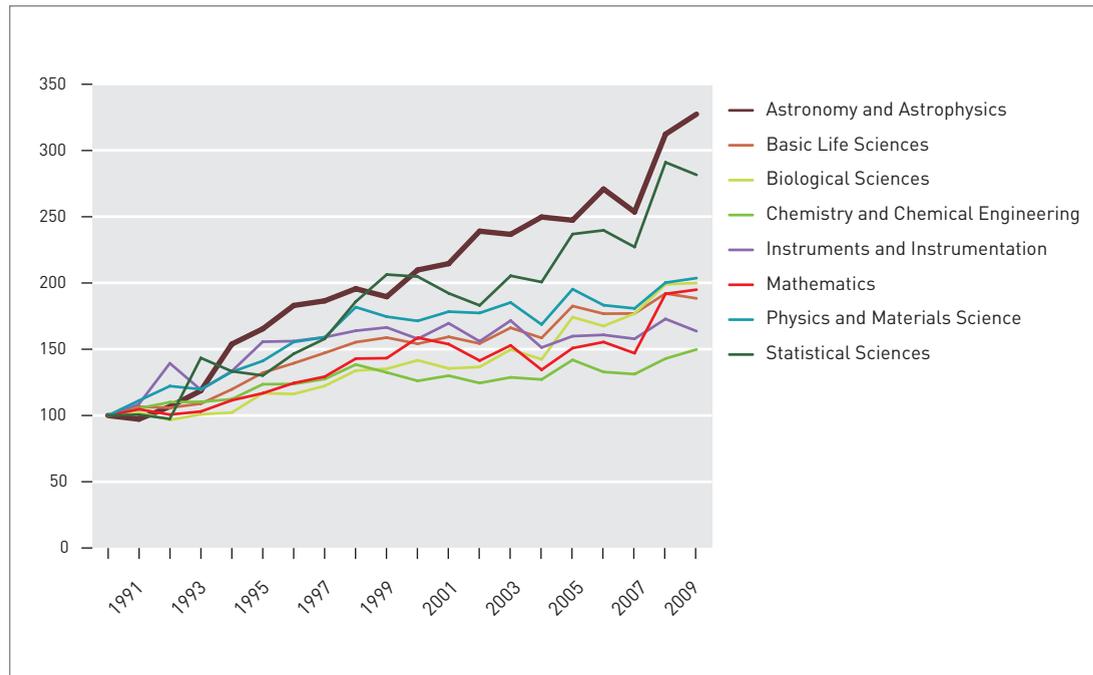


Abb. 2.1: Publikationen in den Journalen des Web of Science für die Naturwissenschaften in Deutschland 1990 bis 2009.⁷

An den auf Seite 21 erwähnten Erfolgen und weiteren Erkenntnissen waren deutsche Forschergruppen maßgeblich beteiligt. Sei es an der wissenschaftlichen Idee und deren Umsetzung, an der theoretischen Modellierung und an numerischen Simulationen, an der Entwicklung der notwendigen Messeinrichtungen oder an der Datenanalyse. Der Erfolg astronomischer Forschung aus Deutschland lässt sich sogar messen. Eine 2010 vom BMBF veröffentlichte bibliometrische Analyse ergab, dass zwischen 1990 und 2009 in zwei Fachgebieten der Einfluss deutscher Forschung im internationalen Vergleich deutlich überproportional gewachsen ist: in der Statistik und in der Astronomie.

Auch in Nachbargebieten der Astrophysik waren Forschende deutscher Einrichtungen an spektakulären neuen Ergebnissen signifikant beteiligt. 2016 gelang erstmals die direkte Messung von Gravitationswellen (Fundamentalphysik), 2015 der Nachweis von hochenergetischen kosmischen Neutrinos (Astroteilchenphysik) und die Landung auf dem Kometen 67P/Tschurjumov-Gerasimenko (Planetenforschung).

Für ihre Beiträge wurden zahlreiche Forscherinnen und Forscher mit renommierten nationalen und internationalen Preisen ausgezeichnet, wie die Übersicht auf der vorhergehenden Doppelseite zeigt.

2.2 Ein dynamisches Forschungsfeld

Astronomie und Astrophysik sind hochmoderne und aktuelle Forschungsgebiete der Physik. Sie spielen an allen Universitäten eine wichtige Rolle in der Physikausbildung und sind in die Bachelor- und Masterstudiengänge integriert. Die Astro-

physik ist ein Zugpferd für junge Menschen: Sie fördert das Interesse an naturwissenschaftlichen Problemstellungen und motiviert den Nachwuchs für die naturwissenschaftliche Forschung. Die folgende Tabelle verdeutlicht das.

Jahr	Bachelor	Master/Diplom	Promotion	Habilitation
2003	2	90	111	18
2004	2	101	117	8
2005	2	134	137	7
2006	2	134	142	8
2007	1	153	136	8
2008	16	155	145	5
2009	22	161	148	3
2010	47	162	167	0
2011	79	128	164	4
2012	102	150	157	3
2013	123	144	171	7
2014	123	154	182	5
2015	152	178	186	8
2016	180	172	188	3

Tab. 2.1: Abschlüsse mit astronomischen Themen an deutschen Universitäten 2003-2016.

Das zunehmende Gewicht von Astronomie und Astrophysik lässt sich auch an der Zahl der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler feststellen. Sie stieg zwischen 2000 und 2016 von rund 1400 auf 2700 Beschäftigte.⁸ An deutschen Universitäten wurden seit 2004 24 zusätzliche Professuren im Bereich der Astrophysik ein-

gerichtet.⁹ Die Astroteilchenphysik mit ihrer aktuell sehr dynamischen Entwicklung ist hier noch gar nicht einbezogen. Etwa 800 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind Mitglieder in der Astronomischen Gesellschaft, 655 in der Internationalen Astronomischen Union (IAU).

⁷ Bibliometrische Analyse des deutschen Forschungsoutputs im internationalen Vergleich. Indikatorenbericht 2010 (vgl. Anhang A).

⁸ Gemäß Jahresbericht 2000 der Astronomischen Gesellschaft und Tabelle 2.2.

⁹ In Heidelberg wurden 6 Professuren eingerichtet, in Potsdam 5, in München 3, in Göttingen, Köln und Bonn jeweils 2 und je eine Professur in Würzburg, Stuttgart, Bielefeld und Hamburg.

Frauen in Führungspositionen



Prof. Dr. Svetlana Berdyugina

wurde 2008 auf einen Lehrstuhl an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg berufen. Seit 2017 ist sie Direktorin am Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik (KIS). Zuvor war sie Professorin an der ETH Zürich und zuletzt Stellvertretende Direktorin am KIS. Sie forscht multidisziplinär mit Schwerpunkten auf solaren/stellaren Magnetfeldern, Exoplanetenatmosphären und in der Astrobiologie.

Svetlana Berdyugina ist eine führende Wissenschaftlerin im Bereich der Polarimetrie der Sonne, Sterne und Exoplaneten. Sie entwickelte die molekulare Polarimetrie für Astrophysik und Astrobiologie und entdeckte neue Strukturen und Zyklen in solaren und stellaren Magnetfeldern. Ihre Gruppe war die erste, die den Albedo und die Farbe eines Exoplaneten vermessen hat. Für ihre Forschungsarbeiten hat sie prestigereiche Auszeichnungen wie den EURYL Award (2005), einen ERC Advanced Grant (2012) und ein NASA Astrobiology Fellowship (2012) gewonnen. Seit 2016 ist sie Mitglied im Editorial Board von „Solar Physics“, seit 2012 Mitglied der Preisjury der Leibniz-Gemeinschaft. 2007 und 2008 war sie Stellvertretende Vorsitzende des ESO Observing Programmes Committee.



Prof. Dr. Alessandra Buonanno

ist Direktorin am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, dem Albert-Einstein-Institut in Potsdam. Sie ist zudem Professorin an der University of Maryland, College Park, USA, und lehrt als Honorarprofessorin an der Humboldt-Universität zu Berlin sowie der Universität Potsdam.

Alessandra Buonanno ist eine führende Wissenschaftlerin auf dem Gebiet der Gravitationswellenphysik und Mitglied der LIGO Scientific Collaboration. Ihre Forschung am Schnittpunkt zwischen analytisch-relativistischer Modellierung und numerisch-

relativistischen Simulationen trug entscheidend zu der Entdeckung von Gravitationswellen und der physikalischen Interpretation ihrer Signale bei.

Für ihre Arbeiten zur Gravitationswellenmessung in der LIGO-Kollaboration erhielt sie den Niedersächsischen Staatspreis sowie den Preis für Astrophysik, Kosmologie und experimentelle Gravitation der Italienischen Gesellschaft für Allgemeine Relativität und Gravitation. Der erstmalige direkte Nachweis von Gravitationswellen durch die LIGO-Kollaboration wurde unter anderem mit dem Gruber-Kosmologie-Preis und dem Prinzessin-von-Asturien-Preis gewürdigt.



Prof. Dr. Paola Caselli

ist seit 2014 Direktorin des Zentrums für astrochemische Studien am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching und Honorarprofessorin an der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU). Von 2007 bis 2014 war sie Professorin an der University of Leeds, zuvor forschte sie am Arcetri-Observatorium in Florenz. Die Jahre 2006/2007 verbrachte sie als Gastwissenschaftlerin an der Harvard University.

Paola Caselli ist Expertin auf den Gebieten Astrochemie und Sternentstehung. Sie schließt aus Molekülspektren auf die physikalischen und chemischen Prozesse, die während der Entstehung von Sternensystemen aus Gas- und Staubwolken eine Rolle spielen. Dafür kombiniert sie Beobachtungsdaten mit chemisch-dynamischen Modellen und speziellen Strahlungstransfercodes.

Prof. Caselli ist Mitglied der American Astronomical Society, Gastprofessorin an der University of Leeds, wurde 2012 mit einem ERC Advanced Grant ausgezeichnet und erhielt vor Kurzem eine Jubiläumsprofessur an der Chalmers University of Technology in Göteborg, Schweden. Sie ist die Sprecherin der International Max Planck Research School für Astrophysik an der LMU.



Prof. Dr. Eva Grebel

wurde 2007 auf einen Lehrstuhl für Astronomie an der Universität Heidelberg berufen und ist Direktorin am Astronomischen Rechen-Institut. Zuvor leitete sie das Astronomische Institut der Universität Basel.

Eva Grebel ist eine führende Wissenschaftlerin im Bereich der Galaxienentwicklung und im aufkommenden Forschungsfeld der Galaktischen Archäologie. Sie nutzt das Alter, die Bewegungen und die chemische Komposition von Sternen als Zeugnis der Entwicklung naher Galaxien und der Milchstraße. Für ihre Forschungs-

arbeiten zur galaktischen Archäologie erhielt sie unter anderem den Johann-Wempe-Preis (2006), den Lautenschläger-Forschungspreis (2009) und den Hector Wissenschaftspreis (2015). Sie ist Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften und der Hector Fellow Academy.

Von 2008 bis 2013 war sie Sprecherin des Fachkollegiums 311 „Astrophysik und Astronomie“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Seit 2013 ist sie Senatorin der DFG. Zudem ist sie seit 2011 Sprecherin des Sonderforschungsbereichs 881 „The Milky Way System“.



Prof. Dr. Guinevere Kauffmann

ist seit 2013 Direktorin am Max-Planck-Institut (MPI) für Astrophysik in Garching und Honorarprofessorin an der LMU München.

Guinevere Kauffmann studierte Angewandte Mathematik und absolvierte ihr Masterstudium in Astronomie 1990 in Kapstadt, Südafrika. Nach ihrer Promotion bei Simon White forschte sie als Miller Fellow an der University of California at Berkeley. Anschließend war sie Postdoc am MPI für extraterrestrische Physik und später am MPI für Astrophysik, wo sie seit 2003 eine eigene Forschungsgruppe leitete.

Zu ihren Forschungsgebieten gehören Galaxienentstehungsmodelle und die Analyse der beobachteten Eigenschaften von Galaxien. Dabei interessieren sie besonders die atomaren und molekularen Eigenschaften des Gases in Galaxien und in aktiven galaktischen Kernen. Sie hat eine eigene Methodik entwickelt, um aus sehr großen Galaxienstichproben Informationen über ihre Entstehung und Evolution zu gewinnen.

Die DFG zeichnete Prof. Kauffmann 2007 mit dem Leibniz-Preis aus. Sie ist Trägerin des Bundesverdienstkreuzes sowie gewähltes Mitglied der Akademie der Wissenschaften Leopoldina und der National Academy of Sciences, USA.

In Deutschland sind Frauen in der Physik mit einem Anteil von etwa 20 Prozent deutlich unterrepräsentiert, in den Ingenieurwissenschaften liegt ihr Anteil sogar noch darunter. Dies ist auch in Nord- und Mitteleuropa und in den angelsächsischen Ländern der Fall. Frankreich, Italien und die Länder Asiens und Südamerikas hingegen können deutlich höhere Anteile von Wissenschaftlerinnen vorweisen. In der Astronomie und Astrophysik sind die Zahlen etwas vorteilhafter als in der Physik, vor allem im Bereich des wissenschaftlichen Nachwuchses. Es dauert jedoch einige Zeit, bis sich die Verhältnisse in den jüngeren Altersstufen auch in den Leitungsebenen widerspiegeln, und selbst dann oft nur in abgeschwächter Form.

Noch zu Beginn der 2000er-Jahre arbeitete an den Instituten des RDS keine einzige C4-Professorin/Direktorin. Der Anteil von Wissenschaftlerinnen unter den deutschen Mitgliedern der IAU betrug damals 3 Prozent. Inzwischen sind in Deutschland 7 von 84 W3-Professuren/Direktoren in der Astronomie und Astrophysik mit Frauen besetzt sowie 23 von 85 W2-Professuren. Die Quote der Frauen unter den deutschen Mitgliedern der Internationalen Astronomischen Union liegt heute bei 13 Prozent, und damit etwas unter dem IAU-Durchschnitt von 16 Prozent. Dieser Zustand ist nach wie vor unbefriedigend, aber es ist deutlich eine positive Entwicklung zu erkennen.

Die Förderung der Astronomie durch die DFG wuchs zwischen 2005 und 2016 überproportional und beträgt heute fast 20 Millionen Euro im Jahr. Die Förderung umfasst unter anderem zwei Exzellenzcluster, vier neu eingerichtete Sonderforschungsbereiche und Transregios sowie drei Schwerpunktprogramme. Die Zahl der Mitglieder im DFG-Fachkollegium 311 „Astrophysik und Astronomie“ stieg in der vergangenen Dekade von vier auf sechs.

Über die Exzellenzinitiative, die International Max Planck Research Schools und das Wettbewerbsverfahren der Leibniz-Gemeinschaft wurden acht Graduiertenschulen mit astrophysikalisch dominierten Themen eingerichtet.

Auch in der europäischen Förderung stehen Astronominnen und Astronomen an deutschen Instituten exzellent da. Das zeigt zum Beispiel die Förderung des Europäischen Forschungsrats (ERC): In den vergangenen zehn Jahren wurden an Forschende in deutschen Einrichtungen 11 Advanced Grants, 8 Consolidator Grants, 16 Starting Grants und ein Synergy Grant vergeben.

Personal/ Wertigkeit	Universitär		Außeruniversitär		Gesamt		Summe
	männlich HH/DM	weiblich HH/DM	männlich HH/DM	weiblich HH/DM	männlich	weiblich	
W3/C4	47/2	3/0	28/0	4/0	77	7	84
W2/C3	24/1	3/0	35/2	20/0	62	23	85
AT/W1	11/0	2/0	4/0	0/0	15	2	17
E15	14/11	3/1	73/8	5/7	106	16	122
E13/E14/ A13/A14	107/174	32/38	418/171	103/61	870	234	1104
Technisches Personal	81/36	25/5	286/62	47/14	465	91	556
Promotion	41/185	17/58	187/68	120/30	481	225	706
Summe	325/409	85/102	1031/311	299/112	2076	598	2674

Tab. 2.2: Wissenschaftliches Personal an RDS-Instituten in Deutschland.

HH: Finanzierung durch Haushaltsmittel, DM: Finanzierung durch Drittmittel (Stand 31.12.2016).

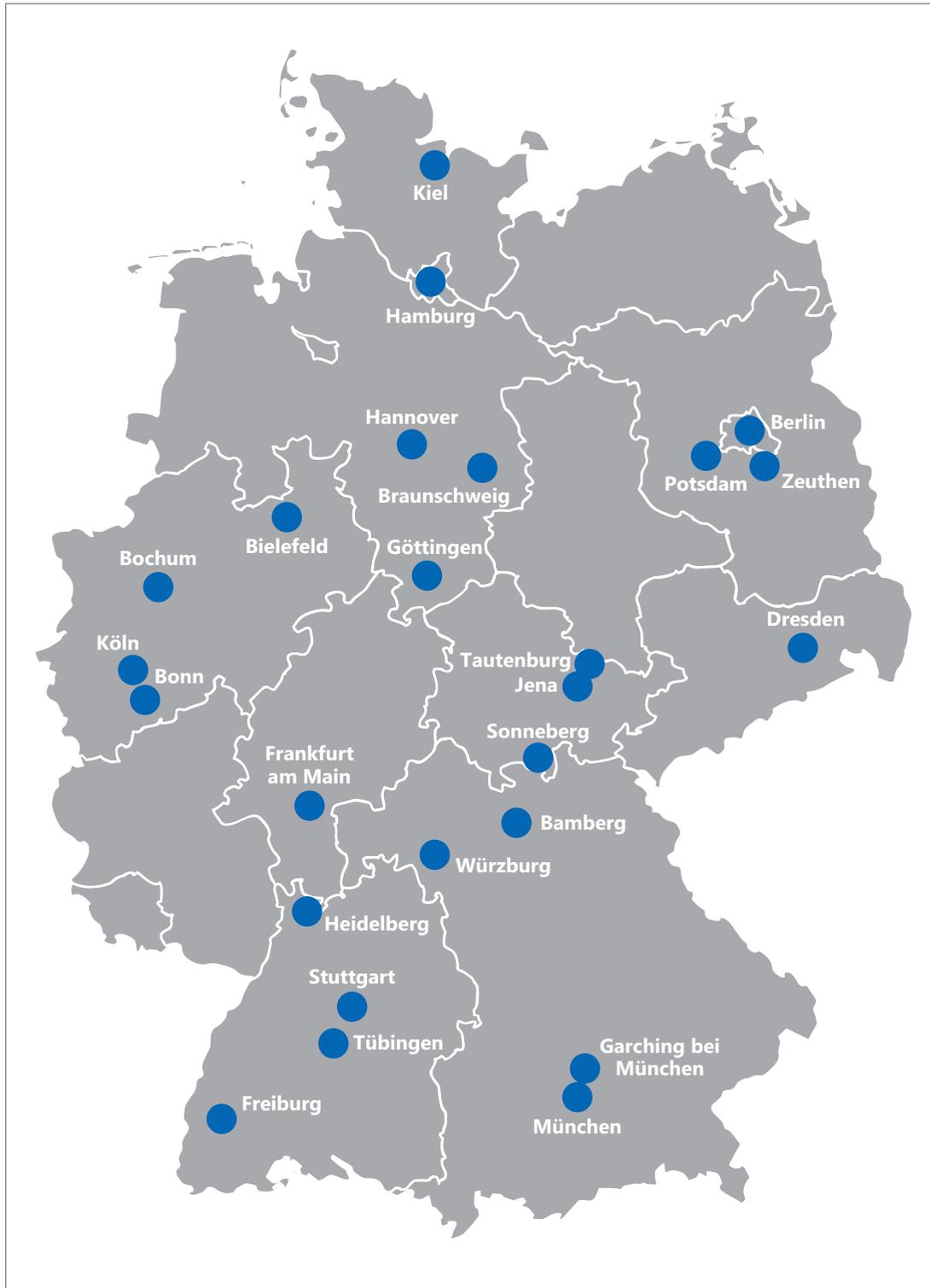


Abb 2.2: Standorte der 38 Mitgliedseinrichtungen des Rats deutscher Sternwarten.

2.3 Astronomie und Astrophysik in den Einrichtungen des RDS

Astronomische und astrophysikalische Forschung findet in Deutschland vor allem an den 38 Mitgliedseinrichtungen des Rats deutscher Sternwarten statt. Der RDS ist in den vergangenen zwölf Jahren um fünf Institute gewachsen und umfasst nun 38 Mitgliedseinrichtungen.¹⁰ Darunter sind 25 universitäre Einrichtungen, sieben Max-Planck-Institute, zwei Einrichtungen der Leibniz-Gemeinschaft, zwei Helmholtz-Zentren, ein Landesinstitut und eine private Einrichtung.

Die Forschungsgegenstände der RDS-Institute umfassen die Sonne, die Sterne und ihre Planetensysteme (17 Einrichtungen), den kosmischen Materiekreislauf (16 Einrichtungen), die Milchstraße und andere Galaxiensysteme (16 Einrichtungen), die Kosmologie und die Erforschung des jungen Universums (12 Einrichtungen) sowie die Extremzustände des Kosmos und die fundamentale Astrophysik (13 Einrichtungen). Dabei kommen in den Einrichtungen zahlreiche Methoden zur Anwendung: Die UV-, optische und Infrarot-astronomie (16 Einrichtungen), die Ferninfrarot-, Submillimeter-, Millimeter- und Radioastronomie (13 Einrichtungen), die Röntgenastronomie und Gammaastrophysik (14 Einrichtungen), die Laborastrophysik (6 Einrichtungen) und das Höchstleistungsrechnen (15 Einrichtungen).

14 Einrichtungen beteiligen sich am Bau von astronomischer Instrumentierung, 11 im Bereich der Weltraummissionen. Leider sind in der Astrophysik diese technologisch orientierten Forschungsvorhaben nach wie vor an universitären Instituten unterrepräsentiert, gerade im Vergleich zu anderen Bereichen der Physik, zum Beispiel der Elementarteilchenphysik.

Viele Einrichtungen arbeiten in mehreren Untergebieten, im Multi-Wellenlängenbereich und sind stark vernetzt, – deutliche Tendenzen in der Astronomie und Astrophysik. Häufig gibt es Berührungspunkte zu benachbarten Forschungsgebieten, vor allem zur Astroteilchen- und Gravitationswellenphysik (14 Einrichtungen) und zur Planetenforschung (3 Einrichtungen). Anhang B und C bieten eine Übersicht der RDS-Institute und ihrer Fachgebiete.

¹⁰ Neu hinzugekommen sind das Deutsche SOFIA Institut (DSI), das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY-Zeuthen (DESY), die Humboldt-Universität zu Berlin, die Universität Bielefeld und die Technische Universität Braunschweig.



3 Astronomie und Gesellschaft

Astronomie hat enorme Auswirkungen auf unsere Kultur, unsere technologische Entwicklung und unser Leben. Viele Menschen begeistern sich für astronomische Forschungsergebnisse. Sie möchten wissen, wo wir herkommen, wie die Welt entstanden ist und ob die Erde der einzige bewohnte Planet im Weltall ist. Die Frequenz und Ausführlichkeit der Medienberichterstattung ist auch deshalb außerordentlich groß. Faszinierende Aufnahmen von Himmelsobjekten machen die Nachrichten aus der astronomischen Welt zudem besonders medien- und öffentlichkeitswirksam.

Diese Stärken der Astronomie und ihre starke Wirkung auf Menschen aller Altersgruppen eignen sich hervorragend, Nachwuchs für die Naturwissenschaften zu rekrutieren.

Spitzenforschung braucht Spitzentechnologie. Deshalb sind neue Teleskop- und Satellitenprojekte auch immer ein Anstoß für neue Hochleistungen der Industrie. Viele Nebenprodukte der astronomischen Forschung sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken, zum Beispiel die Digitalkamera oder das WLAN.

3.1 Industriepartnerschaften

Astronomische Kameras und Spektrografen für kleine und mittelgroße erdgebundene Teleskope werden häufig von den Forschungsinstituten entwickelt und hergestellt. Die benötigten Bauteile werden bei Industriefirmen bestellt. Bei Großteleskopen und Satellitenmissionen werden oft Firmen mit der Herstellung der Instrumente beauftragt, beispielsweise Kayser-Threde oder Berliner Glas, aber auch an zahlreiche kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Auch Forschungs- und Entwicklungsaufträge werden an die Industrie vergeben. Die astronomischen und astrophysikalischen Einrichtungen initiieren also auf unterschiedlichen Wegen Innovationen und fördern sie.

werden. Der Sekundärspiegel wird mit einem Durchmesser von vier Metern der weltweit größte konvex geschliffene Spiegel sein. Auch die Rohlinge für die Spiegelsegmente des gigantischen Hauptspiegels mit 39 Metern Durchmesser werden von Schott gefertigt. Zentrale Technologien für die Antennen des weltgrößten Radioteleskops ALMA sind mit maßgeblicher oder federführender Beteiligung deutscher Unternehmen realisiert worden, zum Beispiel von Vertex Antennentechnik in Duisburg und MT-Mechatronics in Mainz.

Hinzu kommt, dass die ESA Industrienaufträge bevorzugt an Firmen in Ländern vergibt, die sich an ESA-Missionen mit nationaler Forschungsförderung beteiligen. Eine Analyse für die Europäische Südsternwarte hat gezeigt, dass das Auftragsvolumen deutscher Firmen den von Deutschland gezahlten Beitrag übersteigt. Ein aktuelles Beispiel ist das Extremely Large Telescope ELT, dessen Sekundär- und Tertiärspiegel von der Mainzer Firma Schott entwickelt und hergestellt

3.2 Wissens- und Technologietransfer



Panoramaaufnahme der Antennenschüsseln des Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) auf dem Chajnantor-Plateau.

Die Astrophysik benötigt kontinuierlich Geräte an der Grenze des technologisch Machbaren. Anders kann sie ihre Forschung angesichts der Weite des Kosmos, der Schwäche der empfangenen Signale, der irdischen und atmosphärischen Störungen und bei Satellitenexperimenten auch angesichts der Bedingungen im Weltraum nicht betreiben.

Neu- und Weiterentwicklungen für astronomische Instrumente lassen sich häufig in andere Bereiche übertragen, zum Teil mit überraschenden Ergebnissen. In viele Produkte des täglichen Lebens sind technologische Entwicklungen der Astronomie eingeflossen. So stammt die Digitalkamera aus der Weltraumforschung, das drahtlose Internet WLAN aus der Radioastronomie und die LASIK-Korrektur von Sehfehlern aus der adaptiven Optik. Die kompakte Hochfrequenztechnologie in Mobiltelefonen beruht auf Entwicklungen der Radioastronomie und der militärischen Radartechnik vergangener Jahrzehnte. Aber auch weniger technologisch anmutende Produkte stammen aus der astronomischen Forschung, die Gleitsichtbrille zum Beispiel aus der Röntgenastronomie. Das glaskeramische Kochfeld Ceran geht auf das Zerodur-Glas zurück, das die Firma Schott in den 1960er-Jahren entwickelte. Ziel war es, Teleskopspiegel mit möglichst kleinem Wärmeausdehnungskoeffizienten zu bauen, damit

sie sich in kühlen Nächten nicht verformen und die Astronominnen und Astronomen nicht ständig nachfokussieren mussten.

Auch aktuell kann die Entwicklung astronomischer Kameras und Spektrografen vielversprechende Impulse für Produkte der Zukunft geben. Ein Beispiel ist die Diagnose von Hautkrebs mit der Integralen Feldspektroskopie als Nebenprodukt der Entwicklung von Instrumenten für das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte. Entwicklungen für die Röntgenastronomie haben die Grundlagen für empfindliche Detektoren für die Medizintechnik/Onkologie, Sicherheitstechnik, Materialforschung und Qualitätskontrolle geliefert. Die Hightechindustrie in Deutschland profitiert also ganz direkt von astrophysikalischer Forschung.

Neben der Optik und Elektronik bergen insbesondere die datenintensiven modernen Durchmusterungen und das Höchstleistungsrechnen Potenziale für den Transfer in Anwendungen, die häufig als Big Data bezeichnet werden. So nutzt die Vatikanische Bibliothek ein Datenformat aus der Astronomie, um ihre Bestände zu digitalisieren. Bei der Anlage des voraussichtlich 45 Petabyte großen Archivs wird sie von der Europäischen Weltraumorganisation unterstützt.

3.3 Öffentlichkeitsarbeit

Nahezu alle Menschen fühlen sich von der Astronomie angesprochen. Das liegt an den ästhetischen und detailreichen Bildern astronomischer Phänomene, an Dimensionen, die unsere Vorstellungskraft herausfordern, an den exotischen Umgebungen und fundamentalen Fragen der Astronomie. Weltweit sind Astronominnen und Astronomen sehr aktiv und professionell bei der Aufbereitung neuer Forschungsergebnisse für die Öffentlichkeit. Sie werden dabei von vielen Menschen unterstützt, die Astronomie als Hobby und oft mit Hilfe privat oder kommunal finanzierter Volkssternwarten oder Planetarien betreiben.

Auch in Deutschland sind Astronominnen und Astronomen in der Öffentlichkeitsarbeit sehr engagiert. Fast jeder Forschungsverbund hat dafür dedizierte Mittel. Universitäre wie außeruniversitäre astronomische Institute beteiligten sich an Aktionen wie der „Langen Nacht der Wissenschaften“ oder dem „Girls' Day“. Viele Institute bieten darüber hinaus öffentliche Führungen und Beobachtungsnächte an. Wissenschaftshistorische Einrichtungen wie der Große Refraktor und der Einsteinurm in Potsdam sind Publikumsmagnete, mit denen die interessierte Öffentlichkeit nachhaltig an die aktuelle Wissenschaft herangeführt werden kann.

