

Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg-Königstuhl



Jahresbericht **2006**



Zum Titelbild:

Dieses Bild der Spiralgalaxie NGC 6946 entstand am Large Binocular Telescope am 18. September 2006. Die Galaxie ist etwa 16 Millionen Lichtjahre entfernt. Das Komposit ist eine Überlagerung von Aufnahmen durch UV-, Blau- und Grünfilter unter Verwendung eines der beiden Primärspiegel und der Primärfokus-Kamera für den blauen Spektralbereich.

Die gesamte Belichtungszeit betrug 560 Sekunden im nahen Ultraviolett und jeweils 400 Sekunden im blauen (B) und im grünen (V) Spektralbereich, aufgeteilt in 20 Sekunden lange Einzelbelichtungen, um eine Sättigung der Bilder heller Sterne zu vermeiden. In dem Dreifarben-Komposit sind die Aufnahmen in U, B und V in den Farben Blau, Grün und Rot dargestellt.

(Bild: Vincenzo Testa, Cristian De Santis, LBT)

Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht 2006



Max-Planck-Institut für Astronomie

Wissenschaftliche Mitglieder, Kollegium, Direktoren:
Prof. Hans-Walter Rix (Geschäftsführender Direktor)
Prof. Thomas Henning

Wissenschaftlicher Referent: Dr. Klaus Jäger *Telefon:* 0049-6221-528-379
Öffentlichkeitsarbeit (Leitung): Dr. Jakob Staude *Telefon:* 0049-6221-528-229
Verwaltung (Leitung): Mathias Voss *Telefon:* 0049-6221-528-230

Emeritierte wissenschaftliche Mitglieder:
Prof. Guido Münch

Auswärtige wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Immo Appenzeller, Heidelberg
Prof. Steven Beckwith, Baltimore
Prof. Karl-Heinz Böhm, Seattle

Prof. George H. Herbig, Honolulu
Prof. Rafael Rebolo, Teneriffa

Fachbeirat:

Prof. Robert Williams, Baltimore (Vorsitz)
Prof. Ralf-Jürgen Dettmar, Bochum
Prof. Ewine van Dishoeck, Leiden
Prof. Pierre Léna, Meudon
Prof. Dieter Reimers, Hamburg

Prof. Anneila Sargent, Pasadena
Prof. Rens Waters, Amsterdam
Prof. Simon D. M. White, Garching
Prof. Lodewijk Woltjer, St-Michel-l'Obs.
Prof. Harold Yorke, Pasadena

Kuratorium:

Min.-Dir. Dr. Hermann-Friedrich Wagner, Bonn (Vorsitz)
Dr. Ludwig Baumgarten, Bonn
Min.-Dir. Dr. Rainer Hägele, Stuttgart
Prof. Peter Hommelhoff, Heidelberg
Dr. Michael Kaschke, Oberkochen

Dr. Karl A. Lamers, MdB, Berlin
Prof. Roland Sauerbrey, Dresden
Dr. h.c. Klaus Tschira, Heidelberg
Prof. Andreas Tünnermann, Jena
Ranga Yogeshwar, Köln

Mitarbeiter:

Gegenwärtig sind 246 Mitarbeiter (einschließlich der Drittmittelbeschäftigte) am Institut tätig, darunter 34 Wissenschaftler, 57 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler und 46 Doktoranden.

Anschrift: MPI für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg
Telefon: 0049-6221-528-0 *Fax:* 0049-6221-528-246
E-mail: sekretariat@mpia.de *Internet:* <http://www.mpia.de>

Calar-Alto-Observatorium

Anschrift: Centro Astronómico Hispano Alemán, Calle Jesús Durbán 2/2, E-04004 Almería
Telefon: 0034-950-230-988, 0034-950-632-500 *Fax:* 0034-950-632-504
E-mail: info@caha.es *Internet:* <http://www.caha.es>

Arbeitsgruppe »Laborastrophysik«, Jena

Anschrift: Institut für Festkörperphysik der FSU, Helmholtzweg 3, D-07743 Jena
Telefon: 0049-3641-947-354 *Fax:* 0049-3641-947-308
E-mail: friedrich.huisken@uni-jena.de

© 2007 Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg
Herausgeber: Jakob Staude, Thomas Henning, Hans-Walter Rix, Klaus Jäger, Axel M. Quetz
Text: Thomas Bührke und andere
Bilder: MPIA und andere
Graphik, Bildbearbeitung und Layout: Karin Meißner, Carmen Müllerthann
Druck: Koelblin-Fortuna-Druck GmbH & Co. KG, Baden-Baden

ISSN 1437-2924; Internet: ISSN 1617-0490

Inhalt

Vorwort	5	IV.3 ESPRI – Suche nach Exoplaneten mit PRIMA 122
I.1 Scientific Goals	6	IV.4 SPHERE –Abbildung extrasolarer Planeten 123
I.2 Observatories, Telescopes, and Instruments	9	IV.5 LINC-NIRVANA, das Herzstück des LBT 124
I. Allgemeines	6	IV.6 LUCIFER I/II 126
I.1 Wissenschaftliche Zielsetzung	6	IV.7 ASTRALUX –beugungsbegrenzte Abbildung im sichtbaren Wellenlängenbereich 127
I.2 Observatorien – Teleskope – Instrumente	10	IV.8 PANIC – eine Panoramakamera für das nahe Infrarot 129
I.3 Nationale und Internationale Zusammenarbeit ..	16	IV.9 PYRAMIR – Ein neuer Wellenfrontsensor für ALFA 130
I.4 Lehre und Öffentlichkeitsarbeit	19	IV.10 E-ELT – ein extrem großes Teleskop für Europa 131
II. Highlights	20	IV.11 HERSCHEL vor dem Start 132
II.1 Zweitnächster Brauner Zwerg entdeckt	20	IV.12 Instrumente für das JWST 137
II.2 Das Ende einer zirkumstellaren Scheibe	23	IV.13 GAIA – die galaktische Durchmusterungsmission 140
II.3 Das Wechselspiel zwischen Planet und zirkumstellarer Scheibe	27	
II.4 Entstehung massereicher Sterne	32	
II.5 Molekulares Gas in hoch rotverschobenen Quasaren	40	
II.6 Die langsame Entwicklung von Galaxien in ihren Halos aus Dunkler Materie	46	
II.7 Das Schwarze Loch im Zentrum von Centaurus A	50	
II.8 Der Jet des Quasars 3C 273	57	
III. Ausgewählte Forschungsbereiche	62	
III.1 Junge extrasolare Planeten	62	
III.2 Die Geburtsstätten von Planeten	66	
III.3 Kartierung des Halos unserer Galaxis	81	
III.4 Tiefe Durchmusterung bei mehreren Wellenlängen	92	
IV. Instrumentelle Entwicklungen	114	
IV.1 Neue technologische Entwicklungen	114	
IV.2 Erstes Licht für PARSEC	120	
V. Menschen und Ereignisse	144	
V.1 Das Institut stockt auf	144	
V.2 Neue Nachwuchsgruppen am Institut	147	
V.3 International Max Planck Research School in Heidelberg angelaufen	151	
V.4 Minisymposien zur Zukunft der Astronomie und Kosmologie	154	
V.5 Tagungen, Kolloquien, Workshops	156	
V.6 Höhepunkte der Öffentlichkeitsarbeit	159	
V.7 Ernst-Patzer-Preis für Vernesa Smolcic und Catherine Heymans	163	
V.8 Das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg	165	
Personal	169	
Arbeitsgruppen	171	
Zusammenarbeit mit Firmen	172	
Lehrveranstaltungen	174	
Tagungen, Vorträge	175	
Mitarbeit in Gremien	181	
Weitere Aktivitäten	182	
Veröffentlichungen	183	

Vorwort

Mit diesem Jahresbericht möchten wir einen Überblick über die wissenschaftlichen Aktivitäten am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) geben; er wendet sich sowohl an unsere Fachkollegen in aller Welt als auch an die interessierte Öffentlichkeit.

Das Jahr 2006 hat dem MPIA abermals zahlreiche positive Entwicklungen und auf so unterschiedlichen Gebieten wie der Geschichte der Verschmelzungen von Galaxien und den frühen Stadien der Planetenbildung eine reichhaltige Ernte bedeutsamer astrophysikalischer Entdeckungen erbracht.

Auch im Jahr 2006 sind weitere junge Wissenschaftler der neuen Generation ans Institut gekommen: Insgesamt acht Nachwuchsgruppen arbeiten heute am MPIA. Dieses schnelle Wachstum war einer der Gründe, die erstmals eine größere Erweiterung unseres Institutsgebäudes erforderlich machten: Im August wurde der Neubau eines zusetzlichen Stockwerks bezogen.

Die wichtigste von allen Neuigkeiten in diesem Jahr waren aber die ersten wissenschaftlichen Daten vom LBT.

Schließlich können wir über gute, stetige Fortschritte beim Bau der wichtigsten zukünftigen Einrichtungen und Instrumente berichten – des Large Binocular Telescope (LBT), der Instrumente der zweiten Generation für das Very Large Telescope Interferometer (VLTI) und der Instrumente für das James Webb Space Telescope, den Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE. Diese Instrumente bilden die sichere Grundlage für zukünftige astronomische Entdeckungen.

Neben den kürzeren Darstellungen aktueller Forschungsergebnisse berichten wir ausführlicher über ausgewählte Forschungsschwerpunkte des Instituts. Wir werden diese umfassenden Berichte in den kommenden Jahren fortsetzen, so dass sich nach mehreren Jahresberichten ein Gesamtbild des Forschungsprofils unseres Institutes ergibt.

Mit unseren Jahresberichten wollen wir aber auch wichtige Ereignisse, die am Institut stattgefunden haben, beleuchten. Gleichzeitig lassen wir Mitarbeiter und Freunde des MPIA zu Wort kommen, um ein lebendiges Bild von der Arbeitsatmosphäre am Institut zu zeichnen.

Wir hoffen, dass dieser Jahresbericht seinen Lesern neue Einblicke in die astronomische Forschung an unserem Institut verschaffen wird.

Thomas Henning, Hans-Walter Rix

Heidelberg, im Juli 2007

I. Allgemeines

I.1 Wissenschaftliche Zielsetzung

Es ist das Ziel des Max-Planck-Instituts für Astronomie (Abb. I.1), die Natur und Entwicklung der Planeten, Sterne, Galaxien und des Universums als Ganzes zu erforschen und zu verstehen. Seit seiner Gründung im Jahr 1967 hat das MPIA ein breites Spektrum astronomischer Forschung verfolgt und bei Entwicklung und Einsatz von Teleskopen und Messinstrumenten, bei der Planung und Ausführung zahlreicher Beobachtungsprogramme und Durchmusterungen, sowie bei der Analyse und theoretischen Modellierung der erhaltenen Daten eine führende Rolle gespielt. Das MPIA konzentriert seine Beobachtungen auf den optischen und infraroten Spektralbereich und ist führend in der instrumentellen Entwicklung sowohl für bodengebundene als auch für weltraumgestützte Observatorien. Durch die Verbindung dieser Stärken mit Beobachtungen in allen anderen Spektralbereichen hält das MPIA eine führende Position auf diesem sich rasch entwickelnden Feld.

Die Forschung am Institut ist in zwei wissenschaftlichen Abteilungen organisiert: **Galaxien und Kosmologie** (Direktor: Hans-Walter Rix), sowie **Planeten- und Sternentstehung** (Direktor: Thomas Henning). Zusätzlich zu den fest angestellten Mitarbeitern in diesen Abteilungen bestehen auch sieben selbstständige Nachwuchsgruppen (vier von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierte Emmy-Noether-Gruppen und drei Nachwuchsgruppen der Max-Planck-Gesellschaft). 37 Post-Docs und 46 Doktoranden waren im Berichtsjahr am Institut tätig. Es besteht auch eine enge Zusammenarbeit in Forschung und Lehre mit dem Zentrum für Astronomie an der Universität Heidelberg (ZAH). Zu den neueren Initiativen zählen die International Max Planck Research

Abb. I.1: Das Max-Planck-Institut für Astronomie auf dem Königstuhl in Heidelberg. Vorne links das Elsässer-Labor.



School (IMPRS) for Astronomy and Cosmic Physics und ein erfolgreicher Antrag der Universität Heidelberg innerhalb der Exzellenzinitiative.

Die Hauptarbeitsgebiete beider Abteilungen haben zahlreiche wissenschaftliche und praktische Aspekte gemeinsam. Offensichtlich ist die Sternentstehung mit der Entstehung und Entwicklung der Galaxien eng verknüpft. Aber auch die Anforderungen an die Messinstrumente sind in beiden Abteilungen sehr ähnlich, etwa in Bezug auf die benötigte hohe räumliche Auflösung oder auf den hohen Stellenwert umfassender Durchmusterungen und der Beobachtungsmöglichkeiten im infraroten Spektralbereich.

Galaxien und Kosmologie

Wir wissen, dass das Universum unmittelbar nach dem Urknall recht »einfach« und nahezu homogen aufgebaut war, während es heute innerhalb eines weiten Bereiches physikalischer Größenordnungen mit einer reichhaltigen hierarchischen Struktur aufwartet: von der filamentartigen Anordnung der Galaxien über sehr große Entfernung hinweg (dem »kosmischen Netz«) über die Galaxien bis herab zu den Sternhaufen, den Sternen und deren Planeten.

Die Bildung dieser Strukturen auf Skalen der Galaxien und größer lässt sich dann, und nur dann, verstehen, wenn man annimmt, dass sie durch Gravitationsinstabilitäten angetrieben wird, die in einer dominanten, aber bis heute noch nicht identifizierten »Dunklen Materie« auftreten.

Die Galaxien, so wie wir sie im heutigen Universum sehen, stehen etwa in der Mitte dieser hierarchischen Ordnung und bestehen aus Milliarden von Sternen, sowie aus interstellarem Gas und Staub, eingebettet in Halos aus dunkler Materie. Wie Edwin Hubble schon vor 70 Jahren feststellte, zeigen diese »Welteninseln« in ihrem qualitativen Erscheinungsbild und in ihrer Struktur bei Weitem nicht die Vielfalt, die physikalisch möglich erscheint. Die Galaxien umspannen als Objektklasse zehn Größenordnungen in ihren stellaren Massen, und die Zahl der neu entstehenden Sterne variiert in der gleichen Breite; die physischen Größen verschiedener Galaxien variieren immerhin um einen Faktor 100. Während einige Galaxien in ihrem Zentrum offenbar kein Schwarzes Loch besitzen, beträgt die Masse dieses zentralen Schwarzen Loches bei anderen Galaxien mehr als eine Milliarde Sonnenmassen. Im Gegensatz zu dem breiten Spektrum dieser Werte haben gerade die Beobachtungen der letzten 15 Jahre gezeigt, dass nur ein winziger Bruchteil der möglichen *Kombinationen* der charakteristischen Größen (Masse und Alter der Sterne, Größe, zentrales Schwarzes Loch, usw.) tatsächlich im Universum verwirklicht sind. Praktisch alle Größen korrelieren stark mit allen anderen: massereiche Galaxien sind groß; massereiche Galaxien enthalten praktisch

keine jungen Sterne; das zentrale Schwarze Loch enthält einen konstanten Massenbruchteil der zehn Millionen Mal größeren sphärischen Sternverteilung. Während Spiralgalaxien unter den größeren Galaxien der häufigste Galaxientyp sind, kommen sie unter den massereichsten Sternsystemen nicht vor.

Das bedeutet: Das »Reich der Galaxien« (»the realm of galaxies«, wie Hubble es genannt hat) ist in hohem Maße geordnet. Wie diese Ordnung aus den Zufallsfluktuationen nach dem Urknall entstanden ist, ist die Grundfrage der Galaxienentwicklung und eine zentrale Frage der Kosmologie.

Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten, die so eingeschränkte Vielfalt der Galaxien zu erklären:

1. Die beobachteten Galaxien stellen die einzige stabilen Konfigurationen dar.
2. Die realisierten Parameter der Galaxien ergeben sich unmittelbar aus dem begrenzten Satz kosmologischer Anfangsbedingungen.
3. Der gesamte Prozess der Galaxienentstehung führt aufgrund verschiedener Rückkopplungsprozesse zu einer begrenzten Vielfalt von Ergebnissen.

Welche dieser drei Mechanismen wann und wo eine Rolle spielen, ist Gegenstand der gegenwärtigen Forschung.

Spezifische Fragen, die sich aus diesem Gesamtbild ergeben, sind zum Beispiel:

- Während welcher kosmischen Epoche sind die meisten Sterne entstanden?
- Warum hat die Bildung neuer Sterne seit sechs Milliarden Jahren abgenommen? Erleben wir heute das Ende der kosmischen Sternentstehung?
- Wie sind die Schwarzen Löcher in den Zentren der Galaxien entstanden und gewachsen? Warum kann man aus der gesamten Größe einer Galaxie die Eigenschaften des winzigen Schwarzen Loches in ihrem Zentrum vorhersagen?
- Wann und durch welche Prozesse werden Struktur und Morphologie der Galaxien bestimmt?
- Was ist der Zustand des Interstellaren Mediums, des Rohstoffes, aus dem sich neue Sterne bilden?
- Können die vielfältigen Beobachtungen im Rahmen eines umfassenden Modells *ab initio* verstanden werden?
- Wie ist das Milchstraßensystem, der Rosetta-Stein für die Entwicklung der Galaxien, entstanden?

Die am MPIA verfolgten Ansätze, um diese Fragen anzugehen, umfassen drei Aspekte: die detaillierte Untersuchung einzelner Galaxien im jetzigen Universum; die direkte Untersuchung von Galaxien zu früheren kosmischen Epochen durch die Beobachtung weit entfernter (hoch rotverschobener) Objekte; und den Vergleich von Beobachtungen mit physikalischen Modellen. Die Beobachtungen auf diesem Gebiet erfor-

dern Durchmusterungsteleskope – das sind Teleskope möglichst großer Öffnung, um möglichst viele Photonen der schwächsten Lichtquellen zu sammeln, und interferometrische Techniken, um die höchstmögliche räumliche Auflösung zu erreichen. Für umfassende Studien der Galaxienentwicklung sind Beobachtungen im Radio- bis hin zum Röntgenbereich erforderlich.

Die wichtigsten Einrichtungen für Durchmusterungsarbeiten am MPIA sind: der Sloan Digital Sky Survey (SDSS) zur Untersuchung des Milchstraßensystems und der Lokalen Gruppe, sowie dessen Nachfolgeprojekt PanSTARRS 1 ab dem Jahre 2008; das 2.2-m-Teleskop auf La Silla, das 3.5-m-Teleskop des Calas Alto mit seiner Kamera OMEGA 2000 für Programme zur Entwicklung von Galaxien; das Instrument MIPS am Weltraumteleskop SPITZER; und (ab dem Start im Jahre 2008) das Instrument PACS der HERSCHEL-Mission für Untersuchungen zur Sternentstehung und des Interstellaren Mediums, ergänzt durch das VLA, IRAM, APEX und bald auch ALMA im Radio- und Submillimeterwellen-Bereich.

Entstehung von Sternen und Planeten

Sternentstehung ist ein fundamentaler Prozess im Universum. Sie bestimmt die Struktur und chemische Zusammensetzung ganzer Galaxien. Die Entstehung einzelner Sterne lässt sich am besten in den nahen Molekülwolken unserer Galaxis studieren. Die Untersuchung der Sternentstehung in anderen Galaxien zeigt uns den Ablauf dieses Prozesses unter Bedingungen, die von denen in unserer Galaxis sehr verschieden sein können. Unsere Untersuchungen in den Magellanschen Wolken zeigen, wie die Häufigkeiten der schweren Elemente (der sogenannten »Metalle«) den Sternentstehungsprozess beeinflussen – dieser Faktor spielte bei der Sternentstehung im frühen Universum gewiss eine bedeutende Rolle.

Sterne entstehen in den dichten und kalten Kernen von Molekülwolken, die gravitationsinstabil werden und im Allgemeinen in Fragmente zerfallen, aus denen Doppel- und Mehrfachsysteme entstehen. In welcher Weise Magnetfelder und Turbulenzen das Einsetzen der Sternentstehung beeinflussen, ist eine der zentralen offenen Fragen, die es zu beantworten gilt. Sie hängt direkt mit der unterschiedlichen Form der anfänglichen (sub)stellaren Massenfunktion in unterschiedlichen Umgebungen zusammen. Dynamische Wechselwirkungen in Mehrfachsystemen spielen möglicherweise eine entscheidende Rolle bei der Entstehung Brauner Zwerge. Die Entstehung massereicher Sterne geschieht in Sternhaufen und führt zu komplexen Sternentstehungsgebieten. Die schnelle Entwicklung massereicher Protostärne und die damit verbundenen energiereichen Phänomene erschweren die Identifikation der Entstehungswege massereicher Sterne erheblich.

Die frühesten Phasen der Sternentstehung sind hinter enormen Mengen von Staub und Gas verborgen und kön-

nen nur mittels empfindlicher Beobachtungen im fernen Infrarot und im (Sub-)Millimeterwellenbereich untersucht werden. In späteren Entwicklungsstadien leuchten die Objekte im mittleren und nahen Infrarot, und schließlich werden sie im optischen Spektralbereich sichtbar. Deshalb überdecken unsere Beobachtungsprogramme einen weiten Wellenlängenbereich, mit besonderem Schwerpunkt im Infraroten und bei (Sub-)Millimeterwellen.

Die Entstehung von Planeten und Planetensystemen ist ein natürliches Nebenprodukt der Entstehung massereicher Sterne. Aufgrund der Drehimpulserhaltung geschieht die Akkretion von Materie auf den zentralen Protostern hauptsächlich aus einer zirkumstellaren Scheibe. Scheiben um T-Tauri-Sterne sind die natürlichen Geburtsstätten von Planetensystemen, ähnlich dem Sonnensystem vor 4.5 Milliarden Jahren. Während der aktiven Akkretionsphase werden bipolare molekulare Ausflüsse und ionisierte Jets erzeugt, die ihrerseits für die Entwicklung der Stern-Scheiben-Systeme eine wichtige Rolle spielen. Wir beginnen gegenwärtig damit, protoplanetare Scheiben als Labors zu nutzen, in denen wir die Bildung unseres Sonnensystems und die Vielfalt der anderen bisher entdeckten Planetensysteme untersuchen können.

Die Forschung der Abteilung Planeten- und Sternentstehung konzentriert sich auf die Entschlüsselung der frühesten Phasen der Sterne, sowohl am oberen als auch am unteren Ende des Massenspektrums. Beobachtungen mit Hilfe von Weltraumobservatorien wie Iso und SPITZER, wie auch an erdegebundenen Infrarot- und (Sub-)Millimeter-Teleskopen erlauben den Nachweis und die Charakterisierung massereicher Protostärne und ihrer Entwicklung. Mit der energischen Nutzung der Submillimeter-Observatorien bereitet sich die Abteilung auf das Atacama Large Millimeter Array (ALMA) vor, das demnächst in Betrieb gehen wird.

Die Untersuchung Brauner Zwerge, die erstmals 1995 entdeckt wurden, ist ein weiteres wichtiges Forschungsgebiet. Wie entstehen Braune Zwerge? Sind auch substellare junge Objekte von Staub- und Gasscheiben umgeben? Wie oft kommen sie in Doppelsystemen vor, und wie lässt sich ihre Masse genau bestimmen? Wie setzt sich ihre Atmosphäre zusammen? Dies sind einige der brennenden Fragen, mit denen sich die Forscher am MPIA befassen.

Mit der Entdeckung der ersten extrasolaren Planeten im Jahre 1995 trat die Erforschung der Planetenentstehung in protoplanetaren Scheiben in eine neue Phase stürmischer Entwicklung ein. Die Abteilung ist gut gerüstet, um auf diesem Gebiet eine bedeutende Rolle zu spielen, mit einer Kombination von Infrarot- und Millimeterwellen-Beobachtungen, numerischen (magnetohydrodynamischen) Modellrechnungen und Studien des Strahlungs-transports. Die am Weltraumteleskop HUBBLE gewonnenen Bilder und die Fülle der von SPITZER gelieferten Daten verschaffen uns neue Einblicke in die frühesten Stadien der Planetenbildung. Die Erhöhung der

räumlichen Auflösung durch unsere Entwicklungen in der Adaptiven Optik und durch Infrarot-Interferometrie an Großteleskopen und mit großen Basislinien, sowie der Einsatz von Interferometern im Millimeterwellenbereich verschaffen uns Einsichten in die Struktur und Entwicklung der Scheiben auf räumlichen Skalen, die bereits für die Planetenentstehung relevant sind.

Wir haben neue Beobachtungsprogramme in Angriff genommen mit dem Ziel, extrasolare Planeten durch direkte Abbildung, nach der Transitmethode und auf astrometrischem Wege zu finden. Mit dem *Spectral Differential Imaging* Instrument am VLT stellen wir an der hochauflösenden Infrarotkamera mit Adaptiver Optik NACO ein neues Abbildungsverfahren mit hohem Kontrast bereit. Gegenwärtig ist das System leistungsfähiger als jedes andere Instrument dieser Art und bereitet den Weg für das Instrument PLANET FINDER der Eso.

Das theoretische Programm der Abteilung Planeten- und Sternentstehung ist konzentriert auf komplexe nu-

merische Simulationen zur Entwicklung protoplanetarer Scheiben, einschließlich des Zusammenspiels von Strahlung, Dynamik, Chemie und Entwicklung der Staubteilchen. Die Entstehung Brauner Zerge ist ein weiterer Gegenstand theoretischer Studien. Programme zur Berechnung des Strahlungstransports in mehreren Dimensionen, sowohl für Moleküllinien als auch für das Kontinuum der Staubemission, wurden in der Abteilung entwickelt. Die theoretischen Studien sind auch mit den verschiedenen Beobachtungsprogrammen eng verzahnt.

Das Verständnis vieler der mikrophysikalischen Prozesse und der Zusammensetzung von Staub und Gas während der Planeten- und Sternentstehung erfordert gezielte Laboruntersuchungen. Eine entsprechende Arbeitsgruppe »Laborastrophysik« gehört zu unserer Abteilung und befindet sich im Institut für Festkörperphysik der Universität Jena. Diese Gruppe untersucht die spektroskopischen Eigenschaften von Nanoteilchen sowie von Molekülen in der Gasphase.

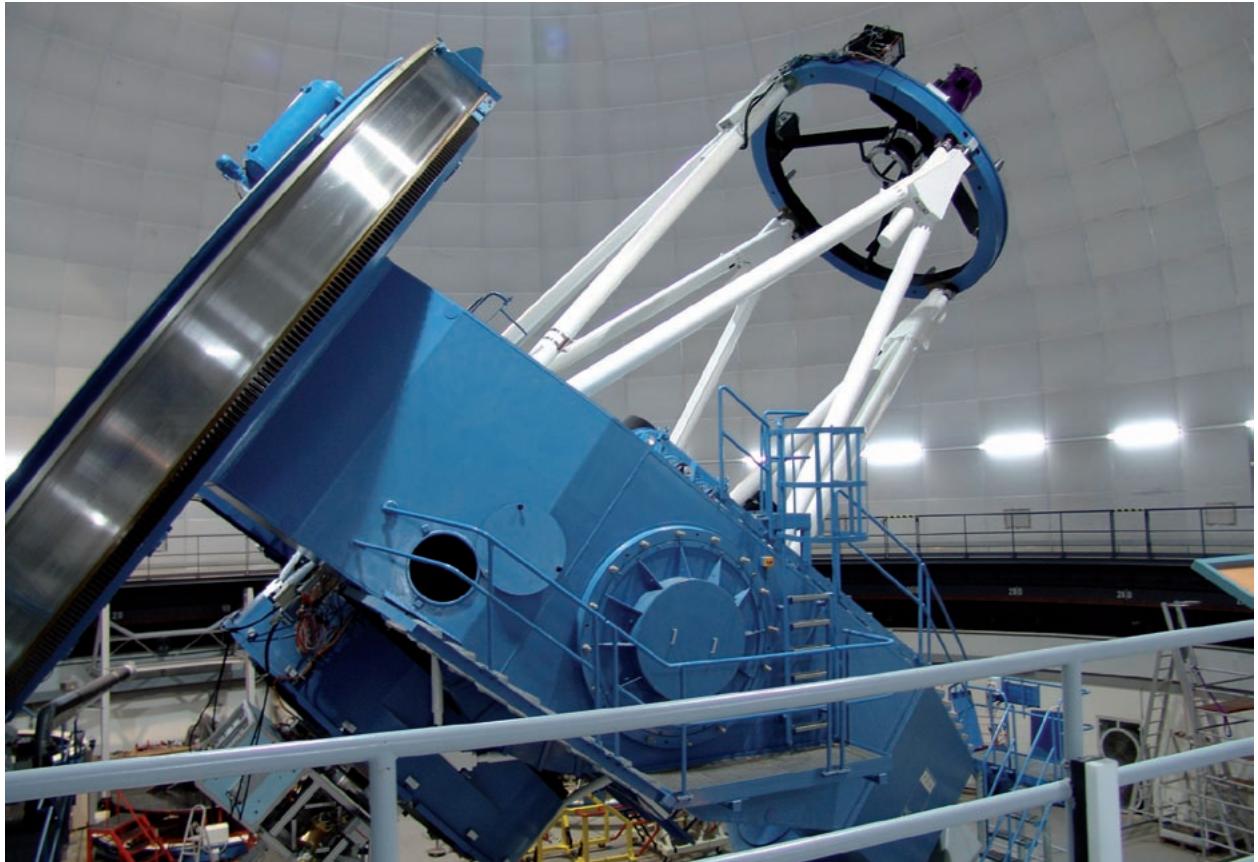
I.2 Observatorien – Teleskope – Instrumente

Das MPIA war und ist mit dem Aufbau und Betrieb zweier großer bodengebundener Observatorien befasst: In den 70er und 80er Jahren war der Aufbau des Calar-Alto-Observatoriums, der größten Sternwarte des europäischen Kontinents, eine zentrale Aufgabe des MPIA: Das 2.2- und das 3.5-m-Teleskop werden nach wie vor für zeitgemäße Beobachtungsprogramme eingesetzt. Seit 2005 wird das Observatorium als Centro Astronomico Hispano-Alemán (CAHA), eine Organisation spanischen Rechts, gemeinsam von der Max-Planck-Gesellschaft und dem Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) betrieben. Seit 1997 koordiniert das MPIA die deutsche Beteiligung am Large Binocular Telescope (LBT), das sich auf dem Mt. Graham in der Nähe von Tucson, Arizona, im Aufbau befindet. Ende 2006 wurde am LBT die erste der beiden Primärfokuskameras in Betrieb genommen – exzellente Bilder konnten damit gewonnen werden. Dem Institut gehört auch ein 2.2-m-Teleskop auf dem Berg La Silla in Chile, das von der Europäischen Südsternwarte (Eso) betrieben wird, und an dem Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft 25 Prozent der Beobachtungszeit nutzen können.

Die am Institut entwickelten und gebauten Instrumente werden sowohl für erdgebundene als auch für weltraumgestützte Beobachtungen eingesetzt. Beide Beobachtungsarten ergänzen einander heute in idealer Weise. Die erdgebundenen Teleskope haben meist größere Primärspiegel und damit eine größere Lichtsammelleistung als Weltraumteleskope. Bei Einsatz moderner Techniken wie Adaptiver Optik und Interferometrie, an deren Entwicklung das MPIA an vorderster Front arbeitet, erzielen sie auch eine höhere räumliche Auflösung. Weltraumteleskope sind hingegen unerlässlich bei Beobachtungen in Wellenlängenbereichen, in denen die Erdatmosphäre die einfallende Strahlung absorbiert oder einen störenden Hintergrund erzeugt, wie dies z.B. in weiten Teilen des infraroten Spektralbereiches der Fall ist.

An der Entwicklung der Infrarotastronomie hat das MPIA seit deren Pionierzeit in den siebziger Jahren erfolgreich teilgenommen. So entstand ISOPHOT, eines

Abb. I.2: Das 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto.



von vier Messinstrumenten des weltweit ersten Infrarot-Weltraumobservatoriums Iso der Europäischen Weltraumbehörde ESA, unter der Federführung des Instituts. Iso lieferte von 1996 bis 1998 hervorragende Daten, insbesondere in dem bis dahin nicht zugänglichen Bereich des fernen Infrarot. Das hierbei gewonnene Know-how setzen die Wissenschaftler am Institut auch bei jetzt anlaufenden Projekten, wie den Weltraumteleskopen HERSCHEL und James Webb Space Telescope (JWST) ein. Astronomen des MPIA sind gegenwärtig auch am US-amerikanischen Infrarotobservatorium SPITZER aktiv mit Beobachtungsprogrammen beteiligt.

Die Instrumente der neuen Generation für Teleskope der 8-m-Klasse und für Weltraumobservatorien sind zu komplex und zu teuer, als dass sie in einem einzelnen Institut von der Größe des MPIA entwickelt werden könnten. Deshalb ist das Institut heute an einer Reihe internationaler Kollaborationen zum Bau neuer Großteleskope und wissenschaftlicher Instrumente beteiligt. Damit ist der Zugang zu den bedeutendsten Observatorien der Erde gewährleistet. Auf der Südhalbkugel ist dies das Very Large Telescope (VLT) der Eso in Chile mit seinen vier 8-Meter-Teleskopen, die sich zu einer leistungsstarken interferometrischen Anordnung zusammenschließen

lassen. Auf der Nordhalbkugel ist das MPIA am Large Binocular Telescope (LBT) in Arizona beteiligt. Dieses außergewöhnliche Teleskop verfügt über zwei 8.4-Meter-Spiegel auf einer gemeinsamen Montierung und ist damit das weltweit größte Einzelteleskop. Mit der Inbetriebnahme der ersten Primärfokus-Kamera im Herbst 2006 sind nun die Voraussetzungen für wissenschaftliches Arbeiten geschaffen. Das MPIA schloss sich im Jahre 2006 der internationalen Kollaboration PanSTARRS 1 (PS1) auf Haleakala, einem Vulkan der Hawaii-Insel Maui, an und erhielt damit den uneingeschränkten Zugang zu den gesammelten Daten. Diese Kollaborationen versetzen das MPIA in die Lage, den Nord- und Südhimmel mit erstklassigen Großteleskopen zu erforschen. Gleichzeitig beteiligt sich das Institut aktiv an Studien zur Instrumentierung von Großteleskopen der nächsten Generation, den sogenannten Extremely Large Telescopes (ELTs, vgl. Kap. IV.10).

Bodengebundene Astronomie – Instrumentierung

Das MPIA hat in den vergangenen Jahren bei der Entwicklung adaptiver optischer Systeme große Anstrengungen unternommen. Abgeschlossen ist der Bau der Adaptiven Optik ALFA am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto. Derzeit werden diese Arbeiten mit der Entwicklung eines Systems der multikonjugierten

Abb. I.3: Das Very Large Telescope in den chilenischen Anden. (Bild: Eso)



Adaptiven Optik fortgesetzt. Erste Inbetriebnahmeflüsse des neuartigen, im Labor für Adaptive Optik am Institut entwickelten Wellenfrontsensors PYRAMIR fanden 2006 statt. Die hierbei gesammelten Erfahrungen gehen bereits in die Entwicklung neuer Instrumente am VLT und am LBT ein.

Die Beteiligung des Instituts am Very Large Telescope der Eso auf dem Paranal (Abb. I.3) ist von herausragender Bedeutung. Gegenwärtig wird am MPIA, in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble (LAOG) und anderen europäischen Instituten die Planetensuchmaschine SPHERE gebaut. Im Jahr 2001 ging die hochauflösende Infrarotkamera CONICA, die zusammen mit der Adaptiven Optik NAOS das System NACO bildet, erfolgreich in Betrieb.

Für den Einsatz in Verbindung mit den Instrumenten NACO und SINFONI am VLT, die beide mit einer eigenen Adaptiven Optik ausgestattet sind, befindet sich der Bau einer gemeinsamen Natrium-Laserleitsternanlage (Laser Guide Star Facility, LGSF) in der entscheidenden Phase. Das Herz der LGSF ist PARSEC, ein Hochleistungslaser, der bei einer Wellenlänge von 589 nm die Natriumschicht in der hohen Erdmesosphäre zum Leuchten anregt und damit die Adaptiven Optiken mit einem hinreichend hellen künstlichen Leitstern versorgt. Das am MPIA gebaute Diagnosegerät LIDAR befindet sich seit Juni 2003

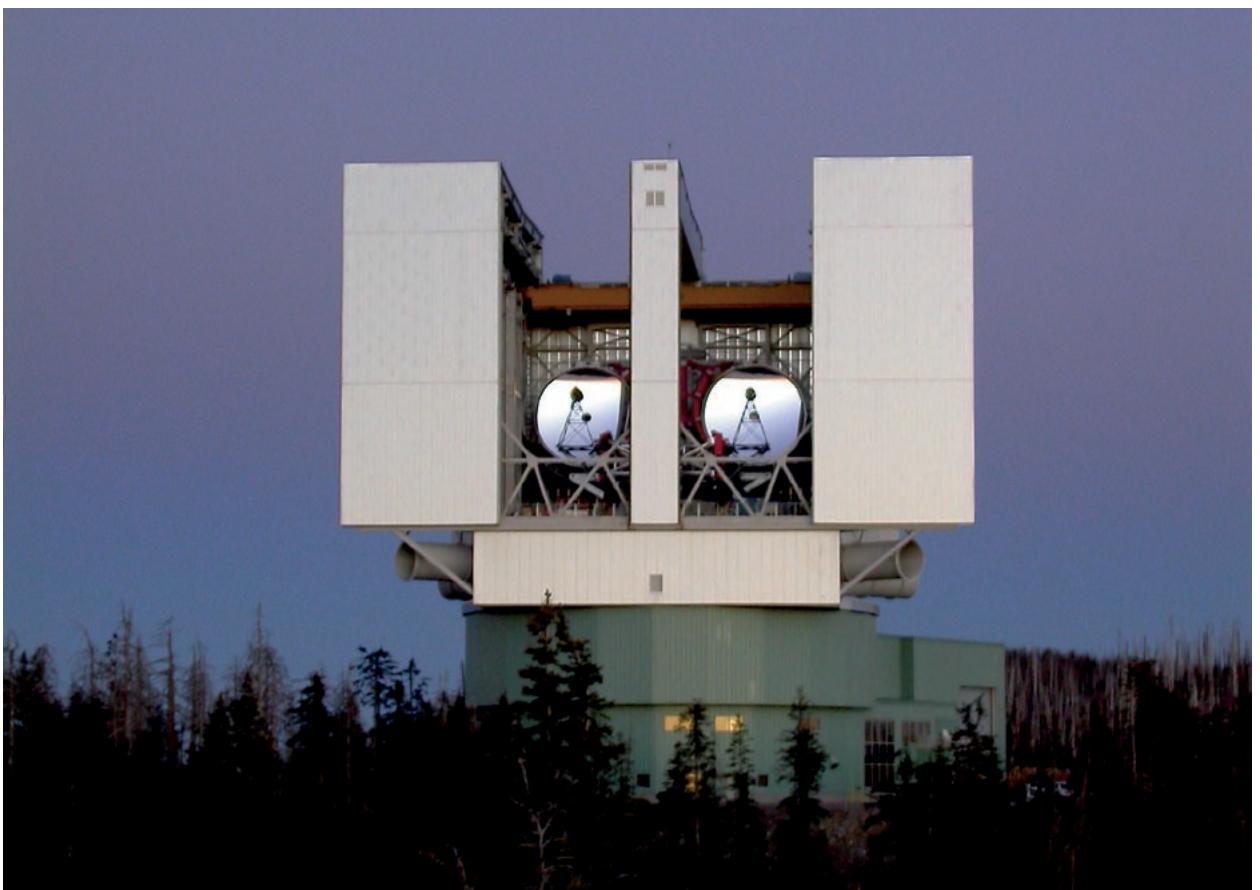
in Garching. Letzte Tests der gesamten LGSF, bestehend aus PARSEC, einem speziellen Lichtleiter und dem Projektionsteleskop, fanden in der ersten Jahreshälfte 2005 in Garching statt. Der erste erfolgreiche Einsatz des PARSEC-Lasers fand im Januar 2006 statt (siehe Kap. IV.2).

Die Arbeiten an ALFA, CONICA und PARSEC erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem MPI für extraterrestrische Physik in Garching, wobei die Erfahrungen zweier führender Gruppen zusammenkamen.

Ende 2002 folgte das »erste Licht« für MIDI. Es ist das erste interferometrische Instrument am VLT und wird im mittleren Infrarot eingesetzt. Mit diesem Instrument konnten sehr erfolgreiche interferometrische Beobachtungen im mittleren Infrarot mit einer Auflösung von einigen hundertstel Bogensekunden durchgeführt werden.

Am MPIA arbeitet man bereits an der Entwicklung der VLT/VLTI-Instrumente der zweiten Generation. So ist das Institut an SPHERE (Eso's PLANET FINDER, vgl. Kap. IV.4), einem Projekt zur Suche und Charakterisierung extrasolarer Planeten mit Hilfe von extremer Adaptiver Optik, und weiteren Zusatzgeräten beteiligt. Gleichzeitig

Abb. I.4: Das Large Binocular Telescope (LBT), auf dem Mount Graham in Arizona. (Bild: LBTO)



arbeitet das MPIA zusammen mit Instituten in Genf und Leiden an den so genannten »Differential Delay Lines« für das PRIMA-System zur astrometrischen Suche nach extrasolaren Planeten.

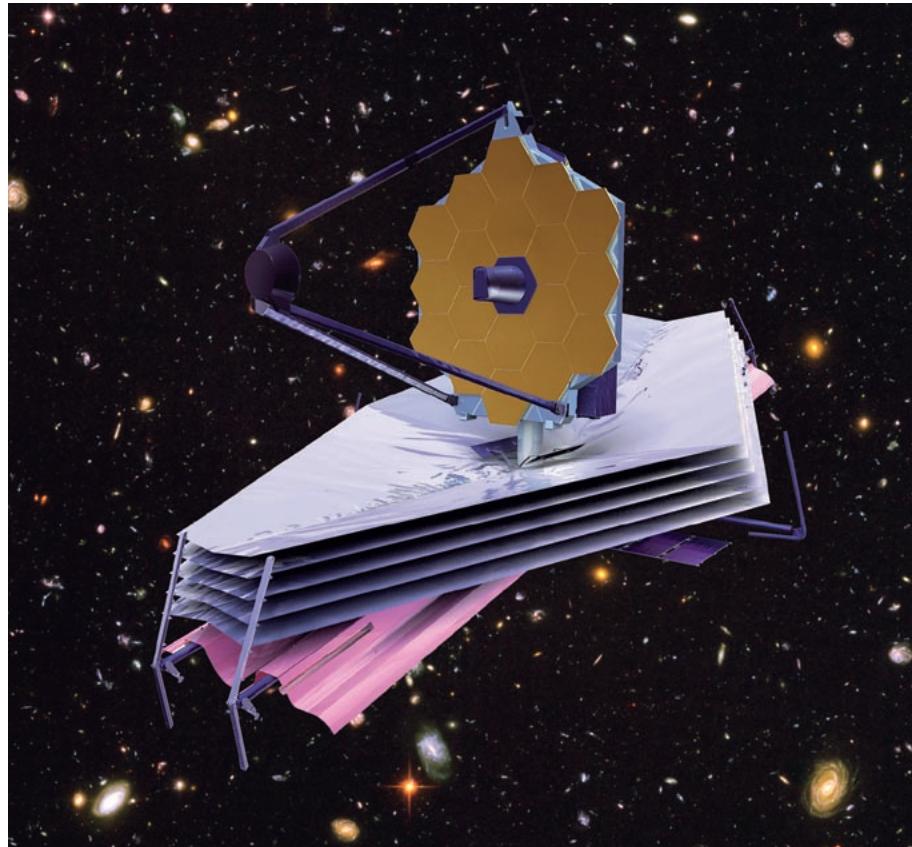
Andere Projekte, in Zusammenarbeit mit mehreren weiteren Instituten, sind: die VLTI-Instrumente der zweiten Generation zur Erweiterung des VLT-Interferometers, ein MATTSE genanntes Projekt, und GRAVITY (ehemals MIDI 24/APRÈS-MIDI), ein Instrument, welches das Licht der vier Hauptteleskope des VLTI kombiniert und eine Bildrekonstruktion zulässt.

Zusammen mit der University of Arizona sowie italienischen und anderen deutschen Instituten ist das MPIA Partner in einem internationalen Konsortium zum Bau des Large Binocular Telescope (LBT, Abb.

I.4). Dieses Großteleskop besitzt zwei Spiegel mit einem Durchmesser von jeweils 8.4 Metern, die von einer gemeinsamen Montierung getragen werden. Beide Spiegel verfügen zusammen über die Lichtsammelkraft eines einzelnen 11.8-Meter-Spiegels. Damit ist das LBT das weltweit leistungsstärkste Einzelteleskop. Die einzigartige Konstruktion des Doppelspiegels eignet sich zudem hervorragend für interferometrische Beobachtungen. Im interferometrischen Betrieb wird das räumliche Auflösungsvermögen des LBT dem eines Spiegels mit 22.8 Metern Durchmesser entsprechen.

Abb. I.5: Das europäische Infrarot-Observatorium HERSCHEL. Der Start der Mission ist für 2008 geplant.





Die deutschen Partner bauen unter der Leitung der Heidelberger Landessternwarte für das LBT den Nahinfrarot-Spektrographen LUCIFER (Kap. IV.6). Das MPIA liefert hierfür das gesamte Detektorpaket und entwickelt das Konzept für die Kühlung. Während die Integration und die Tests des Instruments in den Laboratorien des Instituts erfolgen, laufen die Planungen für das LBT-Interferometer, das mit Adaptiver Optik ausgestattet sein wird, auf Hochtouren. Das MPIA konzipiert hierfür die Optik der Strahlzusammenführung LINC (Kap. IV.5). Letztlich soll Interferometrie über einen Wellenlängenbereich von $0.6 \mu\text{m}$ bis $2.2 \mu\text{m}$ möglich sein. Für dieses Projekt wurde mit Kollegen des MPI für Radioastronomie in Bonn, der Universität Köln und des Osservatorio Astrofisico di Arcetri bei Florenz ein Konsortium gebildet. LINC ist gegenwärtig das größte am Institut entwickelte bodengebundene Instrument.

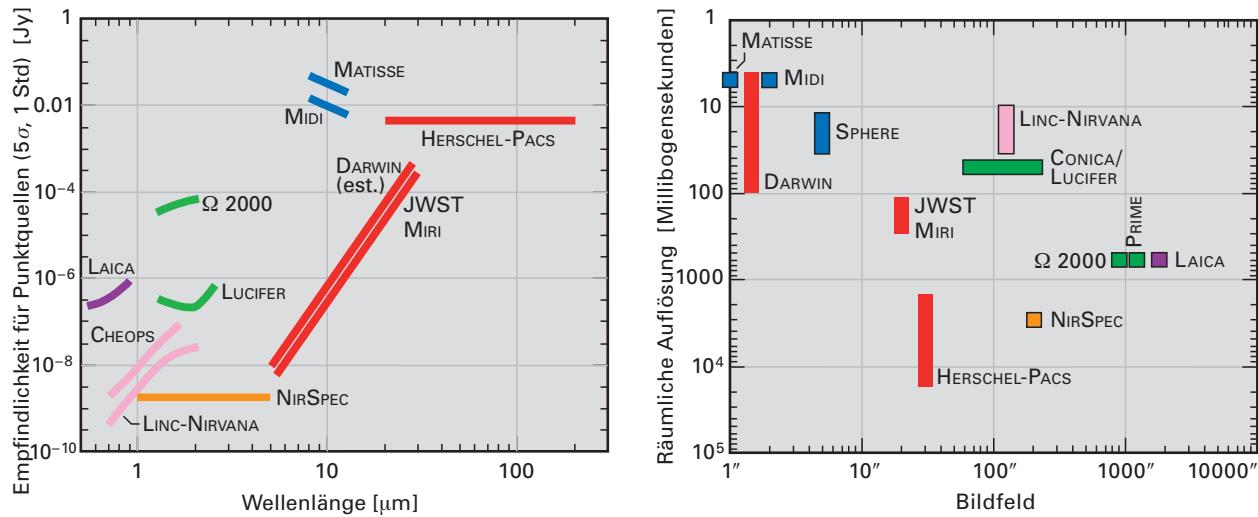
Das MPIA beteiligt sich aktiv an Instrumentierungsstudien für das zukünftige European Extremely Large Telescope (E-ELT), ein Projekt der Eso, für dessen Entwicklung der Eso-Beirat im Dezember 2006 bereits 57 Millionen Euro bereitgestellt hat. Das MPIA nimmt an Vorstudien für verschiedene Instrumente teil, es hat auch umfassende Beiträge zu Instrumentierungsstudien für das ursprünglich geplante 100-m-Teleskop Owl (Overwhelmingly Large Telescope, den Nah-Infrarot-Imager ONIRICA und das Submillimeter-Instrument T-Owl geleistet.

Abb. I.6: Mögliche Konstruktion des JWST, mit dem großen Hauptspiegel und dem charakteristischen Sonnenschutz.

Infrarot-Weltraumastronomie – Instrumentierung

Nach wie vor ist das MPIA im Iso-Projekt der Europäischen Weltraumbehörde ESA aktiv. Mittlerweile sind zahlreiche Arbeiten erschienen, die auf Messungen mit Iso und dem ISOPHOT-Instrument, welches unter der Federführung des Instituts entstand, basieren. Am MPIA wird das ISOPHOT-Datenzentrum geführt, wo zunächst die Programme und Kalibrationsverfahren für die automatische Datenanalyse entwickelt wurden. Die Iso-Datenbasis soll zum Bestandteil eines weltweit zugänglichen »Virtuellen Observatoriums« für alle Wellenlängenbereiche ausgebaut werden.

Die mit ISOPHOT gewonnenen Erfahrungen waren ausschlaggebend für die herausragenden Beiträge des MPIA zum Bau der Infrarotkamera mit Spektrometer PACS (Kap. IV.11). Dieses Instrument wird an Bord des europäischen Infrarotobservatoriums HERSCHEL arbeiten, eines Weltraumteleskops mit 3.5 Metern Öffnung (Abb. I.5). HERSCHEL wird dann das größte bis dahin gebaute Weltraumteleskop sein und wertvolle Beobachtungen der kältesten und fernsten, weitgehend noch unerforschten Objekte im Kosmos liefern. Der Satellit und seine Instrumente werden zur Zeit umfassenden Labortests



unterzogen. Der Start der Mission ist für das Jahr 2008 vorgesehen.

Das Institut ist auch an führender Position in Deutschland am Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE, dem James Webb Space Telescope (JWST), beteiligt (Abb. I.6). Das JWST wird einen ausklappbaren Hauptspiegel mit etwa sechs Metern Durchmesser sowie drei Fokalinstrumente erhalten. Im Rahmen eines europäischen Konsortiums entwickelt das MPIA die Kryo-Mechanismen zur Positionierung der optischen Komponenten in einem der drei Fokalinstrumente, genannt MIRI (Kap. IV.12). Dieses Gerät besteht aus einer hochauflösenden Kamera und einem Spektrometer mittlerer Auflösung. Es ist für den mittleren Infrarotbereich von 5 μm bis 28 μm Wellenlänge ausgelegt. MIRI soll je zur Hälfte von amerikanischen und europäischen Instituten gebaut werden.

Gleichzeitig ist das MPIA an der Entwicklung von NIRSPEC, dem zweiten Fokalinstrument des JWST, einem Multiobjekt-Spektrographen für das nahe Infrarot, beteiligt (Kap. IV.12). Auch hier steuert das Institut kryogene Mechaniken bei. Dieser Beitrag wird den Astronomen des MPIA weitere hervorragende Beobachtungsmöglichkeiten mit hoher Auflösung und Empfindlichkeit im Infraroten bieten. Auf beide Aufgaben, MIRI und NIRSPEC, ist das Institut durch die erfolgreichen Entwicklungen von ISOPHOT und PACS gut vorbereitet. Zur Entwicklung der feinmechanisch-optischen Herzstücke von MIRI und NIRSPEC besteht auch eine enge Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Carl Zeiss Optronics, Oberkochen.

Seit 1998 vertritt das MPIA Deutschland in der DARWIN Science Advisory Group. DARWIN ist ein Welt Rauminterferometer der Europäischen Weltraumbörde ESA, das frühestens 2015 starten soll. Nach der der-

Abb. I.7: Die wichtigsten Instrumente des Instituts. Links die Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge, rechts die räumliche Auflösung in Abhängigkeit von der Bildfeldgröße.

zeitigen Planung wird es aus bis zu acht Teleskopen bestehen, die im Lagrange-Punkt L2, in 1.5 Millionen Kilometer Abstand von der Erde, die Sonne umkreisen. Mit diesem Observatorium sollen extrasolare Planeten im mittleren Infrarot abgebildet und spektroskopisch analysiert werden. Derzeit beteiligt sich das Institut an vorbereitenden Technologiestudien.

Auch an dem Weltraumprojekt GAIA der ESA wirkt das MPIA mit. GAIA soll als Nachfolger des Astrometriesatelliten HIPPARCOS zwischen 2010 und 2012 starten und eine um mehrere Größenordnungen höhere Empfindlichkeit besitzen. Damit wird der Satellit die Positionen, Helligkeiten und Radialgeschwindigkeiten von einer Milliarde Sternen sowie zahlreichen Galaxien, Quasaren und Asteroiden bestimmen. Das Teleskop liefert photometrische Daten in 15 Filterbereichen und Spektren in einem ausgewählten Spektralbereich. Anders als HIPPARCOS wird GAIA jedoch keinen Inputkatalog erhalten, sondern systematisch alle erreichbaren Objekte vermessen. Daher wird der Datenauswertung zur automatischen Klassifikation der Himmelskörper eine große Bedeutung zukommen. Am MPIA arbeitet man derzeit (mit Unterstützung des DLR) an Konzepten zur Bewältigung dieser aufwändigen Aufgabe.

Einen Überblick über die wichtigsten bereits arbeitenden und demnächst anlaufenden Instrumente vermittelt Abb. I.7. Sie zeigt links die Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge und rechts die räumliche Auflösung in Abhängigkeit von der Bildfeldgröße.

I.3 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Der Standort in Heidelberg bietet dem Institut die Möglichkeit, in einem astronomisch besonders aktiven Umfeld zu wirken. Die Zusammenarbeit mit der Abteilung Kosmophysik des MPI für Kernphysik oder mit den Teilinstituten des seit 1. Januar 2005 bestehenden Zentrums für Astronomie Heidelberg (ZAH) der Universität hat sich immer wieder in vielfältiger Weise ergeben (das ZAH setzt sich aus der Landessternwarte, dem Astronomischen Rechen-Institut und dem Institut für Theoretische Astrophysik zusammen). Dies gilt derzeit vor allem für den DFG-Sonderforschungsbereich Nr. 1700, »Galaxien im jungen Universum«, an dem alle genannten Heidelberger Institute beteiligt sind. Enge Zusammenarbeit besteht auch im Rahmen der »International Max Planck Research School« für Astronomie und Kosmische Physik (IMPRS) (siehe Kap. I.4). Außerdem unterstützt das MPIA die Universität Heidelberg in ihren Aktivitäten zur Exzellenzinitiative.

Überregional kommt es immer wieder zu Kollaborationen mit den Max-Planck-Instituten für extraterrestrische Physik in Garching und für Radioastronomie in Bonn, sowie mit zahlreichen deutschen Landes- und Universitätsinstituten. Einen Überblick vermittelt Abb. I.8.

Auch der Aufbau eines Deutschen Zentrums für Interferometrie (Frontiers of Interferometry in Germany, FRINGE) mit Sitz am MPIA unterstreicht die führende Rolle des Instituts innerhalb Deutschlands bei dieser zukunftsweisenden astronomischen Technik. Ziel ist es, die Anstrengungen deutscher Institute und der Industrie auf diesem Gebiet zu koordinieren. FRINGE soll Geräte und Software zusammenführen, welche die beteiligten Institute bauen. Ein weiteres konkretes Ziel besteht in der Vorbereitung der nächsten Generation interferometrischer Instrumente. Dazu zählen die Erweiterung des Instrumentes MIDI bis 20 μm Wellenlänge und der Entwurf von MATISSE – einem Ausbau von MIDI zu einem vier Teleskope einschließenden, abbildenden Interferometer. Weiterhin sind hier zu nennen: die Beteiligung an der Festlegung neuer Abbildungsfähigkeiten des VLT-Interferometers und eine Beteiligung an der Vorbereitung der Weltraummission DARWIN. FRINGE war zusammen mit anderen Interferometriezentren in Europa an der Gründung der European Interferometry Initiative beteiligt. Langfristiges Ziel ist die Einrichtung eines europäischen Interferometriezentrums für den optischen und infraroten Spektralbereich. An FRINGE sind das Astrophysikalische Institut Potsdam, das Astrophysikalische Institut der Universität Jena, das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg, das MPI für extraterrestrische Physik in Garching, das MPI für Radioastronomie in



Abb. I.8: Verteilung der Partnerinstitute des MPIA in Deutschland.

Bonn, die Universität Hamburg und das I. Physikalische Institut der Universität Köln beteiligt.

Das MPIA beteiligt sich an einer Reihe von EU-Netzwerken und weltweiten Kollaborationen, teilweise in leitender Funktion. Hierzu zählen:

OPTICON: ein von der Europäischen Union finanziertes Netz aller Betreiber größerer Teleskope in Europa mit dem Ziel, die wissenschaftlich-technische Infrastruktur optimal zu nutzen und so die wissenschaftliche Ausbeute zu erhöhen und Kosten zu sparen.

Im Rahmen von OPTICON beteiligt sich das Calar-Alto-Observatorium mit dem 2.2- und dem 3.5-m-Teleskop am Programm COMET, das insgesamt 20 europäische Teleskope umfasst. Beobachtergruppen aus allen Ländern der EU und aus assoziierten Ländern, denen vom Programmkomitee des CAHA Beobachtungszeit an den Teleskopen zugeteilt wurde, erhalten freien Zugang sowie technische und wissenschaftliche Unterstützung bei der Durchführung ihrer Beobachtungen. OPTICON gewährt dafür dem CAHA einen finanziellen Ausgleich. Das MPIA beteiligt sich am Netzwerk NEON (Network of European Observatories in the North), das Ausbildungskurse für

Beobachter an Teleskopen der 2-Meter-Klasse sowie für Archiv-Recherchen anbietet. NEON wird von OPTICON und vom Marie-Curie-Förderungsprogramm finanziert.

Ebenfalls mit Förderung von OPTICON und der European Interferometry Initiative (EII), wird am MPIA die oben bereits erwähnte Studie zu MATISSE durchgeführt. Weiterhin werden Software-Arbeiten zur Bildrekonstruktion für LINC-NIRVANA (Kap. IV.4) unterstützt.

Schließlich fördert OPTICON eine so genannte Joint Research Activity (JRA) des MPIA mit dem Osservatorio Astrofisico di Arcetri und der Universität Durham. Innerhalb des JRA wird ein Prototyp eines »Multiple Field of View«-Wellenfrontsensors gebaut – einer besonderen Art der multikonjugierten Adaptiven Optik. Dabei geht es um die Lösung von Problemen, die bei der adaptiv-optischen Bildfeldkorrektur für die extrem großen Teleskope der nächsten Generation auftreten.

An der DFG-Forschungsgruppe »Laborastrophysik« ist das MPIA zusammen mit den Universitäten Braunschweig, Chemnitz, Dresden, Jena und Leiden beteiligt. Diese Arbeitsrichtung wird an der Außenstelle des MPIA in Jena verfolgt.

SISCO (Spectroscopic and Imaging Surveys for Cosmology): Dieses EU-Netzwerk ist der Untersuchung der Galaxienentwicklung mit Hilfe von Himmelsdurchmusterungen gewidmet. Auch hier hat das Institut mit CADIS, COMBO-17 und GEMS bereits erheblich beigetragen. Weiterhin sind beteiligt: University of Durham, Institute for Astronomy, Edinburgh, Universität Oxford, Universität Groningen, Osservatorio Astronomico Capodimonte, Neapel, sowie Eso, Garching.

PLANETS: ein »Research Training Network« der EU, in dem die theoretischen und empirischen Aspekte der Entstehung und Entwicklung protoplanetarer Scheiben und Planeten untersucht werden.

SPITZER Legacy Program: SPITZER, das Infrarottelskop der NASA (vormals SIRTF), begann am 25. August 2003

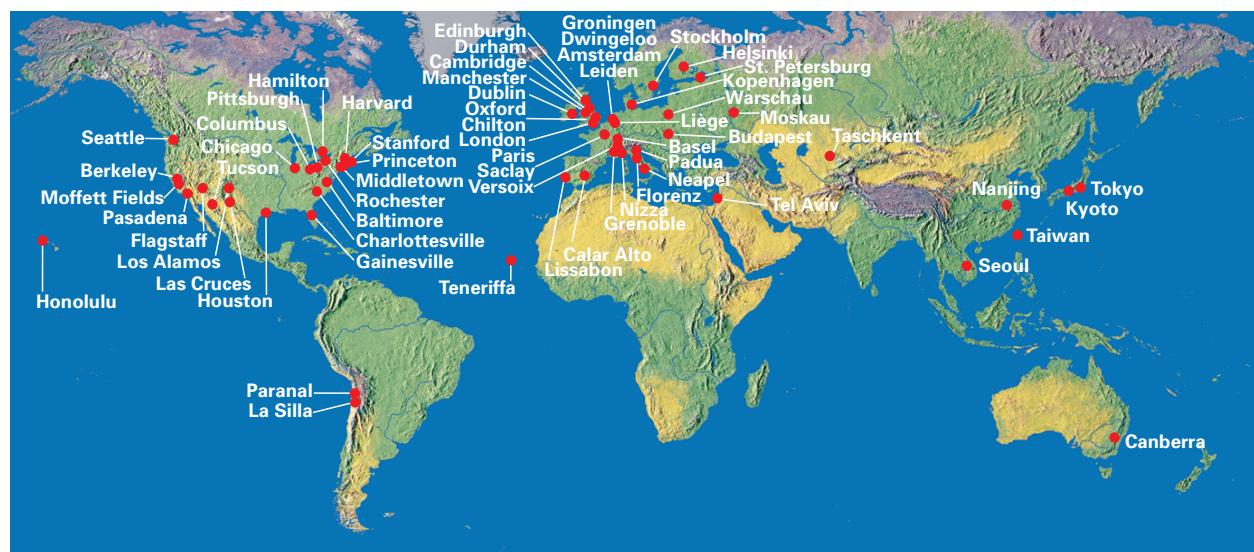
seine für die Dauer von zweieinhalb Jahren geplante Mission. Im Rahmen eines so genannten Legacy Program erhalten Kollaborationen die Möglichkeit, groß angelegte Beobachtungsprogramme durchzuführen. Das MPIA beteiligt sich an einem solchen Programm zur Untersuchung der frühesten Stadien der Sternentstehung in nahen Galaxien (SINGS) und in unserem Milchstraßensystem. Im Rahmen des FEPS Legacy Program (Formation and Evolution of Planetary Systems) in Zusammenarbeit mit dem Steward Observatory und Kollegen in anderen Instituten ist das MPIA verantwortlich für die Auswertung der spektroskopischen Daten. Im Rahmen von SINGS leitet das MPIA die Auswertung der Radiodaten und der Beobachtungen an Zwerggalaxien.

GIF (German-Israeli Foundation): In diesem Rahmen wird ein Programm zur Untersuchung von Gravitationslinsen durchgeführt. Partner des MPIA ist die Universität Tel Aviv. Außerdem wird LAIWO, eine Weitwinkelkamera für das Wise-Observatorium gebaut, die zur Suche nach Planetentransits eingesetzt werden soll.

INTAS ist eine durch das FP6-Programm finanzierte Kollaboration mit Armenien, Russland und Großbritannien, das den Austausch von Gastwissenschaftlern dieser Länder und insbesondere Armeniens ermöglicht.

The Sloan Digital Sky Survey (SDSS): Auf internationaler Ebene hat die Beteiligung an diesem Projekt eine große Bedeutung. Es handelt sich um die bislang umfangreichste Himmelsdurchmusterung, bei der etwa ein Viertel des gesamten Himmels in fünf Farbfiltern aufgenommen wird. Der endgültige Katalog wird Positionen, Helligkeiten und Farben von schätzungsweise hundert Millionen Himmelskörpern sowie die Rotverschiebungen von etwa einer Million Galaxien und Quasaren enthalten. Die Beobachtungen werden mit einem eigens für diesen Zweck gebauten 2.5-Meter-Teleskop am Apache Point

Abb. I.9: Verteilung der internationalen Partnerinstitute des MPIA.



Observatory in New Mexico ausgeführt. Das Projekt wird von einem internationalen Konsortium amerikanischer, japanischer und deutscher Institute durchgeführt, in Deutschland sind das MPIA und das MPI für Astrophysik in Garching beteiligt. Für die Sach- und Geldbeiträge des MPIA zum SDSS erhalten einige Mitarbeiter des Instituts die vollen Datenrechte.

ARENA (Antarctic Research European Network for Astrophysics): Dieses Netzwerk besteht aus 21 Partnern

aus Forschung und Technologie aus sieben europäischen Ländern, sowie Australien. Ziel dieser Kollaboration ist die langfristige Erschließung der Antarktis (insbesondere des Standorts DOME C) für Beobachtungen im Optischen und Infraroten.

Schließlich hat das MPIA auf dem Gebiet der Sternentstehung eine offizielle Zusammenarbeit mit dem Purple Mountain Observatorium in China aufgenommen.

I.4 Lehre und Öffentlichkeitsarbeit

Aus der ganzen Welt kommen Diplomanden und Doktoranden zur Durchführung ihrer Examensarbeiten ans Institut. Ein wesentlicher Teil des wissenschaftlichen Nachwuchses absolviert sein Studium an der Universität Heidelberg; deshalb nehmen eine Reihe von Wissenschaftlern des MPIA Lehrverpflichtungen an der Universität wahr.

Auch Studenten der unteren Semester können sich am MPIA betätigen. So bietet das Institut Fortgeschrittenenpraktika an oder ermöglicht den Studierenden die Teilnahme an etwa zwei Monate dauernden »Miniforschungsprojekten«, deren Aufgabenstellungen einen weiten Bereich überdecken: Die Analyse von Beobachtungsdaten oder numerische Simulationen gehören ebenso dazu, wie Instrumentierungsarbeiten. Diese Praktika verschaffen den Studierenden, insbesondere im Hinblick auf eine spätere Diplom- oder Doktorarbeit, frühzeitig einen praxisbezogenen Einblick in die astrophysikalische Forschung.

Die im Juli 2004 von der Max-Planck-Gesellschaft und der Universität Heidelberg etablierte »*International Max Planck Research School*« (IMPRS) für Astronomie und Kosmische Physik ist erfolgreich gestartet (Kap. V.3). Die Schule bietet für zunächst 40 Doktoranden aus aller Welt eine dreijährige Ausbildung in der experimentellen und theoretischen Forschung auf dem Gebiet der Astronomie und der kosmischen Physik unter hervorragenden Bedingungen. Sie wird von den fünf Instituten getragen, an denen in Heidelberg astronomische Forschung betrieben wird.

Zu den Aufgaben des Instituts gehört auch die Information einer breiteren Öffentlichkeit über die Ergebnisse der astronomischen Forschung. So halten Wissenschaftler des Instituts Vorträge an Schulen, Volks- und Hochschulen und Planetarien und treten insbesondere anlässlich in der Öffentlichkeit stark beachteter astronomischer Ereignisse auf Pressekonferenzen oder in Radio- und Fernsehsendungen auf. Zahlreiche Besuchergruppen kommen zum MPIA auf dem Königstuhl und zum Calar-Alto-Observatorium. Regelmäßig im Herbst findet

in Zusammenarbeit mit der Landessternwarte eine bei Physik- und Mathematiklehrern in Baden Württemberg sehr beliebte einwöchige Lehrerfortbildung statt.

Zwei besondere Höhepunkte des Jahres 2006 waren die »Lange Nacht der Museen« und unsere neue Initiative, die öffentliche Vortragsreihe »Astronomie am Sonntag Vormittag«.

Für Gymnasiasten wurde am MPIA in Zusammenarbeit mit der Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl und dem Astronomischen Rechen-Institut, Heidelberg im Rahmen der Berufsorientierung an Gymnasien (BOGY) ein Schüler-Praktikum durchgeführt. Und auch 2005 beteiligte sich das MPIA wieder am *Girls' Day*, einer bundesweiten Aktion, mit der Schülerinnen ermuntert werden sollen, sich beruflich in Bereichen zu orientieren, die vorwiegend noch eine Domäne der Männer sind. Etwa 60 Schülerinnen erhielten an verschiedenen Stationen einen Einblick in die Arbeit an einem astronomischen Institut (Kap. V.6).

Am MPIA wird die 1962 von Hans Elsässer, dem Gründungsdirektor des MPIA, mitbegründete, monatlich erscheinende Zeitschrift *Sterne und Weltraum* (SuW) herausgegeben. Die Zeitschrift wendet sich an das allgemeine Publikum und bietet sowohl den Fachastronomen als auch der großen Gemeinde der Amateurastronomen ein lebhaftes Forum.

Auf großes Interesse ist das im Vorjahr in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung, Donaueschingen, und mit Unterstützung der Klaus Tschira Stiftung initiierte *SuW-Schulprojekt* gestoßen: Zu ausgewählten Berichten, die in SuW erscheinen, wird monatlich ausführliches didaktisches Material entwickelt und im Internet frei zugänglich gemacht. Etwa viermal pro Jahr werden an der Landesakademie auf diesem Material basierende Lehrerfortbildungskurse durchgeführt. Damit sind Lehrer und Schüler in der Lage, die in SuW allgemeinverständlich beschriebenen aktuellen Themen aus der Forschung im regulären Physikunterricht zu behandeln.

II. Highlights

II.1 Zweitnächster Brauner Zwerg entdeckt

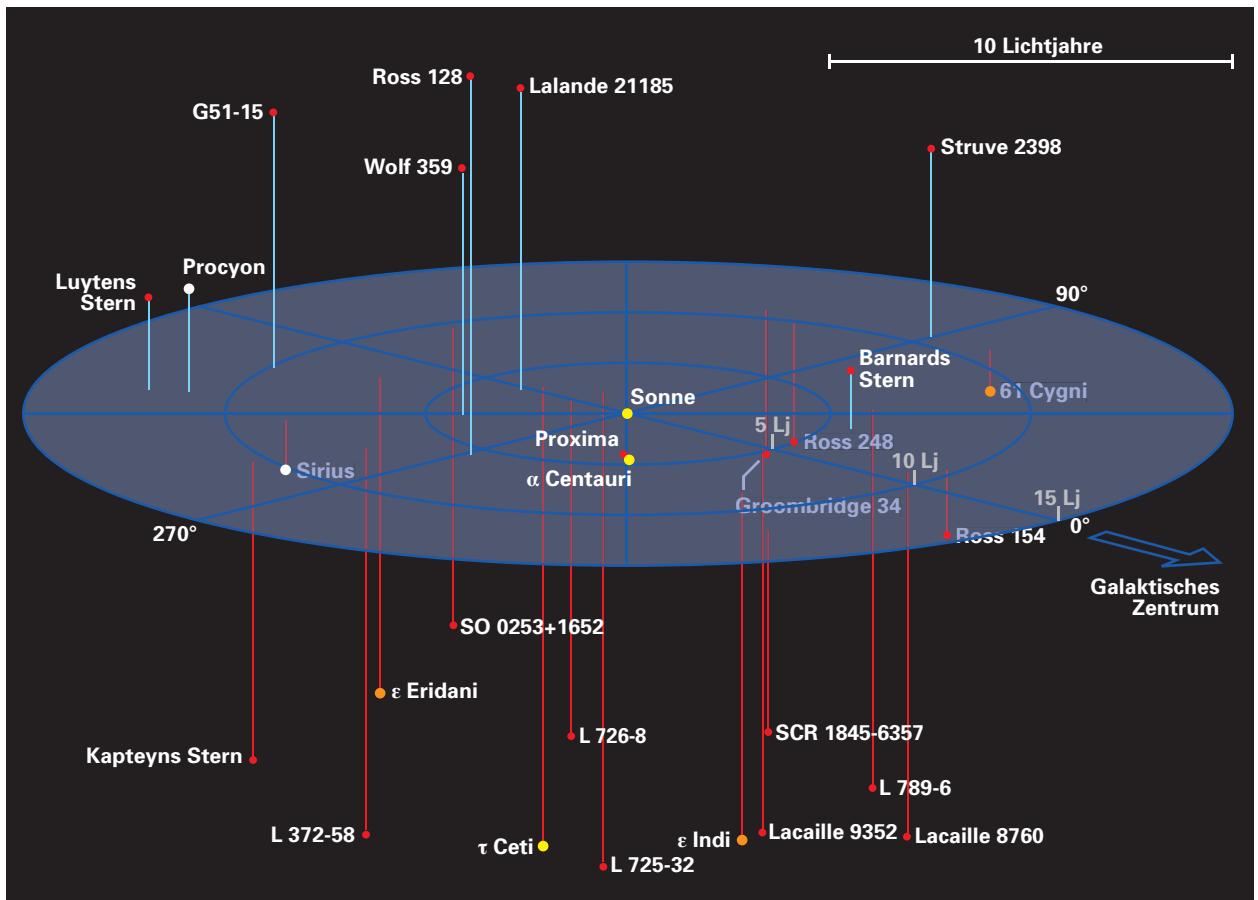
Astronomen des MPIA haben den zweitnächsten bisher bekannten Braunen Zwerg entdeckt. In 12.7 Lichtjahren Entfernung von der Sonne umkreist er einen massearmen Stern der Spektralkasse M8.5. Möglich wurde die Beobachtung mit der am Institut gebauten Kamera Naco SDI, die an einem der vier Reflektoren des Very Large Telescope arbeitet. Der Braune Zwerg mit der Bezeichnung SCR 1845-6357B ist für die Forschung von großer Bedeutung, weil sich innerhalb der nächsten Jahre seine Umlaufbahn genau vermessen lassen sollte. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Masse des Objekts sehr genau zu bestimmen und die bestehenden Modelle für Braune Zwerge zu überprüfen.

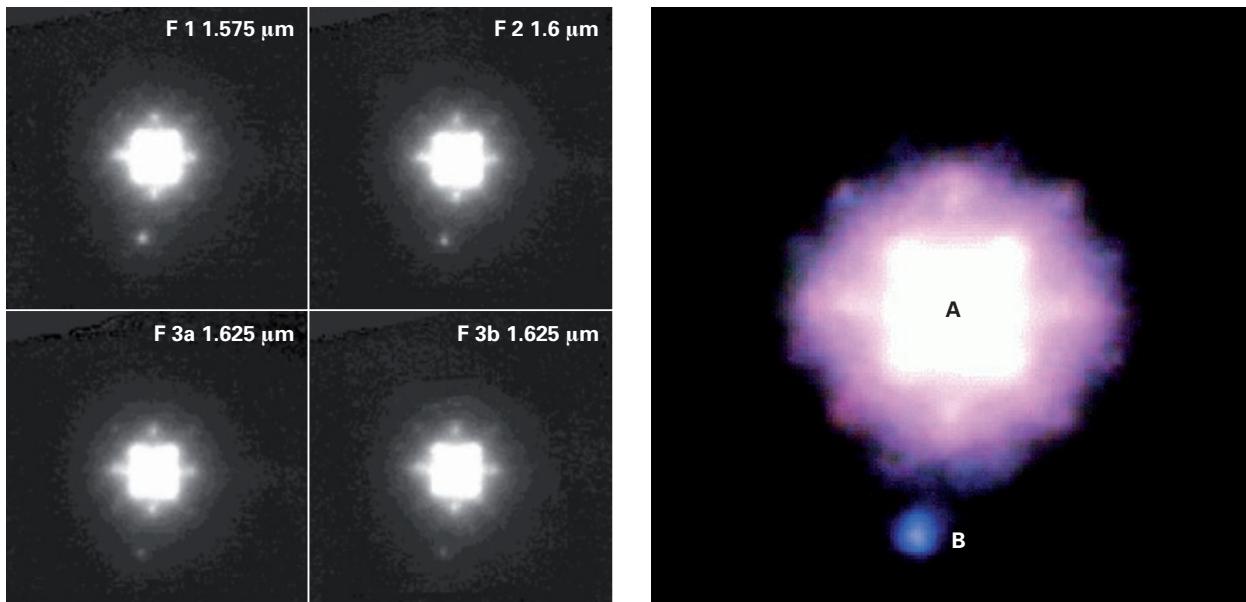
Seit der Entdeckung des ersten Braunen Zwerges im Jahre 1995 sind mehrere Hundert dieser Himmelskörper gefunden worden, jedoch keiner in der nahen Sonnenumgebung, d.h. innerhalb einer Entfernung von etwa 15 Lichtjahren. Doch gerade sehr nahe Braune Zwerge sind

für die Forschung von großer Bedeutung, weil sie sich detailliert untersuchen lassen. Mit neuen Messinstrumenten sucht man deshalb seit wenigen Jahren systematisch nach Braunen Zwergen als Begleiter massearmer Sterne. Hier sind die Entdeckungsmöglichkeiten besonders günstig, weil der Helligkeitskontrast zwischen Stern und Brauner Zwerg relativ gering ist.

Am MPIA wurde eine Kamera eigens für die Aufgabe gebaut, kühle, lichtschwache Objekte in der nahen Umgebung eines Sterns aufzunehmen. Dieses Instrument namens NACO SDI (NACO Simultaneous Differential Imager) arbeitet nach folgendem Prinzip. Die Kamera enthält eine Adaptive Optik, welche die durch Turbulenzen der Erdatmosphäre verursachte Unschärfe beseitigt. Die Zusatzoptik SDI zerlegt das Licht eines einzelnen Sterns

Abb. II.1.1: Die Sterne der Sonnenumgebung. Das jüngst entdeckte Objekt SCR 1845-6357B ist 12.7 Lichtjahre entfernt





in vier identische Bilder bei benachbarten Wellenlängen inner- und außerhalb der für massearme Objekte charakteristischen, infraroten Methanbanden. Auf geeigneten Differenzbildern dieser vier Aufnahmen verschwindet der Hauptstern mit seinem hellen Lichthof nahezu vollständig, und der massearme, kühle Begleiter wird deutlich erkennbar.

Schon in der Testphase von NACO SDI gelang eine bedeutende Entdeckung, als das 12 Lichtjahre entfernte Objekt ϵ Indi B in zwei Braune Zwerge des Spektraltyps T getrennt werden konnte. Die beiden Komponenten ϵ Indi Ba und Bb sind die nächsten bekannten Brauen Zwerge. Weitere Erfolge kamen hinzu. So wurde mit AB Dor C der bislang lichtschwächste Begleiter in nur 0.16 Bogensekunden Winkelabstand vom Hauptstern entdeckt, und bei Gl 86B, dem bislang einzigen bekannten Weißen Zwerg in einem Exoplanetensystem, konnte die Umlaufbewegung nachgewiesen werden. Damals gelangen mit der Kamera auch detailreiche Aufnahmen von der Oberfläche des Saturnmondes Titan.

Der massearme Stern SCR 1845-6357 vom Spektraltyp M8.5 wurde erst kürzlich entdeckt und steht in der Liste der sonnennächsten Sterne an 24. Stelle (Abb. II.1.1). Astronomen des Instituts beobachteten ihn mit NACO SDI im Mai 2005 und entdeckten dabei im Winkelabstand von 1.17 Bogensekunden einen Begleiter, der bei $1.575 \mu\text{m}$ Wellenlänge etwa 35 mal schwächer ist als der Hauptstern. Mit der genau bekannten Entfernung von 12.7 Lichtjahren ergibt sich der gegenseitige Abstand der beiden Objekte zu 4.5 Astronomischen Einheiten.

Der Begleiter zeichnet sich durch starke Methanabsorption bei Wellenlängen größer als $1.6 \mu\text{m}$ aus, was sich anhand von vier Aufnahmen in angrenzenden Wellenlängenbereichen feststellen ließ (Abb. II.1.2). Insbesondere wurde aus schmalbandigen Aufnahmen bei 1.575 und 1.625 Mikrometern Wellenlänge die Stärke

Abb. II.1.2: Aufnahmen von SCR 1845-6357 bei drei verschiedenen Wellenlängen. Der 1.17 Bogensekunden entfernte Braune Zwerg ist links unterhalb des Hauptsterns deutlich erkennbar. Das Falschfarbenbild rechts ist eine Überlagerung der drei Aufnahmen bei 1.575 , 1.6 und 1.625 Mikrometern Wellenlänge.

der Methanbande gemessen und mit Modellspektren von L- und T-Zwergen verglichen. Hieraus ergab sich der Spektraltyp $T5.5 \pm 1$ (Abb. II.1.3). Später aufgenommene Spektren bestätigten diesen Spektraltyp.

Braune Zwerge dieses Typs besitzen nach heutigen Modellen eine Temperatur von etwa 850 K. Die absolute Helligkeit im H-Band um $1.65 \mu\text{m}$ wurde zu 15.23 mag ermittelt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um einen zufällig in der Nähe von SCR 1845-6357 stehenden T-Zwerg und nicht um einen gebundenen Begleiter handelt, ist verschwindend gering. Zudem zeigen neuere Beobachtungen, dass SCR 1845-6357 A und B die gleiche Eigenbewegung besitzen, und es sich somit in der Tat um ein physikalisches, durch Gravitation aneinander gebundenes Paar handelt.

Mit ϵ Indi Ba und Bb, SCR 1845-6357B, Gl 229B und Gl 570D sind nun fünf T-Zwerge innerhalb von 20 Lichtjahren Abstand zur Sonne bekannt, die sich alle in Doppelsystemen befinden. In der Himmelsdurchmusterung 2MASS wurden innerhalb desselben Volumens nur zwei frei stehende T-Zwerge gefunden. Obwohl diese Zahlen klein und somit statistisch nicht sehr aussagekräftig sind, deuten sie zumindest darauf hin, dass es mehr T-Zwerge in Doppelsystemen als alleinstehende gibt.

Dies könnte ein Hinweis auf die Entstehung von Brauen Zwergen sein. Insbesondere dürfte diese Erkenntnis, sofern sie sich zukünftig bestätigen sollte, schwer mit der so genannten Auswurftheorie erklärbar

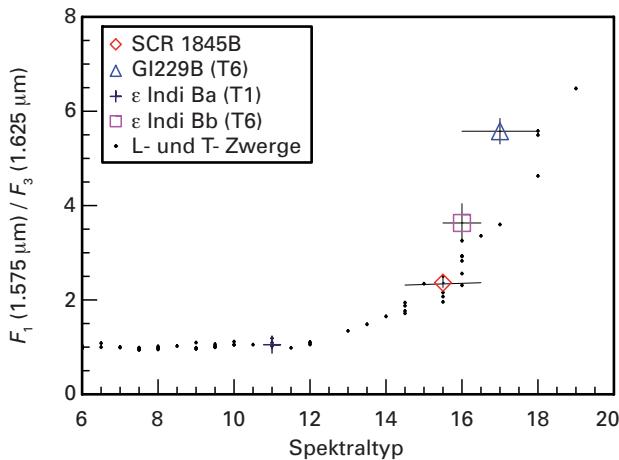


Abb. II.1.3: Methan-Spektralindizes für SCR 1845-6357B sowie für die T-Zwerge Gl 229B und ϵ Indi Ba und Bb.

sein. Sie geht davon aus, dass Braune Zwerge bei ihrer Entstehung Teil eines Mehrfachsystems sind: Sie können nicht zu voller stellarer Größe heranwachsen, weil sie noch während der Akkretionsphase aus dem System hinausgeschleudert werden.

Während die Entfernung zu SCR 1845-6357 bis auf 0.5 Prozent genau gemessen werden konnte, ist das Alter des Systems ungewiss. Alle Werte zwischen 100 Millionen und 10 Milliarden Jahren sind möglich. Daher lässt sich die Masse des Braunen Zwerges nur sehr ungenau angeben. Modelle geben für Braune Zwerge des Spektraltyps T5.5 in diesem Altersbereich Werte zwischen 9 und 65 Jupitermassen an. Damit handelt es sich in jedem Fall um einen Braunen Zwerg.

In den kommenden Jahren werden Astronomen des Instituts versuchen, die Umlaufbahn von SCR 1845-6357 A und B umeinander mit NACO SDI zu ermitteln. Damit lässt sich die Summe der Massen beider Körper bestimmen. Aus einer zusätzlichen Messung der relativen Radialgeschwindigkeit von SCR 1845-6357 A und B ergeben sich dann das Massenverhältnis und somit die Werte Einzelmassen. Der Braune Zwerg würde sich somit ideal als Masse-Leuchtkraft-Kalibrationsquelle für T-Zwerge eignen.

*Wolfgang Brandner.
Beteiligte Institute:
European Southern Observatory (Eso);
Steward Observatory, Tucson;
Keck Observatory, Hawaii*

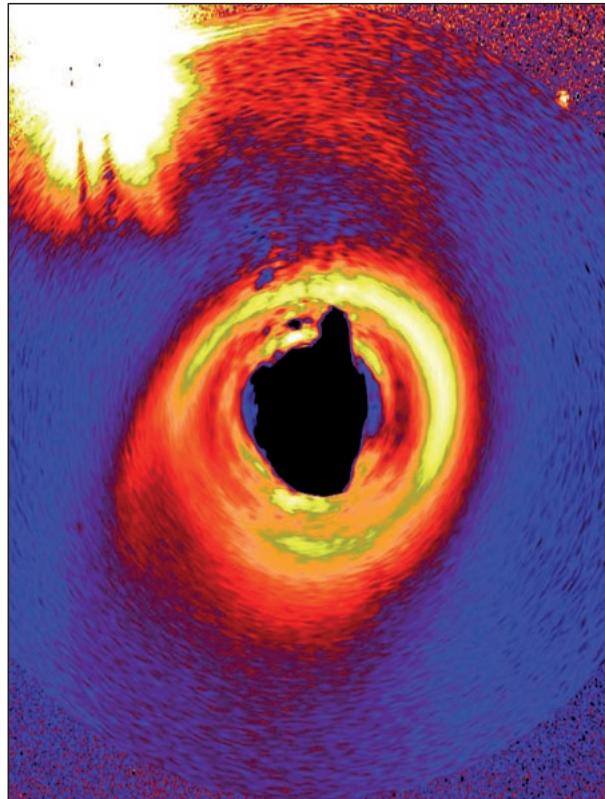
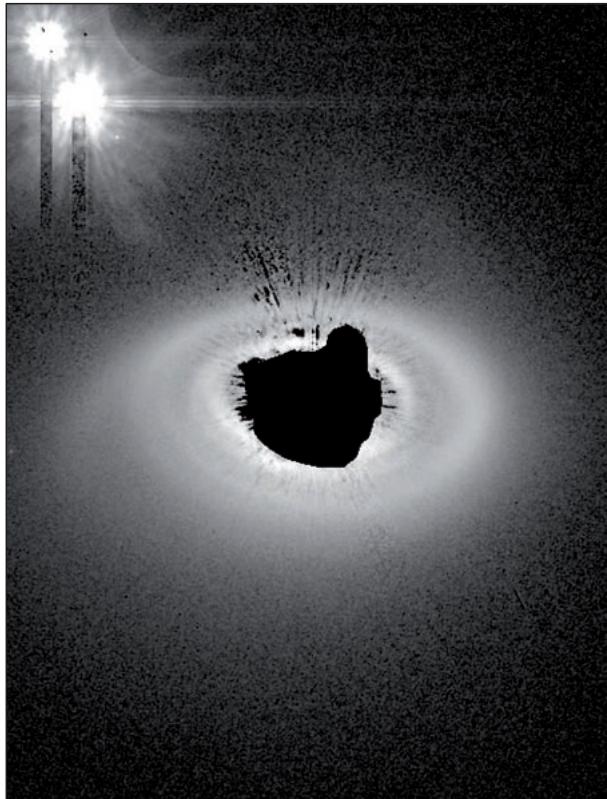
II.2 Das Ende einer zirkumstellaren Scheibe

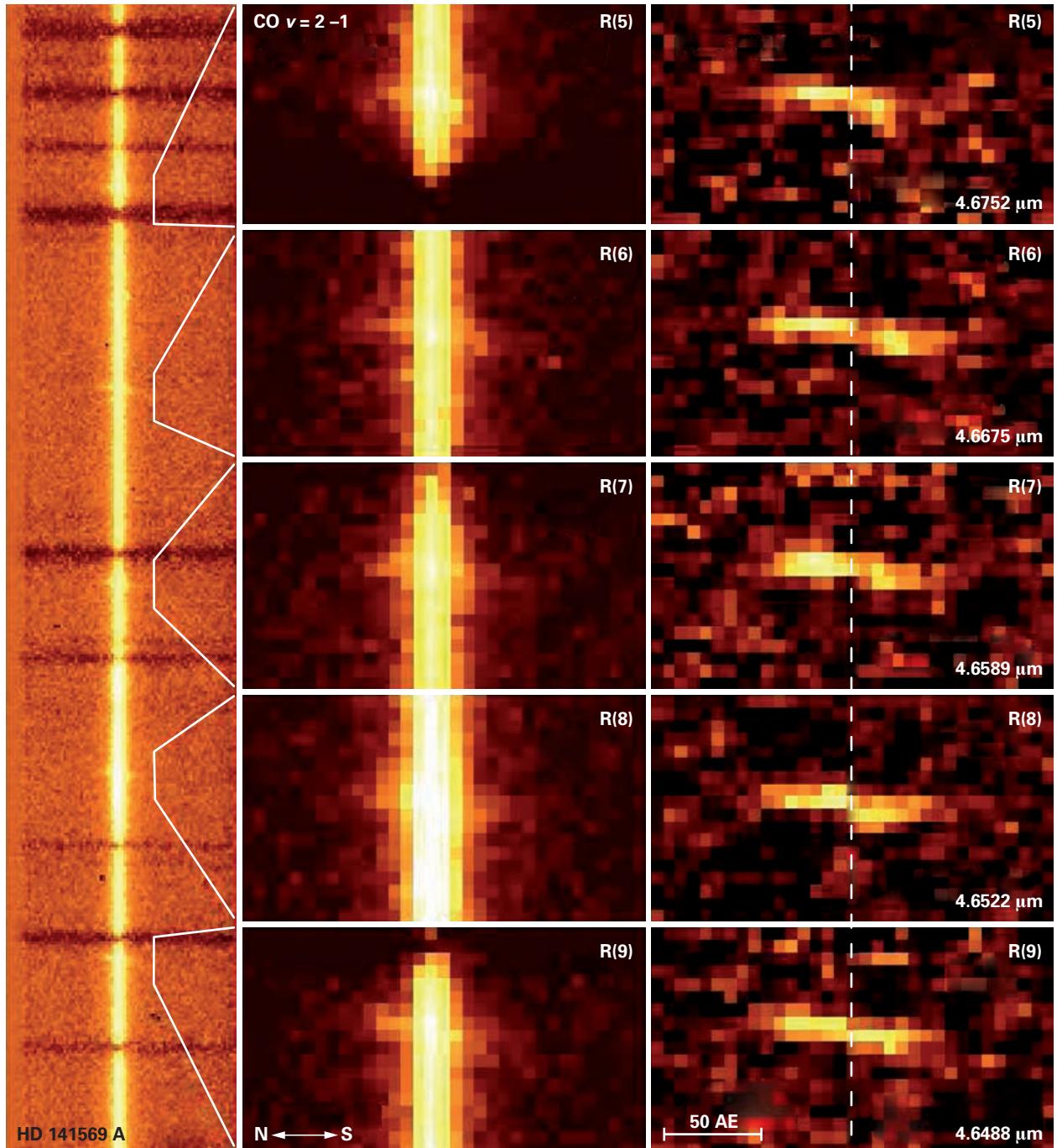
Zirkumstellare Scheiben um junge Sterne sind potentielle Geburtsstätten von Planeten und stehen deshalb derzeit im Brennpunkt der astrophysikalischen Forschung. Im Rahmen einer Kooperation mit Kollegen des National Astronomical Observatory of Japan haben Astronomen des MPIA die innere Struktur einer solchen zirkumstellaren Scheibe um den jungen, etwa 350 Lichtjahre von der Erde entfernten Herbig-Ae-Stern HD 141569A untersucht. Mit dem 8-Meter-Teleskop SUBARU auf Mauna Kea (Hawaii) gelang die Infrarotspektroskopie der CO ($J = 2 \rightarrow 1$)-Linie. Das Ergebnis: Innerhalb eines Radius von 11 Astronomischen Einheiten um den Stern gibt es kein nachweisbares CO-Gas. Wahrscheinlich hat der fünf Millionen Jahre alte Stern das Gas aus dem inneren Bereich der Scheibe bereits beseitigt. Mögliche Gasplaneten hatten somit kaum Zeit sich zu bilden.

Abb. II.2.1: Die Staubscheibe von HD 141569A, aufgenommen mit der Advanced Camera for Surveys (ACS) an Bord des Weltraumteleskops HUBBLE. Rechts ist das Bild der gegen die Sichtlinie geneigten Scheibe im Computer um 39 Grad gekippt worden, so dass man nun senkrecht auf sie herabschaut. Die Falschfarbendarstellung erhöht die Kontraste des Streulichts. (Bild: NASA/ESA).

Der Herbig-Ae-Stern HD 141569A ist Teil eines Dreifachsystems, in dem sich zwei masseärmere Begleiter (Spektraltypen M2 V und M4 V) in 7.55 bzw. 8.9 Bogensekunden Abstand (entsprechend 815 und 960 Astronomischen Einheiten) befinden. Das Alter dieses Systems ließ sich recht genau zu 5 ± 3 Millionen Jahren bestimmen, die Masse von HD 141569A beträgt etwa zwei Sonnenmassen. Modellrechnungen belegen, dass sich der Stern derzeit von einem Herbig-Ae- zu einem Hauptreihenstern entwickelt. Er ist von einer Staubscheibe umgeben.

HD 141569A wurde 1986 auf Aufnahmen des Infrarotsatelliten IRAS entdeckt. Ein Infrarotexzess deutete damals auf zirkumstellaren Staub hin. Auf Bildern des Weltraumteleskops HUBBLE entdeckte man später eine Staubscheibe mit einer ungewöhnlichen Struktur (Abb. II.2.1): Der innere Bereich ist bis in 175 Astronomischen Einheiten Abstand vom Stern weitgehend staubfrei. Außerhalb dieser Lücke, bis zu einem Abstand von 215 Astronomischen Einheiten, schließt sich ein dichter spiralförmiger Staubarm an. Zwischen 215 AE und 300 AE ist der Staub verhältnismäßig dünn verteilt, während sich im äußersten Bereich zwischen 300 und 400 AE ein zweiter Spiralarm erstreckt. Als Ursache für diese unge-





wöhnliche Spiralstruktur ist eine Wechselwirkung mit den anderen beiden Komponenten des Dreifachsystems denkbar.

Hochauflösende Beobachtungen des CO-Gases

Während sich diese Beobachtungen auf den Staub konzentrierten, war über den Gasgehalt wenig bekannt. CO-Gas war im äußeren Bereich nachgewiesen worden und ließ auf einen Gasgehalt von etwa 300 Erdmassen (hauptsächlich molekularem Wasserstoff) schließen.

Abb. II.2.2: Spektrum von HD 141569A um 4.6 μm Wellenlänge. Der Spalt verlief von Süd nach Nord entlang der Hauptachse der Staubscheibe (Norden ist links). *Links:* Ausschnitt des Spektrums, *Mitte:* Vergrößerung der die einzelnen CO-Linien enthaltenen Abschnitte. *Rechts:* Wie in der Mitte, jedoch nach Subtraktion des stellaren Kontinuums, dessen Position die gestrichelte Linie kennzeichnet. Man erkennt die Doppler-Verschiebung der Linien aufgrund der Rotation der Gasscheibe, wobei der nördliche Teil sich von uns weg bewegt.

Allerdings konnte der innere Bereich bis in etwa 30 AE Entfernung vom Stern bislang nicht räumlich aufgelöst

werden. Der Gasgehalt in diesem Bereich ist jedoch für die Entstehung von Gasplaneten entscheidend.

Eine Möglichkeit, diesen inneren Bereich der Scheibe um HD 141569A zu beobachten bietet sich im nahen Infrarot, wo bei Wellenlängen oberhalb von etwa $4.6\text{ }\mu\text{m}$ die CO-Übergänge $J = 2 \rightarrow 1$ liegen. Die Beobachtungen fanden im Mai 2005 am 8-Meter-Teleskop SUBARU auf Mauna Kea (Hawaii) statt. Zum Einsatz kam ein Langspalt-Infrarotspektrograph mit Adaptiver Optik, dessen räumliches Auflösungsvermögen 0.24 Bogensekunden (FWHM) betrug.

Die CO-Linien waren bis zu einer Entfernung von 50 AE vom Stern nachweisbar (Abb. II.2.2). Nach Subtraktion des stellaren Kontinuums wurde die Doppler-Verschiebung der CO-Linien aufgrund der Rotation der Gasscheibe deutlich sichtbar. Der nördliche Teil der Scheibe bewegt sich von uns weg, die Bewegung im Uhrzeigersinn stimmt mit der Krümmung der Staubspiralarme überein.

Die Messdaten zeigen, wie sich das Gas im äußeren Bereichen der Scheibe auf Kepler-Bahnen um den Stern bewegt. In der näheren Umgebung des Sterns lässt sich jedoch ein weiteres Ansteigen der Geschwindigkeit nicht mehr nachweisen (Abb. II.2.4 unten). Die Messdaten belegen somit, dass sich nahe am Stern kaum noch CO-Gas befindet. Summiert man die CO-Emission radial auf, so erhält man das in Abb. II.2.3 gezeigte Profil. Die CO-Emission steigt mit abnehmendem Abstand zum Stern stetig an, erreicht ihr Maximum bei 15 AE und fällt weiter innen rasch ab. Die Anpassung mit einer Potenzfunktion ergibt einen Abschneideradius von 11 ± 2 AE: Näher am Stern ist kein CO-Gas mehr nachweisbar. In unserem Sonnensystem entspricht der innere Rand des Lochs etwa der Umlaufbahn des Saturn. Abb. II.2.4 fasst die Ergebnisse zusammen.

Ursache für das zentrale Loch in der Scheibe

Wie lässt sich das zentrale Loch in der Gasscheibe erklären? Würde das Magnetfeld des Zentralsterns das Loch verursachen, so wäre es mit einem Radius von etwa 0.01 AE kaum größer als der Stern selbst. Wäre das Loch dadurch entstanden, dass die Sternstrahlung den Staubanteil in der Scheibe sublimieren (vom festen Zustand direkt in einen gasförmigen übergehen) lässt, so würde man ein Loch mit etwa 0.1 AE Radius erwarten. Für das Verschwinden des Gases in größeren Abständen müssen andere Prozesse verantwortlich sein.

Auffällig ist, dass der Außenrand des Lochs etwa mit dem so genannten Gravitationsradius übereinstimmt. Dort ist die Schallgeschwindigkeit des ionisierten Mediums so groß wie die Entweichgeschwindigkeit des Systems. Der Gravitationsradius definiert somit den innersten Bereich einer Scheibe, wo die Sternstrahlung ionisiertes Gas aus dem System heraustreibt. Da dieser annähernd mit dem beobachteten Außenrand des Lochs übereinstimmt, kann man davon ausgehen, dass zwei Prozesse die Auflösung der inneren zirkumstellaren Scheibe kontrollieren: Photoevaporation, also Verdampfen durch die energiereiche Strahlung im fernen UV, und Akkretion des Sterns.

In der frühen Entwicklungsphase der zirkumstellaren Scheibe führen Photoevaporation und Akkretion nicht zur Auflösung der inneren Scheibe. Die Viskosität in der dichten Scheibe ist noch hoch, wodurch Material aus den äußeren Bereichen nach innen gelangt und das dort verschwindende Gas ersetzt. Je dünner die Scheibe wird, desto kleiner wird die Viskosität, und der Nachschub versiegt langsam. Jetzt gewinnt die Photoevaporation die Oberhand, und innerhalb des Gravitationsradius bildet sich ein Loch.

Für die Entstehung von Gasplaneten setzt diese Entwicklung zeitliche Grenzen. Derzeitige Modelle sagen für die Bildung eines jupiterähnlichen Planeten eine Dauer von 1 bis 10 Millionen Jahren voraus. Das ist gerade noch vereinbar mit der durchschnittlichen Lebensdauer zirkumstellarer Scheiben. Die hier beschriebenen Beobachtungen an HD 141569A, dessen Alter mit 5 Millionen Jahren angegeben wird, zeigen jedoch, dass das Gas in jenem Bereich, in dem die Gasplaneten vermutlich entstehen, bereits nach relativ kurzer Zeit verschwunden ist. Jupiterähnliche Planeten müssen also in ihrer Entstehungsphase gegen das rasche Verschwinden ihres Rohstoffreservoirs anstrengen. Dieser Prozess würde zwangsläufig zu einer Diversifizierung der Planetensysteme führen: Wenn die Auflösung der Scheibe relativ langsam vonstatten geht, kann ein Gasriese entstehen, andernfalls nicht.

Grundsätzlich denkbar ist, dass sich bei HD 141569A bereits ein Gasplanet gebildet und das Gas im inneren Bereich der Scheibe aufgesammelt hat. Auf die Existenz eines solchen Planeten gibt es jedoch keinen Hinweis. Mit

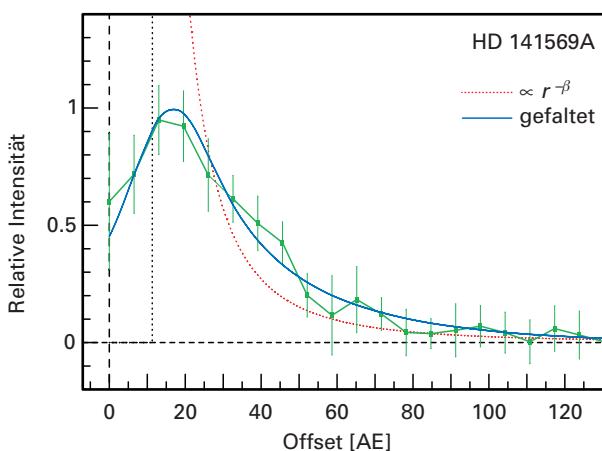


Abb. II.2.3: Radiales Intensitätsprofil der CO-Linien. Die gepunktete Linie zeigt ein Potenzgesetz das mit der Potenz $\beta = -2.6$ abfällt. Innerhalb von 11 AE ist kaum noch CO-Gas vorhanden.

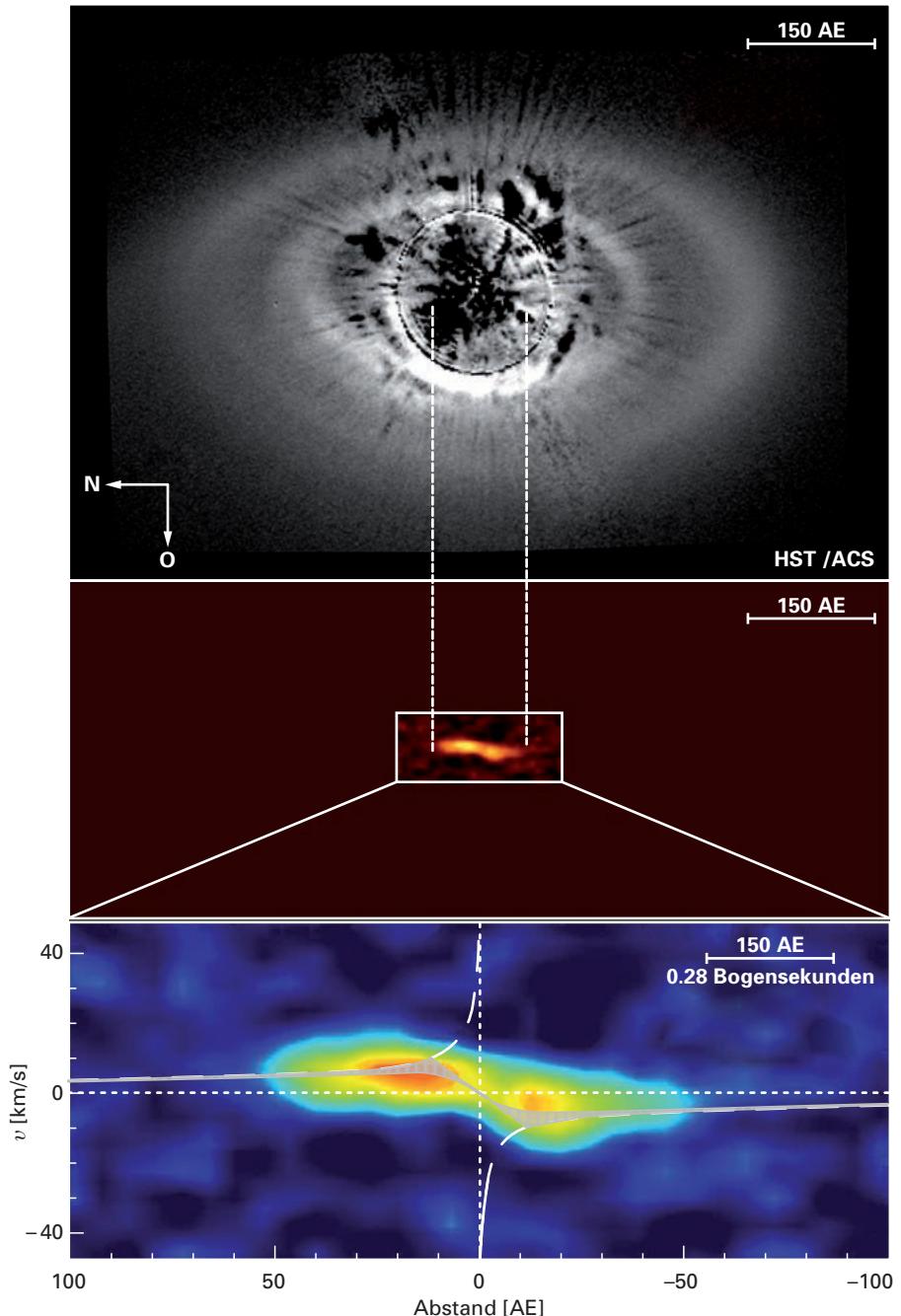


Abb. II.2.4: Oben: Das mit dem Weltraumteleskop HUBBLE aufgenommene Bild von HD 141569A. Der innere, 100 AE große Teil der Scheibe ist abgedeckt. Mitte: Die Geschwindigkeit des Gases (Ordinate) ist als Funktion des Abstandes vom

Zentralstern (Abszisse) dargestellt. Unten: Vergrößerter Ausschnitt des mittleren Bildes. Die beiden Kurven geben den Verlauf der Kepler-Rotation bei einer Zentralmasse von zwei Sonnenmassen wieder.

zukünftigen Instrumenten wird man jedoch nach einem solchen möglichen Begleiter suchen können. Hierfür eignen sich Instrumente mit extremer Adaptiver Optik, wie das im Bau befindliche Planet-Finder-Instrument SPHERE am Very Large Telescope, an dem das MPIA beteiligt ist. Auch mit dem James Webb Space Telescope werden sich gute Chancen ergeben, einen dunklen Begleiter zu finden.

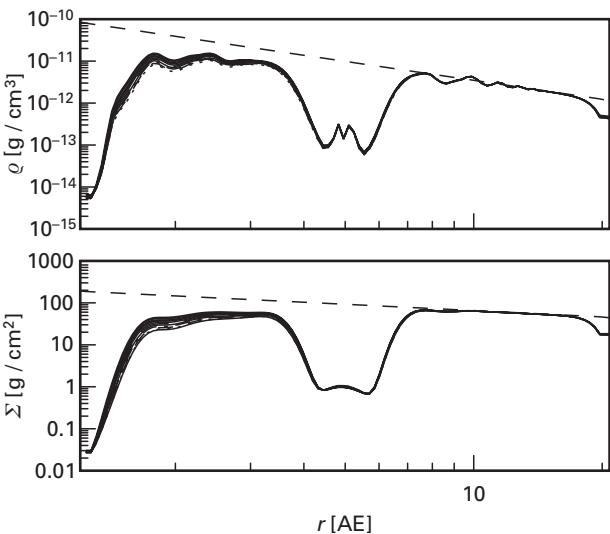
*Miwa Goto, Cornelis Dullemond,
Thomas Henning, Hendrik Linz.
Beteiligte Institute:
SUBARU Telescope, Hilo;
Thüringer Landessternwarte Tautenburg;
National Astronomical Observatory of Japan, Tokio*

II.3 Das Wechselspiel zwischen Planet und zirkumstellarer Scheibe

Das Wachstum eines Planeten, ausgehend von einem Staubkörnchen, vollzieht sich über mehr als 13 Größenordnungen. Es ist derzeit und auch für die nahe Zukunft ausgeschlossen, eine solche Entwicklung »am Stück« im Computer zu simulieren. Theoretiker konzentrieren sich deshalb auf unterschiedliche Phasen. Ein interessanter Aspekt ist dabei die gravitative Wechselwirkung des entstehenden Planeten mit der zirkumstallaren Scheibe, in die er noch eingebettet ist. In einer neuen Studie, die in Zusammenarbeit mit einem Kollegen an der Universität Tübingen durchgeführt wurde, untersuchten Forscher am MPIA dieses Problem erstmals dreidimensional unter Berücksichtigung der Thermodynamik des beteiligten Gases und erhielten überraschende Ergebnisse. So bildet sich zum Beispiel um einen jupiterähnlichen Planeten nicht wie bislang angenommen eine dünne Akkretionsscheibe, sondern eine heiße Gasblase. Wie dieses Phänomen das Planetenwachstum beeinflusst, müssen weitere Studien zeigen. Offenbar hat es aber nur einen geringen Einfluss auf das Migrationsverhalten des Planeten. Um so wichtiger sind die Auswirkungen auf die Beobachtbarkeit des Planeten zum Zeitpunkt seiner Geburt.

Die Entwicklung eines massereichen Gasplaneten in der zirkumstallaren Scheibe ist ein komplexes Wechselspiel, bei dem der Planet die Struktur der Scheibe verändert und umgekehrt Gas und Staub der Scheibe auf den-

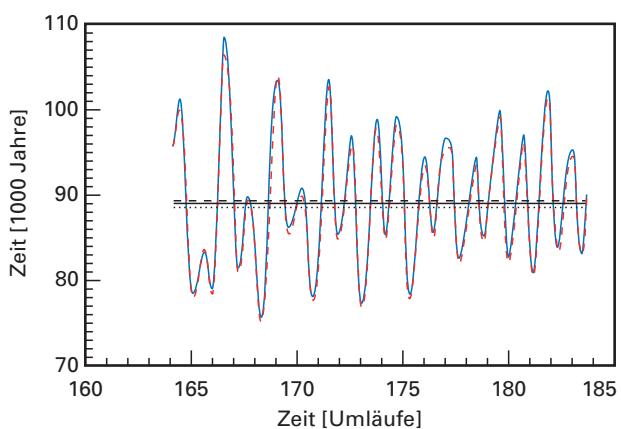
Abb. II.3.1: Modell 1: a) Radiale DichteVerteilung ϱ in der Mittelebene der Scheibe und Flächendichte nach Σ 184 Umläufen; b) Entwicklung der Migrationsrate. Die Gerade bei etwa 90 000 Jahren gibt die zeitlich gemittelte Migrationszeit an.



Planeten einwirken. Computersimulationen haben in den vergangenen Jahren gezeigt, dass ein massereicher Planet mit seiner Gravitation in der Scheibe Störungen wie Spiralarme und vor allem ringförmige Lücken erzeugen kann. Dies geschieht, weil sich die Teilchen innerhalb der Planetenbahn schneller um den Stern herum bewegen als der Planet. Er bremst sie daher mit seiner Schwerkraft ab. Anders gesagt, die Teilchen verlieren an Drehimpuls und wandern weiter nach innen. Die Teilchen jenseits der Planetenbahn hingegen sind langsamer als der Planet und gewinnen von ihm Drehimpuls. Sie werden dadurch schneller und wandern weiter nach außen. Auf diese Weise öffnet sich in der Scheibe zu beiden Seiten der Planetenbahn eine ringförmige Lücke.

Darüber hinaus kann ein Austausch von Drehimpuls zwischen den Teilchen in der Scheibe und dem Planeten stattfinden. Die innerhalb der Umlaufbahn befindliche Materie verleiht dem Planeten Drehimpuls. Deswegen müsste er nach außen wandern. Gleichzeitig entzieht ihm aber die außerhalb seiner Bahn gelegene Scheibenmaterie Drehimpuls, weswegen er nach innen streben müsste. Diese beiden Effekte sind nicht gleich groß. In allen untersuchten Fällen verliert der Planet insgesamt an Drehimpuls und wandert nach innen. Diese Migration erklärt die Existenz massereicher Exoplaneten, die auf sehr engen Bahnen ihren Zentralstern umkreisen. Man nennt diese Körper auch »heiße Jupiter«.

Computersimulationen haben in den vergangenen Jahren gezeigt, dass ein Planet, der in fünf Astronomischen Einheiten von der Sonne entsteht, was der heutigen Umlaufbahn des Planeten Jupiter entspricht, nach mehreren tausend Jahren die Lücke in der Scheibe frei gefegt hat. Gleichzeitig wanderte er nach innen. Bereits nach wenigen zehntausend Jahren hat er seinen Abstand zum Stern halbiert und seine Masse verdoppelt, denn während der Migration sammelte er Materie aus seiner Umgebung auf. Die Wanderung kommt erst zum Stillstand, wenn die



Scheibe sich aufgelöst hat. Ob weitere Bremseffekte, wie Magnetfelder oder Gezeitenkräfte eine Rolle spielen, ist zur Zeit Gegenstand der Forschung.

Die Komplexität dieses Wechselspiels erfordert bei allen Computersimulationen Vereinfachungen. So konnten beispielsweise erst vor wenigen Jahren Rechnungen unter Einbeziehung von Magnetfeldern und Turbulenz (Magnetohydrodynamik) von zwei auf drei Dimensionen erweitert werden. Alle bisherigen numerischen Rechnungen behandelten die Scheibe jedoch

als lokal isotherm. Erste Versuche, Energiedissipation durch Viskosität der Scheibenmaterie zu berücksichtigen, mussten auf zwei Dimensionen beschränkt bleiben.

Lückenbildung, Migration und Akkretion

In der neuen Untersuchung am MPIA in Zusammenarbeit mit der Universität Tübingen wurden die Rechnungen mit Berücksichtigung der Thermodynamik auf drei Dimensionen erweitert. Ziel war die Untersuchung von Einflüssen physikalischer Parameter, wie Strahlungstransport und Materieakkretion, auf den jungen Planeten. Hierbei muss zum Beispiel berücksichtigt werden, dass die Temperaturverteilung innerhalb der Scheibe von der Masse der in ihr enthaltenen Materie abhängt, weil mit ihr die optische Tiefe variiert.

In den Simulationen gingen die beiden Theoretiker von einem Standardszenario aus. In allen Fällen betrachteten sie eine zirkumstellare Scheibe, die sich in einem Entfernungsbereich zwischen 1.25 und 20 AE vom Stern erstreckt. Darin nimmt die Temperatur anfänglich umgekehrt proportional mit dem Abstand ab, während sie in vertikaler Richtung als konstant angenommen wird. Die Anfangsdichte nimmt mit $r^{-1.5}$ vom Stern ausgehend ab, wobei die Dichte in der Äquatorebene bei 5 AE 10^{-11} g/cm³ beträgt. In dieser Entfernung befindet sich bei Beginn der Simulation ein Planet mit einer Jupitermasse. Während der Simulation stellt sich dann schnell ein Temperaturprofil ein, das durch ein Gleichgewicht zwischen Kühlung durch Strahlung und Heizung durch Akkretion und hydrodynamische Prozesse gegeben ist.

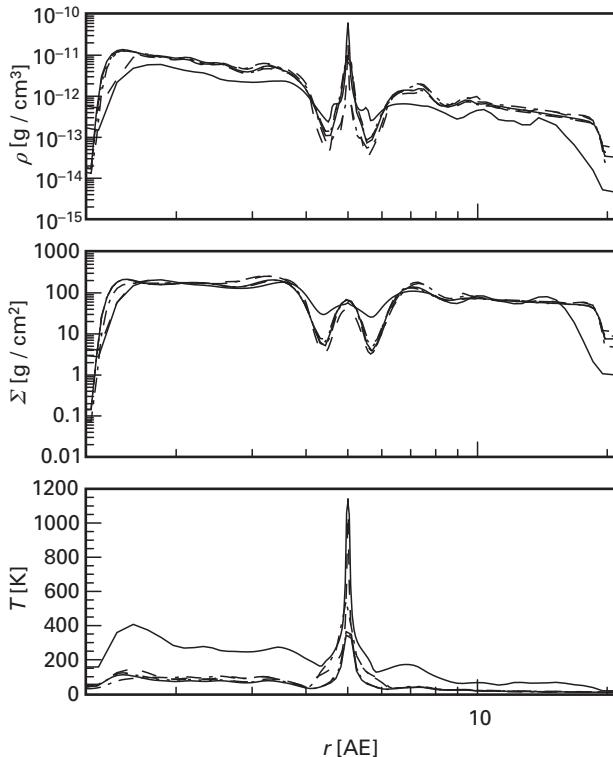
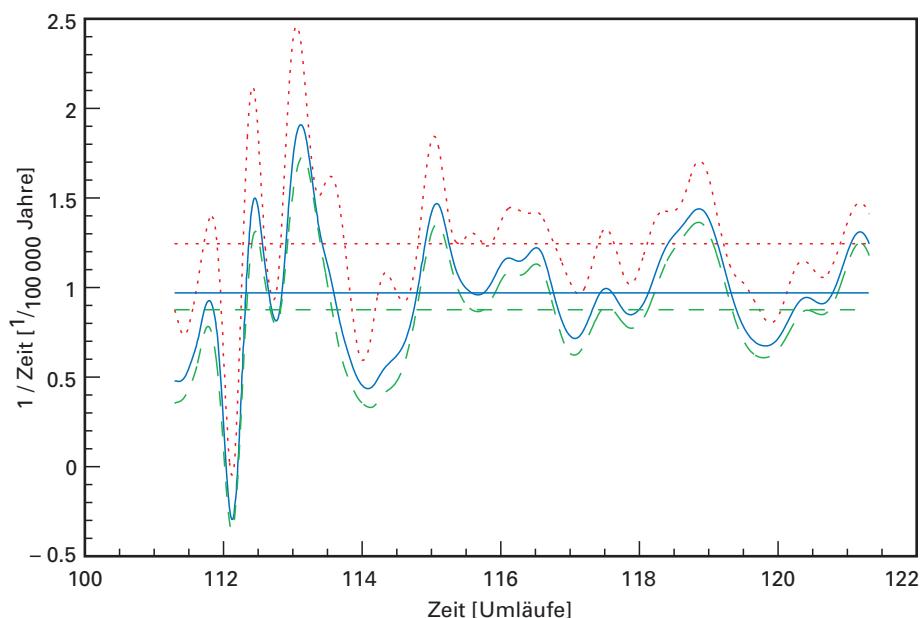


Abb. II.3.2: Modell 4; oben: Radiale DichteVerteilung in der Mittelebene der Scheibe nach hundert Umläufen, Flächendichte und Temperatur; unten: Entwicklung der Migrationsrate.



In den Simulationsläufen wurde auch jener Bereich variiert, innerhalb dessen der Planet Materie akkretiert. Ein Maß hierfür ist das Roche-Volumen. Es gibt jenen Bereich an, in dem Materie gravitativ an den Planeten gebunden ist. Masse außerhalb dieses Gebietes wird auf eine Umlaufbahn um den Zentralstern gezwungen.

Um den Einfluss der Thermodynamik auf die Simulationsergebnisse zu vergleichen, wurden vier unterschiedliche Modelle berechnet:

1. Isothermie mit Materieakkretion, wobei die akkretierte Materie und mit ihr die interne Energie bei jedem Umlauf aus der Simulation entfernt werden.
2. Wie Modell 1, aber unter Berücksichtigung der Strahlung des Planeten.
3. Wie Modell 2, plus Berücksichtigung der thermischen Energie der akkretierten Materie, die sich im Roche-Volumen ansammelt. Bei Start der Simulation ist in der Scheibe bereits eine Lücke um den Planeten vorhanden.
4. Wie Modell 2, plus Berücksichtigung der thermischen Energie der akkretierten Materie; das Modell startet ohne Lücke.

Im Folgenden werden nur die wesentlichen Ergebnisse von Modell 1 und Modell 4 erläutert und die Unterschiede gegenübergestellt.

Das erste Modell gibt die Realität am ungenauesten wieder, aber es eignet sich dennoch, um mit relativ kurzen Rechenzeiten einen Einblick in die grundsätzlichen Geschehnisse zu erhalten. Abb. II.3.1a demonstriert, wie sich nach 184 Umläufen eine stabile Lücke um die Planetenbahn herum geöffnet hat. Hierbei bleibt die Akkretionsrate des Planeten mit 1.5×10^{-4} Jupitermassen pro Umlauf nahezu konstant. Der gravitative Einfluss der Scheibe auf die Migration des Planeten schwankt zwar etwa um einen Faktor zwei, aber die gemittelte Zeitskala von 90 000 Jahren stimmt sehr gut mit den Ergebnissen anderer Simulationen und analytischer Abschätzungen überein.

Abb. II.3.2 zeigt die Ergebnisse für Modell 4. Hier wird nach etwa hundert Umläufen ein Gleichgewichtszustand mit einer Lücke erreicht. Allerdings ist die Akkretionsrate mit 6×10^{-4} Jupitermassen pro Umlauf viermal so hoch wie in dem ersten Modell. Aus anderen Simulationen ist bekannt, dass erst nach etwa tausend Umläufen so viel Staub aus der Lücke entfernt wurde, dass keine Akkretion mehr stattfindet. So lange konnte die Simulation bei diesem komplexen Modell nicht laufen, so dass die gesamte akkretierte Masse nicht ermittelt werden konnte. Abb. II.3.2b demonstriert aber, dass die im Vergleich zu Modell 1 erhöhte Akkretionsrate sich auf kurzer Zeitskala erheblich auf die Migration des Planeten auswirkt. Im Extremfall kann sich der Planet sogar vorübergehend vom Stern entfernen. Dennoch liegt die über mehr als hundert Umläufe gemittelte Zeitskala erneut bei knapp 100 000 Jahren. Abb. II.3.3 zeigt die Dichteverteilung nach 121 Umläufen. Die ringförmige Lücke und auch spiralartige Störungen sind erkennbar.

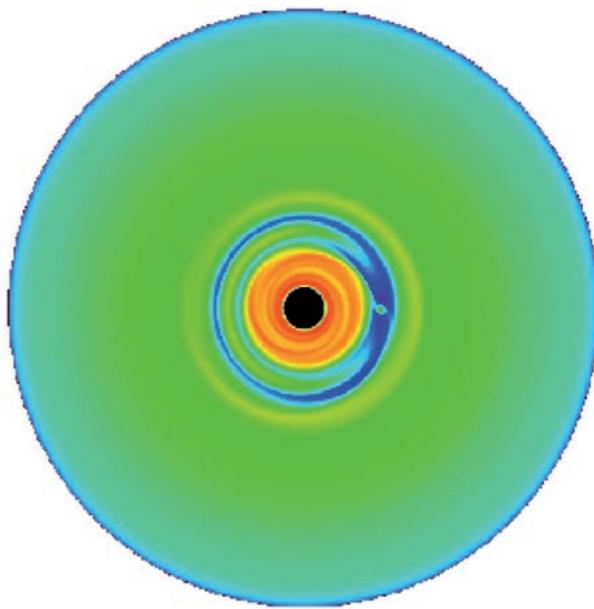


Abb. II.3.3: Modell 4, Dichteverteilung in der Mittelebene der Scheibe nach 121 Umläufen. Gut erkennbar sind die Lücke (dunkel) und spiralförmige Strukturen.

Damit steht ein wesentliches Resultat der neuen Modelle fest: Die Berücksichtigung des Strahlungstransports ändert nur wenig an der mittleren Zeitskala für die Migration des Planeten. Diese wichtige Größe scheint damit aus theoretischer Sicht weitgehend geklärt.

Eine bedeutende Veränderung ist jedoch in Abb. II.3.2 erkennbar. Dichte und Temperatur steigen um den Planeten herum (bei 5 AE) erheblich an. Dies lässt sich physikalisch leicht erklären. In dieser Rechnung wird das Gas zwar aus dem Modell entfernt, sobald es in das Roche-Volumen eindringt, die Energie bleibt aber lokal erhalten. Die bei der Akkretion frei werdende potentielle und kinetische Energie wird daher lokal (in jeder Gitterzelle) zur inneren Energie addiert. Dabei entsteht in der optisch dichten Scheibe über den Polen des Planeten eine Konvektion. Diese Strömung ist so langsam, dass sie nicht wie eine Fontäne aus der Scheibe austreten kann. Stattdessen führt sie zur Ausbildung einer heißen Blase in der Umgebung des Planeten (Abb. II.3.4), in der Höchsttemperaturen von 1500 K erreicht werden (Abb. II.3.2). Damit ist der Planet der mit Abstand heißeste Bereich in der Scheibe. Sollte sich dieses Phänomen als reell erweisen, so wäre der Planet mit hochauflösenden Teleskopen beobachtbar.

Mit der Frage der Beobachtbarkeit haben sich Astronomen des MPIA bereits in einem früheren Stadium der Simulationen ausführlich auseinandergesetzt. Dabei sind sie zu dem Schluss gekommen, dass beispielsweise das große internationale Millimeter-Array ALMA sowie das geplante VLTI-Instrument MATISSE im mittleren

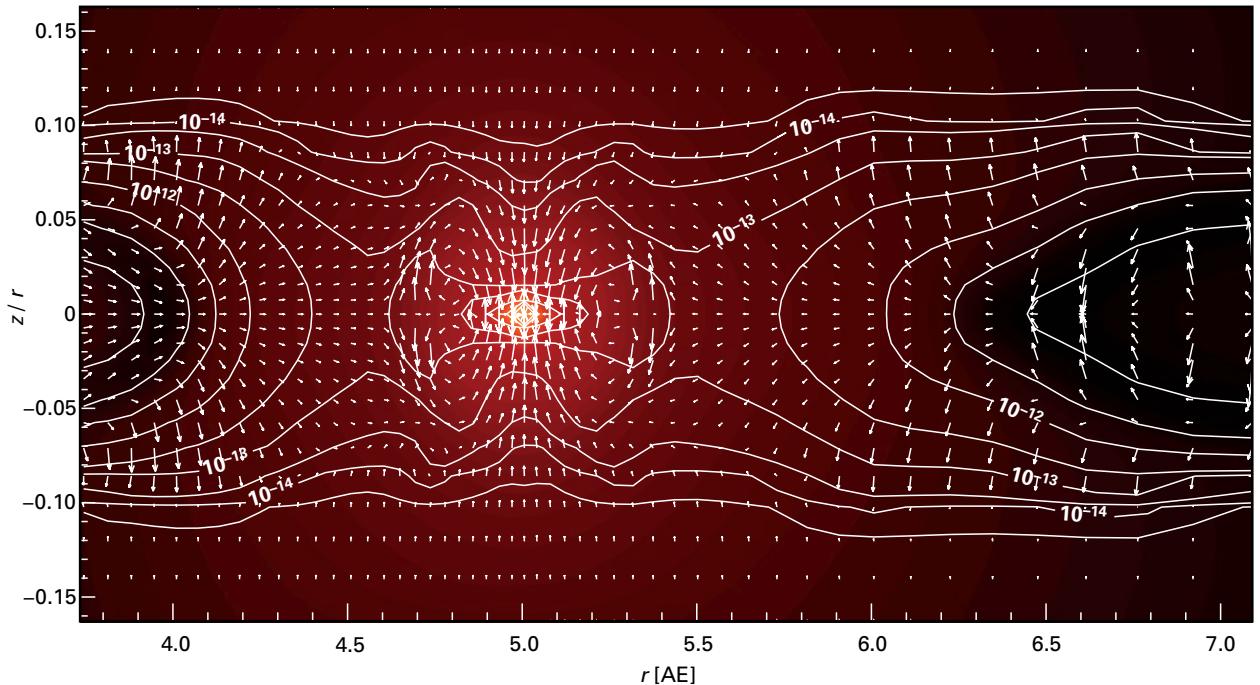
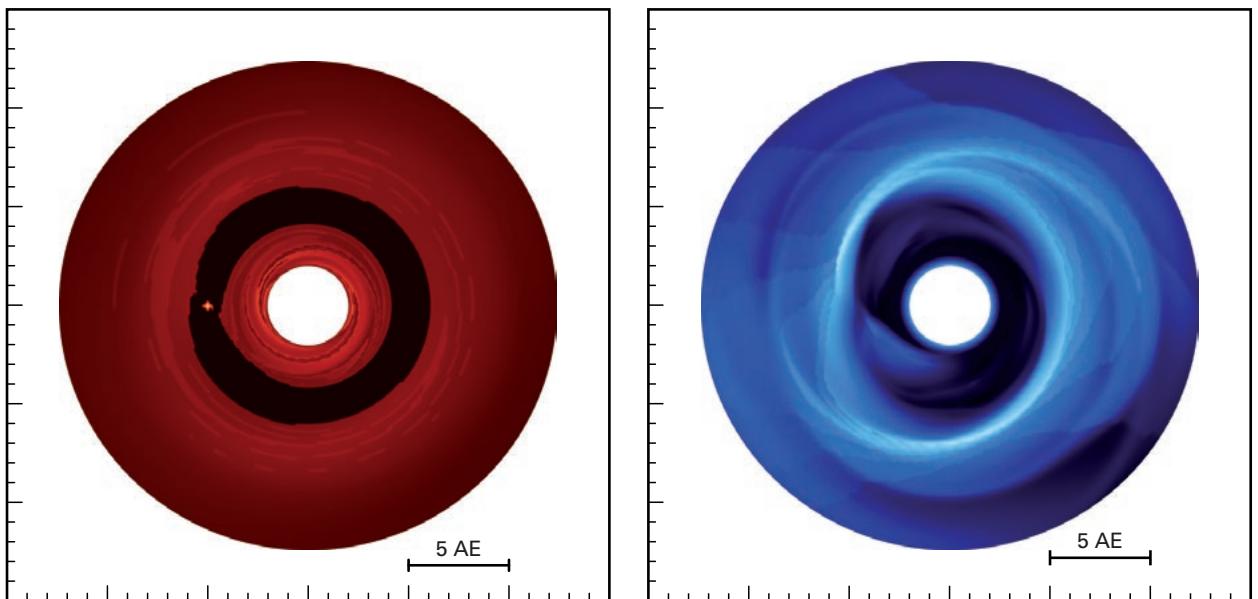


Abb. II.3.4: Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung in der Scheibe nach 141 Umläufen. Die Temperatur variiert zwischen 30 und 1500 K, die Strömung auf den Planeten erfolgt über die Pole, nicht aber entlang der Mittelebene.

