

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

**Status und Perspektiven
der Astronomie in
Deutschland 2003–2016**

Denkschrift

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Status und Perspektiven der Astronomie in Deutschland 2003–2016

Denkschrift

Redaktionskomitee:

Andreas Burkert, Reinhard Genzel,
Günther Hasinger, Gregor Morfill (Vorsitz),
Peter Schneider, Detlev Koester (Vorsitzender
des Rates Deutscher Sternwarten)



WILEY-
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

DFG

Deutsche Forschungsgemeinschaft
Geschäftsstelle: Kennedyallee 40, D-53175 Bonn
Postanschrift: D-53170 Bonn
Telefon: ++49/228/885-1
Telefax: ++49/228/885-2777
E-Mail: (Internet RFC 822) postmaster@dfg.de
Internet: <http://www.dfg.de>

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.
ISBN 3-527-27220-8

© 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Umschlaggestaltung und Typographie: Dieter Hüsken.

Satz: Hagedorn Kommunikation, Viernheim.

Druck: betz-druck gmbH, Darmstadt.

Bindung: J. Schäffer GmbH & Co. KG, Grünstadt

Printed in the Federal Republic of Germany.

Inhalt

Vorwort	IX
Zusammenfassung	XI
1 Astronomie gestern, heute und morgen	1
1.1 Die Entwicklung des Universums	1
1.2 Lebensweg der Sterne und Materiekreislauf	7
1.3 Neue Fenster ins All	18
2 Die wissenschaftlichen Themen	24
2.1 Das Universum – Entstehung, Entwicklung und großräumige Struktur	24
2.1.1 Urknall und kosmische Hintergrundstrahlung	26
2.1.2 Die kosmische Entfernungsskala	29
2.1.3 Kosmologische Entwicklung	34
2.1.4 Die großräumige Struktur im Universum	39
2.1.5 Galaxienhaufen als kosmische Laboratorien	43
2.1.6 Ultrahochenergetische Gammaastronomie	48
2.1.7 Astroteilchenphysik	49
2.1.8 Neue Eigenschaften der Neutrinos	52
2.1.9 Gravitationswellenastronomie	54
2.2 Galaxien und massereiche Schwarze Löcher	55
2.2.1 Entstehung und Entwicklung von Galaxien	59
2.2.2 Struktur von Galaxien	69
2.2.3 Massereiche Schwarze Löcher	74
2.2.4 Aktive Galaxienkerne	82
2.3 Materiekreislauf und Sternentwicklung	87
2.3.1 Das interstellare Medium	91
2.3.2 Kosmische Strahlung	96
2.3.3 Der nächste Stern: die Sonne	98
2.3.4 Die Sterne	101
2.3.5 Sterne als chemische Fabriken und Motoren des Materiekreislaufs ..	106
2.3.6 Endstadien der Sternentwicklung	108

2.4	Stern- und Planetenentstehung: Protosterne, zirkumstellare Scheiben und extrasolare Planetensysteme.	116
2.4.1	Sternentstehung als fundamentaler Prozess im Kosmos	117
2.4.2	Bildung massearmer Sterne: vom prästellaren Kern zur Staubscheibe	120
2.4.3	Massereiche Sterne, Sternhaufen und die Anfangsmassenverteilung	130
2.4.4	Extrasolare Planeten	132
3	Die Observatorien und Instrumente der nächsten fünfzehn Jahre . .	139
3.1	Zugang zu Teleskopen und Beteiligung an internationalen Großprojekten	139
3.2	Sicherung der Konkurrenzfähigkeit	148
3.3	Stärkung der nationalen Initiativfähigkeit und Innovationskraft	149
3.4	Weitere geplante Weltraum- bzw. Ballonmissionen	156
3.5	Neue Initiativen: Astroteilchen- und Gravitationswellenforschung . .	158
3.6	Die Projekte des nächsten Jahrzehnts	162
3.7	Künftige Rolle existierender Einrichtungen	168
3.7.1	Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM)	168
3.7.2	Radioteleskop Effelsberg	170
3.7.3	Calar-Alto-Sternwarte	171
3.7.4	Sonnenteleskope	174
4	Struktur der astronomischen Forschung	175
4.1	Historische Entwicklung	175
4.2	Gegenwärtiger Stand	178
4.3	Forschungsinstitute	180
4.4	Instrumente der Forschungsförderung	185
4.5	Ausbildung	188
4.6	Astronomie und Öffentlichkeit	190
5	Empfehlungen	193
5.1	Grundlegende Aspekte	193
5.2	Instrumente und Projekte	195
5.3	Große Projekte	199
5.4	Mittlere Projekte	199
5.5	Kleine Projekte	201
5.6	Organisatorische Maßnahmen	206
5.7	Wechselwirkung und Kooperation	209
5.8	Sicherung und Stärkung der Förderinstrumente	212
6	Anhang	222
	Mitgliedsinstitute des Rates Deutscher Sternwarten	222
	Glossar/Akronyme	232
	Teleskope, Instrumente, Experimente	234

Redaktionskomitee

Prof. Dr. Andreas Burkert, München
Prof. Dr. Reinhard Genzel, Garching
Prof. Dr. Günther Hasinger, Garching
Prof. Dr. Gregor Morfill (Vorsitz), Garching
Prof. Dr. Peter Schneider, Bonn

Prof. Dr. Detlev Koester, Kiel
(Vorsitzender des Rates Deutscher Sternwarten)

Wir danken allen Mitgliedern des Rates Deutscher Sternwarten sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die tatkräftige Unterstützung.

Vorwort

Die moderne astronomische Forschung befasst sich mit Fragen, deren Faszination sich niemand entziehen kann: Wie ist das Universum entstanden, wie ist die Materie darin verteilt, welchem Schicksal geht es entgegen? Wie bilden sich Sterne, Galaxien und Schwarze Löcher? Unter welchen Bedingungen können Planetensysteme um Sterne entstehen? Die bei der Beantwortung dieser Fragen erreichten Fortschritte in den letzten beiden Jahrzehnten sind außerordentlich und haben intensives öffentliches Interesse hervorgerufen. Gleichzeitig haben technologische Innovationen neue Fenster ins All aufgestoßen, die ungeahnte neue Erkenntnisse für die Zukunft versprechen. Die aktuelle Forschung in der Astronomie ist dabei sehr stark physikalisch geprägt, so dass Astronomie und Astrophysik Synonyme sind.

Die vorliegende „Denkschrift Astronomie“ identifiziert auf der Basis einer Bestandsaufnahme die wichtigsten Schwerpunkte der astrophysikalischen Forschung der nächsten 10 bis 15 Jahre und stellt die Voraussetzungen dafür dar, dass deutsche Astrophysiker wie in der Vergangenheit auch zukünftig eine international führende Rolle einnehmen können. Sie wurde vom Rat Deutscher Sternwarten erarbeitet und setzt die Tradition der Denkschriften von 1962 und 1987 fort. Zunächst werden die zurückliegenden großen wissenschaftlichen Erfolge skizziert und anschließend die Kernfragen der Astrophysik der nächsten beiden Jahrzehnte beschrieben. Damit richtet sich die Denkschrift an Forscherinnen und Forscher in Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen, deren gemeinsames Engagement notwendig ist, um zu den Antworten auf diese Fragen beizutragen. Davon ausgehend wird abgeleitet, welche Prioritäten für die Nutzung vorhandener und den Bau neuer, meist internationaler Beobachtungseinrichtungen gesetzt werden sollten. Weitere Empfehlungen betreffen die Struktur der astronomischen Forschung in Deutschland. Damit richtet sich die Denkschrift gleichzeitig auch an politisch verantwortliche Stellen beim Bund und bei den Ländern.

Bei der optimalen Förderung der Astronomie spielt ein abgestimmtes Zusammenwirken aller nationalen und internationalen Partner eine wesentliche Rolle. Die DFG-Denkschrift Astronomie von 1987 hat unter anderem den Weg zur Einrichtung der Verbundforschung durch das BMBF geebnet. Auf den Gebieten der bodengebundenen Astronomie, der satellitengestützten Astronomie und der Astroteilchenphysik werden hier die projektbezogene Nutzung von internationalen Großgeräten und die Beteiligung an ihrer instrumentellen Ausstattung unterstützt. Dieses wich-

tige Förderinstrument hat in der letzten Dekade reiche Früchte getragen und stellt einen direkten Erfolg der vorausgegangenen Denkschrift dar. Es ist zu wünschen, dass auch die in der jetzt vorgelegten Denkschrift begründeten Maßnahmen möglichst weitgehend und mit langfristigem Planungshorizont umgesetzt werden, damit deutsche Wissenschaftler auch weiterhin erfolgreich zur Entwicklung der Astronomie beitragen können.

Ich bedanke mich bei den Autoren und allen, die mit Diskussionen und Anregungen zur Erstellung dieser eindrucksvollen Denkschrift beigetragen haben.

Prof. Dr. Ernst-Ludwig Winnacker
Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Zusammenfassung

Die Astrophysik zählt zur Zeit zu den aufregendsten Feldern der Physik und wird dies, aller Voraussicht nach, in absehbarer Zukunft weiter bleiben. Neue Teleskope in allen Wellenlängenbereichen, empfindlichste Detektoren und das Aufstoßen ganz neuer Beobachtungsfenster ins All versprechen ein riesiges Potenzial, welches auch mit neuen Herausforderungen für die theoretische Astrophysik verbunden ist. Forscherinnen und Forscher in Deutschland spielen in diesem stark international verbundenen Feld eine sehr gute, vielfach sogar eine führende Rolle. Es ist jetzt – 15 Jahre nach der letzten deutschen „Denkschrift Astronomie“¹ und zu Beginn des neuen Jahrhunderts – ein guter Zeitpunkt, die Fortschritte in diesem schnell wachsenden Gebiet darzustellen, die wichtigsten Richtungen und Entwicklungen der kommenden 10 bis 15 Jahre abzuschätzen und die sich daraus für die Astrophysik in Deutschland ergebenden Schlussfolgerungen abzuleiten. Das ist der Auftrag und das Ziel dieser Denkschrift, die von der Gemeinschaft der deutschen Astronomen (versammelt im Rat Deutscher Sternwarten) in Abstimmung mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft erstellt wurde.

Die Frage nach dem Ursprung und der Entwicklung des Universums, der darin enthaltenen Objekte und der physikalischen Gesetze, die ihr Verhalten bestimmen, steht im Zentrum der Astrophysik. In den letzten Jahren gab es gleich an mehreren Fronten entscheidende Durchbrüche und Paradigmenwechsel, so dass die derzeitige Periode mit Fug und Recht als eine „Goldene Phase“ der Astrophysik angesehen werden darf. Einen entscheidenden Durchbruch gab es zum Beispiel beim Verständnis der Expansion des Universums. Die Inflationstheorie des Urknalls ergab konkrete Vorhersagen, die in letzter Zeit mit hoher Genauigkeit bestätigt werden konnten, zum Beispiel über minimale quasiperiodische räumliche Oszillationen in der Mikrowellenhintergrundstrahlung. Daraus sowie aus Beobachtungen weit entfernter Supernovaexplosionen und aus Röntgenmessungen an Galaxienhaufen konnten die Geometrie des Raumes und die mittlere Dichte im Kosmos abgeleitet werden. Damit ergibt sich, dass die Materie im Kosmos von einer bisher unbekanntem Teilchenform, der so genannten „Dunklen Materie“ dominiert wird. Überraschend war der Befund,

¹ Astrophysik und Astronomie werden hier als Synonyme behandelt. Kosmologie ist der Teil der Astrophysik, der sich mit der Entstehung und Entwicklung des Universums beschäftigt.

dass die gesamte Materie nicht ausreicht, um das Universum zu schließen. Der Kosmos wird sich deshalb vermutlich in alle Ewigkeit weiter ausdehnen. Noch unerwarteter war die Erkenntnis, dass sich die Ausdehnung des Universums immer noch beschleunigt. Dies lässt auf eine bisher vollkommen unverstandene „Dunkle Energie“ schließen, die das heutige und zukünftige Universum dominiert. Die Kosmologie im Großen hat einen unmittelbaren Zusammenhang mit der Physik des Kleinsten. Gerade neue Entdeckungen in der Astrophysik waren in den letzten Jahrzehnten immer wieder eine treibende Kraft, die Grenzen des Standardmodells der Teilchenphysik zu erweitern (zum Beispiel die Entdeckung der Neutrinooszillationen). Die derzeit größte Herausforderung ist die Vereinigung der Relativitätstheorie mit der Quantentheorie. Die neuen Entdeckungen in der Kosmologie stellen die modernen Teilchentheorien (zum Beispiel die Superstring- und Brane-World-Theorien) wiederum auf eine Zerreißprobe und weisen möglicherweise den Weg zu einem neuen Verständnis der Ruheenergie des Vakuums.

Ein Paradigmenwechsel hat auch bei den Schwarzen Löchern stattgefunden, die oft als sehr exotische, möglicherweise rein theoretische Konstrukte angesehen wurden. Inzwischen konnten Objekte entdeckt und genau untersucht werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit Schwarze Löcher darstellen, für die alle alternativen Erklärungen noch wesentlich exotischer wären. In unserer Milchstraße kennen wir Schwarze Löcher von wenigen Sonnenmassen, so genannte stellare Schwarze Löcher. Im Zentrum unserer Milchstraße wurde ein massereiches Schwarzes Loch von mehreren Millionen Sonnenmassen „dingfest“ gemacht. Darüber hinaus existieren massereiche Schwarze Löcher im Zentrum fast aller großen, nahen Galaxien. Statistische Untersuchungen zeigen, dass diese Schwarzen Löcher schon sehr früh im Universum entstanden sein müssen, vermutlich zusammen mit den ersten Sternen und Galaxien. Sie gehören also fundamental zu unserem Dasein. Ein weiterer Durchbruch ist bei der Entdeckung der extrasolaren Planeten gelungen. Wir kennen bis heute mehr als 100 Planetensysteme außerhalb unseres Sonnensystems und diese Zahl wird wöchentlich größer. Unter anderem wurde vor kurzem ein Planetensystem entdeckt, das unserem Sonnensystem ähnlich sein könnte. Wir hoffen, in etwa 10 Jahren Teleskope zu benutzen, die empfindlich genug sind, erdähnliche Planeten in anderen Sonnensystemen zu entdecken, vielleicht sogar Anzeichen von Leben auf anderen Planeten.

Die wichtigsten Forschungsthemen der Zukunft werden sich mit der Entstehung und Entwicklung des Universums als Ganzem, von Galaxien und massereichen Schwarzen Löchern sowie von Sternen und Planetensystemen befassen. Konkrete Aufgabenstellungen sind hierbei unter anderem die Bestimmung der exakten Geometrie des Universums, die Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Energie, die Entdeckung von Gravitationswellen, die Entdeckung der ersten Galaxien, der ersten Schwarzen Löcher und der ersten Sternengeneration, die Entstehung massereicher Sterne, Sternexplosionen und die Verschmelzung kompakter Objekte sowie die Enträtselung der Gammastrahlen-Ausbrüche, die Entstehung von Planetensystemen und nicht zuletzt die Suche nach biologischer Aktivität auf extrasolaren Planeten.

Zwei Themenkreise sollen hier beispielhaft herausgegriffen werden, anhand derer deutlich wird, wie die Entwicklung neuer Beobachtungsmöglichkeiten mit der Beantwortung fundamentaler astrophysikalischer Fragen Hand in Hand geht. Um die

Bildung und Entwicklung von Galaxien im frühen Universum zu verstehen, benötigen wir empfindlichste Beobachtungen im relativ langwelligen Bereich des elektromagnetischen Spektrums – und damit des kalten Universums. Das Licht der Sterne der frühesten Galaxien ist aufgrund ihrer Fluchtbewegung in den nahen bis mittleren Infrarotbereich verschoben, in dem ab 2005 das deutsch-amerikanische Flugzeugteleskop SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*), ab 2007 die europäische Cornerstone-Mission Herschel und ab 2009/2010 das *James Webb Space Telescope* (JWST) der NASA und der europäischen Raumfahrtagentur ESA immer empfindlichere Beobachtungen durchführen werden. Parallel dazu werden im nahen Infrarot die bodengebundene adaptive Optik und Interferometrie höchstauflösende und empfindlichste Bilder entfernter Galaxien aufnehmen, zunächst mit dem *Very Large Telescope Interferometer* (VLTI) der europäischen Südsternwarte ESO und dem internationalen *Large Binocular Telescope* (LBT), in der nächsten Dekade vielleicht mit großen Teleskopen von 50 m bis 100 m Durchmesser. Wir wissen aber seit einigen Jahren, dass ein großer Teil des Lichts der ersten Sterne durch dichte Staubwolken in den frühen Galaxien verschluckt wird und im fernen Infrarot- und Submillimeterbereich des elektromagnetischen Spektrums wieder abgestrahlt wird. Herschel ist auch im fernen Infrarotbereich sehr empfindlich, aber erst das in globaler Zusammenarbeit entwickelte Millimeter- und Submillimeterinterferometer ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*), dessen insgesamt 64 Antennen bis zum Jahr 2010 auf dem Chajnantor-Hochplateau in Chile aufgebaut werden, kann Staub- und Gasmassen selbst der entferntesten Galaxien räumlich auflösen und deren Struktur und Dynamik untersuchen. Durch seine einzigartige Kombination von Winkelauflösung, spektraler Auflösung und Empfindlichkeit wird ALMA die Sternwiegen in unserer Milchstraße mit ihren Protosternen und protoplanetaren Scheiben sowie – in Zusammenarbeit mit Röntgenbeobachtungen – versteckte Schwarze Löcher im Detail studieren.

Der zweite Themenkreis befasst sich mit dem heißen, energiereichen Universum und dem Aufstoßen neuer Beobachtungsfenster ins All. Der Nobelpreis für Physik für 2002 wurde für „Pionierleistungen in der Astrophysik“ vergeben, zur Hälfte an Raymond Davis Jr. und Masatoshi Koshiba für die Entdeckung kosmischer Neutrinos, zur anderen Hälfte an Riccardo Giacconi für seine Beiträge zur Entdeckung kosmischer Röntgenquellen. Die Entdeckungen von Davis und Koshiba haben das neue Feld der Neutrinoastronomie einen Spalt weit geöffnet, mit großen Auswirkungen für die Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie. In den kommenden 15 Jahren erhoffen wir uns, mit neuen, großen Neutrinoteleskopen, zum Beispiel dem in der Antarktis entstehenden *ICECUBE*, routinemäßig Astronomie zu betreiben. Die von Giacconi angestoßene Röntgenastronomie hatte das erste Mal gezeigt, dass in gewissen Objekten unseres Universums gewaltige Energiemengen in kürzester Zeit umgesetzt werden, und hat damit ein Fenster zu den extremsten Materiezuständen geöffnet: sterbende Sterne, Neutronensterne und Schwarze Löcher. Die Röntgenastronomie ist in den mehr als 40 Jahren ihres Bestehens vor allem auch mit deutscher und europäischer Hilfe (zum Beispiel mit dem Röntgensatelliten *ROSAT*) zu einem integralen und unverzichtbaren Teil der Astrophysik geworden. Die Herausforderungen der Zukunft liegen unter anderem in der genauen Vermessung des starken Gravitationsfeldes in der Nähe Schwarzer Löcher und in der Entdeckung der frühesten

Schwarzen Löcher im Universum. Zu diesem Zweck plant die ESA zusammen mit Japan die *X-Ray Evolving Universe Spectroscopy Mission* (XEUS), ein Teleskop aus zwei getrennten Satelliten im Abstand von 50 Metern, dessen Spiegelsystem nach 2012 von Astronauten auf der internationalen Raumstation aus mehreren Einzelteilen zusammengebaut werden soll. Um das Aufstoßen eines neuen Fensters für extreme Kräfte und Materiezustände geht es auch bei der Gravitationswellenastronomie. Im Jahre 1993 erhielten die amerikanischen Astrophysiker Joseph Taylor und Russell Hulse den Physik-Nobelpreis für den indirekten Nachweis von Gravitationswellen an zwei sich umkreisenden pulsierenden Neutronensternen. Der direkte Nachweis von Gravitationswellen durch große laserinterferometrische Detektoren, von denen einige bereits in Betrieb gegangen sind, wird für die nächsten 15 Jahre erhofft. Hier ist insbesondere das gemeinsam von ESA und NASA geplante *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA) wichtig, eine Kombination aus drei Satelliten im Abstand von jeweils 5 Millionen Kilometern, die ab etwa 2011 routinemäßig Gravitationswellen aus der Verschmelzung massereicher Schwarzer Löcher im gesamten Universum beobachten soll.

Die wesentlichen Förderinstrumente für die Astrophysik in Deutschland haben sich bewährt und sollen erhalten bzw. weiter ausgebaut werden. Die Aufgabenverteilung zwischen den verschiedenen Förderorganisationen hat sich über einen langen Zeitraum etabliert, unter anderem als Ergebnis früherer Denkschriften. Die größten Projekte der Astrophysik (zum Beispiel ALMA oder LISA) können nur im Rahmen internationaler oder gar globaler Zusammenarbeit verwirklicht werden. Deutschland ist dabei als einer der wichtigsten Partner in die Europäischen Organisationen für Weltraum- und Bodenastronomie (ESA bzw. ESO) eingebunden. Größere nationale oder transnationale Observatorien (zum Beispiel LBT, ROSAT), aber auch Instrumente für die internationalen Großprojekte können nur von großen nationalen Instituten mit der entsprechenden, langfristig planbaren Grundausstattung und Infrastruktur getragen werden: Max-Planck-Institute, Leibniz-Institute, Landesinstitute und wenige Universitätsinstitute. Dabei ist die Projektförderung durch das DLR im nationalen Weltraumprogramm, die BMBF-Verbundforschung im bodengebundenen Bereich sowie die Förderung in koordinierten DFG-Verfahren wie Sonderforschungsbereichen unverzichtbar. Die Nutzung der großen Observatorien, sowohl am Boden als auch im Weltraum, ist im Rahmen des wissenschaftlichen Wettbewerbs allen Forschern zugänglich. Die dazu notwendige Finanzierung erfolgt über die institutionelle Grundförderung, über die bewährten Förderstrukturen der DFG und über die DLR-Verbundforschung für die Weltraumobservatorien. Die wichtigsten Strukturempfehlungen der Denkschrift werden im Folgenden zusammengefasst:

Von höchster Priorität ist die weitere Beteiligung an den großen Europäischen Forschungsorganisationen ESO (für die Bodenastronomie) und ESA (für die Weltraumastronomie) sowie die nationale wissenschaftliche Nutzung von bzw. Instrumententwicklung für die von diesen Organisationen getragenen Observatorien.

Essenziell dazu ist eine ausreichende und planbare Grundfinanzierung der Max-Planck-Institute, Leibniz-Institute und Landesinstitute sowie die verstärkte Nutzung der bewährten Fördermöglichkeiten der DFG, wofür wiederum eine hinreichende Gesamtfinanzierung der DFG benötigt wird.

Dringend notwendig ist eine spürbare Verbesserung der Grundausrüstung der universitären Astronomieinstitute, speziell im personellen Bereich, die Einrichtung neuer Lehrstühle und eine Ausweitung des Lehrangebots, hin zu einer flächen-deckenden Astronomieausbildung, auch für angehende Physiklehrer. Insbesondere die Bundesländer übergreifende Zusammenarbeit bedarf einer Stärkung.

Die seit mehr als zehn Jahren kontinuierlich abgesunkenen Projektfördermittel im nationalen Extraterrestrikprogramm müssen stabilisiert und mittelfristig wieder aufgestockt werden. Sie sind unverzichtbar für eine konkurrenzfähige Nutzung der großen Investitionen im Rahmen der ESA sowie die Erhaltung der nationalen Initiativfähigkeit und des technologischen Know-how. Die erheblichen Entwicklungs- und Projektlaufzeiten machen eine langfristige Planbarkeit erforderlich.

Das sehr erfolgreiche Element der BMBF/DLR-Verbundforschung Astronomie/Astrophysik soll erhalten und weiter ausgebaut werden. Die Verbundforschung wurde im Zuge der letzten Denkschrift in einer Vereinbarung zwischen DFG, BMBF und DLR festgelegt und konnte während der Vorbereitung dieser Denkschrift um das Gebiet der Astroteilchenphysik erweitert werden. Sie ist absolut notwendig, um die großen Investitionen im Boden- und Weltraumbereich auf breiter Front, insbesondere in den Universitäten, wissenschaftlich zu amortisieren.

Die Sonne ist „unser“ Stern und damit natürlich Bestandteil der Denkschrift „Astronomie“. Die Erforschung des Sonnensystems wurde hier jedoch weitgehend ausgeklammert. Ebenso wurden andere Themen, die durchaus sehr viele Gemeinsamkeiten mit der Astrophysik haben, aus Gründen der Konzentration nicht einbezogen. Hierzu zählen Teilchenwinde der Sterne, Magnetosphären von Planeten, interplanetarer Staub, planetare Ringe, Meteorite, Asteoride, Kometen, Planeten und Monde sowie Ergebnisse aus der Kosmochemie. Die Denkschrift gibt im ersten Kapitel eine allgemein verständliche Einführung in die aktuelle Entwicklung der Astrophysik. Im zweiten Kapitel werden vier Forschungsschwerpunkte beschrieben, die große Herausforderungen und wahrscheinlich die wichtigsten Themen der Zukunft darstellen. Im dritten Kapitel werden die Observatorien und Instrumente der nächsten 15 Jahre vorgestellt. Im vierten Kapitel wird die Struktur der astronomischen Forschung in Deutschland diskutiert, und im fünften Kapitel werden die wichtigsten Observatorien und Instrumente priorisiert und die Strukturempfehlungen erläutert.

1 Astronomie gestern, heute und morgen

1.1 Die Entwicklung des Universums

Das Universum – Raum und Zeit und alle Materie – entstand vor etwa 14 Milliarden Jahren aus einem extrem heißen und dichten Zustand. Seit diesem Urknall („Big Bang“) expandieren der Raum und die in ihm eingebettete Materie. Dass wir überhaupt in der Lage sind, die Entwicklung des Universums rekonstruieren zu können, liegt an der endlichen Laufzeit des Lichtes: Jeder Blick in die Tiefen des Alls ist gleichzeitig auch ein Blick in die Vergangenheit.

*Echo des Urknalls
und Bestimmung
der kosmologischen
Parameter*

Das bislang älteste direkt beobachtbare Zeugnis aus der frühesten Phase des Universums ist die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung. Sie ist auch gleichzeitig die wesentliche Stütze für die Urknalltheorie. Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall war das Gas so weit abgekühlt, dass sich Atomkerne und Elektronen zu Atomen, fast ausschließlich Wasserstoff und Helium, zusammenlagerten. In dieser Ära wurde die Materie für Licht transparent, und die damals freigesetzte Strahlung breitete sich im Universum aus. Sie lässt sich noch heute als Strahlungsfeld nachweisen, das den gesamten Himmel gleichmäßig erfüllt. Durch die kosmische Expansion hat sich dieses Strahlungsfeld auf 2.7 K abgekühlt, weshalb man auch von der 3-K-Strahlung spricht.

Die Entdeckung des homogenen Mikrowellenhintergrundes im Jahre 1965 wurde mit dem Physik-Nobelpreis an Penzias und Wilson geehrt. Erst 1992 gelang es mit dem amerikanischen Weltraumteleskop COBE, Strukturen im Hintergrund, auch Anisotropien genannt, nachzuweisen. Sie werden als Verdichtungen im Urgas interpretiert, aus denen später die großräumigen Strukturen im Universum, wie z.B. die Galaxienhaufen, entstanden sind (Abbildung 1.1). Die Untersuchungen der Struktur des Mikrowellenhintergrundes,

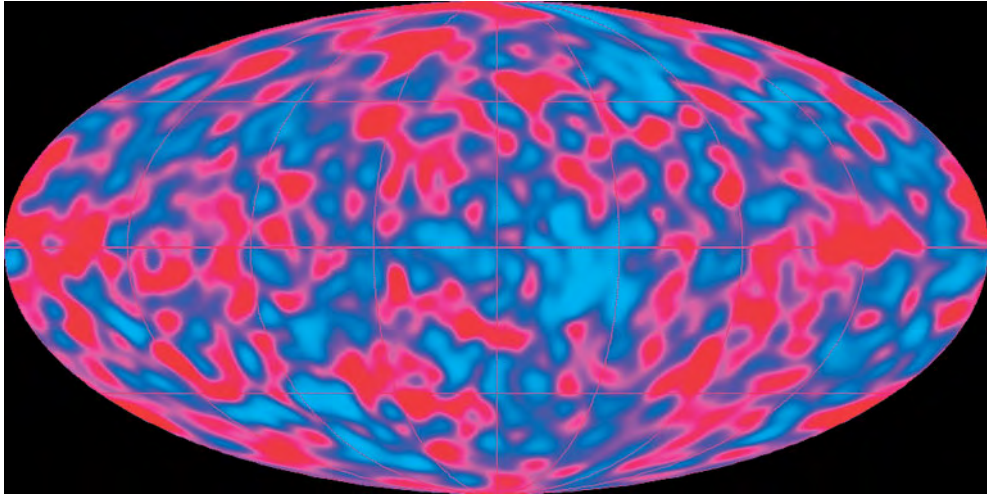


Abb. 1.1: Strukturen der kosmischen Hintergrundstrahlung bei einer Winkelauflösung von sieben Grad. Das Fleckenmuster zeigt kleine Schwankungen in der Temperatur, die von den ersten Verdichtungen im Urgas stammen. (NASA and the COBE Science Working Group/ESA)

zusammen mit einer Vielzahl anderer Studien, liefern miteinander konsistente Werte für die kosmologischen Parameter, welche die Geometrie des Universums und seine Ausdehnung beschreiben. Hierzu gehören die Hubble-Konstante, welche die Expansion und das Alter des beobachtbaren Universums angibt, und die Dichte der verschiedenen Materiekomponenten, welche die Krümmung und Expansionsgeschichte des Raumes bestimmen.

COBE hatte eine Winkelauflösung von nur sieben Grad, entsprechend 14 Vollmonddurchmessern, und konnte damit lediglich ein grobes Bild dieser „Kondensationskeime“ liefern. Theoretische Überlegungen fordern aber, dass gerade in den kleinen Strukturen weitere Schlüsselinformationen über die Bedingungen im Urknall sowie über die Entstehung und Entwicklung des Universums enthalten sind. Aus diesem Grund ist es eine der zentralen Aufgaben, die 3-K-Hintergrundstrahlung mit weit besserer Winkelauflösung und größerer Empfindlichkeit zu studieren, als es mit COBE möglich war. Hierzu wurden weitere Messungen mit Höhenforschungsbalonen durchgeführt. Ein Durchbruch wurde mit der *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) Mission der NASA erzielt, die mit hoher Präzision die Vorhersagen des Standard-Urknall-Modells bestätigt und die kosmologischen Parameter bestimmt hat. Die volle Information über die Polarisation und die Vordergrundemission der Mikrowellenstrahlung wird jedoch erst durch die dreifach bessere Auflösung des von der ESA entwickelten Planck-Satelliten erfasst werden.

In der ferneren Zukunft wird es vielleicht auch möglich sein, einen kosmischen Hintergrund von Neutrinos oder sogar Gravitationswellen nachzuweisen, die Einblicke in eine noch frühere Epoche des Universums liefern.

Die wohl rätselhafteste Komponente des kosmologischen Standardmodells ist die Dunkle Materie. Sie macht sich in vielen Bereichen durch ihre Schwerkraftwirkung bemerkbar, lässt sich aber nicht durch Emission oder Absorption von Strahlung nachweisen. Nach den neuesten Forschungsergebnissen macht sie etwa ein Drittel der gesamten Energiedichte im Universum aus, während die chemischen Elemente der „normalen“, so genannten baryonischen Materie, aus der alle sichtbaren Objekte bestehen, nur wenige Prozent beisteuern. Der Großteil der kosmischen Energiedichte scheint in der erst vor kurzem entdeckten und bisher noch weitgehend unverstandenen „Dunklen Energie“ zu liegen, welche die kosmische Expansion weiterhin beschleunigt.

*Dunkle Materie
und Dunkle Energie*

Auf theoretischer Seite geht man davon aus, dass die Dunkle Materie im frühen Universum die ersten Verdichtungen bildete, in deren Schwerkraftfeldern sich die normale Materie ansammelte und zu Galaxien kondensierte. Sie hatte damit einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Strukturentstehung im Universum. Mit leistungsstarken Computern versuchen Theoretiker, diesen Prozess zu simulieren (Abbildung 1.2). Woraus die Dunkle Materie besteht, ist noch weitgehend unklar. Es kann sich nur zum kleinen Teil um sehr lichtschwache Himmelskörper handeln. Theoretische Überlegungen machen es aber wahrscheinlich, dass es sich überwiegend um eine bislang unbekannte Klasse von Elementarteilchen handelt. Damit ergibt sich eine faszinierende Allianz zwischen der Kosmologie und der Teilchenphysik.

Eine vielversprechende Möglichkeit, die Dunkle Materie nachzuweisen und auch ihre Massenverteilung zu bestimmen, bietet der Gravitationslinseneffekt. Hierbei krümmt die Materie beispielsweise in einem Galaxienhaufen den umgebenden Raum so stark, dass Licht darin wie in einer Linse abgelenkt wird. Das Bild einer Galaxie, die sich hinter einem solchen Haufen befindet, wird dann zu einem Kreisbogen verzerrt (Abbildung 1.3). Mit Hilfe von Modellen lässt sich aus solchen Aufnahmen die Masse der Dunklen Materie und deren räumliche Verteilung ermitteln.

Jüngste Forschungsergebnisse lassen weiterhin darauf schließen, dass der Rest der kosmischen Energiedichte eine Art Vakuumenergie ist (die der Kosmologischen Konstante der Einsteinschen Relativitätstheorie entspricht), welche die

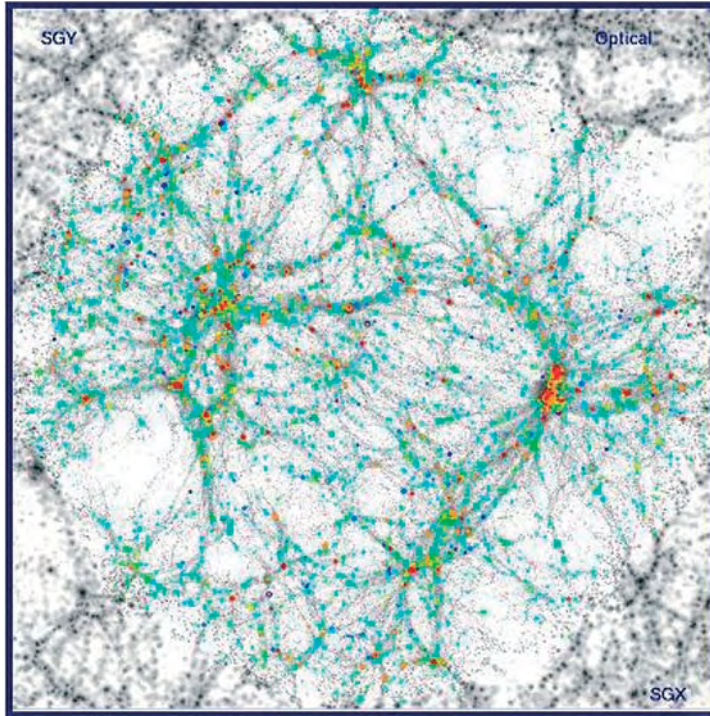


Abb. 1.2: Die derzeit leistungsstärksten Rechner der Welt sind nötig, um die Entstehung von Galaxien und Galaxienhaufen aus dem Urganz zu modellieren. Farbige Punkte repräsentieren verschiedene Galaxientypen, dargestellt durch die Farbe ihrer Sternpopulationen., während der graue Untergrund die Dunkle Materie zeigt. In Galaxienhaufen entstehen vorwiegend elliptische Galaxien mit roten alten Sternkomponenten, während sich in den Filamenten eher Spiralgalaxien bilden mit blau leuchtenden jungen Sternen. (MPA)

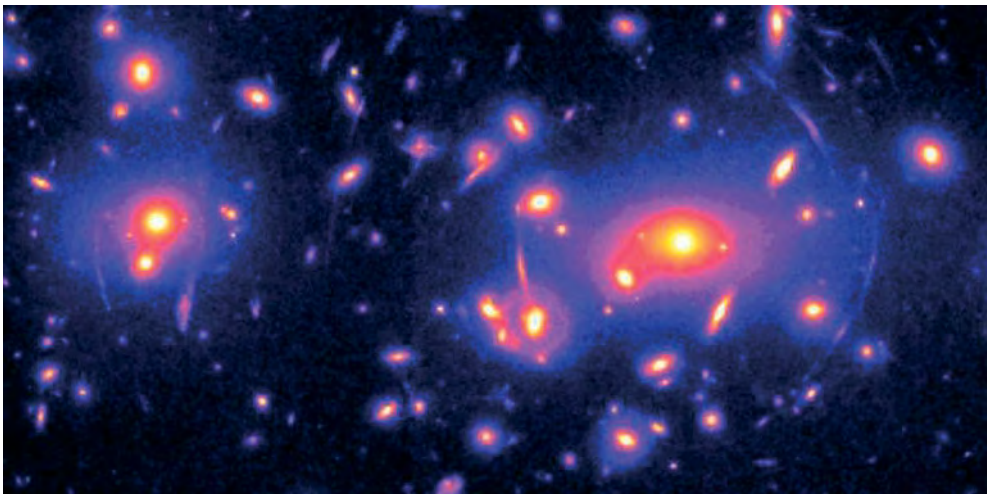


Abb. 1.3: Die gesamte Materie eines Galaxienhaufens wirkt als Gravitationslinse und verzerrt das Bild von weit dahinter befindlichen Galaxien zu Kreisbogen. (ESO)

Entwicklung des Universums entscheidend geprägt hat. Diese unbekannte Dunkle Energie führt zu einer beschleunigten Expansion des Universums. Während aus Sicht der Elementarteilchenphysik Modelle existieren, die zu einer Klärung der Natur der Dunklen Materie führen könnten, ist die Existenz der Dunklen Energie völlig unerwartet. Ein Verständnis dieser Materieform wird voraussichtlich zu fundamentalen Erkenntnissen über die Mikrophysik und den Ursprung der Materie führen.

Aus den Verdichtungen, den Kondensationskeimen im Urgas, bildeten sich die ersten Galaxien. Wann diese Ära genau begann und welche Prozesse im Einzelnen eine Rolle spielten, sind entscheidende Fragen der modernen Forschung. Höchstwahrscheinlich sind mit den Galaxien auch gleichzeitig die Quasare entstanden. Dies sind äußerst kompakte und hell strahlende Zentralbereiche von Galaxien. Nach unserem heutigen Wissen befindet sich im Zentrum eines jeden Quasars ein Schwarzes Loch mit einigen Milliarden Sonnenmassen. Dieses Schwarze Loch zieht aus der Umgebung Gas und Sterne an und verschlingt diese Materie. Bei diesem Vorgang – auch Akkretion genannt – wird in einem Bereich von der Ausdehnung unseres Planetensystems bis zu zehntausendmal mehr Energie frei als alle Sterne der Milchstraße zusammen abstrahlen. Quasare lassen sich daher bis in sehr große Entfernungen nachweisen. Rekordhalter sind Quasare, die wir in einem Zustand sehen, als das Universum weniger als eine Milliarde Jahre alt war.

*Die ersten Galaxien
und Quasare*

Quasare haben in der frühen Phase des Universums eine bedeutendere Rolle gespielt, als man bis vor einiger Zeit vermutet hatte. Mit dem in Deutschland entwickelten Röntgenweltraumteleskop ROSAT fanden Astrophysiker beispielsweise heraus, dass die vor etwa 40 Jahren entdeckte Röntgenhintergrundstrahlung von unzähligen Quasaren aus der Frühzeit des Universums stammt. Für seine Pionierleistungen bei der Konstruktion der ersten Röntgenteleskope, die das Fenster für Röntgenastronomie öffneten und zur Entdeckung der Röntgenhintergrundstrahlung und ihrer Quellen geführt haben, erhielt Riccardo Giacconi im Jahre 2002 den Nobelpreis für Physik.

Dass es in den Zentren sehr vieler, vielleicht sogar aller Galaxien massereiche Schwarze Löcher geben muss, gilt mittlerweile als gesichertes Erkenntnis. Gerade die neunziger Jahre haben hier eine Fülle neuer Erkenntnisse gebracht. Ein wichtiger Beitrag war die von deutschen Astronomen durchgeführte Messung der Bewegung von Sternen innerhalb weniger Lichttage um das Zentrum unserer Milchstraße.

Erstmals konnte ein vollständiger Umlauf eines das zentrale Schwarze Loch umkreisenden Sterns mit hoher Präzision beobachtet werden. Die hohen Sterngeschwindigkeiten weisen auf eine dunkle, zentrale Massenkonzentration hin, bei der es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um ein Schwarzes Loch von etwa drei Millionen Sonnenmassen handelt. Erst seit kurzem fand man heraus, dass die Masse der zentralen Schwarzen Löcher sehr gut mit den Geschwindigkeiten der Sterne in den Muttergalaxien korreliert. Dies deutet auf einen gemeinsamen Entstehungsprozess eines Schwarzen Lochs und der es umgebenden Galaxie hin.

Bei der Suche nach den entferntesten und damit jüngsten Galaxien und Quasaren ist der entscheidende Durchbruch erst in den letzten fünf Jahren durch die Kombination des 10-m-Keck-Teleskops und des Hubble-Weltraumteleskops gelungen. Durch das *Very Large Telescope* (VLT) der europäischen Südsternwarte (ESO) sind jetzt auch deutsche Gruppen in der Lage, in diesem Forschungsbereich aktiv beizutragen.

*Bildung von
Galaxien und
massereichen
Schwarzen Löchern*

Die Entwicklung der jungen Galaxien muss nach neuesten Erkenntnissen sehr turbulent abgelaufen sein. Beobachtungen mit dem europäischen Infrarotweltraumobservatorium ISO belegen, dass in vielen jungen Galaxien geradezu explosionsartig neue Sterne entstanden sind. Außerdem waren die Galaxien damals näher beieinander als heute. Galaxien stießen häufig zusammen und verschmolzen miteinander. Wie Beobachtungen an nahen Galaxien zeigen, führen diese Stöße zu heftigen Sternentstehungsphasen. In dieser Phase könnten sich auch die in vielen Galaxienzentren beobachteten massereichen Schwarzen Löcher gebildet haben, die anschließend durch einfallendes Gas weiter gefüttert wurden.

Um die Bildung und frühe Entwicklung von Galaxien zu verstehen, setzt man große Hoffnungen auf Beobachtungen im Infrarot- bis Millimeterbereich. So soll 2005 erstmals das deutsch-amerikanische Flugzeugteleskop SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*) starten. Neue Maßstäbe wird auch das europäische Weltraumteleskop Herschel setzen, mit dem man bis in den Submillimeterbereich vorstoßen wird. Dessen Start ist für 2007 geplant. Mit dem internationalen Millimeter- und Submillimeterinterferometer ALMA in Chile will man ab 2010 selbst die entferntesten Galaxien räumlich auflösen und deren Struktur und Dynamik untersuchen. Schließlich wird das *James Webb Space Telescope* (JWST) von NASA und ESA (ebenfalls ab 2009/2010) in der Lage sein, empfindlichste Beobachtungen der ersten Galaxien im nahen und mittleren Infrarot durchzuführen.

Schwarze Löcher haben nicht nur bei der Entstehung der Galaxien eine Rolle gespielt. Sie sind auch die Ursache für Kernaktivität in Galaxien. In den letzten zwei Jahrzehnten ist es gelungen, die anfänglich sehr große Zahl unterschiedlicher Typen von aktiven Galaxien durch ein und dasselbe physikalische Modell zu beschreiben. Demnach befindet sich im Zentrum einer Galaxie ein massereiches Schwarzes Loch, das aus seiner Umgebung Materie anzieht. Sie umkreist das Loch zunächst in einer nach innen immer heißer werdenden Scheibe und fällt schließlich in das Schwarze Loch. Hierbei strahlt das heiße Gas vor allem im Röntgen- und UV-Bereich sowie im sichtbaren Licht.

Aktive Galaxien

In vielen Fällen schießen zudem senkrecht zur Scheibe in entgegengesetzten Richtungen zwei beinahe lichtschnelle Gasjets ins All, die an ihren Vorderseiten in riesigen Plasma-blasen enden. Sie senden gebündelte Radio-, Gamma- und Röntgenstrahlung aus. Zu der Erforschung dieser Jets und Akkretionsscheiben haben deutsche Forscher sowohl durch theoretische Arbeiten als auch durch Beobachtungen wesentlich beigetragen. So ermöglichte zum Beispiel erst das Effelsberger Radioteleskop als zentrales Element des Netzes der interkontinentalen Radiointerferometrie die räumliche Auflösung von Jets bis auf wenige Lichtjahre Entfernung vom Schwarzen Loch. In den letzten Jahren haben die Gammaastronomen entdeckt, dass solche Jets auch Quellen höchst-energetischer Photonen sind, deren Erzeugung teilweise noch vollkommen unklar ist. Diese Prozesse sollen zukünftig mit speziellen Teleskopen zum Nachweis von hochenergetischen Photonen im Gammawellenbereich wie H.E.S.S. und MAGIC studiert werden.

1.2 Lebensweg der Sterne und Materiekreislauf

Unser Sonnensystem ist Teil der Milchstraße, einer Spiralgalaxie mit etwa 100 000 Lichtjahren Durchmesser. Die Erforschung dieses Systems, seiner Entstehung und Entwicklung, gehört zu den vorrangigen Aufgaben der Astrophysik. Grundlegend ist hierbei die Eichung der absoluten Entfernungsskala und die Bestimmung physikalischer Grundgrößen der Sterne.

Die Milchstraße

*Astrometrie –
Eichung der Entfer-
nungsskala und der
Sternparameter*

Der 1989 gestartete europäische Astrometriesatellit Hipparcos, an dem auch deutsche Astronomen wesentlich beteiligt waren, lieferte zu diesem Gebiet ganz wesentliche Beiträge. Er bestimmte die Positionen und Eigenbewegungen von über 100 000 Sternen mit einer Genauigkeit bis zu 0.001 Bogensekunden. Damit lassen sich die Entfernungen der Sterne in einer Umgebung von einigen tausend Lichtjahren sehr genau ermitteln. Zudem wurden über eine Million Sterne mit einer geringeren Genauigkeit astrometrisch vermessen und deren Helligkeiten und Farben bestimmt. Dies ist, unter anderem, von großer Bedeutung für die Bestimmung der Entfernungsskala. Die mit Hipparcos erreichte Genauigkeit soll durch die Nachfolgemission GAIA erheblich gesteigert werden.

*Von interstellaren
Wolken zu Proto-
sternen*

Die zweite Komponente neben den Sternen ist das interstellare Medium, also das Gas und der Staub zwischen den Sternen. Laufend entstehen auch heute noch neue Sterne im interstellaren Medium. So verdichtet sich das Gas zu großen Wolken mit bis zu einer Million Sonnenmassen. Kleine Teilbereiche dieser Wolken können unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft in sich zusammenfallen. Aufgrund ihrer Rotation platten sie sich im Laufe des Gravitationskollapses zu schnell rotierenden Scheiben ab, den so genannten protostellaren Scheiben, in deren Zentren sich die Materie zu Sternen verdichtet.

*Protosterne
nachgewiesen*

Ein Problem beim Studium der ersten Phasen der Sternentstehung besteht darin, dass sie im Innern dichter Wolken verborgen ablaufen. Erst zu größeren Wellenlängen hin, im fernen Infraroten sowie im Submillimeter-, Millimeter- und Radiobereich, wird die Wolke durchsichtig. In diesen Bereichen ließen sich mit dem deutsch-französisch-spanischen Millimeterobservatorium IRAM und dem Satelliten ISO erstmals im Innern von Staubwolken extrem kalte Verdichtungen, die Protosterne, nachweisen. Diese „Wiegen der Sterne“ werden sich mit den zukünftigen Observatorien wie SOFIA, Herschel und ALMA detailliert studieren lassen.

*Protoplanetare
Scheiben*

Ein bedeutender Fortschritt war der erste Nachweis von protostellaren Staubscheiben mit den IRAM-Teleskopen und mit dem Weltraumteleskop Hubble (Abbildung 1.4). Diese jungen Sterne sind jetzt in einer Phase, in der unsere Sonne vor etwa 4.6 Milliarden Jahren war. Die weitere Forschung muss klären, wie lange diese Scheiben existieren und unter welchen Bedingungen in ihnen Planeten entstehen. Um diesen Fragen nachzugehen, sind Beobachtungen in allen Wellenlängenbereichen, laborastrophysikalische Messungen und numerische

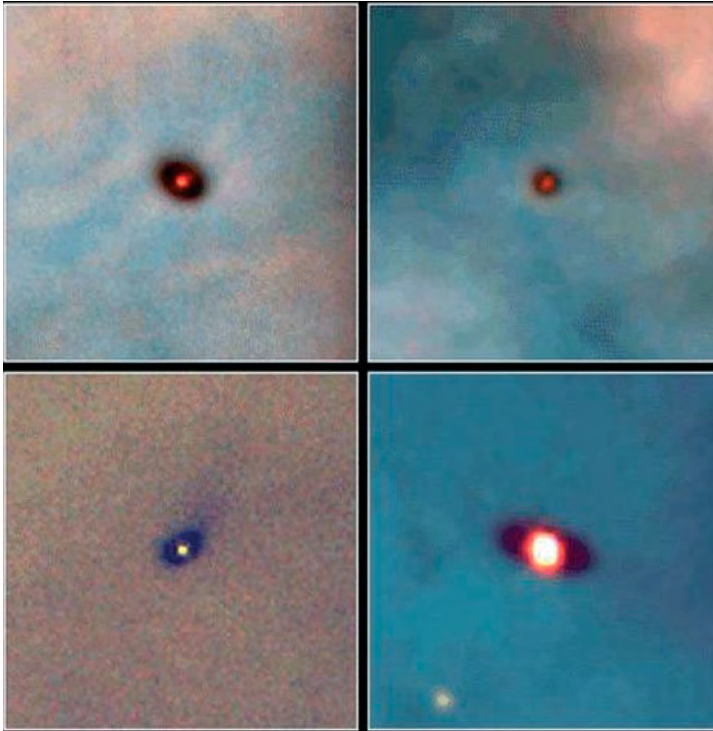


Abb. 1.4: Dunkle Staubscheiben um junge Sterne, entdeckt mit dem Hubble-Weltraumteleskop, werden sichtbar durch Absorption der Strahlung des hellen Hintergrundes. (NASA/ESA/MPIA/AIP)

Simulationen notwendig. Von besonderer künftiger Bedeutung für die Erforschung von Stern- und Planetenentstehung wird die Infrarotinterferometrie sein, wie man sie mit dem *Very Large Telescope* (VLT), dem *Large Binocular Telescope* (LBT) und dem europäischen Satellitenprojekt DARWIN betreiben will. Mit dem *James Webb Space Telescope* (JWST) wird es zum ersten Mal möglich werden, räumlich aufgelöste abbildende Beobachtungen von jungen Sonnensystemen durchzuführen.

Mitte der achtziger Jahre wurde auch die überraschende Entdeckung gemacht, dass viele junge Sterne stark gebündelte Teilchenstrahlen senkrecht zur Scheibenebene ins All schießen (Abbildung 1.5). Diese Jets sind in ihrer Morphologie den relativistischen Teilchenstrahlen aktiver Galaxien (siehe oben) ähnlich, jedoch nur bis zu zehn Lichtjahre lang und die Teilchen bewegen sich mit wesentlich geringerer Geschwindigkeit. Auf welche Weise sie genau entstehen, ist nach wie

*Jets von jungen
Sternen*

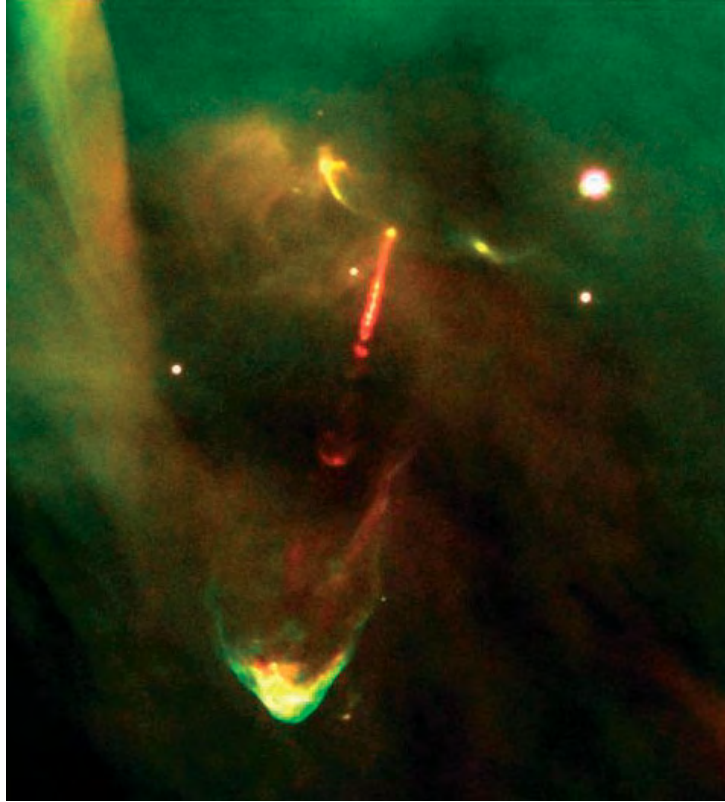


Abb. 1.5: Von einem jungen Stern im Sternentstehungsgebiet im Orion geht ein Jet aus, der in einer Kopfwelle endet. (ESO/LSW Heidelberg)

vor unklar. Ähnlich wie bei den Gasjets aktiver Galaxien könnte die Ursache und Energiequelle in der die jungen Sterne umgebenden Akkretionsscheibe liegen. Ebenfalls noch Gegenstand der Forschung ist die Frage, wie sich die etwa zehntausend Jahre andauernde Jetphase auf die Entwicklung des Sterns und der Scheibe auswirkt.

Extrasolare Planeten

Die bahnbrechende Entdeckung im Jahre 1995 von Planeten, die nahe Sterne umkreisen, eröffnete der Astronomie ein ganz neues Forschungsfeld. Bis Anfang 2003 waren bereits mehr als hundert dieser extrasolaren Planeten bekannt. Bislang lassen sich diese Körper jedoch fast ausnahmslos nur indirekt über die Schwerkraftwirkung auf ihre Zentralsterne nachweisen. Es gehört zu den vorrangigen Zielen, diese Objekte innerhalb der nächsten 10 bis 15 Jahre direkt durch abbildende und astrometrische Techniken zu beobachten. Der direkte

Nachweis von massereichen, Jupiter ähnlichen extrasolaren Planeten und die Spektroskopie ihrer Atmosphären könnte bald durch verbesserte adaptive Optik an den neuen Großteleskopen möglich sein. Fortschritte erwartet man sich außerdem von dem astrometrischen Weltraumteleskop GAIA.

Mit den derzeitigen Mitteln lassen sich nur Planeten nachweisen, die mindestens so massereich wie Saturn sind. Ein gewaltiger Fortschritt wäre der Nachweis von erdähnlichen Planeten und die Bestimmung ihrer chemischen Eigenschaften. Für dieses sehr anspruchsvolle Ziel sind hochpräzise photometrische Methoden (Beobachtung von Bedeckungen des Sterns durch den Planeten) und direkt abbildende Techniken (Infrarot- oder optische Interferometrie) mit Weltraumobservatorien notwendig. Entsprechende Instrumente wie DARWIN werden derzeit von den Forschern in Europa und den USA geplant.

An dieser Stelle empfiehlt sich auch ein Querverweis auf die Erforschung des Sonnensystems, die selbst nicht Bestandteil dieser Denkschrift ist. Aus den neuen Erkenntnissen der Kosmochemie über die Entstehung und die chemischen und physikalischen Eigenschaften der „Urmaterie“ unseres Sonnensystems lässt sich eine Fülle von vermutlich generischen Eigenschaften der Planetenentstehung ableiten. Diese Information hilft bei der Suche nach extrasolaren Planeten. Sie ist zudem notwendig, um zu verstehen, ob unser Sonnensystem typisch ist oder eine Sonderstellung unter den Planetensystemen innehat. Auch in diesem Forschungsbereich haben Forscher an deutschen Instituten in den letzten 15 Jahren wichtige Beiträge geliefert wie die erstmalige theoretische Verknüpfung der Entwicklung protostellarer Scheiben mit gemessenen kosmochemischen Größen und die Altersbestimmung primitiver Meteorite. Ein Highlight waren ohne Frage die direkten Messungen der Zusammensetzung von kometa-rem Material mit der ESA-Raumsonde Giotto.

*Unser Sonnen-
system als Modell*

Ein Stern leuchtet durch Kernreaktionen im Inneren, die Energie freisetzen. Er bleibt so lange stabil, bis er einen signifikanten Teil seines Brennstoffvorrats verbraucht hat. Auf welche Weise er dann seine Existenz beendet, hängt von seiner Masse ab. Unsere Sonne wird sich in etwa fünf Milliarden Jahren zu einem Roten Riesen aufblähen und ihre äußere Gashülle abstoßen. Anschließend schrumpft sie auf die Größe der Erde zu einem Weißen Zwerg zusammen. Dabei steigt ihre Temperatur auf mehrere zehntausend Grad an und sie wird die vorher abgestoßene Gashülle beleuchten. Diese Planetarischen

*Endstadien der
Sternentwicklung*



Abb. 1.6: Der hellste Planetarische Nebel am Nordhimmel: der 650 Lichtjahre entfernte Hantel-Nebel. (ESO)

Nebel werden in vielfältigen Formen in der Milchstraße und nahen Galaxien beobachtet (Abbildung 1.6).

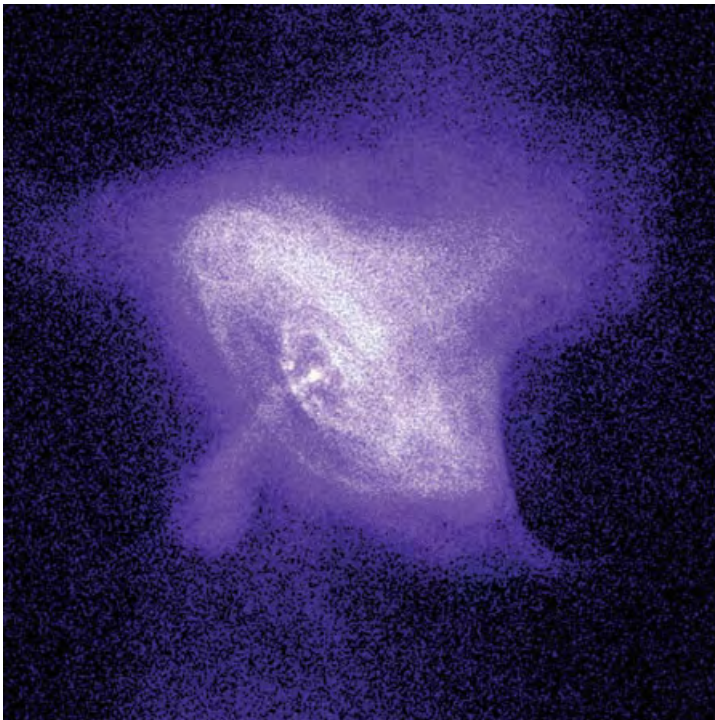
Neutronensterne und Pulsare

Sehr massereiche Sterne, etwa 8- bis 30-mal massiver als die Sonne, blähen sich zunächst zu Überriesen auf und verlieren einen Großteil ihrer Materie, bevor sie als Supernova explodieren. Während die äußere Hülle abgesprengt wird, bricht der innerste Bereich des Sterns in sich zusammen, und es bildet sich ein Neutronenstern mit einem Durchmesser von nur etwa 20 Kilometern. Neutronensterne sind Objekte mit faszinierenden Eigenschaften. Ein junger Neutronenstern ist etwa 100 000 Grad heiß, wie sich mit ROSAT zeigen ließ. Im Innern ist die Materie so stark komprimiert wie in einem Atomkern. Ein derartiges Materiestück von der Größe eines Würfelzuckers würde auf der Erde zehn Milliarden Tonnen wiegen.

Wenn ein Stern zu einem Neutronenstern kollabiert, rotiert er auch immer schneller um die eigene Achse. Der Neutronenstern im Krebs-Nebel (Abbildung 1.7) beispiels-



Abb. 1.7: Der Supernovaüberrest im Sternbild Krebs. Die Supernova beobachteten asiatische Astronomen im Jahre 1054. Oben ein Bild im sichtbaren Spektralbereich (ESO), unten das von Chandra aufgenommene Röntgenbild (NASA/CXC/SAO), das Details des inneren, aktiveren Bereichs um den schnell rotierenden Neutronenstern zeigt.



weise rotiert 33-mal pro Sekunde um die eigene Achse. Gleichzeitig wird das Magnetfeld enorm verdichtet und ist schließlich an der Oberfläche um das Billionenfache stärker als das Erdmagnetfeld. Entlang der Magnetfeldachse werden elektrisch geladene Teilchen bis nahezu an die Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und schießen ins All. Dabei senden sie in Flugrichtung (Synchrotron-)Strahlung aus, wobei der Teilchenschwarm zwei Lichtkegel erzeugt, die jeweils vom magnetischen Nord- und Südpol in den Weltraum ragen. Diese Strahlung reicht vom Radiobereich bis zu den höchsten Gammaenergien.

Bei vielen Neutronensternen ist die Magnetfeldachse gegenüber der Rotationsachse geneigt. Dadurch streichen diese beiden Lichtkegel durch das All. Überstreichen sie zufällig die Erde, so kann man sie wie das Blinken eines Leuchtturms als Strahlungspuls nachweisen. Solche blinkenden Neutronensterne nennt man Pulsare.

Pulsare haben eine besondere Bedeutung auch dadurch erlangt, dass sie wegen ihrer nahezu konstanten Pulsrate extrem genau gehende „Uhren“ sind. Diese Eigenschaft nutzten die amerikanischen Astrophysiker Taylor und Hulse, um die Umlaufperiode der beiden Neutronensterne zu messen. Im Laufe mehrerer Jahre stellten sie fest, dass sich diese langsam verringert. Erklären ließ sich dieser Effekt durch das Abstrahlen von Gravitationswellen. Dadurch verlieren die Körper Energie und nähern sich einander an. Die gemessene Abnahme stimmte innerhalb von weniger als einem Prozent mit dem von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Energieverlust überein. Für diesen ersten indirekten Nachweis von Gravitationswellen erhielten die beiden Forscher 1993 den Physik-Nobelpreis.

Stellare Schwarze Löcher

Bei extrem massereichen Sternen, mit mehr als 30 Sonnenmassen, ist der Kollaps vermutlich durch nichts aufhaltbar. Der ausgebrannte Stern zieht sich theoretisch gänzlich zusammen und verschwindet in einem (stellaren) Schwarzen Loch. Die Schwerkraft ist jetzt innerhalb eines bestimmten Bereichs so stark, dass keine Materie und kein Licht mehr entweichen kann. Der Radius dieses Bereichs beträgt bei einem Schwarzen Loch von beispielsweise acht Sonnenmassen etwa 25 Kilometer.

Schwarze Löcher lassen sich nur indirekt in ihrer Wirkung auf ihre Umgebung nachweisen, zum Beispiel in Doppelsternen, bei denen sich zwei Sterne auf gravitativ gebundenen Bahnen umkreisen. Die Astrophysiker kennen heute einige Systeme, in denen eine Komponente unsichtbar und sehr mas-

sereich ist und daher sehr wahrscheinlich ein Schwarzes Loch darstellt. Beobachtungen im Röntgenbereich, beispielsweise mit dem europäischen Weltraumteleskop XMM-Newton und später mit XEUS, sind hier von großer Bedeutung. Auch die im Bau befindlichen Interferometer am VLT und LBT sollen weiteren Aufschluss über diese rätselhaften Himmelskörper bringen.

Unsere Sonne wird sich in etwa fünf Milliarden Jahren zu einem sogenannten Roten Riesen aufblähen. Interne Prozesse führen zu einer Expansion ihrer äußeren Gashülle und gleichzeitig zu deren Abkühlung, wodurch sich das Maximum der Strahlung in den langwelligeren, roten Bereich verschiebt. Mit dem Entstehen und Vergehen der Sterne ist gleichzeitig ein Kreislauf oder „Recycling“ der Materie verbunden: Die Sterne entstehen aus dem interstellaren Medium. Während ihrer stabilen Brennphase erzeugen sie im Innern durch Kernfusion schwere Elemente. Als Roter Riese oder als Supernova geben sie dann einen Teil dieser prozessierten Materie an das umgebende interstellare Gas zurück, wo sie als Grundstoff für die nächste Sternengeneration dient. Auf diese Weise reichern die Sterne das interstellare Medium und damit auch spätere Sternpopulationen Schritt für Schritt mit schweren Elementen an.

Materiekreislauf

Dieser Vorgang ist die Voraussetzung dafür, dass Planeten und letztlich auch Leben entstehen konnten. Denn nach dem heutigen Verständnis bildeten sich im Urknall fast nur die leichten, flüchtigen Elemente Wasserstoff und Helium. Die Vielfalt der chemischen Elemente und alles irdische Leben sind demnach eine Folge der kosmischen chemischen Entwicklung, die noch vor der Entstehung der Erde ablief. Jedes Kohlenstoff- oder Sauerstoffatom in unserem Körper ist vor Milliarden von Jahren im Innern eines Sterns erzeugt worden.

Kosmische Evolution der Elemente

Es ist wichtig, diese komplizierten Vorgänge der Nukleosynthese, also der Bildung schwerer Elemente, zu ergründen. Möglich ist dies zum Beispiel mit Beobachtungen von Planetarischen Nebeln und den Überresten von Supernovaexplosionen. Letztere sind im Allgemeinen sehr heiß und müssen daher im Röntgenbereich (oder in der nichtthermischen Radiostrahlung bzw. in Gammalinienstrahlung) untersucht werden. Mit Hilfe von ROSAT konnten viele neue Explosionswolken von Supernovae entdeckt werden. Spektraluntersuchungen mit der nötigen Empfindlichkeit und Auflösung sind aber erst jetzt durch die ESA-Mission XMM-Newton und das amerikanische Röntgenobservatorium Chandra möglich geworden.

Supernovaüberreste

Supernovaüberreste gelten auch als Hauptquelle hoch-energetischer geladener Teilchen, der so genannten Kosmischen Strahlung. Diese erfüllt die gesamte Milchstraße, vermutlich auch den extragalaktischen Raum, und bombardiert unaufhörlich die Erde. Sie zählt damit zu den Motoren der natürlichen Genmutationen irdischen Lebens. Die Entdeckung und Weiterentwicklung des wahrscheinlich wichtigsten Prozesses für die Erzeugung der Kosmischen Strahlung basiert auf den Forschungsergebnissen aus deutschen Instituten.

Parallel zu den Beobachtungen müssen auch die numerischen Simulationen von Supernovae voranschreiten. Noch immer ist der Explosionsmechanismus nicht gänzlich geklärt. Vermutlich spielen Neutrinos und chaotische Mischungsvorgänge während der Detonation eine entscheidende Rolle. Ein Ziel solcher Untersuchungen ist es, die Häufigkeiten zu ermitteln, mit denen die unterschiedlichen chemischen Elemente bis hin zum Uran erzeugt werden (Abbildung 1.8).

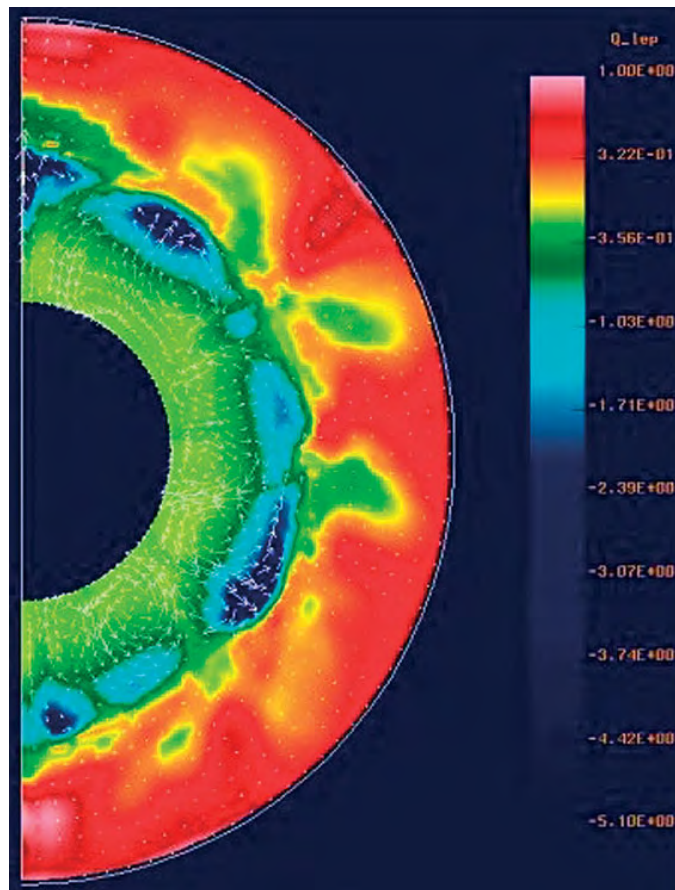


Abb. 1.8: In Computern lässt sich die Explosion eines massereichen Sterns simulieren. Erkennbar die turbulente Mischung der Materie: Sauerstoff, blau; Silizium, grün; Nickel, rot. (MPA)

Der uns am nächsten gelegene Stern ist die Sonne. Auf ihr lassen sich plasmaphysikalische Prozesse von grundlegender astrophysikalischer Bedeutung mit der notwendigen räumlichen Auflösung untersuchen. Die magnetische Aktivität der Sonne führt zu Schwankungen der Strahlung und des Teilchenwindes. Beide beeinflussen Satelliten, Kommunikationssysteme und vermutlich auch das Erdklima. In den letzten Jahren haben Weltraum gestützte Teleskope wie SOHO und erdgebundene Teleskope wie die des Observatoriums auf Teneriffa die Sonne mit immer höherer Präzision analysiert (Abbildung 1.9). Ein Glanzlicht der Forschung war die genaue Vermessung des inneren Aufbaus mit Hilfe der verhältnismäßig neuen Methode der Helioseismologie. Große Fortschritte gelangen auch in der hoch aufgelösten Abbildung und Spektroskopie (Plasma-diagnostik) der Sonnenatmosphäre einschließlich der Korona durch Instrumente im sichtbaren, ultravioletten und Röntgenlicht. Zwei Highlights der deutschen Sonnenforschung waren zum einen die genaue Bestimmung der Quellen des Sonnenwindes mit SOHO, zum anderen die Entdeckung, dass sich das Sonnenmagnetfeld seit der kleinen Eiszeit im siebzehnten Jahrhundert im Gleichschritt mit der Erderwärmung vervielfacht hat.

Unsere Sonne

In Zukunft wird die integrale Betrachtung der gesamten Sonne und ihrer Atmosphäre bis in den interplanetaren Raum hinein im Mittelpunkt der Forschung stehen. Diese „ganz-

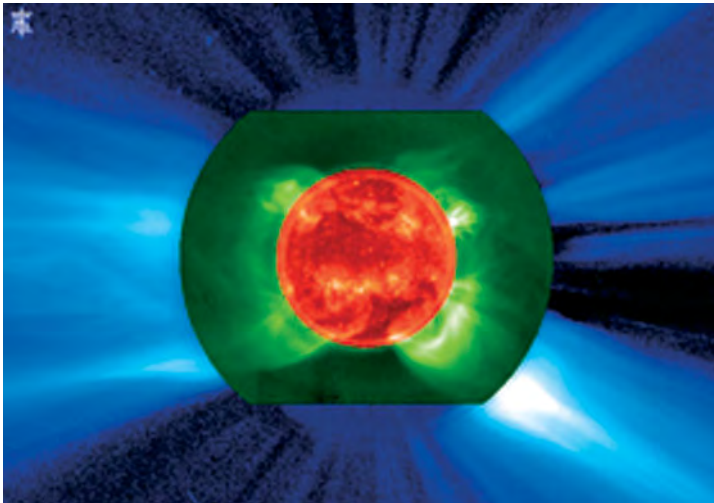


Abb. 1.9: Beobachtungen der Sonne mit verschiedenen Instrumenten auf dem SOHO-Satelliten. Das Bild zeigt magnetische Aktivitätsgebiete auf der roten Sonnenoberfläche, die heiße Sonnenkorona (grün) und den Sonnenwind (blau). (ESA/NASA/MPAe)

heitliche“ Sichtweise ist der Schlüssel zum Verständnis der magnetischen Aktivität und damit auch des Einflusses der Sonne auf das Erdklima. Die notwendige breite Abdeckung von Wellenlängen sowie hohe räumliche und zeitliche Auflösung werden mit der nächsten Generation von Teleskopen wie GREGOR auf Teneriffa, dem ballongetragenen SUNRISE und der möglichen Beteiligung am amerikanischen Sonnen-teleskop ATST, zusammen mit den Instrumenten der ESA-Raumsonde SOLAR ORBITER erreicht werden.

1.3 Neue Fenster ins All

Die meisten Fortschritte in der Astronomie und Astrophysik waren schon immer eng mit der Entwicklung neuer Instrumente, Detektoren und Teleskope verknüpft. Dies bezieht sich sowohl auf die Leistungssteigerung der Instrumente in den „klassischen“ Wellenlängenbereichen als auch auf die Erschließung neuer Bereiche. Hier ergeben sich immer wieder sehr fruchtbare Synergien mit Entwicklungen in ganz anderen Bereichen der Physik und der Technik, wie der Halbleiter- und Laserphysik, der Elektronik und der Computertechnologie. Technologische Fortschritte werden neue Erkenntnisse durch eine höhere räumliche Auflösung und eine detailliertere Analyse des Spektrums der elektromagnetischen Wellen liefern.

Mit den Physik-Nobelpreisen im Jahre 2002 wurden Pionierleistungen bei der Eröffnung neuer Fenster ins All gewürdigt, nämlich die Entdeckung der kosmischen Röntgenstrahlung durch Riccardo Giacconi (1962, 50%), die Lösung des solaren Neutrinoproblems durch Raymond Davis Jr. (1971, 25%) und die Entdeckung der ersten astrophysikalischen Neutrinos von der Supernova 1987A durch Masatoshi Koshihara (1987, 25%). In den nächsten 15 Jahren wollen die Astronomen das Neutrinofenster zum Universum weiter aufstoßen und das neue Fenster der Gravitationswellen eröffnen.

Das „Mooresche Gesetz“ für die Empfindlichkeit von Teleskopen

Die Messempfindlichkeit radioastronomischer Teleskope beispielsweise hat sich seit den dreißiger Jahren im Schnitt alle zwei bis drei Jahre verdoppelt (Abbildung 1.10). Diese rasante Entwicklung ist durchaus mit dem Mooreschen Gesetz der Halbleitertechnik vergleichbar, wonach sich die Speicherkapazität von Chips alle $1\frac{1}{2}$ Jahre verdoppelt. Heutige Radioteleskope sind mit den neuesten Empfängern rund hundertmillionenmal empfindlicher als vor 50 Jahren. Weitere technische Fortschritte lassen Empfindlichkeitssteigerungen

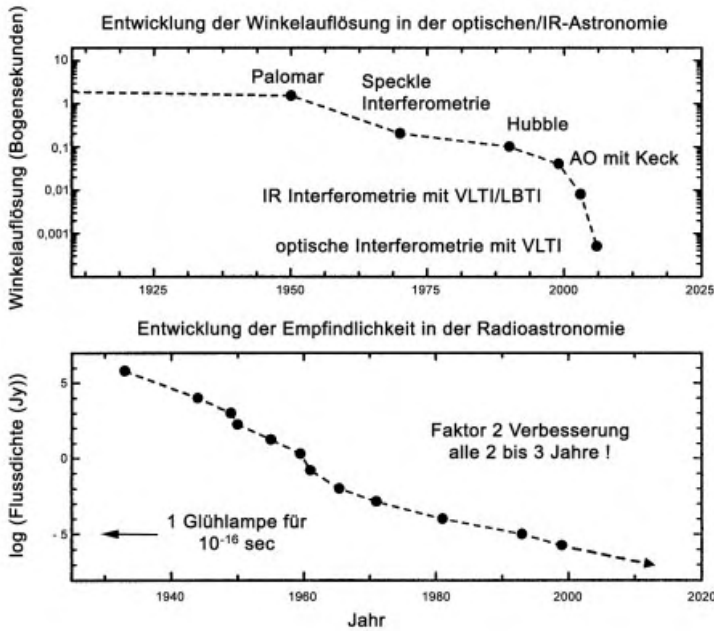


Abb. 1.10: Entwicklung der Messempfindlichkeit in der Radioastronomie (unten) und der Winkelauflösung (oben) von Teleskopen im Bereich des Infrarot und des sichtbaren Lichtes. (MPIFR)

um das 10- bis 50fache innerhalb der kommenden 10 bis 15 Jahre erwarten. Diese bereits heute demonstrierbaren Verbesserungen eröffnen fantastische Möglichkeiten für die Astronomie im Submillimeter- und Millimeterbereich. Die Geschwindigkeitssteigerungen in der digitalen Signalverarbeitung werden es zukünftig darüber hinaus erlauben, im Zentimeterwellenbereich völlig neuartige digitale Radioteleskope zu verwirklichen.

Auch die Winkelauflösung (das Vermögen, zwei nahe beieinander stehende Objekte noch getrennt wahrnehmen zu können) ließ sich in der Vergangenheit wesentlich steigern (Abbildung 1.11). Die Radioastronomie nahm hier insofern eine Sonderstellung ein, als bereits Mitte der fünfziger Jahre das Prinzip der Kopplung von zwei oder mehr Antennen (Apertursynthese) entwickelt wurde. Sie führte ab Ende der sechziger Jahre über die interkontinentale Interferometrie bis zur Weltraum gestützten Interferometrie, die Ende der neunziger Jahre erfolgreich demonstriert wurde. Hiermit sind Winkelauflösungen bis herunter zu 50 Millionstel Bogensekunden möglich. Das entspricht einer Distanz von etwa 10 Zentimeter in der Entfernung des Mondes!

Steigerung der Winkelauflösung

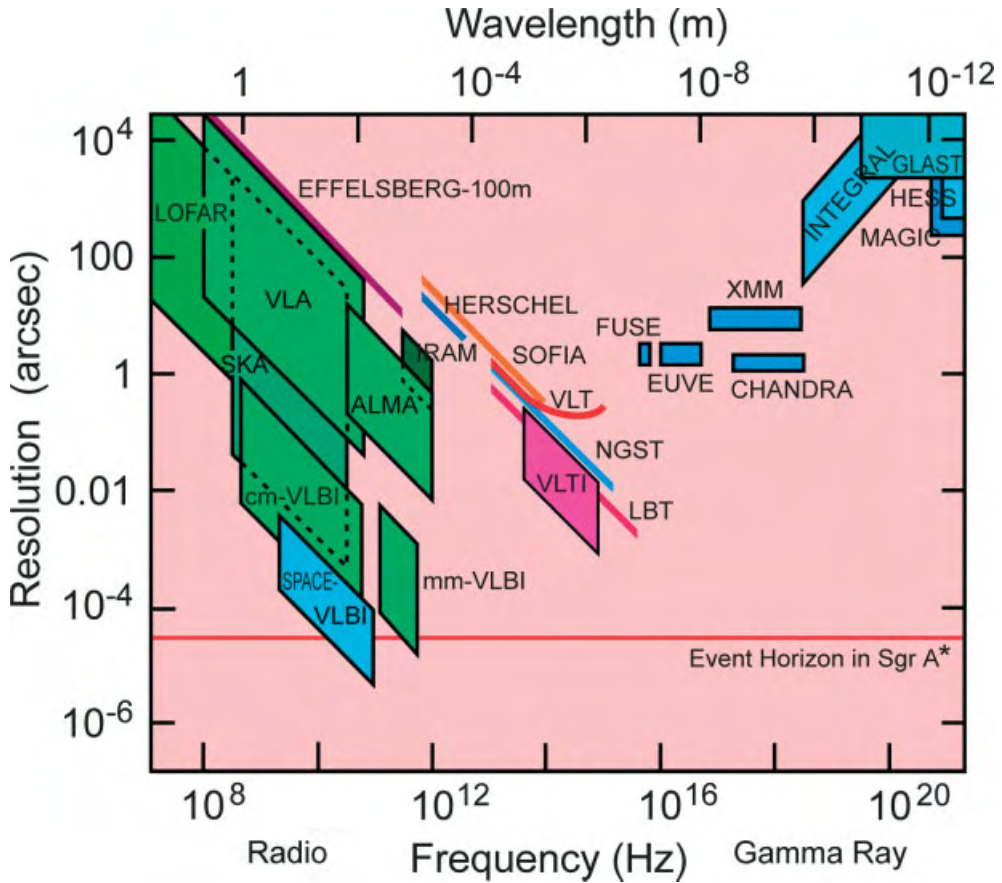


Abb. 1.11: Mit modernen Teleskopen lässt sich das gesamte elektromagnetische Spektrum abdecken. Dargestellt ist hier die Winkelauflösung und der Empfindlichkeitsbereich der wichtigsten in dieser Denkschrift erwähnten Instrumente.