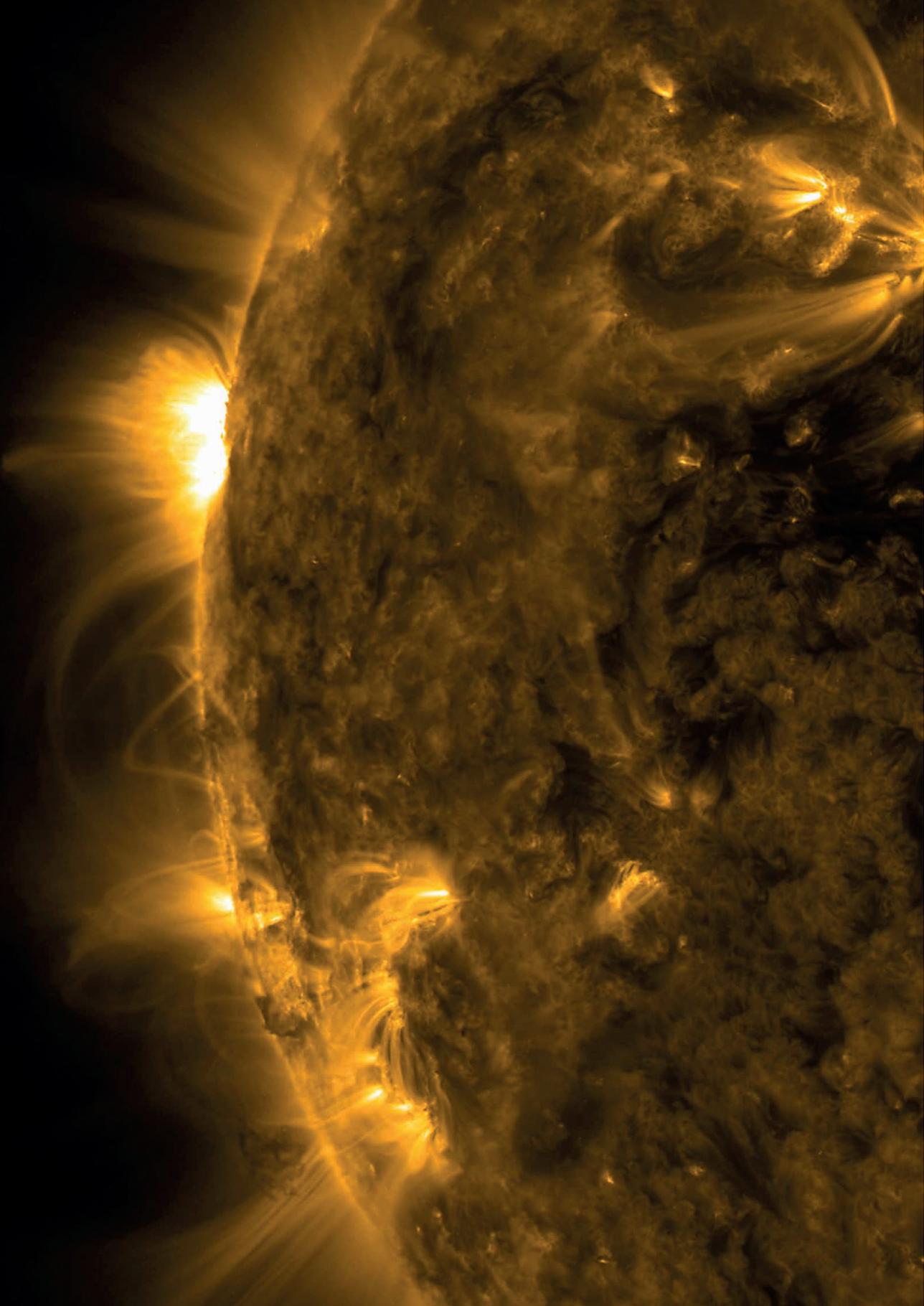
2011 eröffnete auf dem Campus des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg das Haus der Astronomie (HdA) als Zentrum für astronomische Öffentlichkeitsarbeit und Didaktik der Astronomie. Es ist das Ergebnis einer Partnerschaft der Max-Planck-Gesellschaft, der Klaus-Tschira-Stiftung, der Universität Heidelberg und der Stadt Heidelberg. Das HdA soll die Faszination der Astronomie in die Öffentlichkeit und Schulen tragen. Es bietet Aus- und Fortbildungen zu astronomischen Themen für Lehrkräfte an und fördert den interdisziplinären wissenschaftlichen Austausch. Eine Besonderheit des HdA ist seine Nähe zur Grundlagenforschung durch die direkte Anbindung an die astronomischen Forschungsinstitute. Das Zentrum des Gebäudes bil-

det ein großes Auditorium mit etwa 100 Plätzen, das auch als Planetarium nutzbar ist. Außerdem beherbergt das Haus der Astronomie die Redaktion der auflagenstärksten deutschen Astronomiezeitschrift „Sterne und Weltraum“.

Eine besondere Rolle bei der Vermittlung astronomischer Themen spielen die Planetarien, die in der Gesellschaft Deutschsprachiger Planetarien organisiert sind. Zahlreiche Kleinplanetarien, elf Planetarien mit Kuppeldurchmessern zwischen 9 und 15 Metern und neun Planetarien mit größeren Kuppeln bieten in Deutschland regelmäßig Vorführungen für insgesamt knapp 2 Millionen Besucher jährlich an. Zurzeit wird mit dem ESO Supernova Planetarium & Besucherzentrum auf dem Gelände der ESO-Zentrale in Garching das neueste Planetarium Deutschlands gebaut. Seine Eröffnung ist für das Frühjahr 2018 geplant. Die ESO-Supernova wird Ausstellungen, Führungen, ein 3D-Kino und Planetariumsvorführungen anbieten und seinen Besucherinnen und Besuchern die neuesten Ergebnisse der Europäischen Südsternwarte vermitteln. Die Dauerausstellung „The Living Universe“ wird 13 Themen der Astronomie in deutscher, englischer und kinderfreundlicher Sprache erklären. Das Gebäude der ESO-Supernova wurde von der Klaus-Tschira-Stiftung finanziert. Die ESO ist verantwortlich für Betrieb, Unterhalt und Management des Zentrums.

Zu besonderer Sichtbarkeit verhalf der astronomischen Forschung 2009 das Internationale Jahr der Astronomie der UNESCO, 400 Jahre nachdem Galileo Galilei erstmals sein Fernrohr gen Himmel richtete. Weltweit nahmen mehr als 800 Millionen Menschen an Zehntausenden Veranstaltungen teil. In Deutschland gab es den Anstoß für das Webportal „Astronomie in Deutschland“, auf dem die universitären und außeruniversitären astronomischen Institute ihre Forschung und Angebote präsentieren.¹¹

¹¹ <http://www.astronomie-in-deutschland.de>



4 Aktuelle Forschungsthemen der Astronomie und Astrophysik

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung für die verschiedenen Fachgebiete der Astronomie und Astrophysik kurz zusammengefasst. Es werden die dringendsten Fragen für die kommende Dekade präsentiert und die wesentlichen Infrastrukturen, mit denen ihre Beantwortung angegangen werden soll. Dabei liegt der Schwerpunkt

auf Themen, die an deutschen Forschungseinrichtungen untersucht werden. Die Darstellung basiert auf 20 Strategiepapieren in englischer Sprache, die unter <http://www.denkschrift2017.de> zum Download bereitstehen. Am Ende jedes Unterkapitels werden die jeweils relevanten Strategiepapiere noch einmal aufgelistet.

Nr.	Titel der Strategiepapiere	Bezug in der Denkschrift / Kapitel
01	Extrasolar Planets and their Formation	4.1
02	The Sun: a Laboratory for Stellar and Plasma Physics	4.1
03	Stellar Parameters, Stellar Structure and Evolution	4.1, 4.2, 4.3
04	Star Formation and Interstellar Medium	4.1, 4.2, 4.3, 4.4
05	The Milky Way and the Local Volume	4.2, 4.3
06	Galaxy Kinematics and Evolution	4.3, 4.4
07	(Active) Galactic Nuclei	4.3, 4.4, 4.5
08	Dark Energy, Dark Matter and Large-Scale Structure	4.3, 4.4
09	The Early Universe from Inflation to Reionization	4.4, 4.5
10	Fundamental Physics with Astronomical Observations: Testing Gravity and Extreme States of Matter	4.5
11	High-Energy Astrophysics	4.4, 4.5
12	Astronomy from Space	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5
13	Optical/IR Facilities	4.1, 4.2, 4.3, 4.4
14	FIR/submm/mm Facilities	4.1, 4.2, 4.3, 4.4
15	Radio Astronomy Infrastructures	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5
16	Astroparticle Physics with Gamma Rays and Neutrinos: The Decade of the Great Observatories	4.5
17	Surveys	4.1, 4.2, 4.3, 4.4
18	Computational Astrophysics	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5
19	Information Science and E-Infrastructure Challenges in Astronomy	4.3, 4.4, 4.5
20	Laboratory Astrophysics of Molecular Systems and Dust	4.1, 4.2

Tab. 4.1: Strategiepapiere zum Forschungsstand und zu aktuellen Fragen verschiedener astronomischer Teilgebiete und zur Instrumentierung.

4.1. Sonne, Sterne und ihre Planetensysteme

Für die Erforschung des Universums spielt unsere Sonne aufgrund ihrer Nähe eine besondere Rolle. Sie und ihre acht Planeten können wir im Detail untersuchen und nur in unserem Sonnensystem können wir Experimente durchführen. Unsere Erkenntnisse über die Sonne liefern Grundlagen für die Erforschung anderer Sterne.

In Sternen werden fast alle chemischen Elemente geformt, die schwerer sind als Wasserstoff und Helium. Sie werden durch Sternwinde oder gewaltige Supernovaexplosionen in den Weltraum freigesetzt. Sterne treiben also den kosmischen Materiekreislauf¹⁴ an und gestalten dadurch die Eigenschaften der Galaxien mit¹⁵. In den Überresten ehemaliger Sterne lässt sich Materie in Extremzuständen untersuchen. An ihnen können wir fundamentale physikalische Prozesse studieren und Theorien wie die Allgemeine Relativitätstheorie überprüfen.¹⁶ Auf der Erde oder im erdnahen Raum ist dies so nicht möglich.

Noch vor 25 Jahren war es nicht nachgewiesen, ob die Sonne der einzige Stern mit einem Planetensystem ist oder ob, wie gemeinhin vermutet, auch andere Sterne von Planeten umkreist werden – oder sogar alle. Erst 1995 wurde der erste Exoplanet entdeckt. Diese Entdeckung war der Beginn eines neuen und extrem dynamischen Forschungsfeldes. Mittlerweile sind einige Tausend Exoplaneten entdeckt worden.

Sterne und ihre Planetensysteme formen sich aus Staubscheiben um junge Sterne, sogenannten protoplanetaren Scheiben. An ihnen lässt sich der Entstehungsprozess eines Planetensystems studieren.

Die zentralen Fragen in diesem Bereich der Astrophysik sind im kommenden Jahrzehnt:

- **Sonne:** Wie treiben die inneren Strömungen in der Sonne den sogenannten solaren Dy-

namo an? Wie erklärt sich daraus der Aktivitätszyklus der Sonne? Wie steht die Sonne in Wechselwirkung mit ihrer Heliosphäre, also dem vom Sonnenwind beeinflussten Raum, der auch unser Planetensystem einschließt? Inwiefern sind die Eigenschaften der Sonne besonders, inwieweit kann sie als Prototyp für andere Sterne dienen?

- **Sterne:** Können wir ein dreidimensionales Standardmodell für die Sternentwicklung formulieren, das Effekte von Turbulenz, Rotation und Magnetfeldern der Sterne berücksichtigt? Was treibt den Aktivitätszyklus von Sternen an? Wie beenden Sterne ihr Leben, welche Sterne explodieren? Welche Eigenschaften haben die Überreste der Sternentwicklung, zum Beispiel Weiße Zwerge und Neutronensterne? Wie verläuft die Entwicklung in Mehrfachsystemen?
- **Exoplaneten:** Wie sind Exoplaneten aufgebaut? Was bestimmt ihre Eigenschaften? Wie hängen ihre Eigenschaften mit denen des jeweiligen Muttersterns zusammen? Woraus setzt sich die Atmosphäre von Exoplaneten zusammen? Könnte auf Exoplaneten Leben in uns bekannter Form existieren?
- **Entstehung von Planetensystemen:** Wie erklären sich die Strukturen in den riesigen Scheiben aus Gas und Staub, die junge Sterne umgeben? Wie entstehen aus dem Staub dieser protoplanetaren Scheibe Planetesimale und Protoplaneten? Können wir nachweisen, dass hier erdähnliche Gesteinsplaneten gebildet werden? Oder dass Asteroiden oder Kometen Wasser transportieren? Können wir Gas- und Staubscheiben um Exoplaneten als Geburtsorte von Exomonden nachweisen?

Die Sonne als Prototyp für die Untersuchung anderer Sterne

Die Sonne ist die Energiequelle für alles Leben auf der Erde. Schon deshalb ist es für uns Menschen wichtig, die Prozesse in und auf der Sonne zu verstehen. Ihre Nähe spielt eine besondere Rolle: Schon der nächste andere Stern, der „nur“ 4,2 Lichtjahre entfernte Proxima Centauri, ist mehr als 200.000 Mal weiter von uns entfernt als die Sonne. Sie ist deshalb der einzige Stern, dessen Atmosphäre wir detailliert untersuchen können. Auch das nukleare Brennen von Sternen können wir nur bei der Sonne über die Neutrinos beobachten, die bei diesem Prozess ausgestrahlt werden. Die Helioseismologie schließlich analysiert die Eigenschwingungen der Sonne und liefert uns Erkenntnisse über ihre innere Struktur in einem Detailreichtum, wie er bei Untersuchungen anderer Sterne auf absehbare Zeit nicht möglich sein wird.

Ihre Beobachtungen der Sonne verbinden Astronominen und Astronomen eng mit dreidimensionalen Simulationen. Auf diese Weise konnten sie zum Beispiel im Detail untersuchen, wie magnetische Strukturen an der Sonnenoberfläche auftauchen und sich entwickeln. Die bekanntesten dieser magnetischen Strukturen sind die Sonnenflecken. Durch diese Untersuchungen versteht man heute, wie die magnetische Aktivität die Helligkeit der Sonne beeinflusst. Überträgt man diese Erkenntnisse auf andere Sterne, können sie zum Beispiel bei der Planetensuche helfen. Wenn man weiß, wie stark die Helligkeit eines Sterns üblicherweise schwankt, kann man leichter feststellen, welche Helligkeitsschwankungen von Planeten verursacht werden. Die Kombination von Beobachtungsdaten und Simulationsrechnungen brachte auch bei der Erforschung der solaren Korona einen Durchbruch. Die Forschenden verstehen nun, wie sich das Gas der Korona auf ein Vielfaches der Sonnenoberfläche aufheizen kann. Die Korona zeigt im Röntgenspektrum sehr charakteristische Eigenschaften. Auch hier dient die Sonne als Modell, um Veränderungen in der Röntgenhelligkeit von Sternen zu verstehen. Die Röntgenhelligkeit kann entscheidenden Einfluss auf die Entstehung von Leben haben.

Wichtige Fragen sind aber weiterhin offen. Wir verstehen zum Beispiel noch nicht im Detail, wie der solare Dynamo das großräumige Magnetfeld der Sonne erzeugt. Wir müssen auch noch besser verstehen, wie die Sonne, etwa durch Sonnenwinde, auf das sogenannte Weltraumwetter und das Klima der Erde wirkt.

Mit der Inbetriebnahme des Sonnentelekops GREGOR auf Teneriffa steht der deutschen Fachgemeinschaft seit 2014 das derzeit leistungsfähigste optische Sonnenteleoskop fast exklusiv zu Verfügung. Deutschland hat damit eine internationale Führungsposition in der Sonnenphysik. Um sie langfristig zu sichern, müssen deutsche Einrichtungen sich an der nächsten Generation internationaler Infrastrukturprojekte beteiligen. Empfehlenswert wäre insbesondere die deutsche Beteiligung am hochauflösenden 4-m-Europäischen Sonnentelekop EST.



VISTA-Aufnahme der Sternentstehungsregion Monoceros R2.

Die Sterne als Grundlage der Astrophysik

Unser Wissen über die Sterne ist die Grundlage, um den gesamten Kosmos zu verstehen. Sterne spielen bei nahezu allen Phänomenen eine Rolle, mit denen sich die Astronomie beschäftigt. Von Planetensystemen bis zu Supernovaexplosionen, von der Galaxienentwicklung bis zur beschleunigten Ausdehnung des Universums: Immer ist ein tiefes Verständnis der Sternphysik essenziell. An Sternen, ihren Spätstadien und Überresten

¹⁴ Vgl. Kapitel 4.2

¹⁵ Vgl. Kapitel 4.3

¹⁶ Vgl. Kapitel 4.5

können wir zentrale Eigenschaften, Vorgänge und Modelle der Fundamentalphysik erforschen, sei es die Allgemeine Relativitätstheorie, die Neutrinoophysik oder extrem verdichtete Kernmaterie.

Schon seit mehreren Jahrzehnten gibt es ein Standard-Sonnenmodell, das auf andere Sterne übertragen werden kann, und eine etablierte Theorie der Sternentwicklung. Allerdings beruhen beide auf eindimensionalen Gleichgewichtsmodellen. Dank effizienter Simulationsverfahren an Höchstleistungsrechnern findet gerade ein Umbruch statt. In naher Zukunft werden dynamische 3D-Modelle den kompletten Stern berücksichtigen und die Auswirkungen seiner Rotation, Zirkulation, Konvektion und seiner Magnetfelder realistisch nachstellen können.

Eine detaillierte dreidimensionale Modellierung der komplexen Sonnenatmosphäre ist ausschlaggebend, wenn man die Häufigkeiten verschiedener Elemente präzise bestimmen will. Die 3D-Modellierung kann damit auch zur Bearbeitung von Fragestellungen in anderen Bereichen der Astronomie beitragen, etwa bei der Erforschung der Sternentstehung¹⁷, der chemodynamischen Entwicklung von Galaxien¹⁸ oder in der Kosmologie¹⁹. Über die Helio- und Asteroseismologie, also die detaillierte Analyse von Schwingungszuständen der Sonne und der Sterne, lassen sich Erkenntnisse über den strukturellen Aufbau von Sternen gewinnen.

Zur Erforschung der Sterne kombinieren Astronominen und Astronomen zahlreiche Methoden: die systematische Überwachung der Sonne, Zeitserien-Foto- und Spektrometrie von Sternen mit robotischen Teleskopen, hochaufgelöste Sternspektren und die umfassende Durchmusterung verschiedenster Sterne in der Milchstraße mit Multi-Objekt-Spektrografen. Für Astronominen und Astronomen in Deutschland sind dafür die hochauflösenden Spektrografen ESPRESSO am Very Large Telescope und PEPsi am Large Binocular Telescope sowie bald das 4-Meter-spektroskopische-Durchmusterungsteleskop 4MOST

besonders wichtig. In Zukunft werden auch datengetriebene Analysen möglich sein, die bisher aufgrund beschränkter Beobachtungssätze nicht durchgeführt werden konnten.

Von besonderer Bedeutung sind die Spätstadien von Sternen, die oft in extremen Phänomenen wie Supernovaexplosionen enden. Einige grundlegende Ideen zum Ende von Sternen wurden schon vor mehreren Jahrzehnten formuliert. Aber viele der beobachteten Charakteristika konnten erst erklärt werden, als man das komplexe Zusammenspiel verschiedener physikalischer Effekte simulierte. Als Beispiel seien die dreidimensionalen Simulationsrechnungen zu Typ-II-Supernovaexplosionen genannt, bei denen das Max-Planck-Institut für Astrophysik weltweit führend ist. Mit ihnen konnte die eng verkoppelte Kombination von Neutrinoheizung, hydrodynamischer Instabilität und großräumiger Konvektion der sterbenden Sterne direkt verfolgt werden. Die Simulationsrechnungen führten schließlich zu erfolgreichen Explosionsmodellen.

Die Suche nach Exoplaneten und ihre Charakterisierung

Mit der Entdeckung von Planeten um andere Sterne ist ein neues Forschungsfeld entstanden. Seine Relevanz geht weit über die Astrophysik hinaus, denn es ist eng mit der Suche nach Leben im All verknüpft und damit mit der Frage, wie einzigartig die Erde und die Menschheit im Universum sind. Mittlerweile wurden einige Tausend Exoplaneten gefunden. Der Fokus der Forschung verschiebt sich nun vom reinen Nachweis zur Charakterisierung, also zur Messung der Bestandteile von Exoplaneten.

Statistisch gesehen sollte jeder Stern der Milchstraße mindestens einen Planeten haben. Viele dieser Exoplaneten haben jedoch ganz andere Eigenschaften und Bahnparameter als die Planeten in unserem Sonnensystem. Bisher konnten nur wenige erdähnliche Planeten nachgewiesen

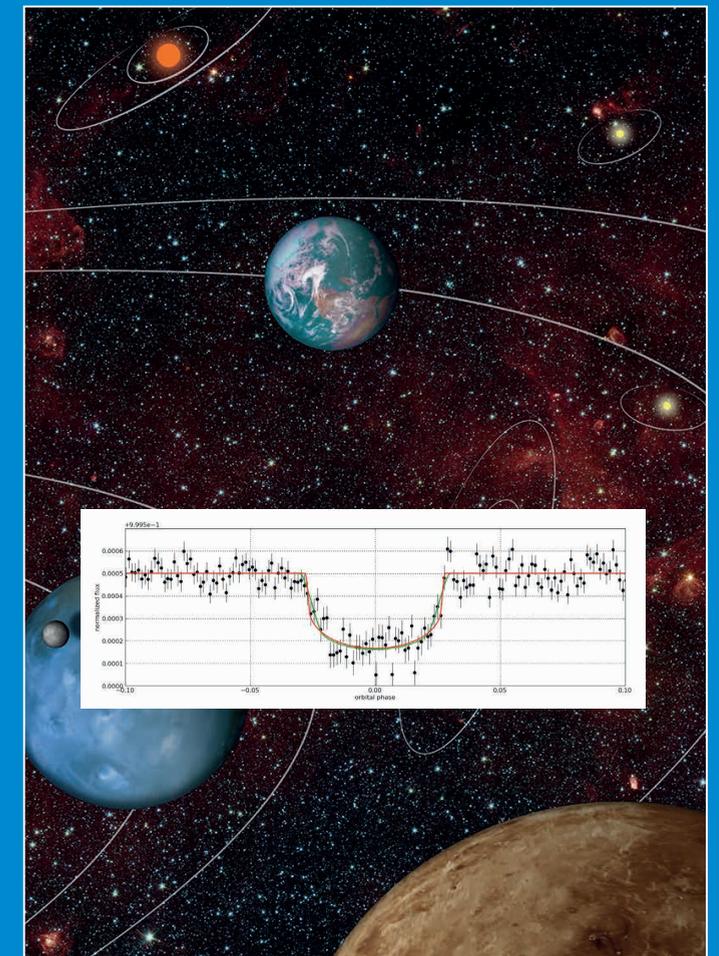
Extrasolare Planeten: Detektion und Charakterisierung



Prof. Dr. Heike Rauer wurde 2006 an das Zentrum für Astronomie und Astrophysik der Technischen Universität Berlin berufen. Am Institut für Planetenforschung des DLR in Berlin leitet sie seit 2005 die Abteilung „Extrasolare Planeten und Atmosphären“. Ihr Arbeitsgebiet umfasst die Suche nach Exoplaneten und die numerische Simulation habitabler Bedingungen. Prof. Rauer ist die wissenschaftliche Leiterin der ESA-Mission PLATO.

„Mit der CoRoT-Mission begann 2007 die Suche nach Exoplaneten vom Weltraum aus, unter französischer Führung und mit deutscher Beteiligung. Das Weitwinkelteleskop CoRoT suchte während der sechsjährigen Mission nach Planeten, die sich durch ihre regelmäßigen Transits bemerkbar machen, bei denen sie ihren Zentralstern verdunkeln. So wurde unter anderem der erste Gesteinsplanet außerhalb unseres Sonnensystems entdeckt.

Aus den Erfahrungen mit CoRoT entstand eine neue europäische Satellitenmission der ESA: PLATO soll ab 2026 gezielt nach Gesteinsplaneten in der bewohnbaren Zone anderer Sterne suchen und den Radius, die Masse und das Alter dieser Exoplaneten genau bestimmen.“



Die Abbildung zeigt vorne die photometrische Transitkurve des ersten außerhalb des Sonnensystems entdeckten Gesteinsplaneten, im Hintergrund eine künstlerische Darstellung der Planetenvielfalt.

¹⁷ Vgl. Kapitel 4.2

¹⁸ Vgl. Kapitel 4.3

¹⁹ Vgl. Kapitel 4.4

werden, die in der bewohnbaren Zone um Sterne kreisen. Sie wurden bislang außerdem nur bei Sternen gefunden, die deutlich weniger Masse haben als unsere Sonne. Dass wir bislang noch keine Systeme gefunden haben, die unserem Sonnensystem ähneln, liegt aber vor allem daran, dass unsere Messverfahren für solche Systeme noch nicht empfindlich genug sind.

2014 ging am VLT das Instrument SPHERE in Betrieb, ein Planetenjäger, der unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Astronomie gebaut wurde. Mit ihm können massereiche Exoplaneten direkt abgebildet werden, indem das Licht des Zentralsterns so gut wie möglich ausgeblendet wird. SPHERE ermöglicht die Bahnbestimmung und Spektroskopie der Planeten mit hohem Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Das Potenzial extremer adaptiver Optik für dieses Gebiet konnte damit nachgewiesen werden.

Mit dem Spektrografen CARMENES am 3,5-Meter-Teleskop auf dem Calar Alto in Südspanien sollen M-Zwerg (Rote Zwerg) systematisch nach Planeten abgesucht werden und die stellaren Eigenschaften dieser Systeme bestimmt werden. Diese Untersuchungen werden seit 2017 im Rahmen der Forschergruppe 2544 „Blaue Planeten bei Roten Sternen“ durch die DFG gefördert. Hochauflösende Spektrografen können auch die Atmosphären von Exoplaneten nachweisen, zum Beispiel die Instrumente PEPsi am Large Binocular Telescope in Arizona, ESPRESSO am Very Large Telescope und gegen Ende der 2020er-Jahre METIS und der hochauflösende Spektrograf HIRES am Extremely Large Telescope der Europäischen Südsternwarte. Sie können Wetterphänomene und globale Zirkulationsströmungen messen. In der kommenden Dekade könnte es sogar möglich werden Biosignaturen nachzuweisen, also Indikatoren für Leben.

Für das Finden und Bestimmen von Exoplaneten spielen die Teleskope der kommenden Generation eine zentrale Rolle, insbesondere das Extremely Large Telescope an der Europäischen Südsternwarte, das James Webb Space Telescope (JWST) und die unter deutscher Leitung laufende ESA-Mission PLATO. In diesen Bereich muss weiter investiert werden, damit die wissenschaft-

liche Vorbereitung der Missionen und ihre wissenschaftliche Ausbeute sichergestellt werden können. Im Sommer 2017 hat die Förderung des DFG-Schwerpunktprogramms 1992 „Exploring the Diversity of Extrasolar Planets“ begonnen. Dies ist ein wichtiger erster Schritt.

Die Entstehung von Planetensystemen

Der Entstehungsprozess von Planeten beginnt, wenn in der protoplanetaren Scheibe Staubteilchen miteinander verkleben. Es bilden sich Staubklumpen mit einer Größe von einigen Zentimetern bis einigen Metern. Durch Instabilitäten verkleben sie zu Planetesimalen, die dann zu Protoplaneten und schließlich zu Planeten anwachsen. Die Eigengravitation dieser Planeten erzeugt spiralartige Wellen in der protoplanetaren Scheibe und öffnet Lücken, durch die der Planet seine Bahn verändert und zu seiner endgültigen Bahn um den Stern wandert. Diese Forschung ist auch Thema der 2017 durch die DFG eingerichteten Forschergruppe 2634 „Übergangsscheiben: Zeugen der Planetenentstehung“.

Die Prozesse der Entstehung und Migration von Planeten konnten bereits mit detaillierten Simulationsrechnungen modelliert werden. Die Struktur der protoplanetaren Scheibe wurde 2015 durch spektakuläre Aufnahmen des ALMA-Teleskoparrays nachgewiesen. SPHERE machte am VLT mit gleicher räumlicher Auflösung Aufnahmen im Infrarotbereich und fand Spiralstrukturen, die mit großer Wahrscheinlichkeit von Planeten stammen. Durch astronomische Beobachtungen konnten auch die Positionen von Exoplaneten und ihre Bewegung um das Zentralgestirn bestimmt werden. Wir scheinen also tatsächlich Planetensysteme im Moment ihrer Entstehung beobachten zu können! Der nächste Schritt ist nun, über räumlich aufgelöste Spektroskopie jene Zonen in den protoplanetaren Scheiben zu analysieren, in denen sich erdähnliche Planeten bilden. Möglich war dies bis 2015 mit dem Interferometer MIDI am Very Large Telescope und seitdem mit den Instrumenten der zweiten VLTI-Generation GRAVITY und MATISSE. MIDI wurde am Max-Planck-Institut für Astronomie entwickelt, GRAVITY wird unter

Leitung des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik gebaut und auch an MATISSE sind deutsche Institute stark beteiligt.

Strategiepapiere:

01 Extrasolar Planets and their Formation
02 The Sun: A Laboratory for Stellar and Plasma Physics

03 Stellar Parameters, Stellar Structure and Evolution
04 Star Formation and Interstellar Medium
12 Astronomy from Space
13 Optical/IR Facilities
14 FIR/submm/mm Facilities
15 Radio Astronomy Infrastructures
17 Surveys
18 Computational Astrophysics
20 Laboratory Astrophysics of Molecular Systems and Dust

4.2 Der kosmische Materiekreislauf

Fast alle chemischen Elemente, die schwerer sind als Wasserstoff und Helium, wurden in Sternen erzeugt, vor allem in Sternen hoher Masse.²⁰ Massereiche Sterne explodieren am Ende ihres kurzen Lebens und geben dabei die erbrüteten Elemente an das interstellare Gas in ihrer Umgebung ab. Die Explosionen setzen extreme Energien frei und durchmischen das interstellare Gas erheblich. Unter Umständen wird es sogar aus der Galaxie herausgetrieben.²¹ Aus dem mit schweren Elementen angereicherten interstellaren Gas und Staub bildet sich dann die nächste Generation von Sternen.