Abb. II.3.5: Thermische Emission von Staub und Gas in der Scheibe. Gezeigt ist die von der Photosphäre der Scheibe und von der Gashülle um den Planeten emittierte Strahlung. Für dieses Modell wurde die Akkretionsleuchtkraft des Planeten, die Heizung durch die Turbulenz der Scheibe sowie die Anstrahlung durch das Zentralobjekt mit einbezogen. Man erkennt deutlich den Planeten in seiner Lücke sowie Anzeichen der Spiraldichtewellen in der Scheibe.

Infrarot gute Chancen bieten, heiße Protoplaneten zu beobachten (Jahresbericht 2004, Kap. III.2 und 2005, Kap. III.2). Abb. II.3.5 zeigt, wie ein solcher Planet durch seine emittierte Strahlung beispielsweise mit ALMA im Submm-Bereich beobachtet werden könnte. Bei kleineren Wellenlängen (Abb II.3.6) dominiert das Licht des Zentralobjekts, das in erster Linie an den

Abb. II.3.6: Im Streulicht des Zentralobjekts beobachtet, ist der Planet in seiner Lücke verborgen. Dafür ist jetzt das vom Planeten angeregte Spiralwellenmuster deutlicher erkennbar. Diese Struktur streut vornehmlich das Licht des Zentralobjekts, weil sie aus der Scheibe herausragt.



Spiralstrukturen um den Planeten zum Beobachter hin gestreut wird. Letzteres wäre prinzipiell mit MATISSE beobachtbar.

Gleichzeitig verhindert der Druck der heißen Gasblase die Entstehung einer Kepler-Scheibe um den Planeten herum. Vielmehr bildet sich eine nahezu sphärische Hülle aus, die sein gesamtes Roche-Volumen ausfüllt. Die Akkretion erfolgt jetzt sogar über die Pole und nicht in der Äquatorebene. Dies würde vermutlich auch bedeuten, dass sich in der Umgebung des Planeten zumindest in dieser Phase keine Monde bilden können.

In zukünftigen Simulationen soll untersucht werden, ob sich dieses bislang unbekannte Phänomen auch dann einstellt, wenn der Planet langsam wächst und nicht bereits als fertiger Planet von der Größe Jupiters in die Simulation hineingesetzt wird.

Hubert Klahr, Sebastian Wolf.

Beteiligt Institut:

*Institut für Astronomie und
Astrophysik der Universität Tübingen*

II.4 Entstehung massereicher Sterne

Die Erforschung der Sternentstehung gehört seit Jahrzehnten zu den Schwerpunktthemen am MPIA. Hierbei standen meist massearme, sonnenähnliche Sterne im Vordergrund. Die ersten Stadien der Entstehung massereicher Sterne wurden dagegen vergleichsweise wenig erforscht. Dies hat viele Gründe. So sind massereiche Sterne wesentlich seltener und entstehen wesentlich schneller als massearme – deshalb ist die Wahrscheinlichkeit gering, ihre Frühphasen beobachten zu können. Zudem stehen alle Regionen mit massereichen jungen Sternen in größerer Entfernung von unserem Sonnensystem, was erhebliche Anforderungen an das Auflösungsvermögen und die Empfindlichkeit der Beobachtungsinstrumente stellt. Aber die neuen Interferometer im Submillimeter- und Millimeterbereich erlauben es heute, auch entferntere Sternentstehungsregionen mit hoher räumlicher Auflösung und ausreichender Empfindlichkeit zu untersuchen. Einem internationalen Team unter Leitung des MPIA gelangen auf diese Weise interessante Einblicke in mehrere Entstehungsgebiete massereicher Sterne, darunter die berühmte Region Orion KL.

Für die Dynamik, Physik und Chemie des interstellaren Mediums sind massereiche Sterne trotz ihrer Seltenheit von großer Bedeutung. Während ihrer ungefähr 100 000 Jahre dauernden Entstehungsphase erzeugen sie intensive Teilchenwinde und Jets, anschließend geben sie im Laufe ihres 4 bis 40 Millionen Jahre währenden Lebens energiereiche, ionisierende UV-Strahlung ab. Und in der Endphase reichern sie durch starke Winde und Supernova-Explosionen das interstellare Medium mit schweren Elementen an.

Viele Fragen zur Entstehung massereicher Sterne sind noch offen. Die einfachste Annahme ist, dass der Prozess ihrer Entstehung lediglich eine hochskalierte Version der Vorgänge bei massearmen Sternen ist. Das erscheint jedoch aus folgendem Grund problematisch. Sterne mit mehr als etwa acht Sonnenmassen strahlen schon während ihrer Entstehungsphase so viel Energie ab, dass der Strahlungsdruck auf das umgebende Material aus Staub und Gas dessen Kollaps abremsen muss. Wären die Akkretionsraten für Sterne aller Massen gleich, dann würde dieser Strahlungsdruck die Entstehung massereicher Sterne völlig verhindern.

In den letzten Jahren sind verschiedene Wege zum Umgehen dieses Hindernisses vorgeschlagen worden. Das Entstehungsschema massearmer Sterne ließe sich im Wesentlichen beibehalten, wenn die Akkretionsraten stark mit der Masse des sich bildenden Sterns zunähmen. Dann würde der Strahlungsdruck das Wachstum des Sterns

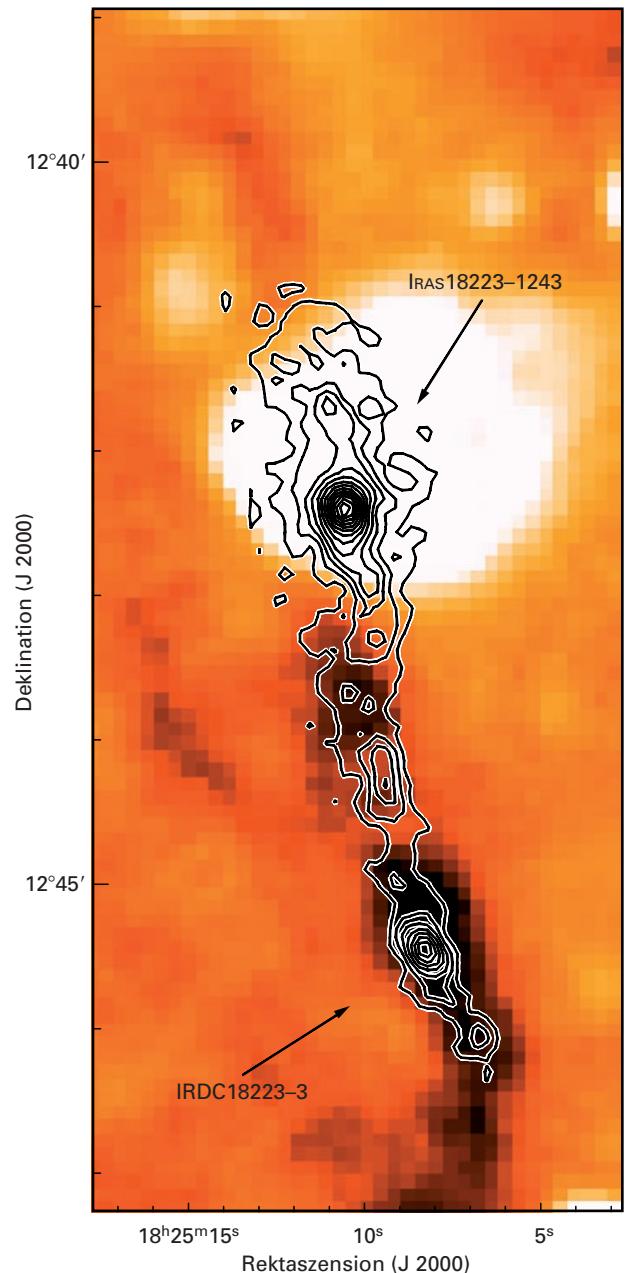


Abb. II.4.1: Aufnahme der Dunkelwolke IRDC 18223-3 mit dem Weltraumteleskop SPITZER bei 8 μm Wellenlänge. Die Konturen geben die Intensität bei 1.2 mm wieder, wie sie bei Beobachtungen mit einem Einzelteleskop gewonnen wurden.

nicht bremsen können. Ein alternativer Ansatz folgt aus der Beobachtung, dass massereiche Sterne immer in kompakten Haufen Hunderter oder Tausender Sterne geringerer Masse entstehen. Möglicherweise sind in solchen

Sternhaufen die Sterne anfänglich so dicht beisammen, dass Sterne mittlerer und kleiner Masse miteinander kollidieren und zu massereicheren Sternen verschmelzen können. In einem solchen Szenario könnten sich allerdings keine stabilen Scheiben um die anwachsenden Sterne halten. Die Suche nach Akkretionsscheiben um junge massereiche Sterne gehört daher zu den vornehmlichen Zielen in diesem Forschungsbereich.

Frühe Beobachtungen mit geringer räumlicher Auflösung lieferten erste Hinweise auf bipolare molekulare Ausflüsse aus massereichen Sternentstehungsregionen. Dies wurde als Indiz für die Existenz von Akkretionsscheiben gedeutet. Doch obwohl der Kenntnisstand über massereiche Ausflüsse in den letzten Jahren stark zugenommen hat, bleiben viele Details ungeklärt. Es gibt bislang noch zu wenige Daten mit hoher räumlicher Auflösung, um die vorhandenen Ergebnisse besser einzurorden.

Darum werden nun weitere Beobachtungen von Sternentstehungsregionen mit Interferometern vorgenommen. Im Millimeterbereich steht hierfür die Anlage auf dem Plateau de Bure zur Verfügung, seit kurzem arbeitet auch das Sub-Millimeter-Array (SMA) auf Hawaii. Mit diesen hochauflösenden Anlagen lassen sich Emissionslinien vieler chemischer Verbindungen gleichzeitig beobachten. Sie geben Aufschluss über wichtige physikalische Größen wie Dichte und Temperatur des Gases und erlauben Rückschlüsse auf Kinematik und Dynamik des Mediums. Schließlich ist es auch interessant, das komplexe chemische Netzwerk in Sternentstehungsgebieten zu studieren und nach Entwicklungsprozessen zu suchen.

Extrem junge, protostellare Objekte in IRDC 18223-3...

Bei der Entstehung massereicher Sterne lassen sich vier Phasen unterscheiden. Anfangs entsteht durch Verdichtung im Innern einer Staubwolke ein noch sternloser Kern, dann ein Protostern geringer bis mittlerer Masse, der Materie aus der Umgebung aufsammelt (akkretiert). Dadurch wächst in der dritten Phase der massereiche Protostern (mit mehr als acht Sonnenmassen) heran, der schließlich als Hauptreihenstern auftritt (vierte Phase) und die Mutterwolke aufzulösen beginnt. Die massereichen Protosterne, die immer noch tief in ihre molekulare Wolke eingebettet sind (hauptsächlich in Phase drei), bilden heiße molekulare Kerne um sich herum aus, die vermutlich mit kompakten HII-Regionen einhergehen. Beobachtungen in jüngerer Vergangenheit haben hierbei zu einer Unterscheidung zwischen hyperkompakten (Radius kleiner als 0.01 pc) und ultrakompakten HII-Regionen (Radius kleiner als 0.1 pc) geführt.

Diese unterschiedlichen Stadien lassen sich nur schwer identifizieren und charakterisieren, weil sie im verborgenen Innern der dichten Staubwolken durchlaufen werden. Auf der Suche nach Objekten, die sich in

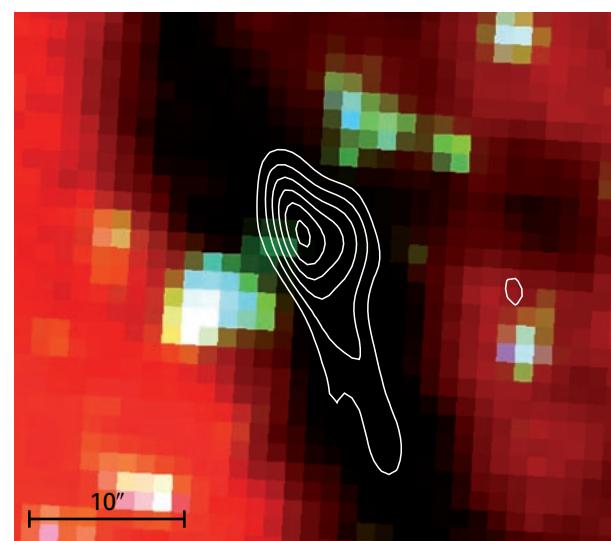


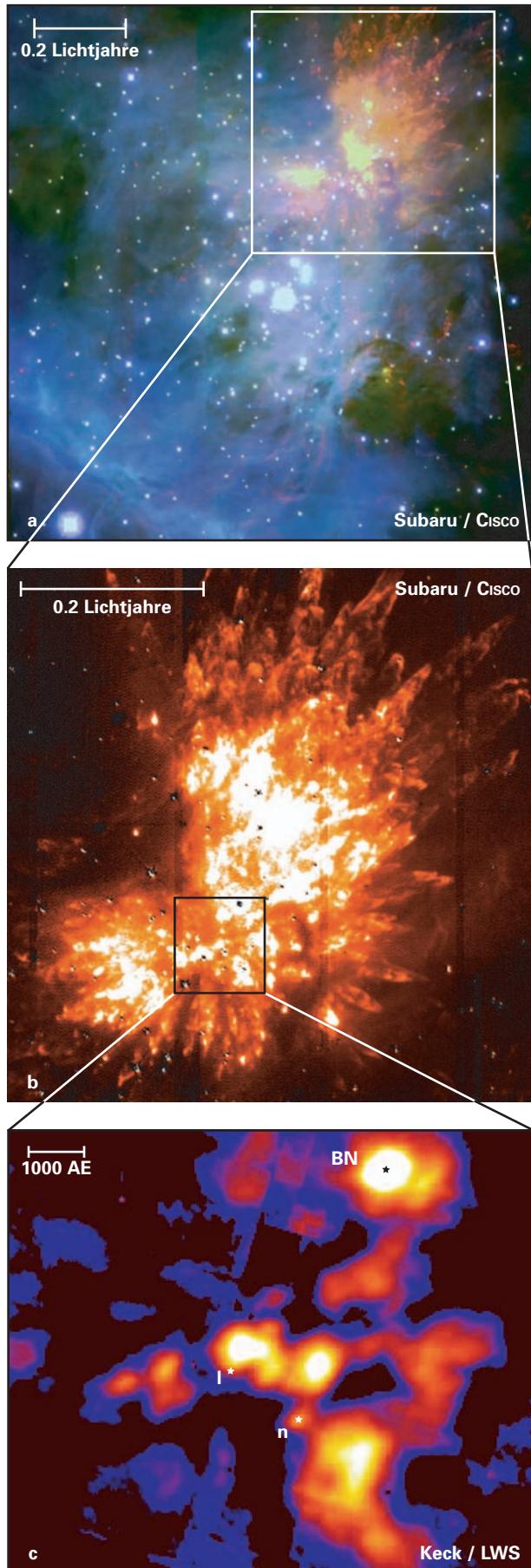
Abb. II.4.2: Überlagerung von drei SPITZER-Aufnahmen bei den Wellenlängen 3.6 μm (blau), 4.5 μm (grün) und 8 μm (rot). Die Konturdarstellung zeigt die Emission bei 3 mm Wellenlänge.

der ersten Phase ihrer Entstehung befinden, wurden die Astronomen auf eine etwa 12 000 Lichtjahre entfernte Region mit der Bezeichnung IRDC 18223-3 aufmerksam (Abb. II.4.1; IRDC steht für Infrared Dark Cloud). Sie befindet sich südlich von einer mit dem Satelliten IRAS entdeckten Infrarotquelle innerhalb einer länglichen Staubwolke und war dort durch Emission bei 1.2 mm Wellenlänge aufgefallen. Beobachtungen von NH_3 ließen auf eine Temperatur von 33 K schließen, wie man es für ein sehr junges Sternentstehungsgebiet erwartet.

Die Astronomen beobachteten IRDC 18223-3 mit dem Plateau-de-Bure-Interferometer IRAM bei 3 mm Wellenlänge, ergänzt wurden die Daten durch Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop SPITZER zwischen 3.6 und 8 μm. Wie Abb. II.4.2 demonstriert, ließ sich im mittleren Infrarot kein protostellarer Kern nachweisen, während sich im Millimeterbereich eine längliche Verdichtung mit einer Ost-West-Ausdehnung von 28 000 AE abzeichnet, deren visuelle Extinktion bis zu einem Faktor 1000 beträgt. Die hierin enthaltene Masse beträgt etwa 184 Sonnenmassen. Sehr wahrscheinlich handelt es sich bei IRDC 18223-3 um eine massereiche Gaskondensation in einem sehr frühen Entwicklungsstadium.

In Abb. II.4.2 sind westlich und östlich der Millimeterquelle auf der SPITZER-Aufnahme bei 4.5 μm Wellenlänge helle, grün kodierte Gebiete erkennbar. Wahrscheinlich handelt es sich hierbei um Linienemission von H_2 und CO, angeregt von einem bipolaren Ausfluss. Eventuell gibt es in dieser Region sogar mehrere Ausströmungen, wie andere Emissionsgebiete in dieser Aufnahme andeuten.

Spektroskopische Untersuchungen der Linienemission von N_2H^+ mit IRAM lieferten zudem Hinweise auf



eine Zunahme der Geschwindigkeitsdispersion im Zentralgebiet der Millimeterquelle. Ob es sich hierbei um Turbulenz, Rotation, Ein- oder Ausflüsse handelt, ließ sich noch nicht feststellen und erfordert weitere Beobachtungen. Aber diese Kinematik lässt ebenfalls auf das Einsetzen von Sternentstehung schließen. Auch ein Vergleich der bei 3 mm ermittelten Masse mit der Virialmasse spricht für eine kontrahierende Gaswolke.

Damit sprechen mehrere Indizien dafür, dass es sich bei der Millimeterquelle IRDC 18223-3 um ein extrem junges, protostellares Objekt handelt. Es ist vermutlich noch recht massearm, sitzt aber tief in einem Molekülwolkenkern, aus dem es sehr viel Masse anammelt, wobei es sich zu einem massereichen Stern entwickeln wird.

... und in Orion KL

Ganz oben auf der Liste bekannter Entstehungsgebiete massereicher Sterne steht Orion KL im Orionnebel. Mit einer Entfernung von 1500 Lichtjahren ist es auch das nächstgelegene Entstehungsgebiet massereicher Sterne (Abb. II.4.3).

Die Region Orion KL besitzt einen »heißen Kern« mit Temperaturen von einigen hundert Kelvin, der reich an teils sehr komplexen organischen Molekülen ist. Er lässt sich im Millimeter- und Submillimeterbereich nachweisen und besteht aus einer Reihe von Verdichtungen in etwa einer Bogensekunde Entfernung von der Radioquelle SMA 1. Daneben gibt es in dieser Region einen Haufen mit mehreren Infrarotquellen, und mindestens zwei Ausflüsse ließen sich dort bislang nachweisen. Deren Quellen konnten noch nicht eindeutig identifiziert werden, als Kandidaten gelten das genannte Objekt 1 sowie eine Infrarotquelle mit der Bezeichnung n, die auch im Radiobereich nachweisbar ist und dort die Bezeichnung 1 trägt.

Diese interessante Region wurde mit dem Submillimeter-Array (SMA) auf Hawaii erstmals bei einer Wellenlänge von 440 μ m mit hoher Auflösung studiert (Abb. II.4.4). Für diese Messung wurden zum ersten Mal sechs Teleskope bei dieser Wellenlänge mit Basislinien zwischen 16 und 68 Metern interferometrisch zusammengeschaltet.

Die spektrale Energieverteilung der Quelle sollte nun Aufschluss über deren Entwicklungsstand geben. Hierbei kam den mit dem SMA gemessenen Flüssen bei 345 und 690 GHz eine besondere Bedeutung zu, wie Abb. II.4.5 demonstriert. Sie erlaubten es, zwi-

Abb. II.4.3: a) Die Sternentstehungsregion BN/KL im Orion liegt in der Nähe der Trapezsterne; b) ein kleinerer Bereich im infraroten Licht der Emission von H_2 ; c) die im Rahmen der hier beschriebenen Arbeit erhaltene Karte von Orion KL im Submillimeterkontinuum, aufgenommen mit dem SMA.

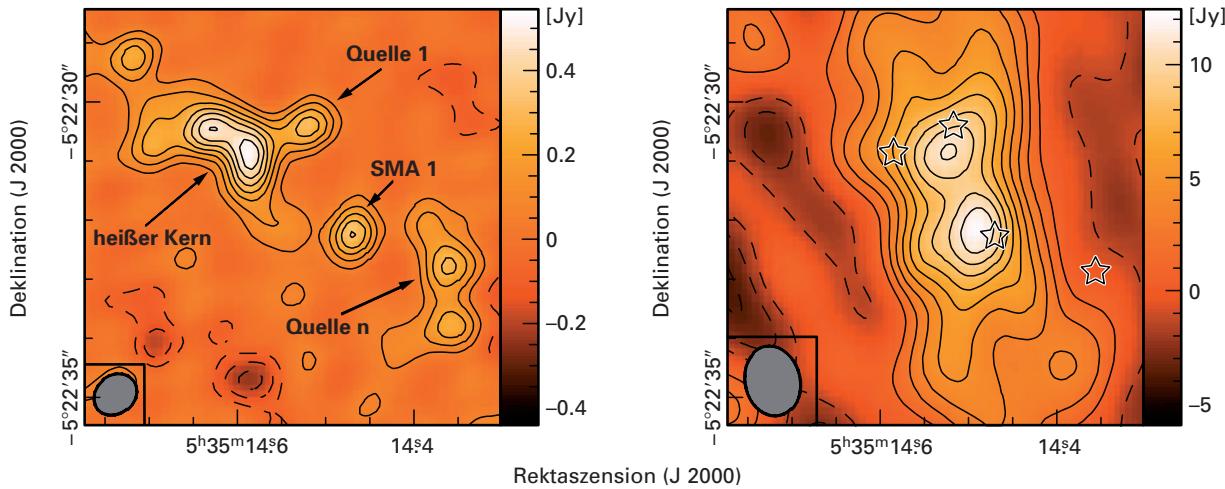
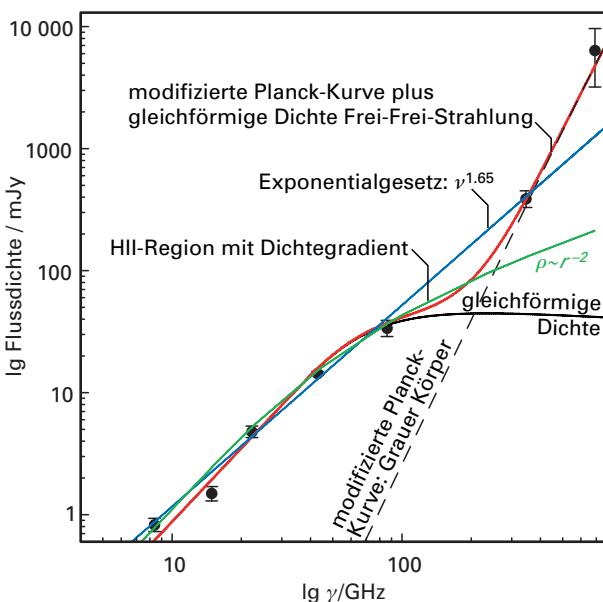


Abb. II.4.4: Die neue Karte der Kontinuumsemission bei 440 μm (rechts) im Vergleich zu früheren Beobachtungen mit dem SMA bei 850 μm (links). Ein wesentlicher Unterschied besteht in der stärkeren Emission um die Quelle 1 im Vergleich zu dem heißen Kern bei der größeren Wellenlänge. Bei den jüngsten Beobachtungen ließ sich die Linienemission um 440 μm zwischen der Kontinuumsemission bei der Quelle 1 und dem heißen Kern räumlich trennen.

schen mehreren Modellen für die Quelle 1 zu unterscheiden. Die Daten lassen sich am besten mit der Annahme erklären, dass die gemessene Strahlung eine Mischung aus Frei-frei-Strahlung von Elektronen und Protonen bei niedrigen Frequenzen und von thermischer Staubemission bei hohen Frequenzen ist. Das ist typisch

Abb. II.4.5: Spektrale Energieverteilung der Quelle 1, die sich am besten als Frei-frei-Strahlung plus Staubemission beschreiben lässt.



für einen tief in einer Staubwolke eingebetteten protostellaren Kern.

Anders sieht die Situation bei einer weiteren entdeckten Quelle, SMA 1, aus. Sie ist keine Fortsetzung des heißen Kerns, wie mehrfach vermutet wurde, sondern eine separate Einzelquelle. Da dieses Objekt weder im Infraroten noch bei Zentimeterwellenlängen nachgewiesen werden konnte, handelt es sich vermutlich um eines der jüngsten Objekte in diesem Haufen.

Neben der Kontinuumsemission konnten im Bereich um 440 μm zudem 24 Emissionslinien nachgewiesen werden, deren Identifikation teilweise noch aussteht. Abb. II.4.6 zeigt die Emissionen einiger Moleküle in Orion KL. Ein Ergebnis ist: Höher angeregte Linien um 440 μm erscheinen intensiv bei Quelle 1, was auf eine hohe Temperatur hindeutet. Insbesondere war es möglich, aus der Emission von CH_3CN (37_K – 36_K) die Temperatur sowohl in Quelle 1 als auch in SMA 1 und dem heißen Kern genauer abzuleiten. Es ergab sich ein Wert von 600 K mit einer Unsicherheit von 200 K. Dieser Temperaturwert liegt einige hundert Kelvin höher als nach früheren Abschätzungen. Das lässt sich damit erklären, dass die beobachteten, sehr hochfrequenten Spektrallinien von wärmerem Gas stammen als die niederfrequenten Linien früherer Beobachtungen.

Heiße molekulare Kerne und Akkretionsscheiben

Heiße Kerne, wie derjenige in Orion KL, haben Temperaturen von mehr als 100 K und werden als frühes Stadium der Entstehung massereicher Sterne angesehen. Die Objekte akkretieren Materie aus der Umgebung, haben aber noch keine ultrakompakte HII-Region ausgebildet.

Die Beobachtung molekulärer Emissionen erlaubt es, den physikalischen Zustand eines solchen Objektes zu untersuchen, falls Teleskope mit sehr hoher räumliche Auflösung zur Verfügung stehen. Mit dem SMA wurde der bekannte heiße molekulare Kern G29.96 bei

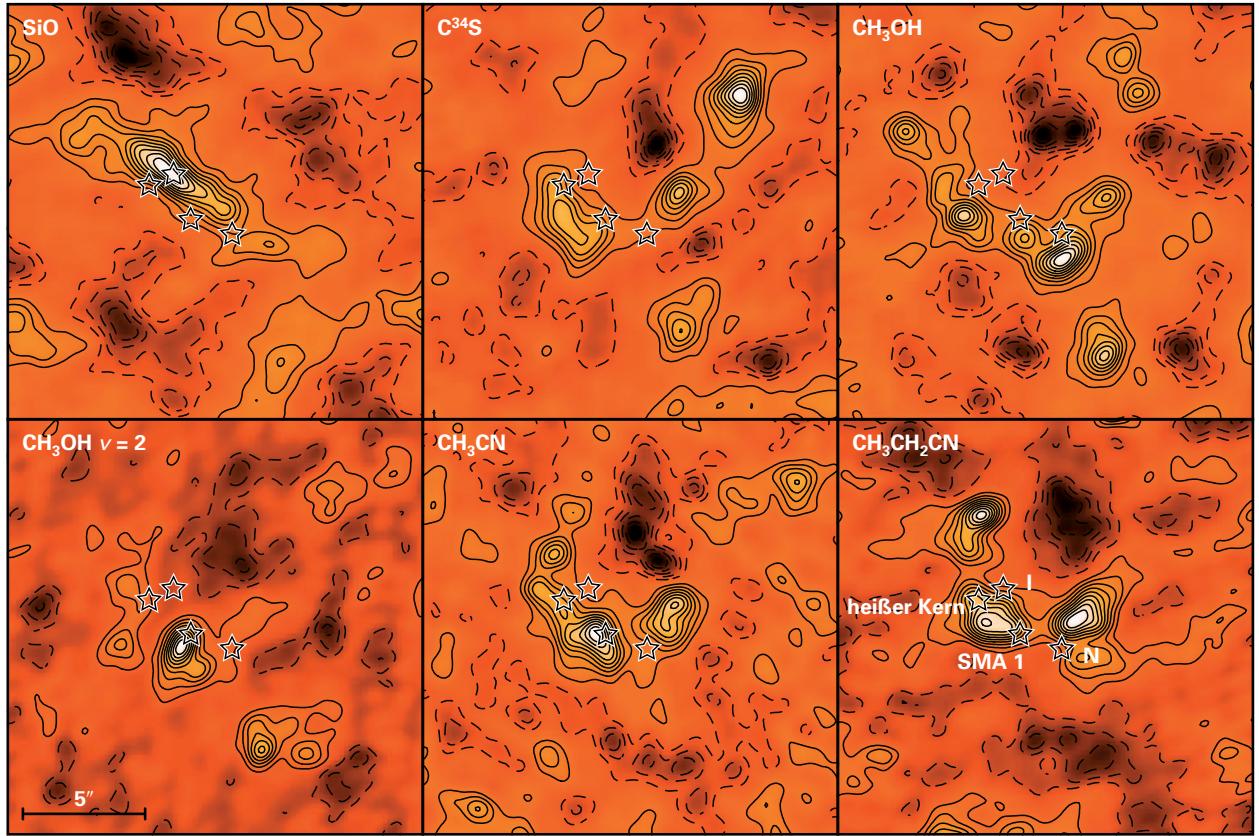
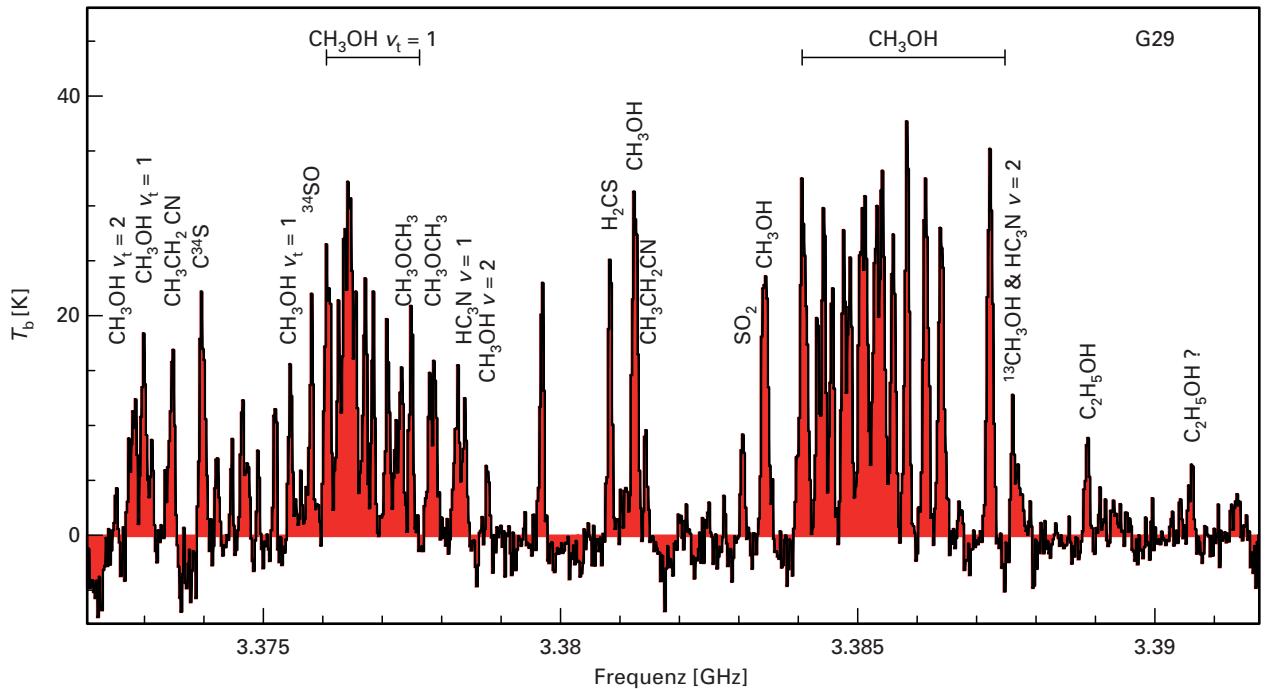


Abb. II.4.6: Emissionen einiger Moleküle in Orion KL.

Abb. II.4.7: Ausschnitt des mit SMA von G29.96 erhaltenen Spektrums.

einer Entfernung von etwa 20 000 Lichtjahren in einem Wellenlängenbereich um $850\text{ }\mu\text{m}$ bei Auflösungen von $0.^{\prime\prime}3$ im Kontinuum und $0.^{\prime\prime}5$ in den Emissionslinien beobachtet. Mit den Kontinuumsbeobachtungen konnte die Quelle zunächst einmal in vier separate Objekte aufgelöst werden.



Gleichzeitig ließen sich etwa 80 Spektrallinien von mehr als 18 Molekülarten identifizieren (Abb. II.4.7). Keine der Molekülemissionen zeigte jedoch die vier Kontinuumquellen (Abb. II.4.8). Zum Teil kann dies daran liegen, dass die Molekülkarten nicht die gleiche sehr hohe räumliche Auflösung wie die Kontinuumskarte erreichen. Eine physikalische Erklärung kann aber auch darin bestehen, dass die Molekülemissionen eventuell aus optisch dicken Gebieten stammen und somit die äußeren Bereiche charakterisieren, nicht aber die eingebetteten Quellen. Die verschiedenen Molekülsorten überdecken einen Temperaturbereich von 40 bis 750 K, das heißt in diesem Wellenlängenbereich kann man ganz unterschiedliche Regionen gleichzeitig studieren. Darüber hinaus ließ sich anhand der SiO-Emission ein bipolarer Ausstrom identifizieren, vielleicht sogar zwei.

Eines der wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchung war aber, dass es möglich ist, unterschiedliche Molekülsorten räumlich getrennt zu beobachten. Damit lassen sich physikalische Modelle und vor allem auch Modelle des chemischen Netzwerkes sowohl in dieser Region als auch im Vergleich zu anderen Sternentstehungsgebieten testen. Diese Aufgabe steht

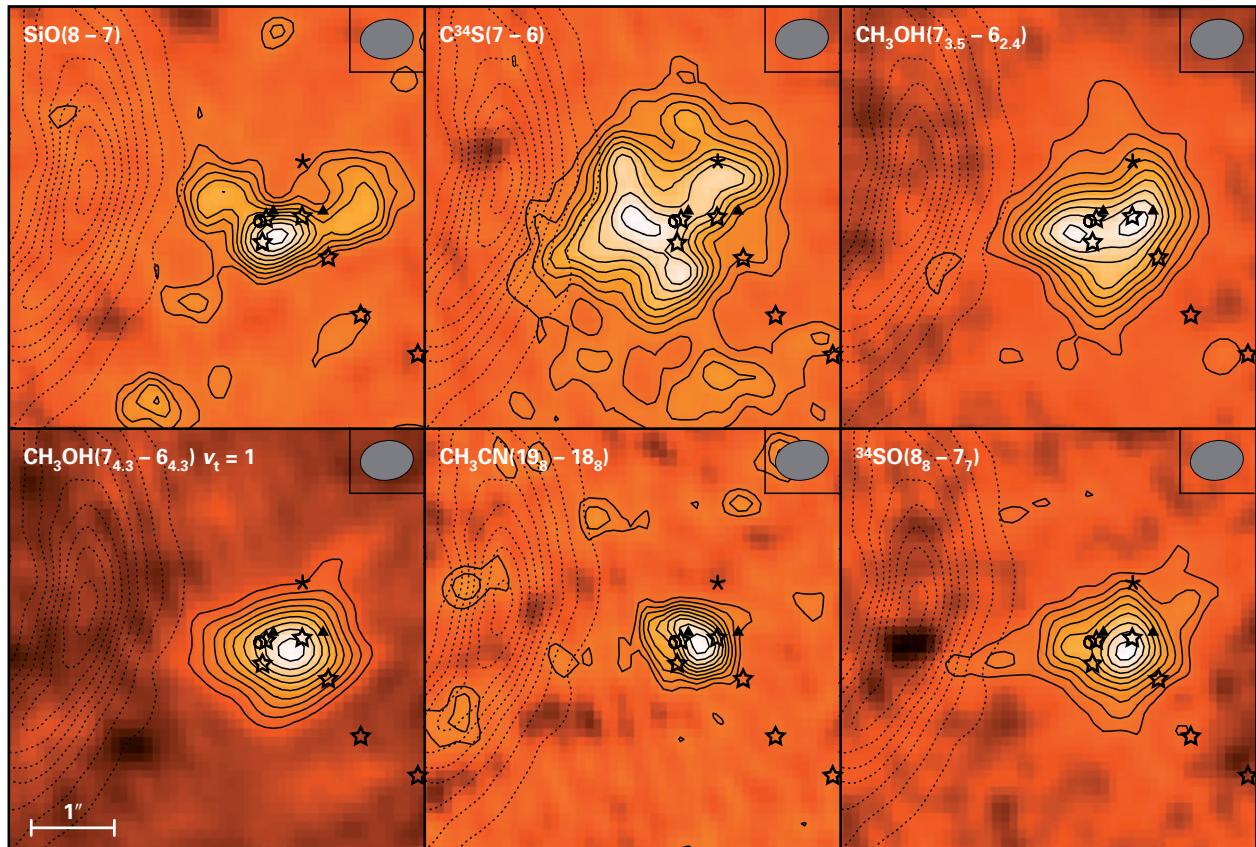
noch aus und verspricht neue Erkenntnisse über die Vorgänge bei der Entstehung massereicher Sterne.

Eine der wichtigsten Motivationen für die hoch aufgelöste Beobachtung von Molekülemission ist, wie anfangs erläutert, der Nachweis von Akkretionsscheiben um massereiche (Proto-) Sterne. In jüngster Zeit ließen sich bei einigen wenigen Objekten Hinweise darauf finden. Einige Beispiele zeigt Abb. II.4.9; z. B. fanden italienische Astronomen eine Scheibe um die Infrarotquelle IRAS 20126 + 4104, in der sie Kepler-Rotation nachweisen konnten (Abb. II.4.9d) – allerdings besitzt hier der noch akkretierende Protostern wohl lediglich sieben Sonnenmassen. Das Hauptproblem besteht darin, die Emission der Scheibe von der anderen Komponenten, zum Beispiel von Ausströmungen und dem umgebenden, eventuell einfallenden Wolkenkern, zu trennen.

Außerdem verändert sich die Chemie in der Umgebung des Protosterns mit dessen Alter. Dies hat zur Folge, dass sich eine und dieselbe Molekülsorte nicht für alle Scheiben als Indikator eignet. Bei dem heißen Kern G29.96 ließ sich eine Struktur am besten im Lichte des Moleküls HN^{13}C nachweisen, dessen Geschwindigkeitsfeld auf eine Scheibe hinweist.

Diese ersten Versuche belegen das große Potenzial interferometrischer Beobachtungen von Entstehungsgebieten massereicher Sterne im Submillimeter- und Millimeterbereich. Insbesondere die große Bandbreite moderner Empfänger ermöglicht es, viele Moleküle, die

Abb. II.4.8: Karten der Emissionen unterschiedlicher Moleküle. In SiO zeichnet sich ein bipolarer Ausstrom ab, vielleicht sogar zwei.



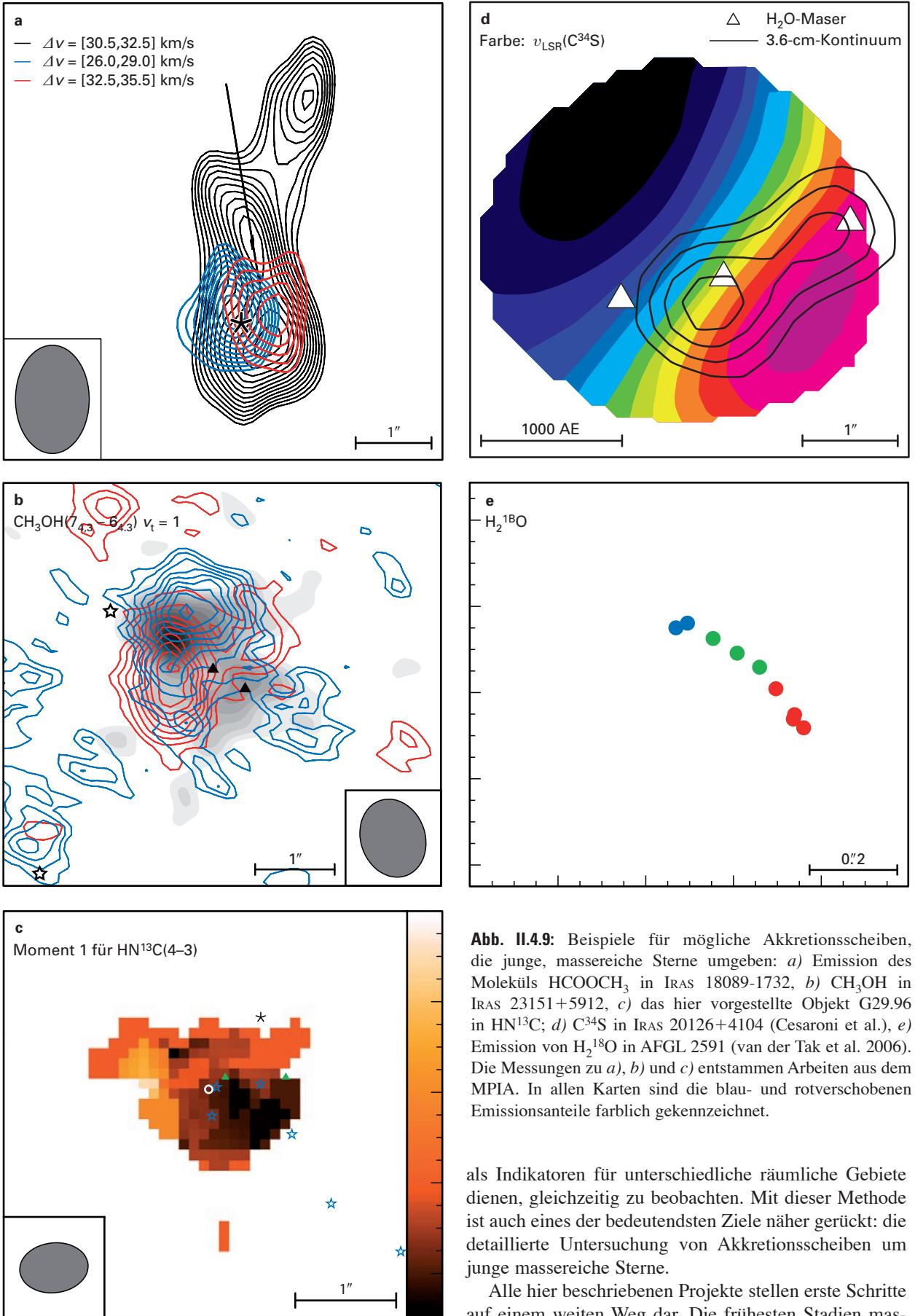


Abb. II.4.9: Beispiele für mögliche Akkretionsscheiben, die junge, massive Sterne umgeben: *a*) Emission des Moleküls HCOOCH_3 in IRAS 18089-1732, *b*) CH_3OH in IRAS 23151+5912, *c*) das hier vorgestellte Objekt G29.96 in HN^{13}C ; *d*) C^{34}S in IRAS 20126+4104 (Cesaroni et al.), *e*) Emission von H_2^{18}O in AFGL 2591 (van der Tak et al. 2006). Die Messungen zu *a*), *b*) und *c*) entstammen Arbeiten aus dem MPIA. In allen Karten sind die blau- und rotverschobenen Emissionsanteile farblich gekennzeichnet.

als Indikatoren für unterschiedliche räumliche Gebiete dienen, gleichzeitig zu beobachten. Mit dieser Methode ist auch eines der bedeutendsten Ziele näher gerückt: die detaillierte Untersuchung von Akkretionsscheiben um junge massive Sterne.

Alle hier beschriebenen Projekte stellen erste Schritte auf einem weiten Weg dar. Die frühesten Stadien mas-

sereicher Sternentstehung wie bei IRDC18223-3 gehören zu den am wenigsten erforschten Entwicklungsstadien und sind erst seit kurzem durch die Infrarotsatelliten ISO, MSX und SPITZER in statistisch signifikanter Anzahl der Beobachtung zugänglich geworden. Dieses Forschungsgebiet wird sich in den nächsten Jahren schnell entwickeln. Die Untersuchung massereicher Akkretionsscheiben wird als heiliger Gral der Erforschung massereicher Sternentstehung betrachtet und von mehreren Arbeitsgruppen verfolgt. Zudem ist das Studium der Chemie der heißen molekularen Kerne ein wichtiges Fundament für die Astrochemie. Es bildet die Basis für zukünftige Studien der Astrobiologie, also der Suche nach komplexen Molekülen im Weltraum, die für das Leben, so wie wir es kennen, notwendig sind. Dass die

Erforschung der Entstehung massereicher Sterne zunehmend an Bedeutung gewinnt, spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass das MPIA im September 2007 eine große internationale Konferenz zu diesem Thema in Heidelberg vorbereitet.

*Henrik Beuther. Beteiligte Institute:
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,
Cambridge, (USA);
Academia Sinica Institute of Astronomy
and Astrophysics,
National Taiwan University, Taiwan;
National Astronomical Observatory of Japan, Tokio*

II.5 Molekulares Gas in hoch rotverschobenen Quasaren – Anregung und Zusammensetzung des Treibstoffes für Sternentstehung

Das Molekül HCO^+ wurde erstmals in Galaxien bei sehr hoher Rotverschiebung nachgewiesen. Die Beobachtungen zeigen, dass dieses Molekül ein guter Indikator für dichtes molekulares Gas in den Sternentstehungsgebieten hoch rotverschobener Galaxien ist. Der Nachweis dieses Moleküls erstmals das Studium der dichten Phase des molekularen interstellaren Mediums und dessen Struktur in Galaxien im jungen Universum (vor mehr als zehn Milliarden Jahren). Damit eröffnet sich ein ganz neuer Zugang zu der Frage, unter welchen Bedingungen Sterne im frühen Universum entstanden sind.

Eine der wichtigsten Methoden, um die Eigenschaften von Sternentstehungsgebieten in Galaxien zu studieren ist die Beobachtung von Rotationsübergängen in molekularem Gas, in der Regel CO. Molekulares Gas ist der Baustoff der Sternentstehung, seine Häufigkeit bestimmt daher, wie viele Sterne eine Galaxie zu einem bestimmten Zeitpunkt noch bilden kann. Im Laufe der letzten 15 Jahre ist es gelungen, dieses Gas in immer weiter entfernten Galaxien zu untersuchen, um so die Entstehung und Entwicklung von Sternensystemen im sehr jungen Universum zu untersuchen. Aufgrund der Rotverschiebung der Strahlung der Rotationsübergänge beobachtet man in diesen entfernten Galaxien in der Regel nicht wie in nahen Galaxien den fundamentalen Übergang, sondern höhere Anregungszustände. Diese sind dann in den gleichen Wellenlängenfenstern beobachtbar wie der fundamentale Rotationsübergang in nahen Galaxien. Im Gegensatz zu normalen Spiralgalaxien wie unserer Galaxis findet man, dass in den weit entfernten, hoch rotverschobenen Galaxien das molekulare Gas häufig hoch angeregt ist, und daher in den höheren Übergängen sehr viel stärker abstrahlt als in den niedrigen.

Eine der zentralen Fragen bei diesen Studien ist jedoch, ob diese Galaxien nicht zusätzlich zu der hoch angeregten Komponente noch eine niedrig angeregte enthalten, wie dies z.B. im Milchstraßensystem der Fall ist. Eine solche Komponente ist durch die Beobachtung hoher Rotationsübergänge nicht nachweisbar, könnte aber dennoch die Strahlung im fundamentalen Übergang dominieren. Daher wird oft argumentiert, dass nur Beobachtungen des leuchtschwachen Fundamentalübergangs ein Maß für die gesamte molekulare Masse liefern, die für Sternentstehung verfügbar ist. Dies ist für die Entstehung und Entwicklung von Galaxien von großer Bedeutung.

Einer internationalen Gruppe von Astronomen unter der Leitung des MPIA gelang es nun erstmals mit den

beiden größten frei beweglichen Radioteleskopen diesen sehr schwer nachzuweisenden fundamentalen Übergang in hoch rotverschobenen Quasaren (bis zu $z = 4.69$, oder 1.3 Milliarden Jahre nach dem Urknall) nachzuweisen. Die Analyse der Emissionslinien deutet darauf hin, dass es in diesen Quasaren neben der hoch angeregten molekularen Gaskomponente keine signifikanten zusätzlichen Reservoirs gibt. In einem zweiten Projekt gelang es erstmals, mit HCO^+ ein ionisiertes Molekül in hoch rotverschobenen Galaxien zu beobachten. HCO^+ ist mehr als zehnmal leuchtschwächer als CO und erst das dritte, im frühen Universum detektierte Molekül. Im nahen Universum ist es für seine Eigenschaften als direkter Indikator für Sternentstehung bekannt.

Bis heute wurde in mehr als 30 Galaxien bei Rotverschiebungen größer als $z = 2$ molekulares Gas in Form von CO nachgewiesen. Molekulares Gas findet man in der Regel entweder in Form einer Scheibe um das Zentrum einer Galaxie oder, im Falle eines Mergers, im Bereich der Zentralregionen und im Bereich der überlappenden Region, wo sich das Gas beider Galaxien vermischt. Es ist das Material, aus dem Sterne entstehen. Das am weitesten entfernte Objekt, in dem CO nachgewiesen werden konnte, ist ein Quasar bei $z = 6.42$. Wir sehen ihn zu dem Zeitpunkt, als das Universum erst 870 Millionen Jahre alt war. Solche CO-Beobachtungen bieten daher die Möglichkeit, die Entstehung und Entwicklung von Sternen und Galaxien selbst in einer derart frühen Epoche des Universums zu untersuchen.

In fast allen Studien dieser Art im jungen Universum wurden jedoch lediglich hohe Rotationsübergänge [$\text{CO} (J \rightarrow J-1), (J \geq 3)$] studiert. Die Gründe hierfür sind: Erstens sind diese höheren Übergänge in die typischen CO-Beobachtungswellenlängenfenster verschoben, und zweitens ist das molekulare Gas in praktisch allen bisher studierten Systemen bei $z > 2$ hoch angeregt und strahlt daher in den höheren Übergängen heller ab als in den niedrigen. Dies ist anders als in normalen Spiralgalaxien wie dem Milchstraßensystem, dessen molekulares Gas sehr viel niedriger angeregt ist und daher einen großen Teil der Strahlung in den niedrigen Übergängen emittiert, insbesondere aus dem fundamentalen Anregungszustand in den Grundzustand, $\text{CO} (J = 1 \rightarrow 0)$.

Eine grundlegende Frage in diesem Zusammenhang ist daher, ob in den hoch angeregten Galaxien bei $z > 2$ noch eine zusätzliche, niedrig angeregte Komponente vorliegt. Diese wäre in den in der Regel beobachteten hohen Übergängen nur sehr schwer nachweisbar, könnte jedoch die Emission im Grundzustand dominieren. Eine solche Komponente könnte daher einen signifikanten

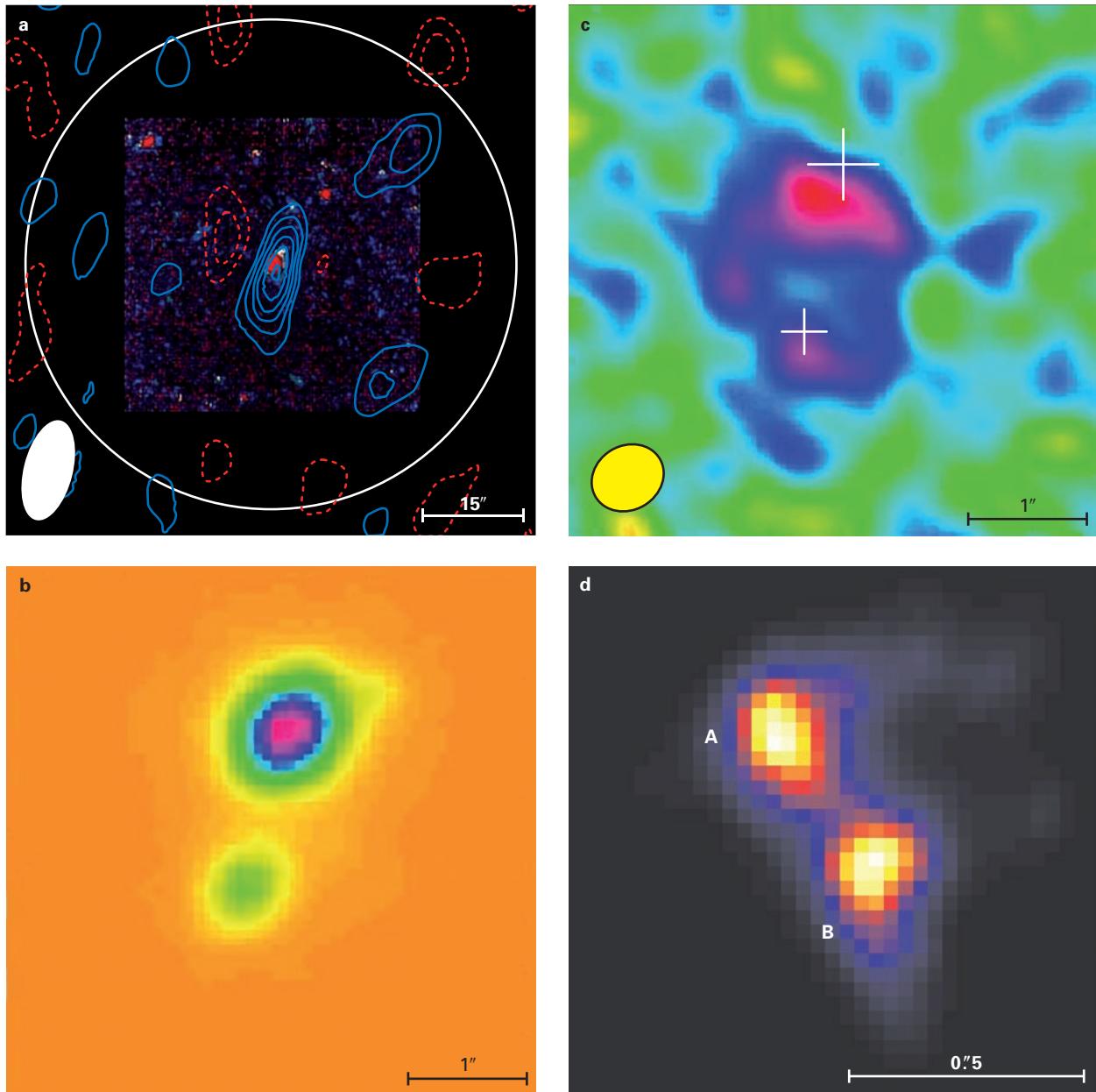


Abb. II.5.1: a) Quasar BR 1202-0725 CO ($J = 5 \rightarrow 4$), Aufnahme mit dem NMA (Konturen), einem optischen Bild überlagert; b) Quasar PSS J2322+1944, Aufnahme im Optischen vom Keck-Observatorium; c) dasselbe Objekt als molekularer Einstein-Ring, aufgenommen mit dem VLA in CO; d) Quasar APM 08279+5255, Röntgenaufnahme mit CHANDRA.

Anteil an der Masse des insgesamt in einer Galaxie vorhandenen molekularen Wasserstoffs (H_2) enthalten, der indirekt über das CO, das zweithäufigste Molekül im Universum, nachgewiesen wird. H_2 ist mit einem Anteil von mehr als 99.9 % das häufigste Molekül im interstellaren Medium, besitzt aber aufgrund seiner Symmetrie keine Rotationsübergänge, und ist daher im fernen Universum nicht nachweisbar. Die Beobachtung

von CO ($J = 1 \rightarrow 0$) in hoch rotverschobenen Galaxien ist zudem wichtig, weil damit ein direkter Vergleich der fernen und nahen Starburst-Galaxien möglich wird, denn die nahen Systeme werden überwiegend im CO ($J = 1 \rightarrow 0$)-Übergang untersucht.

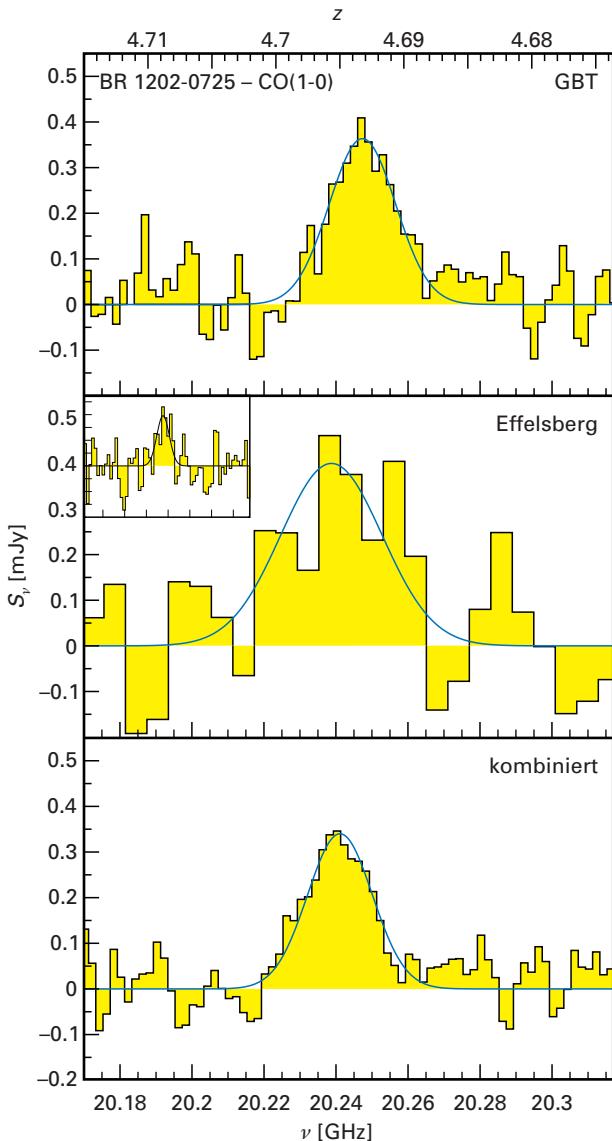
Aufgrund ihrer zumeist geringen Intensität ist die Liniensstrahlung des CO ($J = 1 \rightarrow 0$)-Übergangs noch schwieriger nachzuweisen als die der hohen Übergänge. Zudem ist dieser Übergang in den am weitesten entfernten Systemen bei $z > 4$ bis in die typischen Radiobeobachtungsfenster rotverschoben, und kann daher nur mit klassischen Radioteleskopen beobachtet werden. Das erste Teleskop, mit dem CO ($J = 1 \rightarrow 0$) in dieser Entfernung nachgewiesen wurde, ist das Very Large Array, das aufgrund seiner eingeschränkten Bandbreite und spektralen Auflösung jedoch de-

taillierten Informationen über das Linienprofil liefert. Die fortschreitende technische Aufrüstung der beiden großen 100-m-Radioteleskope, des NRAO Green Bank Teleskops (GBT) und des Teleskops des MPI für Radioastronomie in Effelsberg, bietet nun erstmals die Möglichkeit, CO ($J = 1 \rightarrow 0$) in weit entfernten Quasaren mit hoher Empfindlichkeit, Bandbreite und spektraler Auflösung zu beobachten.

CO-Gas in drei weit entfernten Quasaren

Um die Anregung von CO in mehreren Übergängen zu studieren und damit eine mögliche niedrig angeregte Komponente von einer hoch angeregten separieren zu

Abb. II.5.2: Die Spektrallinie CO ($J = 1 \rightarrow 0$) des Quasars BR 1202-0725 ($z = 4.69$), aufgenommen mit den Radioteleskopen in Green Bank (oben) und in Effelsberg (Mitte). Unten die Kombination beider Spektren.

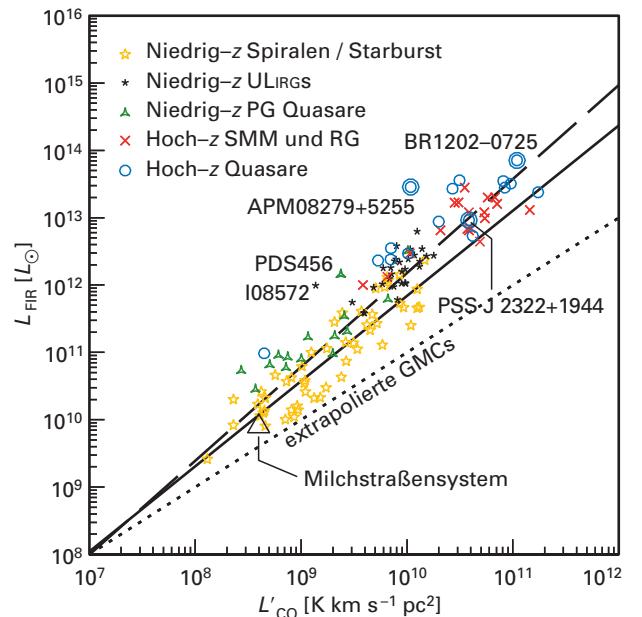


können, wählten die Astronomen drei Quasare aus, die bereits in hohen CO-Übergängen detektiert worden sind: BR 1202-0725 ($z = 4.69$), PSS J2322+1944 ($z = 4.12$) und APM 08279+5255 ($z = 3.91$) (Abb. II.5.1). Dies sind ein Fünftel aller bei $z = 2$ in CO beobachteten Quasare. Diese drei Objekte sehen wir zu einer Zeit, als das Universum zwischen 1.3 und 1.6 Milliarden Jahre alt war.

Weil die Intensitäten an der Grenze des mit gegenwärtiger Radiotechnologie Nachweisbaren liegen, werden sehr lange Integrationszeiten benötigt. An beiden Teleskopen standen daher insgesamt 130 Stunden Beobachtungszeit zur Verfügung. Um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern, wurden die Spektren der beiden Instrumente kombiniert. In allen drei Fällen ließ sich die CO ($J = 1 \rightarrow 0$)-Linie eindeutig nachweisen (Abb. II.5.2). Damit wurde molekulares Gas in Form von CO mit dem GBT und dem Effelsberger Teleskop erstmals bei hohen Rotverschiebungen nachgewiesen.

Vor allem aber wurden die Linien mit einer bislang unerreichten spektralen Auflösung vermessen. Damit konnten die Linienprofile im Detail studiert und die Leuchtkraft der Linien sehr präzise bestimmt werden. Daraus ergab sich mit einem lokal kalibrierten Konversionsfaktor die Gesamtmasse des H₂-Gases in den drei untersuchten Quasaren. Für die hier beschriebenen Messungen findet man typischerweise H₂-Gesamtmasse von 4×10^{10} Sonnenmassen. Dieses molekulare Gas wird im Laufe der Entwicklung dieser Galaxien zu einem großen Teil in Sterne umgewandelt. Aus der Infrarotleuchtkraft der drei untersuchten

Abb. II.5.3: Korrelation zwischen der gesamten Leuchtkraft im Ferninfraroten (FIR) und der CO-Linienleuchtkraft für verschiedene Galaxientypen bei geringer und hoher Rotverschiebung.



Quasare ergab sich eine Sternentstehungsrate von mehreren 1000 Sonnenmassen pro Jahr, bei der ihr gesamtes Gasreservoir innerhalb von 10 bis 100 Millionen Jahren in Sterne umgewandelt werden könnte. Dies ist aber nur ein unterer Grenzwert, denn zum einen wird das Gas nicht vollständig (mit 100 % Effizienz) in Sterne umgewandelt, und zum anderen geben die massereichen Sterne einen Teil der Materie durch Sternwinde und bei Supernova-Explosionen wieder ab.

Mit der Massenbestimmung für das molekulare Gas konnte die Frage angegangen werden, ob die CO ($J = 1 \rightarrow 0$) - Linie zusätzlich zu der hoch angeregten Gaskomponente eine niedrig angeregte Komponente anzeigt.

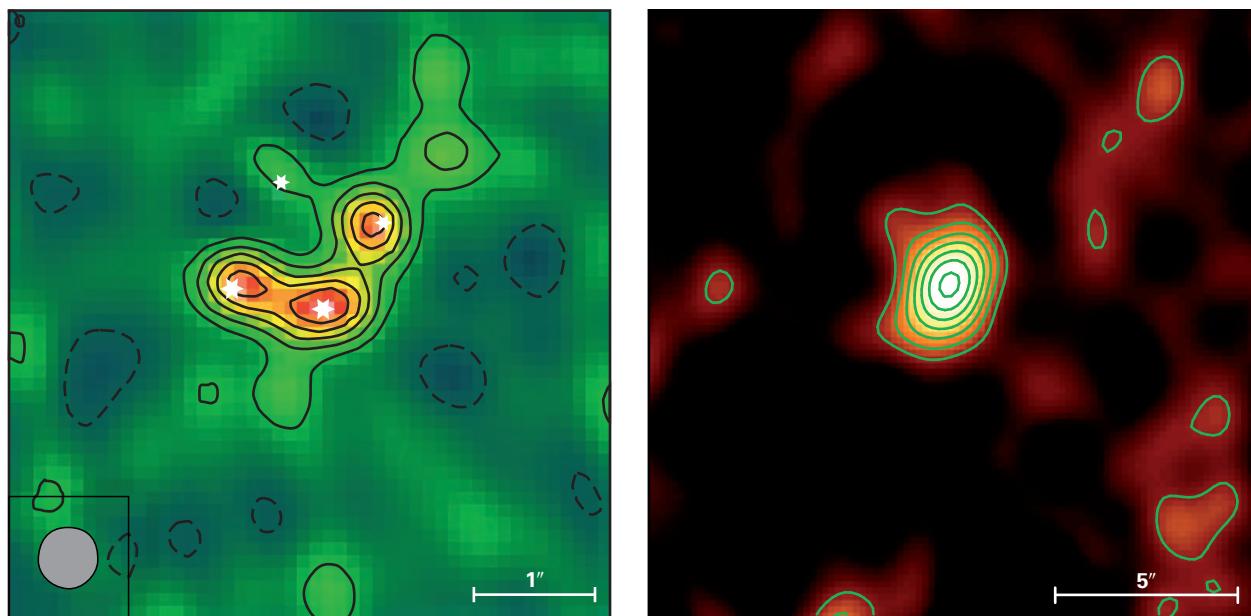
Hierfür modellierten die Astronomen die Eigenschaften des molekularen Gases unter der Annahme eines großen Geschwindigkeitsgradienten (Large Velocity Gradient, LVG-Modelle). Das Ergebnis war in allen drei Fällen gleich: Die gemessenen Flussdichten des fundamentalen CO-Rotationsüberganges sind vollständig mit dem hoch angeregten Gas assoziiert und liefern keinen Hinweis auf eine zusätzliche, niedrig angeregte Komponente. Im Rahmen der mit den Beobachtungen und Modellen verbundenen Unsicherheiten könnte eine solche Komponente höchstens etwa 20 % der beobachteten Flussdichte ausmachen und keinesfalls die CO-Emission dominieren. Dies ist fundamental verschieden von normalen Spiralgalaxien wie unserem Milchstraßensystem, das große Mengen an niedrig angeregtem molekularem Gas enthält.

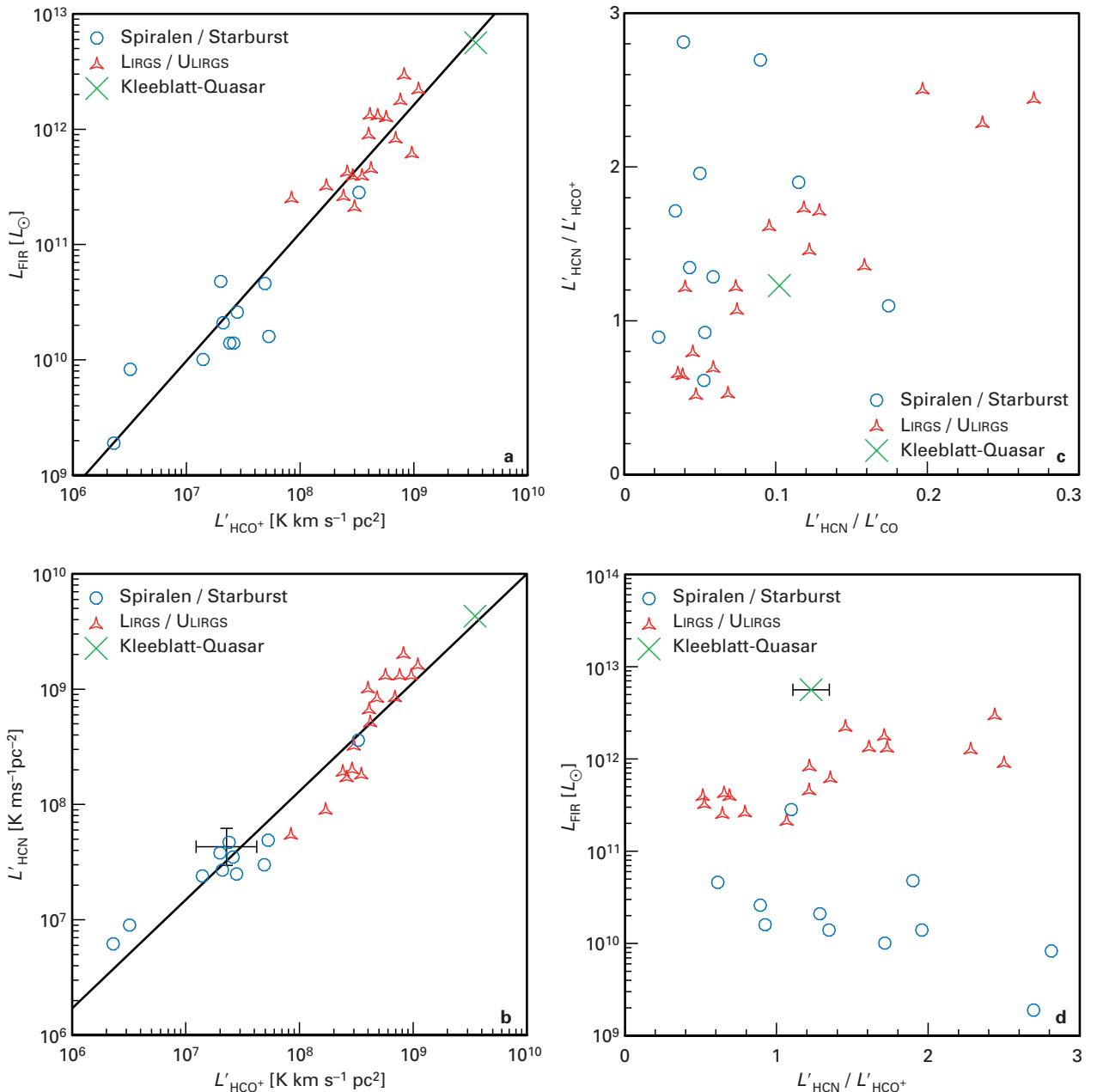
Abb. II.5.4: Der Kleeblatt-Quasar, links in der Linienemission des hohen Rotationsübergangs CO ($J = 7 \rightarrow 6$), aufgenommen 1994 mit dem IRAM Interferometer, rechts in der jetzt erstmals nachgewiesenen Emission von HCO^+ ($J = 1 \rightarrow 0$), aufgenommen 2005/06 mit dem VLA

Dieses Ergebnis bedeutet, dass man auch aus den leichter messbaren hoch angeregten CO-Linien allein die gesamte H_2 -Masse gut bestimmen kann. Mit diesem Ergebnis kann man nun die molekularen Gasmassen aller bei hohen Rotverschiebungen in der CO-Emission nachgewiesenen Galaxien genauer abschätzen. Damit lassen sich die Eigenschaften dieser frühen Systeme mit denen naher, in CO ($J = 1 \rightarrow 0$) beobachteter Galaxien besser vergleichen.

So konnte aufgrund der neuen Studie die Relation zwischen der gesamten, von thermischer Staubemission erzeugten Leuchtkraft im Ferninfraroten und der CO-Linienleuchtkraft auf die hoch rotverschobenen Objekte erweitert werden (Abb. II.5.3). Dieses Diagramm setzt die gesamte Sternentstehungsrate mit der insgesamt vorhandenen Menge an molekularem Gas ins Verhältnis und beschreibt somit die Effizienz, mit der Galaxien H_2 in Sterne umwandeln. Das Diagramm enthält Palomar-Green-Quasare (PG-QSOs), (ultra)leuchtkräftige Infrarotgalaxien (ULIRGS) und lokale Spiral- und Starburst-Galaxien, alle bei $0 < z < 0.3$. Zudem enthält es alle bei hohen Rotverschiebungen gefundenen Objekte, getrennt in Quasare und andere Galaxien (zumeist Submillimeter- und Radiogalaxien).

Interessanterweise folgen alle unterschiedlichen Galaxientypen innerhalb einer bestimmten Streuung einer Relation, die allerdings bei hoher Sternentstehungsrate und massereicheren molekularen Gasreservoirs von der Linearität abweicht. Dies gilt insbesondere für die Gegenüberstellung von nahen und fernen Galaxien als Indikatoren für Galaxienentwicklung. Dies gilt aber auch für die Gegenüberstellung von Galaxien mit und ohne aktiven Kern. Dies ist erstaunlich, da beispielsweise Quasare einen aktiven Kern (AGN) besitzen, der umgebenden Staub zur Infrarotemission anregt, während beispielsweise in ULIRGS wahrscheinlich ausschließlich jun-





ge, gerade gebildete Sterne in Sternentstehungsregionen hierfür verantwortlich sind. Das bedeutet, dass selbst in Quasaren die Sternentstehung die Ferninfrarotemission dominiert, während der aktive Kern nur einen geringen Beitrag dazu liefert.

HCO^+ im Kleeblatt-Quasar

Wie zuvor beschrieben, ist CO ein sehr guter Indikator für die gesamte Menge des in einer Galaxie vorhandenen molekularen Gases und somit des Materials, aus dem sich Sterne bilden können. Es gibt allerdings andere Moleküle, die besser dazu geeignet sind, nur die dichte Komponente des molekularen Gases zu untersuchen. Diese Komponente enthält mit hoher Wahrscheinlichkeit

Abb. II.5.5: Korrelationen der Leuchtkräfte im Fernen Infrarot und in der HCN-Emission mit der Leuchtkraft in der HCO^+ -Emission. Die Werte für den Kleeblatt-Quasar sind mit einem Kreuz gekennzeichnet.

die Kernregionen, in denen Sternentstehung tatsächlich stattfindet. Solche Gas- und Staubwolken hoher Dichte lassen sich von der eher diffusen Komponente des molekularen interstellaren Mediums trennen, indem man Moleküle mit hohem Dipolmoment beobachtet, wie HCN und HCO^+ .

Die Strahlung von Rotationsübergängen dieser Moleküle ist in der Regel um mehr als einen Faktor 10 schwächer als die von CO und daher noch sehr viel schwieriger nachzuweisen. Neben CO ließ sich bislang

bei hohen Rotverschiebungen lediglich HCN nachweisen. Bei $z > 2$ konnte nur bei vier Quasaren Emission von diesem Molekül nachgewiesen werden. Einem Team unter MPIA-Führung gelang es nun erstmals, ein drittes Molekül, das ionisierte HCO^+ , im frühen Universum zu beobachten.

Die im Kleeblatt-Quasar gefundene HCO^+ -Emission des Überganges $J = 1 \rightarrow 0$ (Abb. II.5.4) ist die leuchtschwächste molekulare Linienemission, die in dieser Quelle nachgewiesen wurde. Es handelt sich hierbei um einen Quasar, der durch den Gravitationslinseneffekt in vier Bildern erscheint und dabei in seiner Intensität um den Faktor 11 verstärkt ist. Die Emissionslinie $\text{HCO}^+(J = 1 \rightarrow 0)$ wurde mit dem VLA in 25.5 Stunden Messzeit nachgewiesen. Zusammen mit den bereits bekannten Intensitäten der HCN ($J = 1 \rightarrow 0$)-Linie und verschiedener Übergänge des CO-Moleküls im Kleeblatt-Quasar enthält die Helligkeit dieser Linie wichtige Informationen über die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften des molekularen interstellaren Mediums in den Sternentstehungsgebieten dieser Galaxie. Das erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die Frage, unter welchen Bedingungen Sterne und Galaxien im frühen Universum entstanden sind.

In Abb. II.5.5 sind die Korrelationen zwischen Ferninfrarot- und HCN-Leuchtkraft in Abhängigkeit von der HCO^+ -Leuchtkraft für nahe Spiral- und Starburst-Galaxien und ULIRGS aufgetragen. Diese Korrelationen sind sogar noch enger als der in Abb. II.5.3 gezeigte Zusammenhang zwischen CO- und Ferninfrarotleuchtkraft. Sie zeigen, dass HCN und HCO^+ ähnlich gute Indikatoren für aktive Sternentstehung sind wie die Ferninfrarotleuchtkraft. Es wird deutlich, dass der weit entfernte Kleeblatt-Quasar

den Korrelationen der lokalen Galaxien sehr gut folgt. Interessanterweise ist kein eindeutiger Unterschied zwischen dem Verhältnis von HCN zu HCO^+ für die heutigen Galaxien und für den Kleeblatt-Quasar im jungen Universum zu erkennen. Es gibt demnach keinen klaren Unterschied in der chemischen Zusammensetzung des molekularen Gases. Aus dem Ergebnis, dass die HCN-Leuchtkraft etwa gleich groß ist wie die von HCO^+ , lässt sich schließen, dass beide Moleküle aus einem vergleichbaren, optisch dicken Gebiet stammen.

Die Beobachtungen belegen, dass HCO^+ wie erhofft ein guter Indikator für dichtes molekulares Gas in den Sternentstehungsgebieten hochrotverschobener Galaxien ist. Der Nachweis dieses Moleküls erlaubt eine erste Studie der dichten Phase des molekularen interstellaren Mediums und dessen Struktur in Galaxien im noch jungen Universum bei $z > 2$ (vor mehr als 10 Millarden Jahren).

*Dominik A. Riechers, Fabian Walter,
Kirsten K. Knudsen.*

*Beteiligte Institutionen:
National Radio Astronomy Observatory,
Socorro und Charlottesville;*

*Goddard Space Flight Center, Greenbelt;
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,
Cambridge (USA), Radioastronomisches Institut und
Argelander-Institut für Astronomie, Universität Bonn;
Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn;
University of Massachusetts, Amherst;
California Institute of Technology, Pasadena;
Institut de Radioastronomie Millimétrique,
Saint Martin d'Hères, Frankreich*

II.6 Die langsame Entwicklung von Galaxien in ihren Halos aus Dunkler Materie

Nach der heutigen Standardkosmologie haben sich Galaxien in ausgedehnten Halos aus Dunkler Materie gebildet. Mit Computersimulationen lässt sich diese Entwicklung bereits verhältnismäßig gut nachvollziehen. Allerdings sagen die Modellrechnungen ein schnelleres Wachstum der Galaxien voraus, als tatsächlich beobachtet wird. Theoretiker des MPIA haben ein neues Modell untersucht, in dem die innere Struktur der Halos aus Dunkler Materie berücksichtigt wird. Dabei ergab sich, dass in der zweiten Hälfte der kosmischen Entwicklung (seit der Rotverschiebung $z \approx 1$) die Größe der Galaxien bei gegebener Masse lediglich um 15 bis 20 % zugenommen hat. Dies entspricht den beobachteten Werten.

Im heutigen Standardmodell der Kosmologie sind Wolken (Halos) aus Dunkler Materie eine entscheidende Voraussetzung für die Entstehung von Galaxien. In diesem Szenario entstanden im frühen Universum weit ausgedehnte Halos, die sich im Laufe ihrer Entwicklung unter dem Einfluss der Schwerkraft zusammenzogen und teilweise miteinander verschmolzen. Gleichzeitig strömte die »normale« baryonische Materie in die Gravitationszentren der Halos und kondensierte dort zu den ersten Scheibengalaxien. Auch diese verschmolzen zum Teil miteinander und wuchsen dadurch bis zu ihrer heutigen Größe an. Charakteristische Parameter der Galaxien, etwa ihre Größe, Masse oder Leuchtkraft, sind somit eng an die Entwicklung der Halos aus Dunkler Materie gekoppelt.

Eine wesentliche Eigenschaft der dunklen Halos ist der Drehimpuls, den sie nach dem Urknall erhalten hatten. Dieser blieb während der Kontraktion nahezu erhalten und führte dazu, dass die ursprünglich nahezu sphärischen Gebilde zu Scheiben abplatteten. Auch der Drehimpuls der baryonischen Materie blieb erhalten. Die Annahme, dass die spezifischen (auf eine Einheitsmasse bezogenen) Drehimpulse von Dunkler und baryonischer Materie etwa gleich groß waren, führt zu einer Vorhersage für die heutige Größenverteilung von Scheibengalaxien, die recht gut mit der beobachteten übereinstimmt.

Dennoch sind die in heutigen Modellen berücksichtigten physikalischen Vorgänge immer noch nicht ganz verstanden. So verlieren in komplexen numerischen Simulationen einige Scheiben der Protogalaxien Drehimpuls, und folglich sind die entstehenden Galaxien zu klein und kompakt. Auch das Kühlen des baryonischen Gases und die Sternentstehung haben einen starken Einfluss auf die Entwicklung der wesentlichen Galaxienparameter.

Moderne Himmelsdurchmusterungen bieten seit kurzem immer mehr Möglichkeiten, die Ergebnisse der Computermodelle mit der Realität zu vergleichen. So haben Astronomen des MPIA im Rahmen des HST-Projekts GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and Spectral Energy Distributions) in Kombination mit den Daten des Calar-Alto-Surveys COMBO-17 im Jahre 2005 herausgefunden, dass Scheibengalaxien einer gegebenen Größe bei einer Rotverschiebung von $z = 1$ (vor knapp acht Milliarden Jahren) im Visuellen um etwa eine Größenklasse heller waren, als sie es heute sind. Die Gesamtmasse an Sternen hat sich im selben Zeitraum jedoch nur um maximal 10 % vergrößert. Dieses Ergebnis ist konsistent mit einem langsamem Anstieg des mittleren Masse/Leuchtkraft-Verhältnisses, wie man es von einer alternden Sternpopulation erwartet.

Vergleichbare Himmelsdurchmusterungen haben ergeben, dass die Flächenhelligkeit der Galaxien seit $z = 2.5$ bis heute um 2 bis 3 mag arcsec^{-2} , also etwa um einen Faktor 10, abgenommen hat. Die mittlere Größe bei fester gesamter stellarer Masse hat im selben Zeitraum nicht einmal um einen Faktor 2 zugenommen.

Diskrepanzen zwischen Theorie und Realität

Einfache Skalierungsmodelle können diese Ergebnisse nicht erklären, denn sie sagen eine stärkere Entwicklung der Galaxiengröße voraus als beobachtet. Diese Modelle gehen davon aus, dass die Größe einer Galaxie proportional zu einem Spinparameter und dem Virialradius des dunklen Halos wächst. Unter dieser Voraussetzung sollten die Galaxien seit $z = 1$ um einen Faktor 1.7 und seit $z = 3$ um einen Faktor 3.2 gewachsen sein.

Ursache für diese Diskrepanz zwischen Theorie und Realität sind zu einfache Annahmen dieses Modells, das viele Effekte nicht berücksichtigt. So besitzen die Halos ein Dichteprofil, das vom einfachen virialen Fall abweicht. Neuere Modelle von Navarro, Frenk und White besitzen davon abweichende Dichteprofile. Außerdem modifiziert die im Zentrum des Halos befindliche baryonische Materie das Dichteprofil des Halos, insbesondere im zentralen Bereich. Und drittens können die Scheiben von Protogalaxien instabil werden und einen Balken oder einen Bulge (zentrale sphärische Verdichtung) ausbilden.

Theoretiker des MPIA haben diese drei Effekte in vereinfachter Form in ein erweitertes Skalierungsmodell eingebracht und die Auswirkungen auf die Entstehung und Entwicklung der Galaxien untersucht. Ihrem Modell liegen folgende Annahmen zugrunde: Im Zentrum eines

jeden Halos mit einer Rotationsgeschwindigkeit von weniger als 350 km/s befindet sich eine Scheibengalaxie (die Rotationsgeschwindigkeit eines Halos wird bei dem kritischen Radius r_{200} angegeben). Die Dichteprofile entsprechen dem des Navarro-Frenk-White-Modells. Es wird ein bestimmtes Verhältnis von Halo- zu Galaxienmasse angenommen. Jede Scheibengalaxie besitzt denselben spezifischen Drehimpuls wie ihr Halo, und es wurde ein Stabilitätskriterium definiert, das den Zerfall einer Scheibe in einen Balken oder Bulge festlegt.

Unter diesen Annahmen wurde die Entwicklung der dunklen Halos und der darin befindlichen Galaxien simuliert, anschließend wurden die Ergebnisse bei mehreren Rotverschiebungen mit Beobachtungsdaten verglichen. Hierfür griffen die Astronomen auf die GEMS-Aufnahme und den MPIA-Survey COMBO-17 (s.u.) zurück.

Letztlich standen den Astronomen 5664 Galaxien zur Verfügung, deren charakteristischer Radius r_d durch Anpassen eines Helligkeitsprofils bestimmt wurde. Die Unsicherheit in r_d betrug etwa 35 %, die Helligkeiten ließen sich bis auf etwa 0.2 mag genau festlegen. Diese Galaxiengruppe war bis zu einer kleinsten Masse von 10^{10} Sonnenmassen vollständig, so dass die folgende Analyse auf Galaxien dieser Mindestgröße beschränkt bleibt.

Das neue Modell im Test

Abb. II.6.1 zeigt einen Vergleich des neuen Modells (links) mit den Beobachtungsergebnissen (rechts). Aufgetragen ist die Häufigkeitsverteilung der scheinbaren Helligkeiten der Galaxien und ihrer charakteristischen Größen r_d in Abhängigkeit von der Masse für unterschiedliche Rotverschiebungsbereiche seit $z = 1.05$. Aufgenommen wurden ausschließlich stabile Scheibengalaxien, die also keinen Balken oder Bulge gebildet haben. Das für diesen Vorgang definierte Stabilitätskriterium hatte zur Folge, dass vorwiegend in massereichen Galaxien ein Balken oder Bulge entsteht. Der Ausschluss dieser instabilen Galaxien reduzierte die Streuung der Größen bei gegebener Masse erheblich. Der Anteil an instabilen Galaxien variierte zwischen 5 % bei $z = 0.1$ und 3 % bei $z = 1$.

Das neue Modell gibt die Beobachtungsdaten wesentlich besser wieder als das bisherige Skalierungsmo dell. Die Steigung der Größe-Masse-Relation und die Streuung der Größe bei gegebener Masse stimmen gut mit der Realität überein. Insbesondere sagt das Modell voraus, dass die mittlere Größe bei gegebener stellarer Masse seit $z = 1$ bis heute um 15 bis 20 % zugenommen hat. Dieser Wert ergab sich auch bei der Analyse der GEMS-Aufnahme. Allerdings sagt das Modell zu viele Galaxien mit Massen oberhalb von 10^{11} Sonnenmassen voraus. Das ist nicht überraschend, weil angenommen wurde, dass jeder dunkle Halo genau eine Galaxie enthält.

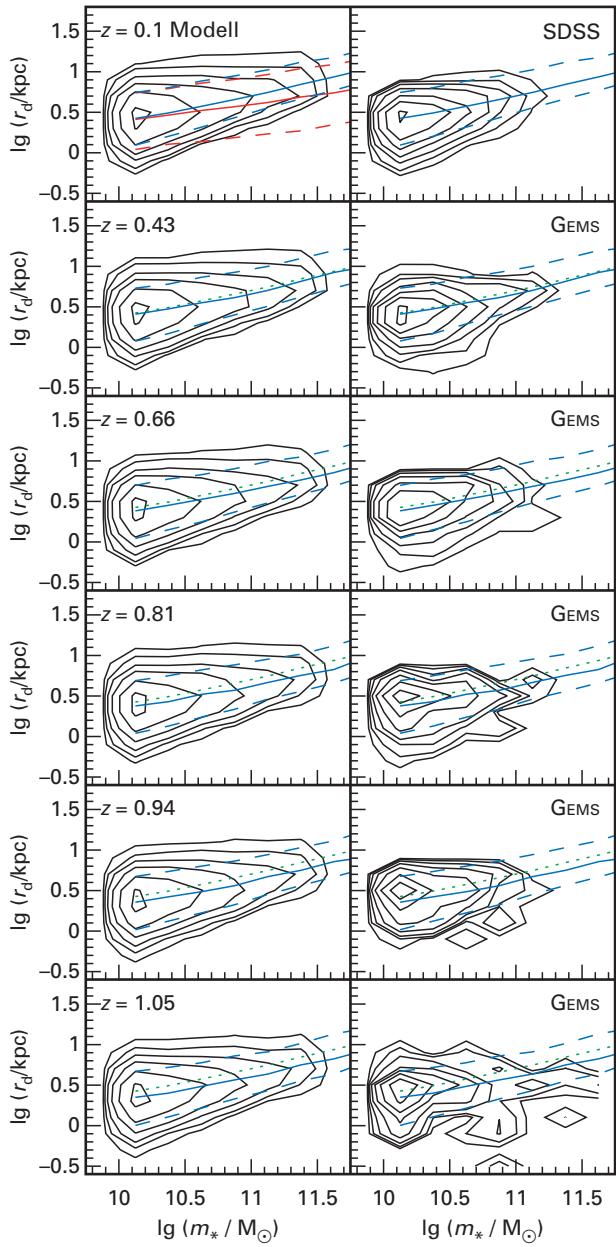


Abb. II.6.1: Entwicklung der Galaxiengrößen (r_d) in Abhängigkeit von der Masse seit $z = 1.05$. Links die Ergebnisse des Modells, rechts zum Vergleich die Beobachtungsergebnisse. Für die lokale Umgebung ($z = 0.1$) wurden Daten des Sloan Digital Sky Survey (SDSS) verwendet, für die weiter entfernten Galaxien stand die GEMS-Aufnahme mit den Rotverschiebungswerten von COMBO-17 zur Verfügung.

Das ist jedoch unrealistisch, da sehr massereiche Halos eher elliptische Galaxien beherbergen. In der folgenden Analyse wurden deshalb diese massereichen Galaxien ausgespart.

Als zweiter Test für die Modelle wurde die stellare Flächendichte ermittelt, eine Größe, die sich aus der Masse und dem Galaxienradius errechnet. Abb. II.6.2 zeigt die zeitliche Entwicklung dieser Größe von

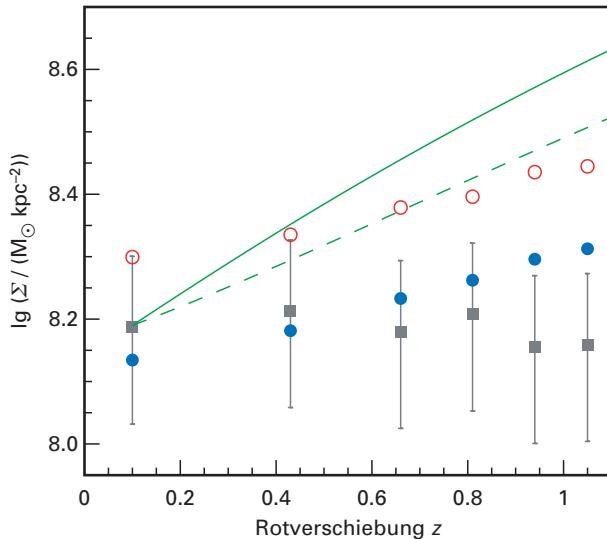


Abb. II.6.2: Zeitliche Entwicklung der stellaren Flächendichte für Galaxien mit 10^{10} bis 10^{11} Sonnenmassen (ausgefüllte Quadrate). Die alten Modelle (gestrichelte und punktierte Kurven) sagen eine viel zu rasche Entwicklung vorher. Das neue Modell lieferte die beste Übereinstimmung, wenn die instabilen Galaxien unberücksichtigt blieben (blaue Punkte). Bei Mitnahme der instabilen Galaxien (offene Kreise) ergibt sich ebenfalls eine zu steile Entwicklung.

$z = 1$ bis heute. Die Messwerte für Galaxien mit 10^{10} bis 10^{11} Sonnenmassen (ausgefüllte Quadrate) zeigen kaum eine Entwicklung, während die alten Modelle (gestrichelte und punktierte Kurven) eine viel zu rasche Entwicklung vorhersagen. Das neue Modell lieferte die beste Übereinstimmung, wenn die instabilen Galaxien unberücksichtigt blieben (blaue Punkte). Bei Mitnahme der instabilen Galaxien (offene Kreise) ergab sich ebenfalls eine zu steile Entwicklung.

Die gute Vorhersagekraft des neuen erweiterten Skalierungsmodells ließ es sinnvoll erscheinen, es auch auf Galaxien mit größeren Rotverschiebungen anzuwenden. Von beobachterischer Seite her steht seit kurzem eine Datensammlung von Galaxien bis $z = 3$ zur Verfügung, wenngleich auch nicht in derselben Qualität wie bis $z = 1$. Dieser Sammlung von Werten für die mittleren Galaxiengrößen von $z = 0$ bis $z = 3$ liegen die GEMS-Aufnahme sowie die Surveys SDSS und FIRES zugrunde.

Abb. II.6.3 zeigt erneut den Vergleich der Modelle mit den Beobachtungsdaten. Auch hier sagt das einfache Skalierungsmodell eine viel zu steile zeitliche Entwicklung voraus, während das neue erweiterte Modell recht gut mit den Beobachtungen übereinstimmt. Es sagt voraus, dass Galaxien bei gegebener stellarer Masse um $z = 2.5$ etwa 60 % der heutigen Größe haben sollten. Das ist eine etwas stärkere Entwicklung als die Messwerte angeben, liegt aber noch innerhalb der Ungenauigkeit der Beobachtungen.

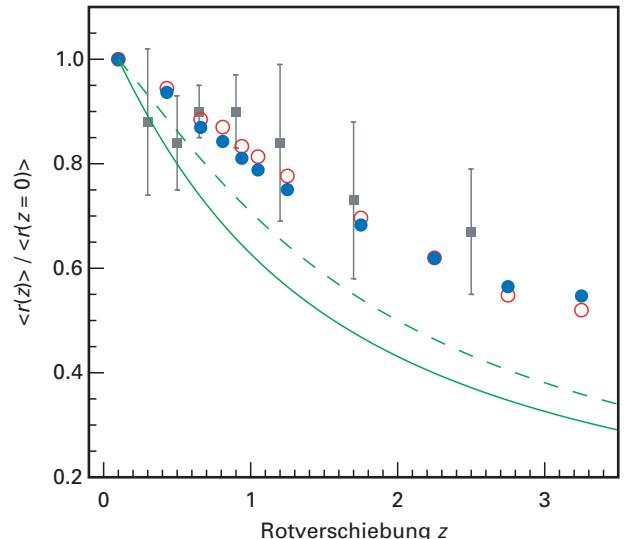


Abb. II.6.3: Zeitliche Entwicklung der mittleren Galaxiengröße seit $z = 2.5$ (Symbole wie in Abb. II.6.2). Das neue Modell gibt die Beobachtungsdaten erneut recht gut wieder.

Obwohl das neue Modell längst nicht alle physikalischen Vorgänge berücksichtigt, die bei der Galaxienentwicklung eine Rolle spielen, spiegelt es die Realität viel besser wider als das alte Skalierungsmodell. Das liegt wohl hauptsächlich daran, dass die Größe einer Galaxie nicht einfach proportional mit dem Virialradius des dunklen Halos wächst. Das ist wiederum eine Folge der zeitlichen Entwicklung der Dichtestruktur der Halos in folgender Weise: Halos sammeln im Laufe der Zeit Materie aus ihrer Umgebung auf. Computersimulationen haben gezeigt, dass dies in zwei Phasen abläuft. Zunächst wächst die Konzentration des Halos im Zentralbereich. In einer zweiten Phase sammelt der Halo zwar weiterhin Materie auf, aber diese verteilt sich gleichmäßig über den gesamten Bereich. Dadurch wächst zwar der Virialradius weiter an, aber das Verhältnis des äußeren zum Zentralbereich bleibt nahezu unverändert, und die Konzentration nimmt ab. In den Modellen führt aber ein weniger stark konzentrierter Halo zur Ausbildung einer größeren Galaxie als in einem Halo mit starkem Konzentrationsanstieg. Dieser zur Entwicklung des Virialradius gegenläufige Trend führt zu einer schwächeren Entwicklung der Größe-Masse-Relation der Galaxien.

Das neue Skalierungsmodell ignoriert einige für die Galaxienentwicklung wichtige physikalische Vorgänge, die im nächsten Schritt berücksichtigt werden sollen. Dazu zählen vor allem das Kühlen von Gas, Sternentstehung, Rückwirkung der Sternentstehung auf das interstellare Medium und die Wechselwirkung von Galaxien.

Die für diese neue Arbeit verwendeten Beobachtungsdaten stammen aus der GEMS-Aufnahme und dem MPIA-Survey COMBO-17. GEMS ist die größte, bislang mit dem

Weltraumteleskop HUBBLE angefertigte Farbaufnahme. Sie entstand unter der Leitung von Astronomen des MPIA und dient dazu, die morphologischen Eigenschaften von rund 10 000 Galaxien zu studieren. Das Himmelsfeld war so gewählt, dass die Rotverschiebungen dieser Galaxien aus dem Survey COMBO-17 gewonnen werden konnten. Im Rahmen dieser Durchmusterung wurde ein großes Himmelsareal durch 17 Filter hindurch aufgenommen und die Helligkeiten der Galaxien in entsprechend vielen Farbbereichen gemessen. Damit lassen sich Galaxien klassifizieren und deren Rotverschiebungen bis zu einer Rothelligkeit von 24 mag bis auf wenige Prozent genau bestimmen. Entscheidende Voraussetzung für das Projekt war das große Bildfeld der Weitfeldkamera (Wide Field Imager, WFI), die unter Leitung des MPIA entwickelt und gemeinsam mit der Eso gebaut wurde. Sie arbeitet am 2.2-Meter-MPG/Eso-Teleskop auf La Silla und besitzt ein $32' \times 33'$ großes Bildfeld, entsprechend etwa der Fläche des Vollmondes. Insgesamt sind rund

25 000 Galaxien erfasst, womit COMBO-17 weltweit zu den umfangreichsten und am tiefsten reichenden Durchmusterungen zählt.

*Rachel S. Somerville, Marco Barden,
Hans-Walter Rix, Eric F. Bell, Andrea Borch,
Boris Häußler, Knud Jahnke, Klaus Meisenheimer.*

*Beteiligte Institute:
Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg;
Space Telescope Science Institute, Baltimore; Johns
Hopkins University, Baltimore;
McDonald Observatory, Texas;
University of British Columbia, Vancouver;
University of Texas, Austin;
University of Massachusetts, Amherst;
Calar-Alto-Observatorium, Almeria;
Astrophysikalisches Institut Potsdam;
University of Oxford; University of Tokyo;
Osservatorio Astronomico di Brera, Milano*

II.7 Das Schwarze Loch im Zentrum von Centaurus A

Die elliptische Galaxie Centaurus A (NGC 5128) ist ein Paradeobjekt für die Erforschung aktiver Galaxien. Mit einer Entfernung von 11 Millionen Lichtjahren ist sie die nächste große elliptische Galaxie, die nächst gelegene Radiogalaxie mit zwei Jets, und sie ist das Produkt einer Verschmelzung zweier Galaxien, die für kosmologische Maßstäbe erst kürzlich stattgefunden hat. Die geringe Entfernung bietet die Möglichkeit, mit hoch auflösenden Beobachtungsmethoden die nahe Umgebung ihres supermassereichen zentralen Schwarzen Lochs zu untersuchen. Dies gelang einem internationalen Team unter Leitung des MPIA mit den Instrumenten NACO und SINFONI am Very Large Telescope der Eso. Die Adaptiven Optiken dieser Instrumente lieferten einzigartige Daten mit bislang unerreichter räumlicher Auflösung. Damit gelang es, die Kinematik der Gasscheibe zu entschlüsseln und die Masse des Schwarzen Lochs zu bestimmen. Der neue Wert demonstriert in beeindruckender Weise, dass sich Cen A entgegen bisheriger Beobachtungen in die bekannten Relationen zwischen den Massen der Schwarzen Löcher und der umgebenden Bulges sowie deren Geschwindigkeitsdispersionen einreicht.

Zahlreiche Untersuchungen der vergangenen Jahre haben zu der Erkenntnis geführt, dass sich im Zentrum einer jeden elliptischen oder Spiralgalaxie vermutlich ein Schwarzes Loch befindet. Die Massen dieser Objekte variieren zwischen etwa einer Million und zehn Milliarden Sonnenmassen. Interessanterweise besteht zwischen der Masse der Schwarzen Löcher und der Gesamtmasse der umgebenden Bulges sowie deren Geschwindigkeitsdispersion eine enge Korrelation – sie ist deshalb überraschend, weil die Gravitation des zentralen Schwarzen Lochs nicht weit genug reicht, um die Dynamik des Bulges beeinflussen zu können.

Der Einflussradius eines Schwarzen Lochs wächst proportional mit dessen Masse und fällt umgekehrt proportional mit der Geschwindigkeitsdispersion der Sterne im Bulge. Innerhalb dieses Radius dominiert die Gravitation des Schwarzen Lochs, außerhalb die des Bulges. Die Einflussradien betragen typischerweise 30 bis 300 Lichtjahre, während die Bulges rund zwei Größenordnungen weiter ausgedehnt sind.

Da der Großteil eines Bulges die Gravitation des zentralen Schwarzen Loches nicht spürt, muss die erwähnte Korrelation zwischen der Masse der Schwarzen Löcher und den Eigenschaften der umgebenden Bulges eine tiefere Ursache haben, die in der Entwicklungsgeschichte der Galaxien liegt. Hier sind noch nicht alle Einzelheiten bekannt, aber Computersimulationen belegen, dass das Verschmelzen und Anwachsen von Galaxien eine wich-

tige Rolle spielt. Bei einem solchen Vorgang gelangt zum einen viel Materie in das Zentrum der entstehenden Galaxie, wo sie das dort befindliche Schwarze Loch aufnimmt und ebenfalls wächst. Zum anderen verwirbeln riesige Staubwolken bei dem Verschmelzungsvorgang, verdichten sich und werden zu gewaltigen Sternentstehungsgebieten. Die Antennengalaxie ist ein berühmtes Beispiel für einen solchen Vorgang. Wie fügt sich Cen A in dieses Szenario ein?

Cen A ist eine elliptische Radiogalaxie, aus deren Zentrum zwei Jets herausschießen, die insbesondere im Radio- und Röntgenbereich hervortreten (Abb. II.7.1). Entstanden ist die Galaxie vermutlich, als vor einigen hundert Millionen Jahren zwei Galaxien miteinander verschmolzen. Dies vermuteten bereits Walter Bade und Rudolph Minkowski Mitte der 1950er-Jahre. Dafür sprechen auch großräumige schalenförmige Strukturen, die im Optischen beobachtet wurden. Auffällig sind an Cen A vor allem langgestreckte Staubwolken, die das sichtbare Licht um bis zu 14 mag abschwächen und folglich die Beobachtung des Zentralgebietes erschweren (Abb. II.7.2). Dennoch konnte im nahen Infrarot eine Scheibe aus ionisiertem Gas gefunden werden, die das zentrale Schwarze Loch umgibt. Und die Geschwindigkeitsdispersion des zentralen Bulges ließ sich zu 138 km/s bestimmen.

Damit sagt die genannte Relation zwischen der Masse eines Schwarzen Lochs und der Geschwindigkeitsdispersion im Bulge für das Schwarze Loch eine Masse von etwa 3×10^7 Sonnenmassen vorher. Im Jahre 2001 kamen Astronomen jedoch auf einen Wert von 2×10^8 Sonnenmassen. Dieser Wert lag also weit oberhalb der Relation. Allerdings lässt sich die Masse des Schwarzen Lochs nur dann zuverlässig bestimmen, wenn das Gebiet innerhalb seines Einflussradius räumlich aufgelöst werden kann. Für Cen A ergibt sich mit der angegebenen Dispersion ein Einflussradius von etwa 16 Lichtjahren, entsprechend einem Winkel von $0.^{\circ}3$. Diese Auflösung haben bisherige Beobachtungen nicht erreicht.

Astronomen des MPIA nutzten die Leistungsfähigkeit von zwei mit Adaptiver Optik ausgestatteten Instrumenten am Very Large Telescope, (VLT) der Europäischen Südsternwarte, Eso. Mit NACO gelangen Direktaufnahmen im K-Band (bei 2.2 μm) und Langspaltspektroskopie im H-Band (bei 1.6 μm). Die Beobachtungsbedingungen waren hervorragend, so dass die Beugungsgrenze von $0.^{\circ}057$ im K-Band erreicht werden konnte (und man im H-Band mit $0.^{\circ}11$ nicht weit davon entfernt lag). Weiterhin wurde Cen A, ebenfalls am VLT, mit dem abbildenden Spektrometer SINFONI untersucht. In den zwei abgedeckten Wellenlängenbereichen von 1.43 bis 1.87 μm und

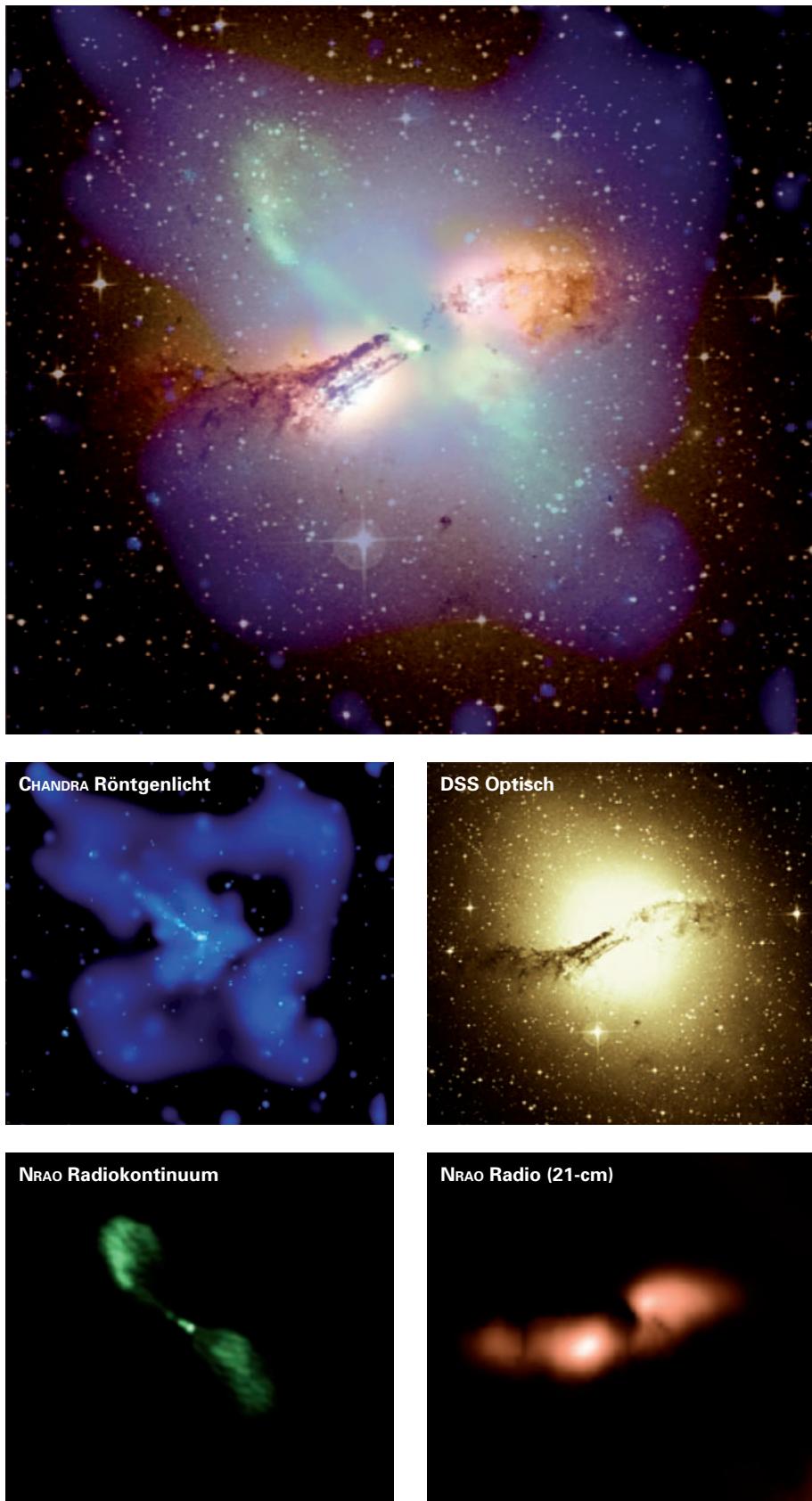
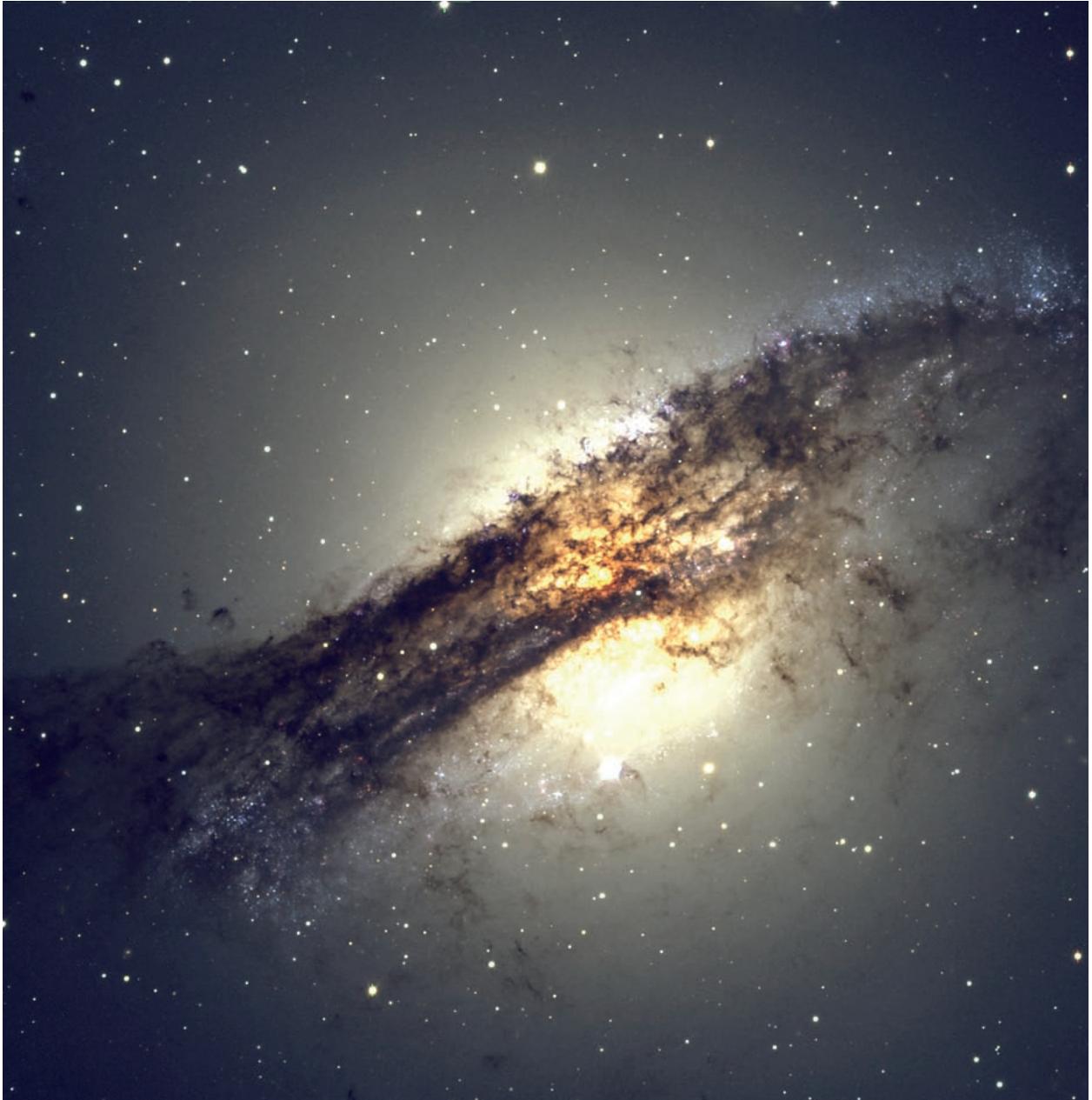


Fig. II.7.1: Oben: Cen A in der Überlagerung von Aufnahmen im Röntgen-, Radio- und optischen Bereich. Unten die Einzelbilder: Röntgen (NASA/CXC/M. Karovska et al.), optisch (Digitized

Sky Survey U.K. Schmidt Image/STScI), Radiokontinuum (NRAO/VLA/J. Condon et al.), Radio 21 cm (NRAO/VLA/J. van Gorkom/Schminovich et al.).



von 1.93 bis 2.47 μm fanden sich zahlreiche Emissionslinien von Ionen und Molekülen in unterschiedlich angeregten Zuständen. Auch diese Beobachtungen erfolgten nahezu an der Beugungsgrenze. Ziel dieser Anstrengungen war es, erstmals mit ausreichender Auflösung die Kinematik der Scheibe und die Masse des zentralen Schwarzen Lochs zu bestimmen.

Mit Daten der NACO-Kamera die Masse des Schwarzen Lochs bestimmen

Für die Analyse der NACO-Langspaltspektren eignete sich am besten eine starke Eisen-Emissionslinie [FeII] bei 1.66 μm Wellenlänge (Abb. II.7.3). Ausgewählt

Abb. II.7.2: Centaurus A im sichtbaren Lichts, aufgenommen mit FORS 2 am VLT. Hier sind die dichten Staubfilamente besonders deutlich. (Bild: Eso)

wurde zudem jenes Spektrum, bei dem der Spalt bei einem Positionswinkel von $32^\circ 5$ auf der großen Achse der geneigten Scheibe lag. Dies hat den Vorteil, dass hier die Flächenhelligkeit entlang des Spalts unabhängig vom Neigungswinkel der Scheibe bestimmt wird. Die Flächenhelligkeit ist ein wichtiger Parameter für die Scheibenmodelle.

Für das Erstellen des Modells wurde zunächst aus Archivaufnahmen der Beitrag der zentralen Sternkomponente zum gesamten Gravitationspotential ermittelt.

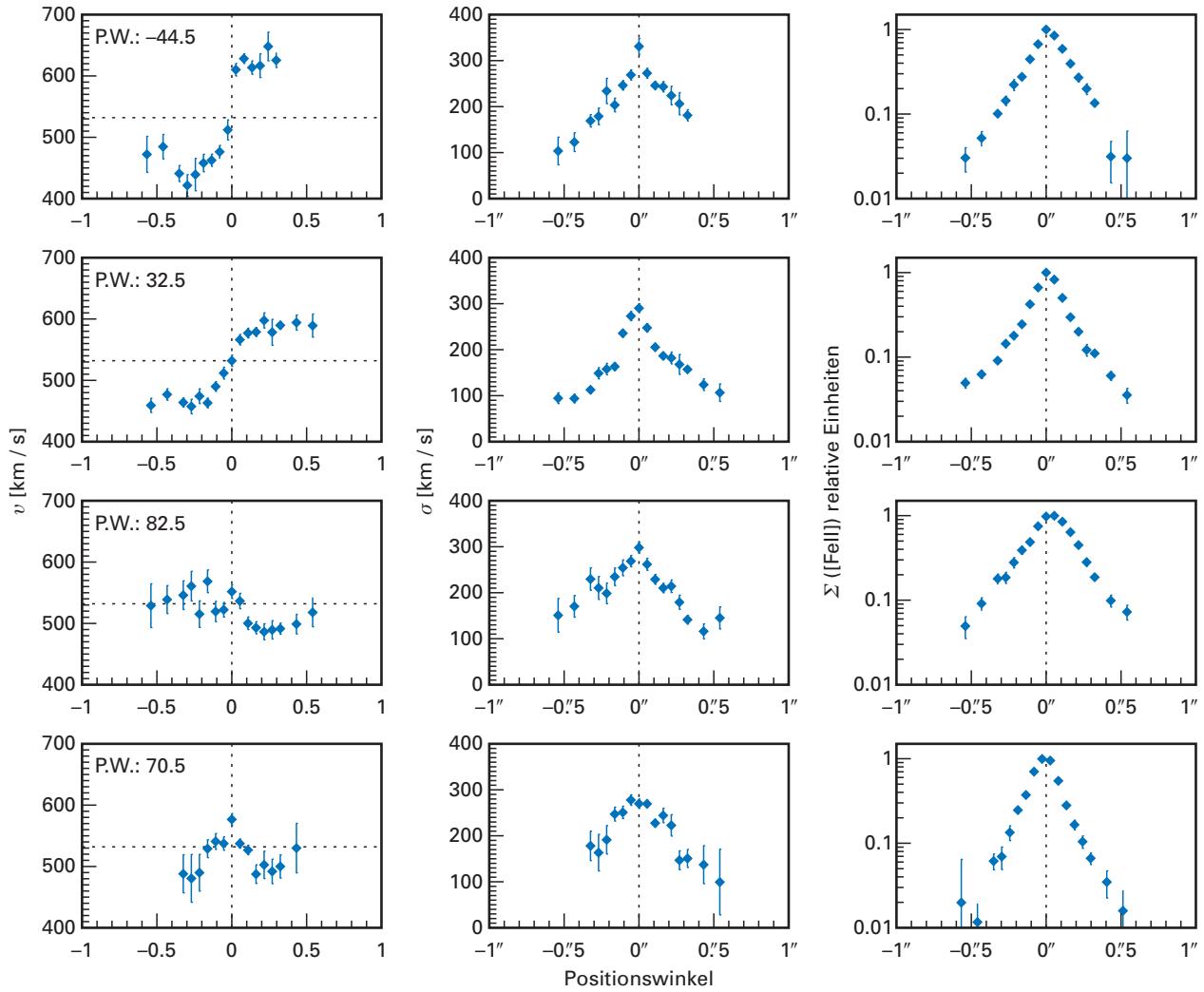


Abb. II.7.3: Aus den NACO-Spektren abgeleitete Daten für den zentralen Bereich von Cen A: Rotationskurven (links), Geschwindigkeitsdispersion (Mitte) und Flächenhelligkeiten (rechts) bei vier Positionswinkeln.

Der Wert von 8×10^7 Sonnenmassen ist wesentlich größer als die geschätzte Gasmenge von etwa 1000 Sonnenmassen in der Scheibe, so dass die Gravitation der Scheibenmaterie in den Modellen ignoriert werden konnte.

Die gemessene Rotationskurve ist die einer flachen rotierenden Scheibe. Auffällig ist eine sehr hohe Geschwindigkeitsdispersion von 300 km/s unmittelbar im Zentrum. Die Ursache hierfür ist ungeklärt, denkbar wäre eine sehr hohe, räumlich nicht aufgelöste Geschwindigkeitskomponente. Um die Masse des zentralen Schwarzen Lochs zu ermitteln, wurden drei Modelle erstellt und mit den Messdaten der optimale Fit gesucht.

Modell 1: Eine dünne kalte Scheibe, in der die beobachtete Geschwindigkeitsdispersion allein durch den Umlauf des Gases um das Zentrum zustande kommt. Dieses Modell ist sicher nicht realistisch, weil es die

Physik des Gases, insbesondere eine Aufheizung, nicht berücksichtigt. Es liefert für die Massenabschätzung eine untere Grenze. In das Modell gehen mehrere Parameter ein, die durch einen Fit angepasst werden. Dazu zählen die Neigung der Scheibe gegen die Sichtlinie, die Flächenhelligkeit und die Masse des Schwarzen Lochs. Diese ergab sich hier zu 4×10^7 Sonnenmassen.

Modell 2: Eine dünne heiße Scheibe, bei der die Ursache für die Geschwindigkeitsdispersion als isotroper Gasdruck interpretiert wird. Dieses Modell liefert für die Masse des Schwarzen Lochs einen Wert von 6.1×10^7 Sonnenmassen.

Modell 3: Eine Vielzahl von Gaswolken, die sphärisch symmetrisch um das Zentrum verteilt sind und dieses umkreisen. Dieses Modell ist nicht sehr realistisch, liefert aber eine obere Grenze für die Masse des Schwarzen Lochs, die sich zu 1×10^8 Sonnenmassen ergab.

Modell 2 liefert wohl den physikalisch besten Wert. Dieser ist erheblich kleiner als der bis dahin geltende Wert und liegt nur noch einen Faktor 2 über der Vorhersage aus der Massenrelation von Schwarzen Loch und Bulge.

SINFONI liefert weitere Details aus dem Zentralbereich

Eine weitere hervorragende Möglichkeit, das Zentralgebiet von Cen A detailliert zu studieren, bietet das abbildende Nahinfrarot-Spektrometer SINFONI am VLT. Das integrierte Spektrum wies eine Reihe von Emissionslinien unterschiedlicher Anregung auf, darunter die hoch angeregte Emission [Si VI] bei $1.96\text{ }\mu\text{m}$ und die Emission geringer Anregung von molekularem Wasserstoff (H_2) bei $2.12\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge.

Abb. II.7.4. zeigt exemplarisch die Ergebnisse für diese beiden Linien. Offenbar stammen die Emissionen aus unterschiedlichen räumlichen Bereichen. Das aus der [Si VI]-Emission abgeleitete Geschwindigkeitsfeld besteht aus zwei Komponenten: Rotation und Translation. Die Translationsbewegung ist eindeutig vom Jet beeinflusst, der vom Zentrum aus in zwei entgegengesetzte Richtungen geht. An der Dopplerverschiebung der Linien

Abb. II.7.4: SINFONI-Daten aus dem zentralen Bereich von Cen A. Oben: Fluss, Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsdispersion, abgeleitet aus der Emissionslinie des [Si VI] bei $1.96\text{ }\mu\text{m}$. Unten: dieselben Größen, abgeleitet aus der H_2 -Emissionslinie des molekularen Wasserstoffs bei $2.12\text{ }\mu\text{m}$.

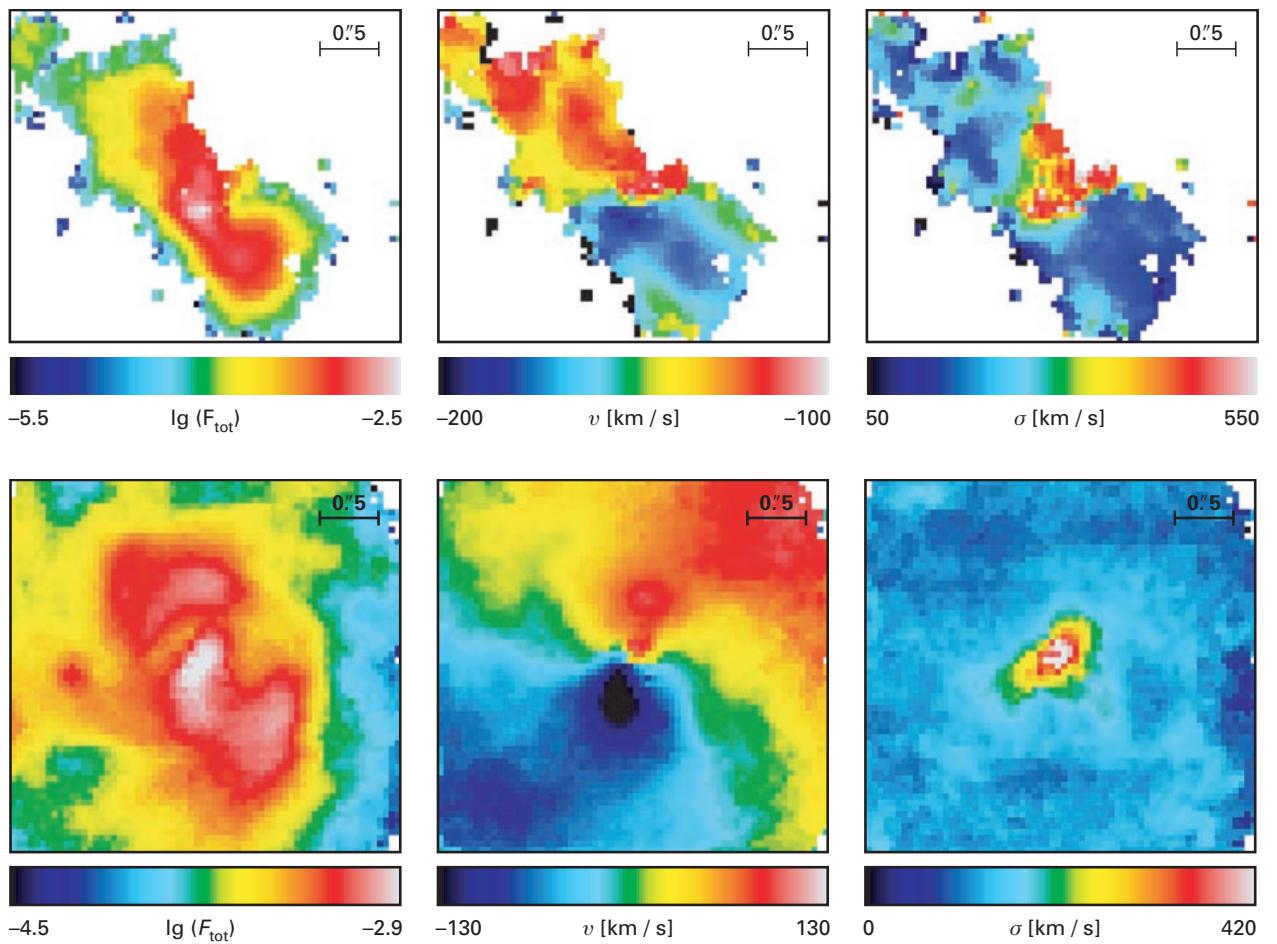
erkennt man jedoch, dass der Gasfluss ins Zentrum hineinführt. Möglicherweise handelt es sich um Material, das zunächst vom Jet nach außen mitgerissen wird, dann aber zur zentralen Scheibe zurückfällt.

Ganz anders verhält sich die räumliche Struktur der H_2 -Emission. Sie zeigt alle Charakteristika einer rotierenden Gasscheibe und eignet sich deshalb am besten, um aus der Scheibenkinematik die Masse des Schwarzen Lochs abzuleiten. Die Gesamtmasse der Scheibe in dem von SINFONI abgedeckten Bereich beträgt etwa 2×10^6 Sonnenmassen und ist somit gegenüber der Masse des Schwarzen Lochs vernachlässigbar.