Optische und Infrarotinterferometrie: ein Zukunftsgebiet

Im Bereich des infraroten und des sichtbaren Lichtes ist der Bau von Interferometern indes ungleich schwieriger. Erste Erfolge an den Großteleskopen des Keck-Observatoriums auf Hawaii und dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte, ESO, in Chile lassen jedoch in Kürze einen großen Sprung in der Winkelauflösung erwarten.

Adaptive Optik

Bei der Realisierung dieser Projekte spielt die Technik der „adaptiven Optik“ eine wesentliche Rolle. Sie erlaubt es, die natürliche Luftunruhe, die zu einem Verschmieren astronomischer Aufnahmen führt, während der Beobachtung zu korrigieren. Adaptive Optiken, wie sie auch von deutschen Gruppen für den Calar Alto und für Teneriffa entwickelt wur-

den, funktionieren im Infrarotbereich sehr gut. Um sie auf den Bereich des sichtbaren Lichtes auszudehnen, müssen jedoch noch einige Anstrengungen unternommen werden. Mit adaptiver Optik ausgestattete Interferometer werden die Winkelauflösung in den kommenden 10 bis 15 Jahren um mehr als das Hundertfache verbessern. Auch in anderen Wellenlängenbereichen lassen neue Technologien und Teleskope wesentliche Verbesserungen in der Winkelauflösung erwarten.

Neutrinos sind Elementarteilchen, die mit Materie nur geringfügig wechselwirken. Daher sind sie auch nur sehr schwer nachweisbar. Sie entstehen bei Kernprozessen wie der Kernfusion im Innern der Sterne oder bei Supernovaexplosionen. Für die Astrophysik sind diese Teilchen daher von großer Bedeutung, weil sie einzigartige Informationen über diese Vorgänge beinhalten und beispielsweise den Blick in das Innere von Sternen ermöglichen, der uns sonst verschlossen bleibt.

*Neutrino-
astrophysik*

Seit Ende der sechziger Jahre haben mehrere Experimente die Suche nach solaren Neutrinos unternommen. Der Nachweis solarer Neutrinos wurde, zusammen mit der Entdeckung von Neutrinos der Supernova 1987A, mit einem Teil des Physik-Nobelpreises 2002 honoriert. Als Sensation galt es Anfang der neunziger Jahre, als mehrere Experimente, unter anderem das unter deutscher Leitung entstandene GALLEX, erstmals Neutrinos aus dem Hauptzweig des Wasserstoffzyklus nachwies. Es war genau genommen der erste direkte Beweis dafür, dass die Sonne – und damit auch alle anderen Sterne – ihre Energie durch Kernfusion erzeugen. Allerdings registrierten die Detektoren signifikant weniger Neutrinos als theoretisch erwartet, was damit erklärt wird, dass Neutrinos eine Ruhemasse besitzen. Dies widerspricht dem Standardmodell der Teilchenphysik, wonach Neutrinos masselos sind. Diese Beobachtungen sind ein Beispiel für eine von vielen Wechselwirkungen der Astrophysik mit anderen Disziplinen der Physik.

Solare Neutrinos

Ebenso ein Erfolg war der Nachweis eines Dutzend Neutrinos von der Supernova 1987A, die sich in der Großen Magellanschen Wolke ereignet hatte. Hier war vor allem der japanische Detektor Super-Kamiokande erfolgreich. Angeregt durch diese ersten Erfolge wurden neue „Neutrinoobservatorien“ geplant und gebaut. Am weitesten fortgeschritten ist das Projekt AMANDA, an dem deutsche Forscher entscheidend beteiligt sind. Hier werden lichtempfindliche Detektoren nahe der Amundsen-Scott-Station am Südpol ins Eis abge-

*Neutrinoforschung
im Eis*

lassen. Dort registrieren sie energiereiche Neutrinos, die darin – ähnlich wie im Super-Kamiokande – Tscherenkow-Strahlung aussenden. Die Forscher hoffen, mit AMANDA sogar Neutrinos von Supernovae oder aus den Zentren ferner Galaxien nachweisen zu können. Eine noch wesentlich höhere Empfindlichkeit wird durch das internationale Nachfolgeexperiment ICECUBE erreicht werden, das wie AMANDA unter der Südpolstation gebaut wird.

Gravitationswellen

Technologisches und wissenschaftliches Neuland haben Astrophysiker in aller Welt mit dem Bau von Gravitationswellendetektoren betreten. Mit ihnen wird es möglich sein, die zeitlich veränderliche Kräuselung des Raumes, wie sie die Allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt, direkt nachzuweisen. Die Herausforderung besteht darin, dass die erwarteten Abstandsänderungen nur einen winzigen Bruchteil eines Atomkerndurchmessers ausmachen. Diese will man mit Laserinterferometern nachweisen. Möglich wurden diese Instrumente auf Grund des Fortschritts im Bereich der Laser- und Präzisionsmesstechnik. Deutsche Forscher sind federführend beim Bau des Interferometers GEO600 bei Hannover.

Der Nachweis dieses Phänomens wäre eine weitere glänzende Bestätigung für Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie. Andererseits gäben die Wellen Aufschluss über die energiereichsten Vorgänge im Kosmos. Hierzu zählen Supernovae, sich auf engen Bahnen umkreisende Doppelsterne sowie kollidierende und miteinander verschmelzende Neutronensterne und Schwarze Löcher. In ferner Zukunft erhofft man sich sogar, Gravitationssignale vom Urknall zu empfangen. Dafür werden aber Laserinterferometer im Welt- raum nötig sein, wie sie die ESA und die NASA derzeit mit LISA planen.

Fortschritte in der numerischen Astrophysik

Neben der klassischen theoretischen Astrophysik ist in den letzten Jahren die numerische Simulationsrechnung für die Beschreibung komplexer Phänomene im Universum zum wichtigsten Hilfsmittel geworden. Im selben Maße, wie die Teleskope und Detektoren weiter entwickelt werden konnten, ließ sich auch die Leistungsfähigkeit von Computern erhöhen. In den letzten 15 Jahren hat sich die Geschwindigkeit von Rechnern um etwa einen Faktor Tausend erhöht, was zusammen mit der Entwicklung immer effizienterer Algorithmen und der Benutzung spezifischer Hardwarekomponenten zu enormen Fortschritten bei numerischen Simulationen vieler astrophysikalischer Prozesse geführt hat. Hierzu zählen die Entstehung von Sternen und Planeten in Staubwolken, die

Explosionen von Supernovae, die Entstehung von Galaxienhaufen oder die Vorgänge in den Scheiben um Schwarze Löcher, um nur einige Beispiele zu nennen.

Realistische Resultate erzielt man mit numerischen Simulationen nur dann, wenn man einerseits möglichst viele physikalische Prozesse berücksichtigt und andererseits eine möglichst hohe räumliche und zeitliche Auflösung erzielt. Um die immer detaillierteren Beobachtungen interpretieren zu können, müssen verstärkt Höchstleistungsrechner benutzt werden und es muss eine kontinuierliche Verbesserung der numerischen Verfahren stattfinden.

Box 1.1: Multiwellenlängenastronomie vom Boden und vom Weltraum aus

Für die moderne beobachtende Astronomie wird die Benutzung von Teleskopen in allen Wellenlängenbereichen vom Radio- bis zum Gammabereich, entsprechend 15 Zehnerpotenzen, immer bedeutender. Es gibt eine Reihe von Objekten, deren Natur sich erst im Lichte aller Wellenlängen erschließt. Aktive Galaxien sind hier ein bedeutendes Beispiel. Die Analyse und Interpretation der Daten verlangt auch immer komplexere Software, die im Rahmen des „Virtual Observatory“ für alle Nutzer zugänglich gemacht werden soll.

Seit Beginn der achtziger Jahre hat die Multiwellenlängenastronomie eine rasante Entwicklung erlebt, bei der auch deutsche Gruppen eine führende Rolle gespielt haben (Abbildung 1.11). Mit dem deutsch-französisch-spanischen Institut IRAM (Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich) haben deutsche Forscher seit mehr als 10 Jahren Zugang zu den weltweit besten Teleskopen für den Millimeterwellenlängenbereich. In den neunziger Jahren bildete das *Infrared Space Observatory* (ISO) der europäischen Raumfahrtagentur ESA einen weiteren Höhepunkt. Es war die weltweit erfolgreichste Infrarotmission der neunziger Jahre. Deutsche Institute und die Industrie waren ganz maßgeblich am Detektorbau beteiligt und tragen zur astronomischen Ausbeute und dem Datenarchiv bei.

Ein großer Erfolg war zudem das Röntgenweltraumteleskop ROSAT. Es führte die erste vollständige Himmelsdurchmusterung mit einem abbildenden Röntgenteleskop durch und entdeckte dabei mehr als 100 000 einzelne Quellen. Bisher wurden etwa 5000 wissenschaftliche Publikationen erstellt, die auf ROSAT-Daten basieren. Damit ist dieses Teleskop fast so ertragreich wie das Weltraumteleskop Hubble. Inzwischen liefern die Nachfolgemissionen XMM-Newton und CHANDRA wesentlich detailliertere Information über das Röntgenuniversum. Ein Meilenstein für die Gammaastronomie war das *Compton Gamma Ray Observatory* (CGRO) der NASA. Es verfügte über vier wissenschaftliche Instrumente, von denen eines unter deutscher Leitung entstanden ist. Mit Compton ließen sich mit bis dahin unerreichter Empfindlichkeit besonders heiße Himmelskörper wie Neutronensterne oder Explosionswolken von Supernovae beobachten.

2 Die wissenschaftlichen Themen

Dieses Kapitel stellt einige der aktuellen und spannenden Forschungsthemen der modernen Astronomie und Astrophysik exemplarisch dar. Bei der Auswahl dieser Kernthemen und des entsprechenden Materials wurde einerseits die Entwicklung der Forschung in den letzten Jahren und die künftigen Entwicklungsmöglichkeiten in diesen Bereichen berücksichtigt; andererseits wurden die Schwerpunkte und Stärken deutscher Forschung in Betracht gezogen. Die Darstellung der Forschungsfelder in diesem Kapitel zielt keineswegs auf Vollständigkeit, sondern es soll ein Eindruck von der Vielseitigkeit und den zukünftigen Entwicklungen der modernen Astrophysik gegeben werden. Diese Themen werden dann in Kapitel 3 als Beispiele herangezogen, wenn die enormen zu erwartenden wissenschaftlichen und technischen Fortschritte durch die Observatorien und Instrumente der nächsten 15 Jahre diskutiert werden.

2.1 Das Universum – Entstehung, Entwicklung und großräumige Struktur

Wissenschaftlicher Fortschritt

- Entdeckung von Strukturen (Anisotropien) in der kosmischen Hintergrundstrahlung.
- Bestimmung der Geometrie des Universums.
- Nachweis Dunkler Materie und der Vakuumsenergie.
- Neueichung der kosmischen Entfernungsskala.
- Altersbestimmung der ältesten Sterne der Milchstraße und des Universums.

- Charakterisierung der großräumigen Struktur im Universum.
- Entdeckung von Gravitationslinsen und deren Anwendung als astrophysikalisches „Instrument“.
- Erklärung der Struktur im intergalaktischen Gas und dessen Anreicherung mit schweren Elementen.

Aufgaben und Ziele

- Genaue Bestimmung der Geometrie (Krümmung) des Universums und der entscheidenden kosmologischen Parameter.
- Präzise Eichung der Entfernungsskala.
- Rekonstruktion der kosmischen Entwicklung: Entstehung der ersten Sterne, der Galaxien und Galaxienhaufen.
- Rekonstruktion der chemischen Entwicklung des Universums: Produktion der schweren Elemente.
- Bestimmung der großräumigen Verteilung der leuchtenden Materie (Sterne und Gas) und der Dunklen Materie.
- Direkter Nachweis der Konstituenten der Dunklen Materie.
- Entdeckung von Gravitationswellen.

Durch den rasanten Fortschritt der Beobachtungsmethoden in enger Verbindung mit theoretischen Entwicklungen hat sich die Kosmologie als Wissenschaft von der Geschichte unseres Universums aus einer ursprünglich mathematisch geprägten Tradition zu einer zentralen Disziplin astrophysikalischer Forschung entwickelt. Noch in den achtziger Jahren war die Kosmologie stark geprägt von rein theoretischen Entwicklungen wie der Theorie des Inflationären Universums. Damals setzten auch die ersten Versuche ein, mit Hilfe von Computern die Entstehung großräumiger Strukturen zu simulieren.

Heute ist es möglich, sehr weit entfernte Galaxien im frühen Universum durch direkte Beobachtungen zu studieren, denn auf Grund der endlichen Lichtlaufzeit ist jeder Blick in große Entfernungen gleichzeitig ein Blick in die Vergangenheit. Erst seit etwa zehn Jahren ist es überhaupt möglich, so tief ins Universum zu schauen, dass man tatsächlich Entwicklungseffekte bei den Galaxien feststellt. So sandten die entferntesten Himmelskörper das heute von ihnen empfangene Licht aus, als sich der Kosmos noch in einer sehr frühen Entwicklungsstufe befand. Ebenso laufen seit etwa zwei Jahren groß angelegte Himmelsdurchmusterungen, mit denen sich die räumliche Verteilung von Millionen von Galaxien ermitteln lässt. Hieraus wird sich die Struktur des heutigen Universums direkt vermessen lassen.

*Die Entwicklung
der Kosmologie*

Hinzu kommt die Untersuchung des Mikrowellenhintergrundes und seiner Anisotropie, die uns Informationen über die Struktur des Universums nur 380 000 Jahre nach dem Urknall vermitteln. Diese Beobachtungen lieferten gerade in den vergangenen 10 Jahren grundlegende Erkenntnisse über die Entwicklung des Universums. Gemeinsam mit anderen Beobachtungsergebnissen haben diese Resultate zu einem selbstkonsistenten Standardmodell des Kosmos geführt, charakterisiert einerseits durch das Urknallmodell, verbunden mit der Theorie der Inflation, und andererseits durch den Materieinhalt des Universums. Nur etwa 4 % der Materie des Universums besteht aus den chemischen Elementen der „normalen“, baryonischen Materie; hinzu kommen zwei fundamental neue Formen der Materie: die Dunkle Materie und die Vakuumsenergie, die sich beide nur durch ihre Gravitationswirkung bemerkbar machen. Der Anteil der Vakuumsenergie von etwa 70 % der Gesamtmasse führt dazu, dass unser Universum heute beschleunigt expandiert.

Sollten sich diese Resultate bestätigen, so wiese dies auf eine momentan unvollständige Beschreibung der Elementarteilchenphysik hin, da der Ursprung der Dunklen Materie und der Vakuumsenergie in der Mikrophysik liegen muss. Die Aufklärung der physikalischen Natur dieser Materieformen bildet eine gewaltige Herausforderung an die Physik und wird zu einer Revolution im Verständnis der grundlegenden Naturgesetze führen. Die wesentlichen Größen zur Beschreibung des Universums, die kosmologischen Parameter, konnten durch die Kombination mehrerer kürzlich durchgeführter Beobachtungen mit einigen Prozent Genauigkeit bestimmt werden – somit ist die Ära der Präzisionskosmologie eingeläutet worden, deren Blüte wir in der nächsten Dekade erleben dürften.

2.1.1 Urknall und kosmische Hintergrundstrahlung

Der Urknall

Im Urknallmodell, das heute im Wesentlichen als bestätigt gilt, treffen die physikalischen Naturgesetze der Elementarteilchen mit der Theorie von Raum und Zeit der Allgemeinen Relativitätstheorie zusammen. Das Universum wird damit zum einmaligen Laboratorium, das weit über jedes irdische Experiment hinaus Anregungen und Testmöglichkeiten für die Vereinheitlichung aller physikalischen Gesetze ermöglicht.

Nach dem „Big Bang“ kühlte sich das expandierende Universum ab. Zunächst bildeten sich im Urgas die Elementarteilchen und nach etwa drei Minuten die leichtesten Atomkerne. Elektronen und Kerne bildeten dabei zunächst

ein Plasma, durch das sich Licht nicht frei ausbreiten konnte: Das Gas war undurchsichtig. Erst etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall hatte sich das Universum so weit abgekühlt, dass Elektronen und Kerne sich zu Atomen vereinigen konnten. Dadurch wurde das Universum transparent, und die Strahlung konnte sich nahezu ungehindert ausbreiten. Wegen der fortschreitenden Expansion des Universums verlor die Strahlung an Energie und kühlte bis heute auf nur 2.73 Kelvin mit einem Intensitätsmaximum im Bereich der Mikrowellen ab. Die Entdeckung dieses allgegenwärtigen kosmischen Mikrowellenhintergrundes (kosmische Hintergrundstrahlung) durch Penzias und Wilson 1965, vorhergesagt 1946 von Gamov, ist einer der größten Triumphe der Kosmologie und bildet eine der wesentlichen Säulen, auf denen die Urknalltheorie ruht.

Laut Theorie bildeten sich die Galaxien und Galaxienhaufen aus geringfügigen Dichteschwankungen in diesem Urgas. Diese „Keime der frühesten Strukturen“ sollten ihren Abdruck in der kosmischen Hintergrundstrahlung hinterlassen haben. 1992 gelang mit dem amerikanischen COBE-Satelliten die großartige Entdeckung dieser vorhergesagten Anisotropie mit relativen Amplituden von etwa einem Tausendstel Prozent (Abbildung 1.1). Das war eine erste wichtige Bestätigung der Theorie der Strukturentstehung im Universum.

*Keime der
Strukturbildung*

COBE hatte jedoch eine relativ geringe Sehschärfe. Die kleinsten erkennbaren Strukturen waren am Himmel etwa 7° groß. Eine Fülle von Informationen über die Struktur des Universums bei einem Alter von 380 000 Jahren ist jedoch auf Winkelskalen zwischen etwa einem Grad und einigen Bogenminuten in der kosmischen Hintergrundstrahlung verborgen. Daher sollen neue und leistungsfähigere Experimente diese Schwankungen mit stark verbesserter Winkelauflösung und größerer Empfindlichkeit vermessen. Für diese Aufgaben sind zwei Satellitenexperimente vorgesehen: die 2001 gestartete *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) der NASA und die europäische Planck-Mission, die 2007 starten soll (Abbildung 2.1). Eine Vorschau auf die zu erwartenden spektakulären Ergebnisse vermittelte im Jahre 2000 die Kartierung kleiner Himmelsregionen im Mikrowellenbereich mit verbesserter Winkelauflösung durch die von Ballonen getragenen Instrumente BOOMERanG und MAXIMA und die erste von WMAP veröffentlichte Karte. Sie zeigten, dass das Universum „flach“ ist. Das bedeutet, die mittlere (Energie-)Dichte im Universum entspricht gerade der kritischen Dichte in Übereinstimmung mit der Vorhersage der Theorie des inflationären Universums.

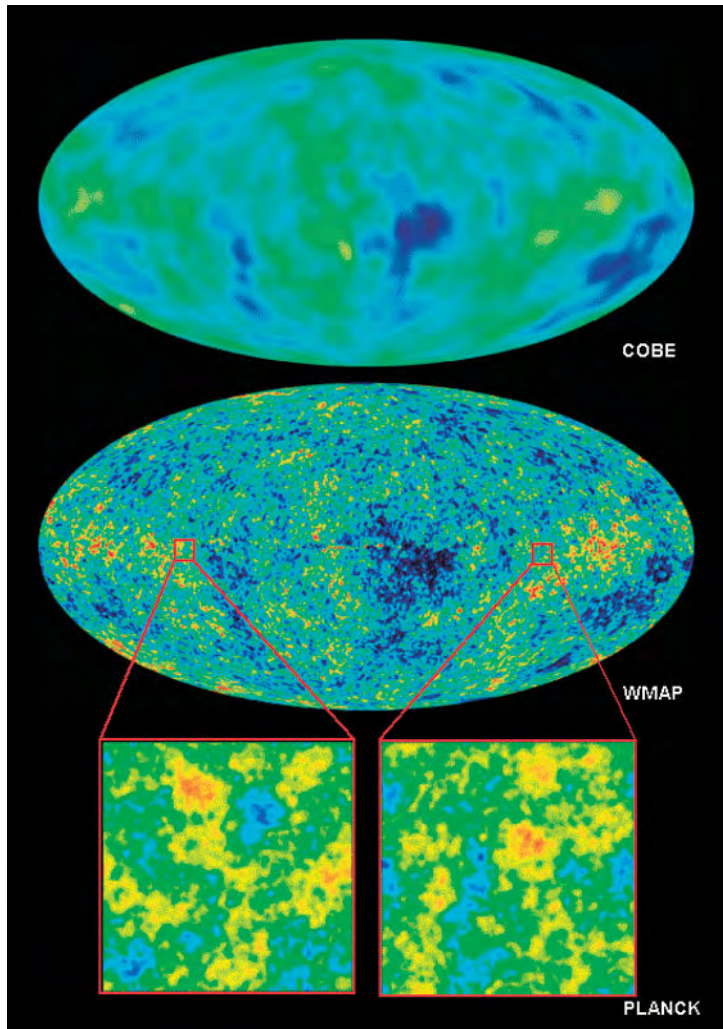


Abb. 2.1: Strukturen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung. Während mit dem COBE-Satelliten (oben) nur ein grobes Bild der frühen kosmischen Strukturen erhalten werden konnte, hat der Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Satellit der NASA die erwarteten quasiperiodischen räumlichen Fluktuationen vermessen (Mitte). Der Planck-Satellit der ESA wird die Feinstrukturen in exquisitem Detail aufzeichnen können (unten). Diese enthalten den Schlüssel zu den fundamentalen kosmologischen Parametern und physikalischen Bedingungen kurz nach dem Urknall. (Quelle NASA/WMAP Science Team/MPA)

Planck wird etwa 50fach detailliertere und etwa zehnfach genauere Himmelskarten erhalten als COBE und hat im Vergleich zu WMAP ein dreifach besseres Winkelauflösungsvermögen und eine größere Wellenlängenabdeckung. Die deutsche Astronomie ist vor allem durch ein Datenzentrum an der Auswertung der Planck-Mission beteiligt.

Nachdem sich Elektronen und Atomkerne zu Atomen verbunden haben, wurde das Universum transparent für relativ langwellige Strahlung. Dies gilt nicht für Photonen im ultravioletten Teil des Spektrums, die von den gebundenen Atomen sehr effizient absorbiert werden, weswegen diese Epoche auch „dunkles Zeitalter“ genannt wird. Da wir jedoch Quasare bei sehr hohen Rotverschiebungen beobachten können, muss das Universum als Ganzes inzwischen wieder reionisiert worden sein. Die dazu notwendigen hochenergetischen Photonen stammen vermutlich aus einer ersten Generation leuchtkräftiger Quellen wie etwa den ersten Quasaren oder den ersten Galaxien. Die Suche nach diesen Quellen und die Bestimmung der kosmischen Epoche, in denen sie aufleuchteten, bildet einen faszinierenden Aspekt der beobachtenden Kosmologie und wird entscheidende Hinweise auf die physikalischen Verhältnisse zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Objekte liefern. Die erwartete komplexe Struktur des Übergangs von einem neutralen zu einem im Wesentlichen ionisierten Universum ist Gegenstand sehr aktiver theoretischer Forschung und kann möglicherweise zukünftig direkt mit dem *Square Kilometre Array* (SKA) beobachtet werden.

Das Ende des „kosmischen Mittelalters“

2.1.2 Die kosmische Entfernungsskala

Edwin Hubbles Entdeckung, dass alle Galaxien voneinander fortstreben, war für die moderne Forschung bahnbrechend und für die Weltanschauung der Menschheit revolutionär. Er fand heraus, dass die „Fluchtgeschwindigkeit“ mit zunehmender Entfernung der Galaxien von der Milchstraße ansteigt. Damit lässt sich aus der messbaren Fluchtgeschwindigkeit die Entfernung ausrechnen, sofern der Proportionalitätsfaktor, die Hubble-Konstante, bekannt ist. Diese Konstante bestimmt gleichzeitig die *Größenskala* und das *Alter* unseres Universums, während die Dichte in den verschiedenen Materiezuständen die *Form* des Universums beschreibt.

Die Fluchtgeschwindigkeit einer Quelle wird ermittelt aus der so genannten Rotverschiebung des Spektrums, das heißt aus der messbaren Verschiebung charakteristischer

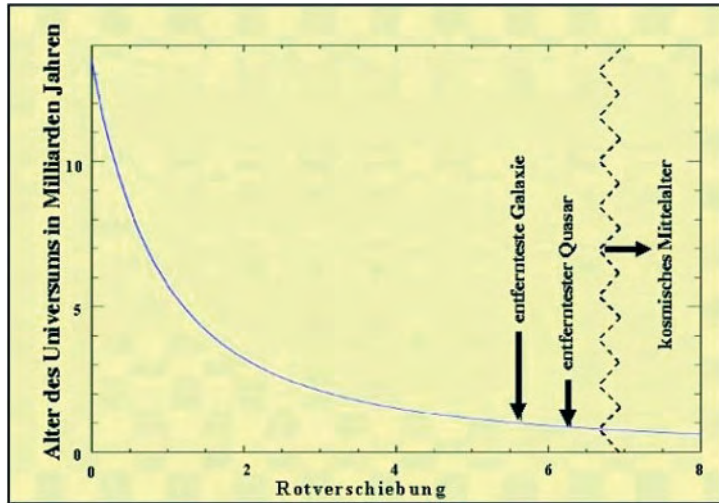


Abb. 2.2: Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung einer Quelle und dem Weltalter zu der Zeit, bei der das Licht dieser Quelle ausgesandt wurde. Das Ende des „kosmischen Mittelalters“ ist zur Zeit nicht genau bekannt. (Uni Bonn)

Spektrallinien zu größeren Wellenlängen hin. Das Hubble-Gesetz besagt, dass Quellen hoher Rotverschiebung, also großer Fluchtgeschwindigkeit, sich in großen Entfernungen von uns befinden. Die Strahlung dieser Quellen stammt von einem Zeitpunkt, als das Universum jünger war; die Rotverschiebung z ist daher nicht nur ein Maß für die Entfernung von Quellen, sondern auch für das zugehörige Weltalter; Abbildung 2.2 zeigt diesen Zusammenhang.

Eichung der Entfernungsskala

Die Entfernungsmessung im Universum gehört seit jeher zu den zentralen Problemen der Astronomie und Kosmologie. Um die Hubble-Konstante zu ermitteln, müssen Verfahren gefunden werden, mit denen sich die Entfernungen der Galaxien unabhängig von ihren Fluchtgeschwindigkeiten ermitteln lassen. Diese Eichung der Entfernungsskala ist eine zentrale Aufgabe der Forschung. Sie geschieht über „Standardkerzen“. Das sind im Allgemeinen Sterntypen mit genau bekannter Leuchtkraft, deren Wert aus den Helligkeiten und den mit der geometrischen Methode der Parallaxe gemessenen Entfernungen einer Stichprobe relativ naher Vertreter dieser Sterntypen bestimmt werden kann. Diese Methode der Kalibration der extragalaktischen Entfernungsleiter hat durch den europäischen HIPPARCOS-Satelliten wichtige Fortschritte gemacht. Große Bedeutung hat hier die zukünftige Astrometriemission GAIA, welche die Entfernungen einer

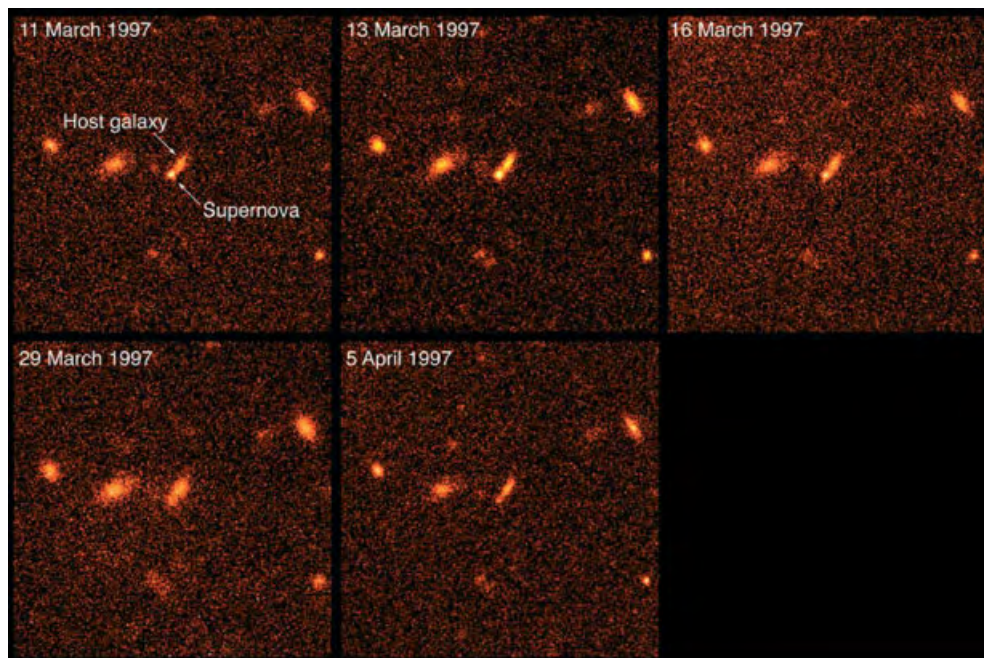


Abb. 2.3: Entdeckung einer Supernova in einer entfernten Galaxie ($z = 0.51$) mit dem New Technology Telescope der ESO. Das in der jeweiligen Bildmitte liegende Objekt wird im Vergleich zu seiner Muttergalaxie zunächst heller und im Verlauf des folgenden Monats wieder schwächer. (ESO)

ausreichend hohen Zahl von Einheitskerzen mit wesentlich größerer Empfindlichkeit und Genauigkeit als HIPPARCOS bestimmen soll.

Eine genaue Eichung von Standardkerzen gelingt inzwischen sogar durch die Beobachtung extragalaktischer Quellen, da man mit interkontinentaler Radiointerferometrie (VLBI) geometrische Entfernungen selbst bis hinaus zu einigen Millionen Lichtjahren messen kann (Abbildung 2.3).

In jüngerer Zeit wurden zunehmend auch Supernovae vom Typ Ia als Standardkerzen eingesetzt (Abbildung 2.3). Sie sind deshalb besonders interessant, weil sie wegen ihrer enormen Leuchtkraft über größere Entfernungen (gegenwärtig bis zu Rotverschiebungen von etwa 2) hin beobachtbar sind als andere Standardkerzen. In den letzten Jahren haben diese Beobachtungen zusammen mit den Messungen der Hintergrundstrahlung und an Galaxienhaufen den spektakulären Hinweis geliefert, dass die Expansion des Universums nicht abgebremst, sondern sogar beschleunigt wird. Diese Beschleunigung wird in der Theorie durch die von Einstein zu-

*Beschleunigte
Expansion des
Universums*

nächst eingeführte und später wieder verworfene Kosmologische Konstante beschrieben; die moderne Interpretation dieser Konstanten ist die bereits erwähnte Vakuumsenergie. Sie ist einer der wichtigsten und gleichzeitig auch rätselhaftesten Parameter in der Beschreibung kosmologischer Modelle. Um die noch verhältnismäßig neue Methode der Entfernungsbestimmung über Supernovae vom Typ Ia auf sichereren Grund zu stellen, müssen weitere Anstrengungen unternommen werden, die Physik dieser explodierenden Sterne besser zu verstehen. Hier leisten gerade deutsche Theoretiker international bedeutende Beiträge.

Alter des Universums

Das Alter des Universums lässt sich einerseits aus dem Expansionsgesetz und dem zugehörigen Wert der Hubble-Konstanten ableiten. Unabhängig davon legen andererseits die ältesten beobachteten Sterne eine Untergrenze für das Weltalter fest. Alle Altersbestimmungen beruhen auf vergleichsweise gut bekannten kernphysikalischen Daten, welche die Entwicklung der Sterne steuern. Im Gegensatz zur Entfernungsskala beruht die Bestimmung des Alters der ältesten Sterne in der Milchstraße auf massearmen, lichtschwachen und kühlen Objekten. Diese können sich in Kugelsternhaufen befinden oder auch als Einzelsterne existieren.

In den vergangenen Jahren wurde auf der Basis der HIPPARCOS-Daten zusammen mit neuen, auch in Deutschland entwickelten Sternentwicklungsmodellen das Alter der ältesten galaktischen Kugelsternhaufen neu bestimmt. Die neuen Werte von ca. 13 ± 3 Milliarden Jahren sind in gutem Einklang mit dem derzeit akzeptierten Wert für die Hubble-Konstante. GAIA soll diese Untersuchungen an Kugelsternhaufen weiter verbessern und auf eine gesicherte Basis stellen.

Gravitationslinsen

Eine der faszinierendsten Entdeckungen der vergangenen 20 Jahre sind Gravitationslinsen. Dieser Effekt der gravitativen Lichtablenkung wird durch die Einsteinsche Allgemeine Relativitätstheorie beschrieben, wonach Materie den umgebenden Raum krümmt. Geht ein Lichtstrahl in einen Raumbereich, in dem das Gravitationsfeld einer Galaxie oder auch eines ganzen Galaxienhaufens spürbar ist, so muss er der zugehörigen Raumkrümmung folgen und bewegt sich daher auf einer gebogenen Bahn. Oder anders gesagt: Lichtstrahlen werden im Gravitationsfeld ebenso abgelenkt wie massive Körper. Beobachtet man eine entfernte Galaxie, deren Licht durch das Gravitationsfeld einer Vordergrundgalaxie hindurchgelaufen ist, so erscheint das weiter entfernte Objekt bogenförmig verzerrt oder als Mehrfachbild. 1979 wurde die erste Doppelabbildung

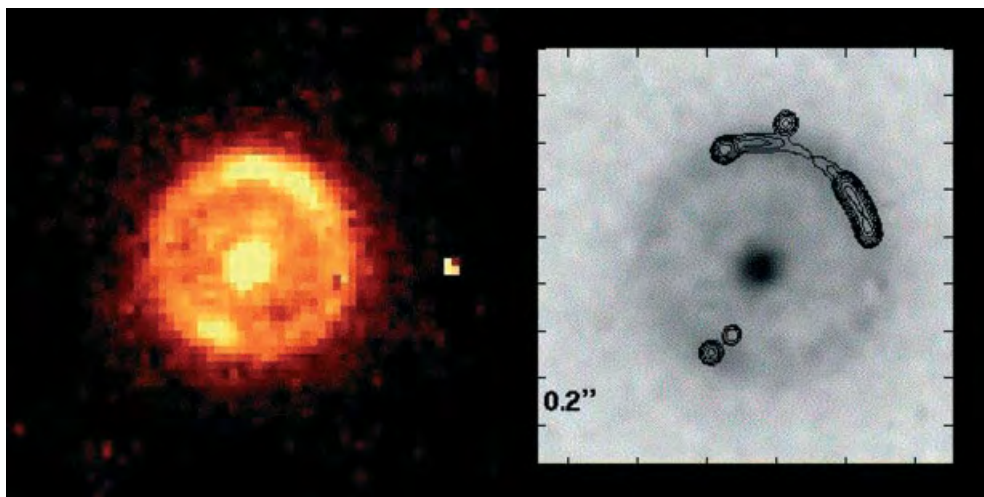


Abb. 2.4: Im Gravitationslinsensystem 1938+666 wird die weit entfernte Radiogalaxie in einen Ring („Einstein-Ring“) abgebildet, wie in der HST/NICMOS-Aufnahme (links) zu sehen ist, während die zugehörige Radioquelle (rechts) in Mehrfachbilder aufgespalten wird. (NASA/STScI/Jodrell Bank/Uni Bonn)

eines Quasars durch eine Galaxie entdeckt, und Mitte der achtziger Jahre fand man Galaxienbilder, die ein Galaxienhaufen ringförmig verzerrt (Abbildung 2.4). Von besonderer Aussagekraft sind mehrfach abgebildete Radioquasare, die sich mit interferometrischen Techniken bei sehr hoher Winkelauflösung untersuchen lassen, wobei Wissenschaftler in Deutschland bedeutende Beiträge geleistet haben.

Theoretiker erkannten, dass sich der Gravitationslinseneffekt vielfältig nutzen lässt, neben sehr genauen Massenbestimmungen zum Beispiel auch zur Bestimmung der Hubble-Konstante. Hierfür muss man Helligkeitsschwankungen in den Mehrfachbildern von Quasaren verfolgen, die wegen des Laufzeitunterschieds entlang der verschiedenen Lichtwege nicht gleichzeitig sichtbar sind. Messungen dieser Art mit optischen und Radioteleskopen sind bereits in mehreren Linsensystemen erfolgreich durchgeführt worden und lieferten Werte für die Hubble-Konstante, die am unteren Ende der Skala liegen, die mit anderen Methoden abgeschätzt werden. Für die Überwachung von Helligkeitsschwankungen werden verstärkt automatisch arbeitende Teleskope eingesetzt.

Die prinzipielle Schwierigkeit dieser Methode besteht vor allem in der genauen Bestimmung der Massenverteilung der Linsengalaxie und ihrer Umgebung. Ihr Vorteil liegt aber darin, dass sie völlig unabhängig von den „klassischen“

*Unabhängige
Bestimmung der
Hubble-Konstante*

Methoden ist. Eine Verbesserung der Linsenmodelle und damit eine genauere Bestimmung der Hubble-Konstanten werden vor allem durch zukünftige Beobachtungen mit dem JWST erwartet.

2.1.3 Kosmologische Entwicklung

Das Verständnis der Entwicklung des Universums aus dem in der Mikrowellenhintergrundstrahlung beobachtbaren frühen Zustand hin zum Universum heute ist ein zentrales Ziel der gegenwärtigen kosmologischen Forschung. Zum ersten Mal haben wir heute die Möglichkeit, diese Entwicklung detailliert zu untersuchen und zu verstehen und somit direkter Zeuge eines einmaligen physikalischen Experiments zu sein: unserem Kosmos.

Diese neuen Möglichkeiten werden durch die Entwicklung neuer Großteleskope in praktisch allen Wellenlängenbereichen eröffnet: Quellen bei hohen Rotverschiebungen, also in der Frühzeit des Universums, sind aufgrund ihrer riesigen Entfernung sehr lichtschwach, so dass sie nur mit sehr empfindlichen Teleskopen zu untersuchen sind. Für die deutsche Astronomie sind dabei vor allem die neuen Großteleskope VLT, LBT und JWST für Beobachtungen im Optischen und nahen Infraroten entscheidend. Für die Entstehungsphase der Galaxien mit starker Sternbildung und vermutlich sehr hohem Staubanteil werden vor allem Beobachtungen im Ferninfraroten, Submillimeter- und Röntgenbereich vorrangig sein. Hier sollen Herschel, APEX und ALMA, beziehungsweise XMM-Newton und später XEUS zum Einsatz kommen.

Zur quantitativen Interpretation der so gewonnenen Daten ist eine dazu parallel verlaufende Entwicklung von theoretischen Ansätzen essenziell. Diese vollzieht sich einerseits im Verstehen der physikalischen Prozesse, die bei der kosmischen Entwicklung eine wesentliche Rolle spielen, sowie im qualitativen Verständnis der zentralen Vorgänge. Andererseits verlangt die Komplexität der Strukturentwicklung, dass diese Entwicklung mit zum Teil sehr aufwendigen Simulationen auf Hochleistungsrechnern nachvollzogen werden muss; der quantitative Vergleich dieser Simulationen mit Beobachtungen führt dann zu Erkenntnissen über die kosmische Entwicklung.

*Strukturbildung
im Universum*

Aus den im Mikrowellenhintergrund sichtbaren Fluktuationen im frühen Universum bildeten sich im Wechselspiel zwischen kosmischer Expansion und Gravitationskraft die

großräumigen Strukturen der Materieverteilung. Diese Entwicklung wird dominiert von der Dunklen Materie, die nur gravitativ wechselwirkt. Ihre Entwicklung lässt sich inzwischen in verblüffendem Detail mittels Simulationen nachvollziehen (Abbildung 2.5), wobei deutsche Institute eine weltweit führende Rolle in der Konzeption, Durchführung und

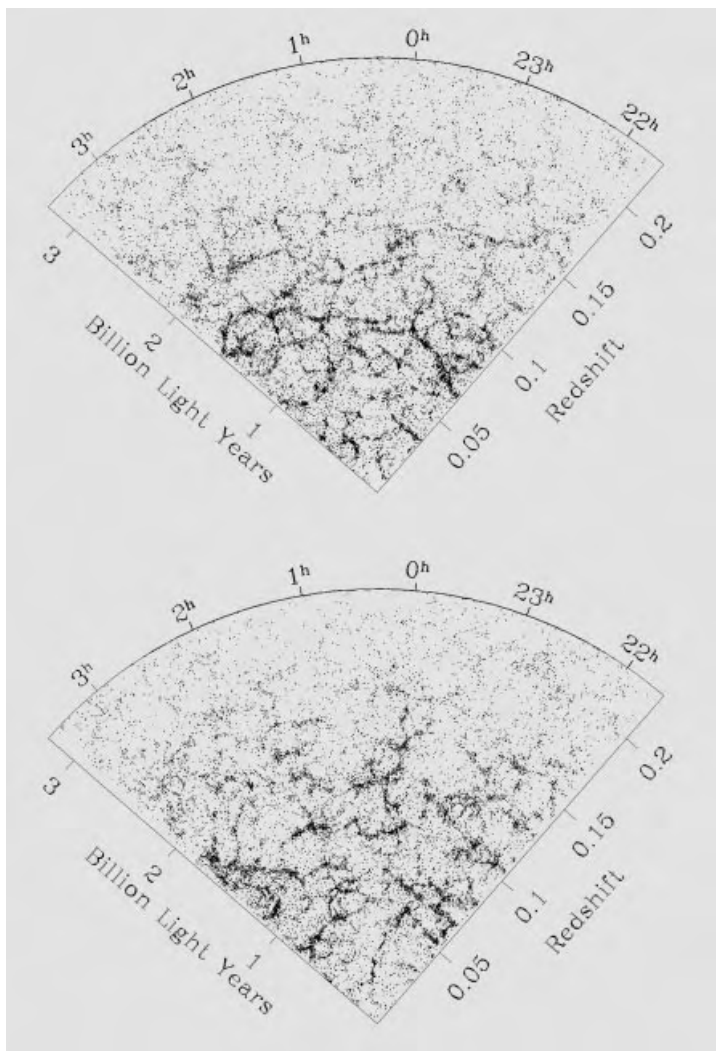


Abb. 2.5: Vergleich der echten Galaxienverteilung, wie sie mit der in Australien durchgeführten 2dF-Himmelsdurchmusterung beobachtet wurde (oben), mit der simulierten Galaxienverteilung in der Hubble-Volumensimulation, der in Deutschland durchgeführten und bislang weltweit größten Supercomputerrechnung der Strukturentwicklung im Universum (unten). (MPA)

theoretischen Interpretation dieser Rechnungen spielen. Die ersten entstehenden massiven Objekte sind demnach solche mit relativ kleiner Masse, während sich große Galaxien und Galaxienhaufen erst später, unter anderem durch Verschmelzung kleinerer Objekte, bilden. Dieses hierarchische Modell der Strukturentwicklung ist inzwischen durch eine Vielzahl von Beobachtungen bestätigt worden, beispielsweise durch die mit der kosmischen Entfernung zunehmenden Zahl von verschmelzenden Galaxien und die Beobachtung der Bildung von Galaxienhaufen aus kleineren Bausteinen.

Absorptionslinien und intergalak- tisches Medium

Eine sehr wichtige Diagnostik der Strukturentwicklung und der Erforschung des intergalaktischen Mediums, aus dem sich die Galaxien bilden, sind Absorptionsliniensysteme. Licht von sehr weit entfernten Quellen wie etwa Quasaren durchquert auf seinem Weg zu uns eine ganze Reihe von Gaswolken, die sich beispielsweise in den Außenbereichen von Galaxien, im Innern junger Protogalaxien oder auch im intergalaktischen Medium zwischen den Galaxien befinden können. Dieses Gas absorbiert einen bestimmten Teil des Lichtes und hinterlässt im Spektrum des Quasars eine charakteristische Signatur (Abbildung 2.6). Die Spektren, die mit den modernen Instrumenten des VLT gewonnen werden können, haben Laborqualität und erlauben eine detaillierte Diagnostik der Gaswolken bezüglich physikalischer Parameter wie Dichte, Temperatur, Turbulenz und chemischer Zusammensetzung. Da die Wolken sich in unterschiedlichen Entfernungen befinden, sehen wir sie in unterschiedlichen Entwicklungsphasen des Universums. Es wurden mit dem VLT schon Quasare mit einer Rotverschiebung um 6 spektroskopiert; sie sandten ihr Licht aus, als das Universum erst 5% des heutigen Alters hatte!

Der Lyman-Alpha- Wald

Während die Entwicklung der Dunklen Materie bereits heute numerisch gut nachvollzogen werden kann, ist die entsprechende Entwicklung der normalen, baryonischen Materie wesentlich komplexer, da diese zusätzlichen Wechselwirkungen unterworfen ist. Andererseits ist nur die Verteilung der baryonischen Materie der direkten Beobachtung zugänglich. In den letzten Jahren wurden erste Fortschritte in der numerischen Simulation dieser Materiekomponente erzielt, was unter anderem zur Lösung eines langjährigen Rätsels führte: der Entschlüsselung der Natur des „Lyman-Alpha-Waldes“. Darunter versteht man eine große Klasse von Absorptionslinien, die in jedem Quasar hoher Rotverschiebung beobachtet werden können. Dieses seit 20 Jahren bekannte Phänomen kann heutzutage theoretisch mittels Computersimulationen

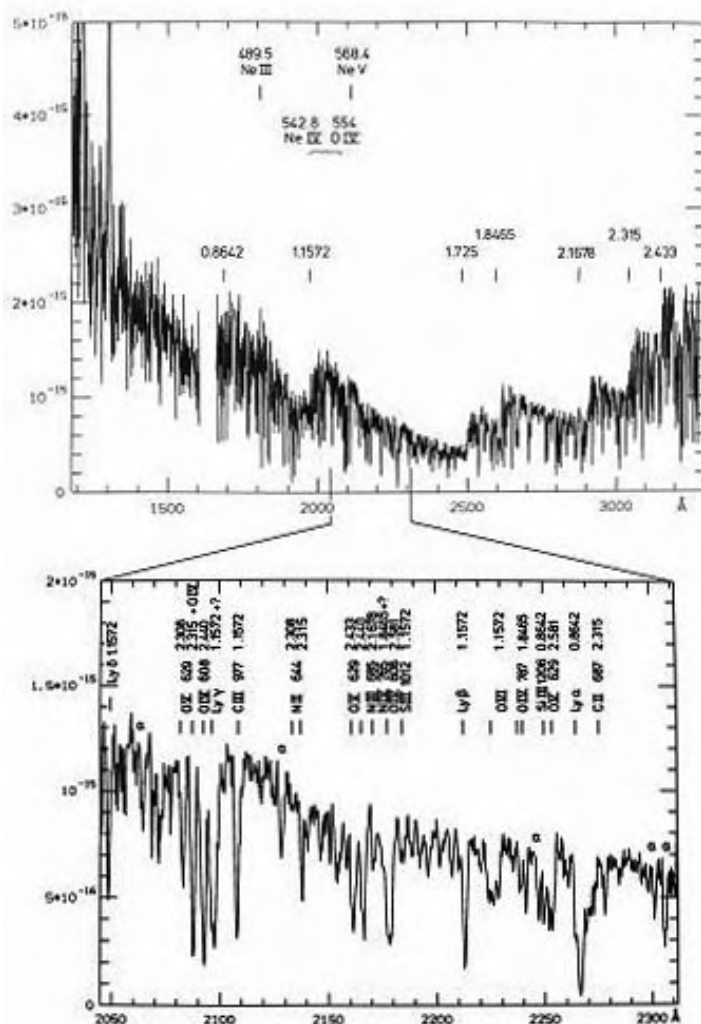


Abb. 2.6: Tomographie des intergalaktischen Mediums entlang des Sichtstrahls zu dem Quasar HS 1700+6416. Die Stärke der Vielzahl von Absorptionslinien in diesem von HST aufgenommenen UV-Spektrum (die horizontale Achse ist die Wellenlänge in Ångström) gibt detaillierte Auskunft über die Elementhäufigkeit und die physikalischen Zustände im dünn verteilten Gas im Vordergrund des Quasars. Dieses Gas hat noch eine sehr „alte“ chemische Zusammensetzung, die noch wenig durch Nukleosynthese in massereichen Sternen angereichert ist. (Quelle NASA/HST/Uni Hamburg)

nachvollzogen werden, indem Lichtstrahlen durch die simulierte Gasverteilung im frühen Universum verbreitet werden und dabei die Absorption durch den Wasserstoff berücksichtigt wird. Die so erzeugten synthetischen Spektren sind statistisch ununterscheidbar von denen beobachteter Quasare. Der Lyman-Alpha-Wald spiegelt daher die Verteilung und den physikalischen Zustand des Gases im frühen Universum wider.

Primordiales Gas

In jüngster Zeit haben Beobachtungen des Lyman-Alpha-Waldes eine ganz besondere Bedeutung gewonnen, als es möglich wurde, das Verhältnis von Wasserstoff zu Deuterium im jungen Universum zu messen. Man vermutet, sogar so weit vorgedrungen zu sein, dass man hier das primordiale, im Urknall durch Kernsynthese entstandene Häufigkeitsverhältnis beobachtet. Dieses wiederum hängt entscheidend von der kosmischen Dichte der baryonischen Materie ab. Aus der Entschlüsselung der chemischen Zusammensetzung konnte daher diese Dichte bestimmt werden: Sie beträgt nur etwa 4 % der kritischen Dichte. In Verbindung mit den Resultaten aus der Untersuchung des Mikrowellenhintergrundes ergibt sich, dass es neben dieser normalen Materieform weitere Materiekomponenten gibt, die bei weitem die Dichte des Universums dominieren.

Diese Beobachtung wurde erst durch Teleskope von der Größe des VLT möglich. Für die Auswahl der dazu notwendigen hellsten Quasare ist die großflächige Himmelsdurchmusterung der Hamburger Sternwarte von entscheidender Bedeutung. Seit kurzem liefert vor allem der Sloan Digital Sky Survey, an dem deutsche Forscher beteiligt sind, ständig neue, weit entfernte Quasare. Zukünftige Beobachtungen werden es ermöglichen, die Entwicklung der chemischen und hydrodynamischen Struktur des absorbierenden Gases sehr genau zu studieren und damit auch wichtige Hinweise auf die frühen Phasen der Struktur- und Galaxienbildung zu liefern.

Entwicklung der schweren Elemente

In den Spektren von Quasaren beobachtet man eine Abnahme der Dichte von Absorptionsliniensystemen mit abnehmender Rotverschiebung und parallel dazu die Neubildung von Galaxien. Das entspricht der Vorstellung, dass aus dem absorbierenden Gas Galaxien entstehen. Gleichzeitig erlaubt die Bestimmung der Häufigkeit schwerer Elemente in den Absorptionslinienwolken Aussagen über die chemische Anreicherung des intergalaktischen Gases. Das gibt einen wichtigen Hinweis auf die Sternentstehungsrate und die Anreicherung des intergalaktischen Mediums mit schweren Elementen.

Insbesondere findet man auch in Absorptionsliniensystemen bei sehr hoher Rotverschiebung Spuren schwerer Elemente, was auf eine sehr frühe Epoche der Sternentstehung schließen lässt. Die direkte Beobachtung dieser ersten Sternengeneration ist eine der interessantesten Herausforderungen der beobachtenden Kosmologie und eines der großen Ziele des JWST.

2.1.4 Die großräumige Struktur im Universum

Es gehört zu den grundlegenden Erkenntnissen, dass die Galaxien nicht gleichmäßig im Universum verteilt sind. Vielmehr finden sie sich in den dichtesten Gebieten zu Gruppen, Galaxienhaufen und Supergalaxienhaufen zusammen. Diese weisen längliche oder flächenförmige Strukturen auf, die wiederum große Löcher – Gebiete mit sehr geringer Galaxiendichte – umschließen, so dass die Galaxienverteilung im Universum auf großen Skalen von bis zu einer Milliarde Lichtjahren eine „blasenartige“ Struktur besitzt.

Seit mehr als einem Jahrzehnt werden Strukturvermessungen des Universums mit einem großem Aufwand durchgeführt, der gegenwärtig im Studium der Galaxienverteilung durch den *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) gipfelt. Solche Durchmusterungen belegen, dass die Galaxien, und vermutlich auch die gesamte Materie, auf Skalen bis zu mehreren hundert Millionen Lichtjahren stark strukturiert sind. So erregte die Entdeckung der „Großen Mauer“, einem über 500 Millionen Lichtjahre langen Supergalaxienhaufen, erhebliches Aufsehen. Ein anderes Beispiel ist der „Große Attraktor“, ebenfalls ein Supergalaxienhaufen, der zunächst lediglich durch seine Schwerkraftwirkung auf andere Galaxien auffiel. Zumindest ein Teil dieses Supergalaxienhaufens ließ sich mittlerweile auf optischen Aufnahmen identifizieren (Abbildung 2.7).

Die Verteilung der Galaxien

Eines der ursprünglichen Ziele der numerischen Simulationen zur kosmischen Strukturbildung war der Vergleich der resultierenden Materieverteilung mit der beobachteten Verteilung der Galaxien. Aus theoretischen Überlegungen erwartet man, dass die Verteilung der Galaxien im Wesentlichen der Verteilung der Dunklen Materie folgt, diese also nachzeichnet, was auch durch Untersuchungen der Dynamik von Galaxienbewegungen verifiziert werden konnte. Tatsächlich sind die numerisch erzeugten Verteilungen Dunkler Materie denen der Galaxien verblüffend ähnlich (siehe Abbildung 2.8), was wiederum als eindrucksvolle Bestätigung unseres kosmolo-

Vergleich mit Simulationsrechnungen

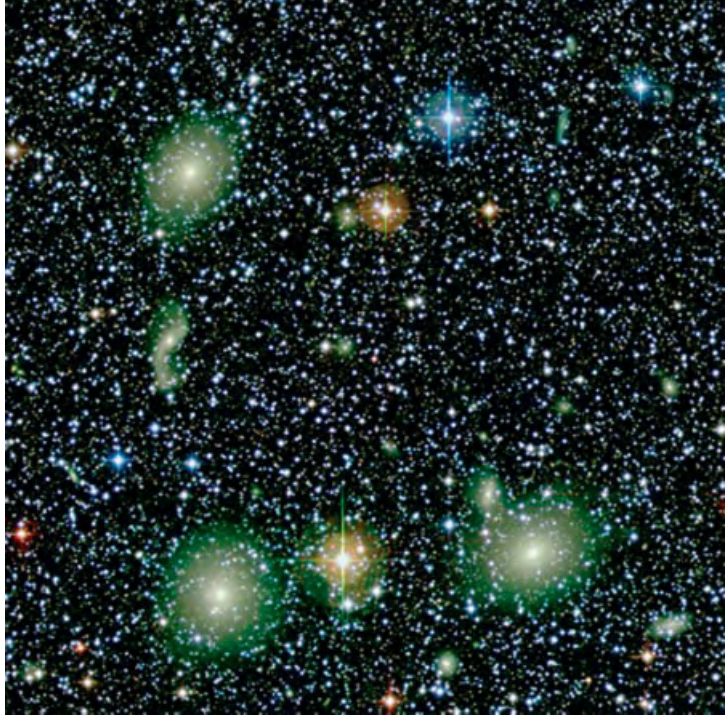


Abb. 2.7: Mit der Weitfeldkamera WFI am ESO/MPG-2.2-m-Teleskop gelang diese Aufnahme eines Teils des Supergalaxienhaufens „Großer Attraktor“. (ESO/MPG)

gischen Modells verstanden werden muss. Der SDSS wird es in den kommenden Jahren erlauben, den Zusammenhang zwischen Dunkler Materie und der Galaxienverteilung wesentlich präziser zu vermessen.

Die Analyse der räumlichen Verteilung der Galaxien und ihrer Bewegungen erlaubt Rückschlüsse auf die mittlere Materiedichte im Universum. Die zur Zeit durchgeführten großen Durchmusterungen ergeben einerseits, dass die Dichte der Dunklen Materie etwa 30 % der kritischen Dichte beträgt, andererseits die Dichte der baryonischen Materie etwa nur ein Zehntel davon ausmacht. Kombiniert man dieses Ergebnis mit den Anisotropiemessungen des Mikrowellenhintergrundes, die ja implizieren, dass die Gesamtdichte gerade gleich der kritischen Dichte ist, so schließt man auf die Anwesenheit der Vakuumsenergie als dritte Komponente des kosmischen Substrats in glänzender Übereinstimmung mit den oben erwähnten Resultaten aus den Supernova Ia-Beobachtungen. Weiterhin stimmt der hier ermittelte Wert der baryonischen Dichte hervorragend mit dem Wert überein, den man aus der Analyse

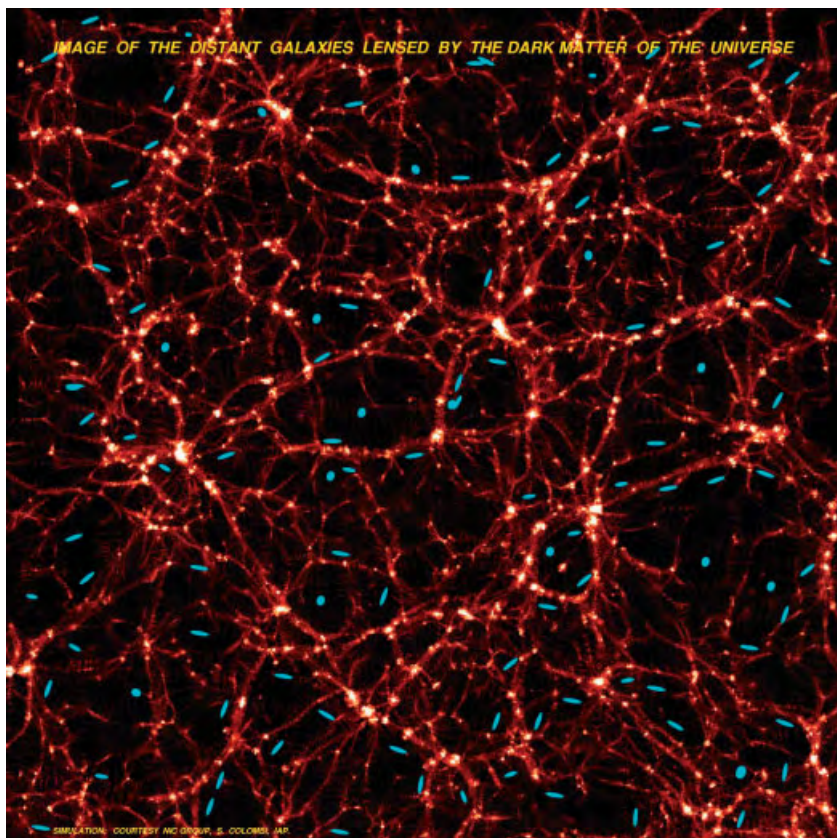


Abb. 2.8: Großrechnersimulationen der Entstehung von Galaxien, Galaxienhaufen und großräumigen Strukturen. Das Bild zeigt die Struktur in der Umgebung unserer Milchstraße. Die verschiedenfarbigen Punkte zeigen die Positionen und Farben der Sternpopulationen von Modellgalaxien und ihre Lage relativ zu der darunter liegenden, in Grau dargestellten, Dunklen Materie an. (MPA)

der chemischen Zusammensetzung von Wasserstoffwolken in Verbindung mit der Theorie der Elemententstehung im frühen Universum erhält.

Durch die Lichtablenkung im Gravitationsfeld kosmischer Strukturen werden die beobachtbaren Bilder weit entfernter Galaxien verzerrt. Da dieser so genannte schwache Gravitationslinseneffekt von der Gesamtmaterieverteilung abhängt, kann er insbesondere zur direkten Untersuchung der Verteilung der Dunklen Materie genutzt werden. Beobachtet wird dieser Effekt durch die Untersuchung der Form und Orientierung sehr lichtschwacher Galaxien. Deren Anzahldichte am Himmel ist so groß (typischerweise sind etwa 25 000 Galaxien

Kosmische Scherung

in einer der Vollmondfläche entsprechenden Himmelsregion zu finden), dass schon sehr kleine Verzerrungen, die zu einer systematischen Ausrichtung der Galaxienbilder führen, statistisch messbar sind. Dieser Effekt der so genannten kosmischen Scherung zeichnet die Dichteverteilung der Materie nach (Abbildung 2.9). Anfang des Jahres 2000 veröffentlichten gleichzeitig vier voneinander unabhängige Gruppen, darunter eine deutsch-französische Kollaboration, die ersten Ergebnisse solcher Untersuchungen. Die beobachtete Stärke der Verzerrungen ist in hervorragender Übereinstimmung mit den Vorhersagen des kosmologischen Standardmodells. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass diese Resultate die Modelle zur Strukturbildung im Universum eindrucksvoll bestätigen.

Die für solche Untersuchungen notwendigen Daten werden mit Hilfe von Weitwinkelkameras gewonnen. Die enorme Entwicklung der Größe der verfügbaren Kameras in den letzten Jahren hat diese Untersuchungen erst ermöglicht. Mit der OmegaCAM am neuen VST der ESO, und etwas später mit VISTA, stehen den deutschen Astronomen erstklassige Instrumente für diese Forschung zur Verfügung, deren nächstes Ziel eine von den anderen Methoden völlig unabhängige Bestimmung der kosmologischen Parameter sein wird. Von besonderem Interesse dafür ist eine Abschätzung der individuellen Entfernungen der schwachen Galaxien; die hierfür

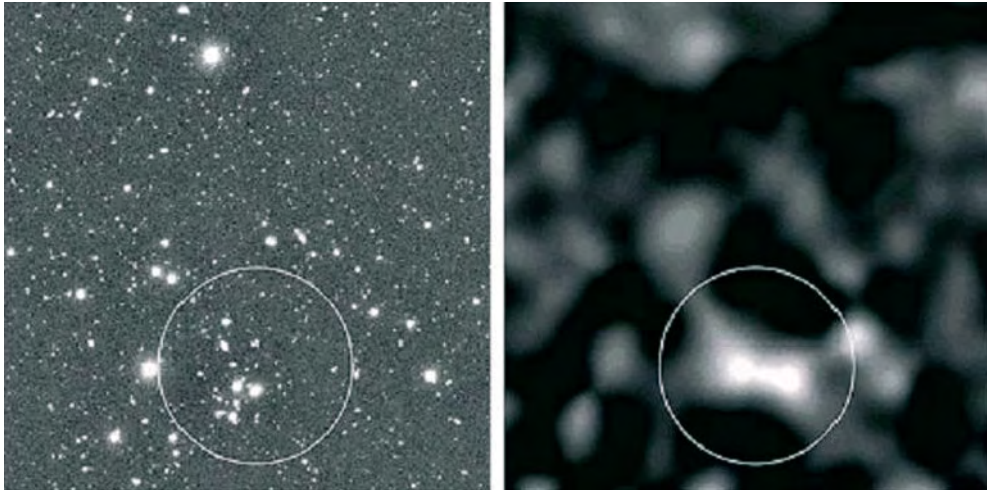


Abb. 2.9: Beobachtung von Dunkler Materie: Aus einem tiefen VLT-Bild (links) wurde durch Analyse der Bildelliptizitäten sehr schwacher Galaxien die Massenverteilung dieses Feldes rekonstruiert (rechts). Die Position der sich dabei ergebenden Massenkonzentration (Kreis) stimmt mit einer Ansammlung heller Galaxien im linken Bild überein. (ESO/Uni Bonn)

zur Verfügung stehende Methode der so genannten photometrischen Rotverschiebungen wird erst durch Photometrie im nahen Infraroten zuverlässig. Die von einer Satellitenmission wie zum Beispiel PRIME erwarteten Daten wären hier praktisch konkurrenzlos.

Box 2.1: Der deutsche Röntgensatellit ROSAT

Einer der größten Erfolge der deutschen Astronomie in den letzten fünfzehn Jahren ist das Röntgenweltraumteleskop ROSAT. Dieser Satellit wurde in der Verantwortung von DARA/DLR unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Extraterrestrische Physik und in Zusammenarbeit mit den Firmen Zeiss und Dornier entwickelt und 1990 durch eine Delta II-Rakete in Cape Canaveral gestartet. ROSAT führte die erste vollständige Himmels-durchmusterung mit einem abbildenden Röntgenteleskop durch und entdeckte dabei mehr als 100 000 einzelne Quellen. In dieser äußerst erfolgreichen Mission wurden zwischen 1990 und 1999 mehr als 4000 Einzelmessungen durchgeführt und bisher fast 5000 wissenschaftliche Publikationen erstellt. Damit ist ROSAT fast so ertragreich wie das Weltraumteleskop Hubble. Die mit ROSAT gewonnenen Erfahrungen in der Spiegel- und Detektorentwicklung konnten sehr erfolgreich in die ESA-Cornerstone-Mission XMM-Newton eingebracht werden und stellen auch die Basis für die künftigen Entwicklungen XEUS und ROSITA dar.

2.1.5 Galaxienhaufen als kosmische Laboratorien

Galaxienhaufen sind die massereichsten gravitativ gebundenen Systeme im Universum. Ihre Entwicklungszeitskala von mehr als einer Milliarde Jahre ist nicht sehr viel kleiner als das Weltalter; Haufen sind daher dynamisch junge Systeme, an denen sich zum Teil ihre Entwicklung noch ablesen lässt. Sie bilden gewissermaßen die Brücke zwischen der Kosmologie und der „klassischen“ Astrophysik und werden mit einer breiten Palette von Methoden und Wellenlängenbereichen intensiv untersucht. Deutsche Institute sind teilweise führend an diesen Forschungen beteiligt, wobei insbesondere ROSAT und das VLT herausragende Stellungen einnehmen.

Galaxienhaufen wurden ursprünglich als Überdichten von Galaxien am Himmel charakterisiert; mit der Entwicklung der Röntgenastronomie wurde bekannt, dass der Raum

zwischen den Galaxien eines Haufens mit heißem Gas bei einer Temperatur von etwa 50 Millionen Grad angefüllt ist, dessen Masse die der gesamten Haufengalaxien übertrifft. Die dominante Massenkomponekte von Galaxienhaufen ist jedoch Dunkle Materie, wie Fritz Zwicky schon 1933 aus Galaxienbewegungen geschlossen hatte.

Die Masse von Galaxienhaufen

Diese Schlussfolgerung ist inzwischen eindeutig bestätigt worden. Die Gesamtmasse und das Massenprofil von Haufen kann auf drei völlig verschiedene Arten bestimmt werden. Erstens erlaubt die beobachtete Bewegung von Haufengalaxien, die Masse des Haufens abzuschätzen, bei der diese Bewegungen gerade eine Gleichgewichtssituation darstellen. Eine zweite Methode besteht in der Untersuchung des heißen Röntgengases: Es würde wie kochendes Wasser im Kochtopf verdampfen, wenn es nicht durch ein sehr starkes Gravitationsfeld gehalten würde. Tatsächlich sind Röntgenleuchtkraft und Temperatur dieses Gases sehr eng mit der Gesamtmasse der Haufen korreliert (Abbildung 2.10). Als dritte Methode dient der schwache Gravitationslinseneffekt; die beobachtbare Verzerrung der Bilder von Hintergrundgalaxien ist umso stärker, je größer die Masse der Galaxienhaufen ist.

Durch Anwendung aller drei Methoden auf eine Vielzahl von Haufen in den letzten Jahren ergab sich übereinstimmend, dass nur etwa 3 % der Masse von Haufen in den Sternen der Galaxien, weitere 17 % in dem heißen Gas zwischen den Galaxien, aber etwa 80 % der Masse von Galaxienhaufen in der Dunklen Materie zu finden sind.

Die Entwicklung von Galaxienhaufen

Alle drei Methoden der Massenbestimmung konnten auch auf Galaxienhaufen bei hohen Rotverschiebungen angewandt werden, wobei Multi-Objekt-Spektrographen an Großteleskopen, leistungsfähige Röntgensatelliten und optische Weitwinkelkameras benötigt wurden. Dabei findet man, dass Galaxienhaufen sich schon zu relativ frühen Zeitpunkten gebildet haben. Dieses zunächst unerwartete Resultat lässt sich nur dann verstehen, wenn die Dichte der Dunklen Materie im Universum wesentlich geringer ist als die kritische Dichte, wie das im zur Zeit bevorzugten Modell des von Vakuumenergie dominierten Universum der Fall ist.

Intergalaktisches Medium

Ein großes Rätsel ist die große Häufigkeit der schweren Elemente im intergalaktischen Medium in Galaxienhaufen. Hier findet man eine wesentlich höhere Masse an Gas und schweren Elementen als in allen Galaxien des jeweiligen

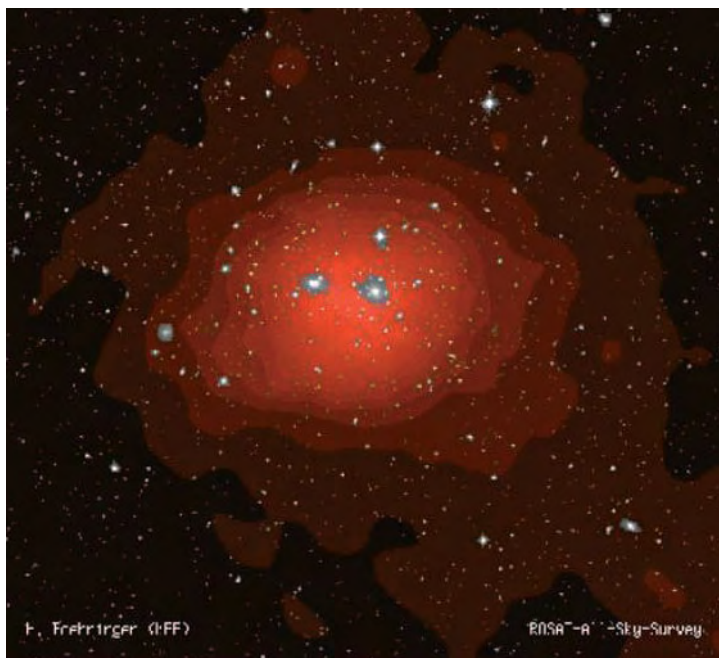


Abb. 2.10: Vergleich des optischen und des mit ROSAT gewonnenen Röntgenbildes des Coma-Galaxienhaufens. Das optische Bild aus dem Palomar Sky Survey ist in Graustufen dargestellt und die beobachtete Röntgenemission in einem roten Schein unterlegt. (MPE)

Haufens zusammen. Aus der Entwicklung unserer eigenen Galaxie zum Beispiel lässt sich eine solch große Produktion von schweren Elementen kaum verstehen. Die Bestimmung der relativen Häufigkeiten schwerer Elemente in entfernten Galaxienhaufen wird vieles zur Aufklärung der Herkunft dieser Elemente beitragen. Hier wird XEUS durch die Röntgenspektroskopie von Haufen im ganz jungen Universum völlig neue Möglichkeiten eröffnen.

Weiterhin haben die beiden neuen Röntgenobservatorien Chandra und XMM-Newton gezeigt, dass im intergalaktischen Gas von Haufen sehr komplexe Wechselwirkungen auftreten; insbesondere konnte durch den Vergleich von Röntgenaufnahmen und detaillierten Radiokarten der Einfluss einer zentralen aktiven Galaxie in einigen Haufen durch ihren Radiojet auf das Röntgengas nachgewiesen werden; gleichzeitig kann kühlendes Gas im Haufen als Brennstoff der zentralen Maschine – vermutlich ein Schwarzes Loch – dienen. Diese Beobachtungen werden auch für die Erforschung von Magnetfeldern im intergalaktischen Gas von Haufen und ihre Wechselwirkung mit dem magnetisierten Plasma der Radio-

jets von enormen Interesse sein und neue Herausforderungen besonders an hydrodynamische Simulationen darstellen.

*Galaxienhaufen
und die groß-
räumige Struktur
des Universums*

Ähnlich wie die Verteilung der Galaxien zeichnet auch die Verteilung der Galaxienhaufen die großräumige Struktur der Materie im Universum nach. Basierend auf der ROSAT-Himmelsdurchmusterung konnte diese Methode der Vermessung der kosmischen Struktur demonstriert werden. Bereits die relativ bescheidene Stichprobe von 450 Galaxienhaufen zeigt klare Strukturen der Dichtefluktuationen bis zu Skalen von etwa zwei Milliarden Lichtjahren (Abbildung 2.11). Ein wichtiges künftiges Ziel ist es daher, diese Untersuchungen auf ein wesentlich größeres Volumen im Universum auszudehnen.

*Die Suche nach
Galaxienhaufen*

Um die räumliche Verteilung von Galaxienhaufen zu untersuchen, benötigt man effiziente Methoden, sie zu entdecken. Neben der traditionellen Methode der Überdichte von Galaxien in bestimmten Regionen am Himmel gibt es mittlerweile mehrere weitere Suchkriterien. Das bislang prominenteste

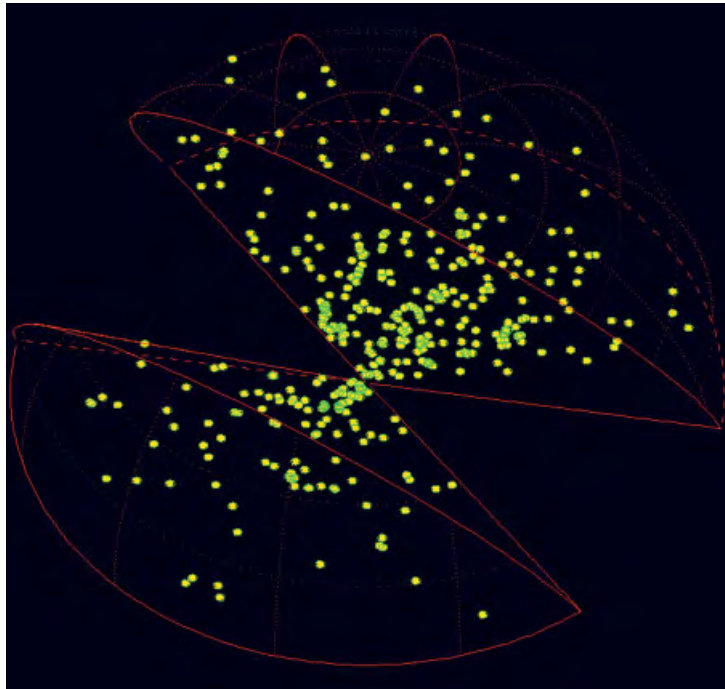


Abb. 2.11: Räumliche Verteilung einer vollständigen Stichprobe der von ROSAT entdeckten Galaxienhaufen am Südhimmel. Deutlich erkennt man die starke Strukturierung der Verteilung. Die außerhalb der kegelförmigen Volumina liegenden Gebiete sind durch Staub in der Scheibe der Milchstraße verdeckt. (MPE)

davon ist die Suche und Identifikation von Röntgenquellen, wie sie sehr erfolgreich mit ROSAT-Daten durchgeführt wurde; ROSAT hat bislang mehr als 1500 Galaxienhaufen identifiziert. Eine ähnliche zukünftige Durchmusterung des XMM-Newton-Archivs wird diese Stichprobe zu leuchtschwächeren und weiter entfernten Haufen hin deutlich erweitern. Eine Himmelsdurchmusterung mit größerer Empfindlichkeit als ROSAT, die eine deutlich größere Anzahl von Haufen ergeben würde, wurde mit ROSITA bereits als nationales Projekt vorgeschlagen und vorbereitet.

Der schwache Gravitationslinseneffekt bietet eine zweite, völlig andersartige und komplementäre Methode zum Auffinden von Galaxienhaufen. Denn im Gegensatz zu Beobachtungen im optischen oder Röntgenbereich ist der Gravitationslinseneffekt von der Art der Materie unabhängig. Die Lichtablenkung an einer Massenkonzentration erzeugt ein charakteristisches Verzerrungsmuster von Hintergrundgalaxien, die im Mittel tangential zum Massenzentrum ausgerichtet sind. Eine systematische Suche nach solchen zirkulären „Scherungsfeldern“ ermöglicht die Definition einer Haufenpopulation allein aufgrund ihrer gravitativen Eigenschaften. Auf diese Weise sind bereits einige Galaxienhaufen gefunden worden; eine konsequente Anwendung dieser Methode mittels des neuen VST wird eine große Anzahl von Haufen entdecken. Der Vergleich mit Galaxienhaufen, die mit optischen oder Röntgenbeobachtungen gefunden wurden, wird Aufschluss über die Bandbreite der Eigenschaften von Galaxienhaufen erlauben. Interessant ist beispielsweise die Frage, ob der relative Anteil der normalen (baryonischen) Materie an der Gesamtmaterie innerhalb der Haufenpopulation stark variiert. Dies würde auf extreme Ereignisse in der Entwicklung der großräumigen Strukturen hinweisen.

Die dritte neue Methode zur Suche nach Galaxienhaufen basiert auf dem so genannten Sunyaev-Zel'dovich-Effekt. Er entsteht, wenn die kosmische Hintergrundstrahlung das heiße Gas im Innern eines Galaxienhaufens durchquert, bevor es zur Erde gelangt. Dann macht sich dies in einer typischen Signatur im Radio- und Submillimeterbereich der Hintergrundstrahlung bemerkbar. Diesen Effekt will man zunächst insbesondere mit Hilfe des *Atacama Pathfinder Experiments* (APEX), eines von Deutschland geleiteten Pilotprojekts von ALMA, beobachten. Auch mit dem Weltraumteleskop Planck erwartet man, tausende von Galaxienhaufen auf diese Weise zu finden. Der Sunyaev-Zel'dovich-Effekt ermöglicht auch eine alternative, von jeglicher Entfernungsleiter unabhängige Bestimmung der Hubble-Konstanten.

2.1.6 Ultrahochenergetische Gammaastronomie

*Neue Methoden
der Beobachtung*

Die Kosmologie wird zukünftig auch vermehrt auf Beobachtungsdaten aus Bereichen zurückgreifen können, die bislang nur schwer oder gar nicht zugänglich waren. Dazu gehören Gammastrahlen, die aufgrund ihrer durchdringenden Natur auch von Quellregionen empfangen werden können, die wegen starker Absorption durch Gas- und Staubwolken in anderen Wellenlängenbereichen verborgen sind.

*Gammastrahlung
höchster Energien
von aktiven
Galaxien*

Von den aktiven Galaxien Mrk 421 und 501 wurde mit Tscherenkow-Teleskopen der Anlage HEGRA auf La Palma ein intensiver und zeitvariabler Fluss von Gammaquanten beobachtet. Das Spektrum der Strahlung von Mrk 501 zeigt einen Potenzverlauf, der bei etwa 6 TeV abbricht (Abbildung 2.12).