Diesen Zyklus aus Sternentstehung, Sternentwicklung und Rückgabe von angereichertem Material an das interstellare Medium bezeichnet man als kosmischen Materiekreislauf. Um die chemischen Elemente in jenem Verhältnis zu erhalten, wie wir es zum Beispiel in unserem Sonnensystem beobachten, muss dieser Zyklus seit der Entstehung der kosmologischen Urmaterie rund fünfmal durchlaufen worden sein. Der kosmische Materiekreislauf birgt also den Schlüssel für das Verständnis der chemischen Entwicklung unseres Universums. Mit seiner Hilfe können wir die Galaxienentwicklung in den verschiedenen Epochen des Universums vom Zeitpunkt der Bil-

dung der ersten Sterne bis heute untersuchen. Die Galaxienentwicklung wird durch die Sternentstehungsprozesse maßgeblich beeinflusst.²² Die Häufigkeit der chemischen Elemente beeinflusst außerdem die Entstehungsbedingungen von Planetensystemen und damit den Ursprung des Lebens.²³

Das Verständnis der Sternbildung aus dem interstellaren Medium, also dem Gas zwischen den Sternen einer Galaxie, ist ein zentrales Thema der modernen Astrophysik. Sterne entstehen in komplexer Wechselwirkung vieler kosmischer Prozesse, die räumlich, zeitlich und energetisch auf Skalen von der Mikrophysik bis zur Größe von Galaxien und darüber hinaus ablaufen. Um die Sternentstehung zu verstehen, müssen Astronomen und Astronomen deshalb viele Ansätze zusammenführen: technisch sehr anspruchsvolle, wellenlängenübergreifende Beobachtungen, verschiedene Bereiche der Physik und die Kombination von Modellierung, theoretischer Durchdringung und Interpretation der Beobachtungsdaten. Das Verständnis der Sternentstehung ist die Voraussetzung dafür, dass wir aus unseren Beobachtungen Rückschlüsse auf die gesamte Geschichte der Sterne und des Universums ziehen und den Ursprung der chemischen Elemente bis ins frühe Universum zurückverfolgen können.²⁴

²⁰ Vgl. Kapitel 4.1

²¹ Vgl. Kapitel 4.3

²² Vgl. Kapitel 4.3

²³ Vgl. Kapitel 4.1

²⁴ Vgl. Kapitel 4.4

Obwohl das Thema also sehr komplex ist, konnten in den vergangenen Jahrzehnten beeindruckende Fortschritte gemacht werden, etwa bei den systematischen und hochauflösenden Beobachtungen, bei der Instrumentierung sowie bei der Modellierung der interstellaren Materie und der Theorieentwicklung für die Entstehung der Sterne. So konnten erstmals die Entstehung und Entwicklung von Molekülwolken im interstellaren Medium magnetohydrodynamisch simuliert werden. 64 der 200 bekanntesten interstellaren Moleküle wurden seit 2003 gefunden, darunter neue Indikatoren für bisher unsichtbare Phasen des interstellaren Mediums.

Die zentralen Fragen in diesem Bereich der Astrophysik im kommenden Jahrzehnt sind:

- **Molekulares Gas:** Wie bilden sich Sterne? Was sind dabei die wesentlichen physikalischen Prozesse? Wie genau beeinflussen die physikalischen und chemischen Bedingungen im interstellaren Medium den Prozess der Sternentstehung? Wie hängt die Astrochemie in den sternbildenden Molekülwolken mit der Chemie in den sich bildenden Planetensystemen zusammen?
- **Atomares Gas:** Wie hängt die Sternentstehung von der Umgebung ab? Wann und in welchen Galaxien entstehen Sterne? Wo ist die Bildung von Sternen am effizientesten, wo die von massiven Sternen? Was beeinflusst die Verteilung der Sternmassen, die sogenannte *Initial Mass Function*? Was erhöht oder verringert die Wahrscheinlichkeit für Doppel- und Mehrfachsysteme?
- **Winde und galaktische Ausflüsse:** Wie werden die durch Nukleosynthese in den Sternen gebildeten schweren Elemente in den intergalaktischen Raum transportiert?
- **Mikrophysik:** Was sind die Frequenzen und Strahlungsraten neu identifizierter Spezies? Welche chemischen Reaktionen laufen unter den exotischen Bedingungen im interstellaren Raum ab?

- Alle diese Bereiche haben einige Fragen gemeinsam: Wie genau und in welchem Umfang beeinflussen junge Sterne ihre Umgebung? Wie und wie stark regulieren sie durch Rückkopplungseffekte die Bildung weiterer Sterne? Wie können wir die komplexen, auf viele Größenskalen verteilten Phänomene des turbulenten Gases mit numerischen Simulationen realistisch erfassen?

Im interstellaren Medium laufen zahlreiche physikalische Prozesse ab, es liegt in unterschiedlichen Dichten, Temperaturen und Zuständen vor. Dementsprechend breit ist das Spektrum der notwendigen Methoden und der zugrunde liegenden physikalischen Beschreibung.

Sternentstehung im dichten interstellaren Medium: molekulares Gas

Die Temperaturen und Dichten des sternbildenden Gases und des von jungen Sternen wieder abgegebenen Gases bilden die idealen Bedingungen für die Anregung vieler atomarer und molekularer Linien. Gleichzeitig wird der interstellare Staub über seine Wärmestrahlung sichtbar. Die Spektrallinien erlauben eine detaillierte Diagnostik der physikalischen Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung des Gases, bei hoher spektraler Auflösung auch der inneren Bewegungen des Gases wie Kollaps, Rotation und Turbulenz. Nur durch deren Beobachtung können wir die Prozesse der Sternentstehung im Detail verstehen. Für die Forschung zur Sternentstehung ist deshalb der Millimeter- und Submillimeter/Ferninfrarot-Wellenlängenbereich von besonderer Bedeutung.

Die deutsche Fachgemeinschaft ist in diesem Bereich sehr gut aufgestellt. Das zeigt sich zum Beispiel in ihren maßgeblichen Beiträgen zum Herschel-Weltraumteleskop und zum Stratosphärenobservatorium SOFIA, zu den Teleskopen am Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich IRAM, zum Atacama Pathfinder Experiment APEX und zum Millimeter- und Submillimeter-Teleskopfeld ALMA. Ihre gute Positionierung gilt gleichermaßen für die instrumentelle Seite wie für die astrophysikalischen Beobachtungen und ihre

Interpretation. Das interstellare Medium wird von fünf Abteilungen an Max-Planck-Instituten erforscht, von mehreren Professuren und Nachwuchsgruppen, im erfolgreichen DFG-Schwerpunktprogramm 1573 „Physics of the Interstellar Medium“ und im Köln-Bonner Sonderforschungsbereich 956 „Bedingungen und Auswirkungen der Sternentstehung“.

Zwei Spektralbereiche sind für die Beobachtung des dichten interstellaren Mediums von besonderer Bedeutung:

Erstens sind es die Millimeterwellen-Radiointerferometer ALMA der ESO und das Northern Extended Millimeter Array (NOEMA) des IRAM. Sie erreichen eine unvergleichbar hohe Winkelauflösung, mit der einerseits einzigartige Details im nahen Universum untersucht werden können und andererseits erstmals auch weit entfernte Galaxien räumlich und spektral aufgelöst werden. Das IRAM-30-Meter- und das APEX-Einzelteleskop ergänzen sie komplementär. Gemeinsam tragen diese Instrumente auch zum Global Millimeter-VLBI Array bei, das von der deutschen Fachgemeinschaft geleitet wird. In naher Zukunft wird das CCAT-prime-Teleskop diesen Bereich ergänzen.

Zweitens ist der ferninfrarote Spektralbereich wichtig, weil hier die stärksten und damit hellsten Kühllinien des interstellaren Mediums liegen, die Feinstrukturlinien von ionisiertem Kohlenstoff und neutralem Sauerstoff. Detailliert konnten sie erstmals mit dem Herschel-Weltraumteleskop untersucht werden. Diese Entdeckung brachte viele Erkenntnisse, zum Beispiel über den inneren Aufbau von Molekülwolken, mit weitreichenden Konsequenzen für unser Verständnis der Sternentstehung. An einige Themenbereiche knüpft zukünftig das James Webb Space Telescope an. Es deckt einen kurzwelligeren Spektralbereich ab, wenn auch mit deutlich reduzierter spektraler Auflösung. Beispielsweise werden mit dem JWST die Entstehung von Akkretionsscheiben um Protosterne erforscht oder die Sternbildungsaktivität von Galaxien im jungen Universum kurz nach und während der Reionisierung. Die deutsche Fachgemeinschaft hat dank der Beteiligung

am SOFIA-Programm privilegierten Zugang zu mittel- und hochauflösten spektroskopischen Beobachtungen im ferninfraroten Spektralbereich. Das fliegende Observatorium SOFIA wird auch mittelfristig als einziges den ferninfraroten Spektralbereich erschließen können. Seine Instrumentierung wird kontinuierlich verbessert, auch durch deutsche Partner, die bei den technologischen Entwicklungen für den ferninfraroten Bereich federführend sind. SOFIA bietet einzigartige Möglichkeiten für die chemische Untersuchung des interstellaren Gases und für Gas- und Staub-Polarisationsmessungen. Zudem erlaubt SOFIA erstmals die großräumige Kartierung der wichtigen Kühllinien im ferninfraroten Bereich. Wir können dadurch zum ersten Mal eine große Temperaturspanne des interstellaren Mediums untersuchen, um die Entwicklung von diffusen warmen zu dichten kalten Phasen zu studieren.

Diffuses atomares Gas: das Gasreservoir von Galaxien

Auf größeren Skalen und bei niedrigeren Dichten liegt die interstellare Materie vorwiegend atomar vor. Das ionisierte Gas strahlt im Radiobereich des elektromagnetischen Spektrums. Die 21-cm-Linie von atomarem, neutralem Wasserstoff ist ein exzellenter Fühler für das diffuse Gas und spielt damit eine wichtige Rolle bei der Untersuchung der Struktur und Physik des turbulenten interstellaren Mediums und der Sternentstehung vom frühen Universum bis heute. Es ermöglicht die Tomografie von galaktischen Sternentstehungsgebieten in Spiralarmen, empfindliche spektroskopische Durchmusterungen der ionisierten und neutralen Komponenten der Milchstraße und die Messung des Gasinhalts von externen Galaxien bis in kosmologische Entfernungen. Angewandt auf die frühesten Epochen im Kosmos kann damit die Epoche der Reionisierung durch die erste Generation von Sternen untersucht werden.²⁵

²⁵ Vgl. Kapitel 4.4

Das geplante Square Kilometre Array sowie das geplante Next Generation Very Large Array (ngVLA) bieten breite Frequenzabdeckung mit großer Empfindlichkeit und hohem Auflösungsvermögen. Sie ermöglichen es, die physikalischen Prozesse zu studieren, die den Zustrom von Gas aus der Umgebung der Galaxien regulieren. Dieses Gas wandelt sich schließlich in Sterne um. Die Spektroskopie von Molekülübergängen im Zentimeterbereich einschließlich Hydroxyl- und Methanol-Masern liefert wertvolle Informationen, mit denen Modelle getestet oder Beobachtungen ergänzt werden können. So können zum Beispiel die Beobachtungen im ferninfraroten Bereich mit SOFIA durch Radio-Rekombinationslinien von Kohlenstoff ergänzt werden. Hier hat das Low-Frequency Array (LOFAR) bereits Pionierarbeit geleistet.

Heißes Plasma: Stellare Winde und galaktische Ausflüsse

Massereiche Sterne treiben oft starke Winde an oder beenden ihr Leben in eindrucksvollen Explosionen. Je nach physikalischen Randbedingungen entflieht die Materie dabei entweder dem Gravitationsfeld der Galaxie und reichert das heiße zirkumgalaktische Gas an oder sie kühlt schnell ab und wird wieder der Galaxie zugeführt. Die Erforschung dieses Prozesses und seiner Randbedingungen ist wichtig, um die Galaxienentwicklung in den verschiedenen kosmischen Epochen zu verstehen.²⁶ Das heiße zirkumgalaktische Gas strahlt im Röntgenbereich. Seine Untersuchung ist eines der Ziele der deutsch-russischen Röntgenmission eROSITA ab 2018 und der ESA-Mission Athena ab 2028. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Physics of the Interstellar Medium“ und anderer Vorhaben werden aufwändige Modelle entwickelt, um das komplizierte zirkumgalaktische Multiphasengas zu verstehen, die Ausflussraten zu bestimmen und seine Wechselwirkung mit der kosmischen Umgebung zu untersuchen.

Von der Mikrophysik zur Entstehung von Sternen und zur Entwicklung von Galaxien

Die Laborastrophysik hat in diesem Bereich eine besondere Bedeutung. Sie liefert atomare und molekulare Daten, mit denen spektroskopische Beobachtungen von Sternen und interstellarem Gas analysiert und interpretiert werden können. Außerdem finden im Labor Untersuchungen der mikrophysikalischen Prozesse statt, etwa im Bereich der Astrochemie oder bei der Bildung von Staub. Ohne diese Untersuchungen ist ein wirkliches Verständnis der Prozesse im interstellaren Medium nicht möglich.

Die komplexe Verknüpfung verschiedener Prozesse auf vielen räumlichen und energetischen Skalen erfordert ein enges Zusammenspiel von Beobachtung und numerischer Modellierung. Nur so können die wesentlichen Faktoren und die komplexen Prozesse des kosmischen Materiekreislaufs herausgearbeitet werden. Die realistische Modellierung der turbulenten interstellaren Materie mit den darin auf kleinen und großen Skalen ablaufenden Strahlungsprozessen und chemischen Reaktionen erfordert den Einsatz modernster massiv-paralleler Algorithmen in Höchstleistungsrechenzentren.

Strategiepapiere:

- 03 Stellar Parameters, Stellar Structure and Evolution
- 04 Star Formation and Interstellar Medium
- 05 The Milky Way and the Local Volume
- 12 Astronomy from Space
- 13 Optical/IR Facilities
- 14 FIR/submm/mm Facilities
- 15 Radio Astronomy Infrastructures
- 17 Surveys
- 18 Computational Astrophysics
- 20 Laboratory Astrophysics of Molecular Systems and Dust

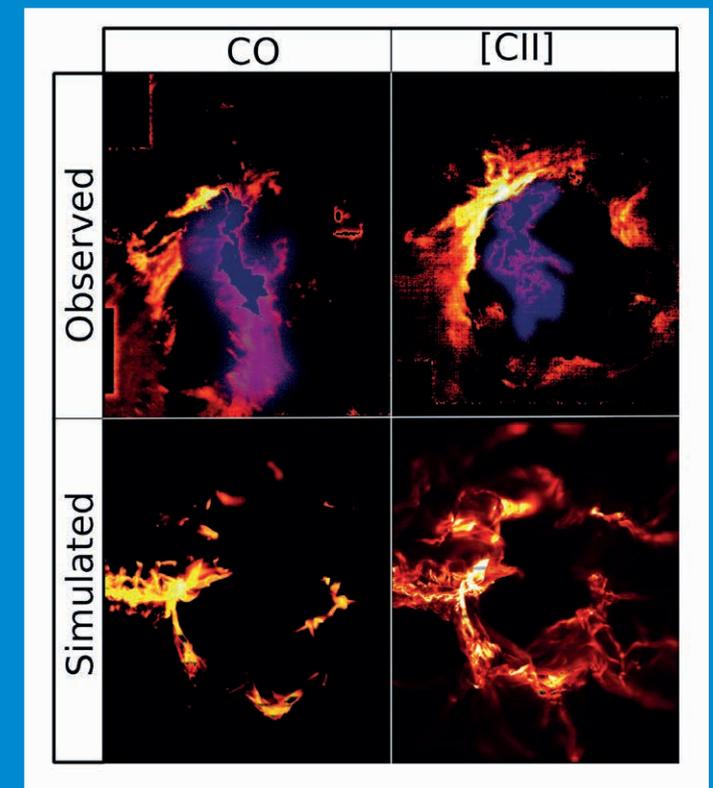
Entstehung und Entwicklung von Molekülwolken



Prof. Dr. Stefanie Walch-Gassner wurde 2013 auf den neu eingerichteten Lehrstuhl für Theoretische Astrophysik am I. Physikalischen Institut der Universität zu Köln berufen. Ihr Arbeitsgebiet ist die numerische Simulation der Entstehung von Molekülwolken und jungen Sternen sowie deren Rückkopplung zur interstellaren Materie. Im Rahmen ihres ERC Starting Grants vergleicht sie Simulation und Beobachtung von Molekülwolken mittels synthetischer Emissionskarten.

„Moderne, hochaufgelöste 3D-Simulationen der Entstehung und Entwicklung von Molekülwolken in ihrer galaktischen Umgebung umfassen die Magnetohydrodynamik, die Eigengravitation und das Feedback der jungen, massereichen Sterne sowie den Strahlungstransport und das Netzwerk chemischer Reaktionen. Die berechneten interstellaren Wolken werden anschließend ‚synthetisch beobachtet‘ und können dann mit realen Beobachtungsergebnissen verglichen werden.“

Das Bild zeigt den Vergleich zwischen Simulation (unten) und Beobachtung (oben) am Beispiel der Orion-Molekülwolke. Die Simulation wurde so ausgewählt, dass die großräumige Form gut mit der Beobachtung übereinstimmt. Die hohe Ähnlichkeit der kleinräumigen, turbulenten Strukturcharakteristik erlaubt detaillierte Rückschlüsse auf die physikalischen Prozesse, von denen die Sternentstehungseffizienz abhängt.“



²⁶ Kapitel 4.3 und 4.4

4.3 Die Milchstraße und andere Galaxiensysteme

Galaxien sind die Bausteine unseres Kosmos. Sie enthalten kühles interstellares Gas, aus dessen Molekülwolken neue Sterne entstehen. Prozesse in Sternen und Galaxien bestimmen den kosmischen Materiekreislauf.²⁷ Unsere Milchstraße ist eine typische Spiralgalaxie, an der wir einige dieser Prozesse im Detail studieren können. Viele Galaxien beherbergen in ihrem Zentrum ein extrem massereiches Schwarzes Loch. Massereiche Schwarze Löcher haben deutlich höhere Massen als Sterne, zwischen Hunderttausenden und einigen Milliarden Sonnenmassen. Sie treiben die Aktivität der Galaxienkerne, zum Beispiel die hell leuchtenden Quasare, an. Die Bewegungen der Sterne in Galaxien lassen sich nicht aus der sichtbaren Materie allein erklären, sondern belegen die Existenz der Dunklen Materie. Die dynamischen Eigenschaften von Galaxien gaben somit den Anstoß, die Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik zu erforschen. Galaxien ordnen sich in Galaxiengruppen, Galaxienhaufen und im kosmischen Netz an. Über diese Anordnung können Astronominen und Astronomen die großräumige Struktur des Kosmos ausloten und seine Entwicklung vermessen.

Die zentralen Fragen in diesem Gebiet der Astrophysik sind im kommenden Jahrzehnt:

- **Galaxienentwicklung:** Wie entwickeln sich Galaxien und was beeinflusst ihre Entwicklung über kosmische Zeiträume?
- **Galaktische Archäologie:** Wie ist die Milchstraße entstanden? Inwiefern kann sie als Referenzobjekt für andere Galaxien gesehen werden?
- **Aktive Galaxien und Schwarze Löcher:** Wie sind die supermassereichen Schwarzen Löcher in den Galaxienzentren entstanden? Was bestimmt den Aktivitätszyklus galaktischer Kerne? Wie beeinflussen sie die Entwicklung von Galaxien?

- **Dunkle Materie:** Was ist die Natur der Dunklen Materie? Wie verteilt sie sich?

Galaxien als Zeugen der kosmischen Entwicklung

Im frühen Universum sammelte sich in den ersten Strukturen aus Dunkler Materie primordiales Gas an und bildete die ersten Sterne. In den folgenden gut 13 Milliarden Jahren war die Entwicklung von Galaxien ein kontinuierlicher Prozess: Galaxien verschmolzen miteinander, sammelten durch Akkretion neues Gas, transformierten es in Sterne und verloren Materie durch Gasausflüsse, die durch Supernovaexplosionen²⁸ und die Aktivität Schwarzer Löcher in den Galaxienkernen ausgelöst werden.

Das Erscheinungsbild von Galaxien wird maßgeblich dadurch bestimmt, welcher dieser Prozesse gerade besonders dominant ist. Ruhige Akkretion von Gas führt zur Bildung von Scheibengalaxien, in denen gerade Sterne entstehen. Während der für kosmische Maßstäbe kurzen Verschmelzungsphasen erscheinen Galaxien irregulär. Danach können Galaxien zu „ausgebrannten“ elliptischen Galaxien werden. Große Galaxien sind von einem Schwarm von Zwerggalaxien umgeben. Sie sind Überreste und Zeugnisse des Akkretions- und Verschmelzungsprozesses.

Mit den neuen großen Observatorien werden wir diesen Entwicklungsprozess der Galaxien von den frühen Phasen bis heute²⁹ beinahe kontinuierlich verfolgen können: Im Sternenlicht mit dem James Webb Space Telescope und dem erdgebundenen Extremely Large Telescope und in der Strahlung von Gas und Staub mit Submillimeter- und Radioteleskopen wie ALMA, LOFAR, NOEMA, MeerKat und in Zukunft mit dem SKA und dem Next Generation Very Large Array. Mit der 3D-Spektroskopie

können auch die Sternentstehungsgeschichten, chemischen Eigenschaften und die Kinematik von Galaxien, zum Beispiel ihre Rotation, räumlich aufgelöst analysiert werden.

In den vergangenen Jahren haben Astronominen und Astronomen bereits spektakuläre Erkenntnisse gewonnen. Sie fanden Galaxien, die aus einer Epoche stammen, in der das Universum gerade einmal eine halbe Milliarde Jahre alt war. Scheibengalaxien, wie wir sie aus unserer kosmischen Umgebung kennen, lassen sich bereits bei einer Rotverschiebung von $z=2$ nachweisen, also zu Zeiten, als das Universum etwa ein Viertel seines heutigen Alters hatte. Die Scheibengalaxien aus der Frühzeit des Kosmos sind aber deutlich gasreicher und turbulenter als Scheibengalaxien im lokalen Universum. Sie werden sich zu Galaxien weiterentwickeln, die heutigen S0- und elliptischen Galaxien ähneln.

Die Milchstraße als Blaupause eines Galaxiensystems

Die Milchstraße ist die Galaxie, in der wir mit unseren Instrumenten die Galaxie in einzelne Sterne auflösen und das interstellare Gas mit der höchsten Detailschärfe betrachten können. Deshalb können wir in der Milchstraße im Detail analysieren, wie sich die chemischen und kinematischen Eigenschaften von Sternpopulationen entwickelt haben. Nur in unserer Galaxie können wir die Bewegungen der einzelnen Bestandteile in alle Richtungen vermessen, etwa die Bewegung von Spiralarmen, jungen und alten Sternen und von Gas- und Molekülwolken.

Mit asteroseismologischen Daten können wir das genaue Alter bestimmter Sterne in unserer Milchstraße messen. Entsprechende Daten werden zum Beispiel von den Exoplaneten-Missionen mit den Weltraumteleskopen CoRoT, Kepler und künftig PLATO geliefert. Sie liefern wichtige Randbedingungen für die detaillierte und zeitlich aufgelöste Modellierung der chemodynamischen Entwicklung unserer Galaxis. Weil unser Sonnensystem selbst in der Milchstraße liegt, erstreckt sich die

Galaxis über den gesamten Himmel. Deshalb sind Weitwinkeldurchmusterungen in den verschiedenen Wellenlängenbereichen notwendig.

Astronominen und Astronomen in Deutschland sind in einer besonders guten Position, um in diesem Gebiet entscheidende Beiträge zu leisten. Sie sind signifikant an Durchmusterung beteiligt, oft sogar in leitender Rolle. Dazu gehören astrometrische Durchmusterungen, etwa mit dem Satelliten Gaia und dem Radiointerferometer BeSSeL, fotometrische Durchmusterungen, etwa in Zukunft mit dem Weltraumteleskop Euclid und dem erdgebundenen Large Synoptic Survey Telescope, und spektroskopische Durchmusterungen bei Radio- bis optischen Wellenlängen, zum Beispiel bald mit dem Teleskop 4MOST an der Europäischen Südsternwarte. Hinzu kommt die ausgewiesene Exzellenz deutscher Forschung im Bereich numerischer kosmologischer Simulationen der Galaxienentwicklung.

Wie Archäologinnen und Archäologen in Ausgrabungsstätten historische Schichten freilegen, so können Astronominen und Astronomen die Milchstraße in einzelne Entstehungsphasen zerlegen. Daraus können sie die Entstehungsgeschichte unserer Galaxis rekonstruieren: Entstehen und Entwicklung ihrer Struktur, ihres interstellaren Mediums aus Gas und Staub und ihres galaktischen Magnetfelds. Auch die Frage, welche Sterne gemeinsam und an welchem Ort gebildet wurden, können sie beantworten.

Im Halo, der kugelförmigen, aus alten Sternen bestehenden Umgebung unserer Milchstraße und in benachbarten Zwerggalaxien können wir Sterne mit sehr geringem Eisenanteil studieren. Sie geben uns Einblick in die chemische Zusammensetzung der kosmischen Materie kurz nach dem Urknall und verknüpfen das Forschungsfeld der Galaxienentwicklung mit der Erforschung des frühen Kosmos.³⁰ Es konnten Sterne gefunden werden, in denen Eisen 10 Millionen Mal seltener vorkommt als in der Sonne. Das deutet auf ein extrem hohes Alter hin. Die Halos unserer Milchstraße und der Andromedagalaxie scheinen zudem voller Unterstrukturen zu sein. Sie

²⁷ Vgl. Kapitel 4.2

²⁸ Vgl. Kapitel 4.3

²⁹ Vgl. Kapitel 4.4

³⁰ Vgl. Kapitel 4.4



Das Galaxienpaar NGC 4438 und NGC 4435.

sprechen dafür, dass dort kontinuierlich Galaxien über Gezeitenfelder zerrissen und ihre Überreste in den Halo eingegliedert wurden. Immer häufiger finden wir solche Überreste auch in der galaktischen Scheibe selbst. Sie zeugen von einer hierarchischen Galaxienentstehung, also vom Wachstum größerer Galaxien durch das Zusammenstoßen und Verschmelzen kleinerer Galaxien. Dieser Prozess wird vom Standardmodell der Kosmologie vorhergesagt, dem Modell der Kalten Dunklen Materie.³¹

Der systematische Ansatz, die Milchstraße und ihre Umgebung auf Überreste früherer Epochen abzusuchen und daran die Entwicklung in den einzelnen Epochen nachzuvollziehen, ist auch als Galaktische Archäologie oder Nahfeldkosmologie bekannt. Dieser Ansatz ist komplementär zur extragalaktischen Astrophysik und Kosmologie. Diese rekonstruieren die Entstehungsgeschichte von Galaxien statistisch, indem sie Populationen von Galaxien in verschiedenen kosmischen Epochen miteinander vergleichen.

Extrem massereiche Schwarze Löcher und aktive Galaxien

Viele Galaxien beherbergen in ihrem Zentrum ein massereiches Schwarzes Loch. Seine Masse scheint direkt mit der Masse des Zentralbereichs der Galaxie, dem Sphäroid oder *Bulge*, zusammenzuhängen. Wir haben schon recht gute Vorstellungen davon, wie sich kleinere Schwarze Löcher bilden. Aber wir verstehen noch relativ wenig darüber, wie massereiche Schwarze Löcher in Galaxien entstehen und wie sie „gefüttert“ werden. Ihr Entstehungsmechanismus scheint jedoch sehr effektiv zu sein. Untersuchungen bei hohen Rotverschiebungen haben gezeigt, dass es bereits im sehr frühen Universum, kaum eine Milliarde Jahre nach dem Urknall, extrem massereiche Schwarze Löcher gab, deren Masse größer als eine Milliarde Sonnenmassen war.

Mit dem erdgebundenen Extremely Large Telescope oder dem James Webb Space Telescope werden

wir die Prozesse des Entstehens und Wachsens Schwarzer Löcher mit bisher unerreichter Auflösung bis in die frühesten Epochen unseres Kosmos studieren können. Beobachtungen mit dem Radioteleskop ALMA liefern zusätzliche Informationen zu den Eigenschaften der Herbergsgalaxien. Aus den innersten Bereichen, der direkten Umgebung der Schwarzen Löcher, liefern Radio-beobachtungen schon jetzt wertvolle Informationen. Mit dem Square Kilometre Array und dem Next Generation Very Large Array wird man demnächst sogar die frühesten Schwarzen Löcher direkt beobachten können.

Mittlerweile hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass die supermassiven Schwarzen Löcher in den Zentren der Galaxien eine entscheidende Rolle bei deren Entwicklung spielen. Die Schwarzen Löcher steuern das Wachstum einer Galaxie durch Rückkopplungsprozesse, die wir bislang nur teilweise verstehen. Kosmologische Simulationen auf Höchstleistungsrechnern, wie sie zum Beispiel am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, am Heidelberger Institut für Theoretische Studien und am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) durchgeführt werden, haben Rückkopplungsprozesse identifiziert, mit denen die heutige Vielfalt der Galaxien zum Teil erklärt werden kann.

Um das Wechselspiel zwischen Schwarzem Loch und seiner Umgebung zu verstehen, sind sehr große und tiefe Himmelsdurchmusterungen in allen Wellenlängenbereichen erforderlich. In der nächsten Dekade wird Deutschland hier führend beteiligt sein, insbesondere mit dem deutschen eROSITA-Teleskop auf dem russischen Satelliten Spektrum-Röntgen-Gamma. Aktive Galaxienkerne, die eROSITA findet, müssen jedoch im Radio-, optischen-, Röntgen-, Gammabereich nachbeobachtet werden. Nur so können wir die Eigenschaften der Schwarzen Löcher und der sie umgebenden Galaxien sowie die Entwicklung von Jets messen. Zu Beginn der 2020er-Jahre wird sich mit dem Ende der Gammasatelliten Fermi und INTEGRAL für diese Forschung eine Lücke in der Abdeckung zwischen 10 Kiloelektronenvolt und dem Teraelektronenvolt-Bereich auftun, den man von der Erde aus untersuchen kann. Noch ist unklar, wie diese Lücke gefüllt werden kann.

Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxis ist für uns von besonderer Bedeutung. Wir können die Bewegungen der Sterne und des Gases in seiner Nachbarschaft untersuchen und die Strahlung des Gases messen. Dadurch lässt sich die Wechselwirkung eines massereichen Schwarzen Lochs mit seiner Herbergsgalaxie prototypisch mit sehr hoher Auflösung untersuchen. Bei anderen Galaxien wird dies auf absehbare Zeit nicht möglich sein, selbst dann nicht, wenn sie sehr nah sind.

Entscheidend für den Erfolg dieser Forschung sind hochauflösende Untersuchungen im optischen und infraroten Wellenlängenbereichs mit dem VLT und seinem Interferometer und in Zukunft mit dem Extremely Large Telescope. Hinzu kommen Multiwellenlängenbeobachtungen vom Radiobereich, etwa mit dem Millimeter-VLBI oder am Event Horizon Telescope (EHT), bis in den Röntgenbereich mit Athena.

Galaxien als Laboratorien zum Studium der Dunklen Materie

Nur etwa ein Sechstel der Masse einer Galaxie besteht aus gewöhnlicher Materie. Einen Teil dieser Materie sehen wir in Form der Sterne, den anderen als interstellares Gas und Staub. Der weitaus größte Teil der Masse einer Galaxie liegt jedoch in Form Dunkler Materie vor. Ihr Ursprung ist bis heute ungeklärt.