Wie bei der [FeII]-Emission taucht auch hier im Zentralteil eine ungewöhnlich hohe Geschwindigkeitsdispersion von 300 km/s auf. Ohne deren Ursache weiter zu klären, wurde in den Modellen angenommen, dass sie zu dem Druck im Scheibengas beiträgt.

Die Annahme eines einfachen Scheibenmodells wie bei den NACO-Daten gab die Beobachtungsdaten nicht sehr gut wieder. Eine bessere Übereinstimmung brachte eine verdrehte Scheibe. Abb. II.7.5 zeigt das beste Modell in der Auf- und Seitenansicht.

Während der Anpassung der Messdaten stellte sich eine besonders starke Abhängigkeit vom mittleren Neigungswinkel heraus. In dem besten Modell hatte die Scheibe eine mittlere Neigung von 27 Grad, die



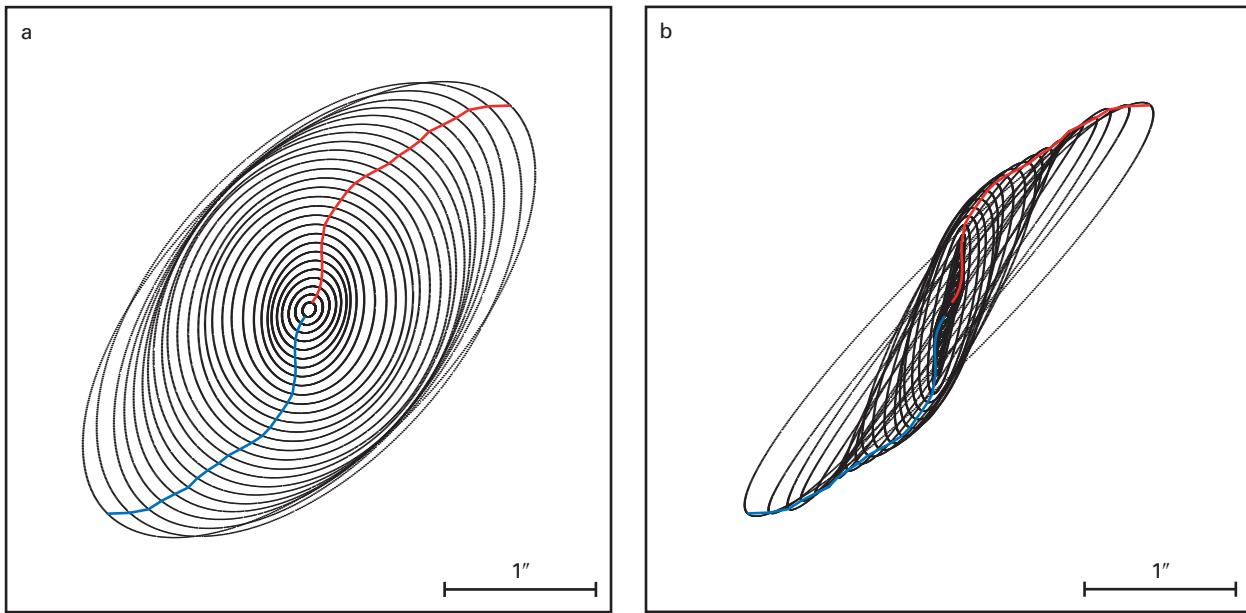
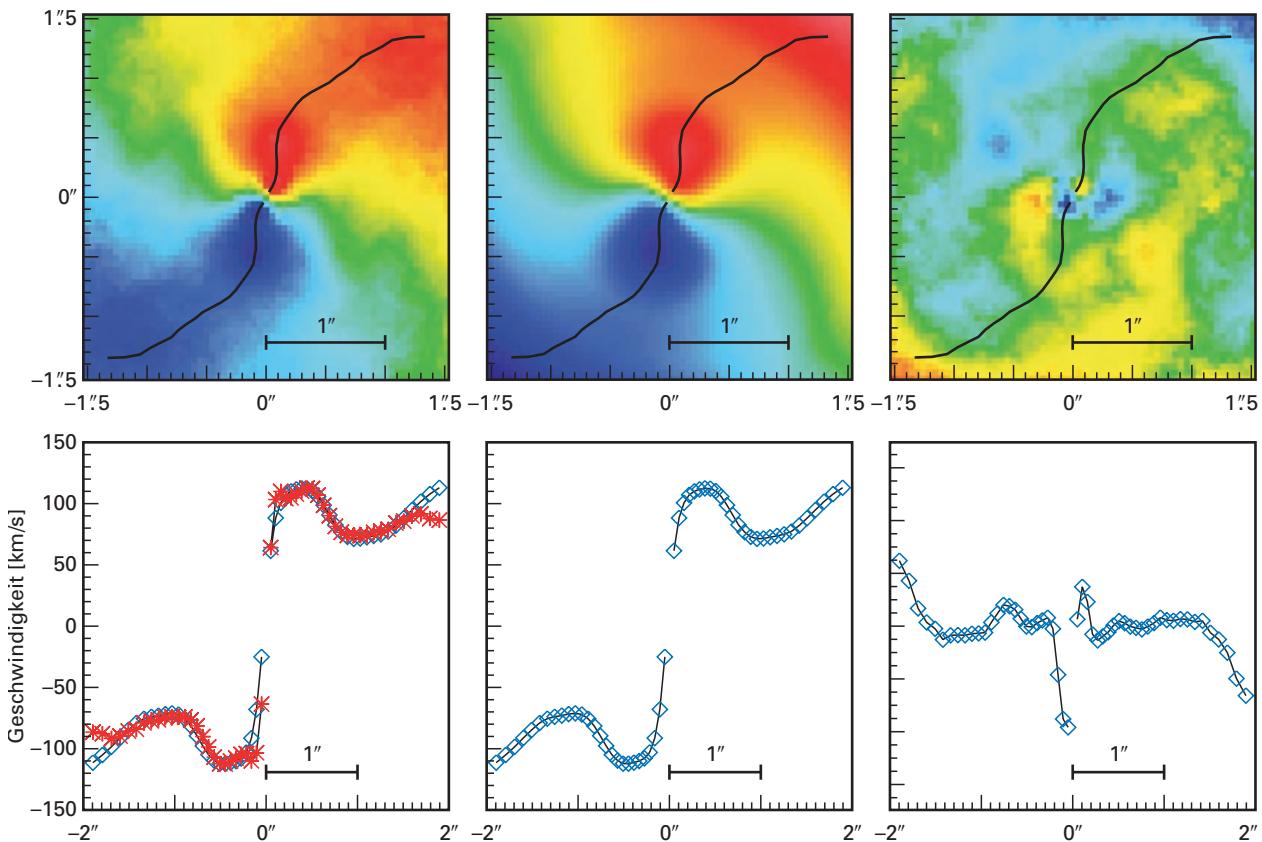
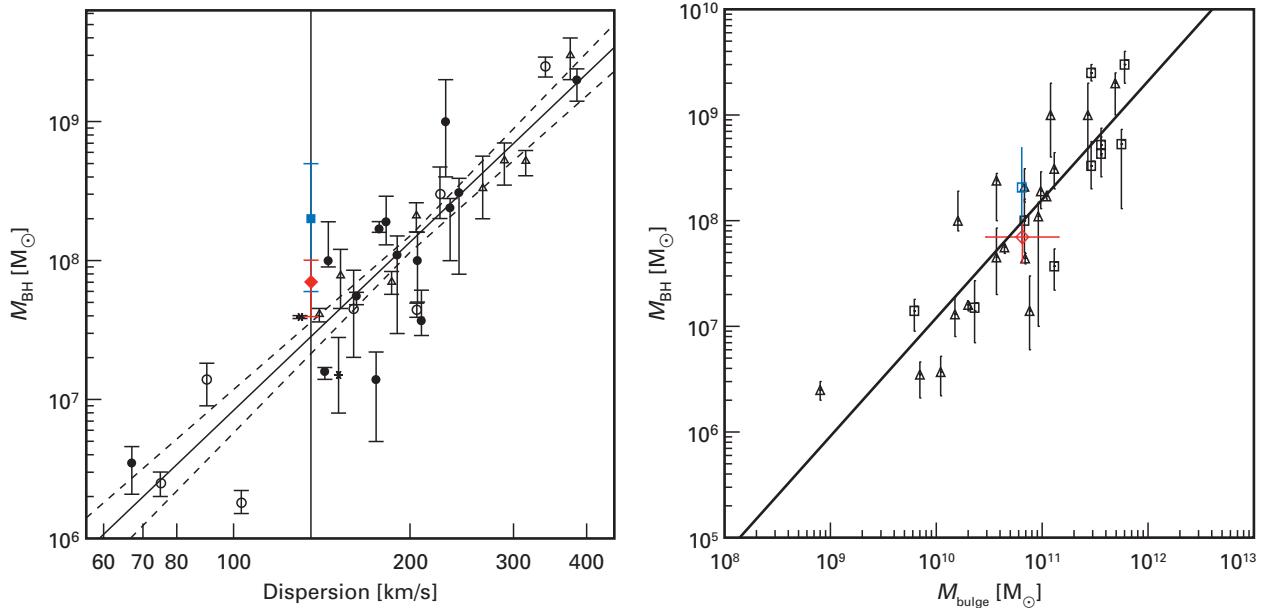


Abb. II.7.5: Modell der verdrehten Scheibe in der Auf- und Seitenansicht. Die Knotenlinie ist eingezeichnet.

Abb. II.7.6: Vergleich von Messdaten (links) und Modell (Mitte). Oben ist die Geschwindigkeitskarte mit der Knotenlinie der verdrehten Scheibe gezeigt, unten die Geschwindigkeitskurven entlang der Knotenlinie. Die beiden Darstellungen rechts zeigen die Abweichungen des Modells von den Daten.

Masse des Schwarzen Lochs ergab sich zu 7×10^7 Sonnenmassen. Eine genaue Datenanalyse offenbarte zudem eine kleine Asymmetrie in Zentrumsnähe. Dort ist der Geschwindigkeitsbetrag der blauverschobenen Linie um 30 km/s größer als der rotverschobene auf der gegenüberliegenden Seite vom Zentrum. Außerdem ist der blauverschobene Bereich heller als der entsprechende rotverschobene. Ursache hierfür könnte ein Gasstrom in





der Scheibe sein, der zu einer höheren Gasdichte führt. Wird eine solche Asymmetrie in dem Modell berücksichtigt, so stimmen Modell und Messdaten noch besser überein (Abb. II.7.6).

Cen A ist doch kein Ausreißer

Damit liegen zwei neue Messwerte für das Schwarze Loch im Zentrum von Cen A vor: 6.1×10^7 Sonnenmassen (NACO) und 7×10^7 Sonnenmassen (SINFONI). Beide Werte stimmen innerhalb der Ungenauigkeit von 10 bis 15 % überein. Es gibt aber auch eine physikalische Ursache für die voneinander abweichenden Werte. Die Beobachtungen mit SINFONI zeigen, dass höher angeregte Gase eine Bewegungskomponente besitzen, die vom Einfluss des Jets herrührt. Sie sind daher nicht so gut für die Massenbestimmung des Schwarzen Lochs aus der Kinematik der Scheibe geeignet. Dies dürfte dagegen bei der mit NACO beobachteten [Fe II]-Linie der Fall sein.

Die hier gezeigten NACO- und SINFONI-Daten besitzen eine rund viermal höhere Auflösung als die bis dahin verwendeten Aufnahmen des Weltraumteleskops HUBBLE. Deren Auflösung reichte nicht aus, um die Einflusssphäre

Abb. II.7.7: Relationen zwischen den Massen der Schwarzen Löcher und der umgebenden Bulges (links) sowie deren Geschwindigkeitsdispersionen (rechts). Die neuen Werte für Cen A sind in Rot eingezeichnet.

des Schwarzen Lochs und den Einfluss der Jets räumlich aufzulösen. Dies war nun erstmals möglich. Die neuen Daten belegen eindrucksvoll, dass sich Cen A entgegen bisheriger Annahmen in die Relationen von Schwarzen Loch und Bulge einfügt. (Abb. II.7.7)

Bei diesen Beobachtungen wurden auch mehrere junge Sternhaufen in Zentrumsnähe entdeckt. Sie sollen in nächster Zukunft genauer untersucht werden, um der Frage nachzugehen, wie Bulges wachsen.

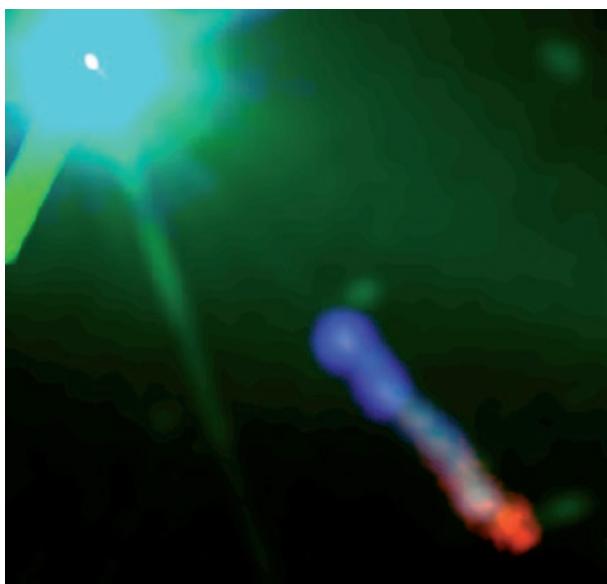
*Nadine Neumayer, Hans-Walter Rix,
 Almudena Prieto, Klaus Meisenheimer,
 Rainer Lenzen.
 Beteiligte Institute:
 Sternwarte Leiden, Niederlande,
 European Southern Observatory, Chile*

II.8 Der Jet des Quasars 3C 273

Eine Vielzahl von Radiogalaxien und Quasaren zeigt ein interessantes Phänomen: Aus ihrem Zentralbereich schießen zwei Gasstrahlen, so genannte Jets, heraus, die sich bis zu mehrere Millionen Lichtjahre weit ins All erstrecken können. Kaum ein Jet wurde bislang so genau untersucht wie der des 2.5 Milliarden Lichtjahre entfernten Quasars 3C 273. Astronomen des MPIA haben nun gemeinsam mit amerikanischen Kollegen neue Beobachtungen mit Hilfe des Röntgenobservatoriums CHANDRA unternommen. Die Ergebnisse bekräftigen eine vor einigen Jahren am MPIA aufgestellte Theorie, wonach der Jet ausschließlich Synchrotronstrahlung emittiert, die von zwei Teilchenpopulationen unterschiedlicher Energie erzeugt wird. Eine ergänzende Untersuchung der Infrarotstrahlung des Jets mit dem Weltraumteleskop SPITZER durch weitere amerikanische Kollegen führte zu demselben Ergebnis.

Astronomen des Instituts beschäftigen sich bereits seit den 1980er-Jahren intensiv mit extragalaktischen Jets, insbesondere mit dem Jet von 3C 273. Sie haben bedeutende Beiträge zur Klärung dieses Phänomens geliefert. Der Jet von 3C 273 lässt sich im Optischen in einem Abstand vom Quasar von 11 bis etwa 22 Bogensekunden nachweisen. Das entspricht einem auf die Himmelsebene projizierten Abstandsbereich von 98 000 bis 196 000

Abb. II.8.1: Falschfarbendarstellung des 3C-273-Jets. Sie ist ein Überlagerung der Bilder mit CHANDRA (blau, Photonenergie 0.5-8 keV), HUBBLE (grün, 620 nm) und dem VLA (rot, 3.6 cm). Der Quasar ist links oben erkennbar.



Lichtjahren. (Diese Werte gelten für eine Hubble-Konstante von 70 km/s/Mpc und ein flaches Universum mit Dunkler Energie). Auf lang belichteten Aufnahmen erscheint der Jet als eine Folge heller Knoten, zwischen denen sich ein diffuses Medium befindet.

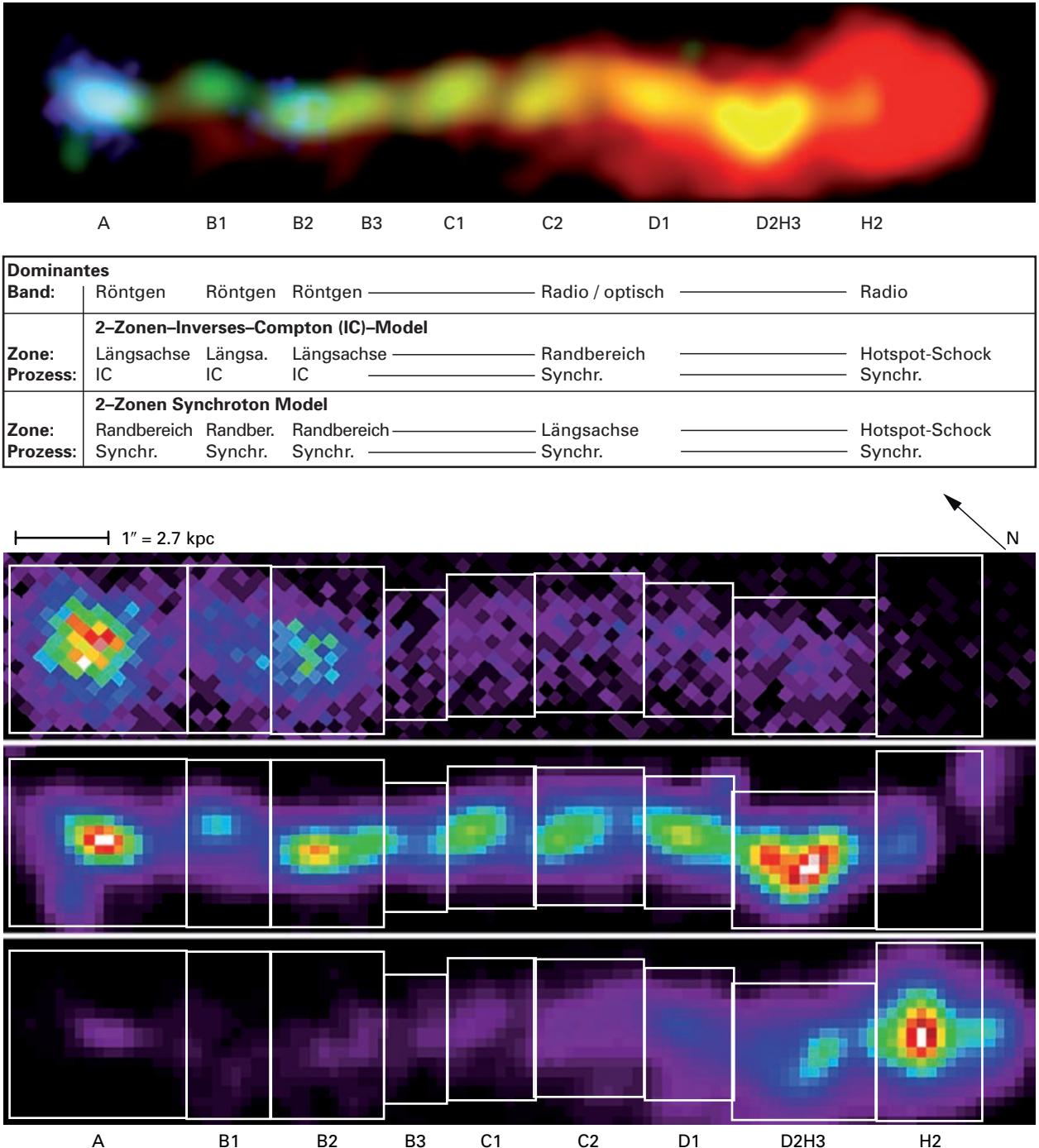
Der Jet entsteht im Zentrum des Quasars, wo sich nach der gängigen Theorie ein Schwarzes Loch mit fast einer Milliarde Sonnenmassen befindet. Dieses ist von einer Gasscheibe umgeben, aus der Materie in das Schwarze Loch hineinstrudelt. Durch einen noch unbekannten Prozess, wahrscheinlich durch Magnetfelder, wird zudem Gas senkrecht zu der Scheibe beschleunigt und zu Jets gebündelt, die sich in das intergalaktische Medium ausbreiten.

In den Jets strömen auf jeden Fall Elektronen, die die Synchrotronstrahlung erzeugen. Noch ist unklar, ob auch deren Antiteilchen (Positronen) oder nur Protonen den Jet elektrisch neutral halten. Da die beobachtete Strahlung ein reines Kontinuum ohne Absorptions- oder Emissionslinien bildet, ist die Strömungsgeschwindigkeit des Gases nicht direkt messbar. Aufgrund zahlreicher Befunde gilt es heute aber als sicher, dass sich das Material im Jet nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.

Nach wie vor ist es aber ein Rätsel, auf welche Weise die Teilchen im Jet dauerhaft auf die hochrelativistischen Energien beschleunigt werden, die zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung nötig sind (vergleichbar mit denen in den irdischen Teilchenbeschleunigern von DESY, CERN und Fermilab). Durch die emittierte Strahlung verlieren die Teilchen nämlich schnell Energie und können sich zum Teil höchstens einige hundert Lichtjahre weit bewegen. Mit Sicherheit können sie nicht die gesamte Länge des Jets von 3C 273 überbrücken. Sie müssen während ihrer schnellen Reise ständig nachbeschleunigt werden.

Es gilt als gesichert, dass die Emission des Jets von 3C 273 vom optischen bis zum Radiobereich Synchrotronstrahlung ist (Synchrotronstrahlung entsteht, wenn sich elektrisch geladene Teilchen in starken Magnetfeldern bewegen). Dies belegen unter anderem Polarisationsmessungen, die erstmals Astronomen des MPIA in den 1990er-Jahren gelangen. Die Ähnlichkeit von optischer und Radiopolarisation legte dabei nahe, dass eine einzige Teilchenpopulation sowohl die optische als auch die Radioemission erzeugt.

Die zuerst mit ROSAT und später mit CHANDRA gemessene Röntgenstrahlung schien hingegen nicht denselben Ursprung zu haben. Astronomen des MPIA hatten aufgrund von Beobachtungen vor allem mit CHANDRA vor einigen Jahren vermutet, dass es eine zweite, energiereichere Teilchenpopulation gibt, welche diese hochenergetische Strahlung abgibt. Damit ließen sich auch die



systematischen Unterschiede zwischen dem beobachteten Spektralverlauf im optischen/ultravioletten Bereich und einfachen Synchrotronspektren erklären.

Alternativ wurde auch ein anderer Emissionsmechanismus für die Röntgenstrahlung diskutiert: Inverse Compton-Emission. In diesem gibt es nur eine einzige Teilchenpopulation, wobei die relativistischen Teilchen geringster Energie im Jet mit den Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung zusammenstoßen und dabei so viel Energie auf die Photonen übertragen, dass diese in den Röntgenbereich gelangen. Um dieses Modell mit den Beobachtungen in Einklang zu bringen,

Abb. II.8.2: Oben – die gleiche Darstellung des Jets wie in Abb. II.8.1, darunter die Bezeichnungen der Emissionsknoten, der jeweils dominierenden Strahlungsart und Details zu den beiden erörterten Emissionsmodellen. Unten – der Jet von 3C 273, aufgenommen mit CHANDRA (oben, im Röntgenlicht), HUBBLE (Mitte, bei 620 nm) und dem VLA (unten, bei 3.6 cm).

müsste das gesamte Jetmaterial hochrelativistische Geschwindigkeiten besitzen, die bisher aber nur für wesentlich kleinere Abstände vom zentralen Schwarzen Loch nachgewiesen werden konnten.

Beobachtungen mit CHANDRA

Neue Beobachtungen mit den Weltraumteleskopen CHANDRA, HUBBLE und SPITZER sollten nun in Kombination mit älteren Daten von HUBBLE und den Radioteleskopen des Very Large Array (VLA) in New Mexico Klarheit in dieser Frage bringen.

Die CHANDRA-Beobachtungen beruhen auf einer Belichtungszeit von insgesamt 45 Stunden, zudem konnten weitere Daten aus dem CHANDRA-Archiv verwendet werden. Zusammen mit ergänzenden Archivaufnahmen von HUBBLE und dem VLA war es möglich, in neun Regionen des Jets eine Spektralanalyse durchzuführen. Eine Überlagerung der Aufnahmen dieser drei Teleskope zeigt Abb. II.8.1., die Einzelaufnahmen sind in Abb. II.8.2 zu sehen.

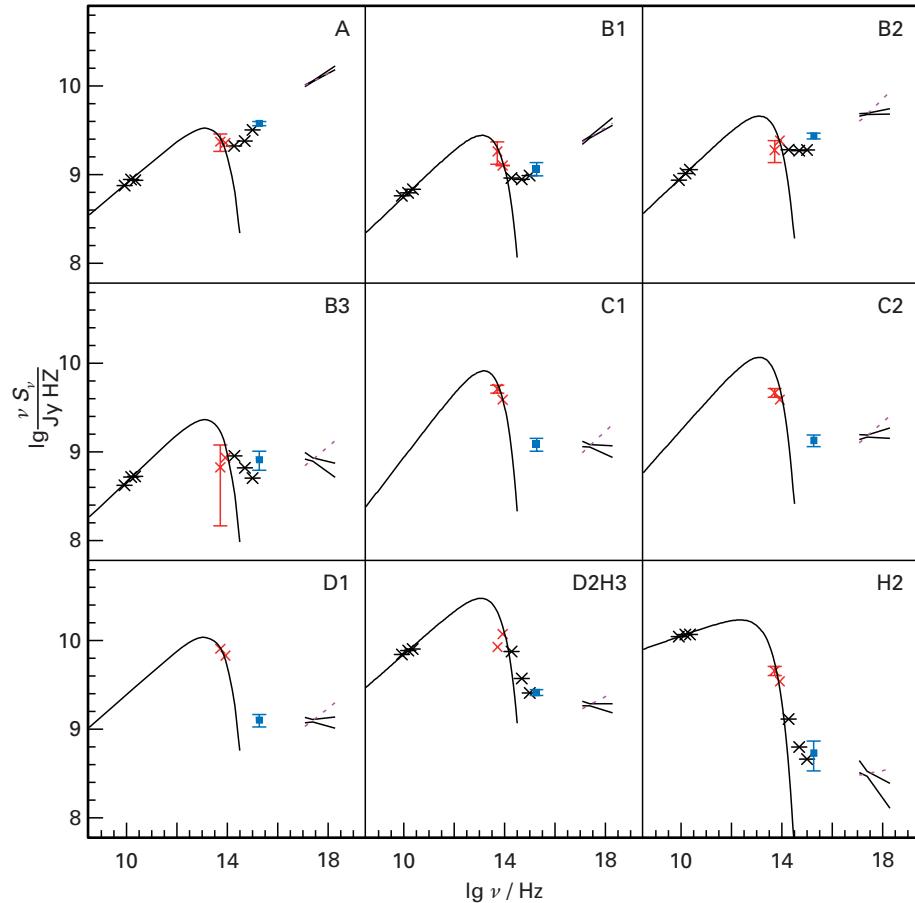
Aus diesen Daten ließ sich die spektrale Energieverteilung der neun Knoten vom Radio- bis zum Röntgenbereich ermitteln (Abb. II.8.3). Die gestrichelten, magentafarbenen Geraden geben den Spektralverlauf an, wie es das Inverse Compton-Modell mit nur einer Teilchenkomponente vorhersagt – der Spektralverlauf im Röntgenbereich sollte den im Radiobereich wider- spiegeln (gepunktete magentafarbene Gerade). Übereinstimmung zeigt sich nur für die Knoten A und B1, alle anderen Knoten jenseits von B1 haben zu geringe Röntgenspektralindizes. In Abb. II.8.4, wo die Spektralindizes für den Radio- und Röntgenbereich aufgetragen sind, wird dies noch deutlicher.

Die Daten widerlegen eindeutig das Inverse Compton- Modell mit nur einer Teilchenkomponente – aber ermöglichen sie auch eine Unterscheidung zwischen einem Inversen Compton-Modell und einem Synchrotronmodell, wenn beide zwei verschiedene Teilchenkomponenten be- inhalten?

Abb. II.8.5 zeigt schematisch, wo sich im Jet die beiden Teilchenpopulationen befinden könnten. Es gibt gute Gründe zu der Annahme, dass die Strömungs- geschwindigkeit entlang der Längsachse (englisch: spine) höher ist als im Randbereich (sheath). Dieser transversale

Abb. II.8.3: Spektrale Energieverteilung der neun Knoten vom Radio- bis zum Röntgenbereich. Die gestrichelten Geraden geben den Spektralverlauf an, wie ihn das Inverse Compton- Modell mit nur einer Teilchenkomponente vorhersagt, mit identischer Steigung im Röntgen- und Radiobereich (gepunktete magentafarbene Geraden). Die roten Kreuze sind die

Messpunkte von SPITZER, die bei den Wellenlängen $3.55 \mu\text{m}$ und $5.73 \mu\text{m}$ liegen, entsprechend Frequenzen von 5.2 und $8.5 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$. Die blauen Quadrate geben die neuen HUBBLE-Daten bei 150 nm ($2 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$) wieder. Die durchgezogenen Linien deuten jeweils beispielhaft den Verlauf der zwei spektralen Komponenten an.



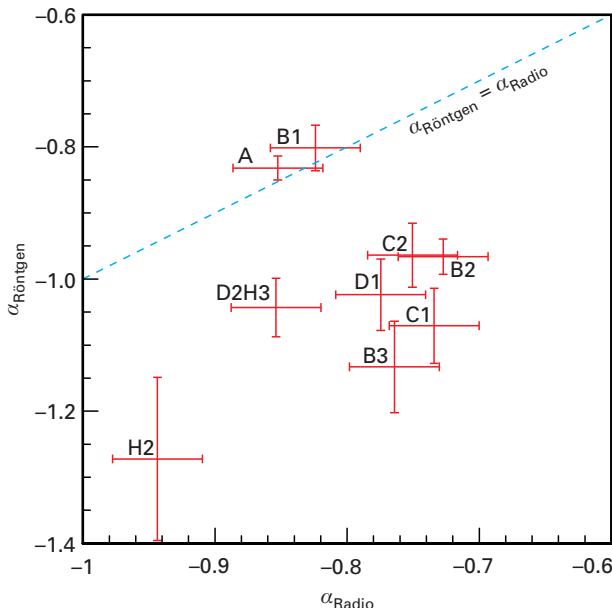


Abb. II.8.4: Die Spektralindizes für den Radio- und Röntgenbereich in den neun Jetknoten.

Geschwindigkeitsgradient würde sich auf die Inverse Compton-Emission auswirken. In diesem Fall wäre der hochrelativistische Innenteil für die Röntgenemission verantwortlich, während die Synchrotronemission mit geringerer Energie im Randbereich entsteht. Die Strahlungsvorgänge wären in einem solchen Fall schwer vorhersagbar. Eine Abschätzung zeigt aber, dass die Strömungsgeschwindigkeit des Jetmaterials im Zentralbereich extrem relativistisch sein müsste. Abschätzungen für den aus der Speziellen Relativitätstheorie bekannten Lorentz-Faktor liegen zwischen 50 und 100, was für solche Jets nicht plausibel erscheint. Außerdem benötigt das Inverse Compton-Modell sehr spezielle Annahmen, um zu erklären, dass das Spektrum im Röntgenbereich einen »weicheren« Verlauf besitzt als im Radiobereich.

Das reine Synchrotronmodell kann unter der Annahme eines transversalen Geschwindigkeitsgradienten die Beobachtungsdaten einfacher erklären. In diesem Fall erzeugen energieärmere Teilchen im Zentralbereich die Radio-Synchrotronstrahlung, während magnetische

Effekte in den Geschwindigkeitsgradienten des Randbereichs hochenergetische Teilchen erzeugen, die Röntgen-Synchrotronstrahlung abstrahlen.

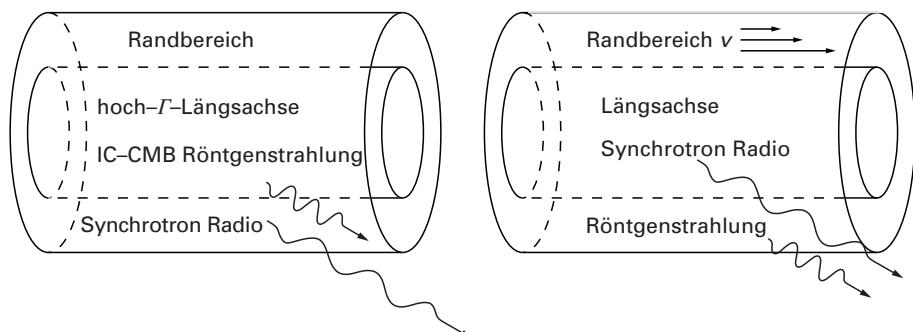
Beobachtungen mit HUBBLE und SPITZER

Mit HUBBLE wurde die Wellenlängenabdeckung im UV-Bereich auf 150 nm erweitert. Damit ließ sich überprüfen, ob die spektralen Abweichungen im optischen Bereich tatsächlich von derselben Komponente erzeugt werden wie die Röntgenstrahlung. Eine weitere Möglichkeit, die Vorgänge im Jet von 3C 273 zu entschlüsseln, boten Beobachtungen mit dem Infrarotteleskop SPITZER bei vier Wellenlängen zwischen 3.6 und 8 μm , die unter der Leitung von Astronomen der Universität Yale gewonnen und ausgewertet wurden. Die Abstände zwischen den Emissionsknoten von etwa 1'' sind etwas geringer als das Auflösungsvermögen des Teleskops. Intensitätsfits an die Helligkeitsverteilung entlang der Jetachse ermöglichten aber eine Photometrie der Jetknoten.

Wie Abb. II.8.3 zeigt, füllten die SPITZER-Daten eine kritische Lücke in der spektralen Energieverteilung aus. Die Messpunkte bei den zwei Wellenlängen 3.55 und 5.73 μm (entsprechend Frequenzen von 5.2 und $8.5 \times 10^{13} \text{ Hz}$) liegen in einem Bereich, in dem die Verteilung steil abknickt. Deutlich ist hier wieder das unterschiedliche Verhalten der Knoten A und B1 im Vergleich zu dem von C1, C2 und D1 erkennbar: Diese beiden inneren Knoten strahlen intensiv im Röntgenbereich, die restlichen vornehmlich im mittleren Infrarot.

Sehr schön erkennbar ist hier auch, wie in A und B1 die spektrale Energiedichte vom Radio- bis zum Infrarotbereich ansteigt und bei etwa $5 \times 10^{13} \text{ Hz}$ einen Cutoff besitzt. Die Hochenergiekomponente verläuft daran anschließend stetig vom Optischen bis zum Röntgenbereich bei 10^{17} bis 10^{18} Hz . Auch die äußeren Knoten weisen einen Cutoff auf, doch steigt die Energiedichte zum Röntgenbereich nicht mehr an.

Abb. II.8.5: Zwei-Komponenten-Modelle für die Inverse Compton-Emission der kosmischen Hintergrundstrahlung (*links*) und für die Synchrotronemission (*rechts*).



Die neuen Daten in den verschiedenen Spektralbereichen deuten darauf hin, dass die Radiostrahlung, das infrarote und optische Licht sowie die Röntgenstrahlung nicht unabhängig voneinander erzeugt werden. Vielmehr wird die gesamte vom Jet emittierte Strahlung von ultraenergiereichen Teilchen als Synchrotronstrahlung abgegeben. Wie von den beteiligten MPIA-Wissenschaftlern vor einigen Jahren vorgeschlagen, wird dabei ein gewisser Teil der Emission im infraroten, optischen und ultravioletten Bereich von derselben Teilchenpopulation erzeugt wie die Röntgenstrahlung, in den Knoten A, B1 und B2 sogar mindestens die Hälfte.

Die hohe optische Polarisation in diesen Knoten wurde ursprünglich so interpretiert, dass dieselbe Teilchenkomponente sowohl Radio- als auch optische Synchrotronstrahlung erzeugt. Die neuen Daten legen aber den Schluss nahe, dass die optische Polarisation auch die der Röntgenkomponente widerspiegelt, die damit höchstwahrscheinlich auch Synchrotronstrahlung ist.

Das Inverse Compton-Modell der kosmischen Hintergrundstrahlung ist damit zwar nicht eindeutig widerlegt, aber die physikalischen Bedingungen, die herr-

schen müssten, um die Daten zu erklären, erscheinen eher unrealistisch. Auf jeden Fall aber müssen zwei Teilchenpopulationen existieren, um die spektralen Energieverteilungen insbesondere der äußeren Knoten zu erklären. Räumlich hochauflöste Polarimetrie mit dem HUBBLE-Teleskop könnte diese letzten Zweifel ausräumen.

*Sebastian Jester, Klaus Meisenheimer.
Beteiligte Institute:
Smithsonian Astrophysical Observatory,
Cambridge USA);
MIT Kavli Institute for Astrophysics
and Space Research, Cambridge (USA);
Yale University, New Haven;
Stanford University, Stanford;
Southampton University, Southampton;
NASA/GSFC, Greenbelt;
ISAS/JAXA, Kanagawa;
University of Tokyo, Tokio;
Osservatorio Astronomico di Brera, Milano*

III. Ausgewählte Forschungsgebiete

III.1 Junge extrasolare Planeten

Eines des spannendsten Gebiete der heutigen Astronomie ist die Erforschung von Planetensystemen jenseits unseres eigenen Sonnensystems. Mit der Entdeckung der ersten extrasolaren Planeten vor etwa zehn Jahren begann eine neue Ära. Das MPIA ist an mehreren Programmen beteiligt, die sowohl der Entwicklung modernster Messinstrumente als auch der Suche nach extrasolaren Planeten und ihrer Untersuchung gewidmet sind.

Die ersten extrasolaren Planeten, die man entdeckte, befanden sich auf Umlaufbahnen um Sterne, die sich sehr von unserer Sonne unterscheiden und als Pulsare bekannt sind. Der Nachweis des ersten extrasolaren Planeten eines sonnenähnlichen Sterns im Jahre 1995 durch die Genfer Gruppe gehört sicherlich zu den wichtigsten Entdeckungen des letzten Jahrhunderts. Im Anschluss an diesen Erfolg sind bis heute mehr als 200 weitere extrasolare Planeten sonnenähnlicher Sterne gefunden worden. Überraschenderweise sind viele dieser Planeten Riesenplaneten, die ihren Zentralstern auf sehr engen Bahnen und in nur wenigen Tagen umkreisen. Auch wurden Planeten auf sehr exzentrischen und auf resonanten Umlaufbahnen entdeckt. Die meisten bisher gefundenen Planetensysteme unterscheiden sich sehr von unserem Sonnensystem. Bislang gibt es noch keine klar umrissene Erklärung, wie solche Planetensysteme entstanden sind. Scheibenentwicklung, Planetenmigration und Wechselwirkungen zwischen den Planeten spielen sicherlich eine Rolle bei der Erklärung

Abb. III.1.1: Das Logo des Planetensuchprogramms ESPRI (Exoplanet Search with PRIMA)



der Vielfalt von Planetensystemen. Inzwischen gelang mit der Radialgeschwindigkeitsmethode der Nachweis kleinerer Planeten mit neptunähnlichen Massen, während es die Durchgangsmethode ermöglichte, die Dichte von Riesenplaneten zu bestimmen. Beobachtungen von Mikrolinsenereignissen lieferten Hinweise auf Planeten mit Massen nahe der Erdmasse.

Die meisten Zentralsterne von Planeten sind sonnenähnlich. Nur sehr wenige Objekte, deren Massen, Atmosphären und Entwicklungsstadien sich von denen der Sonne unterscheiden, sind auf Planeten hin untersucht worden. Insbesondere gibt es noch keine überzeugenden Hinweise auf planetare Begleiter junger Sterne. Diese wären jedoch sehr wichtig, um die Entstehung von Planeten zu verstehen. Künftige Entdeckungen junger Planeten werden sicherlich wichtige Einschränkungen für die Theorien zur Planetenentstehung liefern.

Planetensuchprogramme am MPIA

Zur Zeit gibt es viele Planetensuchprogramme und Instrumentierungsprojekte, die alle zur Verfügung stehenden Techniken verwenden – vom Nachweis von Durchgängen der Planeten vor ihren Zentralsternen bis zu Direkaufnahmen. Die Mehrzahl der extrasolaren Planeten sind mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt worden.

Das MPIA ist an einer Reihe großer Planetensuchprojekte beteiligt, indem es sowohl Instrumente bereitstellt als auch wissenschaftliche Projekte durchführt. Mit dem am VLT installierten Adaptiven Optiksystem NACO und seinem neuen Zusatzgerät für differentielle Abbildung haben wir eine umfassende Abbildungsdurchmusterung nach substellaren Begleitern durchgeführt. Diese Technik lieferte das größte bislang mit bodengebundenen Beobachtungen erzielte Kontrastverhältnis. Erst vor kurzem haben wir an der Aufnahme des ersten Spektrums eines Riesenplaneten mit dem Weltraumteleskop SPITZER mitgewirkt. Hierbei haben wir auch untersucht, welche Beziehung zwischen dem Vorhandensein von Planetensystemen und Asteroiden- und Kuiper-Gürteln besteht, und so die Gesamtstruktur von Planetensystemen erforscht.

Eine viel versprechende Methode zum Nachweis extrasolärer Planeten ist Astrometrie höchster Präzisions (10 Mikrobogensekunden). Das MPIA ist an einem internationalen Konsortium beteiligt, das die differentiellen Verzögerungsstrecken und die astrometrische

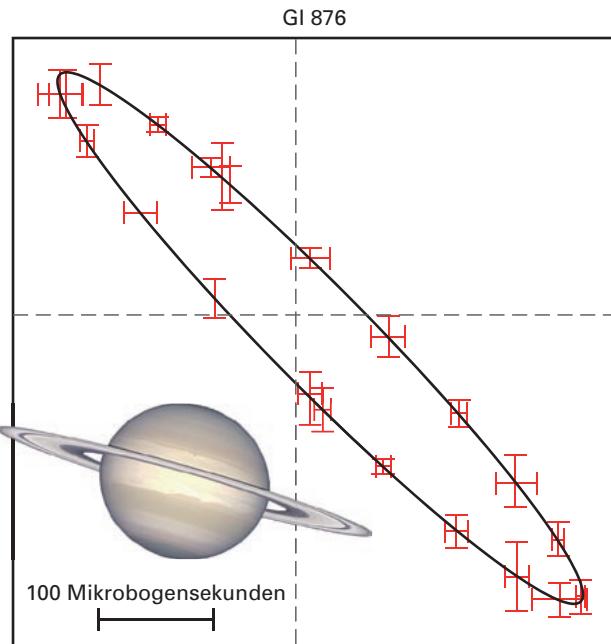


Abb. III.1.2: 30 Positionsbestimmungen des Sterns GI 876 innerhalb von 10 Jahren mit einer Messgenauigkeit von 10 Mikrobogensekunden pro Messpunkt.

Datenreduktionssoftware für PRIMA (Phased Referenced Imaging and Microarcsec Astrometry) am VLTI (Very Large Telescope Interferometer) baut. Das Astrometrie-Instrument PRIMA wird auf dem Paranal-Observatorium der Eso zwei Hilfsteleskope des VLT verwenden. Als Gegenleistung für seine Arbeit erhält das Konsortium garantierte Beobachtungszeit für die Durchführung eines großen, systematischen astrometrischen Planetensuchprogramms mit PRIMA (ESPRI: Exoplanet Search with PRIMA). Das MPIA ist leitender Partner für die vorbereitenden Beobachtungen für ESPRI.

Die spektakulärste Methode zum Auffinden extrasolarer Planeten ist sicherlich die direkte Abbildung. Das MPIA ist an dem Instrumentierungsprojekt zur Direktaufnahme von Planeten namens SPHERE (Spectroscopic and Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) beteiligt. Dabei handelt es sich um ein Instrument der zweiten Generation für das VLT, das aus einem extremen adaptiven Optiksystem (XAO), einem im Visuellen arbeitenden differentiellen Polarimeter, einem Integralfeld-Spektrographen und einer vielseitigen differentiell abbildenden Nahinfrarot-Kamera mit Spektrometer besteht. Das Projekt SPHERE, das allein für Beobachtungen mit hohem Kontrast bestimmt ist, wird in der Lage sein, einen 10 Millionen Jahre alten Planeten mit Jupitermasse bis hinab zu Abständen von 0.2 Bogensekunden um einen 40 pc entfernten M_{\odot} -Stern und einen Planeten von 10 Jupitermassen bis hinab zu 0.1 Bogensekunden um einen eine Milliarde Jahre alten M_{\odot} -Stern in 10 pc Entfernung zu entdecken. Das MPIA ist Co-PI-Institut des SPHERE-Konsortiums mit

einem Gesamtanteil zwischen 10 % und 15 % an diesem Projekt.

Neben den Projekten zur Astrometrie und zur Direktabbildung wird am MPIA ein Instrument zur Planetensuche nach der Durchgangsmethode mit dem 1-m-Wise-Teleskop in Israel entwickelt (Projekt LAIWO). Weiterhin leitet das Institut eine Durchmusterung zur Suche nach Durchgängen großer Exoplaneten (PAN-Planets). Das Projekt PAN-Planets ist eine Suche nach Durchgängen extrasolarer jupiterähnlicher Planeten mit dem 1.8-m-PS1-Teleskop und seiner 7 Quadratgrad abbildenden Weitfeldkamera am Lure-Observatorium in Haleakala auf der Insel Maui (Hawaii). Hauptziel dieser Durchmusterung ist die Entdeckung von mindestens 100 sehr heißen bis heißen Jupiter. Dieses Programm soll 2008 beginnen.

Suche nach jungen Planeten

Ergänzend zu unseren laufenden Instrumentierungsprojekten und Durchmusterungen (ESPRI, SPHERE und PAN-Planets) führen wir eine umfassende Überwachung stellarer Radialgeschwindigkeiten an ausgewählten nahen jungen Sternen durch, um nach substellaren Begleitern (Braunen Zwergen und Planeten) zu suchen. Diese Radialgeschwindigkeitsdurchmusterung, genannt SERAM (Search for Exoplanets with Radial-velocity At MPIA), wurde im Dezember 2003 begonnen.

Das Projekt SERAM verwendet FEROS, einen Echelle-Spektrographen am 2.2-m-MPG/Eso-Teleskop des La Silla-Observatoriums der Eso in Chile. Aufgabe dieser Durchmusterung ist die Beobachtung stellarer Radialgeschwindigkeiten und ihrer Schwankungen mit Hilfe der »simultanen Kalibration«. Das bedeutet, dass die Kalibrationsspektren gleichzeitig mit den Sternspektren aufgenommen werden. Damit werden instrumentelle Instabilitäten bei der Messung der Radialgeschwindigkeiten korrigieren. Die langfristige Messgenauigkeit der Radialgeschwindigkeit mit FEROS ist besser als 10 m/s, gemessen von Dezember 2003 bis Januar 2007 am Stern HD 10700, der uns als Radialgeschwindigkeits-Standardstern diente.

Im Gegensatz zu anderen großen Planetensuchprogrammen nach der Radialgeschwindigkeitsmethode, die sich auf die Planetensuche bei sonnenähnlichen Sternen konzentrieren, überwacht das SERAM-Projekt Radialge-

Abb. III.1.3: Das Projekt SPHERE





Abb. III.1.4: Das 2.2-m-MPG/Eso-Teleskop am Observatorium La Silla.

schwindigkeitsschwankungen bei Sternen, die sich von sonnenähnlichen Sternen unterscheiden. Insbesondere stellen aktive, besonders junge Sterne (in einem Alter von wenigen Millionen bis zu etwa 300 Millionen Jahren) die Mehrzahl der Zielobjekte dar.

Bei aktiven Sternen gibt es drei mögliche Ursachen für Schwankungen der Radialgeschwindigkeit. Diese sind (i) stellare Begleiter in Doppel- oder Vielfachsternsystemen, (ii) Inhomogenitäten an der Oberfläche wie Sternflecken (ähnlich den Sonnenflecken) oder Sternpulsationen, und (iii) substellare Begleiter: Planeten oder Braune Zwerge. Diese Ursachen können zum Beispiel durch die Analyse der Spektrallinienprofile oder durch besondere Merkmale der Radialgeschwindigkeitsschwankungen (Periodizität, Amplitude) voneinander unterschieden werden.

Stellare Begleiter erzeugen Schwankungen in den beobachteten Radialgeschwindigkeiten mit Amplituden von einigen hundert m/s bis zu km/s. Sternflecken und Sternpulsationen sind an Veränderungen der Spektrallinienprofile erkennbar, die mit der Radialgeschwindigkeit korreliert sind. Dieses Merkmal findet sich in Schwankungen der Form des Linioprofils wieder. Auf das Vorhandensein eines substellaren Begleiters kann geschlossen werden, wenn die beobachtete Radialgeschwindigkeitsschwankung weder auf stellare Begleiter noch auf Inhomogenitäten der Sternoberflächen zurückzuführen ist. Allerdings können Planeten auch in Doppel- oder Vielfachsternsystemen sowie bei Sternen mit Sternflecken vorkommen. Dies kann zusätzliche

unabhängige Messungen wie Photometrie, Astrometrie usw. erforderlich machen.

Der Nachweis von Planeten mittels der Radialgeschwindigkeitsmethode hat einige Einschränkungen. So ist sie zum Beispiel optimal nur auf kühle, langsam rotierende Sterne anwendbar. Der Hauptnachteil dieser Technik besteht darin, dass sie nicht zur Bestimmung der wahren Masse des Planeten führt. Wegen des unbekannten Neigungswinkels ermöglicht sie nur die Messung einer Mindestmasse des Planeten. Weiterhin ist die Radialgeschwindigkeitsmethode nur für Planeten auf engen Umlaufbahnen empfindlich. Sie kann auch nicht zur Messung der Größe des Planeten verwendet werden. All diese Probleme können mit Hilfe anderer Nachweismethoden gelöst werden, wie Präzisionsastrometrie, Direktaufnahmen, Suche nach Durchgängen und Mikrolinsenereignissen.

Ein Planetenkandidat bei dem nahen jungen Stern HD 70573

Während der dreijährigen Beobachtungsperiode wurden im Rahmen des SERAM-Projektes nicht nur eine Reihe spektroskopischer Doppelsterne oder Sterne in Vielfachsystemen, Sternflecken und Pulsationen in aktiven Sternen entdeckt, sondern auch mehrere Planetenkandidaten bei jungen Sternen.

Der erste große Erfolg stellte sich mit dem Nachweis eines Begleiters mit Planetenmasse bei dem Riesenstern HD 11977 ein. Dieser ist mit 1.9 Sonnenmassen ein Stern mittlerer Masse. Bis jetzt sind nur sehr wenige planetare Begleiter bei solchen Sternen entdeckt worden. Dieser Massenbereich überdeckt die Spektraltypen

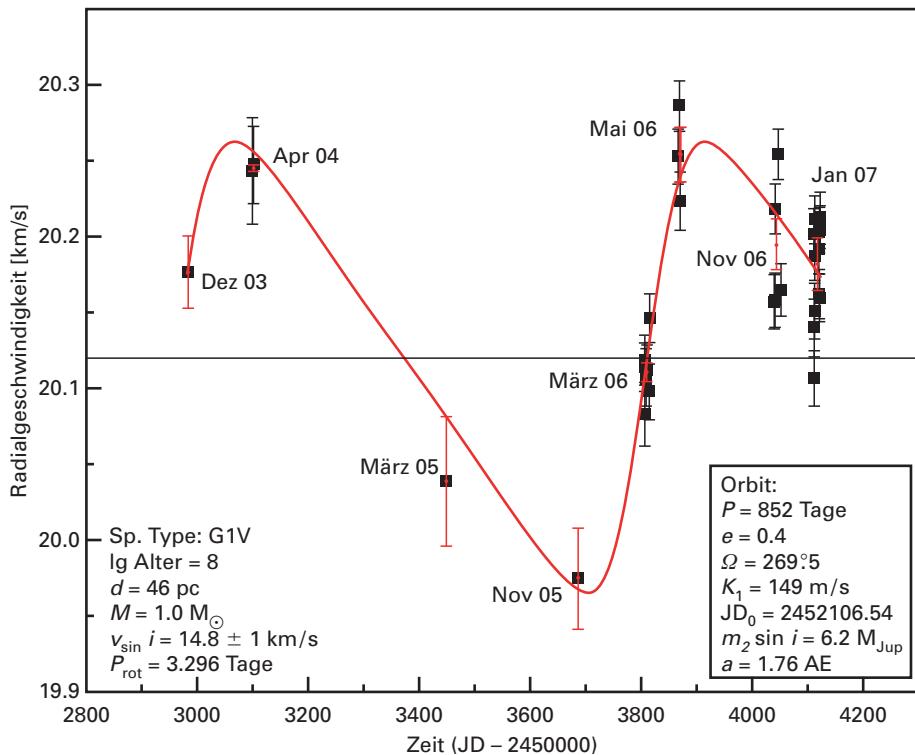


Abb. III.1.5: Die Variationen der Radialgeschwindigkeit von HD 70573, gemessen mit FEROS von Dezember 2003 bis Januar 2007.

A bis frühes F im Hauptreihenstadium. Solche Sterne können mit der Radialgeschwindigkeitsmethode nicht untersucht werden. Wenn sich der Stern jedoch bis zum Riesenstadium weiterentwickelt hat, sind präzise Messungen der Radialgeschwindigkeit möglich.

Das jüngste Ergebnis ist die Entdeckung eines Begleiters mit planetarer Masse bei dem jungen Stern HD 70573 (Abb. III.1.5). Dieser Stern gehört zur Hercules-Lyra-Assoziation, einer Gruppe von Sternen, die sich gemeinsam in Richtung des Sternbilds Hercules durch den Raum bewegen. Der Stern ist etwa 150 Lichtjahre von der Sonne entfernt. Aus unseren spektroskopischen Messungen der Äquivalentbreite der Lithiumlinie, die als Altersindikator dient, haben wir ein Alter im Bereich des Alters der Plejaden (78 bis 125 Millionen Jahre) abgeleitet. Es gelang uns auch, stellare Parameter wie Spektraltyp, Sternmasse, Effektivtemperatur und Metallhäufigkeit zu bestimmen. Wir stellten fest, dass HD 70573 eine ähnliche Masse wie die Sonne aber nur 66 % der solaren Metallhäufigkeit besitzt.

Die Radialgeschwindigkeit von HD 70573 variiert mit einer Periode von etwa 852 Tagen und einer Halbamplitude von 149 m/s. Auf einer kleineren Zeitskala von einigen Tagen entdeckten wir auch Kurzzeitschwankungen, die wahrscheinlich von Sternaktivität herrühren. Durch die Untersuchung der Form der Spektrallinien gelang es uns, die Natur der

Radialgeschwindigkeitsschwankungen zu erkennen. Wir stellten fest, dass die beobachtete Schwankung der Radialgeschwindigkeit nicht auf Sternaktivität beruht sondern eher auf einen substellaren Begleiter zurückgeht. Wir leiteten für den Begleiter eine Mindestmasse von 6.1 Jupitermassen (2×10^{27} kg) ab. Damit fällt diese Masse in den Bereich der Planetenmassen. Unsere Berechnungen ergeben eine mögliche Bahn mit einer großen Halbachse von 1.76 Astronomischen Einheiten und einer Bahnexzentrizität von 0.43.

HD 70573 ist der bislang jüngste Stern mit einem Planeten, der mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt wurde. Die Entdeckung von Planeten bei jungen Sternen liefert wichtige Einschränkungen für Theorien zur Planetenentstehung. Ein Beispiel ist der Migrationsprozess von Planeten, der in den gasreichen Phasen protoplanetarer Scheiben vorkommt. Die Entdeckung junger Planeten wird es uns auch ermöglichen, die Beziehung zwischen extrasolaren Planeten und der Struktur von Trümmerscheiben zu untersuchen. Da HD 70573 zur Stichprobe junger Sterne des SPITZER/FEPS-Legacy-Programms gehört, ist der Nachweis eines planetaren Begleiters bei diesem Stern von großem Interesse für die Untersuchung der Beziehung zwischen Trümmerscheiben und Planeten. Das Planetensystem des Sterns HD 70573 könnte dem jungen Sonnensystem ähneln, doch seine Architektur ist eine völlig andere.

Johny Setiawan, Patrick Weiske,
Thomas Henning, Ralf Launhardt,
André Müller und Jens Rodmann

III.2 Die Geburtsstätten von Planeten

Die Struktur protoplanetarer Scheiben und ihre Beziehung zu den mit ihnen entstandenen Zentralsternen ist ein zentrales Forschungsthema des MPIA. Nur ein breiter Ansatz, der Theorie und Beobachtung kombiniert, ist auf diesem Gebiet erfolgsversprechend. Deshalb haben wir im Laufe der letzten Jahre eine große Forschungsgruppe aufgebaut, die zur Untersuchung dieser Scheiben ein breites Spektrum an Beobachtungen und theoretischen Verfahren einsetzt.

In den letzten zehn Jahren ist die Frage, wie Planeten entstehen, zu einem der Schlüsselthemen der Astronomie geworden. Einer der Gründe hierfür sind die seit 1995 entdeckten mehr als 200 extrasolare Planeten in Umlaufbahnen um sonnenähnliche Sterne, die beweisen, dass unser Sonnensystem nicht einzigartig ist. Ein weiterer Grund für das gewachsene Interesse an der Planetenentstehung ist der gewaltige Fortschritt bei der Beobachtung protoplanetarer Scheiben, der Wiegen der Planeten, von denen viele junge Sterne umgeben sind. Bereits seit Mitte der neunziger Jahre hat das Weltraumteleskop HUBBLE spektakuläre Aufnahmen solcher Scheiben geliefert. Gleichzeitig wurden mit Teleskopen wie dem Very Large Telescope Interferometer (VLTI) in Chile, ausgerüstet mit neuen Infrarotinstrumenten, etwa dem am MPIA gebauten MIDI (Mid-infrared interferometric instrument), Infrarotsichten dieser Scheiben mit niemals zuvor erreichter räumlicher Auflösung gewonnen. Wir können nun die »erdbildende Zone« in einer protoplanetaren Scheibe um nahe junge Sterne direkt beobachten und untersuchen. Und mit dem Infrarot-Spektrographen IRS an Bord des Weltraumteleskops SPITZER, der den Wellenlängenbereich von 5 – 37 Mikrometer abdeckt, wurden Infrarotspektren von so schwachen Objekten wie Brauner Zwergen (mit Sternmassen $M_* \leq 0.08 M_\odot$) bis zu so hellen Objekten wie Herbig-Ae-Sternen (mit Sternmassen $M_* \approx 2 M_\odot$) aufgenommen, womit fast der gesamte stellare Massenbereich abgedeckt ist. Schließlich wurden auch mit Submillimeter-Teleskopen wie der Anlage auf dem Plateau de Bure bei einer Reihe junger protoplanetarer Scheiben die thermische Strahlung von Staub sowie verschiedene Moleküllinien untersucht. Diese und viele andere Beobachtungen haben Hinweise auf den aktuell ablaufenden Prozess der Zusammenballung von Staubteilchen zu größeren Ansammlungen geliefert – die ersten kleinen Schritte auf dem langen Weg der Planetenbildung in diesen Scheiben. Als Ergebnis haben wir heute eine viel bessere Vorstellung als noch vor wenigen Jahren, wie diese »Proto-Sonnensysteme« entstehen, welche Struktur sie haben, wie sie sich entwickeln, und was letztlich zu ihrer Auflösung führt.

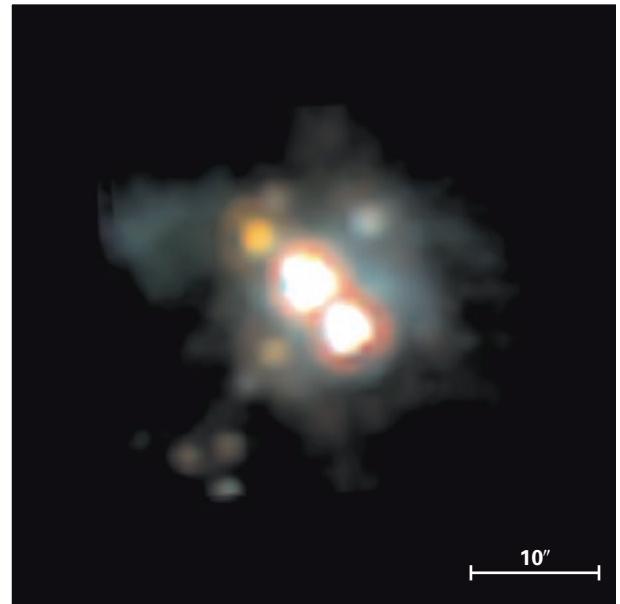


Abb. III.2.1: Eine mit dem Weltraumteleskop SPITZER gewonnene, aus drei Farben zusammengesetzte Abbildung der Region um die FU-Orionis-ähnlichen Stern-Scheibe-Quellen RNO 1B/1C, aufgenommen mit der IRAC-Kamera bei 3.6, 4.5 und 8.0 μm . Dieses Bild zeigt, dass Stern-Scheibe-Quellen vom FU-Orionis-Typ zusammen mit tief eingebetteten Quellen der Klasse 0/I vorkommen – ein Hinweis, dass FU-Orionis-Objekte extrem junge Stern-Scheibe-Systeme sind.

Die Abteilung Planeten- und Sternentstehung am MPIA ist sehr aktiv an der Untersuchung dieser protoplanetaren Scheiben beteiligt. Ihr Ziel ist es, mit einem umfassenden Ansatz ein Bild der gesamten Entwicklung zu liefern: vom Kern einer kollabierenden protostellaren Wolke über die Bildung und zeitliche Entwicklung einer Scheibe bis hin zu einem voll ausgebildeten Planetensystem. Dazu werden sowohl umfangreiche Beobachtungskampagnen als auch theoretische Modellrechnungen durchgeführt. Die Tatsache, dass in dieser Abteilung sowohl Theorie als auch Beobachtung stark vertreten sind, ist von großem Vorteil. Beobachtungen werden routinemäßig mit theoretischen Modellen verglichen, wodurch zum einen die Beobachtungen besser verstanden und zum anderen realistischere Modelle entwickelt werden können. In diesem Beitrag geben wir einen Überblick über die Forschungsaktivitäten dieser Abteilung, die fast das gesamte Feld der protoplanetaren Scheiben und die Untersuchung der Planetenentstehung in diesen Scheiben abdecken.

Bildung und Entwicklung der Scheiben

Protoplanetare Scheiben sind Nebenprodukte der Sternentstehung. Während aus dem gravitativ kollabierenden, rotierenden Kern einer Molekülwolke ein Stern geringer oder mittlerer Masse entsteht, führt die Erhaltung des Drehimpulses zur Ausbildung einer um den Stern rotierenden Scheibe. Magneto-turbulente Drehmomente innerhalb dieser rotierenden Scheibe erlauben anschließend, dass ein Großteil ihrer Materie auf den Stern strömt und sich dort ablagern kann (Akkretion). Zurück bleibt nach einigen hunderttausend Jahren eine Restscheibe, die allgemein protoplanetare Scheibe genannt wird. Eine solche Scheibe besteht typischerweise einige Millionen Jahre und verschwindet dann rasch, vermutlich durch eine Kombination von Akkretion, Photoverdampfung durch stellare UV-Photonen und der Umwandlung von Scheibenmaterial in ein Planetensystem. In der Abteilung Planeten- und Sternentstehung untersuchen wir die Bildung, Entwicklung und Auflösung von Scheiben sowohl aus theoretischer als auch aus beobachtender Sicht.

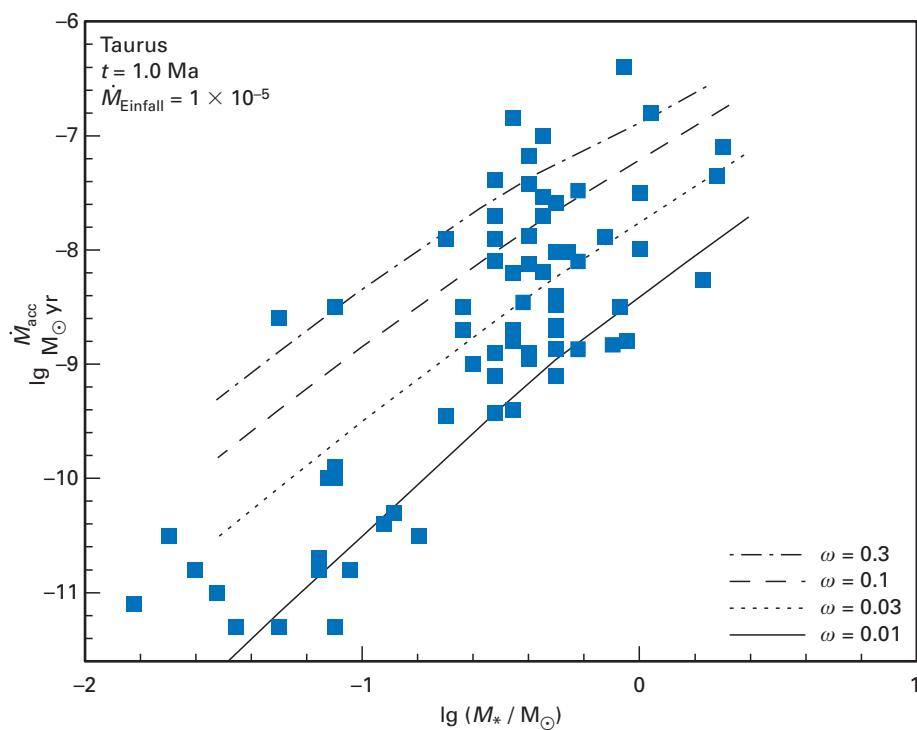
Die frühesten Entwicklungsstadien protoplanetarer Scheiben werden vermutlich von Quellen repräsentiert, die als FU-Orionis-Objekte bekannt sind. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um aus Stern und Scheibe bestehende Systeme, die sehr helle und langlebige Helligkeitsausbrüche erfahren. Der Standardtheorie zufolge werden diese Ausbrüche durch Instabilitäten verursacht, die in sehr massereichen jungen Scheiben auftreten. Dies bedeutet, dass diese Sterne möglicherweise die jüngsten bekannten Stern-Scheibe-Systeme darstellen. Einen Hinweis auf ihre Jugend haben wir kürzlich

durch eine Aufnahme eines sehr jungen protostellaren Haufens mit dem Weltraumteleskop SPITZER erhalten. (Abb. III.2.1)

Während sich die Scheiben über diese instabilen Anfangsstadien hinaus weiterentwickeln, nehmen ihre Massen und Akkretionsraten ab. In der Abteilung Planeten- und Sternentstehung entwickeln wir Modelle dieser Scheibenentwicklung, vom frühesten Entstehungsstadium über die protoplanetare Phase (eine bis einige Millionen Jahre) bis hin zur Auflösung der Scheibe. Diese Modelle liefern Vorhersagen über verschiedene beobachtbare Eigenschaften von Stern-Scheibe-Systemen, wie zum Beispiel die Akkretionsrate von Scheibenmaterial auf die Sternoberfläche in Abhängigkeit von der beobachteten Sternmasse (bei gegebenem Alter) oder in Abhängigkeit vom Alter (bei gegebener Sternmasse). Beides kann mit beobachteten Werten für Stichproben junger Sterne verglichen werden. (Abb. III.2.2)

Wie in Abb. III.2.2 a zu sehen ist, zeigen Beobachtungen, dass die Akkretionsraten solcher Sterne zwar stark streuen, aber generell grob mit der Sternmasse korreliert sind: $\dot{M} \sim M_*^2$. Stationäre (sich nicht entwickelnde) Scheibenmodelle können weder diese quadratische Abhängigkeit reproduzieren, noch eine befriedigende Erklärung für die Streuung liefern.

Abb. III.2.2a: Gemessene Akkretionsraten in Sonnenmassen pro Jahr als Funktion der Sternmasse in Sonnenmassen für eine Stichprobe junger Sterne im Taurus-Molekülwolkenkomplex. Die Linien sind Vorhersagen, getroffen mit unseren Modellen der Scheibenentwicklung für unterschiedliche angenommene Rotationsgeschwindigkeiten ω des ursprünglichen Wolkenkerns, aus dem sich diese Sterne und Scheiben gebildet haben.



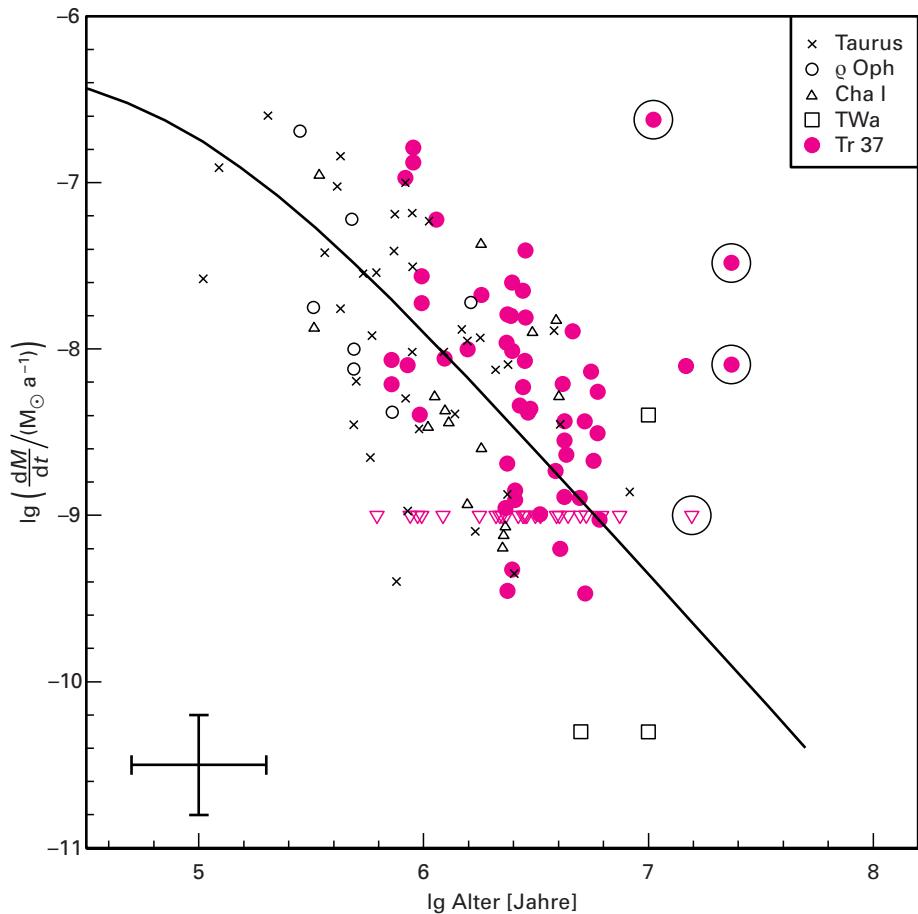


Abb. III.2.2b: Die Akkretionsrate als Funktion des Alters, gemessen für eine Stichprobe von Sternen in dem Haufen Tr 37. Durchgezogene Linie: Modellvorhersage für einen Satz von Anfangszuständen der Scheibe.

Zeitabhängige Modelle der Scheibenentstehung und -entwicklung zeigen jedoch, dass sich diese Abhängigkeit natürlicherweise als Ergebnis der sehr frühen Entstehungsgeschichte erklären lässt. Die beobachtete Streuung der Akkretionsrate \dot{M} für eine gegebene Sternmasse wird damit auf natürliche Weise als »Abdruck« der anfänglichen Rotationsgeschwindigkeit der Mutterwolke, aus der das System entstand, erklärt. Darüber hinaus lässt sich mit diesen Modellen aus einfachen Überlegungen zum Drehimpuls von Wolken unterschiedlicher Masse der Verlauf der Form $\dot{M} \sim M_*^2$ auf ganz natürliche Weise reproduzieren.

Man kann auch weitere Scheibeneigenschaften in die Untersuchung mit aufnehmen, wie zum Beispiel die Infrarot-Photometrie und -Spektroskopie solcher Quellen. Wir haben von 160 Sternen in dem 4 Millionen Jahre alten Haufen Tr 37 die Akkretionsraten, Sternmassen und spektralen Energieverteilungen im Infraroten untersucht. Wir stellten fest, dass viele der Sterne keine Scheibe mehr besitzen, wie wir es für einen Haufen dieses Alters erwarten. Die für diese Stern-Scheibe-

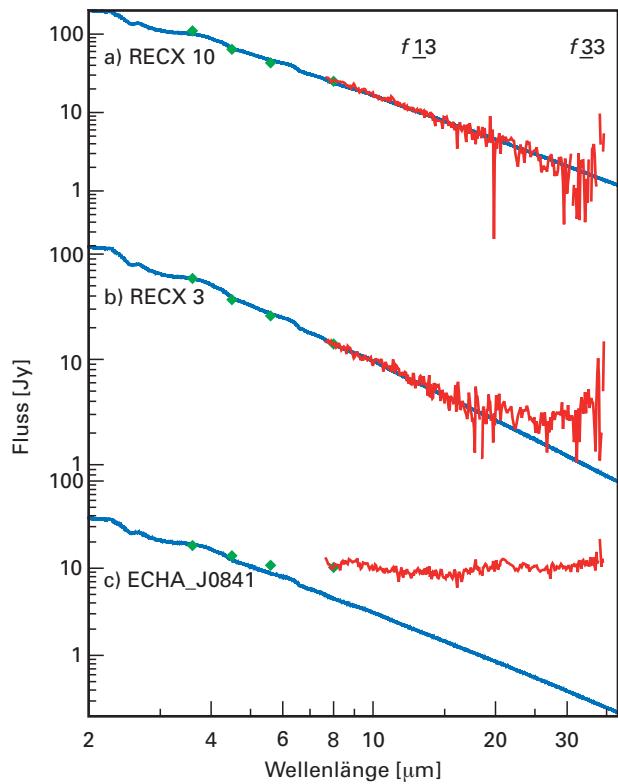
Systeme gemessenen Akkretionsraten scheinen vereinbar mit Entwicklungsmodellen für Scheiben (Abb. III.2.2 b). Interessanterweise zeigen etwa 10 Prozent dieser Objekte spektrale Energieverteilungen im Infraroten, die auf ein großes Loch im Inneren der Scheiben hindeuten. Die gesamte Materie im Umkreis von wenigen AE um diese Sterne scheint durch irgendeinen Prozess entfernt worden zu sein. Eine Vermutung ist, dass dies Scheiben sind, die kurz vor ihrer Zerstörung durch Photoverdampfung stehen: Die UV-Strahlung des Sterns brennt von der Oberfläche der Scheibe ständig Materie weg, bis die Scheibe letztlich ganz verschwindet. In der Tat sagen Modelle zur Scheibenentwicklung vorher, dass solche zentralen Löcher unmittelbar vor der Photozerstörung der gesamten Scheibe erzeugt werden.

Es gibt auch noch andere Faktoren, die das Vorhandensein und die Struktur von Scheiben beeinflussen können. Ein solcher Faktor ist die Doppelsternnatur dieser Sterne. Der Begleitstern kann durch seine Gravitation jede ursprünglich vorhandene Scheibe beeinträchtigen oder zerstören. Mit dem Weltraumteleskop SPITZER haben wir Spektren der Sterne späten Spektraltyps im etwa 8 Millionen Jahre alten Sternhaufen η Chamaeleontis aufgenommen. Da alle Sterne des Haufens gleich alt sind, können unterschiedliche Scheibeneigenschaften und Staubzusammensetzungen nicht vom Alter herrühren, sondern müssen durch andere Sterneigenschaften, wie

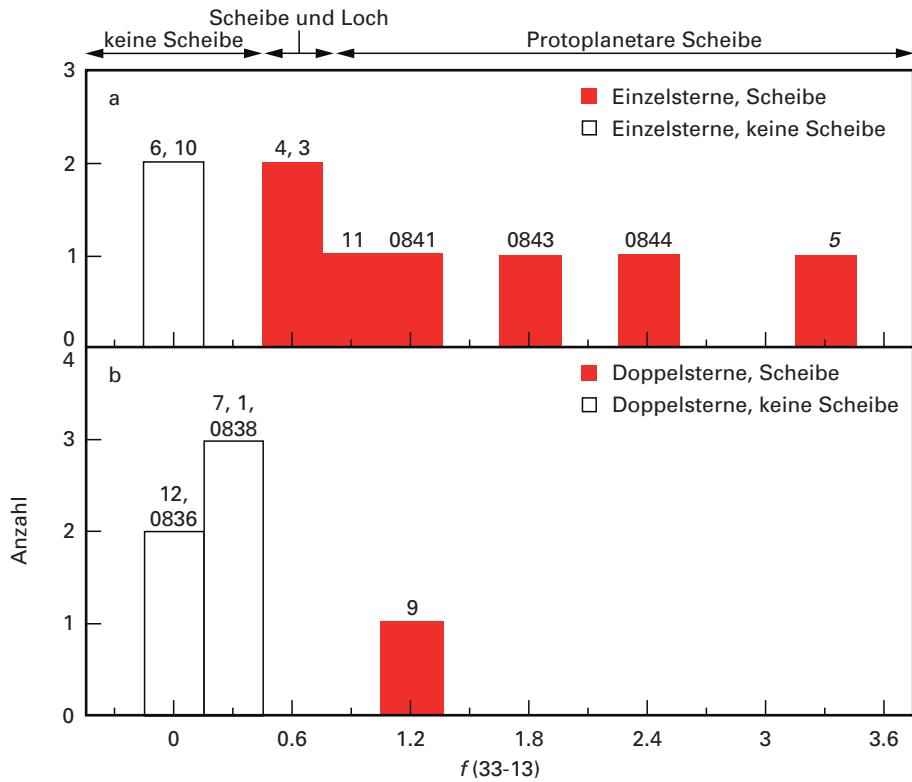
Abb. III.2.3: Spektren von Scheiben (und ihren Zentralsternen) um Einzel- und Doppelsterne im η -Chamaeleontis-Haufen. Blau: Modell des Spektrums der Sternphotosphäre. Rot: Mit SPITZER beobachtetes Spektrum. Die über die Strahlung der Photosphäre hinausgehende überschüssige Strahlung ist Scheibenstrahlung. Durch Messen des Verhältnisses der Flüsse an den gekennzeichneten Stellen ($13\text{ }\mu\text{m}$ und $33\text{ }\mu\text{m}$) lässt sich bestimmen, ob eine Scheibe vorhanden ist, und wenn ja, ob es sich um eine junge Scheibe handelt oder um eine kurz vor der Auflösung stehende Scheibe mit einem zentralen Loch.

zum Beispiel Leuchtkraft und Masse oder Doppelsternnatur, oder durch unterschiedliche Anfangsmassen der Scheiben hervorgerufen werden. Wie in Abb. III.2.3 zu sehen, existieren beträchtliche Unterschiede zwischen den spektralen Energieverteilungen der Systeme. Während in einigen die Scheiben bereits aufgelöst sind, haben andere noch immer eine massereiche, aktiv akkretierende protoplanetare Scheibe. Wir stellten fest, dass das Vorhandensein einer zirkumstellaren Scheibe zur Doppelsternnatur antikorreliert ist, wobei alle Scheiben bis auf eine mit Einzelsternen verbunden sind (Abb. III.2.4). Eine Abschätzung der charakteristischen mittleren Zeitskala, auf der eine Scheibe aufgelöst wird, ergibt ca. 5 Millionen Jahre für die Doppelstern- bzw. 9 Millionen Jahre für die Einzelsternsysteme. Die sehr viel kürzere Lebenszeit der

Abb. III.2.4: Die Häufigkeit von Scheiben unterschiedlicher Struktur um Einzel- und Doppelsterne im η -Chamaeleontis-Haufen, abgeleitet aus dem Verhältnis der bei $13\text{ }\mu\text{m}$ und bei $33\text{ }\mu\text{m}$ gemessenen Flüsse.



Scheibe in engen Doppelsternsystemen deutet darauf hin, dass die Planetenbildung, insbesondere die Bildung jupiterähnlicher Planeten nach dem Kernakkretions-Szenario, in engen Doppelsternsystemen erheblich erschwert sein könnte. Im letzten Abschnitt werden wir auf das Problem der Planetenentstehung in Scheiben näher eingehen.

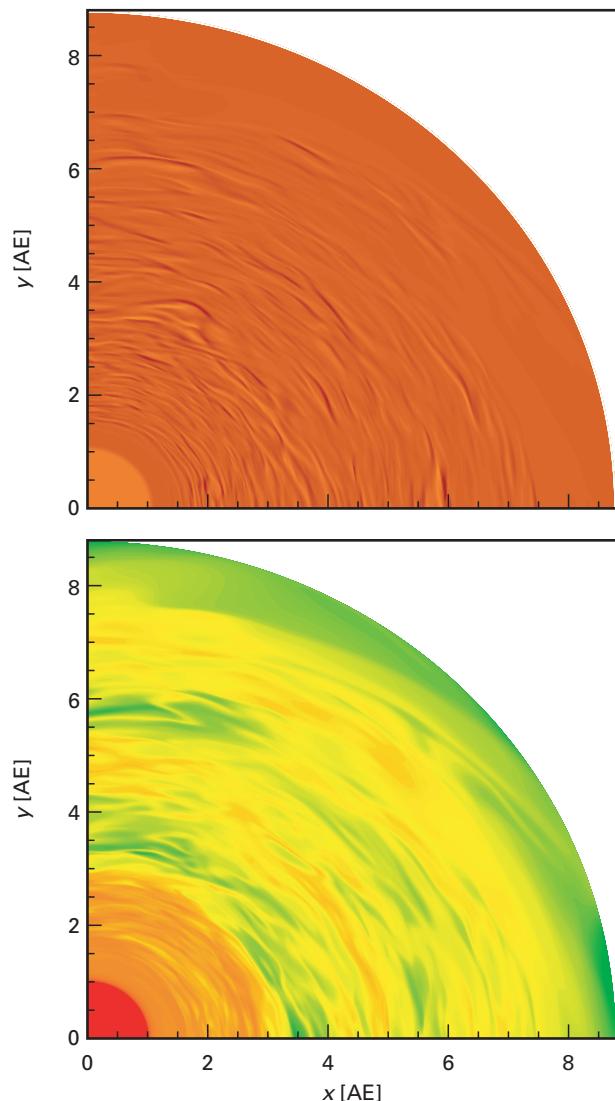


Dreidimensionale dynamische Modelle protoplanetarer Scheiben

Protoplanetare Scheiben haben eine reiche und komplizierte Struktur. Räumlich aufgelöste Bilder (siehe unten, S. 74 zeigen in den äußeren Gebieten dieser Scheiben elliptische und spiralförmige Strukturen auf Skalen von einigen hundert Astronomischen Einheiten (AE). Doch auch die inneren Regionen zeigen ein kompliziertes Verhalten. Ein Team theoretischer Astrophysiker in unserer Gruppe arbeitet an verschiedenen detaillierten numerischen Modellen der Scheibenstruktur. Wie in den Jah-

resberichten 2004 und 2005 bereits beschrieben, treffen wir Modellvorhersagen darüber, wie in diese Scheiben eingebettete Planeten deren Aussehen (so wie es künftige Millimeterwellen-Interferometer beobachten werden) beeinflussen (siehe auch Kap. II.3 dieses Jahresberichts), und modellieren die Turbulenz in solchen Scheiben. Inzwischen berechnen wir auch detaillierte strahlungs-hydrodynamische Modelle der Scheibenstruktur. Parallel dazu entwickeln wir auch einfachere zweidimensionale achsensymmetrische hydrostatische Modelle, die sich eher für den direkten Vergleich mit Beobachtungen anbieten, da sie weit weniger Computerzeit benötigen. Im Folgenden zeigen wir zwei Beispiele für unsere dreidimensionalen hydrodynamischen Modelle.

Abb. III.2.5: Wirbelbildung und Turbulenz in globalen hydromagnetischen Simulationen protoplanetarer Akkretionsscheiben. Die Zeit ist 400 Umläufe nach Beginn der Simulation. Oben: Mittelebenenschnitte der Wirbelbildung; weiß bezeichnet zyklonische, rot antizyklonische Wirbelbildung. Unten: Logarithmische Dichte in der Mittelebene; rot steht für maximale, grün für minimale Dichte.



Turbulenz in protoplanetaren Scheiben

Obwohl wir Turbulenz schon seit mehreren Jahren nach einem Scherflächenansatz untersucht haben (siehe Jahresbericht 2005), weiten wir nun diese Untersuchungen auf globale Modelle aus. Lokale Simulationen unterdrücken naturgemäß großräumige Turbulenzmoden und die Auswirkungen radialer Änderungen in der Scheibe. Nun simulieren wir mit Hilfe des ZEUS-MP-Pakets die Magnetorotationsinstabilität im globalen Rahmen. In einer ersten Untersuchung haben wir gezeigt, dass die Schichtung des radialen Drucks zu keinen merklichen Änderungen bezüglich der lokalen Analyse führt. In der Scheibe finden sich starke Schwankungen in der Wirbelverteilung (Abb. III.2.5). Diese Schwankungen haben sich als die Keimzellen für die Bildung von Planetesimalen erwiesen. Zur Zeit fügen wir die ausführliche Behandlung von Staub in die globalen Simulationen mit ein und testen die Effekte der Globalität auf die Staubdiffusion, Konzentration und Bildung von Planetesimalen.

Der innere Rand der Scheiben

Um die Vorhersagen über den so genannten »aufgeblähten« inneren Rand von Scheiben um Herbig-Ae-Sterne zu überprüfen, führen wir nun die ersten dreidimensionalen Strahlungs-Hydrodynamik-Simulationen dieser Ränder durch. Diese Simulationen schließen Anstrahlung durch das Zentralobjekt über Ray-tracing mit ein und behandeln die von den Staubkörnern herührende Strahlung im flusslimitierten Diffusionsansatz. Diese Untersuchungen bestätigen zum ersten Mal in zeit-abhängigen Hydro-Simulationen die Existenz eines inneren Rands, der einen leichten Schatten wirft, obwohl der Schatten werfende Rand nicht so stark aufgebläht ist wie von früheren Modellen vorhergesagt (Abb. III.2.6). Nun wird die langfristige Entwicklung untersucht. Wie erwartet beobachtet man in der Dichtestruktur des inneren Rands die Bildung nicht-achsensymmetrischer Moden, gekoppelt mit der Bildung antizyklonischer Wirbel. Doch das optische Erscheinungsbild ist nicht merklich anders als bei einem homogenen inneren Rand.

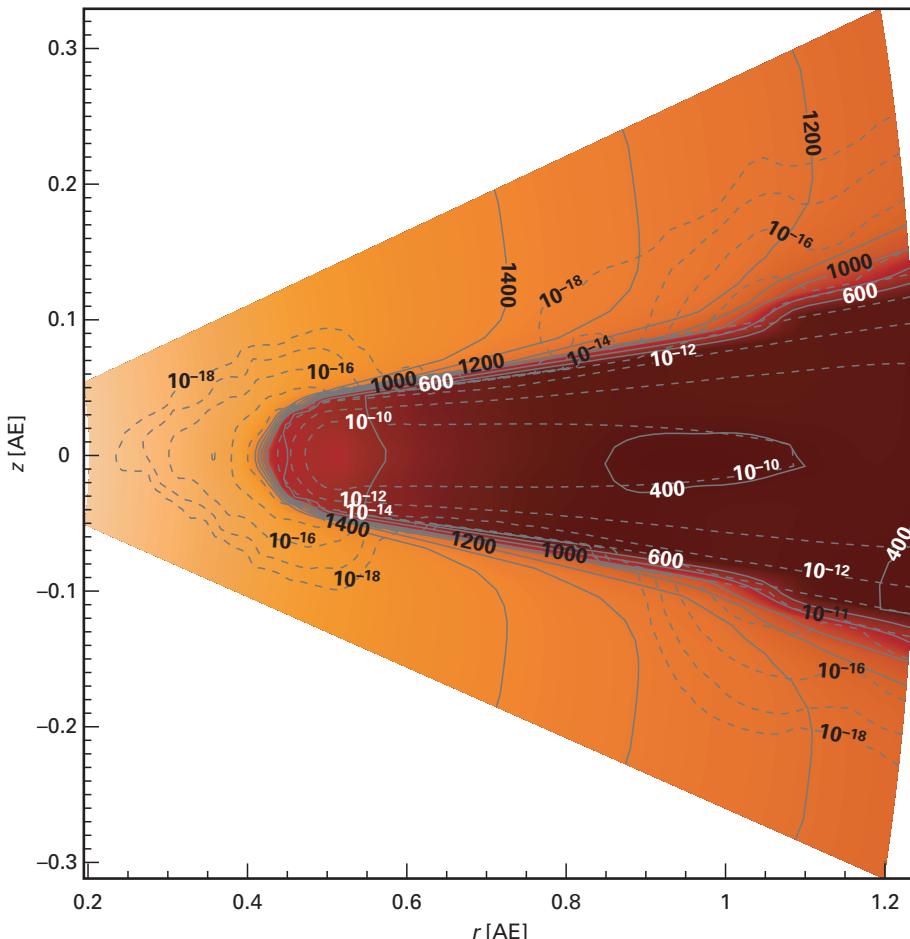


Abb. III.2.6: Senkrechter Querschnitt des inneren Staubbands einer protoplanetaren Scheibe, berechnet in einer strahlungshydrodynamischen Simulation. Farben geben die Temperatur an, ebenso durchgezogene Linien; gepunktete Linien bezeichnen die Dichte.

Gasphasen-Chemie in protoplanetaren Scheiben: Theorie und Beobachtungen

Obwohl protoplanetare Scheiben am leichtesten in der von Staubkörnern stammenden Kontinuumstrahlung beobachtet werden, besteht die Scheibe zu 99 % aus Gas. Offensichtlich ist es daher von großem Interesse, Wege zur direkten Untersuchung der Gasphase der Scheibe zu finden, um Theorien der Scheibenstruktur und Kinematik, aber auch der Gasphasenchemie in diesen Scheiben zu überprüfen. Darüber hinaus bestimmt die chemische Zusammensetzung den Ionisationsgrad in der Scheibe, der den wichtigsten Parameter bei der Regulierung der Akkretionsrate in der Scheibe darstellt. Das Gas der protoplanetaren Scheibe kann direkt durch Messung von Molekülinien untersucht werden, zum Beispiel der CO-Rotations-Vibrationslinien sowie der (Sub-)Millimeter-Rotationslinien einer breiten Palette an Molekülen, von einfachen Molekülen wie CO bis hin zu komplexeren

wie H_2CO . Die Information über die Scheibenstruktur liegt jedoch tief in diesen Emissionslinienspektren verborgen und ist häufig nicht leicht zu interpretieren. Die Modellierung der Chemie in protoplanetaren Scheiben und die anschließende Simulationen des Strahlungstransports in Molekülinien stellen einen einzigen Weg dar, die physikalischen Bedingungen sowie die Kinematik und chemische Zusammensetzung der Scheibenmaterie eng einzuschränken. Wir haben ein belastbares, dem heutigen Stand der Wissenschaft entsprechendes chemisches Modell einer sich entwickelnden protoplanetaren Scheibe erstellt, das die chemisch-dynamische Wechselwirkung zwischen verschiedenen Gaselementen sowie Staubkörnern (turbulente Vermischung) mitberücksichtigt. Im Wesentlichen wirkt die turbulente Vermischung als effizienter Mechanismus zur Desorption gefrorener Moleküle zurück in die Gasphase und als Katalysator für eine reichhaltige Oberflächenchemie, die zur Bildung komplexer (organischer) Molekülarten führt. Mit Hilfe dieses Modells war es möglich, ein rätselhaftes Beobachtungsergebnis zu erklären – die Existenz eines großen Reservoirs an sehr kaltem CO-Gas in der Scheibe um DM Tau, beobachtet von Dartois et al. (2003) (siehe Abb. III.2.7). Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen statischer (unvermischter) chemischer Modelle, in denen alle

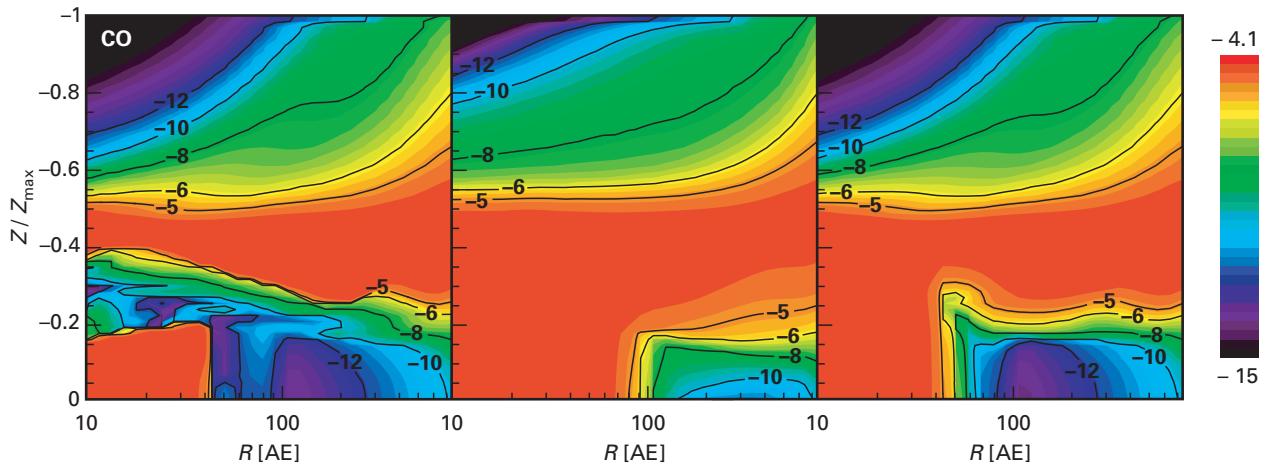


Abb. III.2.7: Chemisches Modell der protoplanetaren Scheibe um den Stern DM Tau. Die Farben geben die Häufigkeit von gasförmigem CO als Funktion des radialen Abstands vom Stern (x-Achse) und der vertikalen Höhe über der Scheibenmittelebene (y-Achse) an. Gezeigt sind die Ergebnisse für drei chemische Modelle: (links) statisches (unvermischt)

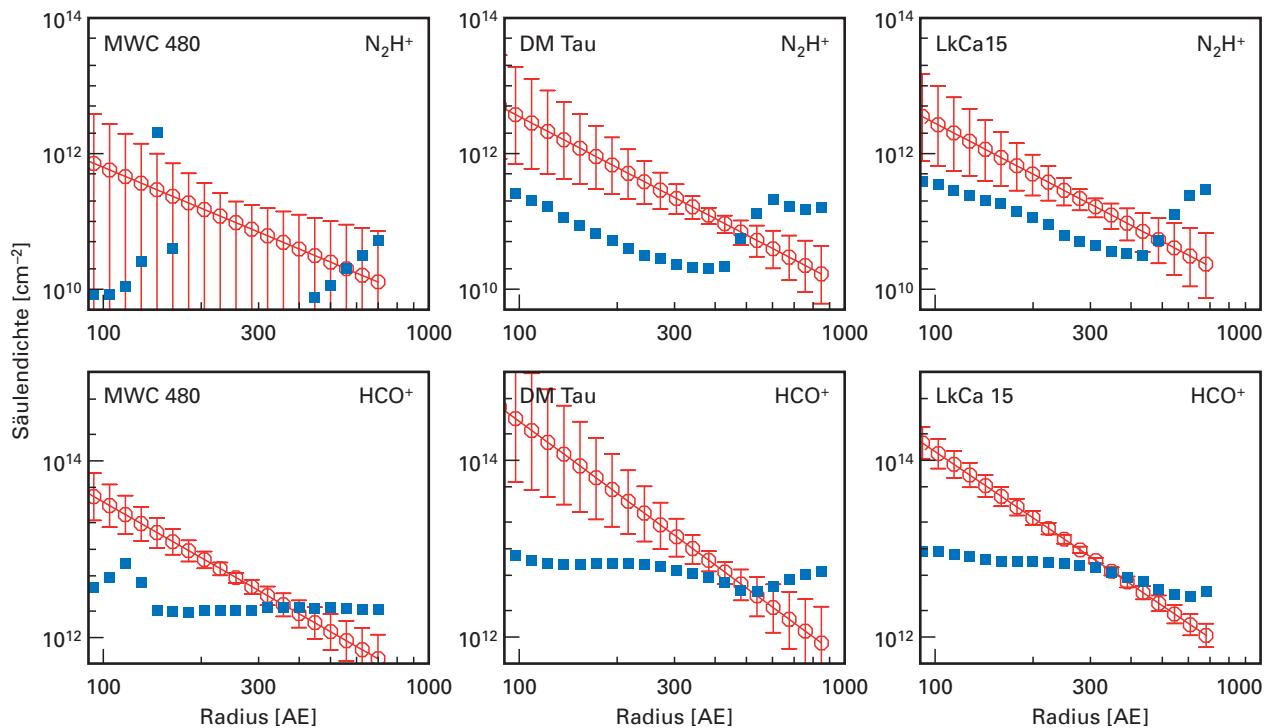
Modell, (Mitte) zweidimensionales Vermischungsmodell, (rechts) zweidimensionales Vermischungsmodell mit 100 fach reduzierter Effizienz. Man beachte, dass die Menge an CO-Gas in der kalten Mittelebene der Scheibe bei $R > 100$ AE, $z \approx 0$ nur im Vermischungsmodell deutlich erhöht ist (mittleres Diagramm).

CO-Moleküle innerhalb eines winzigen Bruchteils der Scheibenlebensdauer von einigen Millionen Jahren vollständig in der dunklen, dichten, kalten Mittelebene ($T < 20$ K) der Scheibe ausfrieren.

Im Rahmen der Kollaboration »Chemistry in Disks« zwischen dem MPIA, dem Observatoire de Bordeaux, Jena und dem Observatoire de Paris haben wir mit dem Plateau-de-Bure-Radiointerferometer zwei sonnenähnliche Sterne (DM Tau, LkCa 15) und einen massereicheren Herbig-Ae-Stern (MWC 480) beobachtet. In allen drei

Scheiben um diese Sterne haben wir Molekülstrahlung von N_2H^+ und HCO^+ nachgewiesen und zum ersten Mal die radiale Verteilung ihrer Säulendichten (die Gesamtmenge an Material in vertikaler Richtung) hergeleitet. Die beobachteten Größen wurden mit unseren

Abb. III.2.8: Beobachtete (offene Kreise) und modellierte (ausgefüllte Quadrate) radiale Verteilung der HCO^+ - (untere Reihe) und N_2H^+ -Ionen (obere Reihe) in drei protoplanetaren Scheiben: MWC 480, DM Tau und LkCa 15.



Modellvorhersagen verglichen (siehe Abb. III.2.8). Wir stellen fest, dass der Gesamtbetrag an N_2H^+ in Scheiben sehr viel geringer ist als früher berichtet und nur etwa 0.03 der HCO^+ -Häufigkeit beträgt. Wir schließen daraus, dass HCO^+ das vorherrschende beobachtbare Ion ist, das den Ionisationsgrad der Scheibe nachzeichnet, während C^+ die häufigste aber nicht beobachtbare geladene Art in Scheiben darstellt.

Zusätzlich zu Beobachtungen von Gaslinien bei (Sub-) Millimeter-Wellenlängen beobachten wir auch Scheiben in infraroten Rotations-Vibrations-Übergängen, die heißeres Gas nachzeichnen. Dazu gehören die weiter oben beschriebene Arbeit über Beobachtungen der räumlich aufgelösten Rotations-Vibrationslinie von CO wie auch Versuche, Signaturen von molekularem Wasserstoff in Scheiben zu finden.

Analysen des Staubinhalts von Scheiben mit dem Weltraumteleskop SPITZER

Der Staub in protoplanetaren Scheiben bildet zum Großteil das Rohmaterial für Planetensysteme. Dieser Staub stammt aus dem interstellaren Medium in Form submikrongroßer Körner, die hauptsächlich aus amorphen Silikaten bestehen. Sobald sie in die Scheibe eindringen, durchlaufen diese Körner verschiedene Stufen der Weiterverarbeitung. Thermische Aufheizung wandelt die Körner in Kristalle um und verändert ihre chemische Zusammensetzung. Zusammenstöße zwischen Körnern führen zur Bildung immer größerer Aggregate, was als erste Wachstumsphase im Bildungsprozess von Planeten angesehen wird. Da der Staub thermische Energie sehr viel effizienter abstrahlt kann als das Gas, beeinflussen diese Umwandlungen des Staubs auch die thermische Struktur der Scheibe selbst. Spektroskopische Untersuchungen der von der zirkumstellaren Materie ausgehenden thermischen Infrarotstrahlung haben sich als entscheidend für unser Verständnis dieser Staubumwandlungsprozesse erwiesen. Die Empfindlichkeit des Weltraumteleskops SPITZER erlaubt es, große Stichproben protoplanetarer Scheiben um sonnenähnliche Sterne zu beobachten. Durch unsere Beteiligung am SPITZER Legacy Program »Bildung und Entwicklung von Planetensystemen« (FEPS) und die Leitung mehrerer SPITZER-Programme, die in der allgemein zugänglichen Beobachtungszeit durchgeführt werden, befinden wir uns an vorderster Front der Erforschung der Entwicklung protoplanetarer Scheiben.

SPITZER-Spektroskopie von Scheiben um sonnenähnliche Sterne

Eine unserer wichtigsten Forschungsarbeiten konzentriert sich auf die Untersuchung protoplanetarer Scheiben um Herbig-Ae- und T-Tauri-Sternsysteme, die heutigen

Analoga des proto-solaren Nebels. Ein Beispiel für die SPITZER-Spektroskopie ist in Abb. III.2.9 zu sehen. Diese Spektren zeigen Mehrfach-Emissionslinien von Silikatstaubspesies. Das Diagramm oben rechts zeigt die Mehrfach-Emissionslinien von kristallinem Forsterit und Siliciumoxid, die in einigen Scheiben beobachtet werden.

Das Vorhandensein kristalliner Silikate in diesen Scheiben liefert Informationen über den Transport durch Turbulenz und die großräumige Zirkulation des Materials innerhalb der Scheibe, da der Ort in der Scheibe, wo diese Spezies entdeckt werden, gewöhnlich nicht dem Bereich entspricht, wo sich diese Kristalle gebildet haben können.

Die beobachteten Infrarotbanden liefern auch Informationen über Korngrößen: Körner kleiner als 1 μm zeigen bei 10 μm Wellenlänge eine starke Bande mit ausgeprägter Spitze, während größere Körner eine flachere und schwächere 10- μm -Bande zeigen. Eine solche Abflachung ist in den unteren Quellen im linken Diagramm der Abb. III.2.9 zu sehen. Sie zeigt, dass Körner in diesen Scheiben deutlich über die Größe der Staubkörner im interstellaren Medium hinaus angewachsen sind.

Wir können uns fragen, welche Auswirkung die Koagulation auf die Scheibenstruktur selbst haben könnte. Stark aufgeweitete Scheiben, die bei großen Radien einen merklichen Anteil der vom Zentralstern kommenden Strahlung abfangen, zeigen eine starke Emission im mittleren bis fernen Infrarotbereich mit einem Maximum um 100 μm . Abgeflachte Scheiben fangen sehr viel weniger Strahlung vom Zentralstern ab und zeigen eine einem Potenzgesetz ähnelnde spektrale Energieverteilung, die mit zunehmender Wellenlänge abnimmt. Koagulationsmodelle (siehe unten, S. 78 f.) sagen vorher, dass die Staubkörner in den oberen Schichten einer aufgeweiteten Scheibe bei Erreichen einer entsprechenden Größe aufgrund der Schwerkraft zur Mittelebene der Scheibe sinken, was zu einer abgeflachten Scheibengeometrie führt.

In Abb. III.2.9 (Diagramm unten rechts) untersuchen wir den Zusammenhang zwischen der Größe der amorphen Silikatkörper, gemessen anhand der Stärke der Silikatbande bei 10 μm , und der geometrischen Dicke der Scheibe, gemessen anhand des Verhältnisses der bei 33 μm und 24 μm gemessenen Flüsse. Mit wachsender Korngröße (abnehmender 10- μm -Bande) scheinen die Scheiben flacher zu werden (aufgezeigt durch die Steigung der spektralen Energieverteilung zu größeren Wellenlängen hin). Unsere Ergebnisse stimmen qualitativ mit den Modellvorhersagen überein und liefern einen direkten spektroskopischen Hinweis auf den Zusammenhang zwischen der typischen Größe der Staubkörner und der Scheibenstruktur. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei T-Tauri-Sternen die Scheibengeometrie durch Koagulation und Absinken der Körner zur Mittelebene bestimmt wird.

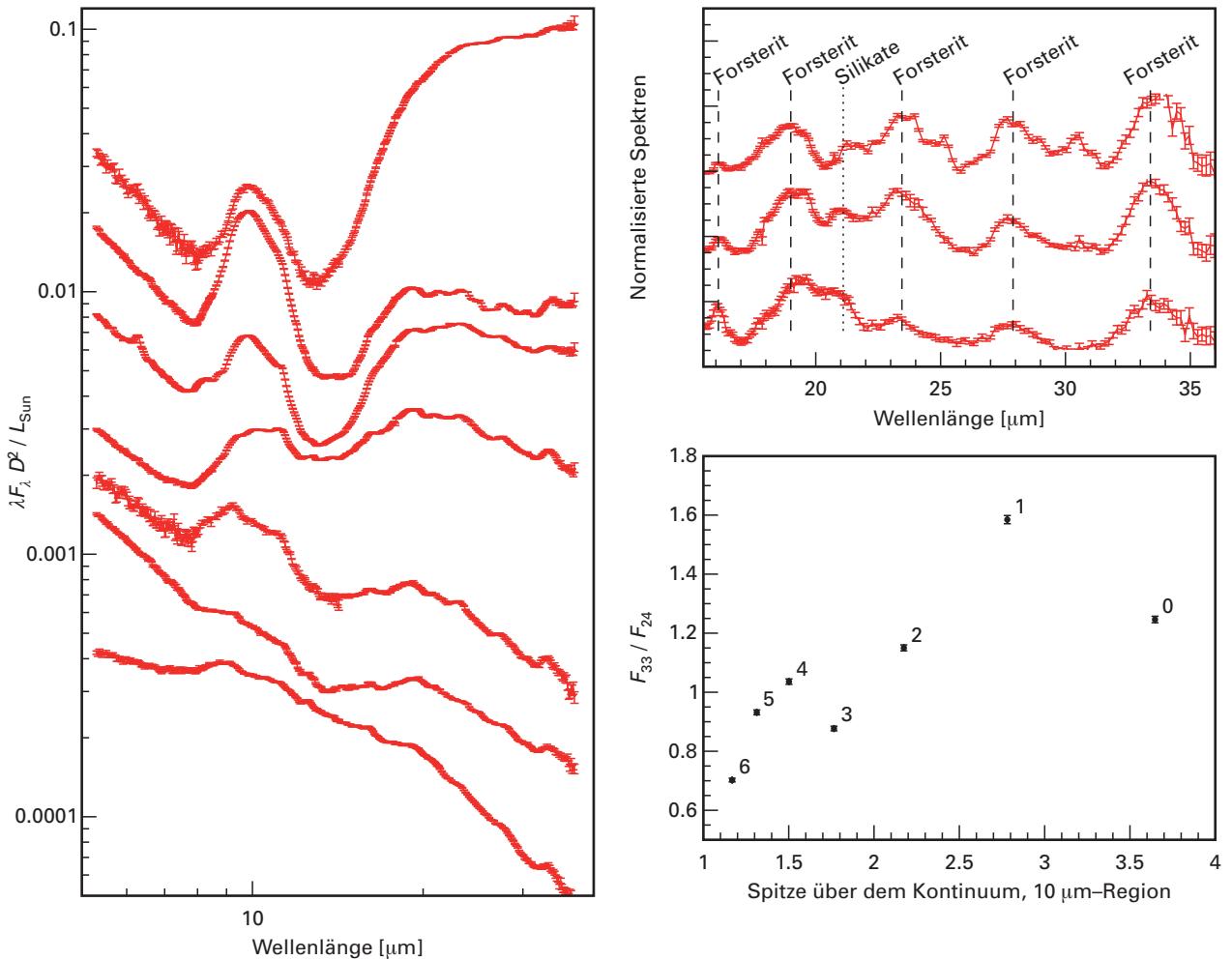


Abb. III.2.9: Beispiele für SPITZER-Spektren von Scheiben um sonnenähnliche Vorhauptreihensterne. *Oben rechts:* Die Banden von kristallinem Silikat in Spektren von T-Tauri-Sternen. *Unten rechts:* Korrelation zwischen der Stärke der 10-μm-Silikatbande, die die Korngröße misst, und der Steigung der spektralen Energieverteilung im langwirigen Bereich, welche die Aufweitung der Scheibe zum Rande hin misst.

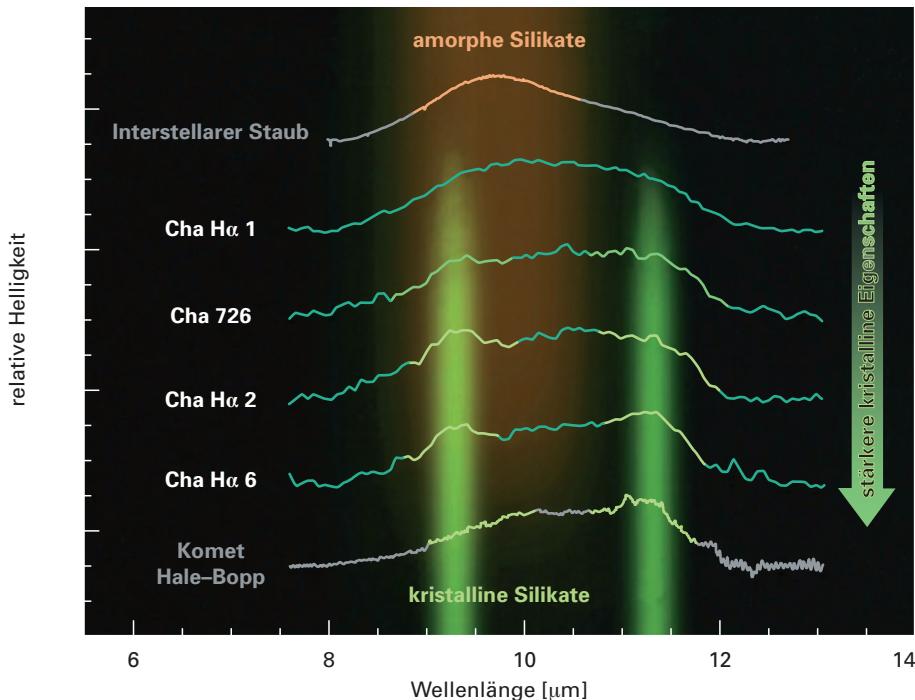
Weiterverarbeitung des Staues: auch in Scheiben um die masseärmsten Sterne

Braune Zwerge werden oft als »gescheiterte Sterne« angesehen, da sie nicht massereich genug sind, um Wasserstoff zu verbrennen. Sie nehmen den Bereich zwischen Sternen und Planeten ein. Doch in den letzten Jahren ist eine Reihe junger Brauner Zwerge entdeckt worden, die von staubhaltigen zirkumstellaren Scheiben umgeben sind, die den typischen protoplanetaren Scheiben um T-Tauri-Sterne sehr ähneln. Wissenschaftler der Abteilung Planeten- und Sternentstehung sind maßgeblich an der Entdeckung und Untersuchung dieser Scheiben beteiligt. Der Stern BD Tau 4 war der erste Braune Zwerg, bei dem Photometrie bei verschiedenen Wellenlängen (bei mittleren Infrarot- und Millimeterwellenlängen) durch-

geführt und untersucht wurde, teilweise durch Vergleich mit theoretischen Modellen protoplanetarer Scheiben. Vom gleichen Wissenschaftler-Team wurden mit dem Weltraumteleskop SPITZER auch die ersten Proben von N-Band-Spektren solcher Scheiben aufgenommen und veröffentlicht (Abb. III.2.10). Wir stellten fest, dass die Scheiben um Braune Zwerge, ganz ähnlich wie ihre massereicheren Gegenstücke, Kristalle in großen Mengen enthalten. Das deutet darauf hin, dass die gleichen Prozesse, die den Staub in protoplanetaren Scheiben um T-Tauri-Sterne verändern und wachsen lassen, auch in diesen sehr leichtgewichtigen Scheiben um sehr massearme Sterne ablaufen. Dies legt die Vermutung nahe, dass der Prozess der Planetenbildung, der eng mit dieser Staubverarbeitung verknüpft ist, möglicherweise auch in der Umgebung Brauner Zwerge stattfindet. Dies würde Braune Zwerge eher der Liga massearmer Sterne zuordnen als der Liga massereicher Planeten und somit die seit langem bestehende Frage nach der Natur dieser Objekte beantworten.

Räumlich aufgelöste Beobachtungen von Scheiben

Obwohl die Spektren von Scheiben eine Menge Information enthalten, benötigt man letztlich doch



räumlich aufgelöste Daten, um die Struktur und Zusammensetzung protoplanetarer Scheiben wirklich eng einzugrenzen.

Direktaufnahmen von Scheiben bei optischen und Infrarotwellenlängen

Wir sind an einem umfangreichen Vorhaben beteiligt, bei dem das Weltraumteleskop HUBBLE zur Beschreibung protoplanetarer und Trümmerscheiben und für die Suche nach schwachen Begleitern dieser Objekte verwendet wird. Kürzlich haben wir einen 36 AE großen Trümmerscheibenring um den F5/F6-V-Stern HD 181327 entdeckt (Abb. III.2.11). Dieser Stern gehört zu der 12 Millionen Jahre alten Beta-Pictoris-Bewegungsgruppe. Dieser Neuzugang zur wachsenden Menagerie zirkumstellarer Trümmerscheiben ähnelt in vielerlei Hinsicht dem Stern-Scheibe-System HR 4796A. Die jüngste Abbildung eines breiteren Rings um das ältere Sonnenanalogon HD 107146 lässt vermuten, dass solche Strukturen ein häufiges (wenn nicht vorherrschendes) Ergebnis des Planetenbildungsprozesses sind.

Untersuchung von Scheiben um T-Tauri-Sterne mit dem VLT-MIDI-Interferometer

Direktaufnahmen mit Infrarot- und optischen Teleskopen ermöglichen es uns nur, die äußeren Bereiche protoplanetarer Scheiben räumlich aufzulösen: die Regionen außerhalb etwa 30 AE vom Stern, was im Sonnensystem grob dem Kuiper-Gürtel entspricht. Bei nahen Quellen wie zum Beispiel TW Hydrae ist es gerade so möglich, räumliche Skalen von 5 AE zu erreichen, aber diese Quellen sind selten. Wollen wir diese proto-

Abb. III.2.10: Die erste Stichprobe Brauner Zwerge, für die mit dem Weltraumteleskop SPITZER N-Band-Spektren aufgenommen wurden. Diese Spektren zeigen, dass ähnliche Prozesse, wie sie mit den frühesten Stadien der Planetenentstehung verknüpft sind, um diese »gescheiterten Sterne« stattfinden.

planetaren Scheiben in Beziehung zum Sonnensystem setzen, so interessiert uns der Bereich, in dem sich Planeten bilden (in grob 0.5 – 30 AE Entfernung vom Zentralstern). Mit Hilfe des Infrarot-Interferometers MIDI am Very Large Telescope ist es seit kurzem möglich, Beobachtungen mit dieser extremen räumlichen Auflösung durchzuführen. Der Nachteil ist, dass man keine Bilder, sondern »nur« korrelierte und unkorrelierte Spektren erhält (oder einfacher ausgedrückt: Spektren von den inneren beziehungsweise äußeren Bereichen der Scheibe). Das aufgelöste Spektrum erforscht die Scheibe außerhalb rund 2 AE vom Stern, das unaufgelöste Spektrum innerhalb 2 AE (für typische VLT-Basislinien und eine 140 pc entfernte Quelle). Diese Methode ist an sehr hellen Sternen wie Herbig-Ae-Sternen demonstriert worden. Vor kurzem ist es uns jedoch gelungen, die Methode auf die viel schwächeren, für den Vergleich mit dem Sonnensystem auch viel interessanteren T-Tauri-Sterne anzuwenden. Diese Messungen erforschen erstmals räumlich aufgelöst die die Erde bildende Region um junge sonnenähnliche Sterne.

TW Hydrae ist eine dieser oben beschriebenen Quellen mit einem zentralen Loch, von denen man annimmt, dass es sich um eine Scheibe unmittelbar vor ihrer Zerstörung und damit am Ende ihrer planetenbildenden Phase handelt. Irgendwelche Gasplaneten müssen sich zu dieser Zeit bereits gebildet haben, da das Gas in allernächster Zukunft wahrscheinlich ent-

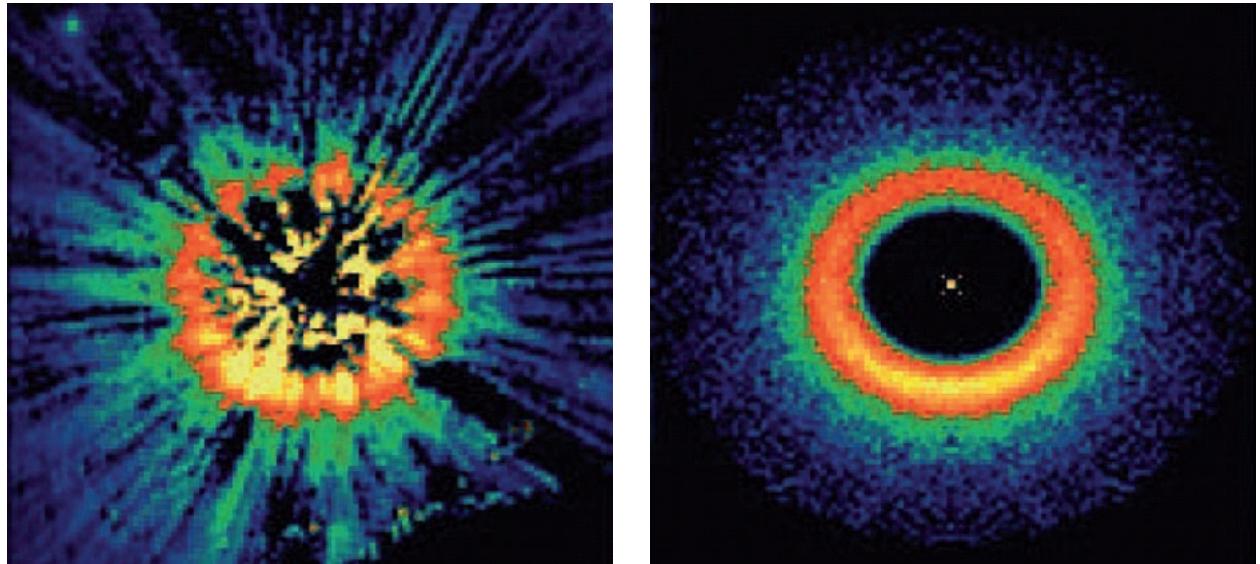


Abb. III.2.11: Zirkumstellare Trümmerscheibensysteme, mit dem HST im gestreuten Licht aufgenommen. *Links:* NICMOS-Aufnahme des Trümmerscheibensystems HD 181327. *Rechts:* Modellbild aus einer Monte-Carlo-Strahlungstransport-Berechnung. Aufnahme und Modell aus Schneider et al. (2006).

fernt werden wird. Eins der Probleme besteht darin, dass auf diese zentralen Löcher bislang nur indirekt aus dem Fehlen von Nahinfrarotstrahlung in der spektralen

Energieverteilung geschlossen wurde. Mit MIDI ist es uns gelungen, durch die kombinierte Auswertung der spektralen Energieverteilung und der Interferometriedaten zusammen mit theoretischen Modellen dieses Loch direkt aufzulösen und seine Existenz zu bestätigen (Abb. III.2.12). Wir stellten jedoch fest, dass es viermal kleiner ist als in früheren Arbeiten aus der spektralen Energieverteilung allein abgeleitet worden war.

Eine weitere mit MIDI beobachtete Quelle, RY Tau, ist ein wohlbekannter, sechs Millionen Jahre alter T-Tauri-Stern, der zu der etwa 450 Lichtjahre entfernten Taurus-

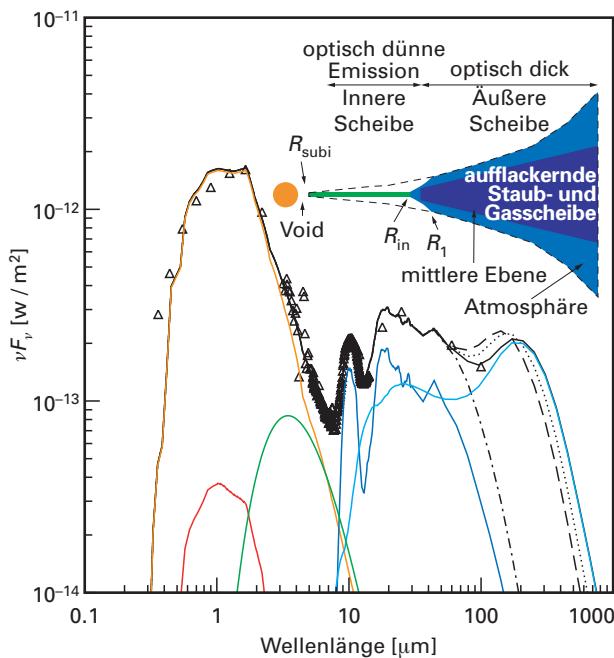
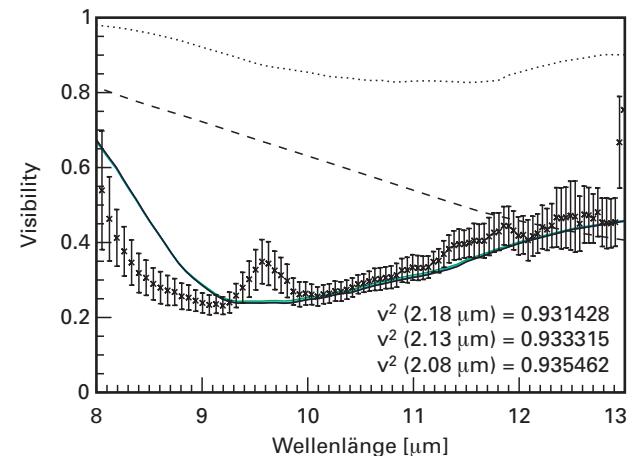


Abb. III.2.12: Auswertung der Beobachtungen des T-Tauri-Sterns TW Hydrae. *Links:* Die spektrale Energieverteilung, mit einge-



zeichnetem bestangepasstem Modell. Dieses Modell besteht aus einer optisch dicken Scheibe mit einem zentralen Loch, das mit optisch dünnem Material angefüllt ist. *Rechts:* Die mit dem MIDI-Interferometer gewonnene Visibility-Kurve. Die »Visibility« ist das Verhältnis von korreliertem Spektrum (vom Interferometer nicht aufgelöst) zu unkorreliertem Spektrum (vom Interferometer aufgelöst). Die durchgezogene Linie stellt die Modellvorhersage dar. Die anderen Linien kennzeichnen früher vorgeschlagene und jetzt ausgeschlossene Modelle.

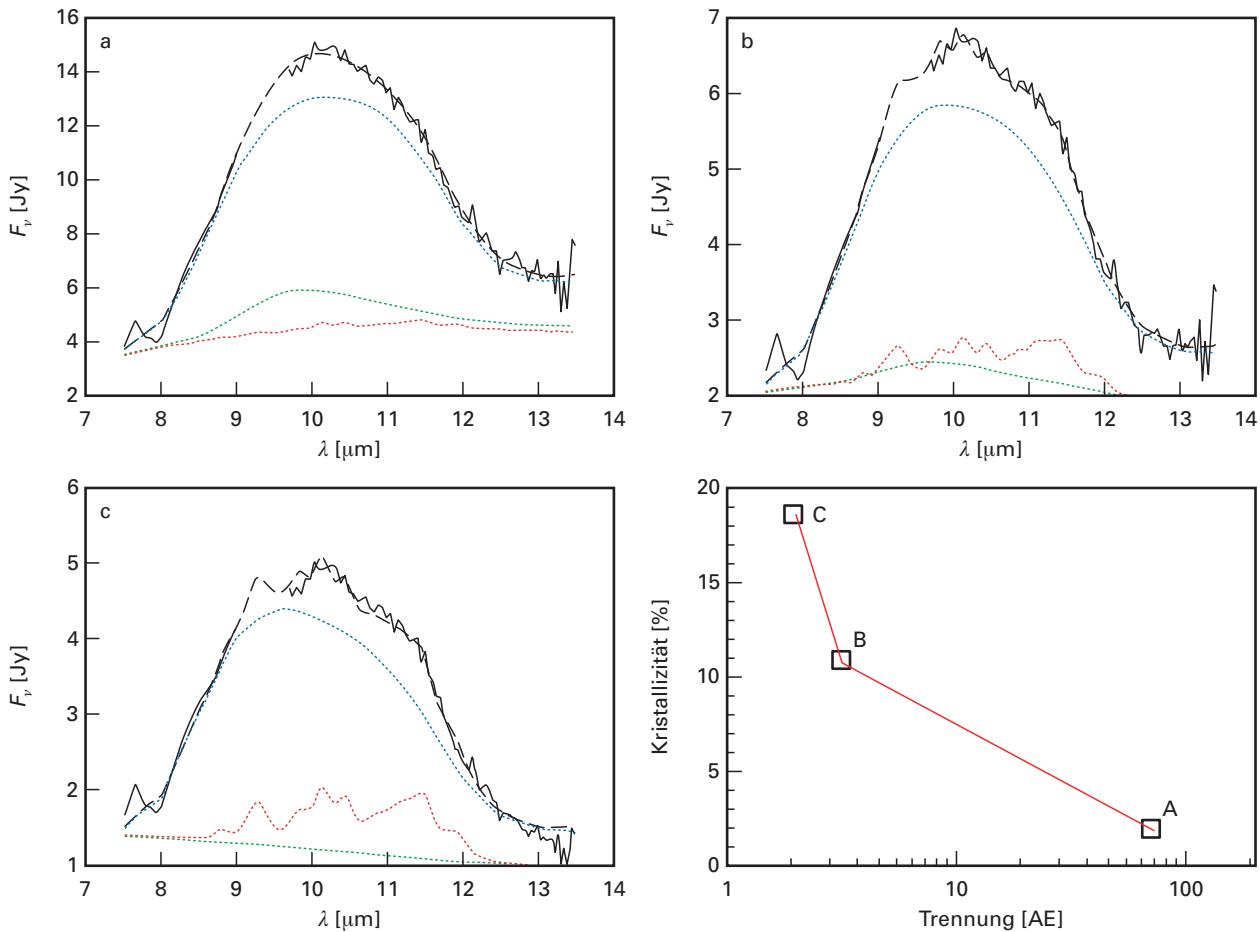


Abb. III.2.13: Drei mit MIDI aufgenommene N-Band-Spektren von RY Tau: a) Ein Spektrum der gesamten Scheibe und zwei Spektren des korrelierten Flusses der inneren Scheibe; b) korreliertes Spektrum bei einer Basislinie von 48 Metern; c) korreliertes Spektrum bei einer Basislinie von 78 Metern. Gepunktete Linien sind Modellkomponenten. Rot: kristalline Silikate, grün: 0.1 μm große amorphe Silikate, blau: 1.5 μm große amorphe Silikate. Diagramm unten rechts: Häufigkeit von Kristallen als Funktion der Position in der Scheibe, abgeleitet aus den Ergebnissen in den anderen Diagrammen.

Auriga-Molekülwolke gehört. Die Auswertung der spektralen Energieverteilung und der interferometrischen Messungen mit MIDI erfolgte durch den Vergleich mit Vorhersagen eines hydrostatischen Scheibenmodells kombiniert mit Monte-Carlo-Strahlungstransport-Rechnungen. Wie sich zeigte, war bei dem RY-Tau-System eine zusätzliche dünne Hülle nötig, um die Stärke des Flusses im nahen und mittleren Infrarot zu erklären. Mit Hilfe der MIDI-Daten war es auch möglich, die Zusammensetzung des Staubs in dieser Scheibe zu analysieren. Abb. III.2.13 zeigt die Form der Silikat-Bande bei 10 μm , der stärksten Festkörperbande im Infrarotbereich. Diese Messungen zeigen, dass der Staub näher am Stern stärker verarbeitet ist – d.h. mehr kristalline Staubspezies enthält und aus größeren Körnern besteht – als in den

äußeren Scheibenregionen. Dies wurde zuvor schon bei den hellen Herbig-Ae-Sternen beobachtet, ist jetzt jedoch auch für T-Tauri-Sterne bestätigt.

Auflösung von Scheiben bei Millimeterwellenlängen

Mit großen Interferometern für den Millimeterwellenlängenbereich können die äußeren Regionen von Scheiben auch räumlich aufgelöst werden. Im Gegensatz zu heutigen Interferometern für das mittlere Infrarot können mit Millimeter-Interferometern echte Bilder rekonstruiert werden. Der Vorteil von Beobachtungen bei diesen Wellenlängen ist, dass die Scheibe optisch dünn ist und daher die Gesamtmasse der Scheibe abgeleitet werden kann. Darüber hinaus können aus der Steigung des Spektrums in diesen Wellenlängenbereichen die Korngrößen im Bereich von 0.1 bis 10 Millimeter bestimmt werden. Damit lässt sich das Wachstum der Körner bis zu etwas größeren Größen bestimmen als mit Infrarotbeobachtungen. Wir waren und sind weiter an Beobachtungskampagnen auf diesem Gebiet beteiligt mit dem Ziel, die Eigenschaften des Staubs in den äußeren Regionen protoplanetarer Scheiben näher zu bestimmen. Unsere Aktivitäten hierzu sind im Jahresbericht 2004 beschrieben.