Auf die Entstehungsweise dieser Strahlung, deren Beobachtung aus kosmologischer Sicht außerordentlich interessant ist, gehen wir im nächsten Kapitel ein. Bei diesen hohen Energien wechselwirken die Gammaphotonen mit dem interga-

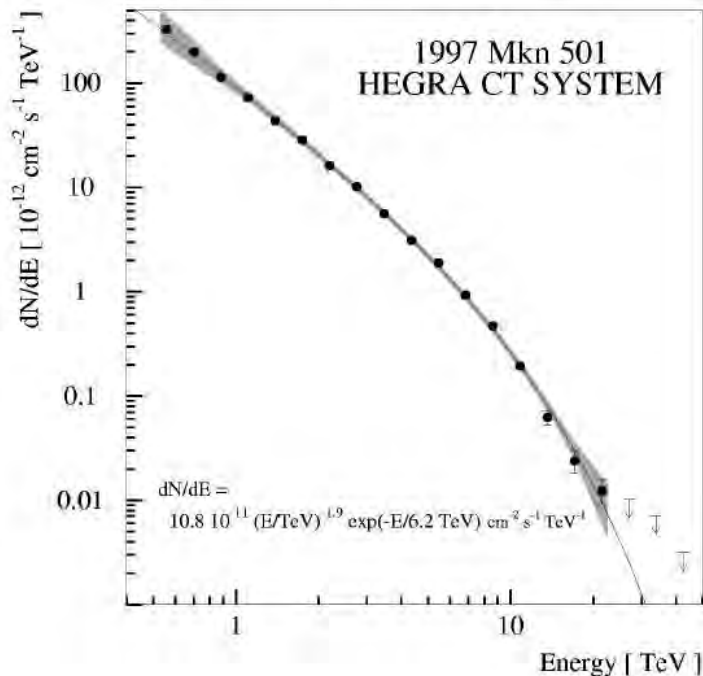


Abb. 2.12: Das Spektrum von Mrk 501 im Bereich höchster Gammaenergien, gemessen mit dem Tscherenkow-Teleskop der HEGRA-Anlage. (MPIK)

laktischen Strahlungsfeld im infraroten, optischen und ultravioletten Wellenlängenbereich, wobei sich die Gammaquanten zu Elektron-Positron-Paaren umwandeln. Die Beobachtung der Quelle Mrk 501 bei Energien von mehr als 10 TeV impliziert daher eine Obergrenze an die Energiedichte des intergalaktischen Strahlungsfeldes. Hieraus lässt sich abschätzen, wie viel Energie Galaxien und Schwarze Löcher seit der Entstehung des Universums erzeugt und abgestrahlt haben.

Wesentlich empfindlichere Untersuchungen dieser Art können mit den Instrumenten der nächsten Generation durchgeführt werden. Dies sind das Weltraumobservatorium GLAST im GeV-Bereich sowie die Observatorien H.E.S.S., MAGIC und andere bodengebundene Instrumente im Bereich von einigen 10 GeV bis zu einigen TeV. Damit werden auch jene Quellen identifizierbar, welche die höchstenergetische Gammastrahlung liefern. Die Entstehung dieser Strahlung bildet einen Schwerpunkt der Gammaastronomie. Deutsche Astronomen leisten auch auf diesem Gebiet internationale Spitzenforschung.

2.1.7 Astroteilchenphysik

Die Eigenschaften des heutigen Universums und seine großräumige Struktur sind direkt mit den Eigenschaften der Elementarteilchen verknüpft. Letztere bestimmten im Bruchteil einer Sekunde nach dem Urknall die grundlegenden Eigenschaften des expandierenden Universums, die Natur der inflationären Phase und die Anfangsbedingungen für die Strukturbildung. Zu dieser frühen Zeit war die Wechselwirkungsenergie der elementaren Teilchenfelder wesentlich höher, als sie je an irdischen Beschleunigern erzeugt werden kann. Dies begründet die Synergie von Teilchen- und Astrophysik, denn viele wichtige Fragen der Teilchenphysik bei höchsten Energien lassen sich „experimentell“ nur im Rahmen der Astroteilchenphysik studieren. In der Tat sind bisher alle Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik aus der Astrophysik gekommen.

*Synergie von
Teilchen- und
Astrophysik*

Auch in der jüngeren Geschichte des Universums treten starke Teilchenbeschleunigungen und extrem hohe Dichten in einigen astrophysikalischen Objekten auf, die sich zum Test teilchenphysikalischer Hypothesen nutzen lassen. Die gewaltigen astronomischen Entfernungen ermöglichen die Messung geringster Laufzeitunterschiede von Signalen, wie sie von einigen Theorien der Quantengravitation gefordert

*Kosmische Teilchen-
beschleuniger*

werden. Auch die komplementäre Sichtweise, die Physik astronomischer Quellen anhand der von ihnen abgestrahlten Teilchen zu studieren, ist in der Astroteilchenphysik von großer Bedeutung.

Eine Reihe von experimentellen Techniken der Astroteilchenphysik hat in den letzten Jahren eine enorme Entwicklung erfahren und der Astrophysik neue Fenster eröffnet: Die Spektroskopie niederenergetischer kosmischer Neutrinos, Präzisionsmessungen von Gammaspekten im TeV-Bereich und Experimente zur Suche nach Elementarteilchen der Dunklen Materie sind seit kurzem möglich.

Relikte des Urknalls

Im Verlauf des Urknalls wurden alle bekannten Arten von Elementarteilchen erzeugt. Abhängig von den anfänglichen Teilchendichten und den Wechselwirkungsquerschnitten machte die Expansion von einem gewissen Zeitpunkt an weitere Reaktionen unwahrscheinlich, und die entsprechende Teilchenspezies fiel aus dem Reaktionszyklus heraus. Innerhalb kurzer Zeit waren Photonen und Neutrinos der Hintergrundstrahlung sowie die baryonische Materie produziert. Möglicherweise haben aber auch verschiedene exotische, schwach wechselwirkende Elementarteilchen (WIMPs) überlebt. Sie könnten dann als Konstituenten der Dunklen Materie die weitere Entwicklung des Universums, insbesondere die Strukturbildung, entscheidend beeinflusst haben.

Experimente zum Nachweis von WIMPs

Für die Suche nach WIMPs nutzt die Astroteilchenphysik verschiedene Methoden. Ein Nachweisprozess beruht darauf, dass ein WIMP beim Eintritt in einen Kristall beispielsweise an Atomkernen elastisch gestreut werden kann. Dabei überträgt das WIMP auf den Kern Rückstoßenergie in ganz geringer Menge. Um sie zu messen, müssen gänzlich neuartige und hochempfindliche Detektoren entwickelt und gebaut werden. Außerdem müssen sie gegen die Kosmische Strahlung und andere Störeinflüsse abgeschirmt werden. Detektoren dieser Art werden derzeit im Gran-Sasso-Untergrundlabor in Italien betrieben.

Die geringen Streuquerschnitte der WIMPs erfordern viele Kilogramm schwere Kristalldetektoren, die über Jahre hinweg betrieben werden. Das DAMA-Experiment im Gran Sasso basiert zum Beispiel auf einem etwa 100 kg schweren Kristall aus Natriumiodid. Die DAMA-Gruppe berichtete von einem Signal, das einen Hinweis auf WIMPs darstellen könnte. Für das kommende Jahrzehnt werden größere Versionen dieser Experimente diskutiert. In Europa sind dies die mit maßgeblicher deutscher Beteiligung stattfindenden Experi-

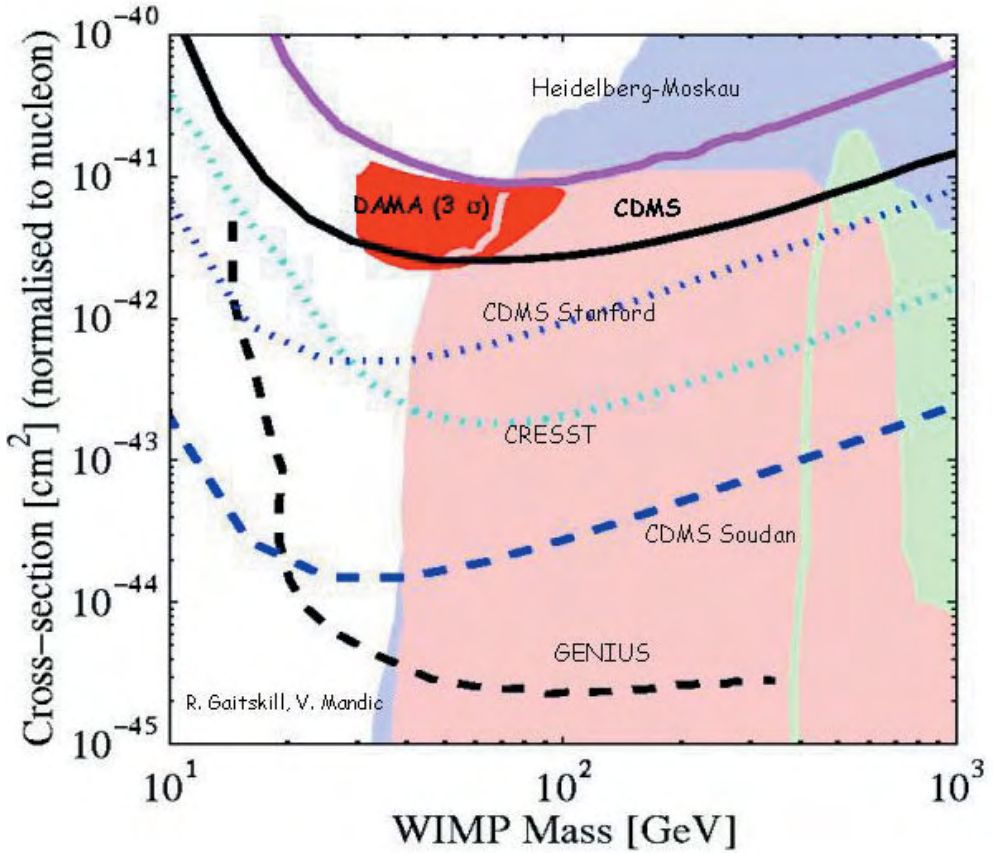


Abb. 2.13: Empfindlichkeit existierender und geplanter Experimente zur Suche nach Dunkler Materie. Gezeigt sind die Ausschlussbereiche als Funktion des angenommenen Streuquerschnitts und der WIMP-Masse. Die Punkte illustrieren die in verschiedenen Klassen von Modellen resultierenden WIMP-Parameter, die schraffierte Region den Bereich der potenziellen Detektion durch das DAMA-Experiment. (MPIK)

mente CRESST und EDELWEIS mit gekühlten Detektoren und das GENIUS-Experiment mit Germaniumzählern. Diese decken einen signifikanten Teil des Parameterraums ab, der von der Elementarteilchenphysik vorhergesagt wird (Abbildung 2.13).

Eine andere Nachweisteknik für massereichere WIMPs basiert auf der Anreicherung solcher Teilchen in einem Gravitationsfeld, beispielsweise im Zentrum der Erde, der Sonne oder im Zentrum der Milchstraße. Die WIMP-Dichte in diesen

WIMP-Anreicherung in Gravitationsfeldern

Regionen kann, abhängig von den Eigenschaften der Partikel, soweit angereichert werden, dass sie sich gegenseitig vernichten. Im Galaktischen Zentrum könnte dieser Prozess der Anihilation in zwei Photonen zu einem Fluss von Gammaquanten führen. Nach ihnen ließe sich mit den Tscherenkow-Teleskopen der nächsten Generation (H.E.S.S. bzw. MAGIC) suchen. Die WIMPs müssten sich dann in einem Massenbereich von 100 GeV bis zu einigen TeV befinden. Zerstrahlen WIMPs im Zentrum der Erde, so würde die dabei entstehende Strahlung mit dem geplanten Neutrinoobservatorium ICECUBE nachweisbar sein.

Topologische Defekte

Eine andere mögliche Form von hochinteressanten Relikten des Urknalls sind Topologische Defekte wie Kosmische Strings oder Magnetische Monopole. Es ist denkbar, dass solche topologischen Defekte in Elementarteilchen mit Massen in der Größenordnung von 10^{24} eV zerfallen. Diese Teilchen sind ebenfalls instabil und zerfallen in Quarks, Gluonen und Leptonen. Damit könnten solche Topologischen Defekte die Quellen höchstenergetischer Teilchen der Kosmischen Strahlung mit Energien von 10^{20} eV und mehr sein. Der Fluss und die Herkunftsrichtung solcher hypothetischer Zerfallsprodukte Topologischer Defekte können im Rahmen des Pierre-Auger-Projekts oder EUSO untersucht werden.

2.1.8 Neue Eigenschaften der Neutrinos

Die vielleicht interessantesten Ergebnisse der Teilchenphysik der letzten Jahre betreffen die Neutrinos. Diese Resultate stammen nicht aus Beschleunigerlaboratorien, sondern von Experimenten der Astroteilchenphysik.

Solare Neutrinos

In den neunziger Jahren wurde erstmals die primäre Komponente der solaren Neutrinos nachgewiesen. Die mit den Homestake-, GALLEX-, und SAGE-Experimenten nachgewiesenen Teilchenflüsse geben zum einen Auskunft über den Kernfusionsprozess im Zentralgebiet der Sonne (Abbildung 2.14). Genaue Analysen haben aber andererseits weitreichende Schlüsse auf die Natur der Neutrinos selbst ermöglicht. So geht man heute davon aus, dass Neutrinos unterschiedlicher Familien sich ineinander umwandeln, sie oszillieren. In die gleiche Richtung weisen die Beobachtungen des japanischen Detektors Super-Kamiokande.

Diese Ergebnisse bedeuten eine Revolution in der Elementarteilchenphysik und haben wichtige Konsequenzen für

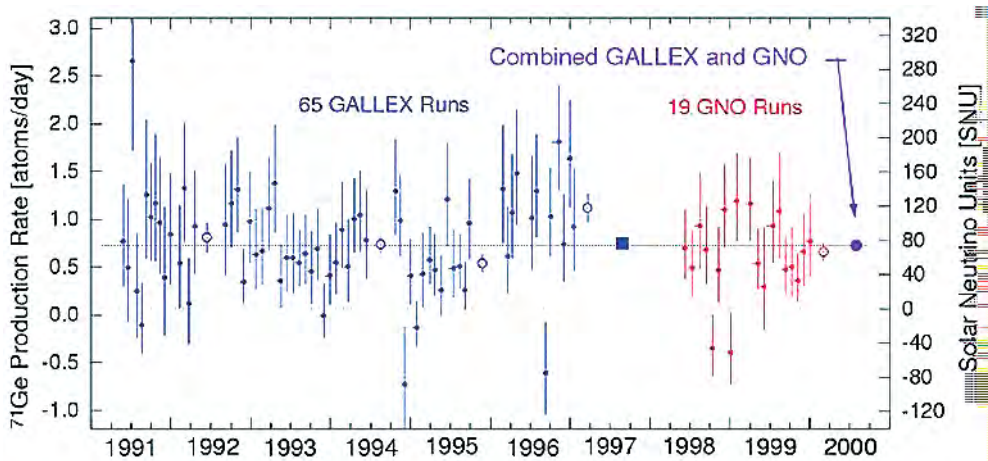


Abb. 2.14: Messung der Hauptkomponente der solaren Neutrinos mit GALLEX und dem Nachfolgeprojekt GNO. Gezeigt sind die Zählraten der verschiedenen Messkampagnen mit diesen beiden Neutrिनodetektoren im Gran-Sasso-Laboratorium. Nur etwa 2/3 des erwarteten Neutrिनoflusses der Sonne wird beobachtet, was einen deutlichen Hinweis auf eine endliche Masse der Neutrinos liefert. (MPK/TU München)

die Auswahl der möglichen kosmologischen Modelle. Neutrinos können nämlich nur dann Oszillationen ausführen, wenn sie eine Ruhemasse besitzen. Im bisherigen Standardmodell der Teilchenphysik geht man davon aus, dass Neutrinos masselos sind.

Allerdings erlauben es die bisherigen Experimente noch nicht, die Massen genau zu bestimmen. Diese Frage ist aber von eminenter Bedeutung sowohl für die Teilchenphysik als auch für die Kosmologie, denn Neutrinos wurden schon früh als mögliche Kandidaten für die Dunkle Materie angesehen. Derzeit favorisieren viele Physiker eine Klasse von Modellen, wonach alle Neutrinos zu leicht sind, um einen signifikanten Beitrag zur Dunklen Materie und damit zur Materiedichte des Universums zu liefern. Dennoch lassen sich Szenarien, in denen die Neutrinos größere Massen haben, nicht gänzlich ausschließen.

Neutrinomassen und die damit verbundenen magnetischen Momente sind ebenfalls von Bedeutung für das theoretische Verständnis von Supernovae. Man geht heute davon aus, dass Neutrinos überhaupt erst die Explosion eines masse-reichen Sterns ermöglichen.

*Neutrinos und
Dunkle Materie*

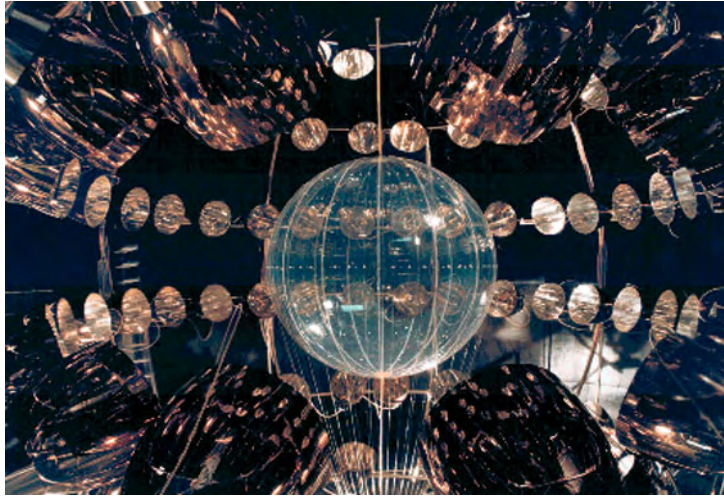


Abb. 2.15: Die Counting Test Facility des Neutrinoexperimentes BOREXINO. Dieser Detektor zum Nachweis solarer Neutrinos entsteht unter deutscher Beteiligung im Gran-Sasso-Labor. (LNGS)

*Zukünftige
Solarneutrino-
experimente*

Zielsetzung einer neuen Generation von Experimenten zum Nachweis solarer Neutrinos ist es daher, die Parameter der Neutrinooszillationen zu bestimmen. Dies wird im hochenergetischen Bereich durch die Experimente SNO (Kanada/USA) und Super-Kamiokande (Japan) erfolgen. Deutsche Arbeitsgruppen sind intensiv an den europäischen Experimenten im niederenergetischen Bereich, GNO, BOREXINO (siehe Abbildung 2.15) und dem geplanten Experiment LENS beteiligt.

2.1.9 Gravitationswellenastronomie

*Nachweis von
Gravitationswellen*

Fast neunzig Jahre nach der Veröffentlichung von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie wandelt sich die relativistische Gravitationsphysik von einem rein theoretischen Forschungsgebiet zu einer experimentellen Wissenschaft. Im Jahre 1993 erhielten die amerikanischen Astrophysiker Joseph Taylor und Russell Hulse den Physik-Nobelpreis für den indirekten Nachweis von Gravitationswellen. Sie hatten über Jahre hinweg zwei sich umkreisende Pulsare beobachtet. Diese Pulsare strahlen Gravitationswellen ab, verlieren dadurch Energie und nähern sich einander an, wodurch sich ihre Umlaufperiode in genau der Art und Weise verringert, wie es von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt wird. Der direkte Nachweis von Gravitationswellen durch große laserinterferometrische Gravitationswellendetektoren,

von denen sich weltweit mehrere der Vollendung nähern, würde nicht nur auf beeindruckende Weise die Einsteinsche Theorie, und damit die Grundlage der modernen Kosmologie bestätigen, sondern das neue Beobachtungsfenster der Gravitationswellenastronomie öffnen.

Der für die Kosmologie interessante Nachweis von Gravitationswellen aus dem frühen Universum ist ein besonders schwieriges, aber fundamentales Ziel dieses jungen Forschungszweiges. Diese Gravitationswellen könnten als Relikt einer inflationären Phase des Universums ähnlich wie die Dichtestörungen erzeugt worden sein und beinhalteten dann ebenfalls fundamentale Informationen aus der Frühphase unseres Universums. Heute sollten diese Störungen einen Gravitationswellenuntergrund bilden.

Einige Modelle der Inflation sagen typische Spektren voraus, die von Gravitationswellendetektoren auf der Erde in den nächsten fünf Jahren gemessen werden könnten. Andere Modelle legen nahe, dass die typischen Strukturen in einem Frequenzband auftauchen sollten, das nur für Detektoren im Weltraum zugänglich ist. Abschätzungen zeigen, dass ein einzelner Gravitationswellendetektor wie LISA in der Lage sein sollte, einen Gravitationswellenuntergrund bei einer Frequenz von 0.01 Hz nachzuweisen. Ist das Gravitationswellensignal schwächer als das Detektorrauschen, so könnte es durch Kreuzkorrelation zweier unabhängiger Detektoren gefunden werden. Das LIGO-II-Detektorsystem im amerikanischen LIGO-Observatorium, das etwa zeitgleich mit dem deutsch-britischen GEO600-Projekt entsteht, könnte eine ausreichende Empfindlichkeit bei einer Frequenz von 20 Hz erreichen.

Gravitationswellen vom Urknall

2.2 Galaxien und massereiche Schwarze Löcher

Wissenschaftlicher Fortschritt

- Nachweis massereicher Schwarzer Löcher in der Milchstraße und in den Zentren naher Galaxien.
- Enge Beziehung zwischen der Masse Schwarzer Löcher und der von Galaxien.
- Nachweis einer Vielzahl junger Galaxien ein bis drei Milliarden Jahre nach dem Urknall.

- Aufklärung der Natur des Röntgen- und Infrarothintergrunds.
- Kosmische Entwicklung von Sternentstehung und Kernaktivität in Galaxien.
- Entstehung der Hubble-Sequenz und ihre zeitliche Entwicklung.
- Nachweis Dunkler Materie in verschiedenen Galaxientypen.
- Nachweis hochenergetischer Gammastrahlung von aktiven Galaxienkernen.

Aufgaben und Ziele

- Untersuchung der Entstehung und Entwicklung von Galaxien im frühen Universum durch direkte Beobachtung.
- Untersuchung der Galaxienentwicklung durch Rückschluss aus der Beobachtung heutiger Galaxien.
- Entdeckung der ersten Sterngeneration.
- Bestimmung der Rolle Schwarzer Löcher und aktiver Galaxienkerne für Struktur und Entwicklung von Galaxien.
- Öffnung neuer Beobachtungsfenster durch Gravitationswellen, hochenergetische Gammastrahlung und Neutrinos.

Galaxien als dynamische Sternsysteme

Galaxien sind Systeme aus Sternen, interstellarer und Dunkler Materie, welche durch die Gravitation zusammengehalten werden (Abbildung 2.16). Die Schwerkraft wirkt auch zwischen den Galaxien und lässt sie zu den größten bekannten Strukturen, den Galaxienhaufen und Superhaufen, zusammenfinden. Diese erreichen Ausdehnungen bis zu mehreren hundert Millionen Lichtjahren (siehe Abschnitt 2.1). In den letzten Jahrzehnten haben sich unsere Vorstellungen über Galaxien dramatisch verändert und erweitert. Statt als relativ statische und isolierte „Welteninseln“ sehen wir sie heute als höchst aktive und dynamische Systeme, die miteinander starke Wechselwirkung eingehen können. So treten beim nahen Vorbeiflug aneinander Gezeitenkräfte auf, die Sterne und interstellares Medium aus ihren Bahnen werfen. Es ist sogar möglich, dass Galaxien miteinander verschmelzen. Aufbau und Entwicklung der Galaxien bilden ein äußerst interessantes und aktives Forschungsgebiet.

Die enorme Steigerung der Nachweisgrenze für schwache Objekte erlaubt es heute erstmals, die Sternentstehungsgeschichte auf kosmischen Zeitskalen zu studieren und die Auswirkung von Wechselwirkungsprozessen in frühen Epochen direkt zu sehen. Mit den heutigen Techniken lassen sich in nahen Galaxien noch Einzelsterne erkennen, so dass im



Abb. 2.16: Die Spiralgalaxie NGC 1232 ist eine typische Spiralgalaxie. Sie ähnelt unserer Milchstraße. (ESO)

direkten Vergleich mit Computersimulationen die Sternentstehungsgeschichte dieser Objekte über mehrere Milliarden Jahre hinweg zurückverfolgt werden kann (Abbildung 2.17).

Weitgehend unbekannt ist aber immer noch der Beginn dieser Entwicklung, der eigentliche Prozess der Galaxienentstehung und die Entstehung der ersten Generation von Sternen. Diese fundamentalen Vorgänge stellen ein zentrales Problem der Astrophysik dar. Um ihnen weiter nachzugehen, muss die genaue Rolle der zur Galaxienentwicklung beitragenden physikalischen Prozesse in den verschiedenen Konstituenten wie auch in deren Wechselbeziehung miteinander verstanden sein. Nur dann kann aus dem heutigen Erscheinungsbild der Galaxien auf deren Entstehungsgeschichte geschlossen werden.

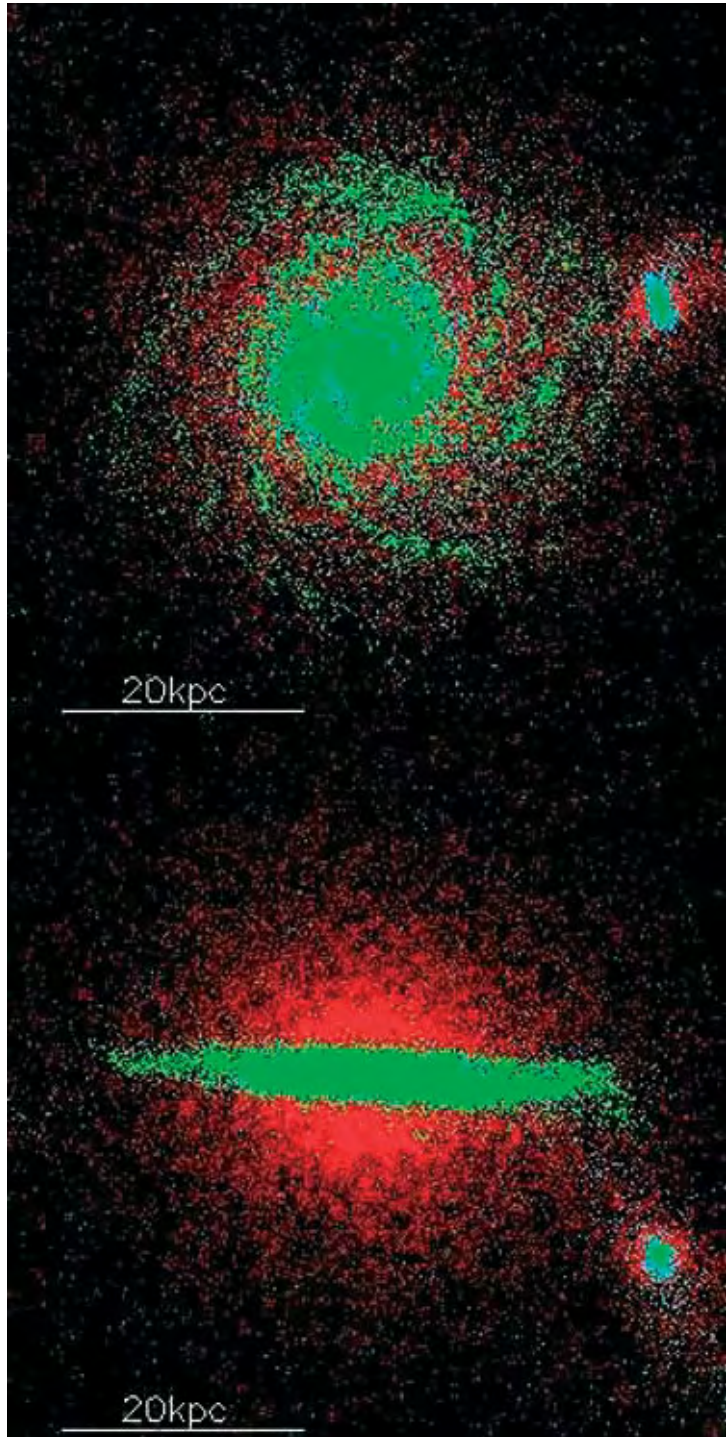


Abb. 2.17: Frontal- und Seitenansicht einer Spiralgalaxie, wie sie sich in hochauflösenden kosmologischen Simulationen der neuesten Generation bildet. Gezeigt ist die Verteilung der alten Sterne (älter als sechs Milliarden Jahre, rot), der jungen Sterne (jünger als sechs Milliarden Jahre, blau) und des Gases (grün). Während die alten Sterne aufgrund des Verschmelzens der Vorgängergalaxien sphäroidal verteilt sind, zeigen die jungen Sterne eine scheibenartige Verteilung ähnlich der des Gases, aus dem sie sich bilden. (AIP/ Steward Observatory/ University of Victoria)

2.2.1 Entstehung und Entwicklung von Galaxien

Die Modelle der Strukturbildung im Universum (siehe Abschnitt 2.1) zielen nicht zuletzt darauf, die Entstehung und Entwicklung von Galaxien zu verstehen. Während die numerischen Simulationen der Dunklen Materie im Universum inzwischen sehr weit vorangekommen sind und insbesondere gebundene Strukturen mit Galaxienmassen vorhersagen, ist der Kontakt mit der Beobachtung dadurch noch nicht gegeben. Erst wenn man auch den leuchtenden Anteil der Galaxien modellieren kann, werden theoretische Vorhersagen direkt mit Beobachtungen vergleichbar. Das Problem hier ist einerseits, dass die Prozesse, denen Gas unterworfen ist, wesentlich komplexer sind als bei der Dunklen Materie. Andererseits sind die zu untersuchenden Längenskalen viel zu verschieden, als dass man hoffen könnte, durch direkte Simulationen die Bildung von Galaxien aus dem kosmischen Substrat und die Bildung und Entwicklung ihrer Sternpopulationen zu modellieren. Trotzdem haben wir inzwischen durch die in Deutschland entwickelte Kombination von numerischen Modellen der Dunklen Materie und semianalytischer Modelle, welche die Sternpopulationen beschreiben (Abbildung 2.1), ein gutes qualitatives Verständnis der Galaxienentwicklung gewonnen. Die Modelle beruhen auf stark vereinfachenden Annahmen, die aber die wesentlichen Prozesse qualitativ berücksichtigen. Dies sind unter anderem der Einfall von Gas in die Halos Dunkler Materie, die Sternentstehungsrate, die Rückkopplung der Sterne an das Gas durch Supernovaexplosionen und die Anreicherung des Gases durch schwere Elemente. Naturgemäß enthalten diese Modelle eine Vielzahl von Parametern, die anhand von Beobachtungen festgelegt werden müssen. Eine deutliche Verfeinerung dieser Modelle, und damit ein tieferes Verständnis der kosmischen Entwicklung, ist in den nächsten Jahren durch Einbeziehung einer Vielzahl neuer Beobachtungen zu erwarten.

*Entstehung
von Galaxien*

Aus der Rotationsgeschwindigkeit von Sternen und Gas in Spiralgalaxien wissen wir seit langem, dass Spiralen von einem ausgedehnten Halo von Dunkler Materie umgeben sind, welche die Dynamik der Galaxien außerhalb des zentralen Bereichs dominiert. Erst in den letzten Jahren konnte zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass auch elliptische Galaxien von Dunkler Materie dominiert werden. Während die räumliche Ausdehnung der leuchtenden Materie beobachtbar ist, gibt es nur sehr wenige Hinweise auf die Ausdehnung des dunklen Halos. Da insbesondere die Gesamtmasse einer Galaxie von

*Dunkle Materie
in Galaxien*

der Größe ihres Halos abhängt, kommt dieser Frage eine besondere Bedeutung zu. Wesentliche Fortschritte werden hier durch Untersuchungen des Gravitationslinseneffektes an einer sehr großen Stichprobe von Galaxien erwartet, wie sie mit den zukünftigen Weitwinkeldurchmusterungen, zum Beispiel mit dem VST, möglich werden.

*Empfindliche
Durchmusterungen
mit großer
Flächenabdeckung*

Untersuchungen der Galaxienentwicklung erfordern signifikante Stichproben des Universums bei verschiedenen Rotverschiebungen. Ein großer Teil unseres derzeitigen Wissens basiert auf tief gehenden Durchmusterungen im sichtbaren Licht, im nahen Infrarot und im Röntgenbereich. Für das genauere Verständnis der Quellen sind spektroskopische Untersuchungen mit den neuen Großteleskopen und dem *James Webb Space Telescope* (JWST) nötig. Ziele sind der Vorstoß zu noch weiter entfernten Sternsystemen, detaillierte physikalische und dynamische Untersuchungen und Beobachtungen der im hierarchischen Modell besonders wichtigen leuchtschwächeren Galaxien.

Von besonderer Bedeutung sind die lang belichteten und sehr tief ins Universum reichenden Himmelsaufnahmen mit dem Weltraumobservatorium Hubble (Abbildung 2.18), dem *Very Large Telescope* (VLT) der ESO, dem deutsch-britisch-amerikanischen Röntgensatelliten ROSAT, dem europäischen Infrarotweltraumteleskop ISO und den neuen Submillimeter-Array-Detektoren SCUBA auf Hawaii sowie MAMBO am 30-m-Teleskop von IRAM. Mit solchen Beobachtungen lässt sich der Beitrag früher Galaxien zur extragalaktischen Hintergrundstrahlung über einen weiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums bestimmen, wobei nur im Submillimeter- und Radiobereich die Sternentstehung ohne Einflüsse von Absorption gemessen werden kann. Die neuen Großteleskope ermöglichen es insbesondere, die Spektren sehr schwacher Galaxien im sichtbaren und nahen Infrarotbereich zu messen und damit deren Entfernungen (genauer: spektrale Rotverschiebungen) und physikalische Eigenschaften zu bestimmen.

Die bisherigen Untersuchungen leiden noch darunter, dass die beobachteten Himmelsflächen zu klein sind. Wichtig wären zukünftig großflächige Durchmusterungen beispielsweise mit dem VLT Survey Telescope. So lassen sich repräsentative Stichproben von ausreichend vielen Galaxien erhalten. Nur diese können auch exotische „Schlüsselobjekte“ enthalten. Selbst der lokale „Zensus“ von Zwerggalaxien, die als Überreste der ursprünglichen Galaxienbildung angesehen werden, ist noch sehr ergänzungsbedürftig. Ein detailliertes

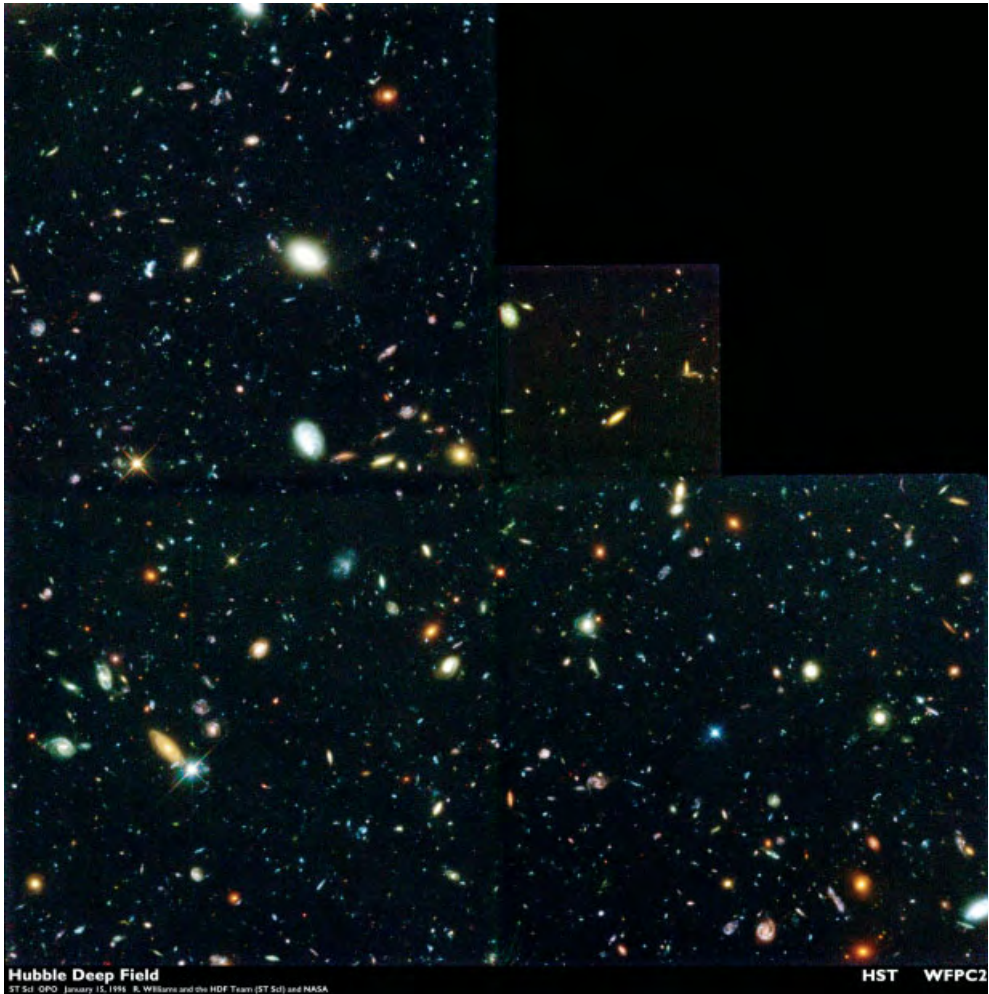


Abb. 2.18: Die bislang am tiefsten ins Universum reichende Himmelsaufnahme gelang mit dem Weltraumobservatorium Hubble im Sternbild des Großen Wagens. Sie zeigt eine Fülle von Galaxien in unterschiedlichen Entfernungen und Entwicklungszuständen. (NASA/STScI/ESA)

Studium dieser Objekte liefert komplementäre Informationen zur direkten Beobachtung der Frühphasen der Galaxienbildung.

Vieles deutet darauf hin, dass die ersten Sterne und Galaxienkerne bei einer Rotverschiebung $z > 6$ entstanden sind. Die Ursprungsstätten der Stern- und Galaxienentstehung sind wahrscheinlich extrem selten, nicht sehr leuchtkräftig und wegen ihrer großen Rotverschiebung nur im Nahinfraroten zu finden. Die Identifikation solcher echter Protogalaxien und Protoquasare erfordert eine Suche über hunderte von Quadrat-

grad und zu sehr schwachen Flussgrenzen bei 1 bis 3 μm . Dies ist vom Boden aus praktisch unmöglich, kann aber mit einem Weltraumteleskop, wie zum Beispiel PRIME, erreicht werden. Die auf diese Weise entdeckten Kandidaten für Protogalaxien können mit JWST im Nahinfraroten detailliert spektroskopiert werden. Röntgenspektroskopie mit XEUS kann dabei zudem die frühesten Protoquasare nachweisen.

Box 2.2: Infrarot-, Submillimeter- und Millimeterastronomie: ein neues Gebiet der deutschen Astronomie

Die Infrarot-, Submillimeter- und Millimeterastronomie hat seit Beginn der achtziger Jahre eine rasante Entwicklung erlebt: Die Empfindlichkeit von Detektoren, Kameras und Spektrometern konnte immer weiter gesteigert werden. Deutsche Gruppen haben bei diesen Entwicklungen eine führende Rolle gespielt. Mit dem deutsch-französisch-spanischen Institut IRAM (Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich) haben deutsche Forscher seit mehr als 10 Jahren Zugang zu den weltweit besten Teleskopen für den Millimeterwellenlängenbereich. In den neunziger Jahren bildete das *Infrared Space Observatory* (ISO) der europäischen Raumfahrtagentur ESA einen weiteren Höhepunkt. Während seiner überraschend langen Lebensdauer von 29 Monaten lieferte dieses bis auf wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt abgekühlte Teleskop zwischen 1995 und 1998 etwa 26 000 Einzelbeobachtungen von exzellenter Qualität. Es war damit die weltweit erfolgreichste Infrarotmission der neunziger Jahre. Deutsche Institute (und Industrie) waren ganz maßgeblich am Detektorbau und sind an der astronomischen Ausbeute und am Datenarchiv beteiligt. Mit diesen Instrumenten konnten wesentliche neue Beobachtungen und Erkenntnisse über das interstellare Medium, die Entstehung von Sternen in unserer Milchstraße sowie über Sternentstehungsaktivität in externen Galaxien bis hin zu Objekten im frühen Universum, gewonnen werden (Abbildung 2.19).

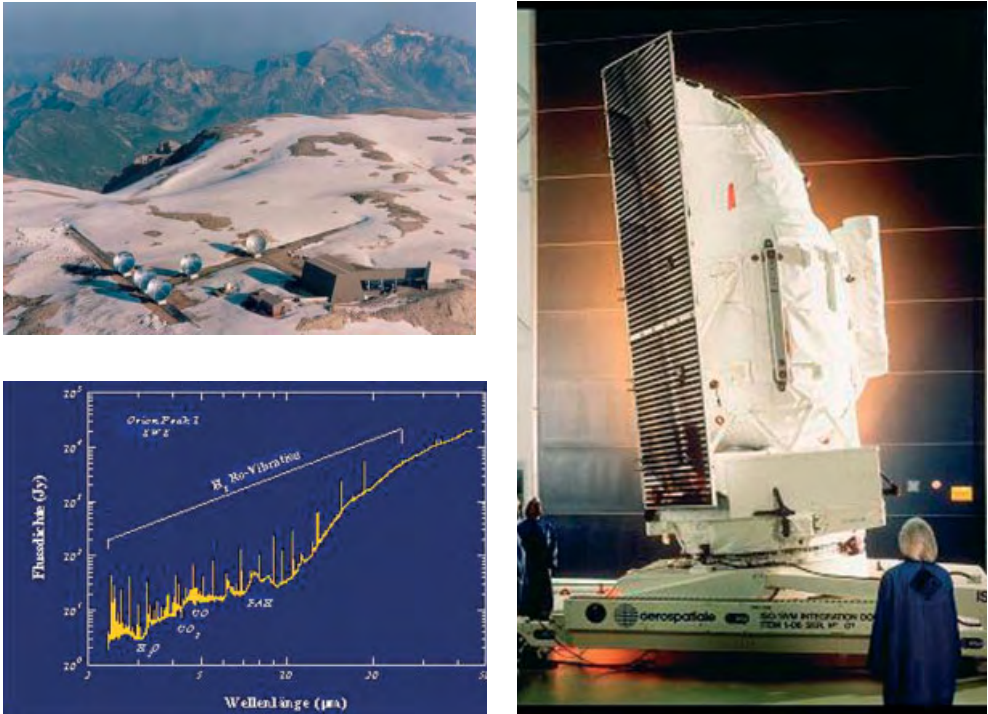


Abb. 2.19: Infrarot-, Submillimeter- und Millimeterastronomie. Rechts: Der ISO-Satellit vor dem Start 1995 in der Testanlage bei ESTEC. Links oben: Das Plateau-de-Bure-Interferometer von IRAM, bestehend aus fünf 15-m-Teleskopen, ist die zur Zeit weltweit empfindlichste Interferometeranlage im Millimeterbereich. Links unten: Eine der vielen Ergebnisse der ISO-Mission waren zum ersten Male detaillierte, spektroskopische Messungen im Infraroten. Hier ist das Mittelinfrarotspektrum der Orion-Sternentstehungsregion zu sehen. Viele Linien von H₂, CO und anderen Molekülen kommen aus dem dichten und warmen Gas, das von den eingebetteten jungen Sternen angeregt wird. Diese Linien geben detaillierte Information über die physikalischen und chemischen Prozesse in Sternentstehungsregionen. (IRAM/ESA/MPE)

In den vergangenen Jahren ließ sich am Himmel in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen ein Strahlungsfeld nachweisen, das wahrscheinlich das Relikt der Galaxienaktivität im frühen Universum ist. Es enthält im Infraroten etwa doppelt so viel Energie wie im sichtbaren Bereich (Abbildung 2.20). Die Natur dieser Strahlung ließ sich bislang nur ansatzweise entschlüsseln. ROSAT konnte fast den gesamten Hintergrund im energiearmen Bereich der Röntgenstrahlung in Einzelobjekte auflösen (siehe Abbildung 2.21): Es handelt sich fast ausschließlich um weit entfernte Quasare und aktive Galaxien. XMM-Newton und Chandra untersuchen den wichtigen energiereicheren Teil der Röntgenstrahlung und spektroskopieren die Quellen. Nur so lassen sie sich eindeutig identifizieren und

Die extragalaktische Hintergrundstrahlung

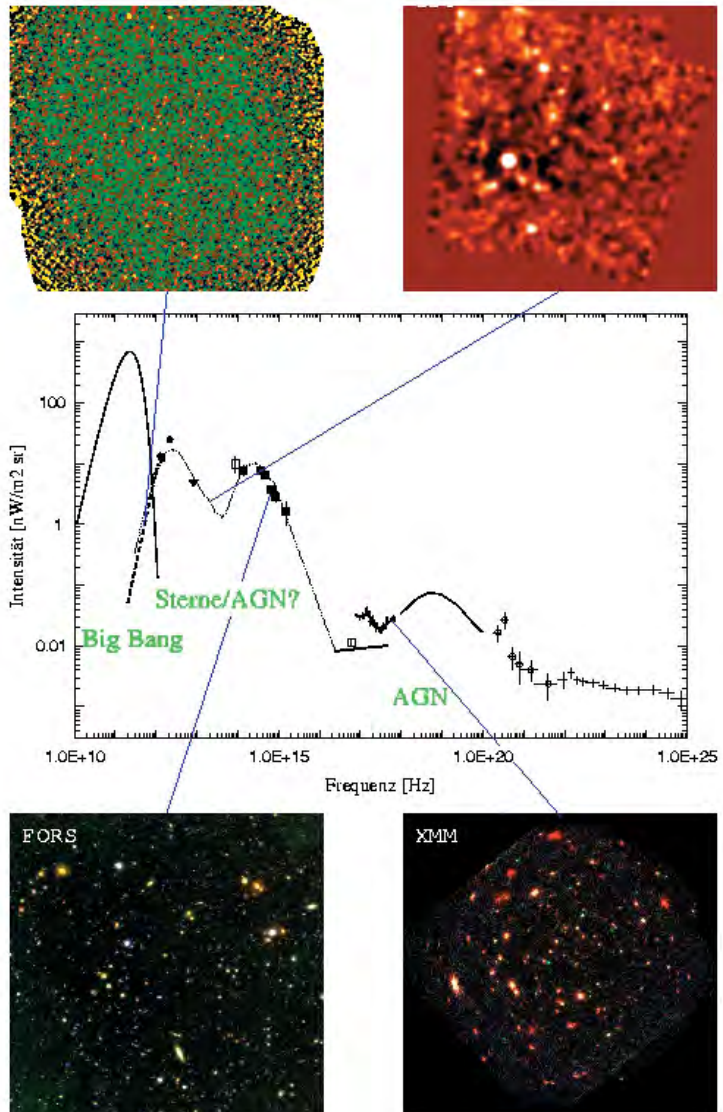


Abb. 2.20: Satelliten und bodengebundene Observatorien haben im letzten Jahrzehnt begonnen, den kosmischen Hintergrund über weite Bereiche in einzelne Galaxien aufzulösen. Hier gezeigte tiefe Durchmusterungen aus deutschen, ESO- und ESA-Projekten reichen von Millimeterwellen (Mambo) über Infrarot (ISO) und sichtbares Licht (FORS) bis zum Röntgenbereich (XMM). (AIP/MPE/MPIfR/ESO/ESA)

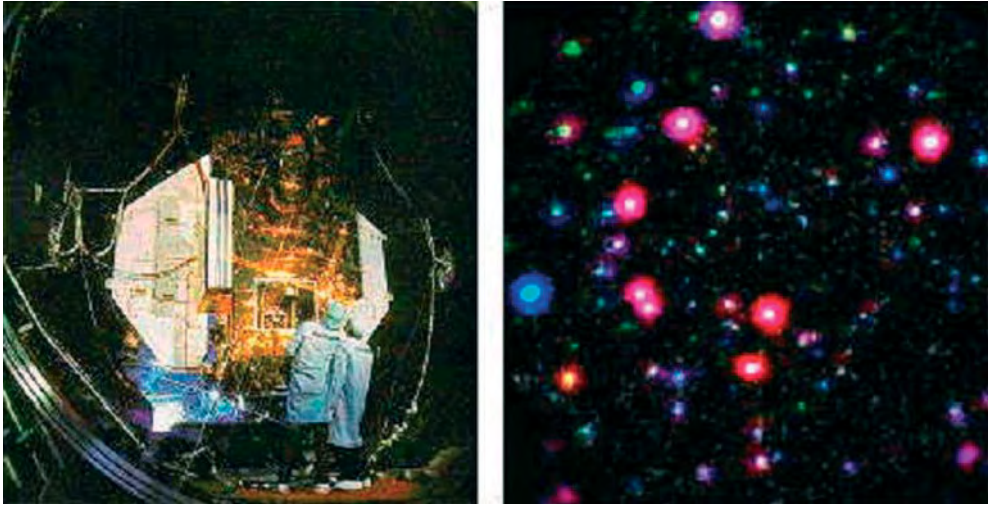


Abb. 2.21: Links: Das Flugmodell des ROSAT-Satelliten in der Raumtestanlage. Rechts: Eines der wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse der ROSAT-Mission war die Auflösung der seit vielen Jahren bekannten, mysteriösen Röntgenhintergrundstrahlung in unzählige Einzelquellen. Die meisten dieser schwachen Quellen stellten sich als weit entfernte Quasare heraus, wobei die verschiedenen Farben den Härtegrad des Röntgenspektrums darstellen. (MPE/AIP/DLR)

deren Entfernungen bestimmen. Im Infraroten haben ISO und im (Sub)Millimeterwellenbereich SCUBA und MAMBO erste entfernte, staubreiche Galaxien mit starker Sternentstehungsrate gefunden. Diese Messungen sowie Nachfolgebeobachtungen mit dem VLA und mit dem IRAM-mm-Interferometer zeigen, dass die energetisch wichtige „Submillimeterpopulation“ von entfernten Galaxien im Optischen fast gar nicht und im nahen Infrarot nur schwer zu sehen ist. Die Submillimeterteleskope APEX und später Herschel und ALMA sind deshalb für weitere Studien der Natur dieser Objekte essenziell. Aufgrund der Infrarot/Radio-Korrelation sind solche Galaxien dann auch mit SKA im Radiobereich nachweisbar. Eine ähnliche Schwierigkeit (extrem schwache Emission im optischen Bereich) besteht für viele der Quellen, die von XMM-Newton und Chandra entdeckt werden.

Die tiefen Himmelsaufnahmen belegen, dass in der Frühzeit des Universums katastrophale Zusammenstöße und Verschmelzungen von Galaxien wesentlich häufiger waren als heute. Dabei bildeten sich Sterne mit einer mehr als zehnmals höheren Rate, als wir im heutigen Universum beobachten. Die schon damals in den kompakten Galaxienkernen vorhandenen massereichen Schwarzen Löcher müssen sehr viel Materie zugeführt bekommen haben, so dass in der Früh-

zeit des Universums annähernd hundertmal mehr Galaxien aktiv waren als heute. Das Wechselspiel von Aktivität und Sternentstehung und ihre relative Gewichtung ist von großer Bedeutung. Es lässt sich auch an verhältnismäßig nahen leuchtkräftigen Galaxien beobachten.

Das *Atacama Pathfinder Experiment* (APEX) wird hier in den nächsten Jahren weitere Fortschritte bringen. Doch erst das Herschel-Weltraumteleskop wird mit seiner stark erhöhten Empfindlichkeit den kosmischen Hintergrund im fernen Infrarot in seine Einzelquellen auflösen. Durchmusterungen mit diesem Teleskop werden eine große Zahl sternbildender und aktiver Galaxien in den frühen Stadien des Universums finden, in denen die meisten schweren Elemente gebildet wurden und die Zahl aktiver Galaxien am größten war. Auf etwas längeren Zeitskalen sind weitere wesentliche Fortschritte bei der Empfindlichkeit und räumlichen Auflösung insbesondere von ALMA im Submillimeterbereich und durch Röntgenspektroskopie mit XEUS zu erhoffen. Der enge Zusammenhang zwischen Ferninfrarotstrahlung und dem Radiokontinuum erlaubt zudem die Untersuchung von Sternentstehung in den weit entfernten Galaxien ohne störende Absorption, hierzu sind allerdings die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen des *Square Kilometre Array* (SKA) notwendig (siehe Abbildung 2.22).

Kernaktivität und Sternentstehung

In den letzten Jahren hat man erstmals eine Vorstellung von dem Verlauf der Sternentstehung im Universum gewonnen. Möglich wurde dies durch die Bestimmung der Rotverschiebung (Entfernung) derjenigen Objekte, die man zuvor in tiefen Himmeldurchmusterungen gefunden hatte. Auch über die Entwicklungsgeschichte des Materieeinfalls in aktive Galaxienkerne wissen wir durch Beobachtungen mit ROSAT und aus Quasardurchmusterungen im optischen und Radiobereich inzwischen mehr.

Demnach entwickelten sich die Sternentstehungsrate und die Kernaktivität in den Galaxien überraschend ähnlich, wobei das Niveau im frühen Universum grundsätzlich mehr als zehnmal höher war als heute. Auch dies ist ein weiteres Indiz für eine enge Beziehung zwischen der Entstehung von Galaxien und den massereichen Schwarzen Löchern in ihren Zentren. Mit den zukünftigen tiefen Durchmusterungen im Röntgen- und Infrarotbereich wird es möglich sein, Entwicklung und Verknüpfung von Sternbildung und aktiven Kernen detailliert bis ins frühe Universum zurückzuverfolgen und mögliche kausale Zusammenhänge besser zu verstehen. Auch von der Gammaastronomie erwartet man weitere Erkenntnis-

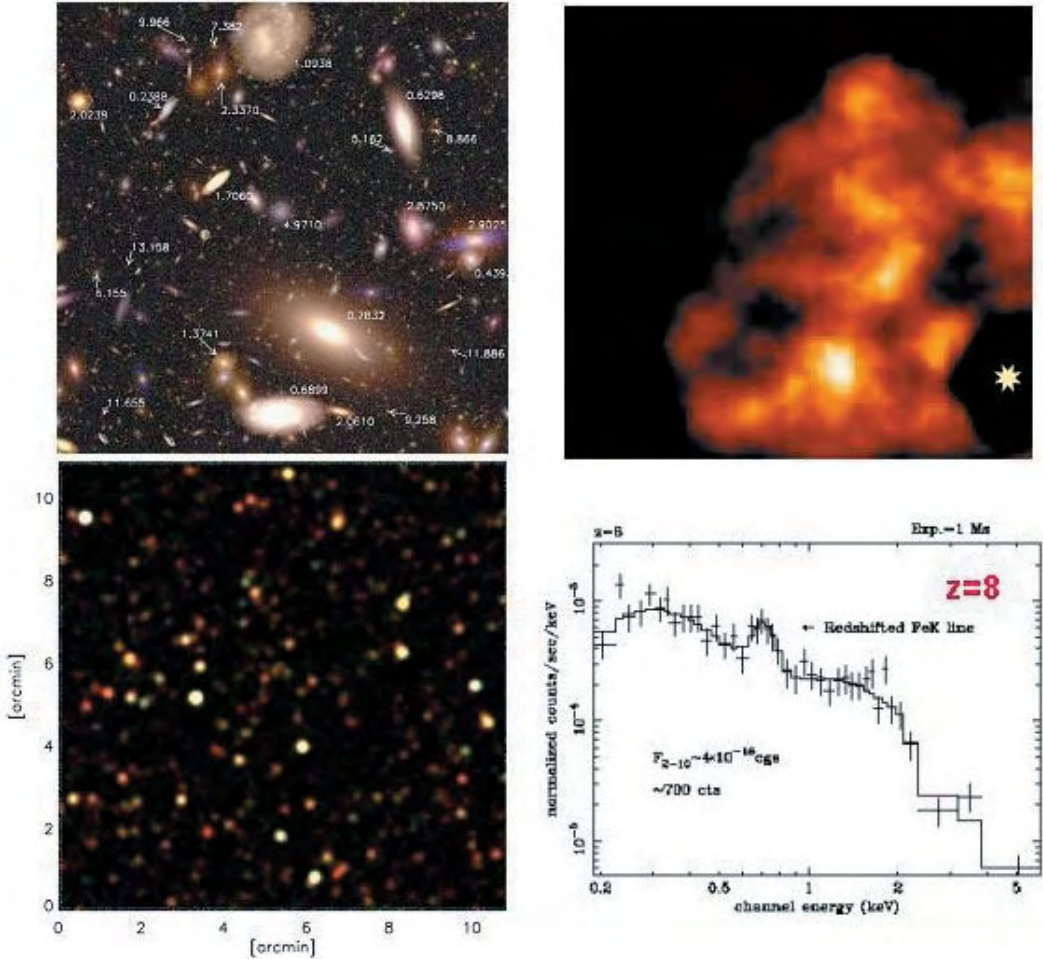


Abb. 2.22: Beobachtungen von Himmelsobjekten im jungen Universum. Die obere linke Abbildung zeigt eine Simulation einer tiefen JWST-Aufnahme im nahen Infraroten, wobei die Zahlen Rotverschiebungen verschiedener entfernter Galaxien anzeigen. Diese Aufnahme ist ein bis zwei Größenordnungen tiefer als die empfindlichsten Messungen, die heute möglich sind. Die JWST-Beobachtungen können junge Galaxien, leuchtkräftige Sternhaufen und Supernovae bis zu Rotverschiebungen von 5–10 sehen, wenn sie in ihrem Ruhesystem ultraviolette und optische Strahlung aussenden. Im Gegensatz dazu werden tiefe Durchmusterungen mit Herschel (links unten: Simulation eines ~ 110 Quadratbogenminuten großen Feldes) staubige Galaxien und aktive galaktische Kerne bei $z = 1\text{--}4$ entdecken und einen Großteil des Ferninfrarothintergrunds in Einzelquellen auflösen. Oben rechts: Simulation einer SKA-Beobachtung einer atomaren Wasserstoffwolke im intergalaktischen Medium, die bei Rotverschiebung $z \sim 9$ (etwa 600 Millionen Jahre nach dem Urknall) zum ersten Mal, am Ende des kosmischen Mittelalters, von einem sich gerade gebildeten Quasar (Stern in der unteren rechten Ecke) beleuchtet und angeregt wird. Unten rechts: Röntgenspektroskopie entferntester Schwarzer Löcher mit XEUS. Gezeigt ist eine Simulation des 0.3–20-keV-Spektrums eines aktiven galaktischen Kerns bei $z = 8$. Mit XEUS kann man charakteristische Emissionslinien messen, die über die Masse der ersten Schwarzen Löcher und die Elementhäufigkeiten in ihrer Umgebung Auskunft geben. (Quellen: NASA/JWST, SKA, MPE und MPIFR)

se über ferne Galaxien. Das Spektrum einer entfernten Gammaquelle, wie es beispielsweise mit H.E.S.S. und MAGIC beobachtet werden kann, enthält Information über die gesamte Energiefreisetzung durch Galaxien und Schwarze Löcher im Raum zwischen einer Gammaquelle und der Erde.

Rekonstruktion der Sternentstehung in heutigen Galaxien

Neben der direkten Beobachtung der Sternentstehungsgeschichte ferner Galaxien ist auch ein „archäologischer“ Zugang möglich: Für relativ nahe Galaxien lässt sich die Sternentstehungsgeschichte mit Hilfe der hoch auflösenden Bilder des Weltraumteleskops Hubble und des VLT rekonstruieren, indem man Helligkeit und Farbe der stellaren Populationen analysiert. Mit der zukünftigen Verfügbarkeit der adaptiven Optik an großen bodengebundenen Teleskopen sowie mit dem JWST wird dies in einem weitaus größeren Volumen möglich sein als heute. Zwerggalaxien sind die wichtigsten Objekte solcher Studien.

Auch die Anreicherung mit schwereren Elementen in Gas und Sternen als summarischer Index der bisherigen Sternentstehungsgeschichte von Galaxien und Galaxienhaufen kann durch optische und Röntgenspektroskopie in einem viel größeren Volumen untersucht werden. Dies hat folgenden Hintergrund: Es ist bekannt, dass im Urknall nur die leichten Elemente, überwiegend Wasserstoff und Helium, entstanden sind. Heute beobachten wir aber in den Sternen und im interstellaren Medium die ganze Palette der chemischen Elemente. Diese sind erst später im Innern der Sterne „erbrütet“ und beispielsweise bei Supernovaexplosionen ins All abgegeben worden (siehe den nächsten Abschnitt). Ein Indikator für den evolutionären Entwicklungszustand einer Galaxie ist somit die mit der Zeit fortschreitende Anreicherung mit schwereren Elementen im interstellaren Gas und in den Sternen.

Die erste Sternengeneration

Eng mit der chemischen Entwicklung der Galaxien verbunden ist die ganz bedeutende Frage, wann die ersten Sterne entstanden sind. Da sie direkt aus dem im Urknall entstandenen (primordialen) Gas stammen, können sie keine schweren Elemente enthalten. Es ist bis heute kein einziger Stern dieser ersten Generation gefunden worden, die sich nach unserer heutigen Vorstellung gebildet haben muss, bevor das Universum 1/10 des heutigen Alters hatte. Mit dem JWST erhofft man sich eine erste Entdeckung, beispielsweise durch die Beobachtung von Supernovaexplosionen in dieser ersten Sternengeneration. Es ist aber auch denkbar, dass Überreste dieser ältesten Sterne in Form von Weißen Zwergen noch heute die Außenbereiche der Milchstraße, Halo genannt, bevölkern.

Eine neue empfindliche Durchmusterung der Galaxis kann somit ebenfalls zur Beantwortung dieser bedeutenden Frage beitragen.

2.2.2 Struktur von Galaxien

Schon vor 80 Jahren führte Edwin Hubble ein Klassifikationsschema ein, das sich im Wesentlichen bis heute erhalten hat. Es unterscheidet vereinfacht gesagt elliptische Galaxien, zwei Typen von Spiralgalaxien und irreguläre Galaxien. Trotz vielfältiger Bemühungen ließ sich bis heute jedoch nicht einwandfrei klären, worauf diese morphologischen Unterschiede beruhen.

Dennoch konnten in den letzten Jahren große Fortschritte bei der Untersuchung der Strukturparameter von Galaxien erzielt werden, wobei deutsche Forscher wesentliche Beiträge liefern konnten. So fand man beispielsweise für elliptische Galaxien eine Beziehung zwischen der Ausdehnung der Zentralregion, der zentralen Flächenhelligkeit, der Geschwindigkeitsverteilung der Sterne und der Häufigkeit schwerer Elemente. Die neuen Großteleskope ermöglichen es, diese Parameter auch in entfernten Galaxien zu bestimmen. Die Frage, wie sich die für nahe Galaxien gefundenen Relationen bei entfernteren systematisch ändern, wird wesentlich zum Verständnis der Galaxienentwicklung beitragen. In diesem Zusammenhang ist der *Sloan Digital Sky Survey* für deutsche Forscher von großer Bedeutung, weil sich damit die Eigenschaften der heutigen Galaxienpopulation mit großer Genauigkeit bestimmen lassen.

In den letzten Jahren zeigten Polarisationsbeobachtungen im Radiokontinuum, dass fast alle Galaxien Magnetfelder besitzen, die überwiegend in Spiralmustern angeordnet und 5 bis 10 $\mu\text{Gauß}$ stark sind (Abbildung 2.23). Ihr Einfluss auf die Sternentstehung und die Bildung von Spiralarmen ist aber noch weitgehend unverstanden. Zur Klärung dieser Frage sind die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen der nächsten Generation von Radioteleskopen notwendig.

Die in Scheibengalaxien auftretenden Strukturen – wie Spiralen und Balken – können als Eigenschwingungen eines aus vielen Komponenten bestehenden Sternsystems verstanden werden. Die Form des Gravitationspotenzials, Dichtewellen, die Wechselwirkung zwischen Sternen und dem interstellaren Medium und andere Prozesse wirken hier in komplexer Weise zusammen. Insbesondere durch Beobachtungen der Milch-

Der Einfluss von Balken in Spiralgalaxien

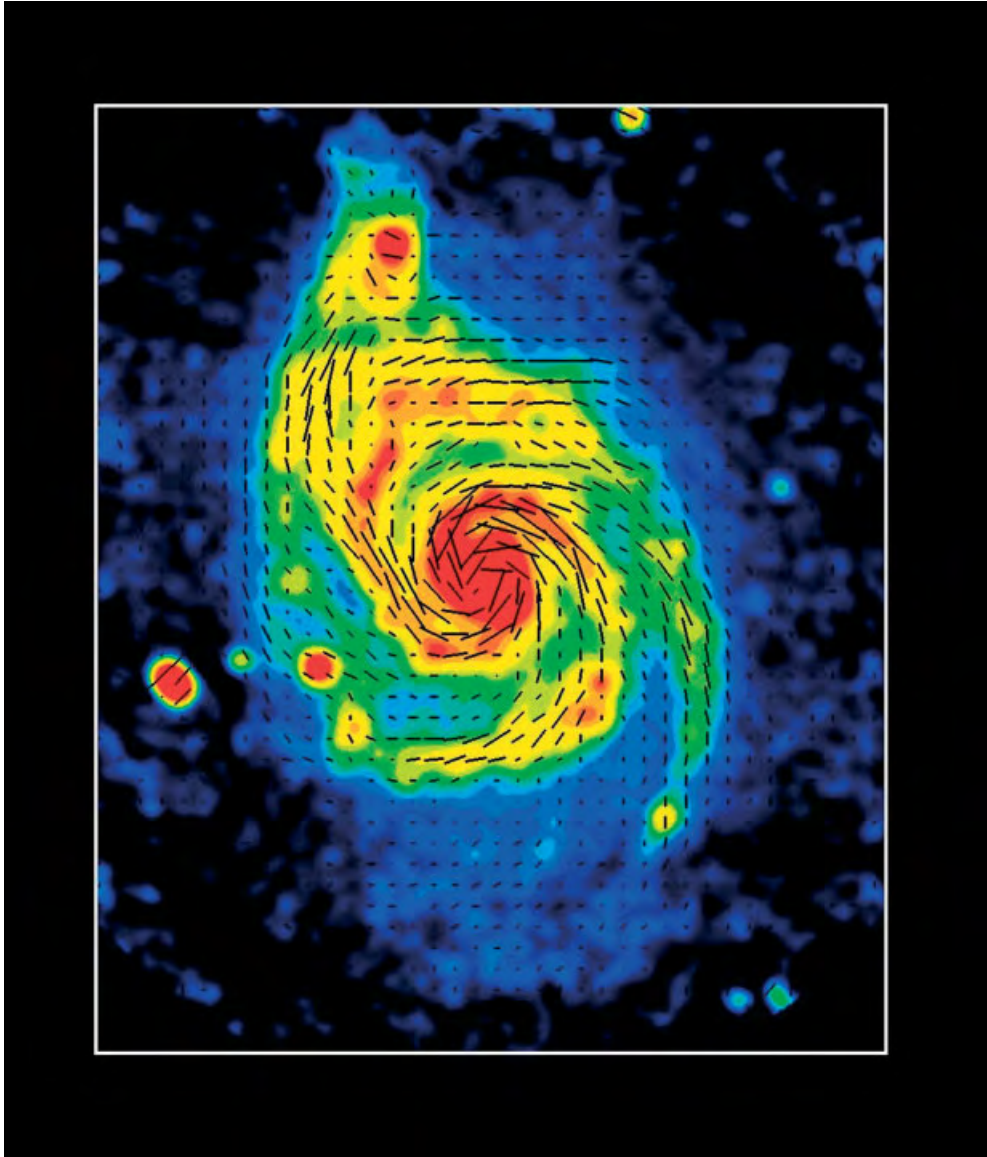


Abb. 2.23: Radiokontinuumbild mit Polarisationsvektoren der Galaxie M51 bei 6 cm Wellenlänge. Sie zeigen die Orientierung von Magnetfeldern relativ zu den Spiralarmen. (VLA/Effelsberg)

straße konnte im Verlauf der letzten Jahre die Bedeutung von Balken (Abbildung 2.24) für die Kinematik des Gases im zentralen Bereich von Scheibengalaxien besser verstanden werden. Die durch das Balkenpotenzial beeinflusste Strömung des Gases führt zu starken nichtradialen Geschwin-



Abb. 2.24: Die mit dem VLT aufgenommene Galaxie NGC 1365 ist eine typische Vertreterin einer Balkenspiralgalaxie. (ESO)

digkeitskomponenten, die eine Umverteilung der Gasmassen im Zentralbereich bewirken. Sie können die Sternentstehung fördern und aktive Kerne mit Materie versorgen. Polarisierte Radiostrahlung im Zentimeterbereich zeigt, dass die Magnetfelder den Gasströmungen in Balkengalaxien folgen, was uns einen neuen Blick auf die Gasdynamik in Galaxien beschert. Numerische Simulationen von Galaxien legen nahe, dass auch die Verteilung der Sterne durch das Balkenpotential beeinflusst werden kann.

Viele Eigenschaften von Galaxien zeigen eine Abhängigkeit von der Umgebung, in der sie sich befinden. So ist schon die Morphologie eine Funktion der Galaxiendichte: In Gebieten mit hoher Galaxiendichte ist das Verhältnis elliptischer zu Spiralgalaxien größer als in Bereichen geringer Dichte. Dies kann grundsätzlich durch Wechselwirkungsprozesse – entweder Verschmelzung oder gravitative Wechselwirkung bei nahen Vorübergängen – von Nachbargalaxien erklärt werden (Abbildung 2.25). So haben Beobachtungen im Zusammenspiel mit numerischen Simulationen die Hypothese bestärkt,

*Wechselwirkungen
der Galaxien*



Abb. 2.25: Das wechselwirkende Galaxienpaar NGC 6872 und IC 4970. (ESO)

dass elliptische Galaxien durch Verschmelzen zweier großer Spiralgalaxien entstehen (Abbildung 2.26). Allerdings ist unklar, ob wirklich alle elliptischen Galaxien auf diese Weise entstanden sind.

Die tiefen Aufnahmen beispielsweise mit dem Weltraumteleskop Hubble (Abbildung 2.18) machen klar, dass im frühen Universum Wechselwirkung über die Schwerkraft und Verschmelzung dominierende Elemente der Galaxienentwicklung waren. Die entferntesten heute bekannten Galaxien zeigen nur wenig Ähnlichkeit mit den Galaxien unserer Umgebung, und häufig ist unmittelbar die Wechselwirkung verschiedener Galaxien erkennbar. Das theoretische Verständnis dieser Vorgänge steht am Anfang und stellt eine große Herausforderung für die numerischen Simulationen dar. Da die Anzahldichte von Galaxien in Haufen gegenüber der mittleren Dichte wesentlich größer ist, sind Wechselwirkungen und Entwicklungsprozesse von Galaxien bevorzugt in Haufen zu studieren. Seit einigen Jahren wissen wir, dass sich die Galaxienpopulation in Haufen mit der kosmischen Zeit verändert,

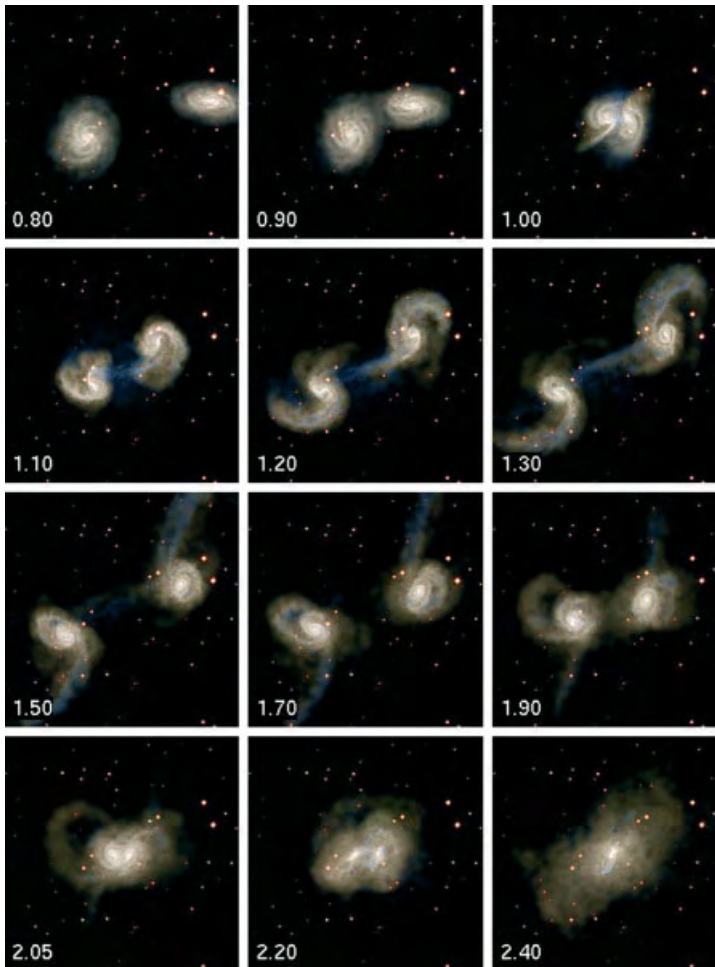


Abb. 2.26: Computersimulation des Verschmelzens zweier Spiralgalaxien. Die Zahlen geben die Zeit in Milliarden Jahren seit dem Start der Simulation an. Wenn sich beide Systeme vereint haben, bleibt ein nahezu kugelförmiges Sternsystem übrig; möglicherweise eine elliptische Galaxie. (MPA)

wobei bislang wenig über die dafür entscheidenden Prozesse bekannt ist.

Die Entstehung und Entwicklung von Galaxien hängt eng zusammen mit der Dynamik des Vielteilchensystems der Sterne und verschiedener Gaskomponenten unter dem Einfluss der Schwerkraft. Das stoßfreie Vielteilchensystem und die komplexe dissipative Physik der interstellaren Materie verursachen neue, in der klassischen Gasphysik nicht bekannte Phä-

Theoretische Modelle

nomene. Die Dynamik eines solchen stoßfreien Vielteilchensystems ist wesentlich komplizierter als etwa Gasdynamik, weshalb hierbei auch neue, in der Gasphysik nicht bekannte Phänomene auftreten. Daher ist es zum Beispiel nicht einfach, aus der Dynamik von Sternen in einem Galaxienkern auf die Masse eines eingeschlossenen Schwarzen Lochs zu schließen. Man benötigt daher Tests der Theorien und Modelle für die stellardynamische Entwicklung von Galaxien. Man verwendet als „Laboratorien“ einerseits numerische Simulationen, andererseits reale Objekte wie Sternhaufen und galaktische Scheiben. Wechselwirkungen kleinskaliger Plasmaprozesse mit der großskaligen Dynamik von Gas- und Sternkomponente durch Austausch von Masse und Energie sind ein wichtiger Aspekt zukünftiger Forschung.

Ohne die an solchen Objekten erprobten Methoden ist es kaum möglich, komplexere Systeme wie Sternhaufen um Schwarze Löcher in Galaxienkernen zu verstehen. Die Computersimulationen ermöglichen es, ähnlich wie in einem realen Experiment, Systeme so zu präparieren, dass sich Prozesse und Hypothesen testen lassen. Die intensive Nutzung von Höchstleistungsrechnern beispielsweise an den Bundesrechenzentren ist hier essenziell. Ebenso wichtig ist, dass die theoretische Astrophysik in Deutschland den Anschluss auf dem Gebiet speziell angepasster Rechner weiter beibehält.

Für unser Verständnis von Galaxien umfassen wichtige Problemkreise der Stellar- und Gasdynamik im nächsten Jahrzehnt den Aufbau der Milchstraße und galaktischer Scheiben, den Gehalt an Dunkler Materie sowie die Dynamik dichter Zentren von Galaxien und die Wechselwirkung von Galaxien.

2.2.3 Massereiche Schwarze Löcher

Wir wissen heute, dass die Zentren vieler naher Galaxien dunkle Massenkonzentrationen enthalten. Dies sind mit großer Wahrscheinlichkeit Schwarze Löcher mit Millionen bis zu Milliarden Sonnenmassen. Diese Erkenntnis, zu der auch deutsche Forschergruppen wesentlich beigetragen haben, kam unerwartet, und die Entstehung dieser Schwarzen Löcher und der Zusammenhang mit der Galaxienentstehung ist noch nicht verstanden. Bisher wurden Schwarze Löcher nur in zwei Typen von Galaxien nachgewiesen: in elliptischen Galaxien und in Spiralgalaxien, die einen stellaren Kernbereich (englisch Bulge) aufweisen. Dieser Kern ist ein nahezu sphärischer Bereich mit überwiegend alten Sternen (Abbildung



Abb. 2.27: Bei der Spiralgalaxie NGC 4565 blickt man unmittelbar auf die Kante der Scheibe. Im Zentrum erkennt man den sphärischen Bulge. (ESO)

2.27). In Form und Farbe ähnelt er einer kleinen elliptischen Galaxie. In reinen scheibenförmigen Spiralgalaxien, ohne zentralen Bulge, ließen sich bislang keine Schwarzen Löcher nachweisen.

Für Bulges und elliptische Galaxien wurde kürzlich eine ebenso verblüffende wie interessante Korrelation entdeckt: Die Masse der Schwarzen Löcher nimmt in etwa linear mit der absoluten Leuchtkraft der Gesamtheit aller Sterne im Bulge zu. Wenn man annimmt, dass die Leuchtkraft ein Maß für die in Form von Sternen vorhandene Materie ist, wächst also die

*Überraschende
Korrelationen*

Masse der Schwarzen Löcher mit der des Kerns an, und die Schwarzen Löcher besitzen stets etwa 0.2% der Masse des umgebenden Kernbereichs. Während diese Korrelation noch eine verhältnismäßig große Streuung aufweist (Abbildung 2.28, links), fand man einen wesentlich strengeren Zusammenhang zwischen der Masse der Schwarzen Löcher und der Geschwindigkeitsdispersion der Sterne im Kern (Abbildung 2.28, rechts): Je massereicher das Schwarze Loch ist, umso schneller bewegen sich die Sterne in der Muttergalaxie. Diese Zusammenhänge sind sehr erstaunlich, denn da die Schwarzen Löcher wesentlich masseärmer sind als die Bulges, ist dementsprechend auch ihre Schwerkraft wesentlich geringer als die aller Sterne im Kern. Infolgedessen sind die Schwarzen Löcher gar nicht in der Lage, die Bewegung der Mehrzahl der Sterne im Kern zu beherrschen. Die überwiegende Zahl der Sterne „spürt“ die Schwerkraftwirkung des Schwarzen Loches gar nicht.

Es gibt derzeit nur schematische Ideen, die diese Zusammenhänge erklären können. Entsprechend dieser durch deutsche Theoretiker entwickelten Modelle könnten sie aber ein Anzeichen dafür sein, dass die Schwarzen Löcher und die

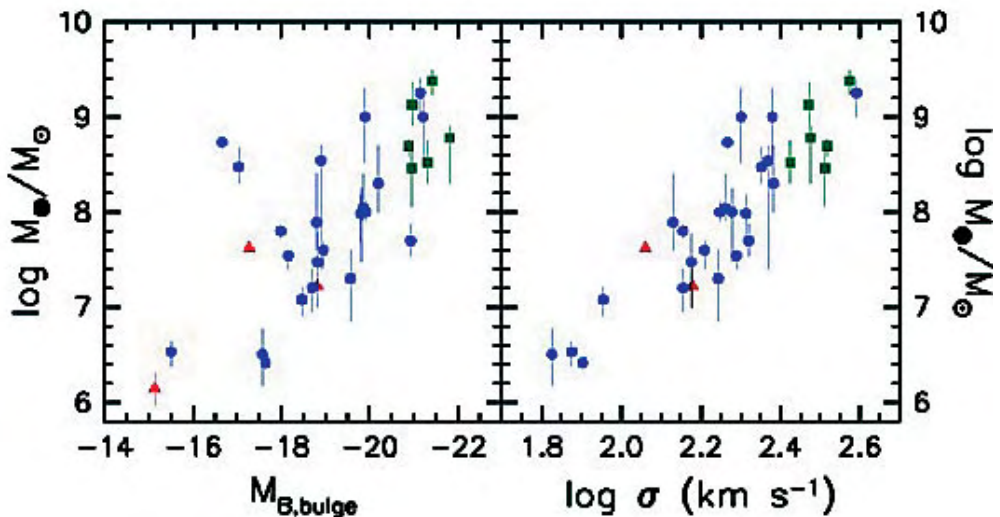


Abb. 2.28: Korrelation der abgeleiteten Massen zentraler Schwarzer Löcher in nahen Galaxien (senkrechte Achse) mit der Masse (oder Leuchtkraft, links) und der Geschwindigkeitsdispersion (rechts) der Muttergalaxien. Diese Korrelation weist darauf hin, dass Schwarze Löcher und Galaxien sich in einem gemeinsamen Prozess in der Frühzeit des Universums gebildet haben. (NASA/HST/Uni München)

Galaxien zusammen entstanden sind. Hochaufgelöste Beobachtungen mit adaptiver Optik an den neuen Großteleskopen sollten in Zukunft nicht nur eindeutige Bestätigungen naher Schwarzer Löcher erlauben, sondern auch die Rückkopplungsprozesse zwischen dem Materieeinfall auf Schwarze Löcher einerseits und der Sternentstehung sowie der Rolle von Galaxienverschmelzungen andererseits besser aufzeigen.