Das Modell der Kalten Dunklen Materie sieht die Lösung in massereichen Elementarteilchen, wie sie von vielen Modellen der Teilchenphysik vorhergesagt werden, aber bis heute nicht im Experiment direkt nachgewiesen werden konnten. Dieses Modell kann zwar viele der beobachteten globalen Eigenschaften von Galaxien erklären, es erzeugt aber auch eine Reihe von ernstzunehmenden Widersprüchen auf kleineren Skalen. Die Dunkle Materie scheint zum Beispiel weniger stark konzentriert zu sein als theoretische Modelle es vorhersagen. Das führt zu Diskrepanzen, insbesondere bei der Zahl, Struktur und Kinematik von Zwerggalaxien. Mögliche Modelle für die Natur der Dunklen Materie lassen sich also eingrenzen durch eine genaue Vermessung der

³¹ Vgl. Kapitel 4.4

Massenverteilung in Galaxien in Abhängigkeit von der jeweiligen kosmischen Epoche. Möglicherweise lässt sich die Dunkle Materie sogar direkt nachweisen. In der Hochenergieastrophysik misst man dazu die Strahlung, die entsteht, wenn Teilchen der Dunklen Materie sich selbst vernichten. Makro- und Mikrokosmos kommen zusammen.

Galaxiengruppen, Galaxienhaufen und das kosmische Netz

Galaxien ordnen sich in größeren Strukturen an: in Galaxiengruppen, Galaxienhaufen und schließlich in einem wabenförmigen Netzwerk, dem kosmischen Netz als größter Struktur im Universum. In Galaxiengruppen und Galaxienhaufen lassen sich Veränderungsprozesse wie das Verschmelzen von Spiralgalaxien zu elliptischen Galaxien besonders gut studieren. Astronominen und Astronomen können hier untersuchen, inwieweit die kosmische Umgebung einer Galaxie ihre künftige Entwicklung beeinflusst. Es könnte einen Unterschied machen, ob eine Galaxie isoliert liegt oder im Verbund mit anderen Galaxien.

Galaxienhaufen sind die größten durch Gravitation gebundenen Strukturen im Kosmos. An ihnen können wir besonders gut Natur und Verteilung der Dunklen Materie studieren. Dies geschieht über die Röntgenemission des heißen Haufengases und über den sogenannten Gravitationslinseneffekt, mit dem sich die Verteilung der Gesamtmaterie berechnen lässt. An außergewöhnlichen Galaxienhaufen wie dem Bullet-Cluster lassen sich die Grenzen von Modellen klären, die die Massenverteilung in Galaxien nicht auf die Existenz Dunkler Materie zurückführen, sondern auf ein verändertes Gravitationsgesetz. Mit Röntgen- und Radiobeobachtungen können wir in Galaxienhaufen und im inter- und zirkumgalaktischen Medium kosmische Plasmen bei extrem niedrigen Dichten studieren. So lassen sich mikrophysikalische Prozesse untersuchen, die unter anderem durch Stoßwellen und Turbulenz kosmische Teilchenstrahlung erzeugen.³² Eine zentrale Rolle

werden hierfür das SKA und verwandte Radioteleskope sowie die Röntgenobservatorien eROSITA und Athena spielen.

Die Eigenschaften des kosmischen Netzes können wir aus den Spektren sehr weit entfernter Quasare rekonstruieren. Über alle Zeitalter des Kosmos hinweg versorgt das kosmische Netz die Galaxien mit frischem Gas. Die Galaxien wiederum reichern über galaktische Ausflüsse das intergalaktische Medium mit schweren Elementen an. Das kosmische Netz kann herangezogen werden, um die geometrische Struktur des Kosmos zu vermessen. Aus den statistischen Eigenschaften der Galaxienverteilung können wir auf die Anfangsbedingungen unseres Kosmos schließen und damit auf die Physik des Universums unmittelbar nach dem Urknall.³³ Dafür geeignet sind die Daten von Durchmusterungen wie den Weltraummissionen Euclid und eROSITA, von spektroskopischen Durchmusterungen mit 4MOST, detaillierten tiefen Beobachtungen mit dem ELT und ALMA oder die Messung neutralen Wasserstoffs über die gesamte kosmische Geschichte hinweg mit dem SKA.

Strategiepapiere:

- 03 Stellar Parameters, Stellar Structure and Evolution
- 04 Star Formation and Interstellar Medium
- 05 The Milky Way and the Local Volume
- 06 Galaxy Kinematics and Evolution
- 07 (Active) Galactic Nuclei
- 08 Dark Energy Dark Matter and Large-Scale Structure
- 12 Astronomy from Space
- 13 Optical/IR Facilities
- 14 FIR/submm/mm Facilities
- 15 Radio Astronomy Infrastructures
- 17 Surveys
- 18 Computational Astrophysics
- 19 Information Science and E-Infrastructure Challenges in Astronomy

³² Vgl. Kapitel 4.5

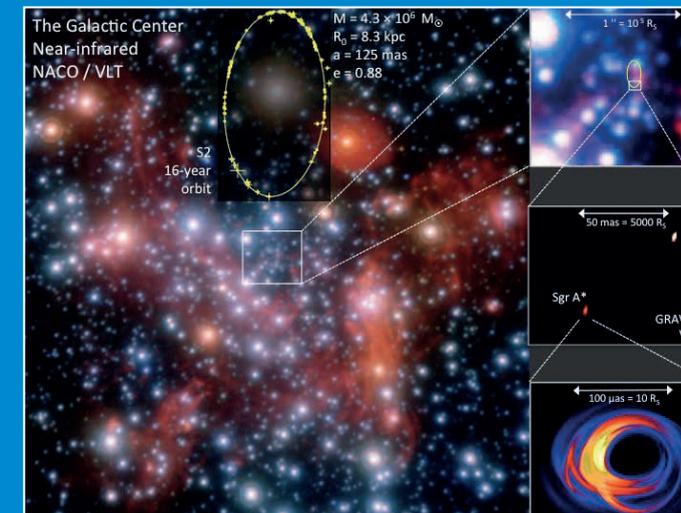
³³ Vgl. Kapitel 4.4 und 4.5

Das massereiche Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum



Prof. Dr. Reinhard Genzel ist seit 1986 Direktor am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching. Zudem ist er Honorarprofessor an der Ludwig-Maximilians-Universität München und Professor am Department for Astronomy der University of California at Berkeley, USA. Reinhard Genzel gehört zu den weltweit führenden experimentellen Astrophysikern auf dem Gebiet der Infrarot- und Submillimeter-Astronomie. Mit seinen Entwicklungen konnte er unter anderem nachweisen, dass sich im Zentrum der Milchstraße ein massereiches Schwarzes Loch mit etwa 4,4 Millionen Sonnenmassen befindet. Seine Arbeiten wurden mit zahlreichen Preisen ausgezeichnet, darunter der Leibniz-Preis der DFG, der Balzan Preis, die Karl-Schwarzschild-Medaille, die Herschel-Medaille, der Tycho Brahe-Preis, der Shaw-Preis und der Crafoord-Preis. 2013 wurde er in den Orden Pour le Mérite aufgenommen und 2014 wurde ihm das Bundesverdienstkreuz, Großes Verdienstkreuz mit Stern, verliehen.

„Seit 25 Jahren beobachten wir insbesondere die schnelle Bewegung der Sterne in unmittelbarer Nähe des Galaktischen Zentrums, vor allem des Sterns S2. Er umrundet in 16 Jahren eine unsichtbare Masse von 4,4 Millionen Sonnenmassen: das massereiche Schwarze Loch Sgr A*. Wir konnten bereits 1,5 Umläufe beobachten. Der nächste Perizentrumsdurchgang des Sterns S2 wird 2018 erstmals mit dem Nahinfrarotinterferometer GRAVITY am VLTI verfolgt werden. Die scheinbare Größe der S2-Bahn am Himmel entspricht einem Fußballstadion auf dem Mond und die Messgenauigkeit wird im Vergleich dazu im Zentimeterbereich liegen. Dadurch kann die Masse von Sgr A* präzise bestimmt und der Abstand von S2 zu Sgr A* geometrisch gemessen werden.“



Dieses Bild zeigt einen Teil des großen und internationalen GRAVITY-Teams während der ersten Beobachtungen am Paranal-Observatorium.

Das Galaktische Zentrum. Nahinfrarot-Aufnahme der zentralen 20 Bogensekunden, gewonnen mit adaptiver Optik am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (Paranal, Chile). Die Pseudofarben entsprechen dem H-, K- und L-Band (1.65µm, 2.2µm, 3.5µm Wellenlänge).

4.4 Kosmologie und junges Universum

Zu Beginn des Universums waren Materie und Energie sehr gleichmäßig verteilt. In der kosmischen Hintergrundstrahlung, die aus der Epoche 400.000 Jahre nach dem Urknall stammt, beobachten wir lediglich Temperaturregelmäßigkeiten von einem hunderttausendstel Grad. Das heutige Universum, 13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall, ist dagegen klar strukturiert in Galaxien, Galaxienhaufen und das kosmische Netz.³⁴ Erste Galaxien beobachten wir bereits 500 Millionen Jahre nach dem Urknall. Wie konnten sich in dieser vergleichsweise kurzen Zeit all diese Strukturen bilden?

Zur Klärung dieser Frage vergleichen Astronominen und Astronomen Simulationsrechnungen mit großen Galaxiendurchmusterungen und detaillierten Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Dadurch haben sich einige Grundprinzipien klar etabliert. Das Standardmodell der Kosmologie, das Modell der Kalten Dunklen Materie, zeigt, dass sich anfänglich kleine Unregelmäßigkeiten, wie wir sie in der kosmischen Hintergrundstrahlung beobachten können, vor allem durch Gravitationsinstabilität verstärkten und schließlich das kosmische Netz bildeten. Das Modell ist nur dann schlüssig, wenn Bestandteile existieren, die bislang noch nicht direkt nachgewiesen werden konnten: die Dunkle Materie und die Dunkle Energie. Dunkle Materie trägt etwa 25 Prozent zum Masse-Energie-Inhalt des Universums bei und bestimmt die Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen.³⁵ Die Dunkle Energie macht rund 70 Prozent des kosmischen Energiehaushaltes aus. Sie scheint die ungewöhnliche Eigenschaft zu besitzen, negativen Druck auszuüben und ist seit etwa 8 Milliarden Jahren der bestimmende Faktor für die Ausdehnung des Kosmos. Gewöhnliche Masse hingegen trägt nur 5 Prozent zum Massenbudget des Kosmos bei, und nur einen Bruchteil können wir als Sternenlicht beobachten.

Trotz der beiden großen Unbekannten Dunkle Materie und Dunkle Energie kann das Modell der

Kalten Dunklen Materie die Entwicklung von Strukturen in der Größenordnung von Galaxien bis zum gesamten Kosmos erstaunlich präzise beschreiben. Dies konnte durch den Vergleich von Beobachtungsdaten und Durchmusterungen mit großen Simulationsrechnungen wie der Millennium-Simulation des Max-Planck-Instituts für Astrophysik eindrucksvoll gezeigt werden. Einige wesentliche Annahmen und Konsequenzen des Modells der Kalten Dunklen Materie verstehen wir bislang allerdings nur sehr rudimentär.

Die zentralen Fragen in diesem Gebiet der Astrophysik sind im kommenden Jahrzehnt:

- **Kosmisches Netz:** Wie entstanden die Strukturen, die wir heute im Kosmos beobachten? Was waren ihre Anfangsbedingungen?
- **Kosmische Morgendämmerung:** Wie gestalteten sich die Frühphasen des Kosmos? Wann entstanden die ersten Strukturen? Wann und wie ionisierten sie das Universum?
- **Dunkle Materie und Dunkle Energie:** Woraus besteht die Dunkle Materie? Besteht sie aus einer oder mehreren Sorten von Teilchen? Was sind ihre Eigenschaften und wie kann man sie direkt oder indirekt messen? Was ist die Dunkle Energie und was sind ihre Eigenschaften? Wie zwingend ist die Annahme der beiden dunklen Komponenten Dunkle Materie und Dunkle Energie?
- **Was ist der Ursprung der Materie?** Wie hängt der Ursprung der Materie mit dem Quantenfeld zusammen, dass das Universum beim Urknall inflationär beschleunigt hat? Was waren die Eigenschaften des Inflatonfelds und wie kann man sie messen?

Für das kommende Jahrzehnt erwarten wir in diesem Gebiet weitreichende Entdeckungen. Forschende in der Teilchenphysik und in der

Astrophysik arbeiten etwa daran, jene Teilchen nachzuweisen, aus denen die Dunkle Materie besteht. Diese Teilchen stellen auch große Herausforderungen an die Standardmodelle aus der Teilchenphysik. Astronominen und Astronomen versuchen, die ionisierende Strahlung der ersten Objekte aus der Epoche der kosmischen Dämmerung zu detektieren. Sogar primordiale Gravitationswellen aus der inflationären Epoche des Universums direkt nach dem Urknall könnten womöglich nachgewiesen werden.

Die Entstehung des kosmischen Netzes

Strukturen wie Galaxien, Galaxienhaufen und das kosmische Netz haben ihren Ursprung in kleinen quantenmechanischen Fluktuationen im sehr frühen Universum. Durch die Inflation, die extrem rasche Ausdehnung des Universums nach dem Urknall, wurden diese Fluktuationen auf makroskopische Skalen vergrößert.

Solche Schwankungen sollten in erster Näherung der Gaußschen Normalverteilung folgen. Allerdings sind Abweichungen möglich, die man als *Non-Gaussianity* bezeichnet. Ihre Eigenschaften hängen davon ab, welche physikalischen Bedingungen zu Beginn unseres Universums herrschten. Neueste Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem Planck-Satelliten der ESA haben innerhalb der Messgenauigkeit die Normalverteilung der Fluktuationen bestätigt. Nun sind genauere Beobachtungen notwendig, um Abweichungen von der Normalverteilung zu finden und aus ihnen Rückschlüsse auf Eigenschaften und Prozesse des sehr frühen Universums zu ziehen.

Dabei werden die zukünftigen Messungen des Mikrowellenhintergrunds eine zentrale Rolle spielen, außerdem die Durchmusterung und Vermessung der großräumigen Verteilung und zeitlichen Entwicklung von Galaxien mit dem Satelliten Euclid, den Teleskopen 4MOST, LSST und dem Observatorium SKA. Ergänzt werden diese Erkenntnisse durch Daten des Röntgensatelliten eROSITA, der die räumliche Verteilung von Galaxienhaufen in den jeweiligen kosmischen Epochen bestimmen wird. Spektroskopische

Durchmusterungen von Quasaren mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte erlauben, das intergalaktische Medium zu tomografieren. In diesem Gas werden 90 Prozent der Baryonen im Kosmos vermutet, also Materie, die aus Atomen besteht. Völlig neue Möglichkeiten für diese Untersuchungen werden sich gegen Ende der kommenden Dekade mit den Spektrografen HIRES und MOSAIC am 39-m-Teleskop ELT und über die Röntgenspektroskopie mit dem Satelliten Athena eröffnen.

Reionisierung und der Blick in die kosmische Morgendämmerung

Einige Millionen Jahre nach dem Urknall war das Universum durch seine Ausdehnung ausreichend abgekühlt. Es bestand zu dieser Zeit hauptsächlich aus neutralem Wasserstoff und Helium. In dieser dunklen Phase des Universums gab es keine sichtbaren Strukturen oder Lichtquellen. Erst mit der Bildung der ersten Strukturen wurde ionisierende Strahlung frei, die das Universum in den weitestgehend ionisierten Zustand versetzte, den wir heute beobachten können. Welche Strukturen die Reionisierung verursachten und wie sie beschaffen waren, ist noch nicht klar. Es wird angenommen, dass die ersten Sterne den Großteil der ersten ionisierenden Strahlen produzierten. Allerdings können auch aktive Galaxienkerne, zerfallende Dunkle Materie oder kosmische Strahlung eine wichtige Rolle gespielt haben. Die Strahlung dieser ersten Strukturen wird von neutralem Gas absorbiert und reemittiert. Wann genau das Universum von einem vorwiegend neutralen zu einem überwiegend ionisierten und damit für Strahlung durchsichtigen Zustand wechselte und wie dieser Übergang genau ablief, ist nur in Ansätzen bekannt.

Diese Frühphase des Universums wird bei Rotverschiebungen $6 < z < 20$ vermutet, also einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall, und war bislang kaum für die Beobachtung zugänglich. Deshalb verstehen wir nur ansatzweise, wann und wie die Reionisierung ablief und ob sie schlagartig für große Bereiche des Kosmos erfolgte oder eher sukzessive Region für Region. Auch ihr Einfluss auf die anschließende Bildung und Entwicklung von Galaxien ist noch unklar.

³⁴ Vgl. Kapitel 4.3

³⁵ Vgl. Kapitel 4.3

Eine systematische Kartografie der ionisierenden Lyman-alpha-Strahlung um junge Galaxien und Quasare wurde erst vor Kurzem durch den Feldspektrografen MUSE am Very Large Telescope der ESO möglich.³⁶ Sie ist allerdings auf Rotverschiebungen $z < 6$, also Zeiten später als 1 Milliarde Jahre nach dem Urknall, beschränkt. Mit dem Weltraumteleskop JWST und dem Großteleskop ELT wird es gelingen, junge Galaxien auch zu deutlich früheren kosmischen Epochen routiniert nachzuweisen und so bis tief in die Epoche der kosmischen Morgendämmerung vorzudringen. Das Teleskop CCAT-prime wird ab 2021 die Kartierung der kumulativen rotverschobenen Emission von ionisiertem Kohlenstoff erlauben und damit weitere Einblicke in die Epoche der Reionisierung geben. Mit Radioteleskopen wie dem LOFAR und zukünftig dem SKA versucht man sogar, die Strahlung des neutralen Wasserstoffs aus der dunklen Epoche des Universums noch vor den allerersten Sternen nachzuweisen.

Dunkle Energie

2011 wurde die erstaunliche Beobachtung mit dem Physik-Nobelpreis gewürdigt, dass sich die Ausdehnung des Universums nicht wie erwartet verlangsamt, sondern beschleunigt! Um dies erklären zu können, muss man höchstwahrscheinlich Physik jenseits des derzeitigen physikalischen Weltmodells heranziehen: Dunkle Energie. Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie hat diese hypothetische Energieform die ungewöhnliche Eigenschaft, negativen Druck auszuüben. Insbesondere ihre winzige Dichte im Verhältnis zur Vakuumenergiedichte der Quantenfeldtheorie gilt als eine der größten Herausforderungen in der modernen Physik. Ein alternatives Szenario geht davon aus, dass die Allgemeine Relativitätstheorie auf großen, kosmologischen Skalen ihre Gültigkeit verliert und modifiziert werden muss. Unser Unwissen über den Ursprung der Dunklen Energie spiegelt sich in der Vielzahl der Erklärungsmodelle wider: Dunkle Energie wird zum Beispiel mit der kosmologischen Konstante gleichgesetzt, man zieht Modifikation der Allgemeinen Relativitätstheorie

in Betracht, höhere Dimensionen oder neue Skalarfelder.

Bislang konnten wir im Wesentlichen nur die Existenz und die Größe der Dunklen Energie bestimmen, wie sie in der heutigen Epoche des Universums vorliegt. Nun müssen wir feststellen, ob die Dunkle Energie tatsächlich konstant ist oder ob sie sich mit der kosmischen Epoche verändert. Nachweisen können wir dies, indem wir die Expansionsrate des Universums in früheren kosmischen Epochen vermessen. Eine Methode dafür ist die Beobachtung von Supernovae vom Typ Ia, die als „Standardkerzen“ fungieren. Ihre absolute Helligkeit kann man bestimmen, dann mit der Helligkeit anderer Objekte vergleichen und so die Entfernung der Supernova ableiten. Diese Methode erbrachte vor 20 Jahren auch den ersten Hinweis auf die Existenz der Dunklen Energie. Es gibt eine Reihe weiterer Methoden, mit denen sich die Expansionsrate des Universums zurückverfolgen lässt, etwa die Untersuchung von Winkelabhängigkeiten von Strukturen in der kosmischen Hintergrundstrahlung, charakteristische Längenskalen in der großräumigen Verteilung der Galaxien, die Häufigkeitsentwicklung von Galaxienhaufen oder der schwache Gravitationslinseneffekt. Deutschland ist an vielen wichtigen Experimenten in diesem Gebiet beteiligt, zum Teil in führender Rolle. Sie werden in den kommenden 10 bis 15 Jahren unser Verständnis der Dunklen Energie entscheidend erweitern. Insbesondere sind hier die Satellitenmissionen eROSITA und Euclid zu nennen, an denen deutsche Institute führend beteiligt sind, sowie die erdgebundenen Durchmusterungen mit den Observatorien 4MOST, LSST und SKA. Durch diese Kombination der Methoden werden wir die Zustandsgleichung der Dunklen Energie messen können und klären, ob die Dunkle Energie dynamisch ist, sich also mit der Zeit ändert.

Wenn wir feststellen, wie die Dunkle Energie von der kosmischen Epoche abhängt, wird das entscheidende Hinweis dafür liefern, ob sie wirklich eine ungewöhnliche neue Energieform ist, ob sie lediglich die Kosmologische Konstante der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellt oder ob wir stattdessen Einsteins Theorie modifizieren müssen.

Ursprung der Materie

Das Inflationsmodell des frühen Universums, also die extrem rasche Ausdehnung des Kosmos etwa 10^{-34} Sekunden nach dem Urknall, ist eine sehr überzeugende und bislang erfolgreiche Theorie. Sie erklärt zugleich die Anfangsbedingungen für die Strukturbildung, die Gleichförmigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung, die Geometrie des Kosmos auf größten Skalen und die Abwesenheit von magnetischen Monopolen.

Das Modell der Inflation besagt, dass am Ende der inflationären Phase das sogenannte Inflatonfeld als einzige Energie zurückblieb. Um die vielfältigen Formen von Materie und Energie zu erzeugen, die wir heute im Universum beobachten, muss dieses Inflatonfeld in die uns bekannten Teilchen zerfallen sein. Dieser Prozess wird *Reheating*, also Wiederaufheizung, genannt. Wie dieser Prozess allerdings vor sich ging, ist weitestgehend unbekannt und hängt davon ab, welche Wechselwirkungen zwischen Inflatonfeld und Materie bestanden. Präzise Beobachtungen der Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung erlauben es, den Mechanismen der Inflation auf den Grund zu gehen. Indem wir die Eigenschaften des frühen Universums bestimmen, haben wir somit möglicherweise Zugang zu den frühesten Phasen im Kosmos und damit zu Bedingungen, die man auf der Erde selbst mit Teilchenbeschleunigern nicht rekonstruieren kann.

Strategiepapiere:

- 04 Star Formation and Interstellar Medium
- 06 Galaxy Kinematics and Evolution
- 07 (Active) Galactic Nuclei
- 08 Dark Energy Dark Matter and Large-Scale Structure
- 09 The Early Universe from Inflation to Reionization
- 11 High-Energy Astrophysics
- 12 Astronomy from Space
- 13 Optical/IR Facilities
- 14 FIR/submm/mm Facilities
- 15 Radio Astronomy Infrastructures
- 17 Surveys
- 18 Computational Astrophysics
- 19 Information Science and E-Infrastructure Challenges in Astronomy

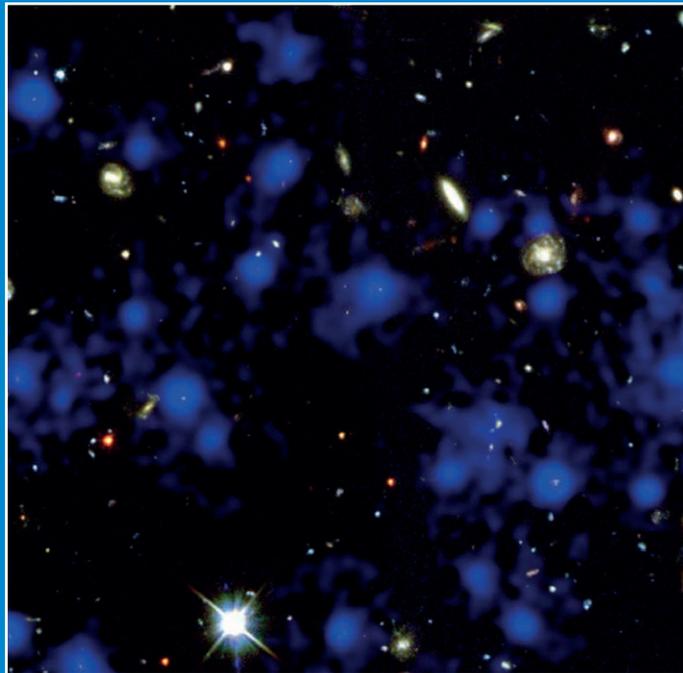
³⁶ Vgl. Seite 60.

Nachweis der Lyman-alpha-Strahlung im frühen Universum



Prof. Dr. Lutz Wisotzki leitet seit 2002 die Abteilung „Galaxien und Quasare“ am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), seit 2009 als Professor für Beobachtende Kosmologie in gemeinsamer Berufung mit der Universität Potsdam. Nach langjähriger Beschäftigung mit aktiven Galaxienkernen und ihrer kosmologischen Bedeutung gilt heute sein Interesse der Entwicklung von Galaxien im Allgemeinen. Er ist Projektwissenschaftler des Spektrografen MUSE am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte.

„Der 2014 am ESO-VLT in Betrieb genommene Multi-Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) ermöglicht die lückenlose spektroskopische Kartierung ganzer Himmelsareale wie die Hubble Deep Fields, bei gleichzeitig höchster Empfindlichkeit für lichtschwache hochrotverschobene Galaxien. Schon mit den ersten MUSE-Beobachtungen konnten in den untersuchten Regionen zahlreiche Galaxien mit spektroskopischen Rotverschiebungen entdeckt werden. Von besonderer Bedeutung ist die Entdeckung, dass die meisten Galaxien bei Rotverschiebungen $z > 3$, also bis zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall, von ausgedehnten Lyman- α -Emissionsregionen umgeben sind. Damit kann erstmals die räumliche Verteilung zirkumgalaktischer Wasserstoffhüllen im jungen Universum direkt untersucht werden. Noch offen ist allerdings, welcher Mechanismus für die Lyman- α -Strahlung dieser Gashüllen verantwortlich ist.“



Von MUSE beobachteter Ausschnitt aus dem Hubble Deep Field South. Das zugrunde liegende Farbbild des Hubble-Weltraumteleskops zeigt etwa 600 Galaxien mit Rotverschiebungen zwischen 0,1 und 6 (sowie 8 Vordergrundsterne). In blau dargestellt sind die mit MUSE entdeckten Lyman- α -Halos von 30 Galaxien bei $z > 3$.

4.5 Extremzustände des Kosmos, fundamentale Astrophysik

Die grundlegenden Gesetze der Physik beschreiben die Welt, in der wir leben, und unser Universum, wie es begann und sich entwickelte. Durch astrophysikalische Beobachtungen können wir physikalische Extremzustände studieren, die in Laboratorien auf der Erde nicht nachgestellt werden könnten. Im Weltraum können wir zum Beispiel die Physik stark gekrümmter Räume untersuchen oder die Entstehung von Gravitationswellen durch Wechselwirkung von Schwarzen Löchern oder Neutronensternen. Dazu gehören auch die Physik von mehreren Millionen Grad heißen Plasmen in der Umgebung extrem dichter Objekte oder die Beschleunigung von Teilchen auf ultrahohe Energien. Messungen derartiger Phänomene sind nicht nur astrophysikalisch relevant, sondern erlauben es auch, fundamentale physikalische Gesetze zu testen.

Die zentralen Fragen in diesem Bereich der Astrophysik sind im kommenden Jahrzehnt:

- **Entwicklung Schwarzer Löcher:** Wie entstehen Schwarze Löcher? Welche Eigenschaften haben sie? Wie viele Schwarze Löcher gibt es und wie groß sind jeweils ihre Massen? Welchen Einfluss haben Schwarze Löcher auf ihre Umgebung und wie entwickeln sie sich im Laufe der Zeit?
- **Zustandsgleichung der Kernmaterie:** Welche Eigenschaften haben Neutronensterne und Pulsare? Wie lautet die Zustandsgleichung der Materie bei extrem hohen nuklearen Dichten?
- **Gravitationswellen und Gravitationsphysik:** Welche Effekte sind im Bereich starker Gravitationsfelder wichtig? Können wir diese Effekte messen? Welche Eigenschaften haben Gravitationswellen?
- **Kosmische Strahlung:** Woher stammt die kosmische Strahlung?

Extremzustände werden sehr häufig in Strahlungsquellen erreicht, die Licht beinahe über das gesamte elektromagnetische Spektrum emittieren, vom Radiobereich bis zur Gammastrahlung. Damit wir sie untersuchen können, müssen wir also bei allen entsprechenden Frequenzen beobachten. Das setzt voraus, dass unsere Beobachtungsmöglichkeiten diese Frequenzen erfassen. In Zukunft werden neben der elektromagnetischen Strahlung weitere Informationsträger an Bedeutung gewinnen, zum Beispiel Neutrinos, Gravitationswellen und Teilchen der kosmischen Strahlung.

Die Entwicklung Schwarzer Löcher

Die Allgemeine Relativitätstheorie hat die Existenz Schwarzer Löcher vorhergesagt, direkt beobachten konnten wir sie allerdings noch nicht. Hochauflösende Radio-VLBI-Beobachtungen weisen auf massereiche Schwarze Löcher in den Zentren aktiver Galaxien hin.³⁷ Sie können zum Beispiel durch die Strahlung gefunden werden, die von den Gasausflüssen ihrer unmittelbaren Umgebung stammt. Auch in Zentren von Galaxien, die zurzeit keine Aktivität zeigen, existieren wahrscheinlich massereiche Schwarze Löcher. Darauf lässt die Kinematik des Gases und der Sterne in Zentrumsnähe schließen. Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße mit seiner Masse von 4,4 Millionen Sonnenmassen ist ein gutes Beispiel dafür. Die Eigenschaften massereicher Röntgendoppelsternsysteme lassen vermuten, dass sich dort kleinere Schwarze Löcher mit Massen von nur einigen Sonnenmassen befinden, sogenannte stellare Schwarze Löcher. Die Erforschung Schwarzer Löcher wird in der kommenden Dekade mit den Weltraummissionen eROSITA und Athena große Fortschritte machen.

Am Gravitationswellendetektor Advanced LIGO wurden 2016 zum ersten Mal Gravitationswellen direkt nachgewiesen. Die Daten belegen zweifelsfrei, dass die Quellen der Gravitationswellen zwei verschmelzende Schwarze Löcher waren.