Modelle für das Wachstum vom Staub zu Planeten

Angesichts der großen Anstrengungen, die unternommen werden, um die Struktur von Scheiben sowohl theoretisch als auch durch Beobachtungen zu untersuchen, lautet die nächste Frage: Wie bilden sich in ihnen Planetensysteme?

Das Wachstum von Staubaggregaten in Scheiben

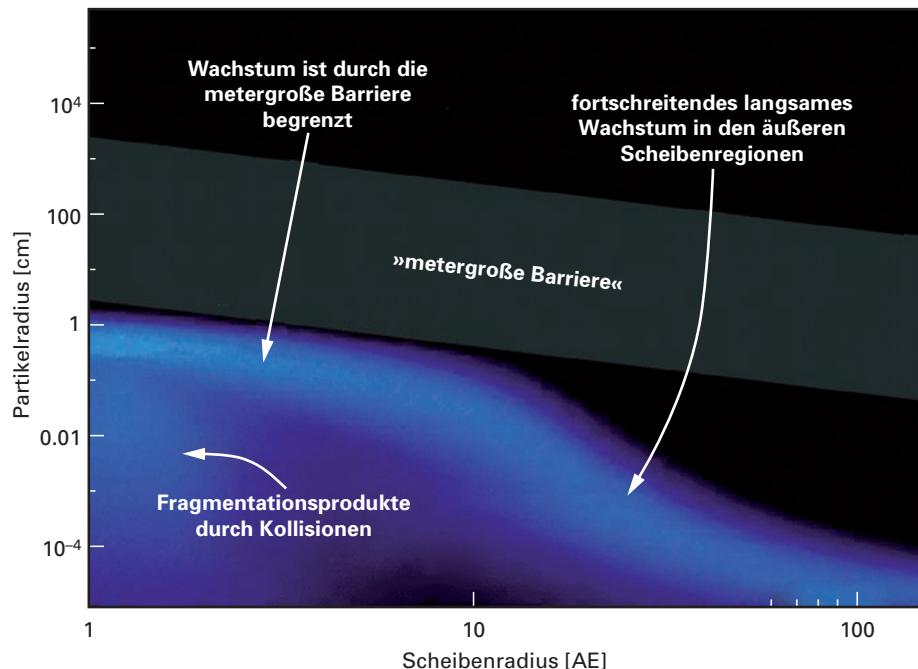
Inzwischen gibt es reichlich Beobachtungshinweise, dass sich die kleinen submikrongroßen Staubteilchen in protoplanaren Scheiben zu größeren Agglomeraten zusammenballen. Neben der Tatsache, dass dieses »Staubwachstum« der allererste Schritt auf dem Weg zur Planetenentstehung ist, beeinflusst es auch die Struktur und das Aussehen der Scheibe. In der Abteilung Planeten- und Sternentstehung sind wir bemüht, Modelle dieses Wachstumsprozesses zu entwickeln und zu erkunden, wie er sich auf die Spektren und Bilder der Scheiben auswirkt. Bis vor kurzem wurden typische Modelle der Staubaggregation in Scheiben insofern vereinfacht, als die Berechnungen in separaten Untermodellen für verschiedene Entfernung vom Stern durchgeführt wurden. Darüber hinaus war der Prozess der Aggregat-Fragmentierung, der auftritt, wenn Staubaggregate mit zu hohen Geschwindigkeiten zusammenstoßen, kaum mitberücksichtigt. Die am MPIA im Laufe der beiden letzten Jahre entwickelten Modelle enthalten ein neues und leistungsfähiges mehrdimensionales Modell des Staubwachstums, in dem die Fragmentierung von Aggregaten und die Bewegung von Staub in alle

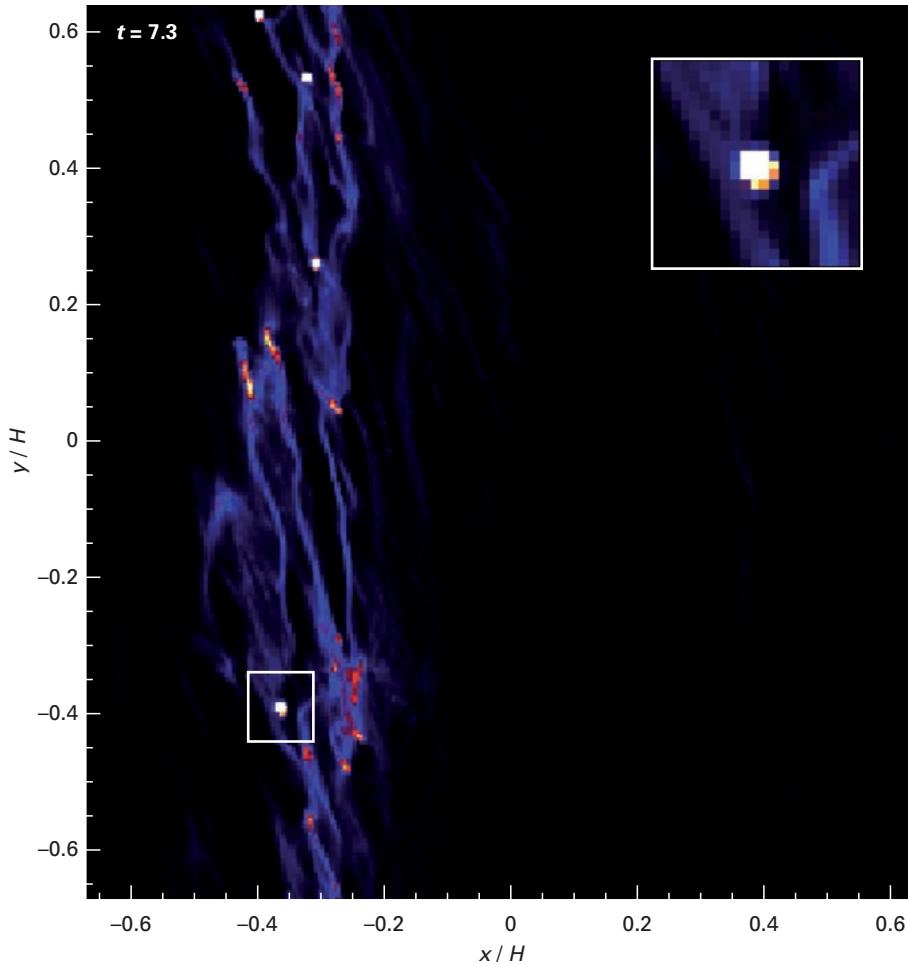
Richtungen mit eingerechnet ist. Ein Schnappschuss dieses Modells ist in Abb. III.2.14 wiedergegeben. Dabei kann man erkennen, wie das Anwachsen von Teilchen durch die so genannte »Meter-Barriere« gehemmt wird – ein Bereich von Korngrößen, in dem rasche radiale Drift und Fragmentierung durch Zusammenstöße das Wachstum behindern. Die Erkundung von Möglichkeiten, diese Meter-Barriere zu durchbrechen, ist eine unserer wichtigsten Aufgaben. Darüber hinaus bilden diese Modelle den Rahmen, in den neue physikalische Daten aus Laborexperimenten und hydrodynamischen Simulationen eingefügt werden sollen (siehe oben, S. 70). Erste Ergebnisse zeigen, dass diese Modelle beim Vergleich mit Beobachtungen die Umgebung, in welcher der Staubwachstumsprozess abläuft, stark einschränken können.

Überwinden der Meter-Barriere durch Gravitation

Eine sehr viel versprechende Möglichkeit, wie das Wachstum fester Körper die Meter-Barriere überwinden könnte, beruht auf Hilfe durch Gravitation. Wenn ein Großteil der festen Körper Größen von einigen Dezimetern erreicht, erfährt die Population dieser Brocken Instabi-

Abb. III.2.14: Größen- und Raumverteilung von Staubteilchen in einer protoplanaren Scheibe, berechnet mit dem am MPIA entwickelten Computerprogramm für Staubentwicklung. Die Blaufärbung kennzeichnet die Staubmenge an der betreffenden Stelle in der Scheibe (x-Achse) und bei der betreffenden Teilchengröße (y-Achse). Das Diagramm zeigt einen Schnappschuss 5000 Jahre nach Beginn der Simulation.





litäten in der aus zwei strömungsfähigen Medien (Gas und Festkörpern) bestehenden Mischung, die zu einem stark nicht-linearen Rückkopplungsverhalten führen. Von unserem Team durchgeführte Simulationen zeigen, dass sich unter solchen Bedingungen die Brocken zu Klumpen zusammenballen, die massereich genug sind, um durch ihre Eigengravitation gebunden zu bleiben, was zu einer raschen Bildung von Planetesimalen mit Massen von etwa 10^{-4} Erdmassen führt. Abb. III.2.15 zeigt einen Schnappschuss einer solchen Simulation, wobei das gravitativ gebundene Objekt in einer vergrößerten Ansicht zu sehen ist. Diese Simulationen waren die ersten, in denen 3-D-Hydrodynamik mit Teilchenbewegungen (einschließlich Rückkopplung mit dem Gas) und Eigengravitation kombiniert wurde.

Die Entstehung von Planeten

Angesichts der gegenwärtigen Erkenntnisse über diese Scheiben und die Frühstadien der Planetenentstehung erhebt sich die Frage, welche Art Planetensysteme sich aus solchen Scheiben bilden können. Ein in alle Details gehendes Modell dieses Prozesses ist selbst mit heutigen Computeranlagen nicht realisierbar. Klug

Abb. III.2.15: Bildung von Planetesimalen durch Eigengravitation. Das Diagramm zeigt die Säulendichte von Staubbrocken in einer protoplanaren Scheibe. Ein gravitativ gebundener Klumpen mit der Masse einiger Zwergplaneten ist aus der turbulenten Strömung auskondensiert.

ausgewählte Vereinfachungen und Idealisierung können die Komplexität jedoch drastisch verringern. Modelle solcher Art wurden in der Abteilung Planeten- und Sternentstehung entwickelt. Diese Modelle bestehen aus zwei Schritten. Der erste Schritt verfolgt die Entwicklung von Gas und festem Material von einer Frühphase, in der alle Festkörper in Form von Staub vorliegen, bis zu dem Stadium, in dem die meisten Festkörper in Form eines Planetesimal-Schwarms vorliegen. Im zweiten Schritt untersuchen wir den Bereich der Massen und Umlaufbahnen von Riesenplaneten, die sich in protoplanaren Scheiben bilden, die durch unterschiedliche Anfangsbedingungen gekennzeichnet sind. Unter Verwendung der Modelle entwickelter Planetesimalenschwärme aus Schritt 1 wird ein Monte-Carlo-Verfahren angewandt, um die Entwicklung der Masse eines Planetenkeims aufgrund der Akkretion von Gas und Planetesimalen sowie seine radiale Entfernung a vom Stern aufgrund von Gravitationswechselwirkun-

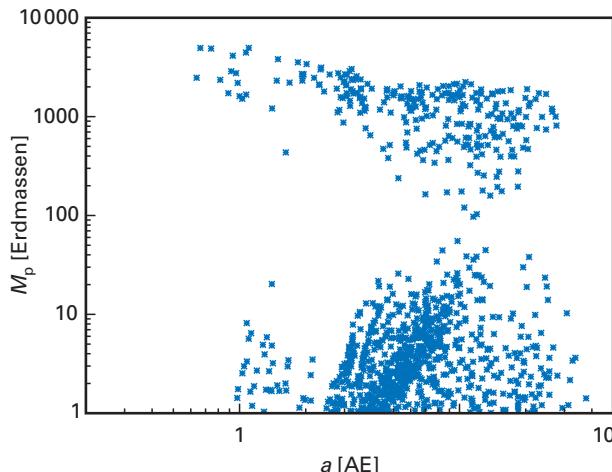


Abb. III.2.16: Die vorhergesagte Position a und Masse M_p von Planeten, die sich aus unseren Monte-Carlo-Modellen für einen Stern von einer Sonnenmasse ergeben. Effekte der Planetenmigration und Wachstum der Planeten nach Öffnung der Lücke sind mit berücksichtigt. Diese Vorhersagen können direkt mit einer a/M_p -Verteilung der bekannten Planeten verglichen werden.

gen mit der Scheibe zu berechnen. Damit lassen sich die Beziehung zwischen endgültigen Bahnradien und Planetenmassen, die im Allgemeinen möglich sind, beschreiben. Damit kann auch überprüft werden, wie sich die daraus folgende Verteilung a gegen M_p ändert, wenn verschiedene physikalische Prozesse wie Migration und Gasakkretion durch den Planeten nach Öffnung der Lücke mitberücksichtigt werden. Abb. III.2.16 zeigt ein Beispiel für solch ein Diagramm a gegen M_p .

Zusammenfassung

Es gibt noch immer viele offene Fragen bezüglich der Struktur und Bildung protoplanetarer Scheiben und wie und welche Planeten in ihnen entstehen. Nur durch die Kombination von Theorie und Beobachtung und eine umfassende Sicht auf das Thema kann man auf diesem Gebiet wirklich Fortschritte machen. Um dieses Ziel zu erreichen, hat das MPIA in den letzten Jahren eine große Forschungsgruppe eingerichtet, die einen breiten Bereich an theoretischen und Beobachtungsansätzen zur Untersuchung dieser Scheiben abdeckt. Unerlässlich sind dabei das enge Wechselspiel zwischen Theorie und Beobachtung und gleichzeitig eine grundsätzliche Herangehensweise an das Problem.

*Cornelis Dullemond, Thomas Henning,
 Sebastian Wolf, Jeroen Bouwman,
 Hubert Klahr, Kacper Kornet,
 Dmitry Semenov, Anders Johansen,
 Aurora Sicilia-Aguilar, Frithjof Brauer,
 Miwa Goto, Thorsten Ratzka,
 Alexander Schegerer, Natalia Dzyurkevich,
 Roy van Boekel, Christoph Leinert,
 Andres Carmona, Jens Rodmann,
 in Zusammenarbeit mit dem
 »Formation and Evolution of Planetary Systems«
 SPITZER Legacy Team sowie
 Kollegen am Steward Observatory (Tucson, Arizona);
 bei Eureka Scientific (Berkeley),
 und am Osservatorio di Arcetri (Florenz)*

III.3 Kartierung des Halos unserer Galaxis

Im vergangenen Jahrzehnt wurden gewaltige Fortschritte im Verständnis der Entstehung und Entwicklung von Galaxien erzielt. Tiefe Durchmusterungen von Galaxien bei mittleren und hohen Rotverschiebungen, mehrere davon unter Leitung des MPIA, haben die Geschichte der Sternentstehung und die morphologische Entwicklung von Galaxien auf kosmischen Skalen sichtbar gemacht. Diese Beobachtungen haben dazu beigetragen, unser heutiges Modell der Galaxienentstehung – das Λ CDM-Paradigma – aufzustellen und zu festigen.

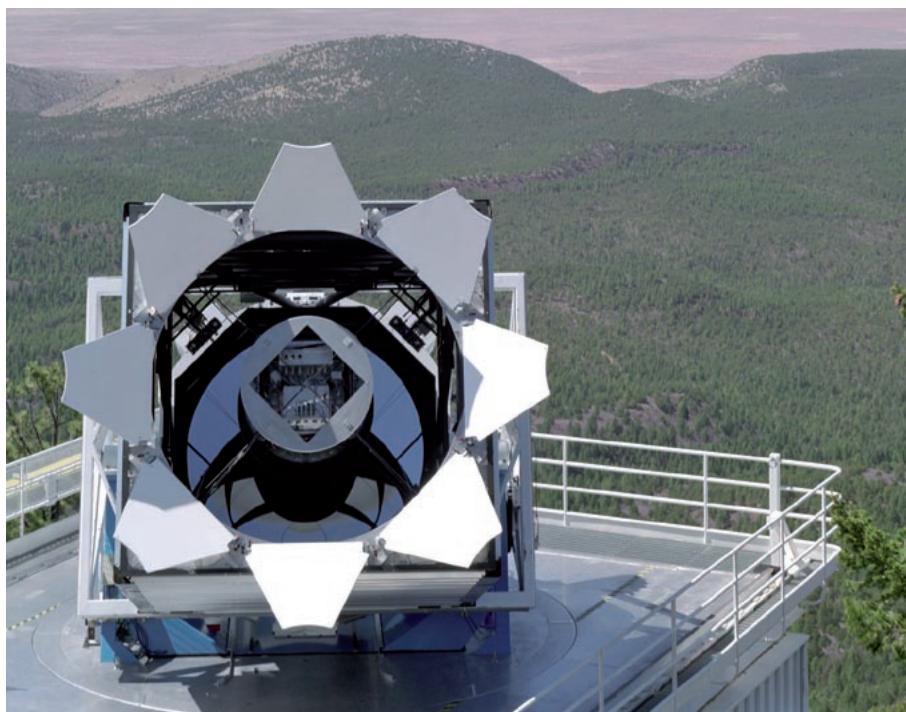
Eine der zentralen Vorhersagen der Galaxienentstehungsmodelle in einem Universum mit kalter dunkler Materie (mit oder ohne kosmologische Konstante) lautet, dass alle massereichen Galaxien, selbst Galaxien mit ausgeprägten Scheiben wie unser Milchstraßensystem, oft mit Zwerggalaxien in ihrer lokalen Umgebung wechselwirken und sie zerreißen – häufig auch galaktischer Kannibalismus genannt. Nach dieser Vorstellung würde der stellare Halo um das Milchstraßensystem (eine weit ausgedehnte, fast sphärische Wolke geringer Flächenhelligkeit, bestehend aus metallarmen Sternen, die sich auf nahezu zufällig verteilten Bahnen um das Milchstraßensystem bewegen) die Überreste früherer Zerreißvorgänge darstellen. So gesehen würde der stellare Halo des Milchstraßensystems eine einzigartige Aufzeichnung vom Zusammenbau unserer Galaxis in sich bergen.

Einen spektakulären Beweis für galaktischen Kannibalismus fand man 1995 mit der Entdeckung der Sagittarius-Zwerggalaxie und der Erkenntnis, dass sie gerade vom Milchstraßensystem durch Gezeitenkräfte auseinander gerissen wird. In den folgenden Jahren gelang es MPIA-Astronomen und anderen, entscheidende Fortschritte beim Verständnis des hierarchischen Aufbaus des Halos der Galaxis zu erzielen; die neusten Ergebnisse zeigen, dass der Halo möglicherweise vollständig aus Sternströmen aufgelöster Satelliten der Galaxis besteht.

Der Sloan Digital Sky Survey

Ein besonders leistungsfähiges Hilfsmittel, um die Eigenschaften der diffusen stellaren Hülle des Milchstraßensystems sowie die anderer Galaxien der Lokalen Gruppe zu verstehen, ist der Sloan Digital Sky Survey (SDSS), an dem das MPIA als Partnerinstitut beteiligt ist. Der SDSS ist sowohl eine abbildende als auch eine spektroskopische Durchmusterung, durchgeführt mit einem eigens hierfür gebauten 2.5-m-Teleskop

Abb. III.3.1: Das 2.5-m-Teleskop des Sloan Digital Sky Survey am Apache Peak Observatory in New Mexico, USA.



(Abb. III.3.1), das etwa $\frac{1}{4}$ des gesamten Himmels bis in nie dagewesene Tiefen abgebildet hat. Die vollautomatische Datenreduktionspipeline hat in dem abgebildeten Himmelsbereich mehr als 200 Millionen einzelner Objekte identifiziert. Für mehr als eine Million dieser Objekte wurden Spektren aufgenommen. Um dies zu ermöglichen, ist das SDSS-Teleskop mit einer Weitfeld-Kamera ausgerüstet, die nach einer Drift-Abtastmethode arbeitet, sowie mit einem glasfasergepeisten Multiobjekt-Spektrographen. Das MPIA war sowohl an der ursprünglichen SDSS-Durchmusterung als auch an der nachfolgenden Erweiterung SDSS-II beteiligt. Während die Hauptmotivation für den SDSS die Erforschung der großräumigen Struktur im Universum und Kosmologie war, ist es eines der wichtigsten wissenschaftlichen Ziele des SDSS-II, Sterne in unserer eigenen Galaxis und in nahen Galaxien zu untersuchen (mit Hilfe des SEGUE-Projekts: SDSS Extension for Galactic Understanding and Exploration).

Der Schlüssel zur Effektivität des SDSS bei der Erforschung schwacher Sternpopulationen in der Lokalen Gruppe ist, dass man Strukturen mit Hilfe einzeln nachgewiesener Sterne identifizieren kann. Oftmals ist man auf die Entdeckung diffuser Strahlung angewiesen, die von der unaufgelösten Sternpopulation stammt, um lichtschwache Strukturen zu finden und zu beschreiben; dies ist naturgemäß nur möglich bei Flächenhelligkeiten von typischerweise 1 % der Helligkeit des Himmelshintergrunds und heller (~ 26 mag pro Quadratbogensekunde). Im Falle der Untersuchung schwacher Sternpopulationen in der Lokalen Gruppe kann der SDSS viele der Sterne einzeln nachweisen, was zu effektiven Grenzflächenhelligkeiten führt, die drei oder mehr Größenklassen schwächer sind ($\sim 29 - 30$ Größenklassen pro Quadratbogensekunde). Diese Extratiefen ermöglichte es, die Anzahl nachgewiesener Milchstraßen-Begleiter fast zu verdoppeln sowie geisterhafte Sternströme nachzuweisen und zu beschreiben, die aus Zwerggalaxien und Kugelhaufen herausgerissen wurden. Zusammen genommen liefern diese Entdeckungen allmählich wichtige Hinweise, wie der stellare Halo und das Milchstraßensystem allgemein aufgebaut wurden.

Der markanteste aller Sternströme im Milchstraßen-Halo ist der Sagittarius-Strom. Er besteht aus Sternen, die im Laufe der letzten wenigen Milliarden Jahre aus der Sagittarius-Zwerggalaxie herausgerissen wurden. In den SDSS-Daten kann der Sagittarius-Strom durch das gesamte durchmusterte Gebiet hindurch verfolgt werden. Damit liefert er exakte räumliche Informationen, mit deren Hilfe (durch Untersuchungen der Präzession der Umlaufbahn mit der Zeit) dynamische Modelle des Systems und das Gravitationspotential des galaktischen Halos eingeschränkt werden können. Darüber hinaus ist anhand der SDSS-Daten klar geworden, dass der Strom in zwei oder mehr getrennte Arme aufgeteilt ist, eine Entdeckung, die bislang nicht befriedigend erklärt

werden konnte und möglicherweise einen wichtigen Hinweis auf die Gestalt des galaktischen Halos aus Dunkler Materie enthält.

Im Jahre 2002 entdeckten Astronomen mehrerer SDSS-Partnerinstitute, darunter auch des MPIA, in den SDSS-Daten einen weiteren großen Sternstrom. Dieser Sternstrom wurde zunächst als eine Überdichte von Sternen nahe der Ebene der galaktischen Scheibe nachgewiesen. Nachfolgende spektroskopische SDSS-Daten bestätigten dann, dass er mit dem bereits bekannten Sagittarius-Strom nichts zu tun hat. Beobachtungen dieses neuen Stroms in anderen Richtungen deuten darauf hin, dass er einen riesigen Ring aus Sternen um die gesamte galaktische Scheibe herum bildet, stets bei niedrigen galaktischen Breiten (engl. low latitudes). Falls dieser »Low-Latitude«-Strom wie der Sagittarius-Strom das Ergebnis der Zerstörung einer Zwerggalaxie durch Gezeitenkräfte ist, dann sollte seine Vorläufergalaxie ebenfalls nahe der galaktischen Ebene liegen. Später wurde eine Überdichte von Sternen in Richtung des Sternbilds Canis Major (CMa) entdeckt. Wegen der offensichtlich beträchtlichen Größe des Systems und seiner Lage nahe der Scheibe könnte es sich um den Vorläufer des Low-Latitude-Stroms handeln.

Nicht nur im Halo der Milchstraße, sondern auch im Halo der Andromeda-Galaxie (M 31), der nächstgelegenen großen Spiralgalaxie, wurden mit Hilfe des SDSS und anderer Durchmusterungen Unterstrukturen gefunden. In Durchmusterungsdaten, die mit dem Isaac-Newton-Teleskop aufgenommen wurden, entdeckte man einen riesigen Sternstrom; und man fand einen »Ring« aus Trümmern um M 31, ähnlich dem Low-Latitude-Strom in der Milchstraße. Außerdem haben Astronomen am MPIA in den letzten drei Jahren mittels SDSS- und anderer Daten fünf neue Begleitgalaxien von M 31 entdeckt, die sämtlich zu den lichtschwächsten Galaxien zählen, die je beobachtet wurden.

Insgesamt haben SDSS-Daten zur Entdeckung von mehr als 10 neuen Zwerggalaxien in der Lokalen Gruppe, einigen Kugelhaufen des Milchstraßensystems sowie mehreren stellaren Unterstrukturen wie Gezeitenströme im Milchstraßen- und im M 31-Halo geführt. Diese Ergebnisse verleihen der Vorstellung, dass Galaxienhalos durch die Zerstörung kleinerer Systeme aufgebaut werden könnten, deutlich Gewicht.

Doch es gibt weiterhin viele offene Fragen bezüglich dieser neuen Entdeckung, von denen zwei im Folgenden sehr viel ausführlicher besprochen werden sollen

- Zuallererst ist die Natur des Low-Latitude-Stroms noch immer unklar. Wurde diese Struktur aus der Scheibe herausgerissen oder handelt es sich um die Trümmer einer Zwerggalaxie? Existenz und Eigenschaften eines Vorläufers des Stroms würden einen entscheidenden Beleg für die Zwerggalaxien-Interpretation liefern. Obwohl die CMa-Überdichte ein erstklassiger Kandidat zu sein scheint, ist deren Natur noch immer umstritten. Folglich haben

Astronomen am MPIA in dem Bemühen, diese Frage zu lösen, den Low-Latitude-Stroms und die CMa-Überdichte genauer untersucht.

- Zweitens, entsprechen die Eigenschaften des galaktischen Halos denen, die man vom Zerreissen von Zwerggalaxien her erwartet? Nachdem uns der SDSS jetzt eine detaillierte Ansicht des stellaren Halos geliefert hat, könnten wir erstmals in der Lage sein, die Ebenmäßigkeit (oder Klumpigkeit) des Halos mit Modellvorhersagen zu vergleichen.

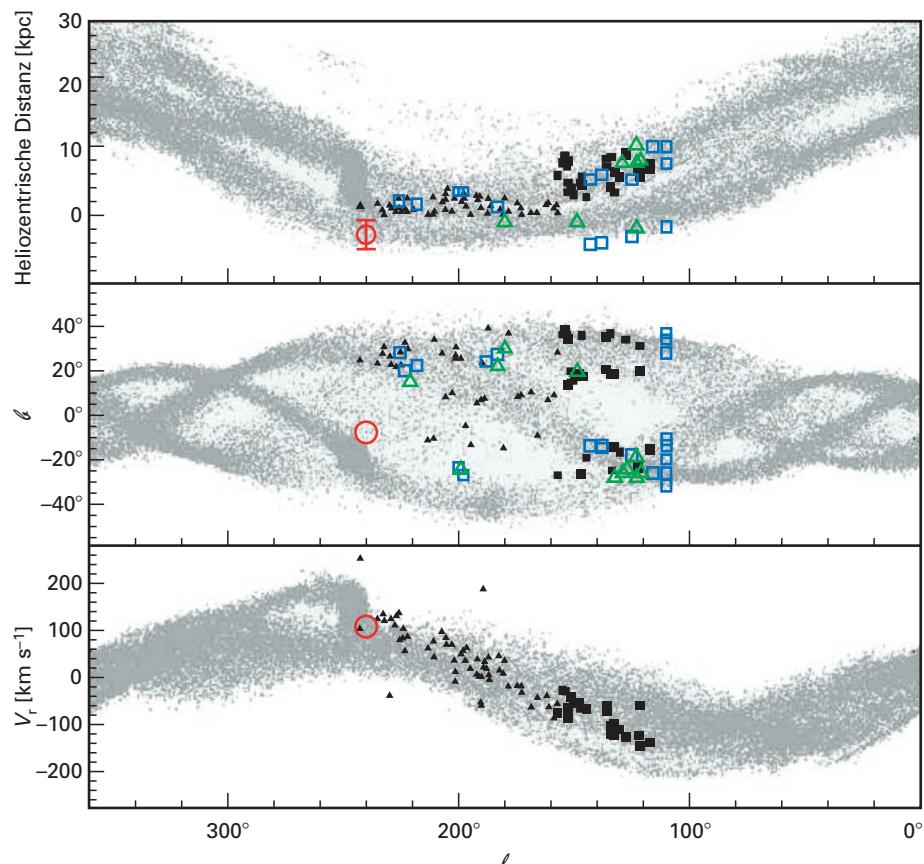
Canis Major und der Low-Latitude-Strom

Der Low-Latitude-Strom und die CMa-Überdichte könnten die Überreste einer einverleibten, zerrissenen Zwerggalaxie von ähnlicher Größe wie die Sagittarius-Zwerggalaxie sein. Zusammen wären diese beiden dem Galaxien-Kannibalismus zum Opfer gefallenen Systeme die wichtigsten Beispiele dafür, dass auch heute noch Galaxien gebildet und aufgebaut werden. Leider ist die Interpretation des Low-Latitude-Stroms und der CMa-Überdichte wegen ihrer Lage nahe an der Scheibenebene nicht so einfach. Die Scheibe selbst zeigt sehr viel Unterstruktur, zum Beispiel Spiralarme. Daher ist es a priori nicht klar, ob irgendeine Unterstruktur in der Sternverteilung bei niedrigen galaktischen Breiten ein Merkmal der Scheibe selbst ist oder einen äußeren Grund hat. Alternativ wurde die CMa-Überdichte

auch als Projektionseffekt der Verdrehung der galaktischen Scheibe und als außerhalb der Scheibe liegender Spiralarm interpretiert. Ebenfalls unklar ist, ob die in Richtung von CMa beobachteten jungen und alten Sternpopulationen tatsächlich in der gleichen Entfernung liegen, oder ob sich die jungen Sterne, wie vorgeschlagen wurde, einige Kiloparsec hinter den alten Sternen befinden. In den vergangenen Jahren haben Wissenschaftler am MPIA die Natur der CMa-Überdichte und ihre mögliche Verbindung mit dem Low-Latitude-Strom auf mehreren Wegen untersucht.

Tiefe photometrische Nachfolgeuntersuchungen wurden durchgeführt, um die Sterne in der Überdichte genauer zu charakterisieren. Diese Daten ergaben, dass in Richtung Canis Major zwei verschiedene Populationen vorhanden sind, eine junge (etwa 1 bis 2 Milliarden Jahre alt) und eine relativ alte (von etwa 6 Milliarden Jahren). Darüber hinaus zeigten die Daten, dass die alten

Abb. III.3.2: Modell des Low-Latitude-Stroms in drei Projektionen: Galaktische Länge gegen heliozentrische Entfernung (oben), gegen galaktische Breite (Mitte) und gegen Radialgeschwindigkeit (unten). Die hellgrauen Punkte geben die Positionen der Teilchen in einer N-Körper-Realisation des Modells an. Die ungefähre Lage des Zentrums der Canis-Major-Überdichte ist durch den großen roten Kreis gekennzeichnet. Kleinere schwarze Symbole zeigen die durch Beobachtungen gewonnenen Einschränkungen, an die das Modell angepasst war.



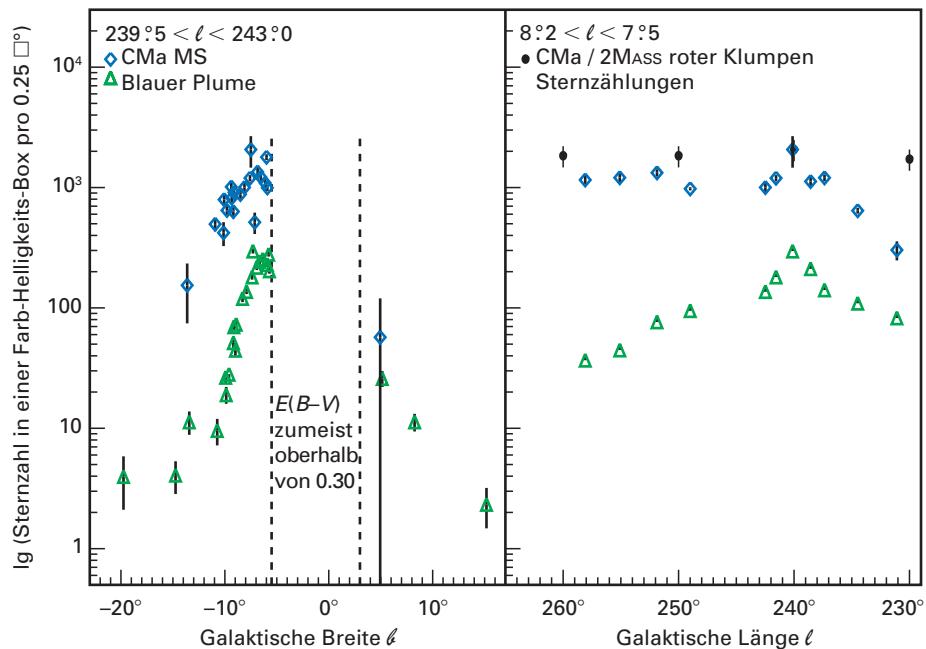
Sterne in einem engen Entfernungsbereich längs der Sichtlinie um etwa 7.5 kpc herum liegen müssen. Einige bekannte Zwerggalaxien in der Lokalen Gruppe enthalten ebenfalls alte Sterne und jüngere Sterne, doch das Gleiche gilt natürlich auch für die Milchstraße. Der enge Entfernungsbereich, innerhalb dessen die CMa-Sterne liegen, kann sowohl durch das Spiralarm-Szenario als auch durch die einverlebte Zwerggalaxie erklärt werden, ist aber schwerer mit der Hypothese in Einklang zu bringen, dass die Überdichte eine Auswirkung der Verdrehung der Scheibe ist.

Dynamische Modelle: Mit Hilfe der verfügbaren, durch Beobachtungen gewonnenen Einschränkungen der räumlichen Struktur und Kinematik des Low-Latitude-Stroms haben Wissenschaftler am MPIA dynamische Modelle des Stroms erstellt. Hauptziel war es herauszufinden, ob Modelle mit der CMa-Überdichte als Vorläufer des Stroms realistisch sind. In der Tat wurde ein Modell gefunden, das sehr gut zu den Beobachtungsdaten des Stroms passt und das einen Vorläufer an ungefähr der Stelle hat, an der die CMa-Überdichte liegt (Abb. III.3.2), interessanterweise jedoch in einer größeren Entfernung als die, die wir bei der CMa-Überdichte beobachtet haben.

Eine neue großflächige Durchmusterung der CMa-Überdichte mit dem MPG/Eso-2.2-m-Teleskop: Um ein umfassenderes Bild der Überdichte und ihrer Beziehung zu dem Low-Latitude-Strom zu erhalten, wurde in der MPIA-Zeit am MPG/Eso-2.2-m-Teleskop mit der Weitfeld-Kamera eine große Durchmusterung der CMa-Region durchgeführt. Die Durchmusterung überdeckt keine zusammenhängende Fläche, sondern besteht aus rund 200 $1^\circ \times 1^\circ$ -Feldern, die über einen weiten Himmelsbereich verteilt sind, um die gesamte Überdichte zu erfassen. Aus Zählungen der Hauptreihensterne in

einem bestimmten Farben-Helligkeits-Gebiet wurden für alle Felder Dichteprofile erstellt (Abb. III.3.3). Wie sich zeigt, ist die Überdichte in galaktischer Länge (parallel zur Scheibenebene) sehr viel ausgedehnter als bislang angenommen. In der Richtung senkrecht zur Scheibe ist die Sternverteilung sehr viel stärker eingeschränkt. Sehr nahe an der Scheibe sind wegen der hohen Staubextinktion jedoch keine Messungen möglich. Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den Verteilungen der alten und der jungen Sterne, wobei die jungen Sterne sehr viel stärker konzentriert und die alten weiter verstreut sind. Da sich die Überdichte über eine so große Entfernung erstreckt, scheint es unwahrscheinlich, dass es sich um ein gravitativ gebundenes System handelt. Sollte sie also einst eine Zwerggalaxie gewesen sein, so ist sie vollständig auseinander gerissen worden. Die Entfernung der Überdichte und ihre Ausdehnung längs der Sichtlinie wurden in den Durchmusterungsfeldern ebenfalls eingeschränkt. Wiederum wurde eine Entfernung von 7.5 kpc gefunden sowie eine Obergrenze für die Halbwertsbreite der Überdichte von etwa 4 kpc. Ein Vergleich dieser Entfernung und Breite mit Modellen der Verdrehung der Scheibe zeigt klar, dass eine Überdichte in dieser Entfernung nicht durch solche Modelle erklärt werden kann.

Abb. III.3.3: Sterndichteprofile der alten (blaue Symbole) und jungen (grüne Symbole) Populationen in der Canis-Major-Überdichte, aufgetragen gegen galaktische Breite (links) und Länge (rechts). Die Sterndichte nimmt zur galaktischen Mittelebene hin rasch zu, doch sind die jungen Sterne etwas stärker konzentriert. In galaktischer Länge zeigen die jungen Sterne eine Dichtespitze nahe dem vermuteten Zentrum der Überdichte; das Profil der alten Sterne ist jedoch sehr flach, was bedeutet, dass die Überdichte der alten Sterne sehr weit ausgedehnt ist, ohne eine deutliche zentrale Spitze.



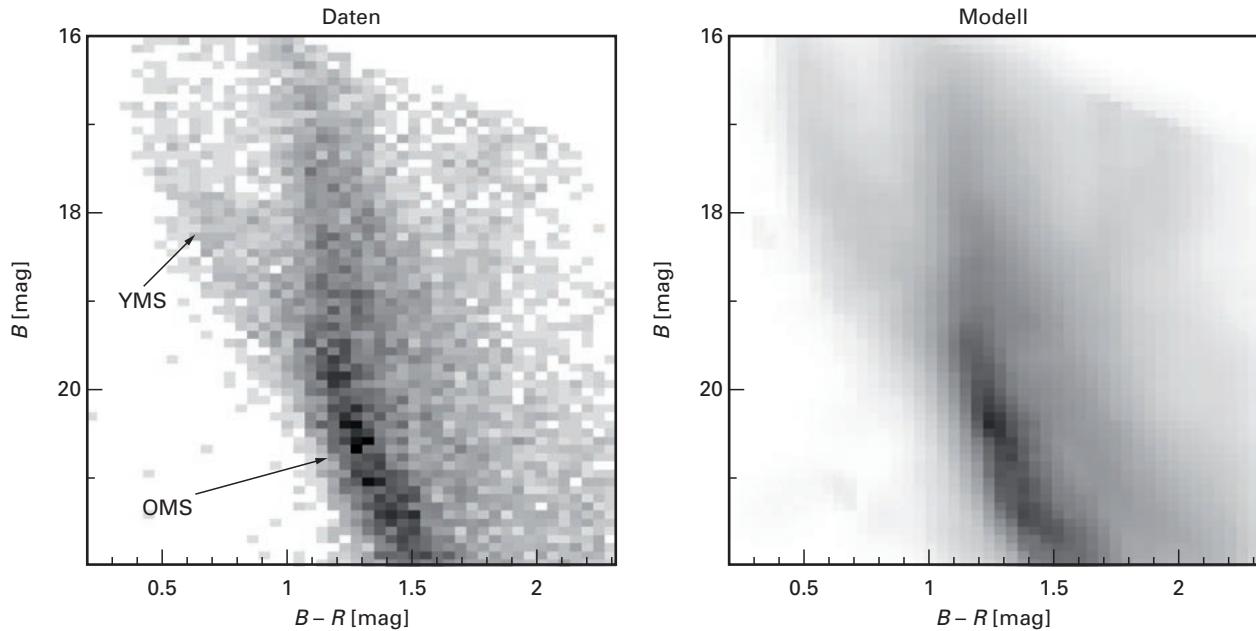


Abb. III.3.4: Links: Hess-Diagramm eines der Felder, die für die Hess-Diagramm-Anpassanalyse der Canis-Major-Überdichte verwendet wurden. Die Hauptreihen der alten und jungen Population sind mit OMS bzw. YMS bezeichnet. Es gibt allerdings eine deutlich Kontamination durch Sterne der dünnen und dicken Scheibe im Vorder- und Hintergrund. Rechts: Das entsprechende bestangepasste Modell-Hess-Diagramm. Es ist eine Kombination der Hess-Diagramme von Modell-Sternpopulationen und dem eines Kontrollfelds zur Anpassung der Vorder- und Hintergrundsterne.

Eine wichtige Frage bezüglich der CMA-Überdichte betrifft die Beziehung zwischen den alten und jungen Sternen. Während die Entfernung zu den alten Sternen ziemlich sicher feststeht (etwa 7.5 kpc), ist die Entfernung zu den jungen Sternen umstritten. Die Kenntnis dieser Entfernung ist entscheidend, um festzustellen, ob sie tatsächlich mit den alten Sternen in Zusammenhang stehen oder ob sie nur in Projektion zusammen gesehen werden. Diese Entfernung ist auch wichtig, um eine etwaige Beziehung der jungen Sterne zu Unterstrukturen der Scheibe, wie zum Beispiel Spiralarmen, zu verstehen. Anhand einer kleinen Zahl Felder aus der Weitfeldkamera-Durchmusterung der CMA-Region ist die Beziehung zwischen den beiden Populationen genauer untersucht worden.

Um die Verwendung sämtlicher verfügbaren Informationen in der Photometrie zu optimieren, wurden hoch entwickelte Anpassmethoden für Hess-Diagramme angewandt (in einem Hess-Diagramm wird die Sternendichte als Funktion der Farbe und Helligkeit aufgetragen). Dabei vergleicht man Modell-Hess-Diagramme, die aus theoretischen Entwicklungswegen und exakten Modellen der Beobachtungsunsicherheiten erstellt werden, mit den eigentlichen Beobachtungen. Die Eigenschaften einer Sternpopulation, wie Entfernung, Alter und Metallgehalt,

beeinflussen die Lage der Sterne im Hess-Diagramm, sodass diese Eigenschaften durch Finden der bestangepassten Modelle eingeschränkt werden können. Ein Beispiel für ein beobachtetes Hess-Diagramm und sein bestangepasstes Modellgegenstück ist in Abb. III.3.4 zu sehen. Mit dieser Methode war es erstmals möglich, belastbare Messungen der Eigenschaften der Sternpopulationen in CMA durchzuführen.

Für die alten Sterne ergab sich eine Entfernung von 7.5 kpc und eine Halbwertsbreite der Ausdehnung längs der Sichtlinie von 3.5 kpc. Dies stimmt sehr gut mit den früheren Abschätzungen überein. Der Metallgehalt dieser Sterne wurde zu etwa $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$ bestimmt, und ihr Alter schwankt zwischen 3 und 6 Milliarden Jahren. Das Alter der jungen Sterne wird auf einige hundert Millionen bis zu 2 Milliarden Jahre geschätzt. Leider gibt es bei der Messung der Entfernung und des Metallgehalts von Sternen mit einem Hess-Diagramm eine Entartung, sodass eine metallreiche, entfernte Population genauso aussieht wie eine metallarme, näherte Population. Dies ist in Abb. III.3.5 veranschaulicht, wo sowohl für die alten wie die jungen Sterne die Konturen der Anpassgüte in der Entferungs-Metallgehalt-Ebene dargestellt sind. Für die jungen Sterne sind die Konturen sehr lang gestreckt und schränken keinen der Parameter gut ein. Zwei Szenarien sind gleich gut mit den Daten vereinbar. Entweder haben die jungen Sterne einen ähnlichen Metallgehalt wie die alten Sterne und liegen in der gleichen Entfernung oder sie sind metallreicher und weiter entfernt.

Zusammenfügen der Ergebnisse: Was verraten uns diese Ergebnisse über die Natur und den Ursprung der CMA-Überdichte? Abb. III.3.6 zeigt eine schematische Darstellung des dritten Milchstraßen-Quadranten, in der die Position der Sonne und die Spiralarmstruktur angedeutet sind. Die Lage der alten Sterne ist mit einem grauen Punkt angegeben. Haben die jungen Sterne einen

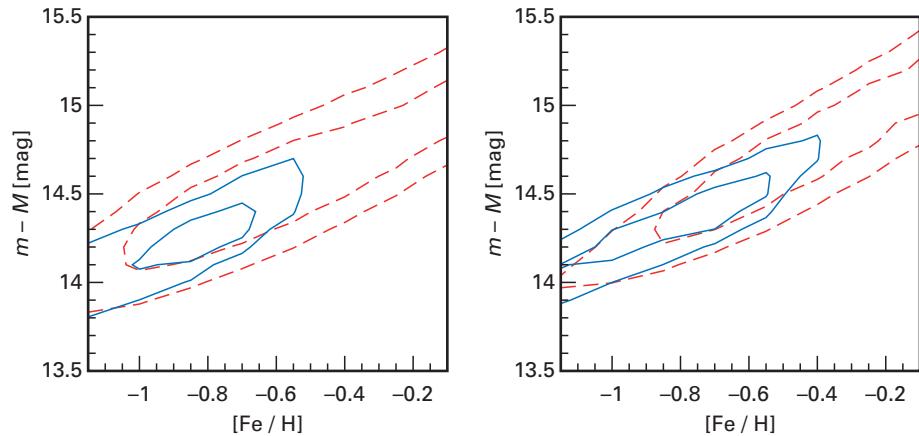


Abb. III.3.5: Konturen der Anpassgüte (1 und 2 sigma) für die alten (durchgezogene Linien) und jungen Sterne (gestrichelte Linien) als Funktion des Entfernungsmoduls $m - M$ und des Metallgehalts $[Fe/H]$ für zwei verschiedene Felder der Wide-Field-Imager-Durchmusterung in der Nähe des Zentrums der Canis-Major-Überdichte. Metallgehalt und Entfernung der alten Sterne sind einigermaßen gut eingeschränkt. Doch wegen der Entartung zwischen Entfernung und Metallgehalt sind die Konturen für die jungen Sterne sehr lang gestreckt und nicht geschlossen. Die Ergebnisse sind sowohl damit vereinbar, dass beide Populationen den gleichen Metallgehalt und gleiche Entfernung haben, als auch damit, dass die jungen Sterne metallreicher und weiter entfernt sind.

ähnlichen Metallgehalt wie die alten, so ist dies auch die Position der jungen Sterne. Der schwarze Punkt gibt die Lage der jungen Sterne an, wenn diese metallreicher sind, $[Fe/H] = -0.3$. Die alten Sterne liegen zwischen zwei Spiralarmen und sind metallärmer als Sterne der dünnen Scheibe, was der Vorstellung, dass diese Sterne von außerhalb der Galaxis stammen, Glaubwürdigkeit

verleiht. Für die jungen Sterne ist das Bild wegen der Entferungs-Metallgehalt-Entartung unsicher. Wenn sie den gleichen Metallgehalt und die gleiche Entfernung haben wie die alten Sterne, würde ihre Lage zwischen Spiralarmen und der geringe Metallgehalt sie ebenfalls zu wahrscheinlichen »Außenseitern« in der Milchstraße machen. Haben sie jedoch einen sonnenähnlichen Metallgehalt, so stimmt ihre Entfernung mit dem äußeren Cygnus-Spiralarm überein. In diesem Fall würden sowohl ihre Lage wie auch ihr Metallgehalt darauf hindeuten, dass es sich um normale Scheibensterne handelt. Dieses Problem kann nur durch spektroskopische Messungen des Metallgehalts der jungen Sterne gelöst werden, und das ist der nächste in diesem Forschungsprojekt geplante Schritt.

Die Struktur des stellaren Milchstraßen-Halos

Eine zweite entscheidende Frage bezieht sich auf die Natur des Milchstraßen-Halos selbst. Angesichts der Tatsache, dass so viel Unterstruktur im stellaren Halo der Milchstraße entdeckt wurde, ist es natürlich zu fragen, ob i) solche Ströme neu und eine unbedeutende Zugabe zu einem bereits aufgebauten, ebenmäßigen stellaren Halo sind, oder ob ii) diese Ströme und ihre älteren Brüder der stellaren Halo sind.

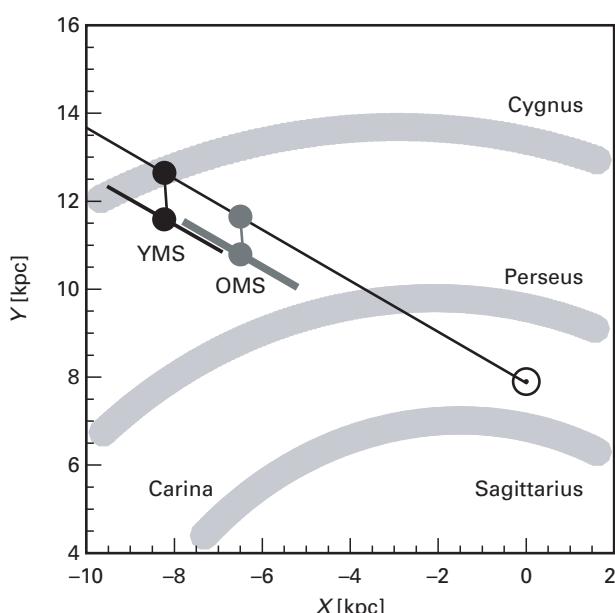


Abb. III.3.6: Schematische Darstellung des dritten Milchstraßenquadranten, in Draufsicht von oben. Die hellgrauen Streifen markieren die Spiralarme. Die Lage der Sonne ist angegeben; das galaktische Zentrum liegt in diesen X-Y-Koordinaten bei (0,0). Die Projektion der Sichtlinie zum Zentrum der Canis-Major-Überdichte auf die galaktische Ebene ist als durchgezogene Linie dargestellt. Der dunkelgraue Punkt und die dunkelgraue Linie mit der Bezeichnung OMS geben die Lage und die Entfernungswerte der alten Sterne an; dies ist auch die Position der jungen Sterne, wenn sie einen ähnlichen Metallgehalt haben. Der schwarze Punkt und die schwarze Linie mit der Bezeichnung YMS kennzeichnen die Entfernung der jungen Sterne für den Fall, dass sie einen Metallgehalt von $[Fe/H] = -0.3$ haben.

Astronomen am MPIA nehmen den SDSS zu Hilfe, um diese Frage anzugehen. Der stellare Halo der Milchstraße hat eine Reihe charakteristischer Eigenschaften, die ihn zu einem Schlüsselobjekt bei der Erforschung der Prozesse der Galaxienentstehung machen. Sterne im Milchstraßen-Halo haben einen geringen Metallgehalt, eine erhöhte Häufigkeit an Alpha-Elementen, zufällig verteilte Bewegungen sowie eine räumliche Verteilung in einem annähernd abgeplatteten Halo, die in etwa einem Potenzgesetz r^{-3} folgt. Der geringe Metallgehalt und die vermehrten Alpha-Elemente deuten darauf hin, dass sich die Sterne relativ früh in der Geschichte des Universums gebildet haben. Es gab jedoch Meinungsverschiedenheiten darüber, wo diese Sterne entstanden sind: Haben sie sich *in situ* während der Frühstadien des Kollapses der Milchstraße gebildet, oder sind sie außerhalb der Milchstraße in Begleitgalaxien entstanden, um zu einem späteren Zeitpunkt von der Milchstraße akkretiert zu werden?

Ein entscheidender Faktor zur Unterscheidung dieser beiden Vorstellungen ist die Struktur des stellaren Halos. Bei einer Bildung *in situ* würde man relativ wenig Unterstruktur erwarten, da die Entstehungsepoke viele dynamische Zeitskalen zurückliegt. Im Gegensatz dazu sagen heutige Modelle der Galaxienentstehung in einem hierarchischen Kontext vorher, dass die große Mehrzahl der Sterne in einem stellaren Halo aus zerrissenen Begleitgalaxien akkretiert wurde. Die angesammelten Trümmer aus sehr alten Akkretionsepisoden verteilen sich rasch im Raum und bilden einen relativ ebenmäßigen stellaren Halo. Die Trümmer von Akkretionsepisoden innerhalb der letzten wenigen Milliarden Jahre können dagegen als deutlich unterscheidbare Strukturen erhalten bleiben. Simulationen sagen in stellaren Halos einen recht großen Bereich an »Klumpigkeit« vorher, wobei generell ein deutliches Maß an erkennbarer Halo-Unterstruktur erwartet wird.

Die Struktur des stellaren Halos wurde mit Hilfe von Sternen erforscht, die gerade von der Hauptreihe abbiegen (Main Sequence Turn-Off stars, MSTO). MSTO-Sterne im stellaren Halo haben eine charakteristische Farbe und eine relativ enge Bandbreite in ihrer absoluten Helligkeit (mit einem Fehler von 0.9 Größenklassen). Folglich können MSTO-Sterne als Standardkerzen benutzt werden, wobei unterschiedliche Bereiche in der scheinbaren Helligkeit unterschiedlichen heliozentrischen Entfernung der MSTO-Sterne entsprechen.

MSTO-Sterne im stellaren Halo: Abb. III.3.7 zeigt die Verteilung von MSTO-Sternen auf der Nördlichen Galaktischen Polkappe in einer flächentreuen Lambert-Projektion, unterteilt in acht Intervalle scheinbarer Helligkeit. Die einzelnen Intervalle sind schmäler als die Verteilung der absoluten Helligkeiten der MSTO-Sterne. Daher ist zu erwarten, dass es zwischen verschiedenen benachbarten Intervallen der scheinbaren Helligkeit zu einem gewissen Grad an gegenseitigem Übersprechen kommt. In allen Intervallen sind die MSTO-Sterne relativ

gleichmäßig verteilt. In den hellsten (d.h. nächstgelegenen) Intervallen gibt es eine Überdichte an Sternen in Richtung galaktisches Zentrum: Dies spiegelt in erster Ordnung die hohe Dichte an Halosternen bei kleineren galaktozentrischen Radien wider. In den helleren Intervallen in Richtung Antizentrum ist eine Überdichte an Sternen bei niedrigen galaktischen Breiten zu sehen: Dies ist der Low-Latitude-Strom. In den Intervallen schwächerer Helligkeiten, die sich über den Himmel erstrecken, erkennt man sehr leicht den Sagittarius-Strom. Doch anhand dieser Karten allein ist schwer festzustellen, ob die Ströme einfach nur der »Zuckerguss« auf dem Halokuchen sind, oder ob die stellare Masse des Milchstraßen-Halos von Strömen und Strukturen dominiert wird.

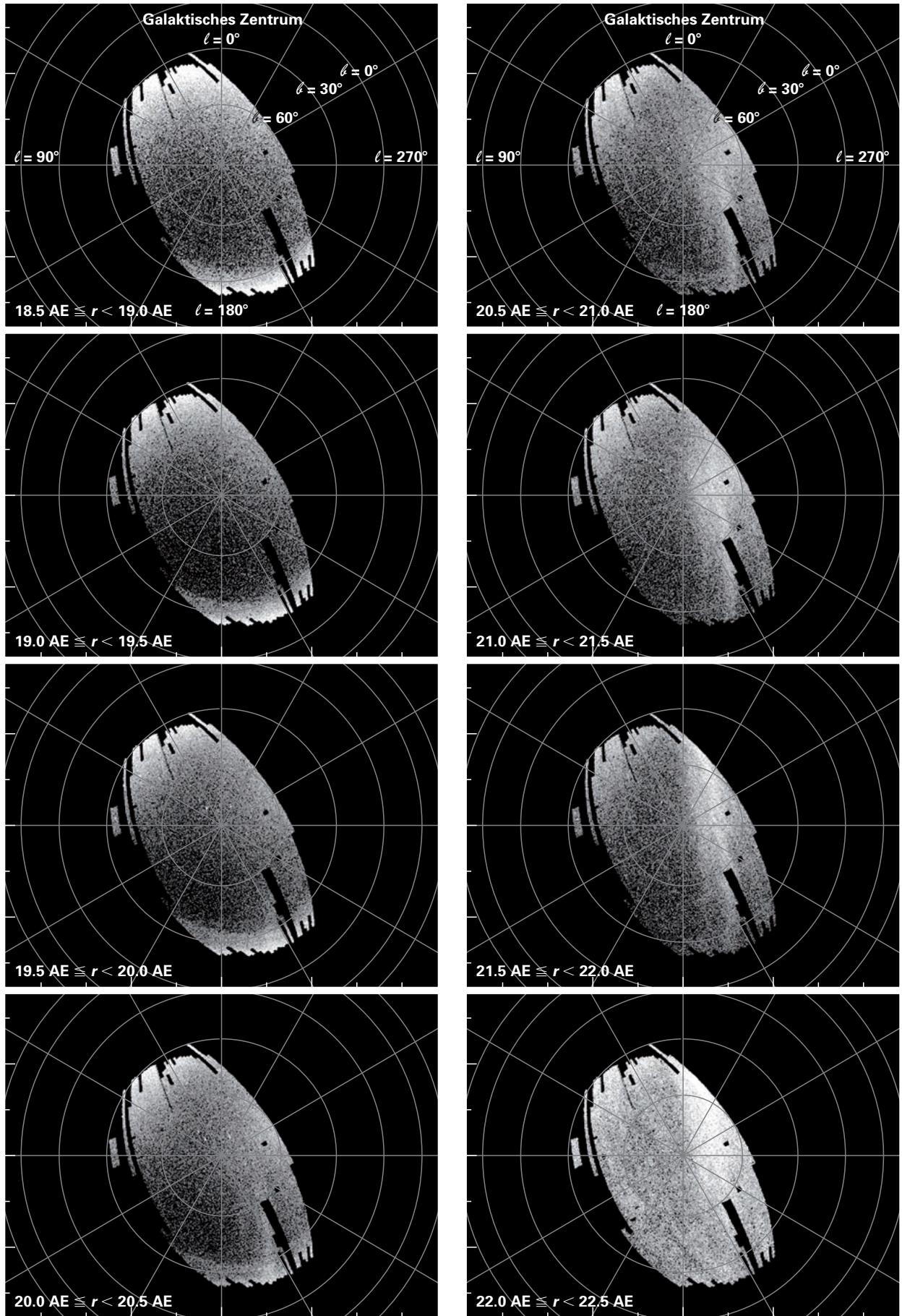
Um diese Kernfrage beantworten zu können, wurden den Daten glatte, abgeflachte (und dreiachsig) zusammengesetzte Potenzgesetz-Modelle angepasst, um die in Abb. III.3.7 erkennbare »glatte« Komponente wiederzugeben. Die besten Modelle wurden ausgewählt, bei denen die Abweichung zwischen dem Modell und den Daten, in Form des quadratischen Mittels der Daten um das Modell, minimal ist, nachdem der erwartete Beitrag des Poisson-Rauschens quadratisch subtrahiert worden war. Die Ergebnisse sind in Abb. III.3.8 und Abb. III.3.10 zu sehen.

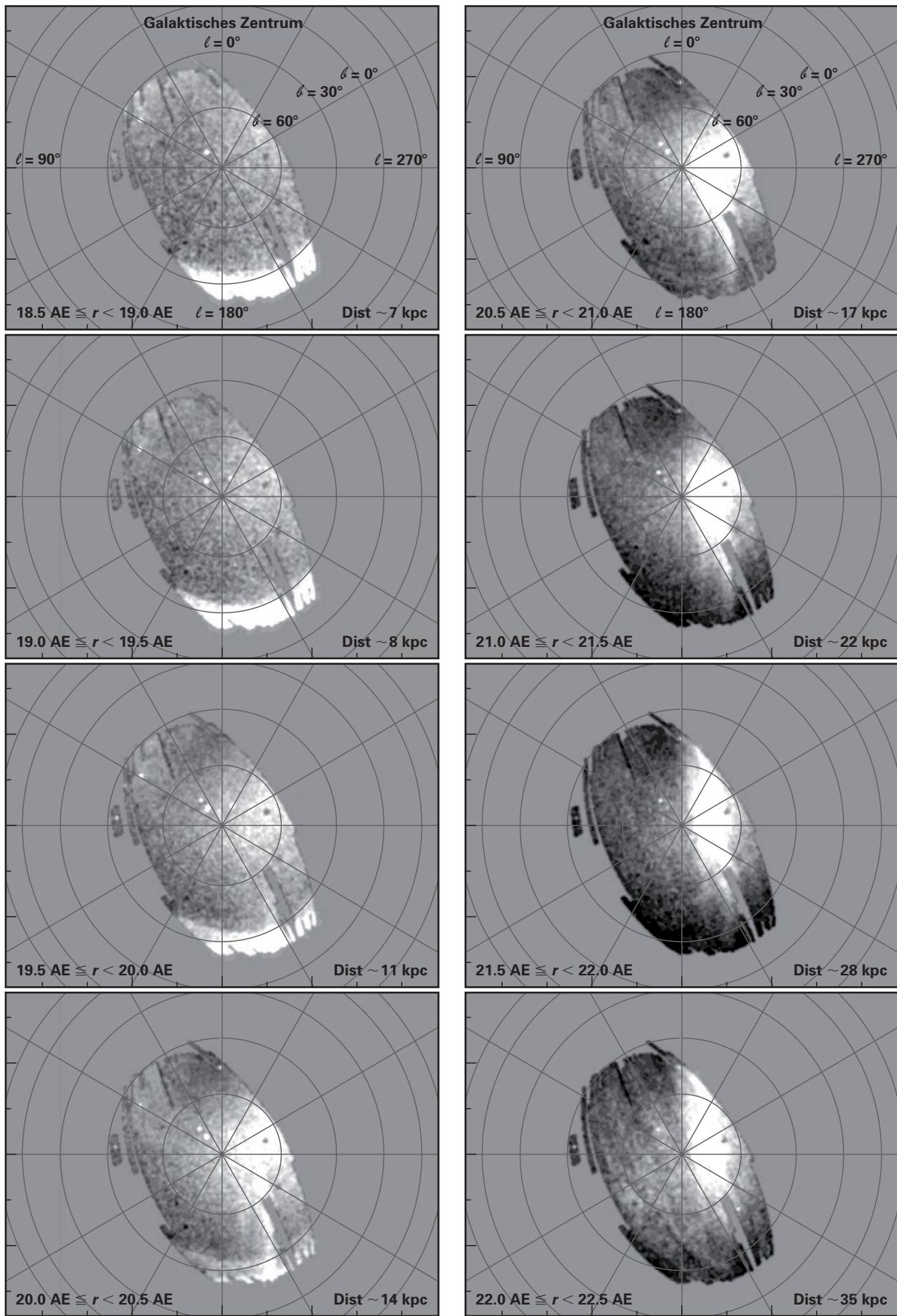
Ein strukturierter stellarer Halo: Eine visuelle Prüfung der Abb. III.3.8 und 10 zeigt, dass der stellare Halo der Milchstraße stark strukturiert ist, mit einer Streuung von insgesamt 40 % oder mehr der Anzahl der Sterne im Halo. Obwohl klar ist, dass ein Großteil der Abweichung in den größten Strukturen liegt (Sagittarius und Monoceros), liegen 60 % der Gesamtabweichung in anderen Strukturen (dadurch bestimmt, indem Sagittarius und Monoceros vor der Anpassung abgedeckt wurden, wie durch Kreuze in Abb. III.3.10 gezeigt).

Vergleich mit Modellen: In den vergangenen Jahren haben Theoretiker ausgeklügelte Modelle entwickelt, in denen die Eigenschaften der stellaren Halos von Scheibengalaxien vorhergesagt werden. Die Abbildungen III.3.9 und III.3.10 zeigen Ergebnisse der Analyse eines

Abb. III.3.7 (Seite 88): Der stellare Halo der Milchstraße, wie er im SDSS zu sehen ist. Die Grauskala gibt die logarithmische Anzahldichte von MSTO-Sternen pro Quadratgrad in acht verschiedenen Helligkeits- (und damit Entfernungs-) Intervallen wieder; verwendet wird eine azimutale flächentreue polare Lambert-Projektion. »Heiße Pixel« sind stellare Überdichten von Kugelhaufen und Zwerggalaxien.

Abb. III.3.8 (Seite 89): Die mit einer Gauß'schen Kurve mit $\sigma = 42'$ geglätteten Residuen (Daten – Modell) vom besten abgeflachten Modell in 8 verschiedenen Entfernungsintervallen. Schwarz bedeutet, dass die Datendichte nur 4 % der Dichte des Modells beträgt; weiß bedeutet, dass die beobachtete Sterndichte 200 % oder mehr der in diesem Helligkeits- und Positionsintervall erwarteten Modelldichte beträgt.





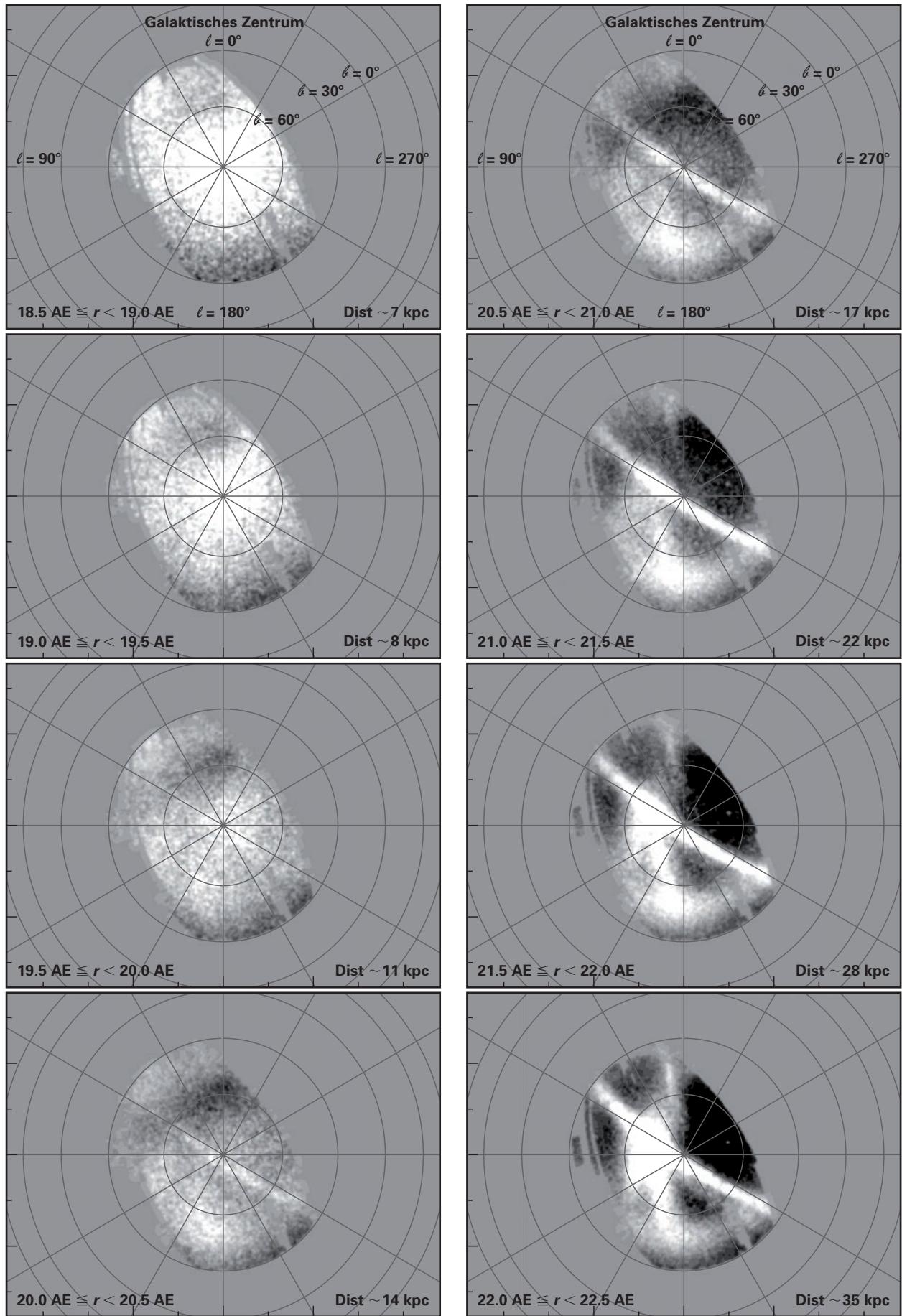


Abb. III.3.9: Residuen der Λ CDM-Simulation. Das Format dieser Abbildung ist das gleiche wie in Abb. III.3.8.

dem heutigen Stand der Wissenschaft entsprechenden Modells von Kathryn Johnston, Sanjib Sharma (beide Columbia University) und James Bullock (University of California, Irvine). Die Modelle sind genauso behandelt worden wie die Daten. Der Verlauf der Streuung mit heliozentrischer Entfernung ist in Abb. III.3.10 für zwei Modelle dargestellt (durchgezogene und gestrichelte Linien); es ist deutlich zu sehen, dass die Modelle die Struktur des stellaren Milchstraßen-Halos quantitativ recht gut beschreiben. Die Residuen der Anpassung eines der Modelle sind in Abb. III.3.9 gezeigt; viele derselben qualitativen Merkmale, die in den SDSS-Daten zu sehen sind, sind auch hier erkennbar. Die Sternströme des Modells neigen dazu, enger begrenzt zu sein als die echten Ströme. Dies liegt wahrscheinlich an den Unzulänglichkeiten des Modells (der Dunkelmaterie-Halo der Milchstraße ist im Modell näherungsweise durch einen gleichmäßig wachsenden starren Halo dargestellt statt eines realistischeren »beweglichen Halos«).

Ausblick

In den letzten zehn Jahren haben wir in unserem Bemühen, die lichtschwachen Sternhüllen um die Milchstraße, M 31 und eine Reihe anderer Galaxien zu verstehen, deutliche Fortschritte erzielt. Diese stellaren Halos sind alle reich strukturiert, was qualitativ und quantitativ ausgezeichnet mit den heute bestmöglichen Modellen der galaktischen Halobildung übereinstimmt. Dennoch liefert die Untersuchung einzelner Ströme noch genauere Einschränkungen. Ein besonderes Rätsel sind die Natur und Herkunft des Low-Latitude-Stroms und seines möglichen Vorläufers, der Canis-Major-Überdichte. Beide werden gegenwärtig am MPIA erforscht.

In diesem Zusammenhang ist die Beteiligung des MPIA am bevorstehenden PanSTARRS-Projekt von besonderem Interesse. Am Ende der 3.5 Jahre dauernden Durchmusterung wird PanSTARRS drei Viertel des gesamten Nachthimmels in fünf Farbbändern abgesucht haben und dabei etwa 1.5 Größenklassen tiefer reichen als der SDSS und eine doppelt so hohe Winkelauflösung erzielen. Astronomen des MPIA werden die Erforschung

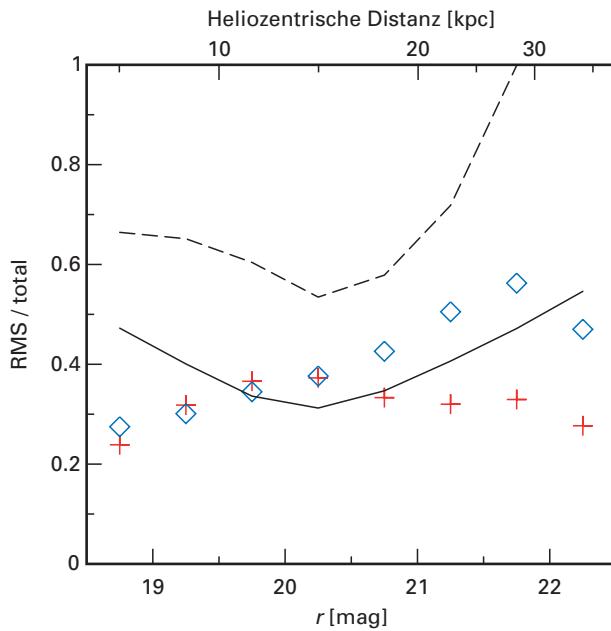


Abb. III.3.10: Die Streuung als Bruchteil der Gesamtzahl der Sterne in Abhängigkeit von der heliozentrischen Entfernung. Rauten kennzeichnen die Streuung unter allen Halosternen (mit galaktischer Breite größer als 35 Grad); Kreuze bezeichnen die Streuung von Halosternen, wenn die Himmelsgebiete mit Beiträgen vom Sagittarius- und Low-Latitude-Strom herausgenommen wurden. Die durchgezogene Linie zeigt die Residuen der in Abb. III.3.9 gezeigten Simulation. Die gestrichelte Linie zeigt die Residuen einer weiteren Simulation.

der Struktur und Dynamik der Lokalen Gruppe mit Hilfe dieser Daten leiten. Dank seiner Tiefe, der großen überdeckten Fläche und der röteren Farbbänder wird PanSTARRS das ideale Hilfsmittel sein, um den Low-Latitude-Strom, die Struktur des Halos und der dicken Scheibe der Milchstraße sowie die Halos um M 31 und andere Galaxien der Lokalen Gruppe bis hinaus zu großen Radien zu untersuchen.

Eric Bell, Knud Jahnke, Jelte de Jong,
 Hans-Walter Rix, Sergei Koposov,
 in Zusammenarbeit mit Forschern in Cambridge,
 Columbia University,
 University of California, Irvine,
 New York University, Basel
 und der SDSS-Kollaboration

III.4 Tiefe Durchmusterungen bei mehreren Wellenlängen

Die Kombination von tiefen Bildern, aufgenommen in mehreren Filtern, die manchmal über das gesamte elektromagnetische Spektrum verteilt sind, ermöglicht es, für alle Objekte im Feld oberhalb einer bestimmten Helligkeitsgrenze »Spektren« niedriger Auflösung abzuleiten. Mit Hilfe dieser Spektren können die Objekte dann nach Objektklassen und – im Falle extragalaktischer Objekte – auch nach Rotverschiebung, d.h. Entfernung klassifiziert werden. Eine solche Datenbank lässt sich für eine Reihe von Projekten verwenden, von denen zwei hier vorgestellt werden sollen: HIROCS ist eine Durchmusterung im optischen und nahen Infrarotbereich nach entfernten Galaxienhaufen, die Kandidaten für die entferntesten heutige bekannten Haufen lieferte. Das zweite Projekt ist das COSMOS-Projekt, bei dem es durch die Kombination tiefer Radiobilder mit Datensätzen aus dem gesamten elektromagnetischen Spektrum möglich ist, die Eigenschaften der schwachen Radiopopulation zu untersuchen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf staubverhüllten massereichen Galaxien mit aktiver Sternentstehung und staubverdeckten Quasaren sowie auf der Beschreibung der Umgebung pekuliärer Radiogalaxien.

Die Erstellung von Katalogen astronomischer Objekte ist das älteste Hilfsmittel, das Himmelsforschern zur Verfügung steht. Eine systematische Katalogisierung von Himmelsobjekten war nötig, um die periodischen Erscheinungen am Himmel das Jahr hindurch ableiten zu können. Dies war im alten Ägypten und Mesopotamien von großem Interesse. Der erste wirkliche Sternkatalog wurde bereits 135 v. Chr. von dem griechischen Astronomen Hipparchos von Nicaea erstellt. Eine weitere wohlbekannte Durchmusterung ist der Messier-Katalog, herausgegeben 1784 von Charles Messier. Messier war ein Kometenjäger und katalogisierte Nebel, die fälschlich für Kometen gehalten werden konnten. Diese wenigen Beispiele zeigen bereits, dass es zwei verschiedene Arten von Katalogen gibt: Vollständige Kataloge, die sämtliche bekannten Objekte am Himmel oder in ausgewählten Himmelsregionen auflisten, und Kataloge von speziellen Objekten, wie zum Beispiel Kometen oder Galaxien.

Moderne Beispiele für Durchmusterungen, die von heutigen Astronomen ausgiebig verwendet werden, sind der National Geographic Society Palomar Observatory Sky Survey (POSS) und der Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Ersterer wurde zwischen 1948 und 1958 mit dem 48-Zoll-Schmidt-Teleskop auf Mt. Palomar in zwei Filtern auf fotografischen Platten aufgenommen, der zweite, fertig gestellt im Juni 2005, mit einer CCD-Kamera in fünf Filtern. Diese Durchmusterungen sind of-

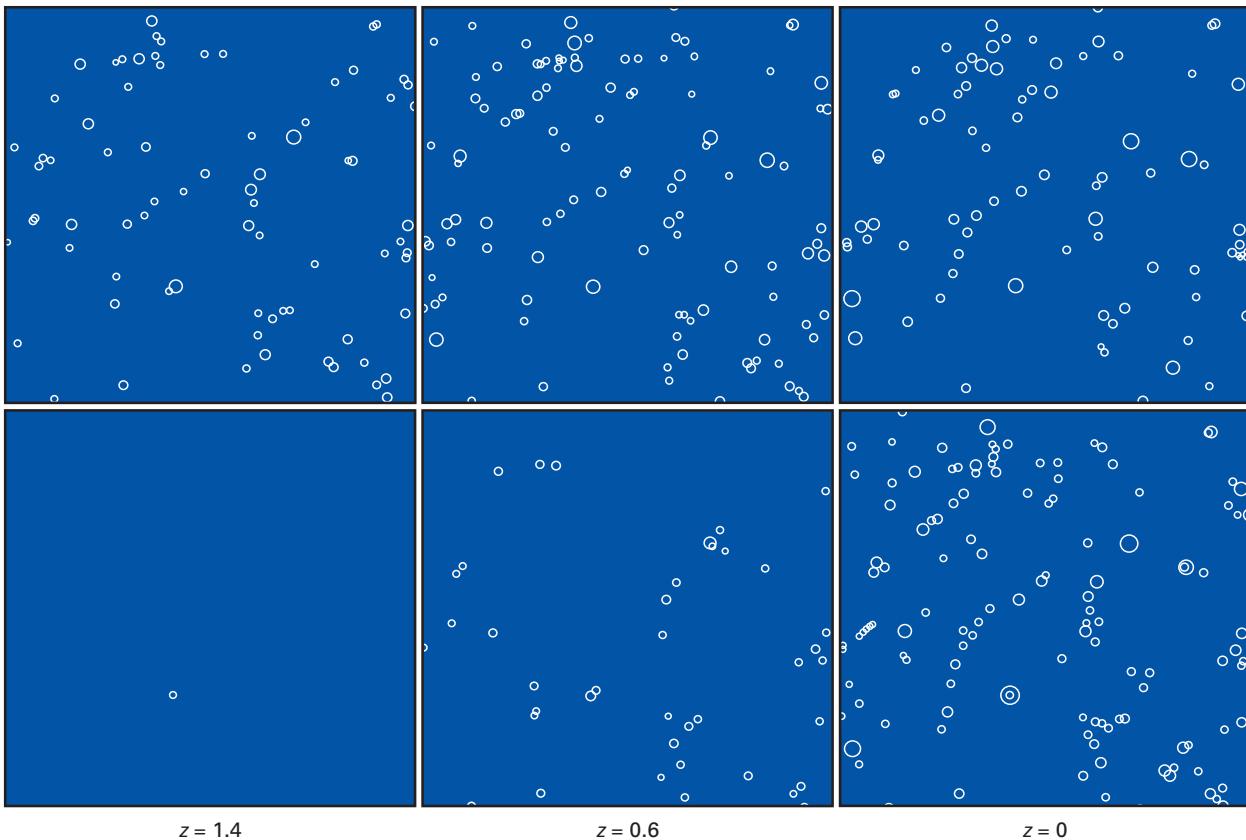
fensichtlich Allzweckwerkzeuge. Aus ihnen wurden für verschiedene Zwecke Teilmengen entnommen: So beruht zum Beispiel der Abell-Katalog der Galaxienhaufen auf einer visuellen Durchsicht der Platten des Palomar-Surveys.

Ein fundamentaler Aspekt der modernen Astronomie ist die Ausweitung der Beobachtungen über den sichtbaren Bereich hinaus. Der erste Wellenlängenbereich, der jenseits des Optischen erforscht wurde, war das Radioband. Und wiederum war ein wichtiges Hilfsmittel eine Radiodurchmusterung, der 3. Cambridge-Katalog. Die optische Identifikation seiner Quellen führte 1963 zur Entdeckung einer neuen Objektklasse, der Quasare. Heute haben wir Kataloge zur Verfügung, die den gesamten Wellenlängenbereich von Radio- bis zu den energiereichen Gammastrahlen überdecken. Teile davon können nicht vom Erdboden aus beobachtet werden, sondern machen es erforderlich, dass das Teleskop in den Weltraum geschossen wird, wie zum Beispiel der ROSAT-Röntgensatellit. Er wurde unter der Leitung des MPI für extraterrestrische Physik in Garching gebaut und führte Anfang der 1990er Jahre die erste Röntgendifurchmusterung des gesamten Himmels durch.

Es ist nur natürlich, das Hilfsmittel Durchmusterung auch zu einer Kombination von Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen auszuweiten. Optische Identifikationen von Radio- oder Röntgenquellen, wie oben erwähnt, sind hierbei nur ein erster Schritt. Aufgrund der Natur der untersuchten Objekte ist eine Kombination von Beobachtungen in mehreren Wellenlängenbereichen hervorragend geeignet, verschiedenartige Objekte von einander zu unterscheiden, sodass es möglich ist, eine bestimmte Objektklasse auszuwählen. In diesem Beitrag soll letztere Methode anhand der am MPIA durchgeführten Mehrfarben-Durchmusterungen genauer beschrieben werden. Aus den verschiedenen Projekten, die in diesem Rahmen derzeit durchgeführt werden, wählen wir zwei Beispiele aus: (A) HIROCS, eine Suche nach entfernten Galaxienhaufen, und (B) COSMOS, ein großes internationales Gemeinschaftsprojekt mit dem Ziel, die Entstehung und Entwicklung von Galaxien über kosmische Zeiträume hinweg zu verstehen.

A. HIROCS – eine Suche nach den entferntesten Galaxienhaufen

Der »Heidelberg InfraRed/Optical Cluster Survey«, HIROCS, ist Teil des extragalaktischen Schlüsselprojekts MANOS (MPI for Astronomy Near-infrared Optical Surveys) und hat die Entdeckung der entferntesten



Galaxienhaufen zum Ziel. Zunächst wird die Motivation für diese Durchmusterung erläutert, dann folgt eine genaue Beschreibung des Durchmusterungsplans. Erste Ergebnisse zeigen, das HIROCS tatsächlich in der Lage ist, Haufen im anvisierten Rotverschiebungsbereich zu finden.

Warum nach entfernten Haufen suchen?

Die Materie ist nicht gleichmäßig im Universum verteilt. Galaxien sind in Filamenten und weiten Flächen angeordnet, die riesige galaxienfreie Räume umschließen und das aufbauen, was wir die großräumige Struktur des Universums nennen. Galaxienhaufen sind die massereichsten gravitativ gebundenen Einheiten in diesen Strukturen, die wir kennen. Nach unserem heutigen Verständnis der Strukturbildung entstehen Haufen aus kleineren Materiekklumpen, die aus anfänglichen, während des Urknalls eingebetteten Dichtestörungen kondensieren. Dunkle Materie beherrscht das Gravitationspotential der größten Strukturen, in welche die kleineren Klumpen (Galaxien) hinein fallen und einen Galaxienhaufen bilden. Aus dieser kurzen Beschreibung wird klar, dass die Einzelheiten der Haufenbildung entscheidend vom angenommenen kosmologischen Modell abhängen. Verfolgt man das Wachstum der anfänglichen Dichtestörungen mit der Zeit, so muss man zwei einander entgegenwirkende Effekte berücksichtigen: Gravitationskollaps gegen kosmologische Expansion. In einem Universum

Abb. III.4.1: Der Einfluss des kosmologischen Modells auf die Entwicklung gravitativer Haufenbildung wurde von Borgani und Guzzo (Nature 2001) mit Hilfe eines N-Körper-Codes mit etwa zwei Millionen Teilchen simuliert. Die Bilder der oberen Reihe beschreiben ein flaches Weltmodell geringer Materiedichte mit $\Omega_m = 0.3$ und $\Omega_A = 0.7$, die untere Reihe zeigt als Extremfall für ein Universum mit hoher Materiedichte Ergebnisse für das Einstein-de-Sitter-Modell (EdS) mit $\Omega_m = 1$. Die Spalten stellen Haufen mit Röntgenstrahlung als Kreise bei drei Rotverschiebungsschnappschüssen von $z = 0$, 0.6 und 1.4 (von rechts nach links) dar, wobei sich jedes Bild über ein Gebiet mit einer Seitenlänge von $250 h^{-1} \text{ Mpc}$ und einer Dicke von $75 h^{-1} \text{ Mpc}$ (mit der kosmischen Expansion mitbewegt) erstreckt. Die Größe der Kreise ist proportional zur Temperatur des Röntgenstrahlung aussendenden Plasmas. Die heutige Haufendichte bei Rotverschiebung Null wurde für beide Modelle als gleich angesetzt. In einem Universum geringer Dichte müssen sich die Haufen schon früh bilden.

hoher Dichte, in welchem die Materiedichte gleich der kritischen Dichte ist, sind die Zeitskalen für beide Effekte zu allen Zeiten die gleichen. In einem Universum mit geringer Dichte gilt diese Gleichheit nur für eine kurze Zeit nach dem Urknall. In späteren Epochen, wenn die Eigengravitation des Universums vernachlässigbar geworden ist, überholt die kosmische Expansion das Wachstum der Fluktuationen, sodass dieses schließlich zum Stillstand kommt. Im Jahr 2001 veröffentlichten Stefano Borgani und Luigi Guzzo eine

Simulation, in der die erwarteten Anzahldichten reicher Haufen als Funktion der Rotverschiebung für Universen mit unterschiedlicher Materiedichte verglichen werden (Abb. III.4.1). Die Simulationen waren so normiert, dass die heutige Haufendichte korrekt wiedergeben wird. Den obigen Argumenten zufolge muss in einem Universum geringer Materiedichte diese Haufendichte früh erzeugt worden sein, d.h. in diesem Fall müsste man reiche Haufen auch bei langen Rückblickzeiten, also hohen Rotverschiebungen sehen. Bei hoher Materiedichte dagegen bildeten sich die Haufen erst spät in der Entwicklungsgeschichte des Universums, sodass sie bei hohen Rotverschiebungen selten sind. Somit liefert die Messung der Anzahldichte von Haufen – als Beweis für das erfolgreiche Wachstum der Fluktuationen – in Abhängigkeit von der Rotverschiebung Einschränkungen für die Materiedichte des Universums.

Neben dieser kosmologischen Begründung für die Suche nach den entferntesten Galaxienhaufen gibt es auch noch den Aspekt der Galaxienentwicklung. Galaxienhaufen sind ideale Laboratorien, um die Entwicklung von Galaxien als Population zu untersuchen, indem man das Universum als Zeitmaschine benutzt. Nach der einfachsten Einteilung gibt es zwei Arten von Galaxien: Scheibengalaxien mit aktiver Sternentstehung sind blau, während elliptische Galaxien eine entwickelte, alte rote Sternpopulation aufweisen. Es ist wohlbekannt, dass elliptische Galaxien Umgebungen mit hoher Dichte wie Haufen oder gar deren dichte Kernregionen bevorzugen, wohingegen Scheibengalaxien in lockererem Kontakt zu ihren Nachbarn leben. Diese Morphologie-Dichte-Relation, 1980 von Alan Dressler entdeckt, scheint bereits bei einer Rotverschiebung von $z \sim 1$ zu bestehen, wenn auch in etwas anderer Form. Da man glaubt, dass elliptische Galaxien durch das Verschmelzen von Scheibengalaxien entstehen, muss es eine frühere Epoche gegeben haben, in der diese Verschmelzung in Haufen vonstatten ging. In ihrem zukunftsweisenden Papier zeigten Harvey Butcher und Gus Oemler 1984, dass der Anteil an blauen Galaxien in Haufen stark von der Rotverschiebung abhängt, wobei die blauen Galaxien in früheren Zeiten häufiger sind. Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE ergaben, dass die blauen Galaxien in Haufen hauptsächlich Spiralen mit aktiver Sternentstehung sind, mit einem hohen Anteil an gestörten, wechselwirkenden und daher wahrscheinlich verschmelzenden Galaxien. Die Entdeckung von Galaxienhaufen bei den höchstmöglichen Rotverschiebungen wird es uns daher mit Sicherheit erlauben, einen Blick auf die Kindheit von Galaxien in Haufen zu werfen.

Zur Zeit kennt man nur sehr wenige entfernte Galaxienhaufen, d.h. solche mit Rotverschiebungen $z > 1$. Nur etwa eine Handvoll sind gut untersucht, und mit einer Ausnahme wurden sie alle aufgrund ihrer Röntgenstrahlung entdeckt (siehe Abb. III.4.13, S. 102). Die Quelle der von Haufen ausgehenden Röntgenstrahlung ist ein extrem heißes (10 bis 100 Millionen Grad) Plasma, das

den Haufen durchdringt und im tiefen Potentialtopf der dunklen Materie des Haufens gefangen ist. Es ist keinesfalls klar, ob diese Röntgenstrahlung aussendenden Haufen typisch sind bei diesen Rotverschiebungen. Eine Suche nach entfernten Haufen, die sich auf den Nachweis des Sternlichts aus den Haufengalaxien konzentriert, anstatt auf die Röntgenstrahlung des Plasmas, soll zeigen, ob und wie die beiden Nachweismethoden durch Auswahleffekte beeinträchtigt sind.

Gegründet auf alle diese Überlegungen begannen wir 2002 am MPIA, eine Durchmusterung nach entfernten Galaxienhaufen mit Rotverschiebungen bis $z = 1.5$ zu planen. Die Weitfeld-Kameras für den Primärfokus des 3.5-m-Teleskops auf dem Calar Alto – LAICA für den optischen und OMEGA 2000 für den Infrarotbereich – standen damals kurz vor ihrer Inbetriebnahme, und diese Instrumente waren erforderlich, um eine solche Durchmusterung innerhalb einer sinnvollen Beobachtungszeit durchführen zu können.

Die Spezifikationen der Durchmusterung

Es stand von Anfang an fest, dass eine derartige Durchmusterung die folgenden Jahre über große Anstrengungen kosten würde. Wegen des großen Bedarfs an Teleskopzeit wurde das Projekt zu einem Schlüsselprojekt der MPIA-Abteilung »Galaxien und Kosmologie« erklärt. Die erste Aufgabe bestand in einer genauen Spezifikation der Durchmusterung: Eine wie große Fläche muss überdeckt werden? Wohin soll geschaut werden? Welche Filter werden benötigt? Wie tief müssen die Belichtungen sein, um Haufen bei Rotverschiebungen $z > 1$ nachzuweisen? Wie sollen wir die Haufenkandidaten aussondern?

Die zu durchmusternde Fläche

Von Anfang an war die Durchmusterung auf den Aspekt der Entwicklung der Galaxienpopulation in Haufen beschränkt. Um kosmologische Parameter ableiten zu können, müsste eine bedeutend größere Fläche abgedeckt werden. Dies versuchen andere Gruppen mit anderen Mitteln, zum Beispiel mittels Durchmusterungen, die den Sunyaev-Zel'dovich-Effekt nutzen. Um die Entwicklung der Galaxienpopulationen zu untersuchen, wird eine Stichprobe von Haufen benötigt, die zumindest zwei deutlich unterschiedliche Rotverschiebungsbereiche abdeckt. Um statistisch signifikant zu sein, ist ein Minimum von 25 Haufen für jeden Bereich nötig. Unser Ziel muss somit eine Haufenstichprobe mit 50 oder mehr Haufen bei Rotverschiebungen $z > 1$ sein. Da dieser Rotverschiebungsbereich terra incognita ist, mussten wir auf Modellrechnungen zurückgreifen. Bartelmann und White (2002) hatten die Anzahl der Haufen mit Rotverschiebungen $z > 1$ abgeschätzt, die man im Sloan Digital Sky Survey erwartet (siehe oben). Ihrer Schätzung nach kann man 5 Haufen pro Quadratgrad erwarten, so-

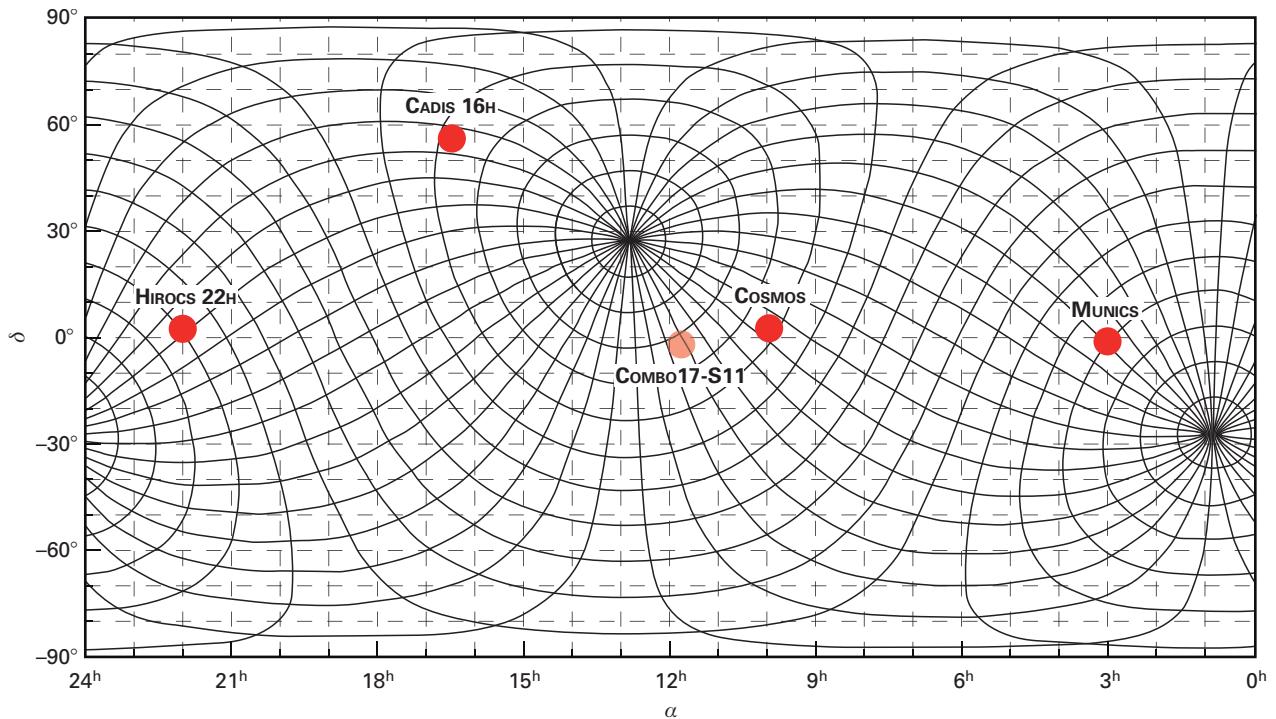


Abb. III.4.2: Lage der HIROCS-Durchmusterungsfelder am Himmel. Die darunter liegenden Kurven sind Linien konstanter galaktischer Breite und Länge. Die Felder liegen alle bei hohen galaktischen Breiten, d.h. weit weg von der Milchstraßenebene.

dass unsere Durchmusterung mindestens 10 Quadratgrad abdecken muss.

Wohin schauen?

Die Durchmusterungsfelder mussten folgende Kriterien erfüllen: 1) Lage nahe am Himmelsäquator, um Nachfolgeuntersuchungen mit großen Teleskopen von beiden Hemisphären aus zu ermöglichen, 2) geringe interstellare Absorption in unserer Milchstraße, 3) keine hellen Sterne im Gesichtsfeld, da deren Streulichthalo einen Großteil der Aufnahmen unbrauchbar machen würde. Wir entschieden uns für die vier in Abb. III.4.2 gezeigten Felder. Drei der Felder enthalten Gebiete, die bereits von anderen Projekten durchmusterter wurden, sodass wir deren Ergebnisse zumindest für Kalibrationszwecke nutzen können: Das 3h-Feld deckt auch das MUNICS-Feld mit ab, und zusammen mit unseren Münchener Kollegen erarbeiten wir einen gemeinsamen Datenpool. Das 10h-Feld ist das COSMOS-Feld (siehe unten, S. 103), für das ein großes internationales Konsortium eine viele Wellenlängenbereiche umfassende Datenbank erstellt, zu der auch Daten vom Weltraumteleskop HUBBLE gehören. Das 16h-Feld ist das einzige Feld, das nur von der Nordhalbkugel aus beobachtbar ist. Es wurde gewählt, weil es eines der CADIS-Felder ist, für die ein umfangreicher spektroskopischer Datensatz verfügbar ist. Um

das ganze Jahr über beobachten zu können, wurde die Lücke zwischen dem 16h- und dem 3h-Feld mit einem eigenen HIROCS-Feld bei etwa 22h Rektaszension gefüllt.

Jedes Feld außer dem COSMOS-Feld ist $1^\circ \times 3^\circ$ groß. Damit wird es uns möglich sein, jede Galaxienüberdichte, die auf der großräumigen Struktur beruht, aufzuspüren und sie hoffentlich von einem echten Haufen zu unterscheiden. Keine unserer Kameras kann jedoch ein so großes Gebiet in einer einzigen Aufnahme abbilden: LAICA benötigt vier Aufnahmen, um ein Quadratgrad abzudecken, und OMEGA 2000 braucht sogar 16 Belichtungen. Dies fügt unseren Datenreduktionsverfahren eine neue Dimension hinzu. In unseren früheren Durchmusterungen wie CADIS oder COMBO-17 wurde jedes Feld mit einer einzigen Belichtung abgedeckt. Jetzt, wo wir unsere Felder mosaikartig zusammensetzen müssen, werden die einzelnen Belichtungen, die zu den unterschiedlichen Teilstücken oder »Kacheln« des Mosaiks beitragen, nicht mehr unter konstanten Bedingungen hinsichtlich Seeing, Himmelshintergrund und Transparenz der Atmosphäre aufgenommen. Zur Bewältigung dieses Problems mussten an unserer Reduktionssoftware verschiedene Erweiterungen vorgenommen werden, um die Mosaik-Kacheln zu vereinheitlichen. Erst danach können wir für die weitere Auswertung unser bereits vorhandenes umfangreiches Software-Paket anwenden.

Wie finden wir die Haufen?

Angenommen, die Daten liegen vor: Wie können dann entfernte Haufen ausgesondert werden? Betrachtet man eine tiefe Himmelsaufnahme mit Myriaden schwacher

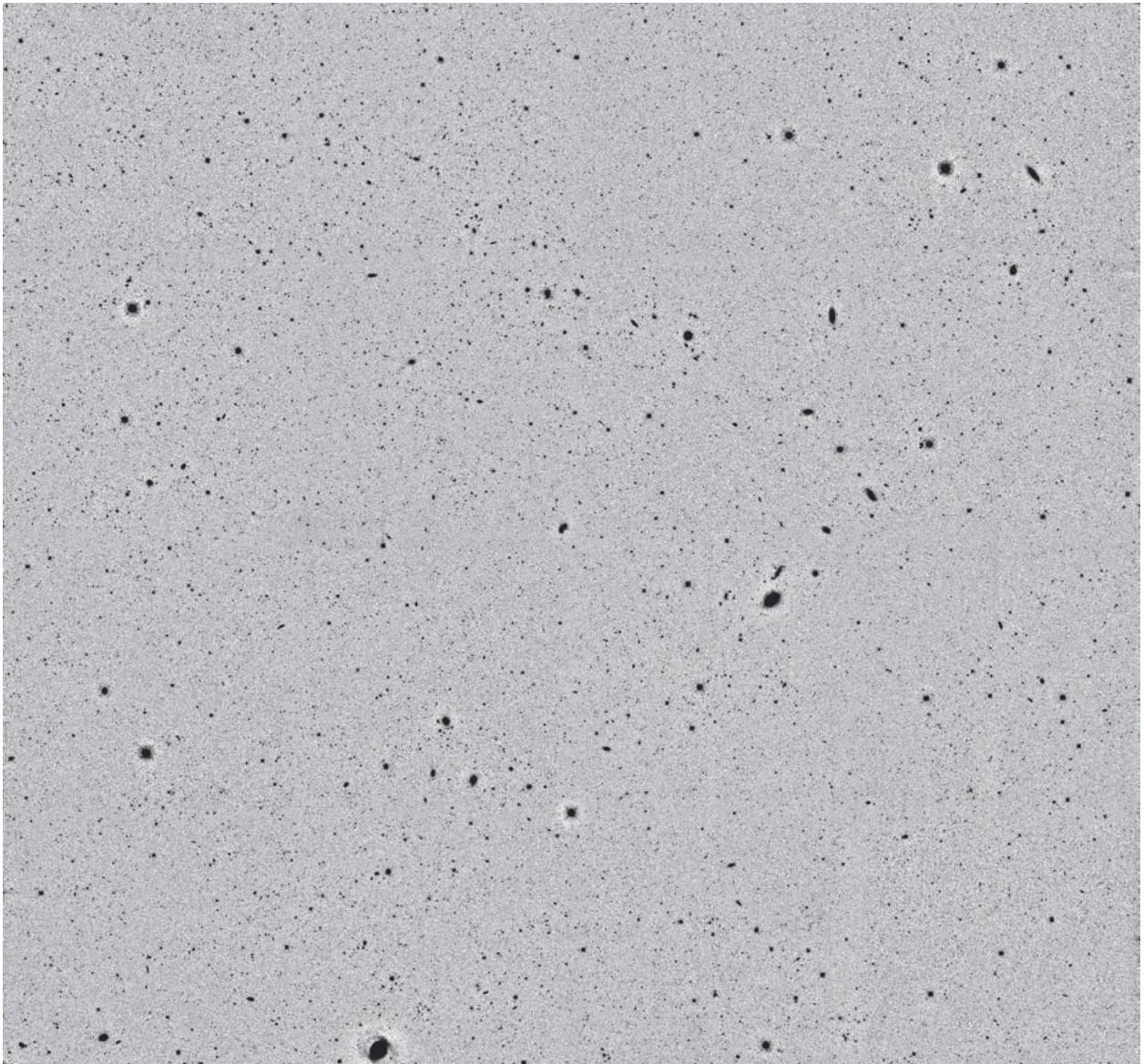


Abb. III.4.3: Dieses volle Mosaik ($1^\circ \times 1^\circ$) aus 4×4 mit OMEGA 2000 gewonnenen H-Band-Aufnahmen des 3h-Felds enthält mehr als 75 000 Objekte mit einem Signal-Rausch-Verhältnis größer als Drei. Jede einzelne Aufnahme ist die Summe aus 50 Einzelaufnahmen, die leicht in ihrer Position verschoben werden (>dithered«), um die Objekte stets auf verschiedene Pixel des Detektors zu platzieren. Jede dieser

Aufnahmen wiederum ist die Summe aus 20 Belichtungen mit je 3 Sekunden Integrationszeit. Diese 20 Belichtungen werden in derselben Teleskopstellung durchgeführt und schon bei der Datenerfassung im Computer addiert. Andernfalls wäre die Datenrate zur Festplatte zu hoch, um sie zu bewältigen. Die gesamte Integrationszeit für dieses Mosaik beträgt demnach $(16 \times 50 \times 20 \times 3)$ Sekunden = 13.3 Stunden.

Galaxien (Abb. III.4.3), so erinnert diese Aufgabe an die Suche nach der berühmten Nadel im Heuhaufen. Bei niedrigeren Rotverschiebungen, zum Beispiel in Abells Katalog naher Haufen, kann man einfach nach Überdichten heller Galaxien suchen. Bei höheren Rotverschiebungen verschlechtert sich der Kontrast von Haufen auf tiefen Aufnahmen gegen die vielen schwachen Vorder- und Hintergrundgalaxien rapide, was es unmöglich macht, Haufen einfach aufgrund der Flächendichte der Galaxien zu finden. Zusätzliche Informationen müssen eingebracht werden. Die Entfernung einer Galaxie

von uns, d.h. ihre Rotverschiebung, ist zweifellos eine solche Information, die es ermöglichen würde, Vorder- und Hintergrundgalaxien direkt zu eliminieren.

Hier kommt unsere Erfahrung aus den CADIS- und COMBO-17-Projekten zum Tragen. Im Laufe der Jahre haben wir Verfahren entwickelt, um mit Hilfe von Aufnahmen, die in vielen verschiedenen Filtern über den sichtbaren Wellenlängenbereich hinweg gewonnen wurden, für jedes Objekt im Feld ein niedrig aufgelöstes Spektrum zu erstellen. Durch den Vergleich dieses Spektrums mit einer Bibliothek von Musterspektren,

die Spektren für alle bekannten Objektklassen enthält, können wir dann das am besten passende Bibliotheks-Spektrum auswählen und damit die wahrscheinlichste Objektklasse bestimmen. Für Galaxien und Quasare müssen die Bibliotheken natürlich auch den gesamten Satz Musterspektren für den ganzen zu durchmusternden Rotverschiebungsbereich enthalten. Letztendlich weist dieses Verfahren der Vielfarben-Klassifikation jedem Objekt im Feld, das heller als eine bestimmte Grenzhelligkeit ist, eine Objektklasse und eine so genannte photometrische Rotverschiebung zu (im Gegensatz zu einer spektroskopischen Rotverschiebung, die aus einem mit einem Spektrographen aufgenommenen Spektrum abgeleitet wird). Für lichtschwächere Objekte wird das Verfahren immer unzuverlässiger. Photometrische Rotverschiebungen sind inzwischen ein allgemein gebräuchliches Hilfsmittel bei extragalaktischen Vielfarben-Durchmusterungen.

Nachdem für jede Galaxie in einem Durchmusterungsfeld die photometrische Rotverschiebung und die Position am Himmel ermittelt sind, kann man nun das oben erwähnte Kontrastproblem überwinden und Haufen wirklich im dreidimensionalen Raum isolieren. Die Idee dabei ist folgende: Für jede Galaxie mit vorliegender photometrischer Rotverschiebung kann man den Radius berechnen, den ein typischer Haufenradius (der Abell-Radius) bei dieser Rotverschiebung am Himmel überspannen würde. Innerhalb dieses Kreises um die Galaxie berechnet man dann für alle anderen Galaxien mit photometrischen Rotverschiebungen die Rotverschie-

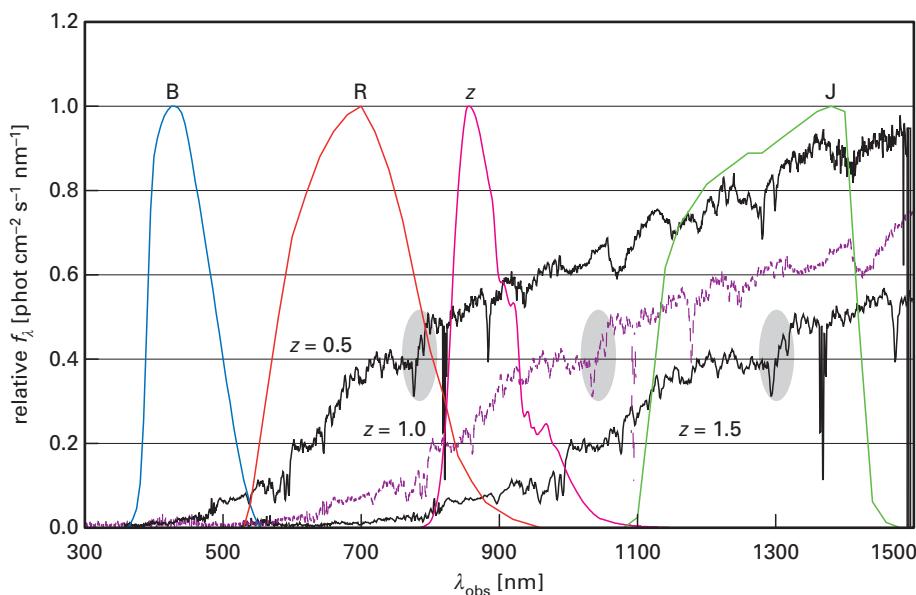
bungsdifferenz zu dieser Galaxie. Rotverschiebungsdifferenzen entsprechen Unterschieden in der Entfernung. Auf diese Weise kann die wahre lokale Galaxien-Volumendichte für jede Galaxie der Stichprobe bestimmt werden. Die Überprüfung der statistischen Verteilung dieser Galaxiendichten weist dann auf Galaxien hin, die sich in überdichten Regionen aufhalten. Dies sind die gesuchten Haufen.

Photometrische Rotverschiebungen sind zwangsläufig weniger genau als Rotverschiebungen, die aus »echten« Spektren abgeleitet werden, und sie werden umso ungenauer, je weniger Filter in der Durchmusterung verwendet werden. Bei CADIS und COMBO-17 wurden 16 bzw. 17 Filter verwendet. Eine so hohe Zahl von Filtern ist jedoch für eine Durchmusterung, die mit den verfügbaren Instrumenten in der verfügbaren Teleskopzeit 10 Quadratgrad abdecken soll, absolut unrealistisch. Die Anzahl der Filter muss daher optimiert werden.

Welche Filter werden benötigt?

Wie oben erwähnt, werden reiche Haufen von einer Population roter elliptischer Galaxien beherrscht. Deren Spektren weisen ein charakteristisches Merkmal auf, den so genannten 4000-Å-Sprung, wo der Fluss um etwa einen Faktor Zwei ansteigt (siehe Abb. III.4.4). Das stärkste Signal bei der Mehrfarben-Klassifikation elliptischer Galaxien kommt von zwei Filtern, die diesen Sprung überspannen. Möchte man eine Durchmusterung bis zu Rotverschiebungen deutlich über Eins hinaus treiben, muss man daher zumindest ein Infrarotband mit aufnehmen. Um die Zahl der Filter im optischen Bereich zu minimieren, starteten wir mit dem vollen Satz von 16 CADIS-Filtern für ein Feld und führten eine Objektklassifikation durch. Dann wurde die Zahl der Filter verringert und die Klassifikation erneut durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit der Originalklassifikation verglichen, insbe-

Abb. III.4.4: Spektrum einer elliptischen Galaxie bei drei verschiedenen Rotverschiebungen. Die Lage des 4000-Å-Sprungs ist durch die graue Ellipse markiert. Die Lage der Filter, die den Sprung bei jeder Rotverschiebung überspannen, ist durch ihre Transmissionskurven angegeben. Für Rotverschiebungen $z > 1$ ist ein Infrarotband unabdingbar.



sondere hinsichtlich der Fehler bei den photometrischen Rotverschiebungen. Es stellte sich heraus, dass mit den fünf Breitbandfiltern B, R, i, z plus dem Infrarotband J immer noch eine verlässliche Klassifikation möglich war. Selbst ein Haufenkandidat, der zufällig in diesem Feld bei einer Rotverschiebung $z \sim 0.6$ lag, konnte mit dem reduzierten Filtersatz wieder gefunden werden. Für die eigentliche Durchmusterung beschlossen wir, das J-Band durch das H-Band zu ersetzen. Bei einer Rotverschiebung $z = 1.5$ liegt das J-Band knapp oberhalb des 4000-Å-Sprungs. Verwendet man dagegen das H-Band, so könnte man die Rotverschiebungsgrenze sogar noch über 1.5 hinaus schieben.

Benötigte Belichtungszeiten

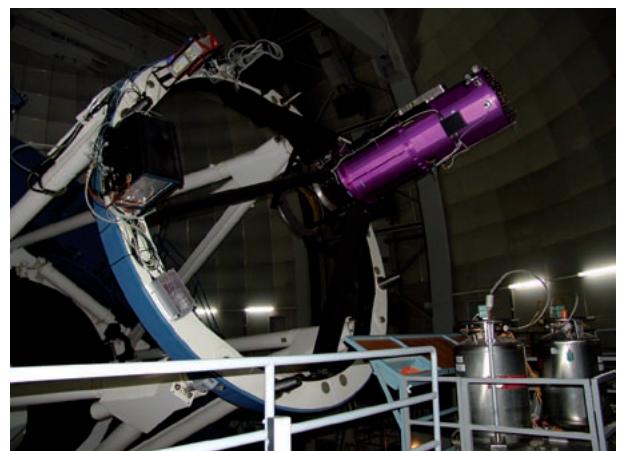
Um die Belichtungszeit zu berechnen, die nötig ist, um ein vorher festgelegtes Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen, muss man die gesamte instrumentelle Anordnung (Atmosphäre, Teleskop und Instrument), die Form des ausgestrahlten Objektspektrums, die Leuchtkraft des Objekts und seine Entfernung zu uns kennen. Gegründet auf diese Informationen kann die Zahl der vom Objekt stammenden nachgewiesenen Photonen sowie das vom Himmelshintergrund herrührende Rauschen als Funktion der Belichtungszeit berechnet werden. Die instrumentellen Daten sind am einfachsten zu beschaffen. Sie sind gewöhnlich auf der Webseite des Observatoriums angegeben. Die erreichbare Entfernung ist durch die Rotverschiebungsgrenze von $z = 1.5$ für die Durchmusterung festgelegt. Für die Leuchtkraft und die Spektren der Objekte mussten wir sinnvolle Annahmen machen, die auf den Ergebnissen der COMBO-17-Durchmusterung beruhen. Da COMBO-17 jedoch kein Infrarotband enthielt, wurden dabei nur Galaxien bis zu einer Rotverschiebung von $z \sim 1$ gefunden. Um von hier bis zu einer Rotverschiebung von $z = 1.5$ zu extrapolieren, sind wir folgendermaßen vorgegangen.

In einem reichen Haufen ist die Anzahl der Galaxien mit einer bestimmten Leuchtkraft entsprechend der so genannten Schechter-Leuchtkraftfunktion über die

Leuchtkraft verteilt. Sie zeigt einen exponentiellen Abfall am hellen Ende und eine Steigung entsprechend einem Potenzgesetz am schwachen Ende; der Umschlagpunkt zwischen den beiden Kurvenästen liegt bei einer typischen Leuchtkraft, die L_* genannt wird. Um einen Haufen als solchen zu erkennen, muss man die Leuchtkraftfunktion deutlich über L_* hinaus in den leuchtschwächeren Teil erkunden. Andernfalls würden nur sehr wenig Haufenmitglieder erfasst und die Natur des Haufens wäre nicht erkennbar. Daher beschlossen wir, bei unserer Untersuchung eine Größenklasse tiefer als L_* zu gehen, was bei typischen Haufen in unserer Nachbarschaft etwa 20 bis 50 Haufenmitglieder mit einschließen würde. Wie von Bell et al. (2004) anhand der COMBO-17-Daten gezeigt wurde, ändert sich L_* mit der Rotverschiebung. Aus dieser Arbeit ergab sich bei einer Rotverschiebung von $z = 1.5$ ein Wert von -22 mag für L_* im B-Band. Was die Form des Spektrums betrifft, so muss man bedenken, dass das Spektrum einer heutigen elliptischen Galaxie nicht typisch ist für eine bei einer Rotverschiebung von $z = 1.5$. Die Sterne in der Galaxie waren damals viel jünger, sodass das zusammengesetzte Spektrum des Sternensembles anders aussah. Als spektrale Energieverteilung haben wir das röteste Spektrum ausgewählt, das im Mittel bei den höchsten Rotverschiebungen in COMBO-17 zu finden war.

All diese Informationen zusammengenommen ermöglichten es uns, die Belichtungszeit zu berechnen, die nötig ist, um eine elliptische Galaxie, die um eine Größenklasse schwächer ist als L_* , bei einer Rotverschiebung von $z = 1.5$ noch nachzuweisen. Zusammen mit der Feldgröße für jedes Instrument konnte dann die gesamte erforderliche Integrationszeit abgeleitet werden. Typische Werte für die Beobachtungseffizienz führten schließlich zu einer Gesamtteleskopzeit für HIROCS von 7.6 klaren Nächten für die Abdeckung eines Quadratgrads in allen

Abb. III.4.5: LAICA (links) und OMEGA 2000 (rechts) im Primärfokus des 3.5-m-Teleskops auf dem Calar Alto. Details zu diesen Instrumenten findet man in früheren Jahresberichten.



fünf Filtern. Unter der Annahme, dass für das COSMOS-Feld die optischen Daten alle öffentlich verfügbar sind, würden wir 73 klare Nächte am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto benötigen, um die Durchmusterung zu vollenden.

Der gegenwärtige Stand von HIROCS

Die ersten Beobachtungen für HIROCS wurden im Juli 2002 mit LAICA durchgeführt (Abb. III.4.5). Die optischen Beobachtungen wurden ab Dezember desselben Jahres durch die Weitfeld-Kamera am 2.2-m-Teleskop auf La Silla ergänzt. OMEGA 2000 wurde 2003 in Betrieb genommen; die ersten Beobachtungen fanden im September desselben Jahres statt. Ab da kamen regelmäßig Infrarotdaten herein. Bei den optischen Daten kam es allerdings zu starken Verzögerungen aufgrund technischer Probleme mit LAICA und dem 3.5-m-Teleskop. Ebenso beeinträchtigten wetterbedingte Ausfälle die Beobachtungen auf La Silla. Wir hatten gehofft, bis Ende 2006 6.6 Quadratgrad in allen 5 Filtern abgedeckt zu haben. Dieses Ziel wurde nicht ganz erreicht, wiederum aufgrund schlechten Wetters. Wir benötigen noch immer 21 Stunden mit OMEGA 2000 und 17 Stunden mit LAICA, die nun für 2007 eingeplant sind.

Das erste mit allen Filtern abgedeckte volle Quadratgrad stand im 3h-Feld zur Verfügung. Wir haben diese Daten benutzt, um die für die geeignete Behandlung dieser Daten notwendige Software zu entwickeln. Wie oben erwähnt, müssen die photometrischen Eigenschaften von Mosaiken mit besonderer Sorgfalt behandelt werden. Die große optische Verzeichnung bei LAICA erforderte ebenfalls eine besondere Behandlung. All diese Hilfsmittel stehen nun zur Verfügung, und die erste volle Reduktion konnte durchgeführt werden.

Erste Ergebnisse

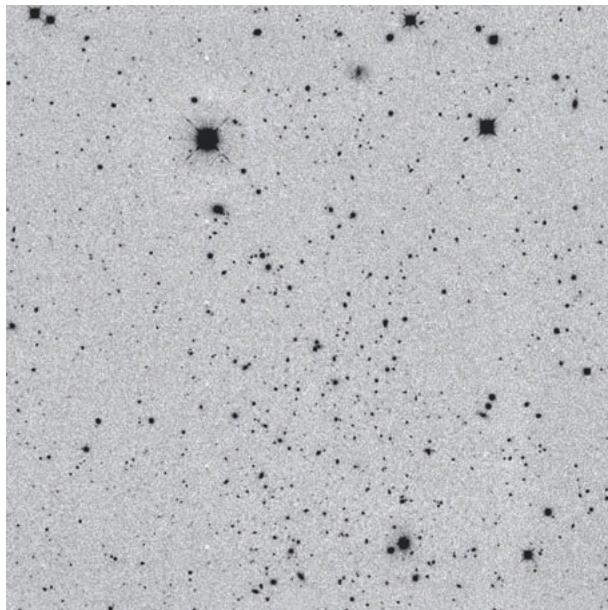
Ein reicher Haufen bei mittlerer Rotverschiebung

Bereits bei der Reduktion des H-Bands erkannten wir mit dem Auge auf einer der OMEGA 2000 Aufnahmen eine Überdichte schwacher Objekte (Abb. III.4.6). Eine im Schnellverfahren durchgeführte Reduktion ergab, dass sie bei einer Rotverschiebung von $z = 0.7$ liegt. Die endgültige Reduktion verbesserte den Wert zu $z = 0.61$.

Erste Suche in einem vollen Datensatz

Bis zum Sommer 2006 waren alle Software-Hilfsmittel einsatzbereit und die Daten in fünf Filtern für das erste ein Quadratgrad große Teilstück des 3h-Felds reduziert. Daten, die erst kurz zuvor für einige Kacheln in einigen Filtern gewonnen worden waren, konnten jedoch noch nicht mit einbezogen werden. Dennoch war es nun möglich, die erste Suche nach hochrotverschobenen Haufen entsprechend der oben beschriebenen Strategie durchzuführen. Das endgültige Datenwerk, mit dem gearbeitet wird, ist eine Tabelle, in der für jedes Objekt eine Zeile angelegt ist und die Spalten die für jedes Objekt gemessenen Parameter wie Position am Himmel, Gestalt, die in den verschiedenen Wellenlängenbändern gemessenen Flüsse sowie die Ergebnisse der Mehrfarben-Klassifikation wie Objektklasse und Rotverschiebung angeben. Auf

Abb. III.4.6: Auf diesem Ausschnitt einer mit OMEGA 2000 gewonnenen H-Band-Aufnahme ist in der Mitte eine Überdichte an schwachen Objekten zu erkennen (*links*). Auf einem aus R-, z- und H-Aufnahmen zusammengesetzten Farbbild sind diese Objekte als eine Wolke roter Galaxien in der Bildmitte erkennbar (*rechts*). Die beiden grünlich erscheinenden hellen Sterne liegen etwa 3' auseinander; Norden ist oben, Osten links



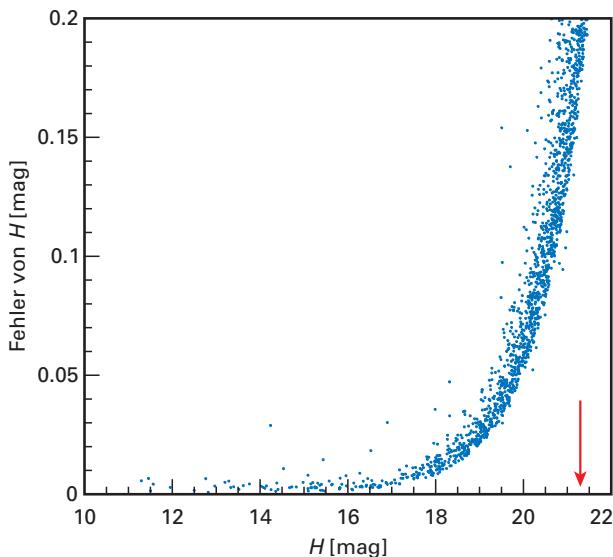
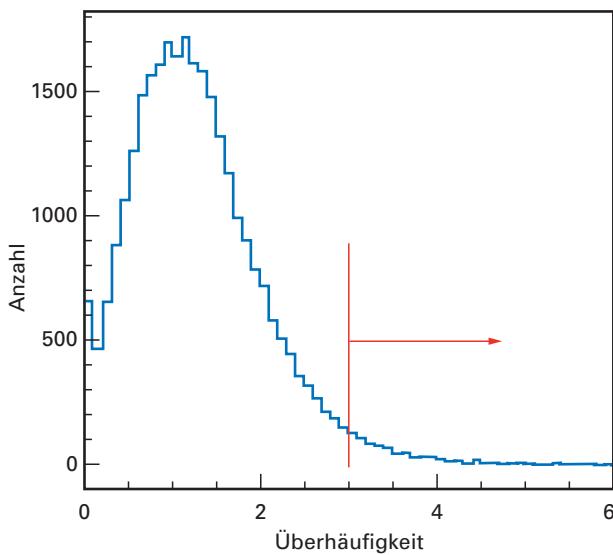


Abb. III.4.7: Verteilung des Helligkeitsfehlers für das H-Band als Funktion der H-Helligkeit. Zur klareren Darstellung ist nur jedes 30. Objekt eingezeichnet. Die Breite der Verteilung ist hauptsächlich durch die verschiedenen Tiefen der 16 Mosaikkacheln gegeben. Die Grenzhelligkeit (5 σ -Niveau, entsprechend $\Delta H = 0.2$ mag) kann zu 21.3 mag abgelesen werden (roter Pfeil). Das ist schwächer als das ursprünglich geplante Ziel von 20.9 mag, da das Seeing während der Beobachtungen besser als erwartet war. Am hellen Ende liegt die photometrische Unsicherheit deutlich unter 1 %.

diese Tabelle können die Hilfsmittel aus dem MIDAS-Tabellensystem angewandt werden, um Ergebnisse aufzuzeichnen und auf den Objektparametern beruhende Auswahloperationen durchzuführen. Diese Tabelle enthielt 145 000 Objekte in 0.96 Quadratgrad. Für 137 000

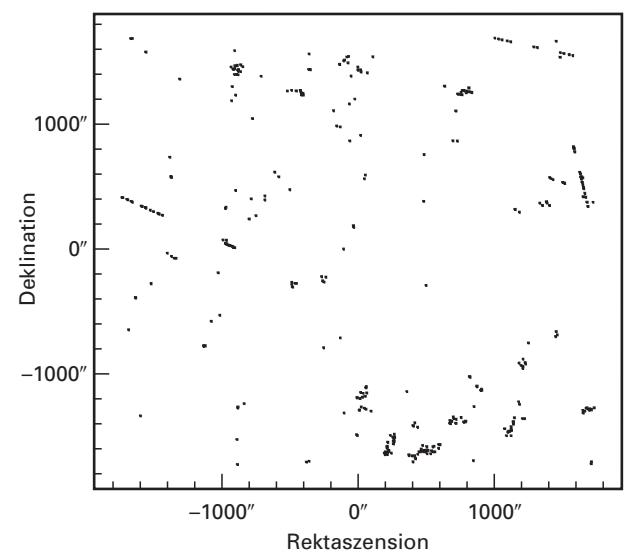
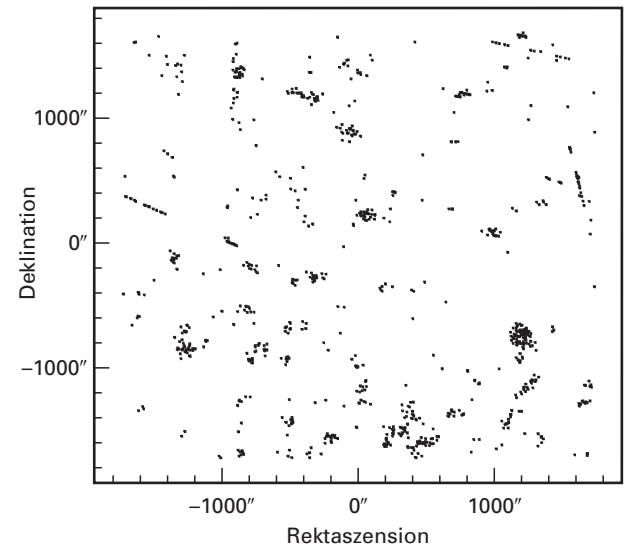
Abb. III.4.8: Verteilung der normalisierten lokalen Objektdichten. Um die Haufenkandidaten auszuwählen, wurde ein Schnitt bei einer Überdichte von 3 (roter Pfeil) verwendet.



von ihnen konnte eine photometrische Rotverschiebung abgeleitet werden; bei 36 600 von diesen war die Genauigkeit besser als 0.1. Als erstes musste überprüft werden, ob die Abschätzung der Belichtungszeit, die zum Erreichen der gewünschten Grenzhelligkeit nötig ist, richtig war. Wie sich herausstellte, war sie für die meisten Filter sogar ein wenig konservativ (Abb. III.4.7).

Um Haufenkandidaten in der Datentabelle auszuwählen, muss die Anzahl der Objekte durch einen

Abb. III.4.9: Positionen von Galaxien, die in überdichten Regionen am Himmel liegen. Im oberen Diagramm sind Objekte aller Rotverschiebungen eingezeichnet, im unteren nur Galaxien mit Rotverschiebungen $z > 1$. Einige unechte Signale wie Satellitenspuren wurden noch nicht entfernt. Der visuell gefundene Haufen ist auf dem oberen Diagramm bei [1200, -750] klar zu erkennen. Das stärkste Signal im unteren Diagramm bei [500, -1600] ist der Haufen bei einer Rotverschiebung von $z = 1.25$.



schrittweisen Auswahlprozess entsprechend verschiedener Objekteigenschaften reduziert werden. Die erste Auswahl geschieht durch Überdichte. Für jede Galaxie mit einer photometrischen Rotverschiebung wird die lokale Objektdichte wie oben skizziert berechnet und in die Tabelle eingetragen. Ein Histogramm der Überdichten für alle Galaxien ist in Abb. III.4.8 zu sehen. Bei diesem ersten Schritt werden alle Objekte ausgewählt, die in Regionen mit Überdichten höher als 3 liegen. Haufen werden in einem Diagramm ausgesondert, in dem die Position der ausgewählten überdichten Objekte am Himmel eingetragen ist (Abb. III.4.9). Anhäufungen von Galaxien in überdichten Regionen weisen auf Haufenkandidaten hin.