International an vorderster Front erwiesen sich deutsche Astronomen beim Studium des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße. Mit Speckle-Interferometrie und adaptiver Optik konnten sie erstmals die Bewegung einzelner Sterne in der Umgebung des Zentrums unserer Milchstraße bis zu einem Abstand von wenigen Lichttagen dreidimensional vermessen und seine Radioemission bis auf Skalen von weniger als 15 Schwarzschildradien abbilden. Die Beobachtungen lassen auf die Existenz eines kompakten Zentralobjekts mit drei Millionen Sonnenmassen schließen. Nach heutigem Verständnis kann es sich hierbei nur um ein Schwarzes Loch handeln (Abbildung 2.29).

Ein weiterer überzeugender Nachweis eines massereichen Schwarzen Lochs gelang mithilfe der Beobachtung der räumlichen Verteilung von Maserlinien molekularen Wasserdampfs in der Galaxie NGC 4258 durch interkontinentale Radiointerferometrie. Hierbei konnte man erstmalig eine kompakte Akkretionsscheibe in Rotation um eine zentrale Punktmasse nachweisen. Damit sind NGC 4258 und das Galaktische Zentrum die beiden zur Zeit besten Beweiselemente, dass es sich bei den dunklen Massenkonzentrationen in vielen nahen Galaxien wirklich um Schwarze Löcher handeln muss.

Innerhalb des nächsten Jahrzehnts müsste es gelingen, für das Galaktische Zentrum die Bahnen der innersten bekannten Sterne abzuleiten und damit das Gravitationsfeld bei drei- bis fünfmal kleineren Abständen vom Zentrum als bisher zu vermessen. Untersuchungen mit den im Bau befindlichen Interferometern am VLT und dem *Large Binocular Telescope* (LBT) sollten ein Auflösungsvermögen von wenigen Tausendstel Bogensekunden erreichen und so empfindlich sein, dass im Vergleich zu heute noch wesentlich schwächere Sterne noch näher am Zentrum entdeckt werden können. Besonders interessant wäre es, in einen Bereich von etwa 0.01 Bogensekunden Abstand vom Zentrum vorzustoßen, da sich hier die durch das Schwarze Loch verursachte Gravitationslinsenablenkung des Sternlichts bemerkbar machen sollte. Ließe sich diese beobachten, so könnte man hieraus die Masse des Schwarzen Lochs noch wesentlich genauer bestimmen. Schon heute kann

*Das Schwarze Loch
im Zentrum der
Milchstraße*

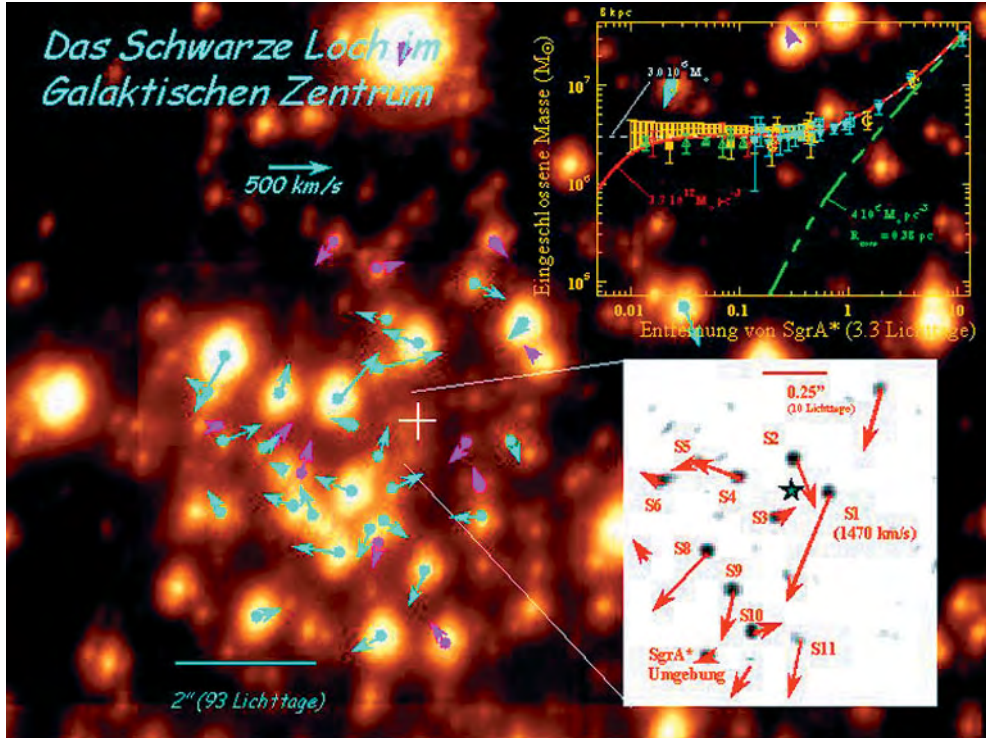


Abb. 2.29: Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße. Die Pfeile zeigen die gemessenen Eigenbewegungen der Sterne im zentralen Bereich, wobei die zentralen 40 Lichttage um die kompakte Radioquelle SgrA* (grüner Stern) im rechten, unteren Ausschnitt zu sehen sind. Aus den stellaren Geschwindigkeiten lässt sich das Gravitationspotenzial ableiten, das durch eine zentrale Punktmasse von ~ 3 Millionen Sonnenmassen an der Position von SgrA* dominiert wird (rechter oberer Einsatz). (MPE)

man mit *Very Long Baseline Interferometrie* (VLBI) im Radiobereich zeigen, dass die Radio- und Submillimeterstrahlung aus einem sehr kompakten Bereich kommen, der nur wenig größer ist als die vermutete Ausdehnung des Schwarzen Loches selber. In naher Zukunft sollte es sogar möglich sein, den „Schatten des Schwarzen Loches“ im galaktischen Zentrum direkt zu beobachten. Theoretische Abschätzungen und jüngste Röntgenbeobachtungen zeigen, dass auch die Röntgenstrahlung aus der direkten Umgebung des Ereignishorizonts des Schwarzen Loches kommen muss.

Röntgenbeobachtungen von Schwarzen Löchern

In den letzten Jahren gelang es erstmalig durch Röntgenspektroskopie, vor allem mit dem japanischen Weltraumteleskop ASCA, außergewöhnliche Phänomene in den Gasscheiben

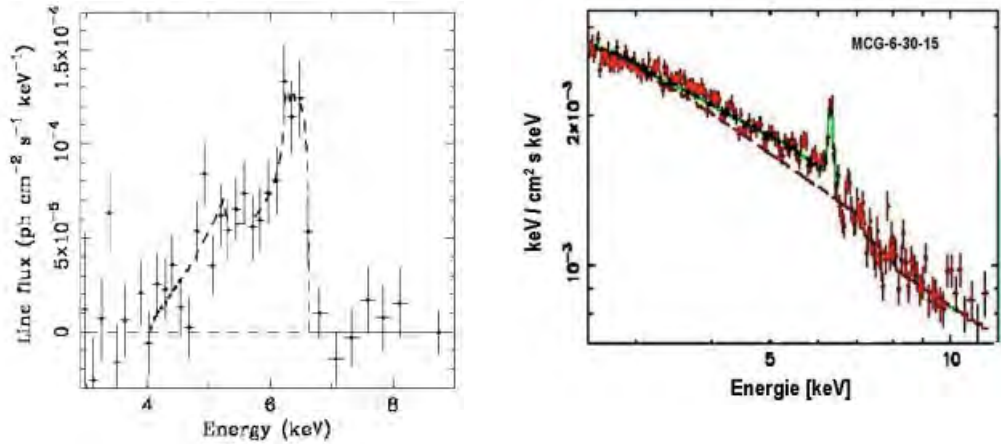


Abb. 2.30: Die relativistisch verbreiterte Röntgenlinie von Eisen in der aktiven Galaxie MCG- 6-30-15. Links mit ASCA gemessen, rechts mit XMM-Newton. (ISAS/Uni Tübingen/ESA)

Schwarzer Löcher nachzuweisen. So wurde eine Emissionslinie von Eisen beobachtet, die im Labor bei 6.4 keV auftritt. Sie wies in der aktiven Galaxie MCG 6-30-15 eine stark verbreiterte und asymmetrische Form auf (Abbildung 2.30). Dies lässt sich durch Effekte der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie erklären, die nur in unmittelbarer Nähe eines Schwarzen Loches auftreten. Mit dem europäischen Röntgenteleskop XMM-Newton werden zur Zeit sehr detaillierte Beobachtungen dieser Eisenlinien an vielen nahen aktiven Galaxienkernen (AGN) durchgeführt, wobei die Details der Röntgenspektren sich als wesentlich komplexer herausstellen, als die bisherigen theoretischen Modelle vorhersagen. Die genaue Untersuchung der zeitlichen Variabilität der Linienform mit XMM-Newton und später mit dem Röntgenobservatorium XEUS wird direkte Rückschlüsse auf die Masse und den Drehimpuls des Schwarzen Loches sowie auf den Massenstrom in das Schwarze Loch hinein geben. Damit ließe sich nicht nur zum ersten Mal der eigentliche „Motor“ eines AGN im Innersten studieren, sondern gleichzeitig ergäbe sich die Möglichkeit, die Allgemeine Relativitätstheorie bei sehr starken Gravitationsfeldern zu testen.

Eine weitere wichtige Diagnosemöglichkeit für die Dynamik des relativistischen Materiestromes in unmittelbarer Nähe des Schwarzen Loches ergibt sich durch die Untersuchung der schnellen zeitlichen Variabilität der Strahlung im Röntgen- und im höher energetischen Gammastrahlenbereich (einige TeV). Simultanbeobachtungen über einen weiten Wellenlängenbereich sowie die optimale Nutzung der hoch auf-

lösenden Radiointerferometer sind notwendig, um Dynamik und Instabilitäten im Gasstrom zu studieren.

*Verschmelzende
Schwarze Löcher*

Das Zusammenstoßen und das Verschmelzen von Galaxien sind wie bereits erwähnt ein kosmischer „Verkehrsunfall“, der im Laufe der Entwicklung vieler Galaxien eine Rolle spielt. Bei einem solchen Ereignis ergibt sich dann aber die Frage, was mit den Schwarzen Löchern geschieht, die sich in den Galaxienzentren befinden. Wenn die Galaxien derart verschmelzen, dass ihre zentralen Schwarzen Löcher beide im neuen Kerngebiet bleiben, dann wird dynamische Reibung mit Sternen sie schließlich nahe genug zueinander bringen und ebenfalls verschmelzen lassen.

Bei diesem Vorgang sollten gemäß der Relativitätstheorie Gravitationswellen abgestrahlt werden (Abbildung 2.31). Der geplante europäisch-amerikanische Gravitationswellendetektor im Weltraum, LISA, wird empfindlich genug sein, das Verschmelzen zweier massereicher Schwarzer Löcher im gesamten Universum zu registrieren. Voraussichtlich wird LISA mehrere solcher Ereignisse pro Jahr nachweisen und detailliert auflösen können. Die charakteristische Schwingungsfrequenz der Gravitationswellen ist so niedrig, dass solche Ereignisse nur vom Weltraum aus beobachtet werden können. Zur Interpretation der Signale sind gute Muster der erwarteten Signalformen aus Simulationen mit leistungsfähigen Supercomputern nötig. Solche aufwendigen Simulationen sind Gegenstand intensiver Arbeit in Deutschland.

Aber auch kosmische Objekte lassen sich zur direkten und indirekten Gravitationswellenmessung benutzen. Pulsare, schnell rotierende Neutronensterne, sind die genauesten Uhren im Kosmos, mit deren Hilfe die Krümmung des Raumes vermessen werden kann. Über die präzise Bestimmung der Pulsankunftszeiten und ihrer Variationen lassen sich langwellige Gravitationswellen, wie sie etwa von engen Doppeltsternen abgestrahlt werden, nachweisen, wobei dem SKA zukünftig eine entscheidende Rolle zukommen wird.

*Mögliche Auswirkungen auf die
theoretische Physik*

Der erwartete Nachweis von Gravitationswellen ist von fundamentaler, über die astronomischen Anwendungen hinausgehender Bedeutung für die Physik. Die Details der Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie für Effekte in sehr starken Gravitationsfeldern werden durch diese Beobachtungen erstmals überprüfbar. Untersuchungen von Gravitationswellen, die entstehen, wenn kleinere Schwarze Löcher in größere hineinfliegen, werden genaue Aussagen über das Gravitationsfeld in der Nähe des großen Schwarzen Loches

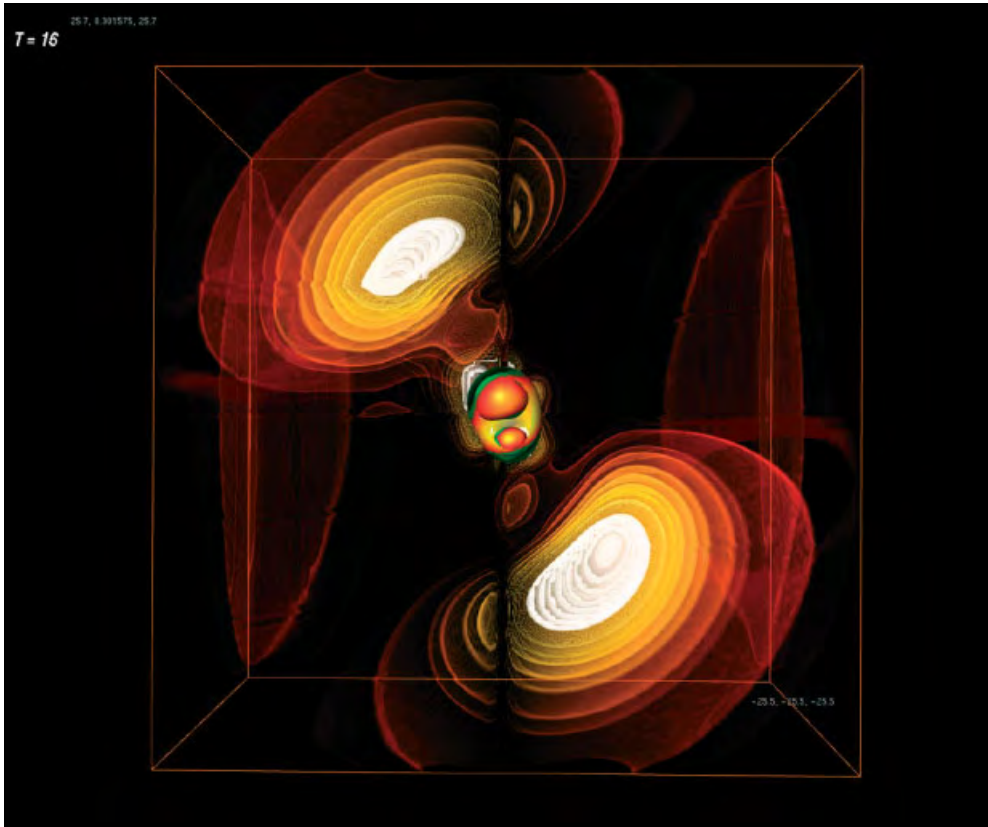


Abb. 2.31: Gravitationswellen von einer streifenden Kollision Schwarzer Löcher. Das Bild zeigt die numerische Simulation (der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie auf einem Hochleistungsrechner) der Abstrahlung einer Gravitationswelle bei der Kollision zweier Schwarzer Löcher. Die Schwarzen Löcher sind durch ihren „scheinbaren Horizont“ dargestellt, der in etwa dem Ereignishorizont entspricht. Die Farben auf den scheinbaren Horizonten kennzeichnen die Krümmung der Oberflächen: grün bedeutet stark positive Krümmung, rot sphärische Krümmung (entsprechend einer Kugeloberfläche), gelb flach, cyan negative (hyperbolische) Krümmung. Die filigranen hüllenartigen Strukturen sind verschiedene Intensitätsstufen der abgestrahlten Gravitationswelle. Solche Kollisionen werden mit dem Weltraumgravitationswelleninterferometer LISA direkt nachweisbar sein. (NSCA)

liefern. Solche Tests von starken Gravitationsfeldern sind von grundlegender Bedeutung insbesondere für die theoretische Physik. Sie könnten möglicherweise auch auf die Versuche ausstrahlen, die Gravitation mit den anderen Wechselwirkungskräften (starke und schwache Kraft und die elektromagnetische Wechselwirkung) zu vereinheitlichen.

2.2.4 Aktive Galaxienkerne

Die Erklärung aktiver Galaxienkerne (AGN) durch akkretierende massive Schwarze Löcher kann heute als äußerst erfolgreiches Paradigma gelten. Dieses erstreckt sich über einen weiten Bereich von Massen und Leuchtkräften und setzt sich sogar bis zu wesentlich schwächeren Aktivitätsformen fort. In jeder dritten Galaxie im nahen Universum finden wir sichtbare Anzeichen für „milde“ Aktivität ihres Zentralbereichs. Extreme Formen von Kernaktivität, die in wenigen Prozent der bekannten Galaxien vorkommen, weisen Strahlungsleistungen bis zum Tausendfachen einer „normalen“ Galaxie auf, die zudem in einem extrem kleinen Raumvolumen vom Durchmesser eines Sonnensystems ihren Ursprung hat. Dies sind die Quasare. Weitgehend akzeptiert sind auch so genannte „vereinheitlichte Modelle“, die viele verschiedene Ausprägungen des AGN-Phänomens als Folge unterschiedlicher Blickrichtung des Betrachters auf eine strukturierte und teilweise verdeckte Kernregion der Galaxie deuten. Der in diesen „vereinheitlichten“ Modellen vorhergesagte dichte Staub- und Gasstorus um den aktiven Kern wurde inzwischen durch optische Polarisationsmessungen und Radiobeobachtungen in einer Reihe von Objekten bestätigt. Viele Aspekte werfen aber noch Fragen auf.

Hierbei ist beispielsweise die Beziehung der absorbierenden Strukturen bei den verschiedenen Wellenlängen (zum Beispiel im Röntgen- und UV/optischen Bereich) unklar. Die genaue räumliche Struktur des „Torus“ bedarf Beobachtungen mit wesentlich höherer räumlicher Auflösung, insbesondere mit adaptiver Optik auf Großteleskopen. Im Standardmodell spielen heute neben der Akkretionsscheibe auch relativistische Plasmastrahlen – „Jets“ genannt – eine große Rolle. Sie schießen, durch Magnetfelder getrieben, aus der Scheibe nach außen und entziehen der Akkretionsscheibe Masse und Energie. Zusätzlich ist es auch möglich, dass Jets dem Schwarzen Loch direkt Rotationsenergie entziehen. Die Emission von Jets erstreckt sich über einen extrem breiten Frequenzbereich, von Radio über Optisch und Röntgen bis in den Gamma- und TeV-Bereich. Dabei spielen hochenergetische Teilchen (Elektronen, Positronen, Hadronen) eine wichtige Rolle (Abbildung 2.32). Die Struktur von Jets und ihres relativistischen Plasmas lässt sich mit Hilfe der VLBI-Technik sogar auf Subparsecskalen beobachten (Abbildung 2.33). Mit der weiteren Entwicklung von Interferometrie im Submillimeterbereich und hin zu größeren Basislinien mit Space-VLBI wird in Zukunft der zentrale Bereich um Schwarze Löcher noch genauer unter die Lupe zu nehmen sein.

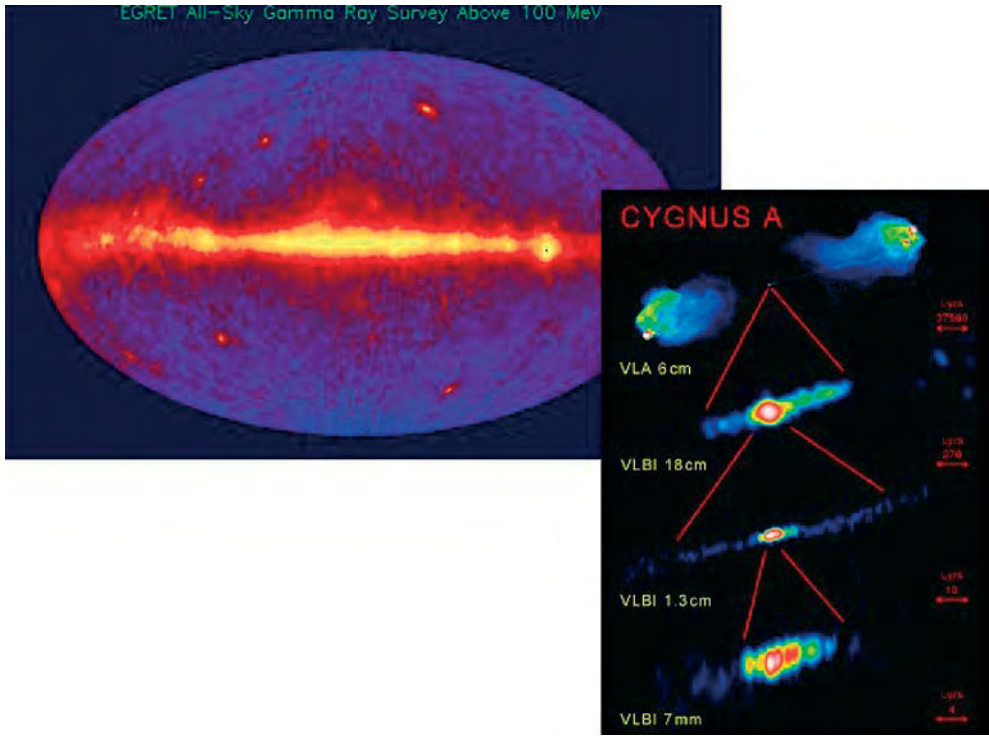


Abb. 2.32: Untersuchungen von aktiven galaktischen Kernen. Links: Die Himmelsdurchmusterung des EGRET-Experiments auf dem Compton Gamma Ray Observatory hat neben intensiver harter Gammastrahlung aus dem interstellaren Medium unserer Milchstraße (waagerechter Streifen) eine Reihe von kompakten, extragalaktischen Gammaquellen entdeckt. Diese Gammastrahlung kommt aus den relativistischen Jets aktiver galaktischer Kerne (NASA/DLR/MPE). Rechts: Hochauflösende Messungen der komplexen Struktur eines solchen Jets über fast 5 Größenordnungen in räumlicher Skala in der Galaxie Cygnus A durch interkontinentale Radiointerferometrie. (MPIFR)

Mit adaptiver Optik an den neuen Großteleskopen und der Interferometrie im Millimeterbereich mit dem geplanten Observatorium ALMA werden sich neue Möglichkeiten ergeben, die nur unvollständig verstandene Versorgung des Schwarzen Loches mit Gas mit höchster Auflösung zu untersuchen (Abbildungen 2.34, 2.35).

Überdies wird man ein anderes Phänomen untersuchen, das sich bereits bei Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Hubble und im nahen Infrarot angedeutet hat. In einigen Fällen findet man nämlich in der Umgebung des aktiven Galaxienkerns Gebiete verstärkter Sternentstehung. Offenbar kann Sternentstehung durch das in die Kernregion einströmende Gas gefördert werden.

Aktive Galaxienkerne und Sternentstehung

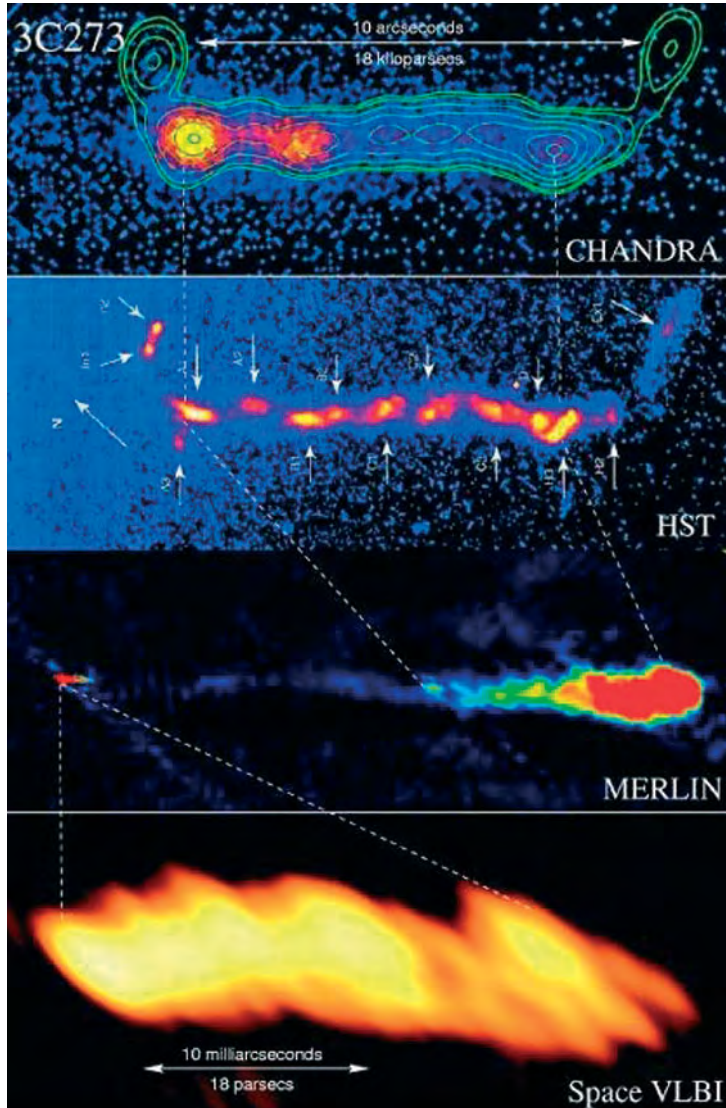


Abb. 2.33: Beobachtungen eines aktiven galaktischen Kerns, die die Notwendigkeit multispektraler Messungen verdeutlichen. Dargestellt ist die räumliche Verteilung eines Jets aus der Umgebung des Quasars 3C273 bei verschiedenen Wellenlängen (Röntgen, optisch, Radio) und verschiedenen Auflösungen (Chandra/HST/MERLIN/Space-VLBI). In allen Wellenlängenbereichen kann man ähnliche Strukturen finden, bis hin zu den aller kleinsten Skalen, die nur noch mit Radiointerferometrie (VLBI) aufgelöst werden. Mit VLBI erreicht man schon heute Auflösungen von 50 Mikrobogensekunden, also den Weltrekord der höchsten in der Astronomie erreichbaren Bildschärfe. (MPIfR)

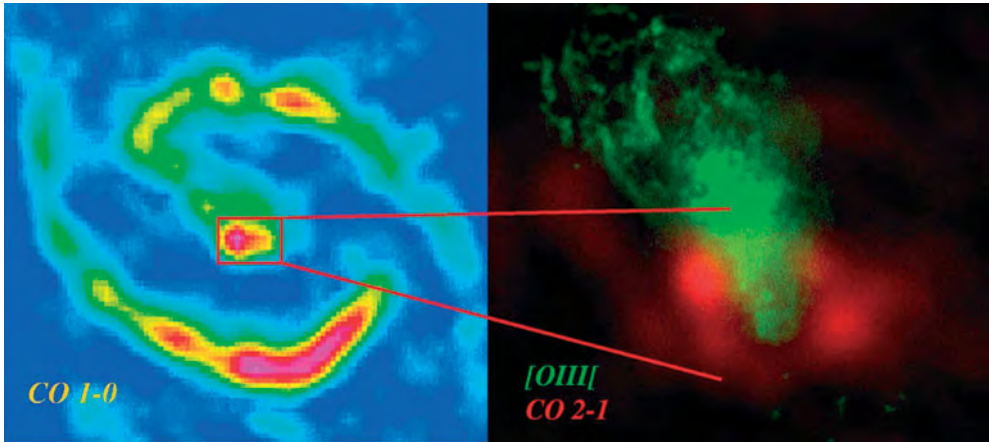


Abb. 2.34: Links: Die mit dem IRAM-Interferometer aufgenommene Abbildung zeigt molekulares Gas in der aktiven Galaxie NGC 1068. Aus zwei Spiralarmen strömt es entlang eines „Balkens“ in die Kernregion. Ausschnitt rechts: Molekulares Gas in der Kernregion (rot) umschließt das konusförmige Gebiet mit vom aktiven Kern angeregtem ionisiertem Gas (grün). (MPE/IRAM)

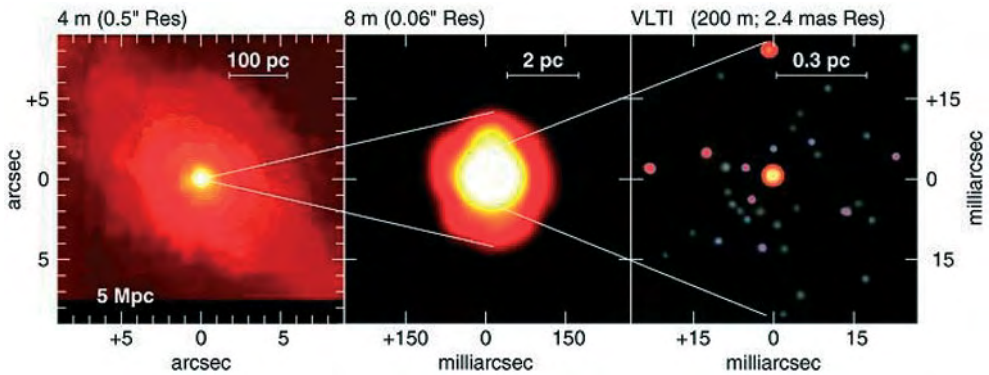


Abb. 2.35: Hochauflösende Messungen von galaktischen Kernen bei optischen und infraroten Wellenlängen. Links ist eine Aufnahme eines nahen (15 Millionen Lichtjahre) Kerns, aufgenommen in gutem „Seeing“. In der Mitte einer balkenförmigen Sternverteilung sitzt ein unaufgelöster, heller aktiver Kern. Mit adaptiver Optik am VLT und LBT (Mitte) kann man dann diesen Kern bereits in eine kompakte Zentralkomponente von heißem Staub um das massereiche Schwarze Loch mit einem darumliegenden, etwas ausgedehnten Sternhaufen auflösen. Mit interferometrischen Aufnahmen kann man dann einzelne helle Sterne in diesem Haufen erkennen und untersuchen (rechts). (MPE)

Stark erhöhte Sternentstehung und aktive Kerne koexistieren auch in vielen der leuchtkräftigsten Galaxien. In den letzten Jahren nutzten deutsche Arbeitsgruppen Infrarotspektroskopie mit dem europäischen Weltraumteleskop ISO, um die störenden Staubschichten zu durchdringen und zu zeigen, dass der Energieausstoß der meisten dieser Objekte

von den gerade entstandenen Sternen dominiert wird. Dieselbe Frage, die auch eng verknüpft ist mit der Erklärung der kosmischen Röntgen- und Infrarothintergrundstrahlung, wird sich im nächsten Jahrzehnt wieder für leuchtkräftige Galaxien bei hoher Rotverschiebung stellen und Beobachtungen mit XMM-Newton, Chandra und Herschel und später mit XEUS erfordern.

*Gamma-
beobachtungen*

Aktive galaktische Kerne gehören zu den Orten mit dem höchsten Energieumsatz im Universum. Seit der Beobachtung zahlreicher aktiver Galaxien im Gammabereich oberhalb einer Energie von 100 MeV ist klar, dass ein signifikanter Teil der beim Einfall in das zentrale Schwarze Loch freigesetzten Energie bei höchsten Energien abgestrahlt wird. Mehrere aktive Kerne konnten als Quellen von Gammastrahlung mit Energien im TeV-Bereich identifiziert werden. Deutsche Arbeitsgruppen nehmen hier mit der Anlage HEGRA eine führende Rolle ein.

Die Strahlung stammt in diesen Fällen wahrscheinlich von eng gebündelten Teilchenstrahlen, die aus dem Zentralgebiet in zwei entgegengesetzte Richtungen in den Raum schießen. Die Teilchen (Elektronen und eventuell deren Antiteilchen, Positronen) bewegen sich in diesen Jets nahezu mit Lichtgeschwindigkeit. Beobachtungen der Galaxie Mrk 501 legen nahe, dass die hochenergetische Strahlung von Elektronen stammt, die in einem Magnetfeld beschleunigt werden. Die im Bau befindlichen Instrumente H.E.S.S. und MAGIC sollten es in den nächsten Jahren ermöglichen, Daten für weitere aktive Galaxien zu erhalten. Sie sollen dazu dienen, mehr über die Beschleunigungsprozesse der Teilchen insbesondere in der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Loches zu erfahren.

*Aktive Galaxien
und Neutrinos*

Die neue Neutrinoastronomie wird im nächsten Jahrzehnt nicht nur generell ein ganz neues Beobachtungsfenster öffnen, sondern sie verspricht ganz konkret komplementäre Information zur Gammaastronomie. Hochenergieneutrino-Detektoren müssen extrem groß gebaut werden, um genügend empfindlich zu sein. Obwohl selbst mit dem geplanten Neutrinodetektor ICECUBE der Nachweis einzelner Quellen schwierig sein wird, sollten mindestens durch Überlagerung der Signale mehrerer Quellen aktive Kerne als Neutrinoquellen – und damit als Beschleuniger schwerer Teilchen (Hadronen) – identifizierbar sein. Ein starkes Signal sollte auch der integrale, von allen aktiven Galaxien erzeugte Neutrinofluss sein. Allerdings ist für dessen Messungen ein genaues Ver-

ständnis des Untergrunds erforderlich, da eine Identifizierung einzelner Quellen wegen der fehlenden Richtungsinformation ausscheidet.

2.3 Materiekreislauf und Sternentwicklung

Wissenschaftlicher Fortschritt

- Erkenntnis der Verteilung, Physik und Chemie des interstellaren Mediums.
- Entdeckung Brauner Zwerge.
- Entdeckung von Mikroquasaren.
- Erstbeobachtungen der Quellen Kosmischer Strahlung im hochenergetischen Gammabereich.
- Identifizierung von Gamma Ray Bursts mit Ausbrüchen in Galaxien.
- Besseres Verständnis der magnetischen Aktivität der Sonne sowie der Korona und des Sonnenwindes.
- Aufklärung der Physik der Sternwinde.
- Sondierung des Innern der Sonne und anderer Sterne durch Helio- und Asteroseismologie.
- Bestimmung von Elementhäufigkeiten in Supernovaüberresten.

Aufgaben und Ziele

- Strukturierung des Multiphasenmodells des Interstellaren Mediums und Wechselwirkung zwischen Sternen und Interstellarem Medium.
- Dynamische Modelle für die Entwicklung von Einzel- und Doppelsternen.
- Aufklärung der Natur der Vorläufersterne von Supernovae Typ Ia.
- Aufklärung der Akkretionsprozesse auf Neutronensterne und Schwarze Löcher sowie der Plasmajetentstehung.
- Numerische Simulationen von Sternexplosionen und dem Verschmelzen kompakter Objekte.
- Detaillierte Studien von Gamma Ray Bursts in allen Wellenlängenbereichen.
- Aufklärung der magnetischen Aktivität der Sonne und der Sterne.

Der größte Teil der beobachtbaren Materie in Galaxien wie zum Beispiel unserer Milchstraße existiert in zwei sehr unterschiedlichen Zuständen: zum einen als heißes, dichtes Plasma beispielsweise im Innern der Sterne und zum anderen als kaltes, hochverdünntes Gas mit beigemischttem Staub im interstellaren Medium. Zwischen diesen Zuständen gibt es einen ständigen Kreislauf, der mit seiner steten Anreicherung an schweren Elementen die Grundlage jeder kosmischen Evolution der Materie bis hin zur heutigen Komplexität bildet (Abbildung 2.36). Das zwischen den Sternen existierende Medium trägt zwar nur zu einem geringen Prozentsatz zur Gesamtmasse unserer Milchstraße bei, es ist aber der Stoff, aus dem die Sterne entstehen und der die galaktische Entwicklung bestimmt. Die Gesamtmasse von Galaxien wird jedoch bei weitem von einem Halo Dunkler Materie dominiert,

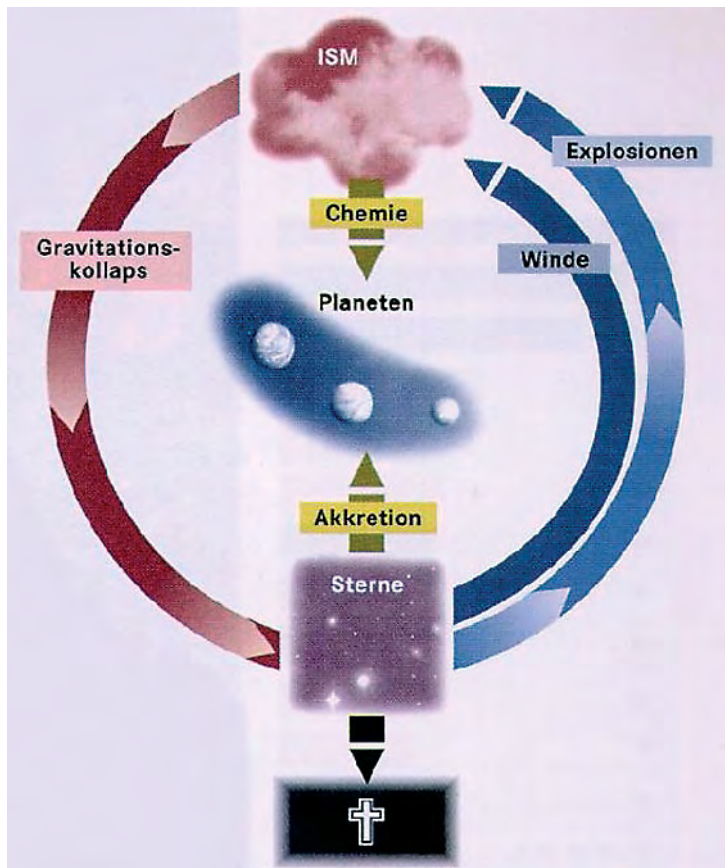


Abb. 2.36: Der Kreislauf des interstellaren Mediums: Hauptakteure und wichtige Prozesse (Uni Bonn).

dessen Gravitationspotenzial die großräumige Dynamik der Sterne und des Gases bestimmt.

Sterne entstehen in Gruppen von Dutzenden bis einigen hunderttausend Mitgliedern in dichten und kühlen Wolken interstellarer Materie. Die jungen Sterne wirken auf unterschiedliche Weise auf das sie umgebende interstellare Medium ein: über die ausgesandte Strahlung und über Teilchen- oder Sternwinde, die von ihren Oberflächen ins All abströmen.

*Der kosmische
Kreislauf*

Einige Millionen Jahre nach der Entstehung eines Sternhaufens explodieren die massereichen Mitglieder bereits wieder als Supernovae. Dabei setzen sie Stoßwellen frei, die durchs interstellare Medium rasen. Sie zerstören die Staubteilchen zum Teil, heizen das Gas auf und ionisieren es. Das heißt, die Atome verlieren ihre Elektronen, so dass ein Plasma aus elektrisch geladenen Teilchen entsteht. Gleichzeitig werden große Mengen mit schweren Elementen angereicherten Materials, das in den Vorläufersternen durch kernphysikalische Prozesse entstanden ist, an das interstellare Medium abgegeben. Daraus entstehen später Molekülwolken, und der Materiekreislauf ist geschlossen.

Die Endprodukte der Sternentwicklung – Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher – entziehen diesem Zyklus immer mehr Materie. In ferner Zukunft wird der Gasvorrat daher erschöpft sein, so dass sich dann keine Sterne mehr bilden können.

Den Sternen kommt in diesem Kreisprozess die zentrale Rolle des Motors zu. Sie sind verantwortlich für die Erzeugung und Verbreitung schwerer Elemente. Ihre Existenz ist notwendige Voraussetzung für die Bildung fester Körper, wie Planeten, und daher auch für eine biologische Evolution.

Ohne weitere Energiezufuhr kühlt das interstellare Gas schließlich bis auf Temperaturen um 10 K ab. Im Innern kühler und dichter Wolken, in die auch die energiereiche Strahlung heißer Sterne nicht vordringen kann, sind die Bedingungen geeignet für die Bildung von Molekülen. Das mit Abstand häufigste Molekül im Universum ist der molekulare Wasserstoff H_2 , der nur im Infraroten und im fernen UV-Bereich des Spektrums direkt nachweisbar ist. Er hat bei der Entstehung der ersten Generation von Sternen im Universum die entscheidende Rolle gespielt. Die Bildung von H_2 auf der Oberfläche von Staubteilchen ist eine notwendige Vorstufe für die Bildung komplexer Moleküle. Es werden immer wieder weitere zum Teil indirekte Methoden zum Nachweis dieser Moleküle entwickelt, auch um die Prozesse bei der Stern-

*Bildung komplexer
Moleküle*

entstehung, insbesondere bei geringen Elementhäufigkeiten, und die komplexe Struktur und Dynamik der Molekülwolken (Abbildungen 2.37, 2.38) zu verstehen; auf diese Prozesse wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Abb. 2.37: Das Sternentstehungsgebiet Orion B. Man erkennt die optische Emission einiger Sterne. Die Konturlinien zeigen Konzentrationen von Kohlenmonoxidmolekülen (gemessen im Millimeterbereich), die Orte der gegenwärtigen Sternentstehung, an. (Uni Köln)

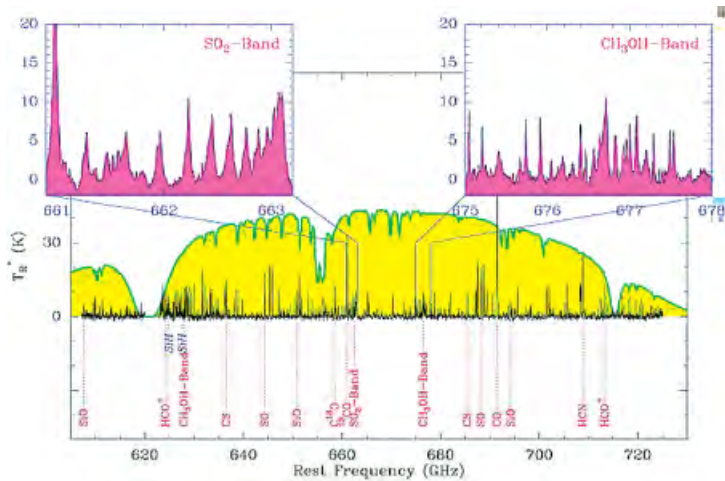
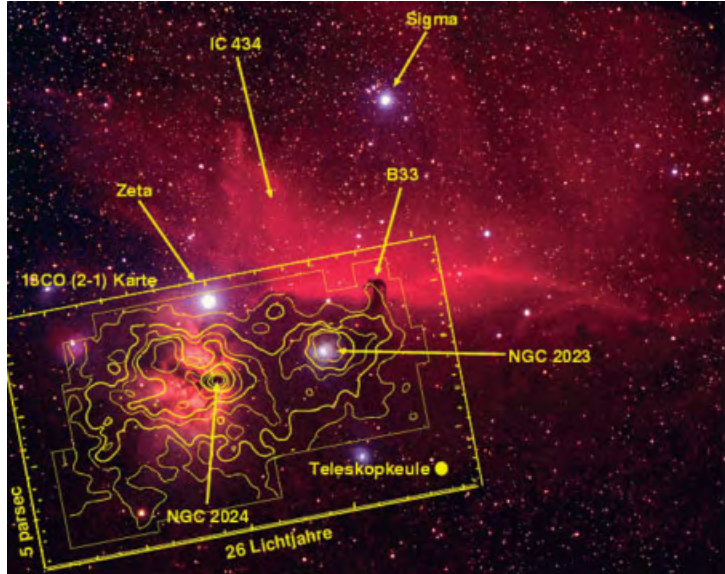


Abb. 2.38: Astrochemie und Astrobiologie. Das Bild zeigt eine mit hochauflösender Heterodynspektroskopie am CSO-Teleskop auf Hawaii durchgeführte spektrale Durchmusterung der molekularen Emissionslinien im atmosphärischen Fenster bei ~ 450 mm (die gelb-grüne Kurve zeigt die atmosphärische Transmission auf dem 4300 m hohen Mauna Kea). Ähnliche Durchmusterungen sind mit SOFIA und Herschel für den gesamten Infrarot- und Submillimeterbereich möglich und geben einen quantitativen „chemischen Fingerabdruck“, der eindeutige Aussagen über die chemische Entwicklung von interstellaren oder zirkumstellaren Wolken ergibt. (MPIfR und Uni Köln)

2.3.1 Das interstellare Medium

Das Verständnis der im Rahmen dieses Materiekreislaufes im interstellaren Medium ablaufenden Prozesse ist die Grundlage für das Verständnis vieler anderer Bereiche der Astrophysik, wie der Stern- und Planetenentstehung, der Entwicklung der Galaxien und der Entstehung der verschiedenen Galaxienformen (siehe Abschnitt 2.2) und letztlich der chemischen Entwicklung des Universums. Aufgrund der, aus irdischer Sicht, außergewöhnlichen Bedingungen ist das interstellare Medium ein ideales Labor für die Physik stark verdünnter Plasmen, für chemische Prozesse unter extremen Bedingungen, für Atom- und Molekülphysik, aber auch für die Festkörperphysik (Staub) sowie für viele andere Bereiche der Naturwissenschaften.

Die Sterne wirken auf das sie umgebende interstellare Material ein. Die zahlreichen massearmen Sterne entwickeln in ihren Frühphasen heftige Teilchenwinde und bipolare Ausströmungen (Jets). In der Spätphase ihrer Entwicklung kühlen sie soweit ab, dass aus den in den Sternen gebildeten Elementen kleine Festkörperpartikel entstehen. Starke Sternwinde treiben diese ins interstellare Medium, was zu dessen Anreicherung mit schweren Elementen und Staubpartikeln führt. Diese kühlen Massenströme tragen maßgeblich zur turbulenten inneren Dynamik der Molekülwolken bei. Im Gegensatz dazu sind massereiche Sterne sehr heiß und können deshalb das Umgebungsgas effektiv aufheizen, Moleküle zerstören (dissoziieren) und Atome ionisieren. Zudem entwickeln sie energiereiche Sternwinde, die mit Expansionsgeschwindigkeiten von einigen 1000 km/s die Umgebung des massereichen Sterns „frei fegen“ und damit direkt auf das interstellare Medium einen dynamischen Einfluss ausüben. Die sich um heiße Sterne bildende Zone aus ionisiertem Gas mit Temperaturen um 10^4 K kann durch ihre vielen Emissionslinien in den optischen, infraroten und Radiobereichen beobachtet und analysiert werden (Abbildung 2.39).

Sterne wirken auf das interstellare Medium ein

Einige Millionen Jahre nach der Entstehung eines Sternhaufens explodieren die massereichsten Sterne bereits wieder. Diese Supernovae sind in verschiedener Hinsicht für das interstellare Medium von großer Bedeutung. Sie heizen das interstellare Medium auf und sind Quellen der kosmischen Teilchenstrahlung. Ihre wohl wichtigste Rolle im Materiekreislauf spielen sie jedoch, wie bereits erwähnt, als Quelle der schwereren Elemente. Im Laufe der Entwicklung einer

Supernovae und das interstellare Medium



Abb. 2.39: Der Tarantel-Nebel in der Großen Magellanschen Wolke, aufgenommen mit dem VLT. Junge heiße Sterne haben die Wolke, in der sie entstanden sind, weitgehend aufgelöst und beleuchten das Restgas in ihrer Umgebung. (ESO)

Galaxie reichern Supernovae und Sternwinde das interstellare Medium mit schweren Elementen an; deren Gehalt bestimmt wiederum, wie schnell heißes Gas abkühlen kann und für eine neuerliche Sternentstehung zur Verfügung steht. Einen vollständigen Überblick der heißen Phase des interstellaren Mediums in der Milchstraße gibt die ROSAT-Himmelsdurchmusterung (Abbildung 2.40).

Röntgenspektroskopische Beobachtungen mit XMM-Newton und Chandra haben es möglich gemacht, den Ausstoß schwerer Elemente in jungen Supernovaüberresten direkt zu beobachten. Die Dichten der häufigsten Elemente vom Sauerstoff bis zum Nickel können nun direkt bestimmt werden. Dabei offenbart sich eine inhomogene Zusammensetzung und Ausbreitung der Supernovaüberreste (Abbildung 2.41). Auch im heißen interstellaren Medium anderer Galaxien lassen sich jetzt die Elementhäufigkeiten bestimmen. Mit XEUS werden

ähnliche Beobachtungen an Galaxien im frühen Universum, als die ersten schweren Elemente gebildet wurden, möglich werden.

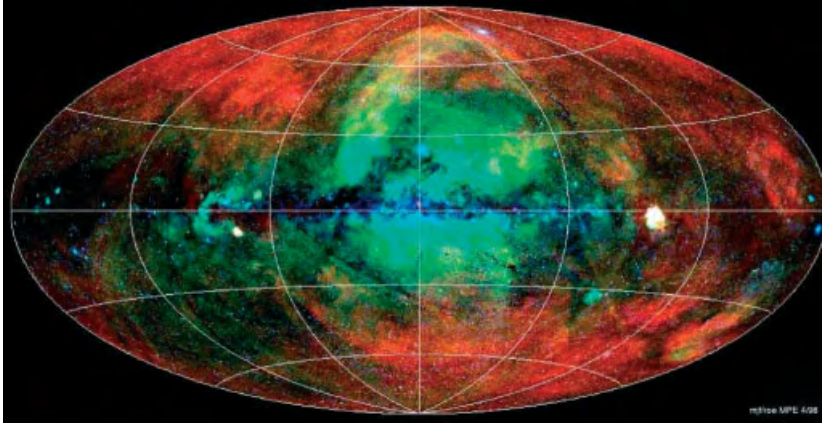


Abb. 2.40: Die diffuse Röntgenstrahlung im Energiebereich 0.1–2.4 keV, gemessen in der ROSAT-Himmelsdurchmusterung. Die Strahlung ist entsprechend ihrer Energie farbkodiert (rot: niederenergetischer, blau: hochenergetischer). (MPE)

Die größten Wolken aus Gas und Staub, die so genannten Riesenmolekülwolken, können bis zu zehn Millionen Sonnenmassen beinhalten. Sie sind somit – abgesehen von dem Schwarzen Loch im galaktischen Zentrum – die massereichsten Objekte in der Milchstraße. Die galaktische Rotation sowie die Zufuhr kinetischer Energie durch die Sternwinde und Supernovaexplosionen führen zu einem hochgradig turbulenten Bewegungszustand des interstellaren Mediums. Massearme Wolken können so durch Kollisionen zu massereichen Molekülwolkenkomplexen heranwachsen. Gleichzeitig führt die innere Turbulenz zur Bildung von Strukturen und Unterstrukturen auf allen Größenskalen. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben wird, sind diese Prozesse zum Verständnis der Sternentstehung entscheidend.

Turbulenz und Sternentstehung

Supernovae sind in der Lage, Gas aus der Ebene einer Scheibengalaxie hinaus zu blasen. Diese heiße Materie lässt sich bei unserer Milchstraße und anderen Spiralgalaxien mit Beobachtungen im Röntgen- und fernen UV-Bereich nachweisen. Es befindet sich im Außenbereich, dem so genannten Halo. Es stellt sich nun die Frage, was mit diesem Gas passiert und wie es möglicherweise die Entwicklung einer Galaxie bestimmt.

Kreislauf des Gases durch den Halo der Milchstraße

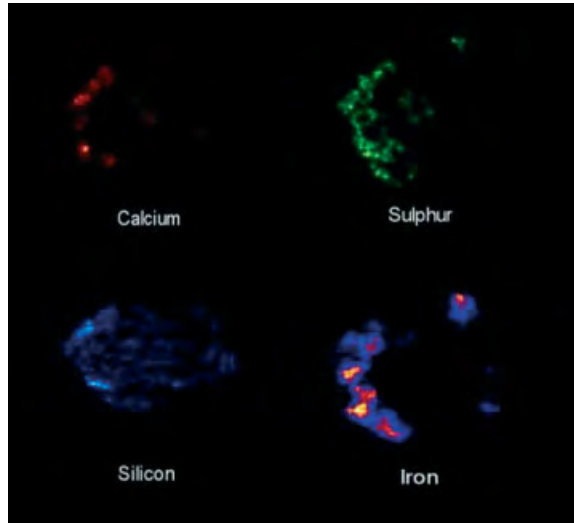


Abb. 2.41: XMM-Newton-Aufnahme des Supernovaüberrestes Tycho, in der die unterschiedliche Verteilung der Elemente erkennbar wird. (MPE)

Kann die Galaxie das Gas im Halo mit ihrer Schwerkraft binden, dann wird es zwangsläufig (mangels ausreichender Energiezufuhr) abkühlen und in die Scheibenebene zurückfallen. Tatsächlich beobachtet man in mehreren Spektralbereichen große Wolken aus neutralem Gas, die sich auf die galaktische Scheibe mit sehr hoher Geschwindigkeit zubewegen. Das in der Scheibe der Milchstraße existierende interstellare Gas wird durch das Ausströmen des heißen Gases in den Halo und den anschließenden Einfall an anderer Stelle in Form von Hochgeschwindigkeitswolken durchmischt und chemisch homogenisiert. Diese Durchmischung zeigt sich auch indirekt an Schwankungen im Gehalt schwerer Elemente in Sternen gleichen Alters. Gleichzeitig erkennt man eine systematische Veränderung des Gehaltes schwerer Elemente in den Sternen von den Innen- zu den Außenbereichen der Milchstraße. Auch dieses Phänomen ist ein Maß für die Effizienz der Durchmischung des interstellaren Mediums.

Hochgeschwindigkeitswolken

Diese Interpretation der in der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs beobachteten Hochgeschwindigkeitswolken ist nicht unumstritten. Ein kleiner Teil dieser Wolken ist vermutlich dadurch entstanden, dass Gas aus den Magellanschen Wolken durch das Gezeitenfeld der Milchstraße herausgerissen wurde, wie man aus deren Position am Himmel schließt.

Falls sich ein Teil der Hochgeschwindigkeitswolken bei sehr viel größerer Entfernung befindet, wären sie zu interpretieren als Gaskomponente der von der Theorie der kosmischen Strukturbildung vorhergesagten Galaxien geringer Masse, bei denen allerdings die Sternentstehung unterdrückt wurde. Diese Galaxien wären dann Mitglieder der Lokalen Galaxiengruppe und, wie bei massiven Galaxien, von Dunkler Materie dominiert. Zukünftige, empfindlichere Radiobeobachtungen werden die Frage beantworten, ob ähnliche Hochgeschwindigkeitswolken um andere Spiralgalaxien zu finden sind, wobei man dann deren gegenseitigen Abstand direkt vermessen kann. Falls diese Erklärung für die Hochgeschwindigkeitswolken zutrifft, wäre eine weitere Vorhersage des kosmologischen Modells bestätigt, weswegen dieser Fragestellung große Aufmerksamkeit gewidmet wird.

Die Vielfalt der thermodynamischen Zustände und die sehr unterschiedlichen Prozesse im interstellaren Medium führen zu einer großen Vielfalt an beobachtbaren Phänomenen. Die Erforschung des interstellaren Mediums erfordert daher Beobachtungs- und Messgeräte, die nahezu das ganze elektromagnetische Spektrum abdecken: So beobachtet man im Gammabereich die Wechselwirkung der Kosmischen Strahlung mit den dichten Molekülwolken und spektroskopisch die Verteilung der in den Supernovaexplosionen erzeugten schweren Elemente, im Röntgenbereich die Strahlung heißer Gase, im fernen UV die Absorptionslinien von molekularem Wasserstoff (H_2) und von hoch ionisierten Sauerstoffatomen (O^{5+}), im UV-Bereich die Absorptionslinien vieler Metalle und des Kohlenmonoxids (CO), im Optischen die klassischen Absorptions- und Emissionslinien aus Gebieten ionisierten Gases und die diffusen Absorptionsbänder, im nahen und mittleren Infrarot die Emission von H_2 und von ionisiertem Gas sowie Absorptionsstrukturen des interstellaren Staubes, im ferneren Infrarot die Emission des Staubes und wichtige Emissionslinien von kühlem und warmem Gas, bei *Submillimeter-, Millimeter- und Zentimeterwellenlängen* Emissionslinien von vielen Molekülen und atomarem Wasserstoff sowie im Radiobereich die Kontinuumsmission heißer ionisierter Gase und Synchrotronstrahlung.

Für viele der genannten Wellenlängenbereiche gibt es sehr gute Beobachtungsmöglichkeiten, beispielsweise im Millimeter- und Submillimeterbereich mit dem deutsch-französischen Observatorium IRAM, im Sichtbaren und nahen Infrarot mit dem VLT der ESO oder den Röntgenteleskopen XMM-New-

Beobachtungen im gesamten Spektralbereich

Beobachtungsmöglichkeiten heute und morgen

ton (ESA) und Chandra (NASA). Im Millimeter- und Submillimeterbereich wird ALMA durch seine hohe Winkelauflösung maßgebliche neue Beiträge hinsichtlich der detaillierten Untersuchung der lokalen Phänomene in der Milchstraße liefern. Im fernen Infrarot ist nach den europäischen Weltraummissionen IRAS und ISO eine Lücke entstanden, die von der amerikanischen Mission SIRTf überbrückt und durch Herschel und SOFIA geschlossen werden. Im UV steht mit dem HST ein sehr vielfältiges, daher stark überbuchtes Teleskop zur Verfügung, nach dessen Abschaltung 2010 das World Space Observatory/UV diese Aufgaben übernehmen kann. Im fernen UV ist der amerikanisch-französische Satellit FUSE in Betrieb. INTEGRAL wird im Gammabereich genaue Verteilungskarten der schweren Elemente und den Nachweis weiterer Nuklide liefern. Mit XEUS werden ähnliche Beobachtungen an Galaxien im frühen Universum möglich werden. Schließlich kann mit der langwelligen Radiostrahlung von Pulsaren über Propagationsprozesse wie interstellare Dispersion, Faraday-Rotation, Streuung und Szintillation die Struktur des interstellaren Mediums vermessen werden, wobei heute Effelsberg und später das SKA genutzt werden.

2.3.2 Kosmische Strahlung

Großer Energiebereich

Eine ungewöhnliche Komponente des interstellaren Mediums ist die Kosmische Strahlung. Sie besteht aus Teilchen, deren Energien sich über viele Dekaden von einigen Millionen Elektronenvolt (eV) bis zu mehr als 10^{20} eV erstrecken. Ein einzelner Atomkern besitzt im Extremfall eine kinetische Energie vergleichbar mit der eines Tennisballs beim Aufschlag! Die Energieverteilung ist nicht thermisch und sie beinhaltet keinen Hinweis auf eine charakteristische Energie- oder Temperaturskala, wie man sie bei thermischer Strahlung findet. Zudem ist die Energiedichte der Kosmischen Strahlung vergleichbar mit derjenigen der Turbulenz des interstellaren Gases oder der Energiedichte des Sternenlichtes. Dies legt nahe, dass die kosmische Strahlung kein isoliertes Phänomen ist, sondern sich in einer Art Gleichgewicht mit anderen Energieformen befindet.

Mögliche Beschleunigerquellen

Die Suche nach den Quellen und Beschleunigungsmechanismen der hochenergetischen Kosmischen Strahlung ist eines der fundamentalen Themen der Hochenergieastrophysik. Zur Zeit geht man davon aus, dass Teilchen in Stoßwellen von Supernovaexplosionen bis auf 10^{15} eV beschleunigt werden. Ein

Beweis steht dafür jedoch noch aus. Die noch energiereichen Teilchen könnten aus aktiven Galaxienkernen stammen.

Ein indirekter Schlüssel zum Verständnis der Erzeugungsmechanismen und Ausbreitung der Kosmischen Strahlung ist ihre Elementzusammensetzung. Bei kleineren Energien kann man aus Isotopenverhältnissen auf die mittlere Aufenthaltsdauer in unserer Milchstraße schließen. Gegenstand intensiver Untersuchungen, beispielsweise mit den Luftschaueranlagen KASKADE und HEGRA, war und ist insbesondere die Zusammensetzung der Kosmischen Strahlung im Bereich um 10^{15} eV. Hier hat die Energieverteilung einen Knick (Knie genannt), über dessen Ursache sich nur spekulieren lässt.

Da die geladenen Teilchen der Kosmischen Strahlung vom Galaktischen Magnetfeld abgelenkt werden, lässt sich ihr Weg zum Ausgangsort nicht direkt zurückverfolgen. Allerdings gehen die Teilchen Wechselwirkungen mit Materie- und Strahlungsfeldern im Universum ein. Dabei entstehen hochenergetische Gammaquanten, die es erlauben, die Quellen und die Ausbreitung der Kosmischen Strahlung zu ermitteln. Eine Kartierung der diffusen Gammastrahlung im Energiebereich von einigen GeV gelang erstmals Mitte der neunziger Jahre mit dem Instrument EGRET auf dem Gammastrahlenobservatorium CGRO, an dessen Bau auch deutsche Forscher beteiligt waren. Die Karte zeigt zum einen eine starke Emission aus dem Band der Milchstraße. Sie stammt zum Teil von Einzelquellen. Zum anderen existiert eine diffuse Strahlungskomponente, welche die Milchstraße weitgehend homogen durchsetzt. Sie entsteht wahrscheinlich durch Wechselwirkung der Kosmischen Strahlung mit der interstellaren Materie (Abbildung 2.32 links).

Erste Himmelskarte

Zukünftige Instrumente der Gammaastronomie im Bereich einiger GeV bis TeV wie GLAST, H.E.S.S. und MAGIC sollen eine detaillierte Modellierung der Verteilung der Kosmischen Strahlung in der Milchstraße ermöglichen. Die Quellen der Kosmischen Strahlung wie die vermuteten Supernovaüberreste sollten durch die innerhalb der Quellen erzeugten TeV-Gammaquanten sichtbar werden.

2.3.3 Der nächste Stern: die Sonne

In der Milchstraße gibt es über hundert Milliarden Sterne, doch nur einer ist nahe genug, um physikalische Prozesse auf vielen Größenskalen direkt zu beobachten: unsere Sonne. (Magneto)Hydrodynamische Prozesse finden in und auf der Sonne auf sehr unterschiedlichen räumlichen Skalen statt, die von wenigen Kilometern bis zur Dimension des Sonnendurchmessers reichen. Die zeitlichen Skalen der Variationen reichen von Sekunden und Minuten beim Ausbruch eines Flares über den mehrjährigen Aktivitätszyklus bis zu Schwankungen der magnetischen Aktivität, und damit auch der Leuchtkraft, über Jahrhunderte bis Jahrtausende.

Helioseismologie

Die Sonne ist ein riesiger Gasball und führt Schwingungen mit ganz unterschiedlichen Frequenzen aus. Die Analyse dieser Eigenschwingungen ist heute ein wirkungsvolles Werkzeug zur Sondierung ihres inneren Aufbaus. Das Verfahren erinnert an die Seismologie der Erde und wird in Anlehnung daran Helioseismologie genannt. Die präzise Messung der Schwingungsfrequenzen über viele Jahre hinweg ermöglicht die experimentelle Bestimmung von Zustandsgrößen als Funktion des Radius und den Vergleich mit Modellen der Sonne. Dabei ergibt sich ein genaues Bild der tiefen- und breitenabhängigen Rotation im Innern der Sonne. Diese Studien haben zum Beispiel gezeigt, dass sich die an der Oberfläche beobachtete breitenabhängige (differenzielle) Rotationsgeschwindigkeit auch ins Innere (in die Konvektionszone hinein) erstreckt.

Außerdem ergänzen sich Helioseismologie und solare Neutrinoforschung in idealer Weise. Letztere kann nur Aussagen über den physikalischen Zustand des unmittelbaren Zentrums der Sonne machen, während für die Helioseismologie genau dieser Bereich schwierig zu beobachten ist.

Wechselwirkungen zwischen konvektiver Strömung und Magnetfeld

Dynamische Wechselwirkungen zwischen konvektiver Strömung und Magnetfeld in einem Plasma können bislang nur bei der Sonne auf ihren charakteristischen Längen- und Zeitskalen studiert werden. In der Photosphäre und Chromosphäre manifestiert sich der Magnetismus der Sonne in Form von Sonnenflecken, Poren und magnetischen Knoten bis hin zu kleinskaligen Flusselementen. Die räumliche Dimension magnetischer Phänomene überdeckt mehrere Größenordnungen, von über 100 000 km bis weit unter 100 km. Die kleinsten Skalen liegen weit unterhalb der beugungsbegrenzten Auflösung selbst der größten heutigen Sonnenteleskope.

Neuerdings wird offensichtlich, dass die Variation des solaren Magnetismus mit einer Schwankung des Energieausstoßes, der so genannten Solarkonstante, korreliert ist. Im Sichtbaren und Infraroten ist dieser Effekt klein: Die langzeitlichen Fluktuationen betragen etwa ein Promille. Im extremen UV und im Röntgenbereich dagegen variiert die Strahlung während eines Sonnenfleckenzklus um etwa eine Größenordnung. Die genauen Ursachen dieser Schwankungen und der ihnen zu Grunde liegenden Prozesse sowie ihr Einfluss auf das vom Sonnenwind dominierte Gebiet im Planetensystem (Heliosphäre) und letztendlich auf das Klima der Erde sind zur Zeit Themen intensiver Forschung.

Variationen und Einfluss auf das Klima der Erde

Sämtliche solaren Aktivitätsphänomene variieren im 11- bzw. 22-jährigen Sonnenzyklus. Die regelmäßige Umkehrung des Magnetfeldes bei jedem Zykluswechsel wird als Beweis für das Wirken eines magnetischen Dynamos interpretiert. Trotz enormer theoretischer Anstrengungen ist das Wirkungsprinzip des solaren Dynamos immer noch unklar, insbesondere was die Bedeutung von magnetischen Flussröhren angeht. Ferner erlaubt die Theorie sogar für die Sonne nur sehr wenige quantitative Vorhersagen, für andere Sterne fast gar keine.

Entstehung des Magnetfeldes

Ein Weg, mehr über das Magnetfeld im Innern der Sonne herauszufinden, besteht in der Beobachtung von sonnenähnlichen Sternen. Wählt man hier solche Objekte aus, die sich von der Sonne aufgrund von Größe, Masse, chemische Zusammensetzung oder Alter unterscheiden, lässt sich der Einfluss dieser Größen auf die magnetische Aktivität ermitteln (solar-stellare Beziehung). Dadurch wird es möglich, Aussagen beispielsweise darüber zu treffen, wie die Aktivität der Sonne in ihrer Jugend war und wie häufig und unter welchen Bedingungen Aktivitätszyklen bei Sternen auftreten. Der im Gebiet der solarstellaren Beziehung erzielte Fortschritt beruhte bisher auf den verbesserten Beobachtungsmöglichkeiten. In der nächsten Dekade wird man zusätzlich die Möglichkeit haben, hochaufgelöste Spektren von Sternen im Optischen an den Großteleskopen oder auch im UV- und Röntgenbereich zu gewinnen. Hochpräzisionsphotometrie wird es in Zukunft auch erlauben, bei nahen sonnenähnlichen Sternen Oszillationen zu studieren. Dann wird eine stärkere Verflechtung mit theoretischen Modellen immer dringender. Beobachtungen auf langen Zeitskalen wie etwa des 11-jährigen Fleckenzklus erfordern den Einsatz spezialisierter Teleskope mit zwei bis drei Metern Spiegeldurchmesser. Der voll robotische Betrieb wird hier ein wichtiges Element zum Erfolg sein.

Die solar-stellare Beziehung

*Korona und
Sonnenwind*

Durch das Studium der Sonne wissen wir von der komplexen Beschaffenheit der äußeren Atmosphäre eines Sterns und seiner Korona, die wir mit bloßem Auge nur bei totalen Sonnenfinsternissen als hellen Strahlenkranz sehen können. Die Korona bildet die Übergangszone in den interplanetaren Raum. Das Magnetfeld der Sonne strukturiert die Atmosphäre und verbindet ihre einzelnen Schichten. Die Atmosphäre kann daher nur als gekoppeltes System von Strahlung, Plasma und Magnetfeld verstanden werden.

Der Sonnenwind – und die von ihm erzeugte Heliosphäre – ist der einzige Sternwind, in dem Teilchen und Felder in situ gemessen und die zugehörigen Plasmaprozesse durch Experimente im Weltraum untersucht werden können (Abbildung 2.42). Die mit Satelliten und Raumsonden gewonnenen Erkenntnisse haben exemplarischen Charakter für das Verständnis anderer, sehr weit entfernter Plasmen im Kosmos und für die Entstehung der Winde anderer Sterne. Auch hier steht die Frage nach dem Einfluss des Sonnenwindes auf die Erde und deren Magnetfeld im Zentrum des Interesses.

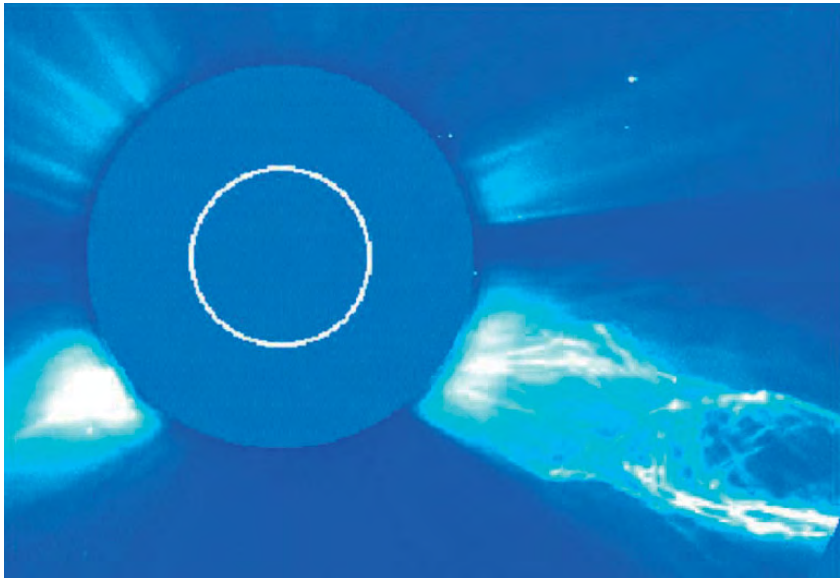


Abb. 2.42: Massenauswurf aus der Sonnenkorona mit einem verdrillten Magnetfeld, aufgenommen mit dem Instrument LASCO auf dem Weltraumobservatorium SOHO. Treffen solche Teilchenströme mit Geschwindigkeiten von mehr als 1000 km/s auf das Erdmagnetfeld, lösen sie magnetische Stürme aus und regen Polarlichter an. (ESA/NASA/MPAe)

2.3.4 Die Sterne

Sterne sind die am besten untersuchten und theoretisch verstandenen Himmelskörper. Die Physik der Sternstruktur und -entwicklung und der Sternatmosphären ist seit Jahrzehnten ein Schwerpunkt der astronomischen Forschung, speziell auch in Deutschland. Dabei wurden enorme Fortschritte erzielt, so dass große Bereiche der Sternphysik als verstanden gelten können, weswegen sich Sterne hervorragend dazu eignen, an ihnen physikalische Prozesse zu studieren. Durch neuere Beobachtungen ergaben sich weitere Fragen, deren Beantwortung wichtige physikalische Einsichten verspricht.

Das Verständnis der sich in den äußeren Hüllen von Sternen abspielenden physikalischen Prozesse ist von zentraler Bedeutung für die gesamte Astrophysik. Plasmaprozesse wie das Aufheizen der Korona auf über eine Million Grad, Kurzschlüsse in Magnetfeldern (Rekonnexion), Phasenübergänge, Sternwindbeschleunigung und die Beschleunigung von Teilchen auf relativistische Energien sind höchstwahrscheinlich Prototypen für im Kosmos weit verbreitete Prozesse. Sie finden sich in ähnlicher Form im diffusen interstellaren Medium, in den Scheiben um Neutronensterne und Schwarze Löcher, in Galaxienhaufen und in anderen Objekten.

Sterne als plasma-physikalische Laboratorien

Eine herausragende Entdeckung der letzten Dekade ist die Existenz der schon lange vorhergesagten Braunen Zwerge (Abbildung 2.43). Das sind kühle, sehr lichtschwache und massearme Objekte ohne nennenswerte thermonukleare Energieerzeugung. Sie befinden sich auf der Massenskala zwischen Sternen und Planeten. Die bisherigen Beobachtungen konnten die vorhergesagten Eigenschaften hervorragend bestätigen. Die neuen Erkenntnisse betonen aber gleichzeitig die Notwendigkeit theoretischer Modelle sowohl für die Atmosphären als auch für den inneren Aufbau und die Entwicklung Brauner Zwerge. Solche Modelle stehen den Beobachtungen bislang noch nach.

Braune Zwerge

Bei den relativ niedrigen Temperaturen, die in den dichten Atmosphären Brauner Zwerge herrschen, spielen chemische und physikalische Nichtgleichgewichtsprozesse eine zentrale Rolle, deren Beschreibung von klassischen Atmosphärenmodellen nicht geleistet werden kann. Insbesondere konnte mit Beobachtungen gezeigt werden, dass sich in den Atmosphären Staubteilchen bilden. Es gibt sogar Hinweise auf die Entstehung von Wolken und Winden, so dass man geradezu von

„Wetter“ auf Braunen Zwergen

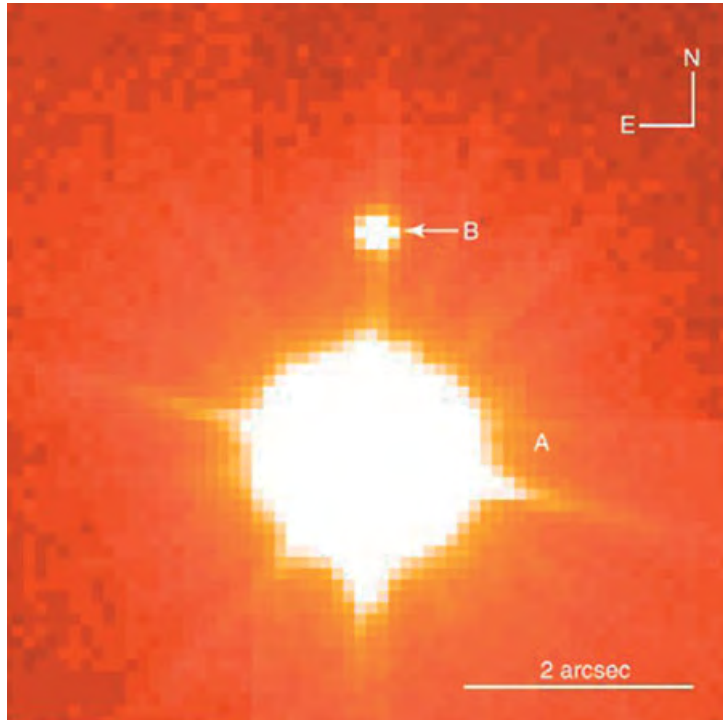


Abb. 2.43: Ein Brauner Zwerg als Begleiter des Sterns TWA 5. (ESO)

wechselnden „Wetterverhältnissen“ auf diesen Himmelskörpern sprechen kann. Diese Phänomene erfordern zukünftig eine erheblich detailliertere physikalische Beschreibung der Atmosphären, die höhere Anforderungen auch an die numerischen Modellierungen stellen werden.

Sternwinde

Auf dem Gebiet der heißen Sterne erlauben Modellrechnungen nunmehr sowohl für statische als auch für expandierende Sternatmosphären eine verlässliche Bestimmung der physikalischen Parameter und der chemischen Zusammensetzung. Zur Analyse von Sternen mit statischen, nicht zu heißen Atmosphären existieren ausgefeilte Standard-Atmosphärenmodelle. Sterne verlieren aber überdies in bestimmten Entwicklungsphasen einen großen, mitunter sogar den überwiegenden Teil ihrer Masse durch kontinuierliche Sternwinde oder episodische Gasauswürfe. Die physikalischen Mechanismen konnten in jüngster Zeit teilweise verstanden werden. Die Winde heißer Sterne lassen sich durch die Wirkung des Strahlungsdruckes auf Atome auch quantitativ erklären (Abbildung 2.44). Lediglich bei sehr dichten Winden (von Wolf-

Box 2.3: Stellarphysik: Eine traditionelle Domäne deutscher Astronomie

Der Aufbau und die Entwicklung von Sternen ist eines der am besten verstandenen Felder der Astrophysik, in dem seit den Anfängen der modernen Astrophysik deutsche Forscher eine weltweit führende Rolle spielten. Sterne sind exzellente Laboratorien zum Studium (astro)physikalischer Prozesse, zum Beispiel Strahlungsprozesse sowie der Wechselwirkung von Materie und Magnetfeldern. Sowohl heiße als auch späte kalte Sterne sind beispielsweise ein entscheidender Motor des kosmischen Materiekreislaufs. Diese Sterne haben enorme Leuchtkräfte, millionenfach größer als die der Sonne. Allein das ausgesandte Licht übt einen dermaßen starken Druck aus, dass große Materiemengen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt und vom Stern weggeblasen werden – die Sterne lösen sich teilweise auf. Sowohl diese strahlungsdruckgetriebenen Winde heißer Sterne als auch die pulsations- und staubgetriebenen Winde kalter Sterne wurden an deutschen Astrophysikinstitutionen maßgeblich erforscht. Beobachtungsdaten lieferten die Teleskope von ESO und am Calar Alto, die weltraumgestützten UV-Spektrographen von IUE und HST sowie ROSAT im Röntgenbereich. Die zur Interpretation der Spektren nötigen Sternatmosphärenmodelle, physikalisch kompliziert und numerisch aufwendig, wurden erfolgreich entwickelt und erlauben nunmehr eine zuverlässige Bestimmung der Parameter. Die Entwicklungswege sowohl der heißen massereichen, als auch der kühleren masseärmeren Sterne konnten damit teilweise aufgeklärt werden.

Rayet-Sternen) stehen selbstkonsistente dynamische Modelle noch aus. Hier konnte insbesondere im Röntgenbereich eine inhomogene Struktur der Sternwinde gefunden werden, deren Erklärung noch aussteht.

Der Antriebsmechanismus für Winde in kühlen Riesensternen ist noch weitgehend unverstanden. In den extremen Endphasen der Riesensterne wird der Wind möglicherweise durch Strahlungsdruck auf den in ihren kühlen Hüllen gebildeten Staub angetrieben. Außerdem können hier Pulsationen des gesamten Sterns eine Rolle spielen. Verschiedenste Beobachtungsgrößen wie Lichtkurven, Intensitäts- und Linienprofile, radiale Konzentrationsverläufe verschiedener Moleküle können als Ergebnis konsistenter Modelle bereits quantitativ beschrieben werden.