³⁷ Vgl. Kapitel 4.3

An der Entdeckung waren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Deutschland unmittelbar beteiligt. Viele der eingesetzten Schlüsseltechnologien wurden in Deutschland entwickelt. Wahrscheinlich wird innerhalb des nächsten Jahrzehnts sogar der ultimative Nachweis möglich werden: Die direkte Beobachtung des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs. Für das Event Horizon Telescope werden Radioteleskope auf der ganzen Welt zusammengeschaltet, um den Ereignishorizont des Schwarzen Lochs Sgr A* im Zentrum der Milchstraße abzubilden. Deutschland ist am EHT führend beteiligt, unter anderem gefördert durch einen ERC Synergy Grant.

Von den Eigenschaften der Schwarzen Löcher hängen auch die physikalischen Prozesse ab, die in ihrer Umgebung Strahlung erzeugen. Diese Prozesse setzen sehr viel Energie frei: Ist der Kern einer Galaxie mit zentralem Schwarzen Loch aktiv, produziert er zum Beispiel mehr Energie als alle Sterne der Galaxie zusammen. Die Gravitation eines Schwarzen Lochs zieht Materie an, was häufig mit Jets einhergeht. Wir verstehen noch nicht wirklich, wie diese Jets entstehen. Neue Erkenntnisse werden Beobachtungen im Radio-, Röntgen- und Gammabereich mit eROSITA oder Athena bringen. Um die Beobachtungen zu verstehen, müssen Jets zudem mit Hochleistungsrechnern detailliert simuliert werden.

Wenn Schwarze Löcher akkretieren, also um sich herum Materie ansammeln, hat das auch Auswirkungen auf die Dynamik des Gases in ihrer Umgebung. Akkretion auf supermassereiche Schwarze Löcher in den galaktischen Zentren beeinflusst die Entwicklung der Galaxien stark. Sie ist deshalb von großer kosmologischer Bedeutung. Die Aktivität im Zentrum einer Galaxie wirkt sich auf ihre Sternbildungsrate aus, und die Sternbildung hat wiederum Auswirkungen auf den Akkretionsfluss. Die Entwicklung eines Schwarzen Lochs ist somit eng mit der umgebenden Galaxie verbunden.³⁸

³⁸ Vgl. Kapitel 4.3

Die Zustandsgleichung der Kernmaterie und der Ursprung kompakter Sterne

Eine zentrale Frage in der fundamentalen Physik betrifft das Verhalten der Materie bei extrem hohen Dichten. Nach wie vor unbekannt ist die Zustandsgleichung von Kernmaterie, also von Materie bei Dichten, die denen in Atomkernen vergleichbar sind. Der beste Weg, die Zustandsgleichung zu bestimmen, besteht in der Messung der Größen und Massen von Neutronensternen. Diese Messungen können durch Beobachtungen von Neutronensternen in Röntgendoppelsternsystemen durchgeführt werden. Hochpräzise Massenbestimmungen sind insbesondere für Radiopulsare möglich. Astronominnen und Astronomen in Deutschland haben mit ihren Beobachtungen die Massen von Neutronensternen in Doppelsystemen präzise bestimmt. Es wurden Neutronensterne bis zur doppelten Sonnenmasse gefunden. Das deutet darauf hin, dass die Zustandsgleichung von Kernmaterie steif ist.

Neutronensterne und Schwarze Löcher stellarer Masse entstehen bei Supernovaexplosion von Sternen, die mehr Masse haben als etwa acht Sonnenmassen. Dieser Prozess kann mittlerweile durch sehr komplexe multidimensionale Simulationsrechnungen unter Zuhilfenahme verschiedenster theoretischer Werkzeuge an den größten Hochleistungsrechnern nachvollzogen werden. In diese Rechnungen müssen neben der Zustandsgleichung der Kernmaterie auch Prozesse der Neutrinophysik, des Strahlungstransports und der Allgemeinen Relativitätstheorie eingehen.

Gravitationswellen und Gravitationsphysik

Neutronensterne und Schwarze Löcher sind ideale Objekte für das Studium der Gravitationsphysik in starken Gravitationsfeldern und bei großen Raumkrümmungen. Wenn in Doppelsystemen zwei Neutronensterne oder sogar zwei Schwarze Löcher in engen Umlaufbahnen einander umkreisen, verliert das gesamte Binärsystem Energie durch Abstrahlung von Gravitationswellen. Die Umlaufbahnen schrumpfen, was präzise messbar

ist, wenn einer der Neutronensterne ein Radiopulsar ist. Mit dieser Methode haben Astronominnen und Astronomen in Deutschland die bislang präzisesten Tests zur Gravitationswellenabstrahlung durchgeführt. An Radiopulsaren sind auch andere Effekte messbar, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt werden, zum Beispiel die Gravitationsrotverschiebung, die Präzession der Umlaufbahnen und die Spins von Neutronensternen. Mit diesen Effekten kann genau getestet werden, ob die Allgemeine Relativitätstheorie, alternative oder erweiterte Theorien zutreffen, mit denen Dunkle Materie und Dunkle Energie erklärt werden sollen. Das Radioteleskop SKA verspricht, diesen Forschungszweig zu revolutionieren. Mit ihm werden wir nicht nur seltene extreme Binärsysteme entdecken können. Seine deutlich höhere Empfindlichkeit wird generell Messungen mit einer Präzision erlauben, die mit heutigen Instrumenten nicht erreichbar ist.

Kommen sich Neutronensterne oder Schwarze Löcher sehr nahe, verschmelzen sie. Dabei wird Energie frei und in Gravitationswellen umgewandelt. Dieser Prozess konnte 2016 mit Advanced LIGO erstmals direkt nachgewiesen werden. Die Schwarzen Löcher waren mit ihren Massen von einigen zehn Sonnenmassen größer als vermutet. Die Beobachtung von Gravitationswellen führt somit zu neuen astrophysikalischen Fragestellungen und trägt insbesondere dazu bei, die Endstadien von Sternen und die Entwicklung massereicher Sterne im frühen Universum besser zu verstehen.

Künftige Generationen von Detektoren werden die Messung von Gravitationswellen bei Quellen auch in anderen Massenbereichen möglich machen. So wird die L3-Weltraummission LISA der ESA das Verschmelzen von massereichen Schwarzen Löchern nachweisen können, wie wir sie in den Zentren von Galaxien finden. Wir stehen am Beginn eines Zeitalters der Gravitationswellenastronomie, in dem sich unser Instrumentarium zum Nachweis kosmischer Phänomene um ein neues Fenster erweitert. Zur physikalischen Interpretation der Messungen werden jedoch weiterhin theoretische Modelle unabdingbar sein, insbesondere Simulationen der Kollisionen kompakter Objekte.

Der Ursprung der kosmischen Strahlung

Eng mit der Frage nach dem Ursprung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern ist die Frage nach dem Ursprung und den Eigenschaften der kosmischen Strahlung verknüpft. Kosmische Strahlung ist keine elektromagnetische Strahlung, sondern besteht aus Atomkernen und Elektronen, die mit sehr hohen Energien aus dem Kosmos auf die Erde gelangen. Die Teilchen können dabei Energien erreichen, die höher sind als die in irdischen Teilchenbeschleunigern. Kosmische Teilchenbeschleuniger könnten zum Beispiel Supernovaexplosionen oder Jets sein. Die genauen physikalischen Mechanismen, die zur Entstehung der kosmischen Strahlung führen, sind noch ungeklärt. Teilchen mit niedrigerer Energie werden vom Sonnenwind abgeschirmt und gelangen nicht bis zur Erde. Die Wechselwirkung zwischen dieser niederenergetischen kosmischen Strahlung und dem interstellaren Medium unserer Milchstraße ist nur teilweise erforscht. Kosmische Strahlung verursacht unter anderem die Ionisation im Inneren der dichten Molekülwolken des interstellaren Mediums, in denen Sterne und Planetensysteme entstehen.

Um Entstehung und Ausbreitung der kosmischen Strahlung erforschen zu können, müssen wir ihre Eigenschaften bestimmen und ihre Quellen untersuchen. Die Bestimmung der kosmischen Strahlung selbst ist zum Beispiel mit dem Pierre-Auger-Observatorium oder dem Gammastrahlenobservatorium CTA möglich. Außerdem werden Observatorien wichtig, mit denen die Folgeprodukte der kosmischen Strahlung beobachtet werden können, zum Beispiel Neutrinos. Mit deutscher Beteiligung konnten am Neutrino-Observatorium IceCube erstmals hochenergetische Neutrinos festgestellt werden, die nicht aus unserer Milchstraße stammen. Dadurch wissen wir nun, dass Neutrinos in der Nähe Schwarzer Löcher entstehen können. Die nächste Generation dieser Experimente wird es erlauben, genauere Messungen durchzuführen und präzisere Aussagen zu Herkunftsrichtung und Energie der Neutrinos zu machen. Kosmische Strahlung wirkt ionisierend auf die Chemie von Molekülwolken. Diese Eigenschaft ermöglicht es, auch das niederenergetische Spektrum über die entsprechenden

Moleküllinien im Ferninfrarot- und Submillimeterbereich nachzuweisen.

Strategiepapiere:

- 07 (Active) Galactic Nuclei
- 09 The Early Universe from Inflation to Reionization
- 10 Fundamental Physics with Astronomical Observations: Testing Gravity and Extreme States of Matter
- 11 High-Energy Astrophysics
- 12 Astronomy from Space
- 15 Radio Astronomy Infrastructures
- 16 Astroparticle Physics with Gamma Rays and Neutrinos: The Decade of the Great Observatories
- 18 Computational Astrophysics
- 19 Information Science and E-Infrastructure Challenges in Astronomy



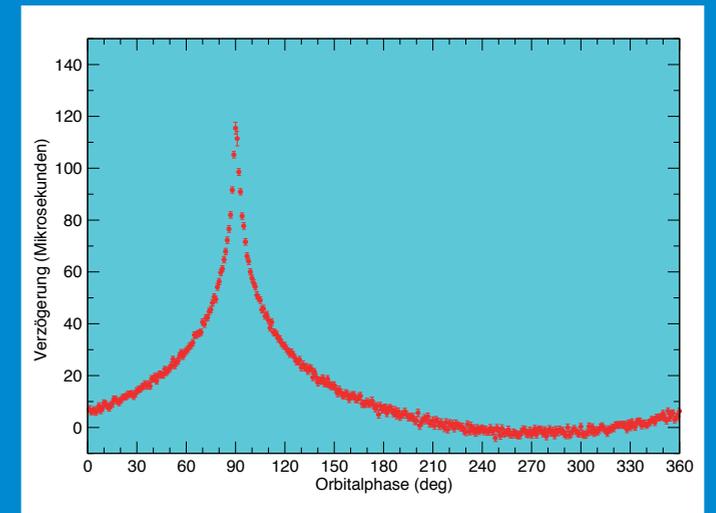
Das MeerKAT-Antennenfeld in Südafrika, Vorläufer für das Square Kilometre Array.

Test der Allgemeinen Relativitätstheorie mit Binärpulsaren

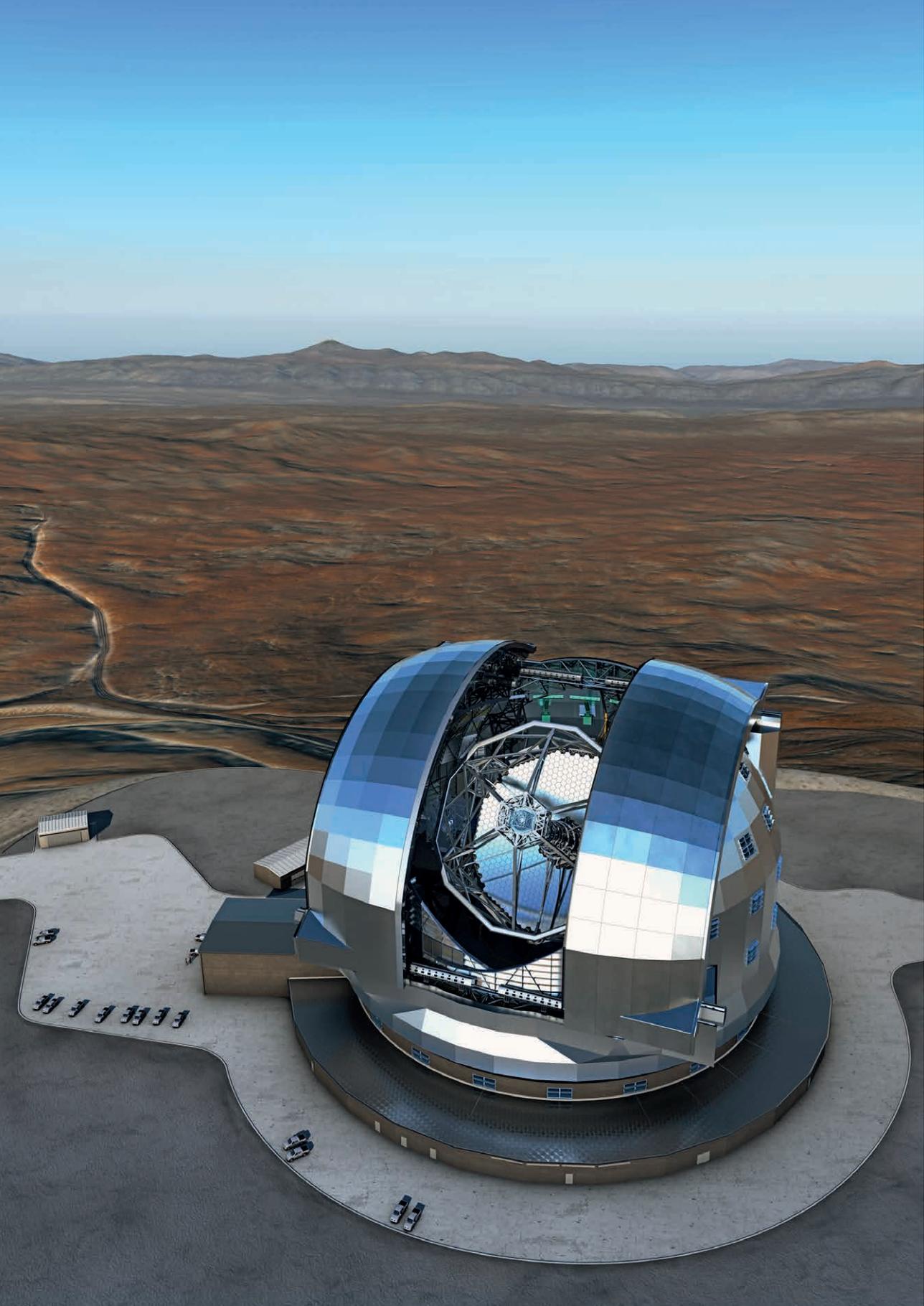


Prof. Dr. Michael Kramer wurde 2009 als Direktor an das Max-Planck-Institut für Radioastronomie berufen. Dort leitet er die Abteilung „Radioastronomische Fundamentalphysik“. Er ist außerdem Professor für Astrophysik an der University of Manchester in Großbritannien. Seine Arbeitsgebiete sind insbesondere die experimentelle Untersuchung von Gravitationstheorien und Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie mithilfe von Beobachtungen von Radiopulsaren. Seine Entdeckungen wurden unter anderem mit der Herschel-Medaille der Royal Astronomical Society ausgezeichnet.

„Radioastronomie ist sehr gut geeignet, um fundamentale Naturgesetze zu überprüfen, weil die Radiostrahlung oft mit kompakten Objekten oder energiereichen Prozessen verbunden ist. Ideale Testobjekte sind Radiopulsare, also rotierende Neutronensterne, die durch ihren Leuchtturmeffekt als pulsierende Radioquellen erscheinen und als Uhren dienen können. Das hochpräzise Vermessen der Pulsankunftszeiten auf der Erde erlaubt es, Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie zu überprüfen, zum Beispiel das Schrumpfen der Umlaufbahn eines Pulsars mit Begleiter durch das Aussenden von Gravitationswellen. 1993 gelang es so zum ersten Mal, die Existenz von Gravitationswellen nachzuweisen (Nobelpreis für J. Taylor und R. Hulse). Noch heute ermöglichen Pulsarbeobachtungen die präzisesten Tests der Gravitationswellenabstrahlung.“



Das Bild verdeutlicht den Effekt der Raumzeitkrümmung durch den Begleiter von Pulsar A im „Doppel-Pulsar“ J0737-3039, das einzige System mit zwei aktiven Pulsaren. Durch die Raumzeitkrümmung erreicht das Signal von Pulsar A die Erde mit etwas Verzögerung. Der Effekt ist am größten, wenn der Pulsar bei 90 Grad Orbitalphase für den Beobachter auf der Erde genau hinter seinem Begleiter steht. Die gemessenen Werte stimmen mit der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie exakt überein.



5 Herausforderungen für das kommende Jahrzehnt

Die Durchführung astronomischer Forschung hat sich in den vergangenen Jahrzehnten grundsätzlich gewandelt. Das lässt sich eindrucksvoll am geänderten Publikationsverhalten der Disziplin ablesen. 1970 wurden von den 1.000 meistzitierten Publikationen noch mehr als die Hälfte von maximal zwei Autorinnen oder Autoren verfasst. Solche Veröffentlichungen sind heute selten geworden. Publikationen mit mehr als zehn Autorinnen und Autoren waren 1970 die große Ausnahme, heute sind sie die Regel. Selbst Publikationen von einigen hundert Forschenden kommen immer häu-

figer vor. Das verdeutlicht, dass astronomische Forschung heute oft eine Gemeinschaftsleistung großer internationaler Teams an herausragenden Teleskopen und Satelliten ist. Auch Simulationsprojekte werden aufgrund ihrer Komplexität heute mit Höchstleistungsrechnern in großen Teams bearbeitet.

Dieses Kapitel stellt die größten Herausforderungen für die wissenschaftlichen Infrastrukturen und die Nachwuchsförderung in dieser veränderten Forschungslandschaft vor.

5.1 Astronomische Forschungsinfrastrukturen im kommenden Jahrzehnt

5.1.1 Die großen erdgebundenen Teleskope

Das ELT der Europäischen Südsternwarte auf dem Cerro Armazones in Chile ist mit seinem 39 Meter großen Hauptspiegel das größte der derzeit weltweit drei geplanten *Extremely Large Telescopes*. Der Bau des ELT wurde 2015 begonnen. Mit dem für 2024 geplanten Beginn der Beobachtungen ist es hervorragend positioniert, nicht nur als größtes, sondern sogar als erstes dieser drei Teleskope in Betrieb zu gehen. Deutschland ist am ELT mit signifikanten Beiträgen vertreten, sowohl auf der technischen Seite, etwa bei der Herstellung der Spiegelsegmente für den Hauptspiegel und den Sekundärspiegel, wie auch auf der wissenschaftlichen Seite. Die Entwicklung und der Bau eines der drei *First Light Instruments*, der astrometrischen Infrarotkamera MICADO, werden von deutschen Instituten geleitet. Auch am Instrument METIS für den mittleren Infrarotbereich sind deutsche Einrichtungen signifikant beteiligt, außerdem am hochauflösenden Spektrografen HIRES und am Multi-Objekt-3D-Spektrografen MOSAIC, deren Betriebsaufnahmen für 2028 geplant sind. Wissenschaftlerinnen und Wis-

senschaftler an deutschen Instituten haben auch eine entscheidende Rolle bei der Etablierung des ELT-Projekts gespielt, sowohl in der wissenschaftlich-technischen Gestaltung, etwa bei der Auswahl des Standorts und der Definition der wissenschaftlichen Spezifikationen im Science-Technical Committee, als auch bei der Führung der Europäischen Südsternwarte über den ESO-Rat.

Die vier 8-Meter-Teleskope des Very Large Telescope und dessen Interferometer VLTI auf dem benachbarten Cerro Paranal werden bis zur Inbetriebnahme des ELT das weltweit führende Observatorium im optischen/infraroten Wellenlängenbereich bleiben. Seine vielfältige Instrumentierung macht das VLT/VLTI auch nach Inbetriebnahme des ELT unverzichtbar als Spitzenobservatorium mit einer breiten Abdeckung astrophysikalischer Themen und Methoden. Unterstützt von den Mitgliedsländern betreibt die Europäische Südsternwarte ein konsequentes Instrumentierungsprogramm, um die Wettbewerbsfähigkeit des Paranal-Observatoriums zu

erhalten und auszubauen. Institute aus Deutschland sind an diesen Vorhaben federführend beteiligt, etwa an dem mit adaptiver Optik unterstützten Kamera/Spektrografen ERIS und am spektroskopischen Durchmusterungsteleskop 4MOST. Nach einer 2015 in den Mitgliedsländern der ESO durchgeführten Bedarfsanalyse gibt es für die weitere Zukunft erste Studien für ein 12-m-Survey-Teleskop im optischen und im nahen infraroten Spektralbereich.

Die ESO betreibt zusammen mit Nordamerika und Ostasien das Millimeter- und Submillimeter-Teleskopfeld ALMA auf der Chajnantor-Hochebene nahe der chilenisch-bolivianischen Grenze. Die Aufbereitung der Daten erfolgt in den ALMA Regional Centers. ALMA wurde 2013 in Betrieb genommen und wird auf absehbare Zeit die leistungsfähigste Einrichtung in diesem Wellenlängenbereich sein. Diese Spitzenposition erfordert eine ständige Weiterentwicklung der Instrumentierung, um die neuesten technologischen Fortschritte für höhere Empfindlichkeit auszunutzen. Mittelfristig steht die Errichtung eines großen Millimeter/Submillimeter-Teleskops der 25- bis 40-Meter-Klasse in unmittelbarer Nähe zum ALMA-Standort als wichtiges Komplement zu ALMA zur Diskussion. Das CCAT-prime-Teleskop, das zurzeit mit deutscher Beteiligung realisiert wird, kann dafür ein wichtiger Vorläufer sein.

Im Bereich der Radiowellenlängen ist das Square Kilometre Array (SKA) die wichtigste große Infrastruktur, deren Bau derzeit von einem weltweiten Konsortium vorbereitet wird. Deutschland plant, sich am SKA-Observatorium im Rahmen einer assoziierten Mitgliedschaft zu beteiligen. Forschende aus Deutschland sind neben Teams aus Großbritannien und Australien am stärksten in die wissenschaftliche Vorbereitung des SKA eingebunden. Das Observatorium verteilt sich auf zwei Standorte, einen in der Karoo-Wüste Südafrikas und einen anderen in Murchison Shire in der entlegensten Region Westaustraliens. In der ersten Ausbaustufe wird in Australien das Antennenfeld für niedrige Frequenzen mit mehr als 500 Stationen aus jeweils 250 einfachen Einzelantennen errichtet. In der südafrikanischen Installation werden 194 große Parabolantennen mit jeweils 14 Metern Durchmesser zusammengeschaltet,

darunter die 64 Parabolantennen des südafrikanischen MeerKAT-Experiments, an dessen Aufbau deutsche Forschungseinrichtungen ebenfalls signifikant beteiligt sind. Das Zusammenschalten der verschiedenen Antennen und Antennenfelder geschieht über modernste Software. Das SKA ist eines der anspruchvollsten Big-Data-Projekte überhaupt, mit erheblichen Herausforderungen an die Datenverarbeitung und an die Versorgung mit erneuerbaren Energien in den extrem abgelegenen Gebieten. Das Antennenfeld in Australien erstreckt sich über eine Fläche von etwa 4000 km², das Antennenfeld in Südafrika sogar über etwa 20.000 km². Beide Gebiete sind von den jeweiligen Staaten als Radio-Schutzzonen ausgewiesen. Das SKA wird die erste internationale wissenschaftliche Großforschungseinrichtung auf dem afrikanischen Kontinent sein.

Die internationalen Großprojekte ELT und SKA haben beide ein sehr breites, sich gegenseitig ergänzendes astrophysikalisches Anwendungsspektrum. Bei großen Infrastrukturen wie diesen Projekten übersteigt das Investitionsvolumen 500 Millionen Euro deutlich. Das ELT und das SKA sind als fortgeschrittene große Forschungsinfrastrukturen *Landmarks* der aktuellen Liste des Europäischen Strategieforums für Forschungsinfrastrukturen (ESFRI).



Radioteleskope des Northern Extended Millimeter Array (NOEMA) in den französischen Alpen.

5.1.2 Die mittelgroßen erdgebundenen Teleskope

Deutsche Institute sind an einer Reihe mittelgroßer Observatorien beteiligt, deren Gesamtinvestitionsvolumen jeweils zwischen 100 Millionen und 500 Millionen Euro liegen. Viele dieser Projekte eint, dass sie fachlich fokussierte Nutzergruppen bedienen. Zur Liste der ESFRI-Projekte zählen das Gammastrahlenobservatorium Cherenkov Telescope Array (CTA) und das European Solar Telescope (EST).

In der Sonnenphysik betreibt Deutschland mit dem 2012 eingeweihten 1,5-m-GREGOR-Teleskop auf Teneriffa das derzeit leistungsfähigste Sonnenteleskop der Welt. Aber auch hier zeichnet sich der Weg zur nächsten Teleskop-Generation ab. Von US-amerikanischer Seite soll 2019 das Daniel K. Inouye Solar Telescope mit deutschen Instrumentierungsbeiträgen auf der hawaiianischen Insel Maui in Betrieb gehen. Von europäischer Seite soll auf Teneriffa das bereits erwähnte European Solar Telescope errichtet werden. Das EST befindet sich derzeit in einer Vorbereitungs-förderung durch die EU und soll im Jahr 2027 in Betrieb gehen.

Das Large Synoptic Survey Telescope (LSST) in Chile wird im US-amerikanischen Decadal Report 2010 als das erdgebundene Teleskop mit der höchsten Priorität genannt. Es wird ab 2019 alle fünf Tage den kompletten Südhimmel mit hoher Auflösung ablichten und somit die Zeit als Dimension für die Astronomie systematisch und umfassend öffnen (sogenannte *Time Domain Astrophysics*). Durch Addition der verschiedenen Aufnahmen wird darüber hinaus eine bisher unerreichte Tiefe möglich. Das LSST ist deshalb auch für die europäische und deutsche Wissenschaft von fundamentalem Interesse. Dem Konsortium für das LSST sind mittlerweile einige Institute und Forschergruppen in Europa beigetreten, teilweise in Form einer nationalen Beteiligung wie Großbritannien und Frankreich, teilweise als individuelle Forschergruppen, etwa in Deutschland.

Die in Abschnitt 5.1.1 genannten Großobservatorien auf der südlichen Hemisphäre werden durch dedizierte Teleskopanlagen auf der Nordhalbkugel

ergänzt. Dazu gehört das von IRAM betriebene Antennenfeld auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen. Dort wird zurzeit die maßgeblich von der Max-Planck-Gesellschaft unterstützte Erweiterung NOEMA gebaut. Deutschland ist nach den Niederlanden der größte Partner beim LOFAR, dem derzeit größten Radiointerferometer, das bei sehr langen Wellenlängen operiert. Das US-amerikanisch-deutsch-italienische Large Binocular Telescope auf dem Mount Graham in Arizona ist derzeit das größte optische Teleskop der Welt. Das 100-m-Radioteleskop Effelsberg ist im Verbund mit anderen Teleskopen im VLBI-Modus ein weltweit führendes Instrument für Pulsar-Zeitmessungen. Alle diese Einrichtungen eint, dass sie von einzelnen Instituten oder Konsortien betrieben werden, aber über entsprechende Vereinbarungen von allen Astrophysikerinnen und Astrophysikern in Deutschland genutzt werden können.

Das Cherenkov Telescope Array ist ein erdgebundenes Teleskopfeld für die Gammastrahlenastronomie mit geplanten Installationen in Chile unweit des Cerro Paranal und auf La Palma in Spanien. Das CTA besteht aus mehr als 100 Einzelteleskopen verschiedener Größe. Es ist ein internationales Projekt, derzeit mit Beteiligung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus Europa, Japan und Südafrika. Das CTA ist momentan in der Vor-Konstruktionsphase. Der Teilbetrieb ist ab 2021 geplant, als Ganzes soll es 2024 in Betrieb gehen. Die Installation in Chile soll über die ESO betrieben werden. Das CTA ist das vorrangige Projekt der Astroteilchenphysik auf Deutschlands nationaler Roadmap und ist ein Projekt der ESFRI-Roadmap. Mit dem CTA wird die Gammastrahlenastronomie aus dem Status eines Experiments der Astroteilchenphysik zu einem anwenderorientierten Observatorium weiterentwickelt und stößt als solches bei astrophysikalischen Forschungsprojekten auf wachsendes Interesse.

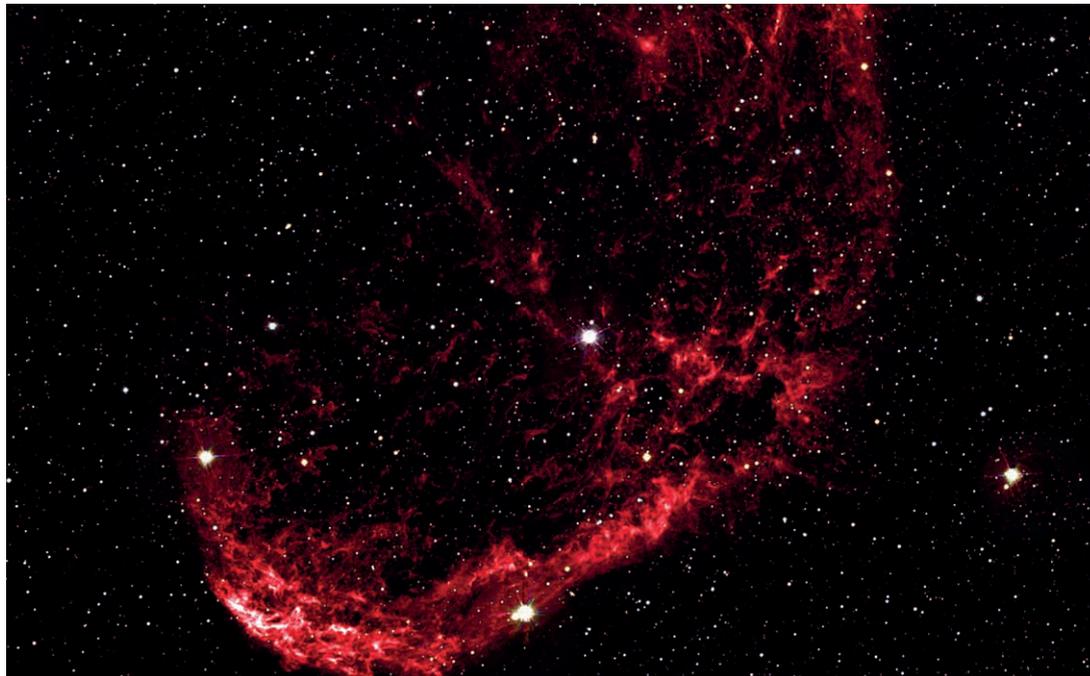
5.1.3 Kleinere erdgebundene Teleskope

Auch der gezielte, dedizierte Einsatz kleinerer Teleskope mit Durchmessern zwischen einem und vier Metern setzt wichtige Akzente für die Wissenschaft. Beispiele für solche kleineren Projekte sind robotische Teleskope für Zeitserienstudien und dedizierte Geräte wie der CARMENES-Spektrograf. Am Bau von CARMENES waren das Max-Planck-Institut für Astronomie und deutsche Universitätsinstitute wie das Zentrum für Astronomie Heidelberg und die Universität Göttingen signifikant beteiligt. CARMENES wird am 3,5-m-Teleskop auf dem spanischen Calar Alto für die Charakterisierung von Exoplaneten eingesetzt und widmet sich somit einer der spannendsten aktuellen Fragen der Astrophysik.