Ein Blick auf Abb. III.4.9 zeigt, dass in der Tat überall Anhäufungen von Objekten vorhanden sind. Einige davon sind sicherlich unecht (wie die Satellitenspuren) und müssen einzeln entfernt werden. In diesem Stadium haben wir die auffälligsten Konzentrationen von Hand überprüft. Ohne irgendeine weitere Auswahl ist die auffälligste Konzentration bei $[1200, -750]$ der bereits visuell identifizierte Haufen (Abb. III.4.9, oben). Da wir nach den am weitesten entfernten Haufen suchen, wurden im nächsten Schritt überdichte Regionen ausgewählt, die aus Galaxien mit photometrischen Rotverschiebungen $z > 1$ bestehen (Abb. III.4.9, unten). Der erste Kandidat, den wir für eine nähere Inspektion auswählten, ist das Gebiet um $[500, -1600]$ im unteren Zentralbereich. Die Auswahl von Objekten wurde weiter voran getrieben, indem nur Objekte ausgewählt wurden, die innerhalb dieser Gebiete lagen, d.h. in dem Intervall $300 < x < 655$ und $-1730 < y < -1480$. Die Anzahl der ausgewählten Objekte war jetzt auf nur 31 (von insgesamt 145 000) zusammengeschrumpft. Die Verteilung der photometrischen Rotverschiebungen für diese verbleibenden Galaxien (Abb. III.4.10) zeigt in der Tat, dass es sich dabei um einen Haufenkandidat bei einer Rotverschiebung von $z \sim 1.24$ handelt. Die Breite der Verteilung entspricht der, die wir aufgrund der Rotverschiebungsgenauigkeiten erwarten. Ein weiterer Beweis, dass wir einen echten Haufen gefunden haben, ist die hervorragende Übereinstimmung unserer photometrischen Datenpunkte mit den Musterspektren. Ein Beispiel ist in Abb. III.4.11 zu sehen.

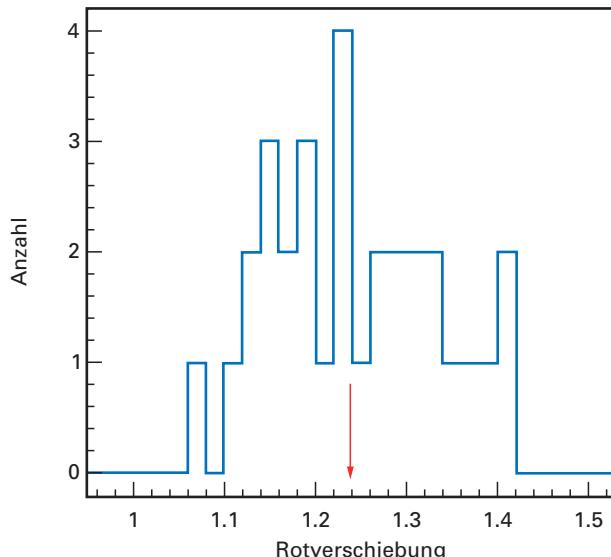
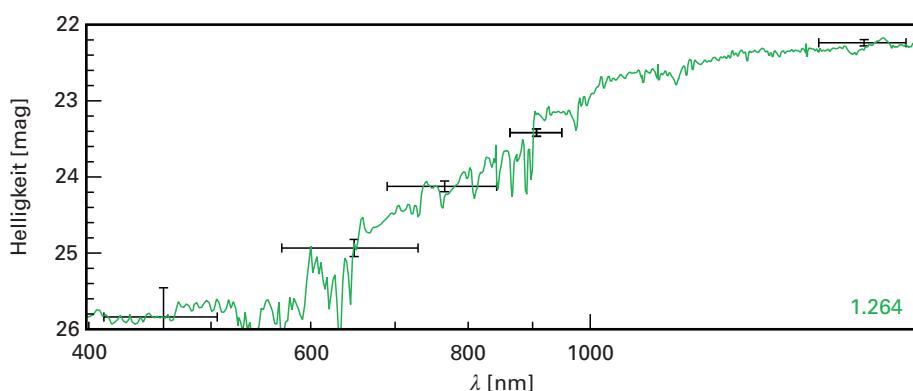


Abb. III.4.10: Verteilung der photometrischen Rotverschiebungen für den ersten HIROCS-Haufenkandidaten bei einer Rotverschiebung $z > 1$. Die mittlere Rotverschiebung beträgt $z = 1.24 \pm 0.02$ (die Streuung für die 31 Objekte beträgt 0.093 in Rotverschiebung).

Ein aus R-, z- und H-Aufnahmen erstelltes Falschfarbenbild dieser Region zeigt den Haufenkandidaten bei der Rotverschiebung $z = 1.24$ als Ansammlung roter Galaxien in der Bildmitte (Abb. III.4.12).

Nicht weit am Himmel davon entfernt wurde ein weiterer Kandidat mit einer noch größeren Rotverschiebung von $z = 1.35 \pm 0.02$ gefunden. Er ist jedoch weniger reich an Galaxien (und damit Masse) und somit weniger

Abb. III.4.11: Das am besten passende Musterspektrum (grün) für ein Mitglied des Haufens bei der Rotverschiebung $z = 1.24$. Die photometrische Rotverschiebung dieser speziellen Galaxie wurde zu $z = 1.26 \pm 0.14$ bestimmt. Die photometrischen Messungen in unseren 5 Filtern sind durch die schwarzen Kreuze dargestellt, deren Breite die Filterbreite und die Höhe den photometrischen Fehler angeben. Diese Galaxie hat eine R-Band-Wega-Helligkeit von 24.8 mag.



beeindruckend in seinem Erscheinungsbild. Inzwischen sind die Daten für das erste Quadratgrad des 3h-Felds nahezu vollständig aufgenommen und die Bilder mit einer Software-Version reduziert, die aufgrund der in der ersten Runde der Datenanalyse gewonnenen Erfahrung weiter optimiert wurde. Die endgültige Liste der Haufenkandidaten für dieses Feld wird somit bald verfügbar sein.

Wie vergleichen sich diese Rotverschiebungen mit den bisher veröffentlichten entferntesten Haufen? Das Kegeldiagramm in Abb. III.4.13 zeigt die Verteilung der momentan bekannten Haufen über der Rotverschiebung, kodiert nach der Entdeckungsmethode. HIROCS-Haufen zählen zu den entferntesten Haufen, die man zur Zeit kennt. Aber es ist auch offensichtlich, dass andere Projekte wie UKIDSS (eine Durchmusterung bei Infrarotwellenlängen mit dem UKIRT-3.8-m-Teleskop auf Mauna Kea, die in drei Filtern eine größere Fläche bis zu schwächeren Größenklassen als HIROCS abdecken wird) oder Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop SPITZER scharfe Konkurrenten sind bei dem Versuch, Galaxienhaufen mittels ihrer stellaren optischen bzw. Infrarotstrahlung (anstatt der vom Zwischenhaufenplasma ausgesandten Röntgenstrahlung) zu finden.

Ausblick

Wir haben gezeigt, dass es möglich ist, hochrotverschobene Galaxienhaufen in der tiefen Mehrfarben-Durchmusterung HIROCS, die auch ein Infrarotband enthält, zu finden. Nun hoffen wir, eine recht große Stichprobe solcher Objekte sicher nachzuweisen, um sie in naher Zukunft mit Großteleskopen wie dem VLT

Abb. III.4.12: Dieses Falschfarbenbild aus der Überlagerung der Aufnahmen in R, z und H zeigt den Haufenkandidaten bei der Rotverschiebung $z = 1.24$ als Konzentration (schwacher!) roter Galaxien in der Bildmitte

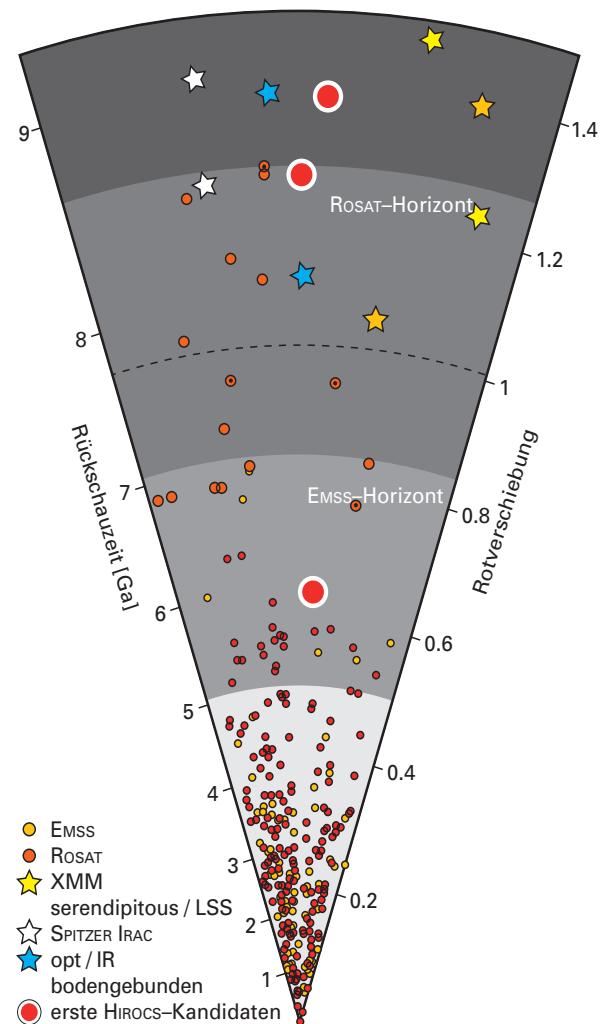


Abb. III.4.13: Verteilung der heute bekannten Haufen im Rotverschiebungsraum. EMSS, ROSAT und XMM bezeichnen Haufen, die durch ihre Röntgenstrahlung gefunden wurden. Optisch ausgewählte Haufen bei niedriger Rotverschiebung (wie die Abell-Haufen) sind nicht eingetragen. (aktualisiert nach Mullis, Ringberg Workshop 2005)

und LBT weiter untersuchen zu können. Ihre genauere Untersuchung wird klären helfen, ob sich die Haufen, die durch die Suche nach Konzentrationen von Sternlicht gefunden wurden, von jenen unterscheiden, die bei tiefen Röntgendifferenzmusterungen entdeckt wurden. Die Erforschung der Galaxienpopulationen in den entfernten Haufen und der Vergleich mit ihren Gegenstücken bei geringerer Rotverschiebung werden sicherlich wichtige Beiträge zu unserem Verständnis der Entwicklung von Galaxien in Haufen und im Allgemeinen liefern.

*Hermann-Josef Röser, Hans Hippelein,
Michael Zatloukal, Kris Blindert,
zusammen mit Siegfried Falter (Köln)
und Christian Wolf (Oxford)*

B. COSMOS – die Untersuchung der kosmischen Entwicklung von Galaxien und Schwarzen Löchern

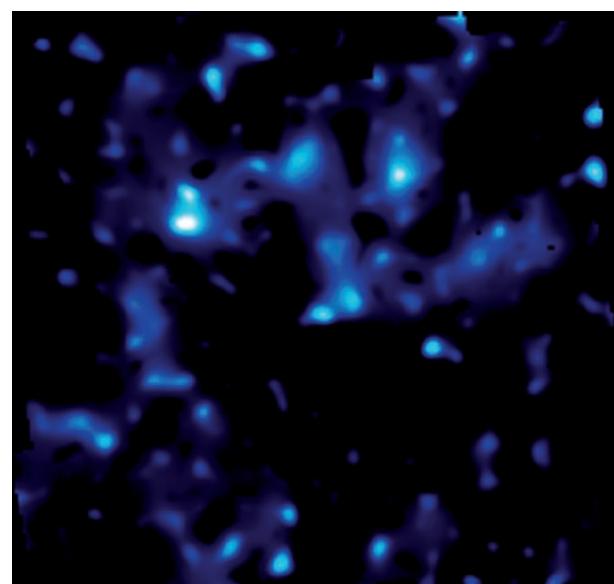
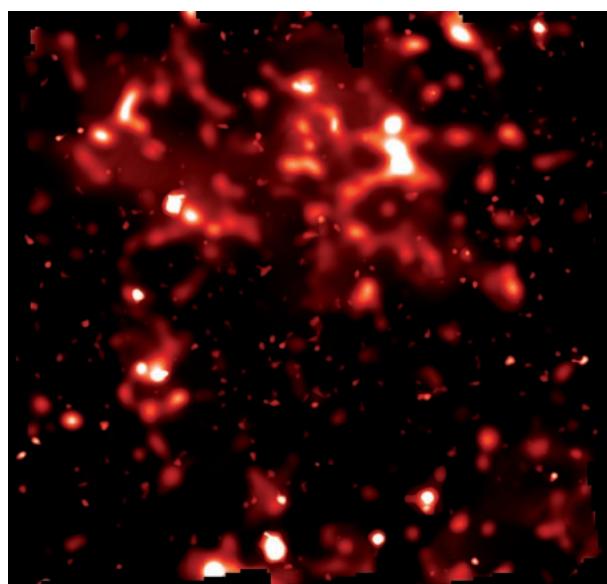
Einander ergänzende und verstärkende Anstrengungen auf theoretischem Gebiet und auf dem Feld der Beobachtungen haben in den letzten zehn Jahren zu gewaltigen Fortschritten beim Verständnis der Entstehung und Entwicklung von Galaxien und ihrer großräumigen Strukturen geführt. In tiefen Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE und den größten bodengebundenen Teleskopen wurden Galaxien- und AGN-Populationen (»Aktive Galaktische Kerne«) bis zurück zu einer Rotverschiebung von $z = 6$ erforscht, als das Universum noch nicht einmal eine Milliarde seiner heutigen 13 Milliarden Jahre erreicht hatte. Ebenso bemerkenswert ist der enorme Erfolg numerischer Simulationen von Λ CDM-Modellen (das sind kosmologische Modelle mit kalter dunkler Materie unter Einschluss einer kosmologischen Konstanten) bei der Reproduktion vieler der heutigen Eigenschaften der großräumigen Strukturen, die alle von einem anfänglichen, fast gleichförmigen, heißen Universum ausgehen.

Die tiefen abbildenden Durchmusterungen (HDF, GOODS, GEMS, HUDF), die mit dem Weltraumteleskop HUBBLE durchgeführt wurden, haben hervorragendes Bildmaterial von Galaxienpopulationen in schmalen Kegeln bis hinaus zu $z \sim 5 - 6$ geliefert. Bodengebundene Mehrfarbenaufnahmen und Spektroskopie liefern die Rotverschiebungen und damit das kosmische Alter dieser Populationen. Sehr kurz ausgedrückt waren die Galaxien des frühen Universums unregelmäßiger und wechselwirkten häufiger miteinander als heute, und die allgemeine kosmische Sternentstehungsrate erreichte ihren Gipfel vermutlich bei $z \sim 1 - 3$ mit dem Zehn- bis Dreißigfachen der heutigen Rate. Obwohl einiges an großräumiger Struktur und Haufenbildung bei den

leuchtkräftigen, hochrotverschobenen Galaxien erkennbar ist, sind es die theoretischen Simulationen, die bislang die großräumigere Struktur der dunklen Materie am besten beschrieben (oder zumindest Hypothesen dazu aufgestellt) haben (siehe Abb. III.4.14).

In der Tat ist die große Lücke in unserem heutigen Verständnis die Frage, welche Verbindung zwischen der großräumigen Struktur und der Entwicklung leuchtkräftiger Galaxien besteht. Für die Beziehungen zwischen kosmischer Massenverteilung, Umgebung und Galaxieneigenschaften (Morphologie, Größe und Alter) gibt es jenseits einer Rotverschiebung von $z \sim 0.5$ keine starken empirischen Einschränkungen. Man glaubt, dass die Geschwindigkeit der Galaxienentwicklung und die morphologische Mischung stark von der Galaxienumgebung (der großräumigen Struktur) abhängen, doch dies ist nur für das lokale Universum

Abb. III.4.14: Zwei Falschfarbenbilder vergleichen die Verteilung der normalen Materie (rot, links) mit jener der dunklen Materie (blau, rechts) im COSMOS-Feld. Die Helligkeit der Klumpen entspricht der Massendichte. Der Vergleich zwischen dunkler und normaler Materie wird die entscheidenden stützenden Beobachtungen für zukünftige Theorien darüber liefern, wie sich unter der Anziehungskraft der Gravitation Struktur im sich entwickelnden Universum gebildet hat. Dunkle Materie ist eine unsichtbare Form von Materie, die den Großteil der Masse des Universums stellt. Ihre Verteilung am Himmel wird über den schwachen Gravitationslinseneffekt gemessen. Dabei handelt es sich um die Verzerrung des Lichts ferner Galaxien (ähnlich wie bei einem Spiegel in einem Lachkabinett) aufgrund der gravitativen Krümmung des Raums durch dunkle Materie entlang unserer Sichtlinie. Für die Konstruktion der gesamten Karte mussten die Formen von einer halben Million Hintergrundgalaxien vermessen werden. Die Verteilung der sichtbaren Materie wurde abgeleitet aus der Verteilung des von Galaxien stammenden Lichts und des heißen Gases in Galaxienhaufen, das Röntgenstrahlung aussendet.



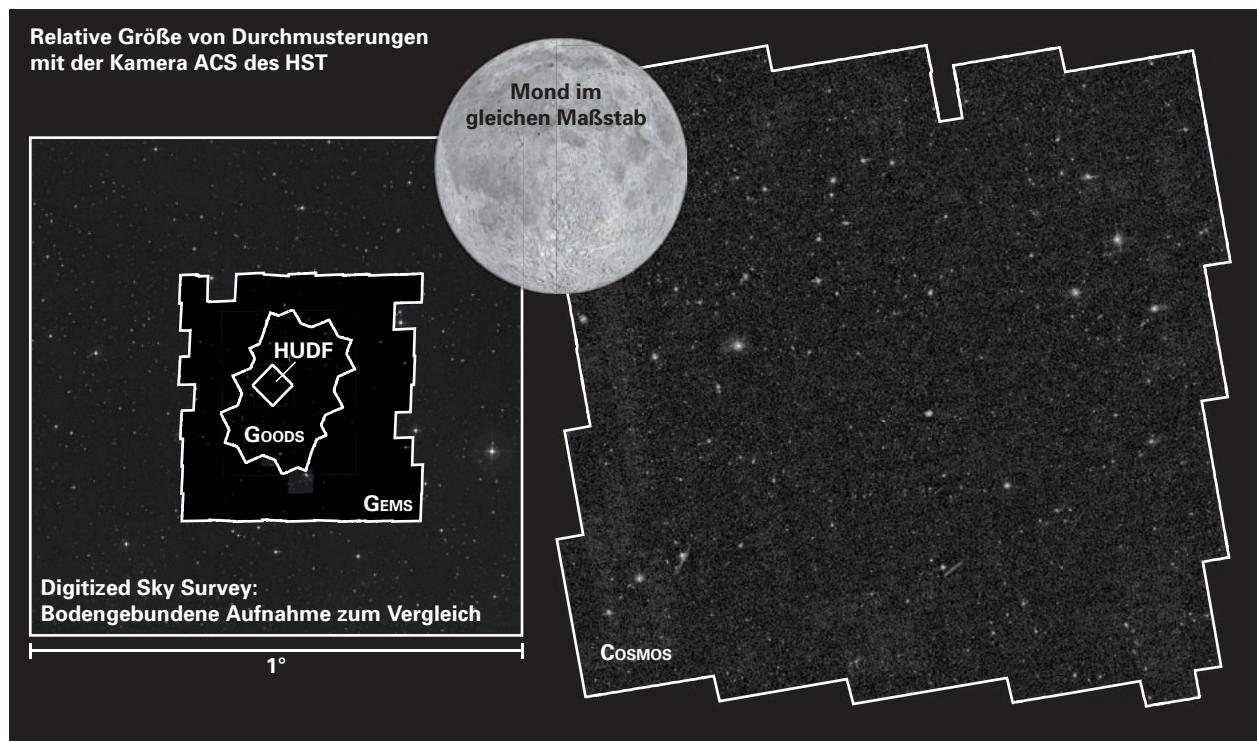
bestätigt (z.B. durch den Sloan Digital Sky Survey). Eine erkennbare großräumige Struktur tritt bei niedriger Rotverschiebung auf Skalen von bis zu ~ 100 Mpc auf, einschließlich Leerräumen, Filamenten, Gruppen und Haufen. Um die Galaxienentwicklung über die gesamte Bandbreite an Umgebungen und Rotverschiebungen einigermaßen abbilden zu können, benötigt man deshalb Daten, die große Flächen abdecken, verbunden mit exakten spektroskopischen Rotverschiebungen ($\Delta z/(1+z) \leq 0.01$), um längs der Sichtlinie Einzelheiten innerhalb der großräumigen Struktur voneinander unterscheiden zu können. Das COSMOS-Projekt ist eine »panchromatische«, d.h. für alle Wellenlängenbereiche empfindliche, abbildende und spektroskopische Durchmusterung zur Erforschung der Entwicklung von Galaxien und super-

massereichen Schwarzen Löchern in Abhängigkeit ihrer kosmischen Umgebung.

COSMOS – The Cosmic Evolution Survey: eine Durchmusterung zur Erforschung der kosmischen Entwicklung

Die internationale panchromatische COSMOS-Durchmusterung (PI: Nick Scoville, California Institute of Technology) ist die erste Durchmusterung, die eine genügend große Fläche umfasst, um die miteinander gekoppelte Entwicklung von großräumiger Struktur, Galaxien, Sternentstehung und AGN zu untersuchen. Das äquatornahe Feld des COSMOS-Projekts bietet den entscheidenden Vorteil, dass sich alle großen Observatorien sowohl auf der Nord- wie auf der Südhalbkugel an dieser großen Aufgabe beteiligen können: COSMOS ist die größte Durchmusterung, die je mit dem Weltraumteleskop Hubble durchgeführt wurde (590 Erdumkreisungen), wobei ein äquatoriales etwa zwei Quadratgrad großes Feld mit I-Band-Belichtungen abgebildet wurde, die jeweils eine Erdumkreisung dauerten (Abb. III.4.15). Umfangreiche Vielfarben-Beobachtungen dieses Felds wurden vom Boden und vom Weltall aus zusammengetragen – und weitere werden erwartet – die das gesamte Spektrum vom Röntgen-, UV-, optischen/Infrarot-, mittleren Infrarot-, Millimeter/Submillimeter- bis zum Radiobereich mit extrem hochempfindlichen Abbildungen und ausgedehnter Spektroskopie abdecken. Dies macht das COSMOS-Feld zu einer hervorragenden Hilfsquelle für die beobachtende Kosmologie und für das Studium der Galaxienentwicklung in dem wichtigen

Abb. III.4.15: Da das Weltraumteleskop Hubble ein enges Gesichtsfeld hat, das nur einen Bruchteil des Winkeldurchmessers des Mondes beträgt, müssen Abbildungen mosaikartig zusammengesetzt werden, um größere Himmelsgebiete durchzumustern und so eine breite Palette von Fragen zur Galaxienentwicklung und Kosmologie in Angriff nehmen zu können. The Cosmic Evolution Survey (Cosmos) ist das größte Hubble-Himmelsmosaik. Es überdeckt zwei Quadratgrad am Himmel. Der Erdmond hat einen Durchmesser von einem halben Grad. Zum Vergleich sind einige andere HST-Durchmusterungsfelder gezeigt, eingefügt in ein Quadratgrad Himmel im südlichen Sternbild Fornax. Von weniger tiefen bis zu den tiefsten Aufnahmen: GEMS – Galaxy Evolution from Morphology and Spectral Energy Distributions, GOODS (Great Observatories Origins Deep Survey), Hubble Ultra Deep Field.



Rotverschiebungsbereich $0.5 < z < 3$, eine Zeitspanne, die etwa 75 % des Alters des Universums überdeckt.

Diese das gesamte elektromagnetische Spektrum erfassende Vorgehensweise ist nötig, um die miteinander gekoppelte Entwicklung junger und alter Sternpopulationen, der Sternentstehungsausbrüche (engl. Starbursts), des interstellaren Mediums (molekulare und ionisierte Komponente), der supermassereichen Schwarzen Löcher, der AGN und der Umgebung aus dunkler Materie erforschen zu können. Der Vielfarben-Ansatz ist auch deshalb erforderlich, weil Licht aus verschiedenen kosmischen Epochen unterschiedlich stark rotverschoben ist und weil viele der sich am schnellsten entwickelnden Regionen in Galaxien von Staub verdeckt sind. Die große Flächenabdeckung von COSMOS ist dadurch begründet, dass man die größten Strukturen, die es im lokalen Universum gibt, stichprobenweise untersuchen will – bei $z = 1$ entsprechen 1 % einer mitbewegten Strecke von ~ 90 Mpc. Eine kleinere Flächenabdeckung würde zu starken kosmischen Schwankungen führen.

Zu den Kernthemen der COSMOS-Durchmusterung gehören: (a) die Verfolgung des Zusammenbaus von Galaxien, Haufen und dunkler Materie auf Skalen bis hin zur Größe des lokalen Coma-Galaxienhaufens, (b) die Aufzeichnung der Entwicklung der Galaxienmorphologie, der Verschmelzung von Galaxien und der Sternentstehung und (c) die Untersuchung der Entwicklung von AGN und der Beziehung zwischen dem Wachstum von Schwarzen Löchern und der Galaxienentwicklung – und dies alles als Funktion der großräumigen Strukturumgebung und der Rotverschiebung. COSMOS findet rund 2 000 000 Galaxien und AGN und erfasst dabei ein Volumen im hochrotverschobenen Universum, das in etwa dem vom Sloan Digital Sky Survey lokal untersuchten Volumen gleicht. Mit dieser großen Anzahl verfügbarer Objekte kann das Wachstum von Galaxien, AGN und Strukturen der dunklen Materie über den größten Teil der kosmischen Geschichte hinweg genau verfolgt werden.

Die VLA-COSMOS-Durchmusterung

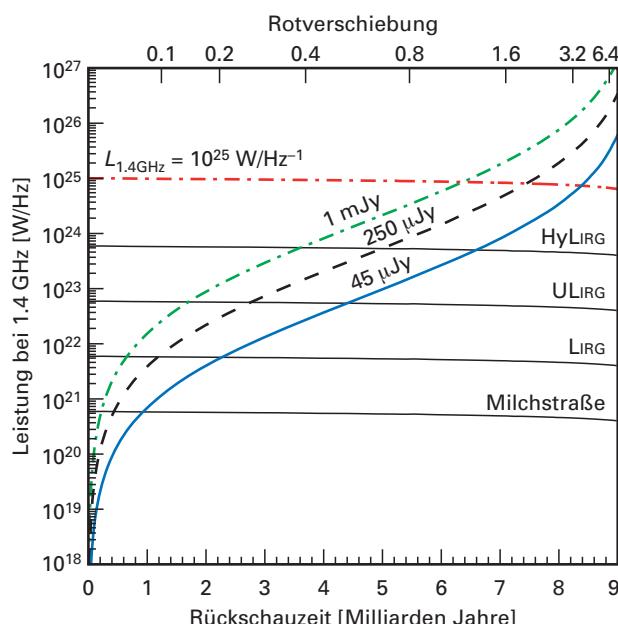
Bei Radioquellenzählungen oberhalb des Milli-Jansky-Niveaus herrschen Radiogalaxien und Quasare vor, die von aktiven galaktischen Kernen (AGN) in elliptischen Wirtsgalaxien angetrieben werden. Tiefe Radiodurchmusterungen bei 1.4 GHz zeigen jedoch einen Anstieg in den integrierten Quellenzählungen auf Sub-Milli-Jansky-Niveau, der auf eine Population schwächer Radioquellen hinweist, die weit über jener liegt, die man von den bei höheren Flüssen vorherrschenden Radiogalaxien hoher Leuchtkraft und Quasaren her erwarten würde. Während es sich bei Radioquellen mit relativ hellen optischen Gegenstücken um »Starburst«-Galaxien handelt, (Galaxien mit ausbruchartig vermehrter Sternentstehung) sind die mit schwächeren optischen Gegenstücken häufig röter als man es für Galaxien vom frühen Typ kennt. Jüngste eingehende



Abb. III.4.16: Mit dem Very Large Array (VLA) des National Radio Astronomy Observatory (NRAO) wurde das COSMOS-Feld bei 1.4 GHz (20 cm) abgebildet. An mehr als 45 Tagen wurde das Feld jeweils 6 Stunden lang beobachtet. (Bild: NRAO/AUI)

Nachfolgeuntersuchungen schwächer Radioquellen in mehreren Wellenlängenbereichen zeigten eine Mischung aus Galaxien mit aktiver Sternentstehung und AGN-Wirtsgalaxien. Die genaue Mischung der verschiedenen Populationen (hochrotverschobene AGN, Post-Starburst-Galaxien bei mittleren und Emissionslinien-Galaxien

Abb. III.4.17: Vergleich der Nachweisgrenze der VLA-COSMOS-Durchmusterung mit anderen großen Radiodurchmusterungen bei 1.4 GHz in Abhängigkeit von der Radialeuchtkraft (Leistung) und Rückschauzeit (oder Rotverschiebung). Die horizontalen Linien geben die Grenze für verschiedene Klassen von Galaxien mit aktiver Sternentstehung an, von einigen Sonnenmassen pro Jahr (Milchstraße) bis zu mehreren hundert Sonnenmassen pro Jahr (Ultra-leuchtkräftige Infrarotgalaxien – ULIRGS). Zusätzlich ist auch die Grenzlinie angegeben, oberhalb derer sämtliche Radiostrahlung von einem AGN stammen muss.

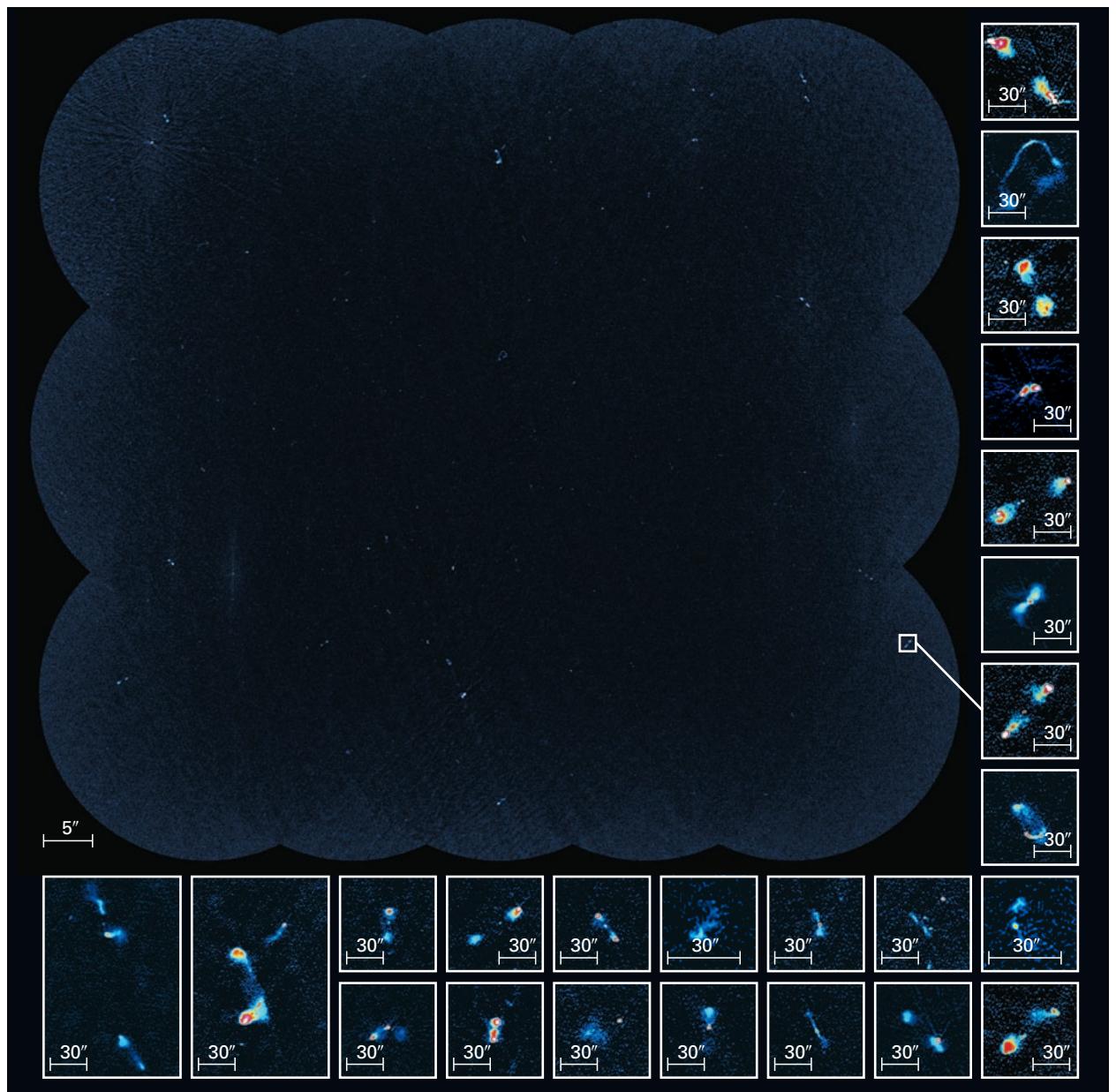


bei niedrigen Rotverschiebungen) als Funktion des Radioflusses ist jedoch, insbesondere für die schwächsten heute beobachtbaren Radioquellen, nicht gut bekannt.

Um die wahre Natur und zeitliche Entwicklung der Mikro-Jansky-Population zu erforschen, muss man tiefe Radiobeobachtungen mit hochwertigen Abbildungs- und spektroskopischen Daten bei anderen Wellenlängen verknüpfen und dabei einen möglichst großen Bereich des elektromagnetischen Spektrums abdecken. Um die COSMOS-Datenbank voll ausnutzen zu können, war es un-

bedingt erforderlich, die Auflösung der Radiobeobachtungen bei 1.4 GHz an die typische Auflösung für bodengebundene optische bzw. Nahinfrarotdaten von $\sim 1''$ anzugleichen. Daher wurden die Beobachtungen mit dem Very Large Array des NRAO (VLA, Abb. III.4.16) in der A-Konfiguration durchgeführt, die eine Auflösung von etwa $1.5''$ (Halbwertsbreite) bei 1.4 GHz liefert. Um das große Gebiet des COSMOS-Felds abzudecken, sind Mosaikaufnahmen nötig. Die VLA-COSMOS-Durchmusterung besteht aus dem Pilotprojekt (Überprüfung der Mosaikfähigkeit des VLA), dem großen Projekt (Abbildung des vollen COSMOS-Felds, Abb. III.4.17) und dem noch laufenden tiefen Projekt (Konzentration auf das zentrale Quadratgrad und die im (Sub-)Millimeterbereich entdeckten sehr staubreichen Galaxien mit aktiver Sternentstehung – siehe unten).

Abb. III.4.18: Das COSMOS-Feld bei 1.4 GHz; das Bild besteht aus 23 getrennten Aufnahmen, jede von der Größe des Vollmonds. Es enthält (im Gesamtbild schwer zu erkennen) etwa 3600 Quellen, die meisten davon Punktquellen, und etwa 60 Radiogalaxien (siehe kleine Bildtafeln rechts und unten).



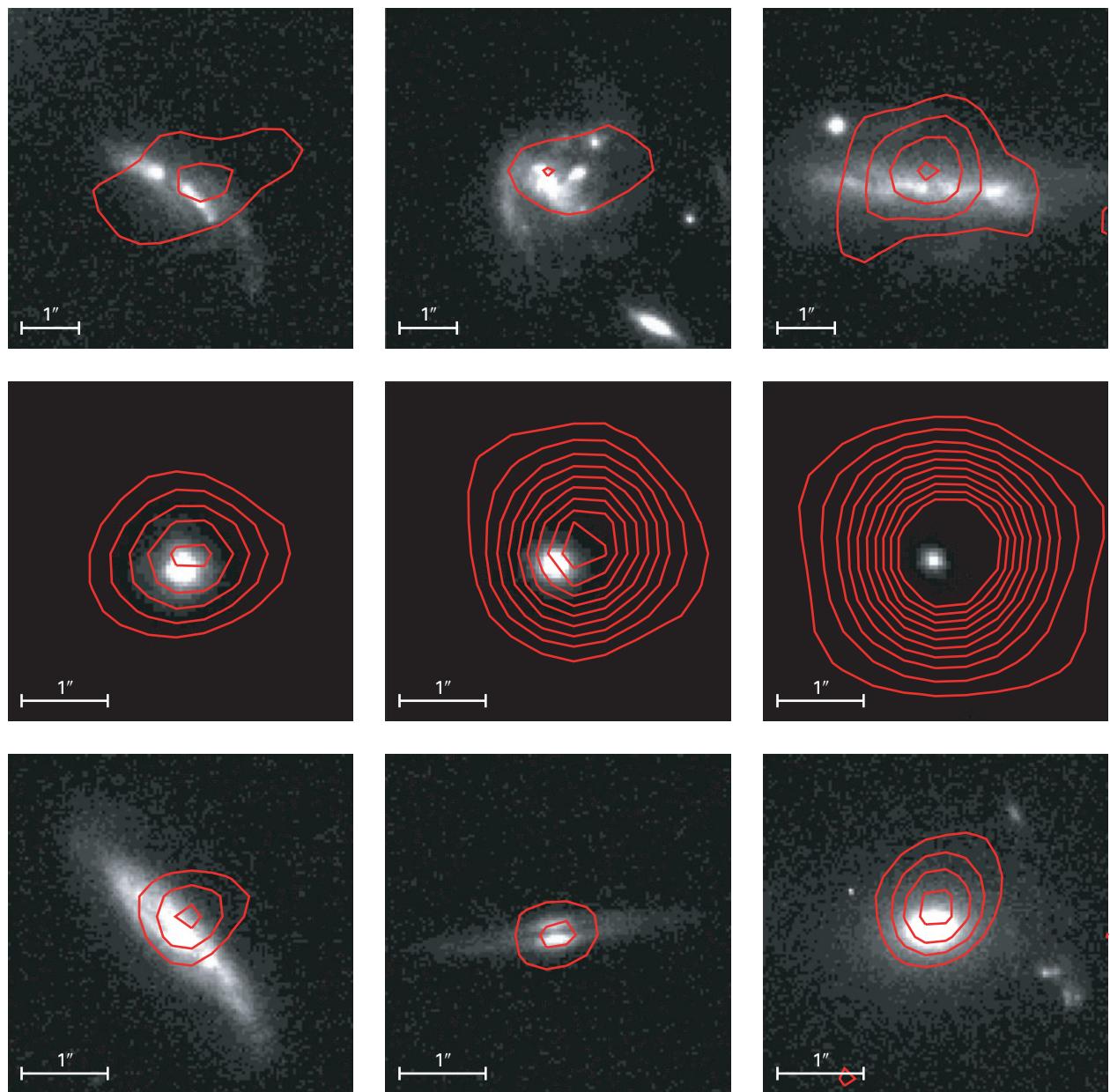
Das COSMOS-Feld wurde als Teil der VLA-COSMOS-Durchmusterung (PI: Eva Schinnerer) mit dem VLA in der A + C-Konfiguration bei 1.4 GHz kartiert, was die bei weitem größte Flächenabdeckung bei dieser Empfindlichkeit und Winkelauflösung ergab (Abb. III.4.18). Der Katalog mit etwa 3500 Quellen liefert in Kombination mit den COSMOS-Vielfarbdaten den zur Zeit besten Datensatz für die Untersuchung der

schwachen Radioquellenpopulation, einschließlich seltener Objekte wie zum Beispiel Radiogalaxien.

Die VLA-COSMOS-Radiobeobachtungen wurden der Gesamt Tiefe der COSMOS-Vielfarbdaten angepasst, um eine breite Palette an Themen in Zusammenhang mit der Geschichte der Sternentstehung, dem Wachstum supermassereicher Schwarzer Löcher und der räumlichen Haufenbildung von Galaxien untersuchen zu können. Die

Abb. III.4.19: Beispiele für optische Gegenstücke von Radioquellen aus dem VLA-COSMOS-Katalog. Die mit dem HST abgebildete Morphologie (Grauskala) kann bei den näheren Zielobjekten benutzt werden, um den Ursprung der Radiostrahlung zu klassifizieren (Konturen, beginnend bei 3σ in Schritten von 2σ). *Obere Reihe:* Sternentstehungsgalaxien, bei denen die Radiostrahlung mit der galaktischen Scheibe und

ihren Spiralarmen zusammenfällt, wo die jungen Sterne geboren werden. *Darunter:* Galaxien mit AGN, die entweder auf der optischen Aufnahme einen klar erkennbaren aktiven Kern zeigen (wie Quasare vom Typ 1, *mittlere Reihe*), oder die durch die im Text beschriebene Methode als AGN klassifiziert werden und bei denen die Morphologie ihrer Wirtsgalaxien mit Galaxien frühen Typs konsistent ist (*untere Reihe*).



speziellen Ziele der VLA-COSMOS-Durchmusterung sind 1) die Untersuchung radiolauter AGN in Abhängigkeit ihrer Umgebung, einschließlich eines Vergleichs mit Röntgen-AGN und Haufen und einer Suche nach Typ-II-Radio-QSOs, 2) eine vom Staub unbeeinflusste Durchmusterung von Galaxien mit Sternentstehung, wie sie in der Population der Sub-Milli-Jansky-Radioquellen gefunden wurde, 3) die Betrachtung der Entwicklung der Radio-Ferninfrarot-Korrelation bis hinaus zu $z \sim 1$ anhand eines Vergleichs mit SPITZER-Daten, und 4) die Untersuchung von extremen, hochrotverschobenen Starburst-Galaxien, wie sie in der Millimeter-COSMOS-Durchmusterung gefunden wurden.

Die laufenden spektroskopischen Durchmusterungen innerhalb des COSMOS-Projekts sind auf genau festgelegte Stichproben von Radioquellen gerichtet und sollen Spektren für etwa 2000 optische Gegenstücke liefern. Dies wird auf absehbare Zeit die größte Stichprobe schwacher Radioquellen mit spektralen Informationen sein. Sämtliche Daten, die im Rahmen der COSMOS-Kollaboration gewonnen werden, sollen der Allgemeinheit zugänglich gemacht werden. Daher sind endgültig reduzierte und kalibrierte Daten des Pilot- und des großen Projekts von VLA-COSMOS bereits im COSMOS-Web-Archiv zu finden.

Bevor man die VLA-COSMOS-Stichprobe für wissenschaftliche Anwendungen verwenden kann, ist es unbedingt erforderlich, die schwachen Radioquellen näher zu charakterisieren (Abb. III.4.19). Zu diesem Zweck entwickeln wir gegenwärtig eine Methode, um die Radioquellen auf der Grundlage der COSMOS-Vielfarben-Datenbank in Galaxien mit aktiver Sternentstehung und AGN-Galaxien zu sortieren. Unsere Methode wurde im lokalen Universum geeicht. Wir klassifizieren die VLA-COSMOS-Radiopopulation in (a) Sterne, (b) Quasare, (c) staubverdeckte AGN und (d) Galaxien mit aktiver Sternentstehung (im Folgenden Sternentstehungsgalaxien genannt). Um die beiden ersten Objektarten zu identifizieren, benutzen wir hauptsächlich hochauflöste HST-Aufnahmen. Beide, Sterne und Quasare, erscheinen nämlich auf hochauflösten optischen Bildern punktartig. Staubverdeckte AGN und AGN niedriger Leuchtkraft (d.h. Seyfert- und LINER-Galaxien) von Sternentstehungsgalaxien zu trennen ist jedoch eine sehr viel schwierigere Aufgabe. Dennoch ließ sich zeigen, dass die spektrale Energieverteilung (engl. spectral energy distribution, SED) vom UV- bis in den Infrarotbereich eine einparametrische Familie ist, und dass insbesondere die Emissionslinienflüsse, die charakteristisch sind für Sternentstehung und/oder AGN-Aktivität, gut mit den Ruhesystem-Farbindizes von Galaxien korreliert sind. Um also Sternentstehungsgalaxien und AGN-Galaxien in unserer VLA-COSMOS-Stichprobe zu identifizieren, verwenden wir folglich die im Ruhesystem bestimmten Farbeigenschaften der Galaxien, die wir erhalten, indem wir die beobachteten SED an Sternsynthese-Modelle anpassen. In Abb. III.4.20 ist diese Methode in groben

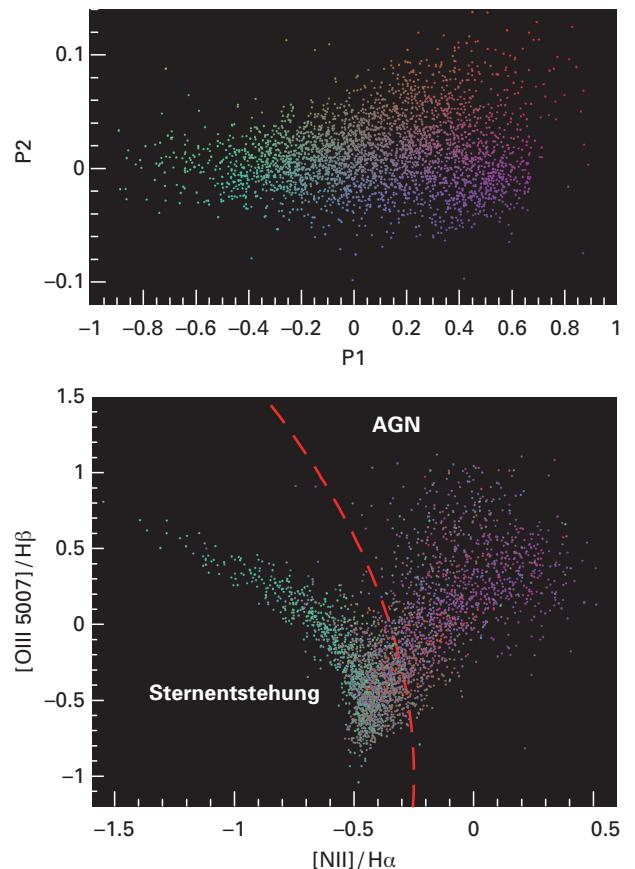


Abb. III.4.20: Oben: Verteilung von ca. 3000 SDSS/NVSS-Galaxien aus der spektroskopischen »Haupt«-Stichprobe in der von zwei Ruhesystemfarben, P1 und P2, aufgespannten Ebene. Jeder Punkt stellt eine Galaxie dar; der Farbcode ist durch die Position einer Galaxie in diesem Diagramm bestimmt. Unten: Die Verteilung von Galaxien im Baldwin-Philipps-Terlevich-(BPT)-Diagramm, das aus den Verhältnissen von Emissionslinienstärken erstellt wird und häufig als diagnostisches Hilfsmittel zur Trennung von AGN und Sternentstehungsgalaxien dient. Die gestrichelte Linie trennt die Gebiete, die von Sternentstehungsgalaxien und von AGN bevölkert werden. Die Punkte (wieder stellt jeder Punkt eine Galaxie dar) sind mittels P1 und P2 wie oben gezeigt eingefärbt. Man beachte, wie gut Sternentstehungsgalaxien mit Hilfe der Ruhesystem-Farbe P1 von AGN-Galaxien getrennt werden können.

Zügen dargestellt; gezeigt sind Galaxien des lokalen Universums aus unserer Kontrollstichprobe, die wir zur Eichung unserer Klassifikationsmethode verwenden.

Der Blick auf die Sternentstehung

Die Radioleuchtkraft lokaler Galaxien ist gut mit ihrer Sternentstehungsrate korreliert und benötigt, anders als optische Indikatoren, keine Korrektur aufgrund der Staubextinktion (Abb. III.4.21). Daher können korrekt als Sternentstehungsgalaxien identi-

fizierte Radioquellen unabhängig verwendet werden, um die Sternentstehungsgeschichte der leuchtkräftigen Quellen zu beurteilen. Während die mittels optischer Durchmusterungen verfolgte Entwicklung der kosmischen Sternentstehungsgeschichte mit der großen Unsicherheit der Staubkorrekturen behaftet ist, bieten tiefe VLA-Beobachtungen des COSMOS-Felds über die gesamte Bandbreite an Umgebungen einen einzigartigen, unverdeckten Blick auf Sternentstehungsgalaxien und Galaxien mit hoher Extinktion. Dies gilt insbesondere in Kombination mit den tiefen (Sub-) Millimeterdaten und tiefen SPITZER-Infrarotaufnahmen, bei denen die hohe Auflösung der VLA-Bilder es ermöglicht, die optischen Gegenstücke dieser leuchtkräftigen Infrarotgalaxien korrekt zu identifizieren.

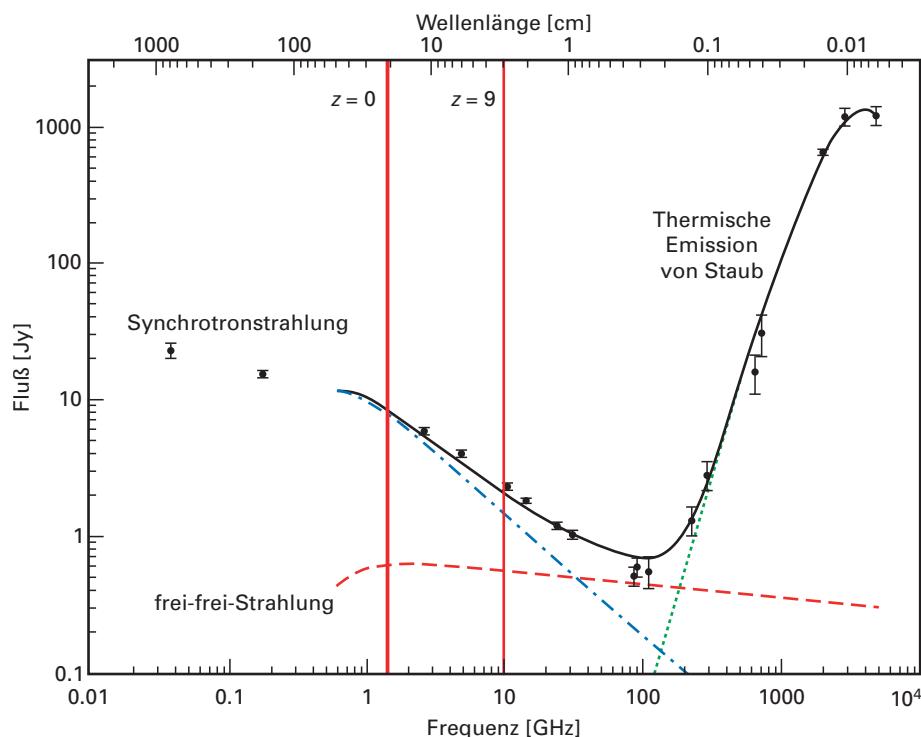
Ein unmittelbares Ziel der COSMOS-Gruppe am MPIA ist, mit Hilfe der VLA-Radiodaten die kosmische Sternentstehungsgeschichte zu verfolgen und die Ferninfrarot-Radio-Korrelation bei hohen Rotverschiebungen zu überprüfen. Jüngste Arbeiten, die tiefe Radiodaten verwenden, bestätigen den Trend, dass die Sternentstehungsrate zwischen $z = 0$ und $z = 1$ zunimmt, obwohl die abgeleiteten Werte noch immer große Fehlerbalken haben. Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor ist der Beitrag der

Abb. III.4.21: Skizze der Komponenten, aus denen sich die spektrale Energieverteilung bei Radio- und Infrarotwellenlängen zusammensetzt (nach Condon 1992). Die Radiostrahlung bei 1.4 GHz besteht hauptsächlich aus Synchrotronstrahlung bei $z = 0$. Bei höherer Rotverschiebung wird die beobachtete Frequenz höher; dies bedeutet, dass auch Bremsstrahlung (Frei-frei-Strahlung) aus stark staubverdeckten Sternentstehungsgebieten zum beobachteten Fluss beitragen kann.

AGN zur schwachen Radiopopulation. Die Schätzungen schwanken hier für Durchmusterungen bis hinab zu 40 Jy zwischen 20 % und 80 %. Unsere neue Methode zur Charakterisierung dieser Population sollte daher zu sehr viel besseren Schätzungen führen.

Zweitens scheint die (Fern-)Infrarot-Radio-Korrelation für Sternentstehungsgalaxien bis hinaus zu hohen Rotverschiebungen zu gelten. Die gegenwärtige Anzahl der bei 1.4 GHz entdeckten Quellen mit Sternentstehung ist oberhalb von $z = 0.5$ jedoch klein. Es ist wichtig, die Infrarot-Radio-Korrelation bis hinaus zu höheren Rotverschiebungen vollkommen zu verstehen, da sie häufig als Entfernungsmaß für Submillimeterquellen ohne optische Gegenstücke benutzt wird. Eine ebenfalls wichtige Frage bei aktiven Sternentstehungsgalaxien betrifft die Rolle von Verschmelzungen, insbesondere bei höheren Rotverschiebungen. Abbildungen im Ferninfrarotbereich haben nicht genügend Auflösung, um diese Frage zu beantworten, während optische Abbildungen unter dem Standardproblem der Extinktion in diesen sehr staubreichen Systemen leiden. Nur Radiodaten mit einer Auflösung im Bogensekundenbereich, wie zum Beispiel die von VLA-COSMOS, werden es erlauben, die räumliche Verteilung der Sternentstehung in staubreichen Starburst-Galaxien auf Skalen zu bestimmen, die für verschmelzende Galaxien relevant sind (~ 10 kpc).

Drittens ist bei Abbildungsdurchmusterungen mit großem Gesichtsfeld im Submillimeter- und Millimeterbereich mit SCUBA und MAMBO eine Population aktiver Sternentstehungsgalaxien bei hohen Rotverschiebungen entdeckt worden, die auch als Submillimetergalaxien (SMG) bezeichnet werden. Diese Objekte beherrschen den Strahlungshintergrund im Bereich des fernen Infrarot.



Nach aktuellen Modellen könnte diese Population die Bildung sphäroidaler Galaxien bei Rotverschiebungen zwischen 2 und 5 darstellen und für etwa die Hälfte der gesamten kosmischen Sternentstehung vom Urknall bis heute verantwortlich sein. Diese Feststellung führte zu einer bedeutsamen Überarbeitung der aus optischen Beobachtungen abgeleiteten Sternentstehungsgeschichte des Universums, indem eine Population stark geröteter aktiver Sternentstehungsgalaxien bei hohen Rotverschiebungen hinzugefügt wurde. Und nachfolgende Massenabschätzungen der Submillimeterquellen ergaben neue Beschränkungen für Galaxienentstehungsmodelle. Es ist von entscheidender Bedeutung, die SMG gut zu verstehen, wenn wir unser Wissen über die Entstehung und Entwicklung von Galaxien voranbringen wollen. Aufgrund der schlechten Auflösung von (Sub-)Millimeterteleskopen ist die Identifikation der Gegenstücke der SMG bei optischen, Infrarot- oder Radiowellenlängen ein aufwändiger Prozess. Deshalb ist es erforderlich, in einer gemeinsamen Anstrengung SPITZER-Daten mit tiefen optischen, Röntgen- und Radiobeobachtungen über genügend große Winkelskalen zu kombinieren, um einen tieferen Einblick in diese rätselhaften Systeme zu erhalten. Dies ist ein Projekt, das in Zusammenarbeit mit Frank Bertoldi und seiner Gruppe am Argelander-Institut für Astronomie an der Universität Bonn verfolgt wird.

Schließlich kann man den VLA-COSMOS-Datensatz auch noch nutzen, um die Radiostrahlung einer bestimmten Objektklasse abzuschätzen, z.B. von Sternentstehungsgalaxien bei einer Rotverschiebung von $z = 5.7$ (identifiziert durch ihre helle Lyman-Alpha-Linienemission), also zu einer Zeit, als das Universum noch sehr jung war. Obwohl keine der etwa 100 Sternentstehungsgalaxien bei $z = 5.7$ ein Radio-Gegenstück hat, haben wir Ausschnitte dieser Objekte aus dem Radiobild »aufaddiert«, um ein durchschnittliches Abbild einer solchen Galaxie im Radiobereich zu erzeugen. Doch auch in diesem Durchschnitts-Radiobild wurde kein Signal entdeckt, was darauf hindeutet, dass die Sternentstehungsrate in diesen Objekten ähnlich ist wie in lokalen Sternentstehungsgalaxien. Diese Additionstechnik kann problemlos auf andere Galaxienstichproben angewandt werden, um nach Sternentstehung zu suchen, die von Staub verdeckt ist.

Der Blick auf die AGN

Nur eine tiefe Radiodurchmusterung mit großem Gesichtsfeld kann Informationen über die derzeit höchst ungewisse Entwicklung schwächer, im Radiobereich entdeckter AGN liefern. Das grundsätzliche Problem bei der Untersuchung der Entwicklung radiolauter AGN bestand darin, dass Stichproben entweder aus Durchmusterungen mit sehr großem Gesichtsfeld aber geringer Tiefe stammen, oder aus sehr tiefen Durchmusterungen mit einem kleinen Gesichtsfeld. Erstere sind bei hohen

Rotverschiebungen auf extrem leuchtkräftige Quellen beschränkt, während letztere unter der Statistik relativ kleiner Zahlen leiden. Die VLA-COSMOS-Durchmusterung wurde so geplant, dass die Untersuchung der Demographie und Entwicklung von AGN möglich ist, indem ein großes kosmologisches Volumen erfasst und eine gute Statistik über radiolaute wie auch radioleise AGN als Funktion der Rotverschiebung bereitgestellt wird. Ihre Empfindlichkeit reicht aus, um relativ schwache im fernen Infrarot- und Radiobereich strahlende AGN bis hinaus zu sehr hohen Rotverschiebungen ($z \sim 6$) zu finden und so eine große Anzahl (~ 1000) von AGN-Quellen zu liefern. Bei niedrigerer Rotverschiebung ($z \sim 1$) sollte noch ein merklicher Anteil radioleiser, aber nicht radioruhiger, optisch ausgewählter QSO beobachtbar sein. Zudem können Fragen bezüglich der Rotverschiebungsentwicklung von Radiogalaxien, der Eigenschaften ihrer Muttergalaxien und Abhängigkeiten von der Umgebung angegangen werden. Sehr leuchtkräftige radiolaute Objekte wie Cygnus A sollten bis zurück in ihre Entstehungsepoke beobachtbar sein, falls es solche Objekte damals schon gab.

Im Rahmen des COSMOS-Projekts konzentriert sich unsere Gruppe am MPIA auf die Untersuchung der Eigenschaften unverdeckter (Typ 1) und von Staub verdeckter (Typ 2) Quasare, insbesondere ihrer Wirtsgalaxien. Die unterschiedlichen Auswahlmethoden für AGN (Röntgen, optisch, Infrarot, Radio) können effektiv kombiniert werden, um auf speziellen Auswahlkriterien beruhende Stichproben von AGN bei mittleren Rotverschiebungen ($1 < z < 3$) sowie die nötigen Kontrollstichproben inaktiver Galaxien zu erzeugen, alle mit einheitlichen und ähnlichen Datensätzen. Diese Forschungsarbeit macht sich den Synergieeffekt zwischen den vielen COSMOS-Datensätzen und dem verfügbaren Sachverstand zunutze.

Ein Aspekt der Arbeit der COSMOS-Gruppe am MPIA ist die Beschreibung der vorherrschenden stellaren Komponenten in Wirtsgalaxien von AGN des Typs 1 und 2 bei Rotverschiebungen $z < 1.1$ und die Untersuchung einer möglichen Abhängigkeit von der aus dem Kern stammenden Radiostrahlung. Untersuchungen der Wirtsgalaxien von Typ-1-Quasaren sind bekanntermaßen schwierig wegen des hellen AGN-Kerns, der oft das aus der Wirtsgalaxie kommende Sternlicht überstrahlt (Abb. III.4.22). Die Größe der Stichproben wird es uns ermöglichen, das erwartete verstärkte Auftreten junger Sternpopulationen als Funktion der Leuchtkraft, Morphologie, Radioemissionseigenschaften und der Anzeichen für Wechselwirkungen im Vergleich zu lokalen Galaxien zu untersuchen. Ebenso planen wir, die Morphologie von AGN-Wirtsgalaxien zu untersuchen, wobei der Schwerpunkt auf möglichen Wechselwirkungen und der Entwicklung dieser Parameter über kosmische Zeiten liegt.

In jüngster Zeit wurde der Frage nach dem wahren Zahlenverhältnis von staubverdeckten (Typ 2) zu un-

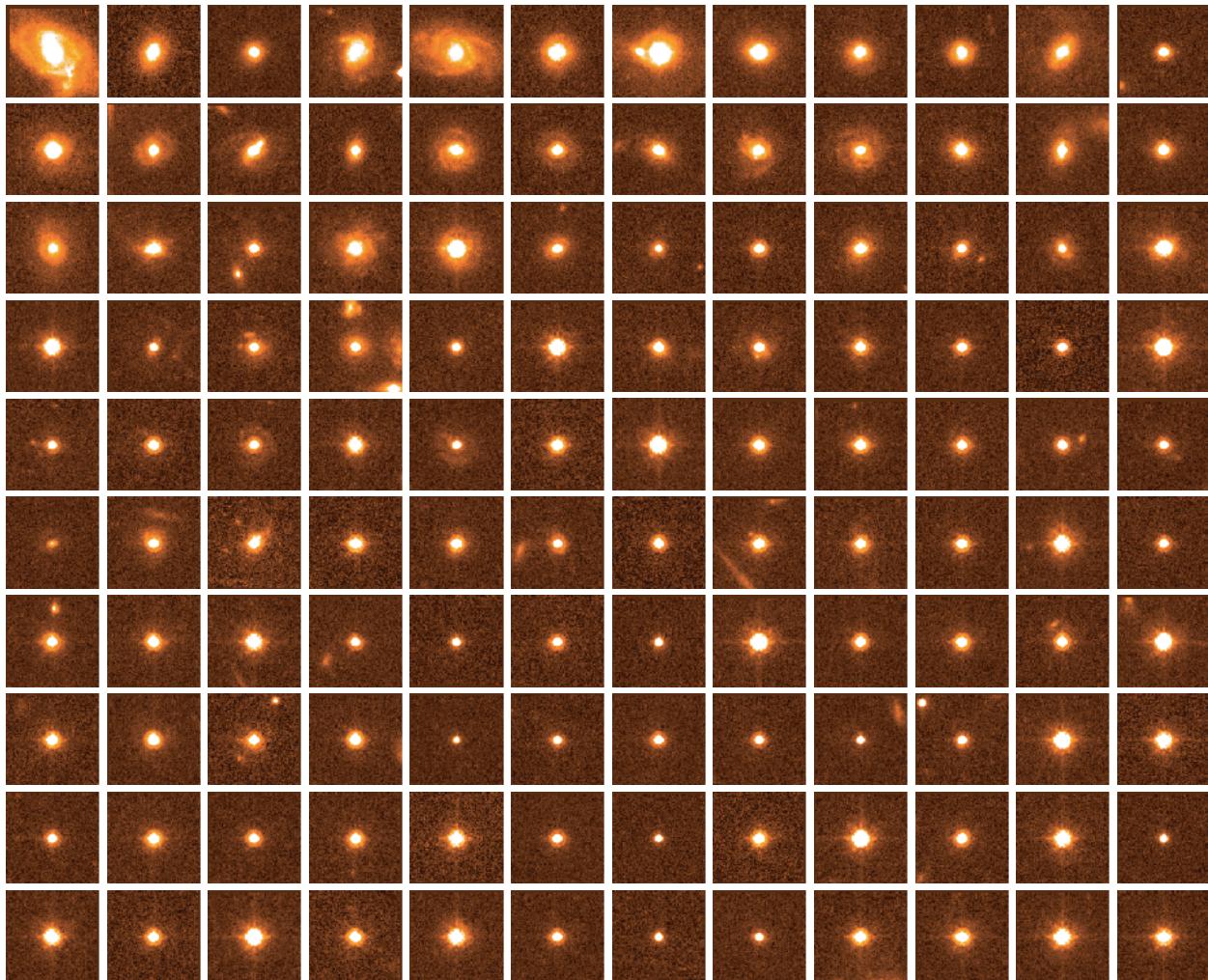
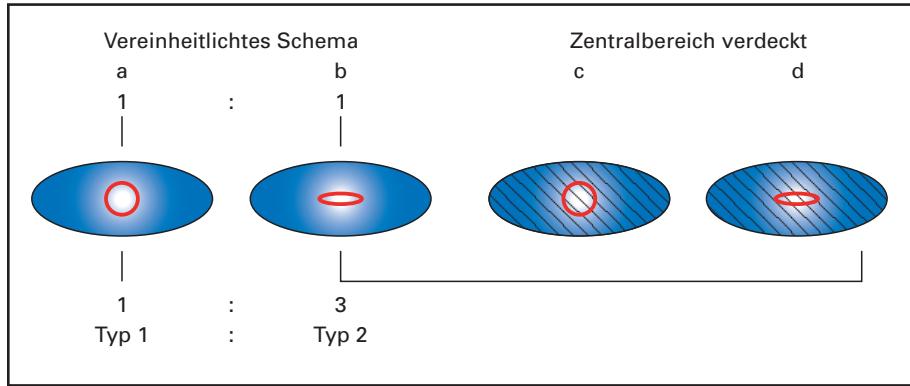


Abb. III.4.22: Eine Stichprobe von 120 Wirtsgalaxien von Typ-1-AGN, die im COSMOS-Feld vorhanden sind. Die HST-Ausschnitte sind nach Rotverschiebung sortiert, die nächsten Objekte stehen in der oberen linken Ecke, die am weitesten entfernten in der unteren rechten Ecke.

verdeckten (Typ 1) Quasaren neue Aufmerksamkeit geschenkt. In dem rein geometrischen Modell beruht der Unterschied zwischen diesen beiden Typen allein auf der Orientierung des akkretierenden Schwarzen Lochs und seines Staub-Torus in Bezug auf den Beobachter. Doch es wurde auch ein Entwicklungsszenario vorgeschlagen, um den Unterschied zu erklären: Die starke Korrelation zwischen der Masse des Schwarzen Lochs und der Masse der zentralen Verdickung (engl. bulge) in Galaxien geringerer Rotverschiebungen wurde als Grund für die Vermutung angeführt, dass der energiereiche Ausstoß des »Quasar-Feedback« die Sternentstehung in der Wirtsgalaxie beendet, indem er das Gas, das zur Bildung junger Sterne nötig ist, aufheizt und aus der Galaxie hinausschleudert, und somit eine möglicherweise wichtige Komponente in heutigen Modellen der Galaxienentstehung darstellt. Man nimmt an, dass, bevor

das Gas hinausgeschleudert wird, der Quasar von Gas und Staub in der Sternentstehungsgalaxie stark verdunkelt wird, während nach dem Hinausschleudern des Gases Quasare nur verdeckt sind, wenn unsere Sichtlinie von dem Staub-Torus um die Akkretionsscheibe blockiert wird (auch bekannt als »vereinheitlichtes Schema«). Inzwischen mehren sich die Hinweise, dass das Verhältnis von Typ-1-Quasaren zu Typ-2-Quasaren nicht 1:1 ist, wie nach dem geometrischen Modell erwartet, sondern tatsächlich unterschiedliche Arten verdeckter Quasare beobachtet werden. Diese neue zusätzliche Klasse von Typ-2-Quasaren könnte stattdessen durch eine Starburst-Wirtsgalaxie verdeckt sein. Abb. III.4.23 zeigt eine Skizze dieses Schemas, in der unverdeckte Quasare sowie die beiden Arten verdeckter Quasare dargestellt sind. Die Skizze zeigt Quasare in Starburst-Wirtsgalaxien, die für die Verdeckung verantwortlich sind (c und d); diese nennen wir wirtsverdeckte Quasare. Im Laufe der Zeit räumen die Quasare den Staub beiseite und lassen entwickelte staubfreie Galaxien übrig, bei denen die Verdeckung (oder das Fehlen einer solchen) von der Orientierung des Torus abhängt (a und b). Mit Hilfe der VLA-COSMOS-Daten zusammen mit den SPITZER-Daten



wollen wir eine Stichprobe verdeckter Typ-2-Quasare bei einer Rotverschiebung von $z \sim 2$ bestimmen, die zur Beantwortung dieser offenen Frage beitragen soll.

Kurzum, der panchromatische COSMOS-Datensatz ermöglicht nicht nur die von Auswahleffekten freie Auswahl von Quasaren und weniger leuchtkräftigen AGN, sondern liefert auch die nötigen Informationen, um ihre Eigenschaften als Funktion der Wellenlänge untersuchen zu können. Zusätzlich haben wir den VLA-COSMOS-Katalog benutzt, um ungewöhnliche Objekte zu finden, die in genaueren Fallstudien untersucht werden. Ein solches Beispiel ist die »Wide-angle-tail« (WAT)-Radiogalaxie (»Weitwinkel-Schweif-Radiogalaxie«) CWAT-01, die bei $z \sim 0.22$ liegt.

Unsere eingehende Untersuchung, in der die Radiodaten mit den optischen und Röntgendifferenzdatensätzen aus der COSMOS-Durchmusterung kombiniert wurden, zeigt, dass CWAT-01 zu einer komplexen großräumigen Struktur gehört, die eine im Aufbau begriffene Haufensammlung mit einer Ausdehnung von etwa 2 Mpc

Abb. III.4.23: Skizze der vorgeschlagenen Verteilung von unverdeckten (Typ-1-) und verdeckten (Typ-2-) AGN. Im vereinheitlichten Schema, wo allein die Orientierung des Torus um den AGN den Unterschied (a und b) bewirkt, erwartet man ein Verhältnis von 1 : 1. Das beobachtete Verhältnis scheint bei einer Rotverschiebung von $z \sim 2$ jedoch näher bei 1 : 3 zu liegen. Dies deutet darauf hin, dass zusätzlich zum rein geometrischen Unterschied auch eine entwicklungsbedingte Komponente (hier: stark vermehrte staubreiche Sternentstehung in der Wirtsgalaxie selbst) eine Verdeckung bewirkt.

Abb. III.4.24: Zusammengesetzte Farbaufnahme der Umgebung der »Wide-angle-tail«-Radiogalaxie CWAT-01, die bei einer Rotverschiebung von $z \sim 0.2$ liegt. Der COSMOS-Datensatz ergab Hinweise auf diese anscheinend im Entstehen begriffene große Struktur. Die Regenbogenfarben zeigen die vier durch ihre Röntgenstrahlung aufgefundenen Galaxienhaufen, während die optischen Abbildungen in Form eines RGB-Bilds dargestellt sind, wobei Galaxien vom frühen Typ eine rötliche und Scheibengalaxien eine blaue Färbung haben. CWAT-01 liegt im Haufen unten links und weist Radio-Jets auf, die zu einem weiten »C« gebogen sind.



darstellt. Abb. III.4.24 zeigt die Verteilung der Strahlung aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums innerhalb der Haufenansammlung. Die diffuse Röntgenstrahlung offenbart, dass der Mutterhaufen von CWAT-01 nur einer der mitgliederarmen Haufen ist, die von einer größeren Haufenstruktur umschlossen sind. Die Haufenansammlung enthält im Umkreis von ~ 2 Mpc mindestens vier hell im Röntgenlicht leuchtende Haufen. Zudem deutet unsere Suche nach Galaxienüberdichten darauf hin, dass es in den Randbereichen der Röntgenhaufen-Ansammlung zumindest eine weitere lose Gruppe gibt, die aber im Röntgenlicht nicht nachgewiesen wurde. Die Tatsache, dass die Richtung der Jets von CWAT-01 nicht mit jener der länglichen Ausdehnung der Röntgenstrahlung übereinstimmt, deutet darauf hin, dass der Haufen noch keine Zeit für eine dynamische Relaxation hatte. Numerische Simulationen von Haufenentwicklung zeigen, dass bei $z = 0.2$ fertige reiche Haufen gerade erst an Kreuzungspunkten von Filamenten aufgebaut werden, indem Materie aus zahlreichen Filamenten akkretiert, d.h. »angesaugt« wird. Daher sind unsere Ergebnisse ein starker Hinweis darauf, dass wir Zeugen der Bildung eines großen Galaxienhaufens aus einer Ansammlung von Mehrfachhaufen sind, ganz in Einklang mit dem hierarchischen Szenario für die Strukturbildung.

Was kommt als nächstes?

Durchmusterungen bei mehreren Wellenlängen sind geeignet, unsere derzeitigen kosmologischen Modelle auf vielerlei Weise zu überprüfen, indem beobachtete Fakten mit theoretischen Vorhersagen verglichen werden – zum Beispiel, wie im Falle von HIROCS, die erwartete Anzahl der Galaxienhaufen, die bereits an Ort und Stelle waren, als das Universum erst halb so alt war wie heute. Die VLA-COSMOS-Durchmusterung wird wichtige Erkenntnisse über die schwache Radiopopulation sowie die aus Radiobeobachtungen abgeleiteten Sternentstehungs- und/oder AGN-Eigenschaften vieler verschiedener Arten von Objekten liefern. Die Existenz solcher panchromatischen Datensätze ist ausschlaggebend für den Bau zukünftiger Instrumente, indem sie zum einen interessante Beobachtungsziele liefert, zum anderen aber der Entwicklung der Instrumente selbst den Weg weist.

*Eva Schinnerer, Vernes Smolcic,
Knud Jahnke, Alejo Martinez Sansigre,
Irini Sakellou
zusammen mit Chris Carilli (NRAO, Socorro),
Nick Scoville (CalTech),
Marco Bondi und Paolo Ciliegi (INAF, Bologna),
Frank Bertoldi (AIfA, Bonn)
und dem VLA-COSMOS-Team
und der COSMOS-Kollaboration*

IV. Instrumentelle Entwicklungen

IV.1 Neue technologische Entwicklungen

Mit dem Vorstoß der Teleskope in den Bereich der 8-m-Klasse und darüber hinaus nehmen auch die astronomischen Messinstrumente an Größe, Gewicht und Komplexität zu. Damit spielt der Leichtbau eine zunehmend wichtige Rolle. Um die teilweise extremen Anforderungen zu erfüllen, werden die neuesten Technologien und Verfahren genutzt. Dabei handelt es sich aber nicht nur um eine Einbahnstraße aus der Technik in die Forschung: Interessante technische Entwicklungen beim astronomischen Instrumentenbau finden auch in der Industrie reges Interesse. Dieser Technologietransfer in beide Richtungen wird hier an Hand konkreter Beispiele erläutert.

Nicht nur bei der Entwicklung und beim Bau moderner Großteleskope, sondern auch beim Bau astronomischer Messinstrumente wurden in den letzten Jahren gewaltige Fortschritte erzielt. Dazu ist eine extrem hohe

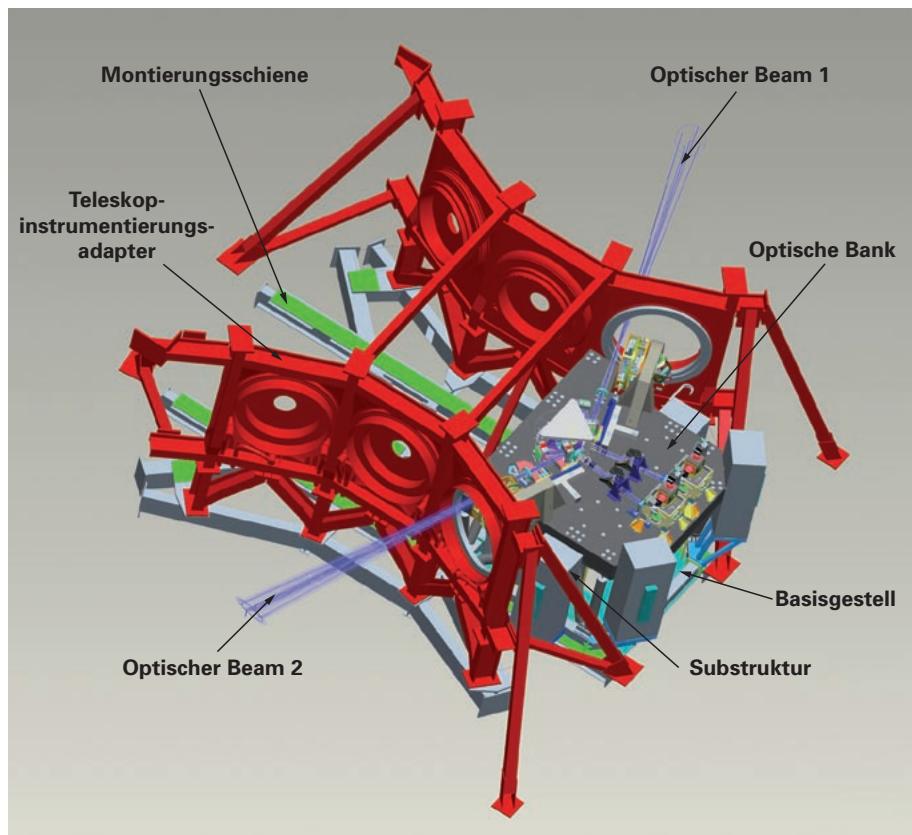
Präzision erforderlich. Und es müssen ständig neue Technologien entwickelt werden, denn mit den neuen Instrumenten wollen die Astronomen immer weiter in den infraroten Spektralbereich vordringen: Dazu müssen die komplexen Optiken, Mechanismen, Detektoren und andere Komponenten bei extrem niedrigen Temperaturen unterhalb von -200°C einwandfrei funktionieren.

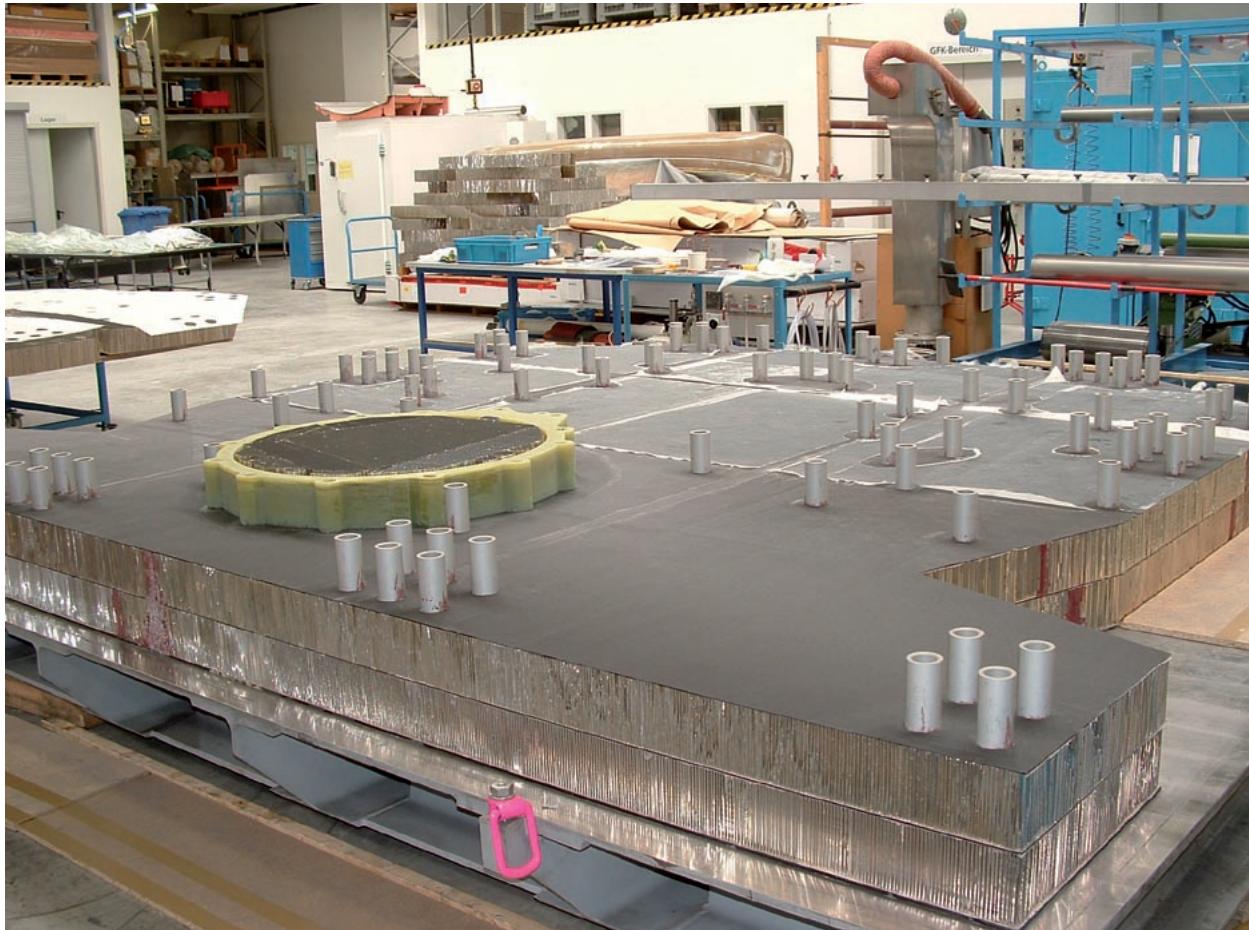
Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK) für das Interferometrieeinstrument LINC-NIRVANA

Das Instrument LINC-NIRVANA dient dazu, die Strahlengänge der beiden Einzelspiegel des Large Binocular Telescope (LBT) mit je 8 Metern Öffnung interferometrisch zu vereinigen. Dadurch wird die räumliche Auflösung eines 23-m-Teleskops erreicht. Abb. IV.1.1 zeigt ein Computermodell von LINC-NIRVANA auf der Instrumentenplattform des LBT.

Alle Komponenten des Instrumentes sind auf einer Platte montiert, die über eine Stützstruktur mit dem

Abb. IV.1.1: LINC-NIRVANA, montiert am LBT





Teleskop verbunden ist. Platte und Stützstruktur müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- Hohe Steifigkeit
- Hohe Genauigkeit der Befestigungspunkte
- Hohe thermische Stabilität
- Hohe Dämpfungseigenschaften
- Minimales Gewicht

Die hervorragenden Eigenschaften von CFK können diese Aufgaben erfüllen. In Zusammenarbeit mit den Firmen Ingenieurbüro Schlossmacher, Unterschleißheim und INVENT, Braunschweig wurden die Haltestrukturen für LINC-NIRVANA entwickelt. Abb. IV.1.2 zeigt den Aufbau der einzelnen Schichten (hochfeste Aluminiumwaben abwechselnd mit CFK-Zwischenschichten) der Montageplatte.

Bei unserer Konstruktion wurden folgende Eigenschaften des CFK-Laminats erreicht (zum Vergleich: die Werte für Stahl in Klammern):

- Elastizitätsmodul $E_x = E_y = 132$ (200) GPa
- Ausdehnungskoeffizient $\alpha_x = \alpha_y = -0.37 (+10) \times 10^{-6} \text{ K}$
- Dichte ρ (CFK) = 1.7 (7.9) g/cm^3

Abb. IV.1.2: Schichtaufbau der Montageplatte bei der Firma INVENT, Braunschweig.

Es sei hier besonders auf den sehr kleinen Ausdehnungskoeffizienten hingewiesen, der eine sehr gute thermische Stabilität des Instrumentes garantiert. Das ist besonders wichtig, da LINC-NIRVANA im Gegensatz zu anderen Interferometriexperimenten direkt am Teleskop montiert, und nicht in einem thermisch stabilen Labor aufgestellt wird.

Die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Stützstruktur wurden mit Hilfe von Computermodellen simuliert. Die an der Universität der Bundeswehr in München an einem Probekörper durchgeführten Belastungstests haben die Richtigkeit des Computermodells bestätigt.

Abb. IV.1.3 zeigt den fertigen Aufbau in der Montagehalle des MPIA. Die CFK-Komponenten (schwarz) sind auf einem Grundrahmen (blau) montiert. Stützrohre und Platte sind über (am MPIA gefertigte) Edelstahlverbindungsstücke miteinander verbunden. Die gesamte Einheit ist auf einem Kipprahmen (gelb) montiert, mit dem die Bewegungen des Teleskops simuliert werden können. Noch größere CFK-Bauteile findet man nur in der Luft- und Raumfahrt.

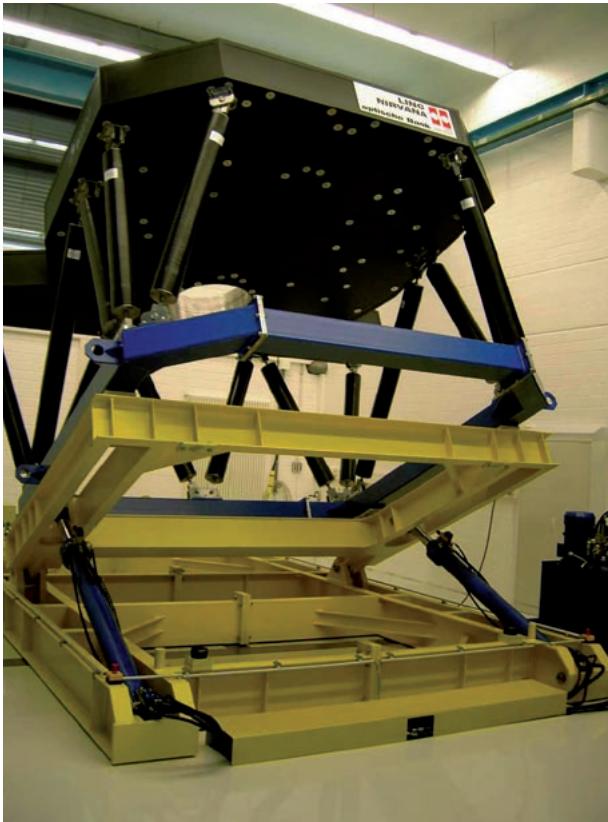


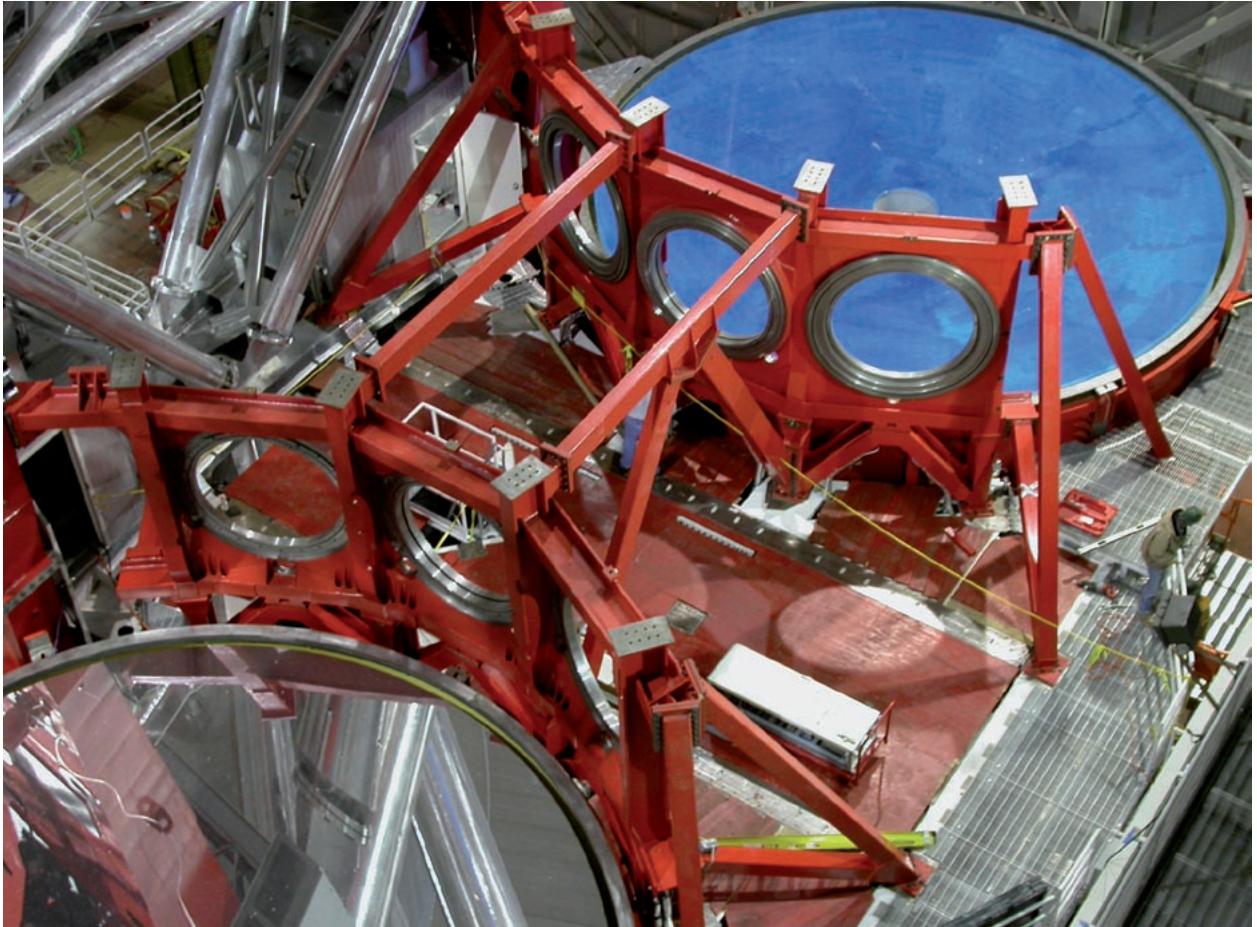
Abb. IV.1.3: Die Stützstruktur von LINC-NIRVANA in der Montagehalle des MPIA

Durchbiegungsmessungen am LBT

Für die Auslegung von LINC-NIRVANA ist es wichtig zu wissen, wie sich die Teleskopstruktur bei verschiedenen Teleskopstellungen verhält. Durchbiegungen lassen sich bei der Größe der Strukturen nicht verhindern. Abb. IV.1.4 zeigt die Instrumentenplattform des LBT, auf der LINC-NIRVANA montiert werden soll.

Im Schiffsbau hat sich eine Methode zur Vermessung großer Strukturen etabliert, die auch für unsere Problemstellung genutzt werden kann. Bei diesem Verfahren (Photogrammetrie) werden auf dem Messobjekt sehr genaue Zielmarken platziert, die dann mit einer Digitalkamera aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden. Eine Spezialsoftware errechnet dann die exakten Lagen der Messmarken. Dadurch können Veränderungen bei verschiedenen Teleskopstellungen erfasst werden. Diese Messungen wurden gemeinsam mit dem

Abb. IV.1.4: Die Instrumentenplattform des LBT



Fraunhofer Anwendungszentrum Groß-strukturen in der Produktionstechnik, Rostock geplant und durchgeführt. Abb. IV.1.6 zeigt oben die Aufnahmetechnik aus einem Krankorb heraus, darunter sind die im Computer abgelegten Zielmarken mit den einzelnen Kamerastandorten zu erkennen. Für zwei Kamerastandorte wurden die Blickrichtungen zu den einzelnen Zielmarken dargestellt.

Ein neuer Spiegelwerkstoff für LINC-NIRVANA

Gegenwärtig wächst der Bedarf bezüglich der Herstellung komplexer Optikflächen mit hohen Anforderungen an die Bauteiloberflächen. Die Ultrapräzisionsbearbeitung (Diamantdrehen und -fräsen) bietet die Möglichkeit, Metalloptiken aus Aluminium, Kupfer oder Nickel mit komplexen Oberflächenformen herzustellen. Während damit die Anforderungen für Anwendungen im infraroten Spektralbereich hinsichtlich der Formabweichung erfüllt werden, ist die durch diese spanende Bearbeitung erreichbare Rauhigkeit und Formtreue für kürzere Wellenlängen unzureichend. Damit wird eine anschließende Feinpolitur bzw. Korrekturpolitur notwendig. Dieser Prozess wird vorzugsweise mit Aluminiumsubstraten, die mit einer amorphen Nickel-Phosphor-Schicht (NiP) versehen sind, durchgeführt. Nachteil dieser Materialpaarung ist die erheblich unterschiedliche thermische Ausdehnung von Aluminium (23.8 ppm/K) und NiP-Schicht (12 ppm/K). Unterliegen die Optikteile im Einsatz einem Temperaturwechsel, so entstehen durch den resultierenden Bimetalleffekt Spannungen und Deformationen, die die optische Qualität erheblich beeinflussen können. Durch die Verwendung einer ausdehnungsangepassten Legierung wie Dispal (AlSi35, CE13F) mit nahezu dem gleichen Kennwert (12.8 ppm/K) wie NiP kann dieser Nachteil beseitigt werden. Ein weiterer Vorteil der Materialpaarung liegt in der größeren Steifigkeit und im höheren E-Modul der Al-Si-Legierung.

Abb. IV.1.5: Die Spiegelbaugruppe für LINC-NIRVANA

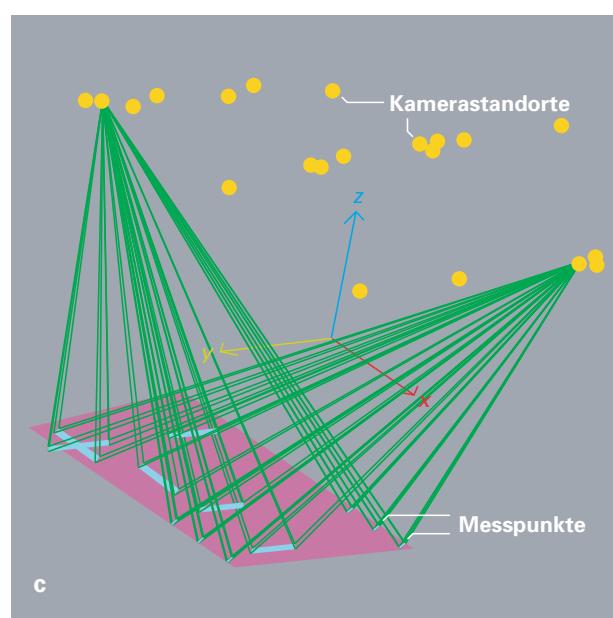
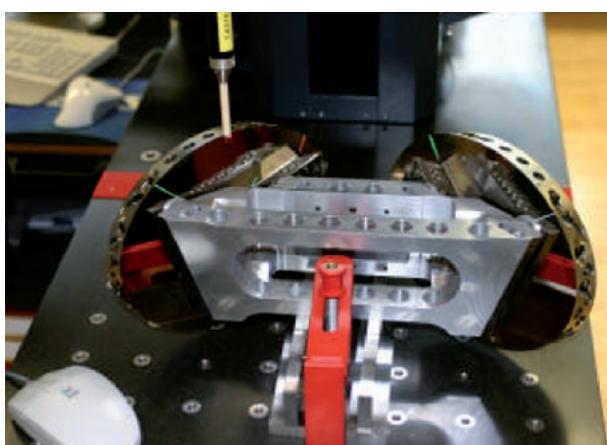


Abb. IV.1.6: Oben: Aufnahme der Zielmarken aus Krankorb; darunter: Darstellung der Daten im Computer.

Abb. IV.1.5 zeigt einen für LINC-NIRVANA zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Feinmechanik und Optik, Jena entwickelten Doppelspiegel. Dieses Verfahren wurde gemeinsam zum Patent angemeldet.

Getriebe für kryogene Temperaturen

Getriebe für Temperaturanwendungen unter -200°C sind auf dem Markt praktisch nicht verfügbar. Bei kryogenen Temperaturen werden deshalb in den meisten Fällen nur Direktantriebe verwendet.

Bei »normalen« Arbeitsbedingungen hat sich das Harmonic Drive Getriebe bewährt. Es erlaubt hohe Untersetzungen bei nur geringer Baugröße. Diese Getriebebauart wurde am MPIA so modifiziert, dass auch ein Einsatz bei Extremtemperaturen möglich ist. Alle sich bewegenden Bauteile wurden mit einer Hartmetallbeschichtung (Trockenschmierung) versehen, der Lagersitz neu angepasst und das Aluminiumgehäuse durch eines aus Stahl ersetzt.

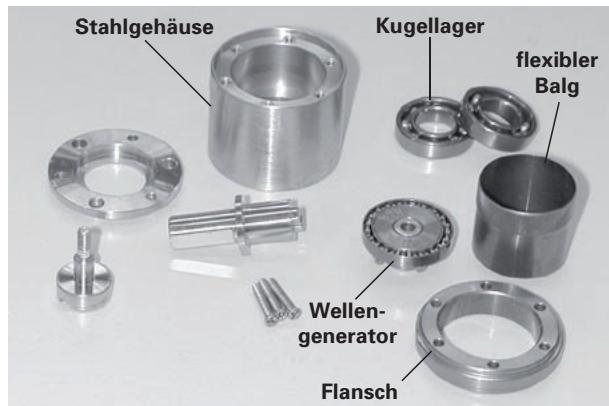


Abb. IV.1.7: Bauteile für das Harmonic-Drive-Getriebe

Abb. IV.1.8: Testaufbau des Harmonic-Drive-Getriebes mit Schrittmotor für -200°C

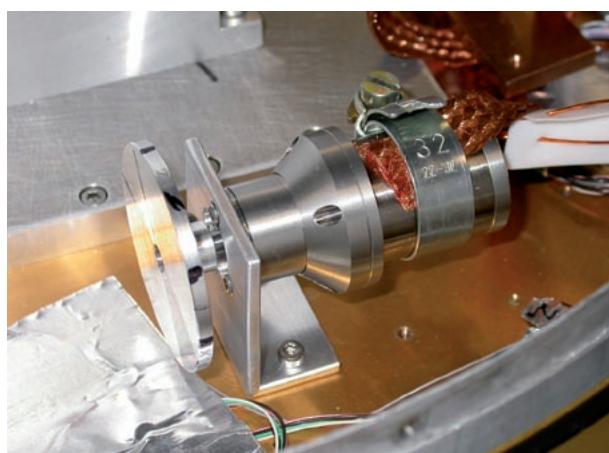


Abb. IV.1.9: Filterradantrieb des Infrarotwellenfrontsensors

Abb. IV.1.7 zeigt die einzelnen Komponenten des Getriebes. Man erkennt an der dunkelgrauen Verfärbung einzelner Bauteile die Hartmetallbeschichtung. Ein Dauertest bei -200°C hat gezeigt, dass das umgebaute Getriebe seine Aufgaben erfüllt. Abb. IV.1.8 zeigt den Testaufbau mit einem montierten Schrittmotor. Es handelt sich dabei um einen Drehaktuator für ein Filterrad, das in einem Infrarotwellenfrontsensor zum Einsatz kommt (Abb. IV.1.9).

Die Entwicklungsarbeiten am MPIA haben bei der Firma Harmonic Drive AG, Limburg starkes Interesse hervorgerufen. Neben dem Einsatz in astronomischen Instrumenten gibt es auch andere kommerzielle Anwendungen bei tiefen Temperaturen oder solche, bei denen auf eine Fettschmierung der Getriebe verzichtet werden muss. Die Entwicklungen am MPIA wurden in der Firmenzeitschrift der Harmonic Drive AG »Newdrive«, Ausgabe 26 beschrieben (Abb. IV.1.10).

Fazit

Wie an den obigen Beispielen gezeigt, profitiert nicht nur der astronomische Instrumentenbau mit seinen teilweise extremen Anforderungen von der immer schnelleren technologischen Entwicklung. Die Industrie wird in der Kooperation mit der Forschung oftmals ihrerseits zu

Nummer 25 • November 2005 • 8. Jahrgang

newdrive

Das News-Magazin der Harmonic Drive AG

Am Himmel spielen sich existenzielle Dramen ab - allerdings von uns meist unbemerkt: riesige Sonnen explodieren in gewaltigen Lichtblitzen oder hauchen ihr Leben als farbenprächtige Nebel aus, während in anderen Regionen des Alls zur gleichen Zeit neue Sterne entstehen.

So besteht unser Universum neben Sternen und Planeten zu einem großen Teil aus dünnen Gaswolken, der so genannten interstellaren Materie. Diese Wölken, die vor allem Wasserstoff enthalten, sind so kalt, dass sie kein sichtbares Licht emittieren; sie lassen sich daher mit einem optischen Teleskop nicht beobachten, zum Ärger der Wissenschaftler, die damit auf eine wichtige Informationsquelle verzichten müssen. Sie senden aber Infrarot- und hochfrequente Radiowellen aus, die sich mit entsprechenden Teleskopen problemlos auffangen ließen – wäre da nicht die Erdatmosphäre ...

Aus interstellaren Materie können unter geeigneten Bedingungen neue Sterne entstehen. Die Erforschung der Frühstadien der Sternentstehung und -entwicklung ist ein typisches Arbeitsgebiet der IR-Astronomie. Infrarot-Astronomie erlebt zurzeit einen Aufschwung. So werden beispielsweise hochpräzise Antriebe in Instrumenten bei kryogenen Temperaturen unter 80 K verwendet, um Detektoren auszurichten, mit denen Bildformationen kompensiert werden, sowie Spiegel, Filter und andere optische Komponenten zu bewegen. Die Positioniergenauigkeit für Linearantriebe liegt dabei bei 1–2 µm und bei Rotationsantrieben bei wenigen Winkelgraden. Solche Präzisionen unterscheiden Wissenschaftler des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Astronomie (MPIA), das sich mit der Erforschung des Universums in optischen und infraroten Spektralbereichen widmet (www.mpi-a.de).

Für Antriebsaufgaben in Vakuumanwendungen steht man vor der Aufgabe einen geeigneten Antrieb zu konstruieren, eine in der Regel rotatorische Bewegung mit Hilfe einer Drehdurchführung in den Vakuumbehälter zu übertragen und Antrieb und Drehdurchführung mit möglichst geringem Aufwand miteinander zu verbinden.

Die beschichteten Komponenten des Harmonic Drive Getriebes beim MPIE

Bei Untersuchungen der Wärmeentzerrung im Sonnenspektrum (er wählte Filter gegen die elbige Hitzestrahlung der Sonne entwerfen) fand der Astronom F. W. Henschel die unterschiedlichen Temperaturen der Spektrotafeln. Rot hatte eine höhere Temperatur als die anderen Farben.

Abel oberhalb des unteren Bereiches, von sich keine Farbe mehr ablehnen, ließ sich eine noch höhere Temperatur messen. Damit war Henschel die Entdeckung der infraroten Strahlung gelungen, welche den Bereich von 0,001 bis 1 mm belegt.

Bei der Anwendung der Infrarotechnik gibt es allerdings einige Probleme zu lösen. Lässt die Lufthülle um unseren Planeten sichtbares Licht noch mehr oder weniger ungehindert passieren, wirkt

Laut Ralf Rainer Rohloff vom MPIA macht es keinen Sinn, AC- oder DC-Motoren in kalter Umgebung zu verwenden, da diese ein Encoder-Feedback erfordern, um die tatsächliche Position zu erfassen. Encoder für kryogene Anwendungen sind jedoch derzeit am Markt nicht verfügbar. Tests am MPIA haben gezeigt, dass sich für einen Rotationsantrieb im Betrieb bei 80 K (93°C) ein Phytton-Schrittmotor in Kombination mit einem Harmonic Drive Getriebe eignet. Wave Generator, Flexpline und Circular Spline des standard Harmonic Drive Getriebes wurden mit Wollfram-Dioxid beschichtet und fettgeschmiert

Orion

Kaltes Licht aus dem All

Technologien werden zurzeit in einer Reihe von bahnbrechenden Teleskopen, wie z. B. dem Large Binocular Telescope (LBT) eingesetzt. Dieser Rotationsantrieb wurde über einen längeren Zeitraum getestet bei nahe -200°C und erreicht die geforderte Lebensdauer.

Kryogene Antriebe für den sofortigen Einsatz hat man nicht mal „eben so auf Lager“. Daher hat das MPIA in Heidelberg Aktuatoren für lineare und kreisförmige Bewegungen entwickelt. Informationen über verwendbare Werkstoffe, Trockenschmierung und Komponenten wie Motoren, Mikroschalter und Resolver für diese Temperaturbereiche sind in der Literatur kaum zu finden. So wurden großangelegte Experimente und Tests durchgeführt, um Antriebe auf ihre Einsatzmöglichkeit unter kryogenen Temperaturen zu qualifizieren. Antriebe vom MPIA mit Harmonic Drive

Die Kryo-Aktuator bestehend aus einem Phytton-Schrittmotor und Harmonic Drive Getriebekomplex

Pyramide des Infrarot-Wavefront-Sensor, mit Harmonic Drive UHVC, in dem 3,5 m Teleskop Calar-Alto (rechts)

Seit 1979 liefert das Calar-Alto-Observatorium bahnbrechende Erkenntnisse. Auch die neuen Techniken der Infrarot-Astronomie kommen hier zum Einsatz.

Pyramide des Infrarot-Wavefront-Sensor, mit Harmonic Drive UHVC, in dem 3,5 m Teleskop Calar-Alto (rechts)

Die Infrarot-Astronomie

Die Infrarot-Astronomie ist eine spezielle Form der Astronomie, die die Infrarotspektren von Sternen und anderen astronomischen Objekten untersucht. Die Infrarotstrahlung wird durch die Atmosphäre auf der Erde gestreut und kann daher nicht direkt mit einem Teleskop aufgenommen werden. Stattdessen wird die Infrarotstrahlung durch Spiegel und Linsen aufgefangen und in ein Spektrometer geleitet, um die Spektren zu erhalten. Die Infrarotstrahlung kann auch durch Filter aufgefangen werden, um bestimmte Wellenlängen zu selektieren. Die Infrarotstrahlung kann auch durch Detektoren aufgefangen werden, um die Intensität der Strahlung zu messen. Die Infrarotstrahlung kann auch durch Computermodelle berechnet werden, um die Struktur und Zusammensetzung der astronomischen Objekte zu verstehen.

Abb. IV.1.10: Der Bericht über die Zusammenarbeit mit dem MPIA in der Firmenzeitschrift der Harmonic Drive AG

Höchstleistungen angespornt. Dabei ist es nicht immer leicht, die industriellen Partner von der Realisierbarkeit eines Projektes zu überzeugen.

Wenn Komponenten oder bestimmte Verfahren nicht auf dem Markt zu erhalten sind, dann werden durch die Zusammenarbeit des MPIA mit hoch spezialisierten Firmen auch neue Entwicklungen gestartet, die auf der industriellen Seite stets auf großes Interesse stoßen. Ein Paradebeispiel dafür ist die Entwicklung der Glaskeramik Zerodur für astronomische Spiegel. Dieses Material ist heute in jeder modernen Küche vorhanden.

Für die Zukunft sind weitere gemeinsame Projekte mit industriellen Partnern geplant. Das MPIA kann dabei vor allem seine Erfahrungen im Tieftemperaturbereich einbringen.

Ralf Rainer Rohloff, Harald Baumeister, Monica Ebert, Norbert Münch, Vianak Naranjo

IV.2 Erstes Licht für PARSEC – den Laser der Leitstern-Einrichtung für das VLT

PARSEC, ein Gemeinschaftsprojekt des MPE (Garching) und des MPIA (Heidelberg), ist der Name des Natrium-lasers, der routinemäßig einen qualitativ hochwertigen Dauerstrichstrahl von 10 – 20 Watt Leistung erzeugt, etwa 10 000-mal so stark wie ein Laserpointer der Klasse 2.

Adaptive Optiken (AO-Systeme) sind heute für alle kokurrenzfähigen Teleskope der 8–10-m-Klasse unverzichtbar. Sie gleichen atmosphärische optische Störungen aus und arbeiten normalerweise im Wellenlängenbereich des nahen Infrarot. Um zu funktionieren, benötigen sie eine Referenzquelle für die Wellenfrontanalyse. Ist man auf ausreichend helle natürliche Leitsterne nahe am zu untersuchenden Objekt angewiesen, so ist die Verwendung von AO-Systemen auf wenige Prozent des Himmels beschränkt. Die Lösung dieses Problems ist ein künstlicher Stern, der von einem starken Laser hinreichend nahe am astronomischen Objekt an den Himmel

Abb. IV.2.1: Erstes Licht für den VLT-Laserleitstern. (Bild: Stefan Seip)

projiziert wird.

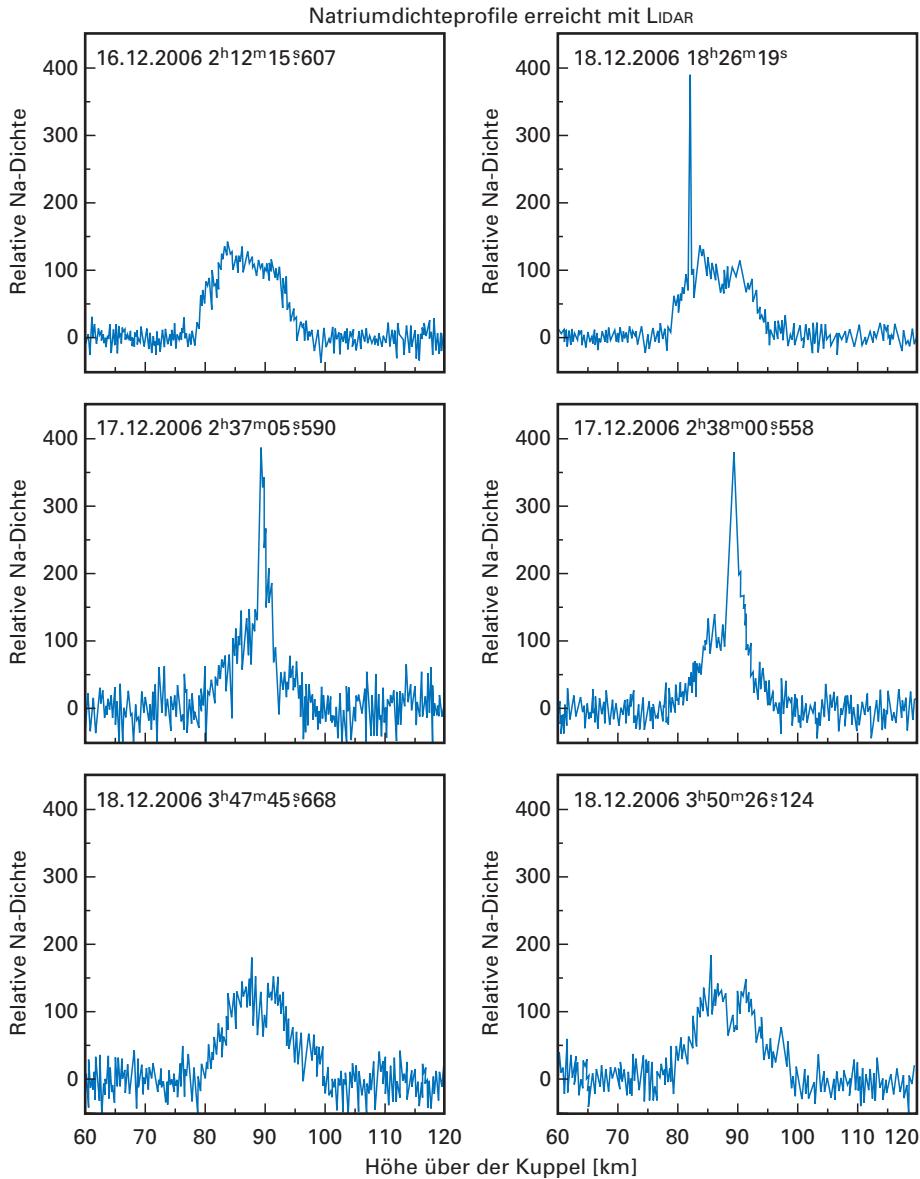
Das Projekt zum Bau der Laserleitstern-Einrichtung (Laser Guide Star Facility, LGSF) für das VLT wurde im Jahr 2000 begonnen. Die LGSF besteht aus drei Hauptkomponenten: einem Projektionsteleskop hinter dem Sekundärspiegel des VLT, einem Glasfaserleiter vom Laserkontrollraum zum Projektionsteleskop und einem Hochleistungsnatriumlaser.

Am 28. Januar 2006 um 23:07 Ortszeit wurde ein mehrere Watt starker Laserstrahl von Yepun aus, der vierten 8.2-m-Teleskopeinheit des Very Large Telescope, in den Himmel geschickt und erzeugte in 90 km Höhe in der Atmosphäre einen künstlichen Stern. Obwohl dieser etwa 20-mal schwächer ist als der schwächste mit bloßem Auge noch sichtbare Stern, ist er hell genug, um der adaptiven Optik als Referenzquelle zu dienen. Das Ereignis war der Höhepunkt der langjährigen Zusammenarbeit eines Teams aus Wissenschaftlern und Ingenieuren der ESO und der Max-Planck-Institute für Extraterrestrische Physik in Garching und für Astronomie in Heidelberg.

Nach mehr als einem Monat Installationszeit vor Ort, wobei das Personal des Paranal-Observatoriums unschätzbare Hilfe leistete, sah die VLT-Laserleitstern-Einrichtung erstes Licht und sandte einen 50 cm breiten, intensiven, wunderschön gelben Lichtstrahl gen Himmel (Abb. IV.2.1).

Obwohl das erste Licht sehr erfolgreich war, zeigte sich





ein Problem bei der Fokussierung des Laserleitsterns, das als Fehljustierung innerhalb des Laserteleskops identifiziert werden konnte. Diese konnte im Herbst 2006 beseitigt werden. Im Dezember 2006 wurde die Inbetriebnahme der LGSF mit dem adaptiven Optik-Instrument NACO fortgesetzt. Zu der Zeit, als dieser Bericht geschrieben wurde, lieferte NACO mit Laserleitstern routinemäßig eine Winkelauflösung auf K-Band-Aufnahmen von unter 0.1 Bogensekunden.

Das integrierte LIDAR-System (Light Detection and Ranging, Laserradar), das Bestandteil des MPIA-Beitrags zu PARSEC ist, wurde ebenfalls 2006 in Betrieb genommen. Erste Ergebnisse der Bestimmung der Natriumdichten über dem Paranal-Observatorium sind in Abb. IV.2.2 wiedergegeben.

Oberflächenabschmelzung von Meteoriten gilt als Hauptquelle für alle Alkaliatome in der Mesosphäre, einschließlich Natrium. Die Natriumschicht erstreckt sich typischerweise von 80 bis 100 km Höhe, mit einem

Abb. IV.2.2: Natriumdichten über Paranal, gemessen mit LIDAR.

Spitzenwert nahe der Mesopause bei 90 km Höhe; die Natriumsäulendichte beträgt größtenteils 5×10^{13} Atome pro Quadratmeter. Die Natriumhäufigkeit kann sowohl kurzfristig variieren als auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. Spitzen im LIDAR-Profil können der Verdampfung natriumhaltiger Meteoroiden zugeschrieben werden. Die Aufzeichnung der Profile durch PARSEC-LIDAR dient zu zweierlei Zwecken: 1) als Diagnosehilfsmittel für den erwarteten Rückfluss vom Laserleitstern und 2) zur Kalibrierung der Fokusverschiebung des Wellenfrontsensors.

Stefan Hippler, Wolfgang Brandner,
Thomas Henning, Udo Neumann, Hans-Walter Rix

IV.3 ESPRI – Suche nach Exoplaneten mit PRIMA

Es dauert nur noch zwei Jahre, bis das hochpräzise Astrometrie-Instrument PRIMA (Phase Referenced Imaging and Micro-arcsecond Astrometry) am Very Large Telescope Interferometer (VLTI) der Europäischen Südsternwarte Eso verfügbar sein wird. Eine der Schlüsselkomponenten für PRIMA, die differentiellen Verzögerungsstrecken, werden am MPIA in Zusammenarbeit mit der Landessternwarte Heidelberg und der Sternwarte Genf entwickelt. Nach seiner Fertigstellung wollen wir PRIMA für eine große astrometrische Durchmusterung zur Suche nach extrasolaren Planeten benutzen.

Mit Hilfe von PRIMA wird das VLT-Interferometer zwei Sterne, die bis zu 30 Bogensekunden auseinander liegen, gleichzeitig beobachten können. Wie bei Beobachtungen mit adaptiver Optik kann ein Stern als Referenz zur Stabilisierung der interferometrischen Phase benutzt werden, während der andere dann ohne Störungen durch die Atmosphäre beobachtet werden kann. Verwendet man diese Technik, um den Abstand zwischen zwei Sternen sehr präzise zu messen (Astrometrie), so kann man das gravitative Taumeln nachweisen (astrometrisches Signal), das von einem (unsichtbaren) Planeten verursacht wird, der diesen Stern umkreist. Ausgerüstet mit differentiellen Verzögerungsstrecken wird PRIMA eine astrometrische Genauigkeit von 10 Mikrobogensekunden erreichen (was von der Erde aus gesehen 2 cm auf dem Mond entspricht). Diese Genauigkeit wird es ermöglichen, extrasolare Planeten bis hinab zur Uranusmasse bei nahe gelegenen Sternen zu entdecken.

Obwohl bis heute die meisten extrasolaren Planeten mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt wurden, stellt die astrometrische Methode eine gute Ergänzung dar, da sie für Planeten mit Umlaufperioden länger als ein Jahr empfindlicher ist. Insbesondere kann die astrometrische Methode auch für die Suche nach Planeten bei Sternen benutzt werden, die für die Suche mittels Radialgeschwindigkeit weniger geeignet sind, weil ihre Spektrallinien zu breit oder nicht genügend stabil sind (z.B. junge und aktive, schnell rotierende Sterne).

Das MPIA, die Landessternwarte Heidelberg und die Genfer Sternwarte arbeiten in einem Konsortium zusammen, das mit der ESO übereingekommen ist, die differentiellen Verzögerungsstrecken (DDL) für PRIMA zu bauen und zu liefern, die Reduktionssoftware für die astrometrischen Daten zu entwickeln und dann mit den Auxiliary Telescopes (ATs) am VLTI ein astrometrisches Planetensuchprogramm im nahinfraroten K-Band durchzuführen.

Was die Entwicklung der Hardware betrifft, so ist das MPIA hauptsächlich für den Entwurf und Bau der Katzenaugenteleskope für die DDL zuständig. In Verbindung mit einem zweistufigen linearen Bewegungsmechanismus und einem Lasermetrologie-System, und montiert auf einer stabilen optischen Bank in einem

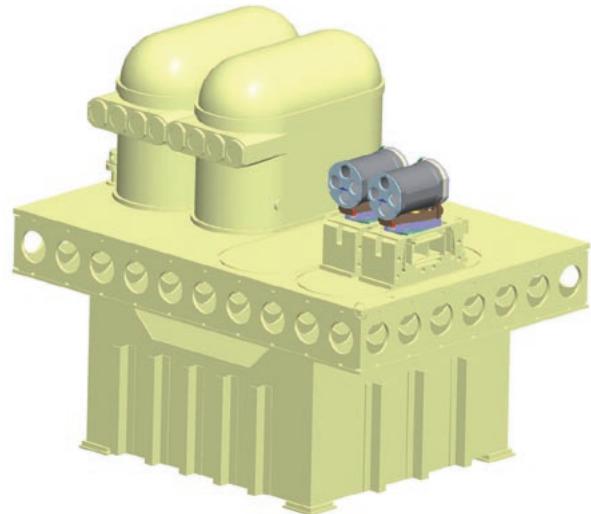


Abb. IV.3.1: Systemansicht (Modell) der differentiellen Verzögerungsstrecken mit optischer Bank, Vakuumtanks mit Eingangsfenstern und Katzenaugenteleskopen auf hochpräzisen linearen Translationsstufen.

Vakuumtank, werden die DDL optische Weglängenunterschiede zwischen den beiden Sternen von bis zu 12 cm mit einer Genauigkeit von einem Nanometer ausgleichen können (was einem Dynamikbereich von 10^8 entspricht!). Die schwierigste technische Herausforderung bestand darin, eine Stabilität im Subbogensekundenbereich über den vollen Bewegungsbereich aufrecht zu erhalten. Im Sommer 2006 haben wir die abschließende Konstruktionsüberprüfung (Final Design Review) für die DDL bei der ESO erfolgreich bestanden. Nach der Durchführung einer technischen Machbarkeitsstudie in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut IOF in Jena haben wir die Firma AXSYS in Detroit beauftragt, die Katzenaugenteleskope zu bauen. Zur Zeit richten wir am MPIA ein neues optisches Labor ein und gehen davon aus, dass wir die erste Katzenaugenoptik im Sommer 2007 erhalten und testen können.

Weitere, nicht weniger wichtige Arbeiten am ESPRI-Projekt sind die Entwicklung der astrometrischen Betriebssoftware (PAOS), die Erarbeitung einer vollständigen Fehleranalyse und die wissenschaftliche Vorbereitung des Planetensuchprogramms. Das MPIA ist an der ersten Aufgabe beteiligt und leitet die beiden letzteren. Die Inbetriebnahme des Instruments und seines astrometrischen Betriebsmodus ist für die zweite Hälfte 2008 vorgesehen, sodass die Suche nach Exoplaneten mit PRIMA Anfang 2009 wird beginnen können.

*Harald Baumeister, Peter Bizenberger, Uwe Graser (PM), Thomas Henning (PI), Ralf Launhardt (PS),
Johny Setiawan, Robert Tubbs, Karl Wagner.
Partner: Observatoire de Genève,
Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl, ESO*

IV.4 SPHERE – Abbildung extrasolarer Planeten

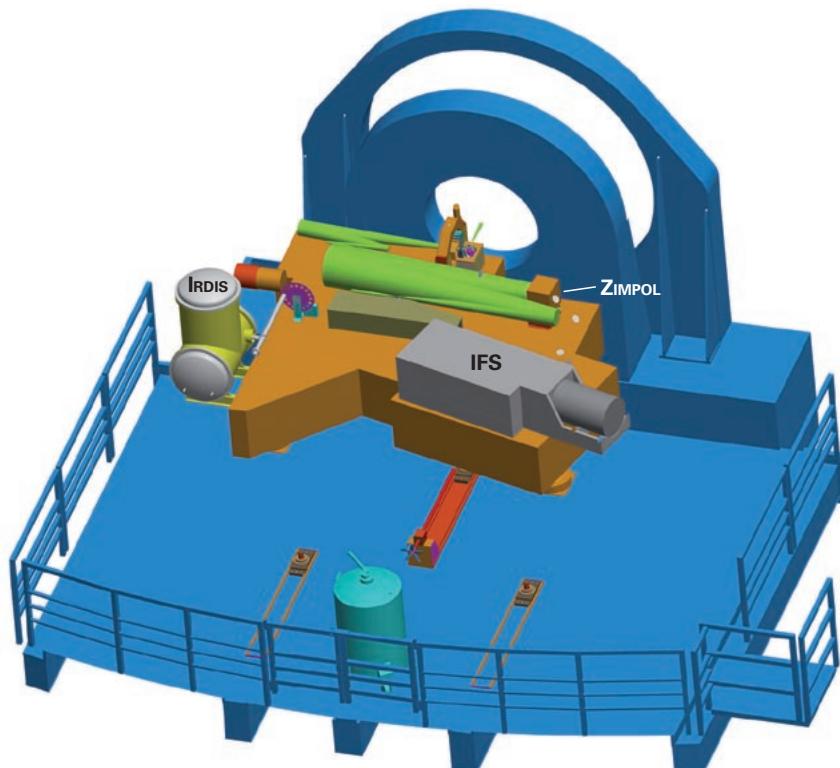
SPHERE – Spectroscopic and Polarimetric High-Contrast Exoplanet Research – ist der Name eines Instrumentes der zweiten Generation für das VLT, welches der direkten Abbildung extrasolarer Planeten dienen soll. Es wird aus einem »extremen« System adaptiver Optik – mit einem deformierbaren Spiegel mit 1600 Aktuatoren und einer Regelfrequenz von 1.5 kHz, dem differentiellen Polarimeter ZIMPOL für den sichtbaren Spektralbereich, einem 3D-Spektrographen für das sehr nahe Infrarot (Y und J-Bänder), sowie einer vielseitigen differentiellen Kamera für das gesamte nahe Infrarot (ähnlich wie CONICA-SDI) bestehen.

Der Startschuss für die Phase B von SPHERE fiel im März 2006 in Paris, vorläufige Konstruktionsüberprüfung (preliminary design review, PDR) ist derzeit für Mai 2007 vorgesehen. SPHERE wird von einem Konsortium aus 13 europäischen Instituten gebaut, mit dem Astrophysikalischen Labor und Observatorium von Grenoble als P.I.-Institut und dem MPIA als Co-P.I.-Institut. Unser hauptsächlicher Beitrag liegt in der Datenreduktions- und Handhabungs-Software. Dies umfasst im wesentlichen alles von der ursprünglichen Objektliste bis zur endgültigen Liste der gefundenen Kandidaten, inklusive der Datenreduktion und Analyse. Zusätzlich stellt das MPIA eine Komponente des Instruments zur Verfügung, im wesentlichen eine Verfahrbühne für einen der Infrarot-Detektoren, die Dispersionskorrekturen, sowie die Feld/Pupill-Derotatoren.

Nach dem derzeitigen Planungsstand soll SPHERE 174 FTE und 6 M€ kosten (inklusive einiger FP6-finanzierter Komponenten). Der geplante Beitrag des MPIA beläuft sich auf 18 FTE und 500 000 €, so dass sich rechnerisch ein Projektanteil von etwa 10 Prozent ergibt. Laut Vereinbarung wird das Konsortium für seinen Beitrag 260 Beobachtungsnächte mit SPHERE erhalten. Eine große, vom gesamten Konsortium gemeinsam durchgeführte Durchmusterung nach Exoplaneten wird einen großen Teil dieser Nächte beanspruchen. Derzeit laufen detaillierte Vorbereitungen für diese Durchmusterung.

Markus Feldt (Co-P.I.) und das SPHERE-Konsortium
Laboratoire d’Astrophysique de Grenoble,
Laboratoire d’Astrophysique de Marseille,
Laboratoire d’Etudes Spatiales et d’Instrumentation
en Astrophysique,
Laboratoire Universitaire d’Astrophysique de Nice,
Istituto Nazionale di Astrofisica,
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,
Observatoire de Genève,
Universität van Amsterdam,
Office National d’Etudes et de Recherches
Aérospatiales,
Stichting Astronomisch Onderzoek in Nederland,
ESO Garching

Abb. IV.4.1: SPHERE an der Nasmyth-Plattform des VLT.



IV.5 LINC-NIRVANA, das Herzstück des LBT

LINC-NIRVANA ist ein abbildender interferometrischer Strahlvereiniger für das Large Binocular Telescope (LBT). Es wird in einem der zentralen gemeinsamen Foki des LBT fest installiert sein und dort das von den beiden 8.4 m großen Hauptspiegeln kommende Licht vereinigen. Auf diese Weise lassen sich echte Weitwinkelauflnahmen mit der räumlichen Auflösung eines einzelnen 23-m-Teleskops gewinnen. Das MPIA leitet ein Konsortium aus vier Instituten, die LINC-NIRVANA gemeinsam bauen. Die anderen Partner sind das Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF, Italien), die Universität zu Köln und das Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn.

Das LINC-NIRVANA-Team hat 2006 eine Reihe wichtiger Meilensteine erreicht. Der sichtbarste war der Beginn des Einbaus der Komponenten in das größere Instrument. Dazu gehören die Installation auf der großen optischen Bank im Reinraum des MPIA und die nachfolgende erfolgreiche Überprüfung der Funktionsfähigkeit. Eine wichtige Aufgabe besteht darin sicherzustellen, dass LINC-NIRVANA hochqualitative Abbildungen liefert, auch wenn das Teleskop aus der Senkrechten geneigt ist. Die große hydraulische Plattform für Biegetests ermöglicht es uns, das Betriebsverhalten bei allen Winkeln zwischen Zenit und Horizont zu prüfen.

Mehrere einzelne Untersysteme sind 2006 in die Integrations- und Verifikationsphase eingetreten. Dazu gehören die warme Voroptik, verschiedene Komponentenlagerungen und -gerüste sowie der große Vakuumkryostat, der die wissenschaftlichen und die Fringe-Tracker-Detektoren aufnehmen wird.

Der Kryostat stellt eine besonders interessante technische Herausforderung für die Ingenieure des MPIA dar. Außer den empfindlichen Detektoren eine kalte (77 K oder -196°C), lichtdichte Umgebung zu bieten, muss der Kryostat über eine Vielzahl mechanischer Funktionen verfügen, wobei elektrische Störsignale und Vibrationen, die für interferometrische Messungen fatal sein können, möglichst klein gehalten werden müssen.

Diese Anforderungen führten zu einer Reihe neuartiger technischer Lösungen für den Kryostaten. So muss sich zum Beispiel der Detektor drehen, um dem astronomischen Zielobjekt folgen zu können, doch Motoren verursachen normalerweise unerwünschte elektrische Störsignale. Um dieses Problem zu bekämpfen, entwickelte das LINC-NIRVANA-Team einen einzigartigen Analogmotorantrieb, der die Stromspitzen, die zu Störungen des Detektors führen, unterbindet.

Vibrationen sind eine weitere entscheidende technische Herausforderung. Typische moderne Kryostate verwenden mechanische Kühlgeräte, um die niedrigen Temperaturen zu erreichen, die für Infrarotbeobachtungen nötig sind. Leider erzeugen mechanische Kühlgeräte jedoch mechanische Vibrationen. Bewegungen der optischen Komponenten von LINC-NIRVANA um einen Bruchteil der Lichtwellenlänge können die empfindliche Interferenz zerstören, die zum Erreichen maximaler räumlicher Auflösung nötig ist. Es gibt zwar mechanische Kühlgeräte mit geringer Vibration, doch die haben nicht die Kühlkapazität, um den großen Kryostaten von LINC-NIRVANA abzukühlen.