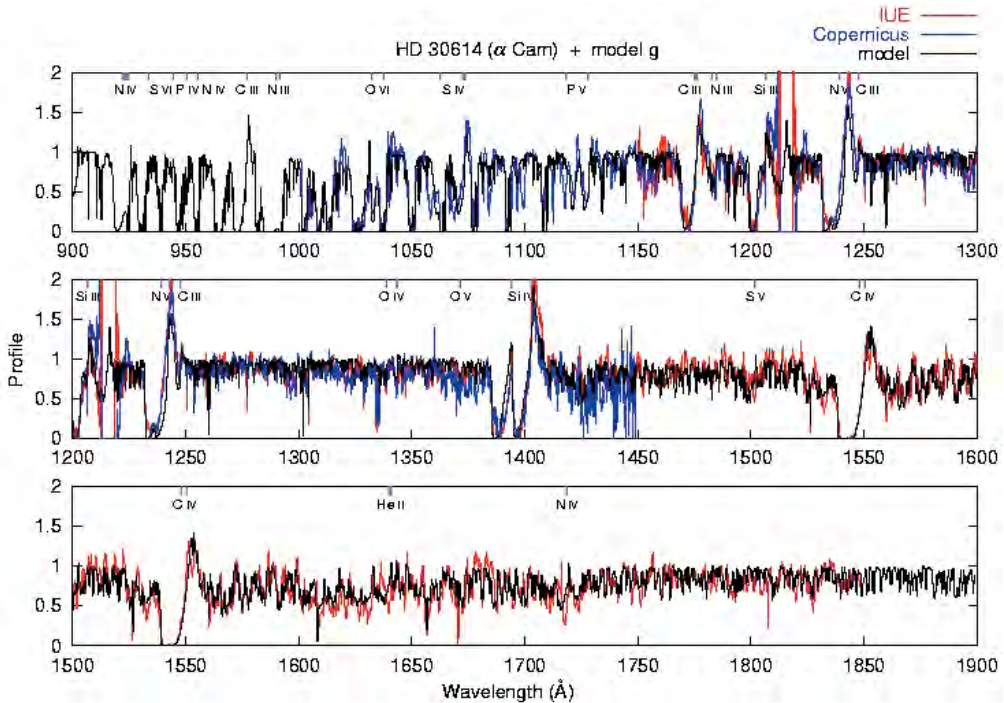


Abb. 2.44: Quantitative Stellarspektroskopie. Detaillierter Vergleich zwischen einem hochauflösten UV-Spektrum eines O-Sterns (α Cam, rot und blau) mit einem Nichtgleichgewichtsmodell der Sternatmosphäre. (Uni München)

Enge Doppelsternsysteme

Sehr interessante Objekte sind auch nahe Doppelsterne. Sie umkreisen einander in so geringem Abstand, dass Materie von einem Körper zum anderen hinüberströmt. Bei diesem Vorgang sammelt sich das Gas häufig zunächst in einer Scheibe an. Hierin verliert es Energie und stürzt schließlich auf den Stern hinunter. Dieser sammelt also Materie auf, weshalb man von Akkretionsscheiben spricht. In solchen Systemen kommt es häufig zu Instabilitäten im Gasstrom und damit verbunden zu Strahlungsausbrüchen. Das Studium dieser kataklysmischen Veränderlichen ermöglicht es, die Struktur von Akkretionsscheiben, die für direkte Beobachtungen zu klein sind, zu ermitteln. Die durch Beobachtung und Theorie erhaltenen Erkenntnisse lassen sich auf andere Objekte wie Röntgendoppelsterne oder auch Kerne aktiver Galaxien übertragen. Eine große Herausforderung ist die Untersuchung heißer Akkretionsplasmen mit den neuen Röntgensatelliten Chandra und XMM-Newton. Zukünftig könnte XEUS hier noch wesentlich mehr Informationen liefern.

Bei einigen Sternen hat sich durch den instrumentellen Fortschritt die Bedeutung magnetischer Eigenschaften eindrucksvoll gezeigt. So gelang in der letzten Dekade der Nachweis von zyklischen Variationen in der Emissionsstärke von Kalzium. Diese Emissionslinie ist ein Maß für die magnetische Aktivität eines Sterns, wie man von der Sonne her weiß. Bei Beobachtungen der Variation der Kalziumlinie bei anderen Sternen fand man Variationen, die dem 11-jährigen Sonnenzyklus ähneln. Mit einer raffinierten Untersuchungsmethode (Doppler-Tomographie) ist es auch gelungen, Magnetfeldstrukturen auf Sternoberflächen zu kartieren, obwohl diese nicht auflösbar waren (Abbildung 2.45). Beobachtungen im Röntgenlicht haben gezeigt, dass Koronen universell um sonnenähnliche Sterne auftreten. Magnetisch angetriebene Teilchenwinde und das Entstehen von Jets sowohl bei jungen Sternen als auch in aktiven Galaxien sind in engem Zusammenhang mit magnetischer Aktivität von Sternen zu sehen. Weiterführende Beobachtungen sind hier jedoch nötig, um diese Phänomene gänzlich zu verstehen.

*Magnetisch
aktive Sterne*

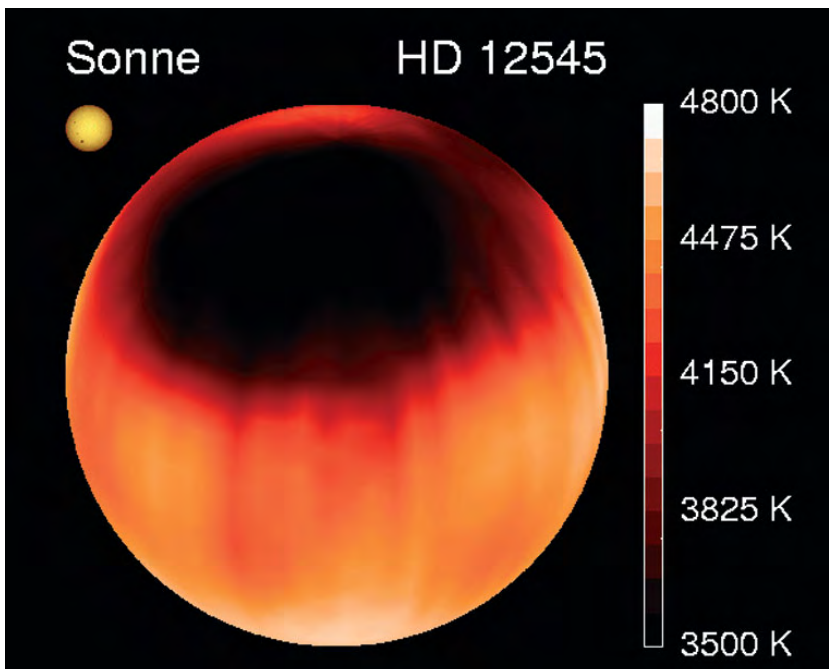


Abb. 2.45: Oberflächenkartierung des Sterns HD 12545 mit Hilfe der Doppler-Tomographie. (AIP)

2.3.5 Sterne als chemische Fabriken und Motoren des Materiekreislaufs

Sternentwicklung

Die Theorie der Sternentwicklung nimmt eine Schlüsselstellung ein, wenn wir die Anreicherung des interstellaren Mediums mit schweren Elementen verstehen wollen. Dazu gehört einerseits die physikalische Beschreibung der Elementanreicherung von Sternatmosphären und der stellaren Teilchenwinde und die Beschreibung des Massenverlustes in Abhängigkeit von den stellaren Parametern. Andererseits ist die Kenntnis aller möglichen nuklearen Fusionsprozesse und Reaktionsraten wichtig, sowohl für Bedingungen, die in normalen Sternen herrschen, als auch für außergewöhnliche Bedingungen, wie sie beispielsweise beim Aufprall von Gasströmen auf kompakte Sterne entstehen.

Teilchenwinde reichern das interstellare Medium mit Elementen an

Massearme Sterne wie die Sonne bleiben nach ihrer relativ kurzen, nur wenige Millionen Jahre dauernden Entstehungsphase über mehrere Milliarden Jahre hinweg in Größe, Temperatur und Leuchtkraft nahezu konstant. Wenn anschließend der Wasserstoffvorrat im Innern verbraucht ist, steigen Druck und Temperatur an, so dass auch Helium in Kohlenstoff und Sauerstoff umgewandelt wird. Als Folge dieser veränderten inneren Struktur dehnt sich der Stern zu einem Riesenstern aus. Besonders wichtig für den Materiekreislauf im Kosmos ist das zweite Riesenstadium, weil der Stern nun sehr viel Materie verliert. Durch diesen Prozess beeinflussen solche Sterne die chemische Entwicklung der Milchstraße.

Große Fortschritte konnten bei der konsistenten Berücksichtigung des Materieverlustes im Rahmen von Sternentwicklungsrechnungen erzielt werden. Sie können heute die „Superwind“-Charakteristik bei Planetarischen Nebeln (Abbildung 1.6) ebenso beschreiben wie die schalenförmigen Hüllen, die kohlenstoffreiche Sterne um sich herum erzeugen (Abbildung 2.46). Letztere werden durch sehr heftige, aber kurze Massenverlustschübe gebildet. Die Hüllenphysik, das heißt die Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik, Strahlungstransport und Chemie, spielt also für die späten Entwicklungsphasen des Sterns eine wichtige Rolle.

Dynamische Vorgänge im Sterninnern wie Konvektion oder thermische Pulse spielen eine entscheidende Rolle für den Entwicklungsweg der Sterne. Die vorhandene Standardtheorie der Sternentwicklung kann bislang viele Ergebnisse der Spektralanalysen nicht reproduzieren. Daher ist die Berücksichtigung der dynamischen Phänomene bei der Sternentwicklung in Zukunft dringend nötig.

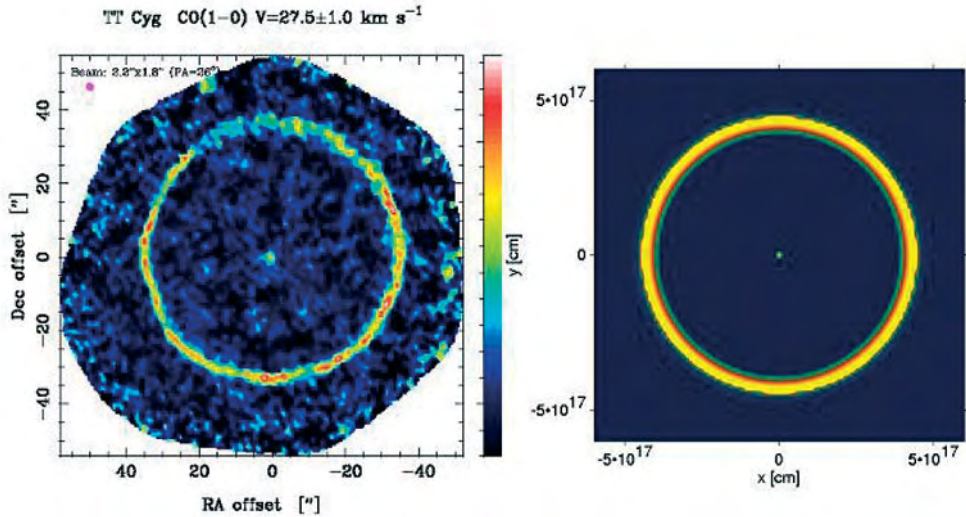


Abb. 2.46: Links: Interferometrisch gewonnene Aufnahme der Umgebung des Kohlenstoff-Sterns TT Cygni im Licht des CO-Moleküls. Rechts: Hydrodynamische Modellrechnung des Teilchenwindes. Ist eine kritische Massenverlustrate erreicht, springt die Windgeschwindigkeit abrupt auf einen höheren Wert. In der resultierenden Wechselwirkungszone wird Materie zu einer Schale aufgefügt und komprimiert. (AIP/TUB)

Bei engen Doppelsternen sind die Entwicklungswege beider Mitglieder miteinander verknüpft. Entwickelt sich eine Komponente zu einem Riesenstern, so strömt Materie auf den Begleiter über. Dabei kann es zur Ausbildung einer gemeinsamen Hülle um beide Sterne kommen. Diese Phase beeinflusst die weitere Entwicklung des Doppelsterns entscheidend, ist aber bisher nur sehr schlecht verstanden.

Hüllen aus Gas und Staub insbesondere um massearme Sterne sind ideale Objekte, um die darin ablaufenden chemischen Vorgänge zu studieren. Anhand von Infrarot- und Radiobeobachtungen von Molekülen lässt sich die chemische Struktur studieren. Es ist seit längerem bekannt, dass sich in den Hüllen auch Staub bildet. Bei diesem Prozess, der aus der Gasphase schrittweise über chemische Reaktionen erfolgt, durchläuft die Materie nacheinander Stufen wachsender Komplexität. Je nach Elementzusammensetzung entstehen chemisch grundlegend unterschiedliche Verhältnisse: In kohlenstoffreichen Elementmischungen liegt eine organische Chemie vor, und es tragen hauptsächlich Kohlenstoff und Wasserstoff zur Staubbildung bei. Im Gegensatz dazu bilden sich in sauerstoffreichen Bereichen anorganische Verbindungen, unter denen verschiedene Silikate vorherrschen.

*Staubbildung
in zirkumstellaren
Hüllen*

Das hervorragende Winkelauflösungsvermögen und die große Empfindlichkeit von ALMA werden es ermöglichen, die räumliche Verteilung diverser Moleküle auch innerhalb der Staubentstehungszone von Riesensternen abzubilden. Die direkte Messung der Häufigkeiten vieler Moleküle als Funktion des Abstandes vom zentralen Riesenstern wird Schlüsselinformationen zur Staubentstehung liefern.

Galaxien- entwicklung

Eines der zentralen Ziele der Astrophysik besteht nun darin, die Beiträge der verschiedenen Sterntypen zur Materieanreicherung der Milchstraße möglichst genau zu quantifizieren. Diese Angaben basieren sowohl auf Beobachtungsdaten als auch auf Modellrechnungen. Hieraus lässt sich dann die chemische Entwicklung der Galaxis ermitteln. Solche Galaxien-Entwicklungsmodelle können auf Eigenschaften der stellaren Komponente zurückgreifen, die unmittelbar aus detaillierten Sternwind- und Supernovamodellen abgeleitet wurden, statt sich approximativer Formeln oder Abschätzungen bedienen zu müssen. Damit wird ein Brückenschlag zwischen der stellaren und der galaktischen Astrophysik möglich.

In Zukunft wird auch bei massereichen Sternen in den relativ nahen Galaxien der Lokalen Gruppe die Bestimmung präziser physikalischer Eigenschaften inklusive ihrer Winde und genauer Elementhäufigkeiten möglich. Heiße, massearme Sternpopulationen, die das UV-Licht mancher Galaxien dominieren, können erstmals in den nächst gelegenen Galaxien studiert werden. Hieran kann die Sternentwicklung beispielsweise in Abhängigkeit vom Gehalt schwerer Elemente untersucht werden. Dies hat erhebliche Konsequenzen für das Verständnis der Spektren von weit entfernten Galaxien und damit auch der Entwicklung von Galaxien.

2.3.6 Endstadien der Sternentwicklung

Es gibt Endstadien der Sternentwicklung, in denen die Materie für alle Zeiten gewissermaßen „begraben“ wird. Dies sind Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher. Sie bilden somit Senken im Materiekreislauf. Zudem befindet sich die Materie im Innern dieser Körper in extremen physikalischen Zuständen, die sich in irdischen Labors nicht realisieren lassen. Besonders beeindruckend ist das Schauspiel, das uns die Sterne kurz vor ihrem letzten Lebensabschnitt darbieten.

Sterne mit einer Anfangsmasse von unter etwa acht Sonnenmassen – also auch unsere Sonne – werfen ihre Hülle als Planetarischer Nebel ab und enden als Weiße Zwerge. Sie sind anfänglich sehr heiß, kühlen dann aber langsam aus, da im Innern keine Kernfusion mehr stattfindet. Die Theorie der Entstehung und Abkühlung der Weißen Zwerge ist weit fortgeschritten. Dennoch ist eine schon klassische, von S. Chandrasekhar gefundene, Masse-Radius-Beziehung empirisch bisher kaum bestätigt. Mit dem künftigen Astrometrie-satelliten GAIA wird sich dies ändern, da wesentlich genauere Entfernungsangaben für eine Vielzahl Weißer Zwerge verfügbar sein werden.

Weiße Zwerge

In den letzten Jahren gelang es, die Methoden der Helioseismologie (siehe oben) auch auf pulsierende Sterne anzuwenden. Am eindruckvollsten hat sich diese Astero-seismologie bei heißen Weißen Zwergen bewährt, bei denen Sternmasse, chemische Schichtung und Rotationsgeschwindigkeit präzise abgeleitet werden. Heutige Abkühltheorien beziehen so exotische Vorgänge wie Kühlung durch Neutrinos oder Kristallisation der Materie mit ein. Sie werden sich künftig auch bei pulsierenden Weißen Zwergen testen lassen. Modellatmosphären für heiße Weiße Zwerge, die Nichtgleichgewichtsthermodynamik, Diffusion und Einfluss der schweren Elemente selbstkonsistent berücksichtigen, konnten erstmals bestimmte Beobachtungsmerkmale (beispielsweise eine starke Abschwächung des Flusses im Röntgen- und extremen UV-Bereich) quantitativ erklären. Verantwortlich hierfür ist das Absorptionsverhalten der schweren Elemente. Damit lässt sich die relativ geringe Zahl Weißer Zwerge in der ROSAT-Himmelsdurchmusterung verstehen. Für kühle Weiße Zwerge ergeben sich aufgrund des Einflusses von Molekülen blauere Farben als bisher angenommen. Dieser Befund ist wichtig für die künftige Suche nach solchen Objekten. In der jüngsten Vergangenheit wurden Weiße Zwerge einer Halopopulation entdeckt und es wurde darüber spekuliert, ob diese Weißen Zwerge als Erklärung für die beobachteten Mikrogravitationslinsenereignisse in Richtung der Magellanschen Wolken dienen können. Abkühltheorie und Atmosphärenmodelle sind überdies wesentliche Fundamente für die Leuchtkraftfunktion der Weißen Zwerge, aus der das Alter der Sternpopulation in der Sonnenumgebung bestimmt werden kann.

Wird durch Einströmen von Materie oder durch Verschmelzen mit einem engen Begleiter in einem Doppelsternsystem die Masse eines Weißen Zwerges auf einen kritischen Wert (bekannt als Chandrasekhar-Grenzmasse) erhöht, so erwar-

Supernovae vom Typ Ia

tet man, dass der Stern instabil wird und explodiert. Nach unserem heutigen Verständnis ist dies der Prozess, der als Supernova vom Typ Ia beobachtet wird. Mit der Entdeckung der „supersoft X-ray sources“ durch ROSAT sowie eines genügend massereichen, engen Doppelsterns sind jüngst erste Kandidaten für die Vorläufersysteme dieser Sternexplosionen gefunden worden.

Trotz dieser Fortschritte sind unsere Kenntnisse über die Vorläufersterne relativ gering. Dem steht die große Bedeutung der Supernovae Ia sowohl als Hauptproduzenten von Eisen als auch als kosmologische Standardkerzen zur Entfernungsbestimmung entgegen. Aufklärung kann durch zusätzliche Beobachtungen von Kandidatensystemen oder durch Identifikation von übrig gebliebenen Komponenten erfolgen. Die Theorie der Entwicklung enger Doppelsterne und die Modellierung des Explosionsprozesses müssen weiterentwickelt werden, um das Phänomen der Supernovae Ia zu verstehen.

Wichtig für ein Verständnis der Doppelsternentwicklung ist die Konstruktion genügend großer und damit aussagekräftiger Stichproben. Große Suchprogramme, bei denen mit Hilfe des VLT über 1000 Weiße Zwerge auf Radialgeschwindigkeitsvariationen hin untersucht werden, sind bereits angelaufen und haben auch schon einen weiteren interessanten Kandidaten gefunden. Nachfolgebeobachtungen aus dem Sloan Digital Sky Survey können hier auch von Bedeutung sein.

Supernovae vom Typ II

Sterne mit Anfangsmassen oberhalb von etwa acht Sonnenmassen sind massiv genug, um auch schwerere Elemente in ihrem Innern zu verbrennen. Der Stern entwickelt gegen Ende seines Lebens eine Zwiebelstruktur mit nach innen hin schwereren Elementen. Gelangt die Kette der Kernfusion zum Eisen, kann keine weitere Energie mehr erzeugt werden, der Eigengravitation kann nicht mehr durch den Druck im Innern entgegengewirkt werden, und der Stern kollabiert. Die Prozesse dieses Kernkollapses sind verbunden mit extremen Materiezuständen, ein instabiler Zwischenzustand entwickelt sich, aus dem heraus eine gewaltige Explosion den Stern zerreißt. Das Resultat ist einerseits eine Supernova vom Typ II, durch die der größte Teil der Sternmaterie herausgeschleudert und an das interstellare Medium abgegeben wird, und andererseits ein Neutronenstern oder, bei den massivsten Sternen, ein Schwarzes Loch.

Ende der achtziger Jahre erlebte die Untersuchung dieses Typs der Supernovae weltweit eine Intensivierung durch die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke

(Abbildung 2.47). Sie war so nahe, dass sie mit bloßem Auge erkennbar war. Auch für Supernovaexplosionen sind eine Verfeinerung der theoretischen Untersuchungen und ein genaueres Ausloten der schnellen und langsamen Kernreaktionen wichtig. Die Menge an schweren Elementen, die an das interstellare Medium abgegeben werden, hängt maßgeblich von den Details der Explosionsvorgänge ab. Diese Prozesse bedürfen einer präziseren Beschreibung. Die in Supernovae erzeugten schweren Elemente tragen erheblich zur Abkühlung des interstellaren Mediums bei. Erst dadurch wird das Wachstum von Staubteilchen möglich. Somit sind die Vorgänge während einer Supernovaexplosion von großer Bedeutung für die Wirkung des Materiekreislaufs des interstellaren Mediums.



Abb. 2.47: Die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke wurde wegen ihres verhältnismäßig geringen Abstandes zur Erde zum Paradeobjekt dieses Forschungsbereiches. (NASA/STScI/ESA)

Neutronensterne

Die Materie im Innern von Neutronensternen ist so dicht gepackt wie in einem Atomkern. Ein Kubikzentimeter Neutronensterne Materie würde auf der Erde etwa eine Milliarde Tonnen wiegen. Außerdem wird vermutet, dass sie sich zum Teil in einem Zustand der Suprafluidität befindet. Materie in diesem Zustand weist keinerlei Reibungswiderstand auf. Sie existiert auf der Erde nicht in natürlicher Form und lässt sich nur in Laborexperimenten realisieren. Aus dem Studium der Neutronensterne erwartet man sich daher auch mehr Informationen über diesen exotischen Materiezustand, repräsentiert durch die so genannte Zustandsgleichung.

Neutronensterne wurden vor mehr als dreißig Jahren in Form von Radiopulsaren entdeckt. Ihre pulsierende Strahlung mit Perioden von teilweise nur wenigen Millisekunden identifizierten sie als sehr kompakte Objekte mit schneller Rotation und Magnetfeldern, die bis zu einer Billion Mal stärker sein können als das Erdmagnetfeld. Ihre extrem regelmäßigen Rotationsperioden machen Pulsare zu äußerst nützlichen Leuchttürmen zum Studium des interstellaren Mediums in der Milchstraße. Der Strahlungsmechanismus im extremen Magnetfeld von Radiopulsaren ist auch nach über dreißig Jahren intensiver Forschung noch immer weitgehend unverstanden. Mit der hohen Empfindlichkeit von SKA und weiteren Beobachtungen mithilfe großer Einzelinstrumente, wie zum Beispiel Effelsberg, in Kombination mit detaillierten plasmaphysikalischen Untersuchungen sind hier in der Zukunft signifikante Fortschritte zu erwarten.

Erst mit ROSAT gelang es, die direkte thermische Strahlung von Neutronensternen zu entdecken. Diese stammt aus der Atmosphäre und erlaubt die Bestimmung der Temperatur. Die Abkühlung eines Neutronensterns wird hauptsächlich durch die wenig bekannten Eigenschaften der sehr dichten Materie im Inneren gesteuert. Von Temperaturmessungen werden deshalb wertvolle Hinweise auf den Zustand der Materie erhofft.

Neutronensterne, die vor mehr als einer Million Jahre gebildet wurden, wären nach den gängigen Modellen bereits auf unter 100 000 K abgekühlt und würden schließlich völlig unsichtbar werden, gäbe es nicht Mechanismen, welche die Abkühlung durch Wärmezeugung verzögern. Eine Möglichkeit wäre Energiedissipation durch Reibung eines schneller rotierenden supraflüssigen Sterninneren mit der äußeren festen Kruste des Neutronensterns. Die Temperaturbestimmung von Neutronensternen ließe Rückschlüsse auf die Wechselwirkung zwischen dem Kern und der Kruste sowie auf deren magnetische Eigenschaften zu.

Von großer Bedeutung ist daher die Modellierung von Neutronensternatmosphären. Neuartige Verfahren müssen auf sehr heiße und dichte Plasmen in sehr starken Magnetfeldern angewandt werden. Die Schwierigkeiten sind hierbei vielfältig. Andererseits stellen diese Objekte einzigartige Labors zum Studium von Plasmen mit extremen Magnetfeldern dar (Abbildung 1.7). Anhand hochauflösender Röntgenspektren können diese Modelle in naher Zukunft getestet werden.

Ist der bei einer Supernova zusammenbrechende Reststern massereicher als etwa drei Sonnenmassen, so kollabiert er zu einem (stellaren) Schwarzen Loch. Da von diesen Objekten keinerlei elektromagnetische Strahlung entweichen kann, kommen alle Informationen über sie aus der Umgebung. Die beobachtete Röntgenstrahlung stammt beispielsweise aus der Akkretionsscheibe, die das Schwarze Loch umgibt und aus der es Materie aufsaugt. Die hierbei auftretenden physikalischen Prozesse sind denen in aktiven Galaxien sehr ähnlich. Da die relevanten Zeitskalen grob mit der Masse des Schwarzen Loches skalieren, ermöglichen Schwarze Löcher in unserer Galaxis die Untersuchung dieser Prozesse über viele charakteristische Zeitskalen hinweg, was bei massereichen Schwarzen Löchern in Galaxienzentren sehr schwierig ist.

*Stellare Schwarze
Löcher*

Die Entdeckung so genannter Mikroquasare zu Beginn der neunziger Jahre war sehr bedeutend. Hierbei handelt es sich um Schwarze Löcher, von denen zwei eng gebündelte Gasstrahlen (Jets) ausgehen. Mit Radiointerferometern wurde gezeigt, dass diese Jets sich, wie bei den viel helleren Quasaren, mit fast Lichtgeschwindigkeit bewegen. Bei diesen Himmelskörpern ist es daher möglich, die Entstehung solcher Jets und die Wechselwirkung zwischen Jet und Akkretionsscheibe auf kleinsten Längenskalen zu studieren.

Trotz dieser Fortschritte sind mehr als 30 Jahre nach ihrer Entdeckung viele grundlegende Eigenschaften galaktischer Schwarzer Löcher immer noch unverstanden. So gibt es bis heute keine Beobachtungsmethode, mit der allein aus dem Spektrum abgeleitet werden kann, ob ein Materie aufsammlendes kompaktes Objekt ein Schwarzes Loch ist oder ein Neutronenstern. Auch die Physik der Strahlungserzeugung und die Prozesse, mit denen das heiße Elektronenplasma und der Jet entstehen, sind noch weitgehend ungeklärt. Die Messung hochaufgelöster Röntgenspektren ist unbedingt nötig, um diese physikalischen Prozesse zu verstehen. Empfindliche Radiobeobachtungen werden zeigen, in welchem physikalischen Zusammenhang Akkretionsscheibe und Plasmajet stehen.

Ferner können mit diesen Instrumenten auch kompakte Objekte in anderen Galaxien beobachtet und studiert werden. Damit wird erstmals ein Vergleich dieser Population mit derjenigen der Milchstraße möglich.

*Gammastrahlen-
ausbrüche (Gamma
Ray Bursts)*

Zu den rätselhaftesten Erscheinungen der modernen Astrophysik zählen die so genannten Gamma Ray Bursts. Dies sind kurze Ausbrüche, die durchschnittlich einmal pro Tag unvermittelt irgendwo am Himmel auftauchen und meist nur wenige Sekunden dauern. Diese „Blitze“ intensiver Gammastrahlung wurden erstmals in den sechziger Jahren mit einem militärischen Satelliten gefunden, der Atomwaffentests überwachen sollte. Die Natur dieser Quellen war lange Zeit völlig unbekannt, die Spekulationen reichten von Objekten am Rande unseres Sonnensystems bis zu fernsten Galaxien.

*Entscheidender
Durchbruch*

Es zählt zu den größten Erfolgen der Astrophysik in den neunziger Jahren, dass eine Reihe dieser Himmelskörper identifiziert werden konnte. Mit Hilfe einer Weitwinkelröntgenkamera auf dem italienisch-niederländischen Satelliten BeppoSAX konnte in einigen Fällen die mit Gamma Ray Bursts assoziierte Röntgenemission lokalisiert werden. Jeweils kurze Zeit später wurden die abbildenden Röntgenteleskope von BeppoSAX auf die Richtung des Bursts ausgerichtet und ein zeitlich schnell abklingendes Nachleuchten entdeckt, das genau genug lokalisiert wurde, um ein optisches Gegenstück zu identifizieren. Durch reaktionsschnelle Nachbeobachtungen in allen Wellenlängenbereichen vom Röntgen- bis zum Radiobereich ist es in den letzten Jahren gelungen, mehrere Gamma Ray Bursts zu lokalisieren. Sie befinden sich in weit entfernten Galaxien. Während ihres Aufblitzens erscheinen sie als die leuchtkräftigsten Objekte im Universum.

*Hypernova oder
verschmelzende
Neutronensterne*

Unklar ist bis heute, ob diese Objekte die beobachtete Strahlung gleichmäßig in alle Richtungen abgeben oder nur gerichtet in ein oder zwei einander entgegengesetzte enge Raumbereiche. Dies zu entscheiden ist von großer Bedeutung, wenn man die abgestrahlte Energie berechnen will. In jedem Fall aber übertreffen Gamma Ray Bursts die Supernovae in ihrer Leuchtkraft. Die Ursache für dieses Phänomen ist noch unklar. Es werden Szenarien favorisiert, in denen ein extrem massereicher Stern als so genannte Hypernova explodiert und der Rest zu einem Schwarzen Loch zusammenbricht. Möglich erscheint es aber auch, dass zwei miteinander kollidierende und verschmelzende Neutronensterne diese enormen Energiemengen aussenden (Abbildung 2.48). Um diese Frage

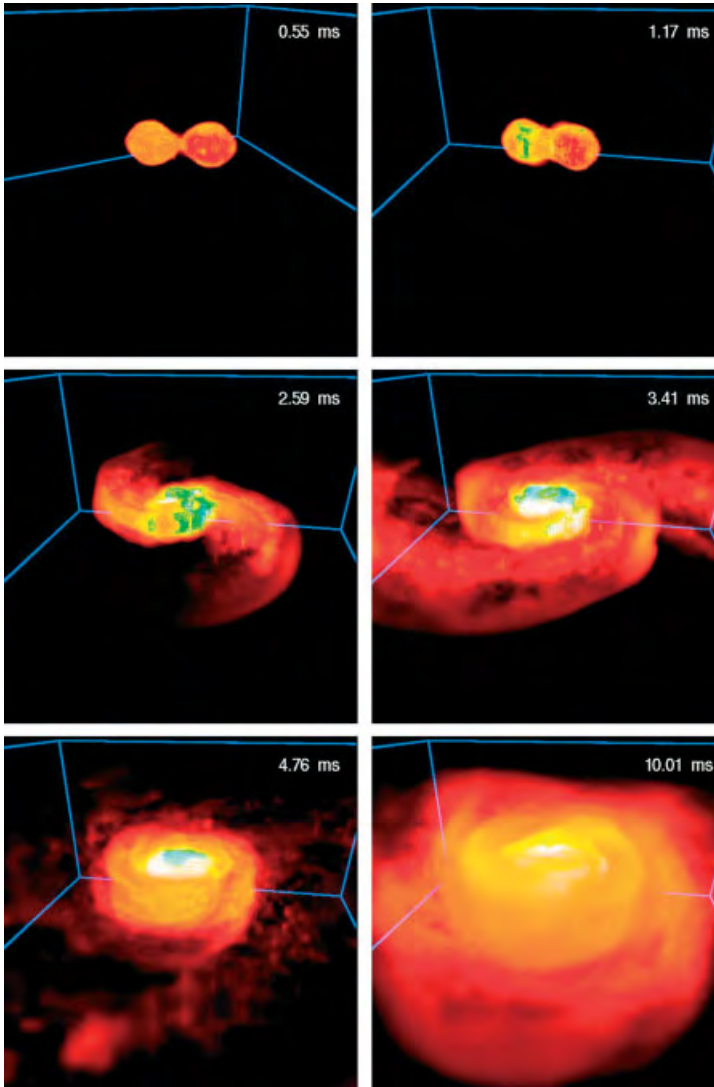


Abb. 2.48: Numerische Simulation des Verhaltens von zwei miteinander verschmelzenden Neutronensternen. (MPA)

zu klären, werden neben weiteren Beobachtungsdaten auch weitere numerische Simulationen nötig sein.

Die Zahl der identifizierten Gamma Ray Bursts wird sich im nächsten Jahrzehnt deutlich erhöhen. Wenn sie in der Tat in der Endphase des Lebens massereicher Sterne erfolgen, könnten sie ein weiterer Indikator für die Sternentstehung im frühen Universum und für die Galaxienentwicklung sein. Für diesen Zweck wichtig ist, dass ihre Gammaemission bis zu den

größten Entfernungen nachweisbar ist und Gas und Staub im Vordergrund kaum abschwächend wirken. Eventuell könnten auch kosmologische Parameter durch eine große Stichprobe identifizierter Gamma Ray Bursts mit Rotverschiebungen besser gemessen werden als mit bisherigen Indikatoren. Für solche Untersuchungen werden robotische Teleskope, die durch Gammastrahlenteleskope im Weltall alarmiert werden, eine wesentliche Rolle spielen.

2.4 Stern- und Planetenentstehung: Protosterne, zirkumstellare Scheiben und extrasolare Planetensysteme

Wissenschaftlicher Fortschritt

- Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Sternentstehungsrate im Universum.
- Bestimmung der Struktur von Sternentstehungsgebieten.
- Entdeckung von Protosternen und prästellaren Wolkenkernen.
- Entdeckung von zirkumstellaren Gas-Staub-Scheiben und protostellaren Jets, numerische Modellierung der Jetdynamik.
- Aufklärung der Doppelsternstatistik in verschiedenen Sternentstehungsregionen.
- Entdeckung sehr junger Sternhaufen und Studium ihrer Sternmassenverteilung.
- Entdeckung extrasolarer Gasplaneten und erster extrasolarer Planetensysteme.

Aufgaben und Ziele

- Aufklärung der Entstehung massereicher Sterne und der Ursache für Sternentstehungsausbrüche.
- Entschlüsselung der Rolle von Magnetfeldern bei der Bildung von Sternen.
- Nachweis von Rückwirkungsprozessen bei der Sternentstehung.
- Verständnis der Sternentstehung im frühen Universum und der Entstehung von Kugelsternhaufen.
- Masse- und Alterskalibration für extrem junge Sterne.

- Verständnis der Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen.
- Direkte Beobachtung und Spektroskopie extrasolarer Planeten und Suche nach Signaturen biologischer Aktivität.

2.4.1 Sternentstehung als fundamentaler Prozess im Kosmos

Die Entstehung von Sternen stellt einen Schlüsselprozess zum Verständnis der Struktur und Evolution von Galaxien und Planetensystemen dar. Wegen ihrer kosmologischen und kosmogonischen Bedeutung steht ihre Untersuchung deshalb weltweit im besonderen Blickpunkt des Interesses astronomischer Forschung.

Fortschritte beim Verständnis der Sternentstehung waren in der Vergangenheit in besonderem Maße mit Durchbrüchen bei der Entwicklung astronomischer Beobachtungstechniken der Infrarot-, Submillimeter- und Radioastronomie verknüpft. Dies betrifft insbesondere die Entwicklung empfindlicher Arrayempfänger für das nahe und thermische Infrarot, von Bolometersystemen und Linienempfängern für Wellenlängen im Submillimetergebiet sowie den sehr erfolgreichen Einsatz des Infrarotobservatoriums ISO. Seit kurzem lassen sich mit diesen Beobachtungsmöglichkeiten die ganz frühen Phasen der Sternentstehung, die sich im Innern sehr kalter Staubwolken abspielen, direkt beobachten. Deutsche Wissenschaftler nehmen auf verschiedenen Gebieten der Sternentstehung eine internationale Spitzenposition ein. Die Vergangenheit hat dabei deutlich gezeigt, dass Fortschritte bei der Aufklärung der Physik der Sternentstehung nur durch die enge und in Deutschland sehr gut ausgeprägte Zusammenarbeit zwischen Theoretikern und Beobachtern zu erreichen sind. Mit neuen numerischen Methoden und leistungsfähigen Rechnersystemen ist man heute erstmals in der Lage, den Kollaps- und Fragmentationsprozess kalter Molekülwolkenkerne, die physikalische und chemische Entwicklung von Akkretionsscheiben sowie die dynamische Entwicklung sehr junger Sternhaufen zu simulieren.

Unser Verständnis des fundamentalen Prozesses der Bildung von Sternen weist jedoch wesentliche Lücken auf. So wissen wir nicht, wie massereiche Sterne entstehen – die einzigen stellaren Objekte, deren Wirkung wir in anderen Galaxien beobachten können und die sowohl die thermodynamischen als auch die chemischen Eigenschaften der Galaxien wesentlich beeinflussen. Bedeutende physikalische Prozesse

– zum Beispiel bei der Entstehung von Protosternen und der Entwicklung von zirkumstellaren Scheiben hin zu Planetensystemen – sind nicht verstanden. Empirische Regeln für die Sternentstehung fehlen in vielen Fällen.

Erst ein tieferes Verständnis der physikalischen Vorgänge bei der Entstehung von Sternen wird es erlauben, von der lokal beobachteten Sternentstehung in Gebieten wie der Orion-Molekülwolke auf die Gesamtvorgänge in anderen galaktischen Umgebungen, wie zum Beispiel in Starburstgalaxien und in wechselwirkenden Galaxien oder bei der Galaxienentstehung im frühen Universum zu schließen. Für viele der dabei wichtigen Prozesse – Molekülwolkenentstehung, Fragmentation der Molekülwolken, Sternentstehungseffektivität, Anfangsmassenverteilung der Sterne – fehlt sowohl eine fundamentale Theorie als auch ein phänomenologisches Verständnis. Allerdings gibt es vielversprechende Ansätze für physikalische Modelle.

Zukünftige Entwicklung des Gebiets

In der Zukunft wird eine hohe räumliche Auflösung im Infraroten und bei Submillimeterwellenlängen entscheidend sein, wobei die deutsche Astronomie in diesem Bereich gut positioniert sein wird. Im nahen und thermischen Infrarot bedeutet hohe Auflösung den Einsatz adaptiver Optik und die Entwicklung von Interferometern, wofür das VLTI und das LBT zur Verfügung stehen werden. Dem nationalen Interferometriezentrum FrInGe wird hierbei eine wichtige Koordinierungsfunktion zukommen. Im fernen Infrarot werden es SOFIA und Herschel sein, die den ersten Schritt in Richtung höherer Auflösung in diesem Wellenlängenbereich erlauben, wobei SOFIA als langfristige Beobachtungsplattform in diesem Spektralbereich zur Verfügung stehen wird. Das *Atacama Large Millimetre Array* (ALMA) wird im Submillimeterbereich ein Auflösungsvermögen besitzen, das vergleichbar ist mit dem optischer Teleskope im Infrarotbereich unter Einsatz adaptiver Optik. Das JWST wird insbesondere auch bei der Erschließung des für die Sternentstehung extrem wichtigen thermischen Infrarotgebiets eine entscheidende Rolle spielen, da es dort um Größenordnungen empfindlicher sein wird als alle bodengebundenen Instrumente.

Deutsche Gruppen waren in den letzten Jahren wiederholt federführend beim Bau von Kameras für das thermische Infrarot; als Beispiel sei das Instrument TIMMI II genannt, das für die ESO gebaut wurde. Hinzu kommt die Astrometriemission GAIA im Weltraum, die bei der Kalibration der Entwicklungswege junger Sterne eine wichtige Funktion haben wird (Abbildung 2.49).



Abb. 2.49: Die Messungen der ESA Cornerstone-Mission GAIA werden Auswirkungen auf viele Bereiche der Astrophysik haben: Die Sternentstehungsgeschichte unserer Milchstraße, Stellare Astrophysik, die Struktur unserer Galaxie, Doppelsternsysteme und Braune Zwerge, Extrasolare Planeten, kleine Körper im Sonnensystem, Relativitätstheorie und das optische Referenzsystem. (Quelle ESA).

Aufgrund der schnellen Entwicklung im Computerbereich wird es in den nächsten Jahren möglich werden, die gesamte Sternentstehung vom Beginn der Molekülwolkenentstehung bis hin zur Ausbildung des fertigen Sterns und Sternhaufens sowie die Entwicklung protoplanetarer Scheiben von ihrer Bildung bis zur Entstehung von Planetensystemen zu beschreiben. Besondere Anstrengungen sind auf dem Gebiet des sehr komplizierten mehrdimensionalen Linien- und Kontinuumsstrahlungstransports zu unternehmen, da nur so eine adäquate Interpretation der Beobachtungsdaten und ein Vergleich der Resultate von Simulationsrechnungen mit der Beobachtung möglich sein wird. Ebenfalls von großer Bedeutung werden Fortschritte in der Entwicklung schnellerer numerischer Verfahren zur Lösung der dreidimensionalen, nichtidealen magnetohydrodynamischen Gleichun-

gen werden, um die Dynamik des magnetisierten Wolken-gases genauer zu verstehen.

Um Aussagen über die primordiale Sternentstehung treffen zu können, muss der Sternentstehungsprozess in protogalaktischen Umgebungen mit geringen Metallhäufigkeiten sowohl durch Beobachtungen als auch theoretisch untersucht werden.

2.4.2 Bildung massearmer Sterne: vom prästellaren Kern zur Staubscheibe

Komplexität der Sternentstehung

Sternentstehung in einer Molekülwolke ist ein komplexer Vorgang, zu dessen Beschreibung neben der Eigengravitation die Untersuchung von Turbulenz, Magnetfeldern, Heiz- und Kühlprozessen und Gas-Staub-Wechselwirkungen gehört. Hinzu kommen externe Faktoren: Hierzu zählen die Entstehung früherer Generationen von Sternen in der Umgebung und ihr Einfluss auf die gegenwärtige Sternentstehung, die differenzielle Rotation galaktischer Scheiben, der Einfluss von Spiraldichtewellen sowie die Wechselwirkung mit anderen Galaxien.

Entstehung massearmer Sterne

Trotz dieser Komplexität wurden beim Verständnis der Entstehung massearmer Sterne mit Massen von ungefähr einer Sonnenmasse in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte erzielt. Durch Beobachtungen mit Radio- und Millimeterinterferometern (zum Beispiel dem IRAM-Interferometer auf dem Plateau de Bure) und dem europäischen *Infrared Space Observatory* (ISO) sowie durch den Einsatz von empfindlichen Empfängern im Submillimeter- und Infrarotbereich, so beispielsweise am VLT der ESO, ist es gelungen, die verschiedenen Phasen der Entstehung massearmer Sterne zu beobachten (Abbildung 2.50). Die heutige Charakterisierung dieser Phasen vom prästellaren Kern über Protosterne bis zum jungen T Tauri-Stern mit zirkumstellarer Scheibe beruht hauptsächlich auf der Analyse von spektralen Energieverteilungen. Diese erlauben jedoch keine Aussagen über die jeweilige Dynamik der Wolkenkerne und Protosterne. Solche kinematischen Untersuchungen stehen erst ganz am Anfang. HST- und bodengebundene Beobachtungen – neuerdings erstmals mit adaptiver Optik, so mit dem ALFA-System auf dem Calar Alto – gaben Einblicke in die verschiedenen Entwicklungsstadien junger Sternhaufen.

Die Untersuchung junger massearmer Sterne ist auch deshalb von großer Bedeutung, weil sie uns Aufschluss über

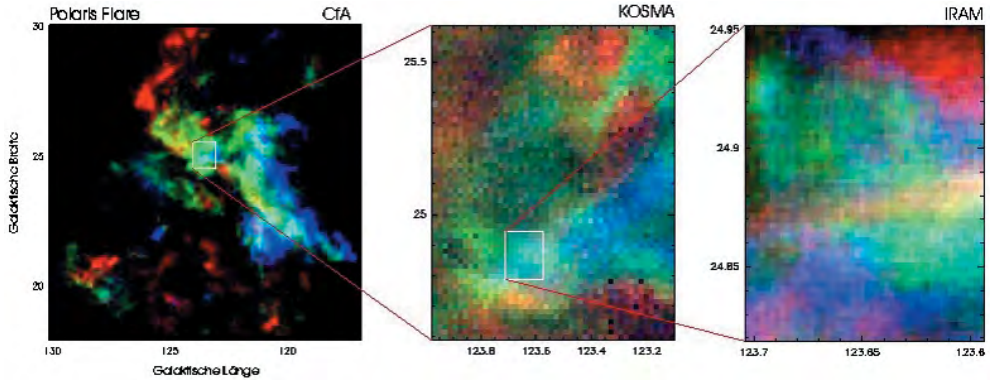


Abb. 2.50: Physik und Chemie interstellarer Molekülwolken. Die drei Bilder zeigen die räumliche Struktur des molekularen Gases in einer Molekülwolke in unserer Milchstraße (dem „Polaris Flare“), wobei die verschiedenen Farben die Dopplergeschwindigkeit des Gases anzeigen. Gas, das sich auf uns zubewegt, ist blau dargestellt, während Gas, das sich von uns wegbewegt, rot dargestellt ist. Das linke, mit dem CfA-Teleskop aufgenommene Bild, zeigt die globale Wolkenstruktur, während das mittlere (aufgenommen mit dem KOSMA-Teleskop auf dem Gornergrat) und das rechte Bild (aufgenommen mit dem IRAM-30-m-Teleskop) immer kleinere Teile der Wolkenstruktur auflösen. Diese Messungen verdeutlichen die klumpige und turbulente Raum- und Geschwindigkeitsstruktur von Molekülwolken, welche die Orte der Sternentstehung in unserer Milchstraße sind. (Uni Köln/Uni Bonn)

die Entstehung der Sonne und unseres eigenen Planetensystems gibt, das sich gemeinsam mit dem Zentralstern gebildet hat, so wie dies wohl auch für extrasolare Planetensysteme der Fall ist.

Numerische Simulationen können heute den Kollaps eines Gasklumpens und die Entstehung eines Protosterns mit umgebender protoplanetarer Scheibe bei Dichtekontrasten von mehr als 10 Größenordnungen auflösen. Einzelne Phasen lassen sich bereits unter Berücksichtigung unterschiedlicher physikalischer Prozesse wie der turbulenten Fragmentation großer Wolken oder der phasenweise agierenden Heiz- und Kühlprozesse simulieren (Abbildung 2.51).

Zusätzlich zu astronomischen Beobachtungen und numerischen Simulationen sind dedizierte Laborexperimente notwendig, wie die zur spektroskopischen Charakterisierung relevanter Staubteilchen und Moleküle und zur Staubkoagulation; solche Experimente werden in Deutschland auf internationalem Niveau durchgeführt und sollten weiterhin ausreichende Unterstützung erhalten.

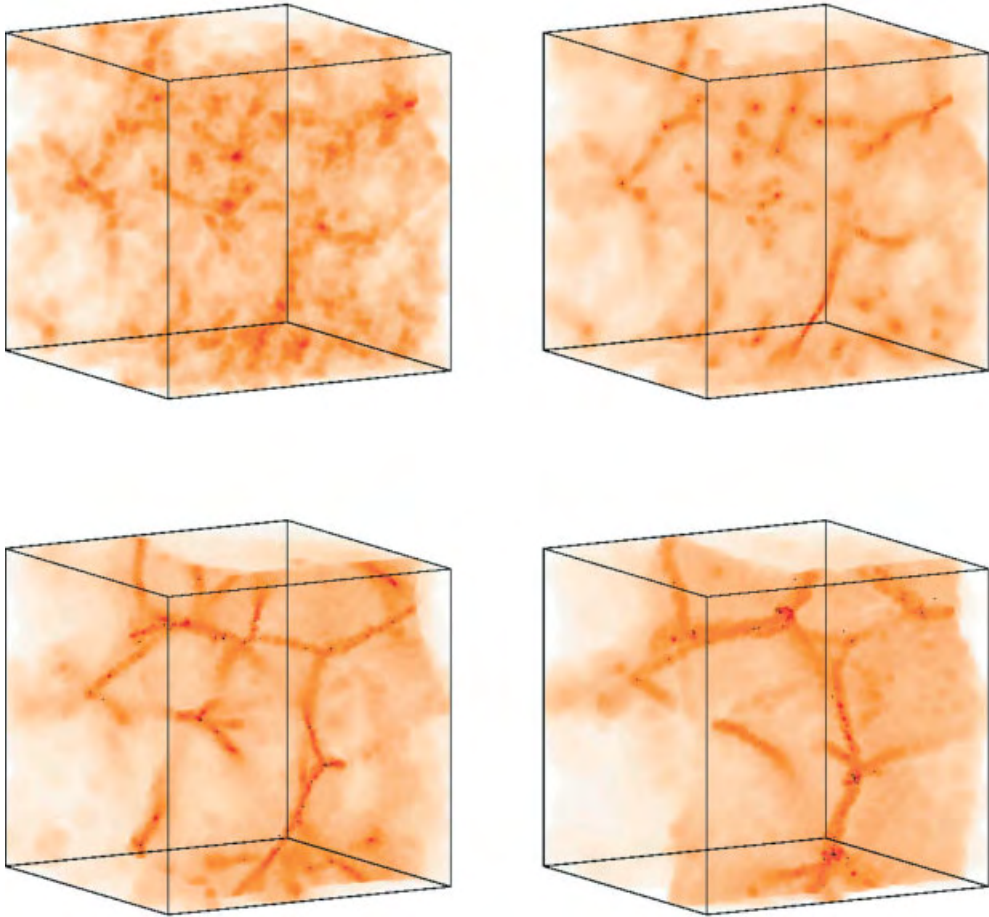


Abb. 2.51: Zeitliche Entwicklung der Fragmentation einer interstellaren Wolke. Man erkennt, wie sich Gas und Staub verdichten und zum Teil in länglichen Filamenten anordnen, in denen die Sterne entstehen. Die Prozentzahlen geben an, wie viel der gesamten Materie jeweils bereits in Sterne umgesetzt wurde. (MPIA)

Prästellare Kerne und Protosterne

Das größte Problem bei der Beobachtung der ersten Phasen der Sternentstehung besteht darin, dass sich diese Phasen in optisch undurchsichtigen Staubwolken abspielen. In vielen Molekülwolken findet man dichte, gravitativ gebundene Objekte, die aus der turbulenten Mutterwolke entstanden sein müssen. Überschreitet die Masse eines solchen Kerns einen kritischen Wert, so kollabiert er unter der Wirkung der Eigengravitation. In den ersten Stadien dieser Kontraktion sind Gas und Staub noch sehr kalt. Beobachten lassen sich diese Objekte erst seit kurzem im Infrarot- bis Radiobereich. Nur für die längerwellige Strahlung sind die Objekte durchlässig (Abbildung 2.52), bzw. die Staubteilchen emittieren

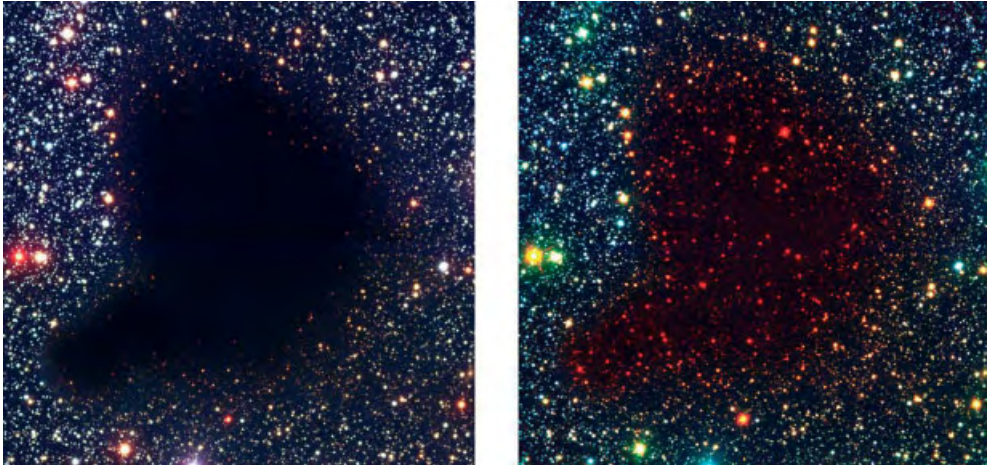


Abb. 2.52: Die beiden Abbildungen demonstrieren, dass Staubwolken mit zunehmender Wellenlänge durchlässiger werden: die Wolke Barnard 68, links im sichtbaren und rechts im Infrarotbereich, aufgenommen mit dem VLT. (ESO)

dort selbst thermische Strahlung. Einige der detailliertesten Beobachtungen wurden mit den Bolometerarrays des IRAM 30-m-Teleskops sowie des JCMT durchgeführt. Die Charakterisierung der frühen Phasen der Sternentstehung hat in den neunziger Jahren mit der Entwicklung empfindlicher Detektoren für den Submillimeter- und Millimeterbereich sowie mit ISO einen starken Aufschwung genommen. ISO war im fernen Infrarot bis zu einer Wellenlänge von 240 Mikrometern empfindlich und konnte dadurch „Wärmestrahlung“ von sehr kaltem Staub mit Temperaturen bis hinunter zu etwa 10 Kelvin nachweisen. Hiermit ließ sich eine ganze Reihe prästellarer Staubverdichtungen entdecken. Mit den Submillimeterbeobachtungen konnte gezeigt werden, dass die Massenverteilung der prästellaren Kerne gut mit der Anfangsmassenverteilung der Sterne niedriger Masse übereinstimmt.

Eine größere Zahl von Protosternen niedriger Masse konnte nachgewiesen werden; erste Beispiele für Protodoppelpsterne sind bekannt. Außerdem gelang die Erstellung räumlich aufgelöster Polarisationskarten mit dem SCUBA-Bolometersystem des JCMT. Die Polarisation der thermischen Strahlung geschieht durch ausgerichtete Staubteilchen aufgrund von Magnetfeldern und liefert damit direkte Informationen über die Magnetfeldtopologie (Abbildung 2.53). Die Suche nach kinematischen Anzeichen für den Kollaps sowie den Fragmentierungsprozess steht jedoch erst am Anfang. Gleiches gilt für die Charakterisierung der Anfangsbedingungen für den Wolkenkollaps: Wie entstehen Wolkenkerne und

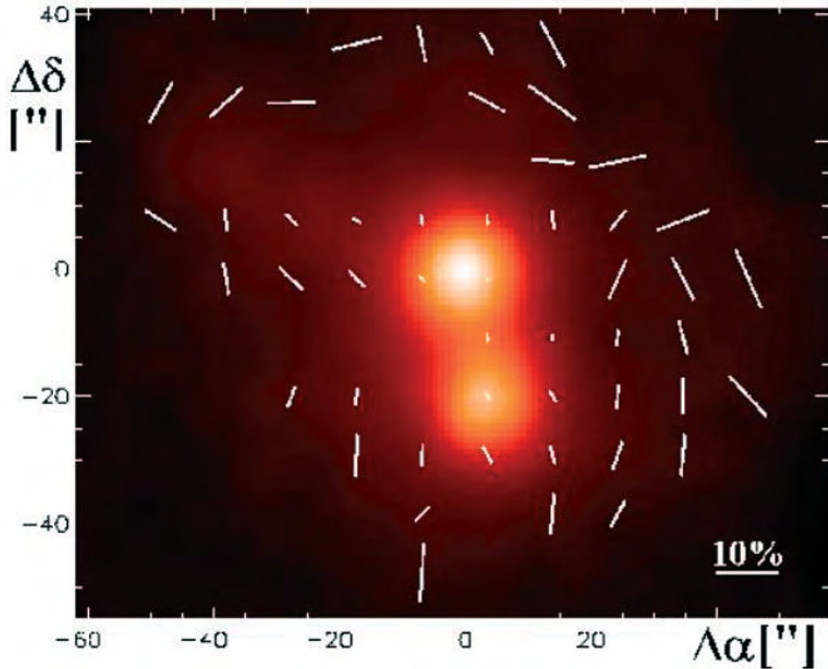


Abb. 2.53: Polarisationsmessungen mit SC BA: Intensitätskarte mit überlagertem Polarisationsmuster der Bok-Globule DC 253-1.6 bei einer Wellenlänge von 850 μm . (Uni Jena/TLS)

wie sind sie in den Molekülwolken verteilt? Wie sehen ihre Dichte- und Geschwindigkeitsprofile auf kleinen Skalen aus? Wie wichtig sind Magnetfelder wirklich? Welche Prozesse führen zum gleichzeitigen Kollaps vieler Wolkenkerne und damit zur Entstehung eines Sternhaufens?

Von Bedeutung ist auch die Frage, welche physikalischen Größen darüber entscheiden, wann Sterne einzeln oder in Doppel- und Mehrfachsystemen entstehen. Etwa die Hälfte aller Sterne befindet sich in Doppelsystemen. Numerische Simulationen belegen, dass der anfängliche Drehimpuls der Wolke, ihre interne turbulente Geschwindigkeitsverteilung und die Dichteverteilung hierbei eine Rolle spielen (Abbildung 2.54). Wenn Doppel- und Mehrfachsysteme die Regel sind bei der Sternentstehung, so schließt sich sofort die Frage an, welchen Einfluss die Multiplizität der Sterne auf die Planetenbildung hat. Welche Planeten bilden sich in engen und welche in weiten Doppelsternsystemen? Wie ist ihr Schicksal? Werden sie durch Gravitationswechselwirkung aus dem Sys-

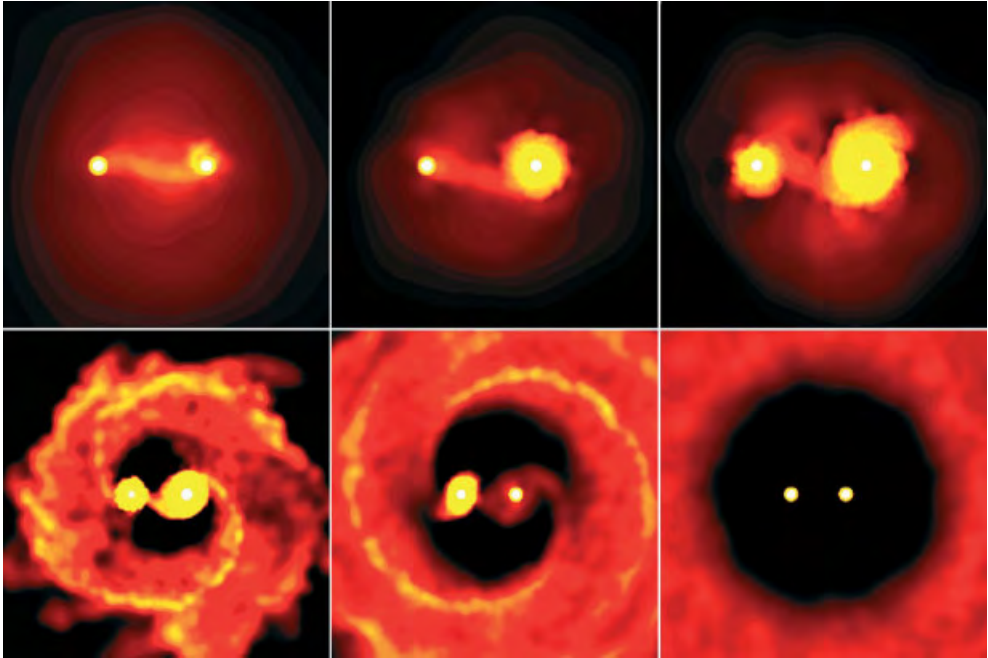


Abb. 2.54: Numerische Simulationen zeigen, wie aus einer rotierenden Wolke ein Mehrfachsternsystem entsteht. Zunächst bildet sich eine schnell rotierende Scheibe, die später in mehrere Protosterne fragmentiert. Diese Konfiguration ist instabil und zerfällt in Einzel- und Doppelsterne. (MPIA)

tem geschleudert? Gibt es demzufolge eine Population frei fliegender Planeten?

Es wird vermutet, dass in der Milchstraße tausende von prästellaren Kernen und Protosternen zu finden sind. Sie bilden die Basis für zukünftige Beobachtungen mit viel höherer räumlicher und spektraler Auflösung im Submillimeter- und Millimeterbereich mit ALMA und im Ferninfraroten mit Herschel. Dank der Beteiligung an diesen Projekten werden deutsche Forscher einen bedeutenden Anteil an diesen Untersuchungen mitbestimmen und Antworten auf die oben diskutierten Fragen geben können.

Prästellare Kerne rotieren von Anfang an. Je weiter sie sich verdichten, desto schneller wird die Rotation. Numerische Simulationen zeigen, dass der Kollaps schließlich zur Bildung einer Gasscheibe führt, in der sich die Zentrifugalkraft und die Gravitationskraft die Waage halten. In diesen Kepler-Scheiben wird Materie nach innen und Drehimpuls

*Zirkumstellare
Scheiben*

nach außen transportiert. Aus den zunächst nur mikrometergroßen Staubteilchen der Scheibe bilden sich Planeten. So lautet das moderne Paradigma, fast wie Kant und Laplace es vor 200 Jahren geahnt hatten. Dieses theoretische Szenario wurde in den neunziger Jahren zunächst durch Messungen der Energieverteilung junger Sterne vom Infrarot- bis in den Millimeterbereich und dann auch erstmals durch direkte Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Hubble bestätigt. Die direkte Abbildung von „Silhouetten“-Scheiben im Orion-Nebel (Abbildung 2.55) und die Identifikation von Scheiben durch ihr Streulicht im nahen Infraroten und im Optischen

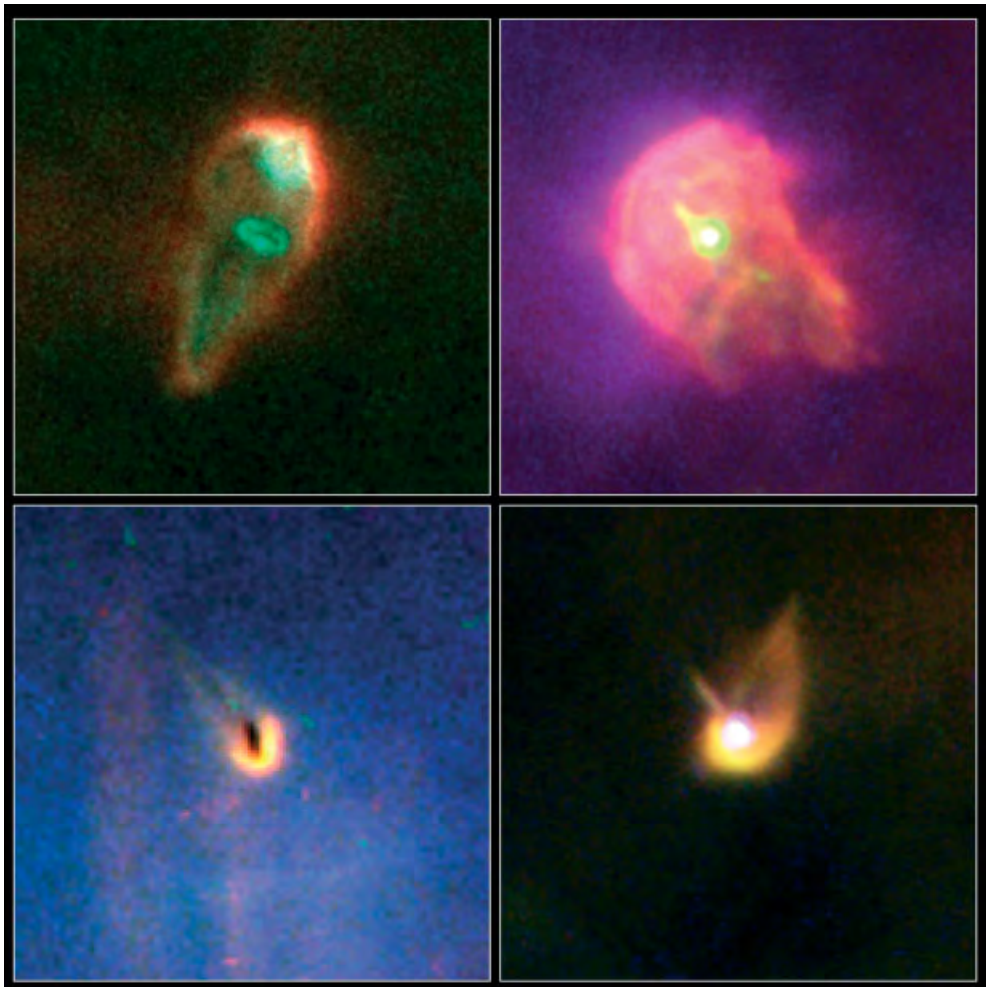


Abb. 2.55: Hubble-Aufnahmen von Staubscheiben um junge Sterne im Orion-Nebel, eines der bestuntersuchten Sternentstehungsgebiete. (NASA/STScI/ESA/AIP)

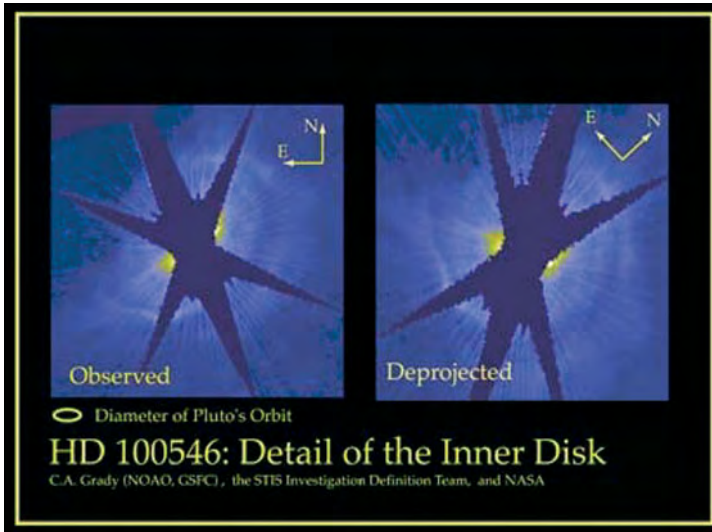


Abb. 2.56: Staubscheibe um den Stern HD 100546, gemessen mit dem STIS-Instrument am Hubble-Weltraumteleskop. (NASA/STScI/Uni Jena)

(Abbildung 2.56) waren besondere Höhepunkte bei der Suche nach protoplanetaren Scheiben. Unterdessen ist es auch gelungen, zirkumstellare Scheiben im thermischen Infraroten und im Millimeter/Submillimeterbereich abzubilden sowie durch Beobachtungen in Moleküllinien Geschwindigkeitsprofile aufzunehmen. Die kinematischen und auch chemischen Untersuchungen von zirkumstellaren Scheiben stehen jedoch erst am Anfang, da hierfür empfindliche Submillimeterinterferometer wie ALMA benötigt werden.

Mit Hilfe von dreidimensionalen magnetohydrodynamischen Simulationen von zirkumstellaren Scheiben muss geklärt werden, wie in ihnen Masse und Drehimpuls transportiert werden. Der Einfluss des Ionisationsgrades der Scheiben, der Staubentwicklung und der Gas-Staub-Wechselwirkungen ist zu untersuchen. Die kürzlich entdeckte Magnetorotationsinstabilität stellt einen vielversprechenden Mechanismus für den Drehimpulstransport in protoplanetaren Scheiben dar; es fehlt jedoch der umfassende Nachweis, dass er tatsächlich das fundamentale Problem des Drehimpulstransports löst.

Überraschend kam Mitte der achtziger Jahre die Entdeckung von eng gebündelten Gasströmen, den Jets, die mit Überschallgeschwindigkeit von jungen Sternen in zwei entgegengesetzte Richtungen ins interstellare Medium schießen. Die Jetachse steht jeweils senkrecht auf der protostellaren Scheibe. Detail-

*Jets von jungen
Sternen*

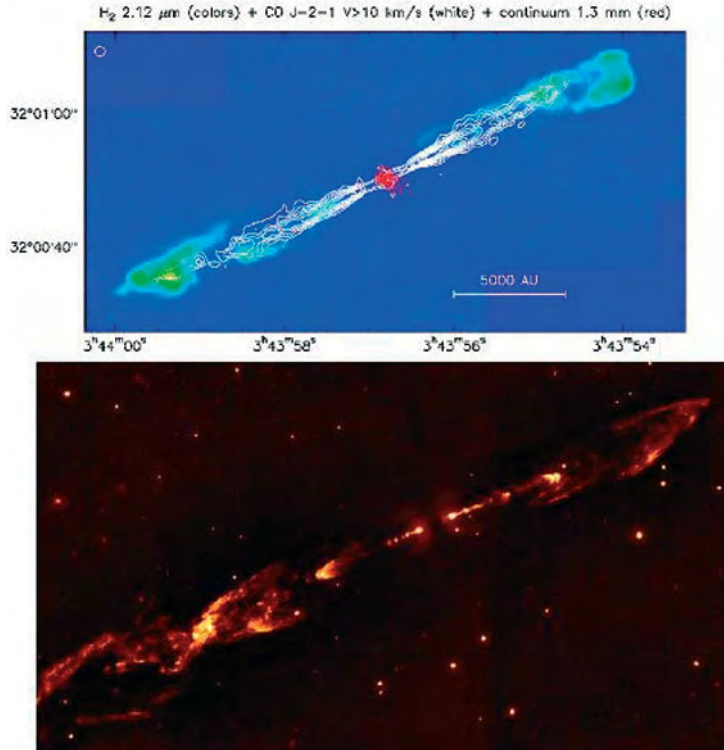


Abb. 2.57: Oben: Zwei Jets, die von einem jungen Stern ausgehen. Der Stern ist in der Mitte umgeben von einer dichten Staub- und Gasscheibe, deren Kontinuumsmission bei 3 mm Wellenlänge rot dargestellt ist. Das CO-Gas (weiße Konturen) strömt senkrecht zur Scheibe. Wo dieser Jet auf umgebende Materie stößt, entsteht heißes H₂-Gas, das im nahen Infraroten leuchtet (grün) (AIP/IRAM). Unten: VLT-Aufnahme des symmetrischen bipolaren Jets des Protosterns HH 212 (AIP).

lierte Untersuchungen dieser Jets (Abbildung 2.57) belegen ihren Zusammenhang mit der Sternbildung. Man findet zum Beispiel, dass die heftigste Ausströmungsphase gleichzeitig mit der heftigsten Einströmungsphase auftritt. Theoretische Arbeiten lassen vermuten, dass Jets die Scheibenentwicklung und damit auch die Stern- und Planetenentwicklung entscheidend beeinflussen können. Auch eine Rückwirkung der Jets auf die Turbulenz der Mutterwolke ist wahrscheinlich, aber nicht bewiesen. Durch theoretische Arbeiten und numerische Simulationen konnte der grundlegende Mechanismus der Jetbeschleunigung und -kollimation als magnetohydrodynamischer Prozess belegt werden. Die Prozesse, die von einer Akkretion hin zum Ausströmen der Jetmaterie führen, sind allerdings noch nicht im Detail verstanden. Ebenso ist nicht

klar, ob der Jet vom Stern ausgeht oder von der Scheibe. Es ist anzunehmen, dass jeder massearme junge Stern, also auch früher unsere Sonne, ein Jetstadium durchlaufen hat.

Die Sonne ist kein Doppelstern, obwohl mehr als 50 % der sonnenähnlichen Feldsterne in der galaktischen Scheibe in Doppelsternsystemen zu finden sind. In den vergangenen Jahren wurden große Anstrengungen unternommen, die Doppelsternstatistik junger Sterne in nahen Sternentstehungsgebieten zu untersuchen. Dabei profitierte man von der Entwicklung räumlich hochauflösender Methoden, wie zum Beispiel der Speckle-Interferometrie oder seit kurzem auch der adaptiven Optik. Es stellte sich heraus, dass die Doppelsternhäufigkeit unter den massearmen Sternen in losen Sternaggregaten, wie zum Beispiel in der Taurus-Auriga-Region, deutlich größer ist als in dichten Sternhaufen, wie zum Beispiel dem Trapezhaufen im Orion. Im ersten Gebiet erreicht die Doppelsternhäufigkeit überraschenderweise fast die 100-%-Marke; die Doppelsternbildung ist hier die Regel. Dagegen beträgt die Doppelsternhäufigkeit im Orionhaufen nur ca. 50 %, ähnlich wie bei den Feldsternen. Dies hat unter anderem zu der Hypothese geführt, dass die Feldsternpopulation im Wesentlichen aus früheren, nunmehr aufgelösten Sternhaufen stammt – eine Vorstellung, die auch mit anderen Beobachtungserkenntnissen übereinstimmt, dass nämlich der Großteil der Sternentstehung in Riesenmolekülwolken über die Bildung von Sternhaufen abläuft. Sternaggregate wie Taurus-Auriga tragen nur in geringem Umfang zur Feldsternpopulation bei. Allerdings liefern sie die weiten Doppelsternpaare unter den Feldsternen, die in dichten Sternhaufen nicht überleben würden. Die Ursache für den Unterschied in der Doppelsternhäufigkeit von losen oder dichten Sternhaufen ist bisher nicht geklärt. Weite Doppelsterne können in dichten Haufen leicht zerstört werden. Vielleicht beeinflusst aber auch die Haufenbildung selbst die Wahrscheinlichkeit für die Doppelsternentstehung.

In Zukunft kommt es darauf an, die Häufigkeit und Massenverteilung der Begleiter von massereicheren Sternen zu bestimmen und als wichtige Hinweise auf den Bildungsprozess zu deuten. Bereits heute deutet sich an, dass massereiche Sterne im Durchschnitt mehr als einen Begleiter besitzen. Oft handelt es sich um Mehrfachsysteme bestehend aus einem sehr engen Paar und einem entfernten Begleiter.

Sehr junge Doppelsterne sind ideale Systeme zur Kalibration der Massenfunktion junger Sterne und damit von Vorhauptreihenentwicklungsmodellen. Für die dynamische

*Statistik junger
Doppelsterne*

Massenbestimmung durch die Bahnbewegung der Objekte werden astrometrische Untersuchungen mit dem VLTI besondere Bedeutung erlangen.

2.4.3 Massereiche Sterne, Sternhaufen und die Anfangsmassenverteilung

Entstehung massereicher Sterne

Während wir ein gewisses Verständnis der Entstehung massearmer Sterne erreicht haben, gilt dies für massereiche Sterne nicht. Gerade diese Objekte sind es aber, die wir bei ihrer Entstehung und Entwicklung in anderen Galaxien „sehen“. Die Schwierigkeiten bei der Erklärung der Entstehung massereicher Sterne liegen zum einen in der Vielzahl komplizierter Rückwirkungsprozesse auf das umgebende Gasreservoir. Massereiche Sterne sind heißer als massearme Sterne und wirken mit einem starken Strahlungsdruck, intensiven Sternwinden und molekularen Überschallströmungen auf die Umgebung ein. Numerische Simulationen müssen hier den komplizierten Strahlungstransport einbeziehen. Zum anderen sind die nächsten Entstehungsgebiete massereicher Sterne wesentlich weiter von uns entfernt als die der massearmen. Diese Tatsache macht interferometrische Untersuchungen und Beobachtungen mit adaptiver Optik unumgänglich. Schließlich sei erwähnt, dass es viel weniger massereiche Sterne als massearme Objekte im Milchstraßensystem gibt. Wir wissen heute nicht, ob massereiche Sterne ebenfalls durch das Aufsammeln von Materie und/oder durch Verschmelzen von jungen Sternen oder von Wolkenkernen mittlerer Masse entstehen. Zur Klärung dieser Frage ist die Suche nach den frühesten Phasen der Entstehung massereicher Sterne, nach zirkumstellaren Scheiben und nach Materieausflüssen notwendig. Außerdem muss geklärt werden, ob massereiche Sterne immer in Haufen entstehen oder auch isoliert vorkommen.

Ein besseres Verständnis der Entstehung massereicher Sterne und ihrer Massenverteilung samt oberer Massengrenze ist auch eine Grundvoraussetzung für das Verständnis der Entwicklung von Galaxien. Denn es sind vor allem die massereichen Sterne, die wesentliche galaktische Phänomene wie die galaktische Nukleosynthese, die Produktion von Turbulenzenergie im interstellaren Medium, die Entstehung galaktischer Winde und die Entstehung und Zerstörung von Molekülwolken bewirken. Die hohe Bildungsrate massereicher Sterne beherrscht die gesamte Energiebilanz von Galaxien mit hoher Sternentstehungsrate („Starburst“-Galaxien) und Infrarotgalaxien mit extrem hoher Leuchtkraft.

Besondere Beachtung bei der Untersuchung der lokalen Sternentstehung muss dem Unterschied zwischen isolierter Sternentstehung und der in dichten Sternhaufen gewidmet werden. Infrarotaufnahmen von sternbildenden Molekülwolken zeigen, dass die meisten jungen Sterne in eingebetteten kompakten Sternhaufen entstehen. Es ist insbesondere die Frage zu klären, welche Prozesse die Sternentstehung in einer Region stimulieren und vorantreiben oder auch behindern und abbrechen können. Das Ergebnis dieser Beobachtungen ist die Leuchtkraftfunktion und damit über Entwicklungsrechnungen die ursprüngliche Massenverteilung sowie die Altersverteilung der Haufensterne.

Sternhaufen und Sternassoziationen

Zu den dichtesten Sternsystemen gehören die Kugelsternhaufen, deren Entstehung bisher völlig unklar ist. Dabei sind sie besonders interessant, da sie zu den ältesten Objekten im Universum gehören und daher Relikte der ersten Sternentstehungsphase im Kosmos sind. In „Starburst“-Galaxien und in verschmelzenden Galaxiensystemen scheinen auch heute noch Kugelsternhaufen zu entstehen. Dagegen haben die dichtesten und massereichsten Sternhaufen in unserer Milchstraße eine wesentlich geringere Masse als Kugelsternhaufen. Sie werden deshalb im Gezeitenfeld der Milchstraße leichter zerrissen und tragen zur heutigen Feldsternpopulation bei.

Neben dichten jungen Sternhaufen gibt es auch lose Assoziationen als Geburtsorte von Sternen. Mit optischen Nachbeobachtungen von ROSAT-Röntgenquellen wurden in allen nahen Sternassoziationen viele vorher nicht bekannte junge, massearme Sterne entdeckt, die weiträumig verteilt sind (Abbildung 2.58).

Eine entscheidende Größe für die galaktische Entwicklung und auch für die Entwicklung von Sternhaufen ist die ursprüngliche Massenverteilung der Sterne. Sie beschreibt die relative Häufigkeit der Sterne in Abhängigkeit von ihrer Masse. Um sie zu ermitteln, sind empfindliche Durchmusterungen im optischen, infraroten und Röntgenbereich sowie spektroskopische Nachbeobachtungen notwendig. Insbesondere muss Vollständigkeit der gefundenen jungen Sternpopulationen zu kleinen Massen hin erreicht werden. Bekannt ist seit langem, dass der Anteil der neugeborenen Sterne mit abnehmender Masse wächst. Unklar ist aber, bis zu welcher Mindestmasse sich dieser Trend fortsetzt.