Dedizierte Teleskope mit Durchmessern zwischen einem und vier Metern werden auch für systematische erdgebundene Kampagnen zur Vorbereitung und Begleitung von Weltraummissionen wichtig sein, wie der PLATO-Mission der ESA. Gerade in diesem Bereich können sich kleinere Arbeitsgruppen durch fokussierte Beiträge

in einer von großen Kollaborationen dominierten Landschaft internationale Sichtbarkeit verschaffen. Als Beispiel seien hier die Zeitserienstudien zu Sternen genannt, wie sie am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) und an den Universitäten Göttingen und Hamburg mit 1,2-m-Teleskopen durchgeführt werden.

Durch den Einsatz robotischer Teleskope werden nicht nur die Beobachtungszyklen optimiert, sondern auch die Kosten für die Durchführung solcher Langzeitprojekte minimiert. Weiterhin sind kleinere Teleskope sehr hilfreich zur Erprobung neuer Beobachtungstechniken und technologischer Entwicklungen. Ein Beispiel ist das von den Universitäten Köln und Bonn gemeinsam mit der US-amerikanischen Universität Cornell entwickelte 6-m-Submillimeter-Teleskop CCAT-prime auf dem Cerro Chajnantor in Chile, dem die Rolle eines Wegbereiters für ein künftiges großes Submillimeter-Survey-Teleskop zukommt. Das CCAT-prime befindet sich derzeit im Bau.



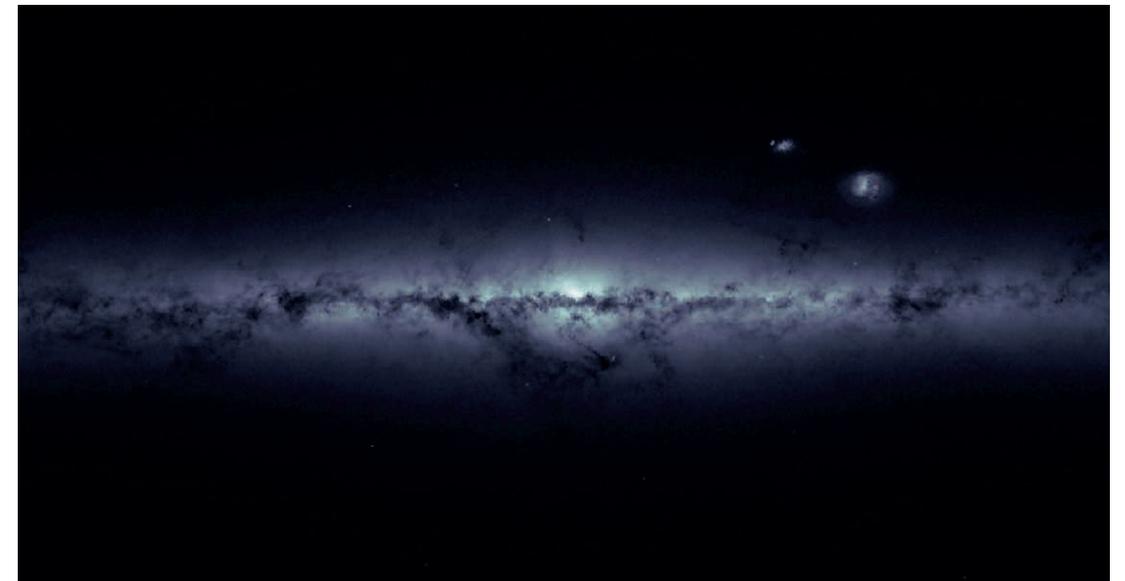
Der Crescent-Nebel, eine 4-Farben-Aufnahme mit dem STELLA-Teleskop auf Teneriffa.

5.1.4 Große Weltraummissionen – Das Cosmic-Vision-Programm der ESA

Astrophysikalische Forschung mit Satelliten findet in Europa zum Großteil über das Programm der ESA statt, ergänzt durch nationale und bilaterale Projekte, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden. Es umfasst insbesondere das Weltraumteleskop Hubble, das Röntgenteleskop XMM-Newton, das Gammastrahlenobservatorium INTEGRAL und die Himmelsdurchmusterung Gaia. Für Astrophysikerinnen und Astrophysiker in Europa ist von besonderer Bedeutung, dass die ESA als europäischer Partner am James Webb Space Telescope der NASA beteiligt ist. Das JWST wird ab 2018 als Nachfolger des Hubble-Weltraumteleskops mit seinem 6-Meter-Spiegel entscheidend zur Suche nach den frühesten Galaxien und nach Exoplaneten beitragen.

Die künftigen Missionen des Cosmic-Vision-Programms der ESA gruppieren sich in drei Kategorien: große L-Klasse-Missionen, mittelgroße M-Klasse-Missionen und kleine S-Klasse-Missionen. Derzeit werden drei M-Klasse-Missionen der ESA mit signifikanter deutscher

Beteiligung umgesetzt. Solar Orbiter (M1) wird 2019 starten und der Sonne auf weniger als 0,3 Astronomische Einheiten nahekommen. Im Mittelpunkt stehen dabei die Verteilung des Magnetfeldes in hohen Breiten und die Wirkung auf den Sonnenwind, auch Weltraumwetter genannt. Der Durchmusterungssatellit Euclid (M2), der 2021 starten soll, wird die Geometrie unseres Kosmos durch die detaillierte Vermessung der Form und der Rotverschiebung von Galaxien bestimmen und fundamentale kosmologische Informationen über die Dunkle Materie und die Dunkle Energie liefern. Die dritte Mission, PLATO (M3), wird von einer deutschen Wissenschaftlerin geleitet³⁹ und ist eine der zentralen Weltraummissionen für die stellare Astrophysik. Mit PLATO sollen vor allem erdähnliche Planeten in der bewohnbaren Zone anderer Sterne entdeckt und charakterisiert werden. Der Start der Mission ist für 2026 geplant. Die beiden L-Klasse-Missionen Athena (Röntgenobservatorium, L2, Start 2028) und LISA (Gravitationswellenobservatorium, L3, Start Mitte der 2030er-Jahre) werden in der folgenden Dekade weiterentwickelt und gebaut.



Karte der Sterndichte in unserer Milchstraße, erstellt aus Daten des Gaia-Satelliten der ESA.

³⁹ Vgl. Seite 43.



Abb 5.1: Weltkarte mit den Standorten wesentlicher erdgebundener Observatorien sowie weltraumgestützter Observatorien mit deutscher Beteiligung.

Erdgebundene Observatorien:

1. Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST), USA
2. Large Binocular Telescope (LBT), USA
3. Hobby-Eberly Telescope (HET), USA
4. Low Frequency Array (LOFAR), Niederlande
5. 100-m-Radioteleskop, Deutschland
6. AJT, Karl-Schwarzschild-Observatorium, Deutschland
7. 2-m-Teleskop „Fraunhofer“, Deutschland
8. IRAM, Plateau de Bure Interferometer, jetzt NOEMA, Frankreich
9. IRAM, 30-m-Millimeter-Teleskop, Spanien
10. Calar Alto (CAHA), Spanien
11. GREGOR Sonnenteleskop, Teneriffa
12. La-Silla-Observatorium und 2,2-m-Teleskop der MPG, Chile
13. Very Large Telescope (VLT), Chile
14. Extremely Large Telescope (ELT), Chile
15. Atacama Large Millimeter Array (ALMA), Chile
16. Southern African Large Telescope (SALT), Südafrika
17. MeerKAT, Südafrika

Weltraumgestützte Observatorien:

- a) eROSITA b) SOFIA
- c) SOHO d) Gaia
- e) XMM-Newton f) Euclid
- g) PLATO h) INTEGRAL
- i) LISA j) Solar Orbiter
- k) JWST l) Athena

5.1.5 Mittelgroße Weltraummissionen – Das nationale Weltraumprogramm des DLR



SOFIA – Das Stratosphärenobservatorium für Infrarotastronomie des DLR und der NASA.

ESA-Satellitenmissionen in den verschiedenen Energiebereichen sind mittlerweile so komplex geworden, dass zwischen zwei Missionen eines Teilgebiets der Astrophysik inzwischen 30 Jahre und mehr vergehen. Um ein Beispiel zu nennen: Der ESA-Röntgensatellit XMM-Newton startete 1999, für die Nachfolgemission Athena ist derzeit der Start für 2028 geplant. Diese Zeiträume übersteigen die Karrierelaufzeit einer Berufsastronomin oder eines Berufsastronomen. Es ist schwierig, kritisches Know-how zu halten, wenn Spezialistinnen und Spezialisten keine Weltraummission und ihre wissenschaftliche Auswertung aktiv erleben. Das nationale Weltraumprogramm schließt diese Lücke durch die Unterstützung von nationalen oder bilateralen Missionen. Ihm kommt deshalb eine entscheidende Bedeutung bei der Technologieentwicklung und Kompetenzerhal-

tung zu. Das nationale Weltraumprogramm wird wie die deutschen Beteiligungen am ESA-Programm über das DLR-Raumfahrtmanagement in Bonn vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie finanziert.

Das Stratosphärenobservatorium SOFIA ist eine Kooperation des DLR mit der NASA. Es besteht aus einem 2,7-m-Teleskop für den ferninfraroten Wellenlängenbereich an Bord einer speziell für den Einsatz in der Stratosphäre umgerüsteten Boeing 747. Im Gegensatz zu Weltraummissionen im Ferninfraroten, deren Dauer durch den Vorrat an flüssigem Helium als Kühlmittel auf wenige Jahre beschränkt ist, ist SOFIA auf eine Laufzeit von mindestens 20 Jahren angelegt. Den deutschen Astronominen und Astronomen steht die gesamte Palette der SOFIA-Instrumente

zur Verfügung. Das Observatorium arbeitet seit 2014 im Vollbetrieb, die Instrumentierung wird weiterhin kontinuierlich erneuert, eine zentrale Besonderheit des Projekts. Mit dem Ferninfrarotspektrometer upGREAT hat die deutsche Seite das enorme Entwicklungspotenzial beispielhaft genutzt.

Das Röntgenteleskop eROSITA an Bord des russischen Satelliten Spektrum-Röntgen-Gamma soll im September 2018 von Baikonur starten und über einen Zeitraum von vier Jahren systematisch den Himmel im Röntgenbereich durchmustern. Darauf wird eine mehrjährige Phase mit pointierten Beobachtungen folgen. Mit Hilfe von eROSITA sollen zentrale Fragen bearbeitet werden, etwa zur Entwicklung von Galaxienhaufen, von aktiven Galaxien und von deren zentralen Schwarzen Löchern. eROSITA wird mehr als 100.000 Galaxienhaufen entdecken, darunter alle im beobachtbaren Universum erwarteten massereichen Haufen, und mehr als zwei Millionen aktive Galaxien. Es wird außerdem das erste STAGE-IV-Experiment zur Bestimmung der Eigenschaften der Dunklen Energie sein.

Spätestens mit dem Start von eROSITA 2018 stellt sich die Frage nach zukünftigen Initiativen des nationalen Weltraumprogramms, insbesondere im Rahmen von nationalen oder bilateralen Vorhaben. Im Rahmen bewährter Kooperationen mit der NASA bieten zum Beispiel folgende Projekte attraktive Möglichkeiten: der für einen Start Mitte der 2020er-Jahre geplante Durchmusterungssatellit WFIRST als wichtigste künftige Mission im Decadal Report 2010 und künftige Initiativen wie das optische/UV-Weltraumteleskop LUVOIR, die Exoplanetenkamera HabEx, das im ferninfraroten Bereich operierende Origins Space Teleskop oder der Röntgensatellit X-ray Surveyor. Auch die Beteiligung an kleineren Missionen der NASA oder anderer internationaler Partner wie China oder Indien könnte ein Weg sein, mit vergleichsweise geringem finanziellen Aufwand eine tragende Rolle bei zukünftigen Missionen zu spielen. Für all diese bilateralen Missionen gilt es, rechtzeitig Abkommen zu treffen, um die Teilhabe von Wissenschaft und Industrie aus Deutschland bei der Gestaltung und Umsetzung der Missionen zu sichern.

Eine wesentliche Komponente des nationalen Weltraumprogramms ist die begleitende wissenschaftliche Auswertung von Weltraummissionen im Rahmen der extraterrestrischen Verbundforschung Astronomie/Astrophysik. Dieses Programm wurde durch die Denkschrift 1987 angeregt und stellt seit den 1990er-Jahren die wissenschaftliche Ernte signifikanter technischer Investitionen sicher. Alle Antragsteller für dieses Förderprogramm sind schon erfolgreich aus einem konsequenten internationalen Auswahlverfahren hervorgegangen. Der hohe Antragsdruck in der extraterrestrischen Verbundforschung Astronomie/Astrophysik zeugt von der hohen Wettbewerbsfähigkeit der Antragstellerinnen und Antragsteller aus Deutschland. Andererseits können dadurch leider auch viele Projekte nicht gefördert werden, die erfolgreich aus dem internationalen Wettbewerb hervorgegangen sind. Hier könnte mit relativ geringen zusätzlichen Mitteln die wissenschaftliche Ausbeute deutlich vergrößert werden.

Bei der künftigen Ausrichtung der extraterrestrischen Verbundforschung Astronomie/Astrophysik sollte zudem geklärt werden, wie dieses bewährte Programm auf Durchmusterungsmissionen mit Satelliten wie eROSITA, Gaia, PLATO oder Euclid angewendet werden kann. Bei Durchmusterungen existiert kein Antragsverfahren, mit dem entschieden wird, welche Quellen bei der systematischen Durchmusterung des Himmels beobachtet werden sollen. Beobachtungsanträge können somit nicht als Grundlage für Entscheidungen über Fördergesuche für diese Projekte dienen.

5.1.6 Laborastrophysik

Labordaten bilden die Grundlage für die astrophysikalische Interpretation von Beobachtungen und deren Modellierung. Unser Verständnis der Sternatmosphären, des interstellaren Mediums und der heißen Plasmen im Weltraum basiert zu großen Teilen auf einer genauen Kenntnis der mikrophysikalischen Eigenschaften und Prozesse von Atomen, Ionen und Molekülen. Nur mit Laborexperimenten können wir die charakteristischen Spektren von Emission und Absorption und die Stoßwirkungsquerschnitte von Atomen, Ionen, Molekülen und interstellaren Staubteilchen bestimmen. Ebenfalls nur im Labor können wir Reaktionsraten in chemischen Netzwerken, Stoß- und andere Wechselwirkungsprozesse für Strahlungstransportrechnungen und Wachstumsprozesse in protoplanetaren Scheiben erforschen. Im kernphysikalischen Bereich führen Labordaten zu einem besseren Verständnis der nuklearen Eigenschaften von Atomkernen und der Wirkungsquerschnitte und Reaktionsraten von Kernprozessen. Mit Dynamoexperimenten werden magnetohydrodynamische Instabilitäten untersucht, wie sie im Sterninneren vorkommen.

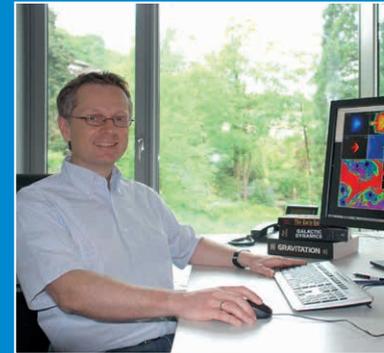
In Deutschland hat sich ein erfolgreiches Netzwerk von Gruppen etabliert, die Laborastrophysik betreiben. Das Erstellen und Pflegen von Datenbanken mit spektroskopischen Daten und Reaktionsraten sind langfristige Infrastrukturaufgaben, deren Bedeutung im Rahmen des ASTRONET-Prozesses der Europäischen Union hervorgehoben wurde. Der Nobelpreis für die Entdeckung der Fullerene ist ein prominentes Beispiel für Fälle, in denen laborastrophysikalische Erkenntnisse auch für die Physik oder Chemie relevant sind. Trotzdem haben die Laborastrophysik-Gruppen zunehmend Schwierigkeiten, im Rahmen von Projektförderungen nachhaltige Fördermittel zu gewinnen, da ihre Forschung eher als Dienstleistung für die Astrophysik denn als eigenständige Grundlagenforschung angesehen wird. Hier gilt es, Instrumente zu etablieren, mit denen die infrastrukturellen Aktivitäten der Laborastrophysik auch außerhalb der oft sehr begrenzten Grundausrüstung der Universitäten nachhaltig gefördert werden.

5.1.7 Großskalige massiv-parallele Computersimulationen

Nahezu alle Prozesse im Universum sind komplex miteinander verbunden. Viele Strukturen entstehen durch Wechselwirkungen mehrerer Komponenten und können deshalb nicht a priori durch wenige zentrale physikalische Grundprinzipien verstanden werden. Nur mit aufwendigen Computersimulationen ist es möglich, die inzwischen enorm detaillierten Beobachtungen der astrophysikalischen Forschung einzuordnen und zu verstehen. Astrophysikalische Simulationsrechnungen gehören deshalb zu den rechenintensivsten Anwendungen in regionalen, nationalen und europäischen Höchstleistungsrechenzentren. Auch für die Definition von Satelliten und Instrumentierungen und für die Gestaltung großer, oft mehrjähriger Beobachtungskampagnen werden Computersimulationen immer wichtiger. Nur durch sie wird eine effektive und zielgerichtete Datengewinnung erreicht. Obwohl die physikalischen Prozesse ext-

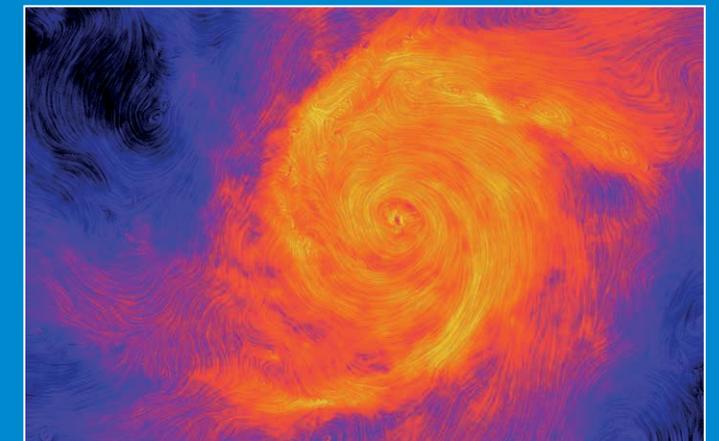
rem komplex miteinander verknüpft sind, müssen die entsprechenden Computerprogramme hochgradig parallelisiert werden, um die vorhandene Infrastruktur der Höchstleistungsrechenzentren optimal zu nutzen. Das hierfür notwendige Know-how geht weit über die Kenntnisse von Astrophysikerinnen und Astrophysikern hinaus. Sie benötigen Spezialisten, die sie bei der Programmentwicklung und -anwendung sowie in der Handhabung und Analyse der Daten unterstützen.

Herausforderung Exaccomputing



Prof. Dr. Volker Springel ist seit 2010 Professor für Theoretische Astrophysik an der Universität Heidelberg und am Heidelberger Institut für Theoretische Studien. Er forscht auf dem Gebiet der numerischen Astrophysik, insbesondere zur Entstehung kosmischer Strukturen unter dem Einfluss von Dunkler Materie und Dunkler Energie. Volker Springels Arbeiten wurden mit zahlreichen Preisen ausgezeichnet, darunter der Otto-Hahn-Medaille der Max-Planck-Gesellschaft (2000), dem Heinz Maier-Leibnitz-Preis der DFG (2004) und dem Klung-Wilhelmy-Weberbank-Preis (2010).

„Der rasante Fortschritt der Computertechnologie hat die Möglichkeiten des wissenschaftlichen Rechnens in ungeahnter Weise erweitert. Noch Anfang der 1960er-Jahre hätte man für die Rechenleistung von 1 Gflop/s mehr als 1000 Milliarden US-Dollar ausgeben müssen, heute kostet sie nur noch wenige Cent. Astrophysikalische Grundlagenforschung gehört derzeit zu den Hauptnutzern von parallelen Höchstleistungsrechnern. Simulationen in der Astronomie erfordern hohe Rechenleistung, schnelle Kommunikationsnetzwerke, große Hauptspeicher und die Bewältigung extremer Datenmengen. Die besonderen Anforderungen astronomischer Simulationen können daher die Entwicklung neuer Hard- und Software sowie innovative numerische Verfahren in der angewandten Mathematik beschleunigen. Aktuelle Supercomputer erreichen in der Spitze annähernd 100 Petaflop. Gegen Ende der Dekade wird das erste System mit Exaflop-Kapazität erwartet. Diese Superrechner können wissenschaftliche Durchbrüche in der multi-Skalen- und multi-Physik-Modellierung astrophysikalischer Systeme erzielen. Allerdings ist klar, dass sich diese Rechenleistung nur bei extrem hoher Parallelität abrufen lässt. Das setzt vollkommen neue Simulationsverfahren voraus, die nur aus einer verstärkten Zusammenarbeit zwischen Forschenden in der Astrophysik, Mathematik und Informatik entstehen können.“



Diese kosmologische Simulation der Entstehung einer Galaxie von der Größe der Milchstraße verdeutlicht die Struktur des Magnetfeldes. Die Riffelung zeigt die Richtung der Feldlinien und die Farbskala kodiert die Feldstärke. Die Magnetfelder werden in der Frühphase der Galaxienentstehung durch einen kleinskaligen turbulenten Dynamo exponentiell verstärkt, bis der magnetische Druck im interstellaren Gas die Größe des thermischen Drucks erreicht.

5.1.8 Big Data, Data-Mining und Virtuelles Observatorium

Astronomische Forschung umfasst heute verschiedene Wellenlängen- und Energiebereiche. Jedes einzelne astronomische Projekt erzeugt erhebliche Mengen wissenschaftlicher Daten. Die Datenmengen nicht weniger Projekte liegen sogar im Peta- und Exabyte-Bereich, etwa beim LSST, das alle fünf Tage den kompletten Südhimmel ablichten wird, oder bei den riesigen Antennenfeldern des SKA. Sie liegen am Rande dessen, was sich derzeit technologisch und finanziell handhaben lässt. Das gleiche gilt für komplexe Simulationsrechnungen, mit deren Ergebnissen diese Daten konfrontiert werden.

Um diese Projekte zum Erfolg zu führen, sind neue Konzepte zur Datenübertragung und -speicherung notwendig. Die hierbei entwickelten Methoden für Big Data haben großes Transferpotenzial für andere Bereiche der Wissenschaft, aber auch für verschiedene Bereiche der Gesellschaft und sind deshalb ein interessantes Feld für die Digitale Agenda der Bundesregierung.

Astronomische Daten haben keinen unmittelbaren marktwirtschaftlichen Wert. Auch aus Sicht des Datenschutzes sind sie im Gegensatz etwa zur Medizin oder den Sozialwissenschaften meist unkritisch. Sie können deshalb als ideale Forschungsumgebung zur Entwicklung neuer Konzepte zur Übertragung, Durchforstung, Auswertung und Speicherung von Daten dienen. Neue Methoden für die Handhabung und Auswertung astronomischer Daten

sind dadurch ein Inkubator für Innovation in der Informationstechnologie, der Data Science und in angrenzenden Technologiebereichen. Das bedeutende neue Forschungsfeld des Data-Mining könnte zum Beispiel durch Data-Analytics-Labore gestärkt und systematisiert werden, in denen Forschende der Astrophysik, Mathematik und Informatik gemeinsam Algorithmen für verschiedene Anwendungen entwickeln.

Im weltweiten Virtuellen Observatorium werden die astronomischen Daten zusammengeführt und einer kombinierten und übergreifenden Analyse zugänglich gemacht. Das VO erlaubt es Astronominen und Astronomen, sehr verschiedenartige Datenzentren ohne Barrieren transparent zu befragen. Es bietet neue leistungsstarke Analyse- und Visualisierungsmethoden und ermöglicht Datenzentren ihre Daten, Dienste und Services in einem Standardsystem zur Verfügung zu stellen. Die Idee des Virtuellen Observatoriums ist kein spezifisches Softwaresystem. Es soll vielmehr eine Rahmenstruktur sein, in der Datenzentren ihre Dienste anbieten können und Softwareentwickler eine Vielzahl von Werkzeugen, Interfaces und Programmen zur Analyse und Visualisierung. Die Nutzer können all dies innerhalb der Rahmenstruktur effizient nutzen, ihre Forschungsarbeit wird erleichtert und unterstützt. Auch hier kann die Astronomie beispielhaft für viele andere Wissenschaftsdisziplinen wirken.

Projekt	Rohdaten	Archivdaten	Betriebsbeginn
IllustrisTNG Simulation	1GB/s	bis zu 18 PB/ Simulation	2017
LOFAR	20 GB/s	7 PB/a	in Betrieb
LSST	1 GB/s	35 PB/a	Betrieb ab 2019
MeerKAT	150 GB/s	65 PB/a	Betrieb ab 2017
SKA (1. Ausbaustufe)	2 PB/s	bis zu 300 PB/a	<i>Early Science</i> ab 2021

Tab. 5.1: Datenmengen und Datenraten einiger Projekte und Simulationsvorhaben der Astronomie.

5.2 Strategische Beendigungen

Weltraummissionen sind aufgrund ihrer Spezifika (Vorrat an Kühlmitteln oder Treibstoff) und aufgrund der harschen Bedingungen im Weltraum (Strahlung) meist auf Laufzeiten von einigen Jahren beschränkt. Missionen mit deutlich längeren Lebensdauern als zehn Jahre sind eher die Ausnahme. Ein jüngeres Beispiel für die begrenzte Lebenszeit von Weltraummissionen ist das Herschel-Weltraumteleskop. Es hat von 2009 bis 2013 im ferninfraroten Bereich Phänomene beobachtet, die von Zwergplaneten in unserem Sonnensystem bis zu Galaxien im frühen Universum reichen. Auch bei solchen Langzeitmissionen findet regelmäßig eine gründliche Überprüfung statt, in der die wissenschaftliche Leistungsfähigkeit mit den entstehenden Kosten ins Verhältnis gesetzt wird. Missionen, deren herausragende wissenschaftliche Leistungsfähigkeit nicht mehr belegt werden kann, werden beendet. Eine Konsequenz davon ist allerdings, dass es nach dem Ende des Hubble-Weltraumteleskops, des Röntgensatelliten NuSTAR- und der Fermi-Missionen keine Beobachtungsmöglichkeiten mehr im ultraviolett und im harten Röntgen- und Gammabereich geben wird.

Bei erdgebundenen Observatorien werden schon allein wegen der erheblichen Baukosten langfristige Nutzungszeiten von 40 Jahren und mehr anvisiert. Da an jedem Observatorium nur eine begrenzte Zahl von Kameras und Spektrografen gleichzeitig betrieben werden kann, werden ältere Instrumentierungen regelmäßig überprüft, erneuert oder außer Betrieb gesetzt. Ein Beispiel

dafür ist das Programm der ESO für die zweite Generation der Instrumente am VLT. Aber auch auf der Ebene ganzer Observatorien gibt es Veränderungen. So verschob sich etwa mit der Inbetriebnahme von Teleskopen der 8- bis 10-Meter-Klasse wie dem Very Large Telescope oder dem Large Binocular Telescope das Anwendungsprofil. Teleskope der 3- bis 5-Meter-Klasse werden nun mit Blick auf die 30- bis 40-Meter-Teleskope meist aus der Förderung genommen. Solche Entscheidungen fallen den betreibenden Organisationen durchaus schwer, weil die kleineren Teleskope nach wie vor wissenschaftlich produktiv sind. Ein Beispiel ist die beendete Beteiligung der Max-Planck-Gesellschaft am Observatorium auf dem Calar Alto 2018, ein weiteres die zunehmende Ausrichtung des La-Silla-Observatoriums der ESO als Serviceanbieter für kleinere Projekte einzelner Universitäten oder Konsortien durch das *Hosting Programme*.

Es ist zu erwarten, dass bei den 8- bis 10-Meter-Teleskopen wiederum eine vergleichbare Neuorientierung stattfinden wird, wenn das Extremely Large Telescope gegen Ende des kommenden Jahrzehnts in den Routinebetrieb übergehen wird. Diese Neuorientierung zeichnet sich schon heute ab, indem etwa Instrumentierungen für das LBT nicht mehr durch die Verbundforschung gefördert werden, zugunsten von Instrumentierungen für das ELT. Die astronomische Fachgemeinschaft wird sich dieser strategischen Herausforderung im kommenden Jahrzehnt stellen.

5.3 Förderung der Beteiligung an Aufbau und Betrieb von Infrastrukturen

Deutsche Forschungseinrichtungen spielen zentrale und führende Rollen bei Aufbau und Erweiterung internationaler Forschungseinrichtungen, insbesondere im Rahmen internationaler Organisationen wie der ESO und ESA. Beide Organisationen betreiben modernste Forschungsinfrastrukturen, die von deutscher Seite maßgeblich durch eine Kombination aus institutioneller Förderung und von den zuständigen Ministerien koordinierter Projektförderung, wie zum Beispiel der Verbundforschung, unterstützt wird. Problematisch sind bei der Projektförderung jedoch oft die kurzen Projektlaufzeiten (typischerweise 3 Jahre) im Vergleich zu den langen Bauzeiten der Infrastrukturen (typischerweise 10-15 Jahre), was es den Projektpartnern erschwert, Spezialistinnen und Spezialisten zu halten. Das neue Rahmenprogramm „Erforschung von Universum und Materie“ (ErUM) des BMBF mit seiner 10-Jahresperspektive wird hier den Anforderungen der Wissenschaft hervorragend gerecht.