Bei der Kühlung großer astronomischer Instrumente beschreiten MPIA-Ingenieure in Zusammenarbeit mit einem kommerziellen Partner einen neuen Weg. Die entscheidende Idee ist, den mechanischen Kühlgeräten von den vibrationsempfindlichen Komponenten zu trennen. Der Kühlgerät für LINC-NIRVANA wird ein Stockwerk unter dem Kuppelboden zusammen mit anderen »schmutzigen« Systemen wie Ventilatoren, hydraulischen Pumpen usw. aufgebaut werden. Der Kühlgerät kühlt ein Tarnsportmedium, in diesem Falle gasförmiges Helium, auf etwa 60 K ab, und ein Flügelrad zwingt das Gas durch ein etwa 40 m langes isoliertes Rohr hindurch zum Instrument. Die Heliumleitung wird in das Vakuumgefäß eingeführt und

Abb. IV.5.1: Links: Die optische Bank von LINC-NIRVANA, ausgerichtet auf den Zenit. Mitte: Um Biegeeffekte zu messen, können hydraulische Stempel das gesamte Instrument kippen. Rechts: Die Überprüfung der optomechanischen Komponenten findet oben auf der Bank statt.

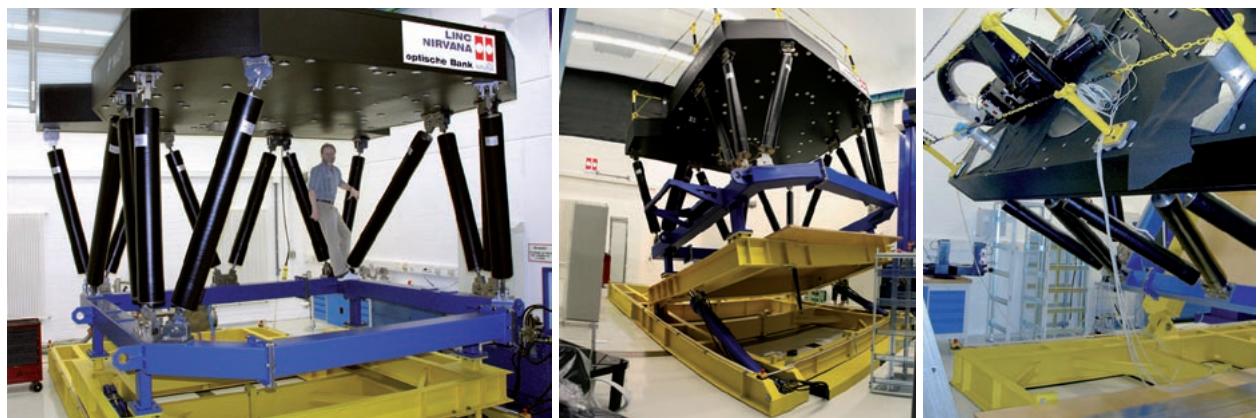




Abb. IV.5.2: Sebastian Egner, Ingenieur am MPIA, justiert die Verbindungspunkte der Vakuumkryogenenleitungen am Kryostaten von LINC-NIRVANA.



Abb. IV.5.3: Der Analogmotorantrieb und der Prototyp des kryogenen Drehmechanismus. (Vianak Naranjo)



Abb. IV.5.4: Der externe mechanische Kühler für den LINC-NIRVANA-Kryostaten.

um einen großen, zylindrischen Wärmetauscher gewickelt, der wiederum die optischen Komponenten und Detektoren kühlt.

Zusammenbau, Einbau und Tests von LINC-NIRVANA werden 2007 und 2008 weiter gehen. Inzwischen macht auch das LBT selbst Fortschritte. Der Beginn des binokularen Betriebs und die Installation der adaptiven Sekundärspiegel sind wichtige Meilensteine in diesem Zeitraum. LINC-NIRVANA soll 2009 auf Mt Graham eintreffen, und bald danach können MPIA-Astronomen beginnen, dieses einzigartige Beobachtungsinstrument zu nutzen.

*Harald Baumeister, Jürgen Berwein,
Mario Bix, Armin Böhm, Luis Borelli,
Florian Briegel, Mario Brix, Fulvio De Bonis,
Sebastian Egner, Wolfgang Gäßler, Bernhard Grimm,
Stefan Hanke, Tom Herbst (PI), Frank Kittmann,
Martin Kürster (PM), Lukas Labadie, Werner Laun,
Ulrich Mall, Lars Mohr, Vianak Naranjo,
Aleksey Pavlov, Hans-Walter Rix,
Ralf-Rainer Rohloff, Eva Schinner,
Joachim-Johannes Schmidt, Clemens Storz*

IV.6 LUCIFER I/II

Die beiden identischen Kamera/Spektrographen-Systeme für das nahe Infrarot LUCIFER I/II machen gute Fortschritte: Im Laufe des Jahres 2006 wurden sämtliche opto- und kryomechanischen Teile hergestellt und geliefert (außer einigen Schmalbandfiltern, die Ende Februar 2007 geliefert werden). Die kalte Struktur einschließlich des Kühlungs- und Vorkühlungssystems wurde in LUCIFER I implementiert. Die optischen Komponenten wurden in ihre mechanischen Halterungen und diese Halterungen in den Kryostaten eingebaut. Die LN₂-Vorkühlungs- und die Umlaufhauptkühlungssysteme wurden erfolgreich getestet. Am Ende des Berichtjahrs war LUCIFER I fast vollständig zusammengebaut. Erste Detektortests sind für Februar 2007 vorgesehen. Für den ersten Test wurde LUCIFER I an den Teleskopsimulator montiert (siehe Abb. IV.6.1).

Parallel dazu wurde die MOS-Einheit in LUCIFER II eingebaut und am MPE (Garching) getestet. Die Bereitstellung der MOS-Einheit und ihr Testeinbau in das vollständig montierte LUCIFER-Instrument soll im Februar 2007 erfolgen.

Der Einbau und die Inbetriebnahme von LUCIFER I am LBT sind nun für Dezember 2007 geplant. Das zweite LUCIFER-Instrument wird etwa ein Jahr später folgen.

Rainer Lenz

Abb. IV.6.1: LUCIFER I, montiert am Teleskopsimulator am MPIA. Auf der Rückseite ist das große Ventil zu sehen, das einen Maskenaustausch bei kryogenen Temperaturen erlaubt.

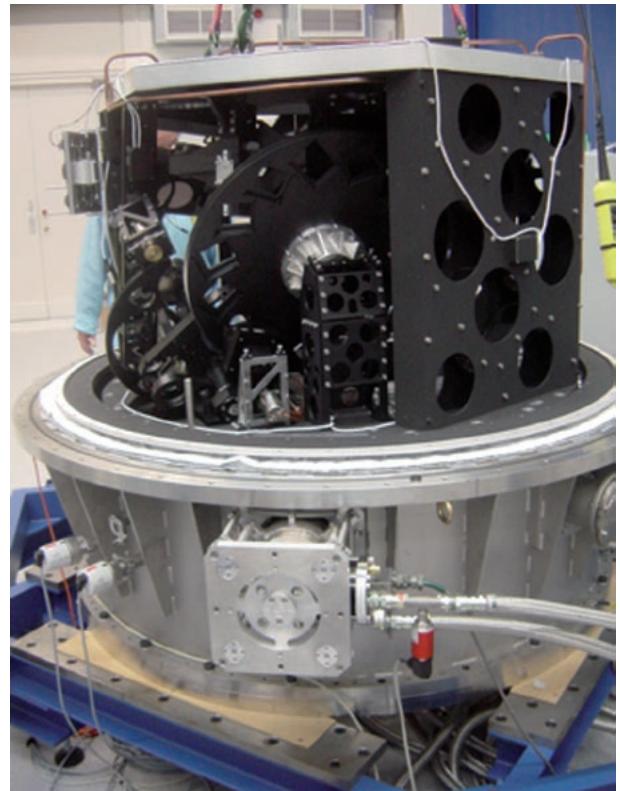
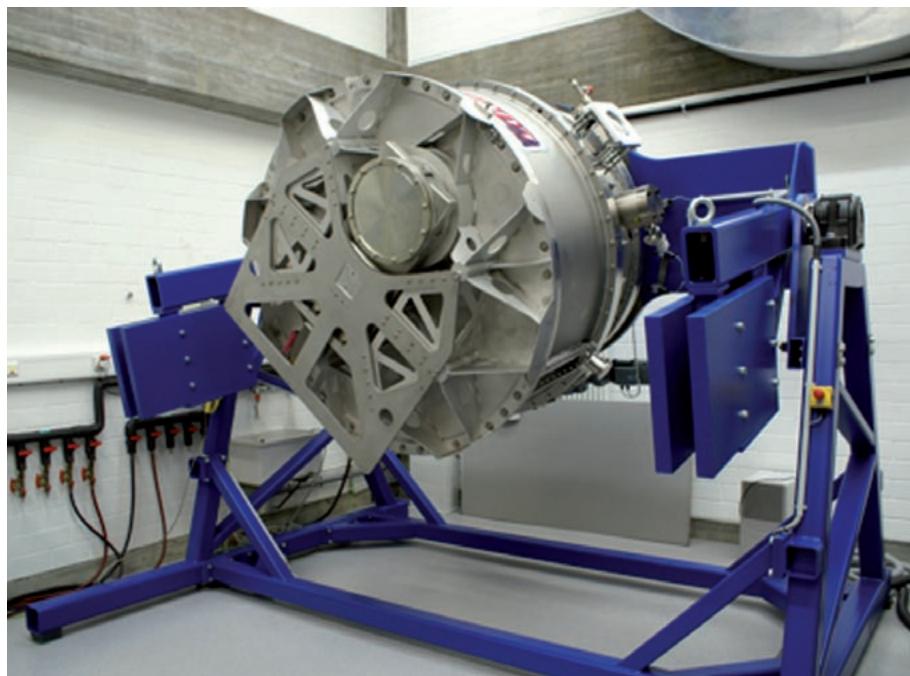


Abb. IV.6.2: LUCIFER I während des Zusammenbaus am MPIA. Die teilweise montierte kryogene Struktur wird in den vorderen Teil des Kryostats eingeführt (Eingangsfenster am Boden, nicht sichtbar). Deutlich erkennbar sind die beiden großen Filterräder.



IV.7 ASTRALUX – Beugungsbegrenzte Abbildung im sichtbaren Wellenlängenbereich

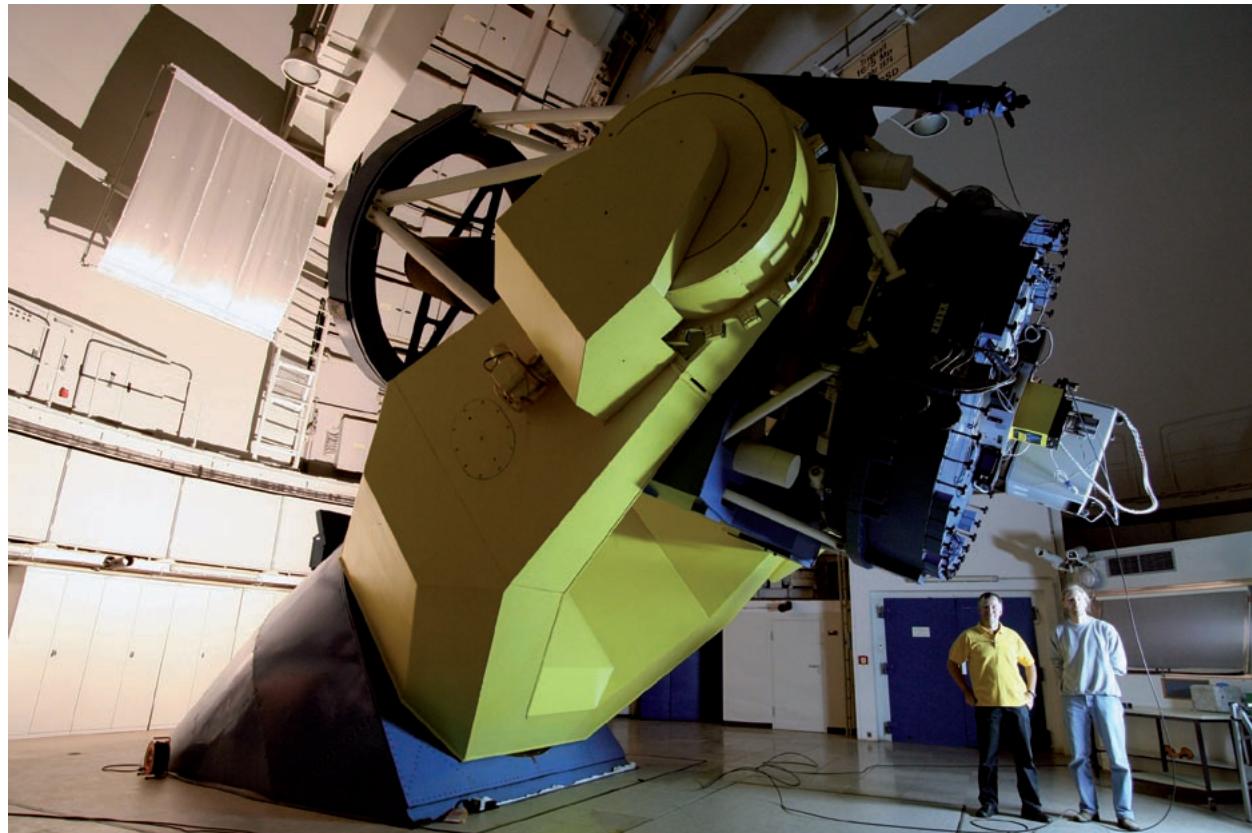
Die mit bodengebundenen Teleskopen erzielte Winkelauflösung ist durch optische Turbulenz der Atmosphäre beeinträchtigt. Es gibt zwei Wege, um diese Einschränkung zu umgehen: Entweder man beobachtet oberhalb der Atmosphäre von Weltraumobservatorien aus, oder man verwendet adaptive Optiken, welche die schnellen deformationen der Wellenfront durch die Turbulenzen der Erdatmosphäre in Echtzeit kompensieren. Hier stellen wir das neue Instrument ASTRALUX vor, das am 2.2-m-Teleskop auf dem Calar Alto im Einsatz ist und nach einer dritten Methode, dem »Lucky Imaging« arbeitet.

Verglichen mit lang belichteten, seeingbegrenzten Aufnahmen können kurz belichtete Aufnahmen durch die Atmosphäre hindurch deutlich schärfere Bilder liefern. Während erstere typischerweise eine Winkelauflösung von etwa einer Bogensekunde zeigen, besteht die Punktverbreiterungsfunktion der kurz belichteten Aufnahmen aus Fleckchen (engl. speckles) mit einer Halbwertsbreite, die der Beugungsgrenze des Teleskops entspricht.

Abb. IV.7.1: Die ASTRALUX-Kamera am 2.2-m-Teleskop auf dem Calar Alto. Links: Stefan Hippler, rechts: Felix Hormuth.

ASTRALUX basiert auf »Lucky Imaging«, einer Methode, bei der aus vielen, kurz hintereinander belichteten Aufnahmen zum Beispiel die besten 1 %, 5 % oder 10 % ausgewählt werden. Diese Aufnahmen werden dann durch Verschieben und Addieren (shift-and-add technique) zum endgültigen Bild übereinander gelegt. An einem 2.2-m-Teleskop wie dem auf dem Calar Alto erreicht Lucky Imaging die Beugungsgrenze des Teleskops: 0.085 Bogensekunden bei einer Wellenlänge von 900 nm.

Erstes Licht mit AstraLux am 2.2-m-Teleskop auf dem Calar Alto war im Juli 2006. Herzstück der AstraLux-Kamera ist ein elektronenvervielfachendes, abgeätztes, von hinten belichtetes CCD, das im Bildtransfermodus betrieben wird und bis zu 34 Bilder pro Sekunde aufnehmen kann, wobei das volle 512×512 Pixel große Bild ausgelesen wird. Die Kamera befindet sich im Cassegrain-Fokus des Teleskops hinter einer einfachen Barlowlinse, die die Öffnungszahl von $f/8$ in $f/32$ umwandelt. Dadurch erhält man einen Bildmaßstab von 46.4 Millibogensekunden/Pixel, der Nyquist-Sampling bei $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ liefert und die theoretische Punktverbreiterungsfunktion bei der typischen Beobachtungswellenlänge von 700 – 950 nm gerade nicht mehr optimal abtastet. Mit Ausnahme der Montierung zur Befestigung der Kamera am Teleskop wurden alle Komponenten fertig gekauft. Das macht AstraLux zu einem einfachen und billigen Instrument, das von der ersten Idee bis zum ersten Licht in nur sechs Monaten realisiert wurde.



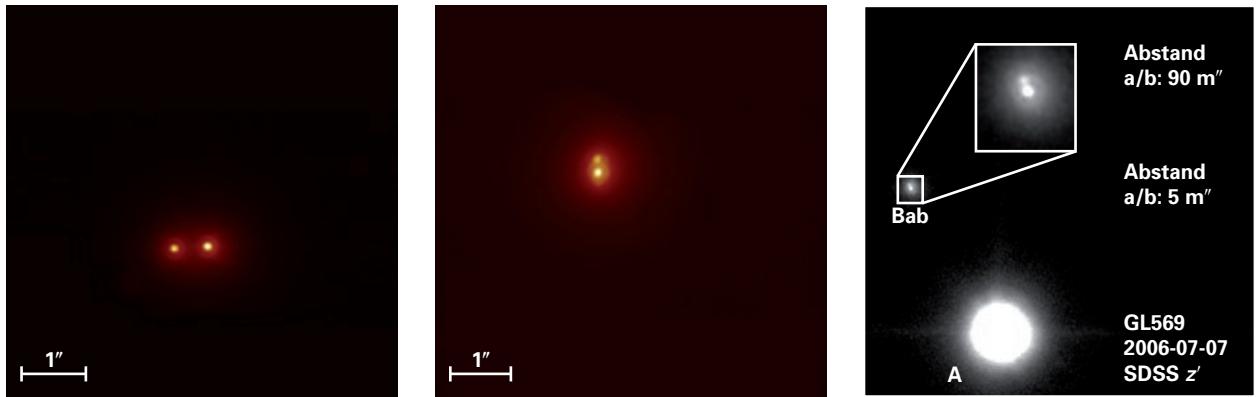
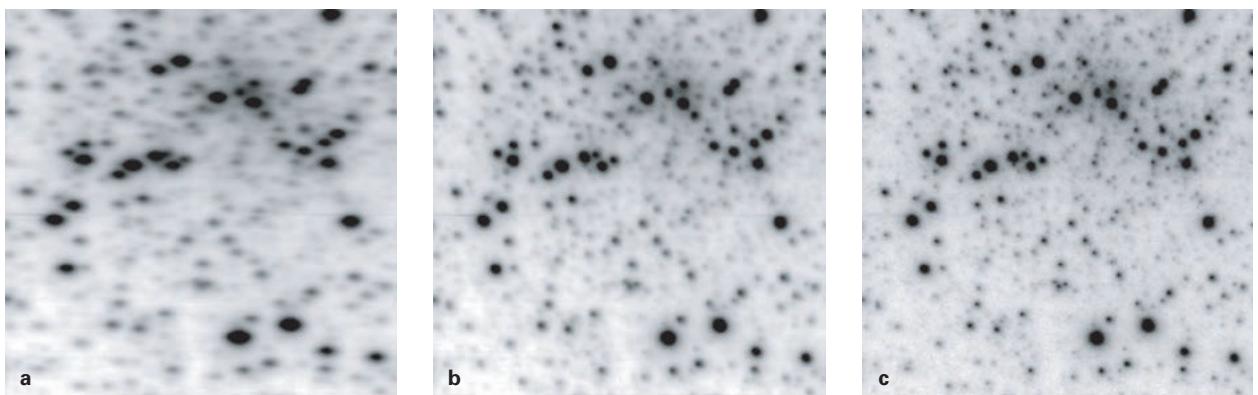


Abb. IV.7.3: Die dichte Kernregion des Kugelhaufens M 15 als Fallstudie für Lucky Imaging. Die Bilder zeigen von links nach rechts das seeingbegrenzte Bild (aufgrund eines Fehlers bei der Teleskopnachführung erscheinen die Sterne länglich, Halbwertsbreite 730×430 Quadratbogensekunden), ein »tip-tilt« (Bildbewegung) korrigiertes Bild und das Ergebnis mit Lucky Imaging, basierend auf den besten 250 von 5000 Aufnahmen. Die Gesamtbelichtungszeit beträgt 15 Sekunden. Die stellare Halbwertsbreite beträgt 110 Millibogensekunden, das Gesichtsfeld ist 24×24 Quadratbogensekunden groß.

Auch wenn sich Astronomen zuweilen Sorgen machen über die schiere Menge an Daten, die fortgeworfen oder nicht verwendet werden, typischerweise 95 %, sind die mit Lucky Imaging gewonnenen Ergebnisse doch sehr vielfältig. Lucky Imaging kann an einem Teleskop der 2-m-Klasse eine hohe Winkelauflösung im sichtbaren Wellenlängenbereich liefern, typischerweise etwa 100 Millibogensekunden. Der Auswahlprozess nach dem Motto »Nur das Beste« erhöht das Signal/Rausch-Verhältnis von Punktquellen im Vergleich zum seeingbegrenzten Fall mit 100 % Fluss. Wegen des Auswahlereffekts ist bei Lucky Imaging der isoplanatische Fleck größer als der auf Bildern, die durch adaptive Optik korrigiert werden. Der für Lucky Imaging benötigte Referenzstern muss an einem 2.2-m-Teleskop nur eine Helligkeit von $I = 15.5$ mag haben, was annähernd gleich der Grenzgröße adaptiver Optik-Systeme für das nahe Infrarot ist.

Die Abbildungen IV.7.2 und IV.7.3 zeigen Ergebnisse, die während der allerersten Beobachtungsnächte gewonnen wurden.

Stefan Hippler, Felix Hormuth,
Wolfgang Brandner, Karl Wagner, Thomas Henning



IV.8 PANIC (Panoramic Near Infrared Camera) – Eine Panoramakamera für das nahe Infrarot

Ziel dieses Projekts ist es, das 2.2-m-Teleskop auf dem Calar Alto mit einer hochmodernen, wettbewerbsfähigen Weitfeldkamera für das nahe Infrarot auszurüsten. Ein solches Instrument wurde von Astronomen des Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) und des MPIA ausgewählt, die im September 2006 in einem gemeinsamen Projekt mit dem Bau von PANIC begannen. Für die Mechanik, die Elektronik und das Auslesen der Detektoren ist das MPIA zuständig, die optische Konstruktion und die Software liefert das IAA. Der jetzige Zeitplan sieht die vorläufige Konstruktionsüberprüfung (preliminary design review, PDR) für Juli 2007 und das erste Licht am Teleskop für die zweite Hälfte 2009 vor.

Da die Hauptanwendungen des Instruments Weitfeldaufnahmen sein werden, wurde die Bildskala auf 0.45 Bogensekunden/Pixel festgelegt. Das ergibt mit einem $4\text{ K} \times 4\text{ K}$ großen Detektor ein Gesichtsfeld von $0^\circ.5 \times 0^\circ.5$. Der spektrale Bereich reicht vom z -Band (0.82 mm) bis zum K -Band (2.42 mm).

Zwei größere Einschränkungen müssen am Ritchey-Chrétien-Fokus des 2.2-m-Teleskops berücksichtigt werden: Die Länge des Instruments darf 160 cm nicht überschreiten, und sein Gewicht im Fokus ist auf 300 kg begrenzt. Die Längenbegrenzung kann leicht durch Falten des Instruments eingehalten werden. Die Gewichtsbegrenzung wird die Verwendung leichter Materialien und Gewichtsreduzierung durch konstruktive Mittel erforderlich machen.

Die optische Konstruktion des Instruments ist in Abb. IV.8.1 dargestellt. Drei Planspiegel falten den Strahlengang, sodass die Längenbegrenzung eingehalten wird und der Großteil der Hardware im Kryostaten nahe

der Brennebene liegt, um das auf das Teleskop wirkende Drehmoment zu minimieren. Das optische Design ist rein dioptrisch. Über das gesamte Gesichtsfeld und den gesamten Spektralbereich sind mehr als 80 % des Punktbildflusses innerhalb eines 1 Pixel großen Radius enthalten. Die Verzeichnung ist kleiner als 0.5 %. Ein Zwischenbild der Eingangspupille innerhalb des optischen Strahlengangs erlaubt es, eine kalte Pupille zu verwenden und so den thermischen Hintergrund des Instruments zu reduzieren. Der Kryostat wird mit einem 60-l-Tank für flüssigen Stickstoff ausgerüstet sein, um eine Kalthaltezeit von etwa 36 Stunden zu gewährleisten. Drei Filterräder können 21 Filter aufnehmen.

Vier Hawaii-2RG-Detektoren werden in einer Anordnung mit einer minimalen Lücke von etwa 12 Pixel montiert werden. PANIC wird daher eine sehr günstige Feldeinteilung haben. Die Ausleseelektronik wird einer neuen, derzeit in der Entwicklung befindlichen Generation der Standard-MPIA-Ausleseelektronik angehören. Sie wird ein schnelles und rauscharmes Auslesen ermöglichen.

Die Software wird eine grafische Benutzeroberfläche zur einfachen Steuerung der Instrumente enthalten sowie Makros zur Erleichterung der Beobachtungen. Eine Daten-Schnellansicht einschließlich Offset- und Flat-Field-Korrektur sowie Aufaddieren (stacking) von Bildern und Verzeichnungskorrektur werden es ermöglichen, die Qualität der erhaltenen Daten bereits während der Beobachtungen zu kontrollieren. Eine Datenreduktionspipeline und ein Archivierungssystem werden wir ebenfalls zur Verfügung stellen.

*Josef W. Fried, Werner Laun,
Ralf-Rainer Rohloff, Bernhard Grimm,
Ulrich Mall, Vianak Naranjo,
in Zusammenarbeit mit Kollegen vom IAA, Granada*



Abb. IV.8.1: Optischer Konstruktionsentwurf für PANIC. Das Eingangsfenster, das sich ebenfalls auf die optische Abbildung auswirkt, liegt vor der Brennebene des Teleskops. Ein Abbild der Eingangspupille wird hinter der ersten Linsengruppe erzeugt. Die Länge der Optik beträgt etwa 160 cm.

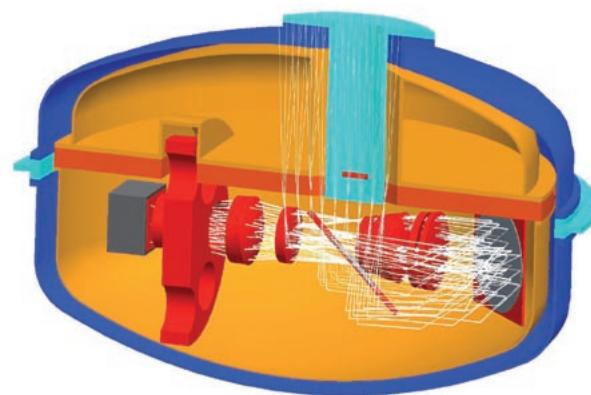


Abb. IV.8.2: Eine Designstudie für das Layout des Instruments. Durch die Verwendung von drei Faltspiegeln ergibt sich eine kompakte Konstruktion. Der Vakuumbehälter ist blau dargestellt, das Stickstoffgefäß ockerfarben, die optischen Elemente und Filterräder sind rot abgebildet, die optische Bank hellrot und der Detektor grau.

IV.9 PYRAMIR – Ein neuer Wellenfrontsensor für ALFA

PYRAMIR ist ein neuer Wellenfrontsensor für das AO-System ALFA am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto. Er basiert auf dem Pyramiden-Prinzip, im Wesentlichen eine Erweiterung des Foucaultschen Messerschneidentests, und soll einem Sensor vom Shack-Hartmann-Typ bei gleicher Photonenrate und hohen Strehlzahlen (20 % oder höher) überlegen sein. Da PYRAMIR im nahen Infrarot arbeitet, dem Wellenlängenbereich, in dem die Korrektor von ALFA am wirksamsten ist, können hier auf dem Wellenfrontsensor hohe Strehlzahlen leicht erreicht werden und der Test der Überlegenheitsvorhersage wird möglich.

PYRAMIR hatte im Jahr 2006 mehrere erfolgreiche Inbetriebnahme-Läufe am 3.5-m-Teleskop. Die AO-

Regelschleife wurde vielfach erfolgreich geschlossen und es wurden Strehlverhältnisse von bis zu 40 % im K-band erreicht. Systematische Tests zur Bestimmung des linearen Bereichs, zum Ausmessen des Modenübersprechens, zum Aufbau eines optimierten Sensormodensatzes und zur Messung des Einflusses statischer Aberrationen im System wurden durchgeführt. Der Nachweis der Überlegenheit bezüglich eines Shack-Hartmann-Sensors steht noch aus, da die Anzahl der systematischen Nachtbeobachtungen hierzu noch nicht ausreicht. Die Situation wird durch den Ausfall der Kommunikationsstrecke des visuellen Shack-Hartmann-Sensors von ALFA noch etwas kompliziert. Dieser Sensor wurde jetzt außer Betrieb genommen und PYRAMIR könnte, einen weiteren erfolgreichen Inbetriebnahmelauf Anfang 2007 vorausgesetzt, ALFAs einziger Wellenfrontsensor werden.

Markus Feldt

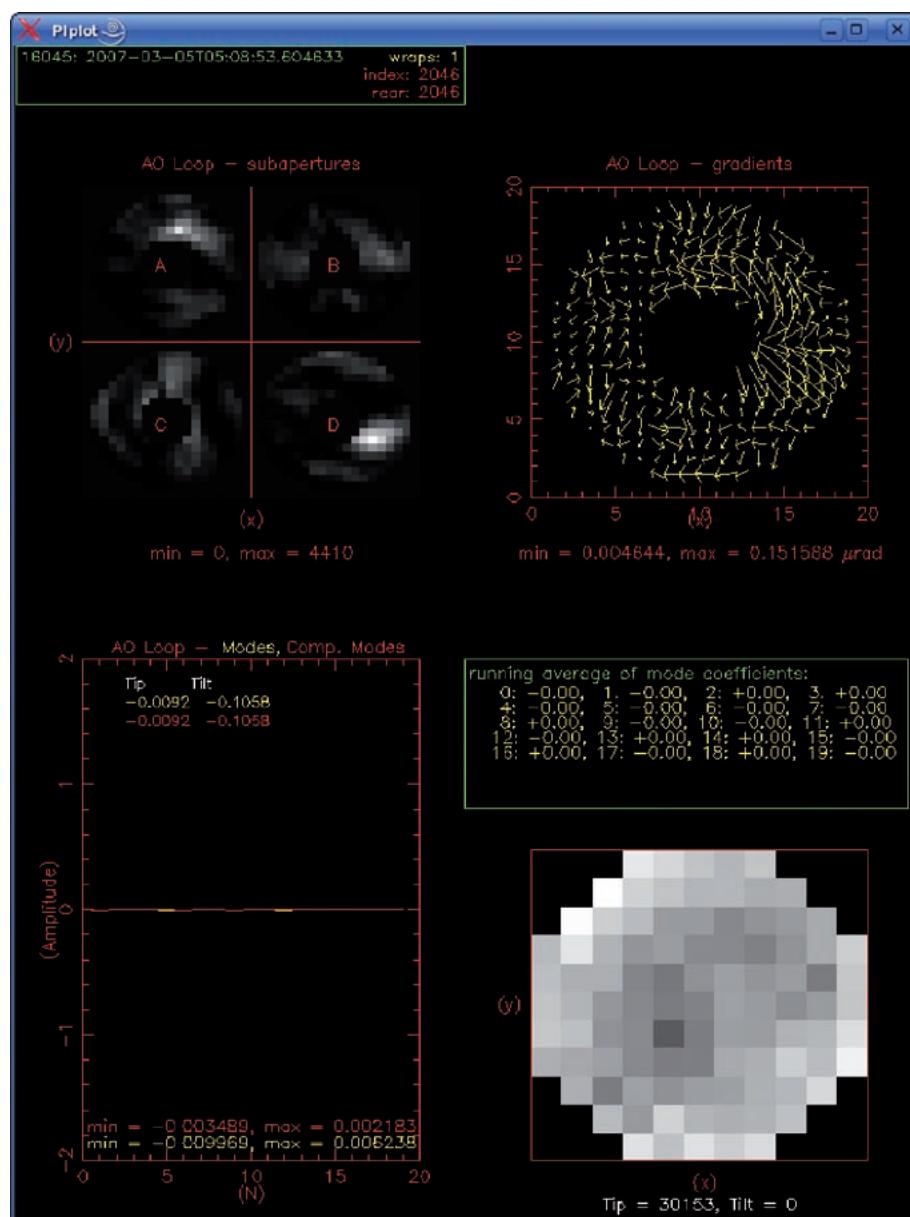


Abb. IV.9.1: Kontrollanzeige der Echtzeitregelung während des Betriebs. Oben links die vier Pupillenabbildungen des Pyramidensensors. Oben rechts die daraus errechneten Wellenfrontgradienten. Unten links die Aberrationsmoden und unten rechts das an den verformbaren Spiegel angelegte Korrektursignal. Die Aufnahme entstand bei geschlossenem Regelkreis der adaptiven Optik, es sind also nur Restaberrationen zu erkennen; Die Strehlzahl beträgt etwa 70 %.

IV.10 E-ELT (European Extremely Large Telescope) – ein extrem großes Teleskop für Europa

Bodengebundene Teleskope mit Durchmessern zwischen 20 und 100 Metern, so genannte »Extremely Large Telescopes« (ELT), stellen den nächsten großen Sprung in der Fähigkeit der Menschheit dar, den Kosmos zu beobachten. Die europäischen Pläne für ein ELT haben 2006 beträchtliche Fortschritte gemacht, wobei das MPIA weiterhin im Mittelpunkt der wissenschaftlichen und technischen Planung für das European ELT (E-ELT) steht.

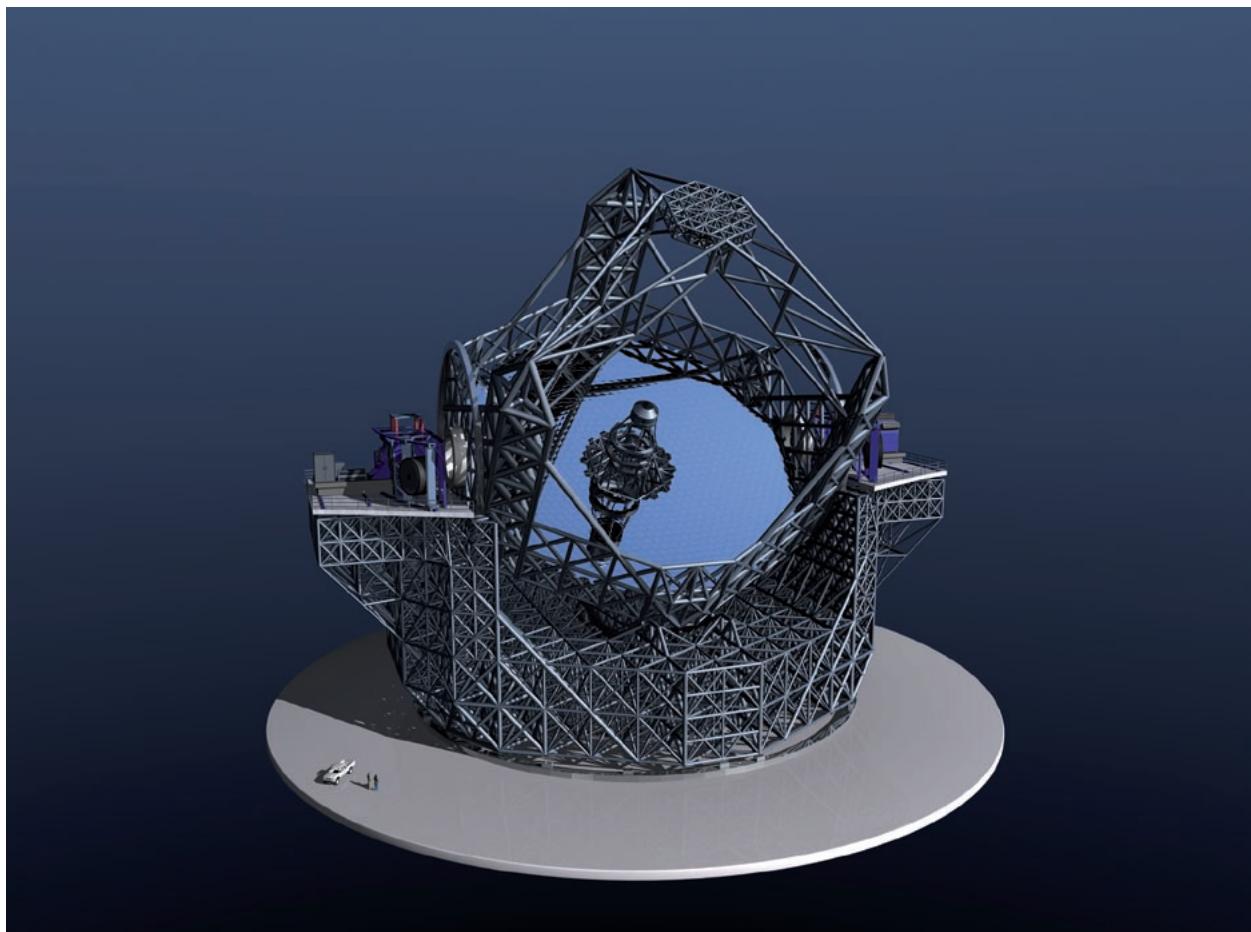
Ende 2005 wurde die Konstruktionsstudie für OWL, ein 100-m-Teleskop, fertig gestellt. Obwohl diese in vielerlei Hinsicht recht erfolgreich war, hielt die Überprüfungskommission ein optisches 100-m-Teleskop für ein innerhalb eines realistischen Finanzierungs- und Zeitrahmens zu ehrgeiziges Projekt. Daraufhin begann die Europäische Südsternwarte ESO im Dezember 2005, die wissenschaftlichen Prioritäten und technischen Fähigkeiten in Europa nochmals zu überprüfen. Insgesamt fünf Arbeitsgruppen für Wissenschaft, Teleskopkonstruktion, adaptive Optik, Instrumentierung und Standortauswahl untersuchten in den ersten vier

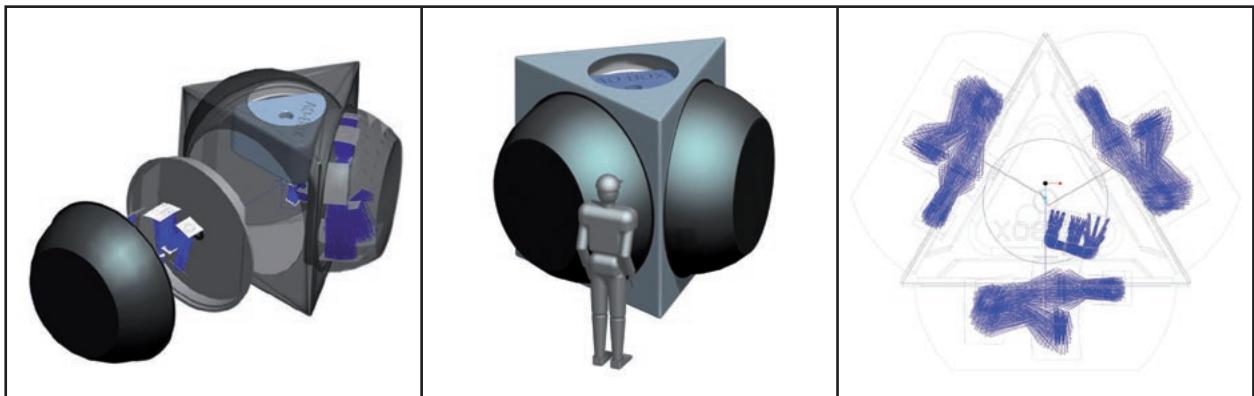
Monaten des Jahres 2006 Optionen für das E-ELT. Das MPIA war in diesen Gremien gut vertreten und stellte Mitglieder und Vorsitzende in drei der fünf Arbeitsgruppen.

ESO schuf im Juni 2006 das »European ELT Project Office«, um das Teleskop so weit voranzutreiben, dass es in die detaillierte Konstruktionsphase eintreten konnte. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse den zukünftigen Beobachtungsbedürfnissen europäischer Astronomen gerecht werden, gründete die ESO auch das »European ELT Science and Engineering« Komitee (ESE). Dieses Gremium, gebildet aus den Leitern der fünf Arbeitsgruppen und zusätzlichen hochqualifizierten Astronomen, wird die Beratung und Aufsicht für das gesamte E-ELT-Projekt übernehmen. Das MPIA ist wesentlich am ESE-Komitee beteiligt: Zwei der zwölf ESE-Komiteemitglieder, darunter der zweite Vorsitzende, sind vom Institut.

Auf der technischen Seite war das MPIA an der MIDIR-Studie beteiligt, in der der optimale Konstruktionsentwurf

Abb. IV.10.1: Vorläufige technische Zeichnung des European ELT. Das derzeitige Konzept ist eine aus fünf Spiegeln bestehende optische Konstruktion mit einem 42 m großen segmentierten Hauptspiegel.





für ein im mittleren Infrarot arbeitendes Kamera/Spektrographen-Instrument für das E-ELT definiert werden sollte. Diese Untersuchung, teilweise vom europäischen FP6-Programm finanziert, führte zu einer Kombination aus Kamera und Spektrograph mit der Möglichkeit, eine integrale Feldeinheit (engl. integral field unit) zu betreiben. Sie würde im Wellenlängenbereich von 3 – 20 μm mit beugungsbegrenzter räumlicher Auflösung und mittlerer bis hoher spektraler Auflösung arbeiten. Da es relativ bescheidene Ansprüche an die vom E-ELT gelieferte Wellenfrontqualität stellt, wäre das MIDIR-Instrument eine ausgezeichnete Wahl für die Instrumentenbesetzung beim ersten Licht.

Zum Abschluss wurde im April 2006 der Tagungsbericht eines vom MPIA organisierten Workshops zur Instrumentierung von ELT veröffentlicht. Die fast 300

Abb. IV.10.2: Explosionsdarstellung (links), Größenvergleich (Mitte) und optischer Konstruktionsentwurf (rechts) des MIDIR-Instruments. Die Linien zeigen die Strahlengänge der Kamera und der drei modularen Spektrographenkanäle, die das zentrale Dreieck umgeben.

Seiten des Berichts geben unsere gemeinsame Meinung wieder, wie die Herausforderung, diese Riesenteleskope mit der bestmöglichen wissenschaftlich produktiven Instrumentierung auszurüsten, angegangen werden sollte.

Wolfgang Brandner, Wolfgang Gäßler,
Roland Gredel, Tom Herbst, Rainer Lenzen

IV.11 HERSCHEL vor dem Start

Im Jahr 2008 wird die Europäische Raumfahrtagentur ESA das Weltraumobservatorium HERSCHEL ins All schicken. Das 3.5-m-Teleskop wird etwa 1.5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt betrieben werden und Beobachtungen im fernen Infrarot- und Submillimeterbereich durchführen. Am MPIA wird für HERSCHEL das Instrument PACS, eine Kamera-Spektrometer-Kombination für den Wellenlängenbereich von 60 bis 210 μm , entwickelt

Eine Rakete – zwei Observatorien

Die beiden bahnbrechenden ESA-Weltraumobservatorien PLANCK und HERSCHEL, die im Herbst 2008 gemeinsam an Bord einer ARIANE-5-Rakete (Abb. IV.11.1) von Französisch Guyana aus ins All geschossen werden sollen, werden beide den fernen Infrarot- und Submillimeterbereich des elektromagnetischen Spektrums untersuchen, der wegen der Atmosphäre von

der Erde aus nicht zugänglich ist. Die beiden Satelliten werden sich kurz nach dem Start trennen und unabhängig voneinander zu verschiedenen Umlaufbahnen um den zweiten Lagrange-Punkt (L2) des Systems Erde-Sonne weiterfliegen.

Während PLANCK Anisotropien in der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung – den Überresten der Strahlung, die unmittelbar nach dem Urknall vor etwa 14 Milliarden Jahren das Universum erfüllte – mit verbesselter Empfindlichkeit und Winkelauflösung kartieren wird, soll der HERSCHEL-Satellit während seiner projektierten 3.5-jährigen Lebenszeit das »kühl Universum« erforschen.

Ein beträchtlicher Teil des Universums besteht aus Gas und Staub, die viel zu kalt sind, um im sichtbaren Licht Strahlung auszusenden. Derartiges kaltes Material ist verknüpft mit den frühesten Entwicklungsstadien von Galaxien, mit neu entstehenden Sternen, mit zirkumstellaren Scheiben, in denen sich Planeten bilden können, und mit den Atmosphären von Kometen, die voller komple-

ker organischer Moleküle sind. Die Kontinuumstrahlung solcher staubverhüllten Objekte hat ihr Maximum in dem von HERSCHEL beobachteten Wellenlängenbereich, und hier senden auch Gase mit Temperaturen zwischen 10 und einigen 100 Kelvin ihre stärksten molekularen und atomaren Emissionslinien aus. Hinzu kommt, dass die optische Extinktion von Staub in solchen Quellen extrem hoch sein kann. Bei Ferninfrarot- und Submillimeterwellenlängen, wo die Emission der kalten Materie am stärksten und die Extinktion praktisch vernachlässigbar ist, lassen sich die ablaufenden physikalischen Prozesse direkt untersuchen.

Um seine wissenschaftlichen Ziele zu erreichen, ist HERSCHEL mit einem 3.5-m-Spiegel ausgestattet und markiert damit den Auftakt zu einer neuen Generation von »Weltraumgiganten«: Mit annähernd 7.5 m Höhe und 4.3 m Breite ist dieses Weltraumteleskop größer als alle seine Vorgänger. Seine wissenschaftliche Nutzlast besteht aus drei Instrumenten: PACS und SPIRE sind sowohl Kameras als auch Spektrometer, die es HERSCHEL ermöglichen werden, Bilder in sechs verschiedenen »Farben« im fernen Infrarot aufzunehmen. HIFI ist ein Spektrometer mit extrem hoher Auflösung.

Frühere Infrarot-Weltraumteleskope hatten weder die Empfindlichkeit und räumliche Auflösung noch die Fähigkeit der drei HERSCHEL-Instrumente, diesen wichtigen Teil des Spektrums umfassend zu erforschen. HERSCHEL wird die Lücke schließen zwischen dem, was mit bodengebundenen Einrichtungen beobachtet werden kann, und den Leistungen früherer Weltraummissionen, wie des von 1995 – 1998 arbeitenden Infrared Space Observatory (ISO) der ESA und SPITZER, der noch laufenden Mission des NASA.

Eine Mission bei extrem tiefen Temperaturen

Um die hohe Empfindlichkeit zu erreichen, die zur Messung der schwachen Wärmesignaturen des »kalten« Teils des Kosmos nötig ist, werden die Detektoren von HERSCHEL bei sehr niedrigen und stabilen Temperaturen hinunter bis wenige Zehntelgrad über dem absoluten Nullpunkt von -273°C betrieben. Die gemeinsame optische Bank, auf der alle drei Instrumente montiert sind, befindet sich in einem großen Kryostaten (Abb. IV.11.2), um die niedrige Temperatur aufrecht erhalten zu können. Rund 2300 Liter flüssiges Helium (bei 1.7 K) werden während der Mission für die Primärkühlung sorgen. Um die niedrigsten Temperaturen zu erreichen, sind einzelne Detektoren mit zusätzlichen speziellen Kühlsystemen ausgestattet.

Der 3.5-m-Spiegel

HERSCHELS 3.5-m-Hauptspiegel – hergestellt mit Hilfe einer neuartigen Siliciumkarbid-Technologie – ist so groß, dass er aus zwölf Einzelspiegeln zusammengesetzt werden musste. Wie in Abb. IV.11.1 zu sehen, passt der Spiegeldurchmesser gerade so in die Spitze der ARIANE-5-Rakete.

Wegen seiner Größe befindet sich der Spiegel außerhalb des Kryostaten von HERSCHEL. Geschützt durch einen feststehenden Sonnenschirm kühlt sich das Teleskop durch Abstrahlung auf eine Betriebstemperatur von etwa -193°C ab. Selbst unter diesen frostigen Bedingungen ist die vom Teleskop ausgehende thermische Hintergrundstrahlung noch hoch verglichen mit der Helligkeit der beobachteten astronomischen Objekte. Um deren schwache Signale zu erkennen, müssen ausgeklügelte Beobachtungsmethoden angewandt werden.



Abb. IV.11.1: Die Spitze der ARIANE-5-Rakete mit den Observatorien HERSCHEL (oben) und PLANCK (darunter). Wichtige Teile der beiden Raumfahrzeuge sind identisch, was die Entwicklungskosten stark reduziert.



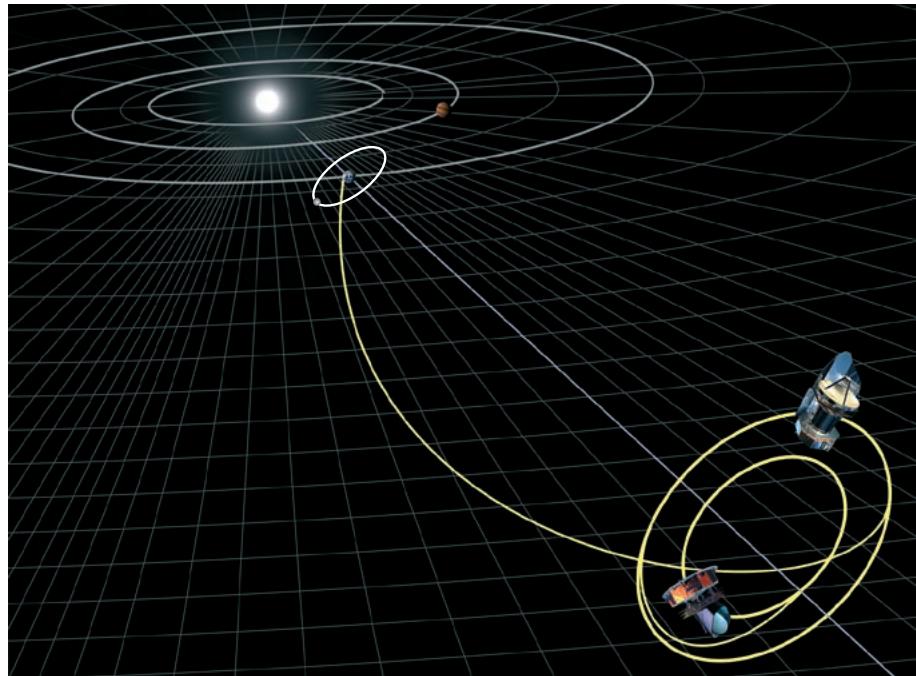
Abb. IV.11.2: HERSCHEL ist 7.5 m hoch und hat einen Querschnitt von $4\text{ m} \times 4\text{ m}$. Das Startgewicht beträgt 3.3 t. Das Nutzlastmodul besteht aus dem Teleskop und dem Kryostaten. Innerhalb des Kryostaten befindet sich die optische Bank mit den Instrumententeilen, die gekühlt werden müssen. Ein Sonnenschirm schützt das Teleskop und den Kryostaten vor Erwärmung durch die Sonne und verhindert, dass Streulicht von der Erde in das Teleskop eindringt; außerdem sind auf ihm Solarzellen angebracht, die den vom Raumfahrzeug benötigten Strom erzeugen.

Standort: L2

Um die nötige kalte und stabile Umgebung zu bieten, wird HERSCHEL im zweiten Lagrange-Punkt (gemeinhin als L2 bekannt) stationiert. Dort, in 1.5 Millionen km Abstand von der Erde auf der Verlängerung der Linie Sonne-Erde, »spürt« der Satellit die gemeinsame Anziehungskraft von Sonne und Erde und umkreist trotz seines größeren Sonnenabstands die Sonne mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit wie die Erde (Abb. IV.11.3). Infolgedessen befinden sich Sonne, Erde und Mond als starke Quellen von Streulicht sowie thermischer Modulation stets in derselben Himmelsregion, was ihre negativen Auswirkungen auf das Observatorium stark reduziert. Daher werden wir HERSCHEL während der gesamten Mission von der Erde aus stets in antisolarer Richtung sehen. Dies ermöglicht stabile Funkverbindungen zur Erde und eine ununterbrochene Beobachtungszeit.

Obwohl L2 eine Lösung des himmelsmechanischen Dreikörperproblems ist, wird man HERSCHEL nicht genau an diesem Punkt stationieren. Mindestens drei Gründe sprechen dagegen: 1. L2 ist ein metastabiler Punkt, d.h. kleinste Störungen treiben einen Satelliten von dort fort (vergleichbar mit einem »stabil« auf der Fingerkuppe aufgestellten Bleistift); 2. Für eine Stationierung direkt in L2 müssten Bremsmanöver durchgeführt werden; 3. Der Satellit würde durch die dazwischenstehen-

Abb. IV.11.3: HERSCHEL und PLANCK werden L2 in etwa 1.5 Millionen Kilometer Abstand von der Erde auf ausgedehnten Lissajous'schen Bahnen umkreisen. Der Standort jenseits der Mondbahn in antisolarer Richtung bietet stabile thermische Bedingungen und ermöglicht eine ununterbrochene Funkverbindung.



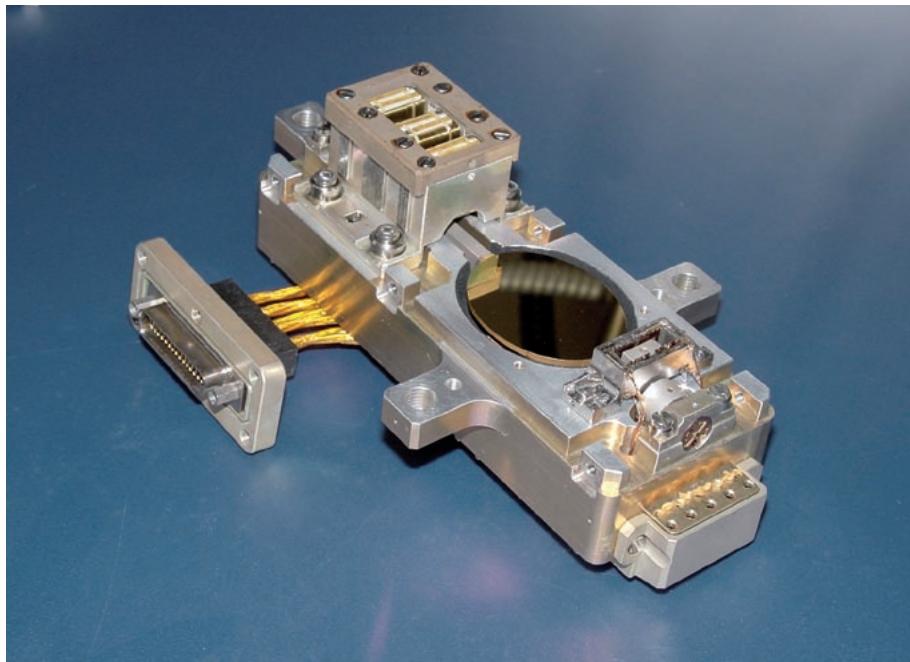


Abb. IV.11.4: Das Reserveflugmodell des PACS-Fokalebenen-Choppers. Der vergoldete Spiegel hat einen größten Durchmesser von 32 mm. Links ist eine der Aufhängungen in einem CuBe-Kreuzfedergelenk zu erkennen, rechts die drei Spulenkörper für die $10\frac{1}{4}\mu\text{m}$ dicken hochreinen Al-Drähte. Im Instrument ist der Chopper in einem infrarot-schwarzen Gehäuse mit Streulichtblenden untergebracht, die für die Aufnahme dieser Abbildung entfernt wurden.

de Erde Sonnenfinsternisse erleiden, wodurch seine Energieversorgung gestört würde.

Daher wählt man in der Praxis schleifenförmige Lissajous'sche Bahnen um L2. Je größer der Durchmesser der Schleifen, desto einfacher sind die Bahnmanöver beim Anflug und spätere Bahnkorrekturen. Eine Obergrenze ist jedoch durch die Streulichtanforderungen gegeben, welche die von der Erde aus gesehene Abweichung von L2 auf rund 30° begrenzen. HERSCHEL wird auf einer großen »Halo«-Umlaufbahn um L2 mit einer Amplitude von etwa 700 000 km und einer Periode von rund 178 Tagen platziert. Die von der Erde aus gesehene Abweichung von L2 wird bis zu 30° betragen.

PACS – Kamera und Spektrometer

Mit Hilfe von PACS (Photonconducting Array Camera and Spectrometer) ist HERSCHEL in der Lage, Infrarotaufnahmen und -spektroskopie im Bereich von 60 bis 210 Mikrometern Wellenlänge durchzuführen. Das Instrument verwendet vier Detektorfelder: zwei Bolometerfelder und zwei Ge:Ga-Photohalbleiterfelder. Die Bolometerfelder dienen zur Photometrie, während die Photohalbleiterfelder allein für die Spektroskopie verwendet werden. PACS kann entweder als abbildendes

Photometer oder als Integralfeld-Linienspektrometer betrieben werden. Das PACS-Instrument wird gemeinsam von elf europäischen Instituten unter der Leitung des MPE Garching entwickelt, wobei das MPIA das größte beteiligte Co-Investigator-Institut ist.

Ein Chopper für PACS

Um das schwache Signal einer kosmischen Quelle vor dem starken thermischen Hintergrundsignal des warmen HERSCHEL-Teleskops präzise messen zu können, verwendet PACS einen Fokalebenen-Chopper. Dieses Gerät (Abb. IV.11.4) ist ein 32 mm großer »Wackelspiegel«, der mit einer Rechteck-Modulation mit Frequenzen bis zu 10 Hz zwei benachbarte Himmelsfelder vergleicht, von denen das eine die zu beobachtende Quelle enthält. Durch Subtraktion der Hintergrundstrahlung, die in beiden Feldern als identischen angenommen wird, kann die Helligkeit der kosmischen Quelle bestimmt werden.

Der Chopper ist einer der wichtigsten Beiträge des MPIA zu PACS. Nach einer erfolgreichen Prototypenphase am Institut wurde die Firma CARL ZEISS, Oberkochen, als industrieller Auftragnehmer für den Bau der Flugmodelle des Choppers ausgewählt. Mit Lieferung der zweiten Flugeinheit am 25. April 2006 endete der Vertrag zwischen MPIA und ZEISS erfolgreich.

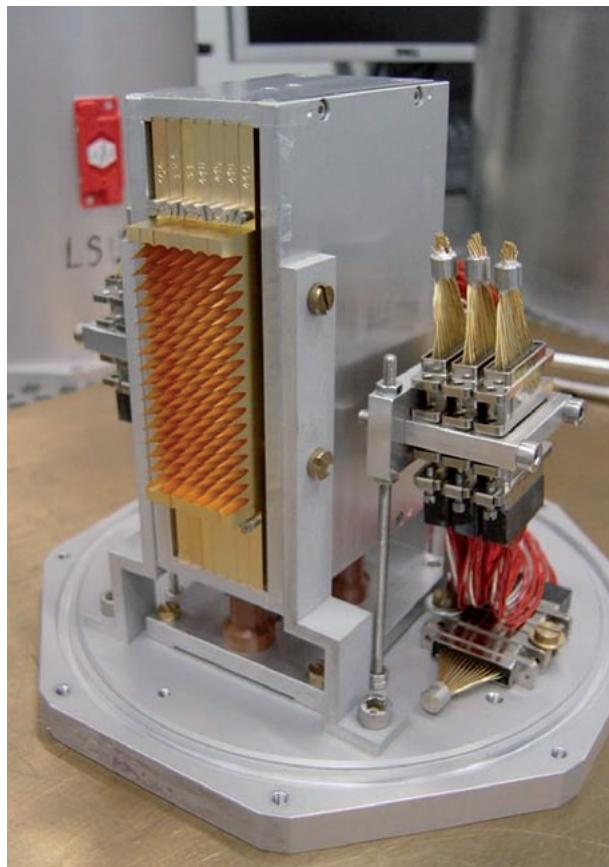
Um den Chopper gründlich zu testen, mussten mehrere Modelle hergestellt werden: Ein Lebensdauer-Modell überstand erfolgreich 650 Millionen Chopperbewegungen bei einer Betriebstemperatur von -270°C ; andere Modelle mussten starke Vibrationsbelastungen bis zum 30-fachen der Erdbeschleunigung aushalten, die einen ARIANE-5-Start simulierten, oder mussten sieben Kalt-Warm-Zyklen ($-270^\circ\text{C} \rightarrow +300^\circ\text{C} \rightarrow -270^\circ\text{C}$) überstehen.

Bereits das im Sommer 2005 ans MPE gelieferte Flugmodell erfüllte all die anspruchsvollen technischen Anforderungen, aber das letzte Reserveflugmodell zeigte sogar ein noch besseres Betriebsverhalten. Die elektrische Verlustleistung konnte auf ein Tausendstel Watt reduziert werden, was den Vorrat an flüssigem Helium an Bord von HERSCHEL schont und somit dessen Lebensdauer verlängert. Daher beschloss man, dieses Modell in die Flugeinheit des PACS-Instruments einzubauen.

Reserveflugmodelle werden gebaut, um Flugmodelle im Falle von Beschädigungen oder anderen Problemen zu ersetzen. Das verringert Startverzögerungen und die damit verbundenen enormen Kosten. Leider trat ein solches Ereignis beim PACS-Chopper tatsächlich ein: Am 31. Oktober 2006 brach während des ersten Kalttests im Rahmen der letzten Boden-Kalibrierungskampagne des PACS-Instruments eines der Kreuzfedergelenke, an denen der Chopper-Spiegel entlang seiner Rotationsachse aufgehängt ist.

In einer genauen Untersuchung konnte der Grund für diesen verhängnisvollen Unfall festgestellt werden: Der Chopper war durch zu hohe Antriebströme in der Instrumentenelektronik und ihrem Software-Regelkreis

Abb. IV.11.5: Sieben Detektorzeilen mit je 16 Pixeln einer Kamera für die PACS-Spektrometereinheit. Erkennbar sind die Lichttrichter vor den Ge:Ga-Pixeln.



(für die nicht das MPIA verantwortlich war) hochgradig überlastet worden, was zur mechanischen Zerstörung des Choppers führte. Finite-Elemente-Berechnungen bestätigten, dass der beobachtete Bruch einer Lamelle des Kreuzfedergelenks genau an der Stelle auftrat, an der ihn diese elektromechanische Überlastung vorhersagt.

Inzwischen wurde das Originalflugmodell des Choppers in PACS eingebaut. Mit Unterstützung des MPIA wurden zudem Vorkehrungen getroffen, um Beschädigungen am einzigen noch verbliebenen Modell zu vermeiden.

Die Ge:Ga-Detektoren

Das MPIA ist auch verantwortlich für die Charakterisierung der schwach gedrückten Gallium-dotierten Germanium (Ge:Ga)-Detektoren für das ferne Infrarot, die in den Integralfeld-Spektrometern des PACS-Instruments verwendet werden (Abb. IV.11.5). Die Testeinrichtung ermöglicht die Simulation des Betriebszustands der Arrays während des Flugs und liefert genaue IR-Flüsse mit Hilfe externer/interner Schwarzkörper und kalibrierter kalter Dämpfungsfilter. Im Jahr 2006 wurde die vollständige Charakterisierung der 16×25 Pixel großen Ge:Ga-Kameras für das Flug- und das Reserveflugmodell durchgeführt.

Im Idealfall erzeugen die Photodetektoren einen Strom, der proportional zum einfallenden Infrarotfluss ist. Die kontinuierliche Strahlungsumgebung am L2-Orbit erzeugt jedoch zusätzliche Ladungsträger in den Ge:Ga-Kristallen, die Veränderungen in den Eigenschaften der Detektoren und der Ausleseelektronik hervorrufen, welche die Leistung der Detektoren beträchtlich beeinflussen.

Bei den Ge:Ga-Detektoren früherer Raumfahrtmissionen zur Erforschung des Himmels im fernen Infrarot, wie z.B. IRAS (1983), ISO (1995 – 1998) und SPITZER (seit 2003 im Weltraum), war ein wichtiger Punkt die Verfolgung der Empfindlichkeitsdrifts, um eine genaue Kalibration aufrechtzuerhalten. Bei PACS besteht das Ziel darin, die optimalen Parameter für den Betrieb auf der L2-Bahn, das beste Ausheil- und das beste Kalibrationsverfahren zu bestimmen, um eine hohe absolute photometrische Genauigkeit im fernen Infrarot zu erzielen ($\sim 1\%$).

Um die entsprechenden Effekte (die strahlungsinduzierten Änderungen der Empfindlichkeit und des Rauschens sowie das Übergangsverhalten) am Boden untersuchen zu können, wird mittels einer ^{137}Cs -Gammastrahlenquelle simuliert, welchen Einfluss die stetige kosmische Strahlenbelastung in L2 auf die Photohalbleiter-Arrays hat. Messungen ohne Strahlenbelastung sind in hohem Grade reproduzierbar. Die experimentelle Simulation der Strahlungsumgebung mittels einer ^{137}Cs Quelle ist eine Erfolg versprechende Methode, um die Auswirkungen der in L2 erwarteten ionisierenden Strahlung zu untersuchen.

Zusätzlich wurden detaillierte Simulationen des Aufschlags galaktischer kosmischer Strahlen auf PACS durchgeführt, indem geometrische Modellrechnungen der Photohalbleiter durchgeführt und ein GEANT4-Code angewandt wurde. Ergänzend zu langfristigen Gammabestrahlungstests wurden auch Protonentests durchgeführt, die den erwarteten Protonenfluss auf HERSCHELS L2-Bahn simulieren, einschließlich Sonnen-eruptionen.

Instrumenten-Kontrollzentrum

Nachdem sich die Arbeiten für das eigentliche Instrument am MPIA dem Ende zuneigen, gehen auch Entwicklung und Tests des Bodenobservatoriums in die Endphase. Wissenschaftler aus Heidelberg waren intensiv an den Kalttests des PACS-Flugmodells am MPE in Garching beteiligt. Hierfür wurden Testverfahren entworfen und eine umfassende Datenanalyse durchgeführt. Naturgemäß lagen dabei die Schwerpunkte der Heidelberger Beiträge bei Detektoren, Chopper und Kalibration.

Darüber hinaus ist das MPIA an der Erstellung der wissenschaftlichen Beobachtungsschablonen für zukünf-

tige Nutzer des HERSCHEL-Observatoriums beteiligt. Außerdem hat es eine führende Rolle bei der Entwicklung der interaktiven Datenanalyse für PACS übernommen.

Zwei Drittel der HERSCHEL-Beobachtungszeit werden der wissenschaftlichen Gemeinde in aller Welt zur Verfügung stehen. Die restliche Zeit ist für die Wissenschafts- und Instrumententeams reserviert. Für ihre Beiträge zur Entwicklung des PACS-Instruments erhalten Wissenschaftler des MPIA 290 Stunden garantierte Beobachtungszeit mit HERSCHEL. Der Großteil davon wird für zwei große Schlüsselprojekte hoher Priorität genutzt werden: 1. Quasare bei hohen Rotverschiebungen, und 2. Frühstadien der Sternentstehung. Weitere Garantiezeitanteile des MPIA gehen in die Beteiligung an anderen Schlüsselprojekten wie z.B. leuchtkräftige Galaxien, Supernovae und protoplanetare Scheiben.

*Oliver Krause, Dietrich Lemke,
Stephan Birkmann, Helmut Dannerbauer,
Ulrich Grözinger, Thomas Henning,
Ralph Hofferbert, Ulrich Klaas,
Jürgen Schreiber, Jutta Stegmaier,
Manfred Stickel, Markus Nielbock, Jeroen Bouwman*

IV.12 Instrumente für das JWST

Im Jahr 2013 soll das James-Webb-Weltraumteleskop (JWST) im warmen Zustand gestartet und dann 5 bis 10 Jahre lang betrieben werden. Das JWST, Nachfolger des Weltraumteleskops Hubble, ist mit vier wissenschaftlichen Instrumenten ausgerüstet. Das MPIA ist verantwortlich für die Entwicklung der beiden Gitterräder und des Filterrads für das im mittleren Infrarot arbeitende MIRI-Instrument. Zudem ist das Institut an der Entwicklung der Mechanismen für die optischen Räder des Nahinfrarot-Spektrographen NIRSPEC beteiligt.

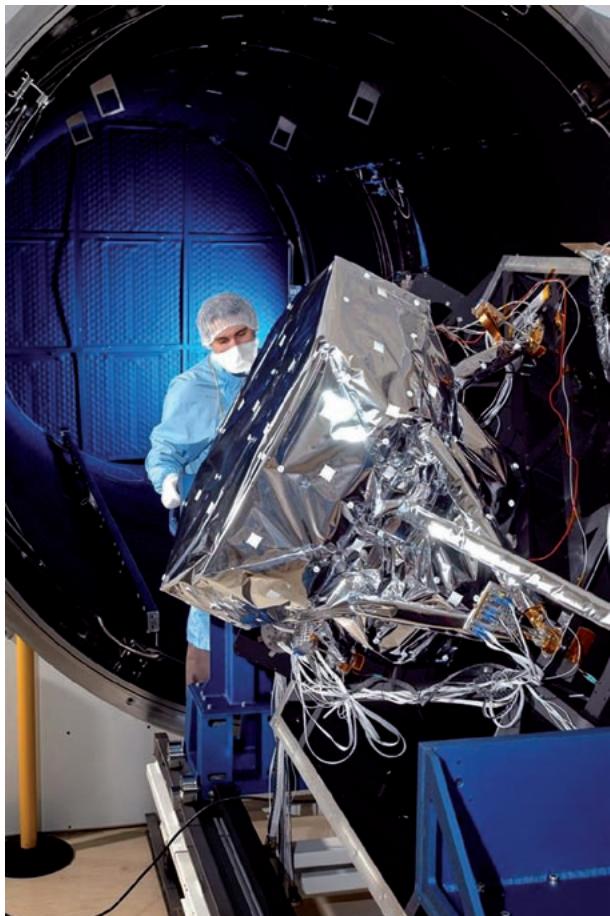
Mehr als tausend Menschen arbeiten derzeit an der Flaggschiff-Mission JWST, dem wichtigsten Weltraumobservatorium für das nächste Jahrzehnt, das gemeinsam von der US-Amerikanischen, der Europäischen und der Kanadischen Weltraumagentur (NASA, ESA und CSA) entwickelt wird.

Die vier wichtigsten wissenschaftlichen Themen der JWST-Mission sind: das Ende des »Dunklen Zeitalters« (das erste Licht und die Re-Ionisation des Universums), die Entstehung von Galaxien, die Geburt von Sternen und protoplanetaren Systemen, und schließlich Planetensysteme sowie der Ursprung des Lebens. Diese Untersuchungen im hochrotverschobenen, staubverhüllten, kühlen Universum werden im infraroten Spektralbereich durchgeführt.

Der 6.5-m-Hauptspiegel des JWST ermöglicht es, im Infraroten Bilder aufzunehmen, die genauso scharf sind wie die vom kleineren Hubble-Spiegel im Optischen aufgenommenen. Um die empfindlichen Kameras nicht durch seine eigene Wärmestrahlung zu blenden, wird der Hauptspiegel durch Abstrahlung auf -230°C abgekühlt. Diese passive Kühlung ist am Lagrange-Punkt L2 in 1.5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde in antisolarer Richtung möglich. Die NASA ist für den JWST-Satelliten verantwortlich, der an Bord einer europäischen ARIANE-5-Rakete gestartet wird.

Das JWST ist mit vier wissenschaftlichen Instrumenten ausgerüstet. Die Kamera für das nahe Infrarot (NIRCAM) überdeckt den Wellenlängenbereich von 0.6 bis 5 μm . Die Kamera kann 4.4×2.2 Quadratbogenminuten große Felder in mehreren Breit- und Schmalbandfiltern abbilden und als Koronograph verwendet werden. Gleichzeitig dient sie als Wellenfrontsensor für das Observatorium, indem sie die Ausrichtung der 18 Spiegelteile des 6.5-m-Hauptspiegels misst.

Während NIRCAM von den USA finanziert und gebaut wird, wird der im nahen Infrarot arbeitende Spektrograph NIRSPEC von der ESA entwickelt und von ASTRUM, Deutschland, gebaut. NIRSPEC erlaubt Multiobjektspektroskopie von mehr als 100 Objekten innerhalb seines 3×3 Quadratbogenminuten großen Felds.



MIRI, eine Kamera mit Koronograph und Spektrometer für das mittlere Infrarot (5–28 μm), wird von einem Konsortium aus 21 europäischen Instituten gebaut, wobei die NASA Detektoren und das Kühlaggregat beisteuert.

Das vierte Instrument, die Sternsensorkamera (Fine Guidance Sensor, FGS), wird von der Kanadischen Weltraumagentur geliefert. Die FGS enthält eine eigene Leiteinrichtung und eine Kamera mit durchstimmmbaren Filtern, die Schmalbandaufnahmen im Wellenlängenbereich von 1.6 bis 4.9 μm ermöglicht.

Allen Fokalebeneninstrumenten gemeinsam ist, dass sie in einem Kryovakuum betrieben werden müssen. Für NIRCAM und NIRSPEC reicht eine Temperatur von -240°C aus. MIRI dagegen muss auf unter -260°C abgekühlt werden, damit seine eigene Wärmestrahlung nicht die kosmische Infrarotstrahlung überstrahlt.

Eine weitere Gemeinsamkeit der Instrumente ist, dass sie alle große optische Wechselräder haben, auf denen zahlreiche Gitter, Filter, Strahlteiler, Spiegel, Prismen und Koronographenmasken angeordnet sind. Obwohl jeder Weltraumtechniker Mechanismen wie diese Räder zu vermeiden sucht (»...können ausfallen...«), sind für leistungsfähige wissenschaftliche Instrumente bewegte Teile unabdinglich.

Aufgrund früherer erfolgreicher Entwicklungen dergleichen Mechanismen für die europäischen Weltraum-

Abb. IV.12.1: Thermisches Strukturmodell (STM) des MIRI-Instruments. Dieses Modell lieferte schon recht früh den mechanischen Qualitätsnachweis der Instrumentenstruktur und wird zur Charakterisierung des Schwerkrafeinflusses und der Wiederholgenauigkeit der Ausrichtung der optischen Elemente beim Übergang von warm nach kalt (77 K) sowie zur Überprüfung des thermischen Instrumentenmodells verwendet. Das STM wird später mit zusätzlichen Spiegeln neu ausgestattet und an die NASA geliefert, wo es bei Tests des integrierten wissenschaftlichen Instrumentenmoduls verwendet werden wird. (MIRI-Konsortium)

teleskope ISO und HERSCHEL war unser Institut für diese risikoreichen Herausforderungen gut vorbereitet, sodass das MPIA seit 2002 an der Entwicklung von Radmechanismen für MIRI und NIRSPEC beteiligt ist.

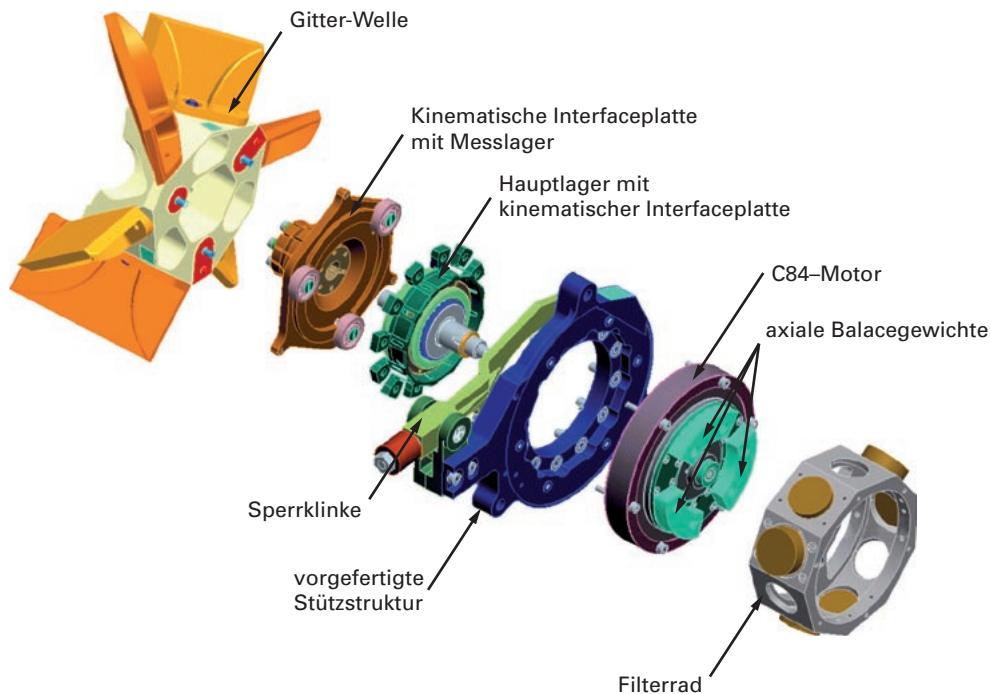
Alle Mechanismen beruhen auf einem Sperrklinkenprinzip (siehe Abb. IV.12.2), das erstmals bei ISO verwendet wurde: Auf dem äußeren Rand des Rads werden kleine Kugellager angebracht, und zwar so viele, wie es der Zahl der optischen Elemente entspricht. Ein keilförmiges Element an einem beweglichen Hebel rastet zwischen zwei Kugellagern ein und legt so die Position des Rads mit einer Wiederholgenauigkeit von etwa einer Bogensekunde fest.

Der zentrale Motor ist ein »Direktantrieb« (Torquemotor) ohne Getriebe. Die genaue Positionierung erfolgt stromlos mechanisch durch die Federkraft der Raste. Bei diesem Antriebsprinzip sind weder Rückkopplung von einer elektrischen Positionsanzeige noch Halteströme erforderlich, da stets zuverlässig mechanisch positioniert wird.

Innerhalb des europäischen MIRI-Konsortiums ist das MPIA für die Entwicklung der beiden Gitterräder und des Filterrads zuständig. Nach einem Ausschreibungsverfahren im Jahr 2005 hat das MPIA das Angebot der Firma ZEISS zum Bau der Qualifikations- und Flugmodelle ausgewählt.

Grundlage für die Zusammenarbeit mit ZEISS war die am MPIA gewonnene Erfahrung bei der Entwicklung und Überprüfung von Prototypen der Mechanismen. An diesen Entwicklungsmodellen wurden umfassende Kalttests durchgeführt, die zu deutlichen Verbesserungen wie zum Beispiel einer neuen Sperrklinkengeometrie und einer verlässlicheren Positionsanzeige führten. Das kritische zentrale Kugellager überstand erfolgreich einen Lebensdauertest mit mehr als 25 000 vollen Umdrehungen bei einer Temperatur von -265°C .

Diese Entwicklungsmodelle werden auch in ein Verifikationsmodell (VM) des MIRI-Instruments eingebaut. Mit Hilfe des VM werden entscheidende Aspekte des Betriebsverhaltens der Instrumente sowie der Integration und Ausrichtung so frühzeitig überprüft, dass im Falle auftauchender Probleme, die umfangreiche Modifikationen des Flugmodells erfordern, größere Kosten und Planungsprobleme vermieden werden. Das VM enthält die für den Flug vorgesehene optische



Konstruktion (wobei jedoch nicht alle optischen Kanäle voll besetzt sind), den DM-Mechanismus sowie ein komplettes Fokalebenensystem mit Detektoren, wie sie beim Flug verwendet werden, und Software.

Nach einer »Überprüfung der Testbereitschaft« (TRR), die unter Beteiligung des MIRI-Konsortiums, der ESA, des DLR und ZEISS im August 2006 am MPIA stattfand, wurden die beiden VM-Gitterradmechanismen und die Filterradmechanismen im Oktober und Dezember vollständig getestet und an die Konsortiumspartner ATC in Edinburgh und CEA in Saclay geliefert.

Im Berichtsjahr bestanden die MIRI-Radmechanismen erfolgreiche eine Reihe kritischer Konstruktionsüberprüfungen (CDR). Einige hundert technische Problempunkte, die sich bei den Überprüfungen ergeben hatten, wurden gelöst und führten zu einem aktualisierten Konstruktionsentwurf der Flug- und Qualifikationsmodelle. Dieser Entwurf wurde beim CDR des optischen Systems von MIRI am 6. und 7. Dezember vorgestellt.

Das MPIA ist auch an der Entwicklung der Gitter- und Filterräder für NIRSPEC beteiligt. Obwohl das Institut auch bei diesem Projekt mit ZEISS zusammenarbeitet, sind die Rollen hier vertauscht: Das MPIA fungiert als Unterauftragnehmer. In dem von ZEISS geführten Konsortium ist das Institut für die Entwicklung der elektrischen Komponenten (Motoren, Positionsanzeigen, Kabelbaum) verantwortlich. Im Berichtsjahr bestanden die Mechanismen erfolgreich die vorläufige Konstruktionsüberprüfung der Untersysteme.

Abb. IV.12.2: Mechanismus der Gitter- und Strahlteilerräder für das Mid-Infrared Instrument (MIRI). Zwei derartige Mechanismen sind im Spektrometerteil von MIRI eingebaut. Das Rad wird durch einen zentralen Torquemotor bewegt und mit einer in einen äußeren Kugellagerkranz einrastenden Sperrlinke positioniert. Der Mechanismus hat einen Durchmesser von 14 cm und eine Gesamtmasse von 1.6 kg (Radmasse 1 kg).

Fortschritte wurden bei der Entwicklung eines zweidimensionalen Neigungs- und Positionsanzeigenesystems für das Gitterrad erzielt, das in der Lage ist, die Gitterorientierung mit einer Auflösung von 0.3 Bogensekunden zu messen. Ein Labormodellsystem bestehend aus bewegten Permanentmagneten und feststehenden magneto-resistiven Elementen wurde eingebaut und erfolgreich im Kryovakuum getestet.

*Oliver Krause, Thomas Henning,
Dietrich Lemke, Ulrich Grözinger,
Ralf Hofferbert, Armin Huber,
Sven Kuhlmann, Armin Böhm,
Monica Ebert, Bernhard Grimm, Stefan Meister,
José B. Ramos, Ralf-Rainer Rohloff,
Alexandra Bohm, Hannelore Heißler,
Friedrich Müller, Silvia Scheithauer,
Christian Schwab, Thomas Blümchen*

IV.13 GAIA – Die galaktische Durchmusterungsmission

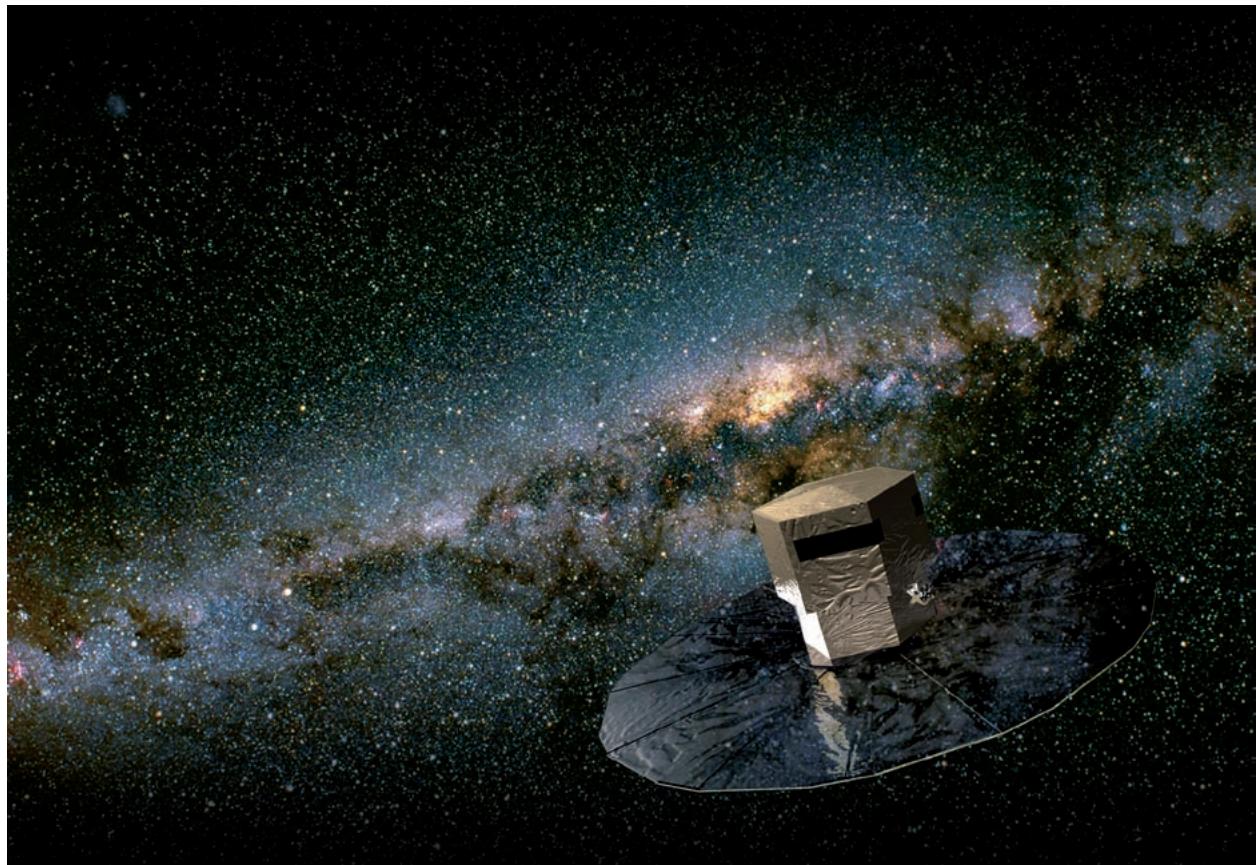
GAIA ist eine den ganzen Himmel umfassende, bis zur Helligkeit $G = 20$ mag ($V = 20$ mag bis 22 mag) vollständige astrometrische und photometrische Durchmusterung, die rund 10^9 Sterne, eine halbe Million Quasare und einige Millionen Galaxien erfassen wird. GAIA wird bei $G = 15$ mag eine astrometrische Genauigkeit von 12–25 Mikrobogensekunden (und damit eine Entfernungsgenauigkeit von 1–2 % bei 1 kpc) und bei $G = 20$ eine Genauigkeit von 100–300 Mikrobogensekunden erreichen. Diese Zahlen entsprechen auch etwa der Genauigkeit für die Eigenbewegungen (Tangentialgeschwindigkeiten) in Mikrobogensekunden pro Jahr.

Die Astrometrie liefert fünf Dimensionen des sechsdimensionalen Phasenraums (drei räumliche und zwei Geschwindigkeitskoordinaten). Die sechste Komponente liefert der an Bord befindliche Radialgeschwindigkeits-Spektrograph. Dieser sammelt Spektren mit einer Auflösung von 11500 bei Wellenlängen um das Ca-II-Triplett, was eine Geschwindigkeitsgenauigkeit von 1–15 km/s für alle Sterne heller als etwa $V = 17$ mag ergibt. Astrometrie und Photometrie werden in einem breiten (»Weißlicht«) Spektralband (G) durchgeführt. Um die durchmustersten Quellen zu charakterisieren, wird jede mittels Prismenspektrophotometrie

mit niedriger Dispersion, die zwischen 3 und 30 nm/Pixel liegt, über den Wellenlängenbereich 330–1000 nm beobachtet. Neben der Möglichkeit einer groben Klassifikation werden es uns diese Daten auch erlauben, astrophysikalische Parameter für Sterne abzuschätzen, wie Effektivtemperatur, Oberflächengravitation, Metallgehalt, Häufigkeit an Alpha-Elementen sowie die Extinktion entlang der Sichtlinie zu individuellen Sternen.

Die eindrucksvolle astrometrische Genauigkeit von GAIA lässt sich besser in Zusammenhang mit einem Modell der Galaxis veranschaulichen. Dieses zeigt, dass GAIA für 11 Millionen Sterne Entferungen mit einer Genauigkeit von 1 % oder besser liefern wird. Zum Vergleich dazu hat HIPPARCOS eine Parallaxe dieser Genauigkeit nur für weniger als 200 Sterne messen können, die alle innerhalb 30 Lichtjahren Entfernung

Abb. IV.13.1: Nach ihrem Start Ende des Jahres 2011 wird GAIA die größte und genaueste bisher unternommene astrometrische Durchmusterung unserer Galaxis durchführen. Es sollen mehr als eine Milliarde Sterne mit einer Genauigkeit von bis zu 10 Mikrobogensekunden vermessen sowie mit hoher wie gringer Auflösung im Optischen und im Infraroten spektroskopiert werden. Eine vom DLR finanzierte Gruppe am MPIA leitet das GAIA Data Processing and Analysis Consortium (DPAC) zur physikalischen Charakterisierung der von GAIA beobachteten Sterne, Galaxien, Quasare und Asteroiden.



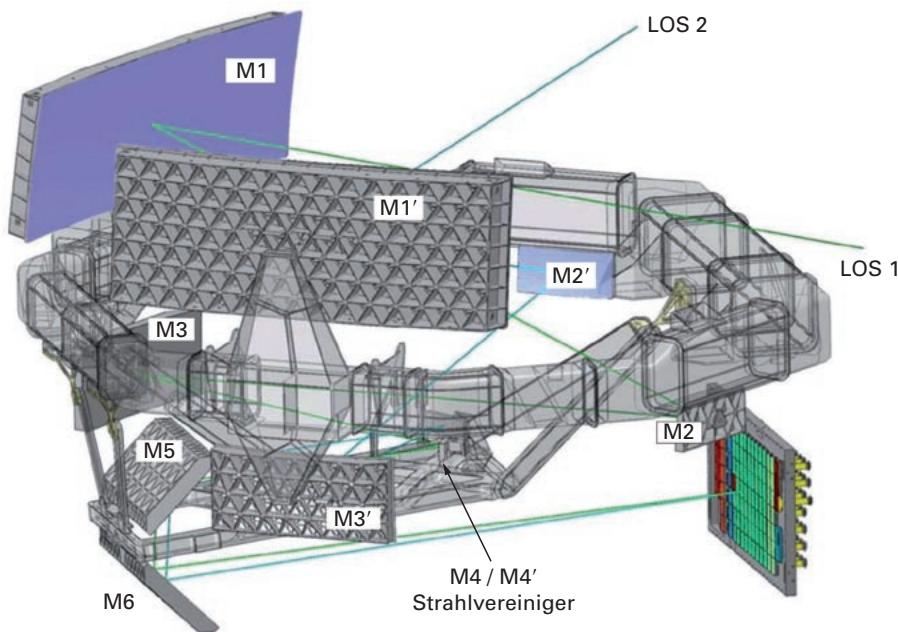


Abb. IV.13.2: GAIA's Teleskop. Um ein starres und genaues astrometrisches Bezugssystem aufzubauen, beobachtet GAIA simultan in zwei Richtungen über die Primärspiegel M1 und M1'. Die Strahlengänge werden in M4/M4' zusammengeführt

und in einer gemeinsamen Fokalebene überlagert. Um höchste Genauigkeit zu erreichen, muss die Struktur extrem stabil sein; thermische und mechanische Störungen müssen weitestgehend unterdrückt werden. (Graphik: EADS Astrium)

zu uns liegen. Für einige 100 000 Sterne wird die Entfernungsgenauigkeit besser als 0.1 % und für etwa 150 Millionen besser als 10 % sein. GAIA geht weit über das hinaus, was wir derzeit an Genauigkeit und Statistik zur Verfügung haben. Entfernungsbestimmungen sind von größter Wichtigkeit für fast jeden Aspekt der Astrophysik, da sie zur Bestimmung der wahren Leuchtkräfte (statt scheinbarer Helligkeiten) und zur Umwandlung von Winkelskalen und -geschwindigkeiten in physikalische Größen dienen. Darüber hinaus ist Astrometrie der einzige Weg, Entfernungen zu erhalten, ohne Annahmen über die Quelle machen zu müssen. GAIA wird es uns ermöglichen, für einige hundert Millionen Sterne in der Galaxis eine Karte des sechsdimensionalen Phasenraums zu erstellen. Zusammen mit Messungen der physikalischen Eigenschaften aller Quellen wird uns dies erlauben, eine breite Palette astronomischer Fragen zu behandeln, darunter die Verteilung der dunklen Materie, die kosmische Entfernungsleiter, Sternaufbau und Sternentwicklung, die stellare Masse-Leuchtkraftbeziehung, erdnaher Objekte, Exoplanetensysteme und Allgemeine Relativitätstheorie.

GAIA ist eine voll finanzierte ESA-Mission und soll Ende 2011 gestartet werden. Bei einer nominellen Missionsdauer von fünf Jahren plus den drei Jahren, die für die Bearbeitung nach der Mission vorgesehen sind, wird der endgültige Katalog etwa 2020 zur Verfügung stehen. GAIA ist die einzige in Vorbereitung befindliche groß angelegte Präzisionsastrometrie-Mission.

ESA ist verantwortlich für den Bau, Start und Betrieb des Satelliten und seiner Instrumente. Im Gegensatz

zu anderen Missionen, wie zum Beispiel PLANCK, HERSCHEL und MARS EXPRESS, gibt es bei GAIA keine »PI-Instrumente«, d.h. Instrumente, für die jeweils verschiedene Wissenschaftler die Hauptverantwortung tragen. Das liegt daran, dass die »Instrumente« nicht auf die übliche Weise vom »Teleskop« getrennt werden können, wie z. B. beim JWST. Stattdessen muss die wissenschaftliche Nutzlast als ein einziges integriertes Ganzes auf höchstem Genauigkeits- und Stabilitätsniveau gebaut werden. Die Hauptaufgabe der wissenschaftlichen Gemeinde ist die Auswertung der Daten.

GAIA ist ein sich selbst kalibrierendes Instrument, d.h. dass eine exakte astrometrische Kalibration aus den wissenschaftlichen Daten selbst gewonnen wird, und zwar über eine gewaltige globale iterative Lösung einiger hundert Millionen simultaner Gleichungen. Die exakte Astrometrie muss an ein festes, präzises Bezugssystem angebunden sein, das auf Mikrobogensekunden-Niveau stabil ist. Um dies zu erreichen, beobachtet GAIA ständig den Himmel in Quasi-Großkreisen. Die etwa 80 Messungen jedes einzelnen Objekts werden dann in den Rohdaten über Zeit und Position vermischt. Die Rohdaten werden sich insgesamt auf 100 Terabyte (10^{14} Byte) belaufen. Durch die Verarbeitung erhöht sich diese Zahl zu Beginn auf rund 1 Petabyte (10^{15} Byte).

Dies ist einer der Gründe, warum die Datenverarbeitung bei GAIA beträchtlich komplexer ist als bei anderen Missionen oder astronomischen Durchmusterungen. Sie umfasst über die globale astrometrische

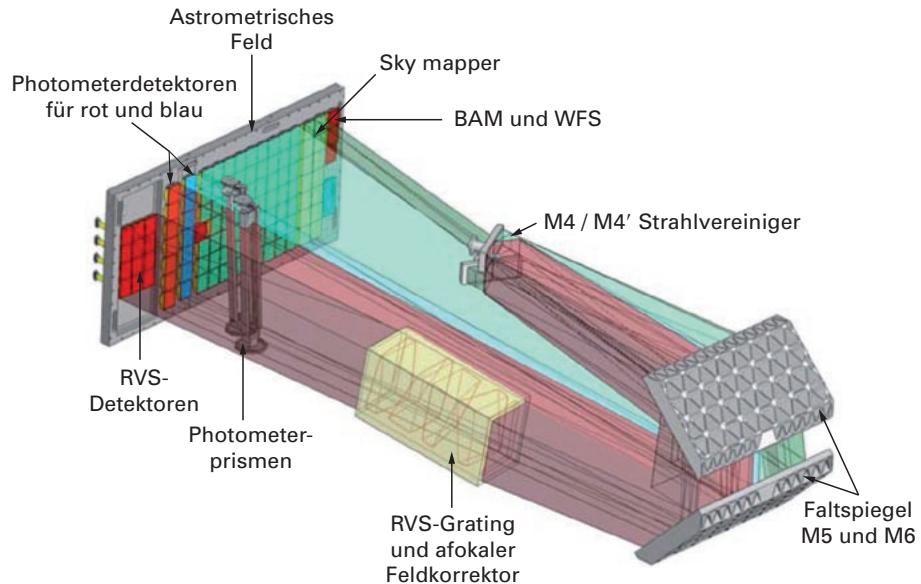


Abb. IV.13.3: Um das Instrument hinreichend kompakt zu halten, damit es in den Stauraum der Trägerrakete passt, wird der Strahlengang über ebene Spiegel gefaltet. Die Fokalebene ist in drei Bereiche aufgeteilt. Ungefiltertes Licht erreicht den ersten Bereich, das so genannte Astrometrische Feld (AF). Hier wer-

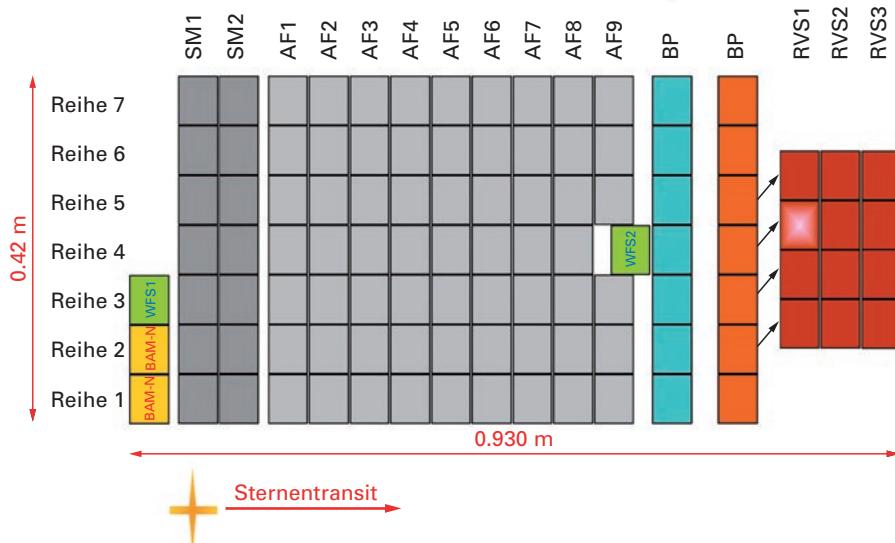
den hochgenaue Bilder gesammelt: die Datenverarbeitung am Boden führt zur präzisen Bestimmung der Schwerpunktlage (und damit der Position) der Sternbilder. Im zweiten Bereich liefern zwei Prismen niedrig aufgelöste Spektren zur Klassifikation und physikalischen Charakterisierung der Quellen.

Lösung hinaus noch viele weitere Aufgaben, darunter Modellrechnungen der Fluglage des Satelliten, die Kalibrierung der 100 CCDs, die Kalibrierung der Empfindlichkeit und der Dispersion der Spektrographen, Modellrechnungen und Ausgleich von Strahlenschäden, die Bestimmung astrometrischer Umlaufbahnen von

Doppelsternen und Exoplaneten sowie den Nachweis und die Beschreibung stellarer Variabilität, um nur einige zu nennen. Die Anstrengungen (und Kosten), die allein für die Datenverarbeitung nötig sind, sind vergleichbar mit dem Bau mehrerer großer Instrumente und stellen einen wesentlichen Teil der Mission dar.

Abb. IV.13.4: Anordnung der CCDs in der Fokalebene des GAIA-Teleskops. Die AF-CCDs registrieren das ungefilterte Licht. BP und RP messen das von den Prismen spektral aufge-

fächerte rote und blaue Licht. Die drei Spalten der RVS-CCDs registrieren die hoch aufgelösten Spektren zur Bestimmung der Radialgeschwindigkeit.



Um diese schwierige Aufgabe in Angriff zu nehmen, wurde das »Konsortium zur Verarbeitung und Auswertung der GAIA-Daten« (DPAC) ins Leben gerufen. Es soll sämtliche GAIA-Daten verarbeiten, analysieren und veröffentlichen, d.h. es soll daraus astrometrische, photometrische, spektroskopische und astrophysikalische Parameter für mehr als eine Milliarde Sterne, Galaxien, Quasare und Objekte aus dem Sonnensystem gewinnen. Das DPAC ist um neun »Koordinationseinheiten« (CU) herum aufgebaut, von denen jede für die Entwicklung und den Betrieb der Datenverarbeitungs-Software- und -Hardware verantwortlich ist.

Eine dieser Koordinationseinheiten, CU8 »Astrophysikalische Parameter«, wird von Coryn Bailer-Jones am MPIA geleitet. CU8 ist für die Klassifikation sämtlicher Objekte verantwortlich, die GAIA beobachtet, sowie für die Bestimmung ihrer intrinsischen astrophysikalischen Parameter. Die CU besteht aus etwa 60 Wissenschaftlern, die über 17 Institute in acht Ländern verteilt sind, wobei deren Arbeitsaufwand insgesamt etwa 15 Vollzeitstellen entspricht (und mit der Zeit noch steigen wird). Seit Anfang 2006 beherbergt das MPIA eine vom DLR finan-

zierte Gruppe aus drei Vollzeit-Wissenschaftlern (plus Gruppenleiter), die für die zentralen Aspekte der CU8 verantwortlich sind. Dazu gehören das Management der CU, die Definition der Systemarchitektur, die Entwicklung und Betreuung des Datenmodells und insbesondere die Erforschung und Entwicklung maschinelner Lern-Algorithmen für die Bewältigung einiger der Hauptklassifikationsaufgaben. Die Arbeit ist eine interessante interdisziplinäre Herausforderung an der Grenze zwischen Astronomie, Computerwissenschaft und statistischer Datenanalyse. Die Software wird in Java entwickelt, wobei sowohl Standardhilfsmittel (z.B. Eclipse, Subversion und Mantis) wie auch maschinelle Lern-Algorithmen wie Support Vector Machines genutzt werden. Die Entwicklung der Software findet in sechsmonatigen Entwicklungszyklen statt, sodass die Erstellung von Prototyp-Algorithmen möglich ist, die sukzessive verbessert werden.

*Coryn A. L. Bailer-Jones,
Carola Tiede, Kester Smith*

V Menschen und Ereignisse

V.1 Das Institut stockt auf

Am 29. September feierte die Belegschaft des MPIA zusammen mit prominenten Gästen die erfolgreiche Aufstockung des Hauptgebäudes. Mit der Fertigstellung der neuen Dachetage stehen nun Büros für 47 weitere Wissenschaftler und Studenten bereit.

Im Laufe der letzten Jahre haben Zahl und Umfang der Projekte des MPIA besonders schnell zugenommen. Der damit verbundene Zuwachs an Mitarbeitern, Studenten und Doktoranden aus aller Welt hatte die erste bauliche Erweiterung des 1975 fertig gestellten Hauptgebäudes dringend notwendig gemacht. Während der letzten Monate vor der Fertigstellung mussten bereits einige Mitarbeiter in Bürocontainern vor dem Haupteingang untergebracht werden.

Für den Bau des Instituts wurde 1977 der Preis des Bundes Deutscher Architekten vergeben. Auch deshalb war bereits bei den ersten Gesprächen mit der Max-Planck-Gesellschaft im Jahre 2004 klar, dass die Aufstockung stilistisch zum bereits bestehenden Gebäude passen musste. Nach der Bewilligung der Baumaßnahme erfolgte die erste Baubesprechung mit Architekten, Fachingenieuren und Rohbauern im November 2005. Bereits am 7. April 2006 konnte das Richtfest gefeiert werden. Mit dem Abschluss der Bauarbeiten stehen dem MPIA nun 47 zusätzliche Arbeitsplätze in 19 neuen

Büros zur Verfügung. Integriert wurde auch ein weiterer, dringend notwendiger Besprechungsraum. Parallel zu den Arbeiten am Erweiterungsbau fand im gesamten Gebäude auch eine aufwändige und ebenso dringend erforderliche Verbesserung des Brandschutzes statt.

Einweihungsfeier mit geladenen Gästen

Die Veranstaltung begann mit einer Führung der auswärtigen Gäste durch das Institut. Der Einweihungsfeier schloss sich das Sommerfest des MPIA an. Neben anderen prominenten Gästen besuchte auch der kurz zuvor neu gewählte Oberbürgermeister der Stadt Heidelberg, Eckart Würzner, den Königstuhl.

Mit der Veranstaltung bedankte sich die Leitung des MPIA bei allen, die den Erweiterungsbau ermöglicht hatten: Das sind die Max-Planck-Gesellschaft, das Architekturbüro Hauss, Walla und Partner, die beteiligten Firmen und Gewerke, die behördlichen Entscheidungsträger und die Feuerwehr. Nicht zuletzt galt der Dank dem Technischen Dienst des MPIA für seinen unermüdlichen Einsatz.

Abb. V.1.1a: Einige Monate lang wurde auf dem Institutsgebäude gebaut, doch der Aufwand hat sich gelohnt.





Abb. V.1.1b: Das erweiterte Haus bietet Raum für 47 neue Arbeitsplätze.

Abb. V.1.2: Der Präsident der Max-Planck-Gesellschaft Peter Gruss (2. v. l.) besichtigt die Bauarbeiten zur Aufstockung und genießt die Aussicht vom Dach des MPIA. Es begleiten ihn der Direktor Hans-Walter Rix, Wissenschaftsreferent Klaus Jäger und Verwaltungsleiter Mathias Voss.





und allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die Geduld, mit der sie während der Baumaßnahme manche Einschränkungen hingenommen hatten.

Wenige Tage nach der Einweihung waren die Container wieder abgebaut und in einigen bis dahin überbesetzten Büros konnte die Lage entschärft werden. Doch es zeigte sich bereits ab, dass auch die neue Etage bald voll besetzt sein wird. Wie auch immer, die Dachaufstockung hat zu einer wesentlichen Erleichterung geführt und die Arbeitsbedingungen am MPIA sehr verbessert.

Abb. V.1.3: Auch Heidelbergs neuer Oberbürgermeister Eckart Würzner zeigte sich an der Forschung des MPIA interessiert. Hier demonstriert ihm Oliver Krause die Funktion eines weltraumtauglichen Filterrades.

Klaus Jäger

V.2 Neue Nachwuchsgruppen am Institut

Eric Bell: Entwicklung massereicher Galaxien

Mit dem Emmy-Noether-Programm unterstützt die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) junge Wissenschaftler, indem sie ihnen die Möglichkeit gibt, eigene Nachwuchsgruppen aufzubauen. Am MPIA entstanden in den Jahren 2004 und 2005 drei solche Gruppen: Protoplanetare Scheiben (Leitung: Sebastian Wolf), Entstehung und Eigenschaften substellarer Objekte (Coryn Bailer-Jones) und Entstehung massereicher Sterne (Henrik Beuther). In diesem Jahr wurde eine vierte Nachwuchsgruppe unter der Leitung von Eric Bell gegründet, die sich mit der Entwicklung massereicher Galaxien beschäftigt.

Eric Bell studierte Physik und Astronomie an der Universität Glasgow und erhielt seinen Doktortitel an der Universität Durham (UK). Anschließend arbeitete er auf einer Postdoc-Stelle als wissenschaftlicher Assistent an der Universität von Arizona. Im Jahre 2002 kam er ans MPIA, wo er das European Union Research Training Network »Spectroscopic and Imaging Surveys for Cosmology« gründete.

Abb. V.2.1: Eric Bell



Ein Schwerpunkt der Arbeiten in seiner Gruppe betrifft die Frage, inwieweit das Verschmelzen von Galaxien dazu beiträgt, dass immer massereichere Galaxien entstehen. Modelle zur Galaxienentwicklung sagen voraus, dass in den vergangenen acht Milliarden Jahren (seit einer Rotverschiebung von $z \approx 1$) das Verschmelzen von Galaxien in der Tat der wichtigste Prozess zur Bildung massereicher Galaxien gewesen ist. Die Überprüfung dieser Vorhersage stellt extreme Anforderungen an die Beobachtungen. Hauptgründe hierfür sind die geringe Anzahl verschmelzender Galaxien, Schwierigkeiten im Erkennen bevorstehender Verschmelzungen und die Unsicherheit von Abzuschätzungen, über welchen Zeitraum hinweg ein Verschmelzungsvorgang als solcher erkannt werden kann. Zwei Doktoranden, Rosalind Skelton und Aday Robaina, arbeiten an modernen Himmelsdurchmusterungen und Modellen, um diese Probleme zu lösen. Ziel ist ein Test für die Vorhersage der Modelle.

Ein anderer Schwerpunkt der Arbeit dieser Nachwuchsgruppe betrifft die Frage, wo in den Galaxien Sterne entstehen und wo sie enden. Hierfür sollen Methoden verbessert werden, mit denen sich aus der spektralen Energieverteilung von Galaxien deren Sternmassen und Sternentstehungsraten und deren Abhängigkeit vom Galaxientyp und von der lokalen Umgebung ableiten lassen. Diese Methoden werden an umfangreichen Datensätzen von Himmelsdurchmusterungen entwickelt, getestet und verbessert. Hierfür stehen insbesondere der Sloan Digital Sky Survey und COMBO-17 zur Verfügung. Dieser Aufgabe werden sich Anna Gallazzi auf einer Postdoc-Stelle und ein weiterer Doktorand ab dem Jahre 2007 widmen.

Cornelis Dullemond: Von kosmischem Staub zu planetaren Bausteinen

Der Bau von Instrumenten für den Infrarot-, Submillimeter und Millimeterbereich hat in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht. Dadurch hat sich der Erforschung der Planetenentstehung ein neues Fenster geöffnet. Das Studium von Spektren und Aufnahmen protoplanetarer Scheiben, die junge Sterne umgeben, hat Hinweise auf die ersten Stufen im gesamten Prozess der Planetenentstehung ergeben. Dies betrifft das Wachstum von Staubteilchen im Größenbereich unterhalb eines Mikrometers zu zentimetergroßen Körnern und darüber hinaus. Diese Entwicklung hat ein großes internationales Interesse an hiermit verbundenen Fragen erneut aufkommen lassen: Wie verlaufen die frühen Phasen genau, wie beeinflussen die anfänglichen



Abb. V.2.2: Cornelis Dullemond

Prozesse die spätere Zusammensetzung der Planeten, und welche Zusammenhänge lassen sich zu dem heute noch vorliegenden ursprünglichen Material in Asteroiden und Kometen unseres Sonnensystems herstellen?

Die Beantwortung dieser Fragen erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Gefordert sind Astrochemie, Astromineralogie, die Physik des Zusammenlagerns und Haftens (einschließlich Laborexperimenten mit Kollisionen), die Physik der Struktur und Entwicklung protoplanetarer Scheiben und die Physik der Teilchenbewegungen in turbulenten Medien. Bislang findet nur ein begrenzter Austausch zwischen diesen Disziplinen statt. Das MPIA ist in zwei Projekte involviert, die diese Situation verbessern sollen.

Zum einen genehmigte die DFG im Oktober 2006 ein Forschergruppen-Netzwerk, in dem Wissenschaftler aus den genannten Bereichen in enger Zusammenarbeit die Probleme angehen sollen. Die Gruppen leiten Willy Kley von der Universität Tübingen, Cornelis P. Dullemond vom MPIA und Mario Trieloff vom Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg. Weitere Beiträge kommen von der Technischen Universität Braunschweig und der Universität Münster. Das MPIA ist daran mit zwei Doktoranden-Projekten beteiligt. Das eine ist eine Kollaboration zwischen Hubert Klahr am MPIA und Willy Kley in Tübingen. Hierin geht es um ein besseres Verständnis der erwarteten Kollisionsgeschwindigkeiten zwischen den Teilchen in protoplanetaren Scheiben. Im Rahmen einer zweiten Kollaboration wollen Sebastian Wolf und Cornelis P. Dullemond Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Forschergruppe und diversen

Beobachtungen an protoplanetaren Scheiben herausfinden.

Zum anderen gründete Cornelis P. Dullemond im Dezember 2006 am Institut im Rahmen des SNWG-Programms der MPG eine neue »Selbstständige Nachwuchsgruppe« (SNWG). Es verfolgt ähnliche Ziele wie das Emmy-Noether-Programm der DFG. Mit dem SNWG fördert die MPG hervorragend qualifizierte junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, indem sie für fünf Jahre alle notwendigen Personal-, Sach- und Investitionskosten übernimmt. Auf diese Weise kann der ausgewählte Nachwuchsgruppenleiter sein selbst definiertes Forschungsvorhaben an einem Max-Planck-Institut eigener Wahl verwirklichen. Dies ist die zweite Gruppe dieser Art am MPIA, die erste leitet Frank van den Bosch seit 2005.

Die neue Gruppe wird sich vornehmlich mit dem Erstellen numerischer Modelle für die großräumige Aggregation in Staubscheiben beschäftigen. Bislang lässt sich mit Beobachtungen lediglich Staub mit Teilchengrößen bis zu etwa einem Zentimeter nachweisen. Die neuen Modelle sollen die Frage klären, was man aus diesen Beobachtungen für das weitere, unbeobachtbare Wachstum dieser Teilchen zu größeren Brocken lernen kann. Weiterhin sollen sich die Modelle mit dem Problem beschäftigen, wie Felsbrocken im Größenbereich von einem Meter zu noch größeren Körpern anwachsen können. Nach bisheriger Kenntnis stoßen solche Objekte mit so hohen Geschwindigkeiten zusammen, dass sie sich eher gegenseitig zerstören als zusammenlagern.

Um realistische Ergebnisse liefern zu können, benötigen die Modelle den Input physikalischer Experimente, der ebenfalls aus der Forschergruppe kommen soll. Das beinhaltet Laborversuche mit Teilchenkollisionen an den Universitäten in Braunschweig und Münster, die theoretische Behandlung der Kollisionen an der Universität Tübingen, mineralogische Daten und Modelle von der Universität Heidelberg und Computersimulationen turbulenten Medien vom MPIA.

Cristina Afonso: Suche nach Transits extrasolarer Planeten

Cristina Afonso erhielt am MPIA eine Stelle im Rahmen des W2-Sonderprogramms zur Förderung hervorragender Wissenschaftlerinnen in der Max-Planck-Gesellschaft. Dieses Programm eröffnet jungen Nachwuchswissenschaftlerinnen die Möglichkeit, ihre eigene Forschungsgruppe aufzubauen.

Cristina Afonso studierte physikalische Ingenieurwissenschaften an der Universität Lissabon. Nach dem Erreichen des Masters in Astrophysik und Astronomie am Observatoire de Meudon erlangte sie die Doktorwürde an der Universität Paris VII. Ihre Doktorarbeit am Centre d'Energie Nucléaire in Saclay behandelte den Nachweis von Microlensing im Richtung des Galaktischen Zentrums.



Abb. V.2.3: Cristina Afonso

Anschließend arbeitete sie zwei Jahre lang als Postdoc an der New Mexico State University, USA, und ein weiteres Jahr am NASA Ames Research Center. Hier war sie an einem Forschungsprogramm zur Suche nach extrasolaren Planeten mit Hilfe des Transitverfahrens beteiligt. Im Jahre 2004 kam sie als Humboldt-Stipendiatin ans MPIA, wo sie ihre Forschungen über extrasolare Planeten fortsetzt.

Der Aufbau ihrer Gruppe wird Mitte 2007 abgeschlossen sein. Deren Hauptaufgabe besteht in der Teilnahme am Pan-Planets-Projekt zur Suche nach Exoplaneten mit der Transitmethode. Für dieses Projekt steht eine Kamera an dem 1.8-m-PanSTARRS1-Teleskop am Lure Observatory auf Haleakala, Hawaii, zur Verfügung. Das Instrument verfügt über ein sieben Quadratgrad großes Gesichtsfeld.

In den vergangenen zehn Jahren hat sich die Suche nach extrasolaren Planeten als ein bedeutendes Forschungsgebiet der Astronomie etabliert, und es wird auch im kommenden Jahrzehnt eines der aktivsten bleiben. Der Nachweis von Exoplaneten mit Hilfe von Transits liefert einige wichtige Größen, wie Masse und Radius des Zentralsterns, sowie Radius des Planeten und Neigung der Umlaufbahn gegen die Sichtlinie. Der Radius eines extrasolaren Planeten kann derzeit nur mit dieser Methode ermittelt werden. Dies macht ihre Stärke aus und ist die Hauptmotivation, sie weiter zu entwickeln. Die Kenntnis des Radius erlaubt Schlüsse auf die Entwicklung des Planeten in Hinblick auf die Migrationstheorie und sie ermöglicht es, mit Hilfe von Entwicklungsmodellen etwas über die Zusammensetzung und die Atmosphären von Exoplaneten zu erfahren.

Mit dem Pan-PLANETS-Projekt hofft man innerhalb von dreieinhalb Jahren mehr als hundert Jupiter-ähnliche Planeten zu finden. Das wird sicherlich dazu beitragen, die Statistik und Charakterisierung extrasolarer Planetensysteme zu verbessern.

Eva Schinnerer: Entwicklung von Galaxien von hohen Rotverschiebungen bis heute

Die zweite Stelle im Rahmen des W2-Sonderprogramms zur Förderung hervorragender Wissenschaftlerinnen in der Max-Planck-Gesellschaft erhielt Eva Schinnerer. Sie beschäftigt sich mit einer Reihe von Schlüsseluntersuchungen zur Entwicklung von Galaxien von hohen Rotverschiebungen bis heute. Hierbei nutzt sie Beobachtungen im Radio-, Millimeter- und Infrarotbereich. Eine ihrer Fragestellungen, nach dem »Füttern aktiver galaktischer Kerne«, wurde bereits im Jahresbericht 2004 (Kap. III.4) beschrieben, ein zweites Gebiet, das COSMOS-Projekt, schildert Eva Schinnerer in Kapitel III.4 dieses Jahresberichts.

Eva Schinnerer erlangte die Doktorwürde 1999 an der Ludwig-Maximilians-Universität in München in der Infrarot-/Submillimeter-Gruppe von Reinhard Genzel am MPE. Von 1999 – 2002 arbeitete sie als Postdoc in der Owens Valley Radio Observatory Group am California Institute of Technology. Anschließend ging sie als Jansky

Abb. V.2.4: Eva Schinnerer



Fellow an das Array Operations Center des National Radio Astronomy Observatory in Socorro, New Mexico. Im Jahre 2004 wechselte sie zum MPIA, wo sie 2005 ihre Stellung im Rahmen des W2-Sonderprogramms zur Förderung hervorragender Wissenschaftlerinnen in der MPG erhielt.

Der Spektralbereich vom Radio- bis zum Infraroten eignet sich hervorragend zum Studium von Sternentstehung und aktiven galaktischen Kernen (AGN). Insbesondere Beobachtungen der molekularen Gasdynamik liefern Aufschlüsse darüber, wie galaktische Zentren (und ihre zentralen massereichen Objekte, wie Schwarze Löcher, und kompakte Sternhaufen) gefüttert werden, und auf welche Weise Aktivität im Kerngebiet entsteht. Mit Millimeter-Interferometern, wie dem Plateau de Bure-Interferometer oder zukünftig mit ALMA, lässt sich die Liniенemission des CO und anderer Moleküle beobachten. Dies bietet die Möglichkeit, in nahen Galaxien die Eigenschaften des molekularen Gases mit höchster räumlicher und spektraler Auflösung zu untersuchen. Diese Messdaten gehen als Randbedingungen in theoretische Modelle ein, welche die Gasdynamik und deren Rolle in der Entwicklung von Galaxien simulieren. Hierzu zählt insbesondere das laufende Projekt NUGA (Nuclei of Galaxies).

Um zu verstehen, wie sich die Sternentstehung und die Aktivität von AGN zeitlich ändern, muss man eine große Zahl von Galaxien bei unterschiedlichen Rotverschiebungen studieren. Dazu zählt zum Beispiel der Cosmic Evolution Survey (COSMOS; PI: Nicolas Scoville, Caltech). Diese zurzeit laufende panchromatische Durchmusterung hat den einzigartigen Aspekt, dass komplementäre Daten vom Radio- bis zum Röntgenbereich existieren. Die Radiobeobachtungen des COSMOS-Himmelsfeldes wurden unter der Leitung von Eva Schinnerer am VLA durchgeführt. Sie ermöglichen einen von Staubextinktion unverfälschten Blick auf massereiche Galaxien mit starker Sternentstehung und/oder aktiven Kernen.

Die Doktorandin Vernesa Smolcic war maßgeblich an der Reduktion und Analyse der VLA-COSMOS-Daten beteiligt und konzentriert sich nun auf die Bestimmung

der Eigenschaften der lichtschwachen Radiopopulation. Diese besteht aus Galaxien mit starker Sternentstehung bei mittleren Rotverschiebungen sowie aus radiolauten AGN, die bis zu großen Rotverschiebungen beobachtbar sind. Sobald alle Galaxien mit starker Sternentstehung identifiziert sind, soll daraus die kosmische Dichte der in dichtem Staub versteckten Sternentstehungsgebiete abgeschätzt werden. Dies ist möglich, weil die Radiobeobachtungen nicht von Extinktion betroffen sind. Die beiden Postdocs Knud Jahnke und Alejo Martinez Sansigre nutzen die COSMOS-Daten, um die zeitliche Entwicklung von verdeckten und unverdeckten AGN zu ermitteln.

Knud Jahnke studiert die Eigenschaften und die Entwicklung der Muttergalaxien von Typ-1-Quasaren. Er will herausfinden, ob sich die zentralen Schwarzen Löcher und die sie umgebenden Bulges gemeinsam entwickeln oder nicht. Alejo Martinez Sansigre beschäftigt sich vornehmlich mit den am stärksten von Staub verdeckten AGN bei einer Rotverschiebung von $z = 2$. Diese geheimnisvollen Objekte scheinen häufiger zu sein als bislang angenommen und kommen in zwei Formen vor: Bei der einen hängt die Extinktion lediglich von der Orientierung des zentralen Staubtorus ab, bei der anderen verdeckt Staub aus Sternentstehungsgebieten in der Scheibe den Blick auf das zentrale Schwarze Loch.

Im Rahmen des HI-NUGA-Projekts wird atomares Gas in den äußeren Bereichen galaktischer Scheiben untersucht. Diese Beobachtungen ergänzen das NUGA-Projekt, bei dem die Kinematik des molekularen Gases innerhalb von etwa tausend Parsec um das Zentrum herum vermessen wurde (Jahresbericht 2004, Kap. III.4). Der Doktorand Sebastian Haan leitet die Analyse der mit dem VLA gewonnenen HI-Daten. Ziel dieses Projekts ist es, bei nahen AGN den Transport von Gas aus den äußeren Bereichen in das Zentrum zu studieren. Darüber hinaus ist geplant, mit Hilfe von N-Körper-Rechnungen die beobachtete Gaskinematik zu simulieren. Damit wird erstmals ein detaillierter Vergleich von Messdaten und dynamischen Modellen über mehrere räumliche Größenordnungen hinweg möglich sein.

V.3 International Max Planck Research School in Heidelberg angelaufen

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ist von elementarer Bedeutung für die Zukunft von Wissenschaft, Forschung und Innovation in Deutschland. Die Max-Planck-Gesellschaft hatte deshalb im Jahr 2000 damit begonnen, gemeinsam mit den Universitäten ein Netzwerk von Graduiertenschulen aufzubauen. Die »International Max Planck Research Schools« (IMPRS) bieten den Studenten zwischen ihrem ersten berufsqualifizierenden Abschluss und der Promotion eine strukturierte wissenschaftliche Ausbildung, kombiniert mit hervorragenden Forschungsmöglichkeiten.

Die IMPRS for Astronomy and Cosmic Physics at the University of Heidelberg wurde im Jahr 2005 aufgebaut und hat ihr erstes »Betriebsjahr« erfolgreich durchlaufen. Als gemeinsame Initiative des MPIA, der Abteilungen Astrophysik und Teilchenphysik des MPI für Kernphysik und der drei Institute des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) bietet sie ein breites Spektrum an modernen Forschungsmöglichkeiten für Doktoranden aus aller Welt.

Das MPIA trägt insbesondere zu folgenden Forschungsbereichen bei: Planeten- und Sternentstehung; extrasolare Planeten, substellare Objekte, Entwicklung und Dynamik von Galaxien, aktive galaktische Kerne, Gravitationslinsen, Kosmologie, Strukturbildung, Dunkle Materie sowie die Entwicklung ergebundener und weltraumgestützter Beobachtungsinstrumente.

In Zusammenarbeit mit der Universität wurde ein strukturiertes fachliches Ausbildungsprogramm in englischer Sprache eingeführt, bestehend aus Grund- und weiterführenden Vorlesungen und dem IMPRS-Seminar und ergänzt durch Softskills-Kurse (so genannte Schlüsselqualifikationen wie z.B. Präsentationstechniken).

Nachdem in der ersten Bewerbungsrounde 2005 schon 17 Doktoranden für die IMPRS gewonnen werden konnten, wurde im vergangenen Jahr mit 23 neuen Doktoranden schon die Zahl erreicht, die ursprünglich nach drei

Abb. V.3.1: Das IMPRS-Poster zur Sommerschule.



Jahren für den langjährigen Durchschnitt avisiert worden war. Für die neue Bewerbungsrounde 2007 scheint sich dieser Erfolgstrend fortzusetzen: Die Zahl der Bewerber, vor allem die der exzellenten, ist erneut gestiegen. Abb. V.3.2 gibt eine Übersicht über die Bewerberzahlen und deren Herkunft. Im Jahr 2006 betrug der Ausländeranteil etwa 85 Prozent. Als sehr positiv bei der internationalen Rekrutierung von IMPRS-Doktoranden ist der in Deutschland ungewöhnlich hohe Frauenanteil von fast 50 Prozent zu nennen.

Ein Höhepunkt des IMPRS-Jahres 2006 war die erste Sommerschule – die erste in Heidelberg überhaupt.

Abb. V.3.2: Bewerberstatistik 2005 bis 2007. Die Herkunfts- kontinente sind farblich unterlegt. Viele Bewerber haben schon eine kleine internationale Karriere hinter sich: Ein India kann seinen Abschluß beispielsweise in den USA gemacht haben, ein Pakistani in Schweden. Die shortlist beinhaltet die besten Bewerber, die in die engere Auswahl für eine Promotion innerhalb der IMPRS kommen. Die Bewerberzahlen sind nach männlich (m) und weiblich (f) aufgeschlüsselt.

Sie wurde von Thomas Henning und Christian Fendt organisiert und richtete sich an Doktoranden, die auf diesem Gebiet arbeiten. Thomas Henning war einer der Sprecher, aus dem Ausland konnten als Dozenten zwei international namhafte Fachkollegen gewonnen werden: Leo Blitz von der University of California in Berkely und Robert Williams vom HUBBLE Space Telescope Science Institute in Baltimore. Neben diesen Hauptvorlesungen stellten die Heidelberger Kollegen in kürzeren »Science Talks« die Forschungsaktivitäten vor Ort auf diesem Gebiet vor.

Aus etwa 95 Bewerbern für die Teilnahme an der Sommerschule wurden etwa 55 aus aller Welt ausgewählt, hinzu kamen etwa 25 Teilnehmer aus Heidelberg. Etwa 30 der internationalen Teilnehmer, insbesondere Doktoranden aus Südamerika oder Osteuropa, konnten nur durch eine Reisekostenhilfe der IMPRS an der Sommerschule teilnehmen. Es gab aber auch Teilnehmer, die ohne Reisekostenunterstützung aus Japan oder Australien anreisten – ein weiterer Beweis für die Attraktivität dieses Projekts.

IMPRS applications – statistics 2005-2007								
Year	Nationalities	Europe/West	Europe/East	Asia	America/Latin	America/North	Arabia	Africa
2005	Applicants	Italy 14	Russia 4	India 6	Chile 3	Canada 3	Iran 2	Ethiopia 1
	82	Germany 11	Ukraine 3	China PR 4	Argentina 2	Mexico 2	Lebanon 1	
	55m, 27f	Greece 2	Poland 2	Korea 3	Pakistan 2	Hong Kong 1	Egypt 1	Turkey 1
	New members 17	UK 2	Slovakia 2	Croatia 1	Malaysia 1	Philippines 1	Indonesia 1	Taiwan 1
		Austria 2	Portugal 1	Spain 1	Sweden 1			
	33 shortlisted	Germany 4						
	20m, 13f	Europe/W 10	Europe/E 6	Asia 6	America/L 4	America/N 3		
2006	Applicants	Italy 13	Bulgaria 2	India 12	Argentina 3	Canada 2	Iran 4	South Africa 2
	90	Germany 12	Romania 2	Taiwan 3	Chile 3	USA 1	Lebanon 1	Egypt 1
	56m, 34f	Spain 5	Ukraine 2	Pakistan 2	Brazil 1	Ecuador 1	Turkey 1	
	New members 23	UK 3	Hungary 1	Korea 1	Bangladesh 1	Mexico 1	Peru 1	
		Austria 1	Poland 1	Russia 1	Indonesia 1	Thailand 1		
	43 shortlisted	Finland 1	France 1	Ireland 1	Czech Rep. 1			
	27m, 16f	Germany 6						
		Europe/W 12	Europe/E 4	Asia 12	America/L 5	America/N 2	Arabia 1	Africa 1
2007	Applicants	Germany 24	Hungary 3	India 9	Mexico 4	Canada 2	Iran 6	Algeria 2
	108	Italy 10	Russia 3	Taiwan 7	Chile 4	USA 1	Lebanon 1	Egypt 1
	60m, 48f	Italy-Chile 1	Turkey 2	China PR 4	(Chile-Italy 1)			
	New members ??	Spain 5	Georgia 1	Indonesia 1	Columbia 2			
		France 3	Romania 1	Thailand 1				
	67 shortlisted	Greece 3	Portugal 3	UK 2	Austria 1	Cyprus 1	Denmark 1	Norway 1
	34m, 33f	Germany 12						
		Europe/W 22	Europe/E 5	Asia 13	America/L 8	America/N 2	Arabia 3	Africa 2



Neben dem fachlichen gab es auch ein ausgiebiges soziales Programm, in dem die Teilnehmer sich gegenseitig und den Standort Heidelberg näher kennen lernten. Ein Besuch mit Führung durch die Labors am MPIA mit anschließendem Leberkäse und Bier, eine Bootsfahrt auf dem Neckar nach Neckarsteinach, eine Schloßbesichtigung und schließlich die Abschlussvorlesung in der Alten Aula der Universität Heidelberg waren Ereignisse, bei denen auch Spaß und Kultur nicht zu kurz kamen.