Die ursprüngliche Massenverteilung der Sterne

Daran schließt sich unmittelbar die Frage nach der Häufigkeit von Braunen Zwergen an. Diese Objekte liegen auf der Massenskala zwischen den Sternen und den Planeten. Sie wurden jahrzehntelang vorausgesagt, ließen sich aber

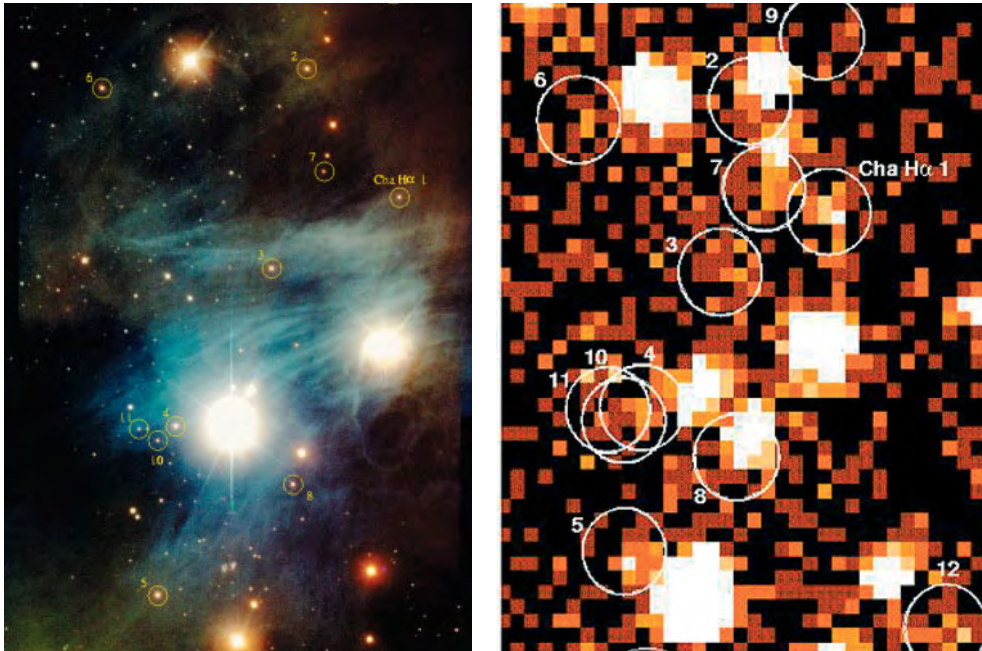


Abb. 2.58: Entdeckung junger Sterne und Brauner Zwerge durch ihre Röntgenaktivität. Links eine Aufnahme im sichtbaren Bereich mit dem VLT, rechts die ROSAT-Aufnahme. (ESO/MPE)

erst Mitte der neunziger Jahre zweifelsfrei nachweisen. Die Massenverteilung von Braunen Zwergen als Begleiter von sonnenähnlichen Sternen scheint nicht kontinuierlich in die Massenverteilung von Riesengasplaneten überzugehen, vielmehr zeichnet sich eine Lücke zwischen beiden Verteilungen ab. Dieser Befund muss in Zukunft aber erst noch gefestigt oder auch widerlegt werden. Dabei werden empfindliche Beobachtungen mit dem JWST eine wichtige Rolle spielen.

2.4.4 Extrasolare Planeten

Die Untersuchung von entstehenden Planetensystemen und die Suche nach extrasolaren Planetensystemen haben sich mit der direkten Abbildung von zirkumstellaren Scheiben und der Entdeckung der ersten extrasolaren Planeten und Planetensysteme von der Spekulation zu einem zentralen Forschungsschwerpunkt der modernen Astrophysik entwickelt.

Planeten, wie die Erde, umkreisen wahrscheinlich viele Sterne. Bis vor kurzem kannte man jedoch nur das Sonnensystem. Im Jahre 1995 ließ sich dann aber erstmals das nachweisen, was die Astronomen seit langem vermutet hatten: Auch

andere Sterne werden von Planeten umkreist. Bislang können die meisten extrasolaren Planeten nur indirekt über ihre Schwerkraftwirkung auf den Zentralstern mit Hilfe des Doppellereffektes nachgewiesen werden, wobei nur Objekte mit Massen mindestens von der Größe des Jupiters und diese nur in engen Umlaufbahnen gefunden werden können. Vor kurzem gelang außerdem der direkte Nachweis des Durchgangs („Transits“) eines solchen Planeten vor einer Sternscheibe, so dass sich Masse, Radius und damit die mittlere Dichte dieses Gasplaneten bestimmen ließen. Dieser Planet hat offensichtlich eine Masse von 70 % der Jupitermasse, jedoch mit einem um 40 % größeren Radius (Abbildung 2.59). Die Entdeckung der ersten extrasolaren Planeten und Planetensysteme hat diesem Gebiet der Astronomie einen enormen Auftrieb verliehen. Insbesondere werden Möglichkeiten gesucht, wie man die bislang noch unsichtbaren, dunklen Sternbegleiter direkt beobachten oder sogar spektroskopisch untersuchen könnte. Dann ließe sich herausfinden, ob die Planeten von Atmosphären umgeben sind, woraus diese bestehen und ob sie Zeichen für biologische Aktivität zeigen.

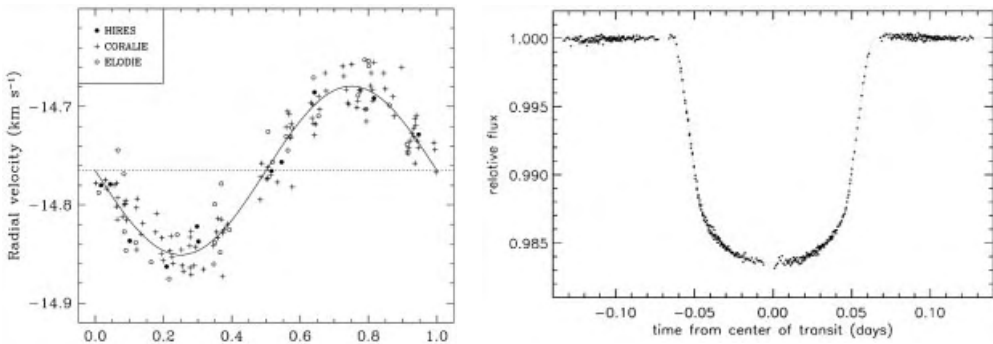


Abb. 2.59: Bei dem Stern HD 209458 ließ sich ein Planet mit zwei Methoden nachweisen: Links durch seine Schwerkraftwirkung auf den Stern, wodurch dieser mit einer Geschwindigkeit von einigen zehn Metern pro Sekunde um seinen Schwerpunkt schwingt. Rechts erkennt man, wie sich die Helligkeit des Sterns geringfügig veränderte, als der Planet vor ihm vorbeizog. Hiermit ließ sich eindeutig nachweisen, dass der Planet 70 % der Masse Jupiters, aber einen um 40 % größeren Durchmesser besitzt. (NASA/ESA)

*Entdeckung und
Charakterisierung
extrasolarer
Planeten*

Bisher waren nur die spektroskopische Doppler-Methode und die Transitmethode im gerade beschriebenen Fall bei der Suche nach extrasolaren Planeten erfolgreich. Mit der Doppler-Methode gelang es unterdessen auch, erste extrasolare Planetensysteme zu entdecken. Ihre Ausdehnung auf andere Spektralklassen wird weiteres statistisches Material zur Häufigkeit von Planetensystemen liefern. Die Transitechnik, kombiniert mit Radialgeschwindigkeitsmessungen, ist in Überwachungsprogrammen auf Sternhaufen auszudehnen, um weitere Systeme mit solchen Transits zu entdecken. Dazu sollten kleinere robotische Teleskope Einsatz finden. Eine Weltraummission wie Eddington wäre auch in der Lage, Transits von erdähnlichen Planeten nachzuweisen.

Das nächste große Ziel muss es dann sein, die Planeten direkt abzubilden und möglichst auch spektroskopisch zu untersuchen. Dies stellt enorme Anforderungen an die Beobachtungstechnik, gilt es doch den extremen Helligkeitskontrast zwischen Hauptstern und Planet zu überwinden. Mit Hilfe dedizierter kontrastreicher Adaptiver-Optik-Systeme an den Teleskopen des VLT und am LBT, gekoppelt mit neuen koronographischen Methoden, wird sich möglicherweise ein Durchbruch für die Riesenplaneten erreichen lassen; mit der thermischen Infrarotkamera auf dem JWST wird dieses Ziel auf jeden Fall erreicht werden. Mit den geplanten Nullungsinterferometern am VLT und am LBT gibt es weitere Chancen. Die Suche nach den Signaturen der Planetenatmosphären und die Aufklärung des Unterschieds zu den Braunen Zwergen sind hierbei vordringliche Forschungsziele. Mit Interferometern im Weltraum wie dem zukünftigen Projekt Darwin der ESA wird dann auch der direkt abbildende und spektroskopische Nachweis erdähnlicher Planeten möglich werden (Abbildung 2.60), aber vorher wird wohl der sogenannte Mikrogravitationslinseneffekt den ersten indirekten Nachweis von erdähnlichen Planeten erbringen. Numerische Rechnungen müssen den Energieaustausch und die Gaszirkulation zwischen der dem Stern zugewandten heißen und der für den Beobachter hauptsächlich sichtbaren, kühlen Schattenseite untersuchen, um die Sichtbarkeit des Planeten vorhersagen zu können.

Um junge extrasolare Planeten beobachten zu können, bedarf es einer Stichprobe geeigneter junger Sterne, die möglichst nahe in der Sonnenumgebung liegen sollten. So ist es gelungen, junge Sterne zu finden, die näher zu uns liegen als alle vorher bekannten Sternentstehungsregionen, und die zum Teil isoliert von Molekülwolken auftreten. Diese sehr nahen und jungen Sterne sind besonders gut geeignet, zirkumstellare Scheiben und eventuell entstehende Planeten direkt

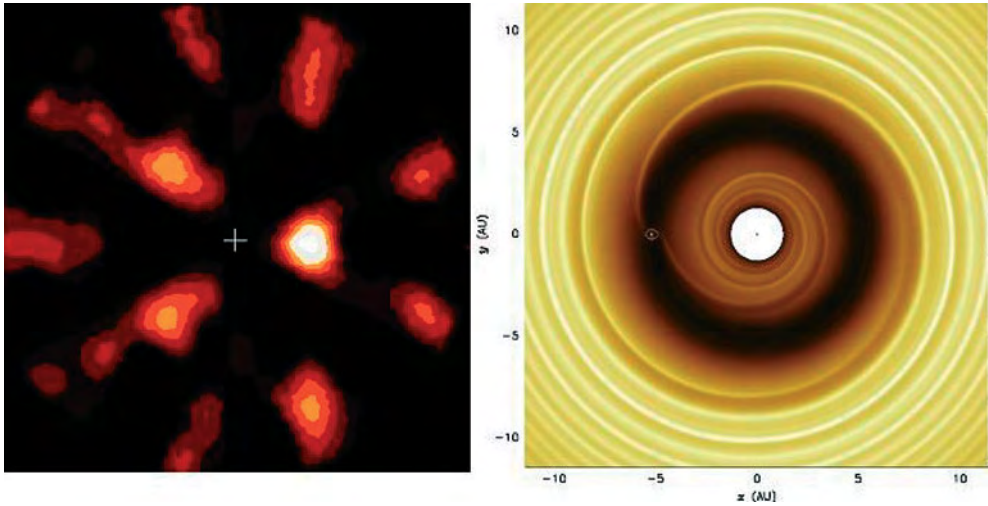


Abb. 2.60: Untersuchungen der Entstehung von protostellaren Scheiben und Planeten. Das linke Bild zeigt die Simulation einer Beobachtung eines erdähnlichen Planeten um einen sonnennahen Stern mit dem DARWIN-Weltrauminterferometer. Der zentrale Stern ist an der Position des Kreuzes und ist, obwohl 10 Millionen Mal heller als der umgebende Planet (heller Fleck), durch die so genannte „Nulling Interferometry“ praktisch völlig ausgeblendet. Die schwächeren Intensitätsmaxima sind Artefakte der recht einfachen Rekonstruktionsmethode, die in dieser Simulation benutzt wurde. Das rechte Bild zeigt eine numerische Simulation einer zirkumstellaren Scheibe, in der durch die Anwesenheit eines Planeten eine staub-/gasfreie Zone in der Scheibe entsteht. Solche Lücken werden mit VLTI/LBTI sichtbar gemacht werden können, und die Gas- und Staubverteilung und die Dynamik im äußeren Teil wird mit ALMA aufgelöst werden können. (ESA/Uni Jena/MPIA)

abzubilden und detailliert zu untersuchen. Der Grund dafür ist, dass junge Planeten heller sind als entwickeltere Objekte.

Die Bildung von Planeten aus den mikrometergroßen Staubteilchen und dem Gas der Scheibe ist ein komplizierter und bis heute nicht ausreichend verstandener Prozess. So wissen wir nicht, ob gravitative Instabilitäten in der Frühphase der Scheibenentwicklung zur Bildung von Riesenplaneten führen können. Ein anderes Szenario geht davon aus, dass die Staubteilchen bis zu kilometergroßen Planetesimalen wachsen und diese dann durch gravitative Wechselwirkung bzw. das Aufnehmen von Gas zu Planeten werden. In der ersten Wachstumsphase ist die dynamische Wechselwirkung der Staubteilchen mit dem Gas von besonderer Bedeutung, die Art der Gasströmung muss also genau bekannt sein. Experimentelle Arbeiten – auch unter Mikrogravitationsbedingungen – haben gezeigt, dass kleine Teilchen unter den typischen Bedingungen zirkumstellarer Scheiben zusammenstoßen, dabei haften und wachsen. Wenn die Teilchen jedoch Metergröße errei-

Bildung extrasolarer Planeten

chen, werden die Kollisionsgeschwindigkeiten so groß, dass es zur Fragmentation kommen muss und der Wachstumsprozess eigentlich aufhören sollte. In diesem Fall würde kein Planet entstehen. Ob die Fragmente durch aerodynamische Reibung zum „Mutterkörper“ zurückkehren oder ob auch hier eine Gravitationsinstabilität hilft, dies ist gegenwärtig ungeklärt. Bei den theoretischen und experimentellen Untersuchungen dieser Vorgänge sind deutsche Gruppen führend; ein Experiment für die Internationale Raumstation befindet sich in Vorbereitung.

Die Entdeckung von Planeten mit mehreren Jupitermassen und sehr geringen Abständen zum Zentralstern sowie von extrasolaren Planeten mit stark exzentrischen Bahnen wirft vielfältige Fragen nach der Entstehung der Planeten und ihrer Wechselwirkung mit der zirkumstellaren Scheibe bzw. mit anderen Planeten auf. So muss geklärt werden, welche Faktoren die Masse der entstehenden Planeten nach oben hin begrenzen: Man muss verstehen, unter welchen Bedingungen ein junger Planet beim Umlauf um den Stern eine Lücke in der Scheibe erzeugen kann und inwieweit Materieeinfall auf den Planeten durch die Lücke hindurch möglich ist. Was spielt sich in der Roche-Zone um den Planeten ab, wie entstehen zirkumplanetare Scheiben und wie nimmt der Planet Masse auf? Wie entstehen die Satelliten der Planeten? Diese Probleme lassen sich derzeit nur mit numerischen Simulationen angehen, wobei der Nachweis der Lücke mit ALMA und dem JWST möglich sein wird (Abbildung 2.61). Ein verwandtes Problem liegt in der Tatsache, dass man viele Riesenplaneten gefunden hat, die sich sehr nahe an ihrem Stern befinden. Nach heutigen Theorien können sie dort nicht entstanden sein. Es wird daher vermutet, dass sie während ihrer Entstehung durch Wechselwirkung zwischen Scheibe und Planet nach innen gewandert sind. Aber was stoppt sie? Wie häufig werden Protoplaneten vom Zentralstern verschluckt?

Schließlich geben uns die stark exzentrischen Bahnen vieler extrasolarer Planeten Rätsel auf. Entstehen sie durch die Wechselwirkung der Planeten mit der Scheibe oder ist die Wechselwirkung der Planeten untereinander wichtiger? Wie stabil sind Planetensysteme? Warum bewegen sich die Planeten unseres Sonnensystems auf nahezu kreisförmigen Bahnen? All diese Fragen werden wir im nächsten Jahrzehnt durch gezielte Simulationen und Beobachtungen beantworten können.

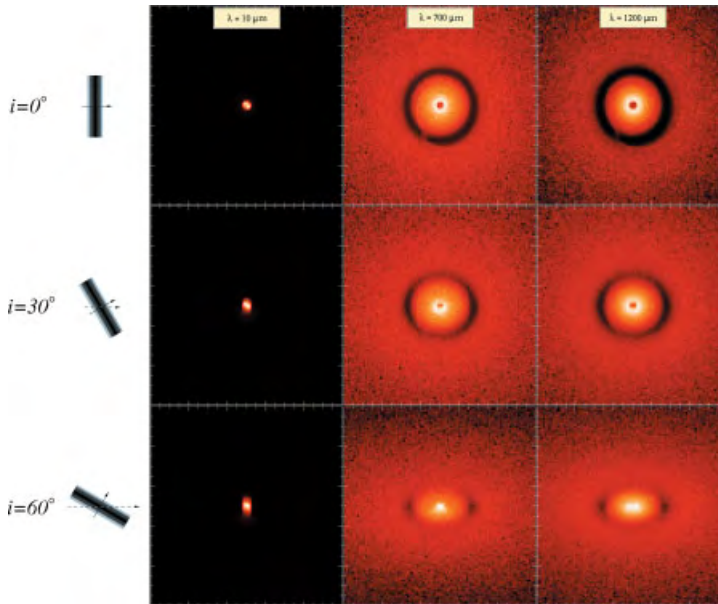


Abb. 2.61: Dreidimensionale Simulationsrechnung der räumlich aufgelösten Emission einer protoplanetaren Scheibe mit einer Lücke, für verschiedene Wellenlängen (von links nach rechts) und verschiedene Blickrichtungen relativ zur Scheibenebene (von oben nach unten). Die Beobachtung solcher Lücken beispielsweise mit ALMA oder dem JWST würde einen direkten Hinweis auf die Anwesenheit eines massereichen Planeten geben. (Uni Jena/TLS)

Aus dem Verständnis der Stern- und Planetenentstehung kann eine Antwort auf die fundamentale Frage erwartet werden, ob Bedingungen, die die Entstehung von Leben begünstigen, in anderen Planetensystemen die Regel oder die Ausnahme sind. Außerdem ist die Frage bedeutend, ob die erstaunlich komplexen organischen Moleküle, die in der interstellaren Materie entstehen, bis auf die Oberflächen neu entstandener Planeten, beispielsweise in Form eisförmigen kometaren Materials, gelangen können. Die Astrophysik ist damit heute an einem Punkt angelangt, an dem sie erstmals die Frage nach Leben auf anderen Planeten mit gesicherten Beobachtungsdaten untersuchen kann.

Planeten leben möglicherweise bei ihrer Geburt sehr gefährlich. Wenn die meisten massearmen Sterne mit zirkumstellaren Scheiben in jungen Sternhaufen geboren werden, so kann es passieren, dass diese Scheiben von der UV-Strahlung der massereichen heißen Sterne zerstört werden und dann keine Planeten bilden können. Die Häufigkeit der Planetenbildung ist somit unsicher. Hinzu kommt, dass jupiterartige

Leben auf anderen Planeten

Planeten sich durch Wanderung nach innen selbst zerstören können, indem sie in ihren Zentralstern fallen und dabei ihre weiter innen gelegenen terrestrischen Planeten mitreißen. Ist dieses Szenario realistisch? Numerische Simulationen müssen diese wichtige Frage klären helfen.

3 Die Observatorien und Instrumente der nächsten fünfzehn Jahre

3.1 Zugang zu Teleskopen und Beteiligung an internationalen Großprojekten

Im Folgenden möchten wir jene Projekte vorstellen, welche die Astronomie in den kommenden zwei Jahrzehnten prägen werden. Es handelt sich zum Großteil um internationale Unternehmungen, aber auch um nationale Entwicklungen, die es Forschern in Deutschland ermöglichen sollen, auch zukünftig eine angemessene Rolle zu spielen.

Es ist im letzten Jahrzehnt immer deutlicher geworden, dass die Erforschung des Universums mit seiner Vielzahl von Objekten und physikalischen Prozessen wellenlängenübergreifende Astronomie braucht, um wirklich erfolgreich zu sein (siehe Abbildung 1.11).

*Multispektrale
Forschung*

Die deutschen Astronomen sind bei der Nutzung erstklassiger Teleskope und Experimente momentan recht gut platziert (Tabelle 3.1). Dadurch ist die deutsche Astronomie weltweit auch konkurrenzfähig, in einigen Bereichen sogar führend (siehe Kapitel 4). Für die Zukunft gilt es, bei der rasanten Entwicklung nicht nur mitzuhalten, sondern wie in der Vergangenheit auch Führungspositionen zu erhalten bzw. auszubauen. Die dadurch erarbeitete internationale Stellung wirkt sich im Wettbewerb generell positiv auf die gesamte Astronomie in Deutschland aus, wie die Erfahrung der vergangenen Jahre gezeigt hat.

Tabelle 3.1: Laufende Observatorien, Teleskope und Experimente der letzten Dekade

Observatorium	Bereich	Boden/ Welt- raum	Start	Ende	Träger	Deut- scher Anteil
Geo600	Gravitationswellen	B	2002		D	100 %
Effelsberg	Radio	B	1972		D	100 %
IRAM	Millimeter	B	1979		D/F/Sp	47 %
ISO	IR	W	1995	1998	ESA	25 %
La Silla	Optisch/NIR	B	1969		ESO	20 %
Calar Alto	Optisch/NIR	B	1973		D/Sp	90 %
VLT Paranal	Optisch/NIR	B	1998		ESO	20 %
SDSS	Optisch	B	1998		USA/NASA/D	5 %
HET	Optisch	B	1999		USA/D	9 %
Teneriffa	Optisch (Sonne)	B	1985		D/Sp	75 %
SOHO	UV/Optisch (Sonne)	W	1995		ESA/NASA	20 %
Hubble Space Telescope	UV/Optisch/NIR	W	1990		NASA/ESA	4 %
ROSAT	Röntgen	W	1990	1999	D/NASA/UK	60 %
Chandra	Röntgen	W	1990		NASA/NL/D	2 %
XMM-Newton	Röntgen	W	1999		ESA	25 %
Compton GRO	Gamma	W	1991	2000	NASA/ESA/D	25 %
Integral	Gamma	W	2002		ESA/Russ.	20 %
HEGRA	UHE-Gamma	B	1987		D/Sp/Armenien	80 %
GNO	Neutrinos	B	1990	1997	D/I/F/Polen/USA	50 %
AMANDA	Neutrinos	B	1996		USA/D/int.	15 %
CRESST/GENIUS	Dunkle Materie	B	1999		D/UK/I+Russ./USA	80 %

Große internationale Anstrengungen in den nächsten zehn Jahren

Viele Ziele der modernen Astrophysik können nur durch große internationale Anstrengungen erreicht werden. Dies gilt seit langem schon für die vom Weltraum betriebene Forschung, aber zusehends auch für die Aktivitäten vom Boden. Der Trend wird sich in den nächsten zehn Jahren weiter verstärken, und in einigen Bereichen wird es zur Einrichtung von „globalen“ Teleskopen kommen müssen. Dies sind derart große, anspruchsvolle und teure Teleskope, dass sie nur durch das Zusammenwirken der Forschergemeinden auf der ganzen Welt realisiert werden können. Das oberste Ziel muss hier für Deutschland sein, sichtbare Beteiligungen an führenden Einrichtungen und Projekten zu erwerben oder aufrechtzuerhalten.

Von zentraler Bedeutung für die deutsche astrophysikalische Forschung sind hier die Europäische Raumfahrtagentur (ESA) und die Europäische Südsternwarte (ESO), die Träger für die meisten der weltraum- bzw. bodengebundenen Groß-

projekte. An ihnen ist Deutschland als vollwertiges Mitglied beteiligt. Für die Erhaltung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit ist es außerordentlich wichtig, dass sich die deutschen Forschergruppen in diesem internationalen Umfeld positionieren und kritische Beteiligungen erwerben können, um die wissenschaftliche Nutzung zu optimieren.

Im Folgenden werden die wichtigsten neuen Initiativen in der Kategorie der internationalen Großprojekte diskutiert. Für die nächste Dekade wurden vor allem solche Projekte aufgenommen, die in diesem Zeitraum realisiert oder zumindest zur Entwicklungsreife gebracht werden können. Keinesfalls von geringerer Priorität sind solche Projekte, die bereits in der wissenschaftlichen Datenphase sind oder sehr kurz davor stehen. An erster Stelle sind hier das Very Large Telescope (VLT) der ESO zu nennen, sowie die Weltraumobservatorien XMM-Newton (X-ray Multi Mirror Mission), SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) und INTEGRAL (International Gamma Ray Laboratory) der ESA, sowie eine Beteiligung an dem Gamma Ray Large Area Space Telescope (GLAST) der NASA. Eine Zusammenfassung gibt Tabelle 3.2.

Das VLT der ESO ist das wichtigste Instrument der deutschen bodengebundenen optischen und Infrarotastronomie und wird es auch in der nächsten Dekade bleiben (Abbildung 3.1). Hier stehen insgesamt vier 8-Meter-Teleskope zur Verfügung,

*Very Large
Telescope (VLT)*



Abb. 3.1: Das Very Large Telescope der ESO auf dem Cerro Paranal in Chile. Zu sehen sind die vier, inzwischen alle in Betrieb befindlichen, 8-m-Teleskope sowie (schematisch) drei der sich in der Entwicklung befindenden 1.8-m-Hilfsteleskope für das VLTI. Ebenfalls schematisch angedeutet sind die Strahlkombinationswege für das VLTI, die in einem zentralen Labor zusammengeführt werden. (ESO)

3 Die Observatorien und Instrumente der nächsten fünfzehn Jahre

Tabelle 3.2: Projekte der nächsten Dekade

Observatorium	Bereich	Boden/ Welt- raum	Start	Träger	Deut- scher Anteil
LISA	Gravitationswellen	W	2011	NASA/ESA	13 %
SKA *	Radio	B	>2010	US/international	
Planck	Mikrowellen	W	2007	ESA	25 %
APEX	Millimeter	B	2004	D/ESO/Sweden	60 %
ALMA	Millimeter	B	2011	USA/Europa	10 %
Herschel	IR	W	2007	ESA	25 %
SOFIA	IR	Flugzeug	2004	USA/D	20 %
DARWIN/TPF *	IR	W	>2012	NASA/ESA	13 %
JWST	NIR/IR	W	2010	NASA/ESA	4 %
PRIME *	NIR	W		USA/D	10 %
LBT	Optisch/NIR	B	2004	USA/I/D	25 %
STELLA	Optisch	B	2003	D/Sp	80 %
MONET	Optisch	B	2003	D/USA/Südafrika	80 %
SALT	Optisch	B	2005	Südafrika/USA/D	5 %
Eddington	Optisch	W	>2007	ESA	25 %
OWL *	Optisch	B	>2012	ESO	20 %
GAIA	Optisch (Astrometrie)	W	<2012	ESA	25 %
Sunrise *	Optisch (Sonne)	Ballon	2004	D/US/Sp	50 %
Gregor	Optisch (Sonne)	B	2005	D/Sp	75 %
Solar Orbiter	Optisch (Sonne)	W	2011	ESA	25 %
WSO/UV *	UV	W	>2007	Russl./D/int.	10 %
ROSITA *	Röntgen	W/ISS	2008	D/ESA	80 %
XEUS *	Röntgen	W/ISS	>2012	ESA/J	20 %
MEGA *	Gamma	Ballon	2003	D/Sp/I	50 %
GLAST	Gamma	W	2006	NASA/F/D/I/J	2 %
H.E.S.S.	UHE-Gamma	B	2002	D/F/UK/Namibia	70 %
MAGIC	UHE-Gamma	B	2003	D/Sp/int.	60 %
BOREXINO/LENS	Neutrinos	B	2003	I/D/int.	10 %
ICECUBE	Neutrinos	B	2008	USA/D/int.	15 %
Pierre Auger	Kosmische Strahlung	B	2003	USA/D/int.	20 %

Ein * gibt an, dass das Projekt in Planung ist, aber noch der Zustimmung bzw. Finanzierung bedarf.

die zusammen mit ihren exzellenten Instrumenten Verbesserungen von Faktoren 3 bis 50 in Empfindlichkeit, Abbildungsgeschwindigkeit und räumlicher/spektraler Auflösung gegenüber bisherigen Teleskopen bieten. VLT-Instrumente der zweiten Generation werden in den nächsten Jahren einen weiteren Ausbau des VLT ermöglichen. Durch die interferometrische Kopplung der VLT-Teleskope mit Zusatzteleskopen

werden in den nächsten Jahren Infrarotbeobachtungen hellerer Objekte mit einem räumlichen Auflösungsvermögen von wenigen Millibogensekunden möglich, einer Verbesserung um eine bis zwei Größenordnungen relativ zu den heutigen Möglichkeiten. Der europäischen Astronomie steht damit zum ersten Mal das weltweit beste Observatorium zur Verfügung. Deutsche Universitäts- und Max-Planck-Gruppen sind fast an der Hälfte aller wissenschaftlichen Instrumente (Kameras und Spektrographen) der ersten Generation federführend beteiligt. Sie stehen damit an vorderster Front des internationalen Wettbewerbs, was nicht zuletzt durch die Verbundforschung ermöglicht wurde. Das VLT ist bereits jetzt ein großer Erfolg.

Die Sonnenmission SOHO (Teil des ersten „Cornerstones“ des ESA-Wissenschaftsprogramms), an der mehrere deutsche Gruppen wesentlich zur Instrumentierung beigetragen haben, liefert seit mehr als fünf Jahren Daten über den Aufbau und die Aktivität der Sonne und ihrer Korona. SOHO ist wesentlicher Bestandteil des Solar-Terrestrial Physics Program, das die Raumfahrtorganisationen der USA, Japans und Europas ins Leben gerufen haben. Im Rahmen dieses Forschungsprogramms wird vor allem auch der Einfluss der Sonne auf die Erde studiert.

Weltraumteleskope

Das Röntgenteleskop XMM-Newton (der zweite ESA-Cornerstone, Abbildung 3.2) hat im Jahre 2000 seine Arbeit aufgenommen und liefert ebenfalls bereits wertvolle wissenschaftliche Ergebnisse. Das Gammastrahlenlabor INTEGRAL ist im Herbst 2002 gestartet worden. In beiden dieser ESA-Missionen sind deutsche Gruppen zentral an der Entwicklung des Spiegelsystems, an der Fokalinstrumentierung und insbesondere an der Entwicklung neuartiger energieauflösender Detektoren beteiligt. An der wichtigen amerikanischen Hochenergiegammamission GLAST sind deutsche Gruppen mit Hard- und Softwarebeiträgen beteiligt.

Im Bereich der großen Weltraummissionen sind in den nächsten Jahren die ESA-Projekte FIRST-Herschel (kurz Herschel, Abbildung 3.3), Planck und JWST als wichtigste zu nennen. Die ESA Cornerstone Mission Herschel und die F-Mission Planck sollen 2007 gemeinsam mit einer Ariane 5 starten, anschließend aber unabhängig voneinander arbeiten. Beide Missionen der ESA sind bereits in der Hardwarephase. Deutsche Institute sind federführend an der Instrumentierung von Herschel und signifikant an der Datenanalyse von Planck beteiligt.

*Herschel
und Planck*



Abb. 3.2: Das Röntgenobservatorium XMM-Newton bei letzten Tests im europäischen Weltraumbahnhof Kourou. (ESA)

Zentrale Ziele von Herschel werden tiefe Durchmusterungen und spektroskopische Analysen von sehr leuchtkräftigen, staubreichen Galaxien mit hoher Sternentstehungsrate und Schwarzen Löchern im frühen Universum sein. Hiermit will man der Frage nachgehen, wie die Galaxien entstanden sind und sich weiter entwickelt haben. Weiterhin wird man mit detaillierter, hochauflösender Spektroskopie von Sternentstehungsgebieten und dem interstellaren Medium in der



Abb. 3.3: Computerbild des zukünftigen europäischen Weltraumteleskops Herschel (ESA) im Weltraum nahe dem L2-Librationspunkt. Im oberen Teil ist das 3,5-m-Teleskop zu sehen, darunter der Kryostat mit den drei Instrumenten und dem superfluiden Heliumkühlmittel. Der untere Teil ist der Satellitenbus. Der Satellit wird durch einen großen Schild (der gleichzeitig auch die Sonnenpaneele enthält) vor der Wärmestrahlung von Erde und Sonne geschützt und kann sich so auf unter 100 K passiv abkühlen. (ESA)

Milchstraße und externen Galaxien sowie von Körpern im Sonnensystem untersuchen, wie sich Sterne und Planetensysteme bilden. Herschel, mit einem gekühlten 3,5-Meter-Teleskop ausgestattet, wird das kalte Universum mit bisher unerreichbarem Auflösungsvermögen und Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 60 bis 600 μm beobachten. Herschel wird mehr als eine Größenordnung empfindlicher als ISO sein und hat eine um einen Faktor 5 bessere räumliche Auflösung.

Planck wird die kosmische Hintergrundstrahlung, das „Echo des Urknalls“, über den gesamten Himmel mit einer Winkelauflösung von etwa vier Bogenminuten im Wellenlängenbereich von 0,3 mm bis 1 cm vermessen und damit eine wesentliche Verbesserung der existierenden Messungen vom Boden und von Ballons sowie der bereits begonnenen Messungen des WMAP-Satelliten der NASA erreichen. Die Hintergrundstrahlung ist das früheste Zeugnis des Universums. Sie enthält eine Fülle von Informationen über die Bildung der ersten Strukturen im Kosmos und die fundamentalen kosmologischen Größen, welche die Entwicklung des Universums bestimmen.

James Webb Space Telescope (JWST)

Eine weitere höchst wichtige, neue Initiative im Weltraum ist der Nachfolger des NASA-Weltraumteleskops Hubble, das James Webb Space Telescope (JWST, ehemals NGST). Es erlaubt die Entdeckung und Beobachtung der ersten, unmittelbar nach dem Urknall entstandenen Protogalaxien und Schwarzen Löcher, und wird unser Verständnis der Stern- und Planetenentstehung revolutionieren. Das JWST ist ein passiv gekühltes 6,5-Meter-Weltraumteleskop. Es wird im Infrarotbereich von 0,6 μm bis 28 μm bis zu hundertmal empfindlicher sein als alle bisher existierenden Teleskope. Das JWST ist das zentrale neue Weltraumprojekt der NASA und soll im Jahre 2010 starten. Die ESA-Gremien haben eine 15-%-Beteiligung am JWST beschlossen, insbesondere einen sehr signifikanten Beitrag zur Instrumentierung des Teleskops. Ein Instrument im mittleren Infrarotbereich (5 μm bis 28 μm) und Beiträge zu anderen Instrumenten sollen aus nationalen Mitteln der ESA-Mitgliedsländer finanziert werden, wobei ein deutscher Beitrag wünschenswert ist.

ALMA

Im bodengebundenen Bereich wird das Atacama Large Millimeter Array (ALMA) eine ganz wichtige, große neue Initiative sein (Abbildung 3.4). Durch seine einzigartige Kombination von Winkel- und spektraler Auflösung sowie Empfindlichkeit wird es die Verteilung und Dynamik der Staub- und Gasmassen in jungen Galaxien und ihre Rolle bei der Entstehung und Entwicklung von Galaxien im Detail studieren können. Gleiches gilt für galaktische Sternentstehungsgebiete und protoplanetare Scheiben. ALMA soll aus 64 Antennen mit je 12 Metern Durchmesser bestehen, die auf Basislängen von mehreren Kilometern interferometrisch gekoppelt werden. Sie werden im Submillimeter- und Millimeterwellenbereich arbeiten. ALMA ermöglicht es beispielsweise, Quellen, die erst in den letzten Jahren entdeckt wurden, mit einer um einen Faktor 10 bis 30 besseren Auflösung und Empfindlichkeit zu beob-



Abb. 3.4: Computerzeichnung der Interferometeranlage ALMA, die ab etwa 2010 auf dem 5000 m hohen Chajnantor-Plateau in Nordchile (Einschub oben links) mit 64 12-m-Teleskopen hochauflösende Millimeter- und Submillimeterastronomie betreiben soll. (ESO)

achten, als es zur Zeit mit bestehenden Interferometeranlagen möglich ist. ALMA wird damit auch in der Lage sein, viel schwächere neue Objekte und Objekte in größerer Entfernung zu entdecken.

ALMA ist ein globales Projekt mit Beteiligung der USA, Europas und möglicherweise auch Japans. Deutschland ist dabei über seine Mitgliedschaft bei der ESO und bei IRAM involviert. Eine deutsche Beteiligung von mindestens 10 % an den Kosten und damit später auch an der Beobachtungszeit würde die führende Stellung deutscher Institute in diesem Bereich festigen und ausbauen. ALMA soll durch den Erhalt (und eine leichte Aufstockung) des gegenwärtigen ESO-Budgets verwirklicht werden. Darüber hinaus könnte es im deutschen Interesse sein, eine zusätzliche Eigenbeteiligung über die MPG und IRAM zu realisieren, um so eine aktive Beteiligung an der Hardwarephase zu sichern und, wie im Fall der Instrumentierung für das VLT, den Zugang zu frühen oder privilegierten Beobachtungen zu sichern.

In diesem Sinne ist das Atacama Pathfinder Experiment (APEX) des MPI für Radioastronomie ein wichtiger solcher Beitrag zu ALMA. Diese Beistellung eines ALMA-Prototyp-teleskops ist technisch eine auch für ESO interessante Vorentwicklung für ALMA und gibt gleichzeitig der deutschen Forschergemeinde die Möglichkeit, bereits in wenigen Jahren interessante Forschungsarbeiten auf dem sehr guten Atacama-Standort durchzuführen.

3.2 Sicherung der Konkurrenzfähigkeit

Die Verbundforschung

Auf Empfehlung der letzten „Denkschrift Astronomie“ wurde eine Verbundforschung Astrophysik eingerichtet, die sich inzwischen als Förderinstrument hervorragend bewährt hat. Sie hat deutsche Universitätsgruppen zum ersten Mal in die Lage versetzt, aus eigener Initiative wesentliche Instrumentierungsprojekte für große internationale Einrichtungen anzugehen und damit ihre wissenschaftliche Wettbewerbsfähigkeit entscheidend zu verbessern. Das beste Beispiel der letzten Jahre sind die von einem Konsortium der Landessternwarte Heidelberg und den Universitäten München und Göttingen entwickelten wissenschaftlichen Instrumente FORS 1 und 2, die derzeitigen „Arbeitspferde“ des VLT. Weitere Beispiele sind die deutsche Universitätsbeteiligung an der Kamera OmegaCAM für das VLT Survey Telescope und dem Spektrographen LUCIFER für das LBT.

Das im Rahmen der Verbundforschung neu eingerichtete Programm für Astroteilchenphysik trägt den Entwicklungen in diesem Bereich Rechnung und fördert die Einbindung dieses neuen Forschungsfeldes in die Astrophysik. Dieses stark interdisziplinäre Gebiet stellt eine wichtige Brückenfunktion zur eigentlichen Physik dar.

Im Weltraumbereich ist die Nutzung nationaler wie internationaler Beobachtungsplattformen durch deutsche Gruppen durch den DLR-Anteil der Verbundforschung wesentlich gestärkt worden. Hier seien vor allem das Röntgenteleskop ROSAT, das Infrarotteleskop ISO, das Gammastrahlenteleskop Compton Gamma Ray Observatory sowie das HST genannt (siehe Verbundforschungsbericht des BMBF/DLR). Neue Weltraumprojekte (zum Beispiel XMM-Newton und Integral) werden in Abstimmung mit dem Rat Deutscher Sternwarten in den DLR-Anteil der Verbundforschung aufgenommen.

Die neuen Großgeräte im Weltraum und auf dem Boden liefern enorme Datenmengen, die zum großen Teil in diversen Archiven an MPIs, bei der ESO, der ESA oder den NASA-Zentren lagern. Die Verbesserung der Archivierung, Handhabung und Auswertung dieser großen Datenmengen ist eine zentrale Aufgabe für die effiziente Nutzung der Großgeräte. Die internationale und wellenlängenübergreifende Auswertung dieser Daten ist nur möglich, wenn die Archive vom heimischen Arbeitsplatz aus bearbeitet und verglichen werden können. Dies wird der Arbeitsstil der Forschung der nächsten Jahrzehnte werden. Er erfordert eine kompatible Archivstruktur, eine sehr schnelle Kommunikation und eine sehr hohe und verteilte Rechnerkapazität. Diese Anforderungen haben das von der EU und von den USA finanzierte GRID-Konzept hervorgebracht. GRID soll der Nachfolger des Internet sein, wobei nicht nur die Kommunikation mit anderen Rechnern, sondern auch die rechnerintensive Bearbeitung von externen Datensätzen für die Nutzer transparent sind.

*GRID und das
Global Virtual
Observatory*

Die Astronomie ist ein ideales Testgebiet für die Entwicklung dieser Technologie. Seit 1997 sind für Vorbereitungsstudien eines solchen „virtuellen Observatoriums“ in den USA, in Großbritannien und bei der EU erhebliche Summen beantragt und bewilligt worden. Es hat sich herausgestellt, dass letztendlich ein einziges „Global Virtual Observatory“ entstehen wird, dessen Vorbereitung in Europa die ESO koordinieren wird.

Für die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Forscher wird es wichtig sein, die nötige Infrastruktur aufzubauen, um dieses entscheidende Zukunftsinstrument für die interpretative Astrophysik und für den Vergleich mit theoretischen Simulationsrechnungen in jedem deutschen Institut effektiv nutzen zu können. Dieses soll im Rahmen des „German Astrophysical Virtual Observatory“ (GAVO) ermöglicht werden.

3.3 Stärkung der nationalen Initiativfähigkeit und Innovationskraft

Komplementär zur Teilnahme an europäischen und globalen Großprojekten sind nationale Initiativen und starke Beteiligungen in binationalen und kleineren multinationalen Programmen zu sehen. Solche Programme sind nicht nur entscheidend für eine klar identifizierbare Rolle der deutschen Astronomie, sondern erlauben insbesondere die schnelle Rea-

lisierung von zielgerichteten experimentellen Entwicklungen und wissenschaftlichen Programmen. Diese tragen wiederum entscheidend zur Stärkung der Initiativfähigkeit und Innovationskraft der deutschen Astrophysik bei.

Large Binocular Telescope (LBT)

Das herausragende Beispiel einer solchen Initiative ist das Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mt. Graham in Arizona. Es handelt sich um eine Art Doppelfernrohr, bei dem zwei 8.4-Meter-Spiegel auf einer Plattform montiert werden und deren Strahlengänge kohärent zusammengeführt werden (Abbildung 3.5). Durch die kompakte Bauweise entsteht im Infrarotbereich ein konkurrenzlos großes Gesichtsfeld mit dem beugungsbegrenzten Winkelauflösungsvermögen, das dem eines 22-Meter-Teleskops entspricht. Das LBT wird das



Abb. 3.5: Das Large Binocular Telescope (LBT). Links oben: Konzeption des LBT. Erkennbar sind die beiden Hauptspiegel mit jeweils 8.4 m Durchmesser sowie das rot gekennzeichnete Strahlkombinationsgerät, in dem für hochauflösende Messungen das Licht aus beiden Einzelteleskopen zur Interferenz gebracht wird, und somit ein Teleskop mit einem effektiven Durchmesser von 22 m geschaffen wird. Rechts unten: Bild der in der Firma Ansaldo hergestellten Teleskopstruktur, aufgenommen im Sommer 2001. (LBTB/LBTC)

leistungsstärkste Teleskop der Nordhemisphäre werden. In Kombination mit adaptiver Optik kann es beispielsweise weit entfernte Galaxien im jungen Universum mit zehnfach besserer Auflösung beobachten als das Weltraumteleskop Hubble.

Deutsche Gruppen sind am LBT zu 25 % beteiligt und tragen schon jetzt stark zur Instrumentierung des Teleskops und seiner adaptiven Optik bei. Durch die Fortführung dieser Instrumentierungsentwicklungen am LBT können die deutschen Astronomen eine weltweit sehr wichtige Rolle auf dem Weg zur nächsten Generation von Großteleskopen spielen.

Ein weiteres wichtiges Element für die deutsche Ferninfrarot- und Submillimeterforschung ist das im Bau befindliche Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA, Abbildung 3.6). Es entsteht als binationales Projekt der NASA und des DLR. Dabei handelt es sich um ein 2.7-m-Teleskop, das in einem eigens hierfür umgebauten Boeing 747 Jumbo-Jet fliegen wird. In einer Flughöhe zwischen 12 und 14 Kilometern ist die Atmosphäre für Infrarotstrahlung durchlässig, so dass mit diesem Instrument ein weiter Wellenlängenbereich von 0,3 μm bis 1600 μm überdeckt wird. Hierfür stehen zunächst zehn wissenschaftliche Instrumente zur Verfügung, von denen zwei unter deutscher Federführung entstehen. Zwischen

SOFIA



Abb. 3.6: Das Flugzeugteleskop SOFIA während eines Testflugs. In dem schwarz markierten Teil des Flugzeugs wird das Teleskop arbeiten. (NASA/DLR)

30 μm und 300 μm wird SOFIA die von ISO und dem Vorgängerflug-zeugteleskop Kuiper Airborne Observatory (KAO) erreichte räumliche Auflösung um mehr als einen Faktor 3 übertreffen und insbesondere für hochauflösende Spektroskopie eine Steigerung in der Empfindlichkeit um mehr als eine Größenordnung erzielen. SOFIA wird auch wichtige Aufgaben in der Ausbildung junger Experimentalphysiker und in der Öffentlichkeitsarbeit haben. Derzeit ist geplant, dass SOFIA 20 Jahre im Einsatz bleibt. Der deutsche Anteil des Betriebs soll in einem neu zu schaffenden Institut (SOFIA-Institut) stattfinden, welches an einem Standort angesiedelt werden soll, an dem Infrarotastronomie bereits jetzt aktiv betrieben wird. SOFIA wird viele Bereiche der Astrophysik befruchten und verspricht insbesondere wesentliche Fortschritte im Studium von jungen Galaxien und Sternentstehungsgebieten.

*Sloan Digital
Sky Survey*

Auf dem Apache Point in New Mexico arbeitet seit 1998 weitgehend automatisch ein 2.5-Meter-Teleskop, das im Laufe der kommenden Jahre den halben Nordhimmel in fünf Farbfiltern aufnehmen wird. Der endgültige Katalog dieses Sloan Digital Sky Survey (SDSS) wird Positionen und Farben von über hundert Millionen Himmelskörpern beinhalten, womit der SDSS die umfangreichste Himmelsdurchmusterung sein wird. Anhand der Farben lassen sich bereits sehr viele Objekte klassifizieren. Darüber hinaus befindet sich am SDSS-Teleskop ein Spektrograph, mit dem die im Durchmusterungsgebiet identifizierten Galaxien und Quasare analysiert werden. Mit ihm werden Rotverschiebungen (Entfernungen) von etwa einer Million Galaxien und 100 000 Quasaren gemessen. Damit wird der Sloan Survey die räumliche Verteilung der Galaxien und Quasare in einem hundertmal größeren Volumen bestimmen als derzeit möglich. Für die Kosmologen und andere Bereiche der Astrophysik werden die Daten ein reicher Fundus sein.

Das Projekt wird von einem internationalen Konsortium amerikanischer, japanischer und deutscher (Max-Planck-)Institute durchgeführt. Letztere sind am SDSS mit Sach- und Geldbeiträgen beteiligt, wofür sie die vollen Datenrechte erhalten. Darüber hinaus besteht ein Großprogramm für Nachfolgebeobachtungen interessanter SDSS-Objekte am Calar Alto Observatorium.

GREGOR

Für die Sonnenphysik stellt der Bau des 1.5-Meter-Teleskops GREGOR auf Teneriffa den nächsten Schritt in Winkelauflösung und Empfindlichkeit dar (Abbildung 3.7). Mithilfe multikonjugierter adaptiver Optik kann im sichtbaren Wellenlängenbereich ein für bodengebundene Teleskope bisher

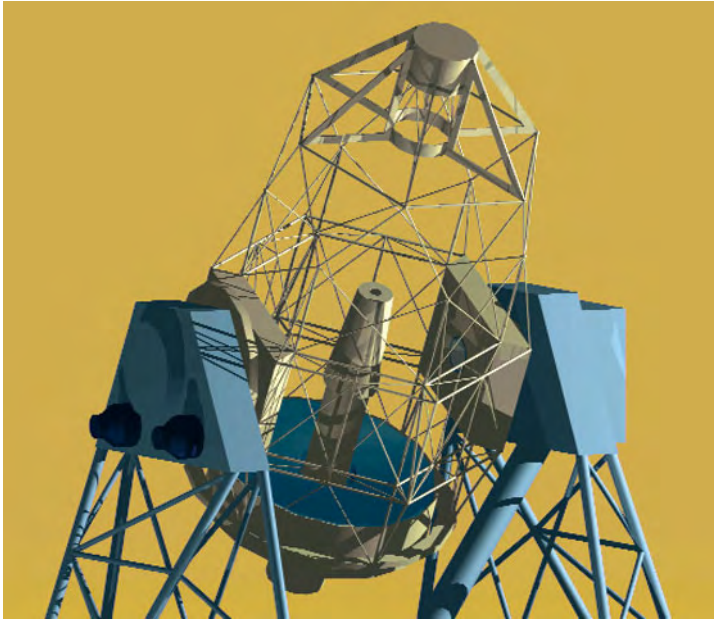


Abb. 3.7: Konzeptionszeichnung des Sonnenteleksops GREGOR. (KIS)

unerreichtes Winkelauflösungsvermögen von etwa 50 Milli-bogensekunden verwirklicht werden. Dies wird es erstmals ermöglichen, die grundlegenden magnetischen Prozesse in der Sonnenphotosphäre auf ihren intrinsischen räumlichen Skalen mittels quantitativer Spektroskopie zu studieren. Damit eröffnet sich die Chance für die deutsche Sonnenphysik, zumindest in Europa eine Führungsrolle einzunehmen. GREGOR stellt einen wichtigen Entwicklungsschritt zu einem internationalen Sonnentelekop der 4-m-Klasse, wie dem von den USA geführten Advanced Technology Solar Telescope (ATST), dar. Eine zukünftige Beteiligung an diesem Teleskop würde die Leistungsfähigkeit der deutschen Sonnenphysik bis weit in das nächste Jahrzehnt hinein sichern.

Komplementär zu der vom Weltraum betriebenen Gammaastronomie im Bereich von einigen zehn keV bis einigen GeV (INTEGRAL und GLAST) ist es im Bereich oberhalb etwa 10 GeV möglich, vom Erdboden aus zu arbeiten. Die Gammaastronomie befasst sich mit den energiereichsten Vorgängen und Objekten im Kosmos, wie Sternexplosionen und Pulsaren, oder dem Masseneinfall auf die supermassiven Schwarzen Löcher im Zentrum aktiver Galaxien. Das Beobachtungsverfahren der bodengebundenen Gammaastronomie unterscheidet

*H.E.S.S.
und MAGIC*

sich grundlegend von dem der üblichen optischen Astronomie. Gammastrahlen können nämlich die Erdatmosphäre nicht durchdringen. Sie kollidieren mit den Atomkernen der Luft und erzeugen dabei einen Schauer von vielen sekundären Elektronen und Positronen. Diese wiederum senden optisches Tscherenkow-Licht aus, das sich mit großen abbildenden Teleskopen nachweisen lässt.

Mit dem HEGRA-Teleskopsystem auf La Palma sowie mit Einzelteleskopen unter anderem in Frankreich, den USA und Australien wurden solche hochenergetischen Quellen im Einzelnen untersucht. Jedoch ist die Zahl nachgewiesener Objekte noch gering. Um statistisch relevante Populationen untersuchen zu können und weitere Strukturen der Objekte auflösen zu können, ist für die kommende Generation von Instrumenten eine signifikante Steigerung der Empfindlichkeit vorgesehen. Die Nachweisgrenze der Instrumente wird im Vergleich zu heutigen Instrumenten zu geringeren Energien verschoben. Dies erlaubt es insbesondere, tiefer ins Universum zu blicken. Wellenlängenübergreifende Beobachtungen im gesamten Spektralbereich werden dabei auch in Zukunft von großer Bedeutung sein.

Deutschland ist federführend im Bau zweier komplementärer Tscherenkow-Teleskope für die Gammaastronomie der nächsten Generation, H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) auf der Südhalbkugel in Namibia (Abbildung 3.8) und MAGIC auf La Palma. Während MAGIC eine möglichst niedrige Energieschwelle und damit die Untersuchung des tiefen Universums anstrebt, betont das H.E.S.S.-System die spektrale und räumliche Vermessung ausgedehnter Quellen im TeV-Energiebereich. Beide Instrumente nehmen weltweit eine Spitzenstellung ein und sollten im Jahr 2002/2003 erste Daten liefern. Die Weiterentwicklung solcher Teleskope kann diese Stellung auch langfristig sichern.

*HET/SALT
und Robotische
Teleskope*

Andere gute Beispiele von kleineren Initiativen zur Erhaltung der Initiativefähigkeit insbesondere auch der deutschen Universitäten sind die 10-m-Teleskope Hobby Eberly Telescope (HET) in Texas und das Southern African Large Telescope (SALT), an denen deutsche Gruppen zu 10% bzw. 6% für etwa 10 Jahre beteiligt sind, was teilweise durch die Volkswagenstiftung ermöglicht wurde. Eine weitere interessante und vielversprechende Entwicklung sind robotische Teleskope. Dies sind gänzlich rechnergesteuerte Teleskope mit spezifisch definierten Beobachtungsprogrammen unter der Verwaltung eines Zentralrechners, also ohne menschliche Präsenz am Ort. Die möglichen Wissenschaftsprogramme reichen dabei

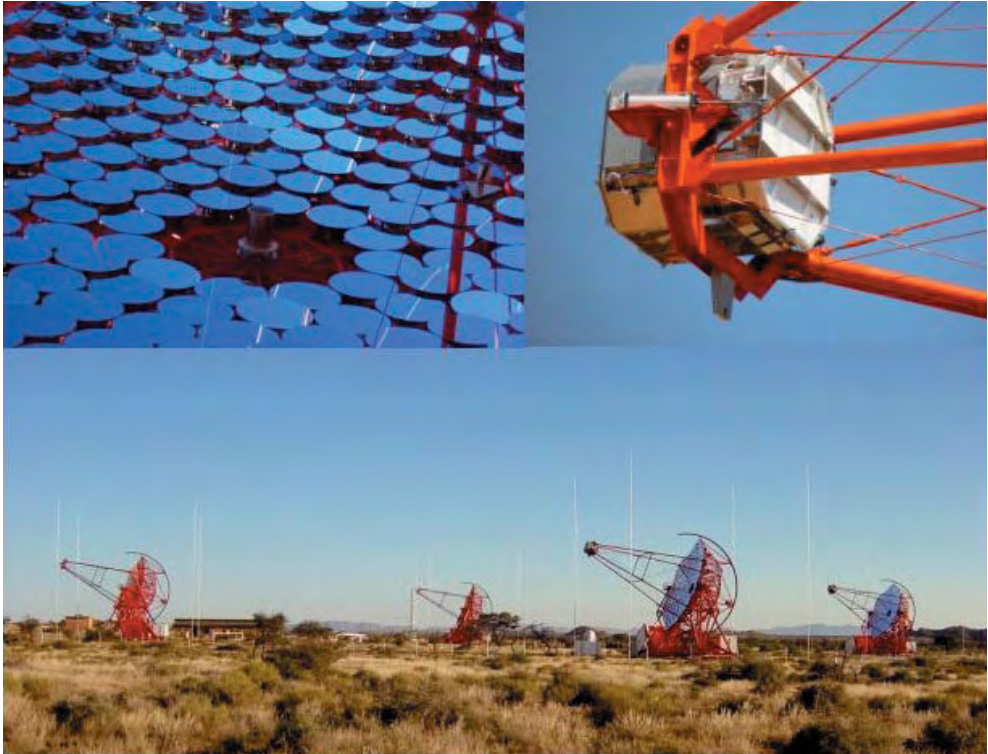


Abb. 3.8: Status der Teleskopanlage H.E.S.S. im April 2003. Zwei der Teleskope, rechts im Bild, sind im regulären Messbetrieb. Links oben: Detail eines Spiegelträgers aus 380 Einzelspiegeln. Rechts oben: Teleskop-Kamera mit 960 Photoröhren als Pixel im Spiegelbrennpunkt. (MPIK).

von Gamma-Ray-Burst-Nachfolgebeobachtungen, der Suche und Photometrie von Supernovae, der Beobachtung von zeitlichen Variationen von AGNs, bis zum Aufzeichnen langer Zeitreihen von magnetischen Aktivitätszyklen bei sonnenähnlichen Sternen. Die vorerst einzige deutsche Einrichtung ist STELLA, zwei 1.2-m-Teleskope am Pico del Teide auf Teneriffa, zur Photometrie und Spektroskopie von Sternaktivitäten. Bei dem in Vorbereitung stehenden MONET-Projekt (Monitoring Network of Telescopes, je ein Teleskop auf Nord- und Südhalbkugel) wird insbesondere auch an die Verfügbarkeit für den Unterricht an Schulen gedacht. Per Internet werden Schüler in der Lage sein, eigene Beobachtungsprogramme zu entwickeln und durchzuführen und damit frühzeitig an naturwissenschaftliche Forschung herangeführt werden.

3.4 Weitere geplante Weltraum- bzw. Ballonmissionen

MEGA

MEGA (Medium Energy Gamma Ray Astronomy) ist ein Kleinsatellitenprojekt aus der Gammaastronomie. MEGA soll Gammastrahlenastronomie im Bereich von 0.4 MeV bis 50 MeV betreiben und als kontinuierlicher Gesamthimmelsmonitor eingesetzt werden. Gegenüber den Vorgängerteleskopen (COMPTEL/EGRET) wird mit MEGA die Sensitivität um mehr als eine Größenordnung gesteigert. Auf dem Weg zu einem so genannten Advanced Compton Telescope, das sowohl von ESA- als auch von NASA-Gutachtern (NAS/NRC Decadal Survey) für die nächste Dekade projiziert wird, stellt MEGA einen technologisch wichtigen Zwischenschritt dar. MEGA wird im MeV-Bereich eine gravierende Empfindlichkeitslücke über zwei Dekaden der multispektralen Beobachtung, zwischen dem harten Röntgen-/niederen Gammabereich (XMM, INTEGRAL) und dem Hochenergiebereich (GLAST, TeV-Observatorien MAGIC, H.E.S.S.) ausfüllen. Zentrale Themen der Astrophysik in diesem spektralen Übergangsbereich von dominant thermischen Prozessen zu relativistischen nichtthermischen Vorgängen sind die Physik der kosmischen Teilchenbeschleunigung (zum Beispiel in der Umgebung von kompakten Objekten und im interstellaren Medium, Explosionen von Supernovae und Gamma Ray Bursts) und die kosmische Radioaktivität als Kennzeichen der Entstehung der Elemente. Durch den Einsatz von MEGA als Gesamthimmelsmonitor werden sich neben bisher unbekanntem schnell veränderlichen Hochenergiequellen auch einmalige Daten zum kosmischen Hintergrund im MeV-Bereich ergeben. Um die Detektortechnologie weiter zu entwickeln und unter annähernd Weltraumbedingungen zu testen, soll im Sommer 2003 in deutsch-spanisch-italienischer Zusammenarbeit ein Ballonflug eines MEGA-Detektor-Prototypen durchgeführt werden.

PRIME

Die vorgeschlagene Satellitenmission PRIME („The Primordial Explorer“) soll mit einer Vielfarbeninfrarotkamera an einem 85-cm-Teleskop ein Viertel des Himmels im Wellenlängenbereich von 1 μm bis 4 μm durchmustern. Da mit einem passiv gekühlten Teleskop in erdnahe Umlaufbahn (600 km Höhe) die störende Vordergrundstrahlung um mehrere Größenordnungen unterdrückt werden kann, hat selbst ein kleines Teleskop eine vom Boden unerreichbare Suchleistung. Mit einer Bogensekunde Auflösung und fast tausendmal

besserer Empfindlichkeit als die bodengebundenen Nahinfrarotdurchmusterungen 2MASS und DENIS ließe PRIME einen Durchbruch bei der Suche nach Objekten im frühen Universum bis zu einer Rotverschiebung von $z \sim 25$ sowie bei der Suche nach planetenähnlichen Objekten bis zu 150 Lichtjahre erwarten. PRIME wurde im Sommer 2002 im Rahmen des NASA-SMEX-Programms leider nicht ausgewählt und soll nun baldmöglichst als NASA-MIDEX-Mission mit DLR-Beteiligung wieder vorgeschlagen werden.

Das Instrument mit der Bezeichnung ROSITA (Röntgen Survey with an Imaging Telescope Array), ein Röntgenteleskop auf der Internationalen Raumstation ISS, soll eine Himmelsdurchmusterung im Breitbandröntgenbereich von 0.5 keV bis 10 keV durchführen, in der bisher verborgene Röntgenquellen systematisch aufgespürt werden. ROSITA ist im Gegensatz zu früheren Röntgendurchmusterungen im gleichen Energieband etwa hundertmal empfindlicher und hat ein etwa hundertmal besseres Winkelaufklärungsvermögen. ROSITA soll weit mehr als 100 000 neue Röntgenquellen entdecken, in der Mehrzahl absorbierte aktive Galaxienkerne, aber auch etliche 10 000 neue Galaxienhaufen, zum Teil bis zu sehr großen kosmologischen Entfernungen. Das ROSITA-Teleskop soll mit einem verbesserten Nachbau des Spiegelsystems von ABRIXAS und mit einem im Vergleich mit XMM wesentlich weiterentwickelten CCD-Detektor verwirklicht werden. Die speziell für ROSITA entworfene Kamera kann als Prototyp des für die in Planung befindliche ESA-Mission XEUS vorgesehenen Detektors betrachtet werden. So ist es im Vergleich zu ABRIXAS möglich, die wissenschaftliche Leistungsfähigkeit noch erheblich zu steigern. ROSITA wurde im Herbst 2001 vom Gutachterausschuss des DLR positiv bewertet und im Frühjahr 2002 von den ESA-Gremien (AWG, SSAC) zur Aufnahme in das ESA-ISS-Programm empfohlen. Die ESA führt nun zunächst eine Phase-A-Studie zur Akkommodation auf der internationalen Raumstation durch.

ROSITA

Die Sonnenatmosphäre ist ein komplexes, dynamisches System. Ihre einzelnen Schichten sind von der Photosphäre bis in die Korona hinein magnetisch miteinander gekoppelt. Sie müssen daher als ein zusammenhängendes System untersucht werden. Dazu sind simultane Messungen über einen möglichst großen Wellenlängenbereich und mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung nötig. Das von einem Ballon getragene 1-m-Teleskop SUNRISE soll in einer Höhe von 40 Kilometern die Sonne beobachten. Insbesondere sollen Spek-

SUNRISE

troskopie im sichtbaren und UV-Bereich bis herunter zu einer Wellenlänge von 200 nm möglich sein. SUNRISE soll auch zur technischen und wissenschaftlichen Vorbereitung künftiger Weltraumteleskope auf dem Solar Orbiter dienen. Es wird unter deutscher Führung und amerikanischer und spanischer Beteiligung entwickelt und gebaut. Die Kombination von GREGOR und SUNRISE schafft die Voraussetzung, um in Deutschland auch in der kommenden Dekade Sonnenphysik von internationalem Rang betreiben zu können. So werden deutsche Sonnenphysiker mit SUNRISE voraussichtlich weltweit erstmals die Sonne auf der wichtigen Skala auflösen, auf welcher der magnetische Fluss gebündelt ist (SUNRISE wird 35 km auf der Sonne auflösen können). Vor allem in Kombination mit einem erweiterten Wellenlängenbereich (Infrarot im Fall von GREGOR, Ultraviolett bei SUNRISE) sind Durchbrüche bei der Erforschung der Magnetokonvektion (Plasma-physik) und der Chromosphäre, eines wichtigen, aber wenig verstandenen Teils der Sonnenatmosphäre, zu erwarten. SUNRISE soll in deutsch-amerikanischer Zusammenarbeit verwirklicht werden. Die Phase B wurde vom DLR bewilligt und hat bereits begonnen; die NASA hat auch den amerikanischen Beitrag für die Phase C/D bewilligt, inklusive des ersten Ballonfluges.

3.5 Neue Initiativen: Astroteilchen- und Gravitationswellenforschung

Zwei neue Gebiete der physikalischen Grundlagenforschung, die Teilchen- und die Gravitationswellenphysik, halten gerade in eindrucksvoller Weise Einzug in die Astrophysik.

Neutrinos

In den neunziger Jahren gelang es erstmals, die Hauptkomponente der solaren Neutrinos nachzuweisen und damit das sogenannte „solare Neutrino-Problem“ klar herauszustellen. Das unter deutscher Leitung entstandene GALLEX im Gran-Sasso-Massiv, das russisch-amerikanische Experiment SAGE und der japanische Detektor Super-Kamiokande spielten hierbei die entscheidende Rolle. Insbesondere haben diese Beobachtungen den Verdacht verstärkt, dass Neutrinos eine Ruhemasse besitzen. Diese Ergebnisse müssen zu einer Erweiterung des etablierten Standardmodells der Elementarteilchenphysik führen, nach dem die Neutrinos masselos sind. Dieses neue Erkenntnis hat darüber hinaus eine ganze Reihe von Neutri-

noexperimenten angeregt, welche der Astrophysik ein neues Beobachtungsfeld eröffnen werden.

Der Aufbau der nächsten Generation von Neutrinoexperimenten, insbesondere GNO, BOREXINO und LENS, mit denen die Massen der verschiedenen Neutrinosorten bestimmt werden sollen, ist für die Astrophysik von sehr hoher Priorität. Die Technologie zur Beobachtung astrophysikalischer Neutrinoquellen, Tscherenkow-Detektoren im Polareis sowie unter Wasser, wird zur Zeit mit signifikanter deutscher Beteiligung aufgebaut.

Am weitesten fortgeschritten ist das Projekt AMANDA am Südpol, an dem deutsche Forscher maßgeblich beteiligt sind. Die Vorhersagen astrophysikalischer Neutrino Flüsse sind noch sehr unsicher. Man kann jedoch davon ausgehen, dass der Detektor der nächsten Generation mit einem Volumen von etwa einem Kubikkilometer, genannt ICECUBE, oder ein vergleichbares europäisches Experiment im Mittelmeer, genannt ANTARES, zum ersten Mal Neutrinoastronomie erlauben wird, die ein hohes Entdeckungspotenzial beinhaltet. ICECUBE könnte ab 2008 für etwa zehn Jahre den Neutrinohimmel erforschen.

*AMANDA
und ICECUBE*

Zugleich mit den elektromagnetischen Signalen aus dem Weltraum erreichen hochenergetische kosmische Teilchen anderer Art die Erde. Dies sind vor allem Atome, die aufgrund ihrer großen Energie vollständig ionisiert sind, also Atomkerne, und sie bilden die so genannte Kosmische Strahlung. Ihre räumliche Energiedichte ist enorm und vergleichbar mit der des interstellaren und intergalaktischen thermischen Gases. Die Gammaastronomie zeigt, dass diese Teilchenkomponente weiträumig im Universum verteilt ist. Bei den höchsten Energien übertrifft die Effizienz der Beschleunigung der Teilchen alle irdischen Teilchenbeschleuniger bei weitem und lässt sich auch kaum durch bekannte kosmische Objekte und mit ihnen assoziierte dynamische Prozesse erklären. Möglicherweise stammen derartige Teilchen daher aus dem Urknall und erreichen uns als Zerfallsprodukte damals erzeugter und sonst im Kosmos nirgends mehr herstellbarer Teilchen. Ihr Nachweis erfolgt durch die beim Aufprall auf die Atmosphäre erzeugten Schauer von Sekundärteilchen und Lichterscheinungen. Untersuchungen der Kosmischen Strahlung bis zu den höchsten Teilchenenergien von etwa 10^{20} eV sind derzeit nur in sehr beschränktem Umfang möglich. Sie ermöglichen es aber, die Vorgänge in Supernovaüberresten oder in der Umgebung von Pulsaren zu analysieren. Das derzeit geplante Pierre-Auger-

*Pierre-Auger-
Experiment*

Experiment, an dem auch deutsche Physiker beteiligt sind, wird zudem Aussagen über die Existenz exotischer Teilchenformen wie magnetische Monopole und Strings erlauben.

*Experimentelle
Suche nach
Dunkler Materie*

Der Großteil der Materie im Universum liegt höchstwahrscheinlich als nichtbaryonische Dunkle Materie vor, einer bisher unbekanntem und nicht erforschten Form von Materie, die mit normaler Materie nur sehr schwach in Wechselwirkung tritt. Nach Teilchen der Dunklen Materie wird zum einen mit den größten Elementarteilchenbeschleunigern gesucht. Zum anderen kann man die vermutlich omnipräsente Dunkle Materie durch ihre Streuung an Kernen normaler Materie nachweisen. Die dafür erforderlichen großen und hochempfindlichen Detektoren erfordern erhebliche Weiterentwicklungen der Nachweistechiken; hier seien Tieftemperaturdetektoren wie im CRESST-Projekt oder neuartige Siliziumdetektoren wie bei GENIUS genannt. Die kommende Generation von Experimenten könnte erstmals die positive Identifizierung der Dunklen Materie ermöglichen, mit weitreichenden Konsequenzen für die Astrophysik, Teilchenphysik und Kosmologie. Deutsche Gruppen sind im Bereich der Teilchenastrophysik sehr aktiv. Das Gran-Sasso-Labor, in dem diese Experimente arbeiten, wird auch in den nächsten zehn Jahren für die Teilchenastrophysik weiterhin eine zentrale Funktion haben (Abbildung 3.9).



Abb. 3.9: Schematischer Querschnitt durch das Gran-Sasso-Labor. Deutlich zu sehen sind die drei Laborhallen, die unter anderem die Experimente GALLEX/GNO, CRESST und BOREXINO beherbergen, sowie der durchgehende Autotunnel. (LNGS)

Für die Astronomie mit Gravitationswellen sind die vorbereitenden wichtigen technologischen Schritte getan. Die ersten großen bodengebundenen Detektoren, darunter das deutsche GEO600-Instrument in Hannover, liefen im Jahre 2001 an. Ein Einbringen der GEO600-Technologie in Nachfolgeprojekte (LIGO-II, VIRGO-II) ließe mit hoher Wahrscheinlichkeit die Entdeckung von hochfrequenten Gravitationswellen, wie sie bestimmte Sterne aussenden, erwarten.

Der wesentliche Schritt zum Nachweis verschmelzender, massereicher Schwarzer Löcher in den Zentren von Galaxien in dem von der Erde aus nicht zugänglichen Niederfrequenzbereich wird jedoch erst durch das Gravitationswelleninterferometer im Weltraum, LISA, möglich sein. LISA (Laser Interferometer for Space Application) ist ein gemeinsames Projekt von NASA und ESA. Es wird aus drei Satelliten bestehen, die an den Spitzen eines gedachten Dreiecks mit fünf Millionen Kilometern Seitenlänge die Sonne umkreisen sollen (Abbildung 3.10). Über Laserstrahlen lässt sich die Entfernung der Satelliten und damit auch der Durchgang von Gravitationswellen exakt messen. Deutsche Gruppen sind an der Konzeption von LISA maßgeblich beteiligt.

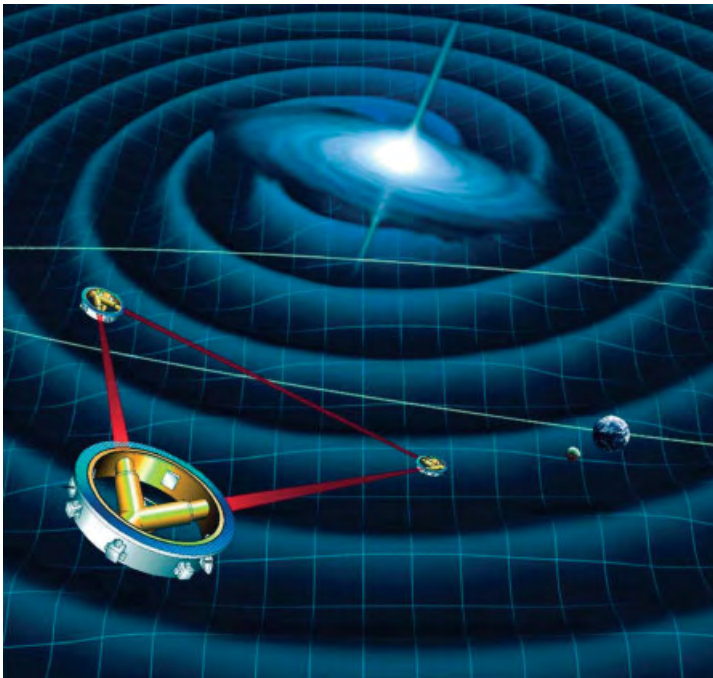


Abb. 3.10: Konzeption des LISA-Interferometers zur Messung von Gravitationswellen im Weltraum. (ESA)

3.6 Die Projekte des nächsten Jahrzehnts

Eine erfolgreiche und wettbewerbsfähige Beteiligung deutscher Forscher an den großen internationalen Projekten nach 2010 erfordert eine frühzeitige Positionierung sowie die Führerschaft und aktive Teilnahme an Instrumentenentwicklungen und Vorentwicklungen kritischer Technologien (Abbildung 3.11).

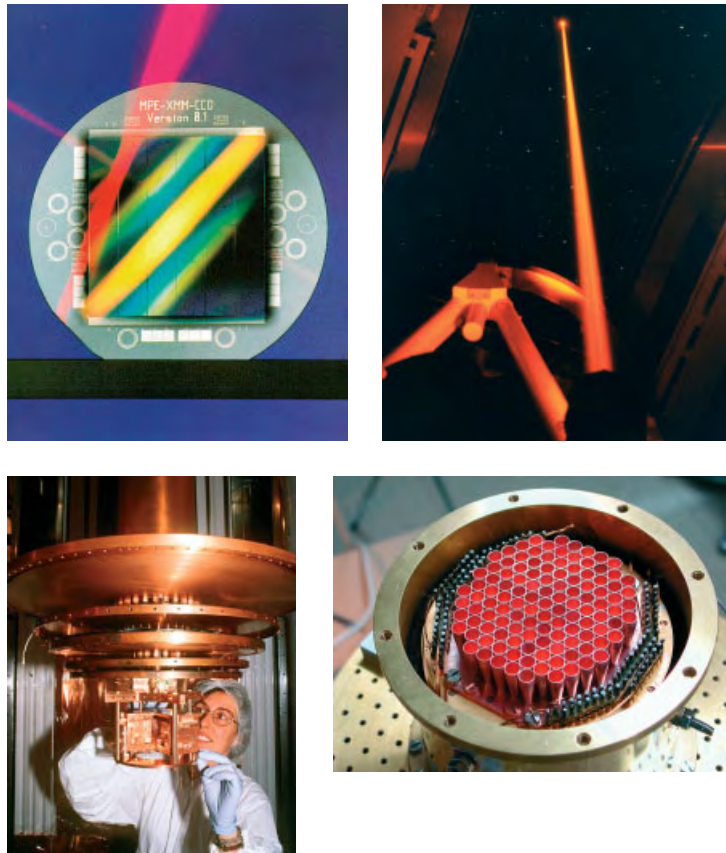


Abb. 3.11: Technologieentwicklungen für die Zukunft: Der abbildende Röntgendetektor EPIC für XMM-Newton (oben links), der ALFA-Laser für adaptive Optik mit dem 3.5-Meter-Teleskop auf dem Calar Alto (oben rechts), der kryogene CRESST-Detektor zur Suche nach Teilchen Dunkler Materie (unten links) und das MAMBO-Bolometer-Array für Beobachtungen im Millimeterbereich mit dem 30-Meter-Teleskop des IRAM auf dem Plateau de Bure (unten rechts). (MPE/MPIA/MPP/MPIfR)

Die Radioastronomie hatte schon früh in den sechziger/siebziger Jahren eine rapide technologische Entwicklung erlebt, die in dem Bau großer Einzelteleskope (zum Beispiel dem 100-m-Teleskop in Effelsberg), verbundener Interferometer (zum Beispiel VLA, MERLIN, WSRT) und interkontinentaler Interferometrie (VLBA, EVN) mündete. Während ein Teil der Radioastronomie sich nun immer höheren Frequenzen zuwendet, steht mittel- bis langfristig die langwelligere Radioastronomie ebenfalls vor weiteren wesentlichen Verbesserungen ihrer Möglichkeiten. Die Steigerung von Rechnerleistung und des Datendurchsatzes von Computernetzen erlaubt eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit von Radioteleskopen und die Entwicklung neuer Teleskopkonzepte. Durch Einsatz moderner Korrelatoren und Glasfaserverbindungen sowie dem Hinzufügen weiterer Elemente sollen zum Beispiel das VLA und MERLIN um einen Faktor 10 bis 50 empfindlicher werden und auch deutlich höhere Auflösungen bekommen (EVLA, e-MERLIN, e-VLBI). Auch Einzelteleskope werden durch Multihornsysteme zunehmend effektiver.

Square Kilometre Array (SKA)

Besonders beeindruckend wird die Entwicklung bei den neuartigen Softwareteleskopen erwartet. Dabei werden Radiowellen von einzelnen Elementen fast omnidirektional aufgenommen, digitalisiert und dann in einem Zentralrechner korreliert. Damit lassen sich mehrere, beliebig flexible Antennenkeulen synthetisieren, störende Radiointerferenz ausblenden und mehrere Objekte gleichzeitig, teilweise sogar im nachhinein, beobachten. Eine erste Entwicklung in dieser Richtung in den nächsten Jahren wird LOFAR (10 MHz bis 200 MHz) und später, mit Fortschreiten der Technologie, das Square Kilometre Array (SKA) sein. In dieser Anlage sollen über 200 Radioteleskope mit einer effektiven Gesamtfläche von einem Quadratkilometer arbeiten. Dabei wird das SKA etwa hundertmal empfindlicher sein als zur Zeit verfügbare Instrumente, was zusammen mit der Mehrfachkeulentechnik die Effizienz gerade im Bereich von Durchmusterungen gewaltig steigern wird. Das SKA soll die Untersuchung erster Strukturen im jungen Universum im Frequenzbereich von einigen Megahertz bis Gigahertz erlauben. Eine andere Anwendung schneller Datenübertragung wird VLBI in Echtzeit sein (Realtime-VLBI), womit man zum Beispiel schnell auf explosive Phänomene reagieren kann.

Die rapide technologische Entwicklung erfordert in den nächsten Jahren die Entwicklung von VLT-Instrumenten der zweiten Generation, um im weltweiten Wettbewerb der neuen Großteleskope mitzuhalten. Gleichzeitig beginnen bereits

Overwhelmingly Large Telescope (OWL)

jetzt die Studien und Vorentwicklungen für die Generation der Großteleskope nach dem VLT. Neue Initiativen für Teleskope mit Spiegeln, deren Durchmesser 30 bis 100 Meter betragen sind derzeit im Entstehen.

Ein Beispiel ist das Overwhelmingly Large Telescope (OWL) der ESO. Teleskope dieser Größenordnung verlangen eine Reihe neuer Entwicklungen, beispielsweise für die multikonjugierte adaptive Optik oder mögliche interferometrische Verfahren. Hier haben deutsche Gruppen mit der Entwicklung des adaptiven Optiksystems ALFA am Calar Alto bereits entscheidende Vorarbeiten geleistet (Abbildung 3.11). Die Weiterentwicklung von Schlüsseltechnologien, bei denen deutsche Gruppen eine weltweit führende Position einnehmen, ist auch für diese nächste Generation bodengebundener Teleskope notwendig.

Weltraumprojekte

Bei der europäischen Raumfahrtagentur ESA sind mehrere Missionen mit hoher Priorität in der Vorauswahl und werden in den nächsten Jahren im Detail studiert und vorbereitet. Im Bereich der Astrophysik sind dies die Astrometriemission GAIA, die Sonnenphysikmission Solar Orbiter, das Röntgenobservatorium XEUS, die Interferometriemission DARWIN und das bereits oben erwähnte Gravitationswelleninterferometer LISA.

GAIA

Die ESA Cornerstone-Mission GAIA (Abbildung 3.12) ist der nächste Schritt in der Astrometrie nach Hipparcos. Der derzeitige Start der Mission ist für 2012 geplant, könnte aber aufgrund der weit fortgeschrittenen Technologieentwicklung bereits früher stattfinden. GAIA besteht aus zwei 1,7-m-Teleskopen, die in entgegengesetzte Richtungen schauen, um so Positionen von bis zu einer Milliarde Sternen auf 10 Mikrobogensekunden messen zu können. GAIA wird es möglich machen, die dreidimensionale Verteilung und die Bewegungen von Sternen über die gesamte Milchstraße zu messen. Damit wird die Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte der Milchstraße und die Verteilung der Dunklen Materie sichtbar gemacht werden können. Die Präzision der Daten wird es auch ermöglichen, jupiterähnliche Planeten um benachbarte Sonnen nachzuweisen, sowie die Einsteinsche Relativitätstheorie auf 10^{-6} Genauigkeit zu testen.