Deutlich schwieriger ist die Situation bei Infrastrukturen, die nicht von einzelnen Organisationen wie der ESO getragen werden, sondern durch einen Verbund von Interessenten. Die Vielzahl der wissenschaftlichen Forschungs- und Förderorganisationen in Deutschland (Max-Planck-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft, Leibniz-Gemeinschaft, DFG, Universitäten, Bundes- und Landesministerien) haben es ermöglicht, in Deutschland fruchtbare und breit gefächerte astrophysikalische Forschungsaktivitäten aufzubauen. Viele große Projekte der letzten Jahre haben besonders davon profitiert, dass sich die verschiedenen Rahmenbedingungen der Finanzierungsschienen in ihren Stärken oft gut ergänzen. Die Vielfalt der Förderungsmöglichkeiten erfordert allerdings eine nachhaltig gute Kommunikation und Koordination der verschiedenen Programmaspekte und damit eine Abstimmung zwischen den verschiedenen Wissenschaftsorganisationen ebenso wie zwischen den jeweils involvierten Ministerien.

Der Rat deutscher Sternwarten sieht hier zwei zentrale Handlungsfelder:

1. Koordination von weltraum- und bodengestützter Forschung:

Bis 2005 waren die boden- und weltraumgestützten Forschungsprogramme auf nationaler Ebene im Bundesministerium für Bildung und Forschung verankert, entweder im Rahmen der institutionellen Förderung oder im Rahmen der Projektförderung. Mit der Verlagerung des Weltraumprogramms zum Bundesministerium für Wirtschaft und Energie ist die vorausschauende Koordination beider Programme noch wichtiger geworden. Dies betrifft die Festlegung klarer und langfristiger Zuständigkeiten, zum Beispiel bei den zukünftigen Instrumentierungsgenerationen für SOFIA. Da der Erfolg von Satellitenmissionen auch maßgeblich von der Vor- und Nachbereitung mit erdgebundenen Teleskopen abhängt, ist für den größtmöglichen wissenschaftlichen Erfolg außerdem eine enge Abstimmung zwischen den verschiedenen Finanzierungsquellen und Programmen für boden- und weltraumgestützte Astrophysik unabdingbar.

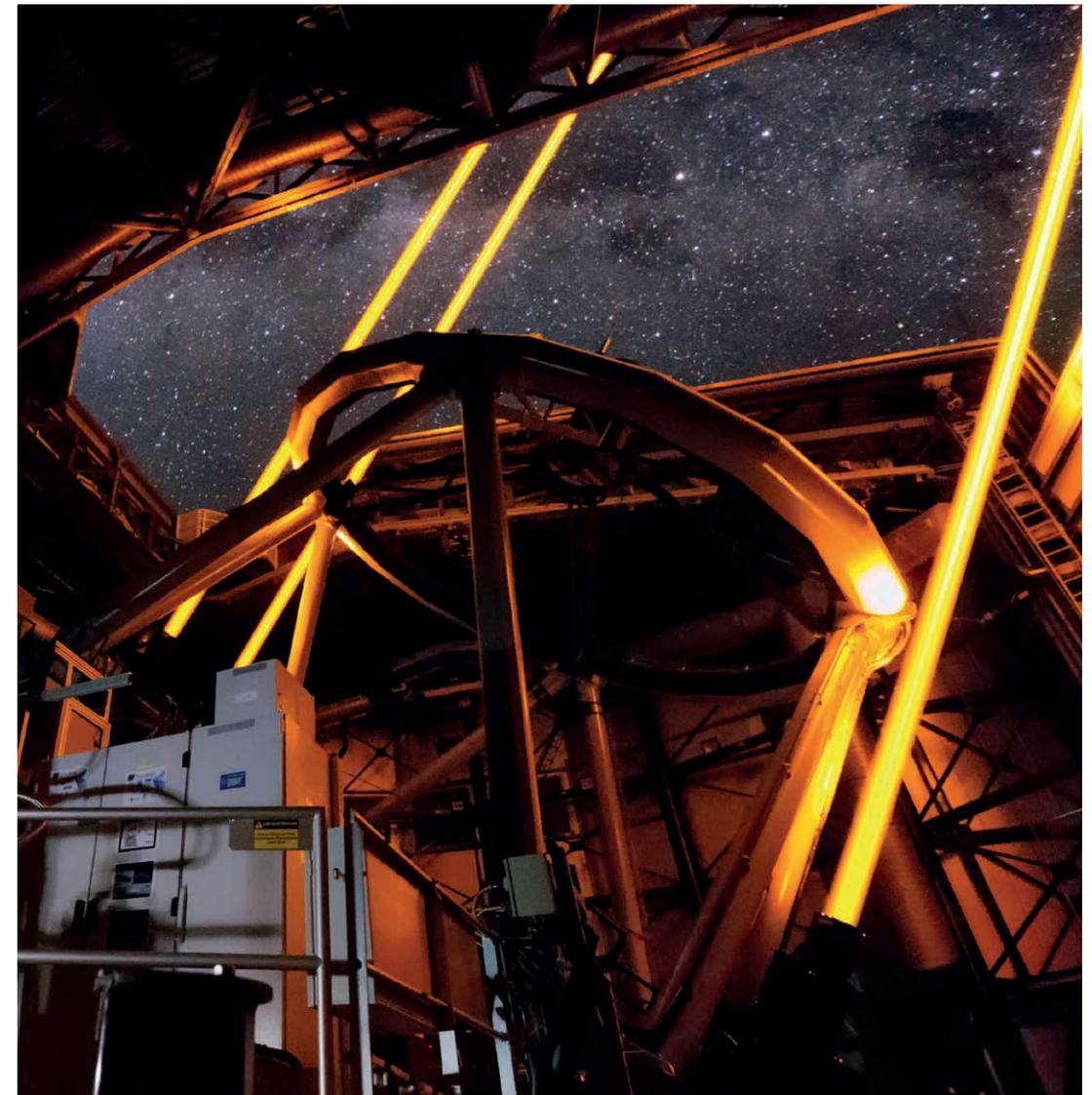
2. Langfristige Finanzierung des Betriebs von astronomischen Großprojekten außerhalb von Organisationen wie ESO und ESA:

Während auf der Ebene der außeruniversitären Forschungsinstitute die Zuständigkeiten klar geregelt und vorhanden sind, ist die Beteiligung universitärer Partner nicht nachhaltig gesichert. Sie handeln auf Basis einer knappen Grundfinanzierung und der hauptsächlich projektorientierten Förderung. Dies betrifft den Betrieb künftiger Großprojekte wie SKA, LSST und CTA, die Beteiligungen an internationalen Forschungsvorhaben wie SDSS, LOFAR und LBT, die Nutzung von 3-m- bis 5-m-Teleskopen für koordinierte Programme wie CALIFA und CARMENES sowie die nachhaltige Unterstützung nationaler Forschungsinfrastruktu-

ren wie die ALMA Regional Centers und das Virtuelle Observatorium. Auch die langfristige Förderung von Laborastrophysik und die nachhaltige Pflege komplexer Softwareprodukte wie etwa multidimensionaler Simulationscodes fällt unter diesen Punkt.

Bereits 1987 empfahl die Denkschrift eine verbesserte Koordinierung zwischen den verschiedenen Förderschienen und Forschungsorganisationen. Ziel war es, die koordinierte Beteiligung deut-

scher Institutionen an internationalen Großvorhaben zu sichern und den wissenschaftlichen Ertrag der signifikanten Investitionen von Bund und Ländern zu optimieren. Die Forschungslandschaft hat sich in den vergangenen drei Dekaden zunehmend ausdifferenziert, deshalb ist eine solche Koordination heute umso dringlicher. Der Rat deutscher Sternwarten ist gerne bereit, diesen Prozess mit dem wissenschaftlichen Know-how seiner Mitglieder gestaltend zu unterstützen.



VLT Adaptive Optics Facility während der ersten Beobachtungen mit dem MUSE-Instrument.

5.4 Wissenschaftlicher Nachwuchs und Führungskräfte von morgen

Verwirklichen können wir das in dieser Denkschrift umrissene Programm nur mit exzellent ausgebildeten und hochmotivierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in allen Karrierephasen. Die herausragenden Qualifizierungsmöglichkeiten für junge Promovierende und Postdocs in den astrophysikalischen und technologischen Projekten müssen in der Förderung berücksichtigt werden. Erfahrene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler brauchen klare Karriereoptionen, sowohl für ihre weitere Karriere in der Wissenschaft, etwa durch Tenure-Track-Verfahren, als auch für ihre Karriere außerhalb des akademischen Umfelds, die auf ihrem wissenschaftlichen Know-how aufbauen kann.

Einige der notwendigen Maßnahmen betreffen nicht nur die Astronomie und Astrophysik, sondern auch die Physik und andere Natur- und Technikwissenschaften. Zentrale Handlungsfelder sind hier:

1. Klarere und frühzeitiger einsetzende Karrierepfade in der Wissenschaft:

Das gilt sowohl für universitäre Laufbahnen wie auch für Leitungspositionen an außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Wichtig sind hier Tenure-Track-Modelle, die den Karriereaufstieg in einem System von W1-W2-W3-Professuren ermöglichen. Im Bereich der infrastrukturintensiven universitären Forschung besteht nach wie vor Bedarf an langfristigen Mittelbaustellen, etwa bei der Entwicklung von Instrumentierung für Großteleskope, der Laborastrophysik oder der Entwicklung von neuartigen Softwareverfahren für Simulationen und für das Data-Mining.

2. Wissenschaftlerinnen in der astronomischen und astrophysikalischen Forschung:

Vor allem in Leitungspositionen, aber nicht nur dort, sind Frauen in der Astronomie deutlich unterrepräsentiert, obwohl es in den vergangenen Jahren positive Entwicklungen gab. Zwar ist in der Astronomie der Anteil von Frauen am

wissenschaftlichen Nachwuchs mittlerweile größer als in der Physik generell, er unterscheidet sich aber von Teilgebiet zu Teilgebiet. In manchen Feldern gibt es erfolgreiche Identifikationsfiguren, etwa bei der Erforschung unserer Milchstraße mit spektroskopischen Durchmusterungen. In solchen Bereichen ist das Verhältnis von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern nahezu ausgeglichen. Beim Bau von Instrumentierungen wie Detektoren, Kameras und Spektrografen oder bei der Entwicklung von Software für Simulationen und Data-Mining sind Frauen hingegen nach wie vor nur selten vertreten. Die Fachgemeinschaft will in diesem Bereich weitere Anstrengungen unternehmen.

3. Nachwuchs für die MINT-Fächer bereits in der Schule:

Die Astronomie fasziniert die Öffentlichkeit und kann gerade bei der Gewinnung von Nachwuchs weit über das eigene Forschungsgelände hinaus wirken. Die Fachgemeinschaft engagiert sich deshalb zum Beispiel bei bundesweiten Aktionen wie dem „Girls' Day“, mit Beiträgen zur Lehrerfortbildung und bei der Entwicklung von Unterrichtsmaterial. Sie plant dieses Engagement beizubehalten oder im Rahmen ihrer Mittel auszubauen.

Weitere Handlungsfelder beziehen sich auf die spezifischen Anforderungen der Astronomie und Astrophysik und auf ihre historisch gewachsene Stellung in der deutschen Forschungslandschaft:

1. Astronomie und Astrophysik an Universitäten:

Astronomie und Astrophysik sind in Deutschland sehr stark in der außeruniversitären Forschung verankert, nicht zuletzt, weil bereits in den 1960er-Jahren die Notwendigkeit für große Forschungsinfrastrukturen erkannt wurde.⁴⁰ Betrieben werden Astronomie und Astrophysik insbesondere in der Max-Planck-Gesellschaft und der Leibniz-Gemeinschaft, in den angrenzenden Feldern der Astroteilchenphysik

und der Planetenerforschung auch von den Instituten der Helmholtz-Gemeinschaft, der Zweigstelle des Deutschen Elektronen-Synchrotron in Zeuthen, dem Karlsruher Institut für Technologie und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Es ist dennoch weitgehend gelungen, das gesamte Spektrum der Astronomie und Astrophysik auch an den Universitäten zu etablieren und zu erweitern. So ist eine gesunde Forschungslandschaft entstanden, von einzelnen Lehrstühlen über große Universitätsinstitute bis zur außeruniversitären Forschung. Bei Einzelaspekten beobachten wir jedoch Fehlstellen und negative Entwicklungen. In der Sonnenphysik gibt es beispielsweise keine universitätsfinanzierte Professur. Auch das wichtige Thema der Entdeckung und Charakterisierung von Exoplaneten wird nur an sehr wenigen deutschen Universitäten bearbeitet, besonders im experimentellen und beobachtenden Bereich. Auch bei der astronomischen Instrumentierung ist an manchen Universitäten Zurückhaltung festzustellen, etwa bei Nach- und Neubesetzungen von Professuren. Dabei sind hierfür nicht mehr Ressourcen notwendig als für einen gut ausgestatteten Lehrstuhl der Experimentalphysik.⁴¹ Die Fachgemeinschaft sieht in der breiten Aufstellung der astronomischen Forschung eine besondere Stärke des Standorts Deutschland und hofft, dass diese Breite auch in der Zukunft erhalten bleibt.

2. Personal zur Auswertung von Beoberkungskampagnen:

Daten aus Beoberkungskampagnen an internationalen Observatorien und Satelliten sind ein wertvolles Gut. Eine Beoberkungsnacht an einem 8-Meter-Teleskop oder 10 Stunden mit einem Satellitenteleskop entsprechen einem Wert von etwa 100.000 Euro, die Kosten sind damit ähnlich hoch wie die Personalkosten für eine Wissenschaftlerin oder einen Wissenschaftler pro Jahr. Die Verteilung von Beoberkungszeit erfolgt meist in einem äußerst kompetitiven Verfahren; die Erfolgchancen liegen oft unter 20 Prozent. Die exklusive Nutzung der

Daten ist zudem meist auf ein Jahr beschränkt, was bedeutet, dass kurzfristig wissenschaftliches Personal für die Auswertung gefunden und finanziert werden muss. Wenn die Erfolgsaussichten bei der Zuteilung von Beoberkungszeit unklar sind, werden die Mittel für Personal in diesen Fällen jedoch selten vorab genehmigt. Für die Weltraumforschung wurde, nicht zuletzt auf Empfehlung der Denkschrift 1987, mit der extraterrestrischen Verbundforschung Astronomie/Astrophysik ein jährlicher, dedizierter Antragszyklus für ausgewählte Satellitenteleskope eingeführt. Der RDS empfiehlt zu untersuchen, ob und wie ein analoges, verkürztes Verfahren für die Förderung der wissenschaftlichen Auswertung von genehmigten Beoberkungsprogrammen bei erdgebundenen Großteleskopen umgesetzt werden kann.

⁴⁰ Vgl. die Zusammenfassung der Denkschrift von 1962 in Kapitel 1.

⁴¹ Vgl. Kapitel 2.3



6 Empfehlungen

Zusammenfassend werden hier die Empfehlungen der *Denkschrift 2017* formuliert. Die Empfehlungen gruppieren sich erstens in Empfehlungen zu Forschungsinfrastrukturen am Boden (B1-B5), im Weltraum (W1 und W2) und für Höchstleistungsrechnen und Big-Data-Wissenschaft (H1 und H2), zweitens in Empfehlungen für die Vernetzung (V1-V3) und drittens in Empfehlungen im Bereich von Know-how und Personalentwicklung (K1-K5).

Empfehlungsgruppe 1 – Vorsprung durch Forschungsinfrastrukturen:

Die Astronomie ist eine empirische Wissenschaft. Ihre Messgeräte sind hauptsächlich Teleskope in allen Varianten und für alle Wellenlängenbereiche, sowohl am Boden wie auch als Satelliten im Weltraum. Für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der astronomischen Forschung in Deutschland ist es unabdingbar, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern Zugang zu den internationalen Großforschungsstrukturen zu garantieren – in einem Umfang, der Deutschlands Bedeutung als einer der international führenden Wissenschaftsnationen entspricht.

Dies betrifft für die **erdgebundene Astronomie** insbesondere Beteiligungen an der Europäischen Südsternwarte und an den astrophysikalischen Großprojekten auf der ESFRI-Liste der Europäischen Union. Dazu gibt der Rat deutscher Sternwarten die folgenden Empfehlungen:

B1 Beteiligung an der ESFRI-Landmark ELT:

Die aktive und umfassende deutsche Beteiligung am Bau des europäischen Flaggschiffs, dem 39-m-European Extremely Large Telescope der ESO auf dem Cerro Armazones, ist essenziell für die astronomische Forschung der kommenden Dekade. Dies umfasst insbesondere auch die Instrumentierung des ELT, die maßgeblich von deutschen Forschergruppen mitgestaltet wird, oftmals in führender Rolle.

B2 Weiterentwicklung des La-Silla-Paranal-Observatoriums und des ALMA-Observatoriums:

Das La-Silla-Paranal-Observatorium ist mit dem Very Large Telescope und dem Interferometer VLTI das für die nächste Dekade weltweit führende optische Observatorium, das Antennenfeld ALMA auf der Hochebene Chajnantor ein einzigartiges Observatorium im Millimeter- und Submillimeter-Bereich. Empfohlen wird insbesondere die Förderung der dritten Generation von Detektoren, Empfängern und Spektrografen. Damit werden die Voraussetzungen für Spitzenforschung in Astronomie und Astrophysik mit der gesamten thematischen Breite geschaffen.

B3 Beteiligung am SKA:

Empfohlen wird die Beteiligung Deutschlands am Square Kilometre Array als wesentlichem internationalen Großprojekt im Radiowellenbereich, das sich zudem als *Landmark* der ESFRI-Liste bereits in der Umsetzung befindet und zeitlich dem ELT nachgelagert ist.

B4 Großobservatorien auf der nördlichen Hemisphäre mit Zugang für RDS-Institute:

Der Rat deutscher Sternwarten begrüßt die Initiativen der betreibenden Institutionen für den Ausbau des Radioteleskops NOEMA auf dem Plateau de Bure sowie den Betrieb und die Modernisierung des Large Binocular Telescopes in Arizona, des Antennenfelds LOFAR in Mitteleuropa und des Radioteleskops Effelsberg. Die Forschungsinfrastruktur für die Astronomie und Astrophysik in Deutschland wird dadurch wesentlich gestärkt.

B5 Beteiligung am Sonnenteleskop EST:

Das EST wird zukünftig im Bereich der Sonnenphysik die zentrale Ressource sein, mit großer Bedeutung auch für die Sternphysik. Es wurde jüngst in die ESFRI-Liste als Projekt in Planung aufgenommen.

Weiterhin empfiehlt der RDS die Unterstützung des Cherenkov Telescope Array. Dieses ESFRI-Projekt befindet sich in der Planung und ist von zentraler Bedeutung für die Astroteilchenphysik und die Astrophysik bei höchsten Energien.

Die Prioritätensetzung steht im Einklang mit den 2009 veröffentlichten strategischen Zielen der ASTRONET-Roadmap für die erdgebundene astrophysikalische Forschung auf EU-Ebene. Auch das Rahmenprogramm „Erforschung von Universum und Materie“ (ErUM) des BMBF stellt die Bedeutung dieser Infrastrukturen für die Grundlagenforschung in Deutschland heraus. Die Empfehlungen berücksichtigen die besonderen Stärken der astronomischen Forschung in Deutschland. Gemäß der ASTRONET-Roadmap sind ELT und SKA große Infrastrukturen, mit denen die Anforderungen astronomischer Forschung in der vollen Breite bedient werden, während CTA und EST als Infrastrukturen mittlerer Größenordnung aufgeführt sind, die insbesondere einer bestimmten Fachgemeinschaft zugutekommen.

Im Bereich der **weltraumgestützten Astrophysik** empfiehlt der Rat deutscher Sternwarten die folgenden Maßnahmen:

W1 Projekte der Europäischen Weltraumorganisation ESA:

Die Prioritäten liegen auf dem Infrarot-Weltraumteleskop JWST, das 2018 in Betrieb gehen wird, auf dessen wissenschaftlicher Nutzung sowie auf den mit signifikanter deutscher Beteiligung entwickelten Missionen des Cosmic-Vision-Programms der ESA. Bei den großen L-Klasse-Missionen sind dies das Röntgenteleskop Athena (L2, Start 2028) und das Gravitationswellenexperiment LISA (L3, Start ca. 2035). Bei den mittelgroßen M-Klasse-Missionen sind es die Sonnensonde Solar Orbiter (M1, Start 2019), die Infrarot-Durchmusterung Euclid (M2, Start 2021) und die Exoplanetenmission PLATO (M3, Start 2026). Zudem sollten Beteiligungen deutscher Gruppen an den Kandidaten zu den Missionen M4 und M5 unterstützt werden, sofern sie ausgewählt werden.

W2 Nationale und bilaterale Weltraummissionen:

Eine Fortführung des nationalen Weltraumprogramms mit Unterstützung nationaler und bilateraler Missionen ist unabdingbar zur Wahrung des enormen technischen Know-hows aus der Arbeit der vergangenen Jahrzehnte. Das nationale Weltraumprogramm sichert die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands insbesondere mit Blick auf die sehr langen Entwicklungszeiten von Weltraummissionen. Mit dem Start der deutsch-russischen eROSITA-Mission 2018 und dem Beginn ihrer wissenschaftlichen Nutzung gewinnt die Sicherung bilateraler Beteiligungen an künftigen Missionen an Dringlichkeit, etwa im Programm der NASA oder der nationalen Weltraumorganisationen Chinas, Frankreichs oder Japans. Für das Infrarot-Observatorium SOFIA findet im Frühjahr 2019 der erste *Senior Review* durch die NASA statt. Im Anschluss an den *Review* wird es dringend notwendig werden, das von den wissenschaftlichen Instituten getragene Instrumentierungsprogramm zu vervollständigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Kosten eines solchen Programms denen einer Weltraummission ähneln.

Eine überregionale Infrastruktur für **Hochleistungsrechnen und Big Data** ist notwendig für die Vorbereitung und Analyse der astronomischen Großvorhaben am Boden und im Weltraum sowie für die zum theoretischen Verständnis unabdingbaren Simulationsrechnungen. Deutschland hat im Bereich Hochleistungsrechnen und Big Data in den letzten Jahrzehnten entscheidende Akzente gesetzt, nicht nur in der Astrophysik. Der RDS unterstützt daher die Digitale Agenda der Bundesregierung und empfiehlt:

H1 Hochleistungsrechenzentren:

Die nationalen und europäischen Zentren für Hoch- und Hochleistungsrechner müssen als Schlüsselressource für die Grundlagenforschung ausgebaut und systematisch mit den regionalen und lokalen Hochleistungsrechnern in Hochleistungsnetzwerken und Cloudstrukturen vernetzt werden.

H2 Big Data:

Die Hoch- und Hochleistungsrechenzentren müssen darüber hinaus weiterentwickelt werden zu einer eng vernetzten Hochleistungsdateninfrastruktur für anspruchsvollste Anwendungen im Data-Mining.

Beide Empfehlungen gelten nicht spezifisch für die Astronomie, sondern für die naturwissenschaftliche Forschung generell. Astronomische Forschung ist allerdings eines der entwicklungstreibenden Felder und bietet sich als Wegbereiter für neue Entwicklungen und Anwendungen an.

Empfehlungsgruppe 2 – Vorsprung durch Vernetzung:

Astronomische Forschung ist wie kaum ein anderes Forschungsfeld seit jeher international aufgestellt und findet zunehmend im Rahmen großer internationaler Vorhaben statt. Neben internationalen Organisationen wie ESO und ESA organisiert sich die Forschung immer häufiger in großen Konsortien und Verbänden, die sich Betrieb und Durchführung von Projekten durch finanzielle Beteiligungsmodelle teilen. Als Beispiel sei hier das Large Synoptic Survey Telescope genannt, im US-amerikanischen Decadal Report das Projekt höchster Priorität unter den erdgebundenen Observatorien. Auch in der europäischen und deutschen Forschung besteht großes Interesse an seiner wissenschaftlichen Nutzung. Die Nutzung von 3- bis 4-Meter-Teleskopen durch Konsortien für fokussierte, langfristige Forschungsprogramme wird ebenfalls zunehmend über Beteiligungsmodelle realisiert. Sogar bei Großvorhaben wie dem SKA oder dem CTA werden finanzielle Beteiligungsmodelle eingesetzt, insbesondere bei den Betriebskosten.

Der Rat deutscher Sternwarten empfiehlt folgende Maßnahmen:

V1 Gemeinsamer Bau und Betrieb internationaler Großvorhaben:

Die astronomische Forschungslandschaft in Deutschland zeichnet sich durch die strukturelle Vielfalt ihrer Akteure und deren erfolgreiche Zusammenarbeit aus. Vor dem Hintergrund der Bund-Länder-Finanzierungssystematik der deutschen Forschung besteht allerdings seit Langem das Problem, dass sich Universitäten selten an langfristigen und kostenintensiven Nutzungen von Infrastrukturen beteiligen können. Mit geeigneten Finanzierungsinstrumenten könnte die ausgezeichnete Position der deutschen astronomischen Forschung im universitären Bereich nachhaltig gestärkt werden.

V2 Nachhaltige Förderung unterstützender Infrastrukturen:

Zusätzlich sind mittel- und langfristig wirksame Finanzierungsinstrumente notwendig, um strukturelle Serviceangebote zu verstetigen und zu garantieren. Beispiele für solche Serviceangebote sind das deutsche ALMA Regional Center zur Aufarbeitung von Beobachtungsdaten des ALMA-Antennenfelds, das Archiv und die Softwarezentren für LOFAR, die astronomische e-Science-Infrastruktur einschließlich des Virtuellen Observatoriums und das in der ASTRONET-Roadmap anvisierte Astrophysical Software Laboratory, mit dem die Entwicklung und Wartung von komplexen Simulationsplattformen für astrophysikalische Anwendungen gewährleistet werden soll. Von einer solchen Förderstruktur würden auch die Entwicklung und Pflege von Datenbanken profitieren, die für die astrophysikalische Analyse grundlegend sind, zum Beispiel Datenbanken für astrochemische Reaktionen, für atomare und molekulare spektroskopische Daten und für Reaktionsdaten in der nuklearen Astrophysik.

V3 Koordinierung von Programmen am Boden und im Weltraum:

Astronomische Fragestellungen werden zunehmend durch die Kombination verschiedenster Frequenzbereiche und Forschungsmethoden bearbeitet. Wie bei den europäischen Organisationen ESO und ESA ist auch im Rahmen der nationalen Förderung eine engere Abstimmung zwischen der Entwicklung von erdgebundenen Observatorien und ihrer Instrumentierung auf der einen und den Satellitenmissionen auf der anderen Seite angeraten. Empfehlenswert wäre zum Beispiel die

Etablierung erdgebundener Begleitprogramme an mittelgroßen Teleskopen für Weltraummissionen wie Gaia, eROSITA, Solar Orbiter, Euclid und PLATO. Zudem könnten Weltraummissionen in idealer Weise mit den spezifischen Fähigkeiten erdgebundener Observatorien gezielt komplettiert werden. Der RDS steht einer solchen Forschungsplanung gerne beratend zur Seite, zum Beispiel durch die Nominierung von Expertinnen und Experten für die entsprechenden Gremien der beteiligten Forschungs- und Förderorganisationen.

Empfehlungsgruppe 3 – Vorsprung durch Know-how:

Mit den Vorhaben der Empfehlungsgruppen 1 und 2 wird für Astronominen und Astronomen in Deutschland der Zugang zu den weltweit besten Observatorien der 2020er-Jahre gesichert. Durch die Beteiligung von Forschenden an Entwicklung, Planung und Bau dieser Observatorien wird sichergestellt, dass die Geräte und ihre Spezifikationen die wissenschaftlichen Prioritäten deutscher Forschungseinrichtungen berücksichtigen. Mit der Beteiligung geht darüber hinaus oft ein exklusiver Zugang zu den Daten und Instrumenten einher, etwa in Form von Schutzzeiten (*Proprietary Periods*) oder von garantierter Beobachtungszeit (*Guaranteed Time Observations, GTO*). Um das immense Potenzial dieser wissenschaftlichen und geldwerten Ressourcen auch nutzen zu können, bedarf es entsprechender personeller Unterstützung. Dazu gehören projektbezogene Promovierende und Postdocs, denen auf diesem Wege herausragende Qualifizierungsmöglichkeiten geboten werden, sowohl für den akademischen wie den nichtakademischen Bereich. Den besten Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern müssen klare Karriereperspektiven geboten werden. Gerade in Instituten der Astrophysik werden dauerhaft angestellte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die langfristige Sicherung von Know-how von zentraler Bedeutung sein, etwa bei der Instrumentierung und Unterhaltung von Großforschungsanlagen, bei der Koordinierung von Big-Data-Projekten sowie bei der Vernetzung von Beoberkungskampagnen in verschiedenen Wellenlängenbereichen.

Der Rat deutscher Sternwarten empfiehlt folgende Maßnahmen:

K1 Universitätsprofessuren zu astronomischen Schlüsselthemen:

Für eine gesunde astronomische Forschungslandschaft ist es wesentlich, dass die Astrophysik in allen ihren Ausrichtungen (Beobachtung, Theorie und Instrumentierungsbau) und Themen (von der Sonnenphysik bis zur Kosmologie) an den Universitäten mit kritischer Masse vertreten bleibt und ausgebaut wird. Hier besteht zum Teil Nachholbedarf, vor allem in ressourcenintensiven Gebieten. So ist die astronomische Instrumentierung heute nur noch an wenigen Universitäten vertreten. Auch die Suche nach Exoplaneten und deren Charakterisierung als eines der Hauptthemen der Astrophysik in der kommenden Dekade wird in Deutschland an Universitäten vergleichsweise selten betrieben. Forschung in der Sonnenphysik findet derzeit fast ausschließlich außeruniversitär statt. Der RDS empfiehlt den Universitäten, bei der Neu- oder Wiederbesetzung von Lehrstühlen in der Physik und Astronomie neben der Sicherung und dem Ausbau anerkannter Stärken auch diese Potenziale des Forschungsfelds angemessen zu berücksichtigen.

K2 Extraterrestrische Verbundforschung Astronomie/Astrophysik:

Die Sicherung der wissenschaftlichen Auswertung kompetitiv eingeworbener Beobachtungszeiten an Satellitenobservatorien geschieht derzeit vorwiegend über die Förderung der extraterrestrischen Verbundforschung Astronomie/Astrophysik. Doch seit einigen Jahren reichen die Mittel nicht aus, um selbst exzellent beurteilte Forschungsvorhaben unter Leitung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus Deutschland zu unterstützen. Eine Aufstockung des Programms ist daher angeraten. Nur mit einer solchen Förderung wird die breitere Fachgemeinschaft die Observatorien, die aus den Beiträgen zum ESA-Programm und aus dem nationalen Weltraumprogramm finanziert werden, auch angemessen nutzen können.

K3 Etablierung von Big-Data-Analytics-Laboren:

In solchen Laboren können Astronominen und Astronomen zusammen mit Forschenden der Mathematik und Informatik Algorithmen entwickeln für das Maschinenlernen und für künstliche Intelligenz, Datenpipelines, Visualisierungen, Informationstheorie und Ähnliches.

K4 Wissenschaftliche Auswertung von Durchmusterungen aus dem Weltraum und von großen Beobachtungsprogrammen am Boden:

Die aktuellen Planungen der ESA und des nationalen Weltraumprogramms zu astronomischen Satellitenmissionen umfassen viele Durchmusterungsmissionen mit signifikanter deutscher Beteiligung, zum Beispiel Gaia, eROSITA, Euclid und PLATO. Deren Beobachtungsprogramm beruht nicht, wie bisher eher üblich, auf Einzelanträgen. Es sollten geeignete Förderinstrumente zur systematischen Auswertung dieser Durchmusterungsvorhaben etabliert werden. Solche Förderinstrumente ließen sich für die wissenschaftliche Datenanalyse von Großprogrammen an erdgebundenen Observatorien erweitern, etwa für die optimale Nutzung von GTO-Programmen, von sogenannten *Large Programmes* und von *Key Science*-Projekten.

K5 Längere Förderzyklen:

Instrumentierungsvorhaben an großen Observatorien sind langfristige Unternehmungen, oft mit Umsetzungszeiten von 10 bis 15 Jahren von der ersten Konzeptstudie bis zur Inbetriebnahme. In der Weltraumforschung sind die Umsetzungszeiten sogar noch länger. Die Etablierung längerer Förderzyklen von 5 bis 10 Jahren gestattet eine längerfristige Planung, hilft Spitzenpersonal zu binden und sichert somit kritisches Know-how. Die Empfehlung steht im Einklang mit dem Rahmenprogramm „Erforschung von Universum und Materie“ (ErUM) des BMBF, das einen nachhaltigen Prozess bei der Errichtung von Forschungsinfrastrukturen vorsieht, von der Konzeptionierung über Bau und Betrieb bis zu Weiterentwicklung und Erneuerung.

Langfristig kann der Erfolg dieser Maßnahmen jedoch nur gesichert werden, wenn der wissenschaftliche Nachwuchs entsprechende Karrierechancen bekommt, zum Beispiel in Form von unbefristeten und Tenure-Track-Stellen im Mittelbau und von Professuren. Auch sind trotz positiver Entwicklungen Wissenschaftlerinnen in der Astronomie und Astrophysik nach wie vor unterrepräsentiert, insbesondere in Leitungsfunktionen. Diese grundsätzlichen Themen der Personalentwicklung können jedoch nicht für die Astronomie gesondert angegangen werden, sondern müssen im Gesamtkontext der universitären wie außeruniversitären Nachwuchs- und Personalplanung der Wissenschaft gelöst werden.

Astronomie und Astrophysik durchleben eine aufregende Zeit. Der Nachweis erdähnlicher Planeten ist in den kommenden 10 bis 15 Jahren ebenso in Reichweite wie die Entdeckung der Dunklen Materie. Diese Substanz beeinflusst maßgeblich die Entwicklung unseres Universums von einer gleichförmigen Masse nach dem Urknall zur heutigen strukturierten Ordnung. Mit der Dunklen Energie stellt sich der Physik ein derart faszinierendes Rätsel wie seit vielen Jahrzehnten nicht mehr. Alle diese Entdeckungen – so sie denn tatsächlich kommen – können das Bild, das wir von unserer Welt haben, revolutionieren. Mit den in dieser *Denkschrift 2017* vorgestellten Projekten und Vorhaben sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an den Forschungsinstituten in Deutschland hervorragend positioniert, zusammen mit ihren internationalen Partnern diese Erkenntnissuche entscheidend mitzugestalten.



Das Hubble Extreme Deep Field bietet einen Blick tief in den Weltraum hinein.

ANHANG

A. Literaturverzeichnis

Dieses Verzeichnis listet vorherige Denkschriften sowie die Strategiepapiere anderer Organisationen und Länder auf, auf die sich die *Denkschrift 2017* bezieht.

Voigt, Hans-Heinrich et al.: Denkschrift zur Lage der Astronomie, Wiesbaden, Franz Steiner Verlag 1962.

Völk, Heinz, Biermann, Peter et al.: Denkschrift Astronomie im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Zusammenwirken mit dem Rat Westdeutscher Sternwarten. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft, 1987.

Burkert, Andreas et al.: Deutsche Forschungsgemeinschaft, Status und Perspektiven der Astronomie in Deutschland 2003–2016, Denkschrift. Weinheim, Wiley-VCH 2003.

Zeeuw, P. T. de, Molster, Frank J. (Hrsg.): A Science Vision for European Astronomy. ASTRONET 2007.

Bode, Michael F. et al.: The Astronet Infrastructure Roadmap: a Strategic Plan for European Astronomy. ESO 2008.

National Research Council: New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics. Washington, The National Academies Press 2010.

Van Leeuwen, Thed: Bibliometrische Analyse des deutschen Forschungs-Outputs im internationalen Vergleich, Indikatorenbericht 2010. CWTS Hintergrundbericht für das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Center for Science and Technology Studies (CWTS), Universität Leiden, Niederlande 2010.

Bundesministerium für Bildung und Forschung: Erforschung von Universum und Materie – ErUM, Rahmenprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. BMBF 2017.

B. Institute des Rats deutscher Sternwarten (RDS)

Ort	Kürzel	Institut
Bamberg		Dr. Karl Remeis-Sternwarte, Astronomisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg
Berlin	DLR	Institut für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)
	ZAA	Zentrum für Astronomie und Astrophysik der TU Berlin
	EAT	Lehrstuhl für Experimentelle Astroteilchenphysik und Kosmologie der Humboldt Universität Berlin

Ort	Kürzel	Institut
Bielefeld		Fakultät für Physik der Universität Bielefeld
Bochum	AIRUB	Astronomisches Institut der Ruhr-Universität Bochum
	TP4	Institut für Physik, Lehrstuhl IV der Ruhr-Universität Bochum
Bonn	AlfA	Argelander-Institut für Astronomie der Universität Bonn
	MPIfR	Max-Planck-Institut für Radioastronomie
Braunschweig	IGEP	Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik der TU Braunschweig
Dresden		Lohrmann Observatorium Dresden und Professur für Astronomie
Frankfurt		Institut für Theoretische Physik/ Astrophysik der J.W. Goethe-Universität Frankfurt
Freiburg	KIS	Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik
Garching	MPA	Max-Planck-Institut für Astrophysik
	MPE	Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik
		Lehrstuhl für Experimental- und Astro-Teilchenphysik am Physik-Department E15 der Technischen Universität
Göttingen	IAG	Institut für Astrophysik Göttingen
	MPS	Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung
Hamburg	HS	Hamburger Sternwarte, Universität Hamburg
Hannover		Institut für Gravitationsphysik der Leibniz-Universität Hannover
Heidelberg	ZAH	Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, mit den Instituten <ul style="list-style-type: none"> ■ ARI Astronomisches Rechen-Institut ■ LSW Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl ■ ITA Institut für Theoretische Astrophysik
	MPIA	Max-Planck-Institut für Astronomie
	MPIK	Max-Planck-Institut für Kernphysik
Jena	AIU	Astrophysikalisches Institut und Universitäts-Sternwarte Jena
Kiel	ITAP	Institut für Theoretische Physik und Astrophysik der Universität Kiel
Köln		Institut für Astrophysik der Universität Köln
München	USM	Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität München und Universitäts-Sternwarte

Ort	Kürzel	Institut
Potsdam	AIP	Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
	UP	Institut für Physik und Astronomie der Universität Potsdam
	AEI	Albert-Einstein-Institut (MPI für Gravitationsphysik)
Sonneberg		Sternwarte Sonneberg
Stuttgart	DSI	Deutsches SOFIA Institut
Tautenburg	TLS	Thüringer Landessternwarte – Karl-Schwarzschild-Observatorium
Tübingen	IAAT	Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen
Würzburg		Institut für Theoretische Physik und Astrophysik der Universität Würzburg
Zeuthen	DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY-Zeuthen

C. Beteiligung von RDS-Instituten an den verschiedenen Forschungsfeldern der Astrophysik sowie benachbarter Forschungsgebiete

Teilgebiet	Beteiligte RDS-Institute
Astrophysikalisches Teilgebiet	
Sonne, Sterne und ihre Planetensysteme	AlfA, AIP, ARI, Bamberg, DLR, HS, IAAT, IAG, ITA, ITAP, KIS, LSW, MPA, MPIA, MPS, TLS, UP, USM
Kosmischer Materiekreislauf	AlfA, AIP, AIRUB, ARI, DSI, HS, ITA, ITAP, Köln, LSW, MPE, MPIA, MPIfR, MPIK, UP, USM, ZAA
Milchstraße und andere Galaxien	AlfA, AIP, AIRUB, ARI, IAG, ITA, Köln, ITAP, LSW, MPA, MPE, MPIA, MPIfR, TLS, UP, USM
Kosmologie und junges Universum	AlfA, AIP, ARI, Bielefeld, EAT, HS, IAG, ITA, MPA, MPE, MPIA, USM
Extremzustände des Kosmos und fundamentale Astrophysik	AEI, Bamberg, DESY, EAT, Frankfurt, IAAT, LSW, MPA, MPE, MPIfR, MPIK, Würzburg, UP

Teilgebiet	Beteiligte RDS-Institute
Methodisches Teilgebiet	
Optische, UV- und IR-Astronomie	AIP, ARI, Bamberg, DLR, IAAT, IAG, ITAP, KIS, Köln, MPE, MPIA, MPIK, MPS, TLS, UP, USM
FIR, submm- und Radioastronomie	AlfA, AIP, AIRUB, Bielefeld, DSI, Köln, HS, ITA, MPA, MPE, MPIA, MPIfR, Würzburg, TLS
Röntgen und Gammaastronomie	AlfA, AIP, ARI, Bamberg, Bonn, DESY, EAT, HS, IAAT, LSW, MPIK, MPE, IAAT, Würzburg
Laborastrophysik	IGEP, AIU, Köln, MPE, MPIA, MPIK
Hochleistungsrechnen und e-Science	AIP, ARI, Frankfurt, IAAT, IAG, ITA, ITAP, Köln, MPA, MPIA, MPS, Sonneberg, USM, TLS, ZAA
Entwicklung von Messeinrichtungen für erdgebundene Teleskope	AIP, DSI, HS, IAG, ITAP, KIS, Köln, LSW, MPE, MPIA, MPIfR, MPS, TLS, USM
Entwicklung von Messeinrichtungen für Weltraummissionen	AIP, ARI, Bamberg, DLR, DSI, IAAT, Köln, MPE, MPIA, MPIfR, MPS
Benachbarte Forschungsgebiete	
Astroteilchen- und Gravitationsphysik	AEI, ARI, DESY, Dresden, EAT, Frankfurt, Hannover, IAAT, Jena, LSW, MPIfR, MPIK, TP4, TU München, UP
Planetenforschung	DLR, IGEP, MPS

D. Beteiligung von RDS-Instituten an den wesentlichen astronomischen Observatorien

Ort	Kürzel	Inbetriebnahme	Observatorium	Partner
La Silla, Chile		1969	La-Silla-Observatorium	Deutschland
La Silla, Chile	MPG-2.2m	1984	2,2-m-Teleskop der MPG	MPG
Cerro Paranal, Chile	VLT	1998	Very Large Telescope	Deutschland
Cerro Amazonas, Chile	ELT	2024	European Extremely Large Telescope	Deutschland
Chajnantor, Chile	ALMA	2011	Atacama Large Millimeter Array	Deutschland
Chajnantor, Chile	APEX	2005	Atacama Pathfinder Experiment	MPIfR
Chajnantor, Chile	CCAT-prime	2021	Cerro Chajnantor Atacama Telescope	Universitäten Köln und Bonn
Effelsberg, Deutschland		1972	100-m-Radioteleskop Effelsberg	MPIfR
Plateau de Bure, Frankreich	IRAM	1989	Plateau de Bure Interferometer, jetzt NOEMA	MPG
Pico Veleta, Spanien	IRAM	1985	30-m-Millimeter-Teleskop	MPG
Tautenburg, Deutschland	AJT	1960	Karl-Schwarzschild-Observatorium	TLS
Wendelstein, Deutschland		2012	2-m-Teleskop „Fraunhofer“	USM
Dwingeloo, Niederlande	LOFAR	2010	Low Frequency Array	AIB, AIP, Bielefeld, HS, MPIfR, MPA, TLS
Südafrika	MeerKAT	2018	Vorläufer zum Square Kilometer Array (SKA)	MPIfR
Calar Alto, Spanien	CAHA	1975	Deutsch-spanisches Astronomie-Zentrum Calar Alto	MPG
Teneriffa	GREGOR	2012	1,5-m-optisches/IR-Sonnenteleskop	AIP, KIS, MPS
Südafrika	SALT	2005	Southern African Large Telescope	IAG

Ort	Kürzel	Inbetriebnahme	Observatorium	Partner
Ft Davis, TX, USA	HET	1998	Hobby-Eberly Telescope	IAG, USM
Mt Graham, AZ, USA	LBT	2005	Large Binocular Telescope	AIP, MPE, MPIA, MPIfR, ZAH
Maui, HI, USA	DKIST	2019	4-m-Sonnenteleskop	KIS, MPS

E. Beteiligung von RDS-Instituten an den wesentlichen laufenden und künftigen Weltraummissionen

Kürzel	Typ	Startdatum	Partner
Athena	Röntgen	2028	AlfA, Bamberg, IAAT, MPE
eROSITA	Röntgen-survey	2018	AlfA, AIP, Bamberg, IAAT, HS, MPE
Euclid	NIR Survey	2021	AlfA, MPE, MPIA, USM
Gaia	Astrometrie	2013	AIP, Dresden, ARI, MPIA
INTEGRAL	Gammastrahlung	2002	IAAT, MPE
JWST	NIR	2018	MPIA
LISA	Gravitationswellen	2035	AEI
SOFIA	FIR und sub-mm	2011	DSI, Köln, MPIfR
SOHO	Extrem-UV-optisches-Sonnenteleskop	1995	MPS
Solar Orbiter	Sonne	2019	AIP, KIS, MPS
PLATO	Exoplaneten	2026	DLR Berlin, MPS
XMM-Newton	Röntgen	1999	AIP, HS, IAAT, MPE

F. Glossar / Abkürzungsverzeichnis

4MOST – 4-Meter Multi-Object Spectrograph Telescope
Advanced LIGO – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
AG – Astronomische Gesellschaft
ALMA – Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, großes Teleskop-Projekt, Radioteleskop
adaptive Optik (AO) – computergesteuerte, verformbare Spiegel die Verzerrungen der Bilder durch Luftturbulenzen korrigieren
APEX – Atacama Pathfinder Experiment
ASTRONET – Konsortium zur Koordinierung astrophysikalischer Forschungsplanung in der EU
Astrophysical Software Laboratory – Infrastrukturprojekt zur nachhaltigen Förderung der Entwicklung von Simulationssoftware
Athena – Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics, große Weltraummission L2, Röntgenobservatorium, früher XEUS/IXO
BeSSeL – radiointerferometrische Durchmusterung
BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CARMENES – Spektrografen am 3,5-Meter-Teleskop auf dem Calar Alto
CCAT – Cerro Chajnantor Atacama Telescope, ALMA-komplementäres 25-m-Klasse submm-Teleskop, Chile, Terahertz-Wellenlängenbereich
CCAT-prime – Pilotprojekt für das CCAT
CoRoT – Weltraumteleskop zur Sternphysik und zur Suche nach Exoplaneten
CTA – Cherenkov Telescope Array, erdgebundenes Gamma-Strahlen-Observatorium
DKIST – Daniel K. Inouye Solar Telescope, 4m Sonnenteleskop auf dem Haleakalea (Hawaii)
DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EHT – Event Horizon Telescope
ELT – Extremely Large Telescope, großes erdgebundenes optisches 39-m-Teleskop der ESO
ERC – European Research Council, Europäischer Forschungsrat
ERIS – Enhanced Resolution Imager and Spectrograph, Kamera und Spektrograf für das VLT
eROSITA – Röntgenteleskop auf dem Satelliten Spektrum-Röntgen-Gamma
ESA – Europäische Weltraumorganisation, European Space Agency
ESFRI – Europäisches Strategieforum für Forschungsinfrastrukturen
ESO – Europäische Südsternwarte, European Southern Observatory
ESPRESSO – hochauflösender Spektrograf am VLT
EST – geplantes europäisches 4-m-Sonnenteleskop auf Teneriffa
Euclid – ESA M-Klasse Mission, extragalaktische Astrophysik und Kosmologie
European XFEL – Forschungsanlage im Röntgenbereich
EVLA – Extended VLA, Ausbau des Radiointerferometers VLA
Fermi-Mission – Gammasatellit
FORS1 und FORS2 – kombinierte optische/Infrarote Kameras/Spektrografen am VLT
Gaia – Astrometriesatellit, Horizon 2000+
GRAVITY – 2. Generation VLTI-Instrument, Nahinfrarotinterferometer
GREGOR – großes Sonnenteleskop, Teneriffa
GTO – Guaranteed Time Observations, garantierte Beobachtungszeit
HabEx – Habitable Exoplanet Imaging Mission, geplante Exoplanetenmission
Herschel-Mission – Weltraummission der ESA, Satellitenteleskop
HIRES – hochauflösender Spektrograf für das ELT
Hubble – Weltraumteleskop NASA / ESA

IceCube – IceCube South Pole Neutrino Observatory, Neutrino-Observatorium
IllustrisTNG Simulation – Große Computersimulation zur Strukturbildung und Galaxienentstehung im Kosmos
INTEGRAL – Weltraummission der ESA, Gammastrahlenobservatorium
ISO – Weltraummission der ESA
IRAM – Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich
JWST – James Webb Space Telescope
Kepler – Weltraumteleskop zur Exoplanetensuche
LBT – Large Binocular Telescope, Arizona, Spiegelteleskop mit zwei 8,4 Meter großen Hauptspiegeln
LISA – Laser Interferometer Space Antenna, große Weltraummission, L3, Gravitationswellenobservatorium
LOFAR – Low Frequency Array, Radioteleskop
LSST – Large Synoptic Survey Telescope
LUVUOIR – optisches/UV-Weltraumteleskop, NASA
MATISSE – 2. Generation VLTI-Instrument
MeerKAT – Vorläufer des SKA
METIS – Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph, Instrument für den mittleren Infrarotbereich
MICADO – Multi-AO-Imaging-Kamera für tiefe Beobachtungen, astrometrische Infrarotkamera, „first-light“ Instrument für das ELT
MIDI – Interferometer am VLT bis 2015
MOSAIC – Spektrograf am ELT
MUSE – Feldspektrograf am VLT
ngVLA – Next Generation Very Large Array, Ausbau des Radiointerferometers VLA
NOEMA – Millimeterwellen-Radiointerferometer am IRAM
NSF – National Science Foundation
NuStar – Röntgensatellit der NASA
Origin Space Telescope – geplanter FIR-Satellit der NASA
PEPSI – hochauflösender Spektrograf am LBT
Pierre-Auger-Observatorium – Observatorium in Argentinien für hochenergetische kosmische Strahlung
Planck – Weltraumsatellit der ESA zur Erkundung der kosmischen Hintergrundstrahlung
PLATO – ESA M-Klasse Mission, stellare Astrophysik und Exoplaneten, Planetary Transits and Oscillation of stars, Weltraumteleskop
RDS – Rat deutscher Sternwarten
ROSAT – deutscher Röntgensatellit
SKA – Square Kilometre Array, großes bodengestütztes Radioteleskop
SOFIA – US-amerikanisch-deutsches Stratosphärenobservatorium für den kontinuierlichen Zugang zum fern-infraroten Spektralbereich
SOHO – Weltraummission der ESA zur Erkundung der Sonne
Solar Orbiter – ESA M-Klasse Mission M1, Sonnenphysik, Start 2019
Spektrum-Röntgen-Gamma – russischer Satellit, eROSITA
SPHERE – Planetenjäger am VLT
upGREAT – SOFIA-Instrument, upGREAT ist eine Weiterentwicklung des Ferninfrarot-Spektrometers GREAT, German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies
VLBA – Very Long Baseline Array, USA
VLBI – Very Long Baseline Interferometry, kombiniert mehrere Radioteleskope, um Messungen mit höchster räumlicher Auflösung und Positionsgenauigkeit durchzuführen
VLT – Very Large Telescope auf dem Cerro Paranal in Chile, ESO, 4 8-Meter-Teleskope
VLTI – Interferometer des VLT
VO – Virtual Observatory, Virtuelles Observatorium
WFIRST – Wide Field Infrared Survey Telescope, Weltraumdurchmusterung
XMM-Newton – Röntgenteleskop / Satellit, Weltraummission der ESA, Horizon 2000
X-ray Surveyor – Röntgensatellit, NASA

G. Bildnachweise

- Cover und S. 4: ESO/VISTA VMC
Vorwort: SKA South Africa
S. 6: P. Weibacher, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)
S. 12: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
S. 19: ESO
S. 20: Robert Müller
S. 22 und 23: Porträtbild von Immo Appenzeller: Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl
Porträtbild von Karsten Danzmann: AEI
Porträtbild von Reinhard Genzel: MPE
Porträtbild von Eva Grebel (ARI Heidelberg): Universität Heidelberg, Kommunikation und Marketing
Porträtbild von Günther Hasinger: Felix Brandl/MPG
Porträtbild von Guinevere Kauffmann: MPA
Porträtbild von Rudolf Kippenhahn: Wolfgang Filser/MPG
Porträtbild von Rolf-Peter Kudritzki: privat
Porträtbild von Karl-Heinz Rädler: AG
Porträtbild von Volker Springel: HITS
Porträtbild von Rashid Sunyaev: privat
Porträtbild von Joachim Trümper: Wolfgang Filser/MPG
Porträtbild von Simon White: H.-A. Arnolds/MPA
Porträtbild von Richard Wielebinski: MPIfR/Richard Wielebinski
S. 26 und 27: Porträtbild von Eva Grebel (ARI Heidelberg): Universität Heidelberg, Kommunikation und Marketing
Porträtbild von Svetlana Berdyugina: KIS
Porträtbild von Paola Caselli (MPE Garching): privat
Porträtbild von Guinevere Kauffmann (MPA Garching): MPA
Porträtbild von Alessandra Buonanno (AEI Potsdam): Sven Döring
S. 32: AIP
S. 34: ESO/B. Tafreshi (twanight.org)
S. 36: Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)
S. 37: ZDF/Tobias Schultes
S. 38: SDO/NASA
S. 41: ESO/J. Emerson/VISTA
S. 43: Porträtbild von Frau Rauer: WISTA-MANAGEMENT GMBH
Kuenstlerische Darstellung der Planetenvielfalt: DLR/Susanne Pieth
Transitlichtkurve: Léger et al, A&A, 2019
S. 49: Porträtbild von Frau Walch: privat
Simulations: Walch et al., 2015, MNRAS, 454, 238 and Seifried et al., 2017, submitted to MNRAS, arxiv:1704.06487;
Observations: Seifried et al., 2017, image composite: S. Suri
S. 52: ESO
S. 55: Porträtbild von Reinhard Genzel: ESO/Reinhard Genzel (Ausschnitt)
Gravity Team: ESO/GRAVITY consortium
Galaktisches Zentrum (s2_v3): MPE / Galactic Center Team
S. 60: Porträtbild von Lutz Wisotzki: privat
Hubble Deep Field mit Lyman alpha: R. Williams (STScI), the HDF-S Team, NASA/ESA, Lutz Wisotzki
S. 64: SKA South Africa
S. 65: Porträtbild von Michael Kramer: MPIfR
Bild Raumzeitkrümmung: Michael Kramer (MPIfR)
S. 66: ESO/L. Calçada
S. 68: Douchet Quentin, CC BY-SA 3.0
S. 70: T. Granzer, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)
S. 71: ESA/Gaia-CC BY-SA 3.0 IGO
S. 72/73: Weltkarte: kartoxjm/Fotolia
Satelliten: Euclid & Solar Orbiter: ESA/C. Carreau, Athena & XMM-Newton: ESA, Spektr-RG mit eRosita: A. Zak, russianspaceweb.com, Gaia & LISA: ESA/ATG medialab, JWST: NASA/Northrop Grumman, SOFIA: NASA/Jim Ross, PLATO: PLATO Mission Consortium, SOHO: A. Lutkus, NASA, ESA, SOHO, INTEGRAL: NASA, ESA AIP-Grafik
S. 74: NASA/Ames Research Center
S. 77: Porträtbild von Volker Springel: HITS
Simulierte Galaxie: Robert J. J. Grand, Facundo A. Gomez, Federico Marinacci, Ruediger Pakmor, Volker Springel, David J. R. Campbell, Carlos S. Frenk, Adrian Jenkins and Simon D. M. White.
S. 81: Roland Bacon
S. 84: ESO/J. Girard (djulic.com)
S. 91: NASA; ESA; G. Illingworth, D. Magee und P. Oesch, University of California, Santa Cruz; R. Bouwens, Leiden University und das HUDF09 Team
S. 101/102: Porträtbild von Prof. Dr. Matthias Steinmetz: AIP
Porträtbild von Prof. Dr. Marcus Brüggen: privat
Porträtbild von Prof. Prof. Dr. Andreas Burkert: privat
Porträtbild von Dr. Eva Schinnerer: privat
Porträtbild von Prof. Prof. Dr. Jürgen Stutzki: privat
Porträtbild von Prof. Dr. Linda Tacconi: MPE
Porträtbild von Prof. Dr. Joachim Wambsganss: Friederike Elias
Porträtbild von Prof. Jörn Wilms: privat

DAS REDAKTIONSKOMITEE DES RATS DEUTSCHER STERNWARTEN



Prof. Dr. Matthias Steinmetz ist Wissenschaftlicher Vorstand des Leibniz-Instituts für Astrophysik Potsdam (AIP), Direktor des Forschungsbereichs „Extragalaktische Astrophysik“ und Professor für Astrophysik an der Universität Potsdam. Seine Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Entstehung und Entwicklung von Galaxien, insbesondere der Milchstraße. Er ist Präsident der Astronomischen Gesellschaft und Vorsitzender des Rats deutscher Sternwarten.



Prof. Dr. Marcus Brüggen ist Professor für Astrophysik an der Universität Hamburg. Seine Forschungsaktivitäten liegen im Bereich der Hochenergieastrophysik und reichen von der kosmischen Strahlung bis zu den Eigenschaften von aktiven Galaxien und Galaxienhaufen. Er ist Mitglied im Fachkollegium 311 „Astrophysik und Astronomie“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Vorsitzender des German Long Wavelength Consortiums.



Prof. Dr. Andreas Burkert ist Professor für computergestützte Astrophysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seine Forschung widmet sich den Strukturen aus Dunkler Materie, der Entstehung von Galaxien, der Struktur und Entwicklung des turbulenten interstellaren Gases und der Entstehung von Sternen und Sternhaufen.



Dr. Eva Schinnerer ist Arbeitsgruppenleiterin am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Ihre Forschung widmet sich den Bedingungen und Regulierungsmechanismen für Sternentstehung in Galaxien. Sie ist Vorsitzende des ALMA Scientific Advisory Committees.



Prof. Dr. Jürgen Stutzki ist Professor für Physik an der Universität zu Köln und Direktor des Kölner Observatorium für Submillimeter Astronomie. Seine Forschungsarbeiten adressieren die Struktur und die physikalischen und chemischen Bedingungen im interstellaren Medium sowie den Bau astronomischer Instrumentierung im Submillimeter- und ferninfraroten Bereich.



Dr. Linda Tacconi ist leitende Wissenschaftlerin am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching. Ihre Forschungsinteressen konzentrieren sich auf die Untersuchung der Sternentstehung in Galaxien und der Eigenschaften ihrer Schwarzen Löcher mit Methoden der Millimeter- und Submillimeter-Interferometrie und der hochauflösenden bildgebenden Infrarotspektroskopie. Sie ist wissenschaftliche Vertreterin Deutschlands im Rat der Europäischen Südsternwarte und Vizevorsitzende des ALMA Boards.



Prof. Dr. Joachim Wambsganz ist Direktor des Astronomischen Rechen-Instituts am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg. Seine Forschungsinteressen reichen von der Suche nach Exoplaneten mit der Technik des Mikrogravitationslinseneffekts über die Untersuchung von Quasaren bis zur Frage nach der Häufigkeit und Verteilung der Dunklen Materie im Universum. Er ist Vizepräsident der Astronomischen Gesellschaft und stellvertretender Vorsitzender des Rats deutscher Sternwarten.



Prof. Dr. Jörn Wilms ist Professor für Astronomie und Astrophysik an der Dr. Karl Remeis-Sternwarte, dem Astronomischen Institut der Universität Erlangen-Nürnberg. Seine Forschungsinteressen liegen in der Hochenergieastrophysik, insbesondere bei den Emissionsprozessen von Schwarzen Löchern in Röntgendoppelsternen und aktiven galaktischen Kernen.

Seit den 1960er-Jahren verfasst der Rat deutscher Sternwarten alle 15 bis 20 Jahre eine *Denkschrift Astronomie*, um die Öffentlichkeit und die Vertreterinnen und Vertreter der Forschungspolitik über die Ergebnisse des Forschungsfelds zu informieren und Perspektiven für das kommende Jahrzehnt darzulegen. Diese Denkschriften formulierten auch jeweils Empfehlungen zur Förderung von Projekten mit nationaler oder internationaler Bedeutung sowie zu notwendigen Fördermechanismen.

Die *Denkschrift 2017* „Perspektiven der Astrophysik in Deutschland 2017-2030: Von den Anfängen des Kosmos bis zu Lebensspuren auf extrasolaren Planeten“ konstatiert eine beeindruckende Entwicklung des Forschungsfelds in den vergangenen 15 Jahren – weltweit und insbesondere auch in Deutschland. Forschende in Deutschland waren an zahlreichen wissenschaftlichen Durchbrüchen beteiligt, oft in führender Rolle. Folglich hat das Forschungsgebiet innerhalb des Wissenschaftsprogramms an deutschen Universitäten und Forschungsinstituten sowohl qualitativ als auch quantitativ deutlich an Bedeutung gewonnen. Maßgeblich für diesen Erfolg war die zentrale Rolle, die deutsche Einrichtungen beim Bau des Forschungsinstrumentariums gespielt haben.

Basierend auf 20 Strategiepapieren fasst die astronomische Fachgemeinschaft in dieser *Denkschrift 2017* die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsfelds seit der letzten Denkschrift zusammen und gibt einen Ausblick bis zum Ende des kommenden Jahrzehnts. Die *Denkschrift 2017* schließt mit einer Reihe von Empfehlungen, um die gute Position der astronomischen und astrophysikalischen Forschung in Deutschland im kommenden Jahrzehnt weiter zu stärken.

ISBN:

978-3-00-057645-4