Abb. V.3.3: Entspannung während der Sommerschule.

Da die Sommerschule der IMPRS jährlich stattfinden soll, fanden direkt nach der Sommerschule 2006 bereits die ersten Planungen für die nächste Veranstaltung statt – dann zum Thema »Milchstraßensystem«.

Christian Fendt

V.4 Minisymposien zur Zukunft der Astronomie und Kosmologie

In welche Richtung entwickelt sich die Astronomie? Wo wird es neue Forschungsschwerpunkte geben? Um sich mit diesen Fragen etwas näher auseinander zu setzen veranstaltete das MPIA erstmals eine spezielle Reihe von vier Minisymposien, zu der 21 prominente Sprecher eingeladen waren.

Kaum ein anderes Feld in den Naturwissenschaften hat in den letzten zwei Dekaden eine derart stürmische Entwicklung erfahren wie die Astronomie. Einen wesentlichen Anteil daran hat der enorme Fortschritt in der Instrumentierung und den Beobachtungsmöglichkeiten über das gesamte elektromagnetische Spektrum hinweg. Und die Entwicklung geht weiter: Die Planung für das Extremely Large Telescope (ELT) nimmt Gestalt an, und mit LBT, HERSCHEL, PLANCK, GAIA, JWST und ALMA sind gänzlich neue Möglichkeiten bereits in greifbarer Nähe. Diese Teleskope werden vielen Forschungsbereichen neue Impulse verleihen. Dieses Potential sollte in den Minisymposien ausgelotet werden.

Im Minisymposium »Extrasolar Planet Searches« am 11. Oktober berichteten Michael Liu (Universität Hawaii), Andrzej Udalski (Universität Warschau), Sara Seager (Carnegie Observatorium) und Didier Queloz (Universität Genf) über die verschiedenen Methoden zur Suche nach Exoplaneten. Auch über die sehr unterschiedlichen Typen von Planeten, die man außerhalb des Sonnensystems bereits gefunden hat und in Zukunft zu finden erwartet, wurde diskutiert. Seit der Entdeckung

des ersten Exoplaneten im Jahre 1995 sind mehr als 200 weitere Planeten bekannt geworden, bei einigen Sternen sogar mehrere Planeten. Aufgrund des extrem kleinen Winkelabstandes eines Planeten zu seinem Mutterstern bei gleichzeitig extremer Helligkeitsdifferenz zwischen beiden Objekten sind – abgesehen von wenigen umstrittenen Fällen – alle bisher entdeckten Exoplaneten indirekt identifiziert worden. Trotz der zukünftig zu erwartenden technischen Fortschritte wird das direkte Abbilden eines extrasolaren Planeten eine große Herausforderung bleiben. Indirekte Methoden, beispielsweise auf der Basis von Transitbeobachtungen oder unter Ausnutzung des Microlensing-Effekts, werden voraussichtlich noch an Bedeutung gewinnen. Bemerkenswert sind die Planetentypen, die man bereits gefunden hat. Aufgrund der bislang häufigsten Entdeckungen mit Hilfe der Doppler-Methode zeigten sich zunächst primär sehr massereiche, jupiterähnliche Planeten mit relativ kurzer Umlaufzeit, also geringem Abstand zum Zentralstern. Diese auch als Hot Jupiters bezeichneten Objekte geben Rätsel auf. Insbesondere die Frage, wie die Existenz der Hot Jupiters mit gängigen Entstehungstheorien vereinbar ist, wurde diskutiert.

Von großer Bedeutung wird die Entdeckung und die nähere Untersuchung erdähnlicher extrasolarer Planeten sein. Trotz der noch größeren Herausforderung an die Beobachtung wird sie bald in greifbare Nähe rücken. Damit werden auch Astrochemie und Astrobiologie immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dies wurde am 29. Mai im Minisymposium »Highlights in Astrochemistry and Astrobiology« deutlich, bei dem Eric Herbst (Ohio State

Abb. V.4.1: Hans-Walter Rix begrüßt die Gäste auf einem der vier Minisymposien.





Abb. V.4.2: Gespannte Aufmerksamkeit im Auditorium bei einem Minisymposiumsvortrag.

Universität), Ewine van Dishoeck (Universität Leiden), Geoffrey Blake (Caltech), Anne Dutrey (Observatorium Bordeaux), Edwin Bergin (Universität Michigan) und Jim Kasting (Penn State Universität) als Sprecher zu Gast waren. Mit der Suche nach erdähnlichen Planeten rücken auch die Fragen nach der Wahrscheinlichkeit für Leben außerhalb des Sonnensystems und dessen möglichem Nachweis immer stärker in den Vordergrund. Doch das ist nur ein Teil des gesamten Arbeitsgebietes. Themen wie die Entstehung komplexer Moleküle im interstellaren Medium, die Zusammensetzung von Kometen und Meteoriten, und was wir daraus lernen können, oder die astrochemische Zusammensetzung und Entwicklung protoplanetarer Scheiben gehören ebenso dazu und machen das Arbeitsgebiet zunehmend präsenter.

Ohne Sternentstehung gibt es keine Planetensysteme, und ohne Verständnis der Mechanismen der Sternentstehung bleiben nicht nur in diesem Arbeitsgebiet viele Fragen offen. Wie der Titel des Minisymposiums »Star Formation from Galactic to Cosmological Scales« vom 10. Juli andeutet, vereint die Untersuchung der Sternentstehung zunehmend Gebiete miteinander, die früher aufgrund der betrachteten räumlichen Skalen eher getrennt behandelt wurden. Eva Grebel (Universität Basel), Tom Abel (KIPAC Stanford), Andrea Ferrara (SISSA), Volker Springel (MPA Garching), Daniela Calzetti (STScI) und Jay Gallagher (Universität Wisconsin) erklärten alle, wie die detaillierte Untersuchung von Sternentstehung und Sternentwicklung in unserem Milchstraßensystem und in verschiedenen Typen naher Galaxien wichtige Impulse für das Verständnis der Geschichte der Sternenstehung im gesamten Universum geben kann. Diese Erkenntnisse müssen auch in Modellen zur Galaxienentwicklung berücksichtigt werden, und damit fließen sie in die aktuellen Simulationen zur kosmologischen Strukturbildung ein, zu denen es im Rahmen des Symposiums eine eindrucksvolle Präsentation gab.

Ein grundlegendes Verständnis der Prozesse in unserer eigenen Galaxie umfasst auch eine genau Kenntnis ihrer morphologischen Struktur und Dynamik. Seit jeher gibt es jedoch bei der Erforschung unseres Milchstraßensystems ein Problem: Wir sind ein Teil der Galaxis und haben einen schlechten Standort, um uns einen Überblick zu verschaffen. Zudem verwehrt uns der interstellare Staub den Blick in manche Bereiche der Galaxis. Im Minisymposium »The Milky Way« am 31. Mai berichteten Steve Majewski (Virginia Universität), Amina Helmi (Kapteyn Astronomical Institute), Wyn Evans (Cambridge Universität), Rodrigo Ibata (Observatorium Strasbourg), Michael Perryman (ESTEC) und andere über die erzielten und zu erwartenden Fortschritte im Bereich der Kartierung der Milchstraße. Hier wird die Mission GAIA ein neues Tor öffnen, indem sie hochpräzise Astrometrie von schätzungsweise einer Milliarde Sterne ermöglicht. Aber die Erforschung unserer Galaxis hat bereits in den letzten Jahren neue Impulse bekommen. Die Entdeckung neuer Satellitengalaxien und von Gezeitenströmen, die bei der Wechselwirkung von Satellitengalaxien mit dem Milchstraßensystem entstanden sind, hat das Bild von der dynamischen Entwicklung der Galaxis entscheidend verändert und erweitert. Schon seit langem nutzt man zudem die Beobachtung unseres nächsten großen Nachbarn, der Andromedagalaxie (M 31), um mehr über unser eigenes Sternensystem zu erfahren. Zukünftige Beobachtungen werden zunehmend die bisherige Vorstellung prüfen, M 31 sei ein Zwilling unserer Galaxis.

Die vier Minisymposien haben deutlich gezeigt, dass unser Wissen in den letzten Jahren selbst auf den klassischen, lang untersuchten Gebieten förmlich explodiert ist und neue Bereiche den Weg aus der Science Fiction in die echte Wissenschaft geschafft haben. Das MPIA dankt auf diesem Wege noch einmal allen Sprechern für die gelungenen Veranstaltungen, die auch viele auswärtige Zuhörer besucht haben.

Klaus Jäger

V.5 Tagungen, Kolloquien, Workshops

Neben den im vorigen Kapitel näher beschriebenen Minisymposien veranstaltete das MPIA im Jahr 2006 eine ganze Reihe weiterer Tagungen, Kolloquien und Workshops – sowohl am Institut, als auch außerhalb. Im Folgenden beschreiben wir kurz zwei dieser Tagungen, eine vollständige Liste findet sich am Ende des Kapitels.

Zwerggalaxien als astrophysikalische und kosmologische Sonden

Vom 12. bis 17. März trafen sich Astronomen aus der ganzen Welt auf Schloss Ringberg, um über eine wichtige Klasse von Galaxien zu diskutieren: die Zwerggalaxien. Sie sind der häufigste Galaxientyp überhaupt. Das Arbeitstreffen wurde von Fabian Walter (MPIA) und Alberto Bolatto (Universität Berkeley, USA) organisiert und von der Max-Planck-Gesellschaft finanziell unterstützt. Mehr als 50 Wissenschaftler aus Nordamerika, Europa und Australien nahmen daran teil.

Das Forschungsgebiet der Zwerggalaxien entwickelt sich rasch. Das Meeting brachte internationale Fachleute, Beobachter wie Theoretiker, zusammen, um über die jüngsten wissenschaftlichen Ergebnisse zu diskutieren.

Zwerggalaxien eröffnen einzigartige Möglichkeiten, über verschiedene Aspekte der Galaxienentwicklung etwas zu lernen. So haben Studien der Sternenpopulationen in Zwerggalaxien der Lokalen Gruppe es ermöglicht, deren chemische Entwicklung und die Geschichte der Sternentstehung zu ermitteln. Auch die Rolle des interstellaren Mediums wurde in diesem Zusammenhang diskutiert. Nahe Zwerggalaxien sind ideale Laboratorien, um etwa herauszufinden, wie Sterne in einem interstellaren Medium mit geringem Gehalt an schweren Elementen entstehen. Ebenso interessant ist die Frage, wie heftige Sternentstehung das umgebende Medium beeinflusst.

Untersuchungen im einem kosmologischen Kontext haben in unserem Milchstraßensystem und in M 31 eine allgegenwärtige Unterstruktur ergeben. Diese wird darauf zurückgeführt, dass Zwerggalaxien in diese großen Galaxien eintauchen und in ihnen aufgehen – ein weiteres Ergebnis, welches das Bild des hierarchischen

Abb. V.5.1: Die Teilnehmer des Workshops über Zwerggalaxien als astrophysikalische und kosmologische Sonden vor Schloss Ringberg.





Abb. V.5.2: Geselliges Beisammensein und Diskussionen beim Abendessen im Kerzenschein.

Anwachsens der Galaxien durch Verschmelzen und Aufsammeln von Materie unterstützt. Gleichzeitig haben sich jedoch Anzahl, innere Struktur und die Eigenschaften von Zwerggalaxien als die heikelsten Probleme für die Theorie der Galaxienentstehung unter dem Einfluss kalter Dunkler Materie herausgestellt, wie Theoretiker in ihren Vorträgen zum Ausdruck brachten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in den vergangenen Jahren bei dem Studium dieser lichtschwachen Sternsysteme bemerkenswerte Fortschritte gemacht wurden. Hierzu haben die Weltraumteleskope SPITZER, HUBBLE und CHANDRA, aber ebenso die großen bodengebundenen Observatorien beigetragen. Gleichzeitig wurden die Möglichkeiten numerischer und semianalytischer Simulationstechniken erheblich erweitert, mit denen sich Eigenschaften von Zwerggalaxien detailliert vorhersagen lassen. Die Sprecher trugen viele neue Beobachtungsergebnisse vor und arbeiteten wichtige Fragestellung heraus, die in den kommenden Jahren angegangen werden sollen.

Insbesondere ein Punkt wurde auf dem Meeting klar: Wir müssen die Physik der Zwerggalaxien detailliert erforschen, bevor wir versuchen können, die großen Galaxien zu verstehen. Angesichts der nächsten Generation von Instrumenten und Teleskopen steht der Erforschung dieser lichtschwachen Objekte eine leuchtende Zukunft bevor.

Transits extrasolarer Planeten

Vom 25. bis 28. September fand am MPIA ein internationaler Workshop über Transits extrasolarer Planeten statt. Dabei ging es um derzeitige Forschungen und zukünftige Pläne auf diesem Gebiet. Mit 55 Beiträgen von 99 Teilnehmern aus 14 Ländern war er sehr gut besucht. Ein glücklicher Zufall wollte es, dass während des Workshops die Entdeckung von zwei extrasolaren Planeten mit der Transitmethode bekannt gegeben wur-

de. Cristina Afonso und David Weldrake hatten den Workshop organisiert.

Im vergangenen Jahrzehnt hat sich die Suche nach extrasolaren Planeten als ein bedeutendes Forschungsgebiet der Astronomie etabliert, und es wird vermutlich auch in den kommenden Jahrzehnten eines der aktivsten Wissenschaftsgebiete bleiben. Ein wichtiger Teil dieses gesamten Bereiches ist die Suche nach Transits extrasolarer Planeten. Dieses Forschungsfeld verzeichnet ein steigendes internationales Interesse und entwickelt sich dementsprechend stark weiter, was sich in der Teilnahme von Astronomen aus aller Welt an diesem Workshop äußerte.

Die Suche nach Transits extrasolarer Planeten ist eines der jüngsten und aktivsten Gebiete der modernen Astrophysik. Viele Gruppen in aller Welt entwickeln und nutzen neue Methoden, die speziell dafür vorgesehen sind, die periodischen Lichtwechsel von Sternen, hervorgerufen durch Exoplaneten, nachzuweisen. Die Zukunft ist vielversprechend für die Entdeckung vieler extrasolarer Planeten mit dieser Methode, weswegen auch das MPIA sich hierin zunehmend engagiert.

Aus Planetentransits lassen sich viele Größen ermitteln, wie die Planetenmasse (in Zusammenhang mit Radialgeschwindigkeitsmessungen aus der Doppler-Methode), Radius und Neigung der Bahnebene, und auch Masse und Radius des Zentralsterns. In den vergangenen Jahren konnten mit der Transitmethode 14 jupiterähnliche Planeten nachgewiesen werden, die in sehr geringen Abständen von weniger als 0.05 AE ihren Stern umkreisen. Transitbeobachtungen bieten derzeit die einzige Möglichkeit, den Radius eines Planeten zu messen. Das ist die Stärke dieser Methode und das wesentliche Motiv, sie verstärkt zu nutzen: Der Radius ist deswegen eine entscheidende Größe, weil diese es erlaubt, die Entwicklungs- und Migrationsgeschichte des Planeten zu ermitteln. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, seinen Aufbau und seine Atmosphäre mit Hilfe von Entwicklungsmodellen zu ermitteln.

Der Workshop behandelte mehrere Themen und sollte einen Gesamtüberblick über das Gebiet geben. Insbesondere ging es um Beobachtungsstrategien, Selektionsmethoden für Transits, sowie um den Nachweis und die Charakterisierung der Planeten. Auch wurde über neue Ansätze, Methoden und die Möglichkeiten von Nachbeobachtungen lichtschwacher Sterne mit der Radialgeschwindigkeitsmethode diskutiert – ein Thema, das mit der wachsenden Anzahl von Transitkandidaten an Bedeutung gewinnt.

Ein Thema des Workshops betraf die derzeit verfügbaren Methoden, um extrem genaue Helligkeitsmessungen von Sternen durchzuführen. Auch das Be seitigen von systematischen Trends oder von Wettereffekten, welche die Datenqualität beeinträchtigen, waren wichtige Themen. Ausführlich wurde die Frage diskutiert, wie sich die Transits von Planeten von Helligkeitsvariationen in Doppelsternen unterschieden las-

sen. Dies ist ein bedeutender Punkt, da in derzeitigen Projekten immer mehr Transitkandidaten auftauchen. Auch über die statistische Wahrscheinlichkeit von Transitentdeckungen wurde viel diskutiert. Hierbei wurden Beobachtungsgründe ausgemacht, die dazu führten, dass bislang nur 14 Planeten mit der Transitmethode gefunden wurden.

Zahlreiche bereits laufende und für die Zukunft geplante Surveys und ihre derzeitigen Ergebnisse wurden auf dem Workshop präsentiert. Hierzu zählt auch das Projekt Pan-Planets, an dem das MPIA beteiligt ist. Zusammen mit anderen ultraweiten und tiefen Surveys wird dies die Transitmethode in den kommenden Jahren revolutionieren und voraussichtlich zur Entdeckung von Hunderten neuer extrasolarer Planeten führen. Viele Suchprogramme sind geplant, sowohl in ausgewählten Sternhaufen als auch im galaktischen Feld. Wir sehen zur Zeit nur die Spitze des Transit-Eisberges.

Während des Workshops wurde die Entdeckung von zwei neuen Exoplaneten, WASP-1 und 2, bekannt gegeben, nicht einmal einen Tag später waren deren Radien genau vermessen. Zum Vergnügen der

Teilnehmer geschah dies während der Live Beobachtung eines Transits, der sich während einer der Sitzungen ereignete.

Sowohl die Beobachtungen als auch die Theorie bekannter extrasolarer Planeten waren gut vertreten. Mehrere Vortragende beschäftigten sich mit dem inneren Aufbau und den Atmosphären der Planeten. Hierbei wurde auch die eindrucksvolle Beobachtung der zweiten Verdunkelung eines Transitplaneten (das Verschwinden des Planeten hinter dem Stern) vorgestellt, die erstmals mit dem Weltraumteleskop SPITZER gelungen war.

Der Workshop war ein lebendiges Forum für die Darstellung des derzeitigen Standes der weltweiten Transitastronomie und sorgte für lange Diskussionen zwischen den Teilnehmern über zukünftige Kollaborationen. Ein unmittelbares Ergebnis bestand in der Vereinbarung, solche Meetings regelmäßig abzuhalten. Nur so können sich die Mitglieder der weltweiten Community in diesem rasch expandierenden Gebiet auf dem Laufenden halten.

Tabelle V.5.1: Alle vom MPIA 2006 organisierten Tagungen

Titel	Veranstaltungsort	Datum
3 rd MPIA Student Workshop	Brixlegg, Österreich	18. – 22 Februar
Planet Formation and Evolution Studies: Various Approaches – One Goal	MPIA	1. – 3. März
Dwarf Galaxies as Astrophysical and Cosmological Probes	Schloss Ringberg	12. – 17. März
“Carbon in Space”	Villa Vigoni, Como	22. – 25. Mai
Highlights in Astrochemistry and Astrobiology	MPIA	29. Mai
The Milky Way	MPIA	31. Mai
Star Formation from Galactic to Cosmological Scales	MPIA	10. Juli
EPoS 2006 – The Early Phase of Star Formation	Schloss Ringberg	28. August – 1. Sept.
From Dust to Planetesimals	Schloss Ringberg	11. – 15. September
Transiting Extrasolar Planets	MPIA	25. – 28. September
IMPRS Summer School “Physics of the Interstellar Medium”	Heidelberg	25. – 29. September
Extrasolar Planet Searches	MPIA	11. Oktober
Planets Network Meeting	MPIA	26. – 27. Oktober
“EU PLANETS: The Next Generation”		
The Formation of Low-Mass Protostars and Proto-Brown Dwarfs	Pasadena	7. November
GEMS/StAGES Collaboration Meeting	MPIA	29. November – 1. Dez.
9 th MHD-Days 2006	MPIA	4. – 5. Dezember

V.6 Höhepunkte der Öffentlichkeitsarbeit

Auch in diesem Jahr gab es am MPIA wieder zahlreiche Projekte und Aktivitäten, um die Forschung des Instituts einem breiteren Publikum, und ganz gezielt Schülern und Studenten näher zu bringen. Dank der Faszination, die unser Fach auf alle Menschen ausübt, sind wir durchaus vom Erfolg verwöhnt. Doch bei zwei Veranstaltungen wurden unsere Erwartungen wieder einmal deutlich übertroffen.

Das Engagement des MPIA in der Öffentlichkeitsarbeit umfasste auch 2006 wieder einen bunten Strauß an Aktivitäten. Ob bei auswärtigen Vorträgen in Planetarien, bei Vereinen und anderen öffentlichen Veranstaltungen, oder bei hauseigenen Führungen (2006 36 Führungen mit 840 Gästen) für prominente Delegationen oder Gäste aus Schulen, Firmen, Instituten und Universitäten – stets war die Resonanz äußerst erfreulich. Dies galt auch wieder für spezielle Schülerpraktika wie Girls' Day oder BOGY, die in gewisser Weise eine Lücke zwischen klassischer Öffentlichkeitsarbeit und reiner Ausbildung schließen.

Neben der im Hause produzierten Zeitschrift *Sterne und Weltraum* trugen vor allem die Pressemitteilungen und der Jahresbericht wieder erfolgreich dazu bei, dass das Institut bei unterschiedlichen Zielgruppen in der

Abb. V.6.1: Girls' Day: Monica Ebert, unsere Kollegin aus der Konstruktionsabteilung, erklärt den sichtlich begeisterten Mädchen ihre Arbeit.

Öffentlichkeit und in den Medien wahrgenommen wurde. 2006 wurden auch die Aktualisierung unseres Faltblatts zur Information der Besucher und die Neugestaltung des Internetauftritts durchgeführt. Auch das Kuratorium zeigte sich in seiner Sitzung im September beeindruckt und bescheinigte dem Institut ein gutes Konzept, mit dem es gelingt, öffentlich präsent zu sein, ohne damit die Kernaufgaben des Instituts einzuschränken.

Neben diesen ständigen Aktivitäten beteiligt sich das MPIA auch an größeren überregionalen Events und Ausstellungen und organisiert gelegentlich besondere Veranstaltungen wie den Tag der offenen Tür. Aus dem Jahr 2006 werden uns zwei spezielle, unerwartet erfolgreiche Veranstaltungen in Erinnerung bleiben: die Lange Nacht der Museen und unsere neue Vortragsreihe Astronomie am Sonntagvormittag.

Die Lange Nacht der Museen

»Von unseren Tagen der offenen Tür wissen wir, dass Tausende von Menschen lebhaftes Interesse an der Astronomie zeigen. Angesichts der vielseitigen Alternativen bin ich jedoch positiv überrascht, dass so viele Besucher den zeitaufwändigen Weg auf den Königstuhl nicht gescheut haben. Wir mussten im Interesse der Besucher zwischenzeitlich die Organisatoren der Langen Nacht bitten, die Verkehrsanbindung zum Institut zu unterbrechen, weil der Andrang nicht mehr





Abb. V.6.2: Auch die Experimente bei der »Kälteshow« kamen bei den Mädchen gut an.

Abb. V.6.3: Einige Kinder haben bei der Langen Nacht der Museen ihre Eindrücke in kleinen Bildern dargestellt.

zu bewältigen war.« Dieser eher nüchtern gehaltene Auszug aus einem Interview der Rhein-Neckar-Zeitung gibt nur sehr vage die Dramatik der Ereignisse wieder, die in der Langen Nacht der Museen am MPIA abliefen. Der Begriff Ausnahmezustand kennzeichnet die Lage treffender.





Abb. V.6.3: Drangvolle Enge im MPIA während der Langen Nacht der Museen.

Seit vielen Jahren findet jährlich in der Rhein-Neckar-Metropolregion die Lange Nacht der Museen statt. Auch am 18. März 2006 öffneten wieder mehr als hundert kulturelle Einrichtungen in Heidelberg, Mannheim und Ludwigshafen ihre Pforten, vor allem Museen, aber auch wissenschaftliche Institute.

Diesmal bot auch das MPIA ein kleines Programm mit Filmvorführungen, Vorträgen, Führungen am Teleskop und einigen Experimenten an. Speziell für Kinder und Jugendliche wurde gemeinsam mit der Astronomieschule der benachbarten Landessternwarte Heidelberg ein gesondertes Programm geschaffen.

Klein aber fein – nach diesem Motto sollte die Veranstaltung laufen. Weil der letzte Tag der offenen Tür mit mehr als fünftausend Besuchern erst ein halbes Jahr zurück lag, konnte (und sollte) der Aufwand überschaubar bleiben, zumal da der nächtliche und zeitraubende Weg auf den Königstuhl und die zahlreichen und leicht erreichbaren alternativen Veranstaltungen kaum größere Besucherströme erwartet ließ. Doch es kam anders.

Bereits um 17 Uhr, also eine Stunde vor Beginn der »Langen Nacht«, bildete sich vor dem Institutseingang eine unübersehbare Schlange, und etwa zwei Stunden später musste etwas unternommen werden, um den Besucherstrom sofort zu stoppen: Jeder im Institut zugängliche Bereich war durch die Menschenmassen völlig überfüllt. Es wurde daher veranlasst, dass die

im Zehn-Minuten-Takt verkehrende Busverbindung zwischen der Heidelberger Innenstadt und dem MPIA bis 22Uhr nur Gäste vom Königstuhl ins Tal zurückbringt. Die Heidelberger Bergbahn brachte ebenfalls keine Besucher mehr auf den Berg: Auch an der Talstation hatte sich eine lange Schlange gebildet.

Die Begeisterung kannte keine Grenzen. Der Hörsaal war bei den Vorträgen bis weit nach Mitternacht überfüllt, so dass kurzfristig Zusatzvorträge in einem kleineren Hörsaal ins Programm genommen werden mussten, um den Wissensdurst der Besucher zu stillen. Die Besucher nahmen ohne zu murren lange Wartezeiten hin und riskierten damit, andere Veranstaltungen der Langen Nacht zu verpassen. Dennoch blieben die meisten Menschen auf dem Königstuhl. Selbst um drei Uhr nachts ließen sich die Besucher nicht davon abschrecken, vor der Kuppel des 70-cm-Teleskops noch auf eine Führung zu warten. »Dann laufen wir eben zu Fuß nach Heidelberg«, so die Antwort eines Besuchers auf die dringende Bitte, doch die letzte Fahrelegenheit mit den Bussen zu nutzen.

Insgesamt waren in dieser Nacht 3000 bis 4000 Besucher auf den Königstuhl gekommen. Dank der Disziplin der Gäste, der professionellen Hilfe des für die Veranstaltung engagierten Sicherheitsdienstes und insbesondere dank des Engagements des kleinen Teams aus Studenten und Mitarbeitern des MPIA verlief die Veranstaltung harmonisch, trotz des Gedränges kam es zu keinen unangenehmen Zwischenfällen. Fazit: Alle Mitarbeiter waren am Ende dieser wirklich langen Nacht erschöpft, aber glücklich.

Astronomie am Sonntag Vormittag

Schon seit einiger Zeit gab es am MPIA die Idee, eine öffentliche Vortragsreihe durchzuführen, in der Wissenschaftler des Instituts auf einfache, allgemeinverständliche Weise Themen aus unserer Forschung am MPIA im Kontext der heutigen Astronomie präsentieren. Diese Reihe sollte während der Sommermonate am Sonntag Vormittag stattfinden und den Besuchern Gelegenheit bieten, einen anregenden Vortrag mit einem Sonntagsspaziergang auf dem als Ausflugsziel beliebten Königstuhl zu verbinden.

Aufgrund der enormen Publikumsresonanz während der Langen Nacht und bei dem Tag der Offenen Tür im Herbst 2005 schien es jedoch ratsam, den Zustrom der Besucher von vorn herein zu kontrollieren und zu begrenzen. Zu diesem Zweck wurde in der Heidel-

berger Innenstadt ein angemessenes Kontingent an Eintrittskarten verkauft.

Auch hier wurden die vereinzelt im Vorfeld geäußerten Bedenken, das Interesse könnte aufgrund der Anfahrt und des Zeitpunktes eher gering sein, gleich von Beginn an zerstreut. Als Hans-Walter Rix am 11. Juni die Reihe mit seinem Vortrag über Schwarze Löcher eröffnete, konnte man bereits ahnen, dass auch diese Veranstaltung durchgehend ein Erfolg werden würde. Tatsächlich war der Hörsaal stets mit etwa hundert Hörern voll besetzt – selbst bei schlechtem Wetter ohne Aussicht auf einen angenehmen Spaziergang auf dem Heidelberger Hausberg. Nach acht Vorträgen über Planeten, Sterne, Galaxien, weltraumgestützte Astronomie und mögliches Leben im Universum wurde die erste Staffel der Sonntagsvortragsreihe erfolgreich beendet. Sie soll deshalb im Jahr 2007 eine Neuauflage erfahren.

Klaus Jäger

V.7 Ernst-Patzer-Preis für Vernesa Smolcic und Catherine Heymans

Der Ernst-Patzer-Preis zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses finanziert sich aus der Wissenschaftlichen Ernst-Patzer-Stiftung, welche die Witwe des Philosophen und Kunstliebhabers Ernst Patzer eingerichtet hat. Diese Stiftung hat sich zum Ziel gesetzt, Wissenschaft und Forschung vornehmlich auf dem Gebiet der Astronomie zu fördern und zu unterstützen. Sie vergibt ihre Förderpreise an junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am MPIA. Ausgezeichnet werden die besten referierten Veröffentlichungen eines Nachwuchswissenschaftlers bzw. einer Nachwuchswissenschaftlerin während der Promotions- und/oder der Postdoc-Phase am MPIA. Die Begutachtung der eingereichten Vorschläge erfolgt durch ein eigens hierfür eingesetztes Auswahlgremium, das sich aus zwei Wissenschaftlern des MPIA sowie einem externen Wissenschaftler zusammensetzt. Die zwei Laureaten des Jahres 2006 erhielten jeweils 2000 Euro.

Vernesa Smolcic studierte in Zagreb, Kroatien. Im Jahre 2004 kam sie als Doktorandin ans MPIA und ist zudem Studentin an der International Max Planck Research School (IMPRS). 2006 erhielt Sie den Patzer-Preis für die beste referierte Veröffentlichung eines Doktoranden/ einer Doktorandin des Instituts. Im Rahmen einer inter-

nationalen Kollaboration beschreibt Smolcic in dieser Veröffentlichung eine »Kaulquappen-Galaxie«, die in dem großen COSMOS-Feld entdeckt wurde. Diese Galaxie mit der Bezeichnung CWAT-01 besitzt zwei Radiojets mit 685 000 und 520 000 Lichtjahren Länge, die bogenförmig im Winkel von 100 Grad abknicken. Aufnahmen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE zeigten, dass es sich um eine elliptische Galaxie handelt. Mit Hilfe hydrodynamischer Modelle fanden Smolcic und Mitarbeiter heraus, dass die abknickenden Jets dadurch entstanden sind, dass sich die Galaxie mit 300 bis 550 km/s relativ zum intergalaktischen Gas bewegt. Für Galaxien in relixierten Haufen ist diese Geschwindigkeit ungewöhnlich hoch. Weitere Untersuchungen im Röntgenbereich offenbarten dann, dass CWAT-01 zu einem Galaxienhaufen gehört, der vor unseren Augen mit einem anderen zusammenstößt. Zudem gibt es unweit davon mindestens zwei weitere Galaxienhaufen. Diese gesamte Gruppe ist Teil einer noch größeren Struktur. Vermutlich werden die Astronomen hier Zeuge, wie mehrere kleinere Galaxienhaufen zu einem Riesenhaufen verschmelzen, der am Ende etwa ein Fünftel der Masse des Coma-Galaxienhaufens besitzen wird.

Catherine Heymans studierte in Großbritannien und erlangte ihren Doktortitel an der Universität Oxford.

Abb. V.7.1: Vernesa Smolcic



Abb. V.7.2: Catherine Heymans mit ihrer Tochter Molly



Im Jahre 2003 kam sie als Postdoc ans MPIA, wo sie sich vornehmlich im Rahmen des Projekts GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and Spectral Energy Distribution) mit der Entwicklung von Galaxien beschäftigte. Ihr Hauptanliegen gilt jedoch dem schwachen Gravitationslinsen-Effekt, der sich in den vergangenen Jahren zu einem neuen Instrument zur Untersuchung der Dunklen Materie entwickelt hat. Ihre mit dem Patzer-Preis ausgezeichnete Arbeit führte Catherine Heymans im Rahmen des Shear Testing Programme (STEP) durch. Das ist ein internationales Projekt zur verbesserten Analyse derzeitiger und vor allem zukünftiger Himmelsdurchmusterungen. Hierzu wurde im

Computer eine tiefe Himmelsaufnahme simuliert, wie sie ein bodengebundenes Teleskop erstellen kann. Auf diese Aufnahme wurden unterschiedliche Verfahren zur Analyse des darin enthaltenen schwachen Gravitationslinseneffekts angewandt und miteinander verglichen. Dabei traten Kalibrationsunsicherheiten zutage, unter denen alle Methoden mehr oder weniger leiden. Dennoch, so ein erstes Ergebnis, sollte es möglich sein, die vom schwachen Gravitationslinseneffekt hervorgerufenen Verzerrungen der Galaxienbilder bis auf einige Prozent genau zu bestimmen. Catherine Heymans setzt ihre Forschungen mittlerweile im Rahmen des STEP-Projekts an der University of British Columbia in Kanada fort.

V.8 Das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg

– neue Perspektiven für die Forschung

Ein Gespräch mit Joachim Wambsganß, dem geschäftsführenden Direktor des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg, und Matthias Bartelmann, dem Dekan der Fakultät für Physik und Astronomie.

Am 1. Januar 2005 wurde offiziell das »Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg« (ZAH) gegründet. Drei astronomische Institute mit insgesamt etwa 150 Mitarbeitern haben sich zu dieser neuen Einrichtungen zusammengeschlossen: das Astronomische Rechen-Institut (ARI) und die Landessternwarte Königstuhl (LSW), die als Landesinstitute bislang unmittelbar dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst unterstanden, sowie das Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg (ITA). Damit war der entscheidende Schritt vollzogen, die astronomischen Forschungskapazitäten außerhalb der Max-Planck-Gesellschaft in Heidelberg zu bündeln, mit dem Ziel, das ZAH zu einer langfristig wettbewerbsfähigen Forschungseinrichtung zu machen. Dadurch, und durch eine enge Zusammenarbeit zwischen dem ZAH und den

Max-Planck-Instituten für Astronomie und für Kernphysik, haben sich die Heidelberger Astronomen in Deutschland eine Spitzenposition erobert. Auch im internationalen Vergleich hat die Heidelberger Astronomie damit an Boden gewonnen. Anlässlich der Eröffnung des ZAH sagte der baden-württembergische Wissenschaftsminister Peter Frankenberg: »An der Universität Heidelberg wird das Potenzial geschaffen, über einen wissenschaftlichen Kristallisierungspunkt und mit der notwendigen kritischen Masse die Ressourcen so weit zu bündeln, dass die Heidelberger Astronomie in Deutschland dauerhaft an der Spitze stehen kann.« Das ZAH arbeitet in Lehre und Forschung eng mit der Fakultät für Physik und Astronomie und mit den astronomisch orientierten Max-Planck-Instituten in Heidelberg zusammen. Diese durch einen gemeinsamen Sonderforschungsbereich bereits gut etablierte Kooperation erhält weiteren Auftrieb durch die in Heidelberg bestehende International Max Planck Research School for Astronomy and Cosmic Physics (IMPRS).

Frage: Wie ist die Idee entstanden, die drei astronomischen Institute zu vereinen?

Joachim Wambsganß: Die Idee geht auf das Jahr 1997 zurück, als die Landesregierung alle astronomischen Institute in Baden-Württemberg evaluieren ließ. Aktuell wurde sie, als die nahezu gleichzeitigen Emeritierungen

Abb. V.8.3: Sehen die Astronomie in Heidelberg auf gutem Weg: Matthias Bartelmann, Dekan der Fakultät für Physik und Astronomie, und Joachim Wambsganß, geschäftsführender Direktor des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg.



der beiden Direktoren Prof. Roland Wielen vom ARI und Prof. Immo Appenzeller von der LSW in den Jahren 2004 und 2005 ins Blickfeld gerieten. Schon bei meinen Berufungsverhandlungen auf die Nachfolge von Herrn Wielen war die mögliche Zusammenlegung der Institute ein wichtiges Thema.

Waren die Pläne für diese Fusion bereits konkret?

JW: Nein, es wurden zunächst verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Eigenständigkeiten der Institute diskutiert. Schließlich kam vom Ministerium der Vorschlag, alle drei Institute in einem solchen Zentrum zu vereinen und in die Universität zu integrieren.

Wie standen Sie zu diesem Vorschlag?

JW: Mir erschien diese Variante sinnvoll. Wichtig war mir dabei allerdings, dass der Astronomie keine Stellen verloren gehen durften. Keines der drei Institute dürfe als »Stellen-Steinbruch« für die Universität verwendet werden. Im Übrigen musste auch die Fakultät erst noch von diesem Konzept überzeugt werden. Aber in mehreren Gesprächsrunden gelang auch das.

Ist das ZAH vollständig in die Fakultät integriert?

JW: Das ZAH ist direkt dem Rektor unterstellt und damit kein Fakultätsinstitut. Aber alle Professoren und sonstigen Wissenschaftler des ZAH gehören der Fakultät für Physik und Astronomie an.

Matthias Bartelmann: Die Tatsache, dass das ZAH kein Fakultätsinstitut ist, verleiht uns teilweise mehr Bewegungsfreiheit als einem Fakultätsinstitut zu kommt.

Ist diese Lösung zum Vorteile aller?

JW: Ich denke, dass alle davon profitieren, sowohl die drei Institute als auch die Fakultät. Für relativ kleine Landesinstitute, wie es LSW und ARI waren, besteht immer die Gefahr der Schließung. Bereits bei den Verhandlungen im Jahre 2004 sagte ich, dass die Lösung als ZAH für alle beteiligten Parteien eine günstige sei, sozusagen eine »Win-win-win-win-win-Situation«; davon bin ich auch heute noch überzeugt.

Die Existenz des ZAH ist zunächst nur befristet?

JW: In der Zielvereinbarung zwischen Land und Universität ist festgelegt, dass es nach fünf Jahren eine Evaluierung geben wird. Dann wird man sehen, ob das Modell erfolgreich ist.

MB: Ich sehe dieser Evaluierung gelassen entgegen. Die Zusammenarbeit der Astronomen aus den ehemaligen

drei Instituten ist viel besser geworden, und wir haben große Forschungsprojekte bekommen, zum Beispiel den SFB/Transregio 33 »Das dunkle Universum«. Und kürzlich haben wir einen Antrag auf einen Exzellenzcluster gestellt. Außerdem haben wir eine Graduiertenschule für fundamentale Physik bekommen, zu der die IMPRS gehört. Deren Koordination liegt beim MPIA, aber möglich ist sie nur in Zusammenarbeit mit der Universität, d.h. mit dem ZAH und der Fakultät.

Auf die Kooperation mit dem MPIA kommen wir später noch einmal zu sprechen. Zunächst die Frage: Welche Folgen hatte bislang die Gründung des ZAH?

JW: Zunächst einmal ist der Kontakt der Mitarbeiter untereinander viel besser geworden. In naher Zukunft werden die Institute auch räumlich zusammengeführt. Es ist geplant, das ITA, das ARI und einen Teil der Theoretischen Physik gemeinsam im Gebäude des Physikalischen Instituts, Philosophenweg 12, unterzubringen. Sobald das Physikalische Institut in einen Neubau im Neuenheimer Feld umzieht, werden wir einen Teil der theoretischen Physiker und alle Astronomen, mit Ausnahme derer der LSW, unter einem Dach vereint haben. Dann wird es auch nur noch eine Bibliothek und eine Verwaltung geben. Es ist eben doch ein Unterschied, ob der Kollege 20 Minuten entfernt in einem anderen Teil der Stadt arbeitet, oder zwei Türen nebenan. Und die LSW steht in unmittelbarer Nachbarschaft des MPIA.

MB: Darüber hinaus haben wir auch sehr viel Flexibilität gewonnen. Wir können uns bei finanziellen Engpässen leichter gegenseitig aushelfen, gemeinsam über Stellen und vor allem auch über Berufungen entscheiden. Das wäre vorher gar nicht oder nur schwer möglich gewesen.

Die Größe des ZAH ist sicherlich auch ein Vorteil, um gute Leute zu berufen.

MB: Zweifellos. Innerhalb des ZAH haben wir eine große Zahl von Forschungsbereichen. Das war vor der Gründung des ZAH zwar auch der Fall, aber jetzt entscheiden wir gemeinsam, wen wir berufen. Und für den neuen Mitarbeiter ist es wichtig, dass er im ZAH sehr viele Kollegen und viele Austauschmöglichkeiten hat. Gerade haben wir zwei neue Professoren berufen, die wir unbedingt haben wollten. Die wären sehr wahrscheinlich nicht an eines der kleinen Vorläuferinstitute gekommen. Wir haben die kritische Masse überschritten. Das ist ein ganz bedeutender Punkt.

JW: Zwei neue Professorenstellen konnten überhaupt nur durch Umwidmung anderer Stellen im Rahmen der Eingliederung von ARI und LSW in die Universität geschaffen werden. Auf diese Weise haben wir jetzt sieben

Professuren für Astronomie am ZAH. Das ist die größte Zahl an einer Universität in Deutschland.

MB: Die kritische Masse ist ein sehr wichtiger Punkt. Ich selbst zum Beispiel bin als ITA-Mitarbeiter an dem Satellitenprojekt PLANCK beteiligt, das ARI ist bei GAIA und die LSW am LBT stark involviert. Jetzt heißt es, das ZAH arbeitet bei PLANCK, GAIA und LBT mit. Dadurch hat die Universität Heidelberg plötzlich viel mehr Gewicht und Sichtbarkeit, national und international. Und wir haben viel bessere Möglichkeiten, zum Beispiel Emmy-Noether-Nachwuchsgruppen zu bekommen. Das ist ein sehr wichtiges Förderungsinstrument der DFG für junge Wissenschaftler.

JW: Neben diesen greifbaren, quantitativen Aspekten gibt es für mich auch in ideeller Hinsicht eine sehr positive Erfahrung: Die Stimmung ist sehr gut, die Leute verstehen sich ausgezeichnet, diskutieren offen miteinander und ziehen an einem Strang. Für mich ist einer der wichtigsten Aspekte am ZAH, dass die wissenschaftliche Atmosphäre angenehm ist. Ich halte dies für eine Grundvoraussetzung für gute gemeinsame Forschungsarbeit.

MB: Und das betrifft auch wirklich die gesamte Fakultät.

Wie haben die Physiker der Universität auf die Gründung des ZAH reagiert, was hat sich geändert?

MB: Die Beteiligung der Astronomen vom ZAH am Leben der Fakultät haben die Physiker sehr begrüßt. Ich selbst halte Anfängervorlesungen für Theoretische Physik, weil ich wirklich alle Studenten miterleben will, nicht nur die höheren Semester in den Astronomievorlesungen. Jetzt nehmen Astronomen auch an physikalischen Kolloquien teil, betreuen Übungsgruppen, Tutorien und so weiter. All das war vorher nicht der Fall, dies ist eine deutliche Bereicherung für beide Teile, die Astronomen und die Fakultät.

JW: Bei einigen Astronomen bedurfte es anfangs einiger Überzeugungsarbeit, sich an der Grundausbildung der Physikstudenten zu beteiligen. Doch jetzt sind die meisten ganz begeistert bei der Sache.

MB: Auch die Physiker sehen in der Expansion der Astronomie in Heidelberg einen ganz großen Gewinn für die Universität. Bei einer Umfrage unter Studienanfängern kam kürzlich heraus, dass ein Drittel der Physikstudenten ihr Studium hier begonnen haben, weil sie sich für Kosmologie interessieren, ein Drittel kam wegen der Astrophysik und ein Drittel wegen der Quantenphysik nach Heidelberg. Da zeigt sich doch ganz deutlich, welchen Stellenwert Kosmologie und Astrophysik unter jungen Physikern besitzen.



Abb. V.8.2: Das Logo des ZAH.

Die Ausbildung von Studenten und die Verbesserung der Forschung sind also auf einem guten Weg.

JW: Es hat sich vieles verbessert. Für Studierende und Doktoranden sind die Bedingungen und Möglichkeiten hier sehr gut. Der Flaschenhals kommt aber immer noch nach der Promotion. Es gibt kaum Postdoc-Positionen und nach wie vor zu wenige feste Stellen. Alle jungen Leute auf Drittmittelstellen sind gezwungen, sich ständig auf andere Positionen zu bewerben, natürlich auch im Ausland. Sobald sie eine Zusage bekommen, sind sie weg.

Könnten Tenure-track-Positionen helfen?

JW: Gewiss. Ich sehe das als eine Art Dauerstelle mit Probezeit, die aber in 80 bis 90 Prozent der Fälle nach ein paar Jahren in eine feste Stelle umgewandelt wird.

Parallel zur Gründung des ZAH verlief auch eine gründliche Umstellung des Lehrplans.

MB: Ich habe mich dafür eingesetzt und es auch erreicht, dass eine vierstündige Vorlesung über Theoretische Astrophysik eingeführt wird. Die ergänzt die bisherige Einführungsvorlesung in die allgemeine Astronomie. Darüber hinaus haben wir dafür gesorgt, dass ein Kanon von Astrophysikvorlesungen entsteht, der auf der Theoretischen Astrophysik aufbaut. Und schließlich mussten wir den Lehrplan auf das neue Bachelor/Master-System umstellen. Hierfür war es nötig, dass sich die Physiker und Astronomen zusammensetzen und den gesamten Studienplan durchdenken und überlegen: Was ist nötig, was nicht? Eine sehr sinnvolle und nützliche Diskussion. Wir haben Lehrinhalte völlig auseinandergenommen und wieder neu zusammengestellt. Dabei ist zum Beispiel auch herausgekommen, dass es eine Mathematikvorlesung für Physiker geben wird. Ganz wichtig wird auch, dass die theoretische Physik im

Bachelorstudium ab dem ersten Semester gelesen wird, und zwar in Verbindung mit den dafür benötigten mathematischen Methoden. Wer will, kann Astronomie von Anfang an als Nebenfach hören. Und nicht zuletzt wird sich dadurch auch der Studienplan für Lehramtsstudenten ändern. Das war insgesamt eine gewaltige Aufgabe, aber ich denke, wir haben in der Fakultät etwas sehr Sinnvolles geschaffen.

Hat die Gründung des ZAH auch das Verhältnis der Astronomen der drei Vorläuferinstitute auf der einen und derer des MPIA auf der anderen Seite verändert?

JW: Ich denke, das Verhältnis war schon früher sehr gut. Das neue, sehr anregende Klima, das am ZAH herrscht, überträgt sich aber auch positiv auf die Zusammenarbeit mit dem MPIA. Die IMPRS ist ein sehr großer Erfolg, den wir nur gemeinsam erreichen konnten. Außerdem haben wir im Sommer gemeinsam einen Vorantrag für einen Exzellenzcluster mit dem Titel »Heidelberg CASTLE – Cluster of ASTrophysical Excellence« erarbeitet. Das war nur durch die Breite der hier vorhandenen astronomischen Forschung möglich. Die Liste der Hauptantragsteller ist etwa halbe/halbe auf Mitglieder der beiden Heidelberger MPIs und der Universität verteilt.

MB: Seit dem 1. November 2006 läuft bei uns die Graduiertenschule für fundamentale Physik, an der Physiker und Astronomen beteiligt sind. Die Laufzeit ist auf fünf Jahre begrenzt und wird pro Jahr mit einer Million Euro aus der Exzellenzinitiative finanziert. Wir hoffen aber auf eine Anschlussfinanzierung. IMPRS ist ein Teil dieser Graduiertenschule. Sollte unser Antrag auf den Exzellenzcluster genehmigt werden, so bekämen wir 6,5 Millionen Euro pro Jahr dafür. Davon kann man etwa 70 Stellen finanzieren. Das wäre natürlich für uns ein riesiger Gewinn. Dennoch sollte man sich vor Augen halten, dass der gesamte Betrag, der jetzt durch die Exzellenzinitiative an die so erfolgreichen Münchner Universitäten fließt, gerade dem Bibliotheksetat der Harvard-Universität entspricht.

JW: Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die gerade bewilligte DFG-Forschergruppe »Planetenent-

stehung«. An ihr sind das MPIA und die Heidelberger Universität sowie Institute in Tübingen, Braunschweig und Münster beteiligt. Und nicht zu vergessen, der DFG-Sonderforschungsbereich 439 »Galaxien im jungen Universum«.

Können Sie uns einige konkrete Projekte nennen, in denen die enge Kooperation des MPIA mit dem ZAH zum Ausdruck kommt?

JW: Wir haben einige Projekte schon angesprochen. Darüber hinaus ist sicherlich der zukünftige Astrometriesatellit GAIA ein gutes Beispiel. Die deutsche Projektleitung liegt beim ARI, am MPIA beschäftigt man sich mit Fragen der Datenauswertung sowie mit einigen wissenschaftlichen Aspekten. Als erfolgreiche Vorstufe für eine solche Zusammenarbeit kann im Augenblick die gemeinsame wissenschaftliche Arbeit an dem Projekt SDSS-SEGUE betrachtet werden. Bereits erwähnt haben wir das LBT, bei dem die Landessternwarte und das MPIA stark involviert sind. Dann gibt es einige Forschungsbereiche, die institutsübergreifend behandelt werden, zum Beispiel die Suche nach Exoplaneten mit dem Microlensing-Effekt und mit Transits oder das Projekt PanSTARRS-1, bei dem mit gigantischen CCD-Kameras ein großer Teil des Himmels immer wieder durchmustert wird.

MB: Es ist völlig klar: Durch den Zusammenschluss der drei Astronomie-Institute innerhalb der Universität und die engere Kooperation der Mitarbeiter am ZAH und in der Fakultät sind die Möglichkeiten der Wechselwirkung deutlich gestiegen. Gleichzeitig sind wir flexibler beim Verschieben von Sachmitteln und attraktiver beim Anwerben von Studenten, Doktoranden, Postdocs und Professoren geworden. Ich bin sicher, dass wir auf dem richtigen Weg sind. Nach zwei Jahren der Umorganisation und großer Änderungen in der Fakultät wünsche ich mir jetzt allerdings dass etwas Ruhe einkehrt, damit wir uns wieder mehr auf unsere eigentliche Arbeit, nämlich Forschung und Lehre, konzentrieren können.

*Die Fragen stellten
Thomas Bührke und Jakob Staude*

Personal

Direktoren: Henning, Rix (Geschäftsführung)

Wissenschaftlicher Koordinator: Jäger

Öffentlichkeitsarbeit: Staude (Leitung)

Verwaltung: Voss (Leitung)

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Afonso, Bailer-Jones, Barden, Bell, Beuther, Bouwman (ab 1.9.), Brandner, Butler, Cannon (bis 15.4.), Dannerbauer, De Bonis, De Jong, Dullemond, Egner (ab 1.11.), Elias (ab 6.7.), Feldt, Fendt, Fernandez, Fried, Fujita, Gallazzi (ab 1.1.), Gäßler, Gouliermis (ab 1.5.), Graser, Gredel, Herbst, Hippel, Hippler, Hinz (bis 31.5.), Hofferbert, Holmberg, Huisken, Jäger, Jahnke, Jester (ab 1.11.), Klaas, Klahr, Köhler (ab 1.11.), Kornet, Krause, Kurk, Kürster, Kuhlmann, Launhardt, Lenzen, Marien, Mehlert (bis 15.1.), Meisenheimer, Müller, F. (ab 4.4.), Mundt, Nielbock (ab 11.12.), Pavlov, Pitz, Quetz, Re Fiorentin, Röser, Sakelliou, Scheithauer (ab 1.12.), Schinnerer, Schreiber, Semenov, Setiawan, Somerville, Smith K. (ab 1.11.), Staude, Stickel, Stolte (bis 31.3.), Tapken, Tiede (ab 12.6.), van den Bosch, Walter, Wolf, S.

Doktoranden: Arold, Berton (bis 11.12.), Bigiel, Birkmann, Boudreault, Brauer, Cacciato (ab 23.5.), Carmona, Chen, Downing, (ab 1.9.), Debieu, Dettenrieder (ab 1.12.), Egner (bis 31.10.), Ernst (ab 1.10.), Esquivel (ab 1.9.), Fallscheer (16.8.), Falter (bis 31.3.), Franco Rico, Furdiu (1.3. bis 31.5.), Haan, Hanke, Häußler, Heinzeller, Hennemann, Janson, Johansen, Juhasz (ab 1.10.), Klement, Koposov (ab 1.8.), Krmpotic, Kuiper (ab 1.9.), Maulbetsch (ab 1.4.), Mignone, More (ab 1.5.), Neumayer, Nicol, Pedaletti (ab 18.4.), Peter, Quanz, Ratzka, Riechers, Roccatagliata, Rodler, Rodriguez, Schartmann (bis 30.11.), Schegerer, Schütz (bis 28.2.), Skelton (ab 1.10.), Smolcic, Stegmaier, Stumpf, Tam, Tamburro, Tristram, Vasyunin (ab 1.9.), Vasyunina (ab 1.12.), Xue (ab 16.10.), Zatloukal, Zub

Diplomanden und studentische Hilfskräfte (UH): Besel (7.3. bis 31.7.), Fernandes (ab 1.12.), Foltin (ab 1.3.), Hoffmann (ab 1.8.), Hormuth, Koposov (bis 31.7.), Meyer, Moster, Müller, A. (ab 1.11.), Rochau (bis 31.5.), Ruhland (ab 15.4.), Schmidt, J., Schmidt, T., Volchkov, Weise

Diplomanden und Master- Studenten der FH: Priess (ab 1.9.), Roth (bis 31.8.), Stilz (bis 14.8.)

Stipendiaten: Blindert (ab 15.7.), Boekel van, Bouwman (bis 31.7.), Caballero (ab 4.5.), Coleman (ab 1.10.), Dziourkevitch, Fontanot (ab 1.5.), Glaschke (ab 1.9.), Goldmann, Gouliermis (bis 30.4.), Goto, Gustafsson (ab 1.10.), Jester (bis 30.9.), Joergens (ab 18.4.), Kang (ab

15.9.), Khochfar (ab 1.10.) Knudsen, Labadie, Leroy (ab 1.10.), Linz, Maccio (ab 15.12.), Martin (ab 1.10.), Martinez Sansigre (ab 15.9.), Mosoni (ab 1.9.), Pasquali, Pavlyuchenkov, Posch, (1.2. bis 31.3.), Prieto (bis 31.8.), Ratzka (bis 30.11.), Roussel, Rodmann (1.5. bis 31.10.), Sicilia Aguilar, Skibba (ab 1.8.), Staicu, Swain (bis 28.2.), Umbreit (15.2. bis 14.8.), Tubbs (ab 1.11.), Weldrake, Zheng

Praktikanten: Brenner (bis 28.2.), Eggert (bis 28.2.), Feger (15.2. bis 31.8.), Immer (17.7. bis 31.10.), Jakob (bis 31.8.), König (bis 28.2.), Meschke (ab 18.4.), Oberrauner (1.3. bis 31.8.), Salonen (ab 1.9.), Schrödel (ab 1.9.), Stricker (1.3. bis 31.8.)

Technische Abteilungen: Kürster (Leitung)

Konstruktion: Rohloff (Leitung), Baumeister (Stellv.); Ebert, Münch; Auszubildende, Praktikanten, wissenschaftliche Hilfskräfte: Schewtschenko

Feinwerktechnik: Böhm (Leitung), W. Sauer (Stellv.); Heitz, Maurer, Meister, Meixner, Morr, Sauer F. (bis 30.9.), Stadler (ab 28. 2.); Auszubildende, Praktikanten, wissenschaftliche Hilfskräfte: Baumgärtner (bis 26. 2.), Euler, Finzer, Franke (ab 1. 9.), Gärtner, Merx (ab 1. 9.), Sauer F. (bis 26. 2.), Schmitt, Stadler (bis 27. 2.)

Elektronik: Grimm (Leitung), Wagner (Stellv.); Alter, Ehret, Klein, Lehmitz, Mall, Mohr, Ramos, Ridinger, Westermann, Wrhel; Auszubildende, Praktikanten, wissenschaftliche Hilfskräfte: Brenner (bis 28. 2.), Eggert (bis 28. 2.), Jakob (1. 3. bis 31. 8.), König (bis 28. 2.), Oberrauner (1. 3 bis 31. 8.), Priess (ab 1. 9.), Rehbein (bis 31. 5.), Salonen (ab 1. 9.), Schrödel (ab 1.9.), Stricker (1.3. bis 31.8.)

Instrumentierungssoftware / Projekt-EDV: Zimmermann (Leitung), Storz (Stellv.); Berwein, Borelli (ab 1.7.), Briegel, Kittmann (Gast Univ. Köln), Neumann, Leibold, Pavlov, Schmelmer (bis 30. 6.); Auszubildende, Praktikanten, wissenschaftliche Hilfskräfte: Volchkov

Instrumentierung und Projektabwicklung: Marien (Leitung), Kürster (Stellv.); Bizenberger, BRix (ab 1. 3.), De Bonis (Gast Univ. Köln), Egner (ab 1. 11.) Graser, Laun, Naranjo; Auszubildende, Praktikanten, wissenschaftliche Hilfskräfte: Roth (1. 3. bis 31. 8.)

Administrativ-Technische Service-Abteilungen:

Verwaltung: Voss (Leitung); Anders, Apfel, Baier, Beckmann (ab 19.6.), Bock, Gieser, Heißler, Hölscher, Kellermann (bis 30.9.), Papousado (bis 31.12.), Resnikschek (bis 31.7.),

Schleich, Trenkler (ab 19.6.), Zähringer; Auszubildende: J. Zimmermann, (ab 1.10.), K. Zimmermann (ab 1.10.)

EDV-Gruppe: Rauh (Leitung), Richter (Stellv.); Hiller, Piroth (ab 1.10.), Tremmel (bis 31.7.)

Graphikabteilung: Quetz; Meissner, Müllerthann

Bibliothek: Dueck

Fotolabor: Anders

Sekretariate: Bohm, Janssen - Bennynck, Koltes - Al-Zoubi, Seifert

Technischer Dienst und Kantine: Zergiebel (Leitung); F. Witzel (Stellv.); Behnke, Herz, Jung, Lang, Nauss, B. Witzel

Freier Mitarbeiter: Thomas Bührke

Wissenschaftliche Gäste: Andrea Stolte, UCLA (Januar – März); Scott Traeger, Groningen (Januar); Heike Rauer, DLR-PF (Januar); Lennon Rodgers, MIT (Januar); Peter Abraham, Budapest (Januar); Agnes Kospal, Budapest (Januar); Attila Juhasz, Budapest (Januar); Csengeri Timea, Budapest (Januar); Carsten Dominik, Amsterdam (Januar); Annie Zavagno, CEA/Saclay (Januar); Frédérique Motte, CEA/Saclay (Januar); Nikolai Piskunov, Uppsala (Januar); Samuel Regendell, Uppsala (Januar); Susanne Hoefner, Uppsala (Januar); Wladimir Lyra, Uppsala (Januar); Surhud More, Taluka Haveli, India (Februar); Ummi Abbas, Pittsburgh (Februar); Thorsten Lisker, Basel (Februar); Felicitas Mokler, MPE (Februar); Warrick Lawson, New South Wales (Februar); Andrew Dolphin, Steward Observatory, Tucson (Februar); Alejo Martinez Sansigre, Oxford (Februar); Jao Alves, ESO (Februar); Aaron Dutton, ETH Zürich (Februar); Viki Joergens, Sterrewacht Leiden (Februar); Marjin Franx, Sterrewacht Leiden (Februar); Edward Taylor, Sterrewacht Leiden (Februar – März); Henrik Spoon, Cornell University (Februar – März); Henry Lee, Minnesota (März); Ramin Skibba, Univ. of Pittsburgh (März); Kang Xi, Oxford (März); Erwin de Blok, Mt. Stromlo (März); Alberto Bolatto, Univ. California (März); T.J. Cox, Harvard, CfA (März); Ray Jayawardhana, Toronto (März); Jennifer Lotz, NOAO / Tucson (März); Johan Holmberg, Kaeplinge, Sweden (März); Silvia Vicente, Lisboa (März); Elias Brinks, Hertfordshire (März); Erwin de Blok, Mt. Stromlo (März); Jorge Penarrubia, Victoria (März); Robert Tubbs, Arcetri (April); Fabio Fontanot, Trieste (April); Andre Mueller, Jena (April); Leonidas Moustakas, JPL (April); Ignacio Ferreras, King's College (April); Sebastian Höning, MPIfR (April); Greg Rudnick, NOAO/Tucson (April); Miljenko Cemeljic, Athen (April); Dirk Froebrich (April); Aurore Bacmann, Bordeaux (April); David Martinez-Delgado, IAC Tenerife (April); Simone Weinmann, Zürich (April); Antonella Nota, STSci (Mai);

Olivier Marco, ESO (Mai); Szilard Csizmadia, Budapest (Mai); David Martinez-Delgado, IAC Tenerife (Mai); Vasily Belokurov, Cambridge (Mai); Nancy Haegel, NPS, Monterey (Mai); Ioannis Contopoulos, Athen (Mai); Dan Zucker, Cambridge (Mai); Romeel Dave, Steward Observatory, Tucson (Mai); Laszlo Mosoni, Budapest (Mai); Peter Abraham, Budapest (Mai); Romeel Dave, Steward Observatory (Juni – Juli); Lorne Hofstetter, Princeton (Juni); Steve Beckwith, STSci (Juni); Michael Endl, Austin (Juni); Arjan Verhoef, Amsterdam (Juni); Christiaan Boersma, Amsterdam (Juni); Buell Jannuzzi, NOAO (Juni); Victor Debahista, Washington (Juni); Artur Gawryszczak, Warschau (Juni); Jeff Olshi, American Museum of Nat. History (Juni); Mansur Ibrahimov, Uzbekistan Academy of Sciences (Juni); William Herbst, Wesleyan University (Juni); Christopher Johns-Krull, Rice University (Juni); Catrina Hamilton-Drager, Mount Holyoke College (Juni); Jeremy Tinker, Chicago (Juni); James Pizagno, Ohio State University (Juni); Richard Wünsch, Prag (Juli); Veronica Castellanos, Univ. Mexico (Juli – August); Juan A. Fernandez, IAC, Tenerife (Juli); David Hogg, New York (Juli); Matilde Fernandez, IAA-CSIC, Granada (Juli); Alejandro Quintero, New York (Juli); Davide Fedele, ESO (Juli); Dan Maoz, Tel Aviv (Juli); Kelly Foyle, Queens Univ. Canada (Juli); Andrea Maccio, Zürich (Juli); Ken-Ichi Nishikawa, Nat. Space Sci. Technol. Center (Juli); Yosuke Mizuno, Nat. Space Sci. Technol. Center (Juli); Chien Peng, STSci (Juli); Sandra Faber, Santa Cruz (Juli); Jochen Eislöffel, Tautenburg (Juli); Ettore Predetti, Univ. Michigan (Juli); Steve Beckwith, STSci (Juli); Phillip Hopkins, Harvard (Juli); Jeff Meissner, Leiden (Juli); Christian Wolf, Oxford (Juli); Ilaria Pascucci, Steward Observatory (Juli); Daniel Apai, Steward Observatory (Juli – August); Scott Traeger (Juli); Kerstin Meyer-Ross, MPI Computational Science (Juli – August); Mahdi Bazarghan, IUCAA (Juli – August); Carol Grady, GSFC Greenbelt (Juli – August); Dan McIntosh, Univ. of Massachusetts (Juli – August); Julianne Dalcanton, Washington (August – September); Peter Schuller, Harvard (August); Aurore Bacmann, Bordeaux (August); Joe Shields, Ohio State Univ. (August); Olga Ines Pintado, CONIZZAT (August); Warrick Lawson, New South Wales (August); Jakob Walcher, Obs. Astron. de Marseille-Provence (August); Eric Keto, Cambridge (August); Jürgen Ott, ATNF, ATCA (August); Torsten Boeker, ESA, Noordwijk (August); Hongchi Wang, Nanjing (August – September); Telemachos Mouschovias, Chicago (August – September); Ofer Biham, Jerusalem (September); Frankreichsco Shankar, Ohio State Univ. (September); Savvas Koushiappas, Los Alamos (September); Aaron Dutton, ETH Zürich (September); Sophia Lianou, Athen (September); Mansur Ibrahimov, Uzbekistan Acad. of Sciences (September); Andrew Youdin, Princeton (September); Witold Maciejewski, Oxford (September); Takashi Kozasa (September – Oktober); Anja Andersen, Copenhagen (September – Oktober); Abhay Karnataki, Bangalore (Oktober); Siegfried Falter, Köln (Oktober); Patrick Jonsson, Santa Cruz (Oktober); Peter Abraham, Budapest (Oktober); Swara Ravindranath, Center

for Astrophysics, India (Oktober); Peter Abraham, Budapest (Oktober); Daniel Bayliss, Mount Stromlo (Oktober); Kai Noeske, Santa Cruz (Oktober); Gary Da Costa, Mount Stromlo (Oktober); Gaelle Dumas, Liverpool (Oktober); Carole Mundell, Liverpool (Oktober); Paolo Ciliegi, INAF (Oktober); Marco Bondi, INAF (Oktober); Andrey Sobolev, Ural State Univ. (November); Dmitri Vibe, Moskau (November); Marco Scodeggi, Mailand (November); Riccardo Coratella, Rom (November); Chien Peng, STScI (November); Dan Zucker, IoA Cambridge (November); Vivi Tislamantza, Athen (November – Dezember); Eric Emsellem, CRAL (November – Dezember); Steve Beckwith, STScI (November – Dezember); Wladimir Lyra, Uppsala (Dezember); Elena Sabbi, STScI (Dezember); Antonella Nota, ESA/STScI, (Dezember); Michael Smith, Univ. Kent (Dezember); Erwin de Blok, Canberra (Dezember); Elias Brinks, Hertfordshire (Dezember); Marjin Franx, Leiden (Dezember); Eduard Westra, Res. School Astron.& Astrophys, ANU (Dezember); Jorge Penarrubia, University of Victoria (Dezember); Conchi Cardenas, IAA Granada (Dezember); Marcos Ubierna, IAA Granada (Dezember); Thorsten Ratzka, AIP Potsdam (Dezember)

Dziourkevitch, Ovidiu Furdui, Patrick Glaschke, Anders Johansen, Rolf Kuiper, Stefan Umbreit

Laborastrophysik: Friedrich Huisken (Leitung), Marco Arold, Olivier Debieu, Cornelia Jäger, Gael Rouillé, Angela Staicu

Interferometriezentrum FRINGE: Thomas Henning (Leitung), Uwe Graser, Ralf Launhardt, Thorsten Ratzka, Jürgen Steinacker

Adaptive Optik: Wolfgang Brandner (Leitung), Alessandro Berton, David Butler, Fulvio De Bonis, Markus Feldt, Dimitrios Gouliermis, Stefan Hippler, Felix Hormuth, Micaela Stumpf

Emmy-Noether-Gruppe I (»Entwicklung zirkumstellarer Staubscheiben zu Planetensystemen«): Sebastian Wolf (Leitung), Kacper Kornet, Alexander Schegerer

Emmy-Noether-Gruppe II (»Entstehung und Eigenschaften substellarer Objekte«): Coryn Bailer-Jones (Leitung), Steve Boudreault, Paola Re Fiorentin

Emmy-Noether-Gruppe III (»Entstehung massereicher Sterne«): Hendrik Beuther (Leitung), Cassandra Fallscheer, Javier Rodon

MPG – Nachwuchsgruppe: Cornelis Dullemond (Leitung, Gruppe im Aufbau)

Sonderprogramm zur Förderung hervorragender Wissenschaftlerinnen: Cristina Afonso (Leitung, Gruppe im Aufbau)

Abteilung Galaxien und Kosmologie

Direktor: Hans - Walter Rix

Structure and Dynamics of Galaxies: Hans - Walter Rix (Leitung), Josef Fried, Matthew Coleman, Jelte De Jong, Anna Pasquali, Nicolas Martin, Rainer Klement, Nadine Neumayer, Domenico Tamburro, Sergey Koposov, Xiangxiang Xue; Coryn Bailer-Jones (GAIA Projekt-Gruppe, Leitung), Johan Holmberg, Carola Tiede, Paola Re Fiorentin

Sternpopulation und Sternentstehung: Fabian Walter (Leitung), Ioannis Bagetakos, Frank Bigiel, John Cannon, Kirsten Kraiberg Knudsen, Adam Leroy, Dominik Riechers, Hélène Roussel; Thomas Herbst (Leitung), Maiken Gustafsson, Lucas Labadie

Galaxienentwicklung und Kosmologie: Eric Bell (Emmy-Noether-Gruppe »Massive Galaxy Evolution«, Leitung), Marco Barden, Isabel Franco, Dörte Mehlert, Xianzhong Zheng, Anna Gallazzi, Rosalind Skelton, Aday Robaina, Boris Häußler; Klaus Meisenheimer (Leitung), Hermann-

Arbeitsgruppen

Abteilung Stern- und Planetenentstehung

Direktor: Thomas Henning

Infrarot – Weltraum – Astronomie: Oliver Krause / Dietrich Lemke (Leitung), Stephan Birkmann, Thomas Blümchen, Jeroen Bouwman, Helmut Dannerbauer, Ulrich Grözinger, Martin Hennemann, Jörn Hinz, Ralph Hofferbert, Armin Huber, Ulrich Klaas, Ernest Krmpotic, Sven Kuhlmann, Friedrich Müller, Markus Nielbock, Silvia Scheithauer, Jürgen Schreiber, Christian Schwab, Jutta Stegmaier, Manfred Stickel

Sternentstehung: Thomas Henning (Leitung), Aurora Aguilar Sicilia, David Butler, Andrés Carmona, Xuepeng Chen, Markus Feldt, Miwa Goto, Attila Juhasz, Ralf Launhardt, Rainer Lenzen, Hendrik Linz, Laszlo Mosoni, Yaroslav Pavlyuchenkov, Diethard Peter, Sascha Quanz, Thorsten Ratzka, Veronica Roccagliati, Dmitri Semenov, Mark Swain, Robert Tubbs, Roy van Boekel, Antonin Vasyunin

Braune Zwerge / Exoplaneten: Reinhard Mundt, (Leitung), Cristina Afonso, Alessandro Berton, José Caballero, Wolfgang Brandner, Matilde Fernandez, Kerstin Geißler, Bertrand Goldmann, Markus Janson, Viki Joergens, Florian Rodler, Jens Rodmann, Victoria Rodriguez Ledesma, Johny Setiawan, David Weldrake

Theorie (SP): Hubertus Klahr (Leitung), Frithjof Brauer, Frank Dettenrieder, Cornelis Dullemond, Natalia

Josef Röser, Hans Hippelein, Siegfried Falter, Irini Sakelliou, Kris Blindert, Isabel Franco, Hélène Nicol, Michael Zatloukal

Aktive Galaxiekerne: Klaus Meisenheimer (Leitung), Christian Fendt, Sebastian Jester, Almudena Prieto, Marc Schartmann, Konrad Tristram; Eva Schinnerer (Sonderprogramm zur Förderung hervorragender Wissenschaftlerinnen, Leitung), Sebastian Haan, Knud Jahnke, Alejo Martinez Sansigre, Vernes Smolcic

Theorie der Galaxienentstehung und großräumiger Struktur: Rachel Somerville (Leitung), Fabio Fontanot, Akimi Fujita, Andrea Maccio, Christian Maulbetsch; Frank van den Bosch (Selbstständige Nachwuchsgruppe, Leitung) Marcello Cacciato, Xi Kang, Surhud More, Ramin Skibba

Instrumentierung: Thomas Herbst (Leitung), Hermann-Josef Röser, Josef Fried, Wolfgang Gäßler, Sebastian Egner, Stefan Hanke, Lucas Labadie, Eva Meyer

Zusammenarbeit mit Firmen

4D electronic GmbH, Bretten
ABB (ehem. Hartmann + Braun),
Alzenau
ADR, Paris
Advanced Office Deutschland GmbH,
Bochum
Agilent Technologies, Böblingen
Almet-AMB, Mannheim
Alternate, Linden
Althen GmbH, Kelkheim/Ts.
America II OPE GmbH,
Mönchengladbach
Amphenol-Tuchel Electronics,
Heilbronn
Angst+Pfister, Mörfelden
APE Elektronik, Kuppenheim
Arthur Henninger, Karlsruhe
ASKnet AXSYS, Karlsruhe
Auer Paul GmbH, Mannheim
Axsys Technologies, Rochester
Hills
bacuplast GmbH, Remscheid-
Lüttringhausen
baier Digitaldruck, Heidelberg
Barth, Leimen
Bechtle, Neckarsulm
Bectronic GmbH, Derschen
Best Power Technology, Erlangen
Beta Layout, Arbergen
Beuth Verlag GmbH, Berlin
Bieri Engineering, Winterthur
Binder Elektronik GmbH, Sinsheim
Binder Magnete, Villingen-
Schwenningen
Blässinger, Stuttgart
Bohnenstiel, Heidelberg
Böllhoff GmbH, Winnenden
Börsig, Neckarsulm
Bubenzer Bremsen, Kirchen-
Wehrbach

Buerma Werner Machauer KG,
Stuttgart
BueroMix, Mannheim
Bürklin OHG, München
Cancom, Bad Homburg
CAB, Karlsruhe
CAP, CNC+Coating Technik, Zell.
a. H.
Cadillac-Plastic, Viernheim
CAM-Center GmbH, Nidderau
Carl Roth, Karlsruhe
Carl Zeiss, 3D Automation GmbH,
Essingen bei Aalen
Carl Zeiss, Optronics GmbH,
Oberkochen
Caspar Gleitlager GmbH, Flein
Cherry Mikroschalter, Auerbach
Christiani, Konstanz
C&K Components, Neuried b.
München
Coating-Plast, Schriesheim
Com Pro, Stuttgart
Compumess Electronik,
Unterschleißheim
ComputaCenter, Kerpen-Sindorf
Comtronic GmbH,
Heiligkreuzsteinach
Conrad Electronic, Hirschau
Creasco GmbH, Gilching
Cryophysics, Darmstadt
Danneowitz, Linsengericht
DataTranslation GmbH, Bietigheim-
Bissigen
db electronic Daniel Böck GmbH,
Ehringshausen
Dell-Computer GmbH, Frankfurt
Delta-V, Wuppertal
Deltron Components GmbH, Nied b.
München
Deti, Meckesheim

Dicronite UTE Pohl GmbH, Iserlohn
Digi-Key, Enschede
DMG-Service, Pfronten
DPV Elektronik, Eppingen
druckerDruck, Bietigheim
Dürkes & Obermayer, Heidelberg
Dyna Systems NCH, Mörfelden-
Walldorf
EBARA Pumpen, Dietzenbach
EBJ, Ladenburg
EBV-Electronik, Leonberg
EC Motion, Mönchengladbach
Edsyn Europa, Kreuzwertheim
EFH, Neidenstein
Eldon, Büttelborn
Elna Transformatoren, Sandhausen
elspec, Geretsried
ELV Electronik, Leer
EMS Elektrometall, Schwanenmühle
ERNI Electronics GmbH, Adelberg
eurodis Enatechnik, Quickborn
Europa-Lehrmittel Verlag, Haan-
Gruiten
Eurostor, Filderstadt
EWF, Eppingen
Faber Industrietechnik GmbH, MA
Farben Specht, Bammental
Farnell Electronic Services,
Möglingen
Farnell InOne GmbH, Oberhaching
FCT Electronic, München
Fels Spedition, Heidelberg
Fisba, St. Gallen
Fischer Elektronik, Lüdenscheid
FPS-Werkzeugmaschinen GmbH,
Otterfing
Frank GmbH International
Franke, Aalen
Fresemann Andreas, Dörpen
Fritz Faulhaber, Schönaich

Future Electronics Deutschland, Unterföhring	Inotec electronics GmbH, Lauffen a.N.	Noesse Datentechnik, Leverkusen
GAD GmbH, Dresden	Invent GmbH, Braunschweig	Noor, Viernheim
Ganter, Walldorf	iSystem, Dachau	Nova Electronik, Pulheim
Garlock GmbH, Neuss	Jacobi Elokal, Altlußheim	Oberhausen, Ketsch
Geier Metall-u. Stahlhandel, Mannheim	Jarmyn, Limburg	OpenStorage, Wiesbaden
Genoma Normteile, Hameln	Joisten+Kettenbaum, Bergisch Gladbach	Optima Research, Detroit
Gerwah Präzision GmbH, Großwallstadt	Kaiser + Kraft GmbH, Stuttgart	Orglmeister Industriemesstechnik, Walluf
GFI Elektro GmbH, Heidelberg	Kaufmann, Crailsheim	Otto Faber, Mannheim
GLT, Pforzheim	Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH, Amberg	Otto Ganter, Furtwangen
Göttle, Königsbrunn	Kniel, Karlsruhe	OWIS, Staufen
Goodfellow, Hamilton ON, Canada	Knürr, München	Parametric Technology, München
Gould Nicolet Meßtechnik, Dietzenbach	Kugler, Salem	Parcom, CH-Flurlingen
Grandpair, Heidelberg	Kurt Noor & Co, Viernheim	pbe Electronic, Elmshorn
Grulms-Pneumatik, Grünstadt	KVT Canespa, Langenhagen	PCE Group oHG, Meschede
GRW, Würzburg	Labelident GmbH, Schweinfurt	Pfeiffer Adolf GmbH, Mannheim
Gummi Körner, Eppelheim	Laflow Reinraumtechnik GmbH, Blaubeuren	Pfeiffer Vakuum GmbH, Asslar
Gummi-Plast Schild, Gernsheim	Lambda Electronics, Achern	Pfister Büro, Leimen
Gutekunst, Pfalzgrafenweiler	Laser Components GmbH, Olching	Phonix Contact GmbH & Co, Blomberg
Häcker, Weinsberg	Laser Vison, Fürth	Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.
Häfele Leiterplattentechnik, Schrießheim	Layher, Güglingen	KG, Karlsruhe/Waldbronn
Hahn u. Kolb GmbH, Oberursel	Lemo Electronik, München	Polytec GmbH, Waldbronn
Handelsvertretung Schaffland, Leverkusen	Leybold Vakuum GmbH, Köln	Phytec Messtechnik, Mainz
Heidenhain Dr. Johannes GmbH, Traunreut	Lineartechnik Korb, Korb	Phytron, Gröbenzell
Heinrich Wietholt GmbH, Velen	LPKF CAD/CAM Systeme, Garbsen	PI, Karlsruhe
Helukabel, Hemmingen	LWS-Technik GmbH & Co, Heilbronn	PINK Vakuumtechnik GmbH, Wertheim
Hema, Mannheim	Macrotron, München	Plastipol, Runkel
Herose GmbH, Bad Oldeslohe	Mädler, Stuttgart	POG, Gera
Herz, Leister Geräte, Neuwied	Mankiewicz, Hamburg	ProCom, Eislingen
Hewlett-Packard Direkt, Böblingen	MathWorks, Ismaning	Prout Services+Hardware GmbH, Darmstadt
Hilger und Kern, Mannheim	Matsuo Electronics Europe, Eschborn	PSI Tronix, Tulare, California, USA
Hilma-Römhild GmbH, Hilchenbach	Matsushita Automation, Holzkirchen	PSC, Saarbrücken
HKi GmbH, Weinheim	Maxim Ges. f. elektronische integrierte Bausteine, Planegg	Pühl A. GmbH, Plettenberg
HM Industrieservice, Waghäusel	Menges electronic, Dortmund	Püschel Electronik, Mannheim
Hommel-Hercules Werkzeughandel, Viernheim	Mentor, Erkrath	Radiall, Rödermark
Hormuth, Heidelberg	Metrofunkkabel-Union GmbH, Berlin	RALA, Ludwigshafen
Horn, Stutensee	Mitsubishi-Electric, Weiterstadt	Räder Gangl, München
Horst Göbel, Ludwigshafen	MGV Stromversorgung, München	Rau-Messtechnik, Kelkheim
Horst Pfau, Mannheim	Möller-Wedel Optical GmbH, Wedel	RED Regional Electronic
HOT Electronic, Taufkirchen	Mönninghoff, Bochum	Distribution, Rodgau-Jügesheim
HTF Elektro, Mannheim	Moll, Bleche und Verarbeitung, Hirschberg	Reeg, Wiesloch
Huber + Suhner GmbH, Taufkirchen	MSC Vertriebs GmbH, Stutensee	Reichelt Elektronik, Sande
Hummer+Rieß, Nürnberg	MTI, Baden-Baden	Reinhold Halbeck, Offenhausen
IBF Mikroelektronik, Oldenburg	MTS Systemtechnik GmbH, Mertingen	Reith, Mannheim
IDS Innomic GmbH, Salzwedel	Munz, Lohmar	Retronic, Ronneburg
Jenaer Meßtechnik GmbH, Jena	Nanotec, Finsing	Reximo, Maulbronn
IFI Ingenubüro f. IC Techno, Wertheim	Newport, Darmstadt	Riegler & Co. kG, Bad Urach
Infrared Labs, Tucson, USA	Nickel Schalt- und Meßgeräte, Villingen-Schwenningen	Riekert & Sprenger, Wertheim
Inkos, Reute/Breisgau	Niedergesess, Sandhausen	Rittal GmbH + Co. KG, Herborn
	Nies Elektronic GmbH, Frankfurt/M.	Roland Häfele Leiterplattentechnik, Schriesheim
		Roth Carl GmbH, Karlsruhe
		RS Components GmbH, Mörfelden-Walldorf

RSP GmbH, Mannheim	Sigmann Elektronik GmbH, Hüffenhardt	TMS Test- und Messsysteme, Herxheim/Hayna
Rudolf, Heidelberg	SolidLine AG, Walluf	TopCart, Erzhausen
Rütgers, Mannheim	Spaeter, Viernheim	Tower Electronic Components, Schriesheim
Rufenach Vertriebs-GmbH, Heidelberg	Sphinx, Laudenbach	Transtec, Tübingen
Rutronik, Ispringen	Spindler & Hoyer, Göttingen	Trivit AG, Ravensburg
Sartorius, Ratingen	Spoerle Electronic, Dreieich	TS-Optoelectronic, München
Sasco, Putzbrunn	Stahlschlüssel Wegst GmbH, Marbach	TWK-Elektronik, Karlsruhe
Sauter-Cumulus GmbH, Freiburg	Straschu Leiterplatten, Oldenburg	Vacuumschmelze, Hanau
Scantec, Planegg	Steinbach Ingenieurbüro, Jena	VBE Baustoff+Eisen GmbH, Heidelberg
Schaffner Elektronik, Karlsruhe	Suco-Scheuffele, Bietigheim-Bissingen	Vero Electronics, Bremen
Schlossmacher Ingenieurbüro, Unterschleißheim	Synatron, Hallbergmoos	Vision Engineering, Emmering
Schrauben-Jäger AG	Tandler, Brauen	W. & W. Schenk, Maulbronn
Schulz Bürozentrum GmbH, München	Tautz GmbH, Gladbeck	Wamser Buero Service, Mannheim
Schuricht, Fellbach-Schmiden	Team Arrow, Untereisesheim	Werner Curt GmbH & Co. KG, Heidelberg
Schwab Holz-Zentrum, Hockenheim	Teldix GmbH, Heidelberg	Wika, Klingenberg
Schweizer Elektroisolierungsstoffe, Mannheim	Testo, Lenzkirch	Wikotec, Bramsche
SCT Servo Control Technology, Taunusstein	THK, Düsseldorf	Wilhelm Gassert, Schriesheim
SE Spezial-Electronic, Bückeburg	Thorlabs, Grünberg	Witter GmbH, Heidelberg
Seifert mtm Systems, Ennepetal	ThyssenKrupp Schulte, GmbH, Düsseldorf	WS CAD Electronik, Berk Kirchen
Siemens IC-Center, Mannheim		

Lehrveranstaltungen

Wintersemester 2005/2006

- C. Dullemond: The Formation of Stars and Planets (Vorlesung)
 Ch. Fendt: Introduction to Astronomy and Astrophysics I/II (IMPRS-Vorlesung, Blockkurs)
 Ch. Fendt, K. Meisenheimer, H.-W. Rix: Current Research Topics in Astrophysics (IMPRS-Seminar, mit W. Duschl, ZAH)
 J. Fried: Galaxies (Vorlesung mit Übungen, m. B. Fuchs, ZAH)
 H.-W. Rix: Introduction to Astronomy and Astrophysics I/II (IMPRS-Vorlesung mit Übungen, mit A. Just, R. Spurzem, ZAH)
 H.-J. Röser, M. Stickel: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, III (Seminar, mit J. Wambsganss, ZAH)
 S. Wolf, Th. Henning: Protoplanetary Disks (Vorlesung)

Sommersemester 2006

- H. Beuther, Th. Henning: Sternentstehung (Vorlesung)
 Ch. Fendt, K. Meisenheimer: Current research topics in Astrophysics (IMPRS-Seminar, Fortgeschrittenen-Seminar, mit W. Duschl und J. Wambsganss, ZAH)
 Th. Henning: Physik der Sternentstehung (Oberseminar)
 K. Meisenheimer, R. Mundt, H.-J. Röser: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, III (Seminar, mit J. Krautter, ZAH)
 H.-J. Röser, M. Stickel: Galaxien im frühen Universum (Oberseminar)

Wintersemester 2006/2007

- H. Beuther, Ch. Fendt: Outflows and Jets: theory and observations (Vorlesung, IMPRS)
 Ch. Fendt, K. Meisenheimer, H.-W. Rix: Current research topics in Astrophysics (IMPRS-Seminar, Oberseminar mit J. Wambsganss, ZAH)
 J. Fried: Galaxien (Vorlesung und Übungen, mit B. Fuchs, ZAH)

- Th. Henning: Substellare Objekte – Extrasolare Planeten und Braune Zwerge (Vorlesung, mit B. Goldmann, ZAH)
 Th. Henning: Physik der Sternentstehung (Oberseminar)
 K. Meisenheimer: Sources of High Energy Radiation

- (Oberseminar, mit M. Camenzind, S. Wagner, ZAH, und J. G. Kirk, MPIK)
 H.-J. Röser: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, III (Seminar, mit J. Heidt, LSW und J. Wambsganss, ZAH)

Tagungen, Vorträge

Veranstaltete Tagungen

Tagungen des MPIA:

Third MPIA Student Workshop, BRixlegg, 18. – 22. Februar (Organisation: S. Quanz, J. Stegmaier, M. B. Stumpf)

Workshop »Planet Formation and Evolution Studies: Various Approaches – One Goal«, MPIA, 1. – 3. März (Organisation: S. Wolf und M. Trieloff, University of Heidelberg)

Workshop »Dwarf Galaxies as Astrophysical and Cosmological Probes«, Schloss Ringberg, 12. – 17. März (Organisation: F. Walter, R. Somerville, J. Cannon, F. Biegel und D. Riechers)

Workshop »Carbon in Space«, Villa Vigoni, Laveno di Menaggio, Como, 22. – 25. Mai (Organisation: F. Huisken, Th. Henning, and L. Colangeli)

Minisymposium »Highlights in Astrochemistry and Astrobiology«, 29. Mai (Organisation: R. Gredel, Th. Henning, K. Jäger)

Minisymposium »The Milky Way«, 31. Mai (Organisation: H.-W. Rix, K. Jäger)

Minisymposium »Star Formation from Galactic to Cosmological Scales«, 10. Juli (Organisation: R. Sommerville, K. Jäger)

Progress meeting LBTO/LINC-NIRVANA/LBT-SW MPIA, 24. Juli (Organisation: M. Kürster)

Workshop »The Early Phase of Star Formation«, EPoS 2006, Schloss Schloss Ringberg, 28. August – 1. September (Organisation: J. Steinacker and A. Bacmann/Bordeaux)

Workshop »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September (Organisation: C. Dullemond, H. Klahr)

Workshop »Transiting Extrasolar Planets«, MPIA, 25. – 28. September, (Organisation: C. Afonso, Th. Henning, David Weldrake)

IMPRS Summer School »Physics of the Interstellar Medium«, Heidelberg, 25. – 29. September (Organisation: Ch. Fendt, Th. Henning)

Minisymposium »Extrasolar Planet Searches«, MPIA, 11. Oktober (Organisation: T. Herbst, K. Jäger, R. Launhardt, S. Wolf)

The 2nd PSF workshop, Mont Sainte-Odile (Frankreich), 23. – 26. Oktober (Organisation: A. Carmona, D. Gouliermis, J. Setiawan, R. van Boekel)

LINC-NIRVANA Consortium Meeting, MPIA, 26. Oktober (Organisation: M. Kürster)

Planets Network Meeting »EU PLANETS: The Next Generation«, MPIA, 26. – 27. Oktober (Organisation: H. Klahr)

Workshop »The Formation of Low-Mass Protostars and Proto-Brown Dwarfs«, Pasadena, 7. November (organized by J. Steinacker, J. Eislöffel/TLS)

GEMS/Stages Collaboration Meeting, MPIA, 29. November – 1. Dezember

9th MHD Days, MPIA, Dezember 4. – 5. (Organisation: N. Dziourkevitch, A. Johansen, H. Klahr)

2nd Meeting of the GAIA Data Processing and Analysis Consortium Coordination Unit 8 (Astrophysical Parameters), MPIA, 6. – 7. Dezember (Leitung: C. Bailer-Jones)

Andere veranstaltete Tagungen:

C. Bailer-Jones: IAUnion General Assembly, Prag, August, Joint Discussion »Exploiting large surveys for Galactic astronomy«, Co-chair of the SOC; First Meeting of the GAIA Data Processing and Analysis Consortium Coordination Unit 8 (Astrophysical Parameters), Nizza, 16. – 17. März (Leitung);

W. Gässler: »Adaptive Optics at the LBT – Upgrades and their Science Drivers«, Florence, 30. – 31. Oktober

R. Gredel: »Towards the European ELT«, Marseille, 27. November – 1. Dezember (SOC-Mitglied)

Th. Henning: Konferenz »Electromagnetic and Light Scattering by Non-spherical Particles«, St. Petersburg, 5. – 9. Juni

M. Kürster: LINC-NIRVANA Consortium Meeting, MPIfR, Bonn, 24. – 25. April

D. Lemke: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation: Optomechanical Technologies for Astronomy Orlando, Florida, USA, 24. – 31. Mai (Leitung); Lunar Observatory Workshop, Bremen, 23. – 24. November (SOC-Mitglied)

H.-W. Rix: Lorentz Center Workshop »Dissecting the Milky Way«, Leiden, 6. – 10. November (mit A. Helmi/ Groningen)

E. Schinnerer: Workshop on »The LINC-NIRVANA Science Case«, Bologna, 28. Februar

J. Steinacker: »The Formation of Low-Mass Protostars and Proto-Brown Dwarfs«, Pasadena, 7. November

S. Wolf: Workshop »MATISSE Science Cases«, Nizza, 27. März; Workshop of the Radiative Transfer Working Group of the European Interferometry Initiative, Paris, 22. – 23. Juni; MATISSE Science Team Workshop, Nizza, 17. November

Eingeladene Vorträge, Kolloquien

- C. Bailer-Jones: Zentrum für Astronomie, Universität Heidelberg, Januar (eingeladener Vortrag); Armagh Observatory, Northern Ireland, Mai (eingeladener Vortrag); IAU General Assembly, Prag, August (eingeladener Vortrag); Lorentz Center workshop »Dissecting the Milky Way«, Leiden, November (eingeladener Vortrag)
- H. Beuther: »Complex Molecules in Space Present status and prospects with ALMA«, Aarhus, 8. – 11. Mai (eingeladener Vortrag); Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, Juni 2006 (Kolloquium); IAU Symposium 237 »Triggered star formation in a turbulent ISM«, Prag, August 14. – 18. (eingeladener Vortrag); EPoS 2006, »The early phase of star formation«, Schloss Ringberg, Germany, 28 August – 1. September (eingeladener Vortrag); ELBA 2006 »2nd European School on Jets from Young Stars: High Angular Resolution Observations«, Marciana Marina, 4. – 8. September (eingeladener Vortrag); Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, USA, November (Kolloquium); University of Gainsville, Florida, USA, November (Kolloquium); University of Heidelberg, Dezember (Kolloquium)
- H. Dannerbauer: ESO, Garching, 25. April (Kolloquium); Sterrewacht Leiden 21. November, (Kolloquium)
- Ch. Fendt: »IMPRS Summer School: Physics of the interstellar medium«, Heidelberg, 25. – 29. September (eingeladener Vortrag)
- R. Gredel: »Towards the European ELT, Marseille, 27. November – 1. Dezember (eingeladener Vortrag)
- Th. Henning: ETH Zürich, 7. Februar (Kolloquium); University of Münster, 9. Februar (Kolloquium); University of Basel, 14. Februar (Kolloquium); Observatoire de Strasbourg, 17. März (Kolloquium); Meeting »Interstellar Dust: from Fundamental Studies to Astrophysical Models«, Les Houches, 1. – 5. Mai (eingeladener Vortrag); Workshop »Carbon in Space«, Lugano, 23. – 25. Mai (eingeladener Vortrag); Nobel Symposium »Cosmic Chemistry and Molecular Astrophysics«, Stockholm, 10. – 15. Juni (eingeladener Vortrag); 69th Meteoritical Society Meeting, »Dust in Protoplanetary Disks«, Zürich, 6. – 11. August (eingeladener Vortrag); Summer School »Physics of the Interstellar Medium«, Heidelberg, 25. – 29. September (eingeladener Vortrag); Workshop »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September (eingeladener Vortrag); Summer School »Physical Processes in Circumstellar Disks around Young Stars«, Portugal, 18. – 23. September (eingeladener Vortrag); ARENA-Meeting, Roscoff, 16. – 19. Oktober (eingeladener Vortrag); University of Düsseldorf, 14. Dezember (Kolloquium)
- F. Huisken: University of Regensburg, 30 Januar (Kolloquium); NASA Laboratory Astrophysics Workshop, Las Vegas, 14. – 16. Februar (eingeladener Vortrag); European Workshop NanoLum IV, Tübingen, 15. – 16. Mai (eingeladener Vortrag); International Workshop on Carbon in Space, Villa Vigoni, Loveno di Menaggio, Como, 22. – 25. Mai (eingeladener Vortrag); Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, 14. Juni (eingeladener Vortrag); Institut für Physikalische Hochtechnologien, Jena, 21. Juni (eingeladener Vortrag); Workshop »Silicon-based dust in Space« of the DFG-Forschergruppe Laborastrophysik, Jena, 7. Juli (eingeladener Vortrag); European Workshop NanoLum V, Troyes, Frankreich, 13. – 14. Oktober (eingeladener Vortrag)
- C. Jäger: International Workshop on Carbon in Space, Villa Vigoni, Loveno di Menaggio, Como, 22. – 25. Mai (eingeladener Vortrag)
- S. Jester: Cambridge (GB), 2. Februar (Kolloquium); Heidelberg, 5. Mai (Kolloquium); Konferenz »Challenges of Relativistic Jets«, Cracow, 25. Juni – 1. Juli (eingeladener Vortrag)
- A. Johansen: University of Tübingen, Februar (Kolloquium); American Museum of Natural History, Mai (Kolloquium); Princeton University, Juni (Kolloquium)
- U. Klaas: Colloquium on Infrared Space Missions in the Far-Infrared and their Legacy to the Virtual Observatory, Konkoly Observatory, Budapest, 11. Mai (eingeladener Vortrag); Helsinki Observatory, 1. November (Kolloquium); ISO Legacy Colloquium, ESAC, Villafranca, Spain, 13. Dezember (eingeladener Vortrag)
- H. Klahr: Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Juni (Kolloquium); American Museum of Natural History, Juli (Kolloquium); Workshop »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September (eingeladener Vortrag); Queen Mary University, London (Kolloquium); University of Tokyo, Dezember (Kolloquium); University of Kyoto, Dezember (Kolloquium)
- O. Krause: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation: Optomechanical Technologies for Astronomy, Orlando, Florida, USA, 24. – 31. Mai (eingeladener Vortrag); AAS #208, 4. – 8. Juni (eingeladener Vortrag)
- R. Launhardt: TLS Tautenburg, Dezember (eingeladener Vortrag)
- D. Lemke: Colloquium on Infrared Space Missions in the Far-Infrared and their Legacy to the Virtual Observatory, Konkoly Observatory, Budapest, Hungary, 11. Mai (eingeladener Vortrag); SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation: Optomechanical Technologies for Astronomy, Orlando, Florida, 24. – 31. Mai (eingeladener Vortrag); Lunar Observatory Workshop, Bremen, 23. – 24. November (eingeladener Vortrag); ISO Legacy Colloquium, ESAC, Villafranca, Spain, 13. Dezember (eingeladener Vortrag)
- A. Pasquali: Strasbourg Observatory, 24. November (eingeladenes Seminar); GAIA CU5 meeting, Barcelona, 13. – 14. Dezember (eingeladener Vortrag)
- Th. Ratzka: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation Konferenz 6268: »Advances in Stellar Interferometry«, Orlando, Florida, 24. – 31. Mai (Eingeladener Vortrag)

- P. Re Fiorentin: Osservatory Astronomico di Torino, 5. Januar (eingeladener Vortrag); Santa Fe, New Mexico, 25. März (eingeladener Vortrag)
- H.-W. Rix: Winter 2006 Aspen Astrophysics Konferenz »Local Group Cosmology«, Aspen/Colorado, 7. Februar (eingeladener Vortrag); Tufts/CfA/MIT Cosmology Seminar, CfA Harvard, Cambridge, USA, 25. April (eingeladener Vortrag); Physics Kolloquium MIT, Boston, 27. April (eingeladener Vortrag); Ringberg-Symposium »Perspectives of Research«, Schloss Ringberg, 3. – 5. Mai (eingeladener Vortrag); MPIfR, Bonn, 12. Mai (eingeladener Vortrag); IAC, Teneriffa, 16. Mai (eingeladener Vortrag); Konferenz »Towards the European ELT«, Marseille, 28. November (eingeladener Vortrag)
- H. Roussel: CEA/Saclay, Frankreich, spring (Seminar); Workshop »Dust and gas in ULIRGs: tracing star formation and black hole growth at the centers of ultraluminous infrared galaxies«, Cornell University, USA, 19. – 22. Juni (eingeladener Vortrag)
- E. Schinnerer: Nobelsymposium »Cosmic Chemistry and Molecular Astrophysics«, Soedertuna, Sweden, 10. – 15. Juni (eingeladener Vortrag); »Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies«, Ishigaki Island, Japan, 25. – 30. Juni, (eingeladener Vortrag); MPIfR, Bonn, 8. Dezember (Kolloquium)
- D. A. Semenov: MPI für Kernphysik, Heidelberg, 14. Juli (eingeladener Vortrag); »Molecular databases for HERSCHEL, ALMA and SOFIA«, Lorentz Center, Leiden, 6. – 8. Dezember (eingeladener Vortrag)
- J. Steinacker: University of Heidelberg, ARI, 27. April (Kolloquium); Les Houches School on »Interstellar Dust Properties: From Fundamental Studies to Astronomical Models«, 1. Mai (eingeladener Vortrag); First Heidelberg Astronomy Summer School »Physics of the Interstellar Medium«, Heidelberg, 27. Juni (eingeladen); »Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics Reunion Konferenz I, Lake Arrowhead 10 Dezember (eingeladen)
- Ch. Tapken: Observatoire de Geneve, 9. Februar (Kolloquium)
- K. Tristram: Euro Summer School »Observation and Data Reduction with the Very Large Telescope Interferometer, Goutelas (Frankreich), 4. – 16. Juni (eingeladener Vortrag)
- R. van Boekel: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation, Konferenz 6268 »Advances in Stellar Interferometry«, Orlando, Florida, 24. – 31. Mai (eingeladener Vortrag); »The third Conference on the Development of Extra-solar Planetary Science«, Tokyo, 11. – 13. Dezember (eingeladener Vortrag); University of Tokyo, 14. Dezember (Kolloquium); ISAS/JAXA, Tokyo, 19. Dezember (Kolloquium)
- F. Walter: »From z -Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies«, NRAO, Charlottesville, 12. – 14. Januar (eingeladener Vortrag); ESO Garching, 9. Februar (Kolloquium); »Science with ALMA: a new era for Astrophysics«, Madrid, 13. – 17. November (eingeladener Vortrag)
- S. Wolf: PLANET EU-RTN network Training School »Detection and Characterization of Exoplanets: Observational Challenges for the next Decade«, Geneve, 28. – 30. Juni (eingeladener Vortrag); COSPAR Symposium »Advances in FIR and submm Astrophysics«, Beijing, China, 16. – 18. Juli (eingeladener Vortrag); 2nd pan-STARRS International Konferenz »Science with ALMA«, Madrid, 13. – 16. November (eingeladener Vortrag); IoA Konferenz »The Planet-Disc Connection«, Cambridge (UK), 17. – 21. Juli (eingeladener Vortrag)

Teilnahme an Tagungen, Fachvorträge, Poster

- C. Afonso: Training School »Detection and Characterisation of Exoplanets«, Observatoire de Genève, Geneva, Switzerland, 28. – 30. Juni; International Transiting Extrasolar Planets Workshop, MPIA, September, 25. – 28. (Vortrag); Planets Network Meeting »EU Planets: the Next Generation«, MPIA, 26. – 27. Oktober, (Vortrag)
- C. Bailer-Jones: 3rd GAIA Data Analysis Coordination Committee meeting, Nizza, 19. – 20. Januar; 16th GAIA Science Team meeting, ESTEC, Netherlands, 20. – 21. Februar; 4th GAIA Data Analysis Coordination Committee meeting, Lund, 23. – 24. Mai; 1st meeting of the GAIA Data Processing and Analysis Consortium Executive meeting, ESAC, Spain, 21. – 22. September; 18th GAIA Science Team meeting, ESTEC, Netherlands, 5. – 6. Oktober
- M. Barden: »Galaxies and Structures through Cosmic Times«, Venedig, 26. – 31. März (Poster)
- H. Baumeister: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation Konferenz »Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy III«, Orlando, Florida, USA, 24. – 31. Mai (Poster)
- J. Berwein: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation, Orlando, 25. – 30. Mai (Vortrag); Konferenz: ADASS 2006 (Astronomical Data Analysis Software & Systems XVI), Tucson, 15. – 18. Oktober (Poster)
- F. Bigiel: »Dwarf Galaxies as Astrophysical and Cosmological Probes«, Rinberg Castle, 12. – 17. März; IAU General Assembly, Prag, August (Poster)
- F. Briegel: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation, Orlando, 25. – 30. Mai (Poster); Konferenz: ADASS 2006 (Astronomical Data Analysis Software & Systems XVI), Tucson, 15. – 18. Oktober (Vortrag)
- S. Birkmann: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation Konferenz »Millimeter and Submillimeter

- Detectors and Instrumentation for Astronomy III«, Orlando, Florida, USA, 24. – 31. Mai (Vortrag)
- W. Brandner: 4th Planet Formation Workshop, Heidelberg, 1. – 3. März; Keck Science Meeting, Irvine, CA, 15. September
- A. Carmona: VLTI Summer School, Chateau Goutelas, Frankreich, 5. – 16. Juni, »Physical Processes in Circumstellar Disks«, Vidago, Portugal, 18. – 23. September (Vortrag); Center of Astrophysics of Porto University, 29. September (Vortrag); »The 2nd PSF workshop«, Mont Sainte-Odile (Frankreich), 23. – 26. Oktober; 24th Jerusalem Winter School in Theoretical Physics »The Lives of Low mass Stars and their Planetary Systems«, The Hebrew University of Jerusalem, 27. Dezember – 5. Januar (Vortrag)
- H. Dannerbauer: Konferenz »Galaxies and Structures through Cosmic Times«, Venedig, 26. – 31. März (Poster); Radiaton Workshop, MPIA, Mai
- N. Druryevich: JPL, Pasadena, Juli (Vortrag); Workshop »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September (Vortrag); PSF Workshop, Monte St. Odile, Oktober (Vortrag); 9th MHD Day, MPIA, 4. – 5. Dezember (Vortrag); EU Network Planets Meeting, MPIA, 26. – 27. Oktober
- J. de Jong: Institute of Astronomy, Cambridge, UK, 19. Januar (Kolloquium); workshop »Deconstructing the Local Group«, Aspen, USA, 25. Juni. – 2. Juli (Vortrag); workshop »Dissecting the Milky Way«, Leiden, November 6. – 10. (Vortrag); IAU Symp. 241 »Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies«, La Palma, 10. – 15. Dezember (Vortrag)
- C. Dullemond: Technische Hochschule Braunschweig, 10. Januar (Kolloquium); University of Florence, 21. Februar (Kolloquium); Workshop »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September (Vortrag); 4th Planet Formation Workshop, Heidelberg, 1. – 3. März (Vortrag)
- S. Egner: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation Konferenz »Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy III«, Orlando, Florida, USA, 24. – 31. Mai (drei Poster)
- F. Fontanot: Seventh Italian Konferenz on Active Galactic Nuclei: »Fenomenologia degli AGN, evoluzione e processi di formazione delle galassie«, Montagnana (Padova), 23. – 26. Mai (Vortrag); Konferenz Deep06 »At the Edge of the Universe«, Sintra, Portugal, 9. – 13. Oktober (Vortrag)
- W. Gäßler: LBT Software workshop, Tuscon, 1. – 5. Oktober
- A. Gallazzi: IAU Symposium 241 »Stellar populations as building blocks of galaxies«, La Palma, 10. – 16. Dezember (Vortrag)
- P. Glaschke: »The 2nd PSF workshop«, Mont Sainte-Odile (Frankreich), 23. – 26. Oktober (Vortrag)
- B. Goldman: Journées de la SF2A, Paris, 26. – 30. Juni (Poster)
- D. Gouliermis: Symposium »Massive Stars: From Pop III and GRBs to the Milky Way«, STScI, Baltimore, 8. – 11. Mai, (Poster); Minisymposium »The Milky Way«, MPIA, Heidelberg, 31. Mai; IAU XXVI General Assembly, Prag, 14. – 22. August, (Poster, Press Release); 2nd PSF Department Workshop, Mont Sainte Odile, 23. – 26. Oktober (Vortrag)
- R. Gredel: Faraday Discussion 133, St. Jacut de la Mer, 24. – 26. April; »Carbon in Space«, Villa Vigoni, 22. – 25. Mai (Vortrag); ELT Konferenz, ESO Garching, 27. – 28. April (Vortrag); OPTICON in FP7, UKATC, Edinburgh, 21. – 22. Juni; 2nd NEON archive school, Garching, 1. – 8. September (Vortrag)
- B. Häussler: MPIA Student Workshop, BRixlegg, 18. – 22. Februar (2 Vorträge); »Cosmic Frontiers«, Durham, GB, 31. Juli – 8. August (Poster); IAU Symposium 235 »Galaxy Evolution along the HUBBLE time«, Prag, 14. – 17. August (Poster); Fall Mini-Workshop »Galaxy Mergers: From the Local Universe to the Red Sequence«, 4. – 6. Oktober, Baltimore (Poster); »At the Edge of the Universe«, 9. – 13. Oktober, Sintra, Portugal (Poster); Royal Observatory, Edinburgh, 23. Oktober (eingeladener Vortrag); GEMS Meeting, MPIA, 29. November – 1. Dezember (2 Vorträge)
- S. Hahn: IAU Symposium 235 »Galaxy Evolution Across the HUBBLE Time«, Prag (Poster)
- S. Hanke: SPIE Conference on Astronomical Telescopes and Instrumentation Orlando, Florida, 24. – 31. Mai
- M. Hennemann: IAU XXVIth General Assembly, Prag, 14. – 25. August (Poster); EPoS 2006, »The Early Phase of Star Formation«, Schloss Ringberg, 28. August – 1. September (Poster)
- K. Jäger: »Universe Awareness for young Children« (UNAWE), ARI, Heidelberg, 5. April
- K. Jahnke: 207th AAS meeting, Washington, 8. – 12. Januar (Poster); »Galaxies and Structures through Cosmic Times«, Venedig, 26. – 31. März (Vortrag); IV Potsdam Thinkshop »The role of black holes in galaxy formation and Evolution«, 11. September (Vortrag); COSMOS collaboration meeting, Schloss Ringberg, 24. – 29. September (Vortrag)
- S. Jester: RAS National Astronomy Meeting 2006, University of Leicester, 3. – 7. April (Poster); Portsmouth, 27. April (Kolloquium); 6th Microquasar Workshop, Como, 18. – 22. September (Vortrag); Oxford, 24. Oktober (Kolloquium); Workshop »Coronae of Stars and Accretion Disks«, Bonn, 12. / 13. Dezember; 9th MHD days at MPIA (Vortrag)
- A. Johansen: »Planet Formation and Evolution Studies«, Heidelberg, März (Vortrag); »Pencil Code Workshop«, Copenhagen, Juli (Vortrag); »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, September (Vortrag); »The 2nd PSF workshop«, Mont Sainte-Odile (Frankreich), 23. – 26. Oktober (Vortrag); »PLANETS Network meeting«, Heidelberg, Oktober (Vortrag)
- F. Kittmann: Konferenz: ADASS 2006 (Astronomical Data Analysis Software & Systems XVI), Tucson, 15. – 18. Oktober (Vortrag)

- H. Klahr: 4th. Planet Formation Workshop, Heidelberg, März; Konferenz »The Planet-Disk Connection«, Cambridge, März (Vortrag); IAU Symposium 239 »Convection in Astrophysics«, Prag, Juli (Vortrag); »The 2nd PSF workshop«, Mont Sainte-Odile (Frankreich), 23. – 26. Oktober (Vortrag); EU Network Meeting PLANETS, Heidelberg, Oktober (Vortrag); The Third Meeting of Exoplanet Research, Tokyo, Dezember (Vortrag)
- R. Klement: Workshop »Dissecting The Milky Way«, Leiden, November
- K. Knudsen: IRAM, Grenoble, Februar (Seminar); »Cosmic Frontiers«, Durham, 31. Juli – 4. August (Poster); IAU General Assembly, Prag, August (Poster); »Science with ALMA: a new ear for Astrophysics«, Madrid, 13. – 17. November
- K. Kornet: »Planet Formation and Evolution Studies: Various Approaches – One Goal«, Heidelberg, 1. – 3. März, (Vortrag); Planet EU-RTN School & Network Meeting: Detection and Characterization of Exoplanets, Genève, 28. – 30. Juni (Poster); Workshop »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September (Vortrag); Planets Network Meeting »EU PLANETS: The Next Generation«, Heidelberg, 26. – 27. Oktober (Poster)
- S. E. Koposov: IAU XVI General Assembly, Prag, August (drei Poster); »Astronomical Data Ananlysis Software and Systems, XVI«, Tucson, September (Poster); International Virtual Observatory Alliance interoperation meeting, Moscow, September (Vortrag)
- E. Krmpotic: GALEV06, »Studying Galaxy Evolution with SPITZER and HERSCHEL«, Agios Nikolaos, Crete, 28. Mai – 2. Juni (Poster)
- J. Kurk: »Galaxies and structures through cosmic times« Venedig, 27. – 31. März (Poster); IAU XXVIth General Assembly, Prag, 14. – 18. August (Vortrag)
- L. Labadie: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation Conference »Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy III«, Orlando, Florida, USA, 24. – 31. Mai (Vortrag); COSPAR Meeting 2006 – General Assembly, Beijing, 16. – 23. Juli
- R. Launhardt: »The Early Phase of Star Formation«, EPoS 2006, Schloss Ringberg, 28. August – 1. September (Vortrag);
- R. Lenzen: »Towards the European ELT«, Marseille, 27. November – 1. Dezember (Poster); SPIE Konferenz »Astronomical Telescopes and Instrumentation«, Orlando, 24. – 31. Mai (Poster)
- A. Martinez: COSMOS collaboration meeting, Schloss Ringberg, September (Vortrag); »The Central Engine of Active Galactic Nuclei«, Xi'an, China, Oktober (Vortrag); SPITZER Science Center, Pasadena, Dezember (Seminar)
- N. Martin: »Dissecting the Milky Way«, Leiden, 6. – 10. November (Vortrag); »Stellar populations as building blocks of galaxies«, La Palma, 11. – 15. Dezember
- E. Meyer: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation, Konferenz 6268 »Advances in Stellar Interferometry«, Orlando, Florida, 24. – 31. Mai (Poster)
- R. Mundt: Workshop »Transiting Extrasolar Planets«, MPIA, 25. – 28. September,
- A. Pavlov: SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation, Orlando, 25. – 30. Mai (Vortrag); Konferenz: ADASS 2006 (Astronomical Data Analysis Software & Systems XVI), Tucson, 15. – 18. Oktober (Vortrag)
- S. P. Quanz: »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September (Vortrag)
- P. Re Fiorentin: SEGUE meeting at ARI, Heidelberg, 14. März (Vortrag); SDSS-II Collaboration Meeting, Santa Fe, New Mexico, 23. – 29. März (Vortrag); Summer School in Statistics for Astronomers and Physicists II, »Statistical Challenges in Modern Astronomy«, State College-Pennsylvania State University, 5. – 15. Juni; GAIA CU8 Meeting, MPIA Heidelberg, 6. – 7. Dezember
- C. A. Riechers: 207th Meeting of the American Astronomical Society, Washington DC, USA, 8. – 12. Januar (Poster); ALMA Konferenz »From z –Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies«, Charlottesville, USA 13. – 14. Januar (Vortrag); DFG Summer School »Evolution of galaxies and their large-scale environment«, Bad Honnef, 2. – 7. Juli; XXVIth General Assembly of the IAU, Prag, 14. – 25. August (2 Poster); ALMA Konferenz »Science with ALMA: a new era for Astrophysics«, Madrid, Spain, 13. – 17. November (Poster)
- H.-W. Rix: SEGUE Workshop, Santa Fe, 27. März (Vortrag); DUNE Workshop, Saclay, 13. Oktober (Vortrag); Lorentz Center Workshop »Dissecting the Milky Way«, Leiden, 6. – 10. November (Vortrag)
- F. Rodler: 4th Planet Formation Workshop, Heidelberg, 1. – 3. März; Konferenz »Precision Spectroscopy in Astrophysics«, Aveiro, Portugal (Poster); Planets Network Meeting »EU PLANETS: The Next Generation«, Heidelberg; »The 2nd PSF workshop«, Mont Sainte-Odile (Frankreich), 23. – 26. Oktober (Vortrag)
- R.-R. Rohloff: SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation Symposium, Orlando, Florida, 24. – 31. Mai (Vortrag)
- Ch. Ruhland: GEMS/STAGES Workshop, MPIA, 29. November – 1. Dezember (Vortrag)
- A. Schegerer: Headquarters of the Submillimeter Array, Hilo, 14. April (Vortrag); Workshop »From Dust to Planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September (Vortrag)
- M. Schartmann: »The History of Nuclear Black Holes in Galaxies«, Cambridge, MA, 15. – 18. Mai (Poster)
- E. Schinnerer: 207th Meeting of the American Astronomical Society, Washington, DC, 8. – 12. Januar (Vortrag); ALMA Workshop »From z –Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies«, Charlottesville, Virginia, 12. – 13. Januar (Vortrag); »Galaxies and Structures through Cosmic Times«, Venedig, 26. – 21. März (Vortrag); IAU Symposium 235 »Galaxy Evolution across the HUBBLE Time«, Prag, 14. – 18. August

- (Poster); COSMOS Team Meeting, Schloss Ringberg, 24. – 29. September (Vortrag), »Science with ALMA: A New Era for Astrophysics«, Madrid, 13. – 17. November (Poster)
- D. A. Semenov: 4th Planet Formation Workshop, MPIA Heidelberg, 1. – 3. März (Poster); Faraday Discussion 133 »Chemical Evolution of the Universe«, St. Jacut de la Mer, Frankreich, 24. – 26. April (Poster), »Complex Molecules in Space – Present Status and Prospects with ALMA«, Aarhus, Denmark, 8. – 11. Mai (drei Poster); 9th Conference on Electromagnetic and Light Scattering by Nonspherical Particles, Saint-Petersburg, 5. – 9. Juni (Poster); »Science with ALMA: a new era for Astrophysics«, Madrid, 11. – 13. November (drei Poster)
- J. Setiawan: Geneva Planet School, Geneva, 24. – 26. Juni (Poster); »Precision Spectroscopy in Astrophysics«, Aveiro (Portugal), 11. – 15. September (Vortrag, Poster); »Transit Extrasolar Planets«, MPIA Heidelberg, 25. – 29. September (Poster)
- J. Stegmaier: Radiation Workshop, MPIA, Mai (Vortrag); SPIE – Astronomical Telescopes and Instrumentation: Optomechanical Technologies for Astronomy, Orlando, Florida, 24. – 31. Mai (Vortrag)
- J. Steinacker: Spring Meeting of the Deutsche Physikalische Gesellschaft, Heidelberg, 15. März (Vortrag); »AstroGrid-D science from robotic telescopes to GRAPE boards«, C & C Research Laboratories, NEC Europe Ltd., St Augustin, 21. April (Seminar); »The Early Phase of Starformation«, EPoS 2006, Schloss Ringberg, 29. August (Vortrag); Observatoire de Bordeaux, 17. Oktober (Seminar); »The 2nd PSF workshop«, Mont Sainte-Odile (Frankreich), 23. – 26. Oktober (Vortrag)
- M. B. Stumpf: 4th Planet Formation Workshop, Heidelberg, 1. – 3. März (Vortrag); XXVIth General Assembly of the IAU, Prag, 14. – 25. August; NEON Archive Summer School, ESO Garching, 30. August – 9. September (Vortrag); »Cool Stars 14«, Pasadena, 5. – 10. November (Vortrag)
- Ch. Tapken: »Cosmic Frontiers«, Durham, 31. Juli – 8. August; »At the Edge of the Universe«, Sintra, Portugal, 9. – 13. Oktober (Poster)
- C. Tiede: Konferenz »Astronomical Data Analysis Software & Systems«, Tucson, 15. – 18. Oktober (Vortrag)
- K. Tristram: The Fourth Harvard-Smithsonian Conference on Theoretical Astrophysics »The History of Nuclear Black Holes in Galaxies«, 15. – 18. Mai, Harvard University, Cambridge, MA (Poster); IAU Symposium 238 »Black Holes«, Prag, 21. – 25. August (Vortrag)
- R. van Boekel: Konferenz »From dust to planetesimals«, Schloss Ringberg, 11. – 15. September
- F. Walter: AAS meeting, Washington, 8. – 12. Januar (Poster); »Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies«, Ishigaki Island, 26. – 30. Juni, (Vortrag); IAU General Assembly, Prag, 13. – 19. August (Vortrag)
- S. Wolf: 4th Planet Formation Workshop »Planet Formation and Evolution Studies: Various Approaches – One Goal«, Heidelberg, 1. – 3. März (Vortrag); Konferenz »Visions for Infrared Astronomy«, Paris, 20. – 22. März (Vortrag); British German Symposium »Frontiers of Science«, Alexander von Humboldt-Stiftung/Junge Akademie, Wyboston, Bedfordshire (UK), 30. März – 2. April (Poster); Konferenz »Complex Molecules in Space – Present Status and Prospects of ALMA«, Aarhus (Denmark), 8. – 11. Mai; Konferenz »Karrierewege in Wissenschaft in Forschung« (BMBF/DFG), Berlin, 4. – 5. Oktober; SEE-COAST Science Team Meeting, Geneva, 5. Oktober (Vortrag); MATISSE Kick-off Meeting, Nizza (Frankreich), 16. November (Vortrag); Konferenz »Towards the European ELT«, Marseille, 27. November – 6. Dezember (Vortrag); Symposium zur Vorstellung der Nachwuchsgruppenleiter, Universität Heidelberg, 12. – 13. Dezember (Vortrag)

Vortragsreihen

- Ch. Fendt: »The Properties of Galaxies«, Summer School SPP 1177 »Evolution of galaxies and their large-scale environment«, Bad Honnef, 2. – 7. Juli

Populärwissenschaftliche Vorträge

- H. Beuther: Astronomie am Sonntag Vormittag, MPIA, Juni: »Die Entstehung der Sterne – von Braunen Zwergen und Blauen Riesen«
- S. Birkmann: Astronomie am Sonntag Vormittag, MPIA, 9. Juli, »Leben im Universum – sind wir allein?«
- B. Häussler: Lange Nacht der Museen, HD, 18. März, »Vom Urknall bis heute: Eine kurze Geschichte des Universums«, Astronomie am Sonntag Vormittag, MPIA, 18. Juni: »Vom Urknall bis ... kurze Geschichte des Universums«
- S. Hanke: Astronomiekreis der Universität Stuttgart, 6. Dezember, »Mit dem Zweiten sieht man besser – das LBT und LINC-NIRVANA«
- Th. Henning: »Die Entdeckung neuer Welten – Extrasolare Planetensysteme«, Göttingen, 7. März
- K. Janke: Planetarium Mannheim, 17. Februar: »Galaxien, Quasare, Schwarze Löcher«; Volkshochschule Rüsselsheim

- heim, 15. September: »Galaxien, Quasare, Schwarze Löcher«
- K. Jäger: Festrede zur Einweihung des neuen Teleskops des MPI für Informatik, Saarbrücken. 20. Juli, »Galaxien und Gigabytes–Astronomie im Zeitalter moderner Großteleskope«; Lange Nacht der Museen, MPIA, 18 März, »Galaxien und Gigabytes–Astronomie im Zeitalter moderner Großteleskope«; Girls' Day, MPIA, 27 April, »Der Himmel im Computer–virtuelle Planetarien«; »Astronomie am Sonntag Vormittag«, MPIA, 23. Juli »Faszinierende Bilder, die Wissen schaffen–Lehrreiches vom HUBBLE-Weltraumteleskop«; Förderkreis Planetarium Göttingen, 10. Oktober, »Geheimnisvolle Quasare – der Lösung eines Rätsels auf der Spur«; BOGY (MPI/LSW), 23. Oktober, »Teleskope und Beobachtungsmethoden«; Planetarium Mannheim, 27. Oktober, »Schöne Bilder, die Wissen schaffen–Lehrreiches vom HUBBLE-Weltraumteleskop«
- O. Krause: Astronomie am Sonntagvormittag, MPIA, 30. Juli, »Höher, schneller, weiter – Satelliten in der Astronomie«
- D. Lemke: Sternenfreunde Nordenham, 15. Juni, »Atacama, Antarktis, Mond, L2 – Reise zu den Observatorien der Zukunft«
- R. Lenzen: HS Mannheim: »Fünf Jahre Very Large Telescope: Entwicklung und Nutzung des astronomischen Großteleskops VLT in Chile«
- S. P. Quanz: Lange Nacht der Museen, Heidelberg, 18. März, »Unser Sonnensystem–Eine Reise zu den neun (?) Planeten«; Anne-Frank-Schule, Eschwege, Februar, »Ursprung, Gegenwart und Zukunft von Materie und Energie«
- H.-W. Rix: Planetarium Mannheim, 20. Januar: »Blick zurück zum Urknall«; Förderkreis Planetarium Göttingen, 21. Februar: »Röter, tiefer, schärfer–die Zukunft der beobachtenden Astronomie«; Hörfunk-Interview »Zur Person« in der Reihe »Redezeit – Neugier genügt«, WDR, Studio Mannheim, 24. Februar; Astronomie am Sonntag Vormittag, MPIA, 11. Juni: »Schwarze Löcher: Die hellsten Objekte im Universum«
- A. Sicilia Aguilar: Antalya (Turkey), 28. März, »Dusty Stars, Newborn Planets and Eclipses in Other Solar Systems«
- J. Stegmaier: Manfred-Sauer-Stiftung, Lobbach, November, »Sternschnuppen – blitzender Kometenschmutz«
- J. Steinacker: Lange Nacht der Museen, Heidelberg, 18. März, »Das bestgehütete Geheimnis der Sternentstehung«
- M. Stickel: Starkenburg-Sternwarte, Heppenheim, 14. März, »Supernovae und die beschleunigte Expansion des Universums«
- Ch. Tapken: Lange Nacht der Museen, Heidelberg, 18. März, »Geheimnisse ferner Galaxien«
- Fabian Walter: Astronomie am Sonntag Vormittag, MPIA, 16. Juli: »Die Milchstraße und ihre Schwestern«

Mitarbeit in Gremien

- C. Bailer-Jones: 2. Vorsitzender des GAIA Data Analysis Coordination Committee; Mitglied des GAIA Science Team; Mitglied des GAIA Data Processing and Analysis Consortium; Leiter des Subconsortiums »Astrophysical Parameters« im GAIA Data Processing and Analysis Consortium; Mitglied des Scientific Organizing Committee of Commission 45 (Stellar Classification) der International Astronomical Union
- W. Brandner: Mitglied des ESO Adaptive Optics Working Group, ESO Observing Programme Committee Panelist, MPG Mitarbeitervertreter in der Chemisch-Physikalisch-Technischen Sektion, Mitglied des ASTRONET Panel C, Referee der Observing Proposals for Taiwan's share of CFHT, Mitglied des MPIA Student Selection Committee, des Calar Alto Scientific Advisory Committee, des PanSTARRS 1 Science Council, des Heidelberg Astronomical Kolloquium Selection Committee
- B. Goldman: Mitglied des Calar Alto TAC
- D. Gouliermis: GALEX GI Program Cycle 3 Peer Review, Towson MD, USA, September
- R. Gredel: Mitglied des OPTICON board, OPTICON executive committee, ELT working group 3 – site characterisation, ELT ESE – Science and Engineering working group
- Th. Henning: Mitglied des the ESO Strategic Planning Group; Mitglied des SOFIA Science Council; Mitglied des European ALMA Board; Vorsitzender des German Interferometry Centre FRINGE; President der Science Council of the European Interferometry Initiative; Co-Chairman of the DFG Researchers Group »Laboratory Astrophysics«, Vorsitzender der LBT-Beteiligungsgesellschaft (bis August); Mitglied des Board of Directors LBT Corporation (bis August); Mitglied des Pan-STARRS1 Board; Zweiter Vorsitzender des Fachbeirats des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik, Freiburg; Co-I der Infrarot-Instrumente FIFI-LS (SOFIA), PACS (HERSCHEL), MIRI (JWST), SPHERE (VLT), PRIMA-DDL (VLTI); MATISSE (VLTI); Mitglied der Astronomischen Gesellschaft, der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina
- K. Jäger: Mitarbeit im CAHA Executive Committee und in der LBT-Beteiligungsgesellschaft, Mitglied der ARENA Information and Communication Unit und des LBT-PR Committee
- U. Klaas: Mitglied des ISO Active Archive Coordination Committee als Vertreter des ISOPHOT Datenzentrums am MPIA; Mitglied des HERSCHEL Calibration Steering

- Group, Vertreter des PACS Instrument Control Centre Calibration Working Group, Vorsitzender des Bibliotheks-ausschusses am Institut
- K. Knudsen: Mitglied des Fachbeirats von IDA (Instrumentcenter for Danish Astrophysics)
- O. Krause: Mitglied des SPITZER Time Allocation Review Panel
- M. Kürster: Mitglied des IAU Working Group »Extrasolar Planets«, Mitglied des Organizing Committee for the Creation of IAU Commission 53, »Extrasolar Planets«
- R. Launhardt: Vorstandsmitglied der Ernst-Patzer-Stiftung
- Ch. Leinert: Mitglied des VLTI subpanel im ESO Science and Technical Committee
- D. Lemke: Mitglied des MIRI Steering Committee (Berater des DLR)
- R. Lenzen: Mitglied des TAC für das ESO/MPG 2.2 m Telescope auf La Silla, Sprecher der Behinderten am Institut, Sicherheitsbeauftragter (Wissenschaft)
- H.-W. Rix: Vorsitz des Fachbeirats des Astrophysikalischen Instituts Potsdam (AIP); Mitglied des Kuratoriums des AIP; Mitglied des Fachbeirats des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg (ARI); Mitglied des ESO Visiting Committee; Mitglied des Board of the Large Binocular Telescope Corporation (LBTC); Mitglied des Board of the Large Binocular Telescope Beteiligungs-gesellschaft (LBTB); Mitglied des Board of OPTICON; Mitglied des JWST/NIRSPEC Science Team; Mitglied des BMBF-Gutachterausschusses »Astrophysik und Astroteilchenphysik«; Mitglied des DFG Emmy-Noether-Ausschuss; Mitglied der DFG Fachkollegien
- H.-J. Röser: Mitglied des TAC für das ESO/MPG 2.2 m Teleskop auf La Silla
- J. Staude: Mitglied der Jury beim Bundeswettbewerb »Jugend forscht«
- E. Schinnerer: Mitglied des Patzer-Preis-Komitees, Gutachterin für das VLA/VLBA am National Radio Astronomy Observatory, Gleichstellungsbeauftragte am Institut.
- K. Tristram: Studentenvertreter in der Chemisch-Physikalisch-Technischen Section der MPG (PhDnet)
- F. Walter: Gutachter für NRAO, Mitglied des IRAM Programmkomitees
- S. Wolf: Mitglied des ESO OPC Observing Programmes Committee; P79/2006); Berater des ESO Observing Programmes Committee. Panel C »ISM, Star Formation and Planetary Systems«, Vorsitzender des Panel C1 in ESO Period P79, Co-Chair of Panel C1 in ESO Period P78; European Interferometry Initiative (EII) Working Group »Radiative Transfer Codes for modelling targets of long baseline optical and infrared interferometry«, Vorsitzender seit 12/2005; Second Generation mid-infrared interferometric VLTI instrument MATISSE, Co-PI und Project Scientist seit 11/2005; Mitglied des Science Teams für VSI/VITRUV (Second generation imaging near-IR interferometer for the VLTI); Gutachter für Astrophysical Journal, Astronomy and Astrophysics and Planetary Sciences Review Series (University of Arizona Press); SOC Mitglied der IOA Konferenz »The Planet-Disc Connection«, Cambridge (UK), Juli; Mitglied des Strategic Time Allocation Committee (STAC) am MPIA

Weitere Aktivitäten am Institut

Im *Physikalischen Fortgeschrittenenpraktikum* an der Universität Heidelberg betreuten Stephan Birkmann, Martin Hennemann, Sascha Quanz, Marc Schartmann, Jutta Stegmaier und Konrad Tristram den Versuch »FP30 – CCD photometry in modern astronomy«, sowie Stefan Hippler, Felix Hormuth, Anders Johansen und Daniel Meschke den Versuch »FP36 – Wavefront analysis with a Shack-Hartmann sensor«.