Solar Orbiter

Solar Orbiter ist der nächste große Schritt in der Sonnenphysik nach ULYSSES und SOHO. Solar Orbiter wird Beobachtungen und insituMessungen verbinden, und sich bis auf einen Abstand von 0.2 Erdbahnradien der Sonne nähern, um so die

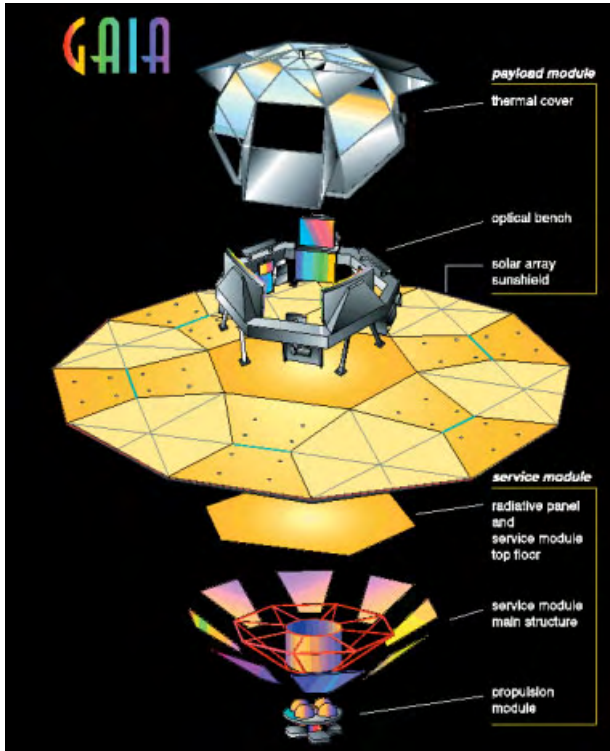


Abb. 3.12: Explosions-Zeichnung des GAIA Satelliten.

Aktivitätsregionen der Sonne mit wenigen 10 km Auflösung untersuchen zu können. Solar Orbiter wird auch zum ersten Mal die polaren Regionen der Sonne mit hoher Auflösung untersuchen können (Abbildung 3.13).

In der Hochenergieastrophysik ist das Observatorium XEUS der nächste, in der ESA als globale Zusammenarbeit geplante Schritt (Abbildung 3.14). Die Spiegel von XEUS sollen in einzelnen Modulen zur Internationalen Raumstation ISS gebracht und dort von einem Roboter zu einem Spiegelsystem mit 10 Metern Durchmesser und 50 Metern Brennweite zusammengebaut werden. Ein solches Teleskop hätte eine Winkelauflösung von wenigen Bogensekunden und im keV-Bereich eine um einen Faktor 100 bessere Empfindlichkeit als XMM-Newton. XEUS wird die Röntgenstrahlung der frühesten, im jungen Universum entstehenden aktiven Galaxien entdecken und direkt die relativistischen Effekte im starken Schwerefeld ihrer zentralen Schwarzen Löcher vermessen können. Darüber hinaus wird XEUS praktisch für alle Gebiete der Astrophysik wichtige Ergebnisse liefern. Wesentliche

XEUS

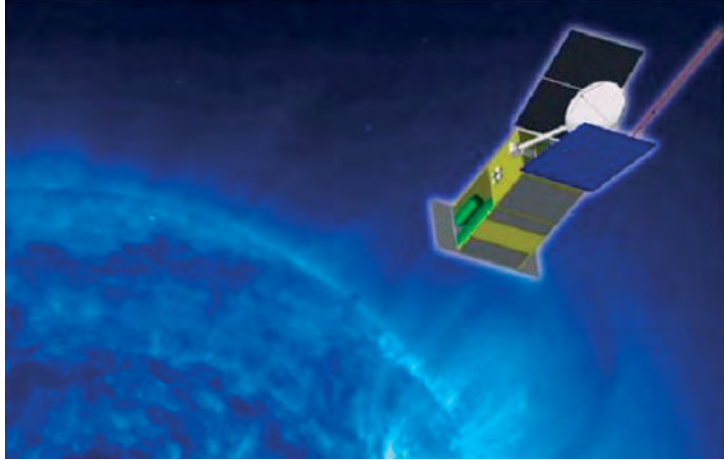


Abb. 3.13: Computerbild der Solar Orbiter Mission. (ESA)



Abb. 3.14: Konzept der XEUS-Mission. (ESA)

technologische Entwicklungen im Bereich schneller Halbleiterdetektoren sowie großer leichtgewichtiger Röntgenspiegel sind nötig, bei denen Deutschland momentan führend ist.

DARWIN

Die ehrgeizige DARWIN-Mission hat das Ziel, erdähnliche Planeten um Sterne in der Sonnenumgebung zu suchen und dann ihre chemische Zusammensetzung zu untersuchen (Abbildung 3.15). Die DARWIN-Mission erfüllt damit auch die lange bestehende Frage der Menschheit nach anderen erdähnlichen Welten und nach extraterrestrischem Leben. Zu diesem Zweck sollen sechs 1.5-m-Teleskope im Formationsflug ein Weltrauminterferometer bilden, das mit hoher räumlicher Auflösung die schwache Infrarotstrahlung eines

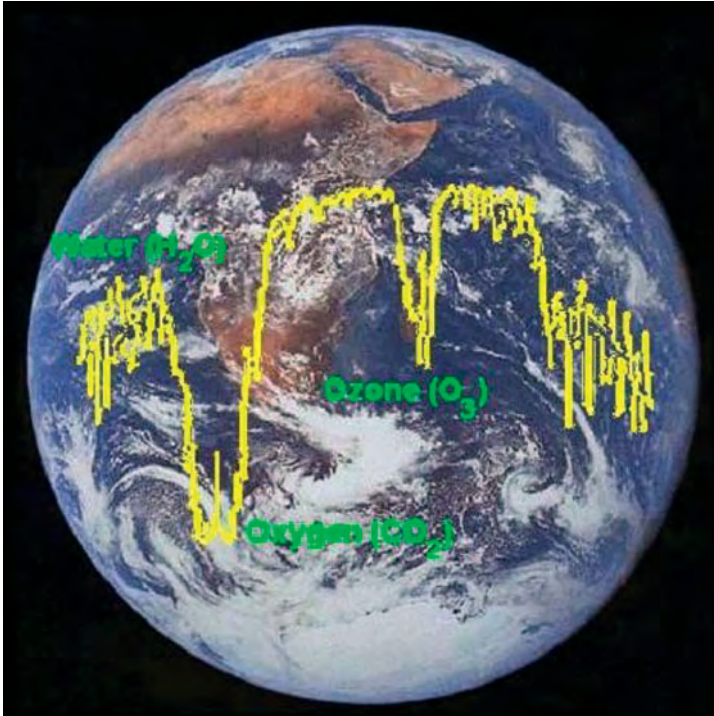


Abb. 3.15: Das Ziel der DARWIN-Mission ist es, erdähnliche Planeten um nahe Sterne zu entdecken und dann deren chemische Zusammensetzung zu untersuchen. Falls solche Planeten erdähnliche Bedingungen aufweisen, würde man eine sauerstoffreiche und ozonreiche Atmosphäre erwarten, die messbare Signaturen in den Infrarotspektren zur Folge hätte. (ESA)

erdähnlichen Planeten sehr nahe um einen Stern detektieren und spektral auflösen kann.

Nach der voraussichtlichen Beendigung von FUSE im Jahre 2005 und dem HST im Jahre 2010 ist ein weiterer Zugang zu UV-Beobachtungen wünschenswert, um einerseits den Zugang zu diesem wichtigen Spektralbereich aufrechtzuerhalten und andererseits die Expertise in der UV-Astronomie, wie sie gerade durch die IUE- und ORFEUS-Missionen gewonnen wurde, zu erhalten. Ein geplantes Weltraumprojekt für diesen Bereich ist das „World Space Observatory in the UV“ (WSO/UV), ein 1.7-Meter-Teleskop im Weltraum, das den UV-Bereich von 115 nm bis 320 nm mit sehr hoher spektraler Auflösung beobachten soll. Gegenüber dem Weltraumteleskop Hubble zeichnet sich WSO/UV durch seine zweifach höhere spektrale Auflösung und größere spektrale Abdeckung aus.

*Zukunft der
UV-Astronomie*

3.7 Künftige Rolle existierender Einrichtungen

3.7.1 Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM)

Weltweit führende Einrichtungen

Das von der französischen CNRS, dem spanischen IGN und der MPG gemeinsam finanzierte Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM) betreibt ein von der Volkswagenstiftung finanziertes 30-m-Teleskop auf dem Pico de Veleta in Südspanien (Abbildung 3.17 rechts) sowie ein aus bisher fünf, und bald sechs, 15-m-Teleskopen bestehendes Interferometer auf dem Plateau de Bure nahe Grenoble in Frankreich. Beide Teleskope zählen zu den weltweit führenden Einrichtungen

Box 3.1: Wissenschaftlicher Ertrag existierender Observatorien

Ein wichtiges Kriterium der wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit von Observatorien ist die Anzahl und die Rate von Publikationen, die auf Daten von diesen Observatorien beruhen. Als Beispiel zeigt Abbildung 3.16 die Publikationsrate einiger wichtiger Weltraumobservatorien, sowie des VLT und des Keck-Teleskops, als Funktion der Zeit nach ihrem Start/Beginn. So haben beispielsweise die mit starker deutscher Beteiligung durchgeführten ROSAT- und ISO-Missionen, ähnlich wie das Hubble-Weltraumteleskop und der IUE-Satellit, das Feld für eine Reihe von Jahren stark befruchtet, mit weit mehr als hundert Publikationen pro Jahr¹.

Eine ähnlich wichtige Rolle spielen die bodengebundenen Teleskope. Die Publikationsrate für die ESO-Teleskope stieg seit der Öffnung des VLT auf etwa 300 pro Jahr an. Die Raten von Calar Alto, Effelsberg und IRAM liegen etwa bei 50 bis 150 pro Jahr. Dies zeigt an, dass sich die Investitionen in der Vergangenheit gelohnt haben und weltweit wettbewerbsfähige Forschung ermöglicht haben.

¹ Die Erfassung der Publikationsraten geschieht mithilfe der Nennungen der jeweiligen Teleskope in den Titeln und Zusammenfassungen der in dem „Astrophysical Database System“ (ADS) zugänglichen Literatur, ist damit aber nicht frei von systematischen Fehlern, insbesondere bei den Bodenteleskopen.

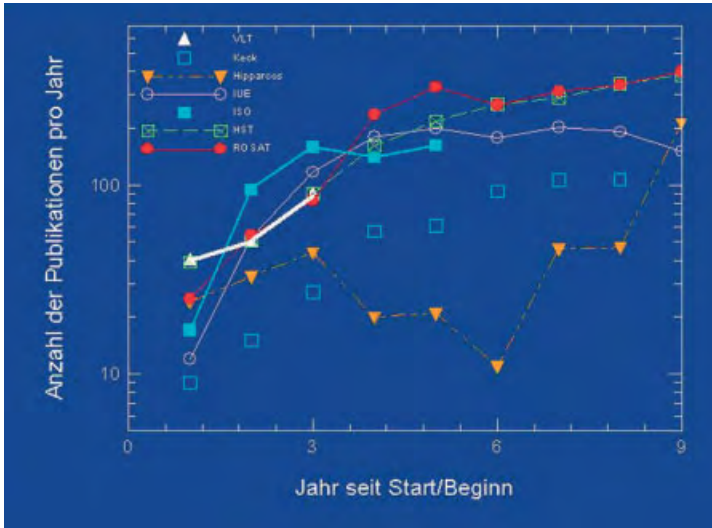


Abb. 3.16: Publikationsrate einiger wichtiger bodengestützter und Weltraum-Observatorien als Funktion der Zeit nach Operationsbeginn.



Abb. 3.17: Links: Das 100-Meter-Radioteleskop der MPG in Effelsberg. Rechts: Das 30-m-Millimeterteleskop auf dem Pico de Veleta in Südspanien. Beide Teleskope wurden in erheblichem Umfang durch Gelder der Volkswagenstiftung unterstützt. (MPIfR/IRAM)

ihrer Art. Durch Ausbau- und Verbesserungsmaßnahmen sowie durch den Einsatz empfindlicherer Empfänger wurde die Leistungsfähigkeit dieser Instrumente in den letzten Jahren kontinuierlich gesteigert, und auch für die Zukunft bestehen noch erhebliche Verbesserungsmöglichkeiten. Leider musste

das Interferometer durch zwei schwere Betriebsunfälle im Jahre 1999 teilweise außer Betrieb genommen werden und kann zur Zeit nur eingeschränkt arbeiten.

*Rolle gegenüber
ALMA*

Durch ihre Empfindlichkeit und geographische Lage werden die IRAM-Teleskope im nächsten Jahrzehnt für Beobachtungen von Quellen auf der Nordhalbkugel einzigartig bleiben. Weiterhin sind die Teleskope von großer Wichtigkeit für VLBI im Millimeterbereich. Langfristig wird aber insbesondere die Interferometeranlage durch das neue Gemeinschaftsprojekt ALMA relativiert werden. Es wäre sicherlich im Interesse eines möglichst effizienten Mitteleinsatzes, dass IRAM sich an den Aktivitäten bei ALMA auf der europäischen Seite intensiv beteiligt. Das könnte sowohl für den Hardwarebereich geschehen (Entwicklung von Empfängerkomponenten, Integration und Test ganzer Empfänger, Beteiligung an der Entwicklung des Korrelators) als auch im Bereich der Softwareentwicklung und Datenauswertung. IRAM sollte in Zusammenarbeit mit anderen Instituten ein europäisches Datenzentrum für ALMA aufbauen.

*Auf hohem
Leistungsstandard
halten*

Die von ALMA übernommenen Aufgaben werden einen in den nächsten Jahren wachsenden Anteil an den IRAM-Aktivitäten ausmachen. Synergieeffekte sollen helfen zu vermeiden, dass die Ressourcen für die weitere Leistungssteigerung bei den vorhandenen Instrumenten dadurch unterkritisch werden. Es sollte vielmehr im deutschen und europäischen Interesse sein, das 30-Meter-Teleskop und das Interferometer auf dem Plateau de Bure auf einem hohen Leistungsstandard zu halten, ähnlich wie dies in den USA mit dem Projekt CARMA (California Millimeter Array) angestrebt wird. Nur so kann die notwendige wissenschaftliche Vorbereitung auf das Projekt ALMA gesichert werden. Das schließt als einen sehr wichtigen Punkt die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ein. Eine enge Zusammenarbeit mit CARMA scheint hierbei wünschenswert.

3.7.2 Radioteleskop Effelsberg

*Das leistungs-
stärkste Einzelradio-
teleskop der Welt*

Das vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn (MPIfR) aus MPG-Mitteln betriebene 100-Meter-Teleskop in Effelsberg ist nach 30 Betriebsjahren immer noch das leistungsstärkste Einzelradioteleskop der Welt und ist Deutschlands einziges bei Radiowellen (Bereich von 70 cm bis 0.3 cm) arbeitendes Instrument (Abbildung 3.17 links). Es wird

von Wissenschaftlern des MPIfR und auch von zahlreichen anderen Instituten und Universitäten des In- und Auslandes genutzt.

Mit dem Teleskop wird ein breites Spektrum von Forschungsprojekten galaktischer und extragalaktischer Radioastronomie durchgeführt. Mit seiner großen Sammelfläche wird das Teleskop auch in den nächsten Jahren eine führende Rolle bei spektroskopischen Beobachtungen spielen und auf absehbare Zeit das wichtigste Element des European Very Long Baseline Interferometry (VLBI) Network und bei weltweiten VLBI-Beobachtungen sein. Am MPIfR läuft zur Zeit ein Programm mit dem Ziel, die technischen Eigenschaften des 100-Meter-Teleskops weiter zu verbessern, um beispielsweise die Oberflächeneinstellung zu optimieren, bessere und Multihornempfänger zu realisieren, Beobachtungen bei kürzeren Wellenlängen (unterhalb von 1 cm) mit größerer Effizienz und eine dynamische Beobachtungsplanung zu ermöglichen. Langfristig wird die Bedeutung des 100-Meter-Teleskops aber in dem Maße abnehmen, in dem das Square Kilometre Array (SKA) verwirklicht wird. Um die künftige Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit des Teleskops besser abschätzen zu können, wird empfohlen, in einigen Jahren eine Evaluierung durch eine Expertenkommission durchzuführen.

*Schlüsselement
des European
Very Long Baseline
Interferometry
Network*

3.7.3 Calar-Alto-Sternwarte

Über Jahrzehnte hinweg hat die vom Max-Planck-Institut für Astronomie geführte und überwiegend aus MPG-Mitteln finanzierte Calar-Alto-Sternwarte (offiziell Deutsch-Spanisches Astronomisches Zentrum, DSAZ) zusammen mit der europäischen Südsternearte auf La Silla für die deutschen Astronomen eine zentrale Rolle für Beobachtungen im Optischen und Nahinfraroten gespielt (Abbildung 3.18).

Zentrale Rolle

Angesichts der zahlreichen neuen Großteleskope, die insbesondere auch eine Schwerpunktverschiebung der MPG vom Calar Alto weg bedeuten, ist eine Überprüfung der Notwendigkeit und zukünftigen Rolle des Calar Alto (wie auch von La Silla) angebracht. Solche Untersuchungen haben in den letzten Jahren weltweit stattgefunden und auch dort ähnliche Ergebnisse ergeben wie im Falle des Calar Alto. Die Überlegungen der letzten Jahre, die in Zusammenarbeit zwischen der deutschen (MPG, Universitäten) und spanischen Nutzer-gemeinde und unter Einsetzung einer beratenden Kommis-

Überprüfung



Abb. 3.18: Luftaufnahme der Calar-Alto-Sternwarte in Südspanien. (MPIA)

sion angestellt wurden, zeigen, dass die zwei großen Teleskope am Calar Alto auch in der absehbaren Zukunft eine wertvolle, wenn auch veränderte Rolle spielen werden. Diese Rolle und ihre künftige zeitliche Entwicklung, auch im Hinblick auf den Calar-Alto-Vertrag mit Spanien, soll im Zeitraum 2005/2006 wieder evaluiert werden.

Zukünftige Rolle

Bahnbrechende Entdeckungen (zum Beispiel die der extrasolaren Planeten) sind in den letzten Jahren an kleinen Teleskopen (1 m bis 2 m) gemacht worden, weil nur an diesen Beobachtungen über lange Zeiträume durchführbar sind. Die Rolle dieser Teleskope wird nunmehr die 2- bis 4-m-Klasse übernehmen. Insbesondere werden langfristige Zeitserien, Messungen, die schnelle Reaktionszeiten erfordern, und vorbereitende Himmelsdurchmusterungen zentrale Aufgaben sein. Dabei wird in der Zukunft der Einsatz von robotischen Teleskopen und „remote observing“ immer wichtiger werden.

Die Calar-Alto-Teleskope können auch, wie im Falle des Projekts ALFA (adaptive Optik mit Laserleitstern), eine wichtige Rolle für innovative Instrumentenentwicklungen spielen.

Bei langen Beobachtungsprogrammen sollte insbesondere die Unterstützung durch die Universitäten über die Bereitstellung von Beobachtern gefördert werden. Dadurch kann der Calar Alto auch seinen Aufgaben im Bereich der Nachwuchsausbildung gerecht werden.

Der rasanten Entwicklung der spanischen Astronomie während der letzten zwanzig Jahre sollte Rechnung getragen werden, indem man bei spanischen Instituten und Wissenschaftlern eine sehr viel aktivere wissenschaftliche Mitwirkung und finanzielle Beteiligung an Betrieb und Nutzung des Calar Alto anregt.

*Spanische
Astronomie*

Die anderen europäischen Sternwarten (zum Beispiel auf La Palma) befinden sich in einer ähnlichen Situation wie der Calar Alto. Daher liegt es nahe, diese mittelgroßen Teleskope auf europäischer Ebene zu vernetzen. Die künftige Instrumentierung der Teleskope soll komplementär ausgelegt und Beobachtungszeit im Wettbewerb unter den Observatorien ausgetauscht werden. So können die Betriebskosten erheblich gesenkt werden. Um effizient arbeiten zu können, muss zum großen Teil vom bisherigen Gastbeobachterbetrieb abgegangen und Beobachtungen entweder im Remote-Betrieb oder als Service (zum Beispiel von für längere Zeit abgestellten Gastbeobachtern) durchgeführt werden.

*Synergieeffekte
und internationale
Vernetzung*

Der Calar Alto kann und braucht dann nicht mehr alle vorstellbaren Beobachtungsmodi und Instrumentierungen zur Verfügung zu stellen, sondern kann sich auf seine Stärken konzentrieren. Trotzdem könnte durch den Austausch mit anderen Teleskopen der deutschen Astronomie die ganze Palette an verschiedensten Instrumentierungen, gegebenenfalls an anderen Observatorien, erhalten werden. Es ist vorgesehen, die Vernetzung der europäischen Observatorien mit finanzieller Unterstützung durch die Europäische Union umzusetzen.

Der Calar Alto wird für die Forschung einer Reihe von deutschen Universitätsinstituten auch in absehbarer Zukunft eine wichtige, teilweise sogar entscheidende Rolle behalten (zum Beispiel Zugang zur Nordhalbkugel). Mit der Schwerpunktverschiebung der MPG weg vom Calar Alto wird deshalb ein zunehmendes Engagement der deutschen Universitätsinstitute (bzw. der DFG) und des spanischen Partners für den Calar-Alto-Betrieb bestimmend sein, wie und in welcher Form der Calar Alto weiterbetrieben werden sollte oder kann. Hierbei geht es sowohl um die Beistellung von Personal als auch von Betriebskosten.

*Rolle der deutschen
Universitäten*

3.7.4 Sonnentelkope

Mit der Inbetriebnahme der Einrichtungen zur Sonnenforschung gegen Ende der achtziger Jahre am Observatorio del Teide auf Teneriffa wurden die deutschen bodengebundenen Sonnenobservatorien an einem ausgezeichneten Standort konzentriert. Die bis dahin bestehenden Einrichtungen in Locarno und Capri wurden geschlossen.

Das Vakuum-Turmteloskop und das Gregory-Coudé-Teleskop

Die Einrichtungen auf Teneriffa umfassen das Vakuum-Turmteloskop (VTT) mit einem 70-cm-Spiegel des Kiepenheuer-Instituts (Freiburg) und das Gregory-Coudé-Teleskop (GCT) der Universitätssternwarte Göttingen mit einem 45-cm-Teleskop. Sie werden vom Astrophysikalischen Institut Potsdam, dem Kiepenheuer-Institut, der Universitätssternwarte Göttingen und seit 2000 auch von der MPG gemeinsam betrieben und von der internationalen Gemeinschaft der Sonnenphysiker genutzt. Am gleichen Standort entstand mittlerweile das französisch-italienische 90-cm-Sonnenteleskop THEMIS. Zusammen mit mehreren Experimenten zur Messung von Oszillationen der Sonne ist das Observatorio del Teide zum bedeutendsten Standort der bodengebundenen Sonnenforschung geworden.

Das VTT hält sowohl hinsichtlich seiner Größe als auch seiner ausgezeichneten Ausstattung an Postfokusinstrumenten dem internationalen Vergleich durchaus Stand und wird das in der nächsten Dekade weiter tun können. Eine der wichtigsten instrumentellen Entwicklungen am VTT ist eine konkurrenzfähige adaptive Optik für die Sonnenbeobachtung. Dagegen hat das GCT, das schon in Locarno betrieben wurde, seinen wissenschaftlichen Zenit überschritten. Es wird gegenwärtig durch das neue 1.5-m-Sonnenteleskop GREGOR ersetzt. Damit werden nicht nur die bereits geleisteten Investitionen in die Infrastruktur effektiv genutzt. Mit der geplanten Fertigstellung von GREGOR im Jahre 2005 wird eine führende Stellung der deutschen experimentellen Sonnenbeobachtung ausgebaut und die gute Zusammenarbeit mit den spanischen Kollegen weiter gestärkt werden können.

4 Struktur der astronomischen Forschung

4.1 Historische Entwicklung

Aus relativ bescheidenen Anfängen nach dem Zweiten Weltkrieg sind Astronomie und Astrophysik aus einem Nebenfeld an einigen deutschen Universitäten zu einem wichtigen Zweig der physikalischen Forschung in Deutschland geworden. Der Kern dieser sehr positiven Entwicklung besteht in einer starken Tradition in Stellarphysik und theoretischer Astrophysik an mehreren deutschen Universitäten. Dazu kam als wesentliches neues Element der Aufbau der Astronomie und Astrophysik in außeruniversitären Einrichtungen, insbesondere der Max-Planck-Gesellschaft. Heute kann sich die astrophysikalische Forschung in Deutschland in einer ganzen Reihe von Feldern inzwischen im weltweiten Wettbewerb messen und ist in einigen sogar an der Weltspitze. Ihre Stärke liegt überwiegend in einigen Zentren sowie in kleineren Forschungsgruppen, die sich auf wenige Themen konzentrieren.

In der Nachkriegsentwicklung hat der Ausbau von Förderinstrumenten der DFG und des BMBF (inklusive DLR) neben dem starken Engagement der MPG eine entscheidende Rolle gespielt. Sie haben zum Beispiel die Mitgliedschaft Deutschlands in internationalen Organisationen, vor allem der Europäischen Südsternwarte ESO und der Europäischen Weltraumbehörde ESA, gefördert und zentrale nationale Förderinstrumente wie Sonderforschungsbereiche, Schwerpunkte, Verbundforschung und nationale Projekte in der extraterrestrischen Forschung zur Verfügung gestellt. Die Unterstützung des BMBF, des DLR, der MPG, sowie von Stiftungen (VW-Stiftung, Krupp-Stiftung) haben auch die Finanzierung von mehreren größeren und vielen kleineren Projekten möglich gemacht, an denen Deutschland ausschließlich (bei-

Förderinstrumente

spielsweise Radioteleskop Effelsberg) oder als starker bzw. federführender Partner (Calar-Alto-Observatorium, Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich IRAM, Sonnenobservatorium Teneriffa, Röntgensatellit ROSAT, Heinrich-Hertz-Teleskop) beteiligt ist.

*Neue Forschungs-
bereiche*

Eine wichtige Entwicklung der letzten Jahre ist das zunehmende Interesse der Teilchenphysiker und Kernphysiker an astrophysikalischen Fragen. Dies hat in Deutschland, wie auch international, zur Bildung des neuen Forschungsfeldes der Astroteilchenphysik geführt, das sich mit Fragen beschäftigt, in der sich Teilchenphysik und Astrophysik gegenseitig ergänzen und befruchten. Hierzu zählen das Neutrinoexperiment GALLEX und das Hochenergieobservatorium HEGRA.

*Numerische
Astrophysik*

Einen ähnlichen Synergieeffekt kann man auch im Zusammenspiel Astrophysik/Numerik beobachten: Die Entwicklung der numerischen Mathematik ist soweit vorangeschritten, dass ihre Methoden und Verfahren für die Lösung realistischer astrophysikalischer Probleme Anwendung finden. Dieses wechselseitige Interesse ist insbesondere im Rahmen verschiedener SFBs und DFG-Schwerpunkte gefördert worden.

*Zunahme der
extragalaktischen
Forschung und
Kosmologie*

In den letzten zehn Jahren ist ein deutlicher Anstieg in der Beschäftigung mit extragalaktischen und kosmologischen Fragen zu bemerken. Während vor diesem Zeitraum dieses Gebiet in der deutschen Astronomie nur wenig vertreten war, zeigt sich unter anderem in der Publikations- und Impaktstatistik (Box 4.1) sowie im Anstieg der im internationalen Wettbewerb gewonnenen Beobachtungszeit bei den großen Observatorien, wie bei der ESO oder am Weltraumteleskop Hubble (siehe Verbundforschungsbericht von BMBF und DLR), dass Deutschland auch in diesem Bereich eine international starke Stellung einnimmt. Auch die Anzahl der auf ROSAT-Beobachtungen basierenden Publikationen auf diesem Gebiet belegt dieses deutlich.

Box 4.1: Impact deutscher astrophysikalischer Forschung in den letzten fünfzehn Jahren

Ein wichtiges Kriterium der Wettbewerbsfähigkeit einer Community ist der Impact ihrer Publikationstätigkeit, gemessen an der Anzahl der Zitate anderer, weltweit im Felde Arbeitender. Es ist in solchen „bibliometrischen“ Vergleichen fast unmöglich, eine Reihe von verzerrenden Faktoren auszuschalten, wie beispielsweise das Zitierverhalten in verschiedenen Feldern und Ländern, die Normierung der Zitate auf die Größe einer Community etc. Dennoch hat sich als ein über Feldergrenzen hinweg anwendbares Erfolgskriterium die Anzahl von referierten Arbeiten herausgestellt, die sehr häufig zitiert werden. Untersucht man in diesem Sinne die mehr als 19000 referierten Publikationen mit Autoren in deutschen Institutionen seit 1985, die in der ADS-Datenbank (Astrophysical Data System) geführt werden, findet man 110 Publikationen mit mehr als 100 Zitaten in diesem Zeitraum. Diese „high impact“-Publikationen teilen sich wie folgt auf die verschiedenen Felder auf.

Sortiert nach den wissenschaftlichen Themen der Denkschrift:

- Das Universum – Entstehung, Entwicklung und großräumige Struktur: 25
- Galaxien und massereiche Schwarze Löcher: 31
- Materiekreislauf: 29
- Stern- und Planetenentstehung und extrasolare Planeten: 17
- Sonstige: 8

Aufgeteilt nach beobachtender Astronomie in den verschiedenen Wellenlängenbereichen und nach Theorie:

- Gammaastronomie: 9
- Röntgenastronomie: 16
- UV-Astronomie: 4
- Optische Astronomie: 23
- Infrarot-, Submillimeter- und Millimeterastronomie: 17
- Radioastronomie: 5
- Theorie, einschließlich numerischer Simulationen: 31
- Sonstige: 5

Die Verteilung in den Beobachtungsbereichen spiegelt im Wesentlichen die technologische Entwicklung der letzten Jahre in den verschiedenen Wellenlängenbereichen wider.

4.2 Gegenwärtiger Stand

Durch die genannten Investitionen in Institutionen und Personal sowie in Infrastruktur und Instrumente sind die deutschen Astronomen und Astrophysiker heute in einer Reihe von Gebieten in der Lage, internationale Spitzenforschung durchzuführen. Hier sind neben dem Traditionsgebiet Stellarphysik die Numerische Astrophysik, sowie insbesondere die neuen Gebiete der beobachtenden Astronomie zu nennen: Radio-, Infrarot-, Röntgen- und Gammaastronomie.

Forschungszentren München/Garching ist inzwischen zu einem der weltweit bedeutendsten Zentren der astronomischen Forschung geworden. In kleinerem Umfang gilt dies auch für Heidelberg, Bonn und Potsdam/Berlin. Die wissenschaftliche Bedeutung dieser Standorte ist teilweise durch die jeweilige Präsenz eines oder mehrerer Max-Planck-Institute mit astrophysikalischem Schwerpunkt bedingt. Der Rat Deutscher Sternwarten (RDS) als oberstes Gremium hat heute 35 Mitgliedsinstitute, wobei allein zehn in den letzten zehn Jahren aufgrund der Wiedervereinigung, aber auch wegen der Erweiterung in neue Forschungsgebiete, hinzugekommen sind (Kapitel 6 enthält eine detaillierte Aufschlüsselung des relevanten Zahlenmaterials).

Bedeutende Forschungsgebiete Im Folgenden seien einige der Gebiete genannt, in denen die deutsche Astronomie nachweislich (Publikationen, Zitierungen, eingeladene Vorträge, Einwerbungen von internationaler Beobachtungszeit und Fördermitteln, internationale Zusammenarbeit) eine internationale Spitzenstellung einnimmt (siehe Box 4.2). Im wissenschaftlichen Bereich sind dies vor allem:

- Beobachtende und theoretische Stellarastrophysik, einschließlich der Sonne und der Endstadien der Sternentwicklung,
- Astrometrie und Stellarstatistik,
- Schwarze Löcher und Galaxienkerne, Galaxienentwicklung,
- Numerische Astrophysik,
- Sternentstehung, interstellares Medium und Astrochemie,
- Beobachtungen und Theorie der kosmologischen Strukturentwicklung,
- Gravitationslinsen und Gravitationswellenforschung,
- solare Neutrinos.

Box 4.2: Förderung der Astronomie in Deutschland im internationalen Vergleich

Die *finanzielle Förderung* der Astronomie in Deutschland beträgt pro Jahr 226 M€ (im Jahre 2000; siehe Tabelle 5.7), d.h. 2,75 € pro Einwohner. Diese auf die Einwohner bezogene Summe ist etwas geringer als in den europäischen Nachbarländern, die etwa 2 % (Großbritannien), 18 % (Italien) und 29 % (Frankreich) mehr pro Bewohner für die Astronomie ausgeben; in den USA ist diese Zahl um 51 % größer, in Australien und Kanada beträgt sie nur 32 % bzw. 20 % des deutschen Anteils (Quelle: Denkschrift der Kanadischen Astronomie). Die relative Ausgeglichenheit im Vergleich mit den europäischen Ländern ist unter anderem auf die gemeinsame Mitgliedschaft bei ESO und ESA zurückzuführen. Die *personelle Situation* in der deutschen Astronomie ist im europäischen Vergleich hingegen sehr negativ zu bewerten. Dies soll durch einige Vergleiche belegt werden:

In der Anzahl der Mitglieder der International Astronomical Union nimmt Deutschland einen Platz im unteren Drittel ein, wenn man die IAU-Mitglieder bezogen auf die Einwohnerzahl (oder das Bruttosozialprodukt) betrachtet (siehe Tabelle 4.1). (Die Mitglieder der IAU werden von der IAU auf Vorschlag der nationalen Gremien, in Deutschland des Rates Deutscher Sternwarten, benannt). In Großbritannien ist die Anzahl permanent beschäftigter Astronomen zwischen 1994 und 2001 um 24 % auf 360 gestiegen (nimmt man Advanced Fellows und Royal Society University Research Fellows hinzu, beträgt die entsprechende Steigerung 21 % auf 411). Dem steht eine Anzahl von 472 Planstellen (C1 bis C4, A/BAT) im astronomischen Bereich, von denen schätzungsweise 350 permanent besetzt sind, und eine Stagnation zwischen 1989 und 1999 in Deutschland gegenüber (bei einem durch die Wiedervereinigung entstandenen Zuwachs der Bevölkerung um etwa 35 %). In Frankreich gibt es 720 permanent besetzte Stellen in der Astronomie, also etwa doppelt so viele wie in Deutschland, trotz einer um 28 % kleineren Bevölkerungszahl. Allerdings muss bei diesem Vergleich berücksichtigt werden, dass es in Frankreich praktisch keine Drittmittelstellen gibt.

Diese Schwäche des Personalstandes ist im Wesentlichen auf die hiesige deutliche Unterrepräsentanz der Astronomie innerhalb der Physik zurückzuführen, wenn man sie mit anderen Ländern vergleicht. Während es insgesamt an deutschen Universitäten etwa 1303 Physikprofessoren (C3 und C4) gibt, beträgt die Anzahl der astronomischen Professuren an Universitäten 46, d.h. ein Anteil von etwa 3,5 %. Nimmt man die außeruniversitären Professoren in der Astronomie hinzu, erhöht sich dieser Anteil auf etwa 7 %. Im Vergleich dazu ist der Anteil permanenter Astronomen innerhalb der Physik in Großbritannien von 21 % (1994) auf 29 % (2001) angestiegen. Auch im europäischen Durchschnitt lässt sich die Unterrepräsentanz der Astronomie innerhalb der Physik hierzulande ablesen: Während in Deutschland nur knapp 6 % der Dissertationen innerhalb der Physik aus der Astrophysik stammen, beträgt der relative Anteil der astrophysikalischen Anträge innerhalb der Physik bei dem Marie Curie Fellowship Programm der EU (wo die Antragsteller in der Regel frisch Promovierte sind) etwa 18 %; diese Zahl ist eine recht verlässliche Abschätzung für den Anteil der astronomischen Promotionen innerhalb der Physik im Bereich der EU.

Im Bereich der Technologie- und Instrumentenentwicklung ist deutsche Forschung zum Beispiel auf folgenden Feldern, die für die zukünftige Entwicklung wichtig sind, führend:

- Röntgenspiegel und energieauflösende Detektoren im Röntgen- und Gammabereich,
- hochauflösende Infrarot- und optische Astronomie (einschließlich Spektroskopie, adaptive Optik und Interferometrie),
- optische und Infrarotinstrumente für Großteleskope,
- Detektoren und Instrumente im Ferninfrarot-, Submillimeter- und Millimeterbereich,
- interkontinentale Radiointerferometrie,
- radiochemische Methoden der Isotopentrennung, kryogene Detektoren für Dunkle Materie,
- Laserinterferometrie zur Messung von Gravitationswellen,
- Stereoskopie mit Tscherenkow-Teleskopen und Luftschau-eranlagen,
- Algorithmen und Software für astrophysikalische Simulationen.

4.3 Forschungsinstitute

Heute ist astrophysikalische Forschung Hauptthema der Arbeit von dreiundzwanzig Universitätsinstituten, fünf Instituten der MPG und zwei der Leibniz-Gesellschaft, einschließlich des nach der Wiedervereinigung hinzugekommenen Astrophysikalischen Instituts in Potsdam (AIP). Dazu kommen drei Landesinstitute, einschließlich der Landessternwarte Thüringen/Tautenburg. Weiterhin gibt es drei außeruniversitäre Institute, in denen Fragen der Astrophysik zum wichtigen Teil des Forschungsprogramms gehören (siehe auch Tabellen 6.1 und 6.2). In diesen Instituten sind insgesamt 524 Wissenschaftler beschäftigt, davon 375 auf Planstellen, 47 auf C3 und 50 auf C4. Dazu kommen 624 Doktoranden und Diplomanden und 405 Ingenieure und Techniker. Damit gehört die deutsche Astronomie/Astrophysik-Gruppe inzwischen zu den zahlenmäßig größeren in Europa, obwohl sie gemessen an Einwohnerzahl und Bruttosozialprodukt immer noch im unteren Drittel rangiert (siehe Tabelle 4.1). Im Folgenden wird die Situation der Forschung an Universitätsinstituten und Max-Planck-Instituten etwas detaillierter beschrieben.

Astronomische Forschung an Universitäten ist in der Regel an separaten Astronomieinstituten angesiedelt, in einigen Fällen auch als Gruppen in Physikinstituten. Die astronomischen Universitätsinstitute sind in die jeweiligen Fachbereiche der Physik eingegliedert. Gemeinsame Lehrveranstaltungen und Kolloquien sorgen für Kontakte zwischen Physikern und Astronomen, und neue Forschungsfelder wie Astroteilchenphysik und Gravitationswellenforschung intensivieren die Zusammenarbeit.

Aufgabe der universitären Institute ist Forschung und Lehre, deren Verbindung sich als sehr positiv herausstellt. Einerseits wird die Forschung durch die Diplomanden- und Doktorandenausbildung enorm verstärkt und wäre ohne die aktive Mitarbeit der Studenten kaum mehr denkbar, andererseits ist die aktive Forschungstätigkeit von Hochschullehrern eine gute Voraussetzung dafür, dass in den Lehrveranstaltungen auch aktuelle Forschungsthemen kompetent behandelt werden und die Studierenden in aktiven Arbeitsgruppen ihre Diplomarbeiten anfertigen. Die Attraktivität der Astrophysik wird von Studenten bewusst wahrgenommen, wie der steigende Anteil von Physikstudenten zeigt, die Astronomie als Wahlpflichtfach belegen.

Die institutionelle Finanzierung ist eine Aufgabe der Bundesländer. Im Verlauf der letzten Jahre mussten die Universitätsinstitute zum Teil erhebliche Kürzungen ihrer Etats und insbesondere ihres Personals hinnehmen (siehe zum Beispiel Tabelle 6.3). Dadurch hat sich die seit langer Zeit bestehende institutionelle Infrastrukturschwäche weiterhin verstärkt. Die meisten deutschen Astronomieinstitute sind zu klein und zu schlecht ausgestattet. Es fehlt an den grundsätzlich notwendigen Sachmitteln: Reisemittel, Bibliotheksetat, EDV-Mittel, Gästemittel. Der Abbau der Personalstellen, der insbesondere zu einer dramatischen Verkleinerung des wissenschaftlichen Mittelbaus geführt hat, fand und findet in einer Epoche statt, in der die Astronomie weltweit eine enorme Entwicklung durchläuft (Kapitel 2).

Als Konsequenz dieser Kürzungen steht die Astronomie in Deutschland im internationalen Vergleich personell schlecht da (siehe Box 4.2).

Eine weitere Konsequenz des Stellenabbaus an den Universitäten ist der geringe Anteil der Universitätsinstitute an der gesamten astronomischen Forschung in Deutschland: Etwa 40 % aller C4-Stellen, beinahe 70 % aller Wissenschaftlerplanstellen und mehr als 70 % des Gesamtetats in der deutschen Astronomie und Astrophysik sind außerhalb der Universität angelagert (zum Vergleich: etwa 70 % der öffentli-

Tabelle 4.1: IAU-Mitgliedschaft

	Anzahl IAU-Mitglieder	Einwohnerzahl (Millionen)	Bruttonozialprodukt (Billionen US\$)	IAU-Mitglieder pro Million Einwohner
Schweden	100	8,9	0,23	11,2
Schweiz	80	7,3	0,29	11,0
Niederlande	172	15,7	0,39	11,0
Frankreich	643	58,9	1,43	10,9
Belgien	101	10,2	0,26	9,9
Dänemark	52	5,3	0,18	9,8
Großbritannien	561	58,7	1,26	9,6
Griechenland	99	10,6	0,12	9,3
USA	2300	276,2	8,08	8,3
Italien	437	57,3	1,15	7,6
Deutschland	455	82,1	2,18	5,5
Spanien	218	39,6	0,56	5,5
Österreich	32	8,1	0,22	4,0
Japan	471	126,5	4,09	3,7
Polen	121	38,7	0,15	3,1

QUELLE: <http://www.iau.org/IAU/Organization/admdoc/adhering.html> und Aktuell 2001, Harenberg Verlag

chen Aufwendungen für Bildung und Forschung fließen in die Universitäten).

Die Flexibilität und Leistungsfähigkeit der deutschen Universitätsinstitute hängt zu stark von Drittmitteln ab. Exemplarisch kann dies belegt werden durch die in Tabelle 6.2 dokumentierte Tatsache, dass 85 % der Doktoranden an Universitäten durch Drittmittel finanziert werden. Bearbeitungs- und Entscheidungszeiten von Drittmittelanträgen, die oft mehr als sechs Monate betragen, erschweren daher häufig den Entschluss eines Studenten zur Mitarbeit in einem Projekt. Die fehlende Planungssicherheit bei einer weitestgehend von Drittmitteln abhängigen Forschergruppe behindert den Wettbewerb um die besten Wissenschaftler: Stellenausschreibungen mit ihrer notwendigen Vorlaufzeit sind deswegen schwierig und an Universitäten selten. Das Problem wird durch die seit Jahren sinkende Bewilligungsquote von DFG-Anträgen im Normalverfahren weiter forciert. Die Notwendigkeit einer flexiblen Handhabung bei der Einstellung von Doktoranden wurde von der MPG erkannt und durch die Einrichtung der International Max Planck Research Schools Rechnung getragen;

ebenfalls bieten die Graduiertenkollegs der DFG innerhalb einer Förderperiode diese notwendige Flexibilität.

Die Dienstordnung an deutschen Universitäten macht es schwer oder gar unmöglich, dass Professoren längere zeitliche Abordnungen bekommen können. Im Gegensatz zu anderen europäischen oder amerikanischen Kollegen können deshalb deutsche Spitzenwissenschaftler kaum die Gelegenheit nutzen, eine zeitlich befristete Forschungstätigkeit an internationalen Einrichtungen wie der ESO oder anderen Universitäten und MPIs durchzuführen. Die unzureichende Repräsentation deutscher Wissenschaftler in leitenden Positionen bei ESO (von den acht Personen im ESO-Management ist keiner aus Deutschland) und ESA kann zum Teil auf dieses Problem zurückgeführt werden.

Die Gründung mehrerer Max-Planck-Institute in den sechziger Jahren hat erheblich dazu beigetragen, dass Deutschland wieder ein starker Standort der Astronomie wurde. Dabei war von zentraler Bedeutung, dass astronomische Großgeräte nach dem Krieg aufgebaut werden mussten und die dafür notwendige Institutsgröße an Universitäten nicht erreicht werden konnte. Die Errichtung der Sternwarte auf dem Calar Alto und der Bau des größten frei bewegbaren Radioteleskops der Welt, Effelsberg, sind Beispiele dafür.

Die Finanzierung der Forschung an den Max-Planck-Instituten wird im Wesentlichen von der Max-Planck-Gesellschaft geleistet; diese hat auf die weltweit starke Entwicklung der Astronomie dadurch reagiert, dass die Astronomie innerhalb der MPG verstärkt aufgebaut wurde.

An den Max-Planck-Instituten arbeiten mehrere Direktoren, denen jeweils eine Abteilung zugeordnet ist. Je nach Größe und Art des Instituts beheimaten die MPIs technische Abteilungen und Arbeitsgruppen für Nachwuchswissenschaftler. Das Verhältnis von Wissenschaftlerplanstellen und Anzahl der Direktoren variiert zwischen den MPIs, beträgt aber in der Regel mindestens sieben. Zusätzlich zu diesen Institutsstellen werben die MPIs in zunehmendem Maße Drittmittel (zum Beispiel der EU oder der Verbundforschung) ein, obgleich diese immer noch einen kleinen Anteil der Gesamtfinanzierung der MPIs ausmachen.

Im Gegensatz zu Universitäten können sich die MPIs weitgehend auf die Forschung konzentrieren. Die astronomischen MPIs sind jeweils an Standorten mit großen Universitäten angesiedelt worden, in denen Astronomieausbildung stattfindet. Die MPIs sind mit den Universitäten dadurch verbunden, dass einige der Wissenschaftler Privatdozenten oder

*Max-Planck-
Institute*

Honorarprofessoren an den Hochschulen sind, die sich an der Lehre beteiligen. Dadurch ergibt sich für die MPIs auch die Möglichkeit der Diplomanden- und Doktorandenausbildung. Die Gründung zweier astronomischer International Max-Planck Research Schools in Garching und Bonn wird die Anbindung der beteiligten MPIs an die Universitäten und die Ausbildungsaktivitäten weiter verstärken.

*Zugang zu
astronomischen
Großgeräten*

Experimentelle astronomische Forschung erfordert die Möglichkeit zur Beobachtung mit modernen Teleskopen. Die deutschen Astronomen haben über verschiedene Wege Zugang zu solchen Teleskopen; die zwei wichtigsten davon sind:

- Mitgliedschaft in der ESO und ESA: Für die optische Astronomie ist der Zugang zu den Teleskopen der ESO von größter Bedeutung. Die beiden Observatorien der ESO auf La Silla und dem Paranal beheimaten eine breite Palette großer Teleskope mit moderner Instrumentierung. Die Benutzung der vier 8.2-m-Spiegel des Very Large Telescopes und der leistungsfähigen Instrumentierung des VLT erlaubt den deutschen Astronomen absolute Spitzenforschung. Der deutsche Anteil an den aus den Mitgliedsländern gestellten und an den bewilligten Anträgen liegt im langjährigen Mittel bei etwa 30 %, also deutlich höher als der deutsche Anteil an den Mitgliedsbeiträgen. Das Weltraumforschungsprogramm der ESA ermöglicht deutschen Astronomen Zugang zu modernen Instrumenten im Weltraum. Bei vielen ESA-Missionen wird die Beobachtungszeit wie bei der ESO über Anträge vergeben, die aufgrund ihrer wissenschaftlichen Qualität und Originalität begutachtet werden. ESA-Missionen wie etwa Hipparcos oder ISO haben erheblich zur Forschung in Deutschland beigetragen; mit dem Ende 1999 gestarteten Satelliten XMM-Newton haben europäische Astronomen eine exzellente Position in der Röntgenastronomie, wobei Deutschland aufgrund der äußerst positiven Erfahrungen mit ROSAT eine bevorzugte Stellung einnimmt. Die ESA-Beteiligung am Hubble Space Telescope gewährleistet Zugang auch zu diesem für die UV-, optische und Nahinfrarotastronomie so wichtigen Teleskop. In der letzten Antragsperiode (Cycle 11) haben Forscher aus Deutschland mit acht akzeptierten Programmen nach den USA den größten Anteil erhalten.
- Teleskope mit deutscher Beteiligung: Der Aufbau des Observatoriums auf dem Calar Alto war für die optische Astronomie ein entscheidender Schritt, um konkurrenzfähige Beob-

achtungen durchführen zu können. Entsprechendes gilt für den Bau des Radioteleskops Effelsberg, die Beteiligung an IRAM und am HHT und den Bau und Betrieb von ROSAT. Diese Großprojekte wurden jeweils von Instituten der Max-Planck-Gesellschaft durchgeführt, teilweise mit erheblicher Finanzierung von außen (BMBF, DLR, Stiftung Volkswagenwerk). Ein signifikanter Teil der Beobachtungszeit an vielen dieser Instrumente steht im Antragsverfahren der gesamten deutschen Astronomengemeinde zur Verfügung.

Weiterer Zugang zu Teleskopen ergibt sich durch Beteiligungen einzelner oder Gruppen von Instituten an Observatorien, wie etwa dem Hobby Eberly Telescope oder in Zukunft dem LBT. Dieser Zugang ist allerdings im Wesentlichen auf die beteiligten Institute beschränkt. Die meisten großen Observatorien vergeben einen Teil ihrer Zeit an Beobachter, die nicht aus Trägerinstituten stammen, und um die sich also auch deutsche Forscher bewerben können. Die Schwierigkeiten dieser Art des Zugangs sind sehr unterschiedlich und in manchen Fällen extrem groß.

4.4 Instrumente der Forschungsförderung

Neben der institutionellen Grundförderung durch die MPG und die Länder und den Beiträgen zu den internationalen Organisationen ESO und ESA wird die astronomische Forschung in Deutschland noch durch andere Instrumente unterstützt, von denen die wichtigsten im Folgenden dargestellt werden.

Die Einrichtung der Verbundforschung Astronomie und Astrophysik durch das BMBF als Folge der Empfehlungen der letzten Denkschrift (1987) hat eine ganz erhebliche qualitative wie quantitative Stärkung der Astronomie gebracht. Einer der Bereiche der Verbundforschung ist die „Astronomie mit Großgeräten“ und unterstützt den Zugang zu großen nationalen und internationalen bodengebundenen Teleskopen. Dies führte unter anderem dazu, dass deutsche Universitäten zum ersten Mal in die Lage versetzt worden sind, aus eigener Kraft große Instrumente entwickeln zu können. Ein gutes Beispiel sind die Landessternwarte Heidelberg sowie die Universitätssternwarten Göttingen und München, die mit den Weltklasseinstrumenten FORS1 und -2 für das VLT technologisch höchst anspruchsvolle Instrumentierung entwickelt und gebaut haben.

*Verbundforschung
Astronomie
und Astrophysik*

Der zweite Verbundforschungsbereich unterstützt vornehmlich die Nutzung großer internationaler Weltraumobservatorien. Durch diese Förderung erhalten die in dem internationalen Wettbewerb um Beobachtungszeit erfolgreichen Wissenschaftler nicht nur die notwendige Planungssicherheit, sondern auch eine bedeutend schnellere und qualitativ hochwertigere Ausführung ihrer Projekte, was zu einer verbesserten Platzierung im internationalen Wettbewerb führt.

Durch den vor kurzem eingeführten Bereich der Astroteilchenphysik in der Verbundforschung wurde der rasanten Entwicklung dieses Gebietes Rechnung getragen; es wird erwartet, dass sich daraus ein erheblicher Innovationsschub für dieses zwischen der Teilchenphysik und der Astrophysik angesiedelte Forschungsfeld ergibt.

Der positive Effekt auch für die Studentenausbildung ist in diesen Beispielen ganz enorm, wie auch am Anstieg der Promotionen auf dem Gebiet der Astrophysik (siehe Tabelle 6.4) ersichtlich ist. Dennoch sind diese Entwicklungen eher den größten deutschen Universitätsgruppen zugute gekommen, die bereits eine gewisse kritische Masse aufzuweisen hatten.

Sonderforschungsbereiche, Schwerpunkte und Graduiertenkollegs der DFG

Die Verbundforschung des BMBF und des DLR hat sich als ein außerordentlich wichtiges unterstützendes Element im Bereich der Nutzung von Großgeräten (insbesondere für die Universitäten) erwiesen. Ein weiteres eminent bedeutsames und äußerst erfolgreiches Instrument sind Sonderforschungsbereiche, Schwerpunkte und Graduiertenkollegs der DFG. Die Bedeutung dieser Instrumente liegt in der Stärkung der interdisziplinären Zusammenarbeit von Forschern verschiedener Arbeitsrichtungen sowie der Koordinierung langfristiger Projekte zwischen Instituten. Diese Elemente kommen im Bereich der Astrophysik besonders zum Tragen, da zum einen astrophysikalische Forschung auf dem Zusammenspiel vieler verschiedener physikalischer Teilaspekte beruht und zum anderen die deutsche Astronomengemeinde in relativ viele kleine Einheiten zerstückelt ist und erst durch das Zusammenwirken eine überkritische Masse und Synergie erreicht wird.

Die Einrichtung des sehr erfolgreichen DFG-Schwerpunktes SPP 450 „Theorie kosmischer Plasmen“ (1987–1993) beispielsweise, der durch die letzte Denkschrift angeregt wurde, hat einen gewaltigen Impuls auf die weitere Forschung in der Astrophysik ausgeübt. Der DFG-Schwerpunkt SPP 451 „Kleine Körper im Sonnensystem“ (1987–1992) führte nachhaltig zu einer erheblichen Stärkung dieses Forschungsgebietes in Deutschland. Wesentliche Impulse für die Entwicklung

des Feldes der Sternentstehung in Deutschland kamen in den letzten Jahren zudem vom DFG-Schwerpunktprogramm SPP 471 „Physik der Sternentstehung“ (1995–2001), an dem sich eine Vielzahl von Instituten aktiv beteiligten. Es hat sich deutlich gezeigt, dass Fortschritte beim Verständnis der Sternentstehung nur durch die enge Zusammenarbeit zwischen Theoretikern und Beobachtern zu erreichen sind.

Durch den SFB 301 „Die Physik und Chemie der interstellaren Molekülwolken“ (1985–1999) ist die Universität Köln in der Lage gewesen, in den letzten fünfzehn Jahren eine weltweit anerkannte Rolle in der Millimeter- und Submillimeterastronomie einzunehmen. An den Universitäten Köln und Bonn sowie am MPI für Radioastronomie wurde im Jahre 2000 der neue SFB 494 „Die Entwicklung der interstellaren Materie: THz-Spektroskopie im Weltall und Labor“ eingerichtet, der auch Beiträge auf dem Gebiet der Sternentstehung liefern wird. Der SFB 328 „Entwicklung von Galaxien“ (1987–1998) hat die Position Heidelbergs als ein Zentrum der extragalaktischen Forschung etabliert, wie auch die Einrichtung des neuen SFBs 439 „Galaxien im jungen Universum“ im Jahre 1999 demonstriert. Ein erheblicher Innovationsschub wurde durch die Einrichtung des Münchener SFBs 375 „Astroeilchenphysik“ (seit 1995) erreicht, dessen interdisziplinärer Ansatz große Anziehungskraft auch für Studenten besitzt. Das Bonn-Bochumer Graduiertenkolleg GRK 118 „Die Magellanschen Wolken und andere Zwerggalaxien“ (1992–2001) hat in den vergangenen neun Jahren diese beiden Standorte eng zusammengebracht, eine große Zahl erfolgreicher Doktoranden ausgebildet und dabei erhebliche wissenschaftliche Fortschritte erzielt; diese bilden auch ein Fundament für das im Jahre 2002 eingerichtete Graduiertenkolleg „Galaxiengruppen als Laboratorien für baryonische und Dunkle Materie“, an dem ebenfalls die Universitäten Bochum und Bonn beteiligt sind. Weiterhin sei hier auch die kürzlich gegründete DFG-Forschergruppe „Laborastrophysik“ an den Universitäten Chemnitz und Jena erwähnt.

Im Rahmen des DLR-Programms „Erforschung des Welt-raums“ wird der deutsche Anteil des ESA-Wissenschaftsprogramms (derzeit etwa 93 M€ pro Jahr ohne Raumstation ISS) sowie die Projektförderung im Rahmen der nationalen Extraterrestrikerforschung (derzeit etwa 37 M€ pro Jahr) finanziert. Etwa die Hälfte dieser Mittel werden jeweils für die Astronomie aufgewendet. Das nationale Programm ermöglicht die Finanzierung von Instrumentbeiträgen zu ESA-Missionen (zum Beispiel. XMM-Newton, Herschel), die Förderung internatio-

*Nationales Extra-
terrestrikprogramm
des DLR*

ner Kooperationen (zum Beispiel ROSAT, SOFIA) und nicht zuletzt die Entwicklung eigener nationaler Kleinmissionen (zum Beispiel ABRIXAS) und stellt deshalb das Herz der Wettbewerbsfähigkeit und Innovationsfähigkeit deutscher Forschungsinstitute dar. Es bietet damit größere Handlungsspielräume zur Durchsetzung nationaler Interessen als beispielsweise das Pflichtprogramm der ESA. Um die Investitionen im Rahmen der ESA (unter anderem auch für die Raumstation) optimal nutzen zu können und insbesondere die Technologieentwicklung in deutschen Instituten und Unternehmen weltweit wettbewerbsfähig zu halten, ist eine gesunde Balance zwischen dem nationalen Programm und den ESA-Beiträgen notwendig. Leider ist der nationale Extraterrestrikkorridor in den letzten Jahren stetig geschrumpft (um mehr als 40 % seit 1996) und geht auch in den nächsten Jahren weiter zurück, so dass diese Balance nicht mehr existiert. Eine Umkehrung dieses Trends in den nächsten Jahren ist dringend notwendig, um die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Weltraumforschung zu erhalten.

EU-Netzwerke

Deutsche Astrophysiker waren und sind aktiv und teilweise federführend an einer Vielzahl von EU-Netzwerken im Rahmen des TMR-Programms beteiligt, was die internationale Kollaboration und den Austausch von Postdoktoranden stark beflügelt hat; insbesondere zeichnen sich diese EU-Netzwerke durch eine sehr angemessene Ausstattung mit Reise- und Gästemitteln aus. Weiterhin ermöglicht das Marie-Curie-Programm der EU jungen deutschen Nachwuchswissenschaftlern die Finanzierung eines bis zu zweijährigen Aufenthaltes im europäischen Ausland, sowie umgekehrt den Forschungsaufenthalt junger ausländischer Wissenschaftler an deutschen Instituten. Der zu erwartende Ausbau solcher Netzwerk- und Fellowship-Programme in den nächsten Jahren wird ausdrücklich begrüßt.

4.5 Ausbildung

Die universitäre Astronomieausbildung findet beinahe ausschließlich im Rahmen der Ausbildung von Diplom-Physikern statt. Dadurch wird sichergestellt, dass Astronomen eine solide Physik- und Mathematikausbildung genießen. Obgleich es an einzelnen Universitäten noch möglich ist, die Astronomiepromotion als ersten Hochschulabschluss abzulegen, wird diese

Möglichkeit praktisch nicht wahrgenommen und wird auch nicht empfohlen. Innerhalb des Studiengangs Physik wird Astronomie/Astrophysik an den Universitäten mit astronomischen Instituten als Nebenfach bzw. als Wahlpflichtfach angeboten. An einigen Universitäten kann Astronomie bereits als Nebenfach zum Vordiplom belegt werden. Wegen der methodischen Vielseitigkeit astronomischer Forschung werden Studierende durch eine Diplomarbeit oder Dissertation in der Astronomie gut und breit ausgebildet und haben im Vergleich zu anderen Studenten der Physik keineswegs schlechtere Berufschancen außerhalb des Wissenschaftsbetriebs. Weiterhin sind in Deutschland ausgebildete Astronomen erfolgreich in der Bewerbung um Wissenschaftlerstellen im Ausland.

Das Astronomieangebot an Vorlesungen, Seminaren und Praktika wird von Studierenden der Physik, und in kleinerem Maße von Chemie-, Mathematik- und Informatikstudenten, sehr gut angenommen. Die Astronomie ist ein „Zugpferd“ für Physiker. Etwa 9% aller Physikdiplomarbeiten werden über astronomische Themen angefertigt (siehe Tabelle 6.4); diese Zahl ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass nur etwa ein Drittel aller Universitäten mit Diplom-Physik-Ausbildung ein Institut mit Schwerpunkt Astronomie beherbergen. Selbst Universitäten mit einer großen Zahl von Physikstudenten haben oftmals keine Astronomieausbildung. Diese Tatsache ist insbesondere in Hinblick auf die Ausbildung angehender Physiklehrer alarmierend – nimmt doch die Astronomie eine ganz zentrale Stellung in unserem naturwissenschaftlichen Weltbild ein.

Die geographische Verteilung der Universitäten mit Astronomieausbildung weist Besonderheiten auf. Ländern mit mehreren Standorten stehen solche ohne jegliche Astronomie gegenüber. Saarland und Rheinland-Pfalz gehören ebenso dazu wie Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt. Nach der geplanten Umwandlung der C4-Professur Astronomie in Frankfurt wird voraussichtlich auch Hessen als weißer Fleck auf der Astronomielandkarte erscheinen (siehe Abbildung 6.1).

Der Abbau des wissenschaftlichen Mittelbaus an Universitäten und die restriktive deutsche Arbeitsgesetzgebung erschweren die Qualifikation von Nachwuchswissenschaftlern für Leitungspositionen in der Wissenschaft. Die Beschränkung der Zeitspanne, in der Mitarbeiter auf Zeitstellen beschäftigt werden können, beeinträchtigt durch den dadurch notwendig werdenden Personalaustausch in vielen Fällen den Fortgang von längerfristigen Projekten und behindert eine

*Nachwuchs-
wissenschaftler*

gesunde Karriereplanung junger Wissenschaftler. Die praktischen Auswirkungen des Anfang 2002 in Kraft getretenen Hochschulrahmengesetzes sind im Detail zur Zeit noch nicht abzuschätzen.

Nachwuchswissenschaftler kommen im Vergleich zu anderen Ländern wie etwa den USA zu spät in die Lage, eigenständige Forschungsprojekte zu initiieren und durchzuführen. Dieser Mangel betrifft alle Institutionen und führt notwendigerweise dazu, dass deutsche Nachwuchswissenschaftler erst relativ spät in Führungspositionen kommen und im Ausland bekannt werden können. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, sind die Nachwuchsgruppen an Max-Planck-Instituten sowie das Emmi-Noether-Programm der DFG hilfreiche Instrumente; die Konsequenzen der Einführung von Juniorprofessoren an Hochschulen werden sich erst im Laufe der nächsten Jahre beurteilen lassen.

4.6 Astronomie und Öffentlichkeit

Öffentliche Bildung

Astronomie ist sehr populär; das Fach zählt mit zu den Zugpferden, welche junge Menschen für das Studium der Physik begeistern. Die Faszination naturwissenschaftlicher Forschung lässt sich durch die Astronomie besonders eindrucksvoll demonstrieren, auch weil die Fragen nach dem Ursprung und der Entwicklung des Universums einen zentralen Aspekt unseres Weltbildes darstellen. Die Astronomie tut sehr viel für die öffentliche Bildung, zum Teil professionell (über Planetarien, Museen und Ausstellungen), zum Teil halbprofessionell (zum Beispiel die populäre Fernsehsendung *Alpha-Centauri BR-alpha*), zum Teil direkt über die Forschungseinrichtungen (öffentliche Vorträge, Tag der offenen Tür), durch Volkssternwarten und astronomische Vereinigungen (es sind in Deutschland etwa 200 Vereine mit mehr als 10000 Mitgliedern registriert) und – in letzter Zeit verstärkt – durch Informationsveranstaltungen in Schulen und für Schüler in den Universitäten.

Ein sehr positives Beispiel ist der Schulunterricht in Astronomie in einigen der Neuen Bundesländer – ein Beispiel, welches im wahrsten Sinne des Wortes „Schule“ machen sollte. Auch in den alten Bundesländern gibt es konkrete Anstrengungen. Herauszuheben ist das Projekt MONET (Monitoring Network of Telescopes) der Universitätssternwarte Göttingen, finanziert von der Alfred-Krupp-von-Bohlen-und-Halbach-Stiftung, welches zur Einbindung allgemeinbildender Schu-

len in Beobachtungsprogramme mit robotisch arbeitenden Teleskopen ausgerichtet ist. Etwa 40 % der Beobachtungszeit soll Schulen zur Verfügung stehen.

In Zukunft soll die jetzt schon große Anstrengung noch verstärkt werden – und die Astronomie soll den Bürgerinnen und Bürgern noch näher gebracht werden. Die interessanteste neue Entwicklung dazu ist das „Virtuelle Observatorium“. Damit könnte es bei geeigneter Infrastruktur (zum Beispiel über die Volkssternwarten und Schulen) ermöglicht werden, vielen interessierten jungen und alten Menschen den Zugang zu der faszinierenden Welt der Astronomie auf einfache Weise zu gewähren.

Astronomie ist ein High-Tech-Fach. Die Detektorentwicklungen in den verschiedenen Wellenlängen stellen höchste Anforderungen an Empfindlichkeit und Präzision. Entwicklungen werden häufig in den Labors der Institute durchgeführt und dann als Auftrag zur Fertigung und Weiterentwicklung an die Industrie vergeben. Ähnliches gilt für Teleskopentwicklung, Steuerung, Datenaufnahmesysteme, Analysesoftware usw.

Wissenstransfer erfolgt somit auf allen Ebenen:

- Ausbildung und Personentransfer,
- Entwicklung und Aufträge,
- Lizenzvergaben,
- Kooperationsverträge mit der Industrie.

Bildverarbeitung ist eines der wichtigsten Werkzeuge der modernen Astronomie. Durch Entwicklungen auf diesem Gebiet erfolgt Wissenstransfer aber auch in ganz andere als die oben erwähnten Bereiche hinein, zum Beispiel in die Medizin – bei der Früherkennung von Hautkrebs, Tumordiagnostik, Osteoporose, Narkosetiefenbestimmung, prä- und perinatale Diagnostik, EKG-Analysen usw. Damit entwickelt sich die Astronomie durch ihre Spezialität, der quantitativen Bildanalyse, zu einem wichtigen Technologietreiber auch außerhalb des eigentlichen Betätigungsfeldes. Weiterer Wissenstransfer kommt aus der Astroteilchenphysik – zum Beispiel Photonendetektoren und kryogene Detektoren.

Dabei ergibt sich auch eine ganz andere Art von Wissenstransfer, wie etwa durch das Projekt des Gammateleskopsystems H.E.S.S.: Die University of Namibia ist in dieses Projekt aktiv eingebunden und erlangt dadurch die Möglichkeit Spitzenforschung zu betreiben. Der Bau der komplexen Stahlstruktur wird in einer namibischen Firma durchgeführt, die dadurch ebenfalls Know-how im Ingenieurbereich erwirbt.

*Wissenstransfer,
Zusammenarbeit
mit der Industrie*

Im Bereich der Weltraumforschung gibt es sehr viele technologische Entwicklungen, die direkt in industrielle Produkte ausstrahlen. Herauszuheben sind zum Beispiel die Fertigung der Röntgenspiegel für ROSAT, XMM und in Zukunft XEUS, welche die industriellen Herstellungsverfahren für asphärische Optiken, insbesondere Gleitsichtbrillengläser signifikant befruchtet haben. Die Entwicklung neuartiger Röntgenhalbleiterdetektoren bzw. Streifendetektoren im niederenergetischen Gammabereich hat ebenfalls vielfältiges Anwendungspotenzial, zum Beispiel in der Mikrostrukturanalyse, Röntgenmikroskopie und Materialdiagnose. Im infraroten und optischen Bereich sind die „adaptive Optik“ für Anwendungen in der ophthalmologischen Diagnostik und Chirurgie, die Infrarotspektroskopie für Pränataldiagnostik, die Entwicklung von Leichtgewichtsspiegeln aus Siliziumkarbid (mit besonderen thermischen Eigenschaften für Sonnenbeobachtungen) und die Hochpräzisionsinterferometrie besonders zu erwähnen. Aus der Radioastronomie kommt die Entwicklung von millimetergroßen (MMIC) Verstärkern, die bis 230 GHz arbeiten und für zukünftige Mobilfunkanwendungen eine große Rolle spielen könnten. Aus der Laborastrophysik haben sich ebenfalls Anwendungen ergeben, zum Beispiel die Entwicklung langreichweitiger Mikroskope und die Analyseverfahren von Lichtstreuung in staubigen Medien, die in der Umwelttechnik und der Pharmazie nützlich sein können. Das heute auch technologisch so wichtige C_{60} -Molekül („Fullerene“) wurde in astrophysikalischen Labors entdeckt und in verwertbaren Mengen produziert (Chemie-Nobelpreis 1996 an Curl, Kroto und Smalley).

Dies sind – und das auch nur ganz verkürzt – einige der neueren Aktivitäten im Wissenstransfer aus der Astrophysik. Diese positive Ausstrahlung sollte auch in Zukunft fortgeführt werden. Die notwendigen Ressourcen können von den existierenden Technologietransferprogrammen des BMBF erworben werden.

5 Empfehlungen

5.1 Grundlegende Aspekte¹

In diesem Kapitel legt der Rat Deutscher Sternwarten eine Reihe von Empfehlungen vor, die nach seiner Analyse in den nächsten 15 Jahren umgesetzt werden sollten, damit die deutschen Astronomen und Astrophysiker an der Spitze der weltweiten Forschungsarbeiten können. Die Empfehlungen betreffen einerseits die Förderung von Projekten, Experimenten und Technologien, deren wissenschaftliche Notwendigkeit in den Kapiteln 2 und 3 dargelegt wurde, und andererseits, hauptsächlich basierend auf der Analyse von Kapitel 4, die Personen und Infrastruktur. Die Strategie ist eine Kombination aus einer starken Position in Entwicklung, Bau und Nutzung neuer Instrumente und einer verbesserten Struktur und Vernetzung. Um mit den empfohlenen Projekten/Instrumenten produktiv und kreativ arbeiten zu können und erstklassige Ergebnisse zu erzielen, benötigen die Forscher ausreichenden Freiraum. Vor allem wird der Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern verstärkt Augenmerk gewidmet werden müssen.

Die Empfehlungen dieser Denkschrift implizieren ein Gesamtvolumen, das im Zeitraum 2003–2009 und bezogen auf das Jahr 2000 *ein moderates reales Wachstum von insgesamt im Mittel etwa 10% (etwas mehr als real 1% pro Jahr)* der bestehenden Förderung bedeutet. Ein Zuwachs in dieser Größenordnung ist der Einschätzung des Rates nach aus der

*Moderates
Wachstum*

¹ Die Empfehlungen in dieser Denkschrift beziehen sich auf eine Prioritätensetzung im Rat Deutscher Sternwarten, die Ende 2001 erfolgte.

momentanen und der zu erwartenden positiven Entwicklung des Feldes, der Erweiterung in neue Richtungen wie Astroteilchenphysik oder Gravitationswellenforschung und der *absolut notwendigen Infrastrukturverbesserungen für die Universitäten* erforderlich und gerechtfertigt. Berücksichtigt werden gleichzeitig aber auch die realistischen Möglichkeiten und Rahmenbedingungen der Geldgeber.

Eckpfeiler dieses moderaten Zuwachses sind eine dazu hier angeregte gemeinsame Initiative von Ländern, DFG und MPG zur Verbesserung der Organisation und Infrastruktur der Universitätsgruppen, ein maßvoller Ausbau der BMBF-Verbundforschung, inklusive der Astroteilchenphysik, sowie eine Stabilisierung und ein moderates Wachstum im nationalen Haushalt der extraterrestrischen Forschung des DLR.

Strukturen der Astronomie-förderung

Von grundlegender Bedeutung für die Leistungs und Initiativfähigkeit der deutschen Forscher sind die (auch politisch sehr wichtigen) internationalen Beteiligungen und die funktionierenden nationalen (wettbewerbsorientierten) Förderinstrumente. Es wird empfohlen, diese bewährten Strukturen beizubehalten und gegebenenfalls auszubauen.

Spezifisch sind dies:

Beteiligung an internationalen Institutionen:

- ESO (Boden),
- ESA (Weltraum).

Nationale Förderung:

- BMBF: Verbundforschung bodengebundene Astronomie/Astrophysik,
- BMBF: Verbundforschung Astroteilchenphysik,
- BMBF: Verbundforschung Weltraum,
- BMBF: Anbindung der Institute an Höchstleistungsrechenzentren,
- DLR-Haushalt der extraterrestrischen Forschung,
- DFG: Schwerpunkte, Sonderforschungsbereiche, Forschergruppen, Graduiertenkollegs, Trans-Regio-Sonderforschungsbereiche, Normalverfahren,
- MPG: Betrieb nationaler bedeutender Observatorien und wissenschaftlicher Institute, Kooperation mit Universitäten und Landesinstituten, Einrichtung der Internationalen Max Planck Research Schools,
- Länder: Finanzierung von Universitäten und Landesinstituten,
- Stiftungen: Sonderfinanzierung von Projekten und Stipendien.

Hinzu kommen die verschiedenen Programme der Europäischen Union, insbesondere die Netzwerke und Fellowships.

Die deutschen Beteiligungen an der ESO und dem Wissenschaftsprogramm der ESA sind aus diesen Gründen erste Priorität für die BMBF- und BMBF/DLR-Förderung, da sie Grundlage einer großen Anzahl von wichtigen Projekten sind. Tabelle 5.1 listet die abgeschätzten Kosten für das BMBF und BMBF/DLR auf. Hierbei wurde von einem deutschen ESO-Beitrag von 22.5 M€ pro Jahr ausgegangen.

Tabelle 5.1: Internationale Beteiligungen
Die Zahlen in dieser Tabelle sind in 2001 M€. Beim ESA-Beitrag wird davon ausgegangen, dass 50% des DLR-Beitrages zum ESA-Wissenschaftsprogramm der Astronomie/Astrophysik zugerechnet wird. Bei allen Geldgebern werden nur die für die Projekte spezifischen Kosten und nicht die institutionelle Förderung aufgelistet. Hier und in den folgenden Tabellen bezeichnet das Symbol *, dass dem Projekt/der Initiative besonders hohe Priorität zugeordnet wird.

B/W	Projekt	P	2003-2009 M€				MPG z.	P	2010-2016 (M€)				MPG z.
			Länder	BMBF	DLR	DFG			Länder	BMBF	DLR	DFG	
W	ESA-Wissenschaftspr.	*			346,0		*			350,0			
B	ESO (VLT, La Silla)	*		180,0			*		180,0				

5.2 Instrumente und Projekte

Die Ausführungen in Kapitel 2 haben bereits aufgezeigt, welche Methoden und Instrumente benötigt werden, um die zentralen wissenschaftlichen Fragen der nächsten Dekade angehen zu können. Die Empfehlungen bei den Instrumenten und Technologien überspannen den ganzen Bereich des elektromagnetischen Spektrums und schließen zusätzlich die Methoden der Gravitationswellen-, Neutrino- und Astroteilchenphysik ein. Untrennbar damit verbunden sind Empfehlungen zur Stärkung der Theorie und der numerischen Simulationen. Ziel ist es, im Sinne der modernen, Wellenlängen überspannenden und Methoden übergreifenden Astrophysik die jeweils besten Techniken und Projekte zu benennen, die zur Lösung der in den vier Schlüsselthemen genannten wissenschaftlichen Probleme dienen. Die Empfehlungen streben an, eine ausgewogene Balance zu erreichen.

Prioritäten der Empfehlungen

Die Mitgliedschaft in den internationalen Organisationen ESO und ESA sichert Astronomen in Deutschland den Zugang zu weltweit führenden Observatorien und wird deshalb als höchste Priorität fortgeschrieben. Projekte, die von diesen internationalen Organisationen betrieben werden, werden hier zusätzlich priorisiert, wenn für sie über den normalen Beitrag hinaus nationale finanzielle Anstrengungen notwendig erscheinen. Bei der Prioritätensetzung für Projekte und Initiativen wurde von folgenden grundsätzlichen Kriterien ausgegangen:

- wesentlicher Fortschritt/Verbesserung in den Messmöglichkeiten (Kapitel 3) und Beiträge zu den Kernthemen der Denkschrift (Kapitel 2, Tabelle 5.2),
- Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Forscher in diesem Bereich,
- Balance zwischen den verschiedenen Größenordnungen von in Kapitel 3 erörterten Projekten (internationale Großprojekte, nationale oder bilaterale Initiativen, innovative Technologien etc.),
- kohärentes Zusammenspiel zwischen verschiedenen Methoden und Wellenlängenbereichen,
- Berücksichtigung der Ergebnisse unabhängiger Begutachtungsverfahren (zum Beispiel im Rahmen von ESA-, ESO- und DLR-Projekten).

Nach einer Zusammenfassung der für den Zeitraum der Denkschrift vorgeschlagenen, als „real“ oder wahrscheinlich bald als real anzusehenden Projekte wurden dann nach den obigen Kriterien die entscheidenden größeren Projekte („golden bullets“) ausgewählt sowie eine Reihe von wichtigen kleineren Projekten und Initiativen identifiziert. *Bei den „golden bullet“-Projekten wurden nur solche aufgenommen, die in Bezug auf Empfindlichkeit oder/und Auflösung eine Verbesserung um mindestens eine Größenordnung oder mehr versprechen und einen fundamentalen Beitrag zu mindestens einem der Kernthemen erwarten lassen.* Weiterhin wurde berücksichtigt, dass einige zukünftige Observatorien „einmalig“ und weltweit völlig konkurrenzlos sein werden („Weltobservatorien“, zum Beispiel ALMA, JWST), so dass eine Beteiligung daran absolut notwendig ist, falls sich Deutschland nicht aus einem ganzen Zweig der astronomischen Forschung auf Jahre hinaus verabschieden will.

Die Empfehlungen wurden dann in *zwei Prioritäten* aufgeschlüsselt. Für die Entwicklung der deutschen Astronomie und Astrophysik wäre es sehr wünschenswert, wenn sowohl die Projekte der ersten wie der zweiten Priorität verwirklicht

werden könnten. Initiativen erster Priorität (markiert mit einem „*“ in den folgenden Tabellen) werden aber als absolut notwendig betrachtet, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Astronomie und Astrophysik zu erhalten. Ihr Wegfallen würde der Auffassung des Rates nach zu einem schweren Schaden für die Entwicklung der deutschen astrophysikalischen Forschung führen. Über die beiden ersten Prioritäten hinausgehende Wünsche werden im Folgenden ebenfalls angesprochen, werden aber von geringerer Priorität angesehen. Bei den Empfehlungen für das Instrumenten- und Technologieprogramm wird zwischen *drei verschiedenen finanziellen Größenordnungen* sowie zwischen *Observatorien am Boden und im Weltraum* unterschieden. Die Initiativen werden auch in *zwei Zeitbereiche* (0 bis 8 Jahre und 9 bis 15 Jahre) eingeteilt, wobei der letztere Zeitraum in den detaillierten Prognosen zwangsläufig ungenauer ist.

Zusätzlich zu den identifizierten Zukunftsprojekten muss aber auch noch Freiraum für Innovationen geschaffen werden, die jetzt noch gar nicht bekannt sind. Dieser Aspekt soll durch einen „*Innovationsfond*“ angegangen werden.

In Tabelle 5.2 wird aus den vier in Kapitel 2 behandelten wissenschaftlichen Themenkreisen noch einmal zusammengefasst, welche Instrumente und Projekte für welche wissenschaftlichen Ziele benötigt werden. Die später diskutierten Infrastrukturmaßnahmen sind für alle Themenkreise gleichermaßen entscheidend.

Einige Instrumente werden für die Bearbeitung wohldefinierter Spezialthemen benötigt. So dienen CRESST und GENIUS der Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie, Planck der Vermessung des Mikrowellenhintergrundes und GREGOR dem Studium der Sonne. Andererseits gibt es Observatorien, die als „Arbeitspferde“ fast die gesamte Breite astrophysikalischer Forschung abdecken. Dazu gehören beispielsweise die großen bodengebundenen Teleskope, aber auch mehrere der Weltraumteleskope.

*Spezialisierte
Instrumente und
„Arbeitspferde“*

5 Empfehlungen

Tabelle 5.2: Übersicht über die Projekte in Bezug auf die wissenschaftlichen Themenkreise

Die Initiativen sind in verschiedene Kategorien (internationale Beteiligung, große, mittlere und kleine Projekte, existierende Einrichtungen), bodengebundene Projekte (B) und Weltraumprojekte (W) eingeteilt. Das Symbol x markiert die Relevanz eines Projekts/einer Initiative für einen bestimmten Themenkreis (Abschnitte 2.1 bis 2.4), ein xx zeigt an, dass ein besonders wichtiger oder fundamentaler Beitrag erwartet wird.

Kategorie	B/ W	Projekt	Themen- kreis 1	Themen- kreis 2	Themen- kreis 3	Themen- kreis 4
Intern. Beteil.	W	ESA-Wissenschaftsprogramm	xx	xx	xx	xx
Intern. Beteil.	B	ESO (VLT, La Silla)	xx	xx	xx	xx
Groß: > 25 M€	W	SOFIA		xx	x	xx
Groß: > 25 M€	W	Herschel	x	xx	x	xx
Groß: > 25 M€	W	XEUS	xx	xx	x	x
Groß: > 25 M€	B	50m+ (z.B. OWL)	xx	xx	x	xx
Groß: > 25 M€	B	ALMA	xx	xx	x	xx
Groß: > 25 M€	B	ALMA:APEX		x	x	x
Groß: > 25 M€	W	Kleinm./bil. Bet.	x	x	x	x
Groß: > 25 M€	W	DARWIN		x		xx
Mittel: 10–25 M€	W	LISA	x	xx		
Mittel: 10–25 M€	W	Solar Orbiter			xx	
Mittel: 10–25 M€	W	Nutzung Weltraumteleskop	x	x	x	x
Mittel: 10–25 M€	B	Innovationsfond	x	x	x	x
Mittel: 10–25 M€	B	VLT(I)/LBT	xx	xx	xx	xx
Mittel: 10–25 M€	B	H.E.S.S./MAGIC		xx	x	
Mittel: 10–25 M€	B	GNO/BOREXINO/LENS	xx	x		
Mittel: 10–25 M€	B	SKA	xx	xx	x	
Mittel: 10–25 M€	B	ICECUBE	x	x		
Mittel: 10–25 M€	W	Solar Orbiter			xx	
Mittel: 10–25 M€	B	Astroteilchenausbau	x	x		
Klein: < 10 M€	W	Planck	xx	x		
Klein: < 10 M€	B	Zugang Rechenzentren	x	x	x	x
Klein: < 10 M€	B	Virtual Observatory	xx	xx	xx	xx
Klein: < 10 M€	B	Adaptive Optik/Detektoren	x	x	x	x
Klein: < 10 M€	B	GREGOR			x	
Klein: < 10 M€	B	LIGO II/Gravitationswellen?	x	x		
Klein: < 10 M€	W	GAIA	x	x	xx	x
Klein: < 10 M€	W	NGST	xx	xx	x	xx
Klein: < 10 M€	W	UV (WSO)	x		x	
Klein: < 10 M€	W	GLAST		xx	x	
Klein: < 10 M€	B	Robotische Teleskope	x	x	x	x
Klein: < 10 M€	B	D.M.:CRESST/GENIUS	xx	x		
Klein: < 10 M€	B	HET/SALT		x	x	

Tabelle 5.2: Fortsetzung

Kategorie	B/ W	Projekt	Themen- kreis 1	Themen- kreis 2	Themen- kreis 3	Themen- kreis 4
Existierende Einr.	W	INTEGRAL		x	x	
Existierende Einr.	W	SOHO			xx	
Existierende Einr.	W	XMM-Newton	xx	xx	x	x
Existierende Einr.	B	Calar Alto	x	x	x	x
Existierende Einr.	B	Effelsberg/VLBI		xx	x	x
Existierende Einr.	B	GEO600	x	x		
Existierende Einr.	B	IRAM		xx	x	xx

5.3 Große Projekte

Im Bereich der großen Weltraumprojekte sind in der Periode 2003–2009 Herschel, SOFIA und die technologische Vorbereitung und Instrumentierung von XEUS erste Priorität (Tabelle 5.3). Mindestens eine Kleinmission oder bilaterale Beteiligungen, wie zum Beispiel MEGA, PRIME, ROSITA oder SUNRISE sind höchst wünschenswert wie auch die technologische Vorbereitung von DARWIN. In der Periode 2010–2015 kommt dann zusätzlich als erste Priorität die Instrumentierung für die DARWIN-Mission.

Im Bereich der großen bodengebundenen Projekte wird in der Periode 2003–2009 das ALMA-Projekt (und sein Vorläuferprogramm APEX) als erste Priorität eingeordnet. In der Periode 2010–2015 steht hier die nächste Generation der bodengebundenen optischen/IR-Teleskope (50 m oder mehr im Durchmesser, wie zum Beispiel das OWL-Projekt) an erster Stelle. Bei ALMA und überwiegend auch bei 50m+/OWL wird davon ausgegangen, dass der Bau über einen real konstanten oder leicht erhöhten deutschen Beitrag zum ESO-Budget finanziert werden kann, wobei aber auch „Inkind“-Beiträge (Eigenleistungen) über IRAM und die MPG wichtig sind.

5.4 Mittlere Projekte

Im Bereich der mittelgroßen Weltraumprojekte sind in der Periode 2003–2009 die DLR-geförderte Nutzung von Weltraumteleskopen („DLR-Verbundforschung“) und die Instrumentie-

Tabelle 5.3: Große Projekte (≥ 25 M€ in mindestens einer der Perioden)

Die Zahlen in dieser Tabelle sind in 2001 M€, müssen also entsprechend auf die Jahre inflationskorrigiert werden. In der Tabelle werden die Grundfinanzierung für die Institute und Universitäten nicht extra sowie bei der MPG nur die für die Projekte direkt benötigten, zusätzlich gewünschten (z.) Mittel im Haushalt aufgeführt. Projekte der ersten Priorität sind mit dem Symbol * gekennzeichnet.

B/W	Projekt	Art	P	Länder	2003–2009 (M€)					Bemerkung
					BMBF	DLR	DFG	MPG z.	MPG z.	
W	SOFIA	Betrieb+Instr.	*		25,0	1,5	1,0			DLR SOFIA-Inst., DFG/MPG Instrum.
W	Herschel	Instr.: PACS,HIFI	*		30,0					
W	XEUS	Instr.	*		10,0					
W	XEUS	Technologie	*		4,5					Unterstützung v. DLR, teilw. ESA
W	Kleinm./bil.Bet.	Satellit/Instr.			25,0					z.B. MEGA/PRIME/ROSITA/Sunrise
W	DARWIN	Techn./Instr.			2,0					
B	ALMA:APEX	Bau APEX	*					3,0		Enthalten in BMBF:ESO+MPG:IRAM
B	ALMA	Bau APEX	*		[20]					
B	ALMA:APEX	Nutzung Apex			1,5					
	Summe Priorität 1				69,5	1,5	4,0			75,0
	Summe Priorität 2				1,5					28,5
2010–2016 (M€)										
B/W	Projekt	Art	P	Länder	2010–2016 (M€)					Bemerkung
					BMBF	DLR	DFG	MPG z.	MPG z.	
W	SOFIA	Betrieb+Instr.			25,0					DLR SOFIA-Institut
W	Herschel	Instr.: PACS, HIFI	*		4,5					
W	XEUS	Instr.	*		30,0					
W	Kleinm./bil.Bet.	Satellit/Instr.	*		25,0					z.B. MEGA/PRIME/ROSITA/Sunrise
W	DARWIN	Techn./Instr.	*		30,0					
B	50 m + (z.B. OWL)	Bau	*		10,0					Enthalten in BMBF:ESO+MPG:IRAM
B	ALMA	Bau	*		[5]					99,5
	Summe Priorität 1				10,0					27,5
	Summe Priorität 2				25,0					

zung von Solar Orbiter und LISA erste Priorität (Tabelle 5.4). Sehr wünschenswert wäre in dieser Periode eine Erhöhung des Max-Planck-Beitrages zum Solar Orbiter. Da sich der Bau der Instrumentierung von Solar Orbiter und LISA wahrscheinlich in die Periode 2010–2015 hineinzieht, bleiben diese beiden Projekte erste Priorität, wie auch die DLR-Verbundforschung. Sollte LISA durch eine Zusammenarbeit von ESA und NASA früher verwirklicht werden können, wäre es wünschenswert, den deutschen Beitrag entsprechend vorzuziehen.

Im Bereich der mittelgroßen bodengebundenen Projekte werden in der Periode 2003–2009 die Astroteilchenprojekte H.E.S.S./MAGIC und ICECUBE, GNO/BOREXINO/LENS, die VLT(I)/LBT-Instrumentierung und eine Max-Planck-Beteiligung an der technologischen Vorbereitung für das Square Kilometre Array als erste Priorität angesehen, wobei hier auch das vorgeschlagene interferometrische Datenzentrum FrInGe einbezogen ist. Hinzu kommt der bereits eingangs erwähnte, durch die BMBF-Verbundforschung, die MPG und die Länder gestützte Innovationsfond, der es möglich macht, neue, in dieser Denkschrift noch nicht absehbare Entwicklungen von herausragender Qualität aufnehmen zu können. Wünschenswert wäre in dieser Periode auch ein weiterer Ausbau der Astroteilchenphysik-Verbundforschung und weitere Mittel für VLT(I) und LBT. In der Periode 2010–2015 sind die Prioritäten sehr ähnlich denen in der ersten Periode, wobei beim SKA die Bau- und Instrumentierungsphase durch die BMBF-Verbundforschung und die MPG unterstützt werden soll. ICECUBE wird sich dann in der Nutzungsphase befinden.

5.5 Kleine Projekte

Im Bereich der kleinen Beteiligungen an Weltraumprojekten haben in der Periode 2003–2009 das Planck-Datenzentrum und Instrumentierung bzw. Datenzentrum von GAIA erste Priorität (Tabelle 5.5). Für das GAIA-Datenzentrum wird eine Beteiligung der Länder angestrebt. Die Hardwarebeteiligung und Mitarbeit an GLAST, ein deutscher Hardwarebeitrag für das JWST (MIRI), eine instrumentelle Beteiligung an GAIA sowie eine Beteiligung an Technologieentwicklung und Instrumentierung eines zukünftigen UV-Weltraumteleskops (wie zum Beispiel am WSO) sind wünschenswert. Die Beteiligung am MIRI-Instrument für das JWST ist hierbei ein besonderer Fall, weil hiermit ein signifikanter deutscher Eigenbeitrag

Tabelle 5.4: Mittlere Projekte (10 bis 25 M€ in mindestens einer der Perioden)

Die Zahlen in dieser Tabelle sind in 2001 M€, müssen also entsprechend auf die Jahre inflationskorrigiert werden. In der Tabelle werden die Grundfinanzierung für die Institute und Universitäten nicht extra sowie bei der MPG nur die für die Projekte direkt benötigten, zusätzlich gewünschten (z.) Mittel im Haushalt aufgeführt. Projekte der ersten Priorität sind mit dem Symbol * gekennzeichnet.

B/W	Projekt	Art	P	Länder	2003-2009 (M€)				MPG z.	Bemerkung
					BMBF	DLR	DFG	MPG z.		
W	LISA	Instr.	*			10,0				
W	Solar Orbiter	Instr.	*			10,0				
W	Weltraumteleskope	Nutzung	*			13,0				
W	Solar Orbiter	Instr./Nutzung				3,0		1,0		
B	VLT(l)/LBT	Instr.	*		11,0				2,5	inkl. FrInGe
B	Innovationsfond	Techn./Instr.	*	5,0	5,0				5,0	neue herausragende kl. Initiativen
B	H.E.S.S./MAGIC	Bau/Nutzung	*		9,2				2,5	
B	Astroteilchen	Bau/Nutzung	*		8,8				2,0	
B	ICECUBE	Bau/Nutzung	*		8,8					
B	VLT(l)/LBT	Instr.						5,0		
	Summe Priorität 1			5,0	42,8	33,0			12,0	92,8
	Summe Priorität 2					3,0			6,0	9,0

B/W	Projekt	Art	P	Länder	2010-2016 (M€)				MPG z.	Bemerkung
					BMBF	DLR	DFG	MPG z.		
W	LISA	Instr.	*			10,0				
W	Solar Orbiter	Instr.	*			10,0				
W	Weltraumteleskope	Nutzung	*			15,0				
W	Solar Orbiter	Instr./Nutzung				2,0				
B	VLT(l)/LBT	Instr.	*		3,0				2,0	inkl. FrInGe
B	Innovationsfond	Techn./Instr.	*	5,0	5,0				5,0	neue herausragende kl. Initiativen
B	H.E.S.S./MAGIC	Bau/Nutzung	*		10,5				1,5	
B	Astroteilchen	Bau/Nutzung	*		2,5				2,0	
B	SKA	Techn./Instr.			10,0				5,0	
B	Ausbau Astroteilchen	Instr.	*		13,0					
B	VLT(l)/LBT	Instr.			5,0				2,0	
	Summe Priorität 1			5,0	34,0	35,0			10,5	84,5
	Summe Priorität 2				15,0	2,0			7,0	24

an dem für die deutsche Forschergemeinde sehr wichtigen JWST verwirklicht werden könnte. JWST insgesamt ist damit definitiv als Projekt der ersten Priorität einzuordnen, und es ist sehr zu hoffen, dass ein deutscher Hardwarebeitrag selbst bei schwieriger Finanzlage verwirklicht werden kann. In der Periode 2010–2016 wurde für diese Kategorie absichtlich kein Unterschied zwischen erster und zweiter Priorität gemacht, da dies zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht genau abschätzbar ist. In diesem Zeitraum sind die wichtigsten Projekte die Datenauswertung von Planck und Beiträge zu GAIA und möglicherweise UV/WSO-Instrumentierung.

Im Bereich der kleinen bodengebundenen Projekte haben in der Periode 2003–2009 das GAVO, der Zugang zu Hochleistungsrechenzentren, die Beteiligung an Gravitationswellenexperimenten (LIGO II), Technologieentwicklung im Bereich der adaptiven Optik und neuer Detektoren und der Bau des Sonnenteleskops GREGOR erste Priorität. Wünschenswert sind zusätzlich die BMBF-Förderung von Experimenten zur Dunklen Materie (CRESST, GENIUS), eine Erweiterung des Technologieprogramms adaptive Optik/Detektoren und der Beteiligung an LIGO II sowie der Förderung von neuen robotischen Teleskopen und von HET/SALT. In der Periode 2010–2016 bleiben die langfristigen Elemente weiterhin erhalten. Wiederum wurden hier absichtlich keine erste Priorität definiert.

Tabelle 5.5: Kleine Projekte (≤ 10 M€ in beiden Perioden)

Die Zahlen in dieser Tabelle sind in 2001 M€, müssen also entsprechend auf die Jahre inflationskorrigiert werden. In der Tabelle werden die Grundfinanzierung für die Institute und Universitäten nicht extra sowie bei der MPG nur die für die Projekte direkt benötigten, zusätzlich gewünschten (z.) Mittel im Haushalt aufgeführt. Projekte der ersten Priorität sind mit dem Symbol * gekennzeichnet.

B/W	Projekt	Art	P	Länder	2003–2009 (M€)					MPG z. Bemerkung
					BMBF	DLR	DFG	MPG	z.	
W	Planck	Nutzung	*			2,0				
W	GALIA	Instr./Nutzung	*	5,0		5,0				
W	NGST	Instr.: MIRI			10,0					
W	UV (WSO)	Techn.+Instr.			5,0					
W	GLAST	Instr.+Nutzung			2,5					
B	Zugang Rechenzentren	Instr.	*	5,0						
B	Virtual Observatory	Instr.	*		2,5		2,0			
B	Adaptive Optik/	Technologie	*							
B	GREGOR	Bau	*	4,0		3,5				Hochschulbauförderung
B	LIGO II/									
	Gravitationswellen	Instr.+Techn.			5,0					
B	Robotische Teleskope	Instr.+Nutzung		2,0	2,0					hinzu kommen Gelder von Stiftungen
B	D.M.:CREST/GENIUS	Techn.+Nutzung			2,5					
B	Adaptive Optik/									
	Detektoren	Technologie			3,5					
B	HET/SALT	Instr.+Nutzung			1,0					hinzu kommen Mittel von VW-Stiftung
	Summe Priorität 1			14,0	6,0	2,0	2,0		24,0	
	Summe Priorität 2			2,0	14,0	22,5			38,5	

(Fortsetzung auf Seite 205)

Tabelle 5.5: Fortsetzung

B/W	Projekt	Art	P	Länder	2010–2016 (M€)				MPG z. Bemerkung
					BMBF	DLR	DFG		
W	Planck	Nutzung				1,0			
W	GAIA	Instr./Nutzung		5,0		5,0			
W	UV (WSO)	Techn.+Instr.				5,0			
B	Zugang Rechenzentren	Instr.		5,0					
B	Virtual Observatory	Instr.			2,5		2,0		
B	Adaptive Optik/ Detektoren	Technologie				4,0			
B	LIGO II/ Gravitationswellen	Instr.+Techn.				10,0			
B	Robotische Teleskope	Instr.+Nutzung		2,0		2,0			hinzu kommen Gelder von Stiftungen
B	D.M.:CRESST/GENIUS	Techn.+Nutzung				4,0			
B	HET/SALT	Instr.+Nutzung				0,5			
	Summe			12,0	23,0	11,0	2,0		48,0

5.6 Organisatorische Maßnahmen

In den ersten beiden Kapiteln dieser Denkschrift wurde dargestellt, dass sich die Astronomie zur Zeit in einer Phase enormer Entwicklung befindet. Dies ist zum einen auf erhebliche technologische Fortschritte zurückzuführen; andererseits wurde durch wissenschaftliche Erkenntnisse des letzten Jahrzehnts die Einsicht verstärkt, dass die Astrophysik einen ganz zentralen Teil physikalischer Forschung darstellt und das Universum als einzigartiges und unverzichtbares Laboratorium physikalischer Forschung zu betrachten ist. Beispiele für diese Aussage sind die Entdeckung Dunkler Materie, Dunkler Energie, und das solare Neutrinoproblem, welches Teilchenmodelle jenseits des Standardmodells enorm befruchtet hat.

Im Gegensatz zu anderen Ländern wurde dieser „Goldenen Phase“ der Astrophysik nicht durch eine personelle Verstärkung der Astronomie Rechnung getragen (siehe Kapitel 4); stattdessen kam es in Westdeutschland zu einem deutlichen Abbau an Planstellen (siehe Tabelle 6.3). Da die Mitgliedsbeiträge zu den internationalen Organisationen ESO und ESA sich aus dem Bruttosozialprodukt der beteiligten Länder ergeben, aber die Zahl der Astronomen in Deutschland, bezogen auf das Bruttosozialprodukt, wesentlich kleiner ist als in vergleichbaren Ländern, kann der wissenschaftliche Ertrag der getätigten Investitionen sicherlich spürbar erhöht werden durch eine Stärkung der Personalsituation.

Stärkung der universitären Grundförderung

Während von dem Stellenabbau sowohl Max-Planck-Institute als auch Landesinstitute und Universitäten betroffen waren, spüren letztere die Auswirkungen wesentlich dramatischer. Die institutionellen Empfehlungen konzentrieren sich daher auf Universitäts- und Landesinstitute. Viele Probleme der Universitätsinstitute sind nicht spezifisch für die Astronomie. Dieser Wissenschaftsbereich ist aber dahingehend ausgezeichnet, als dass nur etwa 30 % der Wissenschaftlerplanstellen an Universitäten angesiedelt sind (siehe Tabelle 6.2). Die Universitäten befinden sich damit in einer ungünstigen Ausgangsposition bei der Konkurrenz um die besten Forscher. Um der strukturellen Schwäche der universitären Astronomieinstitute entgegen zu wirken, *muss die institutionelle Grundförderung gestärkt werden*. Dies bezieht sich gleichermaßen auf personelle und instrumentelle Aspekte. Die folgenden Bemerkungen beziehen sich in etwas abgeschwächter Form auch auf die Landesinstitute.

Der Abbau von Planstellen an vielen Universitäten hat erhebliche Lücken in den Instituten hinterlassen. Nach einer ersten Phase der personellen Konsolidierung wurde in den letzten Jahren bei einigen Instituten die Schmerzgrenze überschritten: Mit immer weniger Personal müssen stets wachsende Aufgaben in der Ausbildung, der universitären Selbstverwaltung, der Drittmittelinwerbung und der Öffentlichkeitsarbeit bewältigt werden. Die daraus resultierende kontinuierliche Abnahme des Forschungsfreiraumes an Universitätsinstituten ist demotivierend und schadet daher auch der Ausbildung; weiterhin wird dadurch die Konkurrenzfähigkeit universitärer Forschung immer weiter reduziert. Es wird deshalb dringend empfohlen, diesen langjährigen Trend umzukehren und dabei das Missverhältnis zwischen Planstellen und Grundausstattung einerseits und Drittmittelförderung andererseits wenigstens abzumildern. Es muss versucht werden, die personelle und finanzielle Unterstützung der Astrophysik an Universitäten auf ein Niveau zu bringen, das dem in vergleichbaren Ländern (siehe Kapitel 4) entspricht. Da die Astrophysik ein integraler Bestandteil der Physik und innerhalb der Physik eines der sich zur Zeit am stärksten entwickelnden Gebiete mit exzellenten Aussichten auf fundamentale Erkenntnisse ist, wird empfohlen, dieser Tatsache bei der Perspektivenplanung von Physikfakultäten Rechnung zu tragen, um der (im internationalen Vergleich) deutlichen Unterrepräsentanz der Astrophysik entgegen zu wirken.

Erhöhung des Personalstandes

Geht man davon aus, dass Spitzenanforderungen an Rechenleistung durch die vorhandenen und geplanten Höchstleistungsrechenzentren befriedigt werden können, so bedarf es daneben auch noch einer geeigneten Hardwareausstattung der einzelnen Institute; das gilt natürlich auch für Arbeitsgruppen, die nicht in Numerischer Astrophysik tätig sind. Beispielsweise fallen bei der Datenreduktion zum Teil so große Datenmengen an, dass die kleineren Institute an Problemen wie Datenspeicherung und Datensicherung zu scheitern drohen. Dieses Problem verschärft sich zunehmend: Exemplarisch seien hier die optischen Kameras erwähnt, die innerhalb weniger Jahre (zum Beispiel bei der ESO) von 1000^2 (SUSY am NTT) auf 16000^2 (OmegaCAM am VST) Bildelemente gewachsen sind. Zusätzlich hat der Personalabbau vielerorts dazu geführt, dass die Betreuung des Rechnersystems durch Studenten übernommen werden muss, es also keine Systemadministratoren gibt. Daher ist eine stärkere Ausstattung der Universitätsinstitute mit Rechnern, dazugehöriger Peripherie (Speicher, Back-up-Systeme) und gegebenenfalls mit Systemadministratoren not-

Instrumentelle Stärkung

wendig, die gemäß DFG-Richtlinien zur Grundausrüstung der Institute und damit in den Zuständigkeitsbereich der Länder fällt. Weiterhin wurden im Zuge der Stelleneinsparungen die Werkstätten an vielen Universitätsinstituten stark geschwächt. Da diese eine notwendige Voraussetzung für die Beteiligung an instrumentellen Projekten darstellen, geht diese Reduzierung direkt mit einer Schwächung der Konkurrenzfähigkeit beim Instrumentenbau einher. Um Universitätsinstituten zu ermöglichen, sich auch weiterhin erfolgreich an Bau und Instrumentierung zu betätigen, wird empfohlen, leistungsstarke Werkstätten wieder herzustellen; dies ist auch vom Aspekt der Studentenausbildung her wünschenswert.

Zugang zu optischen Teleskopen

Neben den ESO-Teleskopen haben deutsche Astronomen Zugang zu optischen Teleskopen durch die MPG-Beteiligung am Calar Alto. Die dort auf Deutschland entfallende Beobachtungszeit wird etwa zur Hälfte von MPIs genutzt, die andere Hälfte steht Mitgliedsinstituten des RDS zur Verfügung. Die von der MPG als notwendig angesehene Reduzierung der deutschen Beteiligung am Calar Alto wird eine schmerzhaft eingeschränkte des Zugangs von Universitätsforschern zu optischen Teleskopen, speziell auf der Nordhalbkugel, mit sich bringen. Während die an der LBT-Betreibergesellschaft beteiligten Institute durch das LBT alternative Beobachtungsmöglichkeiten erhalten werden, besteht dieser Zugang für die Universitätsinstitute nicht. Der Teleskopzugang über die ESO hinaus ist notwendig für die Durchführung großer und langfristiger Programme und wird von vergleichbaren Ländern (Frankreich: Canada-France-Hawaii Telescope; Niederlande: La Palma; Italien: Telescopio Nazionale Galileo, UK: La Palma, Gemini, Anglo-Australian Telescope) ebenfalls gewährleistet. Es wird daher empfohlen, nach Möglichkeiten zu suchen, eine Beteiligung der Universitäten an optischen Observatorien (wie zum Beispiel La Palma) zu erlangen und zu sichern.

Zugang zu den wichtigsten elektronischen Publikationsmedien

Der Preisanstieg von Fachjournalen, in Verbindung mit bestenfalls stagnierenden Institutsetats, hat in den vergangenen Jahren enorme Lücken in die Bibliotheken von Universitätsinstituten gerissen. Der Subskriptionspreis allein der vier wichtigsten astronomischen Journale beträgt zusammen etwa 9700 Euro, damit also einen erheblichen Bruchteil eines Institutsetats. Interdisziplinäre und physikalische Journale sind daher in den astronomischen Bibliotheken selten zu finden. Im Hinblick auf die schnell expandierende elektronische Verbreitung von Daten und Zeitschriften ist es wichtig, dass Universitätsgruppen einen uneingeschränkten generellen Zu-

gang zu den wichtigsten elektronischen Publikationsmedien und elektronisch zugänglichen Fachzeitschriften erhalten. Beispielsweise könnte von der Möglichkeit einer zentralen Subskription von Journalen mehr Gebrauch gemacht werden, wie es innerhalb der MPG geschieht. Es wird empfohlen, ein ähnliches Modell zumindest auf Länderebene anzustreben.

5.7 Wechselwirkung und Kooperation

Aufgrund der instrumentellen Fortschritte und der daraus folgenden Entwicklung hin zu Großgeräten entwickelt sich die Astronomie immer mehr zu einer Wissenschaft der großen Observatorien und Forscherverbünde, von denen die internationale Konkurrenzsituation in zunehmendem Maße geprägt wird. Beispiele in den USA sind das Center for Astrophysics in Cambridge/Massachusetts und die in der Keck Foundation/CARA zusammengeschlossenen sieben Universitäten der University of California und Caltech. Andere Beispiele sind CNRS/INSU in Frankreich und die University of Cambridge sowie PPARC in Großbritannien. Diese Einrichtungen koordinieren ihre größeren Forschungsvorhaben auf verschiedenen Ebenen – von der Instrumentierung der Observatorien, der Planung und Durchführung von Beobachtungsprogrammen bis hin zur Theorie und numerischen Simulation. Es ist die Kopplung von Qualität und Größe (typischerweise zehn bis zwanzig Lehrstühle), die hier Synergie, Effizienz und Erfolg ausmachen. Verbunden ist dies selbstverständlich mit dem Zugang zu den modernsten Teleskopen.

In Deutschland können gerade noch einige außeruniversitäre Institute (teilweise im Verbund miteinander) mit dieser Konkurrenz mithalten, die Universitäten sind im Allgemeinen nicht dazu in der Lage. Durch gezielte Fördermaßnahmen wie SFBs und Verbundforschung gibt es mittlerweile aber auch positive Ausnahmen, die zeigen, dass diese Situation nicht so bleiben muss. Allerdings ist es absehbar, dass der wachsende Aufwand für die Spitzenforschung in den großen Zukunftsthemen zwangsläufig auch zu größeren Forschungsverbänden führen muss, wenn Deutschland einen Platz an der Weltspitze halten will.

*Größere
Forschungsverbände*

Die enge Zusammenarbeit zwischen Instituten ist ein bereits jetzt bestehendes und in Zukunft sich verstärkendes Element, das auch durch das unten empfohlene Konzept von

„thematischen Netzwerken“ weiter verstärkt werden soll. Deswegen darf aber die Bedeutung der vielen kleineren Projekte nicht übersehen werden. Auch heute noch können sehr kleine Gruppen entscheidende Arbeiten leisten, beispielsweise in der Theorie oder mit kleinen, aber sehr gezielten Beobachtungsprogrammen. Gerade für solche Projekte ist oftmals die Flexibilität der Schlüssel zum Erfolg. Auch hier macht sich die Strukturschwäche an den Universitäten bemerkbar, zum Beispiel bei fehlenden Reise- und Gästemitteln.

„Vertikale“ Wissenschaftsstruktur

Um der Zukunftsentwicklung zu größeren Forschungsverbänden Rechnung zu tragen, wird empfohlen, die Astronomie und Astrophysik entsprechend dem wissenschaftlichen Bedarf thematisch zu strukturieren. Neben der „horizontal“ orientierten Technologiestruktur (Observatorien, Instrumente) soll die hauptsächlich an wissenschaftlichen Themen orientierte „vertikale“ Wissenschaftsstruktur verbessert werden.

Aufgabe dieser Netzwerke ist es, die Struktur der deutschen Astronomie zu verbessern durch

- die Einbindung der kleinen Institute in international konkurrenzfähige große Forschungsvorhaben und durch Unterstützung beim Aufbau neuer zukunftssträchtiger Forschungsrichtungen auch an den Universitäten,
- die Bündelung der auf verschiedene Einrichtungen verteilten Expertise für gemeinsame Forschungsprojekte,
- eine größere Durchsetzungsfähigkeit bei internationalen Projekten,
- die Koordination und Planung von Forschungsprojekten,
- die Koordinierung von Lehre und Lehrexport in Standorte, in denen die Astronomie als Studienfach nicht vertreten ist,
- den Austausch von Wissenschaftlern, Doktoranden und Diplomanden zwischen den Instituten sowie die Organisation von Workshops und Sommerschulen, und
- eine wissenschaftsorientierte Darstellung der Astronomie in der Öffentlichkeit.

Solche Netzwerke müssen organisch wachsen; deshalb wird ein schrittweiser Aufbau vorgeschlagen. In einer ersten Phase soll ein „Koordinationsnetzwerk“ eingerichtet werden, in dem die Konzepte für die Einrichtung von thematisch orientierten Netzwerken und ihrer Organisationsstruktur erarbeitet werden, insbesondere auch in Hinblick auf Finanzierungsmöglichkeiten. In einer zweiten Phase soll der Aufbau der thematischen Netzwerke beginnen. Jedes Institut kann – je nach wissenschaftlichem Interesse und Expertise – einem

(oder mehreren) dieser thematischen Netzwerke beitreten. Die Netzwerke können sich beispielsweise wissenschaftlich zunächst an den vier Schwerpunktthemen dieser Denkschrift (siehe Kapitel 2) orientieren. Zusätzlich können sich Netzwerke für besonders zukunftssträchtige technologische Gebiete bilden wie etwa Numerische Astrophysik, die Bearbeitung großer Datensätze oder adaptive Optik, oder ein „Virtuelles Observatorium“. Die Struktur dieser Netzwerke muss flexibel sein; beispielsweise können geographisch benachbarte Institute stärkere Unterknoten bilden.

Die Finanzierung dieser Netzwerke erfordert eine gemeinsame Anstrengung der Länder, der DFG, des BMBF und der MPG. Wegen der Einbindung vieler kleinerer Einrichtungen, in denen sehr viel Expertise vorhanden ist, die aber für sich allein nicht die kritische Größe erreichen, wird das Kosten/Nutzen-Verhältnis eines solchen Netzwerkes größer sein, als es durch eine Förderung einer vergleichbaren Zahl von Einzelvorhaben erreichbar wäre. Gemeinsam mit anderen Fördermaßnahmen, beispielsweise durch die DFG, sollen Netzwerke die Flexibilität beim Einsatz ihrer Mittel haben; sie unterscheiden sich aber von DFG-Schwerpunkten durch die starke Betonung der Infrastruktureffekte. Es ist geplant, dass die Koordinierung zwischen den Netzwerken im Rat Deutscher Sternwarten stattfinden soll.

Gemeinsame Anstrengung

Die traditionell starke Rolle Deutschlands in der Theoretischen Astrophysik sollte unbedingt gehalten werden. Dies gilt sowohl für den Bereich der Numerischen Astrophysik als auch für eher analytische theoretische Forschung. Es ist daher darauf zu achten, dass der großartige instrumentelle Fortschritt in der Astronomie und die damit verbundene Bindung von Ressourcen nicht zu einer eingeschränkten Förderung der Theorie führt. Nur ein gesundes Gleichgewicht und die Zusammenarbeit von Theorie, Beobachtung und Experiment gewährleistet Erkenntnisgewinn. Die Ausgewogenheit dieser Bereiche ist auch unverzichtbar für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Theoretische Astrophysik

Wie in Kapitel 4 dargestellt, ist die Astrophysik nur an etwa einem Drittel der Universitäten vertreten, die Physiker ausbilden. Dadurch wird die große Chance verpasst, auch an den anderen Universitäten durch die insbesondere auch von Studenten empfundene Attraktivität der Astronomie eine Verstärkung der physikalischen Ausbildung zu erreichen. *Insbesondere ist die Ausbildung von Physiklern ohne Einbezie-*

Ausweitung des Lehrangebots

hung der Astronomie besorgniserregend. Um diese Situation deutlich zu verändern und die Astronomieausbildung flächendeckend zu gewährleisten, werden zwei verschiedene, sich nicht gegenseitig ausschließende Modelle vorgeschlagen:

- Einrichtung neuer Astronomieinstitute oder -gruppen. Die Einrichtung von Astronomieprofessuren an Universitäten mit Physikerausbildung würde nicht nur das Lehrangebot erweitern, sondern gleichzeitig auch zur Stärkung der universitären Forschung in der Astronomie beitragen. Dabei ist darauf zu achten, dass aus Gründen der Konkurrenzfähigkeit diese neuen Gruppen nicht zu klein sind, damit für diese Stellen auch exzellente Wissenschaftler gewonnen werden können. Es sei darauf hingewiesen, dass beispielsweise in Großbritannien in den letzten Jahren mehrere neue Astronomiestandorte gegründet wurden.
- Lehrexport. Hochschullehrer von größeren Astronomiestandorten erbringen das astronomische Lehrangebot an benachbarten Universitäten, wie dies zur Zeit in kleinem Rahmen bereits vereinzelt geschieht. Ein solcher Lehrexport ist mit den vorhandenen Hochschullehrern allerdings nicht zu erreichen; es müssten daher neue Professuren an den bereits vorhandenen Astronomiestandorten eingerichtet werden.

Der Vorteil des Lehrexports ist darin zu sehen, dass die neu zu berufenden Professoren und ihre Mitarbeiter in bereits aktive Institute eingebunden werden und so eine Zersplitterung der astronomischen Forschung vermieden werden könnte. Allerdings ist der Lehrexport realistischlicherweise nur bei geographisch benachbarten Universitäten durchführbar; um eine flächendeckende Ausbildung zu erreichen, müsste er weiterhin länderübergreifend organisiert und finanziert werden. Es wird daher empfohlen, eine Mischung beider Modelle zu realisieren.

5.8 Sicherung und Stärkung der Förderinstrumente

Institutionelle Grundförderung

Es gibt eine Reihe von Elementen, die man der Personal- und Infrastruktur zurechnen muss. Das erste wichtige Element ist die institutionelle Grundförderung: von der MPG bei ihren Instituten, vom BMBF und Ländern bei den Instituten der Leibniz-Gesellschaft und von den Ländern bei den Univer-

sitäten und Landesinstituten. Das zweite Element sind die Förderungen von Projekten der Forschung und Entwicklung durch die DFG und der Nutzung von Großgeräten und Welt- raumteleskopen durch die Verbundforschung des BMBF und des DLR. In den letzten Jahren ist hierzu in verstärktem Maße die Förderung durch die Europäische Union, zum Beispiel in Form von internationalen Netzwerken, hinzugekommen. Schließlich sind in diesem Zusammenhang auch generelle Arbeits- und Dienstrechtsfragen zu nennen.

Eine strukturelle Schwäche und ein Wettbewerbsnachteil der deutschen Astronomie ist die relativ späte Übernahme eigener Verantwortung innerhalb einer Forscherkarriere sowie das Fehlen einer langfristigen akademischen Personalentwicklungsperspektive für jüngere Astrophysiker (genau wie für die Physiker allgemein). Während in den letzten zehn Jahren im Westen die Zahl der Promotionen um etwa 50 % gestiegen ist, hat gleichzeitig ein Abbau von Planstellen um etwa 25 % stattgefunden (siehe Tabelle 6.4), wodurch sich die Karrieremöglichkeiten für den wissenschaftlichen Nachwuchs dramatisch verschlechtert haben. *Es wird in den nächsten Jahren unbedingt erforderlich sein, exzellenten jüngeren Nachwuchswissenschaftlern das Verbleiben in Forschung und Lehre attraktiver zu machen.* Um dies zu erreichen, empfiehlt der Rat Deutscher Sternwarte eine Reihe von Maßnahmen:

*Nachwuchs-
förderung*

- Stärkung der universitären Grundförderung, wie bereits oben ausdrücklich geschildert.
- Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen Max-Planck-Instituten, Landesinstituten und Universitäten. In der Systemevaluation der MPG und der DFG wurde auf das Wettbewerbsgefälle zwischen der Max-Planck-Gesellschaft und den Universitäten hingewiesen. Zur Förderung der Eigenständigkeit des wissenschaftlichen Nachwuchses und zur Stärkung der Zusammenarbeit zwischen den Universitäten und der MPG wird die Einrichtung von Forscher- und Nachwuchsgruppen an Universitäten durch die MPG empfohlen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass in Zusammenarbeit zwischen MPG und Universität eine langfristige Perspektive für diese Forschergruppen erarbeitet wird. Für die Astrophysik könnten diese Instrumente der Zusammenarbeit die dringend erforderliche Verbreiterung der astrophysikalischen Basis an den Universitäten beschleunigen. Dieses ist insbesondere in den neuen Bundesländern erforderlich.

- Tenure-Track-Modell für exzellenten Nachwuchs. Eine wesentliche Verbesserung wäre die Einrichtung eines „Tenure-Track-Modells“, das exzellenten Nachwuchswissenschaftlern frühzeitig eine sichtbare langfristige Perspektive aufzeigt. Die im neuen Hochschulrahmengesetz vorgesehenen Juniorprofessuren bieten im Prinzip diese Möglichkeiten und werden daher begrüßt; allerdings ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abzusehen, wie die einzelnen Länder mit diesem Instrument verfahren werden und ob es zu einer spürbaren Verbesserung der Stellung des wissenschaftlichen Nachwuchses führen wird. Alternativ dazu sollte in Zusammenarbeit von Universitäten mit der DFG und der MPG die Einrichtung eines Tenure-Track-Modells erarbeitet werden (Arbeitstitel: Schwarzschild-Programm), welches das Emmy-Noether- Programm der DFG ergänzt: Hierbei könnten beispielsweise die Universitäten die Verlängerung einer der oben empfohlenen MPG-Nachwuchsgruppen und damit die effektive externe Finanzierung einer Lehrtätigkeit für einige Jahre erreichen, wenn sie sich im Anschluss zur langfristigen Übernahme des Gruppenleiters (nach erbrachtem Erfolgsnachweis) verpflichten. Die Auswahl sollte hierbei nach Ausschreibung durch eine Berufungskommission erfolgen, wie bei C3-Universitätsstellen und MPG-Nachwuchsgruppenleitern.
- Einrichtung interdisziplinärer Lehrstühle und Zentren. Die Astrophysik strahlt stark in andere Fachrichtungen aus und eignet sich deshalb sehr gut für die Einrichtung interdisziplinärer Lehrstühle und Zentren. Zu denken wäre dabei beispielsweise an Lehrstühle für Plasma- und Astroteilchenphysik sowie an Zentren für Stern- und Planetenentstehung, Gravitationswellenastrophysik, Astrochemie und Kosmologie.

Projektförderung

Die Förderung von Forschungsprojekten durch die DFG und die Verbundforschung sind essenzielle Elemente der deutschen Forschungslandschaft; hinzu kommen Fördermaßnahmen der Europäischen Union sowie die Unterstützung von Stiftungen. Diese Drittmittelförderung ist unverzichtbar für die Aufrechterhaltung der Forschung an Universitäten, aber auch von entscheidender Bedeutung für Landesinstitute und Institute der Leibniz-Gesellschaft. Die verschiedenen Förderprogramme unterscheiden sich in ihrem Umfang und ihrer Dauer; während auf der einen Seite Sonderforschungsbereiche der DFG eine langjährige Förderperspektive bieten, sind andere Förderinstrumente auf typischerweise zwei bis drei Jahre befristet.

Im Hinblick auf die oben diskutierten Großprojekte und die wachsende Bedeutung komplexer Modellierung, theoretischer Interpretation und numerischer Simulationen werden die Synergieeffekte in der nächsten Dekade noch wichtiger werden. Aus diesen Gründen wird dringend empfohlen, dass die Forschergemeinde verstärkt Anstrengungen unternimmt, sich um Sonderforschungsbereiche und Schwerpunktprogramme zu bewerben, und dass die DFG in die Lage versetzt wird, diese Instrumente der Förderung verstärkt zu unterstützen. Die Einrichtung von Trans-Regio-Sonderforschungsbereichen wird begrüßt. Diese Förderinstrumente bieten aufgrund ihrer längerfristigen Perspektive die Möglichkeit der gestaltenden Forschungsplanung, was insbesondere auch die Personalplanung betrifft.

(Trans-Regio-)Sonderforschungsbereiche und Schwerpunktprogramme

Die Einbindung der Forschergruppen in große, oftmals internationale Kooperationen und in längerfristige Projekte passen in vielen Fällen nicht in das Konzept der zweijährigen Projektförderung, das beispielsweise dem DFG-Normalverfahren in der Regel zugrunde liegt. Astro-physikalische Forschung findet meistens nicht im Rahmen isolierter oder gut abtrennbarer Zwei-Jahres-Projekte statt. Andererseits sind die aktiven Gruppen durchaus erfolgreich in der Einwerbung von Verlängerungs- bzw. Nachfolgeprojektmitteln. Das wesentliche Problem dabei ist das Fehlen der Planbarkeit: Die Genehmigung eines Verlängerungsantrags wird erst kurz vor Ablauf des ursprünglichen Programms bekannt. Als Konsequenz daraus können erfahrene Mitarbeiter oftmals nicht gehalten bzw. geeignete neue Mitarbeiter nicht kurzfristig angeworben werden.

„Rolling Grants“

Es wird daher empfohlen, als Instrument der Förderung so genannte „Rolling Grants“ einzurichten, wie sie auch in anderen Ländern (zum Beispiel Großbritannien) existieren. Dabei wird einer Forschergruppe oder einer Kollaboration ein Projekt für vier Jahre genehmigt. Eine Evaluation nach etwa zwei Jahren entscheidet dann darüber, ob der Fortgang des Projektes seine Weiterführung über die vier Jahre hinaus rechtfertigt, ob die Mittel nach den vier Jahren gekürzt oder gar erhöht werden sollten, oder ob das Projekt nach den vier Jahren auslaufen soll. Für den Fall einer Verlängerung um zwei Jahre findet die nächste Evaluation zwei Jahre später statt, usw. Bei diesem Modell hat die geförderte Forschergruppe stets eine Planungssicherheit von zwei Jahren, was dann auch erlauben würde, rechtzeitig Stellen auszuschreiben und international nach den geeignetsten Forschern zu

suchen. Der Rat Deutscher Sternwarten ist überzeugt davon, dass eine solche Forschungsförderung bei vergleichbarem Finanzumfang einen wesentlich effizienteren Einsatz der Fördermittel darstellt als die bislang übliche Praxis der Zwei-Jahres-Projekte.

Beschleunigung von Drittmittelverfahren

Die Probleme der fehlenden personellen Flexibilität kleiner Institute und ihre Abhängigkeit von Drittmittelfinanzierung werden durch oftmals lange Bearbeitungs- und Entscheidungsfristen verschärft. Es wäre daher sehr wünschenswert, gerade bei kleineren Anträgen diese Fristen deutlich zu verkürzen und damit der Lebens- und Karriereplanung von jungen Wissenschaftlern verstärkt Rechnung zu tragen. Damit würden auch die Forschungsinstitute stärker konkurrenzfähig bei der Anwerbung bzw. Weiterbeschäftigung von Wissenschaftlern.

Europaweite Programme nutzen

Astronomie und Astrophysik ist international ausgerichtet. Deshalb ist das Feld in einer exzellenten Position, im Umfeld der europäischen Integration europaweite Programme auch weiterhin zu nutzen und in Zukunft verstärkt die Möglichkeit internationaler Studiengänge und Nachwuchs-förderung wie das Erasmus-Programm oder die Marie Curie Fellowships aufzugreifen. In diesem Zusammenhang sind auch die jüngeren Initiativen der DFG (Emmy-Noether-Programm) oder der MPG (International Research Schools) zu begrüßen und auch in Zukunft wünschenswert.

Stärkung der Forschung mit Spitzenteleskopen

Deutsche Astronomen sind erfolgreich bei der Einwerbung von Beobachtungszeit an Spitzenobservatorien, die sehr stark überbucht sind (beispielsweise um etwa einen Faktor 7 beim Hubble Space Telescope). Der Erfolg im Wettbewerb um diese Teleskopzeit, die im internationalen Peer-Review-Verfahren vergeben wird, bescheinigt dem Projekt eine ausgezeichnete Qualität. Um aus den gewonnenen Daten ein Maximum wissenschaftlicher Ergebnisse erzielen zu können, müssen die personellen Ressourcen gesichert sein. Es wird daher empfohlen, dass erfolgreich eingeworbene Beobachtungszeit an Spitzenteleskopen auch bei solchen Observatorien, die nicht in die Verbundforschung aufgenommen sind (zum Beispiel Chandra), stärker mit einer entsprechenden personellen Förderung gekoppelt wird.

Schaffung von Freistellungsmöglichkeiten

Die mangelhafte Vertretung deutscher Wissenschaftler in den Leitungsebenen internationaler Organisationen wie ESO und ESA hat ihre Ursache in der Schwierigkeit deutscher

Spitzenforscher, längerfristig von ihren Aufgaben freigestellt zu werden. Die Schaffung von Freistellungsmöglichkeiten würde wesentlich erleichtert werden, wenn durch geeignete Fördermaßnahmen längerfristige Lehrvertretungen finanziert werden könnten. Lehrvertretungsfinanzierung über eine ausgedehnte Periode (etwa 3 Jahre), zum Beispiel durch ein neues und gezieltes Forschungspreisprogramm, würde hochrangigen Hochschullehrern einerseits genügend Zeit und Freiraum geben, neue Forschungsrichtungen und wissenschaftliche Kollaborationen (zum Beispiel in den geplanten Netzwerken) zu beginnen, andererseits ihnen erlauben, für Aufgaben in den internationalen Organisationen zur Verfügung zu stehen und dadurch den Einfluss deutscher Wissenschaftler in ihnen zu stärken. Forschungspreise könnten für Projekte in Zusammenarbeit mit anderen Instituten verliehen werden und sollten dann Reise- und Sachmittel enthalten, um regelmäßige Besuche (beispielsweise einige Tage im Monat) zum Partnerinstitut zu ermöglichen.

Der Anteil von Frauen in der Astronomie ist, wie auch insgesamt in der Physik, erschreckend gering. Im internationalen Vergleich liegt Deutschland beim weiblichen Anteil von IAU-Mitgliedern gerade noch vor Ländern wie Japan, Schweiz und Indien, nimmt aber mit unter 4 % einen Platz hinter praktisch allen anderen Ländern ein (Großbritannien 7 %, Niederlande 8 %, USA 9 %, Italien 17 %, Frankreich 26 %; IAU-Mittel: 10.5 %). Während für diesen geringen Frauenanteil mehrere Gründe verantwortlich sind, spielt nicht zuletzt das Dienstrecht eine entscheidende Rolle. Für junge Familien und insbesondere Frauen auf befristeten Stellen erlaubt es das Dienstrecht nicht, Überbrückungshilfen, zum Beispiel für Kinderauszeiten, zu gewähren. Im politischen Raum ist deshalb dringend Unterstützung für die geplante Reform des Dienstrechtes (Wissenschaftlertarifvertrag) notwendig.

Frauenförderung

Der aktuelle und auch mittelfristig zu erkennende Mangel an Physikern sollte zu verstärkten Anstrengungen bei der Förderung von Doktoranden Anlass geben. Insbesondere wäre es wünschenswert, die verschiedenen Förderprogramme für Doktoranden dahingehend zu vereinheitlichen, dass die zur Zeit existierenden großen Unterschiede der finanziellen Unterstützung (von ca. 620 € Landesstipendien bis hin zu vollen BAT-IIa- Stellen) ausgeglichen und auf vernünftigem Niveau (mindestens BAT IIa/2) ausgerichtet werden. Es ist nicht zu vermitteln, dass Doktoranden am gleichen Institut, die auch an vergleichbaren Themen arbeiten, sehr unterschiedlich be-

Graduiertenförderung

zahlt werden; daraus entstehen unnötige Konflikte innerhalb von Arbeitsgruppen.

Zusammenfassung

Wir fassen hier die wichtigsten Empfehlungen im Bereich der Organisation, Personal- und Infrastruktur zusammen (siehe Tabelle 5.6):

- Spürbare Verbesserung der Grundausstattung der universitären Institute, speziell im personellen Bereich,
- Einrichtung neuer Lehrstühle (insbesondere fachübergreifend, zum Beispiel in der Plasma- und Astroteilchenphysik, Stern- und Planetenforschung Gravitationswellenastrophysik, Astrochemie und Kosmologie),
- Ausweitung des Lehrangebots, hin zu einer flächendeckenden Astronomieausbildung, gerade auch für angehende Physiklehrer,
- verstärkte Nutzung von DFG-Sonderforschungsbereichen, Schwerpunkten, Graduiertenkollegs und Trans-Regio-Verbänden sowie von Forschungszentren, insbesondere im Bereich des Zusammenspiels von Beobachtung, Theorie und numerischer Modellierung,
- Gründung von länderübergreifenden thematischen „Netzwerken“ oder Verbänden,
- Aufbau von Kompetenzzentren in technisch anspruchsvollen Bereichen,
- Einrichtung von Forscher- und Nachwuchsgruppen gemeinsam von Universitäten und MPG sowie verstärkte Nutzung des Emmy-Noether-Programms der DFG zur Förderung der Eigenständigkeit des wissenschaftlichen Nachwuchses und der Stärkung der Zusammenarbeit zwischen Universitäten und MPG,
- Einrichtung von Tenure-Track-Positionen (Arbeitstitel: Schwarzschild-Stipendium) an Universitäten, und
- Erleichterung von längeren Abordnungen und Forschungsfreistellungen durch ein Preisträgerprogramm.

Tabelle 5.6: Infrastrukturmaßnahmen

Die Zahlen in dieser Tabelle sind in 2001 M€, müssen also entsprechend auf die Jahre inflationskorrigiert werden. In der Tabelle werden die Grundfinanzierung für die Institute und Universitäten nicht extra sowie bei der MPG nur die für die Projekte direkt benötigten, zusätzlich gewünschten (z.) Mittel im Haushalt aufgeführt. Projekte der ersten Priorität sind mit dem Symbol * gekennzeichnet. Bei den Zentren bezieht sich die (in der Summenbildung nicht mitgerechneten) 25 M€ auf das vom DLR finanzierte SOFIA-Institut.

Projekt	P	2003–2009 (M€)					2010–2016 (M€)					
		Länder	BMBF	DLR	DFG	MPG z.	P	Länder	BMBF	DLR	DFG	MPG z.
Nachw.-/Arbeits-/Forschergr.	*			10,0	8,0				10,0	5,0	10,0	5,0
SFB/Schw/Transr/Grad/Norm	*			76,0			*				80,0	
Netzwerke zu Themen 1-4	*	12,0	10,0	2,5			*	12,0	5,0	2,5		
Tenure-Track-Positionen		8,0						5,0				
Neue Lehrstühle		8,0						13,0				
Summe Priorität 1		12,0	10,0	2,5	86,0	8,0		12,0	5,0	2,5	80,0	
Summe Priorität 2		16,0						18,0			10,0	5,0
Gesamtsumme Priorität 1		118,5						99,5				
Gesamtsumme Priorität 2		16,0						33,0				

*Verteilung auf
die Geldgeber*

Tabelle 5.7 fasst die hier vorgeschlagenen Initiativen zusammen und listet die auf die verschiedenen Geldgeber entfallenen Ressourcen, nach Prioritäten und Zeitperiode geordnet. Wie in den anderen Tabellen enthält Tabelle 5.7 die abgeschätzten Kosten in M€ für das Stichjahr 2001. Es wird davon ausgegangen, dass das Budget in seiner künftigen Entwicklung inflationskorrigiert wird. Bei den Ländern (Universitäten und Landesinstitute), dem BMBF (Institute der Leibniz-Gesellschaft) und der MPG ist die bestehende institutionelle Förderung der Institute mitgerechnet. (Sie beträgt etwa 110 M€ pro Jahr inklusive Overheads). Bei der MPG gibt die Spalte „MPG z.“ (zusätzlich) die im Zusammenhang mit den hier empfohlenen Projekten benötigten zusätzlichen Ressourcen an, die außerhalb des Rahmens der bestehenden institutionellen Förderung fallen. „DLR“ bezeichnet hier die durch das BMBF geförderte nationalen Extraterrestrikprogramme und die deutsche Beteiligung am ESA-Wissenschaftsprogramm. Bei DLR (ESA) ist die Hälfte des Wissenschaftsprogramms gezählt, was in etwa dem Anteil der Astronomie/Astrophysik-Forschung an diesem Programm entspricht.

Tabelle 5.7: Aufteilung auf die Geldgeber

Die Max-Planck-Gesellschaft hat laufend (auch im Jahre 2000) zusätzliche Förderungsprogramme für die Astronomie bewilligt (Berufungsmittel, Bautätigkeit, Sonderbeteiligungen etc.). Diese sind hier nicht aufgeführt. Ähnliches gilt für die Länder.

Geldgeber	alle in M€							Jährliche Förderung 2003-16 Prio. 1+2	Jährliche Förderung Stand 2000
	2003-2009 Priorität 1	2010-2016 Priorität 1	2003-2009 Priorität 2	2010-2016 Priorität 2	Jährliche Förderung 2003-16 Prio. 1	Jährliche Förderung 2003-16 Prio. 1	Jährliche Förderung 2003-16 Prio. 1+2		
DFG	86	80	10	12	13	9			
BMBF (ESO)	180	180		26	26	22			
BMBF (national)	112	106	38	16	19	11			
Länder	434	422	30	61	65	58			
DLR (ESA)	346	350		50	50	50			
DLR (national)	107	130	38	17	23	16			
MPG (zusätzlich)	26	11	15	3	4	0			
MPG (institutionell)	414	423	9	60	61	60			
Insgesamt:	1705	1702	140	244	260	226			

6 Anhang

Mitgliedsinstitute des Rates Deutscher Sternwarten

Dr. Remeis-Sternwarte Bamberg
Astronomisches Institut der Universität
Erlangen-Nürnberg
Sternwartstraße 7
96049 Bamberg
Tel. 0951-95222-0
Fax: 0951-95222-22
<http://a400.sternwarte.uni-erlangen.de>

Zentrum für Astronomie
und Astrophysik
der Technischen Universität Berlin
Hardenbergstraße 36
10623 Berlin
Tel. 030-314-23783
Fax: 030-314-24885
<http://www-astro.physik.TU-Berlin.de>

Institut für Weltraumsensorik
und Planetenerkundung
DLR Adlershof
Rudower Chaussee 5
12489 Berlin
Tel. 030-67055-500
Fax: 030-67055-502
<http://solarsystem.dlr.de>

Astronomisches Institut
der Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150/NA7
44780 Bochum
Tel. 0234-322-3454
Fax: 0234-32-14169
<http://www.astro.ruhr-uni-bochum.de>

Institut für Theoretische Physik
der Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl IV
(Weltraum- und Astrophysik)
Universitätsstraße 150
44780 Bochum
Tel. 0234-322-4728
Fax: 0234-32-14177
<http://www.tp4.ruhr-uni-bochum.de>

Sternwarte mit Observatorium
Hoher List der Universität Bonn
Auf dem Hügel 71
53121 Bonn
Tel. 0228-73-3655
Fax: 0228-73-3672
<http://www.astro.uni-bonn.de/~webstw>

Radioastronomisches Institut
der Universität Bonn
Auf dem Hügel 71
53121 Bonn
Tel. 0228-73-3658
Fax: 0228-73-3672
<http://www.astro.uni-bonn.de/~webrai>

Institut für Astrophysik
und Extraterrestrische Forschung
der Universität Bonn
Auf dem Hügel 71
53121 Bonn
Tel. 0228-73-3676
Fax: 0228-73-4022
<http://www.astro.uni-bonn.de/~webiaef>

Max-Planck-Institut
für Radioastronomie
Auf dem Hügel 69
53121 Bonn
Tel. 0228-525-1
Fax: 0228-525-229
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de>

Lohrmann-Observatorium
und Professur für Astronomie
im Institut für Planetare Geodäsie
der Technischen Universität
Mommsenstraße 13
01062 Dresden
Tel. 0351-463-4097
Fax: 0351-463-7019
<http://astro.geo.tu-dresden.de>

Institut für Theoretische Physik
der Universität Frankfurt
(Astrophysik)
Robert-Mayer-Straße 10
60054 Frankfurt/Main
Tel. 069-798-22357
Fax: 069-798-28350
<http://www.astro.uni-frankfurt.de>

Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik
Schöneckstraße 6
79104 Freiburg
Tel. 0761-3198-0
Fax: 0761-3198-111
<http://www.kis.uni-freiburg.de>

Max-Planck-Institut
für Astrophysik
Karl-Schwarzschild-Straße 1
85748 Garching
Tel. 089-30 000-0
Fax: 089-30 000-3235
<http://www.mpa-garching.mpg.de>

Max-Planck-Institut
für Extraterrestrische Physik
Giessenbachstraße
85748 Garching
Tel. 089-30 000-0
Fax: 089-30 000-3569
<http://www.mpe-garching.mpg.de>

Technische Universität München
Physik Department E15
James-Franck-Straße
85748 Garching
Tel. 089-289-12511
Fax: 089-289-12680
<http://www.e15.physik.tu-muenchen.de>

Universitätssternwarte
Geismarlandstraße 11
37083 Göttingen
Tel. 0551-39-5042
Fax: 0551-39-5043
<http://www.uni-sw.gwdg.de>

Max-Planck-Institut
für Gravitationsphysik
Albert-Einstein-Institut
Am Mühlenberg 1
14476 Golm
Tel. 0331-567-70
Fax: 0331-567-7298
<http://www.aei-potsdam.mpg.de>

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg
Tel. 040-7252-4112
Fax: 040-7252-4198
<http://www.hs.uni-hamburg.de>

Institut für Atom- und Molekülphysik
der Universität Hannover
Abt. Spektroskopie
Callinstraße 38
30167 Hannover
Tel. 0511-762-2229
Fax: 0511-762-5861
<http://www.amps.uni-hannover.de>

Astronomisches Recheninstitut
Mönchhofstraße 12-14
69120 Heidelberg
Tel. 06221-405-0
Fax: 06221-405-297
<http://www.ari.uni-heidelberg.de>

Institut für Theoretische Astrophysik
der Universität Heidelberg
Tiergartenstraße 15
69121 Heidelberg
Tel. 06221-54-4837
Fax: 06221-54-4221
<http://www.ita.uni-heidelberg.de>

Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl
Königstuhl
69117 Heidelberg
Tel. 06221-509-0
Fax: 06221-509-202
<http://www.lsw.uni-heidelberg.de>

Max-Planck-Institut
für Astronomie
Königstuhl 17
69117 Heidelberg
Tel. 06221-528-0
Fax: 06221-528-246
<http://www.mpia.de/index.html>

Max-Planck-Institut
für Kernphysik
Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg
Tel. 06221-516-229
Fax: 06221-516-549
<http://www.mpi-hd.mpg.de>

Astrophysikalisches Institut
und Universitätssternwarte
Schillergäßchen 2
07745 Jena
Tel. 03641-947501
Fax: 03641-947502
<http://www.astro.uni-jena.de>

Max-Planck-Institut
für Aeronomie
Max-Planck-Straße 2
37191 Katlenburg-Lindau
Tel. 05556-979-0
Fax: 05556-979-240
<http://www.linmpi.mpg.de>

Institut für Theoretische Physik
und Astrophysik der Universität Kiel
24098 Kiel
Tel. 0431-880-4110
Fax: 0431-880-4100
<http://www.astrophysik.uni-kiel.de>

I. Physikalisches Institut
der Universität Köln
Zülpicher Straße 77
50937 Köln
Tel. 0221-470-5737
Fax: 0221-470-5162
<http://www.ph1.uni-koeln.de/index.html>

Thüringer Landessternwarte
Karl-Schwarzschild-Observatorium
Sternwarte 5
07778 Tautenburg
Tel. 036427-863-0
Fax: 036427-863-29
<http://www.tls-tautenburg.de>

Institut für Astronomie und Astrophysik
der Universität München
Universitätssternwarte
Observatorium Wendelstein
Scheinerstraße 1
81679 München
Tel. 089-2180-6001
Fax: 089-2180-6003
<http://www.usm.uni-muenchen.de>

Institut für Astronomie und Astrophysik
der Universität Tübingen
Abteilung Astronomie
Sand 1
72076 Tübingen
Tel. 07071-29-72486
Fax: 07071-29-3458
<http://astro.uni-tuebingen.de>

Astrophysikalisches Institut Potsdam
An der Sternwarte 16
14482 Potsdam
Tel. 0331-7499-0
Fax: 0331-7499-200
<http://www.aip.de>

Institut für Astronomie und Astrophysik
der Universität Tübingen
Abteilungen Theoretische Astrophysik,
Computational Physics
Auf der Morgenstelle 10
72076 Tübingen
Tel. 07071-29-72487
Fax: 07071-29-77575
<http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de>

Bereich Astrophysik
Universität Potsdam
Postfach 601553
14415 Potsdam
Tel. 0331-977-1054
Fax: 0331-977-1107
<http://www.astro.physik.uni-potsdam.de>

Lehrstuhl für Astronomie
Institut für Theoretische Physik
und Astrophysik der
Universität Würzburg
Am Hubland
97074 Würzburg
Tel. 0931-888-5031
Fax: 0931-888-4603
<http://www.astro.uni-wuerzburg.de>

Zweckverband Sternwarte Sonneberg
Sternwartestraße 32
96515 Sonneberg
Tel. 03675-812-10
Fax: 03675-812-19
<http://www.stw.tu-ilmenau.de>

Tabelle 6.1: Wissenschaftliche Arbeitsgebiete der Astronomie- und Astrophysikinstitute in Deutschland

Institut	Arbeitsgebiet(e)	Technologieentwicklung
Bamberg, StW	Weißer Zwerge Enge Doppelsterne Heiße Sterne	
Berlin, DLR	Sternentstehung und interstellares Medium Planetenerkundung	Ja
Berlin, TU	Sternatmosphären Zirkumstellare Staubhüllen Astrochemie Numerische Astrophysik	
Bochum, AIB	Zwerggalaxien Interstellares Medium Sternentstehung	Ja
Bochum, Theor. Physik	Plasmaphysik Hochenergiephysik und Weltraumforschung	
Bonn, IAEF	Gravitationslinsen Kosmologie Interplanetarer Raum Hochatmosphäre	
Bonn, MPIfR	Sternentstehung Späte Stadien der Sternentwicklung Aktive Galaxienkerne Galaxien und ihre Entwicklung Magnetfelder Pulsare Astrochemie Kosmologie	Ja
Bonn, RAIUB	Zwerggalaxien Galaxienentwicklung Interstellares Medium Submillimeter- und Millimeterastronomie	
Bonn, StW	Sterne, stellare Populationen Struktur der Galaxis Interstellare UV-Spektroskopie Zwerggalaxien	Ja
Dresden, Univ. Frankfurt, UF	Sonnensystem Interstellare Materie Strahlungstransport, Moleküllinien Quasare	
Freiburg, KIS	Sonnenphysik Stellare Aktivität Magnetohydrodynamik	Ja

Tabelle 6.1: Fortsetzung

Institut	Arbeitsgebiet(e)	Technologieentwicklung
Garching, MPA	Nukleare Astrophysik Hochenergieastrophysik Numerische Astrophysik Sternentwicklung Kosmologie Struktur und Entwicklung von Galaxien	Ja
Garching, MPE	Kosmologie Endstadien der Sternentwicklung Schwarze Löcher, aktive Galaxienkerne Galaxienentwicklung Stern- und Planetenentstehung, extrasolare Planeten Astrophysikalische Plasmen	Ja
Garching, TUM	Astroteilchenphysik	
Göttingen, USG	Theoretische Stelldynamik Numerische Astrophysik Hochenergieastrophysik Stellarastronomie Galaxien und Galaxienhaufen Sonne (Beobachtung und Theorie)	Ja
Hamburg, UH	Kosmologie Sternaktivität und Koronen Endstadium der Sternentwicklung Sternatmosphären	Ja
Hannover, Univ.	Gravitationswellen	Ja
Heidelberg, ARI	Astrometrie, Stelldynamik Ephemeriden und Kalender Bibliographie	Ja
Heidelberg, ITA	Sternatmosphären Akkretionsscheiben Entstehung von Sternen und Planeten Numerische Astrophysik	
Heidelberg, LSW	Aktive Galaxien und Quasare Röntgenquellen Novae Sternentstehung Jets und Scheiben Schwarze Löcher Heiße Sterne Sonne	Ja

Tabelle 6.1: Fortsetzung

Institut	Arbeitsgebiet(e)	Technologieentwicklung
Heidelberg, MPIA	Struktur und Entwicklung von Galaxien Stern- und Planetenentstehung, interstellares Medium Dunkle Materie Schwarze Löcher Numerische Astrophysik	Ja
Heidelberg, MPIK	TeV-Gammaastronomie Astroteilchenphysik Plasmaastrophysik Infrarot-Astrophysik	Ja
Jena, AIU	Stern- und Planetenentstehung Interstellares Medium Laborastrophysik, Astrochemie Numerische Astrophysik	Ja
Katlenburg-Lindau MPAE	Sonnenphysik Heliosphärenphysik Weltraumplasma und Magnetohydrodynamik Sonne-Erde-Beziehungen	Ja
Kiel, Uni	Sternatmosphären Weiße Zwerge Kühle Sterne und Sonne Interstellares Medium Stellardynamik Galaxienentwicklung	
Köln, 1. Phys. Inst.	Sternentstehung Entwicklung von Galaxien Aktive Galaxien Interstellares Medium	Ja
München, USM	Winde und Atmosphären von Sternen Struktur und Entstehung von Galaxien Plasmaastrophysik Doppelsterne Kataklysmische Veränderliche	Ja
Potsdam, AIP	Magnetohydrodynamik Physik und Aktivität von Sternen Sonnenphysik Sternentstehung und extrasolare Planeten Entstehung und Entwicklung von Galaxien Kosmologie Numerische Astrophysik	Ja

Tabelle 6.1: Fortsetzung

Institut	Arbeitsgebiet(e)	Technologieentwicklung
Potsdam, UP	Heiße Sterne Gravitationslinsen Extrasolare Planeten Quasare	Ja
Potsdam, AEI	Gravitationswellen Quantengravitation Numerische Gravitation	
Sonneberg, StW	Veränderliche Sterne Erdnahe Asteroiden Himmelsüberwachung Datenbanken	Ja
Thüringen/Taut., LSW	Extrasolare Planeten und Braune Zwerge Sternentstehung Aktive Galaxien Gamma Ray Bursts Stellare Pulsation	
Tübingen, IAAT	Endstadien der Sternentwicklung Experimentelle und theoretische Röntgenastronomie UV-Astronomie Relativistische Astrophysik Stern- und Planetenentstehung Numerische Astrophysik	Ja
Würzburg, Univ.	Extragalaktische Astronomie Astroteilchenphysik Hochenergieastrophysik	

Tabelle 6.2: Wissenschaftliches Personal an deutschen Instituten

Personal	Insgesamt	Universitätsinstitute	Außeruniversitäre Institute (inkl. MPG)
C4	50	27	23
C3	47	19	28
Planstellen	375	94.5	280.5
C2, C1, A/BAT			
Drittmittel	202	83	119
Gesamt	674	223.5	450.5
Doktoranden			
Planstellen	147	31	116
Drittmittel	262	215	47
Gesamt	409	246	163
Diplomanden	215	163	52

Tabelle 6.3: Zeitliche Stellenentwicklung in der Astronomie

Jahr	Planstellen	Drittmittel	Techniker	Verwaltung
1962	100	30	130	17
1987	379	109	342	112
1999	375	202	405	90,9

Tabelle 6.4: Zeitliche Entwicklung abgeschlossener Diplom- und Doktorarbeiten

Jahr	Diplom	Anteil	Promotion	Ost/West	Anteil
1991	253	7.5 %	55	1/54	4,8 %
1993	207	5.8 %	61	3/58	4,3 %
1995	318	10.6 %	50	1/24	3,3 %
1997	304	8.9 %	83	6/77	5,5 %
1998	283	8.8 %	88	9/79	5,9 %
1999	215	8.4 %	77	8/69	5,0 %

Der prozentuale Anteil bezieht sich auf die Gesamtzahl aller Diplom- und Dissertationsabschlüsse im Fach Physik des jeweiligen Jahres.

Tabelle 6.5: Zeitliche Entwicklung der Publikationen und Konferenzberichte

Jahr	Referierte Zeitschriften	Konferenzbände
1991	1435	244
1993	1646	379
1995	1277	886
1997	1564	894
1998	1726	1034
1999	1681	1108

Quelle: Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft

Statistisches Material zur Entwicklung der Astronomie und Astrophysik

Die folgenden Institute sind in der Statistik erfasst:

Bamberg, Berlin, Bochum (TH, AI), Bonn (IAEF, RAIUB, StW, MPIFR), Dresden, Frankfurt, Freiburg (KIS), Göttingen, Hamburg, Hannover, Heidelberg (ARI, ITA, LSW, MPIA, MPIK), Jena, Kiel, Köln, Katlenburg-Lindau, München, Garching (TUM, MPA, MPE), Potsdam (AIP, Univ.), Sonneberg, Tautenburg, Tübingen, Würzburg.



Abb. 6.1: Wissenschaftliche Astronomieplanstellenverteilung in Deutschland

Glossar/Akronyme

Organisationen/Institute

AI	Astronomisches Institut, Bochum
AIP	Astrophysikalisches Institut Potsdam
AIU	Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte, Jena
AWG	ESA Astronomy Working Group
ARI	Astronomisches Recheninstitut, Heidelberg
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CARA	California Association for Research in Astronomy
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DSAZ	Deutsch-Spanisches Astronomisches Zentrum
ESA	European Space Agency
ESO	European Southern Observatory
EU	European Union
FrInGe	Frontiers of Interferometry in Germany (Deutsches Interferometriezentrum für den optischen und infraroten Wellenlängenbereich, Heidelberg)
IAEF	Institut für Astrophysik und Extraterrestrische Forschung der Universität Bonn
IAU	International Astronomical Union
IGN	Instituto Geografico Nacional, Spanien
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers, Frankreich
IRAM	Institut de Radioastronomie Millimetrique, Grenoble, Frankreich; Granada, Spanien
LNGS	Laboratorio Nazionale del Gran Sasso
LSW	Landessternwarte, Heidelberg
MPE	MPI für Extraterrestrische Physik, Garching
MPA	MPI für Astrophysik, Garching
MPI	Max-Planck-Institut
MPIA	MPI für Astronomie, Heidelberg
MPIfR	MPI für Radioastronomie, Bonn
MPIK	MPI für Kernphysik, Heidelberg
MPG	Max-Planck-Gesellschaft
NAS/NRC	National Academy of Science
NASA	National Aeronautic and Space Agency
PPARC	Particle Physics and Astronomy Research Council, UK
RAIUB	Radioastronomisches Institut der Universität Bonn
RDS	Rat Deutscher Sternwarten
SFB	Sonderforschungsbereich
Stw	Sternwarte
SSAC	ESA Space Science Advisory Committee

Uni	Universität
USM	Universitätssternwarte München
VBF	Verbundforschung

Astronomische und andere Begriffe

AGN	Aktiver Galaxienkern
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ESFON	European Star Formation Network
EUV	Extreme Ultraviolet
GAVO	German Virtual Observatory
GCT	Gregory-Coudé-Teleskop
GRID	Nachfolge des Internet
GRK	Graduiertenkolleg
IC	Index Catalogue
IR	Infrarot
ISS	International Space Station
KIS	Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik
MACHOs	Massive Compact Halo Objects
MCG	Morphological Catalogue of Galaxies
MeV	Mega-Elektronenvolt
Mrk	Markarian
MIDEX	Medium-class Explorer
NGC	New General Catalogue
NIR	Near Infrared
NORAS	Northern Rosat All-Sky (Cluster Survey)
OPTICON	Optical Infrared Coordination Network for Astronomy
QSO	Quasistellar Object
REFLEX	ROSAT/ESO Flux Limited X-Ray Survey
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SMEX	Small Explorer
SPP	Schwerpunktprogramm
SZ-Effekt	Sunyaev-Zeldovich-Effekt
TeV	Tera-Elektronenvolt
THz	Tera-Hertz
TMR	Training and Mobility of Researchers
ULIRGs	Ultra Luminous Infrared Galaxies
UV	Ultraviolett
VHE	Very High Energy
WIMPs	Weakly Interacting Massive Particles

Teleskope, Instrumente, Experimente

Gammabereich

CGRO	Compton Gamma Ray Observatory
COMPTEL	Imaging Compton Telescope
EGRET	Energetic Gamma Ray Experiment Telescope
INTEGRAL	International Gamma Ray Laboratory
GLAST	Gamma Ray Large Area Space Telescope
HEGRA	High Energy Gamma Ray Astronomy
H.E.S.S.	High Energy Stereoscopic System
MAGIC	Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope
MEGA	Medium Energy Gamma Ray Astronomy

Röntgenbereich

ABRIXAS	A Broad Band Imaging X-Ray All-Sky Survey
ASCA	Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics
Chandra	amerikanischer Röntgensatellit (ehemals AXAF), benannt nach S. Chandrasekhar
EPIC	European Photon Imaging Camera
ROSAT	Röntgensatellit
ROSITA	Röntgen Survey with Imaging Telescope Array (Nachfolge ABRIXAS)
XEUS	X-Ray Evolving Universe Spectroscopy Mission
XMM-Newton	X-Ray Multi Mirror Mission, ESA-Röntgensatellit, benannt nach Isaac Newton

UV-, optischer und Infrarotbereich

ALFA	Adaptive Optics with a Laser For Astronomy, Calar Alto
ASTRO-SPAS	Shuttle Pallet Satellite, wiederverwendbare Weltraumplattform
ATST	Advanced Technology Solar Telescope
BUSCA	Simultane Vierfarben CCD-Kamera, Calar Alto
COS	Cosmic Origins Spectrograph
Darwin	Infrared Space Interferometer, benannt nach C. Darwin
DENIS	Deep Near Infrared Survey
Eddington	Asteroseismology mission, benannt nach A.S. Eddington
FIRST	Far Infrared Space Telescope, jetzt Herschel
Herschel	Neuer Name für FIRST, Far Infrared Space Telescope
FORS 1 + 2	Focal Reducer and Spectrograph (zwei Instrumente)
FUSE	Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer
GAIA	Global Astrometric Interferometer for Astrophysics

GREGOR	Sonnenteleskop, Teneriffa, benannt nach J. Gregory
HET	Hobby Eberly Telescope, Texas
HHT	Heinrich-Hertz-Teleskop
HIPPARCOS	Astrometriesatellit, benannt nach Hipparchos
HST	Hubble Space Telescope
IRAS	Infrared Astronomical Satellite
ISO	Infrared Space Observatory
ISOCAM	ISO Camera
ISOPHOT	ISO Imaging Photopolarimeter
IUE	International Ultraviolet Explorer
JWST	James Webb Space Telescope, ehemals Next Generation Space Telescope, NGST
KAO	Kuiper Airborne Observatory
Keck-Teleskop	Zwei 10-m-Teleskope auf Mauna Kea, Hawaii, benannt nach Keck
LASCO	Large Angle and Spectrometric Coronagraph
LBT	Large Binocular Telescope, Mt. Graham
LBTI	LBT-Interferometer
LUCIFER	LBT NIR Spectrograph and Integral-Field Unit
2MASS	2 Micron All Sky Survey
MIRI	Mid Infrared Instrument
MONET	Monitoring Network of Telescopes
NGST	siehe JWST
NTT	New Technology Telescope, La Silla
OmegaCAM	Kamera für das VST
ORFEUS	Orbiting and Retrievable Far and Extreme Ultraviolet Spectrograph
OWL	Overwhelmingly Large Telescope
PRIME	Primordial Explorer
SALT	Southern Africa Large Telescope
SHARP	Hochauflösende Infrarotkamera
SIRTF	Space Infrared Telescope Facility
SOFIA	Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
Solar Orbiter	Raumsonde zur Sonnenforschung
STEREO	Stereoscopic View of the Sun-Earth Connection
STELLA	Robotisches Teleskop zu Untersuchung stellarer Aktivität, Teneriffa
SUNRISE	Ballonexperiment zur Sonnenforschung
THEMIS	Sonnenteleskop, Teneriffa
TIMMI-2	Thermal Infrared Multimode Instrument am 3.6-m-Teleskop, La Silla
ULYSSES	Sonnen-Pol-Mission der NASA
VISTA	Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy
VLT	Very Large Telescope, Paranal
VLTi	VLT-Interferometer
VST	VLT Survey Telescope, Paranal
VTT	Vakuum-Turmteleskop, Teneriffa
WSO	World Space Observatory

Submillimeterradiobereich

ALMA	Atacama Large Millimetre Array, Chajnantor
APEX	Atacama Pathfinder Experiment; Pilot-Experiment für ALMA
BOOMERanG	Balloon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics
CARMA	California Millimeter Array
COBE	Cosmic Background Explorer
EVN	European VLBI Network
EVLA	Expanded Very Large Array
JCMT	James Clerk Maxwell Teleskop, Mauna Kea
LOFAR	Low Frequency Array, geplantes Radioteleskop
MAMBO	Max-Planck-Millimeter-Bolometer
MAXIMA	Millimeter Anisotropy Experiment Imaging Array
MERLIN	Multi-Element Radio Linked Interferometer Network
MMIC	Monolithic microwave integrated circuits
Planck	Cosmic Background Mission, benannt nach Planck
SCUBA	Submillimetre Common-User Bolometer Array
SKA	Square Kilometre Array, geplantes Radioteleskop
VLA	Very Large Array
VLBA	Very Long Baseline Array
VLBI	Very Long Baseline Interferometer
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Astroteilchenphysik

AMANDA	Antarctic Muon and Neutrino Detector Array
ANTARES	Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental Research
AUGER	Cosmic Ray Project, benannt nach P. Auger
BOREXINO	Detector for Low Energy Solar Neutrinos, Gran-Sasso-Laboratorium
CDMS	Cryogenic Dark Matter Search
CRESST	Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers
DAMA	Dark Matter searches with low activity scintillators, Gran-Sasso-Laboratorium
EDELWEISS	Expérience pour Détecter les WIMPs en Site Souterrain
EUSO	Extreme Universe Space Observatory
GALLEX	Gallium Experiment, Gran-Sasso-Laboratorium
GENIUS	Germanium in liquid Nitrogen Underground Setup
GNO	Gallium Neutrino Observatory, Gran-Sasso-Laboratorium
Homestake	Neutrinoexperiment in der amerikanischen Homestake-Mine
ICECUBE	Neutrino-Teleskop: Instrumenting a cubic kilometre of ice under the South Pole
KASCADE	Karlsruhe Shower Core and Array Detector

LENS	Low Energy Neutrino Spectroscopy
SAGE	Sovjet-American Gallium Experiment
SNO	Sudbury Neutrino Observatory
Super-Kamiokande	japanischer Neutrinodetektor

Gravitation

GEO600	Laserinterferometer in Hannover mit 600 m Armlänge
GP/B-Mission	Gravity Probe B
LIGO II	Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
LISA	Laser Interferometer Space Antenna
STEP	Satellite Test of Equivalent Principle
VIRGO II	italienisch-französisches Laserinterferometer