Beim *Astronomisch-astrophysikalischen Praktikum* an der Langessternwarte für Studenten der Astronomie assistierten Michael Zatloukal und Rainer Klement.

Ein *Schülerpraktikum* im Rahmen der Berufsorientierung an Gymnasien (BOGY) wurde von Klaus Meisenheimer organisiert und vom 23. – 27. Oktober durchgeführt, mit Unterstützung von Nadine Neumayer, Wolfgang Sauer, Marc Schartmann, Jutta Stegmaier, sowie Ulrich Bastian, Michael Biermann Holger Mandel (ZAH)

Für die Organisation und Durchführung der *Miniforschungsprojekte für Studenten* jüngerer Semester am MPIA war Sebastian Wolf verantwortlich, an der

Durchführung waren zahlreiche Kollegen beteiligt.

Der *Girls' Day* am MPIA (27. April) wurde von Eva Schinnerer organisiert. An der Durchführung waren 35 Mirabeiter des Instituts beteiligt.

Unsere Veranstaltung zur *Langen Nacht der Museen* (18. März) wurde von Klaus Jäger organisiert. Bei der Durchführung halfen 20 weitere Mitarbeiter des Instituts.

Sascha P. Quanz und Jutta Stegmaier organisierten die Reihe »*Astronomie am Sonntag Vormittag*« – acht öffentliche Vorträge am Institut während des Sommersemesters

Jakob Staude, unterstützt von Axel M. Quetz, gestaltete den 45. Jahrgang der Zeitschrift *Sterne und Weltraum*.

Im Laufe des Jahres wurden insgesamt 840 *Besucher* in 36 Gruppen durch das MPIA geführt (Axel M. Quetz, Stephan Brinkmann und andere)

Das *Kuratorium* des MPIA tagte am 28. September im Institut.

An der Organisation und Durchführung von *Explore Science* (Mannheim), einer Veranstaltung für Schüler der Region, beteiligten sich Christian Fendt, Klaus Meisenheimer

und Klaus Jäger in Zusammenarbeit mit Cecilia Scorza de Appl, LSW (Juni)

Das Institut beteiligte sich am *Euroscience Open Forum* am 15. – 19. Juli in München (Th. Henning, K. Jäger)

Wolfgang Brandner war ab Juli Gastprofessor an der University of California, Los Angeles

Das MPIA setzte im Berichtsjahr verschiedene Maßnahmen zur besseren *Vereinbarkeit von Beruf und Familie* um.

Dazu gehören u.a. die Einrichtung eines Baby-Büros für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Schaffung der Möglichkeiten familienbedingter Tele- und Heimarbeit, Verbesserung des Informationsaustausches zum Thema Vereinbarkeit von Beruf und Familie. Diese Maßnahmen sollen laufend fortentwickelt werden, um die Rahmenbedingungen für die Forschungsarbeit am Institut weiter zu verbessern.

Preise

Der Ernst-Patzer-Preis zur Förderung von Nachwuchswissenschaftlern wurde im Berichtsjahr zweimal vergeben

Vernesa Smolcic aus Kroatien, Doktorandin an der Heidelberger International Max Planck Research School (IMPRS) für Astronomie und Kosmische Physik, erhielt ihren Preis für die Veröffentlichung einer Arbeit über die »Kaulquappen-Galaxie« CWAT-01.

Catherine Heymans aus Großbritannien, am Institut als Postdoc am Projekt GEMS (Galactic Evolution from Morphology and Spectral energy distribution) beteiligt, erhielt ihren Preis für eine Arbeit zum schwachen Gravitationslinseneffekt.

Veröffentlichungen

In Zeitschriften mit Referierungssystem

Ábrahám, P., L. Mosoni, T. Henning, Á. Kóspál, C. Leinert, S. P. Quanz, T. Ratzka: First AU-scale observations of V1647 Orionis with VLTI/MIDI. *Astronomy and Astrophysics* 449, L13 – L16 (2006)

Abuter, R., J. Schreiber, F. Eisenhauer, T. Ott, M. Horrobin, S. Gillesen: SINFONI data reduction software. *New Astronomy Reviews* 50, 398 – 400 (2006)

Adelman-McCarthy, J. K., M. A. Agüeros, S. S. Allam, K. S. J. Anderson, S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, I. K. Baldry, J. C. Barentine, A. Berlind, M. Bernardi, M. R. Blanton, W. N. Boroski, H. J. Brewington, J. Brinchmann, J. Brinkmann, R. J. Brunner, T. Budavári, L. N. Carey, M. A. Carr, F. J. Castander, A. J. Connolly, I. Csabai, P. C. Czarapata, J. J. Dalcanton, M. Doi, F. Dong, D. J. Eisenstein, M. L. Evans, X. Fan, D. P. Finkbeiner, S. D. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, B. Gillespie, K. Glazebrook, J. Gray, E. K. Grebel, J. E. Gunn, V. K. Gurbani, E. de Haas, P. B. Hall, F. H. Harris, M. Harvanek, S. L. Hawley, J. Hayes, J. S. Hendry, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, C. M. Hirata, C. J. Hogan, D. W. Hogg, D. J. Holmgren, J. A. Holtzman, S.-i. Ichikawa, Z. Ivezic, S. Jester, D. E. Johnston, A. M. Jorgensen, M. Juric, S. M. Kent, S. J. Kleinman, G. R. Knapp, A. Y. Kniazev, R. G. Kron, J. Krzesinski, N. Kuropatkin, D. Q. Lamb, H. Lampeitl, B. C. Lee, R. F. Leger, H. Lin, D. C. Long, J. Loveday, R. H. Lupton, B. Margon, D. Martínez-Delgado, R. Mandelbaum, T. Matsubara, P. M. McGehee,

T. A. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, R. Nakajima, T. Nash, E. H. Neilsen, Jr., H. J. Newberg, P. R. Newman, R. C. Nichol, T. Nicinski, M. Nieto-Santisteban, A. Nitta, W. O'Mullane, S. Okamura, R. Owen, N. Padmanabhan, G. Pauls, J. Peoples, Jr., J. R. Pier, A. C. Pope, D. Pourbaix, T. R. Quinn, G. T. Richards, M. W. Richmond, C. M. Rockosi, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, J. Schroeder, R. Scranton, U. Seljak, E. Sheldon, K. Shimasaku, J. A. Smith, V. Smolcic, S. A. Snedden, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, P. Szkody, M. Tegmark, A. R. Thakar, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. E. Vanden Berk, J. Vandenberg, M. S. Vogeley, W. Voges, N. P. Vogt, L. M. Walkowicz, D. H. Weinberg, A. A. West, S. D. M. White, Y. Xu, B. Yanny, D. R. Yocom, D. G. York, I. Zehavi, S. Zibetti, D. B. Zucker: The Fourth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophysical Journal Supplement Series* 162, 38 – 48 (2006)

Afonso, C., J. F. Glicenstein, A. Gould, M. C. Smith, R. M. Wagner, J. N. Albert, J. Andersen, R. Ansari, É. Aubourg, P. Bareyre, J. P. Beaulieu, G. Blanc, X. Charlot, C. Coutures, R. Ferlet, P. Fouqué, B. Goldman, D. Graff, M. Gros, J. Haissinski, C. Hamadache, J. de Kat, L. Leguillou, É. Lesquoy, C. Loup, C. Magneville, J. B. Marquette, É. Maurice, A. Maury, A. Milsztajn, M. Moniez, N. Palanque-Delabrouille, O. Perdereau, L. Prévot, Y. R. Rahal, J. Rich, M. Spiro, P. Tisserand, A. Vidal-Madjar, L. Vigroux, S. Zylberajch: The OGLE-II

- event sc5_2859: A classical nova outburst? *Astronomy and Astrophysics* 450, 233–239 (2006)
- Araya, E., P. Hofner, W. M. Goss, S. Kurtz, H. Linz, L. Olmi: Anew galactic 6 cm formaldehyde maser. *The Astrophysical Journal* 643, L33–L36 (2006)
- Araya, E., P. Hofner, L. Olmi, S. Kurtz, H. Linz: Arecibo observations of formaldehyde in L1551. *The Astronomical Journal* 132, 1851–1858 (2006)
- Assef, R. J., A. Gould, C. Afonso, J. N. Albert, J. Andersen, R. Ansari, É. Aubourg, P. Bareyre, J. P. Beaulieu, X. Charlot, C. Coutures, R. Ferlet, P. Fouqué, J. F. Glicenstein, B. Goldman, D. Graff, M. Gros, J. Haissinski, C. Hamadache, J. de Kat, L. Le Guillou, É. Lesquoy, C. Loup, C. Magneville, J. B. Marquette, É. Maurice, A. Maury, A. Milsztajn, M. Moniez, N. Palanque-Delabrouille, O. Perdereau, Y. R. Rahal, J. Rich, M. Spiro, P. Tisserand, A. Vidal-Madjar, L. Vigroux, S. Zylberajch, D. P. Bennett, A. C. Becker, K. Griest, T. Vandehei, D. L. Welch, A. Udalski, M. K. Szymanski, M. Kubiak, G. Pietrzynski, I. Soszynski, O. Szewczyk, L. Wyrzykowski: Removing the microlensing blending-parallax degeneracy using source variability. *The Astrophysical Journal* 649, 954–964 (2006)
- Auld, R., W. J. G. de Blok, E. Bell, J. I. Davies: Morphology and star formation in nearby low surface brightness galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 366, 1475–1492 (2006)
- Bailer-Jones, C. A. L.: Prospects for GAIA and other space-based surveys. *Memorie della Societa Astronomica Italiana* 77, 1144–1152 (2006)
- Barazza, F. D., S. Jogee, H.-W. Rix, M. Barden, E. F. Bell, J. A. R. Caldwell, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, C. Wolf: Color, structure, and star formation history of dwarf galaxies over the last ~ 3 Gyr with GEMS and SDSS. *The Astrophysical Journal* 643, 162–172 (2006)
- Beckwith, S. V. W., M. Stiavelli, A. M. Koekemoer, J. A. R. Caldwell, H. C. Ferguson, R. Hook, R. A. Lucas, L. E. Bergeron, M. Corbin, S. Jogee, N. Panagia, M. Robberto, P. Royle, R. S. Somerville, M. Sosey: The HUBBLE Ultra Deep Field. *The Astronomical Journal* 132, 1729–1755 (2006)
- Bell, E. F., T. Naab, D. H. McIntosh, R. S. Somerville, J. A. R. Caldwell, M. Barden, C. Wolf, H.-W. Rix, S. V. Beckwith, A. Borch, B. Häussler, C. Heymans, K. Jahnke, S. Jogee, S. Koposov, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, S. F. Sanchez, L. Wisotzki: Dry mergers in GEMS: The dynamical evolution of massive early-type galaxies. *The Astrophysical Journal* 640, 241–251 (2006)
- Bell, E. F., S. Phleps, R. S. Somerville, C. Wolf, A. Borch, K. Meisenheimer: The merger rate of massive galaxies. *The Astrophysical Journal* 652, 270–276 (2006)
- Belokurov, V., D. B. Zucker, N. W. Evans, G. Gilmore, S. Vidrih, D. M. Bramich, H. J. Newberg, R. F. G. Wyse, M. J. Irwin, M. Fellhauer, P. C. Hewett, N. A. Walton, M. I. Wilkinson, N. Cole, B. Yanny, C. M. Rockosi, T. C. Beers, E. F. Bell, J. Brinkmann, Z. Ivezic, R. Lupton: The field of streams: Sagittarius and its siblings. *The Astrophysical Journal* 642, L137–L140 (2006)
- Belokurov, V., D. B. Zucker, N. W. Evans, M. I. Wilkinson, M. J. Irwin, S. Hodgkin, D. M. Bramich, J. M. Irwin, G. Gilmore, B. Willman, S. Vidrih, H. J. Newberg, R. F. G. Wyse, M. Fellhauer, P. C. Hewett, N. Cole, E. F. Bell, T. C. Beers, C. M. Rockosi, B. Yanny, E. K. Grebel, D. P. Schneider, R. Lupton, J. C. Barentine, H. Brewington, J. Brinkmann, M. Harvanek, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. Long, A. Nitta, J. A. Smith, S. A. Sneden: A faint new Milky Way satellite in Bootes. *The Astrophysical Journal* 647, L111–L114 (2006)
- Bendo, G. J., B. A. Buckalew, D. A. Dale, B. T. Draine, R. D. Joseph, R. C. Kennicutt, Jr., K. Sheth, J.-D. T. Smith, F. Walter, D. Calzetti, J. M. Cannon, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, G. Helou, D. Hollenbach, E. J. Murphy, H. Roussel: SPITZER and JCMT observations of the active galactic nucleus in the Sombrero Galaxy (NGC 4594). *The Astrophysical Journal* 645, 134–147 (2006)
- Benedict, G. F., B. E. McArthur, G. Gatewood, E. Nelan, W. D. Cochran, A. Hatzes, M. Endl, R. Wittenmyer, S. L. Baliunas, G. A. H. Walker, S. Yang, M. Kürster, S. Els, D. B. Paulson: The Extrasolar Planet ϵ Eridani b: Orbit and mass. *The Astronomical Journal* 132, 2206–2218 (2006)
- Berton, A., R. G. Gratton, M. Feldt, T. Henning, S. Desidera, M. Turatto, H. M. Schmid, R. Waters: Detecting extrasolar planets with integral field spectroscopy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 118, 1144–1164 (2006)
- Beuther, H., Q. Zhang, M. J. Reid, T. R. Hunter, M. Gurwell, D. Wilner, J. H. Zhao, H. Shinnaga, E. Keto, P. T. P. Ho, J. M. Moran, S. Y. Liu: Submillimeter Array 440 μ m/690 GHz line and continuum observations of Orion KL. *The Astrophysical Journal* 636, 323–331 (2006)
- Beuther, H., Q. Zhang, T. K. Sridharan, C. F. Lee, L. A. Zapata: The high-mass star-forming region IRAS 18182–1433. *Astronomy and Astrophysics* 454, 221–231 (2006)
- Biham, G., R. Rebolo, V. J. S. Béjar, J. A. Caballero, C. A. L. Bailer-Jones, R. Mundt, J. A. Acosta-Pulido, A. Manchado Torres: Pleiades low-mass brown dwarfs: the cluster L dwarf sequence. *Astronomy and Astrophysics* 458, 805–816 (2006)
- Biller, B. A., M. Kasper, L. M. Close, W. Brandner, S. Kellner: Discovery of a brown dwarf very close to the sun: A methane-rich brown dwarf companion to the low-mass star SCR 1845–6357. *The Astrophysical Journal* 641, L141–L144 (2006)
- Birkmann, S., O. Krause, D. Lemke: Very cold and massive cores near ISOSS J18364–0221: Implications for the initial conditions of high-mass star formation. *The Astrophysical Journal* 637, 380–383 (2006)
- Borch, A., K. Meisenheimer, E. F. Bell, H. W. Rix, C. Wolf, S. Dye, M. Kleinheinrich, Z. Kovacs, L. Wisotzki: The stellar masses of 25 000 galaxies at $0.2 < z < 1.0$ estimated by the COMBO-17 survey. *Astronomy and Astrophysics* 453, 869–881 (2006)

- Bouwman, J., W. A. Lawson, C. Dominik, E. D. Feigelson, T. Henning, A. G. G. M. Tielens, L. B. F. M. Waters: Binarity as a key factor in protoplanetary disk evolution: SPITZER disk Census of h Chamaeleontis cluster. *The Astrophysical Journal* 653, L57 – L60 (2006)
- Bouy, H., E. L. Martín, W. Brandner, M. R. Zapatero-Osorio, V. J. S. Béjar, M. Schirmer, N. Huélamo, A. M. Ghez: Multiplicity of very low-mass objects in the Upper Scorpius OB association: a possible wide binary population. *Astronomy and Astrophysics* 451, 177 – 186 (2006)
- Bouy, H., E. Moraux, J. Bouvier, W. Brandner, E. L. Martín, F. Allard, I. Baraffe, M. Fernández: A HUBBLE Space Telescope Advanced Camera for surveys search for brown dwarf binaries in the Pleiades open cluster. *The Astrophysical Journal* 637, 1056 – 1066 (2006)
- Broeg, C., V. Joergens, M. Fernández, D. Husar, T. Hearty, M. Ammler, R. Neuhäuser: Rotational periods of T Tauri stars in Taurus–Auriga, south of Taurus-Auriga, and in MBM12. *Astronomy and Astrophysics* 450, 1135 – 1148 (2006)
- Caballero, J. A., E. L. Martín, P. D. Dobbie, D. Barrado Y Navascués: Are isolated planetary-mass objects really isolated?. A brown dwarf-exoplanet system candidate in the σ Orionis cluster. *Astronomy and Astrophysics* 460, 635 – 640 (2006)
- Cacciato, M., M. Bartelmann, M. Meneghetti, L. Moscardini: Combining weak and strong lensing in cluster potential reconstruction. *Astronomy and Astrophysics* 458, 349 – 356 (2006)
- Cannon, J. M., J.-D. T. Smith, F. Walter, G. J. Bendo, D. Calzetti, D. A. Dale, B. T. Draine, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, G. Helou, R. C. Kennicutt, Jr., C. Leitherer, L. Armus, B. A. Buckalew, D. J. Hollenbach, T. H. Jarrett, A. Li, M. J. Meyer, E. J. Murphy, M. W. Regan, G. H. Rieke, M. J. Rieke, H. Roussel, K. Sheth, M. D. Thornley: Warm dust and spatially variable polycyclic aromatic hydrocarbon emission in the dwarf starburst galaxy NGC 1705. *The Astrophysical Journal* 647, 293 – 302 (2006)
- Cannon, J. M., F. Walter, L. Armus, G. J. Bendo, D. Calzetti, B. T. Draine, C. W. Engelbracht, G. Helou, R. C. Kennicutt, Jr., C. Leitherer, H. Roussel, C. Bot, B. A. Buckalew, D. A. Dale, W. J. G. de Blok, K. D. Gordon, D. J. Hollenbach, T. H. Jarrett, M. J. Meyer, E. J. Murphy, K. Sheth, M. D. Thornley: The nature of infrared emission in the Local Group dwarf galaxy NGC 6822 as revealed by SPITZER. *The Astrophysical Journal* 652, 1170 – 1187 (2006)
- Cappellari, M., R. Bacon, M. Bureau, M. C. Damen, R. L. Davies, P. T. de Zeeuw, E. Emsellem, J. Falcón-Barroso, D. Krajnovic, H. Kuntschner, R. M. McDermid, R. F. Peletier, M. Sarzi, R. C. E. van den Bosch, G. van de Ven: The SAURON project – IV. The mass-to-light ratio, the virial mass estimator and the Fundamental Plane of elliptical and lenticular galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 366, 1126 – 1150 (2006)
- Castro-Tirado, A. J., M. Jelínek, S. B. Pandey, S. McBreen, J. de Jong, D. K. Sahu, P. Ferrero, J. A. Caballero, J. Gorosabel, D. A. Kann, S. Klose, A. de Ugarte Postigo, G. C. Anupama, C. Gry, S. Guziy, S. Srividya, L. Valdivielso, S. Vanniarajan, A. A. Henden: GRB 051028: an intrinsically faint gamma-ray burst at high redshift? *Astronomy and Astrophysics* 459, 763 – 767 (2006)
- Chen, X. P., T. Henning, R. van Boekel, C. A. Grady: VLT/NACO adaptive optics imaging of the Herbig Ae star HD 100453. *Astronomy and Astrophysics* 445, 331 – 335 (2006)
- Chesneau, O., A. Collioud, O. de Marco, S. Wolf, E. Lagadec, A. A. Zijlstra, A. Rothkopf, A. Acker, G. C. Clayton, B. Lopez: A close look into the carbon disk at the core of the Planetary Nebula CPD-56°8032. *Astronomy and Astrophysics* 455, 1009 – 1018 (2006)
- Chini, R., V. H. Hoffmeister, M. Nielbock, C. M. Scheyda, J. Steinacker, R. Siebenmorgen, D. Nürnberger: A remnant disk around a young massive star. *The Astrophysical Journal* 645, L61 – L64 (2006)
- Christensen, L., K. Jahnke, L. Wisotzki, S. F. Sánchez: Extended Lyman- α emission around bright quasars. *Astronomy and Astrophysics* 459, 717 – 729 (2006)
- Christensen, L., K. Jahnke, L. Wisotzki, S. F. Sánchez, K. Exter, M. M. Roth: A jet – cloud interaction in the 3C 196 environment. *Astronomy and Astrophysics* 452, 869 – 874 (2006)
- Combes, F., S. García-Burillo, J. Braine, E. Schinnerer, F. Walter, L. Colina, M. Gerin: High resolution observations of a starburst at $z = 0.223$: resolved CO(1 – 0) structure. *Astronomy and Astrophysics* 460, L49 – L52 (2006)
- Comerón, F., A. Pasquali, J. Torra: G76.188 + 0.098: a newly born massive binary star. *Astronomy and Astrophysics* 457, 553 – 559 (2006)
- Corbin, M. R., W. D. Vacca, R. Cid Fernandes, J. E. Hibbard, R. S. Somerville, R. A. Windhorst: Ultracompact blue dwarf galaxies: HUBBLE Space Telescope imaging and stellar population analysis. *The Astrophysical Journal* 651, 861 – 873 (2006)
- Correia, S., H. Zinnecker, T. Ratzka, M. F. Sterzik: A VLT/NACO survey for triple and quadruple systems among visual pre-main sequence binaries. *Astronomy and Astrophysics* 459, 909 – 926 (2006)
- Cox, T. J., P. Jonsson, J. R. Primack, R. S. Somerville: Feedback in simulations of disc–galaxy major mergers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 373, 1013 – 1038 (2006)
- da Silva, L., L. Girardi, L. Pasquini, J. Setiawan, O. von der Lühe, J. R. de Medeiros, A. Hatzes, M. P. Döllinger, A. Weiss: Basic physical parameters of a selected sample of evolved stars. *Astronomy and Astrophysics* 458, 609 – 623 (2006)
- Dale, D. A., J. D. T. Smith, L. Armus, B. A. Buckalew, G. Helou, R. C. Kennicutt, Jr., J. Moustakas, H. Roussel, K. Sheth, G. J. Bendo, D. Calzetti, B. T. Draine, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, D. J. Hollenbach, T. H. Jarrett, L. J. Kewley, C. Leitherer, A. Li, S. Malhotra, E.

- J. Murphy, F. Walter: Mid-Infrared Spectral Diagnostics of Nuclear and Extranuclear Regions in Nearby Galaxies. *The Astrophysical Journal* 646, 161 – 173 (2006)
- Dannerbauer, H., E. Daddi, M. Onodera, X. Kong, H. Röttgering, N. Arimoto, M. Brusa, A. Cimatti, J. Kurk, M. Lehnert, M. Mignoli, A. Renzini: MAMBO 1.2 mm observations of BzK-selected star-forming galaxies at $z \sim 2$. *The Astrophysical Journal* 637, L5 – L8 (2006)
- de Blok, W. J. G., F. Walter: The Stellar population and interstellar medium in NGC 6822. *The Astronomical Journal* 131, 343 – 362 (2006)
- de Blok, W. J. G., F. Walter: The star formation threshold in NGC 6822. *The Astronomical Journal* 131, 363 – 374 (2006)
- de Rijcke, S., P. Buyle, J. Cannon, F. Walter, A. Lundgren, D. Michielsen, H. Dejonghe: APEX CO(3–2) observations of NGC 6822. *Astronomy and Astrophysics* 454, L111 – L114 (2006)
- de Val-Borro, M., R. G. Edgar, P. Artymowicz, P. Ciecielag, P. Cresswell, G. D'Angelo, E. J. Delgado-Donate, G. Dirksen, S. Fromang, A. Gawryszczak, H. Klahr, W. Kley, W. Lyra, F. Masset, G. Mellema, R. P. Nelson, S. J. Paardekooper, A. Peplinski, A. Pierens, T. Plewa, K. Rice, C. Schäfer, R. Speith: A comparative study of disc–planet interaction. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 370, 529 – 558 (2006)
- Debattista, V. P., I. Ferreras, A. Pasquali, A. Seth, S. De Rijcke, L. Morelli: The binary nucleus in VCC 128: A candidate supermassive black hole in a dwarf elliptical galaxy. *The Astrophysical Journal* 651, L97 – L100 (2006)
- Delerue, C., G. Allan, C. Reynaud, O. Guillois, G. Ledoux, F. Huisken: Multiexponential photoluminescence decay in indirect-gap semiconductor nanocrystals. *Physical Review B* 73, 235318–1 – 4 (2006)
- Dib, S., E. Bell, A. Burkert: The supernova rate–velocity dispersion relation in the interstellar medium. *The Astrophysical Journal* 638, 797 – 810 (2006)
- Dijkstra, C., C. Dominik, J. Bouwman, A. de Koter: Water ice growth around evolved stars. II. Modeling infrared spectra. *Astronomy and Astrophysics* 449, 1101 – 1116 (2006)
- Doucet, C., E. Pantin, P. O. Lagage, C. P. Dullemond: Mid-infrared imaging of the circumstellar dust around three Herbig Ae stars: HD 135344, CQ Tau, and HD 163296. *Astronomy and Astrophysics* 460, 117 – 124 (2006)
- Dullemond, C. P., D. Apai, S. Walch: Crystalline silicates as a probe of disk formation history. *The Astrophysical Journal* 640, L67 – L70 (2006)
- Dullemond, C. P., A. Natta, L. Testi: Accretion in protoplanetary disks: The imprint of core properties. *The Astrophysical Journal* 645, L69 – L72 (2006)
- Dunham, M. M., N. J. Evans, II, T. L. Bourke, C. P. Dullemond, C. H. Young, T. Y. Brooke, N. Chapman, P. C. Myers, A. Porras, W. Spiesman, P. J. Teuben, Z. Wahhaj: The SPITZER c2d survey of nearby dense cores. I. First direct detection of the embedded source in IRAM 04191 + 1522. *The Astrophysical Journal* 651, 945 – 959 (2006)
- Emsellem, E., K. Fathi, H. Wozniak, P. Ferruit, C. G. Mundell, E. Schinnerer: Gas and stellar dynamics in NGC 1068: probing the galactic gravitational potential. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 365, 367 – 384 (2006)
- Endl, M., W. D. Cochran, M. Kürster, D. B. Paulson, R. A. Wittenmyer, P. J. MacQueen, R. G. Tull: Exploring the frequency of close-in Jovian planets around M dwarfs. *The Astrophysical Journal* 649, 436 – 443 (2006)
- Engelbracht, C. W., P. Kundurthy, K. D. Gordon, G. H. Rieke, R. C. Kennicutt, J. D. T. Smith, M. W. Regan, D. Makovoz, M. Sosey, B. T. Draine, G. Helou, L. Armus, D. Calzetti, M. Meyer, G. J. Bendo, F. Walter, D. Hollenbach, J. M. Cannon, E. J. Murphy, D. A. Dale, B. A. Buckalew, K. Sheth: Extended mid-infrared aromatic feature emission in M82. *The Astrophysical Journal* 642, L127 – L132 (2006)
- Fendt, C.: Collimation of astrophysical jets: The role of the accretion disk magnetic field distribution. *The Astrophysical Journal* 651, 272 – 287 (2006)
- Ferreras, I., A. Pasquali, R. R. de Carvalho, I. G. de la Rosa, O. Lahav: A principal component analysis approach to the star formation history of elliptical galaxies in compact groups. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 370, 828 – 836 (2006)
- Flynn, C., J. Holmberg, L. Portinari, B. Fuchs, H. Jahreiß: On the mass-to-light ratio of the local Galactic disc and the optical luminosity of the galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 372, 1149 – 1160 (2006)
- Fontanot, F., P. Monaco, S. Cristiani, P. Tozzi: The effect of stellar feedback and quasar winds on the active galactic nucleus population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 373, 1173 – 1187 (2006)
- Förster Schreiber, N. M., M. Franx, I. Labbé, G. Rudnick, P. G. van Dokkum, G. D. Illingworth, K. Kuijen, A. F. M. Moorwood, H.-W. Rix, H. Röttgering, P. van der Werf: Faint Infrared Extragalactic Survey: Data and source catalog of the MS 1054 – 03 Field. *The Astronomical Journal* 131, 1891 – 1913 (2006)
- Fuchs, B., S. Phleps, K. Meisenheimer: »CADIS has seen the Virgo overdensity and parts of the Monoceros and »Orphan Streams in retrospect.« *Astronomy and Astrophysics* 457, 541 – 543 (2006)
- Gabasch, A., U. Hopp, G. Feulner, R. Bender, S. Seitz, R. P. Saglia, J. Smigula, N. Drory, I. Appenzeller, J. Heidt, D. Mehlert, S. Noll, A. Böhm, K. Jäger, B. Ziegler: The evolution of the luminosity functions in the FORS deep field from low to high redshift. II. The red bands. *Astronomy and Astrophysics* 448, 101 – 121 (2006)
- Geers, V. C., J.-C. Augereau, K. M. Pontoppidan, C. P. Dullemond, R. Visser, J. E. Kessler-Silacci, N. J. Evans, II, E. F. van Dishoeck, G. A. Blake, A. C. A. Boogert, J. M. Brown, F. Lahuis, B. Merín: C2D SPITZER–IRS spectra of disks around T Tauri stars. II. PAH emission features. *Astronomy and Astrophysics* 459, 545 – 556 (2006)

- Geissler, K., E. Masciadri: Meteorological parameter analysis above Dome C using data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 118, 1048 – 1065 (2006)
- Goto, M., B. Stecklum, H. Linz, M. Feldt, T. Henning, I. Pascucci, T. Usuda: High-resolution infrared imaging of HERSCHEL 36 SE: A showcase for the influence of massive stars in cluster environments. *The Astrophysical Journal* 649, 299 – 305 (2006)
- Goto, M., T. Usuda, C. P. Dullemond, T. Henning, H. Linz, B. Stecklum, H. Suto: Inner rim of a molecular disk spatially resolved in infrared CO emission lines. *The Astrophysical Journal* 652, 758 – 762 (2006)
- Gouliermis, D., W. Brandner, T. Henning: The low-mass pre-main-sequence population of the stellar association LH 52 in the Large Magellanic Cloud discovered with HUBBLE Space Telescope WFPC2 observations. *The Astrophysical Journal* 636, L133 – L136 (2006)
- Gouliermis, D., W. Brandner, T. Henning: The low-mass initial mass function of the field population in the Large Magellanic Cloud with HUBBLE Space Telescope WFPC2 observations. *The Astrophysical Journal* 641, 838 – 851 (2006)
- Gouliermis, D. A., A. E. Dolphin, W. Brandner, T. Henning: The star-forming region NGC 346 in the Small Magellanic Cloud with HUBBLE Space Telescope ACS observations. I. Photometry. *Astrophysical Journal Supplement Series* 166, 549 – 556 (2006)
- Gouliermis, D. A., S. Lianou, M. Kontizas, E. Kontizas, A. Dapergolas: HST WFPC2 observations of the peculiar main sequence of the double star cluster NGC 2011 in the Large Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal* 652, L93 – L96 (2006)
- Gredel, R.: HH135/HH136 – a luminous H₂ outflow towards a high-mass protostar. *Astronomy and Astrophysics* 457, 157 – 166 (2006)
- Grosbøl, P., H. Dottori, R. Gredel: Star-forming knots and density wave in NGC 2997. *Astronomy and Astrophysics* 453, L25 – L28 (2006)
- Gueunier-Farret, M. E., J. P. Kleider, F. Voigt, R. Brüggemann, G. H. Bauer, F. Huiskens, G. Ledoux: Transport properties and defects in silicon nanoparticles and effect of embedding in amorphous silicon layers. *Journal of Non-Crystalline Solids* 352, 1101 – 1104 (2006)
- Guirado, J. C., I. Martí-Vidal, J. M. Marcaide, L. M. Close, J. C. Algaba, W. Brandner, J. F. Lestrade, D. L. Jauncey, D. L. Jones, R. A. Preston, J. E. Reynolds: On the dynamics of the AB Doradus system. *Astronomy and Astrophysics* 446, 733 – 738 (2006)
- Hamadache, C., L. Le Guillou, P. Tisserand, C. Afonso, J. N. Albert, J. Andersen, R. Ansari, É. Aubourg, P. Bareyre, J. P. Beaulieu, X. Charlot, C. Coutures, R. Ferlet, P. Fouqué, J. F. Glicenstein, B. Goldman, A. Gould, D. Graff, M. Gros, J. Haissinski, J. de Kat, É. Lesquoy, C. Loup, C. Magneville, J. B. Marquette, É. Maurice, A. Maury, A. Milsztajn, M. Moniez, N. Palanque-Delabrouille, O. Perdereau, Y. R. Rahal, J. Rich, M. Spiro, A. Vidal-Madjar, L. Vigroux, S. Zylberajch: Galactic Bulge microlensing optical depth from EROS-2. *Astronomy and Astrophysics* 454, 185 – 199 (2006)
- Heidt, J., K. Jäger, M. Dietrich: The QSO HE1013 – 2136 ($z = 0.785$): Tracing the ULIRG-QSO connection towards large look-back times? *New Astronomy Reviews* 50, 762 – 765 (2006)
- Heymans, C., E. F. Bell, H.-W. Rix, M. Barden, A. Borch, J. A. R. Caldwell, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, C. Wolf, S. V. W. Beckwith, B. Häußler, K. Jahnke, S. Jogee, S. F. Sánchez, R. Somerville, L. Wisotzki: A weak lensing estimate from GEMS of the virial to stellar mass ratio in massive galaxies to $z \sim 0.8$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 371, L60 – L64 (2006)
- Heymans, C., L. Van Waerbeke, D. Bacon, J. Berge, G. Bernstein, E. Bertin, S. Bridle, M. L. Brown, D. Clowe, H. Dahle, T. Erben, M. Gray, M. Hetterscheidt, H. Hoekstra, P. Hudelot, M. Jarvis, K. Kuijken, V. Margoniner, R. Massey, Y. Mellier, R. Nakajima, A. Refregier, J. Rhodes, T. Schrabback, D. Wittman: The Shear Testing Programme – I. Weak lensing analysis of simulated ground-based observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 368, 1323 – 1339 (2006)
- Hines, D. C., D. E. Backman, J. Bouwman, L. A. Hillenbrand, J. M. Carpenter, M. R. Meyer, J. S. Kim, M. D. Silverstone, J. Rodmann, S. Wolf, E. E. Mamajek, T. Y. Brooke, D. L. Padgett, T. Henning, A. Moro-Martin, E. Stobie, K. D. Gordon, J. E. Morrison, J. Muzerolle, K. Y. L. Su: The formation and evolution of planetary systems (FEPS): Discovery of an unusual debris system associated with HD 12039. *The Astrophysical Journal* 638, 1070 – 1079 (2006)
- Hippler, S., F. Hormuth, D. J. Butler, W. Brandner, T. Henning: Atmosphere-like turbulence generation with surface-etched phase-screens. *Optics Express* 14, 10139 – 10148 (2006)
- Holtzman, J. A., C. Afonso, A. Dolphin: The Local Group stellar populations archive from the HUBBLE Space Telescope WFPC2. *Astrophysical Journal Supplement Series* 166, 534 – 548 (2006)
- Hopkins, P. F., R. S. Somerville, L. Hernquist, T. J. Cox, B. Robertson, Y. Li: The relation between quasar and merging galaxy luminosity functions and the merger-driven star formation history of the Universe. *The Astrophysical Journal* 652, 864 – 888 (2006)
- Hunter, T. R., C. L. Brogan, S. T. Megeath, K. M. Menten, H. Beuther, S. Thorwirth: Millimeter multiplicity in NGC 6334 I and I(N). *The Astrophysical Journal* 649, 888 – 893 (2006)
- Ivezic, Z., D. Schlegel, A. Uomoto, N. Bond, T. Beers, C. Allende Prieto, R. Wilhelm, Y. S. Lee, T. Sivarani, M. Juric, R. Lupton, C. Rockosi, G. Knapp, J. Gunn, B. Yanny, S. Jester, S. Kent, J. Pier, J. Munn, G. Richards, H. Newberg, M. Blanton, D. Eisenstein, S. Hawley, S. Anderson,

- H. Harris, F. Kiuchi, A. Chen, J. Bushong, H. Sohi, D. Haggard, A. Kimball, J. Barentine, H. Brewington, M. Harvanek, S. Kleinman, J. Krzesinski, D. Long, A. Nitta, S. Snedden: SDSS spectroscopic survey of stars. *Memorie della Societa Astronomica Italiana* 77, 1057 (2006)
- Jackson, D. C., J. M. Cannon, E. D. Skillman, H. Lee, R. D. Gehrz, C. E. Woodward, E. Polomski: Hot dust and polycyclic aromatic hydrocarbon emission at low metallicity: A SPITZER survey of local group and other nearby dwarf galaxies. *The Astrophysical Journal* 646, 192 – 204 (2006)
- Jäger, C., S. Krasnokutski, A. Staicu, F. Huisken, H. Mutschke, T. Henning, W. Poppitz, I. Voicu: Identification and spectral properties of polycyclic aromatic hydrocarbons in carbonaceous soot produced by laser pyrolysis. *Astrophysical Journal Supplement Series* 166, 557 – 566 (2006)
- Jäger, C., H. Mutschke, F. Huisken, R. Alexandrescu, I. Morjan, F. Dumitrache, R. Barjega, I. Soare, B. David, O. Schneeweiss: Iron-carbon nanoparticles prepared by CO₂ laser pyrolysis of toluene and iron pentacarbonyl. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* 85, 53 – 62 (2006)
- Jahnke, K., S. F. Sánchez, A. Koekemoer: Seeing the sky through HUBBLE's eye: The COSMOS SkyWalker. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 118, 1186 – 1189 (2006)
- Jahnke, K., L. Wisotzki, S. F. Sánchez: Young stars in high- z QSO host galaxies. *New Astronomy Reviews* 50, 766 – 768 (2006)
- Janson, M., W. Brandner, T. Henning, H. Zinnecker: Early ComeOn + adaptive optics observation of GQ Lupi and its substellar companion. *Astronomy and Astrophysics* 453, 609 – 614 (2006)
- Jester, S., D. E. Harris, H. L. Marshall, K. Meisenheimer: New CHANDRA observations of the Jet in 3C 273. I. Softer X-ray than radio spectra and the X-ray emission mechanism. *The Astrophysical Journal* 648, 900 – 909 (2006)
- Jetha, N. N., M. J. Hardcastle, I. Sakelliou: Jet speeds in wide-angle tailed radio galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 368, 609 – 618 (2006)
- Jiang, L., X. Fan, D. C. Hines, Y. Shi, M. Vestergaard, F. Bertoldi, W. N. Brandt, C. L. Carilli, P. Cox, E. Le Floc'h, L. Pentericci, G. T. Richards, G. H. Rieke, D. P. Schneider, M. A. Strauss, F. Walter, J. Brinkmann: Probing the evolution of infrared properties of $z \sim 6$ quasars: SPITZER observations. *The Astronomical Journal* 132, 2127 – 2134 (2006)
- Johansen, A., T. Henning, H. Klahr: Dust sedimentation and self-sustained Kelvin-Helmholtz Turbulence in protoplanetary disk midplanes. *The Astrophysical Journal* 643, 1219 – 1232 (2006)
- Johansen, A., H. Klahr, T. Henning: Gravoturbulent formation of planetesimals. *The Astrophysical Journal* 636, 1121 – 1134 (2006)
- Johansen, A., H. Klahr, A. J. Mee: Turbulent diffusion in protoplanetary discs: The effect of an imposed magnetic field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 370, L71 – L75 (2006)
- Jonsson, P., T. J. Cox, J. R. Primack, R. S. Somerville: Simulations of dust in interacting galaxies. I. Dust attenuation. *The Astrophysical Journal* 637, 255 – 268 (2006)
- Jordi, C., E. Høg, A. G. A. Brown, L. Lindegren, C. A. L. Bailer-Jones, J. M. Carrasco, J. Knude, V. Straizys, J. H. J. de Bruijne, J. F. Claeskens, R. Drimmel, F. Figueras, M. Grenon, I. Kolka, M. A. C. Perryman, G. Tautvaisiene, V. Vansevicius, P. G. Willemsen, A. Bridzis, D. W. Evans, C. Fabricius, M. Fiorucci, U. Heiter, T. A. Kaempf, A. Kazlauskas, A. Kucinskas, V. Malyuto, U. Munari, C. Reylé, J. Torra, A. Vallenari, K. Zdanavicius, R. Korakitis, O. Malkov, A. Smette: The design and performance of the GAIA photometric system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 367, 290 – 314 (2006)
- Kessler-Silacci, J., J.-C. Augereau, C. P. Dullemond, V. Geers, F. Lahuis, N. J. Evans, II, E. F. van Dishoeck, G. A. Blake, A. C. A. Boogert, J. Brown, J. K. Jørgensen, C. Knez, K. M. Pontoppidan: c2d SPITZER IRS spectra of disks around T Tauri stars. I. Silicate emission and grain growth. *The Astrophysical Journal* 639, 275 – 291 (2006)
- Kiss, C., P. Ábrahám, R. J. Laureijs, A. Moór, S. M. Birkmann: Constraints on the nature of dust particles by infrared observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 373, 1213 – 1226 (2006)
- Kiss, Z., L. V. Toth, O. Krause, M. Kun, M. Stickel: Star formation in the Cepheus Flare region: Implications from morphology and infrared properties of optically selected clouds. *Astronomy and Astrophysics* 453, 923 – 936 (2006)
- Klaas, U., H. J. Walker, T. G. Müller, P. J. Richards, J. Schreiber: Multi-aperture photometry of extended IR sources with ISOPHOT. I. The nature of extended IR emission of planetary Nebulae. *Astronomy and Astrophysics* 452, 523 – 535 (2006)
- Klahr, H., P. Bodenheimer: Formation of giant planets by concurrent accretion of solids and gas inside an anticyclonic vortex. *The Astrophysical Journal* 639, 432 – 440 (2006)
- Klahr, H., W. Kley: 3D-radiation hydro simulations of disk-planet interactions. I. Numerical algorithm and test cases. *Astronomy and Astrophysics* 445, 747 – 758 (2006)
- Kleinheinrich, M., P. Schneider, H.-W. Rix, T. Erben, C. Wolf, M. Schirmer, K. Meisenheimer, A. Borch, S. Dye, Z. Kovacs, L. Wisotzki: Weak lensing measurements of dark matter halos of galaxies from COMBO-17. *Astronomy and Astrophysics* 455, 441 – 451 (2006)
- Knudsen, K. K., V. E. Barnard, P. P. van der Werf, P. Vielva, J. P. Kneib, A. W. Blain, R. B. Barreiro, R. J. Ivison, I. Smail, J. A. Peacock: An ultradeep submillimetre map: Beneath the SCUBA confusion limit with lensing and robust source extraction. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 368, 487 – 496 (2006)

- Koike, C., H. Mutschke, H. Suto, T. Naoi, H. Chihara, T. Henning, C. Jäger, A. Tsuchiyama, J. Dorschner, H. Okuda: Temperature effects on the mid- and far-infrared spectra of olivine particles. *Astronomy and Astrophysics* 449, 583 – 596 (2006)
- Kondo, S., N. Kobayashi, Y. Minowa, T. Tsujimoto, C. W. Churchill, N. Takato, M. Iye, Y. Kamata, H. Terada, T.-S. Pyo, H. Takami, Y. Hayano, T. Kanzawa, D. Saint-Jacques, W. Gaessler, S. Oya, K. Nedachi, A. Tokunaga: First detection of Na I D lines in high-redshift damped Ly α Systems. *The Astrophysical Journal* 643, 667 – 674 (2006)
- Körding, E. G., S. Jester, R. Fender: Accretion states and radio loudness in active galactic nuclei: analogies with X-ray binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 372, 1366 – 1378 (2006)
- Kornet, K., S. Wolf: Radial distribution of planets. Predictions based on the core-accretion gas-capture planet-formation model. *Astronomy and Astrophysics* 454, 989 – 995 (2006)
- Kornet, K., S. Wolf, M. Różyczka: Formation of giant planets around stars with various masses. *Astronomy and Astrophysics* 458, 661 – 668 (2006)
- Kriek, M., P. G. van Dokkum, M. Franx, N. M. Förster Schreiber, E. Gawiser, G. D. Illingworth, I. Labbé, D. Marchesini, R. Quadri, H.-W. Rix, G. Rudnick, S. Toft, P. van der Werf, S. Wuyts: Direct measurements of the stellar continua and Balmer/4000 Å breaks of Red $z > 2$ Galaxies: Redshifts and improved constraints on stellar populations 1. *The Astrophysical Journal* 645, 44 – 54 (2006)
- Kriek, M., P. G. van Dokkum, M. Franx, R. Quadri, E. Gawiser, D. Herrera, G. D. Illingworth, I. Labbé, P. Lira, D. Marchesini, H.-W. Rix, G. Rudnick, E. N. Taylor, S. Toft, C. M. Urry, S. Wuyts: Spectroscopic identification of massive galaxies at $z \sim 2.3$ with strongly suppressed star formation. *The Astrophysical Journal* 649, L71 – L74 (2006)
- Kundurthy, P., M. R. Meyer, M. Robberto, S. V. W. Beckwith, T. Herbst: Mid-Infrared observations of T Tauri stars: Probing the star-disk connection in rotational evolution. *The Astronomical Journal* 132, 2469 – 2477 (2006)
- Labadie, L., C. Vigreux-Bercovici, A. Pradel, P. Kern, B. Arezki, J.-E. Broquin: M-lines characterization of selenide and telluride thick films for mid-infrared interferometry. *Optics Express* 14, 8459 – 8469 (2006)
- Lahuis, F., E. F. van Dishoeck, A. C. A. Boogert, K. M. Pontoppidan, G. A. Blake, C. P. Dullemond, N. J. Evans, II, M. R. Hogerheijde, J. K. Jørgensen, J. E. Kessler-Silacci, C. Knez: Hot organic molecules toward a young low-mass star: A look at inner disk chemistry. *The Astrophysical Journal* 636, L145 – L148 (2006)
- Lara, L. M., H. Boehnhardt, R. Gredel, P. J. Gutiérrez, J. L. Ortiz, R. Rodrigo, M. J. Vidal-Nuñez: Pre-impact monitoring of Comet 9P/Tempel 1, the Deep Impact target. *Astronomy and Astrophysics* 445, 1151 – 1157 (2006)
- Lebrón, M., H. Beuther, P. Schilke, T. Stanke: The extremely high-velocity molecular outflow in IRAS 20126+4104. *Astronomy and Astrophysics* 448, 1037 – 1042 (2006)
- Lebzelter, T., T. Posch, K. Hinkle, P. R. Wood, J. Bouwman: Tracing the development of dust around evolved stars: The case of 47 Tuc. *The Astrophysical Journal* 653, L145 – L148 (2006)
- Lee, C.-F., P. T. P. Ho, H. Beuther, T. L. Bourke, Q. Zhang, N. Hirano, H. Shang: Infall and outflow around the HH 212 protostellar system. *The Astrophysical Journal* 639, 292 – 302 (2006)
- Lee, H., E. D. Skillman, J. M. Cannon, D. C. Jackson, R. D. Gehrz, E. F. Polomski, C. E. Woodward: On extending the mass–metallicity relation of galaxies by 2.5 decades in stellar mass. *The Astrophysical Journal* 647, 970 – 983 (2006)
- Lee, K.-S., M. Giavalisco, O. Y. Gnedin, R. S. Somerville, H. C. Ferguson, M. Dickinson, M. Ouchi: The large-scale and small-scale clustering of Lyman Break Galaxies at $3.5 \leq z \leq 5.5$ from the GOODS Survey. *The Astrophysical Journal* 642, 63 – 80 (2006)
- Leroy, A., A. Bolatto, F. Walter, L. Blitz: Molecular gas in the low-metallicity, star-forming dwarf IC 10. *The Astrophysical Journal* 643, 825 – 843 (2006)
- Letawe, G., P. Magain, F. Courbin, P. Jablonka, G. Meylan, K. Jahnke, L. Wisotzki: VLT on-axis spectroscopy of quasar host galaxies. *New Astronomy Reviews* 50, 779 – 781 (2006)
- Luhman, K. L., J. C. Wilson, W. Brandner, M. F. Skrutskie, M. J. Nelson, J. D. Smith, D. E. Peterson, M. C. Cushing, E. Young: Discovery of a young substellar companion in Chamaeleon. *The Astrophysical Journal* 649, 894 – 899 (2006)
- Maier, C., S. J. Lilly, C. M. Carollo, K. Meisenheimer, H. Hippelein, A. Stockton: Oxygen gas abundances at $z \sim 1.4$: Implications for the chemical evolution history of galaxies. *The Astrophysical Journal* 639, 858 – 867 (2006)
- Maraston, C., E. Daddi, A. Renzini, A. Cimatti, M. Dickinson, C. Papovich, A. Pasquali, N. Pirzkal: Evidence for TP-AGB stars in high-redshift galaxies, and their effect on deriving stellar population parameters. *The Astrophysical Journal* 652, 85 – 96 (2006)
- Marcillac, D., D. Elbaz, S. Charlot, Y. C. Liang, F. Hammer, H. Flores, C. Cesarsky, A. Pasquali: The star formation history of luminous infrared galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 458, 369 – 383 (2006)
- Martín, E. L., W. Brandner, H. Bouy, G. Basri, J. Davis, R. Deshpande, M. M. Montgomery: Resolved HUBBLE space spectroscopy of ultracool binary systems. *Astronomy and Astrophysics* 456, 253 – 259 (2006)
- Masiadri, E., S. Egner: First seasonal study of optical turbulence with an atmospheric model. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 118, 1604 – 1619 (2006)
- Masjedi, M., D. W. Hogg, R. J. Cool, D. J. Eisenstein, M. R. Blanton, I. Zehavi, A. A. Berlind, E. F. Bell, D. P.

- Schneider, M. S. Warren, J. Brinkmann: Very small scale clustering and merger rate of Luminous Red Galaxies. *The Astrophysical Journal* 644, 54 – 60 (2006)
- McIntosh, D. H., E. F. Bell, M. D. Weinberg, N. Katz: Nature and completeness of galaxies detected in the Two Micron All Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 373, 1321 – 1338 (2006)
- Mehlert, D., C. Tapken, I. Appenzeller, S. Noll, D. de Mello, T. M. Heckman: Medium-resolution spectroscopy of galaxies with redshifts $2.3 < z < 3.5$. *Astronomy and Astrophysics* 455, 835 – 843 (2006)
- Miley, G. K., R. A. Overzier, A. W. Zirm, H. C. Ford, J. Kurk, L. Pentericci, J. P. Blakeslee, M. Franx, G. D. Illingworth, M. Postman, P. Rosati, H. J. A. Röttgering, B. P. Venemans, E. Helder: The Spiderweb galaxy: A forming massive cluster galaxy at $z \sim 2$. *The Astrophysical Journal* 650, L29 – L32 (2006)
- Monaco, P., G. Murante, S. Borgani, F. Fontanot: Diffuse stellar component in galaxy clusters and the evolution of the most massive galaxies at $z \leq 1$. *The Astrophysical Journal* 652, L89 – L92 (2006)
- Moór, A., P. Ábrahám, A. Derekas, C. Kiss, L. L. Kiss, D. Apai, C. Grady, T. Henning: Nearby debris disk systems with high fractional luminosity reconsidered. *The Astrophysical Journal* 644, 525 – 542 (2006)
- Movsessian, T. A., T. Khanzadyan, C. Aspin, T. Y. Magakian, T. Beck, A. Moiseev, M. D. Smith, E. H. Nikogossian: An outbursting protostar of the FU Orionis type in the Cygnus OB7 molecular cloud. *Astronomy and Astrophysics* 455, 1001 – 1008 (2006)
- Murphy, E. J., R. Braun, G. Helou, L. Armus, J. D. P. Kenney, K. D. Gordon, G. J. Bendo, D. A. Dale, F. Walter, T. A. Oosterloo, R. C. Kennicutt, Jr., D. Calzetti, J. M. Cannon, B. T. Draine, C. W. Engelbracht, D. J. Hollenbach, T. H. Jarrett, L. J. Kewley, C. Leitherer, A. Li, M. J. Meyer, M. W. Regan, G. H. Rieke, M. J. Rieke, H. Roussel, K. Sheth, J. D. T. Smith, M. D. Thornley: An initial look at the far-infrared-radio correlation within star-forming galaxies using the SPITZER Space Telescope. *The Astrophysical Journal* 638, 157 – 175 (2006)
- Murphy, E. J., G. Helou, R. Braun, J. D. P. Kenney, L. Armus, D. Calzetti, B. T. Draine, R. C. Kennicutt, Jr., H. Roussel, F. Walter, G. J. Bendo, B. Buckalew, D. A. Dale, C. W. Engelbracht, J. D. T. Smith, M. D. Thornley: The effect of star formation on the far-infrared-radio correlation within galaxies. *The Astrophysical Journal* 651, L111 – L115 (2006)
- Naab, T., I. Trujillo: Surface density profiles of collisionless disc merger remnants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 369, 625 – 644 (2006)
- Neistein, E., F. C. van den Bosch, A. Dekel: Natural downsizing in hierarchical galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 372, 933 – 948 (2006)
- Neumayer, N., M. Cappellari, H.-W. Rix, M. Hartung, M. A. Prieto, K. Meisenheimer, R. Lenzen: VLT diffraction-limited imaging and spectroscopy in the NIR: Weighing the black hole in Centaurus A with NACO. *The Astrophysical Journal* 643, 226 – 237 (2006)
- Nota, A., M. Sirianni, E. Sabbi, M. Tosi, M. Clampin, J. Gallagher, M. Meixner, M. S. Oey, A. Pasquali, L. J. Smith, R. Walterbos, J. Mack: Discovery of a population of pre-main-sequence stars in NGC 346 from Deep HUBBLE Space Telescope ACS images. *The Astrophysical Journal* 640, L29 – L33 (2006)
- Obre, M., Z. Ivezić, P. N. Best, R. H. Lupton, C. Tremonti, J. Brinchmann, M. A. Agüeros, G. R. Knapp, J. E. Gunn, C. M. Rockosi, D. Schlegel, D. Finkbeiner, M. Gacesa, V. Smolcic, S. F. Anderson, W. Voges, M. Juric, R. J. Siverd, W. Steinhardt, A. S. Jagoda, M. R. Blanton, D. P. Schneider: Panchromatic properties of 99 000 galaxies detected by SDSS, and (some by) ROSAT GALEX, 2MASS, IRAS, GB6, FIRST, NVSS and WENSS surveys. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 370, 1677 – 1698 (2006)
- Ofek, E. O., D. Maoz, H.-W. Rix, C. S. Kochanek, E. E. Falco: Spectroscopic redshifts for seven lens galaxies. *The Astrophysical Journal* 641, 70 – 77 (2006)
- Ohnaka, K., T. Driebe, K. H. Hofmann, C. Leinert, S. Morel, F. Paresce, T. Preibisch, A. Richichi, D. Schertl, M. Schöller, L. B. F. M. Waters, G. Weigelt, M. Wittkowski: High angular resolution *N*-band observation of the silicate carbon star IRAS 08002 – 3803 with the VLTI/MIDI instrument. Dusty environment spatially resolved. *Astronomy and Astrophysics* 445, 1015 – 1029 (2006)
- Palau, A., P. T. P. Ho, Q. Zhang, R. Estalella, N. Hirano, H. Shang, C. F. Lee, T. L. Bourke, H. Beuther, Y. J. Kuan: Submillimeter emission from the hot molecular jet HH 211. *The Astrophysical Journal* 636, L137 – L140 (2006)
- Pascucci, I., U. Gorti, D. Hollenbach, J. Najita, M. R. Meyer, J. M. Carpenter, L. A. Hillenbrand, G. J. Herczeg, D. L. Padgett, E. E. Mamajek, M. D. Silverstone, W. M. Schlingman, J. S. Kim, E. B. Stobie, J. Bouwman, S. Wolf, J. Rodmann, D. C. Hines, J. Lunine, R. Malhotra: Formation and evolution of planetary systems: Upper limits to the gas mass in disks around sun-like stars. *The Astrophysical Journal* 651, 1177 – 1193 (2006)
- Pasquali, A., F. Comerón, A. Nota: The birth-cluster of the galactic luminous blue variable WRA 751. *Astronomy and Astrophysics* 448, 589 – 596 (2006)
- Pasquali, A., N. Pirzkal, S. Larsen, J. R. Walsh, M. Kümmel: Slitless grism spectroscopy with the HUBBLE Space Telescope Advanced Camera for surveys. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 118, 270 – 287 (2006)
- Pavlyuchenkov, Y., D. Wiebe, R. Launhardt, T. Henning: CB 17: Inferring the dynamical history of a prestellar core with chemodynamical models. *The Astrophysical Journal* 645, 1212 – 1226 (2006)
- Peñarrubia, J., A. J. Benson, D. Martínez-Delgado, H.-W. Rix: Modeling tidal streams in evolving dark matter halos. *The Astrophysical Journal* 645, 240 – 255 (2006)
- Peng, C. Y., C. D. Impey, L. C. Ho, E. J. Barton, H.-W. Rix: Probing the coevolution of supermassive black holes and quasar host galaxies. *The Astrophysical Journal* 640, 114 – 125 (2006)

- Peng, C. Y., C. D. Impey, H.-W. Rix, E. E. Falco, C. R. Keeton, C. S. Kochanek, J. Lehár, B. A. McLeod: Lensed quasar hosts. *New Astronomy Reviews* 50, 689–693 (2006)
- Peng, C. Y., C. D. Impey, H.-W. Rix, C. S. Kochanek, C. R. Keeton, E. E. Falco, J. Lehár, B. A. McLeod: Probing the coevolution of supermassive black holes and galaxies using gravitationally lensed quasar hosts. *The Astrophysical Journal* 649, 616–634 (2006)
- Perlman, E. S., C. A. Padgett, M. Georganopoulos, W. B. Sparks, J. A. Biretta, C. P. O'Dea, S. A. Baum, M. Birkinshaw, D. M. Worrall, F. Dulwich, S. Jester, A. Martel, A. Capetti, J. P. Leahy: Optical polarimetry of the jets of nearby radio galaxies. I. The data. *The Astrophysical Journal* 651, 735–748 (2006)
- Phleps, S., J. A. Peacock, K. Meisenheimer, C. Wolf: Galaxy clustering from COMBO-17: The halo occupation distribution at $<z> = 0.6$. *Astronomy and Astrophysics* 457, 145–155 (2006)
- Pohlen, M., I. Trujillo: The structure of galactic disks. Studying late-type spiral galaxies using SDSS. *Astronomy and Astrophysics* 454, 759–772 (2006)
- Preibisch, T., S. Kraus, T. Driebe, R. van Boekel, G. Weigelt: A compact dusty disk around the Herbig Ae star HR 5999 resolved with VLTI / MIDI. *Astronomy and Astrophysics* 458, 235–243 (2006)
- Puga, E., M. Feldt, C. Alvarez, T. Henning, D. Apai, E. Le Coarer, A. Chalabaev, B. Stecklum: Outflows, disks, and stellar content in a region of high-mass star formation: G5.89–0.39 with adaptive optics. *The Astrophysical Journal* 641, 373–382 (2006)
- Pyo, T.-S., M. Hayashi, N. Kobayashi, A. T. Tokunaga, H. Terada, H. Takami, N. Takato, C. J. Davis, M. Takami, S. S. Hayashi, W. Gaessler, S. Oya, Y. Hayano, Y. Kamata, Y. Minowa, M. Iye, T. Usuda, T. Nishikawa, K. Nedachi: Adaptive optics spectroscopy of the [Fe II] outflows from HL Tauri and RW Aurigae. *The Astrophysical Journal* 649, 836–844 (2006)
- Quanz, S. P., T. Henning, J. Bouwman, T. Ratzka, C. Leinert: FU Orionis – The MIDI/VLTI perspective. *The Astrophysical Journal* 648, 472–483 (2006)
- Ragazzoni, R., S. Kellner, W. Gaessler, E. Diolaiti, J. Farinato: Pseudo-infinite guide stars for multi-conjugated adaptive optics on extremely large telescopes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 368, 1796–1802 (2006)
- Reijns, R. A., P. Seitzer, R. Arnold, K. C. Freeman, T. Ingerson, R. C. E. van den Bosch, G. van de Ven, P. T. de Zeeuw: Radial velocities in the globular cluster ω Centauri. *Astronomy and Astrophysics* 445, 503–511 (2006)
- Richards, G. T., M. Lacy, L. J. Storrie-Lombardi, P. B. Hall, S. C. Gallagher, D. C. Hines, X. Fan, C. Papovich, D. E. Vanden Berk, G. B. Trammell, D. P. Schneider, M. Vestergaard, D. G. York, S. Jester, S. F. Anderson, T. Budavári, A. S. Szalay: Spectral energy distributions and multiwavelength selection of type 1 quasars. *Astrophysical Journal Supplement Series* 166, 470–497 (2006)
- Richards, G. T., M. A. Strauss, X. Fan, P. B. Hall, S. Jester, D. P. Schneider, D. E. Vanden Berk, C. Stoughton, S. F. Anderson, R. J. Brunner, J. Gray, J. E. Gunn, Z. Ivezić, M. K. Kirkland, G. R. Knapp, J. Loveday, A. Meiksin, A. Pope, A. S. Szalay, A. R. Thakar, B. Yanny, D. G. York, J. C. Barentine, H. J. Brewington, J. Brinkmann, M. Fukugita, M. Harvanek, S. M. Kent, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. C. Long, R. H. Lupton, T. Nash, E. H. Neilsen, Jr., A. Nitta, D. J. Schlegel, S. A. Snedden: The Sloan Digital Sky Survey quasar survey: Quasar luminosity function from data release 3. *The Astronomical Journal* 131, 2766–2787 (2006)
- Ridderstad, M., M. Juvila, K. Lehtinen, D. Lemke, T. Liljeström: Properties of dust in the high-latitude translucent cloud L1780. I. Spatially distinct dust populations and increased dust emissivity from ISO observations. *Astronomy and Astrophysics* 451, 961–971 (2006)
- Riechers, D. A., F. Walter, C. L. Carilli, K. K. Knudsen, K. Y. Lo, D. J. Benford, J. G. Staguhn, T. R. Hunter, F. Bertoldi, C. Henkel, K. M. Menten, A. Weiss, M. S. Yun, N. Z. Scoville: CO(1–0) in $z \gtrsim 4$ quasar host galaxies: No evidence for extended molecular gas reservoirs. *The Astrophysical Journal* 650, 604–613 (2006)
- Riechers, D. A., F. Walter, C. L. Carilli, A. Weiss, F. Bertoldi, K. M. Menten, K. K. Knudsen, P. Cox: First detection of HCO^+ emission at high redshift. *The Astrophysical Journal* 645, L13–L16 (2006)
- Riechers, D. A., A. Weiss, F. Walter, C. L. Carilli, K. K. Knudsen: A search for H_2O in the strongly lensed QSO MG 0751+2716 at $z = 3.2$. *The Astrophysical Journal* 649, 635–639 (2006)
- Rockenfeller, B., C. A. L. Bailer-Jones, R. Mundt: Variability and periodicity of field M dwarfs revealed by multichannel monitoring. *Astronomy and Astrophysics* 448, 1111–1124 (2006)
- Rockenfeller, B., C. A. L. Bailer-Jones, R. Mundt, M. A. Ibrahimov: Multiband photometric detection of a huge flare on the M9 dwarf 2MASSW J1707183+643933. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 367, 407–411 (2006)
- Rodmann, J., T. Henning, C. J. Chandler, L. G. Mundy, D. J. Wilner: Large dust particles in disks around T Tauri stars. *Astronomy and Astrophysics* 446, 211–221 (2006)
- Rossa, J., R. P. van der Marel, T. Böker, J. Gerssen, L. C. Ho, H.-W. Rix, J. C. Shields, C.-J. Walcher: HUBBLE Space Telescope STIS spectra of nuclear star clusters in spiral galaxies: Dependence of age and mass on HUBBLE type. *The Astronomical Journal* 132, 1074–1099 (2006)
- Roussel, H., G. Helou, J. D. Smith, B. T. Draine, D. J. Hollenbach, J. Moustakas, H. W. Spoon, R. C. Kennicutt, G. H. Rieke, F. Walter, L. Armus, D. A. Dale, K. Sheth, G. J. Bendo, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, M. J. Meyer, M. W. Regan, E. J. Murphy: The opaque nascent starburst in NGC 1377: SPITZER SINGS observations. *The Astrophysical Journal* 646, 841–857 (2006)
- Rudnick, G., I. Labbé, N. M. Förster Schreiber, S. Wuyts, M. Franx, K. Finlator, M. Kriek, A. Moorwood, H.-W.

- Rix, H. Röttgering, I. Trujillo, A. van der Wel, P. van der Werf, P. G. van Dokkum: Measuring the average evolution of luminous galaxies at $z < 3$: The rest-frame optical luminosity density, spectral energy distribution, and stellar mass density. *The Astrophysical Journal* 650, 624 – 643 (2006)
- Sakelliou, I., T. J. Ponman: XMM-Newton observations of Abell 2255: a test case of a merger after »core crossing«. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 367, 1409 – 1416 (2006)
- Sánchez, S. F., B. García-Lorenzo, K. Jahnke, E. Mediavilla, J. I. González-Serrano, L. Christensen, L. Wisotzki: A new technique for decoupling the host and nuclear spectra of type I AGNs using integral field spectroscopy. *Astronomische Nachrichten* 327, 167 – 170 (2006)
- Sánchez, S. F., B. García-Lorenzo, K. Jahnke, E. Mediavilla, J. I. González-Serrano, L. Christensen, L. Wisotzki: Decoupling the host and nuclear spectra of type I AGNs using integral field spectroscopy: A test on 3C 120. *New Astronomy Reviews* 49, 501 – 507 (2006)
- Schegerer, A., S. Wolf, N. V. Voshchinnikov, F. Przygoda, J. E. Kessler-Silacci: Analysis of the dust evolution in the circumstellar disks of T Tauri stars. *Astronomy and Astrophysics* 456, 535 – 548 (2006)
- Schinnerer, E., T. Böker, E. Emsellem, U. Lisenfeld: Molecular gas dynamics in NGC 6946: A bar-driven nuclear starburst »Caught in the Act«. *The Astrophysical Journal* 649, 181 – 200 (2006)
- Schneider, G., M. D. Silverstone, D. C. Hines, J.-C. Augereau, C. Pinte, F. Ménard, J. Krist, M. Clampin, C. Grady, D. Golimowski, D. Ardila, T. Henning, S. Wolf, J. Rodmann: Discovery of an 86 AU radius debris ring around HD 181327. *The Astrophysical Journal* 650, 414 – 431 (2006)
- Schramm, M., L. Wisotzki, K. Jahnke: Host galaxies of luminous high redshift quasars. *New Astronomy Reviews* 50, 806 – 808 (2006)
- Schreyer, K., D. Semenov, T. Henning, J. Forbrich: A rotating disk around the very young massive star AFGL 490. *The Astrophysical Journal* 637, L129 – L132 (2006)
- Schuler, S. C., A. P. Hatzes, J. R. King, M. Kürster, L.-S. The: Hyades oxygen abundances from the $\lambda 6300$ [O I] line: The giant–dwarf oxygen discrepancy revisited 1. *The Astronomical Journal* 131, 1057 – 1073 (2006)
- Schuler, S. C., A. P. Hatzes, J. R. King, M. Kürster, L.-S. The: Erratum: »Hyades Oxygen Abundances from the $\lambda 6300$ [O I] Line: The giant–dwarf oxygen discrepancy revisited«. *The Astronomical Journal* 131, 2749 – 2749 (2006)
- Schwartz, D. A., H. L. Marshall, J. E. J. Lovell, D. W. Murphy, G. V. Bicknell, M. Birkinshaw, J. M. Gelbord, M. Georgopoulos, L. Godfrey, D. L. Jauncey, S. Jester, E. S. Perlman, D. M. Worrall: Discovery of an X-ray jet and extended jet structure in the quasar PKS 1055 + 201. *The Astrophysical Journal* 647, L107 – L110 (2006)
- Semenov, D., D. Wiebe, T. Henning: Gas-phase CO in protoplanetary disks: A challenge for turbulent mixing. *The Astrophysical Journal* 647, L57 – L60 (2006)
- Setiawan, J., M. Roth, P. Weise, M. P. Dölinger: Multi-periodic oscillations of HD 32887 and HD 81797. *Memorie della Società Astronomica Italiana* 77, 510 (2006)
- Shapiro, K. L., M. Cappellari, T. de Zeeuw, R. M. McDermid, K. Gebhardt, R. C. E. van den Bosch, T. S. Statler: The black hole in NGC 3379: a comparison of gas and stellar dynamical mass measurements with HST and integral-field data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 370, 559 – 579 (2006)
- Shi, Y., G. H. Rieke, D. C. Hines, V. Gorjian, M. W. Werner, K. Cleary, F. J. Low, P. S. Smith, J. Bouwman: 9.7 μ m silicate features in active galactic nuclei: New insights into unification models. *The Astrophysical Journal* 653, 127 – 136 (2006)
- Sicilia-Aguilar, A., L. Hartmann, N. Calvet, S. T. Megeath, J. Muzerolle, L. Allen, P. D'Alessio, B. Merín, J. Stauffer, E. Young, C. Lada: Disk evolution in Cep OB2: Results from the SPITZER Space Telescope. *The Astrophysical Journal* 638, 897 – 919 (2006)
- Sicilia-Aguilar, A., L. W. Hartmann, G. Fürész, T. Henning, C. Dullemond, W. Brandner: High-resolution spectroscopy in Tr 37: Gas accretion evolution in evolved dusty disks. *The Astronomical Journal* 132, 2135 – 2155 (2006)
- Silverstone, M. D., M. R. Meyer, E. E. Mamajek, D. C. Hines, L. A. Hillenbrand, J. Najita, I. Pascucci, J. Bouwman, J. S. Kim, J. M. Carpenter, J. R. Stauffer, D. E. Backman, A. Moro-Martin, T. Henning, S. Wolf, T. Y. Brooke, D. L. Padgett: Formation and evolution of planetary systems (FEPS): Primordial warm dust evolution from 3 to 30 Myr around sun-like stars. *The Astrophysical Journal* 639, 1138 – 1146 (2006)
- Smolcic, V., Z. Ivezic, M. Gacesa, K. Rakos, K. Pavlovski, S. Ilijic, M. Obrić, R. H. Lupton, D. Schlegel, G. Kauffmann, C. Tremonti, J. Brinchmann, S. Charlot, T. M. Heckman, G. R. Knapp, J. E. Gunn, J. Brinkmann, I. Csabai, M. Fukugita, J. Loveday: The rest-frame optical colours of 99 000 Sloan Digital Sky Survey galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 371, 121 – 137 (2006)
- Staff, J. E., C. Fendt, R. Ouyed: Cannonballs in the context of gamma ray bursts. Formation sites? *Astronomy and Astrophysics* 451, 1 – 8 (2006)
- Staicu, A., S. Krasnokutski, G. Rouillé, T. Henning, F. Huisken: Electronic spectroscopy of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at low temperature in the gas phase and in helium droplets. *Journal of Molecular Structure* 786, 105 – 111 (2006)
- Stanke, T., M. D. Smith, R. Gredel, T. Khanzadyan: An unbiased search for the signatures of protostars in the ζ Ophiuchi molecular cloud II. Millimetre continuum observations. *Astronomy and Astrophysics* 447, 609 – 622 (2006)
- Steinacker, J., A. Bacmann, T. Henning: Ray tracing for complex astrophysical high-opacity structures. *The Astrophysical Journal* 645, 920 – 927 (2006)
- Steinacker, J., R. Chini, M. Nielbock, D. Nürnberger, V. Hoffmeister, J. M. Huré, D. Semenov: Modeling the NIR-

- silhouette massive disk candidate in M 17. *Astronomy and Astrophysics* 456, 1013–1026 (2006)
- Stolte, A., W. Brandner, B. Brandl, H. Zinnecker: The secrets of the nearest starburst cluster. II. The present-day mass function in NGC 3603. *The Astronomical Journal* 132, 253–270 (2006)
- Swain, M. R., H. Gallée: Antarctic boundary layer seeing. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 118, 1190–1197 (2006)
- Tapken, C., I. Appenzeller, A. Gabašch, J. Heidt, U. Hopp, R. Bender, D. Mehlert, S. Noll, S. Seitz, W. Seifert: Ly- α emission galaxies at a redshift of $z \sim 5.7$ in the FORS deep field. *Astronomy and Astrophysics* 455, 145–152 (2006)
- Trujillo, I., C. Carretero, S. G. Patiri: Detection of the effect of cosmological large-scale structure on the orientation of galaxies. *The Astrophysical Journal* 640, L111–L114 (2006)
- Trujillo, I., N. M. Förster Schreiber, G. Rudnick, M. Barden, M. Franx, H.-W. Rix, J. A. R. Caldwell, D. H. McIntosh, S. Toft, B. Häussler, A. Zirm, P. G. van Dokkum, I. Labbé, A. Moorwood, H. Röttgering, A. van der Wel, P. van der Werf, L. van Starkenburg: The size evolution of galaxies since $z \sim 3$: Combining SDSS, GEMS, and FIRE. *The Astrophysical Journal* 650, 18–41 (2006)
- Uchiyama, Y., C. M. Urry, C. C. Cheung, S. Jester, J. Van Duyne, P. Coppi, R. M. Sambruna, T. Takahashi, F. Tavecchio, L. Maraschi: Shedding new light on the 3C 273 jet with the SPITZER Space Telescope. *The Astrophysical Journal* 648, 910–921 (2006)
- van de Ven, G., R. C. E. van den Bosch, E. K. Verolme, P. T. de Zeeuw: The dynamical distance and intrinsic structure of the globular cluster ω Centauri. *Astronomy and Astrophysics* 445, 513–543 (2006)
- van der Wel, A., M. Franx, P. G. van Dokkum, J. Huang, H.-W. Rix, G. D. Illingworth: The evolution of rest-frame K-band properties of early-type galaxies from $z=1$ to the present. *The Astrophysical Journal* 636, L21–L24 (2006)
- van der Wel, A., M. Franx, S. Wuyts, P. G. van Dokkum, J. Huang, H.-W. Rix, G. D. Illingworth: Comparing dynamical and photometric mass estimates of low- and high-redshift galaxies: Random and systematic uncertainties. *The Astrophysical Journal* 652, 97–106 (2006)
- van Dokkum, P. G., R. Quadri, D. Marchesini, G. Rudnick, M. Franx, E. Gawiser, D. Herrera, S. Wuyts, P. Lira, I. Labbé, J. Maza, G. D. Illingworth, N. M. Förster Schreiber, M. Kriek, H.-W. Rix, E. N. Taylor, S. Toft, T. Webb, S. K. Yi: The space density and colors of massive galaxies at $2 < z < 3$: The predominance of distant red galaxies. *The Astrophysical Journal* 638, L59–L62 (2006)
- Vanden Berk, D. E., J. Shen, C.-W. Yip, D. P. Schneider, A. J. Connolly, R. E. Burton, S. Jester, P. B. Hall, A. S. Szalay, J. Brinkmann: Spectral decomposition of broad-line AGNs and host galaxies. *The Astronomical Journal* 131, 84–99 (2006)
- Voshchinnikov, N. V., V. B. Il'in, T. Henning, D. N. Dubkova: Dust extinction and absorption: The challenge of porous grains. *Astronomy and Astrophysics* 445, 167–177 (2006)
- Wake, D. A., R. C. Nichol, D. J. Eisenstein, J. Loveday, A. C. Edge, R. Cannon, I. Smail, D. P. Schneider, R. Scranton, D. Carson, N. P. Ross, R. J. Brunner, M. Colless, W. J. Couch, S. M. Croom, S. P. Driver, J. da Ångela, S. Jester, R. de Propris, M. J. Drinkwater, J. Bland-Hawthorn, K. A. Pimbblet, I. G. Roseboom, T. Shanks, R. G. Sharp, J. Brinkmann: The 2df SDSS LRG and QSO survey: evolution of the luminosity function of luminous red galaxies to $z = 0.6$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 372, 537–550 (2006)
- Walcher, C. J., T. Böker, S. Charlot, L. C. Ho, H.-W. Rix, J. Rossa, J. C. Shields, R. P. van der Marel: Stellar populations in the nuclei of late-type spiral galaxies. *The Astrophysical Journal* 649, 692–708 (2006)
- Walter, F., C. L. Martin, J. Ott: Extended star formation and molecular gas in the tidal arms near NGC 3077. *The Astronomical Journal* 132, 2289–2295 (2006)
- Wang, H., T. Henning: A search for optical outflows from brown dwarfs in the Chamaeleon I molecular cloud. *The Astrophysical Journal* 643, 985–994 (2006)
- Weigelt, G., H. Beuther, K. H. Hofmann, M. R. Meyer, T. Preibisch, D. Schertl, M. D. Smith, E. T. Young: Bispectrum speckle interferometry of the massive protostellar outflow source IRAS 23151+5912. *Astronomy and Astrophysics* 447, 655–665 (2006)
- Weinmann, S. M., F. C. van den Bosch, X. Yang, H. J. Mo: Properties of galaxy groups in the Sloan Digital Sky Survey – I. The dependence of colour, star formation and morphology on halo mass. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 366, 2–28 (2006)
- Weinmann, S. M., F. C. van den Bosch, X. Yang, H. J. Mo, D. J. Croton, B. Moore: Properties of galaxy groups in the Sloan Digital Sky Survey – II. Active galactic nucleus feedback and star formation truncation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 372, 1161–1174 (2006)
- Welty, D. E., S. R. Federman, R. Gredel, J. A. Thorburn, D. L. Lambert: VLT UVES observations of interstellar molecules and diffuse bands in the Magellanic Clouds. *Astrophysical Journal Supplement Series* 165, 138–172 (2006)
- Westra, E., D. H. Jones, C. E. Lidman, K. Meisenheimer, R. M. Athreya, C. Wolf, T. Szeifert, E. Pompei, L. Vanzi: The wide field imager Lyman- α search (WFILAS) for galaxies at redshift ~ 5.7 . II. Survey design and sample analysis. *Astronomy and Astrophysics* 455, 61–72 (2006)
- Wisotzki, L., K. Jahnke, S. F. Sanchez, M. Schramm: The evolution of QSO host colours. *New Astronomy Reviews* 50, 829–832 (2006)
- Wittkowski, M., J. P. Aufdenberg, T. Driebe, V. Roccatagliata, T. Szeifert, B. Wolff: Tests of stellar model atmospheres by optical interferometry. IV. VINCI interferometry

- and UVES spectroscopy of Menkar. *Astronomy and Astrophysics* 460, 855 – 864 (2006)
- Wittkowski, M., C. A. Hummel, J. P. Aufdenberg, V. Roccagliati: Tests of stellar model atmospheres by optical interferometry. III. NPOI and VINCI interferometry of the M_{\odot} giant γ Sagittae covering 0.5 – 2.2 μm . *Astronomy and Astrophysics* 460, 843–853 (2006)
- Wünsch, R., A. Gawryszczak, H. Klahr, M. Różyczka: Two-dimensional models of layered protoplanetary discs – II. The effect of a residual viscosity in the dead zone. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 367, 773 – 780 (2006)
- Yang, X., H. J. Mo, F. C. van den Bosch: Observational evidence for an age dependence of halo bias. *The Astrophysical Journal* 638, L55 – L58 (2006)
- Yang, X., H. J. Mo, F. C. van den Bosch, Y. P. Jing, S. M. Weinmann, M. Meneghetti: Weak lensing by galaxies in groups and clusters – I. Theoretical expectations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 373, 1159 – 1172 (2006)
- Yang, X., F. C. van den Bosch, H. J. Mo, S. Mao, X. Kang, S. M. Weinmann, Y. Guo, Y. P. Jing: The alignment between the distribution of satellites and the orientation of their central galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 369, 1293 – 1302 (2006)
- Zapata, L. A., L. F. Rodríguez, P. T. P. Ho, H. Beuther, Q. Zhang: In search of circumstellar disks around young massive stars. *The Astronomical Journal* 131, 939 – 950 (2006)
- Zheng, X. Z., E. F. Bell, H.-W. Rix, C. Papovich, E. Le Floc'h, G. H. Rieke, P. G. Pérez-González: Detecting faint galaxies by stacking at 24 μm . *The Astrophysical Journal* 640, 784 – 800 (2006)
- Zucker, D. B., V. Belokurov, N. W. Evans, J. T. Kleyna, M. J. Irwin, M. I. Wilkinson, M. Fellhauer, D. M. Bramich, G. Gilmore, H. J. Newberg, B. Yanny, J. A. Smith, P. C. Hewett, E. F. Bell, H.-W. Rix, O. Y. Gnedin, S. Vidrih, R. F. G. Wyse, B. Willman, E. K. Grebel, D. P. Schneider, T. C. Beers, A. Y. Kniazev, J. C. Barentine, H. Brewington, J. Brinkmann, M. Harvanek, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. Long, A. Nitta, S. A. Snedden: A curious Milky Way satellite in Ursa Major. *The Astrophysical Journal* 650, L41 – L44 (2006)
- Zucker, D. B., V. Belokurov, N. W. Evans, M. I. Wilkinson, M. J. Irwin, T. Sivarani, S. Hodgkin, D. M. Bramich, J. M. Irwin, G. Gilmore, B. Willman, S. Vidrih, M. Fellhauer, P. C. Hewett, T. C. Beers, E. F. Bell, E. K. Grebel, D. P. Schneider, H. J. Newberg, R. F. G. Wyse, C. M. Rockosi, B. Yanny, R. Lupton, J. A. Smith, J. C. Barentine, H. Brewington, J. Brinkmann, M. Harvanek, S. J. Kleinman, J. Krzesinski, D. Long, A. Nitta, S. A. Snedden: A new Milky Way dwarf satellite in Canes Venatici. *The Astrophysical Journal* 643, L103–L106 (2006)

Tagesberichte und Bücher

Atad-Ettedgui, E., J. Antebi, D. Lemke (Eds.): Optomechanical Technologies for Astronomy. SPIE 6273. SPIE, Bellingham, Wash. 2006,

Klahr, H., W. Brandner (Eds.): Planet Formation. Cambridge Astrobiology 1. Cambridge University Pr., Cambridge, UK 2006, 302p.

Eingeladene Vorträge

- Bailer-Jones, C. A. L.: Astronomical object classification and parameter estimation with the GAIA Galactic Survey Satellite. In: Classification – the Ubiquitous Challenge, (Eds.) C. Weihs, W. Gaul. Studies in classification, data analysis and knowledge organization Springer, 325–329 (2005)
- Bailer-Jones, C. A. L.: Design of astronomical filter systems for stellar classification using evolutionary algorithms. In: Classification – the Ubiquitous Challenge, (Eds.) C. Weihs, W. Gaul. Studies in classification, data analysis and knowledge organization Springer, 330–337 (2005)
- Brandner, W., M. E. Kasper (Eds.): Science with Adaptive Optics. ESO Astrophysics Symposia. Springer, Berlin 2005, 387 p

- Hayano, Y., W. Gaessler, N. Takato, H. Takami, M. Iye, Y. Minowa, P. Wizinowsich, D. Summers: Observational impact of scattered light from the laser beam of a laser guide star adaptive optics. In: Annual Report of the National Astronomical Observatory of Japan, (Eds.) K. Tanikawa, M. Imanishi, A. Ueda, M. Oe, T. Sekii, M. Sôma, M. Miyoshi, Y. Yamashita. Annual Report of the National Astronomical Observatory of Japan 6, National Astronomical Observatory of Japan, 29 (2005)
- Hempel, A., T. M. Herbst, D. J. Thompson: Surface density of extremely red objects with $R - J \geq 5$. *Astronomy and Astrophysics* 443, 831 – 839 (2005)

In Sammelbänden und Tagungsberichten

- Afonso, C., T. Henning, D. Weldrake, T. Mazeh, S. Dreizler: Giant transiting planets observations GITPO. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq 200, Cambridge Univ. Pr., 79–82 (2006)
- Barazza, F. D., S. Jogee, H. W. Rix, M. Barden, E. F. Bell, J. A. R. Caldwell, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, C. Wolf: Studying Distant Dwarf Galaxies with GEMS and SDSS. In: New Horizons in Astronomy, (Ed.) F. N. Bash. ASP Conf. Ser. 352, ASP, 225–228 (2006)
- Barillot, M., P. Courteau, O. Absil, V. Coudé du Foresto, M. Swain: Conceptual design of the ALADDIN Antarctic nulling interferometer. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62682Z–1–8 (2006)
- Baumeister, H., C. Afonso, K.-H. Marien, R. Klein: LAIWO: a new wide-field CCD camera for Wise Observatory. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62693I–1–11 (2006)
- Berton, A., M. Feldt, R. Gratton, S. Hippler, T. Henning: The search for extrasolar giant planets using integral field spectroscopy: Simulations. *New Astronomy Reviews* 49, 661–669 (2006)
- Berton, A., M. Feldt, R. G. Gratton, T. Henning, S. Desidera, S. Hippler, M. Turatto: A simulation code for AO assisted 3D spectroscopic imaging of extrasolar planets. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 75–78 (2006)
- Berton, A., R. Gratton, J. Antichi, K. Dohlen, R. Claudi, M. Feldt, T. Henning, J.-L. Beuzit, P. Puget: Simulating diffractions and chromatic effects in the microlens array in searching for extrasolar planets with SPHERE IFS. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 626960–1–11 (2006)
- Bertram, T., H. Baumeister, W. Laun, C. Straubmeier, S. Rost, Y. Wang, A. Eckart: The LINC-NIRVANA fringe and flexure tracker: Cryo-ambient mechanical design. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62683L (2006)
- Berwein, J., A. Pavlov, F. Briegel, W. Gaessler, C. Storz: Reactive scheduling for LINC-NIRVANA. In: Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems, (Eds.) D. R. Silva, R. E. Doxsey. SPIE 6270, SPIE, 627010 (2006)
- Beuzit, J. L., M. Feldt, D. Mouillet, C. Moutou, K. Dohlen, P. Puget, T. Fusco, P. Baudoz, A. Boccaletti, S. Udry, D. Ségransan, R. Gratton, M. Turatto, H. M. Schmid, R. Waters, D. Stam, P. Rabou, A. M. Lagrange, F. Ménard, J.-C. Augereau, M. Langlois, F. Vakili, L. Arnold, T. Henning, D. Rouan, M. Kasper, N. Hubin: A Planet Finder instrument for the VLT. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 317–322 (2006)
- Biller, B. A., L. M. Close, R. Lenzen, W. Brandner, D. McCarthy, E. Nielsen, S. Kellner, M. Hartung: Suppressing Speckle Noise for simultaneous differential extrasolar planet imaging (SDI) at the VLT and MMT. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. 200, Cambridge Univ. Pr., 571–576 (2006)
- Biller, B. A., L. M. Close, E. Masciadri, R. Lenzen, W. Brandner, D. McCarthy, T. Henning, E. Nielsen, M. Hartung: A Survey of close, young stars with SDI at the VLT and MMT. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 53–60 (2006)
- Biller, B. A., L. M. Close, E. Masciadri, R. Lenzen, W. Brandner, D. McCarthy, T. Henning, E. L. Nielsen, M. Hartung, S. Kellner, K. Geissler, M. Kasper: Contrast limits with the Simultaneous Differential Extrasolar Planet Imager (SDI) at the VLT and MMT. In: Advances in Adaptive Optics II, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62722D–1–10 (2006)
- Birkmann, S., U. Grözinger, J. Stegmaier, O. Krause, E. Pitz, D. Lemke: A test setup for the characterization of far-infrared filters under cryogenic conditions. In: Astronomical Telescopes and Instrumentation, (Eds.) J. Zmuidzinas, W. S. Holland, S. Withington, W. D. Duncan. SPIE 6275, SPIE, 62750S (2006)
- Bizenberger, P., E. Diolaiti, S. Egner, T. M. Herbst, R. Ragazzoni, D. Reymann, W. Xu: LINC-NIRVANA: Optical design of an interferometric imaging camera. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62690D–1–8 (2006)
- Bonaccini Calia, D., E. Allaert, J. L. Alvarez, C. Araujo Hauck, G. Avila, E. Bendek, B. Buzzoni, M. Comin, M. Cullum, R. Davies, M. Dimmler, I. Guidolin, W. Hackenberg, S. Hippler, S. Kellner, A. van Kesteren, F. Koch, U. Neumann, T. Ott, D. Popovic, F. Pedichini, M. Quattri, J. Quentin, S. Rabien, A. Silber, M. Tapia: First light of the ESO Laser Guide Star Facility. In: Advances in Adaptive Optics II, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 627207 (2006)
- Bouwman, J., M. R. Meyer, J. S. Kim, M. D. Silverstone, J. M. Carpenter, D. C. Hines: The formation and evolution of planetary Systems: Placing our Solar System in context. In: Planet Formation, (Eds.) H. Klahr, W. Brandner. Cambridge Astrobiology 1, Cambridge Univ. Pr., 14–30 (2006)
- Brandl, B., R. Lenzen, L. Venema, H.-U. Käufl, G. Finger, A. Glasse, W. Brandner, R. Stuik: MIDIR/T-OWL: the thermal/mid-IR instrument for the E-ELT. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 626920–1–14 (2006)

- Brandner, W.: Exoplanet detection techniques – from astronomy to astrobiology. In: *Planet Formation*, (Eds.) H. Klahr, W. Brandner. Cambridge Astrobiology 1, Cambridge Univ. Pr., 250–255 (2006)
- Briegel, F., J. Berwein, F. Kittmann, V. Volchkov, L. Mohr, W. Gaessler, T. Bertram, S. Rost, Y. Wang: The LINC-NIRVANA common software. In: *Advanced Software and Control for Astronomy*, (Eds.) H. Lewis, A. Bridger. SPIE 6274, SPIE, 62741M (2006)
- Cannon, J. M., E. D. Skillman, K. R. Sembach, D. J. Bomans: Probing the multiphase interstellar medium of the dwarf starburst galaxy NGC 625 with FUSE spectroscopy. In: *Astrophysics in the Far Ultraviolet: Five Years of Discovery with FUSE*, (Eds.) G. Sonneborn, H. Moos, B.-G. Andersson. ASP Conf. Ser. 348, ASP, 489–494 (2006)
- Cappellari, M., R. Bacon, M. Bureau, M. C. Damen, R. L. Davies, P. T. de Zeeuw, E. Emsellem, J. Falcón-Barroso, D. Krajnovic, H. Kuntschner, R. M. McDermid, R. F. Peletier, M. Sarzi, R. C. E. van den Bosch, G. van de Ven: Dark matter in the central regions of early type galaxies. In: *Mass Profiles and Shapes of Cosmological Structures*, (Eds.) G. A. Mamon, F. Combes, C. Deffayet, B. Fort. EAS Publications Series 20, EDP Sciences, 127–130 (2006)
- Cecconi, M., A. Ghedina, P. Bagnara, A. Baruffolo, C. J. Carmona Rodriguez, G. Cresci, E. Diolaiti, J. Farinato, W. Gaessler, L. C. González Suárez, F. Mannucci, R. Ragazzoni, A. L. Riverol Rodríguez: Status progress of AdOpt@TNG and offer to the international astronomical community. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62722G (2006)
- Claudi, R. U., M. Turatto, J. Antichi, R. Gratton, S. Scuderi, E. Cascone, D. Mesa, S. Desidera, A. Baruffolo, A. Berton, P. Bagnara, E. Giro, P. Bruno, D. Fantinel, J. L. Beuzit, P. Puget, K. Dohlen: The integral field spectrograph of SPHERE: the planet finder for VLT. In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62692Y–1–10 (2006)
- Clénet, Y., M. Kasper, E. Gendron, T. Fusco, G. Rousset, D. Gratadour, C. Lidman, O. Marco, N. Ageorges, S. Egner: PSF reconstruction for NAOS-CONICA. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62723T–1–12 (2006)
- Close, L. M., E. L. Nielsen, J. C. Guirado, B. A. Biller, R. Lenzen, W. Brandner, M. Hartung, C. Lidman: On the age, spectral type, orbit, and comparison to evolutionary models of AB Dor C. In: *Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques*, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 11–18 (2006)
- Coudé du Foresto, V., O. Absil, M. Barillot, M. Swain: ALADDIN: an optimized ground-based precursor for DARWIN. In: *Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques*, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 305–308 (2006)
- Coudé du Foresto, V., O. Absil, M. Swain, F. Vakili, M. Barillot: ALADDIN: an optimized nulling ground-based demonstrator for DARWIN. In: *Advances in Stellar Interferometry*, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 626810–1–5 (2006)
- Cunningham, C., E. Atad-Ettadgui, R. Bacon, B. Brandl, J.-G. Cuby, G. Dalton, W. Dent, S. D'Odorico, I. Egan, C. Evans, F. Hammer, N. Hubin, P. Jagourel, M. Kasper, F. Kerber, R. Lenzen, I. Montilla, G. Moretto, S. Morris, L. Pasquini, E. Prieto, A. Quirrenbach, M. Redfern, O. Ryan, M. Strachan, C. Verinaud: ELT instrument concepts: impact on telescope and adaptive optics design. In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62691R–1–13 (2006)
- Döellinger, M. P., L. Pasquini, A. Hatzes, A. Weiss, J. Setiawan, L. da Silva, J. R. de Medeiros, L. Girardi: Radial velocity variations of G and K giants. In: *Tenth Anniversary of 51 Peg-b: Status of and prospects for hot Jupiter studies*, (Eds.) L. Arnold, F. Bouchy, C. Moutou. Frontier Group, 138–140 (2006)
- Dohlen, K., J.-L. Beuzit, M. Feldt, D. Mouillet, P. Puget, J. Antichi, A. Baruffolo, P. Baudoz, A. Berton, A. Boccaletti, M. Carbillet, J. Charton, R. Claudi, M. Downing, C. Fabron, P. Feautrier, E. Fedrigo, T. Fusco, J.-L. Gach, R. Gratton, N. Hubin, M. Kasper, M. Langlois, A. Longmore, C. Moutou, C. Petit, J. Pragt, P. Rabou, G. Rousset, M. Saisse, H.-M. Schmid, E. Stadler, D. Stamm, M. Turatto, R. Waters, F. Wildi: SPHERE: A planet finder instrument for the VLT. In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62690Q–1–12 (2006)
- Eckart, A., R. Schödel, C. Straubmeier, T. Bertram, J.-U. Pott, K. Muzic, L. Meyer, J. Moultsaka, T. Viehmann, S. Rost, T. Herbst: Interferometric observations of the galactic center: LBT and VLTI. In: *Advances in Stellar Interferometry*, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62681J–1–10 (2006)
- Egner, S. E., W. Gaessler, R. Ragazzoni, B. LeRoux, T. M. Herbst, J. Farinato, E. Diolaiti, C. Arcidiacono: MANU -CHAO: a laboratory ground-layer adaptive optics experiment. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62724X–1–12 (2006)
- Egner, S. E., E. Masciadri, D. McKenna, T. M. Herbst: Beyond conventional G-SCIDAR: the ground-layer in high vertical resolution. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 627256–1–9 (2006)
- Egner, S. E., E. Masciadri, D. McKenna, T. M. Herbst, W. Gaessler: G-SCIDAR measurements on Mt. Graham: recent results. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 627257–1–10 (2006)
- Farinato, J., R. Ragazzoni, C. Arcidiacono, G. Giorgia, E. Diolaiti, I. Foppiani, M. Lombini, L. Schreiber, D. Lorenzetti, F. D'Alessio, G. Li Causi, F. Pedichini, F.

- Vitali, T. Herbst, M. Kürster, P. Bizenberger, F. Briegel, F. De Bonis, S. Egner, W. Gäßler, L. Mohr, A. Pavlov, R.-R. Rohloff, R. Soci: The MCAO wavefront sensing system of LINC-NIRVANA: status report. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 627229-1-9 (2006)
- Fassbender, R., J. Stegmaier, A.-M. Weijmans, S. Köstner, A. Kruselburger, C. Diethart, P. Fertl, E. Valiante, M. Hayes, P. Schuecker, G. Hasinger: VADER: a satellite mission concept for high precision dark energy studies. In: *Space Telescopes and Instrumentation*, (Eds.) M. J. L. Turner, G. Hasinger. SPIE 6266, SPIE, 626632 (2006)
- Feldt, M., A. Berton, T. Henning, R. Gratton, M. Turatto, H. M. Schmid, M. Kasper, J. L. Beuzit: AO assisted NIR 3D spectroscopic imaging – Can an ELT see the earth at 10 pc? In: *Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques*, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 495 – 500 (2006)
- Feldt, M., Y. Hayano, H. Takami, T. Usuda, M. Watanabe, M. Iye, M. Goto, P. Bizenberger, S. Egner, D. Peter: SUPY: an infrared pyramid wavefront sensor for Subaru. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62722A-1-7 (2006)
- Feldt, M., D. Peter, S. Hippler, T. Henning, J. Aceituno, M. Goto: PYRAMIR: First on-sky results from an infrared pyramid wavefront sensor. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 627218-1-6 (2006)
- Gál, C., F. Müller-Sánchez, A. Krabbe, F. Eisenhauer, C. Iserlohe, M. Haug, T. M. Herbst: LIINUS/SERPIL: a design study for interferometric imaging spectroscopy at the LBT. In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62693O-1-12 (2006)
- Gardner, J. P., J. C. Mather, M. Clampin, R. Doyon, M. A. Greenhouse, H. B. Hammel, J. B. Hutchings, P. Jakobsen, S. J. Lilly, K. S. Long, J. I. Lunine, M. J. McCaughrean, M. Mountain, J. Nella, G. H. Rieke, M. J. Rieke, H.-W. Rix, E. P. Smith, G. Sonneborn, M. Stiavelli, H. S. Stockman, R. A. Windhorst, G. S. Wright: Science with the James Webb space telescope. In: *Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter*, (Eds.) J. C. Mather, H. A. MacEwen, M. de Graauw. SPIE 6265, SPIE, 62650J (2006)
- Geissler, K., E. Masciadri: Meteorologic parameters analysis above Dome C made with ECMWF data. In: *Ground-based and Airborne Telescopes*, (Ed.) L. M. Stepp. SPIE 6267, SPIE, 626719 (2006)
- Gillessen, S., G. Perrin, W. Brandner, C. Straubmeier, F. Eisenhauer, S. Rabien, A. Eckart, P. Lena, R. Genzel, T. Paumard, S. Hippler: GRAVITY: the adaptive-optics-assisted two-object beam combiner instrument for the VLTI. In: *Advances in Stellar Interferometry*, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 626811-1-9 (2006)
- Gouliermis, D., A. Berton, W. Brandner, T. Henning, M. Feldt: The search for the sub-solar initial mass function in the Local Group. In: *The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes*, (Eds.) P. A. Whitelock, M. Dennefeld, B. Leibundgut. IAU Symposium 232, Cambridge Univ. Pr., 261 – 264 (2006)
- Gouliermis, D., A. Dapergolas, S. Lianou, E. Kontizas, M. Kontizas: Mass segregation in star clusters in the LMC HST/WFPC2 observations. In: *Recent Advances in Astronomy and Astrophysics*, (Ed.) N. Solomos. AIP Conf. Proc. 848, Springer, 525 – 529 (2006)
- Henning, T., C. P. Dullemond, S. Wolf, C. Dominik: Dust coagulation in protoplanetary disks. In: *Planet Formation*, (Eds.) H. Klahr, W. Brandner. Cambridge Astrobiology 1, Cambridge Univ. Pr., 112 – 128 (2006)
- Hippler, S., F. Hormuth, W. Brandner, D. J. Butler, T. Henning, S. Egner: The MPIA multipurpose laboratory atmospheric turbulence simulator MAPS. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 627255-1-11 (2006)
- Hofmann, K.-H., S. Kraus, B. Lopez, G. Weigelt, S. Wolf: Aperture synthesis image reconstruction study for the mid-infrared VLTI imager MATISSE. In: *Advances in Stellar Interferometry*, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62683I-1-7 (2006)
- Kasper, M., D. Apai, W. Brandner, L. M. Close, K. Geißler: L-band search for substellar companions in the Tucana and beta Pictoris moving groups. In: *Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques*, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 175 – 180 (2006)
- Katterloher, R., L. Barl, A. Poglitsch, P. Royer, J. Stegmaier: Proton irradiation of PACS stressed Ge:Ga detector arrays to simulate L2-orbit conditions. In: *Space Telescopes and Instrumentation*, (Eds.) J. Zmuidzinas, W. S. Holland, S. Withington, W. D. Duncan. SPIE 6275, SPIE, 627515 (2006)
- Kellner, S., R. Ragazzoni, E. Diolaiti, W. Gaessler, J. Farinato: Eliminating perspective elongation for LGS based AO-systems at ELTs. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62725E-1-9 (2006)
- Klahr, H., M. Pózyczka, N. Dziourkevitch, R. Wünsch, A. Johansen: Turbulence in protoplanetary accretion disks: driving mechanisms and role in planet formation. In: *Planet Formation*, (Eds.) H. Klahr, W. Brandner. Cambridge Astrobiology Cambridge Univ. Pr., 42 – 63 (2006)
- Klein, R., A. Poglitsch, W. Raab, N. Geis, M. Hamidouche, L. W. Looney, R. Höhne, M. Schweitzer, W. Viehhauser, R. Genzel, E. E. Haller, T. Henning: FIFI LS: The far-infrared integral field spectrometer for SOFIA. In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, (Eds.) S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62691F-1-10 (2006)
- Kniazev, A., E. K. Grebel, D. Zucker, E. Bell, H. Harris: Planetary Nebulae in the Outer Disk and Halo of M31. In: *Planetary Nebulae Beyond the Milky Way*,

- (Eds.) L. Stanghellini, J. R. Walsh, N. G. Douglas. ESO Astrophysics Symposia Springer, 46–48 (2006)
- Kornet, K., S. Wolf, M. Rózyczka: Gravitational instability and the formation of giant planets by core accretion. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 99–104 (2006)
- Krause, O., D. Lemke, R. Hofferbert, A. Böhm, U. Klaas, J. Katzer, F. Höller, M. Salvasohn: The cold focal plane chopper of HERSCHEL's PACS instrument. In: Optomechanical Technologies for Astronomy, (Eds.) E. Atad-Ettedgui, J. Antebi, D. Lemke. SPIE 6273, SPIE, 627325–1–12 (2006)
- Krmotic, E., U. Klaas, D. Lemke: Interaction enhanced star formation in Arp 84. In: Studying Galaxy Evolution with SPITZER and HERSCHEL. Eds.: V. Charmandaris, D. Rigopoulou, N. D. Kylafis. CUP Conference Series (2006)
- Labadie, L., L. t. Abel-Tiberini, E. LeCoarer, C. Vigreux-Bercovici, B. Arezki, M. Barillot, J.-E. Broquin, A. Delboulbé, P. Kern, V. Kirschner, P. Labeye, A. Pradel, C. Ruilier, P. Saguet: Recent progress in mid-infrared integrated optics for nulling interferometry. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62682E (2006)
- Labadie, L., P. Kern, T. Herbst, P. Labeye, J. E. Broquin, C. Vigreux: Detection of extrasolar earth-like planets: a new challenge for space interferometry. In: 36th COSPAR Scientific Assembly, 36, 792 (2006)
- Lagarde, S., B. Lopez, P. Antonelli, U. Beckman, J. Behrend, Y. Bresson, O. Chesneau, M. Dugué, A. Glazeborg, U. Graser, K. H. Hofmann, W. Jaffe, C. Leinert, F. Millour, J. L. Menut, R. G. Petrov, T. Ratzka, G. Weigelt, S. Wolf, P. Abraham, C. Connot, T. Henning, M. Heininger, Y. Hugues, S. Kraus, W. Laun, A. Matter, U. Neumann, E. Nussbaum, A. Niedzielski, L. Mosoni, S. Robbe-Dubois, A. Roussel, D. Schertl, F. Vakili, K. Wagner, L. B. F. M. Waters: MATISSE: A four beams combiner in the mid-infrared for the VLTI. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62683M–1–10 (2006)
- Lanford, E., M. Guillon, K. Knepper, V. Olson, D. Roche, M. Swain, P. Little: Study on transport of assembled interferometer to Antarctica. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62684D (2006)
- Lanford, E., M. Swain, C. Meyers, T. Muramatsu, G. Nielson, V. Olson, S. Ronsse, E. Vinding Nyden, R. Hammerschlag, P. Little: Concept study and validation of Antarctic telescope tower. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 626814–1–12 (2006)
- Laun, W., H. Baumeister, P. Bizenberger: The LINC-NIRVANA IR cryostat. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 626956 – 1 – 8 (2006)
- Lemke, D., A. Böhm, F. de Bonis, M. Ebert, T. Groß, U. Grözinger, T. Henning, J. Hinz, R. Hofferbert, A. Huber, O. Krause, S. Kuhlmann, G. Luichtel, J. Ramos, R.-R. Rohloff, C. Stein, M. Trunz, M. Übele, K. Weidlich: Cryogenic filter- and spectrometer wheels for the Mid Infrared Instrument (MIRI) of the James Webb Space Telescope (JWST). In: Astronomical Telescopes and Instrumentation, (Eds.) E. Atad-Ettedgui, J. Antebi, D. Lemke. SPIE 6273, SPIE, 627324 – 1 – 8 (2006)
- Lenzen, R., B. Brandl, W. Brandner, G. Finger, A. Glasse, H.-U. Käufl, L. Venema: Observational capabilities and technical solutions of a thermal and MIR instrument at E-ELT. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 626952–1–12 (2006)
- Lombini, M., I. Foppiani, E. Diolaiti, J. Farinato, R. Ragazzoni, G. Bregoli, C. Ciattaglia, G. Cosentino, G. Innocenti, L. Schreiber, C. Arcidiacono, F. De Bonis, S. Egner, W. Gaessler, T. Herbst, M. Kürster, J. Schmidt, R. Soci, P. Rossetti, R. Tomelleri: Integration, testing, and laboratory characterization of the mid-high layer wavefront sensor for LINC-NIRVANA. In: Advances in Adaptive Optics II, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62724P–110 (2006)
- Lopez, B., S. Wolf, S. Lagarde, P. Abraham, P. Antonelli, J.-C. Augereau, U. Beckman, J. Behrend, N. Berruyer, Y. Bresson, O. Chesneau, J. M. Clauze, C. Connot, K. Demyk, W. C. Danchi, M. Dugué, S. Flament, A. Glazeborg, U. Graser, T. Henning, K. H. Hofmann, M. Heininger, Y. Hugues, W. Jaffe, S. Jankov, S. Kraus, W. Laun, C. Leinert, H. Linz, P. Mathias, K. Meisenheimer, A. Matter, J. L. Menut, F. Millour, U. Neumann, E. Nussbaum, A. Niedzielski, L. Mosonic, R. Petrov, T. Ratzka, S. Robbe-Dubois, A. Roussel, D. Schertl, F. X. Schmider, B. Stecklum, E. Thiebaut, F. Vakili, K. Wagner, L. B. F. M. Waters, G. Weigelt: MATISSE: perspective of imaging in the mid-infrared at the VLTI. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62680Z – 1 – 7 (2006)
- Lorenzetti, D., F. D'Alessio, G. Li Causi, F. Vitali, F. Pedichini, R. Speziali, E. Diolaiti, J. Farinato, R. Ragazzoni, F. Briegel, F. De Bonis, W. Gaessler, R. Soci: The LINC-NIRVANA patrol camera. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62695C–1–12 (2006)
- Mandel, H. G., I. Appenzeller, W. Seifert, H. Baumeister, R. J. Dettmar, C. Feiz, H. Gemperlein, A. Germeroth, B. Grimm, J. Heidt, T. Herbst, R. Hofmann, M. Jütte, V. Knierim, W. Laun, T. Luks, M. Lehmitz, R. Lenzen, K. Polsterer, A. Quirrenbach, R.-R. Rohloff, J. Rosenberger, P. Weiser, H. Weisz: LUCIFER status report: Summer 2006. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, (Eds.) I. S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62693F–1–11 (2006)
- Marshall, H. L., S. Jester, D. E. Harris, K. Meisenheimer: X-ray emission from the 3C 273 Jet. In: The X-ray Universe

- 2005, (Ed.) A. Wilson. ESA SP-604, El Escorial, 643–644 (2006)
- Masciadri, E., K. Geissler, S. Kellner, W. Brandner, T. Henning, R. Mundt, L. Close, B. Biller, A. Raga: Ground-based direct imaging of extra-solar planets supported by AO. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 501–506 (2006)
- Meyer, E., W. Gaessler, S. A. Kellner, E. Diolaiti, S. Egner, R. Ragazzoni, J. Farinato: Multiconjugated adaptive optics for ELTs: an enhancement of the PIGS setup. In: Advances in Adaptive Optics II, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62723Q–1–8 (2006)
- Moutou, C., J. L. Beuzit, R. Gratton, D. Mouillet, F. Allard, J.-C. Augereau, A. Boccaletti, S. Desidera, M. Feldt, T. Henning, A. M. Lagrange, A. Longmore, F. Ménard, H. M. Schmid, D. M. Stam, S. Udry, R. Waters: Science case for VLT-Planet Finder. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 159–164 (2006)
- Pavlov, A., W. Gäßler, C. Arcidiacono, J. Berwein, F. Briegel, E. Schinnerer, T. Herbst: Observation preparation software for LINC-NIRVANA. In: Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems, (Eds.) D. R. Silva, R. E. Doxsey. SPIE 6270, SPIE, 627011 (2006)
- Peter, D., H. Baumeister, P. Bizenberger, M. Feldt, T. Henning, S. Hippler, S. Ligori, U. Mall, U. Neumann, N. Salm, C. Storz, K. Wagner: PYRAMIR: construction and implementation of the world's first infrared pyramid sensor. In: Advances in Adaptive Optics II, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 627226–1–11 (2006)
- Poglitsch, A., C. Waelkens, O. H. Bauer, J. Cepa, H. Feuchtgruber, T. Henning, C. van Hoof, F. Kerschbaum, D. Lemke, E. Renotte, L. Rodriguez, P. Saraceno, B. Vandenbussche: The photodetector array camera and spectrometer (PACS) for the HERSCHEL Space Observatory. In: Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter (Eds.) J. C. Mather, H. A. MacEwen, M. W. de Graauw. SPIE 6265, SPIE, 62650B (2006)
- Raab, W., A. Poglitsch, R. Klein, R. Hoenle, M. Schweizer, W. Viehhauser, N. Geis, R. Genzel, L. W. Looney, M. Hamidouche, T. Henning, E. E. Haller: Characterizing the system performance of FIFI LS: the field-imaging far-infrared line spectrometer for SOFIA. In: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy., (Eds.) S. McLean, M. Iye. SPIE 6269, SPIE, 62691G–1–10 (2006)
- Ragazzoni, R., R. Falomo, C. Arcidiacono, E. Diolaiti, J. Farinato, M. Lombini, B. Le Roux, L. Greggio, F. Bertelli, A. Fontana, A. Grazian, M. Castellano, H.-W. Rix, W. Gaessler, T. Herbst, R. Soci, S. D'Odorico, E. Marchetti: ONIRICA: an infrared camera for OWL with MCAO low order partial correction. In: Advances in Adaptive Optics II, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 6272OT–1–12 (2006)
- Ratzka, T., O. Chesneau, K. Meisenheimer, K. Tristram: Status of the scientific observations with MIDI on the VLTI. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62680M–1–14 (2006)
- Reffert, S., D. Ségransan, R. Launhardt, T. Henning, D. Queloz, A. Quirrenbach, F. Pepe, J. Setiawan, P. Weise: The PRIMA astrometric planet search: goals and prospects. In: Advances in Stellar Interferometry, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 626846–1–8 (2006)
- Rohloff, R.-R., N. Münch, A. Böhm, W. Schlossmacher, C. Schöppinger, H. Neugeboren, H. Wittke, H. Wichmann: CFRP structure for the LBT instrument LINC–NIRVANA. In: Optomechanical Technologies for Astronomy, (Eds.) E. Atad-Ettedgui, J. Antebi, D. Lemke. SPIE 6273, SPIE, 62730Z–1–12 (2006)
- Sakellou, I.: The Cluster–Galaxy Connection: The morphology of clusters. In: The X-ray Universe 2005, (Ed.) A. Wilson. ESA SP-604, ESA Publications Division, 749 (2006)
- Schmid, H. M., J. L. Beuzit, M. Feldt, D. Gisler, R. Gratton, T. Henning, F. Joos, M. Kasper, R. Lenzen, D. Mouillet, C. Moutou, A. Quirrenbach, D. M. Stam, C. Thalmann, J. Tinbergen, C. Verinaud, R. Waters, R. Wolkencroft: Search and investigation of extra-solar planets with polarimetry. In: Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 165–170 (2006)
- Schwartz, D. A., H. L. Marshall, J. Gelbord, E. S. Perlman, M. Georganopoulos, M. Birkinshaw, D. M. Worrall, J. E. J. Lovell, D. L. Jauncey, L. Godfrey, G. V. Bicknell, D. W. Murphy, S. Jester: The remarkable X-ray jet in the quasar 4C 20.24. In: The X-ray Universe 2005, (Ed.) A. Wilson. ESA SP-162, ESA, 579 (2006)
- Shkolnik, E., G. A. H. Walker, D. A. Bohlender, P. G. Gu, M. Kürster: Magnetized exoplanets. In: Tenth Anniversary of 51 Peg-b: Status of and prospects for hot Jupiter studies, (Eds.) L. Arnold, F. Bouchy, C. Moutou. Frontier Group, 282–289 (2006)
- Staude, J.: Sterne und Weltraum – A popular magazine devoted to science and its use in school teaching. Astrophysics and Space Science Library 343: Organizations and Strategies in Astronomy, Vol. 6, 439–448 (2006)
- Stegmaier, J., S. Birkmann, U. Grözinger, R. Katterloher, O. Krause, D. Lemke: Laboratory simulation of cosmic radiation effects on stressed Ge:Ga detectors at L2 and curing. In: Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter, (Eds.) J. C. Mather, H. A. MacEwen, M. W. M. de Graauw. SPIE 6265, SPIE, 62652H (2006)
- Stickel, M., U. Klaas: Uncovering Small Scale Structures in Near-Infrared Adaptive Optics Images. In: Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, (Eds.) C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, E. Solano. ASP Conf. Ser. 351, ASP, 141–144 (2006)

- Straubmeier, C., T. Bertram, A. Eckart, S. Rost, Y. Wang, T. Herbst, R. Ragazzoni, G. Weigelt: The imaging fringe and flexure tracker of LINC-NIRVANA: basic opto-mechanical design and principle of operation. In: *Advances in Stellar Interferometry*, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62681I-1–12 (2006)
- van Boekel, R., P. Ábrahám, S. Correia, A. de Koter, C. Dominik, A. Dutrey, T. Henning, Á. Kóspál, R. Lachaume, C. Leinert, H. Linz, M. Min, L. Mosoni, T. Preibisch, S. Quanz, T. Ratzka, A. Schegerer, R. Waters, S. Wolf, H. Zinnecker: Disks around young stars with VLTI/MIDI. In: *Advances in Stellar Interferometry*, (Eds.) J. D. Monnier, M. Schöller, W. C. Danchi. SPIE 6268, SPIE, 62680C-1–19 (2006)
- Vérinaud, C., N. Hubin, M. Kasper, J. Antichi, P. Baudoz, J. L. Beuzit, A. Boccaletti, A. Chalabaev, K. Dohlen, E. Fedrigo, C. Correia Da Silva, M. Feldt, T. Fusco, A. Gandorfer, R. Gratton, H. Kuntschner, F. Kerber, R. Lenzen, P. Martinez, E. Le Coarer, A. Longmore, D. Mouillet, R. Navarro, J. Paillet, P. Rabou, F. Rahoui, F. Selsis, H. M. Schmid, R. Soummer, D. Stam, C. Thalmann, J. Tinbergen, M. Turatto, N. Yaitskova: The EPICS project for the European Extremely Large Telescope: outcome of the Planet Finder concept study for OWL. In: *Advances in Adaptive Optics II*, (Eds.) B. L. Ellerbroek, D. Bonaccini Calia. SPIE 6272, SPIE, 62720M-1–12 (2006)
- Weidlich, K., M. Sedlacek, M. Fischer, M. Trunz, M. Ellenrieder, D. Lemke, O. Krause, R. Hofferbert, U. Grözinger, G. Königsreiter, C. Neugebauer: The grating and filter wheels for the JWST NIRSPEC instrument. In: *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, (Eds.) E. Atad-Ettedgui, J. Antebi, D. Lemke. SPIE 6273, SPIE, 627323-1–8 (2006)
- Wolf, S.: Tracing Planets in Circumstellar Disks. In: *Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques*, (Eds.) C. Aime, F. Vakili. IAU Colloq. 200, Cambridge Univ. Pr., 139 – 144 (2006)

Doktorarbeiten

- Berton, A.: Detecting extrasolar planets using IFS-based simultaneous differential imaging. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006
- Egner, S.: Multi-conjugate adaptive optics for LINC-NIRVANA. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006
- Falter, S.: Searching for distant galaxy clusters: Optical observations, cluster search algorithms and the cluster se-

- lection function. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006
- Kovács, Z.: Test of the infrared wide-field camera OMEGA 2000 and its application for an extragalactic survey. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006
- Rodmann, J.: Dust in circumstellar disks. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006

Diplomarbeiten

- Dorner, B.: Characterization of components for adaptive optical systems. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006
- Kitzing, A.: Calibration and optimisation of the infrared camera OMEGA 2000. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006

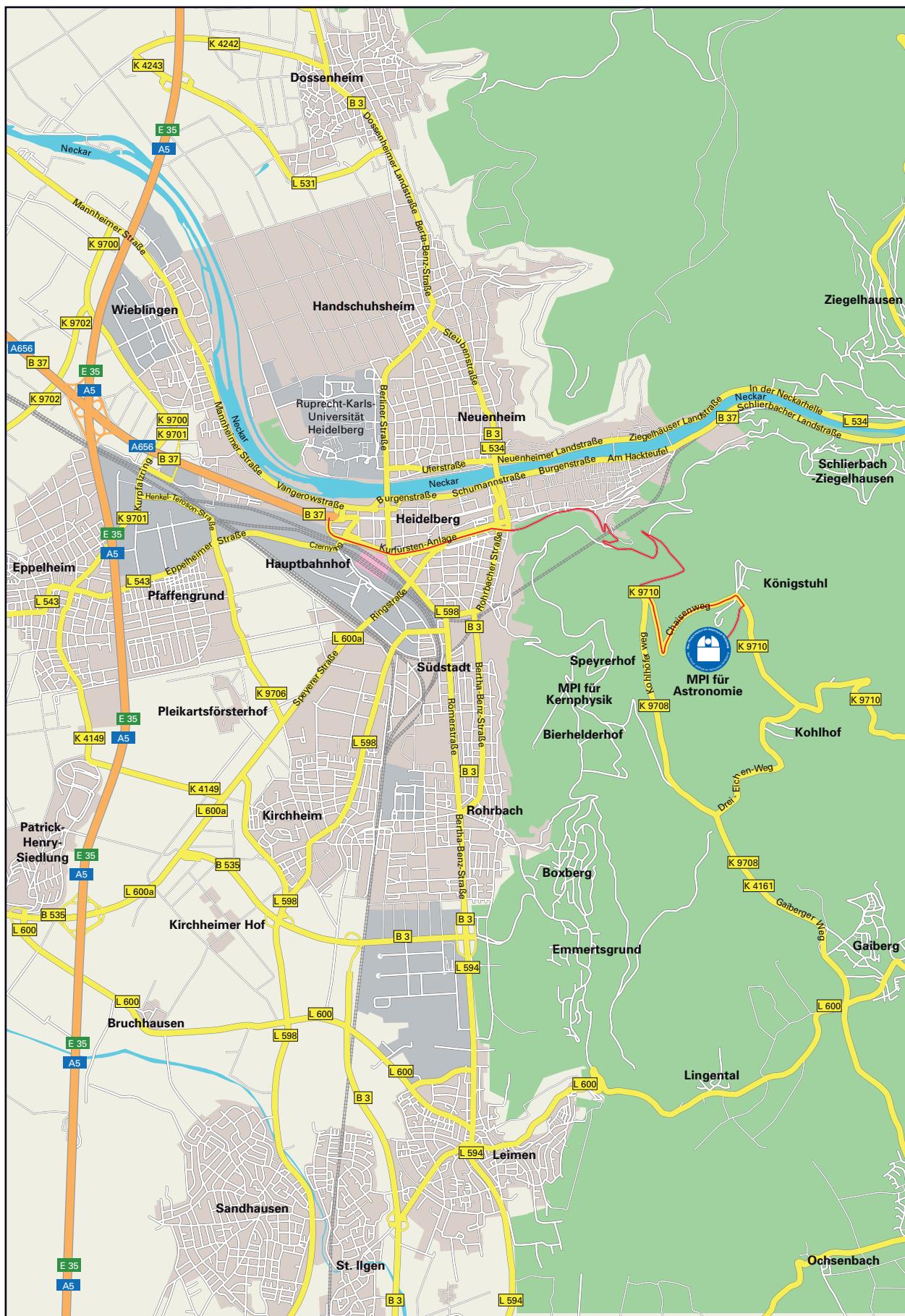
- Meyer, E.: Multikonjugierte adaptive Optik für extrem große Teleskope mit dem PIGS-Sensor. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006
- Roth, S.: Calibration of the collimators for a Fizeau type interferometer by interferometric wavefront measurements. University of Applied Sciences Darmstadt, 2006

Habilitationensschrift

- Wolf, S.: Signatures of planets and their formation process in circumstellar disks. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2006

Populärwissenschaftliche Beiträge

- Bailer-Jones, C., W. Brandner, T. Henning: Braune Zwerge. Entstehung, Scheiben, Doppelsysteme und Atmosphären. *Sterne und Weltraum* 45,4, 34 – 42 (2006)
- Beuther, H.: Die Geburt massereicher Sterne. *Sterne und Weltraum* 45,3, 22 – 23 (2006)
- Courbin, F., G. Letawe, G. Meylan, P. Magain, P. Jablonka, K. Jahnke, L. Wisotzki, Y. Letawe, P. North: The host galaxies of the brightest quasars: Gas-rich galaxies, mergers, and young stars. *The Messenger* 124, 32 – 36 (2006)
- Dannerbauer, H.: Das Licht der ersten Sterne? *Sterne und Weltraum* 45, 2, 20 (2006)
- Dannerbauer, H., E. Daddi: Der Galaxienentwicklung auf der Spur. *Sterne und Weltraum* 45, 12, 21 – 23 (2006)
- Henning, T., M. Feldt, H. Linz, E. P. Antolin, B. Stecklum: The formation and early evolution of massive stars. *The Messenger* 123, 24 – 28 (2006)
- Hetterscheidt, M., P. Simon, T. Erben, P. Schneider, M. Schmirmer, J. P. Dietrich, H. Hildebrandt, O. Cordes, T. Schrabbach, L. Haberzettl, O. Schmithuesen, C. Trachternach, C. Wolf, K. Meisenheimer, A. Micol, F. Perfederici: Probing the Universe using a mostly virtual survey: The Garching – Bonn Deep Survey. *The Messenger* 126, 19 – 23 (2006)
- Kürster, M., M. Endl, F. Rodler: In search of terrestrial planets in the habitable zone of M dwarfs. *The Messenger* 123, 21 (2006)
- Lemke, D.: HUBBLE's Nachfolger. Das James-Webb-Weltraumteleskop. *Sterne und Weltraum* 45,8, 26 – 35 (2006)
- Lemke, D.: Vom Kometenring zur Welteninsel. *Sterne und Weltraum*. Spezial 1, 6 – 23 (2006)
- Meisenheimer, K.: Die Suche nach Staubtori in aktiven galaktischen Kernen. *Sterne und Weltraum* 45,7, 24 – 30 (2006)
- Quanz, S. P.: Ein sonnennaher Stern mit drei Neptunen. *Sterne und Weltraum* 45,7, 20 – 21 (2006)
- Quanz, S. P.: Dunkelwolken an der Grenze zum Kollaps. *Sterne und Weltraum* 45,1, 20 – 21 (2006)
- Quanz, S. P., J. Bouwman: Braune Zwerge mit Planetensystem. *Sterne und Weltraum* 45,4, 15 – 16 (2006)
- Quetz, A. M.: Entstehung von Planetensystemen. *Naturwissenschaftliche Forschungen im Weltall, Beiträge zur Astronomie* 1, 14 – 35 (2005)
- Riechers, D. A., F. Walter, C. Carilli: Detecting CO(1 – 0) emission from $z \approx 4$ quasar host galaxies with the GBT. *NRAO. Newsletter* 109, 6 – 7 (2006)
- Rix, H. W.: Geboren in dunkler Materie – Zur Entstehung und Entwicklung unserer Galaxie. *Sterne und Weltraum*. Spezial 1, 102 – 111 (2006)
- Schreiber, J.: Leben auf Planeten bei M-Zwergen? *Sterne und Weltraum* 45,7, 16 – 17 (2006)
- van der Wel, A., M. Franx, P. G. van Dokkum, H.-W. Rix, G. D. Illingworth, J. Huang, B. P. Holden, P. Rosati: Masses and Mass-to-Light Ratios of Early-Type Galaxies at High Redshift? The Impact of Ultradeep FORS2 Spectroscopy. *The Messenger* 123, 45 – 48 (2006)
- Wolf, S., T. Henning, R. Launhardt: Die Geburt von Sternen und Planeten. *Sterne und Weltraum*. Spezial 1, 62 – 75 (2006)
- Wolf, S., H. Klahr: Planetenentstehung: Am Himmel beobachtet – im Computer verstanden. *Sterne und Weltraum* 45, 2, 22 – 30 (2006)



Die Max-Planck-Gesellschaft

Die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften wurde im Jahre 1948 als gemeinnützige Forschungsorganisation in der Rechtsform eines eingetragenen Vereins gegründet und betreibt in ihren derzeit 88 Instituten und Einrichtungen erkenntnisorientierte und anwendungsoffene Grundlagenforschung. Bei einem Jahresetat von rund 1.4 Milliarden Euro im Jahr 2006 beschäftigt sie rund 12 600 Mitarbeiter, von denen etwa 4400 Wissenschaftler sind. Zusätzlich forschen im Jahresverlauf rund 11 300 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler an den Einrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft.

Das Ziel der Max-Planck-Gesellschaft ist die Förderung von Spitzenforschung im internationalen Vergleich. Dazu werden die Forschungseinrichtungen angemessen ausgestattet und herausragend qualifizierten Forschern anvertraut. Diese genießen bei ihrer Arbeit ein hohes Maß an wissenschaftlicher Autonomie.

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.

Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Hofgartenstr. 8

80539 München

Tel.: 089/2108-1275 oder -1277

Fax: 089/2108-1207

Internet: www.mpg.de



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT