

Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg-Königstuhl



Jahresbericht

2005



MAX-PLANCK-GESellschaft

Zum Titelbild:

Das Sternentstehungsgebiet LH 95 in der Großen Magellanschen Wolke. Neben den massereichen und leuchtkräftigen jungen Sternen sind auf diesem hochauflösenden Bild zahlreiche neugeborene massearme Sterne zu erkennen. Das bedeutet eine drastische Veränderung der Vorstellungen, die wir bisher von der Zusammensetzung der Sternentstehungsgebiete in den Magellanschen Wolken hatten; siehe Kapitel III.1.

Das Bild ist ein Ausschnitt der von Forschern am MPIA mit dem Weltraumteleskop HUBBLE und der »Advanced Camera for Surveys« gewonnenen Aufnahme. Sie wurde erstmals auf der Hauptversammlung 2006 der Internationalen Astronomischen Union in Prag vorgestellt.

(NASA, ESA und Dimitrios A. Gouliermis/MPIA)

Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl

Jahresbericht

2005



Max-Planck-Institut für Astronomie

Wissenschaftliche Mitglieder, Kollegium, Direktoren:

Prof. Thomas Henning (Geschäftsführender Direktor, bis 31.12.2005)

Prof. Hans-Walter Rix

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. George H. Herbig, Honolulu

Prof. Steven Beckwith, Baltimore

Prof. Rafael Rebolo, Tenerife

Prof. Karl-Heinz Böhm, Seattle

Fachbeirat:

Prof. Robert Williams, Baltimore (Vorsitz)

Prof. Anneila Sargent, Pasadena

Prof. Ralf-Jürgen Dettmar, Bochum

Prof. Rens Waters, Amsterdam

Prof. Ewine van Dishoek, Leiden

Prof. Simon D. M. White, Garching

Prof. Pierre Léna, Meudon

Prof. Lodewijk Woltjer, Saint-Michel-l'Observatoire

Prof. Dieter Reimers, Hamburg

Prof. Harold Yorke, Pasadena

Kuratorium:

Min. Dir. Hermann-Friedrich Wagner, Bonn (Vorsitz)

Dr. Ludwig Baumgarten, Bonn

Min. Dir. Wolfgang Fröhlich, Stuttgart

Prof. Peter Hommelhoff, Heidelberg

Dipl. Ing. Reiner Klett, München

Dr. Karl A. Lamers, MdB, Berlin

Prof. Roland Sauerbrey, Jena

Dr. h.c. Klaus Tschira, Heidelberg

Ranga Yogeshwar, Köln

Mitarbeiter:

Gegenwärtig sind 211 Mitarbeiter (einschließlich der Drittmittelbeschäftigten) am Institut tätig, darunter 60 Wissenschaftler, 74 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler.

Anschrift: MPI für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg

Telefon: 0049 6221 5280

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, Spanien

Telefon: 0034 950 230 988, 0034 950 632 500, *Fax:* 003450 632 504

E-mail: info@caha.es

Internet: <http://www.caha.es>

Arbeitsgruppe »Laborastrophysik«, Jena

Anschrift: Institut für Festkörperphysik der Friedrich-Schiller-Universität, Helmholtzweg 3, D-07743 Jena

Telefon: 0049-3641-9-47354,

Fax: 0049-3641-9-47308,

E-mail: friedrich.huisken@uni-jena.de

© 2006 Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

Herausgeber: Jakob Staude, Thomas Henning, Hans-Walter Rix, Klaus Jäger, Axel M. Quetz

Text: Thomas Bürke u. a.

Bilder: MPIA u. a.

Graphik, Bildbearbeitung, Layout: Karin Meißner, Carmen Müllerthann

Druck: Laub GmbH & Co. KG, D-74834 Elztal-Dallau

ISSN 1437-2924; Internet: ISSN 1617-0490

Inhalt

Vorwort	5	IV.6 Differentielle Verzögerungsstrecken für PRIMA am VLTI	107
I. Allgemeines	6	IV.7 VLT: SPHERE – Suche nach Exoplaneten am VLT	108
I.1 Wissenschaftliche Zielsetzung	6	IV.8 LAIWO – suche nach Exoplaneten am Wise Observatorium	108
I.2 Observatorien – Teleskope – Instrumente	9	IV.9 PYRAMIR – ein neuer Wellenfrontsensor für ALFA	109
I.3 Nationale und internationale Zusammenarbeit ...	15	IV.10 Verbesserung des Seeing am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto	110
I.4 Lehre und Öffentlichkeitsarbeit	17	IV.11 PACS – Ferninfrarot-Kamera und Spektrometer für das Weltraumteleskop HERSCHEL	111
II. Highlights	18	IV.12 PIA – ein Großrechner für das MPIA	112
II.1 Lichtechos geben Einblicke in die aktive Vergangenheit von Cassiopeia A	18	V. Menschen und Ereignisse	114
II.2 AB Doradus C: Ein junger, massearmer Stern hat doppelt so viel Masse wie erwartet	22	V.1 Erstes Licht für das Large Binocular Telescope	114
II.3 Der erste Heidelberger extrasolare Planet	25	V.2 Tag der offenen Tür am MPIA	117
II.4 Die Entstehung von Planetesimalen aus Gravitationsinstabilitäten	27	V.3 Weitere Ereignisse und Aktivitäten	119
II.5 Staub-Tori in Aktiven Galaktischen Kernen	32	V.4 International Max Planck Research School in Heidelberg	122
II.6 Massereiche Sternhaufen in den Zentren von Spiralgalaxien	40	V.5 Ringberg-Tagung »Entfernte Galaxienhaufen«	124
II.7 Beobachtungen ferner Galaxien mit SPITZER ...	44	V.6 Die Wilhelm und Else Heraeus-Physikschule »Extrasolar Planetary Systems«	126
II.8 Dynamik, Staub und junge Sterne Modellrech- nungen zur Verschmelzung von Galaxien	48	V.7 Zwei neue Nachwuchsgruppen am Institut	128
III. Ausgewählte Forschungsgebiete	52	V.8 Preise für Nachwuchswissenschaftler	130
III.1 Sternentstehung in den Magellanschen Wolken	52	V.9 Der Girls' Day – Mädchen zu Gast am MPIA ..	134
III.2 Strahlungstransport – Bindeglied zwischen Simulation und Beobachtung	65	V.10 Das Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« ...	135
III.3 Galaxien und Dunkle Materie	75	V.11 Der Hanno und Ruth Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik	136
III.4 Das interstellare Medium in nahen Galaxien ...	82	V.12 Abschiedskolloquium für Immo Appenzeller ..	138
IV. Instrumentelle Entwicklungen	91	V.13 Vier Jahrzehnte auf dem Königstuhl	139
IV.1 Instrumente für das James-Webb- Weltraumteleskop	91	V.14 Wo steht das MPIA in unserer Forschungslandschaft?	145
IV.2 Neuartige Konzepte für ein »Extremely Large Telescope«	100	Personal	149
IV.3 Das Projekt DARWIN	102	Arbeitsgruppen	150
IV.4 Fortschritte bei LINC-NIRVANA für das LBT ...	104	Zusammenarbeit mit Firmen	152
IV.5 LUCIFER I und II– zwei Spektrographen für das LBT	105	Lehrveranstaltungen	154
		Tagungen, Vorträge	154
		Mitarbeit in Gremien	159
		Weitere Aktivitäten am Institut	160
		Veröffentlichungen	160

Vorwort

Mit diesem Jahresbericht möchten wir einen Überblick über die Forschungsarbeiten 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.

Im Jahr 2005 gab es am MPIA bedeutsame neue astrophysikalische Entdeckungen und zahlreiche positive Entwicklungen. Frühere instrumentelle Entwicklungen haben eine reichhaltige wissenschaftliche Ernte erbracht. Insbesondere haben Beobachtungen mit dem interferometrischen Messinstrument MIDI sensationelle Ergebnisse über zirkumstellare Scheiben und die Struktur aktiver galaktischer Kerne geliefert. Aber auch die Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop SPITZER ergaben eine Fülle neuer Daten.

In diesem Jahr ist auch eine neue Generation junger Wissenschaftler ans Institut gekommen: Zwei neue Gruppenleiter haben ihre Arbeit aufgenommen, und insgesamt vier neue Nachwuchsgruppen wurden eingerichtet. Dieses schnelle Wachstum war einer der Gründe, die erstmals eine größere Erweiterung unseres Institutsgebäudes erforderlich machten.

Neu war in diesem Jahr auch, dass das Calar-Alto-Observatorium paritätisch als gemeinsam geführte deutsch-spanische Einrichtung betrieben wurde; und in Heidelberg nahm die »International Max-Planck Research School (IMPRS) for Astronomy and Cosmic Physics« ihre Arbeit auf.

Mit mehr als 5000 Besuchern wurde unser Tag der offenen Tür im September zu einer fast überwältigenden Demonstration des öffentlichen Interesses für die Aufgaben des MPIA und für die astronomische Forschung.

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 (VLT) und der Instrumentierung für das James Webb Space Telescope, den Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE.

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 Gastwissenschaftler, Mitarbeiter und Freunde des MPIA zu Wort kommen, um ein lebendiges Bild von der Arbeitsatmosphäre am Institut zu zeichnen.

Wir wünschen den Lesern dieses Jahresberichts neue Einblicke in die an unserem Institut durchgeführte astronomische Forschung.

Thomas Henning, Hans-Walter Rix

Heidelberg, im August 2006

I. Allgemeines

I.1 Wissenschaftliche Zielsetzung

Das Universum, die Natur der astronomischen Objekte und ihre Entwicklung im Rahmen der physikalischen Gesetze zu verstehen, ist die zentrale Aufgabe der Astronomie – und dieses Ziel verfolgt das Max-Planck-Institut für Astronomie seit seiner Gründung im Jahr 1967. Das breite Spektrum der am Institut betriebenen astronomischen Forschung bestimmt die Entwicklung und den Einsatz von Teleskopen und Messinstrumenten, die Ausführung einer Vielzahl von Beobachtungsprogrammen, sowie die Analyse und theoretische Modellierung der erhaltenen Daten am MPIA. Dabei beschränken sich die Aktivitäten des Instituts nicht auf die erdgebundene Beobachtung und auf den sichtbaren Spektralbereich. Vielmehr spielt das MPIA auch bei der Instrumentierung weltraumgestützter Observatorien und ihrer Nutzung, insbesondere in der Infrarotastronomie, seit vielen Jahren eine führende Rolle.

Die Forschung am Institut ist in zwei 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 beste-

hen auch fünf selbstständige Nachwuchsgruppen (drei von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierte Emmy-Noether-Gruppen und zwei Nachwuchsgruppen der Max-Planck-Gesellschaft), 37 Post-Docs und 45 Studenten waren im Berichtsjahr am Institut tätig. Es besteht auch eine enge Zusammenarbeit mit der Universität Heidelberg, im Rahmen der »International Max Planck Research School (IMPRS) for Astronomy and Cosmic Physics« und z.B. 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.

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 Entfernungen hinweg (dem »kosmischen Netz«) über die Galaxien bis herab zu den Sternhaufen, den Sternen und deren Planeten.

Abb. I.1: Das Max-Planck-Institut für Astronomie auf dem Königstuhl in Heidelberg.



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 einzig 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?

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 erfordern 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.

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 Protosterne 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 können 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 erdgebundenen Infrarot- und (Sub-) Millimeter-Teleskopen erlauben den Nachweis und die Charakterisierung massereicher Protosterne 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 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 (magneto-) hydrodynamischen Modellrechnungen und Studien des Strahlungstransports. 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. Mit der Entdeckung des ersten »Heidelberger« Planeten (Kap. II.3) beginnen wir die Früchte eines Radialgeschwindigkeitsprojekts zu ernten.

Das theoretische Programm der Abteilung Planeten- und Sternentstehung ist konzentriert auf komplexe numerische Simulationen zur Entwicklung protoplanetarer Scheiben, einschließlich des Zusammenspiels von Strahlung, Dynamik, Chemie und Entwicklung der Staubteilchen. Die Entstehung Brauner Zwerge 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.

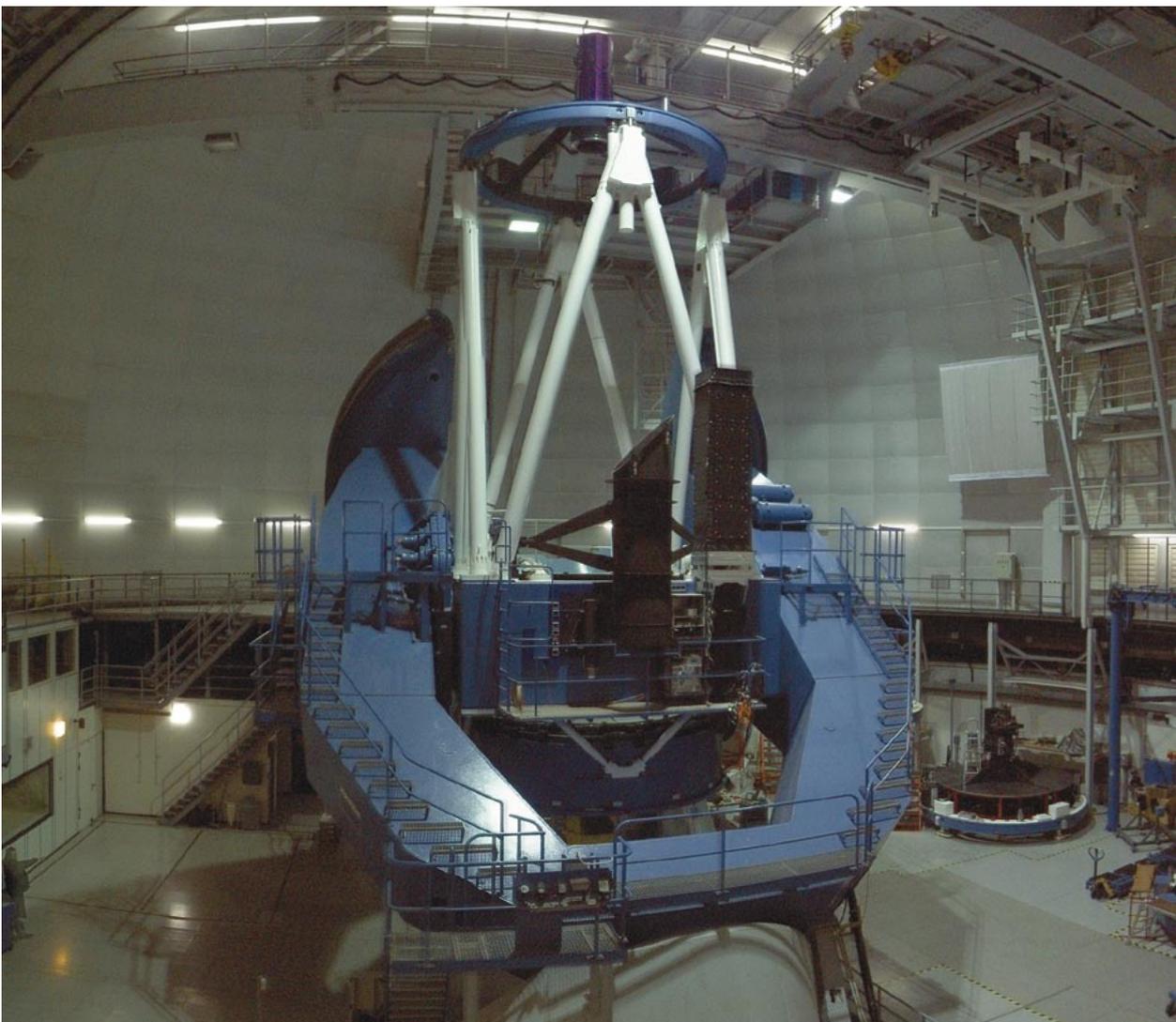
I.2 Observatorien – Teleskope – Instrumente

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.

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 welt-raumgestützte Beobachtungen eingesetzt. Beide Beobachtungsarten ergänzen einander heute in idealer Weise. Die erdgebundenen Teleskope haben meist größere Primärspiegel und damit eine größere Lichtsammelleistung

Abb. I.2: Das 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto in seiner 43 m hohen Kuppel.



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 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. So gelang im Rahmen einer Kollaboration mit amerikanischen und italienischen Wissenschaftlern die Entdeckung, dass Planetenbildung zumindest im Ansatz auch in der Umgebung der Braunen Zwerge abläuft, womit sich dieser Prozess der Planetenbildung als universeller und robuster als bisher vermutet erweist. Ein anderes Beispiel ist die eindrucksvolle Beobachtung einer sphärisch verteilten, filamentartigen Staub-Komponente im Halo der Starburst-Galaxie M 82, die in Zusammenarbeit mit englischen und amerikanischen Astronomen gelang.

Das Institut ist 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

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



außergewöhnliche Teleskop wird über zwei 8,4-Meter-Spiegel auf einer gemeinsamen Montierung verfügen und damit das weltweit größte Einzelteleskop sein. Im Herbst 2005 hatte das LBT mit dem ersten der beiden Hauptspiegel »First Light«. Beide Kooperationen versetzen die Astronomen des 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.2).

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 Adaptiven Optik fortgesetzt. Das »First Light« für den neuartigen Wellenfrontsensor PYRAMIR, der im Labor für Adaptive Optik am Institut entwickelt wur-

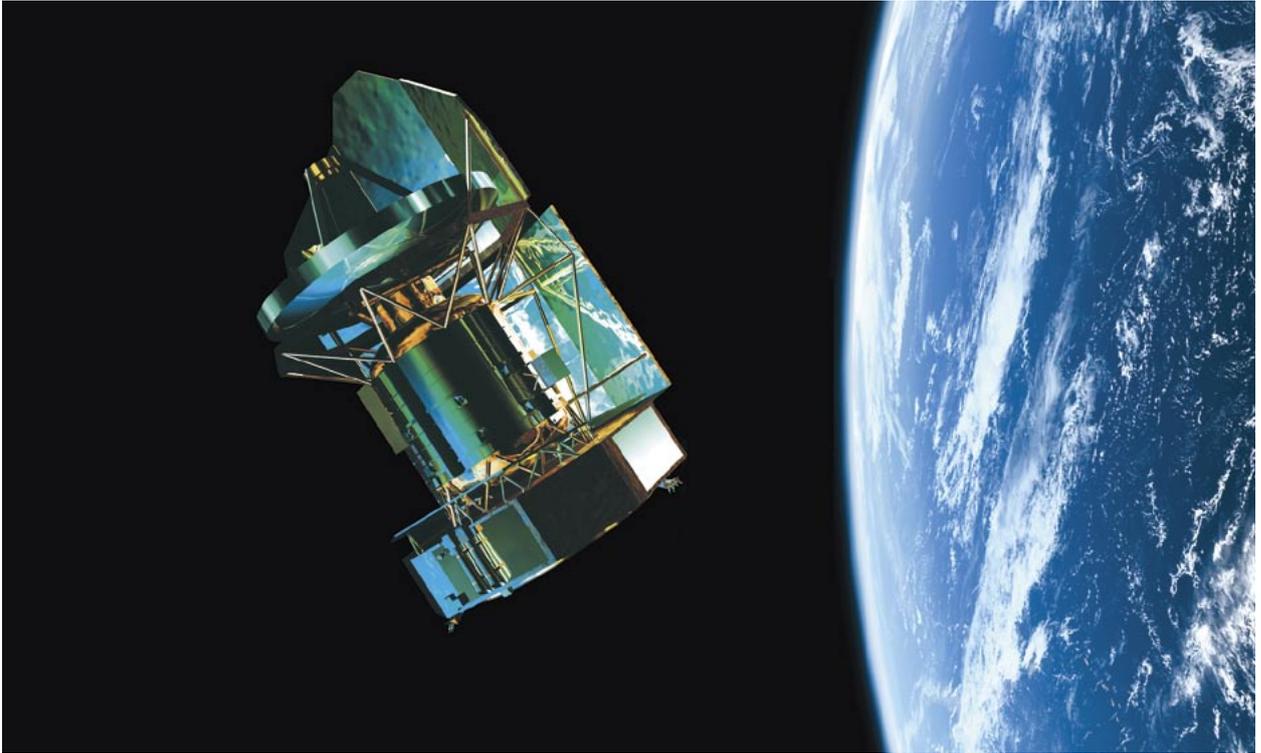
de, wird noch 2006 erwartet. Die hierbei gesammelten Erfahrungen gehen bereits in die Entwicklung neuer Instrumente am VLT und am LBT ein.

Die Beteiligung des Instituts am Very Large Telescope der ESO auf dem Paranal (Abb. I.3) ist von herausragender Bedeutung. Im Jahr 2001 ging die hochauflösende Infrarotkamera CONICA, die zusammen mit der Adaptiven Optik NAOS das System NACO bildet, erfolgreich in Betrieb. 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 (vgl. Kap. II.5).

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,

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





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. Auch für den PARSEC-Laser erwartet man im Jahre 2006 den ersten erfolgreichen Einsatz.

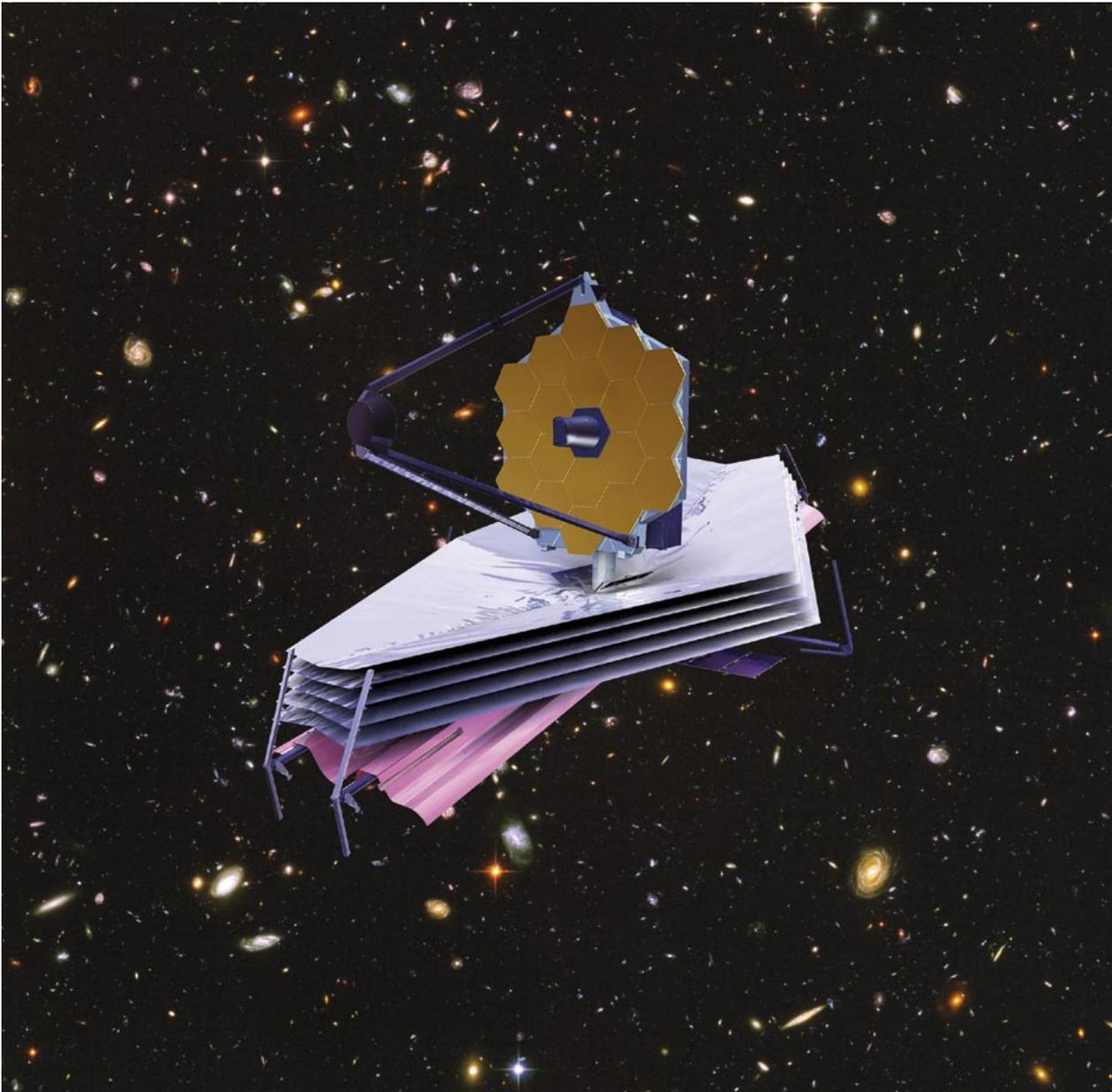
Am MPIA arbeitet man bereits an der Entwicklung der VLT/VLTI-Instrumente der zweiten Generation. So ist das Institut an SPHERE (ehemals PLANET FINDER, vgl. Kap. IV.7), einem Projekt zur Suche und Charakterisierung extrasolarer Planeten mit Hilfe von extremer Adaptiver Optik und weiteren Zusatzgeräten beteiligt. Gleichzeitig 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. Ein weiteres Projekt – in Zusammenarbeit mit dem Observatoire de Nice – besteht in der Erweiterung von MATISSE (ehemals MIDI 24/APRÈS-MIDI), einem Instrument, welches das Licht der vier Hauptteleskope des VLTI kombiniert und eine Bildrekonstruktion zulässt. Das Projekt CHEOPS gehört zu diesem Komplex.

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

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

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 wird das LBT das weltweit leistungsstärkste Einzelteleskop sein. Die einzigartige Konstruktion des Doppelspiegels eignet sich zudem hervorragend für interferometrische Beobachtungen. Im interferometrischen Betrieb entspricht das räumliche Auflösungsvermögen des LBT dem eines Spiegels mit 22.8 Metern Durchmesser.

Die deutschen Partner bauen unter der Leitung der Heidelberger Landessternwarte für das LBT den Nahinfrarot-Spektrographen LUCIFER (Kap. IV.5). 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.4). Letztlich soll Interferometrie über einen Wellenlängenbereich von 0.6 μm bis 2.2 μm 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.



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 Beteiligung des MPIA am Bau der Infrarotkamera mit Spektrometer PACS (Kap.

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

IV.11). Dieses Instrument wird an Bord des europäischen Infrarotobservatoriums HERSCHEL arbeiten, eines Weltraumteleskops mit 3,5 Metern Öffnung, dessen Start für das Jahr 2007 vorgesehen ist. (Abb. I.5)

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

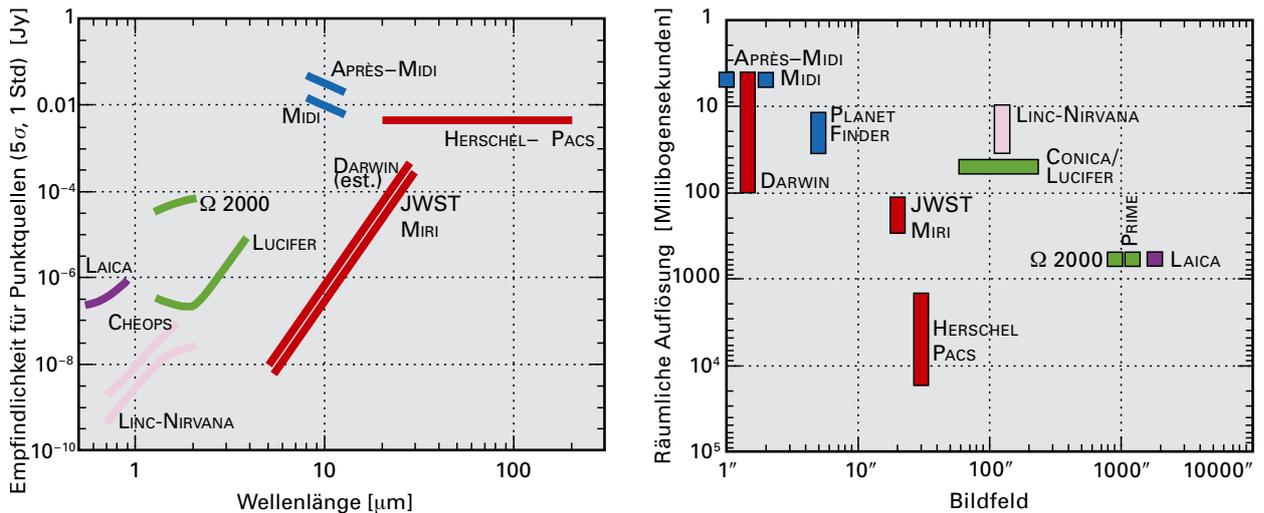


Abb. 1.7: Die wichtigsten Instrumente des Instituts. *Links* die Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge, *rechts* die räumliche Auflösung in Abhängigkeit von der Bildfeldgröße.

Komponenten in einem der drei Fokalinstrumente, genannt MIRI (Kap. IV.1). 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.1). 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. Die diesbezüglichen Verträge wurden im November des Berichtsjahres unterzeichnet.

Seit 1998 vertritt das MPIA Deutschland in der DARWIN Science Advisory Group. DARWIN ist ein Weltrauminterferometer der Europäischen Weltraumbehörde

ESA, das frühestens 2015 starten soll. Nach der derzeitigen 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 will man im mittleren Infrarot extrasolare Planeten abbilden und spektroskopisch analysieren. 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 an Konzepten zur Bewältigung dieser aufwändigen Aufgabe.

Einen Überblick über die wichtigsten bereits arbeitenden und demnächst anlaufenden Instrumente vermittelt Abb. 1.7. 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 $20\mu\text{m}$ Wellenlänge und der Entwurf von MATISSE (ehemals APRÈS-MIDI) – 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 Bonn, die Universität Hamburg und das I. Physikalisches Institut der Universität Köln beteiligt.



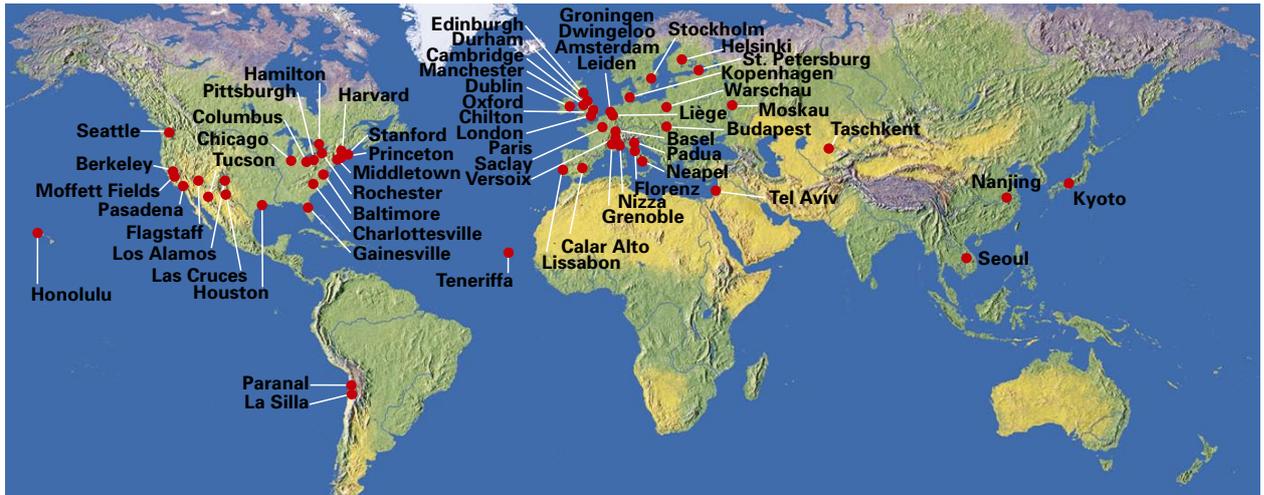
Abb. I.8: Verteilung der Partnerinstitute des MPIA in Deutschland.

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.

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

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

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 (S. Kap. IV.8).

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 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.

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.4). 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, Volkshochschulen 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.

Ein besonderer Höhepunkt war im Berichtsjahr der *Tag der offenen Tür* (Kap. V.2). Am 25. September besuchten mehr als fünftausend Gäste das Institut, um sich an insgesamt 34 Stationen über die wissenschaftlichen und technischen Projekte des MPIA zu informieren und Neues aus dem Bereich der modernen Astronomie zu erfahren.

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 eines Astronomischen Instituts. (Kap. V.9)

Schließlich wird am MPIA 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.

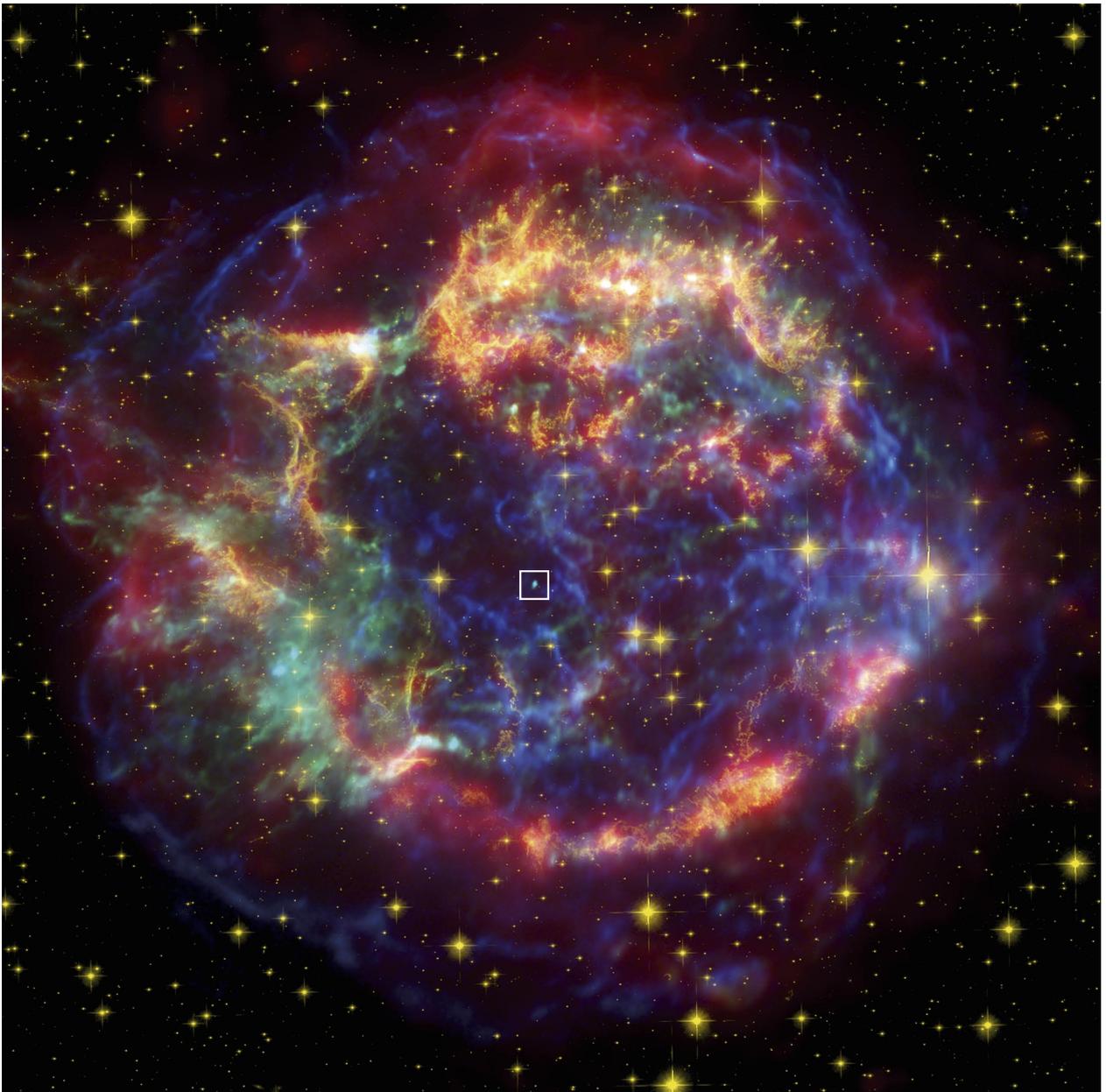
Auf sehr großes Interesse ist das im Vorjahr in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung, Donaueschingen, und mit Unterstützung der Klaus-Tschira-Stiftung initiierte *SuW-Schulprojekt* gestoßen: Zu ausgewählten Berichten, die in SuW erscheinen, wird monatlich ausführliches didaktisches 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.

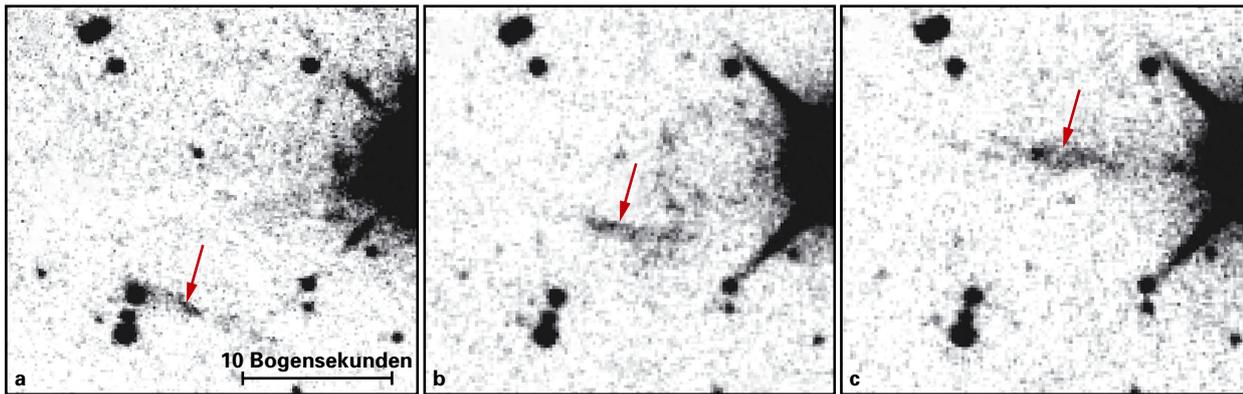
II. Highlights

II.1 Lichtechos geben Einblick in die aktive Vergangenheit von Cassiopeia A

Cassiopeia A ist der jüngste bekannte Supernova-Überrest in unserer Galaxis. Von Menschen unbeobachtet, muss er um 1680 explodiert sein. Der rund 11000 Lichtjahre entfernte Nebel gehört zu den meist untersuchten Himmelskörpern. Um so erstaunlicher ist es, dass es erst jetzt Astronomen des Instituts gemeinsam mit Kollegen aus den USA gelang, im infraroten Spektralbereich Lichtechos um den Supernova-Überrest zu entdecken.

Diese stammen von interstellarem Staub, der durch den Lichtblitz der Supernova-Explosion und durch in jüngster Vergangenheit erfolgte Helligkeitsausbrüche des zentralen Neutronensterns aufgeheizt wurde – ein überraschender Befund, weil die optische Suche nach solchen Echos bis dahin erfolglos war und man davon ausging, der Zentralkörper würde langsam und ereignislos auskühlen. Diese Beobachtungen gelangen Astronomen am MPIA.





Der Nebel Cassiopeia A (Abb. II.1.1) ist wahrscheinlich entstanden, als ein Stern mit etwa 20 Sonnenmassen seinen Brennstoff verbraucht hatte und als Supernova vom Typ II explodierte. Dabei wurde seine äußere Hülle ins All geschleudert, während der zentrale Kern zu einem Neutronenstern mit etwa 20 Kilometer Durchmesser zusammenbrach. Das Alter dieses Supernova-Überrestes von ungefähr 325 Jahren lässt sich aus der Geschwindigkeit und Ausdehnung der Wolke ermitteln.

Das Astronomenteam beobachtete Cassiopeia A erstmals im November 2003 mit dem Weltraumteleskop SPITZER im Infraroten bei 24, 70 und 160 μm Wellenlänge. Auf der 24- μm -Aufnahme fielen zwei helle bogenförmige Wolken auf, die sich auf entgegengesetzten Seiten des Zentralkörpers in 45 beziehungsweise 36 Lichtjahren Entfernung befinden. Um sie näher zu studieren, unternahm das Team Nachbeobachtungen dieser »lobes« mit dem Multiple Mirror Telescope auf dem Mount Hopkins und dem 3.5-m-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums. Diese Infrarotaufnahmen zeigten, dass sich scheinbar einige der in den lobes befindlichen Strukturen mit erheblicher Geschwindigkeit bewegt hatten (Abb. II.1.2). Würde es sich dabei um eine reale Bewegung von Staubwolken handeln, so müssten diese etwa 50% der Lichtgeschwindigkeit schnell sein. So hohe Geschwindigkeiten hat man in vergleichbaren Fällen noch nie beobachtet. Daraufhin beobachteten die Wissenschaftler Cassiopeia A im Dezember 2004 erneut mit SPITZER – auch auf diesen Aufnahmen fanden sich signifikante Veränderungen im Vergleich zu den ein Jahr zuvor gewonnenen Bildern (Abb. II.1.3 und II.1.4).

Abb. II.1.1: Falschfarbenbild von Cassiopeia A, aufgenommen mit dem Röntgensatelliten CHANDRA (blau und grün), dem Weltraumteleskop HUBBLE im Optischen (gelb) und mit dem Weltraumteleskop SPITZER im mittleren Infrarot (rot). Sterne und das von der Supernova-Explosion mit schweren Elementen angereicherte Gas leuchten besonders im Optischen, während die Emission im Infraroten warmen Staub im Überrest zeigt. Der zentrale Neutronenstern (Kästchen) ist nur im Röntgenbereich erkennbar (Bild: NASA/JPL-Caltech)

Abb. II.1.2: Scheinbare Bewegung eines Staubfilaments, aufgenommen (a) im Mai 2004, (b) im Oktober 2004, (c) im Januar 2005 bei 2.2 μm Wellenlänge. Verwendet wurden hierfür das Multiple Mirror Telescope (a) und das 3.5-m-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums (b, c).

Mit realen Bewegungen der Staubwolken waren diese Unterschiede wegen der extrem hohen Geschwindigkeiten nicht erklärbar. Die Astronomen sehen in dieser Erscheinung ein Lichtecho: Der zentrale Neutronenstern hatte einen Ausbruch energiereicher Strahlung, vermutlich im Gamma- und Röntgenbereich. Dieser Lichtblitz breitete sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus und traf dabei nacheinander auf die zufällig verteilten Wolken von Gas und Staub in dem Supernova-Überrest. Der Staub erwärmt sich dabei und leuchtet im Infraroten, bis er wieder abgekühlt ist. Währenddessen entfernt sich der Lichtblitz weiter vom Zentralstern. Im Laufe der Zeit ergibt sich so eine Spur von aufleuchtenden und wieder erlöschenden Staubfilamenten. Sie markieren gewissermaßen die Ausbreitungsfront des Strahlungsblitzes und täuschen eine reale Bewegung der Filamente nur vor.

Mit einem einfachen räumlichen Modell ließ sich aus den beobachteten scheinbaren Bewegungen der Wolken ableiten, wann der Helligkeitsausbruch stattgefunden haben muss. Eine genaue Analyse zeigte: In Cassiopeia A gibt es mindestens zwei voneinander unabhängige Echos. Eines scheint von der Supernova-Explosion aus dem Jahre 1680 selbst zu stammen, das andere von erst kürzlich erfolgten Ausbrüchen, von denen einer um 1953 stattgefunden haben muss.

Ein solches Verhalten deutet darauf hin, dass es sich bei der zentralen Quelle in Cassiopeia A um einen »Soft gamma repeater« handelt. Das sind vermutlich Neutronensterne mit starken Magnetfeldern, auch Magnetare genannt. Die Ursache der Ausbrüche ist nicht zweifelsfrei bekannt. Nach einer Theorie kann bei diesen Objekten das extrem starke Magnetfeld dazu führen, dass sich in der Kruste des Neutronensterns Beben ereignen, die zu gewaltigen Ausbrüchen von Gammastrahlung führen.

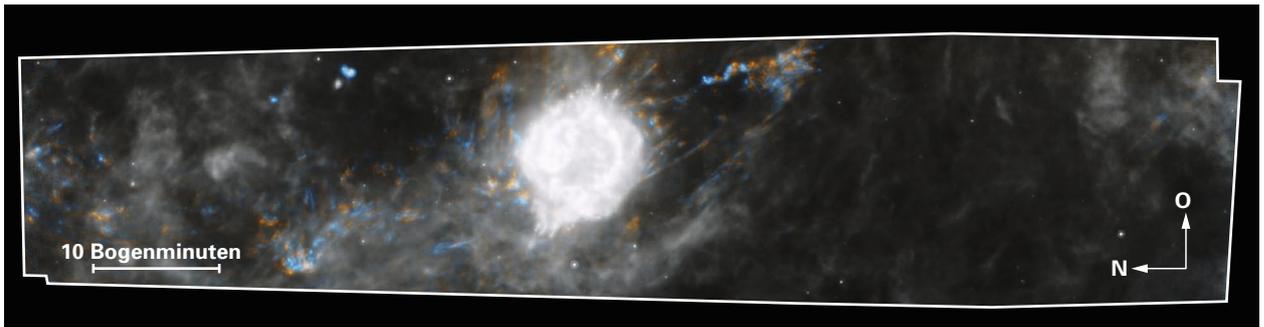


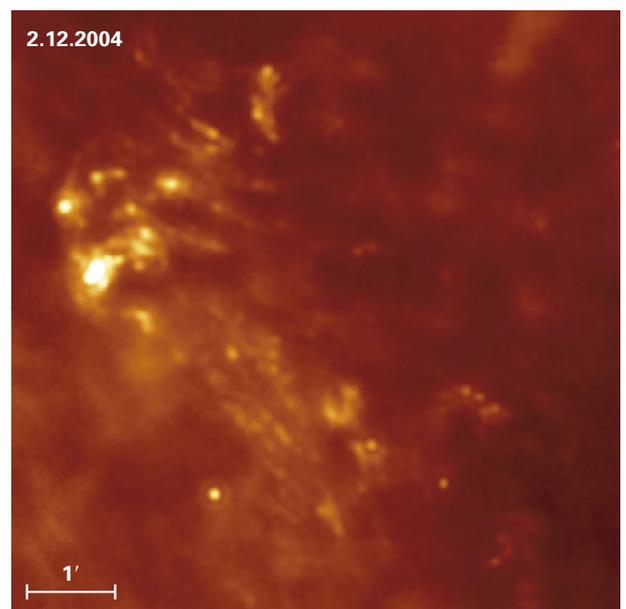
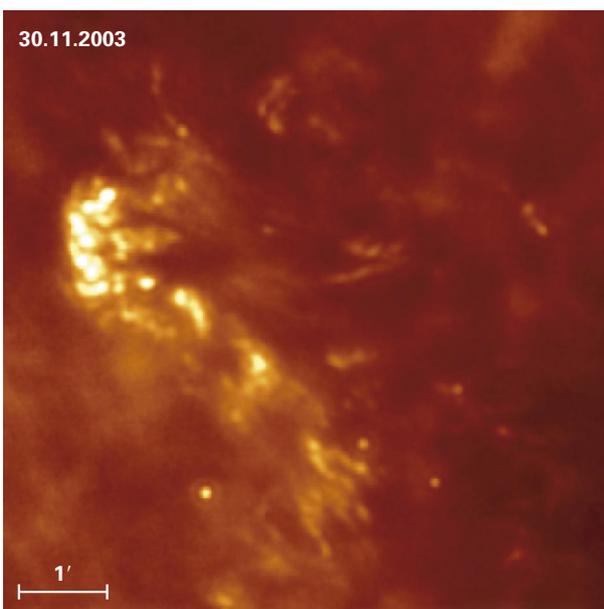
Abb. II.1.3: Die Umgebung von Cassiopeia A bei einer Wellenlänge von $24\mu\text{m}$, aufgenommen mit SPITZER am 30. November 2003 (*blau*) und am 2. Dezember 2004 (*orange*). Unveränderte Strukturen – wie der Überrest selbst und große Teile des galaktischen Zirrus – erscheinen weiß. Das Infrarotecho außerhalb des kreisrunden, weißen Überrestes ist als farbige (*blau* und *orange*), bipolare Struktur zu erkennen, die sich vom Zentrum der Supernova weg zu bewegen scheint.

Bislang sind nur sehr wenige Magnetare bekannt. Sollten die Astronomen im Zentrum von Cassiopeia A tatsächlich solch ein Objekt entdeckt haben, so wird es das erste sein, von dem genau bekannt ist, wann und aus was für einem Stern es entstanden ist. In diesem Zusammenhang ist auch die Frage nach der Ursache der beiden bogenförmigen Staubfilamente von Interesse. Diese bipolare Struktur deutet darauf hin, dass die anregende Energiewelle gebündelt und gerichtet aufgetreten ist. Es ist auch möglich, dass das nun zum Leuchten angeregte Material selbst die beobachtete, vornehmlich bipolare Verteilung hat. Dies ließe sich durch starke, kollimierte Winde des massereichen Sterns vor seiner Explosion erklären.

Zusätzliche Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop SPITZER gaben neue Hinweise auf den Ursprung der Lichtechos. So zeigt eine kürzlich gewonnene, noch größere $24\mu\text{m}$ -Aufnahme Lichtechos bis zu einer projizierten Entfernung von mehr als 300 Lichtjahren um den Supernova-Überrest. Auch für diese neu entdeckten Filamente bestätigen bodengebundene Nachbeobachtungen im nahen Infraroten die schon für die näheren Echos gefundenen schnellen scheinbaren Bewegungen. Im Oktober 2005 gelang es außerdem erstmals, die bisher nur im Infraroten beobachteten Echos auch bei visuellen Wellenlängen nachzuweisen.

Zukünftig sind weitere Beobachtungen geplant, unter anderem auch Spektroskopie von einigen besonders hellen Filamenten. Da es sich bei der im Optischen beobachteten Emission höchstwahrscheinlich um an Staubpartikeln gestreutes Licht der Explosion von 1680 handelt, ließe sich aus einem Spektrum der genaue Typ

Abb. II.1.4: Bilder von einer der beiden bogenförmigen Wolken, aufgenommen bei $24\mu\text{m}$ Wellenlänge mit SPITZER im Abstand von einem Jahr. Die morphologischen Veränderungen sind deutlich erkennbar.



der Supernova ableiten – mehr als drei Jahrhunderte, nachdem das Licht der Explosion die Erde erstmals erreichte. Dies wäre eine weitere spektakuläre Entdeckung. Sie würde es uns ermöglichen, den sehr gut erforschten Überrest von Cassiopeia A mit der Physik der Explosion zu verknüpfen.

*(Oliver Krause, Stephan Birkmann, Sascha Quanz.
Beteiligte Institute:
Steward Observatory, University of Arizona;
Rutgers University, Piscataway;
Space Science Institute, Boulder)*

II.2 AB Doradus C: Ein junger, massearmer Stern hat doppelt so viel Masse wie erwartet

Die Masse ist der bedeutendste Parameter der Sternentwicklung, sie entscheidet unter anderem über Leuchtkraft, Temperatur und Lebensdauer. Ihre Bestimmung gehört daher zu den fundamentalen Aufgaben der Astronomie. Doch meist misst man die Leuchtkraft eines Sterns und ermittelt die Masse indirekt über eine Masse-Leuchtkraft-Beziehung. Diese Beziehung ist für entwickelte massereiche Sterne gut etabliert, ließ sich jedoch bislang für junge, massearme Sterne und insbesondere für Braune Zwerge nicht kalibrieren. Hierbei ist man gänzlich auf Entwicklungsmodelle angewiesen. Astronomen des MPIA und Kollegen aus Spanien und den USA ist es erstmals gelungen, aus astrometrischen Daten die Masse eines jungen, sehr massearmen Sterns abzuleiten. Ihr Wert erwies sich überraschenderweise als etwa doppelt so hoch wie es Modelle bei der gegebenen Leuchtkraft erwarten ließen. Das hat weitreichende Auswirkungen, zum Beispiel auf die bislang angenommene Häufigkeit Brauner Zwerge und Planeten in jungen Sternhaufen.

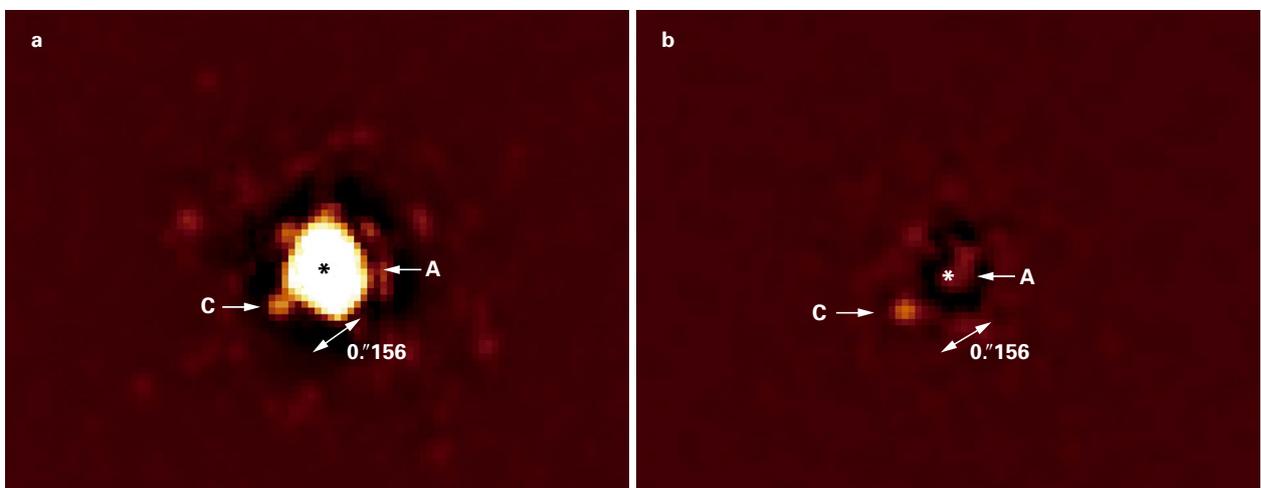
Junge Braune Zwerge und Planeten sind bei ihrer Entstehung heiß und hell, und kühlen mit der Zeit ab, weshalb sie sich am besten in einem frühen Entwicklungsstadium beobachten lassen. Ein Stern, bei dem man

Abb. II.2.1: Entdeckungsaufnahme von AB Doradus C mit der am MPIA gebauten Kamera NACO-SDI. *Links* die Aufnahme mit NACO bei 1.625 Mikrometer Wellenlänge. *Rechts* tritt der Begleiter durch die Subtraktionswirkung der SDI deutlich hervor.

schon seit langem nach massearmen Begleitern sucht, ist AB Doradus. Seine geringe Entfernung von 14.94 pc (49 Lichtjahre, gemessen mit HIPPARCOS) und sein relativ gut bekanntes Alter von 50 Millionen Jahren haben ihn dafür prädestiniert. Er ist vom Spektraltyp K1 und befindet sich noch im Vorhauptreihenstadium. Seit Beginn der 1990er-Jahre ist bekannt, dass er in 9 Bogensekunden Abstand (entsprechend 135 AE) einen Begleiter besitzt. Die beiden Körper erhielten die Bezeichnungen AB Dor A und B.

Diesen Doppelstern beobachteten Astronomen des MPIA und Kollegen aus Spanien und den USA mit einer Weiterentwicklung der am MPIA gebauten Infrarotkamera NACO. Das neue Instrument mit der Bezeichnung NACO Simultaneous Differential Imager (NACO SDI) ist hervorragend geeignet, massearme Sterne und Braune Zwerge in enger Nachbarschaft zu einem Stern zu finden. Die NACO-SDI-Kamera enthält eine Adaptive Optik, welche die durch Turbulenzen der Erdatmosphäre verursachte Unschärfe beseitigt. Die Zusatzoptik SDI zerlegt das Licht eines einzelnen Sterns in vier identische Bilder bei benachbarten Wellenlängen inner- und außerhalb der für massearme Objekte charakteristischen, infraroten Methanabsorptionsbanden. Auf geeigneten Differenzbildern dieser vier Aufnahmen verschwindet der bläuliche Hauptstern mit seinem hellen Lichthof nahezu vollständig, und der massearme, kühle und rötliche Begleiter wird deutlich erkennbar.

Mit diesem Instrument an einem der 8-m-Teleskope des Very Large Telescope (VLT) entdeckten die Astronomen in nur 0.07 Bogensekunden (1 AE) Abstand von AB Dor B einen Begleiter. Die beiden Objekte wurden daraufhin mit AB Dor Ba und Bb bezeichnet. Gleichzeitig fanden sie in nur 0.156 Bogensekunden (2.3 AE) Abstand von



AB Dor A noch einen, bis dahin unbekanntem Begleiter. Dieser Körper mit der Bezeichnung AB Dor C ist im nahen Infrarot rund hundertmal so lichtschwach wie AB Dor A. Es ist damit das lichtschwächste Begleitobjekt, das jemals so nahe an einem Stern abgebildet werden konnte (Abb. II.2.1). Die Tatsache, dass der Versuch, AB Dor C mit dem Weltraumteleskop HUBBLE aufzuspüren, fehlschlug, unterstreicht die enorme Leistungsstärke von NACO-SDI.

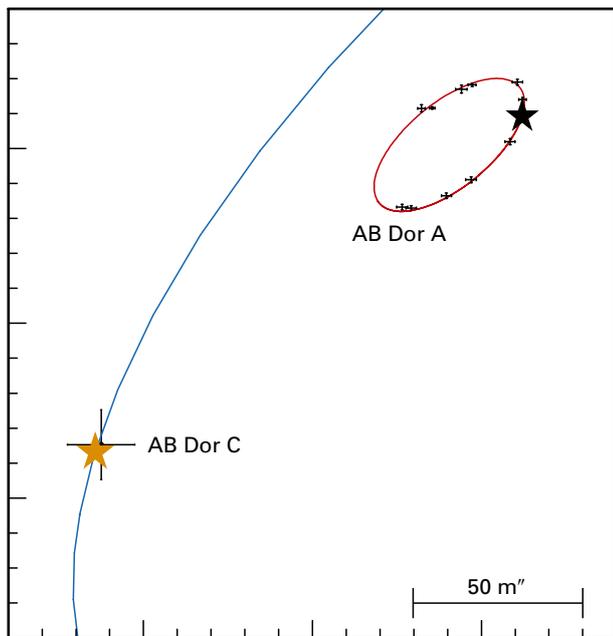
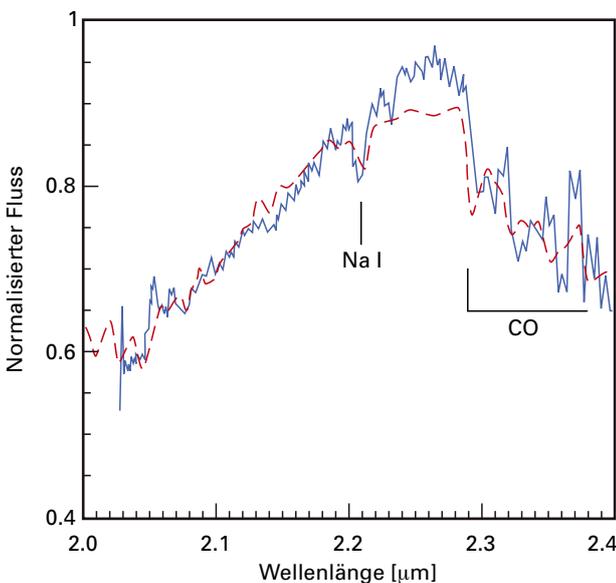


Abb. II.2.2: Die aus astrometrischen Daten ermittelten Bahnen von AB Dor A und C.

Abb. II.2.3: Das Spektrum von AB Dor C im nahen Infrarot.



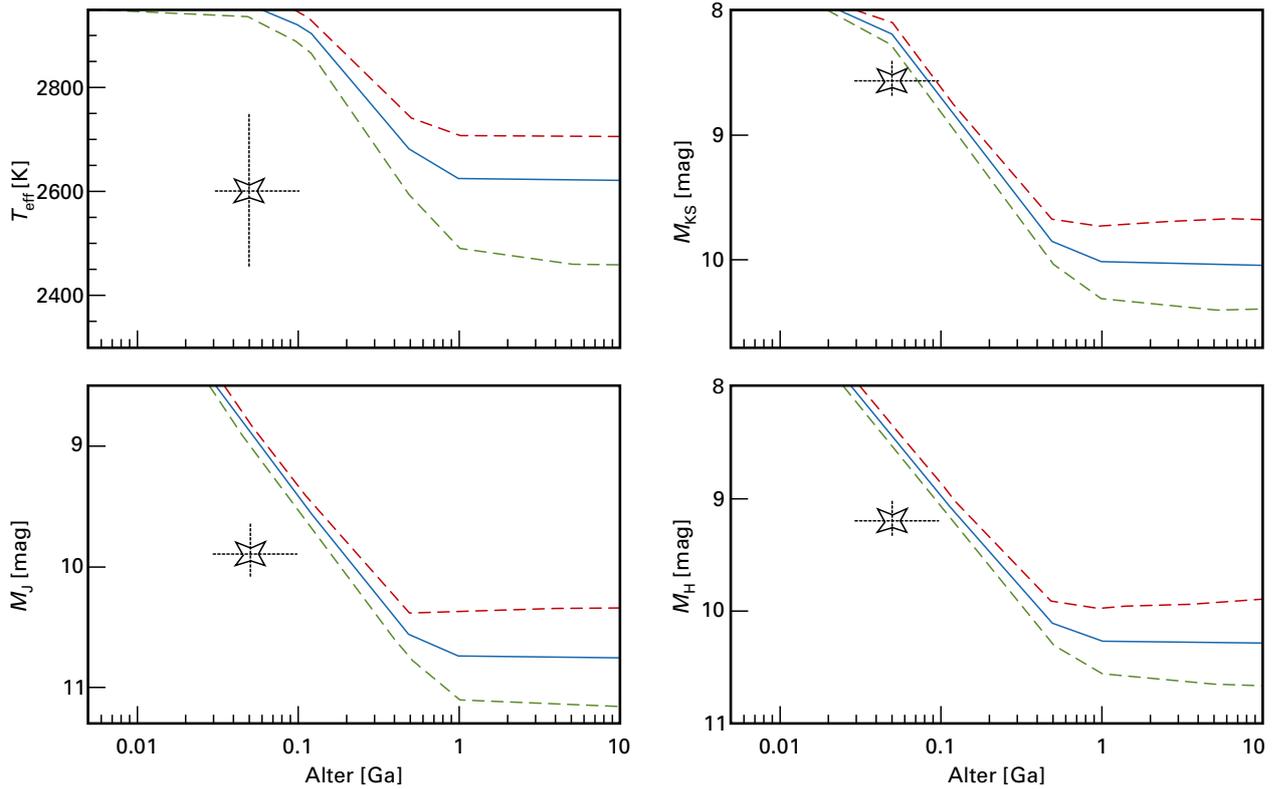
Damit handelt es sich bei dem vermeintlichen Doppelstern in Wirklichkeit um ein Viersystem, in dem sich zwei enge Paare in einem Abstand von etwa 135 AE umkreisen. Die Umlaufbahn von AB Dor C um A (Abb. II.2.2) bot die Möglichkeit, die Bahnparameter und damit erstmals auch die Masse eines so massearmen Körpers aus astrometrischen Beobachtungen abzuleiten. AB Dor C wirkt mit seiner Schwerkraft auf seinen Zentralstern, beide Sterne bewegen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Solche Beobachtungen der so genannten Reflexbewegung waren bereits in den Jahren zuvor mit VLBI und HIPPARCOS vorgenommen worden und konnten nun für die Rekonstruktion der Bahn verwendet werden. Es zeigte sich, dass AB Dor C auf einer stark elliptischen Bahn läuft ($e = 0.59$) und für einen Umlauf 11.75 Jahre benötigt.

Aus der bekannten Masse von AB Dor A von 0.865 Sonnenmassen und den Bahnelementen ergab sich für AB Dor C eine Masse von 0.09 Sonnenmassen (entsprechend 93 Jupiter-Massen). Damit liegt der Himmelskörper knapp oberhalb der oberen Grenze für Braune Zwerge von 0.07 Sonnenmassen. Aus den gemessenen Helligkeiten bei drei Wellenlängen im nahen Infrarot ließ sich für AB Dor C ein Spektraltyp M7 – M9 ableiten. Um den Typ noch genauer zu bestimmen, nahmen die Astronomen mit dem NACO adaptive optics spectrograph ein Spektrum des Objekts auf. Dieses passte am besten zu einem Spektraltyp M8 (Abb. II.2.3), dem eine Temperatur von 2600 K zugeordnet wird. Die Leuchtkraft von AB Dor C ließ sich aus den gemessenen Infrarotflüssen zu 0.0018 Sonnenleuchtkraften ermitteln.

Damit lagen die physikalischen Parameter dieses massearmen Sterns fest und ließen sich mit den Vorhersagen von Modellrechnungen vergleichen. Zur Überraschung der Forscher war der Begleiter um 400 Grad kühler und 2.5-mal so lichtschwach wie auf Grund neuester Modellrechnungen erwartet (Abb. II.2.4). Oder anders gesagt: Derzeitige Modelle liefern für so junge, massearme Objekt nur etwa halb so große Massenwerte.

Das hat bedeutende Auswirkungen auf die Interpretation von einer ganzen Reihe von Beobachtungen. So wurden bei Infrarot-Durchmusterungen im Bereich des Sternentstehungsgebietes im Orion sehr viele junge, massearme Objekte entdeckt, von denen ein Großteil mit Hilfe der Entwicklungsmodelle als Braune Zwerge eingestuft wurden. Nach den neuen mit AB Dor C gewonnenen Erkenntnissen handelt es sich nun bei vielen von ihnen um massearme Sterne. Kritisch ist jetzt auch die Existenz von so genannten frei fliegenden Planeten anzusehen. Dabei handelt es sich um leuchtkraftarme Himmelskörper ebenfalls im Orionnebel, die als Planeten eingestuft wurden. Sind auch hier alle ermittelten Massenwerte um einen Faktor zwei zu gering, so handelt es sich wahrscheinlich um Braune Zwerge.

Die Arbeit hat eindringlich bewiesen, dass man bei der Beurteilung von Entwicklungsmodellen für mas-



searme Sterne und Braune Zwerge sehr vorsichtig sein muss. Um eine verlässlichere Kalibrierung der Masse-Leuchtkraft-Beziehung zu erhalten, müssten weitere Fälle dieser Art gefunden werden. Objekte wie AB Dor C sind aber sehr selten. Nur ein Prozent aller Sterne haben enge massearme Begleiter, und nur ein Prozent der sonnennahen Sterne sind jung. Deshalb ist die Möglichkeit, diese Messung überhaupt durchführen zu können, als großer Glücksfall zu bezeichnen. Es wäre wünschenswert, diese Ergebnisse an weiteren Objekten zu überprüfen.

Abb. II.2.4: Vergleich der ermittelten physikalischen Größen von AB Dor C (als Stern markiert) mit den Ergebnissen von Modellrechnungen (Kurven).

(Rainer Lenzen, Wolfgang Brandner.
 Beteiligte Institute:
 Steward Observatory,
 University of Arizona,
 Universidad de Valencia,
 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,
 European Southern Observatory)

II.3 Der erste Heidelberger extrasolare Planet

Mehr als 180 extrasolare Planeten wurden seit 1995 entdeckt. Die meisten von ihnen umkreisen sonnenähnliche Sterne. Bis heute sind nur ganz wenige substellare Begleiter bekannt, die beispielsweise Riesensterne umkreisen. Ein internationales Astronomenteam unter der Leitung des MPIA hat nun einen Planeten bei einem Roten Riesen mit etwa zwei Sonnenmassen entdeckt. Der Stern HD 11977A wird von einem Begleiter mit einer Mindestmasse von 6.5 Jupitermassen in knapp 2 AE Abstand umkreist. Dieser Befund liefert einen wichtigen Beitrag zu den Theorien der Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen.

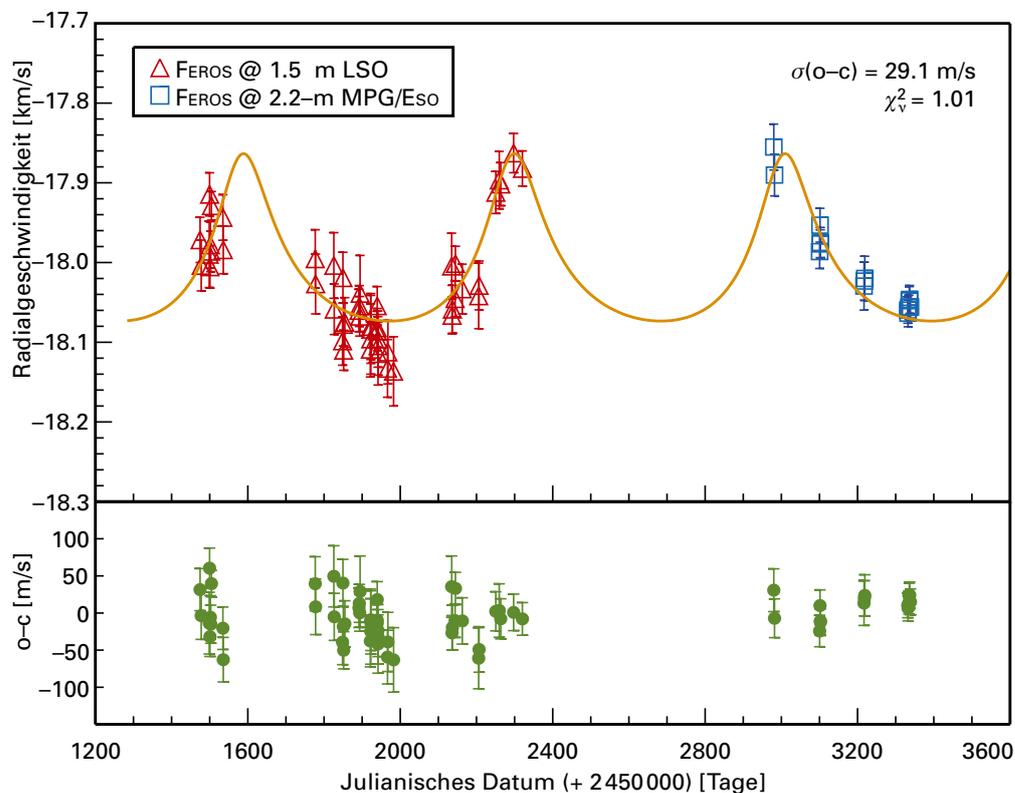
Große Suchprogramme für extrasolare Planeten konzentrieren sich bisher auf sonnenähnliche Sterne. Für diese Sterne hat sich die Methode der genauen Messung stellarer Radialgeschwindigkeiten etabliert. Die Frage, ob auch andere Sterne Planeten besitzen, ist aber von höchstem Interesse. Dazu zählen Sterne in anderen Massenbereichen oder Entwicklungsphasen.

Bei Hauptreihensternen, die massereicher als die Sonne sind, lassen sich die Radialgeschwindigkeiten nicht mit hoher Genauigkeit bestimmen. Diese Sterne sind heißer als die Sonne, deshalb enthält ihr Spektrum weniger Absorptionslinien. Sie rotieren meist auch viel

schneller, wodurch ihre Linien stark verbreitert werden und ihre Radialgeschwindigkeit nicht mehr so genau messbar ist. Hat sich ein Hauptreihenstern mittlerer Masse ($1.5 - 4 M_{\odot}$) oder ein noch massereicherer Stern weiterentwickelt und abgekühlt, so erhöht sich die Messgenauigkeit seiner Radialgeschwindigkeit. Wenn sich dieser Stern auf den Roten Riesenast zubewegt, rotiert er langsamer und kühlt sich dabei aufgrund der Expansion seiner Hüllen ab. Das begünstigt die genaue Messung der Radialgeschwindigkeiten. Allerdings treten dann andere Effekte auf: So zeigen Rote Riesen höhere stellare Aktivität als sonnenähnliche Sterne, etwa große Sternflecken oder starke Oszillationen. Diese Phänomene lassen sich jedoch in ihren Spektren nachweisen und somit von Radialgeschwindigkeitsvariationen, die von unsichtbaren Begleitern hervorgerufen werden, unterscheiden.

Das internationale Astronomenteam beobachtete den 216 Lichtjahre entfernten Roten Riesen HD 11977 bereits seit 1999 im Rahmen einer Studie der Physik entwickelter Sterne. Insgesamt etwa 200 Riesensterne vom

Abb. II.3.1: Variation der Radialgeschwindigkeit bei HD 11977, gemessen mit FEROS von Oktober 1999 bis November 2004.



Typ G bis K standen auf dem Programm. Verwendet wurde der Echelle-Spektrograph FEROS am 1.5-m-Teleskop der ESO auf La Silla. Im Jahr 2002 bemerkten die Astronomen bei HD 11977 erstmals periodische Radialgeschwindigkeitsvariationen, die auf einen substellaren Begleiter hindeuteten. Nachdem FEROS an das 2.2-m-Eso/MPG-Teleskop versetzt wurde, konnten die Messungen mit diesem lichtstärkeren Teleskop fortgeführt werden. Durch genauere Untersuchungen der Spektren ließ sich eine stellare Aktivität als Ursache für die Schwankungen der Radialgeschwindigkeit ausschließen. Es blieb als einzige plausible Erklärung die Existenz eines substellaren Begleiters übrig. Bis zum November 2004 hatten die Astronomen zwei Perioden einer regelmäßigen Schwingung gemessen, die zweifelsfrei auf die Schwerkraftwirkung eines unsichtbaren Begleiters zurückzuführen war (Abb. II.3.1).

Aus der Umlaufperiode von 711 Tagen und der Masse des Zentralsterns von 1.9 Sonnenmassen ergab sich für den Begleiter eine Masse $m = 6.5 M_J / \sin i$ (M_J : Jupitermasse, i : Neigungswinkel der Umlaufbahn gegen die Sichtlinie). Aus den astrometrischen Messungen des Satelliten HIPPARCOS ließ sich die Obergrenze für die Masse des Begleiters zu $66 M_J$ festlegen. Das liegt unter der Obergrenze von $75 M_J$ für Braune Zwerge. Nimmt man den wahrscheinlichsten Wert $\sin i = \sqrt[3]{4}$ für zufällig im Raum verteilte Neigungswinkel an, so erhält man für den Begleiter $M = 8.3 M_J$. Die Masse des Begleiters liegt somit im Massenbereich der Planeten (Obergrenze: $13 M_J$).

Tabelle 1: Astrophysikalische Größen von HD 11977 und seinem Begleiter.

HD 11977	
Spektraltyp	G5III
visuelle Helligkeit	4.68 mag
Entfernung	66.5 pc
Masse	$1.91 M_{\odot}$
Radius	$10.1 R_{\odot}$

HD 11977B	
Masse	$6.5 - 66 M_J$
Bahnperiode	711 Tage
Bahnhalbmesser	1.93 AE
Exzentrizität	0.4

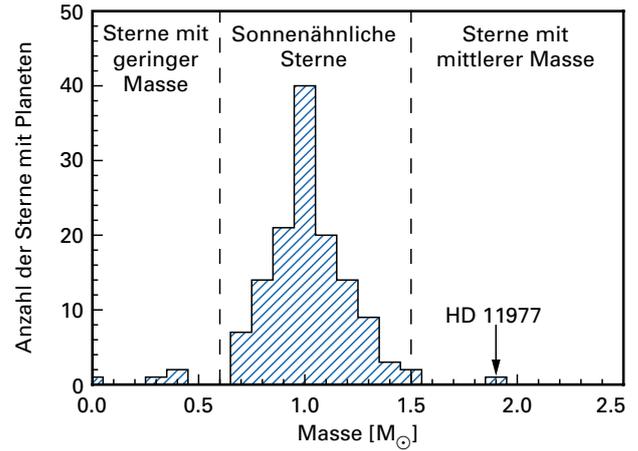


Abb. II.3.2: Massenverteilung von Sternen mit bekannten Planeten bzw. substellaren Begleitern. HD 13189 wurde wegen der großen Unsicherheit seiner Masse nicht mit aufgenommen.

Ob es sich bei HD 11977B um einen Planeten oder einen Braunen Zwerg handelt, lässt sich derzeit nicht entscheiden. Heute sind nur zwei weitere massereiche Sterne bekannt, die einen substellaren Begleiter besitzen, HR 7329 ($2.9 M_{\odot}$) und HD 13189 ($2 - 7 M_{\odot}$, vgl. Abb. II.3.2). Ob diese geringe Ausbeute bedeutet, dass massereiche Sterne grundsätzlich seltener substellare Begleiter besitzen, oder ob es sich um einen Auswahleffekt handelt, müssen weitere Beobachtungen klären.

Bis heute ist unklar, ob zwischen der Häufigkeit der Planetenbildung und der Masse des Zentralsterns ein Zusammenhang besteht. Interessant sind Rote Riesen wegen der ungeklärten Frage, wie sich Planeten weiterentwickeln, wenn der Zentralstern seinen Wasserstoffvorrat verbraucht hat und das Hauptreihenstadium verlässt.

(Johny Setiawan, Jens Rodmann.

Beteiligte Institute:

Observatorio Nacional, Rio de Janeiro,
 Thüringer Landessternwarte, Tautenburg,
 European Southern Observatory, Garching,
 Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg,
 Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal,
 Osservatorio Astronomico di Trieste, Triest)

II.4 Die Entstehung von Planetesimalen aus Gravitationsinstabilitäten

Nach heutigen Vorstellungen entstehen Planeten in protoplanetaren Scheiben in mehreren Stufen. Zunächst stoßen Staubteilchen zusammen, bleiben aneinander haften, und wachsen bis auf die Größe von Planetesimalen an. Diese Körper lagern sich dann aufgrund gravitativer Wechselwirkung zusammen und erreichen schließlich die Ausmaße von Planeten. In dieser Prozessfolge sind noch viele Einzelschritte unverstanden. Turbulenzen unterschiedlicher Art gehören hierzu, doch sie ließen sich bislang wegen unzureichender Rechenleistungen nicht befriedigend simulieren. Theoretiker des Instituts haben jetzt den Einfluss von Magnetorotations- und Kelvin-Helmholtz-Turbulenz numerisch untersucht. Ein überraschendes Ergebnis war, dass diese Turbulenzen die gravitative Entstehung von Planetesimalen nicht – wie vermutet – verhindern, sondern sogar fördern kann.

In den ersten Phasen der Planetenentstehung lagern sich kleinste Staubpartikel zusammen. Die hierfür nötigen Relativgeschwindigkeiten erhalten die Teilchen durch die Brownsche Bewegung. Sie nimmt mit wachsender Teilchenmasse ab und kann deshalb nur in der frühesten Wachstumsphase eine Rolle spielen. Im weiteren Verlauf sinken die immer größer werdenden Teilchen aufgrund der Schwerkraft zur Mittelebene der sich ausbildenden protoplanetaren Scheibe ab. Da die Sinkgeschwindigkeit mit wachsender Teilchenmasse zunimmt, treten auch hier zwischen den Staubpartikeln Relativgeschwindigkeiten auf, die zu weiteren Zusammenstößen und einem Anwachsen führen. Auf diese Weise können die Teilchen vermutlich beim Erreichen der Scheibenebene bis zu einigen Zentimetern groß werden.

In der Scheibenebene ist die Staubbichte verhältnismäßig hoch, so dass Teilchen jetzt öfter zusammenstoßen und zu Planetesimalen mit einigen Kilometern Durchmesser anwachsen können. Gleichzeitig gibt es jedoch mehrere Mechanismen, die diesem Wachstum entgegenwirken. So können auch mikroskopische Teilchen nur aneinander haften bleiben, wenn sie nicht zu schnell kollidieren. Gleiches gilt für Stöße zwischen kleinen Staubpartikeln und metergroßen Felsen. Ab einer gewissen Geschwindigkeit prallen die Staubkrümel einfach von einander ab. Noch schlimmer ist es um Stöße zwischen makroskopischen Körpern bestellt. Zwei Felsen haften nie aneinander, egal mit welcher Geschwindigkeit sie zusammenprallen. Oberhalb einer kritischen Relativgeschwindigkeit zerstören sich die Körper dann sogar gegenseitig. Wo diese Grenze liegt, ist noch umstritten, vermutlich aber bei einigen zehn Metern pro Sekunde. Außerdem verlieren einige Meter große Körper aufgrund ihrer Reibung mit dem Gas in

der Scheibe an Drehimpuls und nähern sich auf einer spiralförmigen Bahn dem Zentralstern. Abschätzungen zeigen, dass ein Fels dieser Größe innerhalb von etwa hundert Jahren dem Stern so nahe kommen kann, dass er verdampft. Um diesem Schicksal zu entgehen, muss er innerhalb dieser kurzen Zeitspanne um mindestens eine Größenordnung wachsen, was einem Massenzuwachs von drei Größenordnungen entspricht. Nach bisherigen Modellrechnungen benötigt das Wachstum in dieser Phase jedoch eine Zeit von mindestens 1000 Jahren.

Magnetorotations-Turbulenz konzentriert Gesteinsbrocken

Das zweite Problem (die hohen Driftraten der Felsbrocken) bezieht sich auf Scheiben, in denen Gas und Staub laminar strömen. Aber bereits seit einiger Zeit wird vermutet, dass Turbulenz hier eine entscheidende Rolle spielt. Turbulenz bewirkt nicht nur eine Diffusion der kleinsten Staubpartikel, sie erzeugt auch Relativgeschwindigkeiten zwischen felsgroßen Körpern, die nur noch schwach ans Gas an koppeln. So kommt es einerseits zu vermehrten Kollisionen, aber andererseits auch zu einer lokalen Konzentration der Gesteinskörper. Bis zu einigen Metern große Brocken können so zum Beispiel in Wirbeln eingefangen werden. Diese Wirbel können unter anderem durch die so genannte Magnetorotationsturbulenz (MRI-Turbulenz) entstehen.

Die MRI-Turbulenz ist ein Zusammenspiel aus Scherströmungen und Magnetfeldern, das man sich etwa wie folgt vorstellen kann. Scherströmungen können zu Turbulenz führen. Bekannt ist dies zum Beispiel bei schnellen Sportwagen, bei denen die umströmende Luft turbulent werden kann. Die Kunst der Autobauer besteht darin, die Form des Wagens so zu gestalten, dass die Turbulenz minimiert wird, denn die entstehenden Wirbel erhöhen den Luftwiderstand. Spoiler und Stromlinienform tragen dazu bei, die Turbulenz möglichst weit hinter dem Sportwagen auftreten zu lassen.

Auch in Gasscheiben um junge Sterne gibt es eine solche Scherströmung. Das Gas strömt dicht am Stern schneller als in größerer Entfernung. Experimente und analytische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Strömung in Scheiben nicht so leicht turbulent wird, da die Scheibe um den Stern mit hoher Geschwindigkeit rotiert. Der damit verbundene Drehimpuls stabilisiert die Scherströmung, wirkt also ähnlich wie ein Spoiler am Sportwagen.

Hinzu tritt nun die Wirkung der Magnetfelder. Das Gas um den jungen Stern ist wahrscheinlich ionisiert und

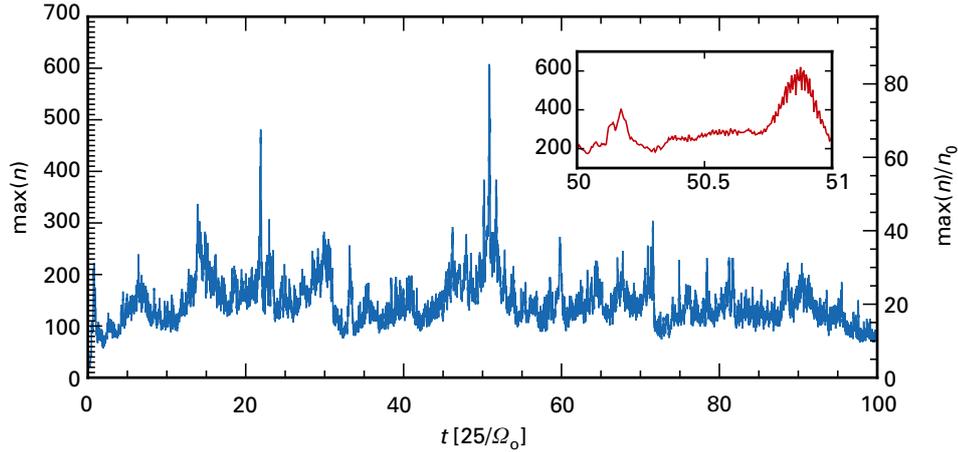


Abb. II.4.1: Anzahl der Teilchen in einer Rechenzelle als Funktion der Zeit für metergroße Gesteinsbrocken. Die Teilchendichte erreicht den bis zu 80-fachen Wert der mittleren Durchschnittsdichte. Die Zeit t ist in Einheiten der Umläufe angegeben.

die Ladungsträger koppeln an magnetische Feldlinien. Wie Gummibänder durchziehen sie die Scheibe und versuchen die Scherung zu verhindern. So wird der innere Bereich der Scheibe gebremst und der äußere Bereich beschleunigt. Dies destabilisiert die Strömung in der Scheibe allerdings so stark, dass sie turbulent wird und Wirbel ausbildet. Die Magnetfelder wirken demnach wie ein Wald von Antennen, die man auf seinen Sportwagen aufschraubt: Dadurch erhöht sich der Luftwiderstand immens, da die Strömung um den Wagen turbulent wird – trotz aller Spoiler.

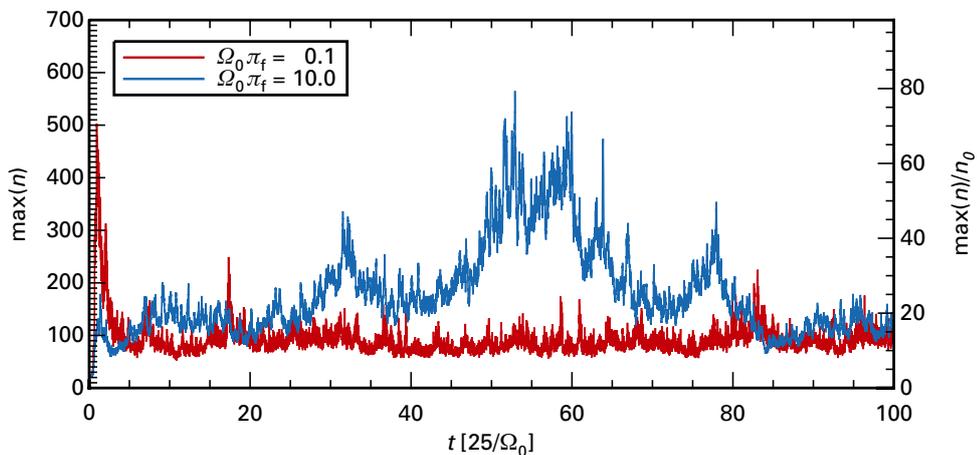
Das Phänomen der MRI-Turbulenz in Scheiben um junge Sterne behandelten die Theoretiker des MPIA numerisch. Zwei Millionen Teilchen repräsentierten die Gesteinsbrocken, die sich in einem Gas bewegen. Die Reibung ließ sich mit Hilfe eines Parameters variieren. Dann wurde die MRI-Turbulenz des Gases mitgerechnet, um den Einfluss dieses Phänomens auf die Bewegung der makroskopischen Körper zu untersuchen.

Da eine komplette dreidimensionale Behandlung der gesamten Scheibe die Rechenleistung heutiger Computer bei weitem übersteigt, musste die Simulation auf ein Volumen innerhalb der Scheibe beschränkt werden. Werte für einen radialen Dichtegradienten und einen Druckgradienten wurden jeweils über einen Bereich variiert, wie man ihn von protoplanetaren Scheiben erwartet. Für die Größe der Gesteinskörper wurden Werte von zehn Zentimetern sowie einem und zehn Metern angenommen.

Die Simulationsläufe mit unterschiedlichen Parametern zeigten überraschende Auswirkungen. Die MRI-Turbulenz erzeugt in dem Gas Wirbel mit leicht erhöhter Dichte und geringfügig höherem Druck als in der Umgebung. Diese Verdichtungen bleiben über einige Umläufe in der Scheibe erhalten, was einer Zeitdauer von einigen zehn oder – in äußeren Bereichen der Scheibe – gar hundert Jahren entspricht. Dann lösen sie sich auf, entstehen aber eventuell an anderer Stelle wieder neu.

Die Wirbel drehen sich in unterschiedlichen Richtungen und lassen sich, wie in der Erdatmosphäre, je

Abb. II.4.2: Wie Abb. II.4.1., aber für Steine mit 10 cm (rote Kurve) und 10 m große Partikel. Deutlich ersichtlich ist die überdurchschnittlich starke Anreicherung der großen Brocken.



nach Drehsinn in Zyklone und Antizyklone unterscheiden. Interessanterweise streben die festen Körper in die Antizyklone hinein und bleiben darin gefangen. Zyklone hingegen zerstreuen die Teilchen. Der Effekt wächst sogar mit der Teilchengröße und findet bei Körpern im Meterbereich ein Maximum: Hier sind die Körper lokal bis um das Hundertfache stärker konzentriert als im Mittel, während der Effekt bei den kleinen Körnern und größeren Objekten wesentlich geringer ausfällt (Abb. II.4.1 und Abb. II.4.2). Ursache für das Wandern der Teilchen in die Antizyklonbereiche ist der dort herrschende Druckgradient. Diese Ansammlungen der großen Körper bleiben sogar noch eine zeitlang bestehen, nachdem sich die Gaswirbel, die sie erzeugt hatten, bereits aufgelöst haben.

Als zweites interessantes Ergebnis erwies sich, dass die MRI-Turbulenz die eingangs beschriebene Wanderung der Felsbrocken in Richtung zum Zentralstern hin verzögert. Im Vergleich zu einer laminaren Scheibe ist diese Geschwindigkeit um bis zu 40% verringert (Abb. II.4.3). Hier ist die Dichte der Teilchen in azimuthaler Richtung (Ordinate) dargestellt in Abhängigkeit von der radialen Richtung (Abszisse). Die größeren Teilchen sind in radialer Richtung weit stärker konzentriert.

Wie sich diese Vorgänge auf das Szenario der Entstehung von Planetesimalen auswirkt, können nur Simulationen der gesamten Scheibe zeigen. Dennoch

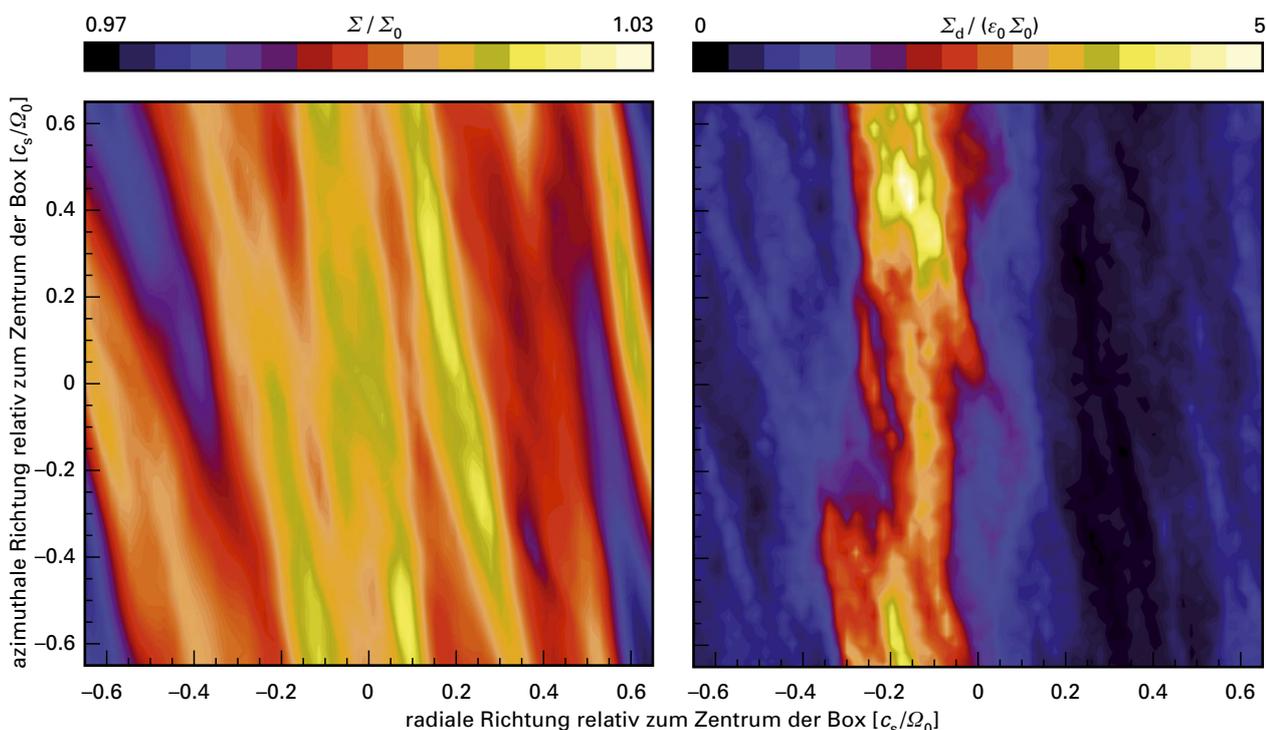
Abb. II.4.3: Säulendichte von Gas (*links*) und größeren Teilchen (*rechts*). Während die Gasdichte in den Wirbeln gegenüber dem Mittel der Umgebung nur verhältnismäßig wenig variiert, treten bei den Teilchen erhebliche Dichtekonzentrationen auf.

erscheint es plausibel, dass die Anreicherung der Körper in den Antizyklonen ihr weiteres Zusammenlagern aufgrund der Schwerkraftwirkung begünstigt.

Ob die verlangsamte Driftgeschwindigkeit ausreicht, um die Körper vor dem frühzeitigen verdampfen zu bewahren, ist noch unklar. Auf jeden Fall scheint MRI-Turbulenz die Entstehung von Planetesimalen zu fördern. Wie eine einfache Abschätzung zeigt, ist die Ansammlung in den Klumpen so dicht, dass die einzelnen Brocken ihre gegenseitige Schwerkraft spüren müssen. Diese Schwerkraft könnte jetzt ausreichen, um die Auflösung des Klumpens zu verhindern. Dies könnte zu einem Kollaps des Staubklumpens führen, an dessen Ende ein kilometergroßes Planetesimal steht. Das numerische Experiment hierzu ist in Vorbereitung.

Kelvin-Helmholtz-Turbulenz

Es ist schon seit langem bekannt, dass in zu schwach ionisierten Scheiben die MRI-Turbulenz verhindert wird, weil die Magnetfelder nicht an neutrales Gas koppeln. Nun kommt es aber zu einer zweiten Form von Instabilität, die einen erheblichen Einfluss auf die protoplanetare Scheibe und die Entstehung von Planetesimalen haben muss: die Kelvin-Helmholtz-Instabilität (kurz KH-Instabilität). Sie entsteht in einer Scheibe aus Staub und Gas auf folgende Weise: Zunächst sedimentiert der Staub zur Mittelebene der Scheibe, was die MRI-Turbulenz ansonsten verhindert hätte. In einer protoplanetaren Scheibe sinken Temperatur und Dichte mit wachsendem Abstand vom Zentralstern. Aus



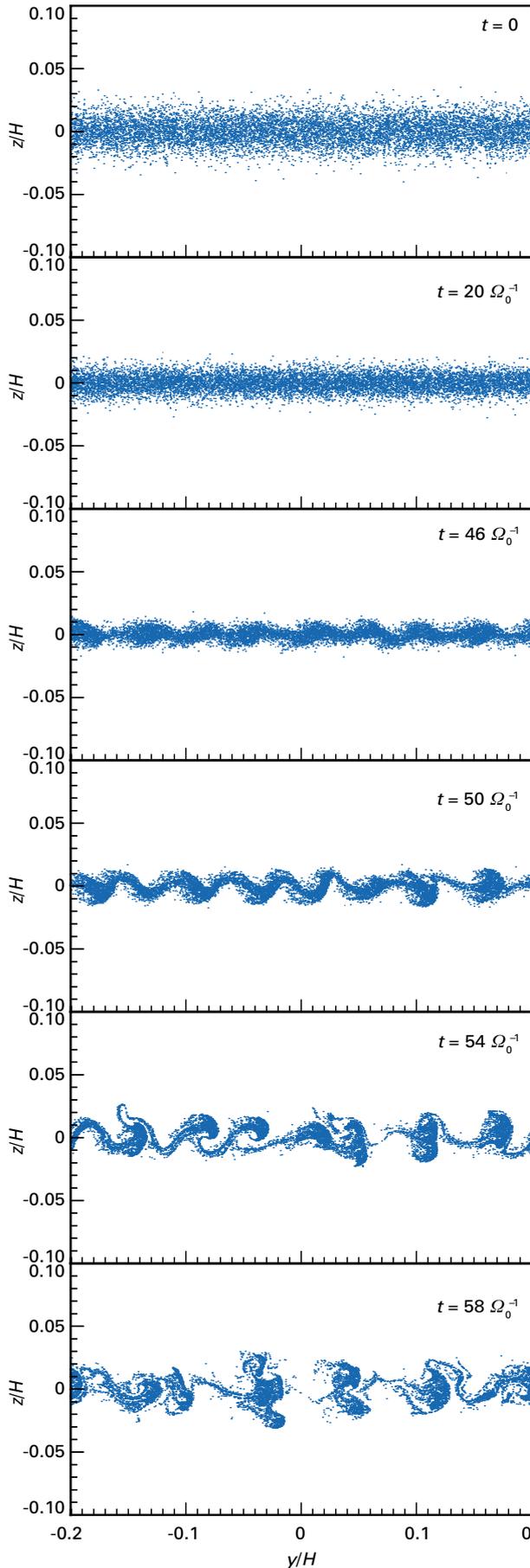


Abb. II.4.4: Zentimetergroße Körner haben sich um die Mittelebene der Scheibe angesammelt und fallen auf sie zu. Ist dort eine ausreichende Dichte erreicht, so entwickeln sich Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten.

diesem Grunde herrscht ein radialer Druckgradient, der dazu führt, dass das Gas langsamer rotiert, als es dies auf einer reinen Keplerbahn tun würde. Der Staub hingegen reagiert nicht auf den Druckgradienten, sondern spürt nur die Schwerkraft. Er rotiert deshalb auf Keplerbahnen. Ist in der Mittelebene der Scheibe das Staub/Gas-Verhältnis hoch genug, so reißt der Staub die Gasteilchen mit und zwingt sie ebenfalls auf die Geschwindigkeit einer Keplerbahn. Folglich bewegt sich das Gas in der Mittelebene schneller als darüber und darunter. Es tritt also eine vertikale Geschwindigkeitsscherung auf. Dies führt zur Entstehung von KH-Instabilitäten.

Die dabei einsetzende turbulente Gasbewegung kann dazu führen, dass der Staub aus der Mittelebene herausgewirbelt, und so eine gravitative Verklumpung des Staubes zu Planetesimalen verhindert wird. Dieser Vorgang wurde schon vor mehr als 20 Jahren als Hindernis für das Anwachsen der Staubeilchen zu Planetesimalen angesehen. Dementsprechend vielfältig waren die Vorschläge, um dieses Problem zu lösen. Eine numerische Behandlung erfordert es, Staub und Gas als zwei eigenständige Systeme zu behandeln, die sich wechselseitig beeinflussen und gegeneinander bewegen können – ein anspruchsvolles nichtlineares Problem.

Es wurden erneut Computerläufe mit Teilchen von dreierlei Größe gerechnet: ein Zentimeter, zehn Zentimeter und ein Meter. Abb. II.4.4. zeigt ein Ergebnis für zentimetergroße Körner. In einer anfänglich gaußförmigen Dichteverteilung in z -Richtung (*oben*) bilden sich mit zunehmender Staubbichte in der Mittelebene Wirbel aus, welche die ursprüngliche Staubscheibe sogar an vielen Stellen aufbrechen können (*unten*). Je größer die Teilchen, desto rascher setzt der Vorgang ein, weil die großen Teilchen schneller zur Mittelebene fallen als die kleinen. Außerdem sind die großen Brocken stärker zur Ebene hin konzentriert als die kleinen: Zentimetergroße Teilchen haben eine rund fünfmal so große Skalenhöhe als metergroße.

Die Körper sind aber nicht gleichmäßig um die Mittelebene herum verteilt, sondern bilden – wie es Abb. II.4.4. zeigt – dynamische Wirbel. Eine Zeitsequenz der Simulationen verdeutlicht, dass diese Klumpen um die Mittelebene herum oszillieren (Abb. II.4.5).

Ähnlich wie bei der MRI-Turbulenz können sich auch in diesen Wirbeln makroskopische Körper ansammeln. Außerdem bewegen sich staubreiche Turbulenzzellen schneller als staubarme. Als Folge davon stoßen solche Zellen häufig zusammen und gehen ineinander auf: Die Teilchenzellen wachsen also. Die KH-Instabilität wird somit zum Auslöser für eine Verklumpungsinstabilität. Es erscheint plausibel, dass solche Klumpen, in denen

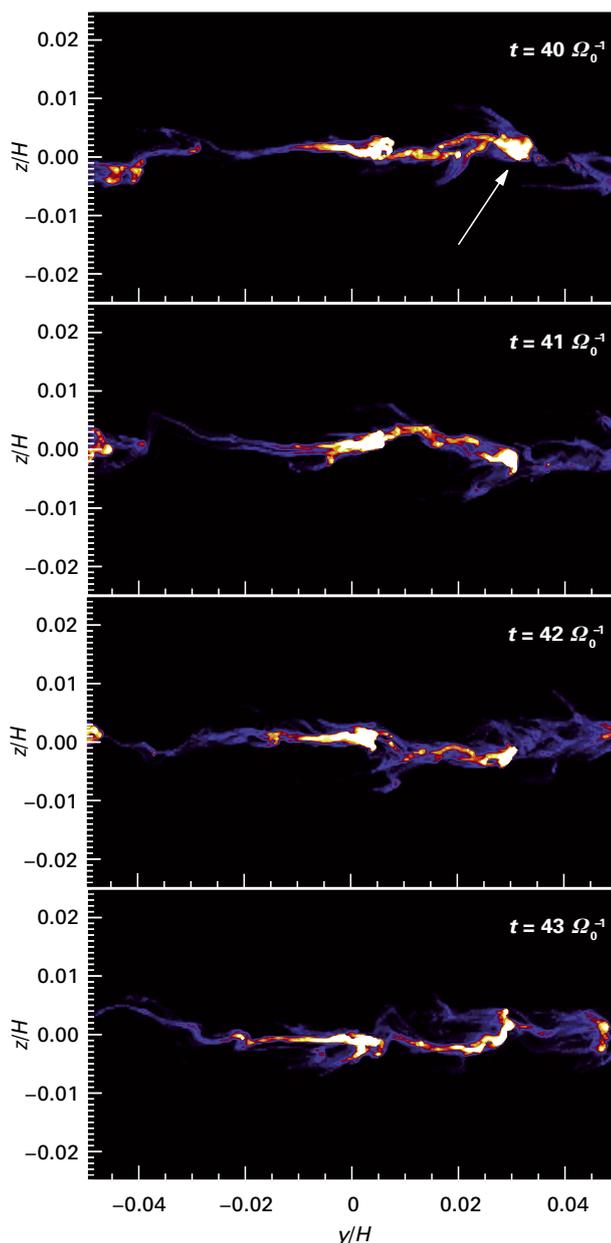


Abb. II.4.5: Zeitliche Entwicklung der Teilchendichte in y - und z -Richtung der Scheibe für metergroße Brocken. Aufgrund der KH-Turbulenz oszillieren manche Wirbel um die Mittelebene herum (*Pfeil*).

die Dichte um einige Größenordnungen höher sein kann als in der umgebenden Scheibe, ebenfalls irgendwann fragmentieren und Planetesimale bilden können. Hier liegt also ein ganz ähnlicher Fall vor wie bei der MRI-Turbulenz.

Es ist die Aufgabe zukünftiger Simulationen herauszufinden, wie diese Einzelprozesse ineinander greifen und welche Auswirkungen sie auf die Entstehung von Planetesimalen haben. Hier sind vor allem 3D-Simulationen gefordert. Erste Ergebnisse deuten an, dass die Scherung in der Scheibe die Ausbildung der KH-Instabilität in Richtung der Gasströmung verlangsamt. Dafür kommt es allerdings trotzdem noch zu einer Verklumpungsinstabilität, diesmal jedoch in radialer Richtung auf den Stern zu. Ebenfalls wurde mit ersten Simulationen begonnen, welche die gravitative Anziehung zwischen den Felsbrocken behandeln. Hier ist die Frage, wie lange es dauert, bis sich die Staubklumpen zu Planetesimalen zusammengezogen haben.

All diese Computersimulationen sind am MPA nur Dank des neuen Großrechners PIA möglich (siehe Kapitel IV.12). Mit seiner Hilfe erwarten die Theoretiker in den kommenden Jahren weitere spannende Ergebnisse zur Entstehung von Planetesimalen. So bereiten sie gerade die ultimative Simulation vor, in der sie alle Effekte gleichzeitig mit einbeziehen werden: MRI- und Kelvin-Helmholtz Instabilität, sowie die gravitative Wechselwirkung der Felsbrocken miteinander.

Filme der Computersimulationen finden sich unter: www.mpia.de/~johansen/research_en.php

(Anders Johansen, Hubert Klahr,
Thomas Henning)

II.5 Staub-Tori in aktiven galaktischen Kernen

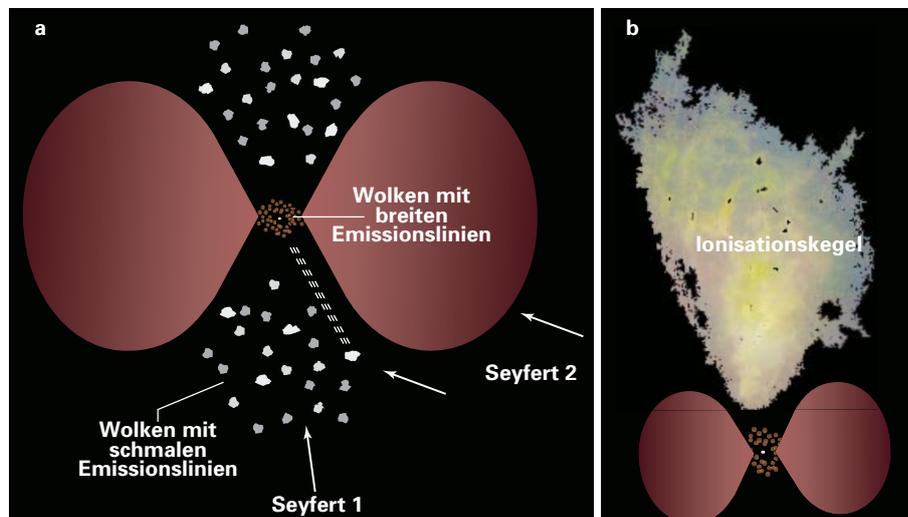
Fast alle Galaxien scheinen in ihrem Zentrum ein sehr massereiches Schwarzes Loch zu besitzen. In vielen Fällen – zum Beispiel in unserem Milchstraßensystem – ist es kaum auffällig, in einigen Prozent der Galaxien verrät es sich jedoch durch intensive Strahlung von Materie in seiner Umgebung. Wir sprechen in diesem Fall von einem aktiven galaktischen Kern. Seit Jahren existieren indirekte Hinweise, dass sich Gas und Staub in der äußeren Einflussosphäre des Schwarzen Loches aufstauen und eine dicke, reifenförmige Struktur bilden. Aber selbst in den nächsten Galaxien sind diese »Staub-Tori« zu klein, um mit konventionellen Einzelteleskopen auflösbar zu sein. Mit Hilfe des MID-Infrared interferometric Instruments (MIDI) am VLT in Chile ist es Astronomen des MPIA erstmals gelungen, einige Staub-Tori direkt sichtbar zu machen. Der Vergleich mit neu entwickelten Modellen ermöglicht es, den Einfall der Materie auf die aktiven galaktischen Kerne nachzuvollziehen und im Detail zu untersuchen. MIDI ist der Erfolg einer deutsch-holländisch-französischen Zusammenarbeit unter der Führung des MPIA (siehe Jahresbericht 2003, S. 31).

Seit vielen Jahren vermuten Astronomen, dass viele aktive galaktische Kerne (engl. active galactic nuclei, AGN) in einem dicken Ring aus Gas und Staub eingebettet sind. Bis 2003 war es jedoch nicht möglich, diese Hypothese durch direkte Beobachtungen zu überprüfen. Dazu sind die erwarteten Strukturen zu klein: Eine einfache Abschätzung ergibt, dass in einem typischen AGN nur innerhalb eines Radius von 1 bis 10 Lichtjahren (Lj) um das Schwarze Loch herum der Staub auf einige hundert Kelvin (300 Kelvin entsprechen 27°C) aufgeheizt werden kann. Damit ist er warm genug,

um Wärmestrahlung im mittleren Infrarot auszusenden. Diese ist am besten bei Wellenlängen zwischen 5 und 20 μm nachweisbar. Selbst in den nächstgelegenen AGN typischer Leuchtkraft entsprechen 10 Lj einer scheinbaren Größe von nur 40 Millibogensekunden (mas). Das entspricht dem Durchmesser einer Ein-Euro-Münze in 113 km Entfernung. Selbst am kurzwelligen Ende des mittleren Infrarot von 5 μm erreicht ein 8-m-Teleskop bestenfalls eine Auflösung von 100 Millibogensekunden, so dass jeder Staub-Torus als unaufgelöster Punkt erscheinen muss.

Alle bisherigen Hinweise auf die Existenz dieser Staub-Tori waren daher indirekter Natur. Ein spezieller Typ von AGN im nahen Universum, so genannte Seyfert-Galaxien, spielen hierbei eine besondere Rolle. Man unterscheidet zwei Typen, die sich in ihren optischen Eigenschaften wesentlich unterscheiden, während ihre Staubstrahlung im mittleren und fernen Infrarot sehr ähnlich scheint. Dies lässt sich leicht erklären, wenn man annimmt, dass in allen Seyfert-Galaxien ein Staub-Torus existiert, der uns je nach Blickrichtung unterschiedlich erscheint (Abb. II.5.1): Bei Seyfert-1-Galaxien blicken wir etwa entlang der Achse direkt in das Herz des AGN hinein. Wir empfangen dann die Strahlung der heißen

Abb. II.5.1: a) Dem vereinheitlichten Modell zufolge ist der Kern jeder Seyfert-Galaxie von einem Staubtorus umgeben. Je nachdem, ob man in das heiße Zentralgebiet oder nur auf den Torus blickt (Pfeile), unterscheidet man Seyfert-Galaxien des Typs 1 und 2. b) In der Seyfert-2-Galaxie NGC 1068 strömt vom Zentrum des Staubtorus ein Kegel ionisierten Gases weg; der Torus ist hier relativ zum Ionisationskegel etwa hundertfach vergrößert dargestellt.



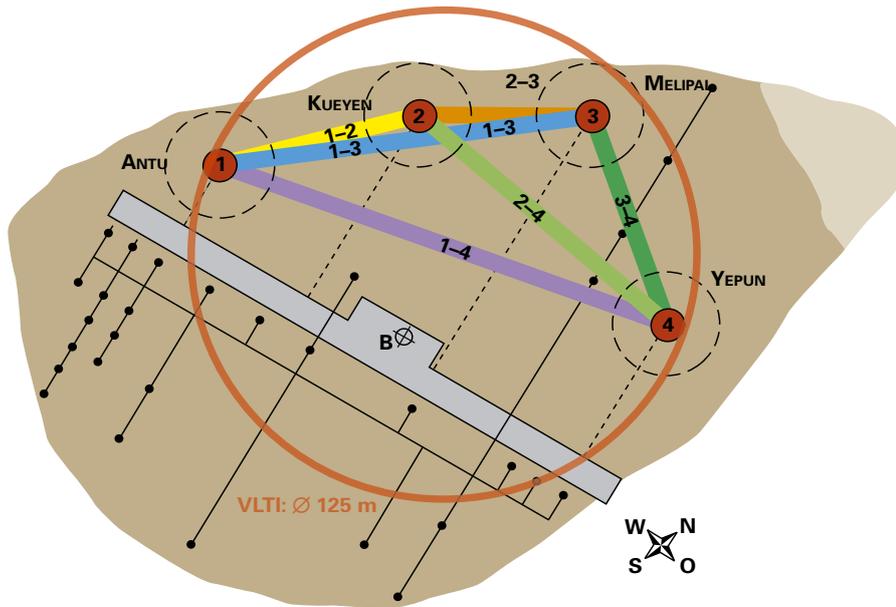


Abb. II.5.2: Die Lichtwege der vier 8,2-m-Teleskope des VLT und von drei Hilfsteleskopen lassen sich im Interferometerlabor zusammenführen (*oben*). Mit MIDI können jeweils zwei der großen Einzelteleskope zusammengeschaltet werden, wodurch sich sechs mögliche Teleskopkombinationen ergeben (*unten*). Damit wird das Auflösungsvermögen eines 125-m-Teleskops erreicht (*roter Kreis*).

Akkretionsscheibe und der schnell umlaufenden Wolken heißen Gases. Erstere emittiert ein blaues Kontinuum und letztere die breiten Emissionslinien, die für den Typ 1 charakteristisch sind. In Seyfert-2-Galaxien schauen wir von der Seite auf den Staub-Torus, so dass der direkte Blick auf Akkretionsscheibe und schnelle Gaswolken wegen der Staubabsorption im Torus blockiert ist. Nur die langsameren Gaswolken, die sich weiter entfernt vom Schwarzen Loch und damit auch unter- und oberhalb des Staubtorus aufhalten, bleiben sichtbar und emittieren die für Seyfert-2-Galaxien typischen, schmalen Emissionslinien. Die Strahlung des warmen Staubes im Innenbereich des Torus schwächt weiter außen liegender Staub kaum ab. Folglich erscheinen beide Typen im mittleren und fernen Infrarot kaum verschieden.

Astronomen sprechen bei diesem Modell der AGN von dem vereinheitlichten Schema. Zusätzliche Unterstützung erhielt es durch zwei Beobachtungsbefunde: Zum einen konnte man in vielen Seyfert-2-Galaxien durch Beobachtungen im polarisierten Licht ebenfalls breite Emissionslinien nachweisen. Dieses Licht erreicht uns durch Streuung an Teilchen, die sich ober- und unterhalb des Torus befinden. Zum anderen zeigen einige Seyfert-2-Galaxien einen Kegel ionisierten Gases (Abb. II.5.1b). Er wird darauf zurückgeführt, dass der Staub-Torus nur einen mehr oder weniger schmalen Kanal freilässt, durch den die ionisierende Strahlung der Akkretionsscheibe entfernte Gaswolken in der Galaxie zum Leuchten anregen kann. Eine wichtige Vorhersage dieses Modells

ist es, dass die Geometrie des Staub-Torus (also die Öffnung des Kanals) in direktem Zusammenhang mit dem Öffnungswinkel des Ionisationskegels stehen sollte.

Die Beobachtungsmöglichkeiten an AGN und anderen Objekten machten im Jahr 2003 einen revolutionären Sprung nach vorne: Mit der Inbetriebnahme des MIDI-infrared interferometric Instruments (MIDI) am Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte, Eso, wurde es erstmals möglich, die vier 8-m-Teleskope für Beobachtungen im mittleren Infrarot (Wellenlängenbereich 8-13 μm) zusammenzuschalten. Auf diese Weise erhält dieses VLT-Interferometer (VLTI) die räumliche Auflösung eines 125-m-Teleskops. Die Lichtsammelfläche entspricht freilich nur der Summe der Einzelteleskope (Abb. II.5.2).

Um eine möglichst vollständige Überdeckung der Gesamtfläche mit den Einzelspiegeln zu erzeugen, macht man sich die Erdrotation zunutze. Sie führt dazu, dass im Laufe der Nacht die Positionen der Einzelteleskope innerhalb des Umfangs von 125 m rotieren und so nach und nach verschiedene Bereiche des »Gesamteleskops« mit Spiegelfläche gefüllt werden. Leider ist die Sache in der Praxis etwas komplizierter: Da MIDI es nur erlaubt, jeweils zwei Einzelteleskope zusammenzuschalten, müssen die sechs möglichen Teleskopkombinationen nach und nach über mehrere Nächte hinweg realisiert werden.

Wie wir im Folgenden sehen werden, reicht es de facto oft aus, nur einige Teleskopkombinationen bei wenigen Erdrotationswinkeln zu verwenden, um einen ersten Eindruck von Größe und Gestalt eines astronomischen Objektes zu erhalten. Allerdings setzt die Interpretation solcher unvollständiger Beobachtungen voraus, dass man ein gutes Modell des beobachteten Objektes besitzt. Dessen wesentliche Parameter, wie Größe, Elongation, Orientierung und Farbverteilung, muss man dann durch Anpassung an die Beobachtungen ableiten.

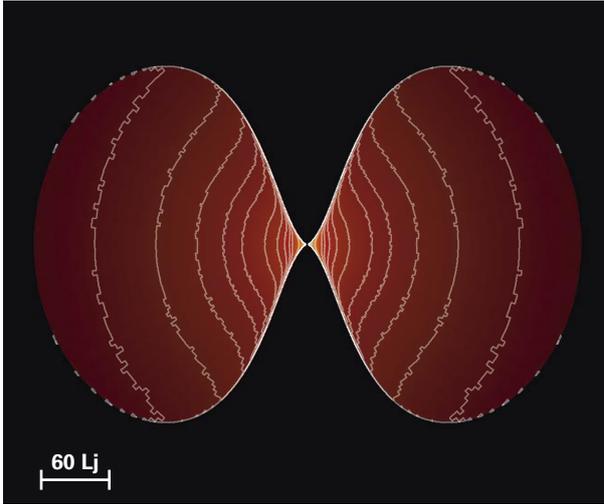


Abb. II.5.3: Temperaturverteilung in dem Modell eines homogenen Torus einer typischen Seyfert-Galaxie. Im Zentrum werden mehr als 1000 Kelvin erreicht (*orange*). Nach Außen nimmt die Temperatur kontinuierlich bis auf etwa 100 Kelvin ab (*dunkelrot*).

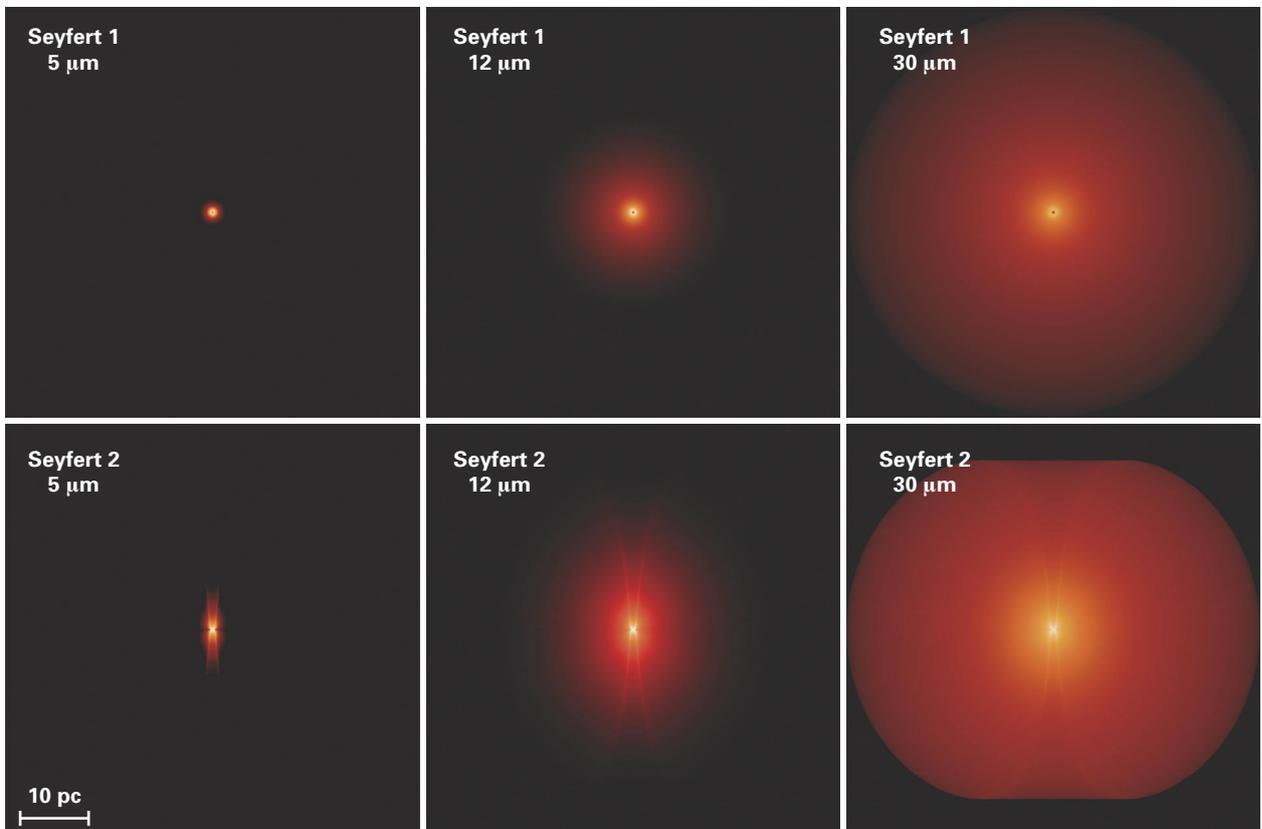
Abb. II.5.4: Diese Bilder von Staub-Tori im mittleren Infrarot ergeben sich aus kontinuierlichen Modellen. *Die obere Reihe* zeigt den Torus einer Seyfert-1-Galaxie bei Wellenlängen von 5, 12 und 30 μm . *Die untere Reihe* zeigt die entsprechende Ansicht einer Seyfert-2-Galaxie bei denselben Wellenlängen. Bei kurzen Wellenlängen leuchtet nur der innere, heiße Kanal des Torus.

Theoretische Modelle für Staub-Tori

Zu diesem Zweck haben wir parallel zu den MIDI-Beobachtungen ein Theorieprojekt gestartet, innerhalb dessen wir versuchen, die mögliche Struktur und die beobachtbaren Eigenschaften der Staub-Tori in AGN zu modellieren.

Ein realistisches Modell der Staub-Tori müsste viele physikalische Aspekte berücksichtigen. Dazu gehören eine statische Balance zwischen Anziehungskräften des Schwarzen Loches und des zentralen Sternhaufens einerseits und zentrifugalen Kräften wie Rotation und zufällige Gasbewegung andererseits. Es müsste zudem zeitabhängige Effekte berücksichtigen, wie Gaszufluss von außen, lokale Quellen von Staub und das Aufwirbeln des Gases durch Supernovae. Darüber hinaus müsste jeweils berechnet werden, wie die so entstehende, komplexe Gas- und Staubverteilung von der Akkretionsscheibe geheizt wird und auf welchem Wege die entstehende Infrarot-Strahlung den Staub-Torus verlassen kann. Ein solches Modell würde im Rechner Millionen räumlicher Zellen und Tausende von Zeitschritten erfordern – weit mehr als heutige Computer leisten können. Wir gehen die Modellbildung daher in drei Schritten zunehmender Komplexität an.

Im *ersten Schritt* verteilen wir Gas und Staub in einem effektiven Potential, das durch die Masse des Schwarzen Lochs und den zentralen Sternhaufen (Masse,



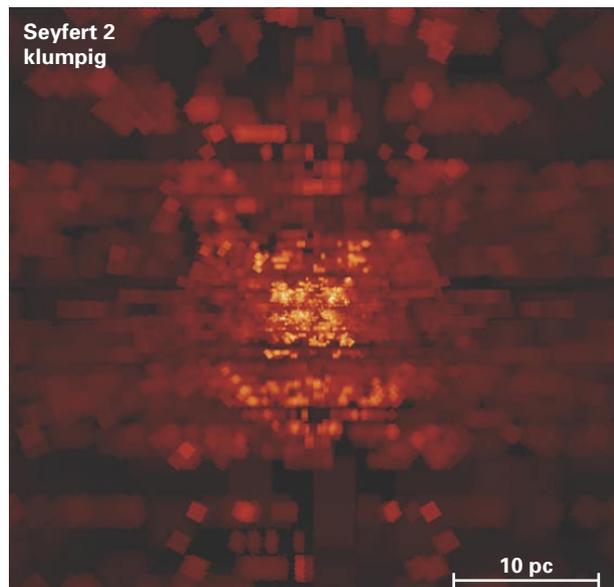
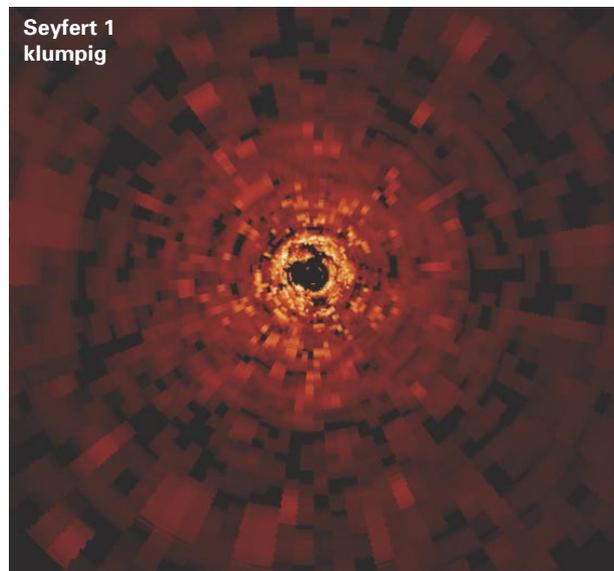
Geschwindigkeitsverteilung, Rotation) bestimmt ist. Dabei versuchen wir die Eigenschaften einer typischen Seyfert-Galaxie nachzubilden. Beleuchtet man diese stationäre und kontinuierliche Staubverteilung mit der Strahlung einer heißen Akkretionsscheibe, so erhält man nicht nur die Temperaturverteilung des Staub-Torus (Abb. II.5.3), sondern kann auch Bilder der bei verschiedenen Wellenlängen entweichenden Strahlung ableiten. Abbildung II.5.4 zeigt die erwarteten Bilder des Torus für Seyfert-1- (obere Reihe) und Seyfert-2-Galaxien. Man erkennt, dass bei kürzeren Wellenlängen ($\lambda = 5 \mu\text{m}$) nur der heiße Innenrand des Torus wahrnehmbar ist, während bei längeren Wellenlängen immer größere Bereiche des Torus strahlen. Ursache hierfür ist die sinkende Temperatur mit wachsendem Abstand vom Schwarzen Loch.

Der *zweite Schritt* berücksichtigt, dass realistische Staub-Tori nicht kontinuierlich mit Gas und Staub gefüllt sind. Wie in den Molekülwolken unserer Milchstraße

wird sich der Staub eher in Wolken oder filamentartigen Strukturen anordnen. Wir haben deshalb berechnet, wie sich Gesamtspektrum und Ansichten des Torus ändern, wenn man eine klumpige Staubverteilung annimmt (Abb. II.5.5). Wir finden, dass klumpige Tori das in Seyfert-1-Galaxien beobachtete Spektrum besser wiedergeben als kontinuierlich gefüllte. Ob die Auflösung des VLTI ausreicht, direkte Hinweise auf die Klumpigkeit zu beobachten, hängt entscheidend davon ab, aus wie vielen Klumpen die Tori in nahen AGN bestehen.

Im *dritten Schritt* versuchen wir, die dynamischen Prozesse nachzuvollziehen, die Aufbau und zeitliche Entwicklung eines Torus im Zentralbereich einer Galaxie be-

Abb. II.5.5: Die Staub-Tori von Seyfertgalaxien sind vermutlich nicht kontinuierlich mit Gas und Staub gefüllt, sondern haben eher klumpige Struktur. Modellrechnungen für die Typen 1 und 2 ergeben bei $12 \mu\text{m}$ Wellenlänge die hier gezeigten Ansichten.



stimmen. Sternwinde und Planetarische Nebel erzeugen den Staub. Supernovae liefern die kinetische Energie, die notwendig ist, den geometrisch dicken Torus aufrecht zu erhalten, da Anziehung und Zentrifugalkraft allein zu einer dünnen Scheibe führen würden, von deren Innenrand Material in Richtung Schwarzes Loch abgesaugt wird. Obwohl unsere Simulationen sicher nicht die räumliche Auflösung erreichen werden, um realistische Bilder abzuleiten, sind wir zuversichtlich, auf diese Weise Einblick in wesentliche Eigenschaften und zeitliche Variabilität der Tori zu erhalten.

Direkter Nachweis der Staub-Tori in Seyfert-2-Galaxien

Es gibt zwei gute Gründe, den direkten Nachweis der Existenz von Staub-Tori zunächst an Seyfert-2-Galaxien zu versuchen. Erstens steht und fällt das vereinheitlichte Schema der Seyfert-Galaxien mit der Hypothese, dass der Staub in Seyfert-2-Galaxien eine ringartige Verteilung hat. Zweitens erwarten wir, dass hier der Torus die Strahlung im mittleren Infrarot klar dominiert, während in Seyfert-1-Galaxien eine Überstrahlung durch das langwellige Ende des thermischen Spektrums der heißen Akkretionsscheibe zu vermuten ist.

Die ersten erfolgreichen Beobachtungen mit MIDI gelangen uns schon im Jahr 2003. Auf der Grundlage von Beobachtungen mit nur zwei Teleskopkombinationen an der prototypischen und hellsten Seyfert-2-Galaxie,

Abb. II.5.6: Teleskopüberdeckung bei der Beobachtung der Circinus-Galaxie mit MIDI. Da jede Teleskopkombination symmetrisch zum Ursprung dargestellt wird, überdecken die Punkte den doppelten Durchmesser des Gesamtteleskops (vgl. Abb. II.5.2).

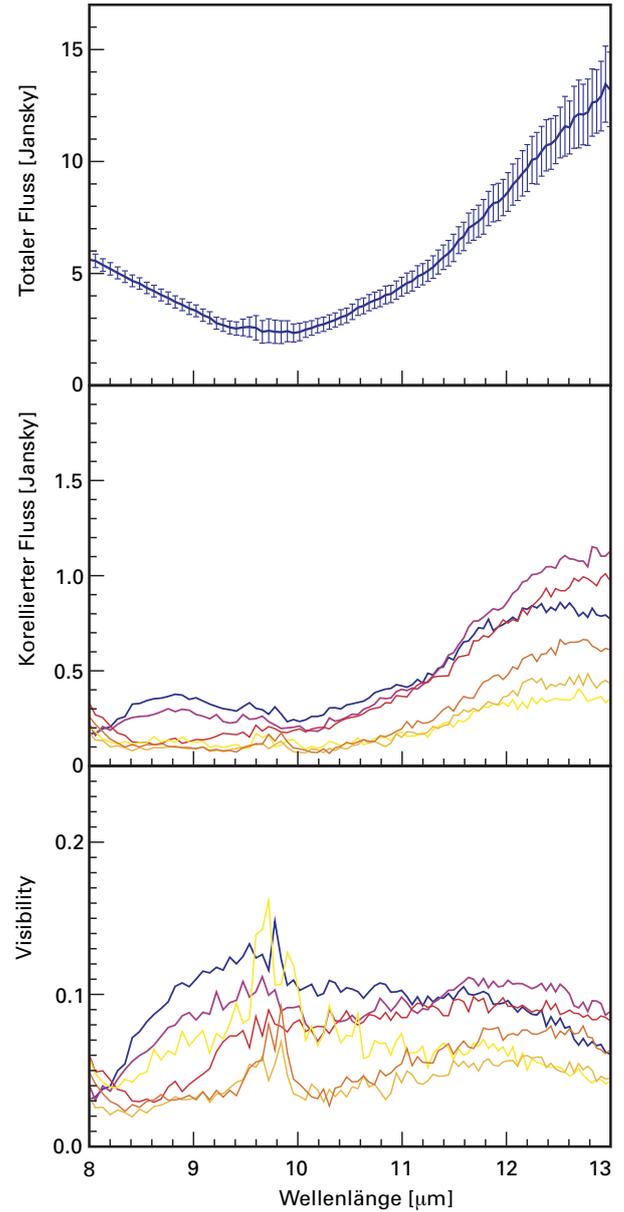
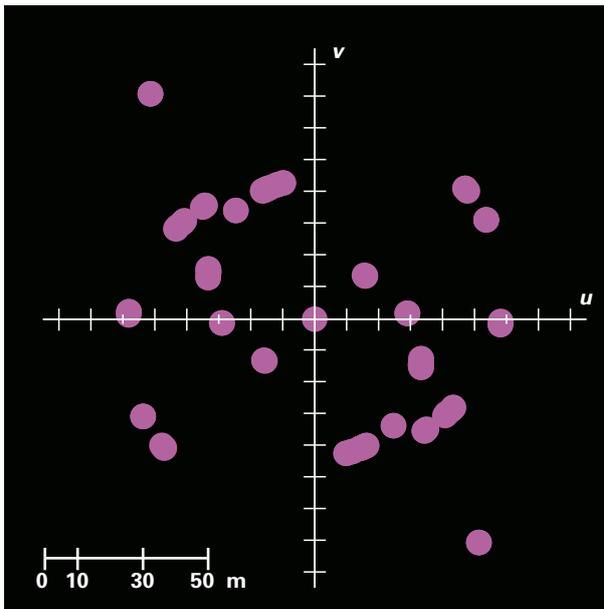


Abb. II.5.7: MIDI-Messungen der Circinus-Galaxie. *Oben:* Totaler Fluss, gemessen mit einem Einzelteleskop. *Mitte:* korrelierter Fluss zweier Teleskope während einer Nacht, in der die Projektion der Teleskopverbindungsline an den Himmel von Nordost-Südwest (*gelb*) auf Südost-Nordwest (*pink*) drehte. *Unten:* die Visibility – der Quotient aus korreliertem und totalem Fluss – ist ein grobes Maß für die Größe des Torus.

NGC 1068, konnten wir zeigen, dass in ihrem Kern tatsächlich eine Staubstruktur existiert, deren warme Komponente der AGN heizt. Bei einer Temperatur von etwa 300 Kelvin besitzt sie einen Durchmesser von 11 Lj und eine Gesamthöhe von 6.7 Lj. Zusätzlich konnten wir eine heiße Staubkomponente von höchstens 3 Lj Größe nachweisen, die tief in den warmen Staub eingebettet ist. Wir interpretieren diese Komponente als Signatur des

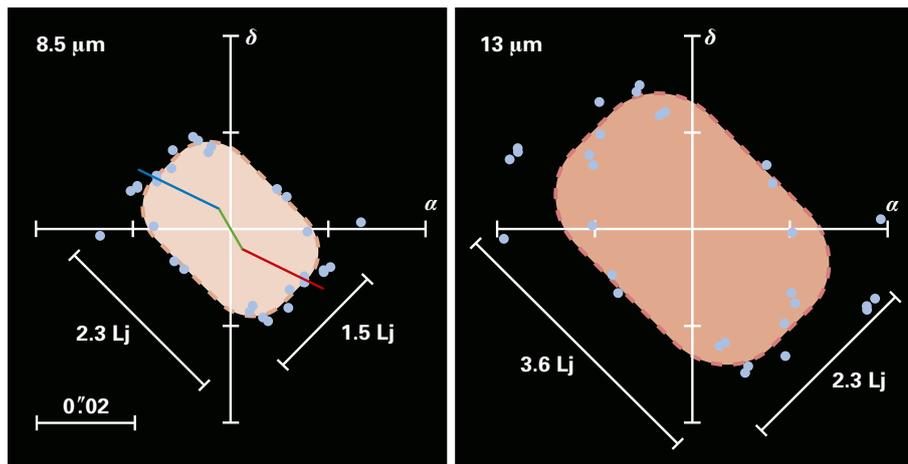


Abb. II.5.8: Aus der gemessenen Visibility (Abb. II.5.7 unten) lässt sich die effektive Größe des Staubtorus in der Circinus-Galaxie rekonstruieren – hier für zwei Wellenlängen dargestellt. Bei größerer Wellenlänge erscheint der Torus erwartungsgemäß größer.

Staubes, der sich an der inneren Grenzfläche des Torus – dem axialen Kanal – befindet und so auf Temperaturen nahe der Verdampfungstemperatur der Staubteilchen von 1500 K aufgeheizt wird.

Diese Befunde stimmen überraschend gut mit der Vorhersage unseres einfachen Modells überein (Abb. II.5.4). Einschränkend muss allerdings betont werden, dass wir mit nur zwei Teleskopkombinationen die Orientierung der Staubstruktur nicht unabhängig bestimmen können. Sie musste auf Grund der Orientierung der anderweitig bekannten Ausflussphänomene in NGC 1068 festgelegt werden.

Inzwischen ist es uns während vier Beobachtungskampagnen gelungen, die allernächste Seyfert-2-Galaxie – die knapp 13 Millionen Lj entfernte Circinus-Galaxie – so oft zu beobachten, dass wir dem Idealfall einer gut gefüllten Spiegelüberdeckung recht nahe sind (Abb. II.5.6). Damit sind wir erstmals in der Lage, ein Bild der Staubverteilung zu rekonstruieren ohne auf Vorannahmen zurückgreifen zu müssen.

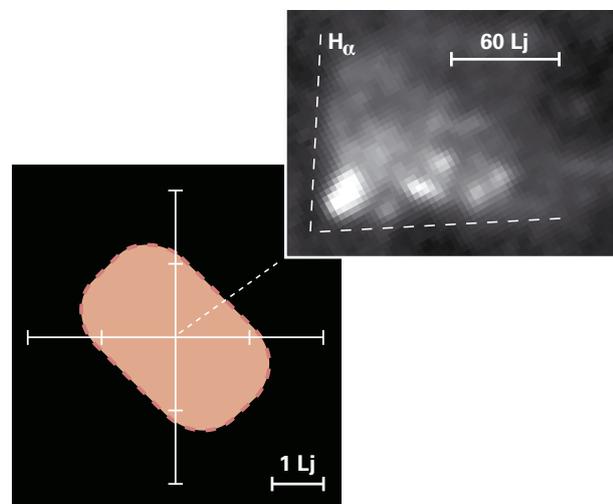
Die beobachtete Reihe von zwei Teleskopkombinationen in insgesamt 15 verschiedenen Orientierungen, die jeweils etwa 20 spektral aufgelöste, unabhängige Messpunkte enthalten (Abb. II.5.7), ermöglicht es im Prinzip, ein sehr detailliertes Modell der zweidimensionalen (auf die Himmelsebene projizierte) Staubverteilung (einschließlich der Temperatur) zu rekonstruieren.

Wir haben uns aber entschlossen, zunächst eine primitive Bildrekonstruktion zu verwenden, die soweit wie möglich von spezifischen Modellannahmen unabhängig ist: Wir nehmen an, dass die Helligkeitsverteilung der Staubemission in allen Projektionen und in allen Wellenlängen durch eine Gaußfunktion angenähert werden kann. Unter dieser Annahme lässt sich die beobach-

tete »Visibility« (Abb. II.5.7) direkt in eine Messung der effektiven Breite übersetzen. Die Punkte in Abb. II.5.8 geben diese Rekonstruktion der effektiven Größe der Staubverteilung in der Circinus-Galaxie für zwei Wellenlängenbereiche ($\lambda = 8.5$ und $13 \mu\text{m}$, vgl. Abb. II.5.7) wieder. Diese Wellenlängen werden kaum von der Absorption durch Silikat-Staubkörner beeinträchtigt.

Mit Hilfe dieser einfachen Bildrekonstruktion finden wir, dass sowohl bei einer Wellenlänge von $12.5 \mu\text{m}$ (dominiert von Staub bei etwa 300 K) als auch bei $8.5 \mu\text{m}$ (heißerer Staub) die Staubverteilung kastenförmig erscheint. Bei $12.5 \mu\text{m}$ ist die beobachtete Ausdehnung des Kastens $50 \text{ mas} \times 30 \text{ mas}$, was einem Durchmesser von 3.2 Lj und einer Höhe von 1.9 Lj entspricht. Größe und Orientierung dieser Staubverteilung passen ausgezeichnet zu anderen Beobachtungen des Kerns der Circinus-Galaxie (Abb. II.5.9): Zum einen steht die

Abb. II.5.9: Die Symmetrieachse des vom HST fotografierten Ionisationskegels der Circinus-Galaxie steht genau senkrecht auf dem rekonstruierten Staubtorus. Zu beachten sind die unterschiedlichen Maßstäbe.



Symmetrieachse des Ionisationskegels, der mit dem HST beobachtet wurde, genau senkrecht auf der von uns gefundenen maximalen Ausdehnung (der Torus-Ebene). Zum anderen stimmt der Bereich, in dem Maser-Emission von molekularem H_2O -Gas in wohlgeordneter Rotation gefunden wurde, exakt mit unserer Staubverteilung überein. Damit ist bewiesen, dass sich der Wasserdampf und Staub in denselben Bereichen konzentrieren.

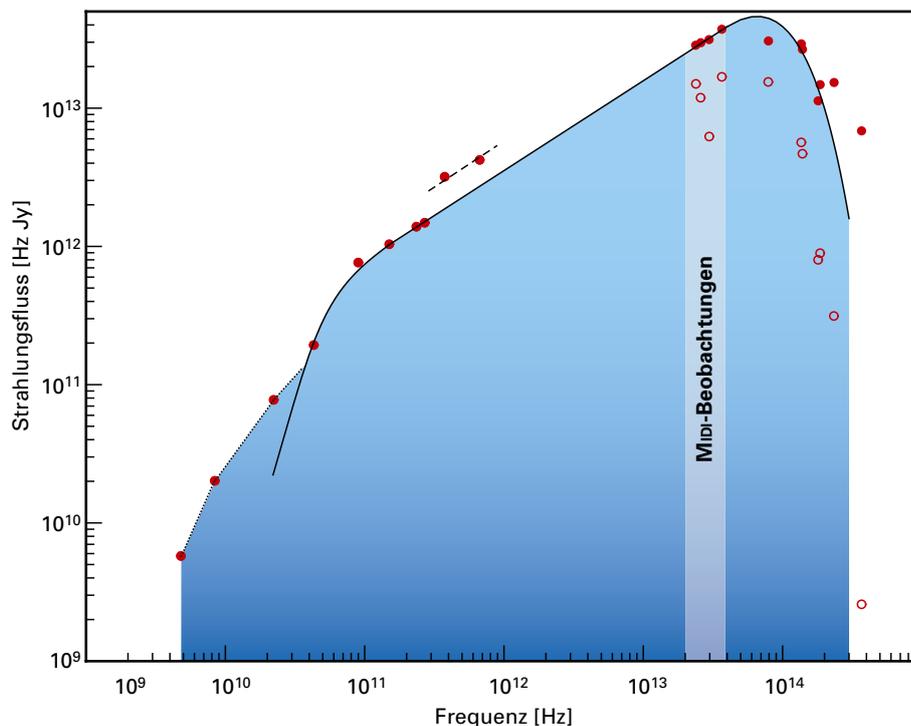
Bleibt noch zu untersuchen, wie hoch die Staubverteilung wirklich ist, da eine scheinbare Höhe auch durch eine geneigte Scheibe vorgetäuscht werden könnte. Legt man den wahrscheinlichsten Wert für die Orientierung der Symmetrieachse bezogen auf unsere Sichtlinie (70°) zugrunde, so findet man, dass die wahre Höhe des Staub-Torus knapp 1 Lj beträgt. Daraus schließen wir, dass der Torus in der Circinus-Galaxie relativ dünn ist: Das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser beträgt hier etwa $h/d=0.25$. Im Vergleich dazu beträgt in NGC 1068 die relative Dicke $h/d=0.6$. Dieser Befund ist in hervorragender Übereinstimmung mit der Beobachtung, dass der Ionisationskegel der Circinus-Galaxie viel weiter geöffnet ist als der von NGC 1068 (vgl. Abb. II.5.9 mit Abb. II.5.1b).

Die bisherigen Beobachtungen mit MIDI an den zwei uns nächstgelegenen Seyfert-2-Galaxien bestätigen somit das Konzept eines zentralen Staub-Torus, der uns an einer direkten Sicht auf die Akkretionsscheibe hindert, sehr genau. Der Vergleich mit hochauflösenden Radiokarten und Millimeterbeobachtungen mit ALMA werden es zukünftig erlauben, genauer zu studieren, wie das Gasreservoir im Torus nach innen abfließt und so die Akkretionsscheibe »füttert«.

Interferometrische Beobachtungen des Kerns der Radiogalaxie Centaurus A

Mit einer Entfernung von nur 12 Millionen Lj ist Centaurus A die uns nächstgelegene Radiogalaxie. Auch sie haben wir mit MIDI beobachtet. Diese Daten zeigen, dass die Strahlung im mittleren Infrarot von einer unaufgelösten Punktquelle dominiert wird. Ihr Durchmesser muss kleiner als 0.6 Lj sein. Aus dem Vergleich mit Beobachtungen bei Radio- und Millimeterwellenlängen schließen wir, dass diese Strahlung nicht von warmem Staub stammt, sondern von der Synchrotronstrahlung hochenergetischer Elektronen, die sich auf Spiralbahnen in einem Magnetfeld von 0.3 Gauß bewegen (Abb. II.5.10). Wir wollen hier nicht auf die Details dieser Quelle eingehen, sondern nur festhalten, dass wir in Centaurus A keinen Hinweis auf die Existenz einer zentralen, AGN-geheizten Staubverteilung finden. Offensichtlich gibt es eine Klasse von AGN, die keinen Staub-Torus besitzt.

Abb. II.5.10: MIDI-Messungen am Kern von Centaurus A passen gut in das bisher beobachtete Spektrum der nicht-thermischen Synchrotronstrahlung dieser Radiogalaxie. *Offene Kreise:* beobachteter Fluss, *volle Kreise:* korrigiert auf Vordergrundabsorption.



MIDI Beobachtungen an ferneren und schwächeren aktiven Kernen

Im Jahr 2005 gelang es uns auch, mit MIDI die Seyfert-1-Galaxien NGC 3783 und Markarian 1239 sowie die Seyfert-2-Galaxie MCG-5-23-16 zu beobachten. Das ist deshalb bemerkenswert, weil diese Quellen unter der bis dahin angenommenen Grenzhelligkeit des Instruments ($10 \mu\text{m}$ Fluss aus dem Kern $> 1 \text{ Jy}$) liegen. Offenbar ist MIDI in der Lage, auch Quellen im Bereich von 0.5 Jy ohne Hilfe einer Stabilisierung des Interferenzmusters durch den vorgesehenen »fringe tracker« FINITO zu beobachten. Der soll bei etwa $2 \mu\text{m}$ arbeiten, ist aber bisher nicht einsatzfähig. Diese erfreuliche Überraschung erweitert unsere Liste der möglichen extragalaktischen Ziele für MIDI von drei Quellen (NGC 1068, Circinus, Centaurus A) auf mindestens ein Dutzend.

Wie auf Grund der größeren Entfernung erwartet, deuten unsere bisherigen Ergebnisse an den drei genannten Quellen darauf hin, dass mit nahe benachbarten Teleskopkombinationen des VLTI (Abb. II.5.2) diese nicht aufzulösen sind. Der Durchmesser des vermuteten Staubrings ist kleiner als 10 mas . Im nächsten Schritt werden wir Teleskopkombinationen mit größerem Abstand wählen. Entscheidend für die vollständige Bestätigung des vereinheitlichten Schemas ist es nämlich, nicht nur zu zeigen, dass Staub-Tori in Seyfert-2-Galaxien existieren. Mindestens ebenso wichtig ist der Nachweis, dass sich in Seyfert-1-Galaxien ganz ähnliche Tori befinden. Nur in diesem Fall wäre bewiesen, dass das Gas- und Staubreiservoir im Torus entscheidend für die – im Vergleich zur Masse des Schwarzen Loches – hohe Masseneinflussrate und die damit verbundene hohe Leuchtkraft der Seyfert-Kerne ist.

Zusammenfassung

Schon in den ersten drei Jahren seines Betriebs hat MIDI am VLTI bewiesen, dass interferometrische Beobachtungen im mittleren Infrarot wichtige Einblicke in die Vorgänge in aktiven galaktischen Kernen erlauben: Der direkte Nachweis von Staub-Tori in Seyfert-2-Galaxien ist nicht nur eine Bestätigung des vereinheitlichten Schemas, sondern eröffnet auch erstmals die Möglichkeit, das Gasreservoir zu studieren, das für die hohe Leuchtkraft der Seyfert-Galaxien und ihrer großen Brüder, der Quasare, verantwortlich scheint.

Erste Ergebnisse an der Radiogalaxie Centaurus A erlauben es auch, die Unterschiede zwischen Seyfert-Galaxien (meist sehr schwache Radiostrahlung) und Radiogalaxien herauszuarbeiten. Wir sind zuversichtlich, dass es mit MIDI in nächster Zukunft gelingen wird, auch den »missing link«, die Tori in Seyfert-1-Galaxien, aufzuspüren – oder diese Theorie zu widerlegen. Damit wäre das erste Etappenziel auf dem Weg erreicht, die physikalischen Vorgänge im Zentrum der aktiven galaktischen Kerne direkt zu beobachten. Größere und empfindlichere Interferometer werden diesen Weg fortsetzen, so dass MIDI bald nur als erster Schritt in eine neuen Ära extragalaktischer Astronomie mit interferometrischen Methoden erscheinen wird.

*(Klaus Meisenheimer, Konrad Tristram,
Marc Schartmann, Sebastian Wolf,
Thomas Henning, Hubert Klahr.
Beteiligte Institute:
Landessternwarte Heidelberg,
Sternwarte Leiden)*

II.6 Massereiche Sternhaufen in den Zentren von Spiralgalaxien

Im vergangenen Jahrzehnt wurden mit Hilfe des Weltraumteleskops HUBBLE in den Zentren von Spiralgalaxien sehr kompakte, massereiche Sternhaufen entdeckt – sogar in Galaxien, die keine zentrale Verdickung (Bulge) besitzen. Wegen ihrer geringen Ausdehnung von typischerweise etwa 30 Lichtjahren lassen sie sich nur sehr schwer untersuchen. Bisherige Beobachtungen beschränkten sich daher auf einzelne Sternhaufen. Ein internationales Astronomenteam unter der Leitung des MPIA hat erstmals neun solcher Haufen spektroskopisch untersucht und daraus wichtige Größen wie Masse, chemische Zusammensetzung und das Entwicklungsstadium abgeleitet. Größe und Masse dieser nuklearen Sternhaufen sind mit denen der größten Kugelsternhaufen vergleichbar, sie besitzen aber auch Eigenschaften, die offenbar nur in ihrer Lage in den Zentren der Galaxien vorkommen: Sie enthalten Populationen unterschiedlichen Alters, und damit eine ausgedehnte Entstehungsgeschichte, und einige von ihnen besitzen möglicherweise einen aktiven galaktischen Kern. Der Zusammenhang zwischen diesen Eigenschaften und ihrer zentralen Lage ist noch unverstanden.

Die Zentren von Galaxien haben seit jeher das Interesse der Astronomen auf sich gezogen, denn sie besitzen häufig sehr ungewöhnliche Eigenschaften. Hierzu gehören massereiche Schwarze Löcher, oft umgeben von einer heißen Akkretionsscheibe, Gebiete intensiver Sternentstehung oder extrem dichte Sternhaufen. Zudem hat man mehrere Korrelationen von Eigenschaften der Kernregion mit denen der restlichen Galaxie entdeckt, die auf einen engen entwicklungsgeschichtlichen Zusammenhang zwischen beiden Regionen hinweisen.

Schon vor mehr als 20 Jahren wurde vermutet, dass sich in den Zentren vieler Spiralgalaxien kompakte Sternhaufen befinden, deren Dynamik vom übrigen Bulge und der Scheibe weitgehend unabhängig ist. Wegen des nicht ausreichenden Auflösungsvermögens der damaligen Teleskope ließ sich diese Hypothese jedoch nicht überprüfen. Dies änderte sich entscheidend mit dem Weltraumteleskop HUBBLE (HST). Mit ihm konnten mehrere »nukleare Sternhaufen« entdeckt werden. Die bekanntesten und am besten untersuchten Beispiele stehen im Zentrum unseres Milchstraßensystems sowie in den Kernen des Andromedanebels M31 und des Dreiecksnebels M33. Letzter besitzt eine Masse von etwa 5×10^5 Sonnenmassen. Die meisten dieser Haufen verfügen über 10^6 bis 10^7 Sonnenmassen und sind somit typischerweise größer als massereiche Kugelsternhaufen.

In mehreren nahen Spiralgalaxien konnten solche Haufen räumlich aufgelöst werden, weiter entfernte Galaxien zeigen in ihren Zentren eine helle Punktquelle, bei der es sich vermutlich um einen räumlich nicht aufgelösten, nuklearen Sternhaufen handelt. All diese Untersuchungen führen zu der Schätzung, dass drei Viertel aller Spiralgalaxien solche nuklearen Haufen besitzen.

Die Existenz dieser Haufen ist rätselhaft. Insbesondere in Spiralgalaxien ohne Bulge ist das gezeiteninduzierte Gravitationspotential im Zentrum recht flach. Hier würde man daher auch nicht die Entstehung eines kompakten Haufens erwarten. Dennoch werden sie beobachtet. Diese Fälle haben zu der Vermutung geführt, dass nukleare Sternhaufen vielleicht die Anfangsstadien entstehender Bulges sind. Gleichzeitig gab die kompakte Erscheinung der nuklearen Sternhaufen Anlass zu der Vermutung, dass es einen Zusammenhang zwischen diesen Haufen und den ähnlich erscheinenden Kugelsternhaufen und/oder ultrakompakten Zentren einiger Zwerggalaxien gibt. Bislang gab es jedoch keine systematischen Versuche, diese Frage anzugehen. Dies änderte sich jetzt mit der neuen Studie.

Insgesamt wurden neun zentrale Sternhaufen spektroskopiert, die sich alle in den (geometrischen) Zentren von Spiralgalaxien der Typen Scd bis Sm befinden (Abb. II.6.1). Von allen lagen bereits Aufnahmen mit der Kamera WFPC 2 des HST vor. Die Spektren wurden mit dem Instrument UVES am Very Large Telescope, (VLT) aufgenommen. Da das Seeing-Scheibchen größer war als die effektiven Radien von $0''.2$ der von etwa 7 bis 75 Mio. Lichtjahre entfernten Sternhaufen, handelte es sich also um integrierte, räumlich nicht aufgelöste Spektren (Tabelle II.6.1.).

In einem ersten Schritt ermittelten die Astronomen aus den Doppler-verbreiterten Profilen mehrerer Absorptionslinien die Geschwindigkeitsdispersion in den Haufen. Aus den Werten zwischen 13 und 34 km/s lässt sich mit Hilfe eines dynamischen Modells die Masse der Haufen berechnen. Für solche Modellierungen werden auch Abschätzungen der Leuchtkräfte und effektiven Radien benötigt. Letztere konnten aus den Helligkeitsprofilen der HST-Aufnahmen mit Hilfe einer Entfaltung mit der Punktverbreiterungsfunktion der HST-Aufnahmen gewonnen werden. Mit Leuchtkräften zwischen etwa 10^6 und 10^8 Sonnenleuchtkräften ergaben sich Massenwerte zwischen 10^6 und 6×10^7 Sonnenmassen. Damit übertrifft der größte nukleare Haufen (in NGC 7418) den massereichsten Kugelsternhaufen der Galaxis Omega Centauri um das Zehnfache.

Aus den vorhandenen photometrischen und spektroskopischen Daten sowie den daraus ermittelten physikalischen Größen ließen sich nun grundlegende Eigenschaften



Abb. II.6.1: Drei Spiralgalaxien mit nuklearen Sternhaufen, die im Rahmen der neuen Studie untersucht wurden: NGC 300, NGC 7424 und NGC 7793, aufgenommen mit dem HST, dem VLT und mit SPITZER. Diese Aufnahmen veranschaulichen das beobachterische Problem, die nuklearen Sternhaufen von den sie umgebenden Sternen der Galaxie abzugrenzen. (Bilder: HUBBLE Heritage Team, NASA/ESA; NASA/JPL-Caltech/R. Kennicutt und das SINGS-Team; ESO).

nuklearer Sternhaufen mit denen von Kugelsternhaufen sowie ultrakompakten Zentren von Zwerggalaxien vergleichen. Ein Vergleich der projizierten Massendichte erwies sich als besonders hilfreich. Wie Abb. II.6.2 zeigt, liegen die nuklearen Haufen (ausgefüllte Quadrate) zusammen mit den galaktischen Kugelsternhaufen entlang einer Geraden. Sie kennzeichnet die Position von Haufen mit konstantem Radius von etwa 10 Lj. Hier nehmen die nuklearen Haufen den oberen Bereich ein. Dies kann jedoch ein Auswahleffekt sein, weil für die Studie

vornehmlich leuchtkräftige Haufen ausgewählt worden waren. Die ultrakompakten Kerne von Zwerggalaxien liegen etwa parallel unterhalb dieser Geraden. Das heißt, bei einer bestimmten Gesamtmasse weisen diese Kerne von Zwerggalaxien geringere Massendichten auf als die nuklearen Sternhaufen. Deutlich von diesen drei Gruppen getrennt liegen die Bulges von sphärischen Galaxien und elliptischen Zwerggalaxien. Übergangsobjekte zwischen diesen beiden Gruppen gibt es nicht, demnach sind die zentralen Sternhaufen keinesfalls als »die kleinsten Bulges« zu verstehen.

Ein ganz ähnliches Bild ergibt sich, wenn man die Phasenraumdichten der Systeme vergleicht, die ein Maß für die Dissipation des Gases vor der Haufenbildung liefern. Sie ergibt sich aus einer Kombination von effektivem Radius und Geschwindigkeitsdispersion (Abb. II.6.3). Deutlich erkennt man auch hier einen Bereich entlang einer Geraden, in dem sich Kugelsternhaufen und nukleare Sternhaufen und nun auch Kerne von

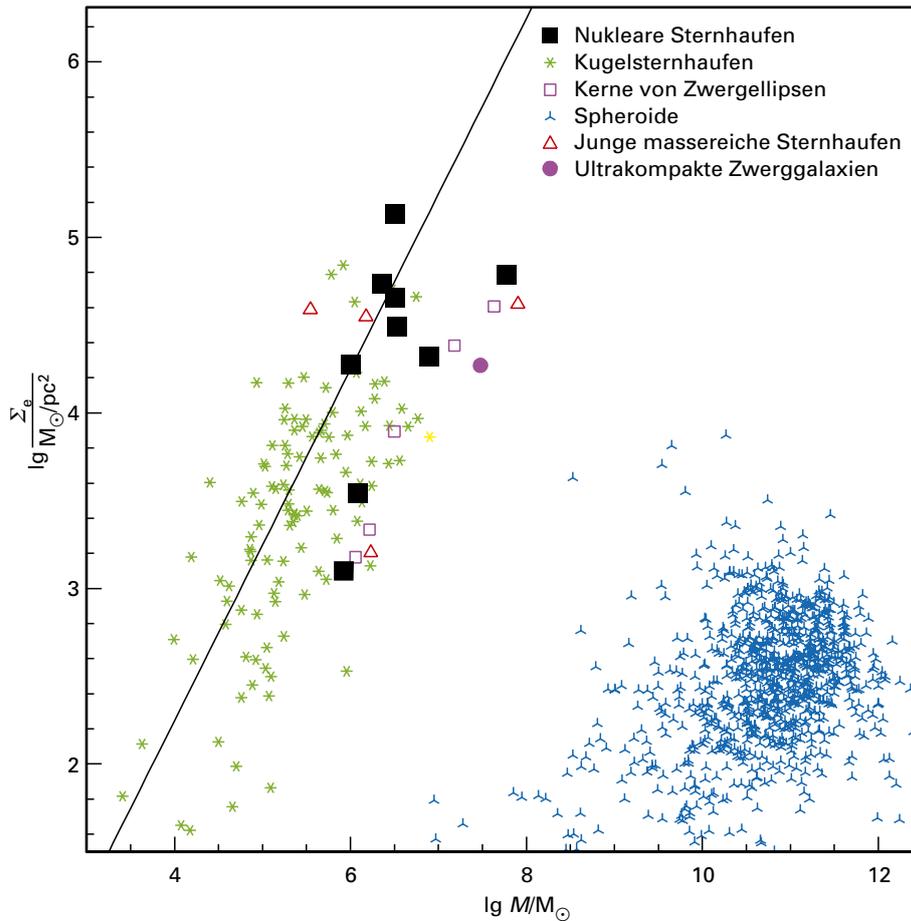


Abb. II.6.2: Die projizierte Massendichte in Abhängigkeit von der Gesamtmasse. Die nuklearen Haufen (*ausgefüllte Quadrate*) bilden eine einzige Sequenz, die vor allem von den galaktischen Kugelsternhaufen definiert wird. Deutlich getrennt erscheinen die elliptischen Galaxien und die Zwerggalaxien.

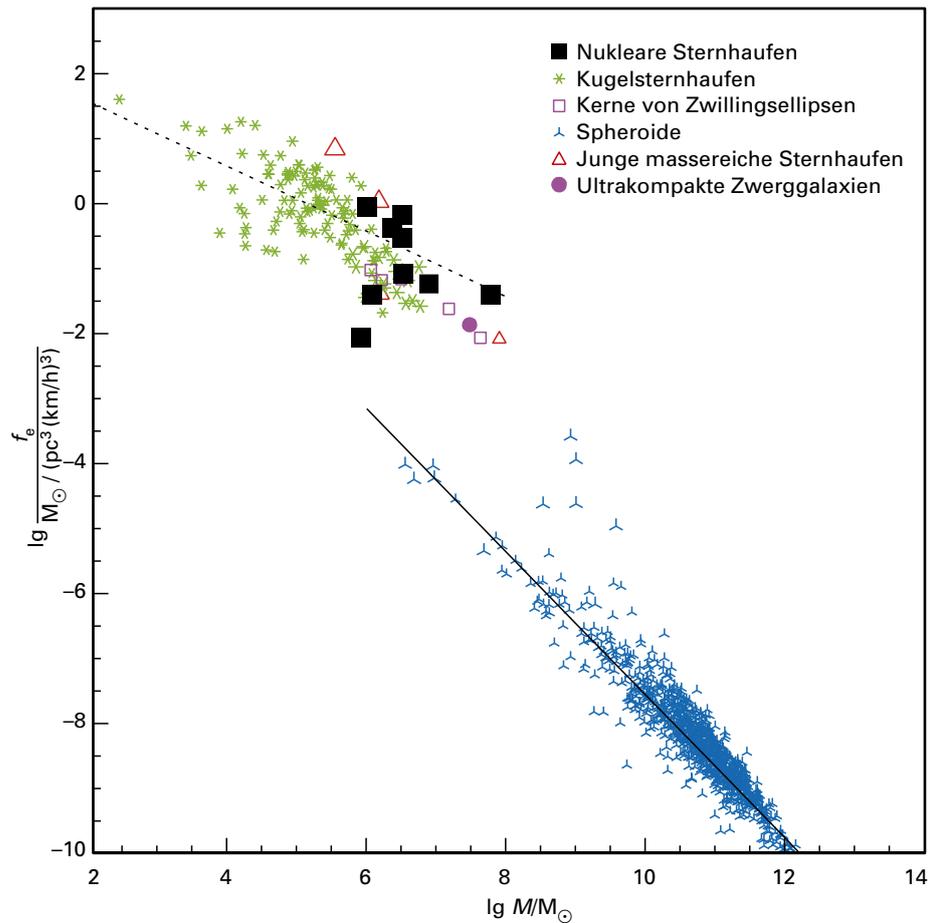
Zwerggalaxien befinden, während die elliptischen Galaxien und Zwerggalaxien deutlich abgetrennt sind. In diesem Fall weisen die beiden Relationen auch eine signifikant unterschiedliche Steigung auf, was die vorhergehende Interpretation unterstreicht: Nukleare Sternhaufen sind wahrscheinlich keine Vorläufer von Galaxien-Bulges.

Betrachtet man aber die spektralen Eigenschaften, so treten deutliche Unterschiede zwischen den zentralen Sternhaufen und den Kugelsternhaufen auf. Die mit UVES erhaltenen Spektren boten die Möglichkeit, die Alter der Sternhaufen zu bestimmen. Hierzu wandte das MPA-Team drei verschiedene Verfahren an: 1) Bestimmung eines Satzes von Spektralindizes, 2) Anpassung der beobachteten Spektren an synthetische Spektren einer Sternpopulation gemeinsamen Alters, und 3) Anpassung der beobachteten Spektren an synthetische Spektren einer Sternpopulation unterschiedlichen Alters. Während das erste Verfahren bei Kugelsternhaufen erfolgreich angewandt wurde, ergeben sich aufgrund des relativ jungen Alters der nuklearen Haufen in diesem Falle Schwierigkeiten. Daher hat sich das Team um die konsequente Weiterentwicklung des zweiten und dritten Verfahrens bemüht. Dabei waren die hohe Qualität der Daten und die zunehmend realistischen synthetischen Spektren besonders nützlich. Das dritte Verfahren beruht auf der Erkenntnis, dass sich jede Population mit belie-

biger Entwicklungsgeschichte durch eine Serie instanter Sternentstehungsereignisse beschreiben lässt.

Spektrale Modellierungen unter Annahme eines gemeinsamen Alters lieferten für die dominierende Sternpopulation eines jeweiligen Haufens Alterswerte von 10^7 bis 3×10^9 Jahren. Diese Ergebnisse waren relativ unabhängig von der angenommenen Metallizität. Wurden nach dem dritten Verfahren für die Fits der Spektren ausgedehnte Phasen der Sternentstehung angenommen, so ergaben sich für das Alter durchgehend höhere Werte von 4×10^7 bis 10^{10} Jahren. Die Metallizität liegt generell leicht unter der solaren Häufigkeit, weist aber zwischen den Haufen erhebliche Schwankungen auf (Tabelle II.6.1.). Die Modellierung unter der Annahme einer ausgedehnten Entstehungsgeschichte lieferte durchweg bessere Anpassungen an die Spektren als diejenige mit nur einer Population. Daraus konnte geschlossen werden, dass nukleare Sternhaufen, im Gegensatz zu den Kugelsternhaufen, im allgemeinen Populationen unterschiedlichen Alters enthalten. Die Modellierung mit mehreren Sternpopulationen ermöglichte es uns zudem, in jedem Haufen die letzte zurückliegende Sternentstehungsperiode t_{\min} zu bestimmen. Das Mittel lag bei 34 Millionen Jahren, keine Phase lag länger als 100 Millionen Jahre zurück. Offenbar hat in diesen nuklearen Haufen in der Vergangenheit und bis in die heutige Zeit hinein Sternentstehung immer wieder episodenhaft ein-

Abb. II.6.3: Die Phasenraum-dichte in Abhängigkeit von der Gesamtmasse für unterschiedliche Typen von Sternsystemen. Erneut deutlich erkennbar ist die deutliche Trennung der nuklearen Sternhaufen und Kugelsternhaufen von den sphärischen (Zwerg-) Galaxien. Die gepunktete Linie kennzeichnet die Positionen von Haufen, die dem Virialtheorem gehorchen und einen Radius von 10 Lj besitzen. Auf der durchgezogenen Geraden liegen Systeme, die dem Virialtheorem und einer Faber-Jackson-ähnlichen Relation zwischen Masse und Geschwindigkeitsdispersion gehorchen.



gesetzt. Das wirft einmal mehr die Frage auf, auf welche Weise diese kompakten und massereichen Sternhaufen in den Zentren so vieler Spiralgalaxien entstanden sind. Welche Vorgänge regen immer wieder neue Episoden der Sternentstehung an? Und es bleibt rätselhaft, warum es in den Zentren einiger Spiralgalaxien keinen nuklearen Sternhaufen gibt, obwohl sie sich nicht von anderen zu unterscheiden scheinen, die solche nuklearen Sternhaufen

besitzen. Das Team hat daher weitere Beobachtungen durchgeführt, die helfen werden, die zugrundeliegenden Eigenschaften der Galaxienzentren besser zu verstehen.

(Jakob Walcher, Hans-Walter Rix, Nadine Neumayer, in Zusammenarbeit mit: Space Telescope Science Institute, Baltimore, ESA/ESTEC, Noordwijk, Observatories of the Carnegie Institution of Washington, Pasadena, Oxford Astrophysics, Oxford, Ohio University, Athens, USA, MPI für Astrophysik, Garching und Institut d'Astrophysique de Paris)

Tabelle: II.6.1: Eigenschaften der nuklearen Sternhaufen. Hierin bedeuten d der Abstand, t das mittlere Alter, Z die Metallizität, t_{\min} die Zeitspanne der jüngsten Sternentstehungsphase und M die Masse.

Galaxie	d [Mpc]	$\lg(t)$	Z	$\lg(t_{\min})$	$\lg(M)/[M_{\odot}]$
NGC 0300	2.2	9.49	0.004	8.00	6.02 ± 0.24
NGC 0428	6.1	9.27	0.02	7.48	6.51 ± 0.14
NGC 1042	18.2	10.05	0.02	7.00	6.51 ± 0.21
NGC 1493	11.4	9.76	0.008	7.00	6.38 ± 0.14
NGC 2139	23.6	7.61	0.05	6.48	5.92 ± 0.20
NGC 3423	14.6	9.75	0.008	7.00	6.53 ± 0.14
NGC 7418	18.4	9.05	0.008	7.00	7.78 ± 0.19
NGC 7424	10.9	9.11	0.008	7.48	6.09 ± 0.14
NGC 7793	3.3	9.29	0.008	8.00	6.89 ± 0.14

II.7 Beobachtungen ferner Galaxien mit SPITZER

Neue Beobachtungen haben überzeugend gezeigt, dass in den vergangenen acht Milliarden Jahren die mittlere Sternentstehungsrate im Universum um fast eine Größenordnung gesunken ist. Diese Erkenntnis aus der jüngeren kosmologischen Forschung gilt als gesichert. Sowohl die Ursache für dieses Phänomen als auch die Frage, welche Galaxientypen hierfür verantwortlich sind, sind weitgehend unklar. Ein internationales Astronomenteam unter der Leitung des MPIA ging diesen Fragen nach, indem es auf einer Infrarotaufnahme des Weltraumteleskops SPITZER nahezu 8000 Galaxien identifizierte und deren Infrarotflüsse mit Daten der Himmelsdurchmusterung COMBO-17 und anderen Surveys kombinierte. Studien an lokalen Galaxien hatten bereits gezeigt, dass die Infrarotleuchtkräfte der Galaxien ein sehr gutes Maß für die Sternentstehungsrate sind. Mit einer speziellen Analysetechnik haben die Forscher des MPIA nun die mittleren Infrarotleuchtkräfte von Galaxien (selbst von schwachen Zwerggalaxien) sehr genau gemessen und daraus die bislang genaueste Entwicklung der Sternentstehungsrate für die vergangenen acht Milliarden Jahre ermittelt. Demnach ist diese Rate um einen Faktor neun gesunken. Wie die Beobachtungen der hellsten Galaxien mit SPITZER zeigen, hat dies vor allem in der Abnahme leuchtkräftiger und ultraleuchtkräftiger Infrarotgalaxien seine Ursache.

Die massereichen Sterne in einer jungen Sternpopulation dominieren die UV-Helligkeit einer Galaxie, oft sogar deren gesamten Energieausstoß. Große Staubmassen, die in Sternentstehungsgebieten vorhanden sind, absorbieren

aber den größten Teil der UV-Strahlung. Dadurch strahlt der von jungen Sternen aufgeheizte Staub im thermischen Infrarot. Alle Schätzungen der Sternentstehungsrate durch Beobachtungen basieren deswegen entweder auf der Messung der UV- oder der Infrarotleuchtkraft. Eine vollständige Bestandsaufnahme der Strahlung junger Sterne in fernen Galaxien sollte sowohl die UV- als auch die Infrarotflüsse einbeziehen.

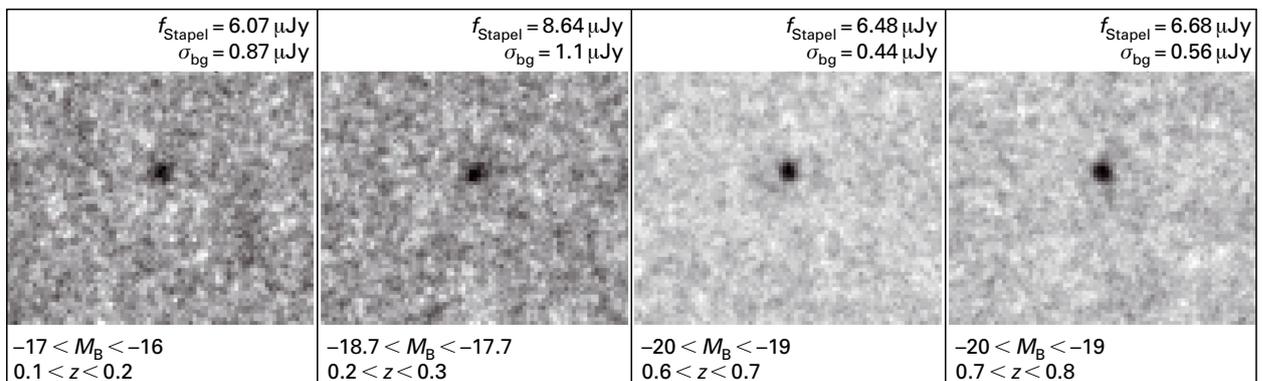
Bis vor kurzem verhinderten vor allem zu geringe Empfindlichkeit und das zu geringe Auflösungsvermögen der IR-Teleskope die detaillierte Beobachtung ferner Galaxien, insbesondere im Bereich relativ geringer Massen. Das Weltraumteleskop SPITZER bietet seit kurzem im Bereich zwischen 3.6 und 160 μm Wellenlänge diese Möglichkeit.

Ein internationales Team unter Leitung des MPIA nutzte die Aufnahme eines $90' \times 30'$ großen Himmelsfeldes, das mit dem »Multiband Imaging Photometer on SPITZER« (MIPS) bei 24 μm Wellenlänge aufgenommen wurde. Es handelt sich um ein Mosaik, denn das Beobachtungsfeld von MIPS beträgt nur 5.4×5.4 . Das MIPS-Feld deckt den Bereich der Röntgenaufnahme CHANDRA Deep Field South ab und fällt ebenfalls mit der Himmelsdurchmusterung COMBO-17 (Classifying Objects by Medium-Band Observations with 17 Filters) des MPIA sowie der mit dem Weltraumteleskop HUBBLE gewonnenen Himmelsaufnahme GEMS zusammen.

Im Rahmen von COMBO-17 wurde ein großes Himmelsareal durch 17 Filter hindurch aufgenommen und die Helligkeiten von Galaxien in entsprechend vielen Farbbereichen gemessen. Damit lassen sich Galaxien

Abb. II.7.1: Die mittlere thermische IR-Emission für Klassen von Galaxien in vier unterschiedlichen Rotverschiebungsbereichen, $0.1 < z < 0.8$. Da kaum eine dieser Galaxien einzeln nachweisbar ist, wurden die MIPS-Bilder aller Galaxien in einem

gegebenen B-Band in einem Rotverschiebungsbereich aufsummiert und ergaben so einen klaren statistischen Nachweis des von jungen Sternen aufgeheizten Staubes.



bis zu einer Rotverschiebung $z \approx 1$ (als sie etwa halb so alt waren wie das Universum heute) klassifizieren und deren Rotverschiebung 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-m-MPG/Eso-Teleskop auf La Silla und besitzt ein $32' \times 33'$ großes Bildfeld, entsprechend etwa der Fläche des Vollmondes.

Mit Hilfe der mit COMBO-17 bestimmten Farben und speziell entwickelter Software lassen sich Sterne, Quasare und Galaxien unterschiedlichen Typs (elliptische, Spiral- und Starburst-Galaxien) identifizieren. Insgesamt sind rund 25 000 Galaxien erfasst, womit COMBO-17 weltweit zu den umfangreichsten und am tiefsten reichenden Durchmusterungen zählt.

Selbst mit der verbesserten Empfindlichkeit von SPITZER (IR-Fluss größer als $83 \mu\text{J}$ bei $24 \mu\text{m}$) lassen sich nur Galaxien mit ungewöhnlich hoher Sternentstehungsrate als Einzelobjekte im thermischen IR messen. Bei einer Rotverschiebung $z = 0.7$ liegt die untere Grenze etwa bei sechs Sonnenmassen pro Jahr, ein Mehrfaches der Sternentstehung in unserer Galaxis. Die Kombination der MIPS-Daten mit den bekannten Rotverschiebungswerten und Positionen von COMBO-17 ermöglichte es jedoch, die Nachweisempfindlichkeit mit Hilfe des »Stacking-Verfahrens« erheblich zu erhöhen. Dieses Verfahren funktioniert nach folgendem Prinzip: Auf der Basis der COMBO-17-Daten definiert man einen Satz von hundert Galaxien (zum Beispiel blaue Galaxien im Rotverschiebungsbereich $z = 0.7$, die so hell sind wie das Milchstraßensystem). Dann zentriert man die MIPS-Bildausschnitte auf die Koordinaten dieser Galaxien und addiert sie auf. In den meisten Fällen, auch wenn keines der Objekte einzeln sichtbar ist, ergibt sich durch dieses Stacking eine signifikante Messung des mittleren IR-Flusses. Dieses Verfahren wurde bei Röntgen- und Submillimetraufnahmen bereits eingesetzt, ist für Infrarotaufnahmen jedoch neu.

Auf diese Weise war es möglich, die untere Grenze für die gemessenen Infrarotflüsse um einen Faktor fünf (für $0.7 < z < 1.0$) beziehungsweise zehn ($z < 0.7$) unter die bis dahin für MIPS-Bilder geltende Grenze zu senken und Sternentstehungsraten unter einer Sonnenmasse pro Jahr zu bestimmen. Für verschiedene Unterklassen von insgesamt fast 8000 Galaxien lagen schließlich die mittleren Rotverschiebungen und die Durchschnittshelligkeiten bei $24 \mu\text{m}$ sowie bei 2800 Angström und in den Johnson-U-, V und B-Bändern vor.

Diese Stichprobe wurde in neun Gruppen mit Rotverschiebungen zwischen $z = 0.1$ und $z = 1$ unterteilt, was einer maximalen Rückblickzeit von fast acht Milliarden Jahren entspricht. Abb. II.7.1 zeigt exemplarisch vier Unterklassen von Galaxien mit ihren Infrarotflüssen in vier Rotverschiebungsbereichen. Man achte auf die geringen Infrarotflüsse weit unterhalb der bisherigen Grenze von $83 \mu\text{Jy}$.

Zusammenhang zwischen IR-Leuchtkraft und Sternentstehungsrate

Bei nahen Galaxien, die sich detailliert untersuchen lassen, hat man einen Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Leuchtkräfte im IR und im UV ($L_{\text{IR}}/L_{\text{UV}}$) einerseits und der absoluten Helligkeit im blauen (B) andererseits festgestellt: Galaxien mit geringer B-Helligkeit besitzen auch ein geringes Verhältnis $L_{\text{IR}}/L_{\text{UV}}$: Je höher die Sternentstehungsrate, desto höher die Staubextinktion und desto höher der UV-Anteil, der in IR-Strahlung umgewandelt wurde.

Mit dem vorhandenen Datenmaterial konnte dieser empirische Zusammenhang nun auch für weiter entfernte Galaxien überprüft werden. Allerdings musste hierfür aus den $24\text{-}\mu\text{m}$ -Flüssen die gesamte Infrarotleuchtkraft von 8 bis $1000 \mu\text{m}$ berechnet werden. Dies wurde durch Anpassen typischer Spektralverläufe für unterschiedliche Galaxientypen an die Messdaten erreicht. Dieses Verfahren liefert zwar nur relativ ungenaue Infrarotflüsse, aber innerhalb der Grenzen scheint sich das Verhältnis $L_{\text{IR}}/L_{\text{UV}}$ zu B zumindest für $z < 0.8$ ähnlich zu verhalten wie bei nahen Galaxien (Abb. II.7.2).

Nun stellte sich die Frage, wie sich die gemessenen Flüsse bei $24 \mu\text{m}$ (entsprechend einer Ruhewellenlänge von $15 \mu\text{m}$) als Maß für das thermische IR, sowie der 380-nm -Fluss als Maß für das UV in eine Sternentstehungsrate umrechnen lassen. Diese beiden Größen sollten entscheidend sein, weil man im UV die direkte Strahlung der heißen jungen Sterne sieht, während im IR jener Teil des Sternenlichts erscheint, der vom Staub verschluckt und anschließend im IR wieder abgestrahlt wird. Hierfür ist es nötig, mit Hilfe einer empirisch bestimmten Beziehung aus den mit COMBO-17 gemessenen Helligkeiten bei 2800 Angström den gesamten UV-Fluss von 1216 bis 3000 Angström zu berechnen. Die Sternentstehungsrate lässt sich dann aus der Summe der Leuchtkräfte im UV und im IR berechnen.

Das wesentliche Ergebnis dieser Untersuchung ist: Offenbar folgen alle Galaxien dem Trend lokaler Galaxien, wonach das Leuchtkraftverhältnis $L_{\text{IR}}/L_{\text{UV}}$ mit der wie oben bestimmten Sternentstehungsrate steigt. Dies gilt zumindest bis zu einer Rotverschiebung von 0.8, bis zu der sich die vorliegende Untersuchung erstreckt.

Schließlich konnten die Astronomen aus der IR-Leuchtkraft die kosmische Sternentstehungsrate ausrechnen. Dies war im Vergleich zu früheren Arbeiten deshalb besonders signifikant, weil die neuen Daten die Beiträge erheblich schwächerer Galaxien enthalten als zuvor. Das Ergebnis zeigt die gesamte IR-Leuchtkraft (in einem mit der Expansion des Universums mitbewegten Einheitsvolumen) in Abhängigkeit von der Rotverschiebung (Abb. II.7.3). Es ist deutlich, dass die thermische IR-Leuchtkraft innerhalb der letzten acht Milliarden Jahre um einen Faktor neun gesunken ist.

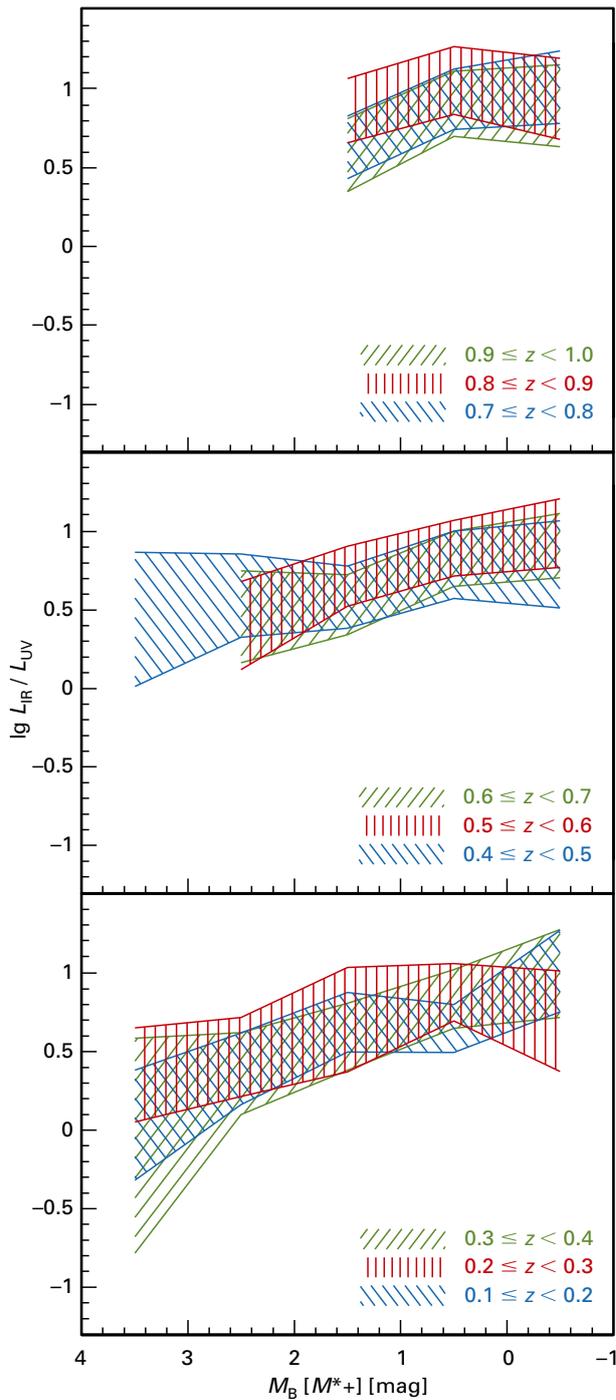


Abb. II.7.2: Korrelation zwischen dem Verhältnis $L_{\text{IR}}/L_{\text{UV}}$ aus der absorbierten zur entwichenen Leuchtkraft junger Sterne und der Leuchtkraft im Blauen für unterschiedliche Rotverschiebungsbereiche. Je leuchtkräftiger eine Galaxie ist, desto höher der Anteil der IR-Strahlung. Dies gilt für alle Rotverschiebungswerte $0.1 < z < 1.0$ (von unten nach oben).

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Sternentstehungsrate in der zweiten Lebenshälfte des Universums stark gesunken ist. Eine entscheidende Frage ist nun: Welche Art von Galaxien ist vor allem für das dramatische Absinken der Sternentstehung im Universum verantwortlich?

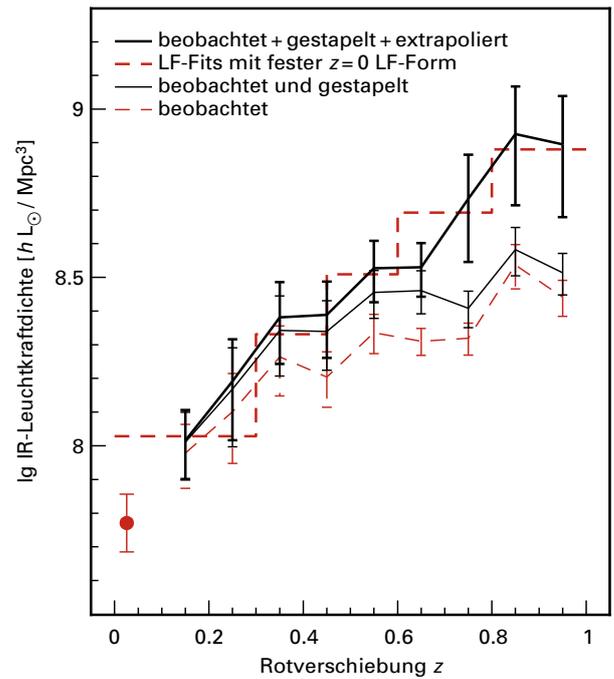


Abb. II.7.3: Die Leuchtkraftdichte im Infraroten in Abhängigkeit von der Rotverschiebung (*durchgezogene Linie*) zeigt den Abfall der globalen Sternentstehungsrate von $z \approx 1$ bis heute. Der rote Punkt unten links zeigt den Wert für das heutige Universum. Die rot gestrichelte Linie gibt die Ergebnisse einer anderen, unabhängigen Studie wieder.

Das Verschwinden der leuchtkräftigen und ultraleuchtkräftigen Infrarotgalaxien

Um dieser Frage nachzugehen, untersuchten die Astronomen eine Untergruppe von etwa 2600 relativ hellen Galaxien der MIPS-Aufnahme, deren IR-Flüsse mehr als $80 \mu\text{Jy}$ betragen. Hierbei fielen vor allem leuchtkräftige (LIRG) und ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien (ULIRG) auf. Sie besitzen im Bereich von 8 bis $1000 \mu\text{m}$ Wellenlänge Leuchtkräfte zwischen 10^{11} und 10^{12} Sonnenleuchtkräften oder stärker.

Die neu analysierten Daten zeigen ganz deutlich, dass diese beiden Galaxientypen in der Vergangenheit wesentlich häufiger waren als heute, und dass sie den größten Teil der gesamten Leuchtkraftdichte im Infraroten lieferten (Abb. II.7.4). Bei einer Rotverschiebung von $z = 1$ tragen die LIRGs (in der Abb. orange eingetragen) etwa 70% der Infrarotstrahlung bei, die ULIRGs (rot) nur etwa 10%. Die Anzahl der LIRGs und ULIRGs hat sich danach stark verringert, und vor etwa fünf Milliarden Jahren ($z < 0.5$) haben die Galaxien geringer Leuchtkraft (blau) die Dominanz in der IR-Leuchtkraftdichte übernommen. Diese sind nahezu »normale« Spiralgalaxien.

Insgesamt ist die Dichte der Galaxien mit IR-Leuchtkräften von mehr als 10^{11} Sonnenleuchtkräften in den vergangenen acht Milliarden Jahren um mehr als einen Faktor hundert gesunken, wobei die ULIRGs

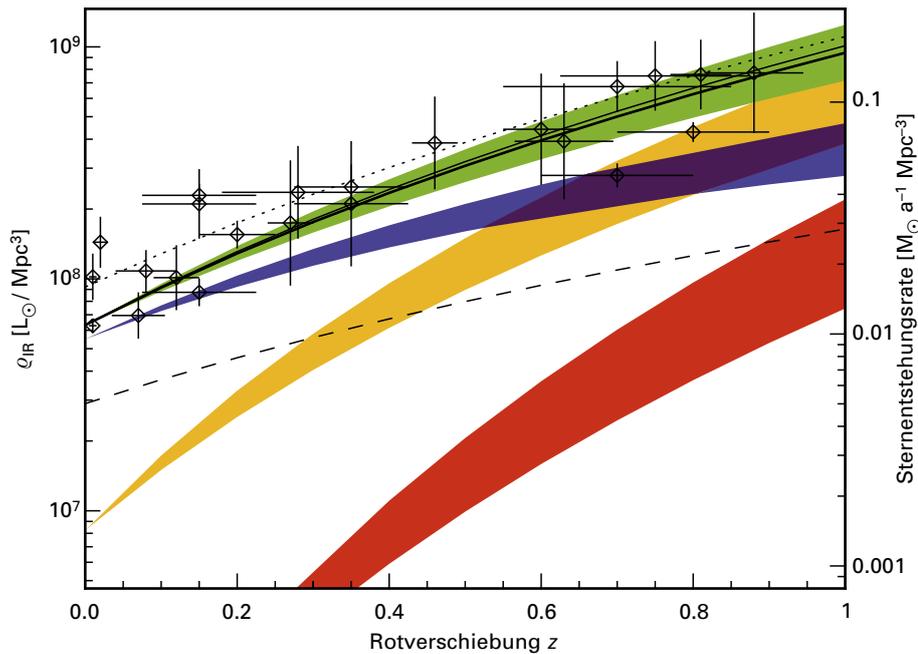


Abb. II.7.4: Entwicklung der IR-Energiedichte insgesamt (*grün*) und unterschieden nach Galaxientypen. *Blau*: leuchtkraftarme Galaxien ($L_{\text{IR}}, 10^{11} L_{\odot}$), *orange*: LIRGS, *rot*: ULIRGS. Die durchgezogene Linie zeigt eine Abnahme in Abhängigkeit von der Rotverschiebung nach einem Potenzgesetz mit Exponenten 3.9.

besonders stark zurückgegangen sind. Es ist daher zu vermuten, dass diese extrem staubreichen Galaxien mit hoher Sternentstehungsrate in einer früheren Ära des Universums ($z > 1$) noch wesentlich häufiger waren als bei $z = 1$. Möglicherweise sind sie verantwortlich für das Maximum in der kosmischen Sternentstehungsrate bei Rotverschiebungen zwischen 2 und 3. Dass der Anteil an staubreichen Galaxien früher wesentlich größer war als heute, zeigt auch die Abnahme der IR-Leuchtdichte nahezu mit der vierten Potenz der Rotverschiebung. Im gleichen Zeitraum ist die UV-Dichte (der direkten, nicht von Staub absorbierten Sternstrahlung) nur mit der zweiten Potenz gesunken.

Die neuen IR-Aufnahmen des Teleskops SPITZER haben es somit ermöglicht, die Entwicklung der kosmischen Sternentstehung in den vergangenen acht Milliarden Jahren eingehend zu untersuchen. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt dabei wesentlich von der Berechnung der Gesamtleuchtkräfte aus wenigen spektralen Messpunkten ab. Zukünftig werden deshalb vor allem Beobachtungen in mittleren und fernem IR (zum Beispiel mit HERSCHEL) sowie im Submillimeter- und Millimeterbereich (mit ALMA) zu genaueren Ergebnissen führen.

(Eric F. Bell, Xianzhong Zheng, Hans-Walter Rix.
Beteiligte Institute:
Steward Observatory, Tucson,
Observatoire de Paris-Meudon,
Institut d'Astrophysique Spatiale, Paris,
Instituto de Estructura de la Materia, Madrid,
Space Science Institute, Boulder,
National Optical Astronomy Observatory, Tucson)

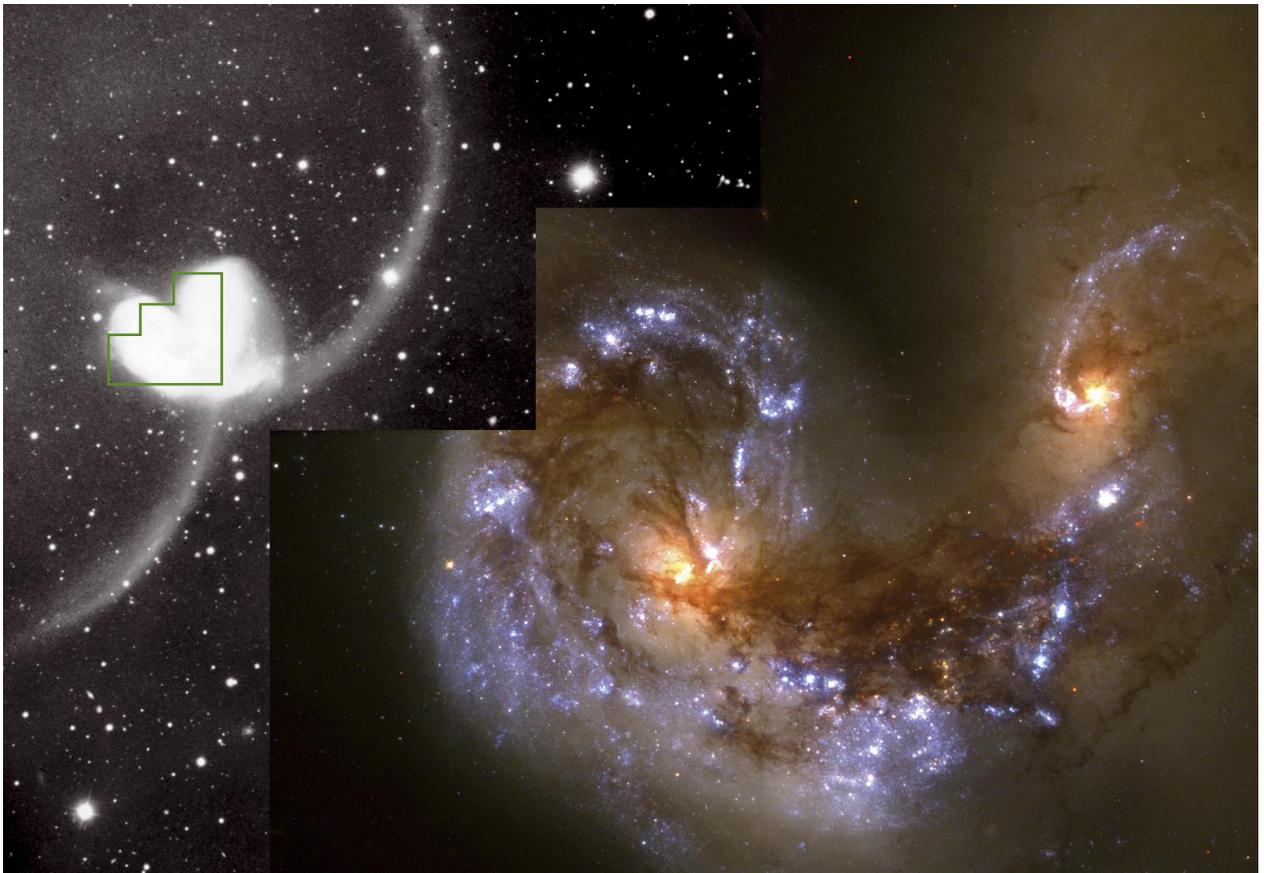
II.8 Dynamik, Staub und junge Sterne

Modellrechnungen zur Verschmelzung von Galaxien

Wenn Galaxien nahe aneinander vorbeifliegen oder zusammenstoßen, treten gewaltige Gezeitenkräfte auf, die Staub und Gas in den Galaxien verwirbeln und komprimieren. Dies führt zu einem starken Anstieg der Sternentstehung in dichten Staubfilamenten, die einen Großteil des Galaxienlichtes absorbieren. In einigen nahen Galaxienpaaren lässt sich dieser Vorgang detailliert studieren. Bei den weit entfernten Sternsystemen ist dies hingegen nicht möglich. Hier ist man darauf angewiesen, aus Helligkeiten in bestimmten Wellenlängenbereichen, die über die gesamte Galaxie gemittelt sind, auf die Sternentstehungsrate zu schließen. Mit umfangreichen Computersimulationen konnte eine Theoretikerin des MPIA gemeinsam mit ihren Kollegen zeigen, wie sich die Sternentstehungsrate während eines Verschmelzungsvorgangs verhält und wie sich dabei wichtige Beobachtungsgrößen verändern. Aus den Simulationen leiteten sie eine analytische Formel her, mit der sich die Staubabsorption vorherzusagen lässt. Diese Ergebnisse können Modelle zur Galaxienentwicklung erheblich verbessern.

Während Sterne in der Milchstraße praktisch nie miteinander zusammenstoßen, ereignen sich Galaxienkollisionen im Vergleich dazu recht häufig. In der Tat sind sie ein zentraler Mechanismus der Galaxienentwicklung. Das bekannteste Beispiel für zwei verschmelzende Galaxien sind die 63 Millionen Lichtjahre entfernten NGC 4038 und NGC 4039, die zusammen als Antennen-Galaxie bezeichnet werden (Abb. II.8.1). In der Kollisionszone wirbeln riesige Staubwolken durcheinander. An vielen Stellen hat der Zusammenstoß dazu geführt, dass sich die Wolken verdichten und in ihnen neue Sterne entstehen. In wechselwirkenden Galaxien dieser Art steigt die Sternentstehungsrate im Mittel auf 30 bis 50 Sonnenmassen pro Jahr, kurzzeitig kann die Rate sogar noch höher liegen.

Abb. II.8.1: Die Antennen-Galaxie, *links* in einer Übersichtsaufnahme, *rechts* in einer Detailaufnahme des Weltraumteleskops HUBBLE (Bild: B. Whitmore, NASA/ESA).



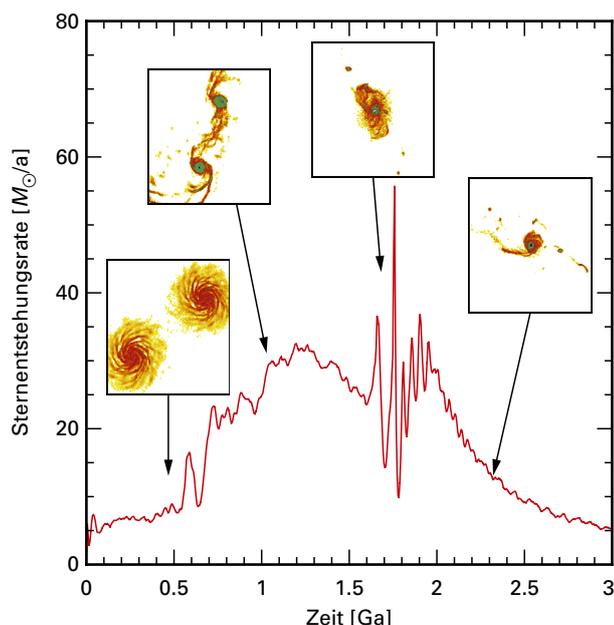


Abb. II.8.2: Entwicklung der Sternentstehungsrate bei der Wechselwirkung von zwei dem Milchstraßensystem ähnlichen Sbc-Galaxien. Die kleinen Bilder verdeutlichen die Verteilung des Gases in unterschiedlichen Stadien der Wechselwirkung bei Aufsicht auf die Bahnebene.

In diesen »Starburst-Galaxien« dominieren die massereichsten und leuchtkräftigsten Sterne die Strahlung im UV und im Blauen, doch gleichzeitig absorbieren Staubwolken einen Großteil des Lichtes. Die Regionen intensivster Sternentstehung sind deshalb gar nicht zu sehen. Sie erwärmen aber den Staub, der im Infraroten leuchtet. Diese Galaxien erscheinen dann als ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien (ULIRG) mit Gesamtleuchtkräften von mehr als 10^{12} Sonnenleuchtkräften. Bei sehr weit entfernten Galaxien ist das Emissionsmaximum so weit zu größeren Wellenlängen hin verschoben, dass sie im Submillimeter- und Millimeterbereich sehr hell erscheinen.

Hohe Sternentstehungsraten sind demnach immer mit dem Vorhandensein dichter Staubwolken verbunden. In zahlreichen Modellsimulationen haben Theoretiker versucht, diesen Effekt zu berücksichtigen, um die Beobachtungen interpretieren zu können oder Computersimulationen zur Galaxienentwicklung zu unterstützen. Doch alle bisherigen Versuche gaben die Verhältnisse (Verteilung der Wolken, Hydrodynamik u.a.) nur unzureichend wieder und waren nicht sehr praktikabel.

Die jetzt entstandene Arbeit behandelt das Verschmelzen unterschiedlicher Galaxientypen. Sie berücksichtigt erstmals die Hydrodynamik und erfasst den Strahlungstransport vollständig. Bei der Kollision setzt Sternentstehung in Gebieten ein, in denen die Gasdichte einen bestimmten Wert überschritten hat. Ein wesentlicher Unterschied zu bisherigen Arbeiten besteht zu-

dem darin, dass hier der Feedback-Mechanismus von Supernovae mit aufgenommen wurde. Darüber hinaus wurde berücksichtigt, dass Supernovae die Häufigkeit chemischer Elemente (die »Metallizität«) verändern. Ziel war es, Zusammenhänge herzustellen zwischen dem Anteil der Energie, den der Staub absorbiert, und physikalischen Größen wie Leuchtkraft, Metallizität und Masse der simulierten Galaxien.

Die Simulationen umfassten sieben unterschiedliche Galaxienmodelle: drei Scheibengalaxien mit unterschiedlicher Masse und Metallizität, sowie vier Galaxien, deren Eigenschaften typischen Galaxien entsprechen, wie sie im Sloan Digital Sky Survey (SDSS) gefunden wurden. Letztere verteilen sich auf einen größeren Massenbereich als die Spiralgalaxien und enthalten weniger Gas als diese. Insgesamt überdeckten die Galaxienmodelle zwei Größenordnungen in der baryonischen Masse (Sterne plus Gas und Staub), drei im Gasgehalt und vier in der Metallizität. Für die einzelnen Computerläufe wurden identische Paare der sieben Galaxientypen auf eine parabolische Umlaufbahn umeinander gesetzt, wobei eine der beiden Scheibenebenen in der Umlaufebene lag und die andere um 30 Grad dagegen geneigt war. Acht weitere Simulationen mit Sbc-Galaxien dienten dazu, Variationen in der Galaxienorientierung und der Bahn zu testen.

Während des Wechselwirkungsvorgangs wurde bei 50 Zeitschritten die Verteilung von Sternen, Gas und Staub ermittelt und als Input für eine detaillierte Berechnung des Strahlungstransports eingegeben. Das Ergebnis waren Bilder der Galaxien bei 22 Wellenlängen im Bereich zwischen 21 nm und $5\mu\text{m}$ und bei elf unterschiedlichen Blickwinkeln. Berücksichtigt wurde hierbei die Absorption von Sternlicht durch Staubwolken und seine Wiederausstrahlung im Infraroten. Als entscheidende Größe für das Erscheinungsbild der Galaxie erwies sich indes nicht die Absorption des Staubes, sondern die gesamte Lichtabschwächung. Sie ist definiert als der Anteil, um den der Staub die Gesamtleuchtkraft der Sterne verringert. Neben der Absorption ist dabei auch die Streuung an Staub entscheidend.

Abb. II.8.2 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Sternentstehungsrate bei der Wechselwirkung von zwei Sbc-Galaxien in Aufsicht auf die Bahnebene. Die kleinen Bilder verdeutlichen die Verteilung des Gases in unterschiedlichen Stadien. Gezeitenkräfte wirbeln das Gas auf und führen beim ersten nahen Vorbeiflug zu einer hohen Sternentstehungsrate. Während sich die beiden Galaxien voneinander entfernen, strömt Gas in die beiden Zentralgebiete, wodurch dort die Sternentstehung weiter angefacht wird. Diese bleibt auch hoch, während die beiden Galaxien umkehren und in einem Bogen erneut aufeinander zufliegen. Beim letztendlichen Verschmelzen der beiden Galaxienkerne treten einige starke Starbursts auf. Nachdem die beiden Galaxien vereint sind, ebbt die Sternentstehungsrate im Verlaufe von etwa einer Milliarde Jahren ab.

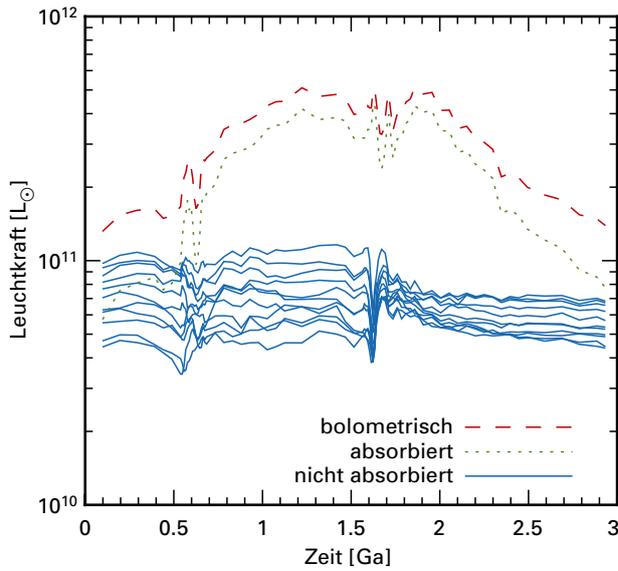
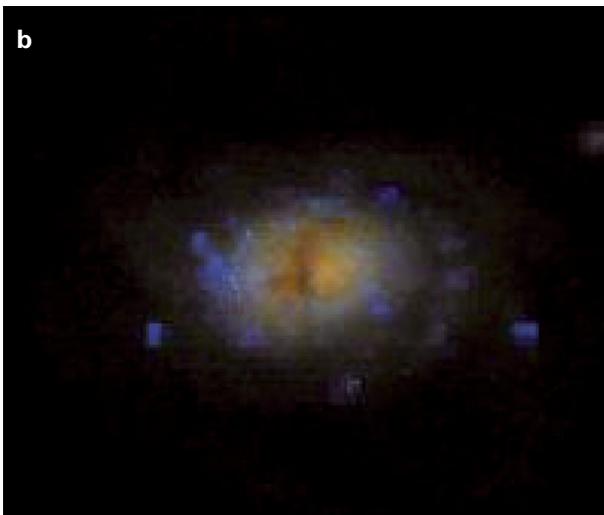
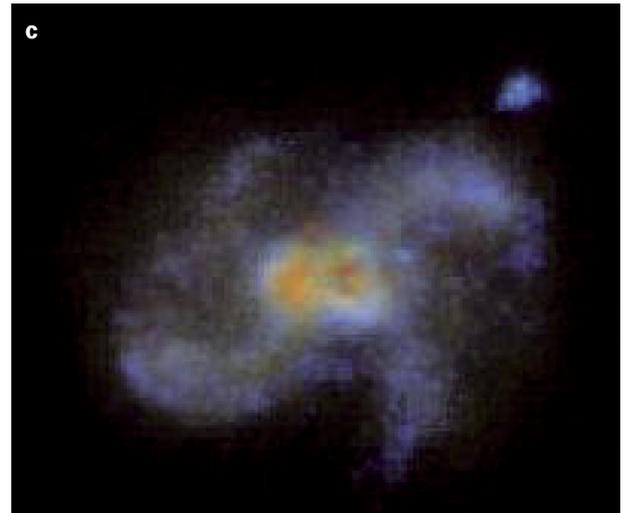
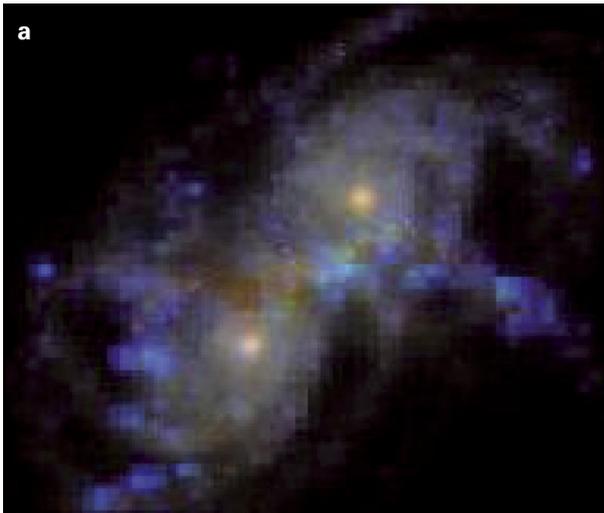


Abb. II.8.3: Bild oben: Zeitliche Entwicklung der bolometrischen Leuchtkraft und ihres von Staub abgeschwächten Anteils (*obere Kurven*). UV- und Blauanteil variieren für jeden der elf Blickwinkel nicht so stark (*untere Kurven*).

Die gesamte Phase erhöhter Sternentstehung zieht sich demnach über zwei Milliarden Jahre hin. In dieser Zeit erhöht sich die bolometrische Leuchtkraft um fast eine Größenordnung. Allerdings bleibt die von den jungen Sternen erzeugte UV- und Blau-Helligkeit bei gegebenem Blickwinkel nahezu unverändert, weil der Staubanteil wächst und somit das Sternenlicht zunehmend abschwächt (Abb. II.8.3). Diese Strahlung entweicht bevorzugt senkrecht zur Scheibenebene, so dass die Galaxie in Aufsicht bis doppelt so hell erscheint als in Schrägsicht. Das Resultat der Vereinigung zweier Scheibengalaxien ist eine sphäroidale oder elliptische Galaxie, bei der die Helligkeit im UV und im Blauen nicht mehr so stark vom Blickwinkel abhängt.

Wie eingangs erwähnt, wurde die Helligkeit für 22 Wellenlängen berechnet. Insgesamt ergaben sich deshalb für 25 Simulationsläufe mit den unterschiedlichen Galaxientypen und 50 Zeitschritten mehr als

Abb. II.8.4: Bilder unten: Simulierte Bilder von zwei verschmelzenden Sbc-Galaxien bei den Zeitschritten a) 0.6, b) 1.6, c) 1.7 und d) 2 Milliarden Jahre.



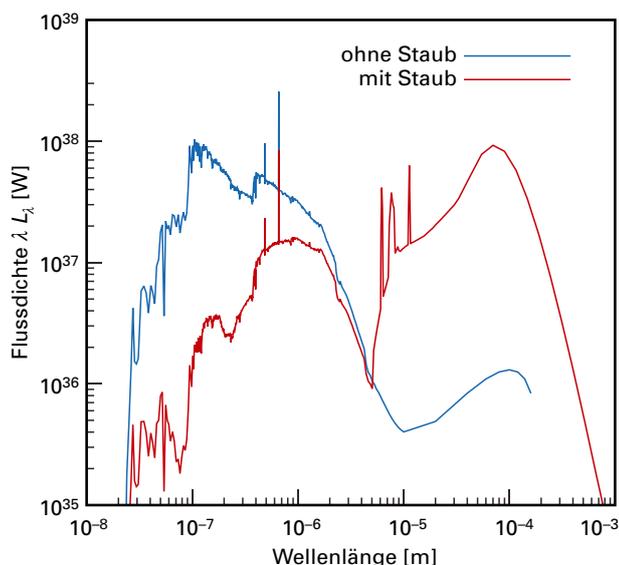


Abb. II.8.5: Spektrale Energieverteilung während der Phase des zweiten Bildes in Abb. II.8.4. Die beiden Linien verdeutlichen die Wirkung der Abschwächung durch Staub.

100000 Bilder und 10000 Spektren. Abb. II.8.4 und Abb. II.8.5 demonstrieren dies erneut an dem Beispiel zweier verschmelzender Sbc-Galaxien. Abb. II.8.5 verdeutlicht die abschwächende Wirkung des Staubes. Grundsätzlich ist ersichtlich, dass diese mit ansteigender Sternentstehungsrate und Gesamtleuchtkraft zunimmt. Dies hatten auch bereits Beobachtungen nahegelegt.

In einem zweiten Schritt entwickelte das Theoretikerteam eine einfache analytische Formel, mit der sich die Abschwächung der Sternstrahlung durch Staub berechnen lässt, wenn Leuchtkraft, Masse und Metallizität der Galaxie bekannt sind. Abb. II.8.6 zeigt die Werte der analytischen Lösung im Vergleich zu denen der Simulationsläufe. Die geringe Streuung ist ersichtlich und lässt die Gleichung als verhältnismäßig gute Beschreibung erscheinen. Die Vorhersagegenauigkeit hängt jedoch vom Blickwinkel ab. Gemittelt über alle Richtungen beträgt die mittlere Ungenauigkeit 4 %, entlang einer speziellen Sichtlinie schwankt sie, abhängig von der Wellenlänge, zwischen 6 und 12 %. Die gefundene Relation scheint nicht nur für wechselwirkende, sondern auch für einzelne Galaxien zu gelten.

Die geringe Streuung der Daten im Vergleich zur analytischen Lösung zeigt, dass diese in kosmologischen Modellen der Entstehung und Entwicklung von Galaxien verwendet werden kann. Anders als bisherige Modelle, welche die Wirkung von Staub berücksichtigen, liefert diese Lösung in selbstkonsistenter Weise Informationen über den Grad der Staubabschwächung und seine Abhängigkeit von astrophysikalischen Größen einer Galaxie.

Diese Ergebnisse geben Hoffnung, einem realistischen Modell wechselwirkender Galaxien einen bedeutenden

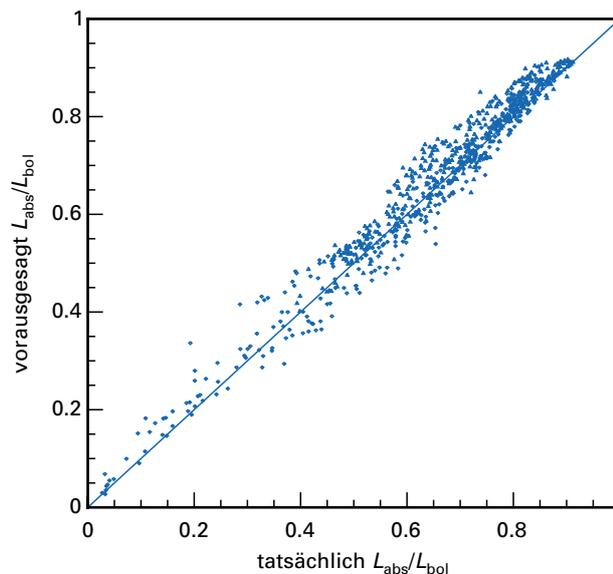


Abb. II.8.6: Die näherungsweise analytisch berechnete Abschwächung im Vergleich zu den aus der Simulation erhaltenen Werten. Die geringe Streuung der Daten im Vergleich zur analytischen Lösung zeigt, dass diese in kosmologischen Modellen der Entstehung und Entwicklung von Galaxien verwendet werden kann. Anders als bisherige Modelle, welche die Wirkung von Staub berücksichtigen, liefert diese Lösung in selbstkonsistenter Weise Informationen über den Grad der Staubabschwächung und seine Abhängigkeit von astrophysikalischen Größen einer Galaxie.

Schritt näher gekommen zu sein. Insbesondere sind solche Rechnungen die Grundlage für die Bestimmung der tatsächlichen Verschmelzungsrate von Galaxien. Um diese Rate auf der Basis fluss- und helligkeitsbegrenzter Stichproben zu messen, muss man wissen, um welchen Faktor Galaxien während dieser Phase heller oder schwächer werden. Die Simulationen können auch zur Kalibration statistischer Untersuchungen zur Identifikation wechselwirkender Galaxien in echten Beobachtungen verwendet werden.

Es mussten jedoch einige Effekte unberücksichtigt bleiben, die in naher Zukunft mit einbezogen werden sollen. So erfassen die Modelle zwar aufgrund der Hydrodynamik die großräumige Staubstruktur in der Galaxie, aber Strukturen auf der Größenskala einzelner Sternentstehungsgebiete liegen noch jenseits des rechnerischen Auflösungsvermögens. Darüber hinaus sollen künftig Gasausflüsse aus der Galaxie, welche beispielsweise die Anreicherung mit schweren Elementen verringern, mit einbezogen werden. Und schließlich muss auch die Wirkung eines aktiven galaktischen Kerns, der ein supermassereiches Schwarzes Loch enthält, berücksichtigt werden.

(Rachel Somerville.

*In Zusammenarbeit mit der
University of California, Santa Cruz und dem
Space Telescope Science Institute, Baltimore)*

III. Ausgewählte Forschungsgebiete

III.1 Sternentstehung in den Magellanschen Wolken

Die Magellanschen Wolken, zwei der unserem eigenen Milchstraßensystem am nächsten gelegenen Galaxien, bieten eine einzigartige Möglichkeit, jüngste Sternentstehungsprozesse in einem galaxienumfassenden Maßstab zu beobachten. Obwohl sie sehr viel kleiner sind als das Milchstraßensystem, weisen sowohl die Kleine als auch die Große Magellansche Wolke eine ungewöhnlich hohe Sternentstehungsaktivität auf. Sie zeigt sich in riesigen expandierenden Hüllen interstellarer Materie, aktiven Sternentstehungsgebieten verbunden mit ionisiertem Wasserstoff, sowie einer großen Vielfalt an jungen Sternsystemen wie Sternhaufen und Assoziationen.

Junge Sternsysteme eignen sich hervorragend dazu, in einer Galaxie Sternentstehungsprozesse auf unterschiedlichen Skalen zu untersuchen. Junge Sternassoziationen in den Magellanschen Wolken bilden eine vollständige Stichprobe von Objekten mit einer Vielzahl charakteristischer Merkmale, die für die Untersuchung von Fragen bezüglich der Entstehung von Sternen in Haufen geeignet sind. Die bislang aus bodengebundenen Beobachtungen gewonnenen Informationen beziehen sich auf die massereichen jungen Sterne in Assoziationen der Magellanschen Wolken und die Verteilung ihrer Massen, die sogenannte ursprüngliche Massenfunktion. Es ist jedoch wenig darüber bekannt, wie viele massearme Sterne diese Systeme enthalten. Diese Informationslücke wird zur Zeit mit Ergebnissen aus Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE gefüllt. Die Kombination von Untersuchungen des Gehalts an massereichen wie auch an massearmen Sternen in jungen Assoziationen der Magellanschen Wolken liefert ein vollständiges Bild der jüngsten Sternentstehung in Haufen – in einer Umgebung, die sich sehr von unserer Milchstraße unterscheidet.

Einführung

Die Große und die Kleine Magellansche Wolke sind zwei Zwerggalaxien, die als Begleiter unserer eigenen Galaxis diese einmal in etwa 1.5 Milliarden Jahren umkreisen. Am Südhimmel sind sie auffällige Objekte und erscheinen dem bloßen Auge wie zwei abgetrennte Teile der Milchstraße. Benannt sind sie nach dem portugiesischen Seefahrer Ferdinand Magellan, der sie nach seiner ersten Weltumseglung 1519 in Europa bekannt machte. Die 179000 Lichtjahre entfernte Große Magellansche Wolke (engl. Large Magellanic Cloud, LMC) ist die größte und nächstgelegene noch nicht zerrissene Galaxie außerhalb unserer eigenen. Die Kleine Magellansche

Wolke (engl. Small Magellanic Cloud, SMC) umkreist unsere Milchstraße in einer Entfernung von etwa 210000 Lichtjahren und ist damit die zweitnächste uns bekannte externe Galaxie. Beide Magellansche Wolken sind irreguläre Zwerggalaxien und nahe genug, um in einzelne Sterne aufgelöst werden zu können. Tiefe fotografische Aufnahmen zeigen sie als hochkomplexe Systeme mit zahlreichen interessanten Objekten wie hellen Emissionsnebeln, Staubwolken, offenen Sternhaufen und Kugelhaufen, Supernovaüberresten und Planetarischen Nebeln, die anscheinend wahllos über das Antlitz der beiden Galaxien verstreut sind (Abb. III.1.1). Folglich stellen sie ideale Laboratorien zur Untersuchung unterschiedlicher Sternpopulationen dar. Die sehr geringe interstellare Absorption innerhalb unserer Galaxis in ihre Richtung ist sicherlich ein großer Vorteil bei diesen Untersuchungen, da das Licht der Magellanschen Wolken nicht durch die im Vordergrund liegende Staubscheibe der Milchstraße abgeschwächt wird. Hinzu kommt, dass ihre räumliche Tiefe sehr gering zu sein scheint und somit alle beobachteten Sterne mehr oder weniger gleich weit von uns entfernt liegen, wobei es nur sehr wenige störende Vordergrundsterne aus unserer eigenen Milchstraße gibt. Da beide Magellansche Wolken eine geringere Häufigkeit an Elementen schwerer als Wasserstoff als die Milchstraße besitzen (in der Astronomie zusammen als »Metalle« bezeichnet), zeigen sie auch eine geringe Absorption durch ihr eigenes interstellares Medium.

Die Magellanschen Wolken stellen ein einzigartiges Laboratorium dar, um Sternentstehung in einer Umgebung zu studieren, die sich von der unserer Milchstraße unterscheidet. Aufgrund ihrer Nähe haben verschiedene Untersuchungen wertvolle Informationen über sie liefern können. So ist zum Beispiel die Metallhäufigkeit in der LMC fast viermal geringer als in unserer Galaxis, während ihre Sternentstehungsrate (Masse an neu gebildeten Sternen als Funktion der Zeit) hoch ist, beinahe ebenso hoch wie die der Galaxis. Dies führt zu einer hohen Zahl an Sternen »frühen Spektraltyps« (O- und B-Sterne) mit sehr starken Strahlungsfeldern, was zur Folge hat, dass sich die Sternentstehung in der LMC von der in der Milchstraße unterscheidet.

Die Magellanschen Wolken zeigen eine sehr lebhaftere Sternentstehungsaktivität, erkennbar an der eindrucksvollen »Starburst«-Region (Gebiet mit ausbruchartiger Sternentstehung) des Tarantel-Nebels (30 Doradus) in der LMC, riesengroßen und überriesengroßen Hüllen aus atomarem Wasserstoff (HI-Hüllen) sowie Gebieten mit ionisiertem, strahlendem Wasserstoff (HII-Regionen). Das leuchtende Gas des interstellaren Mediums in letzte-



Abb. III.1.1: Ein Farbbild der Kleinen Magellanschen Wolke, zusammengesetzt aus drei Weitwinkelaufnahmen, die in verschiedenen Wellenlängenbereichen aufgenommen wurden: blau, visuell und rot. Norden ist oben in diesem etwa 5.4 Grad großen Bild. Copyright 1984–2002, Anglo-Australian Observatory, Royal Obs. Edinburgh. Foto von David Malin aus UK Schmidt-Platten.

ren ist eine Brutstätte für die Bildung neuer Sterne (Abb. III.1.2). All diese Gebilde stehen in Zusammenhang mit jüngster Sternentstehung, wobei die meisten mit neu gebildeten jungen Sternsystemen verknüpft sind. Typisch für beide Magellanschen Wolken ist insbeson-

dere eine einzigartige Stichprobe von HII-Regionen, HI-Hüllen, molekularen CO- und H₂-Wolken sowie jungen Sternhaufen und Sternassoziationen, die in Regionen mit jüngster Sternentstehung liegen.

Der Begriff der Sternassoziationen wurde ursprünglich 1947 von Ambartsumian eingeführt, der zeigte, dass es sich dabei um Sternentstehungsgebiete in unserer Galaxis handelt. Extragalaktische Assoziationen sind leicht an ihren massereichen Sternen »frühen Spektraltyps« (O- und B-Sterne) erkennbar, während die stellaren Mitglieder der Assoziationen innerhalb der Milchstraße mit Vorder- und Hintergrundsternen in den Spiralarmen der galaktischen Scheibe, in denen sie gelegen sind, verwechselt werden

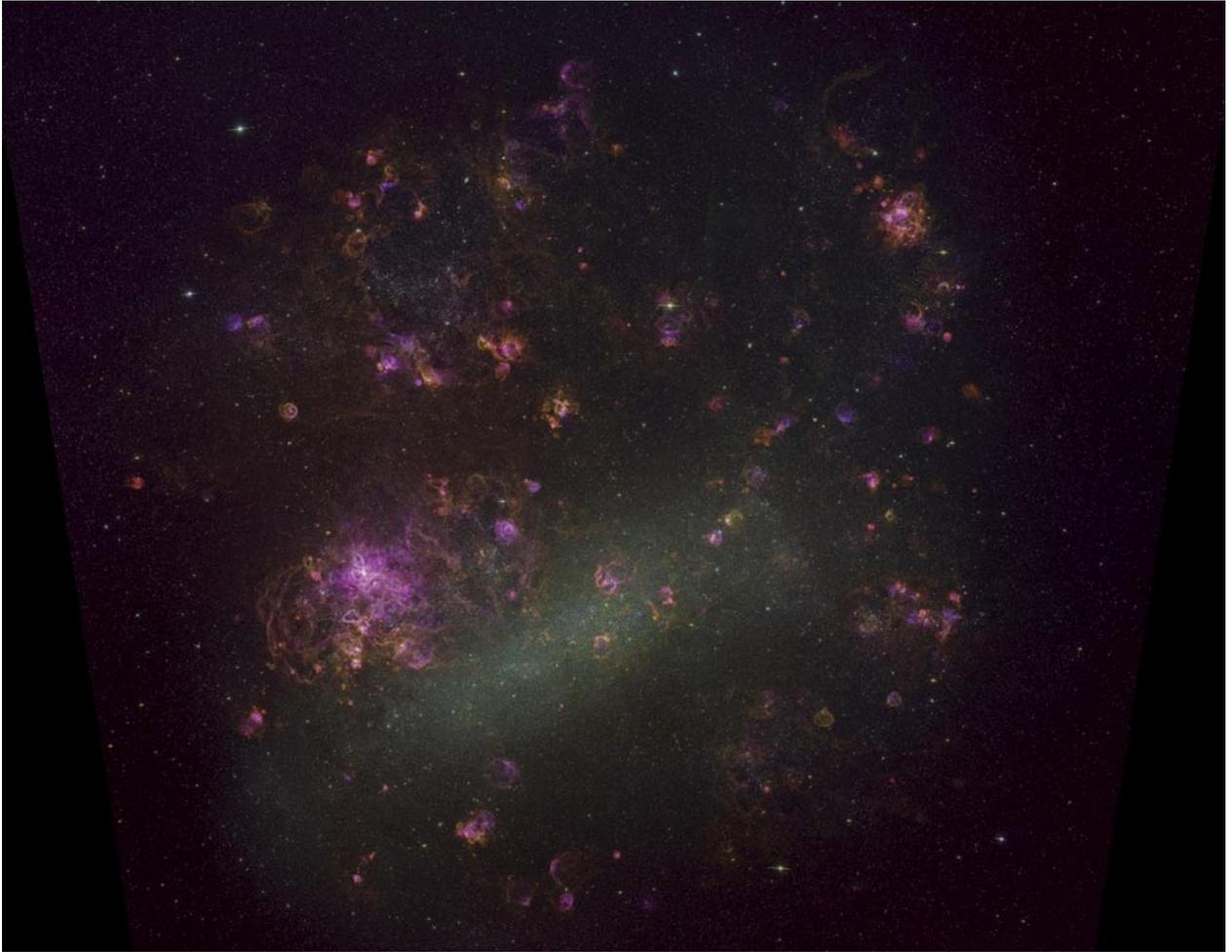


Abb. III.1.2: Mosaikbild vom leuchtenden Gas des interstellaren Mediums in der Großen Magellanschen Wolke, das für den Magellanic Cloud Emission Line Survey (MCELS) aufgenommen wurde. Dieses Bild, das die zentralen 8×8 Quadratgrad der LMC überdeckt, ist ein Farbkomposit, aufgenommen in fünf Wellenlängenbereichen: Emissionslinien

von Wasserstoff ($H\alpha$), zweifach-ionisierter Sauerstoff ($[OIII]$), einfach-ionisierter Schwefel ($[SII]$) sowie roten und grünen Kontinuumbändern. Für dieses Mosaik wurden mehr als 1500 Einzelbilder zusammengesetzt. (Bild: C. Smith, S. Points, the MCELS Team and NOAO/AURA/NSF)

können. Allgemein versteht man unter Sternassoziationen einzelne, lockere Ansammlungen leuchtkräftiger O- und B-Sterne, die in den jüngsten Sternentstehungsgebieten einer Galaxie eingebettet sind. Ihre Abmessungen liegen zwischen denen gewöhnlicher offener Haufen mit wenigen Parsec Durchmesser und einigen zig Parsec. Die stellare Massendichte in diesen Systemen liegt definitionsgemäß unter einem zehntel Sonnenmasse pro Kubikparsec. Photometrische und spektroskopische Untersuchungen junger Sternassoziationen in den Magellanschen Wolken beruhten bislang auf bodengebundenen Beobachtungen, mit denen aber nur der Gehalt an massereichen Sternen bis hinab zu etwa 2 Sonnenmassen (M_{\odot}) untersucht werden kann. Die obere Massengrenze für die massereichen Sterne dieser Systeme liegt größenordnungsmäßig bei $100 M_{\odot}$. Aufgrund ihrer sehr kurzen Lebensdauer sind derartige Sterne typisch für allerjüngste Sternentstehung.

Ihr Vorhandensein weist eindeutig darauf hin, dass die Sternassoziationen der Magellanschen Wolken sehr jung sind, schätzungsweise zwischen 1 und 30 Millionen Jahre alt. Die Strahlung der HII-Regionen an den Orten von Assoziationen ist mit diesen massereichen Sternen verbunden, da diese mit ihren starken Sternwinden und ihrer ionisierenden Strahlung, beobachtbar im ultravioletten Wellenlängenbereich, auf das interstellare Medium ihrer Umgebung einwirken.

Die ursprüngliche Massenfunktion

Der Sternentstehungsprozess ist bestimmt durch die Umwandlung von Gas in Sterne, wobei die neugebildeten Sterne einen ganzen Bereich an Massen umfassen. Es ist äußerst wichtig, die relative Anzahl von Sternen in

verschiedenen Massenbereichen quantitativ zu bestimmen und systematische Änderungen der Verteilung der Sternmassen mit unterschiedlichen Sternentstehungsbedingungen zu verknüpfen. Dies wird es uns ermöglichen, die physikalischen Vorgänge zu verstehen, die in den einzelnen Massenbereichen wirken. Die Verteilung der Sternmassen innerhalb eines bestimmten Raumvolumens in einem Sternsystem zum Zeitpunkt ihres Entstehens nennt man die stellare ursprüngliche Massenfunktion (engl. Initial Mass Function, IMF). Zusammen mit den zeitlichen Veränderungen der Sternentstehungsrate beschreibt die IMF den Gehalt an Sternen einer Galaxie als Ganzes. Die IMF kann durch die logarithmische Ableitung Γ beschrieben werden:

$$\Gamma = \frac{d \lg \xi(\lg m)}{d \lg m}.$$

Hierbei ist $\xi(\lg m)$ die IMF, abgeleitet aus Zählungen der Sterne in gleich großen logarithmischen Massenintervallen, und Γ ist die Steigung, die man aus der linearen Regression zwischen $\lg \xi(\lg m)$ und $\lg m$ ableiten kann. Als Bezugswert für die Steigung Γ der IMF gilt die von Salpeter für die Sonnenumgebung und Sterne mit Massen zwischen 0.4 und 10 M_{\odot} gefundene Steigung $\Gamma = -1.35$.

Die ursprüngliche Massenfunktion im oberen Massenbereich

Bodengebundene Untersuchungen einer großen Stichprobe von Assoziationen in den Magellanschen Wolken ließen darauf schließen, dass die IMF für massereiche Sterne in diesen Systemen mehr oder weniger dieselbe ist und eine Steigung hat, die um einen Wert von $\Gamma \approx -1.5 \pm 0.1$ schwankt. Dieser Wert unterscheidet sich

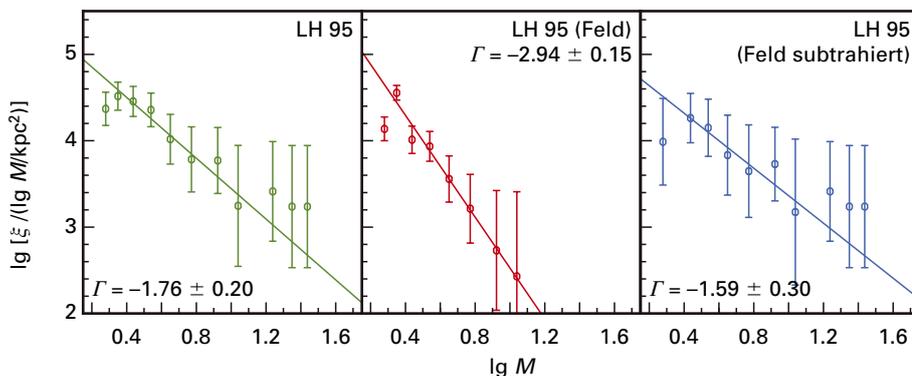
nicht sehr von den Steigungen der IMF typischer junger kompakter Haufen in der Großen Magellanschen Wolke für den gleichen Massenbereich. Somit scheint die IMF für massereiche Sterne in jungen Sternsystemen so ziemlich überall die gleiche zu sein – mit einer typischen Steigung, die sich nicht wesentlich von der von Salpeter gefundenen unterscheidet. Andererseits scheint sowohl in der LMC als auch in der SMC die IMF massereicher Feldsterne abseits jeglicher Sternsysteme steil zu sein, mit einer Steigung $\Gamma \sim -4$, dem gleichen Wert wie er für Feldsterne in der Milchstraße gefunden wird. Allgemein variiert die IMF für massereiche Sterne von einer Region der Galaxie zur anderen. Dies lässt darauf schließen, dass die IMF im Bereich hoher Massen wahrscheinlich stark von Umgebungsbedingungen beeinflusst wird. Ein typisches Beispiel ist die LMC-Assoziation LH 95. Hier wurde insofern ein Gradient der IMF-Steigung beobachtet, als die IMF von Sternen mit Massen zwischen 3 und 10 M_{\odot} vom Zentrum des Systems nach außen steiler wird (Abb. III.1.3). Das deutet darauf hin, dass es einen deutlichen Unterschied zwischen der Population des Systems, dem Feld in seiner Umgebung und dem allgemeinen Feld der LMC gibt. Zudem gibt es Sternassoziationen, die sehr unterschiedliche Steigungen bei der IMF für massereiche Sterne aufweisen, mit Werten zwischen $\Gamma = -1$ und -2 . Diese Variabilität rührt wahrscheinlich von regionalen Unterschieden beim Sternentstehungsprozess her.

Die IMF im unteren Massenbereich

Das Bild von dem Sterngehalt der Assoziationen in den Magellanschen Wolken, das uns bodengebundene Beobachtungen liefern, ist auf Massen oberhalb 2 M_{\odot} beschränkt. Informationen über massearme Mitglieder und die entsprechende IMF in diesen Systemen sind

Abb. III.1.3: Massenfunktion aller Hauptreihensterne im Gebiet der Assoziation LH 95. Die Massenfunktion für sämtliche Sterne innerhalb der Assoziation (Entfernung weniger als 1.2 Bogenminuten von ihrem Zentrum) ist im *linken* Diagramm gezeigt. Die Feldpopulation ist mit eingeschlossen. Die entsprechende Massenfunktion für Sterne im umgebenden Feld ist im *mittleren* Diagramm zu sehen. Hier führt das Fehlen von Sternen

massereicher als 10 M_{\odot} zu einer steileren Massenfunktion. Dies veranschaulicht die radiale Abhängigkeit der Steigung der Massenfunktion, die nach außen steiler wird. Das *rechte* Diagramm zeigt die ursprüngliche Massenfunktion (IMF) der Hauptreihensterne in der Assoziation nach Abzug des Beitrags der Feldsterne. Diese IMF ist vergleichbar mit einer typischen Salpeter-IMF. Aus Gouliermis et al. (2002).



noch immer unvollständig. In Anbetracht der Tatsache, dass die – sehr nahe gelegenen – Magellanschen Wolken die einzigen extragalaktischen Objekte sind, in denen Sterne mit Massen unter einer Sonnenmasse mit den heute verfügbaren modernen Instrumenten beobachtet werden können, wird diese Lücke erst jetzt langsam gefüllt, und zwar durch unsere Untersuchungen, die auf Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE (HST) beruhen. Unsere Ergebnisse eröffnen eine neue Debatte, indem sie wichtige Fragen wie diese ansprechen: (1) Gibt es in Sternassoziationen massearme Sterne, und wenn ja, welche Steigung hat die IMF für massearme Sterne in diesen Systemen? (2) Welches wäre die niedrigste beobachtbare Masse? Gibt es einen bestimmten untersten Massenwert, unterhalb dessen die IMF von Assoziationen in den Magellanschen Wolken gekappt ist? (3) Welche funktionale Abhängigkeit hat die IMF für niedrige Massen in den Magellanschen Wolken? Flacht sich die IMF für Massen unter einer Sonnenmasse ab? (4) Hat die IMF also über ihren gesamten nachweisbaren Massenbereich eine konstante Steigung oder nicht? Und schließlich: (5) Welche Steigung hat die IMF des unteren Massenbereichs im allgemeinen Feld, und welche Unterschiede bestehen zu der junger

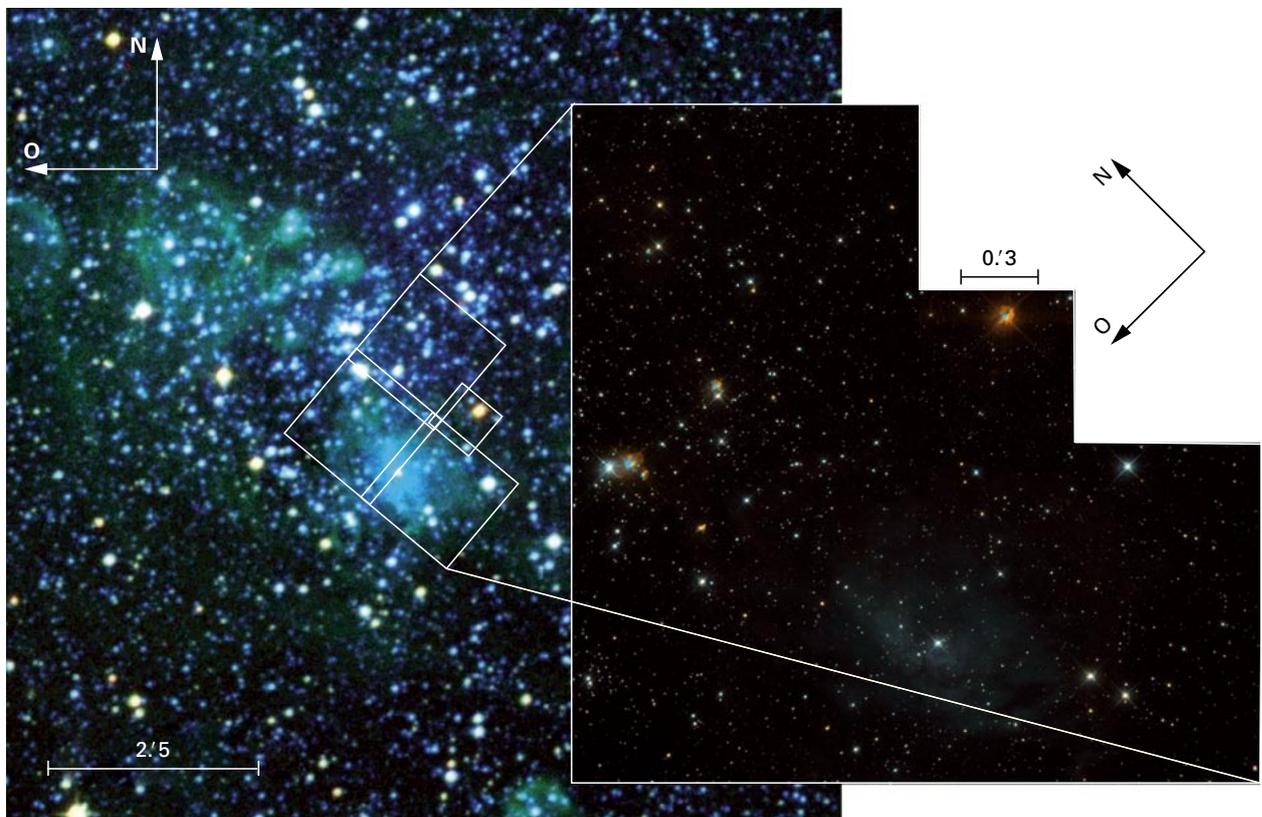
Sternsysteme? Hängt die Steigung der IMF irgendwie von der Umgebung ab, in der die Sternentstehung stattfindet? Daten von Weltraumbeobachtungen der Magellanschen Wolken sind im Datenarchiv des HST verfügbar. Wir haben solche Beobachtungen der LMC untersucht und festgestellt, dass sich in der Tat massearme Sterne in der Nachbarschaft von Assoziationen in den Magellanschen Wolken befinden. Damit war es uns möglich, die IMF für Sterne mit Massen bis hinab zu einer Sonnenmasse abzuleiten.

Sternassoziationen in der Großen Magellanschen Wolke, untersucht anhand von HST-Beobachtungen

Die Magellanschen Wolken sind während des gesamten erfolgreichen Einsatzes des HST eingehend beobachtet worden. Diese Beobachtungen werden hauptsächlich mit einem der erfolgreichsten Instrumente an Bord des HST durchgeführt, der Wide-Field Planetary Camera 2 (WFPC2). Dieses im UV- und im sichtbaren Bereich arbeitende zweidimensional abbildende Photometer wurde 1993 im HST installiert. Es befindet sich im Zentrum der Fokalebene des HST und überdeckt

Abb. III.1.4: Ein Kompositbild aus digitalisierten fotografischen Beobachtungen der Region um die Sternassoziation LH 52 (NGC 1948) in der Großen Magellanschen Wolke. Das umrissene Gebiet zeigt das Feld, das mit der Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) des Weltraumteleskops HUBBLE beobachtet wurde; *rechts* eine Detailaufnahme des Gebiets. Die Daten

stammen aus dem HST-Datenarchiv. In diesem Gebiet wurden mit dem HST mehr als 4000 Sterne nachgewiesen, im Gegensatz zu den nur 220 Sternen, die zuvor mit bodengebundenen CCD-Aufnahmen gefunden worden waren. Dieser Vergleich veranschaulicht den Gewinn bei der Photometrie sternreicher Felder in der LMC durch das Weltraumteleskop HUBBLE.



den Wellenlängenbereich von 1150 bis 10 500 Ångström (Å). Die am häufigsten mit dieser Kamera beobachteten Objekte in den Magellanschen Wolken waren junge Sternhaufen, das allgemeine Feld der Galaxien und das äußerst aktive Sternentstehungsgebiet von 30 Doradus in der LMC. Obwohl Sternassoziationen in den Magellanschen Wolken zu den geeignetsten Zielen bei der Suche nach extragalaktischen massearmen Sternen zählen, wurden sie leider nur unzureichend mit WFPC2 beobachtet. Und nur sehr wenige der beobachteten Felder überdeckten auch einige Teile von Assoziationen in der LMC. Unsere Analyse von WFPC2-Beobachtungen zweier Sternfelder am Rande der übergroßen Hülle LMC 4 zeigten jedoch, dass HST-Beobachtungen einzigartige Informationen über die lichtschwachen Sternpopulationen von Assoziationen in den Magellanschen Wolken liefern können. Das erste Feld überdeckt den südwestlichen Teil der großen Assoziation LH 52 und liefert eine repräsentative Stichprobe der Sternpopulation einer LMC-Assoziation (Abb. III.1.4). Das zweite Feld liegt in dem leeren Gebiet zwischen zwei kleineren Assoziationen (LH 54 und LH 55) und repräsentiert die Sternpopulation des allgemeinen Hintergrundfelds der LMC. Wir bezeichnen es als das LH 55-Feld. Diese Beobachtungen erreichen eine Nachweisgrenze, die fast 6 Größenklassen tiefer liegt als die zuvor vom Boden aus durchgeführten, und sie umfassen eine große Zahl schwacher Sterne bis hinab unter einer Sonnenmasse. Insbesondere sind im WFPC2-Feld des LH 52-Gebietes mehr als 4000 Sterne zu sehen, während übliche bodengebundene CCD-Aufnahmen des gleichen Feldes nur etwa 220 der hellsten Sterne zeigten.

Die große Zahl der beobachteten massearmen Sterne mit Massen zwischen 1 und $2 M_{\odot}$ in beiden Feldern scheint ein charakteristisches Merkmal der allgemeinen Feldpopulation der LMC zu sein. Die (heutige) Massenfunktion dieser Sterne ist ihrer ursprünglichen Massenfunktion (IMF) sehr ähnlich, da sich massearme Sterne nur sehr langsam entwickeln. Man geht davon aus, dass innerhalb der Lebensdauer der allgemeinen Feldsterne der LMC keine Entwicklungseffekte stattgefunden haben, die die ursprüngliche Masse der Sterne

verändert und sie zum Verlassen der Hauptreihe gezwungen haben. Diese Zeitskala ergibt sich aus den entsprechenden Farben-Helligkeits-Diagrammen (engl. color-magnitude diagram, CMD) des LH 52-Gebiets und des LH 55-Felds. In dieser Untersuchung wird erstmals gezeigt, dass die heutige Massenfunktion (engl. present-day mass function, PDMF) der Hauptreihensterne geringer und mittlerer Masse in der LMC nicht durch ein einzelnes Potenzgesetz dargestellt werden kann: Für Massen unter etwa $2 M_{\odot}$ ist sie steiler, mit einer Steigung zwischen -4 und -6 , während für Massen über $2 M_{\odot}$ die Steigung der Massenfunktion flacher ist, zwischen -1 und -2 (Abb. III.1.5). Das bedeutet, dass der Beitrag der massearmen Hauptreihensterne zur Massenfunktion eines Systems höher ist als erwartet, wenn man annimmt, dass die Massenfunktion für Massen unter etwa $2 M_{\odot}$ die gleiche Steigung hat. Die Massenfunktion der Sterne im generellen Hintergrundfeld der LMC dient dazu, den Beitrag des Hintergrundfelds zu den in dem beobachteten Gebiet der Assoziation LH 52 gefundenen Sternen zu korrigieren. Nach dieser Korrektur wird die von den Feldsternen befreite Massenfunktion der mit WFPC2 in LH 52 gefundenen Hauptreihensterne konstruiert. Diese PDMF umfasst nur die Sterne, die Mitglieder der Assoziation sind, und stellt daher die IMF des Systems dar, da dieses als sehr jung angesehen wird. Aufgrund der Beobachtungsbeschränkungen im LH 55-Feld war ihre Rekonstruktion nur bis hinab zu Massen von etwa $1 M_{\odot}$ möglich.

Es zeigt sich, dass die Steigung dieser IMF vergleichbar, vielleicht ein wenig flacher ist als eine typische Salpeter IMF ($\Gamma \approx -1.12 \pm 0.24$) im Massenbereich zwischen 1 und $9 M_{\odot}$. Aus früheren bodengebundene CCD-Aufnahmen von Hill et al. konnte die IMF derselben Assoziation für Sterne mittlerer und hoher Massen (zwischen 3 und $18 M_{\odot}$) konstruiert werden. Die Kombination unserer Ergebnisse über den unteren Massenbereich der IMF, die auf HST-Beobachtungen beruhen, mit der IMF im oberen Massenbereich, die aus bodengebundene Bildaufnahmen stammt, ermöglichte es zum ersten Mal, die IMF einer jungen LMC-Assoziation über ihren gesamten beobachteten Massenbereich von 1 bis $18 M_{\odot}$ zu konstruieren

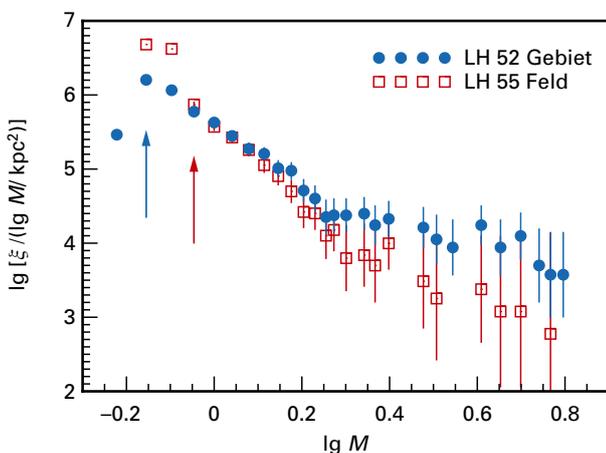


Abb. III.1.5: Massenfunktion der Hauptreihensterne im LH 52-Gebiet und im LH 55-Feld, abgeleitet aus HST/WFPC2-Beobachtungen. Die Massenfunktion wurde mit Hilfe der aus theoretischen Sternentwicklungsmodellen stammenden Masse-Leuchtkraft-Beziehung konstruiert. Die Sterne wurden in (zehner-)logarithmischen Massenintervallen gezählt. Die Zahlen wurden im Hinblick auf Unvollständigkeit korrigiert und auf eine Fläche von einem Quadratkiloparsec normiert. Die Fehler spiegeln die statistischen Unsicherheiten wider. Die Pfeile markieren die 50-Prozent-Vollständigkeitsgrenze beim Nachweis von Sternen im LH 52-Gebiet (*blauer Pfeil*) und im LH 55-Feld (*roter Pfeil*). Die Massenfunktion ändert ihre Gestalt für Sterne mit Massen unter $2 M_{\odot}$.

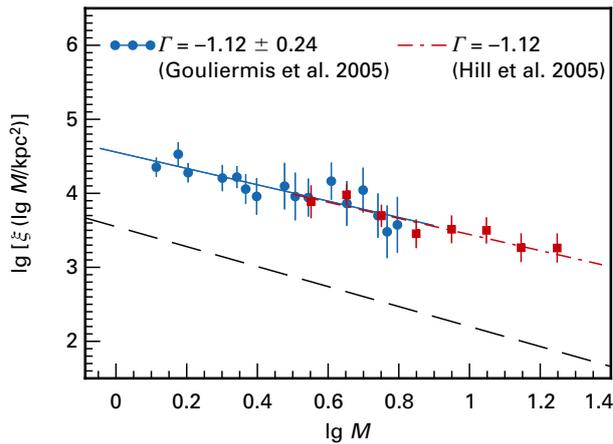


Abb. III.1.6: Die ursprüngliche Massenfunktion der Assoziation LH 52 hinab zu etwa $1 M_{\odot}$ (HST/WFPC2-Beobachtungen). Die Ergebnisse von Untersuchungen von Sternpopulationen sowohl hoher als auch niedriger Massen wurden kombiniert, um erstmals die IMF über den gesamten beobachteten Massenbereich eines jungen Sternsystems in den Magellanschen Wolken bis hinauf zu 18 Sonnenmassen zu konstruieren. Wie sich zeigt, ist die IMF der Assoziation über den gesamten Massenbereich hinweg konstant und hat eine Steigung die vergleichbar, aber ein wenig flacher ist als eine typische Salpeter-Massenfunktion (zum Vergleich hier *gestrichelt* dargestellt).

(Abb. III.1.6). Wie sich zeigt, ist ihre Steigung über den ganzen Massenbereich konstant. Dies weist klar auf eine »oberlastige« IMF hin, die gut durch ein einzelnes Potenzgesetz mit der Steigung $\Gamma \approx -1.1$ dargestellt werden kann. Demzufolge wird die Steigung der PDMF für die Feldsterne der LMC von der massearmen Population bestimmt, die IMF der Assoziation LH 52 dagegen von ihren massereicheren Mitgliedern. Das deutet klar darauf hin, dass die lokalen Bedingungen für Sternentstehung in LMC-Assoziationen die Bildung massereichere Sterne begünstigt. Bis hinab zur beobachteten Grenze von etwa einer Sonnenmasse fand sich in unseren Daten weder ein Hinweis auf ein Abflachen der IMF zum massearmen Bereich hin noch eine Kappung der IMF bei niedrigen Massen.

Das Feld der Großen Magellanschen Wolke, untersucht anhand von HST-Beobachtungen.

Der erste Hinweis, dass für Feldsterne der LMC die IMF zum unteren Massenbereich hin flacher wird, ist kürzlich von uns vorgelegt worden. In dieser Studie wird eine große Zahl archivierter photometrischer HST/WFPC2-Daten eines Gebiets verwendet, das westlich des Balkens der LMC liegt. Dieses Gebiet ist typisch für das allgemeine stellare Hintergrundfeld der inneren Scheibe der LMC. Die Daten umfassen sechs überlappende WFPC2-Felder, erreichen Helligkeiten bis hinab

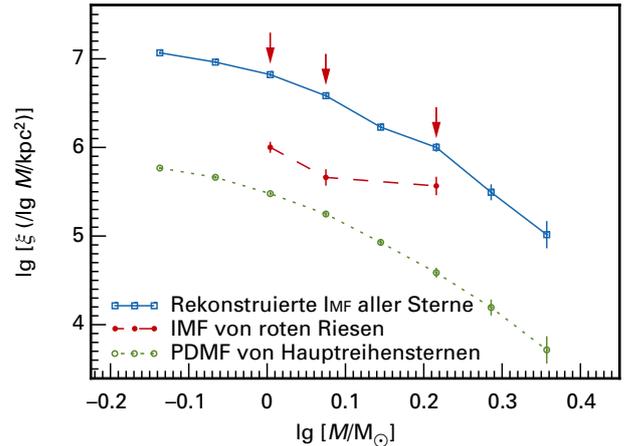


Abb. III.1.7: Massenfunktion der Sterne im allgemeinen Feld der Großen Magellanschen Wolke westlich ihres Balkens, beobachtet mit HST/WFPC2. Die heutige Massenfunktion (PDMF) der Hauptreihensterne ist als grüne gepunktete Linie eingezeichnet. Für die Rekonstruktion der ursprünglichen Massenfunktion (IMF) dieser Sterne wurden mehrere Annahmen über die Sternentstehungsgeschichte der LMC gemacht. Die rote gestrichelte Linie stellt die IMF der Sterne des Rote-Riesen-Astes (RGB) dar, die unter Berücksichtigung der Entwicklungseffekte dieser Sterne konstruiert wurde. Die geringe Anzahl der RGB-Sterne in dem Gebiet und ihr enger Massenbereich bewirken nur kleine Veränderungen in den drei spezifischen Massenintervallen (*rote Pfeile*); die IMF zeigt einzig die Tendenz, in Richtung der Grenze von etwa $1.6 M_{\odot}$ ein wenig flacher zu werden. Die IMF sämtlicher Sterne (sowohl der Roten Riesen als auch der Hauptreihensterne) ist als blaue durchgezogene Linie eingezeichnet. Sie wurde durch die Kombination der IMF von Hauptreihen- und RGB-Sternen erhalten. Alle gezeigten Massenfunktionen sind zur Vermeidung von Überschneidungen gegeneinander verschoben.

zu $V = 25$ mag, und liefern eine große Stichprobe von mehr als 80000 Sternen. Diese Daten ermöglichten es uns, die heutige Massenfunktion (PDMF) der Hauptreihensterne im Feld der LMC bis hinab zu etwa $0.7 M_{\odot}$ genau zu bestimmen. Diese Massenfunktion ist identisch mit der ursprünglichen Massenfunktion (IMF) für Sterne mit Massen unter etwa $1 M_{\odot}$, da diese noch keine Entwicklungseffekte durchlaufen haben, welche die ursprünglichen Massen dieser Sterne verändern oder dazu führen, dass sie die Hauptreihe verlassen.

Die höchste in den Daten gefundene Masse ist etwa 2 Sonnenmassen. Wie sich zeigt, hat die PDMF von Hauptreihensternen bis hinauf zu dieser Grenze im LMC-Feld keine gleichmäßige Steigung über den gesamten beobachteten Massenbereich. Das bedeutet, dass die Steigung der PDMF des LMC-Feldes nicht einem einzelnen Potenzgesetz folgt. Dies stimmt mit dem überein, was wir bereits für die allgemeine Hintergrundpopulation im Falle des LH 55-Feldes und des LH 52-Gebiets festgestellt haben. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die PDMF des Feldes durch ein Multi-Potenzgesetz dargestellt werden

kann. Ihre Steigung ändert sich bei etwa $1 M_{\odot}$, wo sie flacher wird für Sterne mit niedrigeren Massen bis hinab zur kleinsten beobachteten Masse von $0.7 M_{\odot}$. Für noch kleinere Massen zeigen sich deutliche Anzeichen einer weiteren Abflachung. Wir haben statistisch nachgewiesen, dass für Sterne unter $1 M_{\odot}$ die IMF eine Steigung $\Gamma \approx -2$ hat, mit einer Salpeter-ähnlichen Steigung $\Gamma \approx -1.4$ für Sterne im Massenbereich zwischen 0.7 und $0.9 M_{\odot}$. Für massereichere Sterne wird die Hauptreihen-PDMF mit $\Gamma \approx -5$ dagegen viel steiler. Die Hauptreihen-Leuchtkraftfunktion (LF) des beobachteten Feldes stimmt sehr gut mit der LF der Galaxis überein, wie zuvor schon festgestellt. Unter Berücksichtigung mehrerer Annahmen über Entwicklungseffekte, die im Laufe der Zeit den Sterngehalt des beobachteten Feldes verändert haben sollten, haben wir seine IMF für den gesamten beobachteten Massenbereich ($0.7 - 2.3 M_{\odot}$) qualitativ rekonstruiert. Dabei stellten wir fest, dass die Anzahl der beobachteten entwickelten Sterne nicht ausreicht, um die Form der IMF wesentlich zu beeinflussen, so dass diese fast identisch mit der beobachteten PDMF ist (Abb. III.1.7). Tiefer gehende Beobachtungen würden mit Sicherheit eine bessere statistische Stichprobe mit niedrigeren Massen liefern, mit der dieses Ergebnis verifiziert werden könnte.

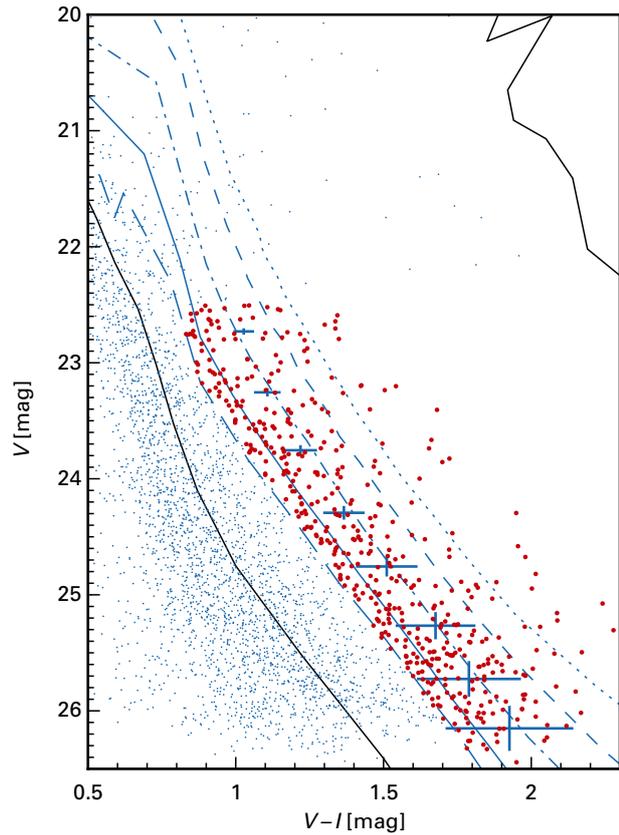
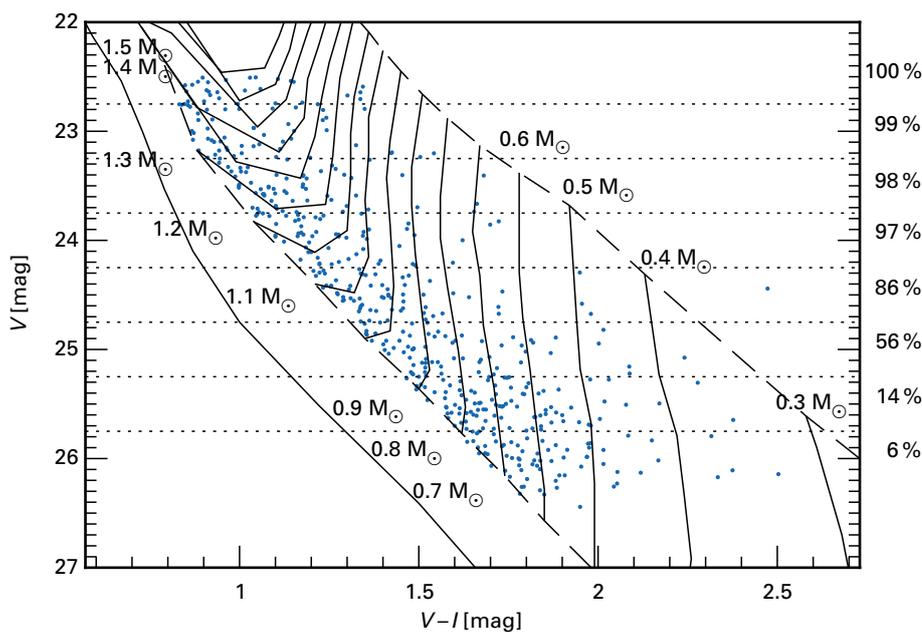


Abb. III.1.8: oben rechts und unten: Farben-Helligkeits-Diagramm der Sterne der unteren Hauptreihe in dem von WFPC2 beobachteten Feld der Assoziation LH 52. Im rechten Diagramm sind auch isochrone Vor-Hauptreihen-Modelle für die Alter 1.5, 2.5, 5, 10 und 15 Millionen Jahre und für die Metallhäufigkeit der LMC als blaue gestrichelt-gepunktete Linien eingetragen. Sie zeichnen sehr gut die entdeckte sekundäre schwache, rote Sequenz nach, die weder mit einer Doppelsternsequenz noch einer Verbreiterung der Hauptreihe aufgrund photometrischer Fehler zusammenzufallen scheint. Die Kandidaten für massearme Vor-Hauptreihensterne sind durch dicke, rote Punkte gekennzeichnet.

Die Modelle der Anfangshauptreihe und Geburtslinie sind als dicke, schwarze Linien eingezeichnet. Die waagrecht blauen Linien rechts geben typische mittlere photometrische Fehler in der Farbe an. Im unteren Diagramm sind Entwicklungswege für Vor-Hauptreihensterne mit Massen bis hinab zu $0.3 M_{\odot}$ über das Diagramm der Vor-Hauptreihenandidaten gezeichnet worden. Aus diesen Wegen lässt sich die entsprechende Masse für jeden Stern ablesen, sodass mit ihrer Hilfe die IMF dieser Sterne konstruiert werden kann. Die entsprechende Masse ist neben jedem Entwicklungsweg vermerkt. Rechts ist auch die Nachweiseffizienz (in %) in jedem Helligkeitsbereich (Vollständigkeit) angegeben.



Die Vor-Hauptreihen-Population von Assoziationen in den Magellanschen Wolken.

Massearme Sterne (mit Massen unter $1 M_{\odot}$) sind von großer Bedeutung für die Lösung der grundlegendsten Probleme der Sternentstehung, da sie eine Momentaufnahme der fossilen Sternentstehungsgeschichte riesiger Molekülwolkenkomplexe liefern. In großräumigen Durchmusterungen wurden Hunderte massearme Mitglieder naher OB-Assoziationen in der Milchstraße identifiziert, wobei sich herausstellte, dass überall dort, wo jüngst massereiche Sterne entstanden sind, auch massearme Sterne existieren. Die massearmen Sternpopulationen galaktischer OB-Assoziationen gelten als Schlüssel für die Erforschung grundlegender Fragen zur Entstehung und frühen Entwicklung von Sternen. Die Form der IMF im unteren Massenbereich und die Frage, ob OB-Assoziationen massearme Populationen besitzen, die der Feld-IMF der Galaxis entsprechen, oder ob ihre IMF gekappt ist, sind immer noch umstritten. Infrarotuntersuchungen haben starke Hinweise auf primordiale Akkretionsscheiben um massearme Sterne geliefert, die sich mit verschiedenen Zeitskalen von 1 bis 20 oder sogar 30 Millionen Jahren auflösen. Dabei handelt es sich um Sterne im »Kindesalter«, die sich noch nicht auf der Hauptreihe befinden und daher Vor-Hauptreihensterne genannt werden. Gibt es solche Sterne in den Assoziationen der Magellanschen Wolken? Eine Antwort auf diese Frage können nur Beobachtungen mit Instrumenten geben, die ein hohes Auflösungsvermögen besitzen.

Unsere auf HST-Beobachtungen gestützte Untersuchung der Assoziation LH 52 offenbarte eine massearme Sternpopulation, die für die Vor-Hauptreihenpopulation der Assoziation gehalten wird. Dies ist das erste Mal, dass solche Sterne in der Umgebung einer extragalaktischen Assoziation gefunden wurden. Die Vor-Hauptreihenkandidaten bilden eine sekundäre rote Sequenz, die vom Abzweigpunkt bis hinab zur Nachweisgrenze fast parallel zur unteren Hauptreihe verläuft, wie im Farben-Helligkeits-Diagramm für LH 52 zu sehen ist (Abb. III.1.8). Fast 500 Vor-Hauptreihenkandidaten wurden ausgewählt. Vor-Hauptreihen-Entwicklungsmodelle mit Altern zwischen 1.5 und 15 Millionen Jahren zeichnen den Ort dieser Sterne im Farben-Helligkeits-Diagramm sehr gut nach. Dies ist ein erster Hinweis, dass diese Sterne tatsächlich zur Vor-Hauptreihe gehören. Der Vergleich des Farben-Helligkeits-Diagramms der Sterne

im LH 52-Gebiet mit denen verschiedener Feldgebiete der LMC zeigte mit hoher statistischer Sicherheit, dass diese Sterne ausschließlich zur Assoziation gehören und kein gemeinsames, allgemeines Merkmal der LMC sind. Dies bestärkt die Vermutung, dass es sich bei der sekundären roten Sequenz um Vor-Hauptreihensterne in der Assoziation handelt, und nicht um massearme Sterne auf der Hauptreihe der Assoziation. Zudem stimmt die Lage der Vor-Hauptreihenkandidaten im Farben-Helligkeits-Diagramm fast exakt mit den Orten massearmer Vor-Hauptreihensterne überein, die kürzlich in der galaktischen Assoziation Orion OB1 entdeckt wurden. Diese Sterne wurden als T-Tauri-Sterne mit Massen unter 2 Sonnenmassen identifiziert. Die Übereinstimmung der Orte massearmer Vor-Hauptreihensterne im Farben-Helligkeits-Diagramm einer galaktischen Assoziation mit der beobachteten Sequenz von Vor-Hauptreihenkandidaten in unserem Farben-Helligkeits-Diagramm von LH 52 bestärkt uns zusätzlich in unserer Überzeugung, dass es sich bei dieser Sequenz um die Vor-Hauptreihenpopulation der Assoziation handelt. Überdies zeigt sie, dass die Vor-Hauptreihensterne in LMC-Sternassoziationen ein galaktisches Gegenstück besitzen, wahrscheinlich weil sie von gleicher Natur sind wie die Vor-Hauptreihensterne in Assoziationen unseres Milchstraßensystems.

Wir haben untersucht, wie die anhand theoretischer Entwicklungswege im Farben-Helligkeits-Diagramm bestimmten Massen der Vor-Hauptreihenkandidaten in LH 52 verteilt sind (Abb. III.1.8). Diese Verteilung stellt die ursprüngliche Massenfunktion (IMF) dieser Sterne dar. Aufgrund der Nachweisgrenze für Sterne mit sehr geringen Massen (die Nachweeffizienz pro Helligkeitsbereich ist in Abb. III.1.8 in Prozent angegeben) konnte die IMF nur für Sterne bis hinab zu etwa $0.8 M_{\odot}$ konstruiert werden. Da wir zudem die oberste Helligkeitsgrenze der Vor-Hauptreihensterne strikt so gewählt haben, dass sie deutlich unterhalb des Abzweigpunktes liegt, ist die Anzahl der gezählten Sterne in den höheren Massenbereichen ebenfalls unvollständig. Die verwendbare obere Massengrenze liegt somit bei etwa $1.4 M_{\odot}$. Die IMF für den Massenbereich zwischen 0.8 und $1.4 M_{\odot}$ hat eine Steigung von $\Gamma \sim -1.26$, was einer typischen Salpeter-IMF sehr nahe kommt. Vollständigere Daten für Vor-Hauptreihensterne in Assoziationen der Magellanschen Wolken über einen größeren Massenbereich hinweg werden sicherlich zu einem vollständigeren Bild der IMF des gesamten Massenbereichs solcher Objekte führen.

Abb. III.1.9: Diese Aufnahme mit der ACS-Kamera des Weltraumteleskops HUBBLE zeigt eines der dynamischsten und detailreichsten Sternentstehungsgebiete in der Kleinen Magellanschen Wolke. Das Bild ist zusammengesetzt aus Aufnahmen, die mit dem Weitfeld-Kanal der ACS bei drei Wellenlängen gewonnen wurden: V, I und H α . Im Zentrum des Gebiets liegt die strahlend helle Sternassoziation NGC

346. Sie ist umgeben von einer Struktur aus bogenförmigen, ausgefranzten Filamenten mit einer deutlichen Kammlinie, in der junge Vor-Hauptreihensterne liegen. Solche hochaufgelösten Beobachtungen der Magellanschen Wolken werden unser Wissen über ihre jüngsten Sternentstehungsprozesse erheblich erweitern. Bildquelle: NASA, ESA und A. Nota (ESA/STScI)







17.4 Lichtjahre
20 Bogensekunden

Abb. III.1.10: Dieses vom Weltraumteleskop HUBBLE mit der ACS-Kamera aufgenommene Bild des Sternentstehungsgebiets LH 95 in der Großen Magellanschen Wolke wurde erstmals auf der Generalversammlung der Internationalen Astronomischen Union 2006 in Prag vorgestellt. Dank seiner überragenden Bildschärfe erfasst es eine große Zahl massearmer junger

Sterne, die mit den hellen, massereichen Sternen koexistent sind. Dieser Befund bedeutet eine drastische Veränderung unserer bisherigen Vorstellung von den jungen Sternassoziationen in den Magellanschen Wolken. Bildquelle: NASA, ESA, D. A. Guliermis (MPIA).

Zukunftsaussichten

Unsere Untersuchungen anhand von HST/WFPC2-Beobachtungen haben gezeigt, welcher wissenschaftlicher Nutzen durch räumlich hochaufgelöste 2D-Photometrie mit Hilfe des neuesten Instruments an Bord des HST, der Advanced Camera for Surveys (»Hochentwickelte Kamera für Durchmusterungen«, ACS), erzielt werden könnte. Diese Kamera, die im März 2002 am HST installiert wurde, steigert die Nachweiseffizienz des HST um das Zehnfache. Sie besteht aus drei elektronischen Kameras und einem Satz an Filtern, die Licht vom Ultraviolett- bis zum Nahinfrarotbereich (1200–10000 Å) nachweisen. Tiefe Beobachtungen von Assoziationen in den Magellanschen Wolken mit HST/ACS werden mit Sicherheit unser Wissen über jüngste Sternentstehungsvorgänge in der dortigen Umgebung erweitern. Obwohl Sternassoziationen in den Magellanschen Wolken typischerweise eine lockere Struktur besitzen und es bei photometrischen Untersuchungen somit keine Konfusionsprobleme bei der Identifikation einzelner heller Sterne (»Gedränge-Effekte«) gibt, ist für die Untersuchung schwächerer Sterne eine hohe räumliche Auflösung unumgänglich. Das hohe Auflösungsvermögen der ACS ist nötig, um Gedränge-Effekte bei Sternen bis hinab zu etwa einer halben Sonnenmasse (entsprechend einer scheinbaren Helligkeit von $V \approx 27$ mag) zu vermeiden. Zudem haben Sternassoziationen Durchmesser in der Größenordnung von einigen zig Parsec, sodass Weitfeldaufnahmen nötig sind, um eine Sternassoziation als Ganzes mitsamt ihres Umgebungsfeldes beobachten zu können. Auch dies ist mit der ACS möglich.

Aufgrund dieser Argumente und unserer Ergebnisse mit der WFPC2-Kamera haben wir HST/ACS-Beobachtungen der LMC-Assoziation LH 95 für den HST-Zyklus 14 beantragt und bewilligt bekommen. Eine Reihe von Tatsachen machen dieses Objekt zu einem geeigneten Ziel für die Untersuchung der ursprünglichen Massenfunktion und der jüngsten Sternentstehungsprozesse in der Großen Magellanschen Wolke. Unser Programm (HST Program 10566) beinhaltet ein Projekt über jüngste Sternentstehung in den Magellanschen Wolken, das in Zusammenarbeit mit Kollegen von der Sternwarte Leiden und der Eso durchgeführt wird. Ähnliche Beobachtungen, die mit der HST/ACS-Kamera von NGC 346 gemacht wurden, der hellsten sternbildenden Assoziation in der Kleinen Magellanschen Wolke, haben jüngst eine reiche

Population an massearmen Vor-Hauptreihensternen in diesem Gebiet zum Vorschein gebracht. Diese Sterne mit Massen zwischen 0.6 und 3 Sonnenmassen sind wahrscheinlich das Produkt eines einzelnen Sternentstehungsereignisses vor 3 bis 5 Millionen Jahren. Sie scheinen am stärksten im Hauptteil der Assoziation konzentriert zu sein, sind aber auch über ein rund 45 Parsec großes Gebiet verteilt (Abb. III.1.9). Diese im HST-Datenarchiv verfügbaren Beobachtungsdaten enthalten eine große Stichprobe massereicher und massearmer Sterne und überdecken ein etwa 5 Bogenminuten großes Feld.

Der Beitrag der massearmen Feldsterne zur ursprünglichen Massenfunktion einer Assoziation ist so wichtig, dass die Subtraktion des Feldes eine der größten Unsicherheiten bei der Bestimmung des IMF darstellt. Daher sind Beobachtungen des allgemeinen LMC-Feldes ebenso nötig wie die des Systems selbst. Folglich wurden während 10 Orbits zwei Felder, eines zentriert auf LH 95 und eines auf das allgemeine Feld (etwa 75 Parsec westlich des ersten), mit der ACS im Weitfeld-Modus mit den V- und I-äquivalenten ACS-Filtern (F555W und F814W) beobachtet. Parallele Beobachtungen mit NICMOS sollen uns helfen, eine möglicherweise vorhandene Vor-Hauptreihenpopulation in dem Gebiet zu kennzeichnen. Wir erwarten, mehrere 10000 massearme Hauptreihen- und Vor-Hauptreihensterne bis hinab zu etwa $0.5 M_{\odot}$ zu finden, die uns ein klares Bild der subsolaren IMF in einer sternbildenden Assoziation der LMC liefern werden. Wir werden das große Gesichtsfeld und das hohe Auflösungsvermögen der ACS-Kamera nutzen, indem wir sowohl die archivierten Daten über NGC 346 verwenden, als auch unser eigenes, kürzlich erhaltenes Bild von LH 95 (Abb. III.1.10), um den unteren Massenbereich der ursprünglichen Massenfunktion und die jüngste Sternentstehung in Assoziationen der Großen sowie der Kleinen Magellanschen Wolke zu untersuchen. Mit ziemlicher Sicherheit werden solche tiefen Beobachtungen die Vor-Hauptreihenpopulation dieser Systeme sichtbar machen. Und zusammen mit hochaufgelösten bodengebundenen Beobachtungen mit modernsten Nahinfrarot-Detektoren wird es möglich sein, die Eigenschaften der Vor-Hauptreihensterne und anderer sich gerade bildender stellarer Objekte zu bestimmen und ihre ursprüngliche Massenfunktion zu untersuchen. Dies würde ein völlig neues Forschungsfeld über die Magellanschen Wolken eröffnen.

*(Dimitrios A. Gouliermis,
Wolfgang Brandner, Thomas Henning)*

III.2 Strahlungstransport – Bindeglied zwischen Simulation und Beobachtung

Fast alle Informationen über die Objekte im Kosmos erhalten wir durch Analyse der Strahlung, die wir von ihnen empfangen. Aus diesem Grunde könnte man erwarten, dass die Berechnung des Transportes der Strahlung innerhalb des Objektes und im interstellaren Medium zu den längst gelösten Problemen der Astrophysik gehört. Überraschenderweise ist das Gegenteil der Fall: Von den zahlreichen Prozessen, die in der Astrophysik wichtig sind, ist der Strahlungstransport eines der am schwierigsten zu lösenden Probleme.

Das MPIA gehört zu den wenigen Instituten weltweit, an denen mit Programmen gearbeitet wird, die der Strahlung selbst in komplexen dreidimensionalen Strukturen folgen können. Dies wird besonders wichtig bei Objekten, die von Gas- und Staubhüllen umgeben sind – etwa sich bildenden und jungen Sternen, Trümmerscheiben um Hauptreihensterne, in denen sich möglicherweise Planeten bilden, oder auch Schwarze Löcher in galaktischen Kernen.

Die sieben Dimensionen des Strahlungstransportes

Sternentstehung beginnt nach heutigem Verständnis mit dem gravitativen Kollaps kalter Molekülwolkenkerne. Aufgrund der Erhaltung des Drehimpulses flachen die Verteilungen um den sich bildenden Protostern ab und bilden in späteren Phasen zirkumstellare Scheiben. Um der Entwicklung vom Molekülwolkenkern bis zum fertigen Stern zu folgen, sind aufwendige Simulationen nötig, in denen die Bewegung des Gases und Staubes mit Hilfe magneto-hydrodynamischer Rechnungen verfolgt wird. Hierbei spielt der Strahlungstransport eine wichtige Doppelrolle: Zum einen transportiert die Strahlung Energie durch die Struktur und trägt so zu ihrer Heizung oder Kühlung bei, zum anderen kann deren Erscheinungsbild bei einer bestimmten Wellenlänge nur aus der Berechnung des Strahlungstransportes ermittelt werden.

Dennoch wurde der Strahlungstransport bisher in den Simulationen vernachlässigt oder stark vereinfacht berechnet. Der Grund dafür liegt in der hohen Dimensionalität des Problems: Das Strahlungsfeld ist nicht nur eine Funktion des Raumes und der Zeit, sondern hängt auch noch von der Richtung und der Wellenlänge ab. Damit hat es drei Dimensionen mehr als die anderen physikalischen Größen wie Dichte oder Magnetfeld. Entsprechend würde eine Simulation, die die Magnetohydrodynamik und den Strahlungstransport gleichermaßen korrekt berechnet, fast alle Rechenzeit auf den Strahlungstransport verwenden.

Bei genäherter Berücksichtigung des Strahlungstransportes wird zumindest der Transport der mittleren Energie durch das System korrekt berechnet. So wird z.B. im Rahmen der »fluss-limitierten Diffusion« das Strahlungsfeld im optisch sehr dünnen oder sehr dicken Fall richtig berechnet, was für viele Anwendungen ausreicht. Sobald allerdings spektrale Energieverteilungen oder räumlich aufgelöste Bilder der Objekte zu berechnen sind, wird ein korrekter Strahlungstransport benötigt. Dies liegt an der Tatsache, dass das Erscheinungsbild des Objektes bei einer bestimmten Wellenlänge vor allem von der Strahlung dominiert wird, die dem räumlichen Bereich entstammt, in dem die optischen Tiefen bei 1 liegen. Aber genau in diesem Bereich brechen die Näherungen zusammen – deshalb ist er auch numerisch am aufwendigsten.

Strahlungshydrodynamik: Diffusion plus Ray-Tracing

Die numerische Berechnung der hydrodynamischen Entwicklung von Akkretionsscheiben unter gleichzeitiger Behandlung des Strahlungstransportes ist daher nach wie vor eine große Herausforderung. Ohne Strahlungstransport kann man aber keine realistische Thermodynamik der Scheibe betreiben. Flusslimitierte Diffusion war bislang die *ultima ratio* auf diesem Gebiet, da korrekter Strahlungstransport ohne Näherungen zu viel Rechenzeit verschlingt, um der dynamischen Entwicklung der optisch dicken Scheibe folgen zu können. Die Diffusionsnäherung ist nur bedingt anwendbar, wenn es um die Behandlung der Einstrahlung durch den Zentralstern geht. Wenn man aber wie Kollegen in Pasadena die einfache lokale Diffusionsnäherung mit angenommener lokaler Schwarzkörperstrahlung durch einen wellenlängenabhängigen Diffusionsansatz ersetzt, ist der numerische Aufwand bereits wieder so hoch, dass man selbst mit modernen Rechnern die zeitliche Entwicklung einer Scheibe nicht mehr in allen drei räumlichen Dimensionen simulieren kann. Deshalb haben wir in einer Zusammenarbeit mit Willy Kley (Tübingen) den einfachen Diffusionsansatz um einen Ray-Tracer erweitert. Dieser Ray-Tracer erlaubt es, die Absorption der stellaren Strahlung in der Akkretionsscheibe präzise zu berechnen. Die absorbierte Strahlungsenergie wird dann dem Diffusionsansatz als Quellterm zugeführt.

Die Testergebnisse sind ermutigend, wobei gezeigt wurde, dass der Ansatz »Diffusion plus Ray-Tracing« und ein exakter Kontinuumstrahlungstransport quantitativ vergleichbare Ergebnisse liefern (Abb. III.2.1).

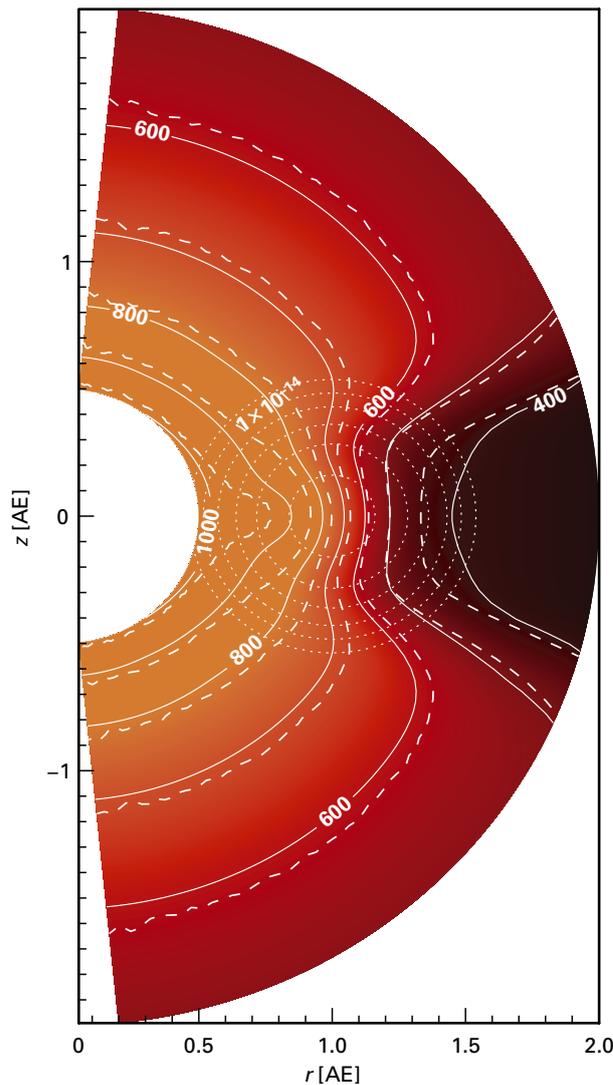


Abb. III.2.1: Ein Staubtorus wird durch eine Zentralquelle beleuchtet. Die gepunkteten Linien deuten die Dichteverteilung des Staubes an. Die Farben geben einen Eindruck der Temperaturverteilung (hell = heiß), die mit dem »Diffusion plus Ray-Tracing«-Algorithmus bestimmt wurde. Die dazu gehörigen Linien konstanter Temperatur sind durchgezogen dargestellt, die gestrichelte Linie gibt den Vergleich zum exakteren Kontinuumstrahlungstransport wieder. Der lokale Fehler in der Schallgeschwindigkeit lag in diesem Test stets unter 5%.

Für die Bestimmung einer verlässlichen spektralen Energieverteilung oder einer Intensitätskarte der Scheibe sind die Fehler zwar zu groß, sie erlauben jedoch lokal die Bestimmung einer hinreichend genauen Schallgeschwindigkeit – das ist aber genau die Größe, die man für die Hydrodynamik benötigt. Dieser neue Algorithmus wird zunächst auf protoplanetare Akkretionsscheiben um leuchtkräftige junge Sterne und junge, in ihre Mutterscheibe eingebettete Planeten angewandt.

Dem Idealfall ein Stück näher: inverser 3D-Strahlungstransport

Liegen Bilder eines Objektes vor, so wäre es zur Deutung der Beobachtungsergebnisse wünschenswert, aus den Teleskopbildern direkt eine Dichte- und Temperaturverteilung zu berechnen. Die Berechnung des Strahlungsfeldes für eine gegebene Verteilung ist aber so komplex, dass eine Umkehrung nur für sehr einfache Objekte möglich ist. Man ist daher darauf angewiesen, durch vielfache Iteration bei Variation der Dichte- und Temperaturverteilung zu einer Modellierung der Teleskopbilder zu kommen. Ein Blick auf die räumlich aufgelösten Staubverteilungen um junge Sterne reicht aus, um zu verstehen, dass man in fast allen Fällen von filamentartigen oder ellipsoiden Verteilungen ausgehen muss. Und für solche sind Modellierungen aufgrund der langen Laufzeit für die Berechnung einer Konfiguration praktisch ausgeschlossen.

Wissenschaftlern des MPIA gelang in Zusammenarbeit mit Kollegen aus Bordeaux und Potsdam die erste 3D-Modellierung einer Verdichtung in der Molekülwolke bei Rho Ophiuchi. Dieser sternlose Kern ist ein gutes Beispiel für die Anfangsbedingung der Sternentstehung, wenn durch Kollaps des Kerns ein Protostern entsteht. Für den Kern lagen ISOCAM-Karten bei 7 und 15 Mikrometern Wellenlänge vor, auf denen er als komplexe, in zwei Hauptklumpen unterteilte Struktur in Absorption gegen die Infrarotstrahlung der dahinterliegenden Region zu sehen ist. Auf einer mit dem IRAM-30-m-Teleskop im langwelligen mm-Bereich aufgenommenen Karte hingegen war der Kern durch die Strahlung des kalten Staubes zu erkennen. Die komplexe Geometrie der Verteilung schloss eine einfache Modellierung mit einem 1D- oder 2D-Modell aus. Es wurden daher 30 Klumpen mit dreidimensionaler Gaußscher Dichteverteilung verwendet, die in ihrer Position, ihrem Achsenverhältnis und ihrer Gesamtdichte variabel waren. Mittels des Optimierungsalgorithmus »Simulated Annealing« wurden die Klumpen so verschoben und deformiert, dass die gemessene Absorption im mittleren Infrarot bei gegebener Hintergrundstrahlung genau wiedergegeben wurde. Die Information, wie die Klumpen entlang der Sichtlinie verteilt und geformt sind, konnte damit allein nicht ermittelt werden. Allerdings reagiert die Abstrahlung des Staubs im mm-Bereich empfindlich auf die jeweilige Form des Kerns und konnte zur Bestimmung der fehlenden 3D-Information verwendet werden. Bei der Berechnung der Emission im mm-Bereich wurde ausgenutzt, dass die Temperatur im Kern vor allem von der mittleren optischen Tiefe der von außen eindringenden Strahlung abhängt. Diese Abhängigkeit variierte bei Bewegung und Verformung der Klumpen um weniger als 1 K in der Temperatur und konnte im Rahmen der sogenannten T/tau-Methode durch Anwendung eines 3D-Programms für den Transport von Kontinuumstrahlung vor der eigentlichen Modellierung berechnet werden.

Die ermittelte Dichteverteilung weist viele lokale Maxima auf, mit einem kompakten südlichen absoluten Maximum. Ein Vergleich mit hydrodynamischen Simulationen, die auch turbulente Bewegungen zulassen, zeigt, dass solche Maxima transienten Charakter haben können und möglicherweise auf der dynamischen Zeitskala der Turbulenz wieder verschwinden. Aufgrund der hohen Dichte und der Kompaktheit im südlichen Maximum ist aber anzunehmen, dass dieses Maximum nicht wieder zerfließt und möglicherweise sogar kollabieren könnte.

Komplexe Strukturen, wie sie in der Sternentstehung üblich sind, besitzen viele freie Parameter, die aus dem Vergleich mit den Beobachtungen ermittelt werden müssen. Allerdings fußt die neue inverse 3D-Strahlungstransportmethode auf einer simultanen Modellierung von mehreren Karten, die einige tausend Pixel enthalten, und ist so wohlbestimmt. Die Entwicklung dreidimensionaler Modelle ist auch eine natürliche Konsequenz aus der Tatsache, dass viele Beobachtungen eine klar aufgelöste dreidimensionale Struktur zeigen, bei der herkömmliche ein- und zweidimensionale Modelle versagen.

Ein wichtiger Aspekt der Modellierung sind die als konstant angenommenen Eigenschaften der absorbierenden und emittierenden Staubeilchen. Gerade in kühlen Molekülwolken mag es jedoch zu einem Wachstum der Teilchen durch Koagulation kommen, wodurch sich die optischen Eigenschaften der Teilchen ändern würden. Neben der Form wurde auch die chemische Zusammensetzung der Staubeilchen (z.B. die Dicke möglicher Eismäntel) bisher nicht bestimmt und ist Gegenstand derzeitiger Forschung. Zukünftige Modelle werden einer solchen Differenzierung Rechnung tragen müssen.

Was verraten uns Moleküllinien über die Sternentstehung?

Das gemeinsame Merkmal prästellarer Kerne und Scheiben ist, dass sie alle gut gegen ionisierende interstellare oder stellare Strahlung abgeschirmt sind und ihre innere Temperatur deshalb niedrig ist. Unter solchen Bedingungen können sich viele komplexe Molekülsorten bilden und überleben, vor allem CO, CS und N_2H^+ . Jedes Molekül rotiert und sendet Strahlung bei bestimmten Radiofrequenzen aus. Der Energiezustand der Rotation kann durch Zusammenstöße mit anderen Molekülen wie H_2 oder auch durch Wechselwirkung mit Photonen verändert werden. Bislang hat man die Radiostrahlung von einhundert Molekülen im Weltraum nachgewiesen. Mit Hilfe einer Einzelantenne oder einer Antennenanordnung mit guter spektraler und räumlicher Auflösung können wir diese Objekte bei verschiedenen Moleküllinien im Detail abbilden. Durch Beobachtungen von Moleküllinien lassen sich der physikalische Zustand und die chemische Zusammensetzung prästellarer Kerne

und zirkumstellarer Scheiben eingrenzen. Die größte Schwierigkeit dabei ist, dass der Hauptbestandteil des Mediums, H_2 , der etwa 80 Prozent der Masse stellt, nicht einfach zu beobachten ist. Daher sind wir auf andere indirekte Methoden angewiesen, um die physikalische Struktur prästellarer Objekte und Scheiben zu bestimmen, nämlich auf Beobachtungen von Moleküllinien und der thermischen Kontinuumsstrahlung des Staubes. Beobachtungen von Linien haben einen wesentlichen Vorteil, da sie auch Informationen über die Kinematik des Gases in diesen Objekten enthalten, wenn auch gut versteckt in den Linienprofilen.

Verwendet man Moleküllinienbeobachtungen als Werkzeug, sieht man sich jedoch vor zwei ernste Schwierigkeiten gestellt. Erstens ist die chemische Struktur der prästellaren Objekte nicht gleichförmig, sodass verschiedene Molekülsorten verschiedene Gebiete der Quelle nachzeichnen. Zweitens werden molekulare Emissionslinien häufig in nichtstationären Bedingungen angeregt, die über das Objekt hinweg variieren. Aufgrund dieser beiden Tatsachen ist es schwer, eine Fülle von Informationen über die Quelle direkt aus den Liniendaten zu gewinnen. Deshalb benötigt man ausgeklügelte gekoppelte chemo-dynamische Strahlungstransport-Modelle. Durch iterativen Vergleich der von den Modellen gelieferten Ergebnisse mit beobachteten Größen kann man die beste Anpassung und damit die grundlegenden Parameter des Objekts ermitteln.

Am MPIA sind wir an der Entwicklung aller nötigen Werkzeuge für die Interpretation und Simulation molekularer Emissionslinien von Scheiben und Wolken beteiligt, einschließlich vieldimensionaler chemo-dynamischer Modelle und numerischer Codes für Strahlungstransportsimulationen. Hier stellen wir eine Anwendung dieser Werkzeuge auf mm-Beobachtungen von AB-Aur vor. Dieses System ist eine der am besten untersuchten zirkumstellaren Scheiben um junge Herbig-Ae-Sterne. Es wurde im gesamten Spektralbereich von UV- bis Millimeterwellenlängen, einschließlich Moleküllinien, gründlich vermessen. Hauptziel unserer Untersuchung war, die Orientierung und Eigenschaften des AB-Aur-Systems mit Hilfe von Linienbeobachtungen kombiniert mit modernen theoretischen Modellrechnungen zu bestimmen. Abb. III.2.2 zeigt eine Skizze des Systems (*oben*), zusammen mit der Dichte- und Temperaturstruktur des angenommenen Scheibenmodells (*unten*). Das AB-Aur-System besteht aus einer nach außen dicker werdenden Scheibe, die von einer ausgedehnten Hülle umgeben ist. Die Scheibe schattet eine ringförmige Region in der Hülle vor stellarer UV-Strahlung ab, weshalb sich dort viele komplexe Moleküle bilden können. Mit Hilfe des Strahlungstransports in mehreren Moleküllinien haben wir eine zusammenhängende schrittweise Modellierung der AB-Aur-Scheibe, der physikalischen Struktur ihrer Hülle und ihrer chemischen Entwicklung durchgeführt.

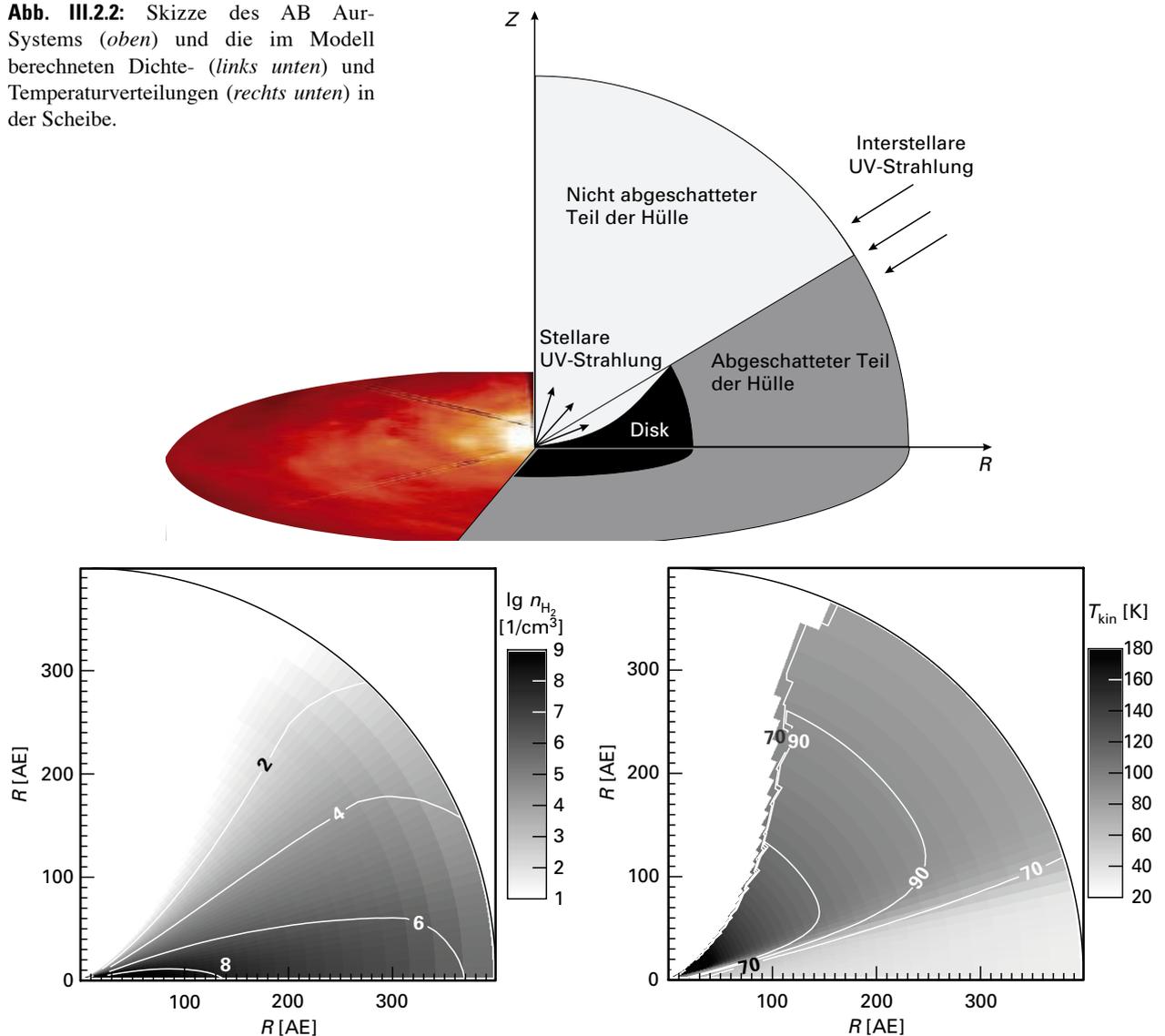
Mit dem am besten passenden Modell konnten wir die meisten der beobachteten Merkmale der Moleküllinienprofile der Scheibe erklären und ihre Grundparameter wie Masse, Größe, chemische Struktur und Orientierung ableiten. Wegen der unzureichenden räumlichen Auflösung unserer Beobachtungen war es jedoch nicht möglich, sämtliche Einzelheiten der Struktur der AB-Aur-Scheibe sichtbar zu machen. Zukünftige Radio-Interferometer wie ALMA werden uns detailliertere Informationen über die chemische Zusammensetzung und Struktur protoplanetarischer Scheiben und prästellare Kerne liefern.

Eine kleine Scheibe kommt groß 'raus

Die zirkumstellaren Scheiben aus Gas und Staub, in denen sich Planeten bilden, sind oft zu klein und zu weit entfernt, um räumlich aufgelöst werden zu können. Dies

gilt insbesondere für das Weltraumteleskop SPITZER: Es ist zwar das empfindlichste Infrarotteleskop, das heute verfügbar ist, hat aber nur ein begrenztes räumliches Auflösungsvermögen. Viele Sterne mit Scheiben liegen jedoch in Riesenmolekülwolken. Einige dieser Scheiben sind zufälligerweise so orientiert, dass wir sie von der Kante her sehen (d.h. wir blicken auf den äußeren Rand der Scheibe). Die linke Tafel in Abb. III.2.3 zeigt ein von SPITZER aufgenommenes Falschfarbenbild der Umgebung des hellen Sterns VV Serpentis: Strahlung bei $4.5\mu\text{m}$ Wellenlänge ist blau dargestellt, die bei $8.0\mu\text{m}$ grün und die bei $24.0\mu\text{m}$ rot. Der helle rote Stern links hat wahrscheinlich nichts mit VV Ser zu tun. Der Nebelfleck um VV Ser ist das Leuchten polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAH), d.h. sehr kleiner Staubkörner in der Umgebung des Sterns. Diese senden aufgrund von Quantenanregung durch Ultraviolett-Photonen, die von VV Ser stammen, Strahlung aus. Der dunkle Keil ist nicht die zirkumstellare Scheibe, wie man vielleicht

Abb. III.2.2: Skizze des AB Aur-Systems (oben) und die im Modell berechneten Dichte- (links unten) und Temperaturverteilungen (rechts unten) in der Scheibe.



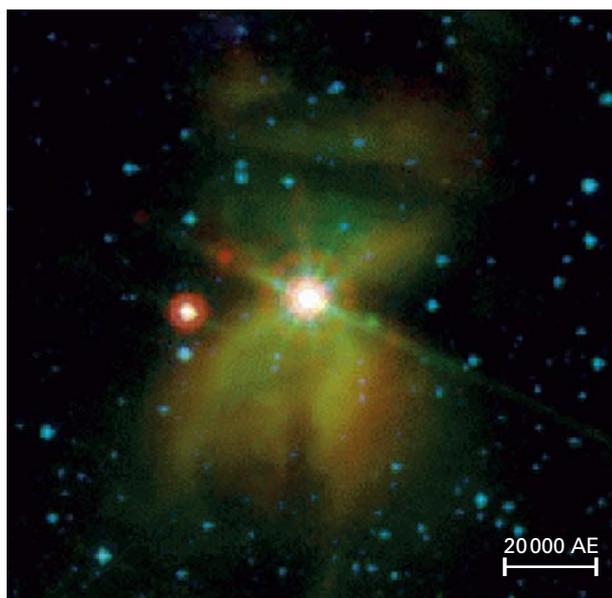
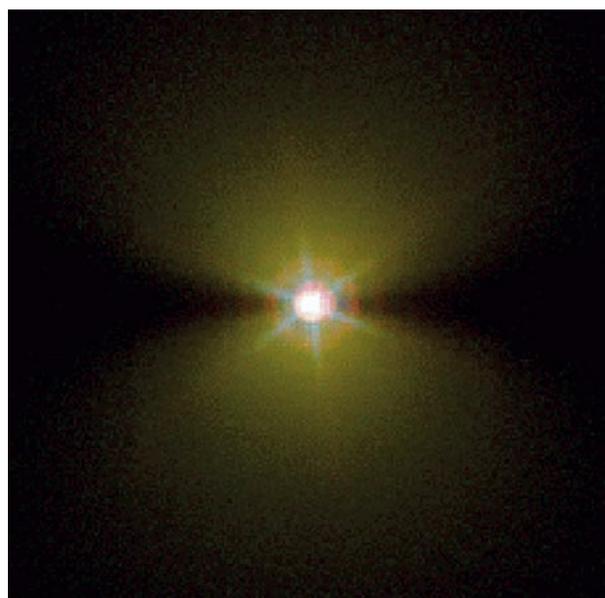


Abb. III.2.3: Links: Umgebung des Sterns VV Serpentis in einer Aufnahme des Weltraumteleskops SPITZER. Strahlung bei $4.5\mu\text{m}$ Wellenlänge ist *blau* dargestellt, die bei $8.0\mu\text{m}$ *grün* und die bei $24.0\mu\text{m}$ *rot*. Der helle Stern in der Mitte ist VV Ser.



Rechts: Modellbild von VV Ser. Die Scheibe ist so klein, dass sie vollständig innerhalb des zentralen hellen Punktes liegt. Der dunkle Keil ist der von der kleinen Scheibe geworfene Schatten.

vermuten könnte, denn solche Scheiben sind zehnbis hundertmal kleiner. Mit Hilfe mehrdimensionaler Modellrechnungen mit Strahlungstransport-Codes haben K. Pontoppidan und C. P. Dullmond stattdessen gezeigt, dass eine sehr viel kleinere Scheibe einen Schatten in die Umgebung hinein wirft. PAH-Körner, die in diesem Schatten liegen, können die vom Stern kommenden UV-Photonen nicht »sehen«, da ihre Sicht auf den Stern durch die zirkumstellare Scheibe versperrt ist, während PAH-Körner anderswo durch die stellaren UV-Photonen angeregt werden.

Ein Modell (Abb. III.2.3, rechte Tafel) zeigt, dass diese Erklärung funktioniert. In dieser Abbildung ist die Scheibe so klein, dass sie vollständig innerhalb des zentralen hellen Punktes liegt (die Größe des Punktes stellt das Auflösungsvermögen des Teleskops dar). Der dunkle Keil ist der Schatten, den die kleine Scheibe wirft. Auf diese Weise ist die Scheibe etwa um das Hundertfache vergrößert. Der Öffnungswinkel des dunklen Keils ist gleich dem Öffnungswinkel (d.h. der Dicke) der nicht aufgelösten Scheibe im Zentrum des Bildes. Die Autoren haben dasselbe Modell auch mit von SPITZER aufgenommenen Infrarotspektren verglichen und gezeigt, dass das Modell diese ebenfalls erklären kann. Überdies wurde mit Hilfe der aus dem obigen Bild abgeleiteten Scheibenstruktur und der Anpassung der Spektren eine besondere Art von Variabilität im optischen Licht des Sterns erklärt (UX-Orionis-Typ-Variabilität genannt). Interferometrische Beobachtungen dieses Objekts im nahen Infrarotbereich konnten sie damit ebenfalls erklären. So wurde die Scheibe um VV Ser eine der am

umfassendsten modellierten Scheiben um einen jungen Stern. Das Modell hat Einblick in die Struktur dieser Scheibe und in die Größenverteilung der darin vorhandenen Staubteilchen gewährt. Beides ist für Theorien der Planetenentstehung von großer Wichtigkeit.

Signaturen von Planeten in räumlich unauflösten Trümmerscheiben

Hauptreihensterne sind gewöhnlich von Trümmerscheiben umgeben, die aus kaltem Staub bestehen, der ständig aus einem Reservoir unentdeckter, Staub erzeugender Planetesimaler wieder aufgefüllt wird. In einem Planetensystem mit einem Gürtel aus Planetesimalen (wie dem Kuiper-Gürtel des Sonnensystems) und einem oder mehreren innerhalb davon liegenden Riesenplaneten können Staubteilchen in den mittleren Bewegungsresonanzen mit den Planeten eingeschlossen werden und so Strukturen in der Staubscheibe bilden, da sich die Teilchen bei bestimmten großen Halbachsen ansammeln. Planeten mit genügend größer Masse können auch Staubteilchen streuen oder aus einem Planetensystem hinausschleudern und so eine staubfreie Zone innerhalb der Umlaufbahn des Planeten schaffen. In Erwartung zukünftiger Beobachtungen räumlich unauflöster Trümmerscheiben mit dem Weltraumteleskop SPITZER untersuchen wir, wie die von Planeten eingekerbte Struktur die Form der spektralen Energieverteilung (SED) der Scheibe beeinflusst und ob die SED folglich benutzt werden kann, um auf das

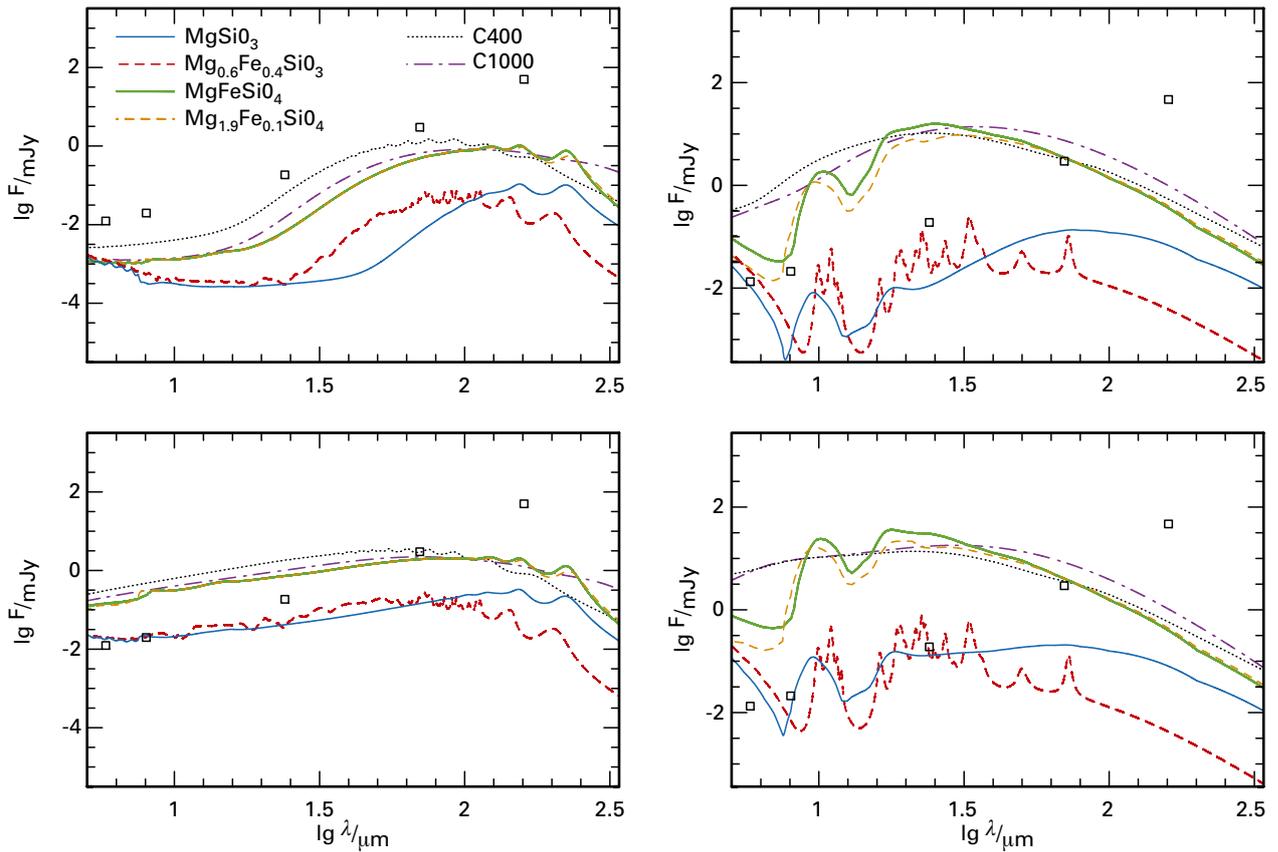


Abb. III.2.4: Spektrale Energieverteilungen von Scheiben mit 1 und 40 μm großen Körnern unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen, berechnet für ein Modell, das dem Sonnensystem ähnelt (d.h. Planeten, außer Merkur und Pluto,

und Kuiper-Gürtel als Staubquelle). *Oben links:* Scheibe aus Staub mit einer Korngröße von 40 μm mit Planeten; *oben rechts:* dasselbe für Korngröße 1 μm . Die unteren Tafeln zeigen die entsprechenden Verteilungen ohne Planeten.

Vorhandensein von Planeten schließen zu können. Für solche von einem Gürtel aus Planetesimalen erzeugte Staubscheiben berechnen wir numerisch die räumliche Gleichgewichtsdichteverteilungen und die SEDs, die sich in Gegenwart innerer Riesenplaneten in unterschiedlichen Planetenkonfigurationen und für eine repräsentative Stichprobe chemischer Zusammensetzungen ergeben. Die dynamischen Modelle sind nötig, um die Anreicherung von Teilchen in der Nähe der mittleren Bewegungsresonanzen mit den Planeten abzuschätzen und zu bestimmen, wie viele Teilchen ins Innere der Planetenbahn driften. Auf der Grundlage der SEDs und der vorhergesagten SPITZER-Farben erörtern wir, welche Arten von Planetensystemen erkannt werden können, sowie die Entartungen der Hauptparameter in den Modell-SEDs.

Für die Simulation der Trümmerscheiben-SEDs verwenden wir einen Strahlungstransportcode, der für optisch dünne Staubkonfiguration mit einer eingebetteten Strahlungsquelle optimiert ist. Die Dichteverteilung, die Strahlungsquelle und die Staubparameter können entweder aus einer internen Datenbank gewählt oder vom Benutzer definiert werden. Darüber hinaus ist

dieses Verfahren für die Untersuchung zirkumstellarer Trümmerscheiben optimiert, bei denen man erwartet, dass große Körner (mit Radien $\geq 1 \mu\text{m}$) maßgebend für die spektrale Energieverteilung der Staubabstrahlung im Ferninfrarot- bis Millimeter-Bereich sind. Der Code ist erhältlich unter <http://aida28.mpia-hd.mpg.de/~swolf/ddds>

In Abb. III.2.4 vergleichen wir die aus den verschiedenen Zusammensetzungen hervorgehende Strahlung (wobei die Teilchengröße annähernd konstant gehalten wird). Diese Simulationen zeigen, dass die Trümmerscheiben-SED von den Eigenschaften der Staubkörner (chemische Zusammensetzung, Dichte und Größenverteilung) sowie von der Masse und dem Ort des störenden Planeten abhängt. Die SED einer Trümmerscheibe mit inneren Riesenplaneten unterscheidet sich grundlegend von der einer Scheibe ohne Planeten. Erstere zeigt einen deutlichen Abfall des Flusses im nahen und mittleren Infrarotbereich, der auf die Räumung des Staubes innerhalb der Planetenbahn zurückzuführen ist. Die SED reagiert besonders empfindlich auf die Lage des Planeten, d.h. auf die Fläche im Inneren der Planetenbahn, die von Staub freigeräumt ist.

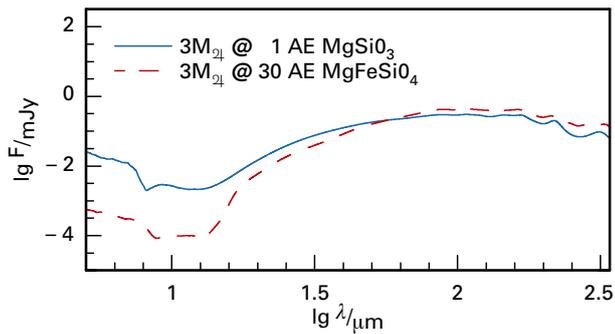
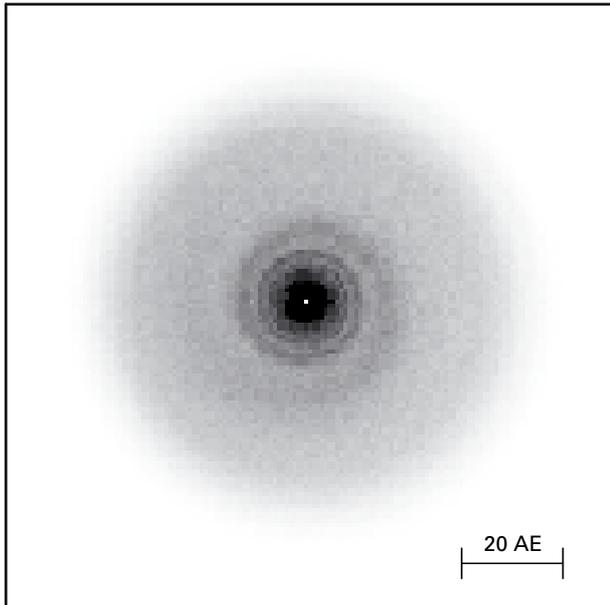
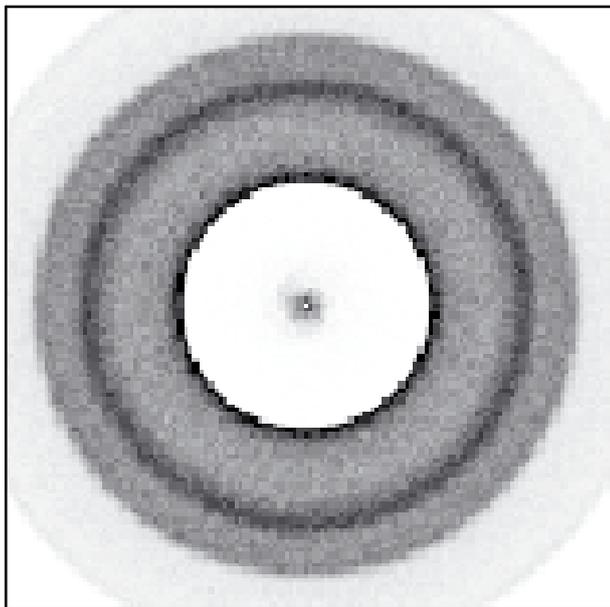


Abb. III.2.5 *Oben:* Mögliche Entartung zwischen der chemischen Zusammensetzung der Körner und dem Ort eines Planeten, der die Lücke frei räumt: SED einer Staubscheibe aus MgSiO_3 -Körnern mit einem $3\text{-}M_J$ -Planeten bei 1 AE (durchgezogene Linie) und einer Staubscheibe aus MgFeSiO_4 -Körnern mit einem $3\text{-}M_J$ -Planeten bei 30 AE (gestrichelte Linie). *Mitte:* Helligkeitsdichteverteilungen bei $70\ \mu\text{m}$ (unter der Annahme von Graukörperstrahlung von $12\ \mu\text{m}$ großen Körnern), wie man sie von einer Scheibe mit einem $3\text{-}M_J$ -Planeten bei 1 AE erwartet (in beliebigen Einheiten dargestellt). *Unten:* Wie in der Mitte, aber für einen Planetenabstand von 30 AE. Um die Entartung aufzuheben, sind hochaufgelöste Abbildungen nötig.



haltige und Fe-reiche Silikatkörner vorherrschen. Da das SED-Minimum sich auch zu längeren Wellenlängen hin verschiebt, wenn der Radius der Lücke größer wird (weil die mittlere Temperatur der Scheibe abnimmt), müssen wir beachten, dass eine Entartung vorhanden sein könnte zwischen der chemischen Zusammensetzung der Staubkörner und der großen Halbachse des Planeten, der die Lücke frei räumt. Man beachte z.B. die Ähnlichkeiten in der Form der SED einer Staubscheibe mit einem $3\ M_J$ -Planeten bei 1 AE, die von MgSiO_3 -Körnern dominiert wird, und der einer Scheibe mit einem $3\text{-}M_J$ -Planeten bei 30 AE, in der MgFeSiO_4 -Körner vorherrschen (siehe Abb. III.2.5). Dies veranschaulicht, wie wichtig zum einen spektroskopische Untersuchungen sind, welche die chemische Zusammensetzung der Körner einschränken können, und/oder zum anderen hochaufgelöste Bilder, die die Scheibe räumlich auflösen.



Sobald einmal interessante Trümmerscheiben durch SPITZER identifiziert sind, wird der nächste Schritt sein, hochempfindliche und räumlich hochaufgelöste Bilder in gestreutem Licht und/oder thermischer Strahlung zu erhalten (z.B. mit LBT, JWST, SOFIA, ALMA oder SAFIR). Von besonderem Interesse sind die längeren Wellenlängen: Hier können Beobachtungen Einschränkungen bezüglich der Menge des weiter vom Planeten entfernten Materials liefern. Hier dominiert die Strahlung der größeren Staubteilchen – derjenigen, die eine auffallendere Struktur haben. Wenn man Beobachtungen hätte, die die Scheibe räumlich auflösen, könnten wir mit Hilfe der dynamischen Modelle den störenden Planeten lokalisieren. Dann könnten wir die allein aus der SED abgeleiteten Information mit der aus dem aufgelösten Bild vergleichen. Dies ist wichtig, um die Grenzen zu verstehen, die der Bestimmung der Architektur von Planetensystemen allein auf der Grundlage räumlich unaufgelöster Trümmerscheiben gesetzt sind. Außerdem können wir mit aufgelösten Bildern bei einer oder mehreren Wellenlängen die Entartung brechen, die wir bei der Analyse der Scheiben-SED erwarten. In Erwartung dieser räumlich aufgelösten Beobachtungen haben wir mit der Modellierung der Helligkeitsverteilungen begonnen, die von Trümmerscheiben in Gegenwart verschiedener Planetenkonfigurationen herrühren (siehe Abb. III.2.6).

Einige Entartungen können jedoch die Interpretation der SED hinsichtlich des Ortes des Planeten komplizieren. So hat z.B. die SED einer von Fe-armen Silikatkörnern dominierten Staubscheibe ihr Minimum bei längeren Wellenlängen als die einer Scheibe, in der kohlenstoff-

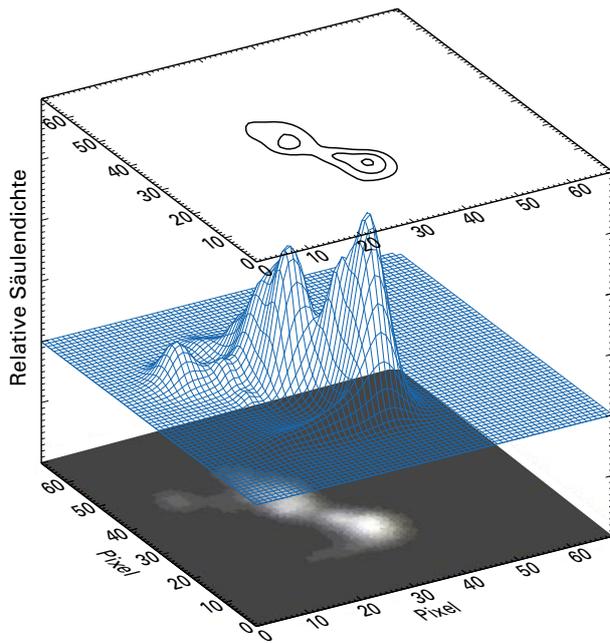
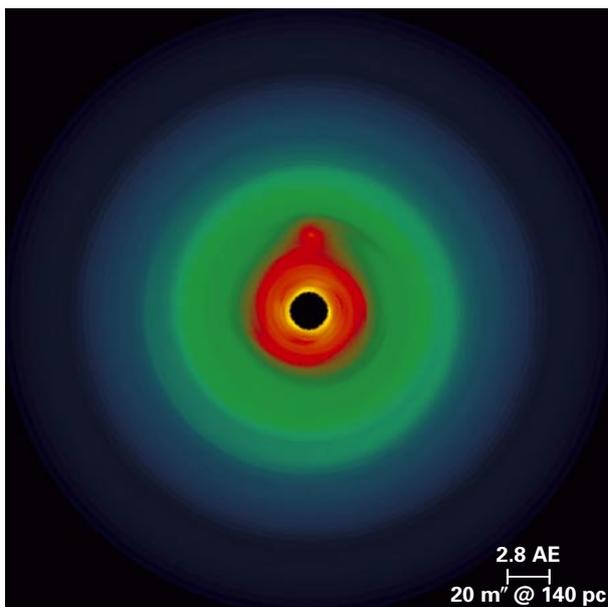


Abb. III.2.6 Simuliertes Streulicht-Bild einer Trümmerscheibe mit einem eingebetteten Planeten (Planet mit Jupitermasse, Bahnradius: 54 AE; Staubkornradius: $9\ \mu\text{m}$)

Abb. III.2.7: Simulierte $10\text{-}\mu\text{m}$ -Bilder des inneren Gebiets (Radius 20 AE) einer zirkumstellaren T-Tauri-Scheibe mit einem eingebetteten Planeten von einer Jupitermasse im Abstand von 5.2 AE vom Zentralstern (Wolf und Klahr 2005). Das linke Bild zeigt die Scheibe unter einem Neigungswinkel von 0° , das rechte bei 60° . Bei beiden Neigungswinkeln ist das heiße Gebiet um den Planeten oberhalb des Scheibenzentrums, in diesen Reemissions-Bildern als helle Flächen dargestellt, deutlich zu erkennen. Der Bildmaßstab von 20 Millibogensekunden (in der rechten unteren Ecke angegeben) ist unter der Annahme einer Entfernung von 140 pc berechnet.

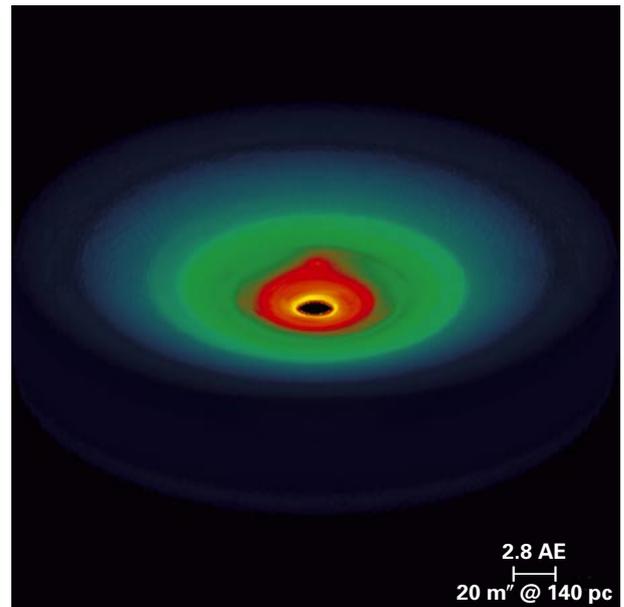


Strahlungstransport-Simulationen in Zusammenhang mit wissenschaftlichen Fallstudien für MATISSE

MATISSE ist als Spektro-Interferometer für den mittleren Infrarotbereich geplant, das die Strahlengänge von bis zu vier Teleskopen (UTs) bzw. Hilfsteleskopen (ATs) des Very Large Telescope Interferometer (VLTI) vereinen soll. MATISSE wird Phasenabgleichbeziehungen messen und damit die Möglichkeit zur Bildrekonstruktion mit interferometrischer Auflösung bieten. Außerdem wird MATISSE drei neue Beobachtungsfenster am VLTI öffnen: das L-, M- und Q-Band, die alle zum mittleren Infrarotbereich gehören. Darüber hinaus wird es das Instrument ermöglichen, gleichzeitige Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen durchzuführen.

MATISSE wird auch mehrere spektroskopische Modi zur Verfügung stellen. Zusammengefasst kann man MATISSE als einen Nachfolger von MIDI ansehen, indem es Abbildungsfähigkeiten im gesamten vom Boden aus zugänglichen mittleren Infrarotbereich bietet. Die Erweiterung von MATISSE bis hinab zu $2,7\ \mu\text{m}$ sowie seine verallgemeinerte Anwendung der Phasenabgleiche (engl. closure phases) machen es auch zu einem Nachfolger von AMBER. Somit wird MATISSE in vielerlei Hinsicht die Erfahrungen vereinen und erweitern, die mit zwei VLTI-Instrumenten der ersten Generation gemacht wurden – MIDI und AMBER.

MATISSE wird das astrophysikalische Potential des VLTI vergrößern, indem es die Vieldeutigkeiten überwindet, die häufig bei der Interpretation einfacher Sichtbarkeitsfunktions-Messungen auftreten. Es wird ein Instrument von einzigartiger Leistungsfähigkeit sein. Dies hängt teilweise damit zusammen, dass am VLT vier große Spiegel (UTs) vorhanden sind, mit denen sich die Empfindlichkeitsgrenze auf Werte steigern lässt, die für ausgewählte Programme wie die



Untersuchung aktiver galaktischer Kerne und extrasolarer Planeten nötig sind.

Zudem ist die erwartete Leistungsfähigkeit von MATISSE mit der Verfügbarkeit der ATs verknüpft, die auf etwa 30 verschiedene Positionen verschoben werden können, sodass eine Abtastung der Fourier-Ebene mit einer bis zu 200 m großen Basislänge möglich ist. Wissenschaftliche Schlüsselprogramme, die mit Hilfe der ATs durchgeführt werden, behandeln z.B. die Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen, die Geburt massereicher Sterne sowie die Beobachtung der kontrastreichen Umgebung heißer und entwickelter Sterne.

MATISSE wird der europäischen astronomischen Gemeinde Aufnahmen mit hoher Winkelauflösung und Spektroskopie im mittleren Infrarotbereich ermöglichen, der die L-, M-, N- und Q-Bänder umfasst. Dieser Wellenlängenbereich liegt zwischen dem nahen Infrarot, für das Instrumente wie AMBER empfindlich sind, und dem (Sub-)Millimeterbereich, für den ALMA eine hohe Winkelauflösung liefern soll, und ist daher von fundamentalem wissenschaftlichem Interesse. Im Hinblick auf die Abbildungsfähigkeit kann man MATISSE als bodengebundenen Vorläufer des zukünftigen Weltraum-Interferometers DARWIN ansehen, das zur Zeit als Instrument für den Bereich zwischen 6 und 18 μm geplant ist.

Strahlungstransport-Simulationen sind von entscheidender Bedeutung für die Bestimmung und Auswertung der wissenschaftlichen Fallstudien für MATISSE und damit für die Festlegung der Instrumentenspezifikationen während der Design-Phase von MATISSE. So stützt sich z.B. die Untersuchung des Bildrekonstruktionsvermögens von MATISSE auf Modellbilder ausgewählter astrophysikalischer Objekte, die aus Strahlungstransport-Simulationen stammen.

Eines der Hauptziele von MATISSE wird die Erforschung des Planetenentstehungsprozesses sein. Man geht davon aus, dass sich Planeten in zirkumstellaren Scheiben bilden, die als natürliche Folge der Protosternenentwicklung gelten, zumindest bei Sternen geringer und mittlerer Masse. Während man bereits eine recht genaue Vorstellung von der zirkumstellaren Umgebung, insbesondere den zirkumstellaren Scheiben, hat, steht der Prozess der Planetenentstehung größtenteils noch zur Diskussion. Die dominierende beobachtbare Größe aus dem inneren Scheibengebiet ($r < 10$ bis 20 AE) ist die von heißem Staub ausgesandte Kontinuumsstrahlung im mittleren Infrarotbereich. In Anbetracht der typischen Entfernung naher Sternentstehungsgebiete von etwa 140 bis 200 pc und der räumlichen Auflösung von bis zu 3 Millibogensekunden, die mit dem VLTI (je nach beobachteter Wellenlänge und AT/UT-Konfiguration) in den mittelinfraroten atmosphärischen Fenstern (L-, M-, N- und Q-Band) erzielt werden kann, wird MATISSE das ideale Instrument zur Untersuchung der planetenbildenden Region in zirkumstellaren Scheiben sein.

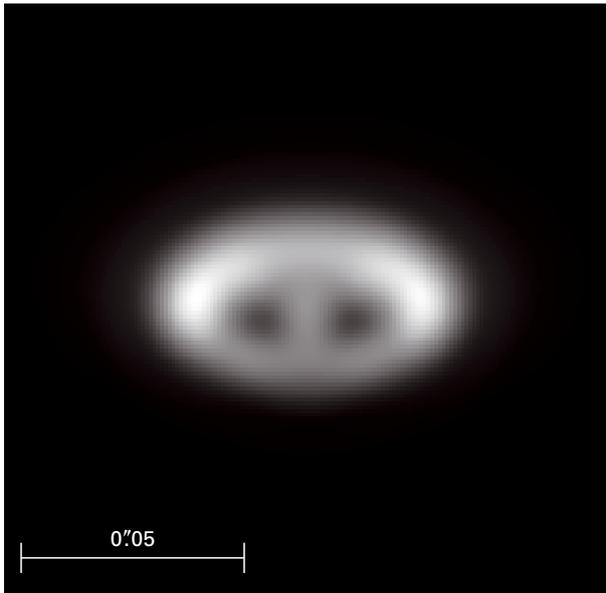
Die beiden folgenden Fragen sind beispielhaft für die, die mit MATISSE geklärt werden können:

(1) Wird die Struktur der inneren Scheibe durch frühe Phasen der Planetenentstehung verändert? – Es ist zu erwarten (aber noch nicht bewiesen), dass das innere Gebiet von zirkumstellaren Scheiben großräumige (sub-AE bis AE große) Dichtefluktuationen und Inhomogenitäten aufweist. Die auffallendsten Beispiele sind vorhergesagte langlebige Antizyklon-Wirbel, in denen sich Staubkörner zu einer größeren Dichte anhäufen und einen beschleunigten Wachstumsprozess durchlaufen könnten – der erste Schritt hin zur Planetenentstehung (siehe Kap. II.4). Lokal erhöhte Dichten und die daraus folgende erhöhte Skalenhöhe der Scheibe wirken sich direkt auf die Erwärmung der Scheibe durch den Zentralstern aus. Sie sollten als lokale Helligkeitsvariationen (aufgrund erhöhter Absorption oder Abschattungseffekten) in den Mittelinfrarot-Bildern sichtbar werden (Abb. III.2.7).

(2) Wie weit ist die Räumung der Scheibe innerhalb der innersten paar AE fortgeschritten? – Entsprechend der Temperatur und Leuchtkraft des Zentralsterns beträgt der Sublimationsradius für Staubkörner größenordnungsmäßig 0.1 bis 1 AE (T-Tauri- und Herbig Ae/Be-Sterne). Dieser kann mit MATISSE bei nahen jungen stellaren Objekten im L-Band in etwa räumlich aufgelöst werden. Im Gegensatz zu diesen Werten wurde jedoch aus Modellierungen der spektralen Energieverteilung für die 10 Millionen Jahre alte protoplanetare Scheibe um TW Hydrae ein deutlich größerer innerer Staubscheibenradius von etwa 4 AE abgeleitet (Calvet et al. 2002).

Andere Beispiele sind das Objekt CoKu Tau/4 mit einer freigeräumten inneren Zone von ~ 10 AE Radius und GM Aur mit einem deutlichen Abfall der Staubabstrahlung innerhalb etwa 4 AE um den Zentralstern. Diese Lücke ist dadurch gekennzeichnet, dass zumindest die Population kleiner Staubkörner fehlt, die für den Fluss im nahen und mittleren Infrarotbereich verantwortlich sind. Durch die Bestätigung dieser indirekt festgestellten Lücken sowie die Überprüfung anderer Scheiben auf vorhandene ähnliche Lücken wird man wertvolle Einschränkungen für die Entwicklung der planetenbildenden Region und damit für den Prozess der Planetenentstehung selbst erhalten. Abb. III.2.8 zeigt, dass es möglich ist, mit MATISSE eine große innere Lücke nachzuweisen.

Die in Abb. III.2.7 und III.2.8 gezeigten Strahlungstransportsimulationen sind mit dem Strahlungstransport-Code MC3D durchgeführt worden. Dabei handelt es sich um einen 3D-Kontinuumsstrahlungstransport-Code, eine Kombination der neuesten Monte-Carlo-Strahlungstransport-Konzepte sowohl für den selbstkonsistenten Strahlungstransport, d.h. die Abschätzung räumlicher Staubtemperatur-Verteilungen, wie auch für reine Streuungsanwendungen, wobei der Polarisationszustand des Strahlungsfelds mit berücksichtigt wird. Der Code kann unter www.mpia.de/homes/swolf/mc3d-public/mc3d-public.html heruntergeladen werden.



Ausblick

Die Aussicht, die inverse 3D-Strahlungstransportmethode auf andere Kerne anzuwenden, ist erfolgversprechend. Jedes weitere bei anderen Wellenlängen beobachtete Bild wird neue Beschränkungen für den unbekannt Parameter liefern und damit die Genauigkeit der ermittelten Dichtestruktur erhöhen. Das höchste Ziel bei der Anwendung der Methode auf gut beobachtete Kerne wird jedoch sein, die Schlüsselfrage der frühen Sternentstehung zu beantworten, nämlich ob es bei den betrachteten Kernen Materieeinfall gibt. Aus den heutigen verfügbaren Linienbeobachtungen erhält man den über alle sich bewegenden Gaszellen längs der Sichtlinie integrierten Fluss der Moleküllinienstrahlung.

Im allgemeinen Fall können Gasbewegung und Emissionsvermögen der Zellen nicht entflochten werden, und um sie zu entfalten, werden die 1D-Näherung oder Scherschichten angenommen. Entfaltet man sie nicht, kann Einfallbewegung mit Rotationsbewegung verwechselt werden, sodass offen bleibt, ob der Kern irgendwelche Anzeichen für das Einsetzen von Sternentstehung zeigt. Dies ist anders, wenn der Kern mit der neuen Methode untersucht wurde. Kennt man die volle 3D-Struktur der Staubdichte und Temperatur, so kann das Sichtlinienintegral umgekehrt werden und die vollständige kinematische Information liefern. Dies gilt allerdings nur, wenn die betrachtete Linie optisch dünn ist und ein Modell für die Abreicherung der betrachteten Moleküle verwendet wird. Dieser direkte Nachweis von Einfallbewegung würde es auch ermöglichen, die Frage zu beantworten, ob der Einfall sphärisch stattfindet oder über eine Akkretionsscheibe im ersten Stadium.

Abb. III.2.8: Simuliertes 10- μm -Bild des inneren Bereichs einer zirkumstellaren T-Tauri-Scheibe mit einem freigeräumten inneren Gebiet, gesehen unter einem Neigungswinkel von 60° (angenommene Entfernung 140 pc). *Links:* Originalbild, gefaltet mit einer Punktverbreiterungsfunktion, die einer 202 m großen Apertur entspricht. *Rechts:* Rekonstruiertes Bild. Konfiguration: 7 Nächte mit 3 ATs. (MATISSE Science case study)

(J. Steinacker, S. Wolf, H. Klahr, C. Dullemond,
Y. Pavlyuchenkov, Th. Henning, M. Sticker,
in Zusammenarbeit mit Kollegen des
Observatoire de Bordeaux,
des Astrophysikalischen Instituts Potsdam,
des Instituts für Astronomie und
Astrophysik der Universität Tübingen,
des Steward Observatory der University of Arizona,
des Department of Planetary Sciences
der University of Arizona
und des California Institute of Technology)
Emmy-Noether-Forschungsgruppe
»Evolution of circumstellar dust disks
to planetary systems«
am MPIA:
Sebastian Wolf (PI), Jens Rodmann,
Kacper Koronet, Alexander Schegerer;
Gennaro D'Angelo/Exeter,
Amaya Moro-Martin/Princeton,
Karl R. Stapelfeldt/JPL,
Deborah L. Padgett/CIT)

III.3 Galaxien und dunkle Materie

Statistiken über die Besetzungszahlen von Halos, die den statistischen Zusammenhang zwischen Galaxien und ihren Halos aus dunkler Materie beschreiben, spielen eine entscheidende Rolle in der modernen Astrophysik. Sie bieten einen Einblick in die komplizierten physikalischen Prozesse, die bei der Entstehung von Galaxien ablaufen. Außerdem erlauben sie uns, mit Hilfe der beobachteten Galaxienverteilung kosmologische Parameter eng einzugrenzen. Eine neue Nachwuchsgruppe am MPIA beschäftigt sich mit der Entwicklung neuer Methoden, um diese Besetzungsstatistik näher einzugrenzen und mit ihrer Hilfe sowohl kosmologische als auch Galaxienentstehungsmodelle einzuschränken.

Den Ursprung und die Entwicklung von Galaxien zu verstehen ist eines der faszinierendsten, ungelösten Probleme der Astrophysik. Dabei geht es um physikalische Prozesse auf Skalen, die vom Universum als Ganzem (Kosmologie) bis hinab zur »Mikrophysik« reichen, welche die Entstehung einzelner Sterne beschreibt. Die heutigen allgemein gängigen kosmologischen Theorien beschreiben ein Universum, das aus baryonischer Materie, kalter dunkler Materie und einer Form von Vakuumenergie besteht. Man nimmt an, dass kurz nach dem Urknall Quantenprozesse kleine Störungen in der Verteilung der Materie (sowohl der dunklen als auch der baryonischen) erzeugten, die als Keime für die Bildung von Strukturen dienten. Da ein Gebiet mit einer erhöhten Dichte eine größere Anziehungskraft auf seine Umgebung ausübt als im Mittel, strömt netto mehr Materie in das überdichte Gebiet. Dadurch steigt die Überdichte des Gebiets weiter an und seine Amplitude wächst. An einem Punkt erreicht die Überdichte dann einen kritischen Wert und die Störung beginnt zu kollabieren. Die dazugehörige dunkle Materie erfährt eine sogenannte gewaltsame Relaxation, die zur Bildung eines virialisierten Halos aus dunkler Materie führt. Gleichzeitig wird die baryonische Materie durch einen Verdichtungsstoß auf hohe Temperaturen aufgeheizt, während sie sich im Potentialtopf des Halos aus dunkler Materie im hydrostatischen Gleichgewicht niederlässt. Danach führen atomare Prozesse dazu, dass sich das Gas abkühlt und dabei seine Bindungsenergie abstrahlt. Infolgedessen sinkt das Gas ins Zentrum des Dunkelmateriehalos, wo es eine dichte Ansammlung bildet. In dieser findet schließlich Sternentstehung statt, und eine Galaxie entsteht. Dieses Bild ist jedoch unvollständig, da sich die Dunkelmateriehalos nicht als isolierte Systeme entwickeln. Stattdessen verläuft die Bildung hierarchisch, wobei kleine Halos fortlaufend miteinander

zu immer größeren Halos verschmelzen. Die Galaxien in diesen Halos verschmelzen entweder zu einer größeren Galaxie oder sie überleben als Satellitengalaxien, die einander im Hintergrundpotential der dunklen Materie umkreisen.

Obwohl diese Standardvorstellung schon seit fast drei Jahrzehnten besteht, sind wir noch weit davon entfernt, die komplizierten Prozesse wirklich zu verstehen, die das heiße Gas aus dem frühen Universum in eine leuchtende Galaxie aus Sternen von heute verwandeln. Das liegt größtenteils daran, dass viele der beteiligten physikalischen Prozesse noch kaum verstanden sind, insbesondere die »Mikrophysik« in Zusammenhang mit der Sternentstehung und den dabei ablaufenden Rückkopplungsprozessen mit dem interstellaren Medium.

Im Prinzip könnten wir viel über Galaxienentstehung lernen, wenn wir irgendwie die durchschnittliche Beziehung zwischen Halomasse und Galaxieneigenschaften bestimmen könnten: Wie viele Galaxien gibt es im Mittel pro Halo und wie hängt diese Zahl von der Halomasse ab? Wie hängen Eigenschaften der Galaxien wie Leuchtkraft, Sternentstehungsgeschichte oder Morphologie mit der Masse des Halos zusammen, in dem sie liegen? Diese Statistik der Halo-Besetzungszahlen beschreibt die zwischen Galaxien und dunkler Materie bestehende Beziehung, in der die verschiedenartigen physikalischen Prozesse der Galaxienentstehung unmittelbar eingepreßt sind. Die Eingrenzung des statistischen Zusammenhangs zwischen Galaxien und dunkler Materie ist damit gleichbedeutend mit der Eingrenzung der Physik der Galaxienentstehung.

Die Statistik der Halo-Besetzung ist auch von entscheidender Bedeutung, wenn wir jemals mit Hilfe der Galaxienverteilung Einschränkungen für die kosmologischen Parameter finden wollen. Ein wichtiges Ziel der heutigen Kosmologie ist die Bestimmung der Materieverteilung im Universum, die sehr stark vom jeweiligen kosmologischen Modell abhängt. Leider besteht der Großteil der Materie aus dunkler Materie, die unsichtbar ist. Doch da nach dem oben beschriebenen Paradigma der Galaxienentstehung Galaxien in Halos aus dunkler Materie liegen, können wir das Licht der Galaxien als Indikator für die Massenverteilung der dunklen Materie verwenden.

Leider sind Galaxien kein sauberer Indikator für die Massenverteilung, sondern ein durch Auswahleffekte verfälschter: Wenn eine bestimmte Region doppelt so viel Licht (von Galaxien) enthält wie eine andere Region gleichen Volumens, bedeutet dies nicht notwendigerweise, dass sie auch doppelt soviel Masse enthält. Diese nichtlineare Relation zwischen Licht und Masse heißt »Galaxien-Auswahleffekt« (engl. galaxy bias). Sie rührt

daher, dass die Dunkelmateriehalos selbst wiederum verfälschte Indikatoren für die Verteilung der dunklen Materie sind. Dies erklärt sich einfach aus der Tatsache, dass Dunkelmateriehalos aus Überdichten im ursprünglichen Materiefeld entstehen. Halos zeigen daher nur Regionen mit überhöhter Dichte an und nicht die mit zu geringer. Zum Glück versteht man diesen Halo-Auswahleffekt recht gut und weiß für jedes vorgegebene kosmologische Modell ziemlich genau, wie Halos einer bestimmten Masse davon betroffen sind. Das einzige, was zur Bestimmung des Galaxien-Auswahleffekts fehlt, ist daher der Zusammenhang zwischen Galaxien und Dunkelmateriehalos, was uns zurück zur Statistik der Halobesetzungszahlen bringt.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass eine genaue Beschreibung der Beziehung zwischen Galaxien und dunkler Materie, in Form der Statistik der Halobesetzungszahlen, nützliche Einschränkungen sowohl für kosmologische als auch für Galaxienentwicklungsmodelle liefern kann. Im Folgenden beschreiben wir einige Highlights unserer Arbeit, deren Ziel es ist, ein selbstkonsistentes, kohärentes Bild des statistischen Zusammenhangs zwischen Galaxien und ihren Dunkelmateriehalos zu erstellen.

Die bedingte Leuchtkraftfunktion

Wie oben besprochen, führt Gravitation zu einem hierarchischen Wachstum von Strukturen im Universum. Infolgedessen ist die Materieverteilung im heutigen Universum stark geklumpt. Da Galaxien in Dunkelmateriehalos liegen, ist es nicht weiter verwunderlich, dass die Verteilung der Galaxien ebenfalls stark geklumpt ist, wie große Galaxienrotverschiebungsdurchmusterungen in der Tat bestätigen. Eine genauere Analyse zeigt, dass leuchtkräftigere Galaxien auch stärker zu Haufen geklumpt sind. Diese Abhängigkeit der Klumpungsstärke von der Leuchtkraft liefert die Information, die nötig ist, um eine statistische Beschreibung der Beziehung zwischen Galaxien und dunkler Materie zu erstellen. Der Grund, warum dies funktioniert, ist der, dass die massereicheren Halos stärker zu Haufen geklumpt sind: Ausgedrückt in Form des oben erwähnten Halo-Auswahleffekts heißt das, dass massereichere Halos stärker vom Auswahleffekt betroffen sind. Folglich ist die Klumpungsstärke von Galaxien einer vorgegebenen Leuchtkraft ein direktes Maß für die Masse der Halos, in denen diese Galaxien liegen: Da leuchtkräftigere Galaxien stärker zu Haufen geklumpt sind als weniger leuchtkräftige und massereichere Halos stärker geklumpt als weniger massereiche, müssen leuchtkräftigere Galaxien in massereicheren Halos liegen.

Die Forschungsgruppe von Frank van den Bosch am MPIA hat in Zusammenarbeit mit Xiaohu Yang (Shanghai Observatory) und Houjun Mo (University of Massachusetts) eine neuartige statistische Methode ent-

wickelt, die auf diesem Prinzip beruht. Die Methode zielt darauf ab, die Statistik der Halobesetzungszahlen über die sogenannte bedingte Leuchtkraftfunktion (engl. conditional luminosity function, CLF) zu beschreiben. Diese gibt die mittlere Anzahl von Galaxien der Leuchtkraft L an, die in einem Halo der Masse M liegen. Diese CLF spezifiziert genau den Galaxien-Auswahleffekt als Funktion der Galaxienleuchtkraft und ermöglicht es, die gesamte, mittlere Leuchtkraft aller Galaxien zu berechnen, die in einem Halo vorgegebener Masse liegen. Mit anderen Worten, die mittlere Beziehung zwischen Licht und Masse im Universum ist vollständig durch die CLF spezifiziert.

Mit Hilfe der Leuchtkraftfunktion, die angibt, wie viele Galaxien pro Leuchtkraftintervall vorhanden sind, und der Abhängigkeit der Klumpungsstärke von der Leuchtkraft, die wir aus dem 2dFGRS (einer der bislang umfangreichsten Galaxienrotverschiebungsdurchmusterungen) ermittelt haben, ist es uns gelungen, die bedingte Leuchtkraftfunktion und damit auch die mittlere Beziehung zwischen Licht und Masse stark einzugrenzen. Abb. III.3.1 zeigt Konfidenzniveaus für verschiedene Größen, berechnet aus der CLF, die wir für eine typische Λ CDM-Konkordanzkosmologie erhalten haben. Die offenen Kreise mit Fehlerbalken in den oberen beiden Diagrammen zeigen die Daten aus dem 2dFGRS, die zur Eingrenzung der Modelle verwendet wurden: die Galaxienleuchtkraftfunktion (oberes linkes Diagramm) und die Korrelationslängen als Funktion der Leuchtkraft, die ein Maß für die Klumpungsstärke darstellen (oberes rechtes Diagramm). Die schattierten Flächen zeigen die aus unserem Modell erhaltenen 68- und 95-Prozent-Konfidenzniveaus. Man beachte die gute Übereinstimmung mit den Daten, die zeigt, dass die CLF genau zu den beobachteten Häufigkeiten und Klumpungseigenschaften der Galaxien im 2dFGRS passt. Mit anderen Worten: Wir haben quantitativ bestimmt, wie Galaxien unterschiedlicher Leuchtkräfte über Halos verschiedener Massen verteilt sind.

Das Diagramm unten links in Abb. III.3.1 zeigt die Beziehung zwischen Halomasse M und der Gesamtleuchtkraft L , deren Erwartungswert sich aus der CLF ergibt. Man beachte, dass die Konfidenzniveaus sehr stark einschränkend sind, insbesondere für die massereicheren Halos: Offenbar gibt es keinen großen Spielraum, um Licht in Übereinstimmung mit den Daten über Halos unterschiedlicher Massen zu verteilen. Man beachte, dass die mittlere Relation zwischen Licht und Masse eine drastische Änderung bei etwa $M \approx 7 \times 10^{10} h^{-1} M_{\odot}$ aufweist. Diese charakteristische Skala ist kein Artefakt des Modells, sondern wird tatsächlich von den Daten gefordert. Dies verrät uns, dass bei dieser Skala irgendetwas in Bezug auf die Physik der Galaxienentstehung geschehen muss.

Im rechten unteren Diagramm der Abb. III.3.1 sind die entsprechenden Masse-Leuchtkraft-Verhältnisse als Funktion der Halomasse eingetragen. Der charakteris-

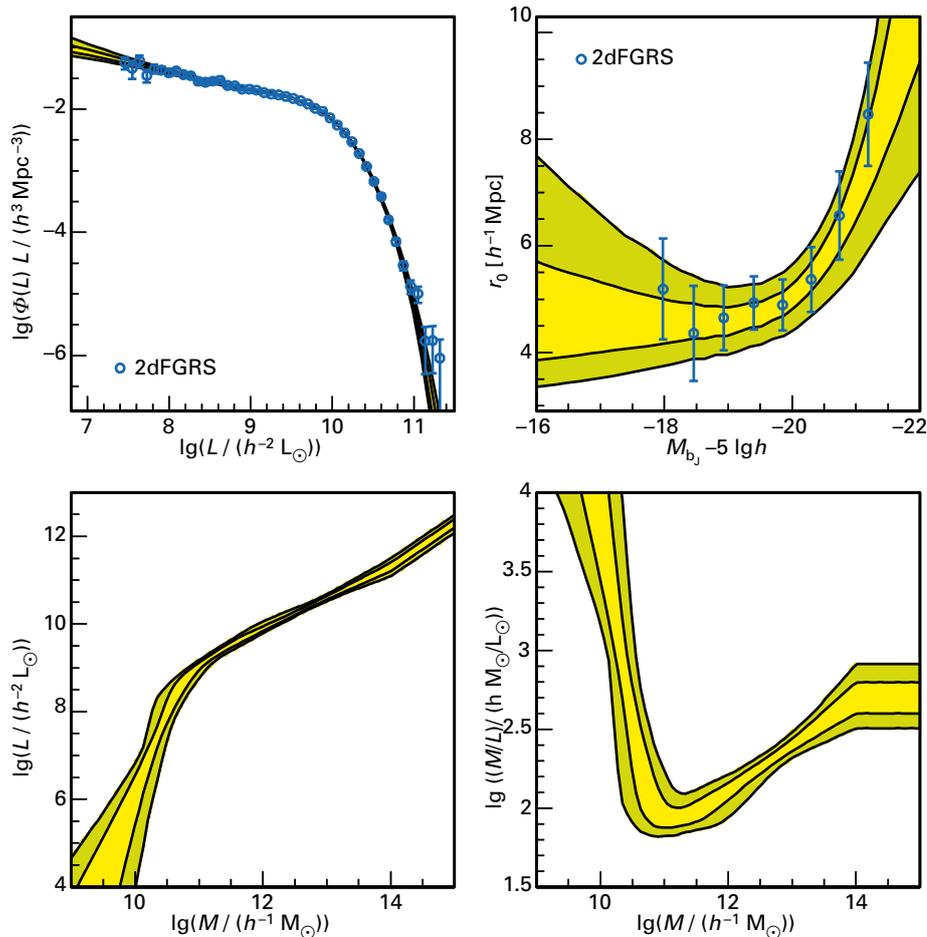


Abb. III.3.1: In jedem Diagramm geben die Konturen die 68- und 95-Prozent-Konfidenzniveaus aus unserem CLF-Modell an. *Oben links:* Die Galaxienleuchtkraftfunktion. *Oben rechts:* Die Korrelationslängen in Abhängigkeit von der Leuchtkraft. *Unten links:* Die Beziehung zwischen Licht und Masse. *Unten rechts:* Das mittlere Masse-Leuchtkraft-Verhältnis als Funktion der Halomasse.

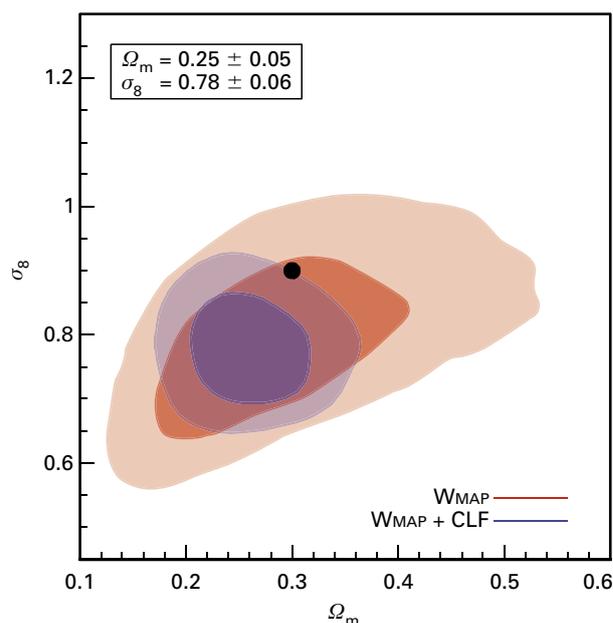
tische Bruch in der mittleren Beziehung zwischen Licht und Masse zeigt sich hier als ein ausgeprägtes Minimum in den Masse-Leuchtkraft-Verhältnissen. Die charakteristische Skala kennzeichnet daher die Massenskala, bei der Galaxienentstehung am effizientesten ist, d.h. bei der es das meiste Licht pro Masseneinheit gibt. Für masseärmere Halos steigt das Masse-Leuchtkraft-Verhältnis mit abnehmender Halomasse drastisch an. Es deutet darauf hin, dass die Galaxienentstehung in Halos mit $M < 5 \times 10^{10} h^{-1} M_{\odot}$ extrem ineffizient werden muss. Bei Modellrechnungen zur Galaxienentstehung versucht man dies zu erreichen, indem man Rückkopplung von Supernovae mit berücksichtigt. Diese Sternexplosionen erzeugen riesige Energiemengen, durch die große Anteile der baryonischen Masse aus massearmen Halos, die vergleichsweise niedrige Entweichgeschwindigkeiten haben, hinaus geschleudert werden können. Die hier

vorgestellten Ergebnisse zeigen, wie sich die Effizienz dieses Vorgangs mit der Halomasse ändern muss, wenn das Modell die beobachteten Häufigkeiten und Haufenbildungseigenschaften von Galaxien erfolgreich wiedergeben soll. Am massereichen Ende steigt das mittlere Masse-Leuchtkraft-Verhältnis ebenfalls an. Numerische Simulationen zur Galaxienentstehung waren lange Zeit nicht in der Lage, einen solchen Verlauf nachzuvollziehen – eine Tatsache, die als »Überkühlungs-Problem« (engl. overcooling problem) bekannt ist. Zur Zeit untersuchen viele Forschungsgruppen, welche Rolle die Rückkopplung von aktiven galaktischen Kernen (AGN) spielt, die verhindern soll, dass sich das Gas in massereichen Halos zu stark abkühlt. Auch hier setzen die statistischen Ergebnisse unserer CLF-Analyse enge Schranken dafür, wie sich die Effizienz dieser sogenannten AGN-Rückkopplung mit der Halomasse ändern muss.

Kosmologische Parameter

Zwei der wichtigsten kosmologischen Parameter sind die mittlere Materiedichte und die Normalisierung der Stärke der ursprünglichen Dichtefluktuationen. Diese

werden typischerweise mit Hilfe des Materiedichteparameters und des Normalisierungsparameters des Leistungsspektrums, σ_8 , parametrisiert. Typischerweise führt eine Vergrößerung jedes dieser Parameter zu einer größeren Anzahl massereicher Halos und einer größeren allgemeinen Klumpungsstärke von Dunkelmateriehalos. Ein anderes kosmologisches Modell erfordert daher eine andere Beziehung zwischen Galaxien und dunkler Materie (d.h., eine andere CFL), um mit der beobachteten Anzahl und den Haufenbildungseigenschaften der Galaxien vereinbar zu sein. Wenn man zum Beispiel die Normalisierung des Leistungsspektrums der Materieverteilung erhöht, klumpen sich die Dunkelmateriehalos stärker zu Haufen zusammen. Um zur beobachteten Klumpungsstärke zu passen, müssen Galaxien demnach weniger stark vom Auswahleffekt betroffen sein. Dies kann man erreichen, indem man Galaxien über masseärmere Halos verteilt, die weniger stark zu Haufen geklumpt sind als massereiche. Wenn man jedoch immer mehr Galaxien aus haufengroßen Halos entfernt und stattdessen über masseärmere Halos verteilt, erhöht dies das allgemeine Masse-Leuchtkraft-Verhältnis von Haufen. Mit Hilfe unabhängiger Beschränkungen des mittleren Masse-Leuchtkraft-Verhältnisses von Haufen konnten wir mit unserem CLF-Formalismus kosmologische Parameter eng eingrenzen. Die Ergebnisse sind in Abb. III.3.2 dargestellt. Die blauen Konturlinien geben die 68- und 95-Prozent-Konfidenzniveaus für den Materiedichteparameter Ω_m und den Normalisierungsparameter des Leistungsspektrums σ_8 an. Zum Vergleich geben die roten Konturen die Einschränkungen an, die aus den Daten des WMAP-Satelliten stammen, wie sie nach einem Jahr Messzeit veröffentlicht wurden. Unsere Ergebnisse bevorzugen deutlich ein kosmologisches Modell mit einer niedrigeren Materiedichte und einem niedrigeren Normali-



sierungsparameter als typischerweise für die sogenannte Konkordanzkosmologie (angegeben durch den schwarzen Punkt) angenommen wird. Im März 2006 bestätigte das WMAP-Team unsere Ergebnisse und zeigte, dass die verbesserte Messung der Anisotropien und der Polarisation der kosmologischen Mikrowellenhintergrundstrahlung auf ein kosmologisches Modell mit Parametern hindeutet, die denen aus unserer CLF-Analyse sehr nahe kommen. Dies beweist klar, dass der CLF-Formalismus eine zutreffende Beschreibung des Galaxien-Auswahleffekts liefert und uns damit erlaubt, mit Hilfe der Galaxienverteilung kosmologische Parameter einzuschränken.

Pseudo-Universen

Eine weitere wirkungsvolle Anwendung der CLF ist die Konstruktion von Pseudo-Galaxienrotverschiebungsdurchmusterungen (engl. mock galaxy redshift surveys, MGRSs), die ein äußerst nützliches Hilfsmittel bei der Interpretation großer Rotverschiebungsdurchmusterungen darstellen. Wie bei jedem Datensatz erschweren verschiedene beobachtungsbedingte Auswahleffekte eine direkte, einfache Interpretation solcher Durchmusterungen. Die CLF ist hervorragend geeignet, virtuelle Universen aufzubauen, von denen Pseudo-Galaxienrotverschiebungsdurchmusterungen erstellt werden können, wobei die gleichen Auswahl- und Unvollständigkeitseffekte wie bei den echten Daten verwendet werden. Alles, was dazu nötig ist, ist eine numerische Simulation der Verteilung der dunklen Materie im Universum. Nachdem die Dunkelmateriehalos in einer solchen Simulation identifiziert sind, kann mit Hilfe der CLF jeder dieser Halos mit Galaxien unterschiedlicher Leuchtkraft bevölkert werden. Dabei ist zu beachten, dass konstruktionsgemäß die Häufigkeit und die Klumpungseigenschaften dieser Galaxien automatisch mit denen der Daten übereinstimmen. Nach Einführung eines virtuellen Beobachters in dem simulierten Volumen kann man MGRSs konstruieren und mit echten Rotverschiebungsdurchmusterungen wie dem 2dFGRS und dem Sloan Digital Sky Survey (SDSS) eins zu eins vergleichen.

Abb. III.3.3 zeigt eine Scheibe aus einem unserer virtuellen Universen. Vom oberen linken Diagramm ausgehend im Uhrzeigersinn ist die Verteilung der dunklen Materie, aller Galaxien, der Galaxien frühen Typs sowie der Galaxien späten Typs dargestellt. Man beachte, dass auf den ersten Blick die Galaxien exakt der Massenverteilung der dunklen Materie zu folgen scheinen. Eine genauere

Abb. III.3.2: Die 68- und 95-Prozent-Konfidenzniveaus für die Materiedichte Ω_m und den Normalisierungsfaktor σ_8 des Leistungsspektrums, gewonnen vom WMAP-Satelliten aus der kosmischen Hintergrundstrahlung (rote Konturen) und aus der Kombination von WMAP-Daten mit unserer CLF-Analyse der großräumigen Struktur des Universums (blaue Konturen).

Analyse würde jedoch zeigen, dass sich die tatsächlichen räumlichen Verteilungen von Galaxien unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Leuchtkraft statistisch von einander und von der dunklen Materie unterscheiden. Dies spiegelt die komplizierte Abhängigkeit des Galaxien-Auswahleffekts vom Maßstab, vom Typ und von der Leuchtkraft wider, die dessen ungeachtet vollständig durch die CLF spezifiziert ist.

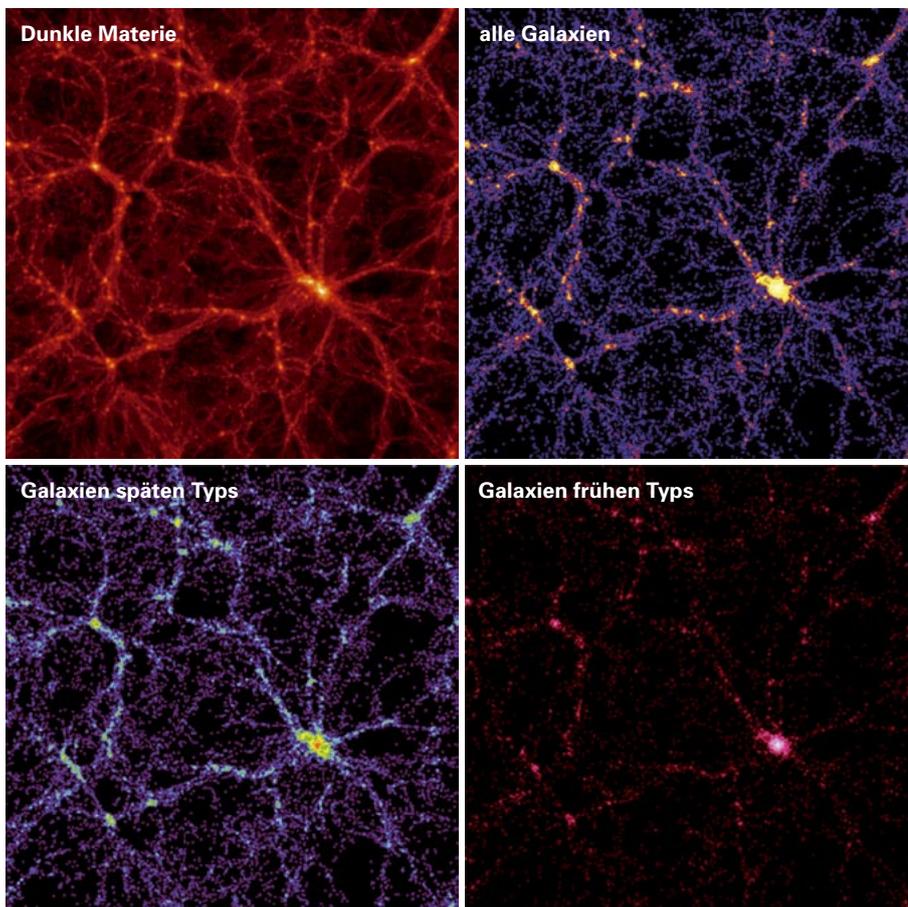
Kinematik von Satellitengalaxien

Wie oben besprochen und in Abb. III.3.1 gezeigt, erhält man aus der beobachteten Haufenbildung von Galaxien in Abhängigkeit von der Leuchtkraft enge Grenzen dafür, wie Galaxien unterschiedlicher Leuchtkraft Halos unterschiedlicher Massen bevölkern. Um die im unteren linken Diagramm von Abb. III.3.1 gezeigte abgeleitete Beziehung zwischen Licht und Masse zu überprüfen, haben wir die Kinematik von Satellitengalaxien untersucht. Satellitengalaxien sind solche Galaxien in einem Dunkelmateriehalo, die nicht im Halozentrum sitzen (das sind die sogenannten Zentralgalaxien), sondern den Halo in relativ großen Abständen vom Zentrum umkreisen. Folglich erkunden diese Satelliten den Potentialtopf bis hinaus zum äußersten Rand ihrer Halos und sind somit

hervorragend geeignet, die gesamte Halomasse zu messen. Insbesondere ist die typische Geschwindigkeit, mit der Satelliten ihre entsprechende Zentralgalaxie umkreisen, ein direkter dynamischer Indikator für die Masse des zugehörigen Halos. Die Kehrseite dieser Methode ist jedoch, dass die Zahl der nachweisbaren Satelliten in einzelnen Systemen im Allgemeinen viel zu klein ist, um eine zuverlässige Massenabschätzung zu erhalten. Man kann jedoch die Daten vieler Zentralgalaxien-Satelliten-Paare übereinander stapeln und so statistische Abschätzungen der Halomassen erhalten, die mit Zentralgalaxien einer vorgegebenen Leuchtkraft verbunden sind. Das kritische Problem dabei ist zu entscheiden, welche Galaxie eine Zentralgalaxie und welche ein Satellit ist.

Mit Hilfe der oben beschriebenen MGRSs haben wir die Zentral-Satelliten-Auswahlkriterien so optimiert, dass sie große Mengen an Zentral- und Satellitengalaxien liefern, wie auch kleinere Anteile von »Störern« (Satelliten, die nicht zum Halo der Wirtsgalaxie gehören). Die

Abb. III.3.3: Projizierte Dunkelmaterie/Galaxien-Verteilung einer $100 \times 100 \times 10 h^{-1} \text{ Mpc}^3$ großen Scheibe aus einem unserer Pseudo-Universen. Die Diagramme zeigen (im Uhrzeigersinn von oben links) die Dunkelmaterieteilchen, alle Galaxien, Frühtyp-Galaxien und Spättyp-Galaxien. Galaxien sind entsprechend ihrer Leuchtkraft gewichtet.



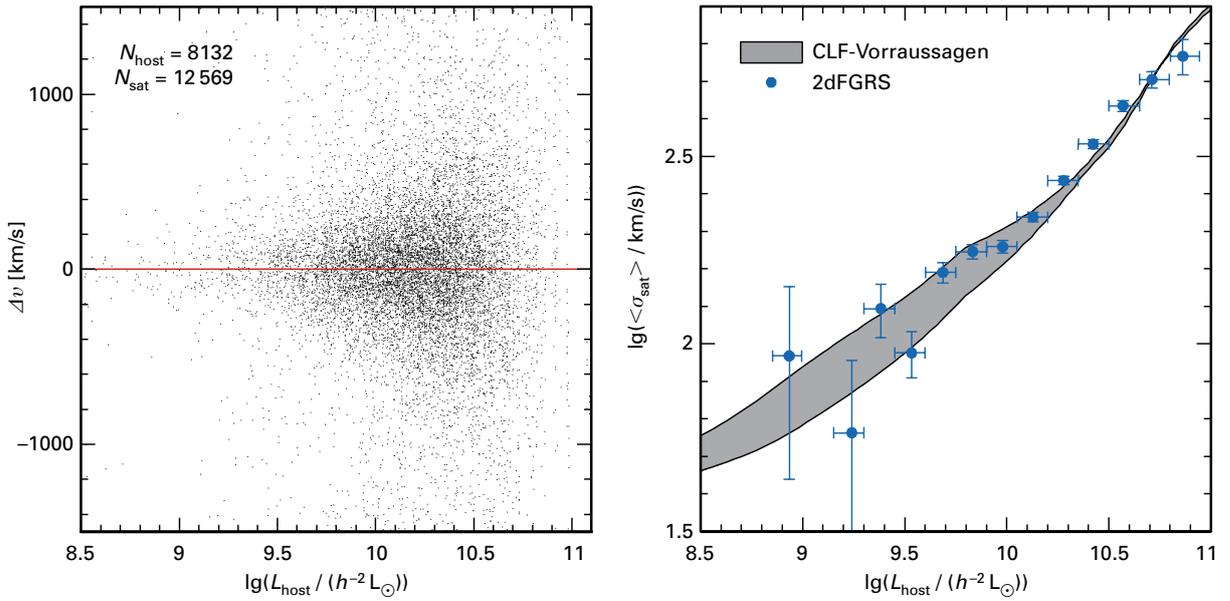


Abb. III.3.4: *Links:* Streudiagramm der Geschwindigkeitsdifferenz Δv zwischen Wirts- und Satellitengalaxie im 2dFGRS als Funktion der Leuchtkraft der Wirtsgalaxie. *Rechts:* Geschwindigkeitsdispersion der Satelliten als Funktion der Leuchtkraft der zentralen Wirtsgalaxie. Ausgefüllte Punkte mit Fehlerbalken entsprechen den 2dFGRS-Ergebnissen im linken Diagramm, während die graue Fläche die aus der CLF abgeleiteten Erwartungswerte bezeichnet.

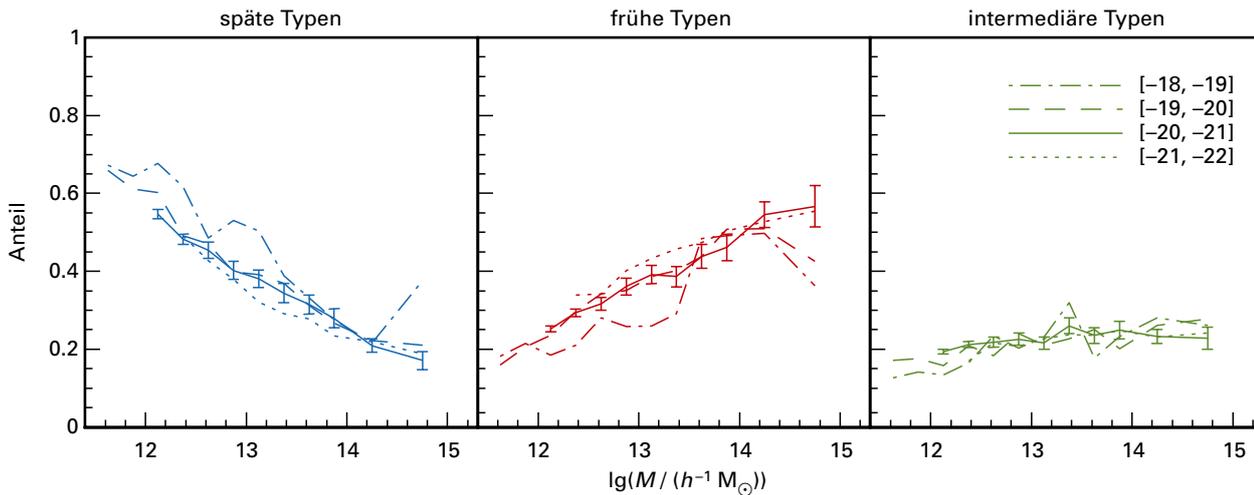
Anwendung dieser optimierten Auswahlkriterien auf den 2dFGRS lieferte insgesamt 8132 Zentralgalaxien und 12569 Satellitengalaxien, rund eine Größenordnung mehr als vorherige Untersuchungen. Im linken Diagramm in Abb. III.3.4 ist die Geschwindigkeitsdifferenz Δv zwischen Zentral- und Satellitengalaxien als Funktion der Leuchtkraft der Zentralgalaxie aufgetragen. Man beachte, dass die Varianz in Δv stark mit dieser Zentralleuchtkraft ansteigt, was darauf hindeutet, dass leuchtkräftigere Galaxien in massereicheren Halos liegen. Dies wird durch das rechte Diagramm der Abbildung noch unterstrichen, wo wir die Geschwindigkeitsdispersion der Satelliten als Funktion der Leuchtkraft der Zentralgalaxie auftragen (ausgefüllte Punkte mit Fehlerbalken). Die graue Fläche bezeichnet die aus unserer CLF abgeleiteten Erwartungswerte. Die Satellitenkinematik, die sich aus dem 2dFGRS ergibt, stimmt offensichtlich hervorragend mit diesen Vorhersagen überein. Dies stellt eine dynamische Bestätigung der allein aus den Klumpungseigenschaften abgeleiteten mittleren Beziehung zwischen Masse und Licht dar.

Galaxiengruppen

Der CLF-Formalismus nutzt die Klumpungseigenschaften von Galaxien, um die Statistik der Halobesetzungszahlen von Galaxien unterschiedlicher Leuchtkräfte auf statistische Weise abzuleiten. Im Prinzip kann man die Besetzungsstatistik auch aus Galaxiengruppen-Katalogen ableiten: Wenn man irgendwie feststellen kann, welche Galaxien zu ein und demselben Dunkelmateriehalo gehören (d.h. zur selben »Gruppe« gehören), und auf irgendeinem Wege die genaue Masse dieses Halos ermitteln kann, dann kann man die Statistik der Halobesetzungszahlen direkt ableiten. Diese Methode ist offensichtlich sehr viel direkter als die auf den Klumpungseigenschaften beruhende statistische Methode. Insbesondere liefert sie die vollen Wahrscheinlichkeitsverteilungen und nicht nur mittlere Besetzungszahlen.

Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, einen zuverlässigen Algorithmus zu finden, mit dem man all jene Galaxien identifizieren kann, die zum gleichen Dunkelmateriehalo gehören. Wir haben die oben beschriebenen MGRSs als Prüfstand benutzt und so einen neuen »Gruppenfinder« entwickelt, der erfolgreich Galaxien entsprechend ihrer gemeinsamen Halos Gruppen zuordnen kann. Genaue Tests haben gezeigt, dass im Hinblick auf Vollständigkeit und Störanteilen dieser Gruppenfinder wesentlich zuverlässiger ist als bisherige Gruppenentdeckungs-Algorithmen, die in der Vergangenheit ausgiebig verwendet wurden.

Wir haben diesen neuen Gruppenfinder auf den SDSS angewandt und mit Hilfe des so erhaltenen Katalogs von Galaxiengruppen untersucht, wie verschiedene Galaxieneigenschaften (neben der Leuchtkraft) mit der Halomasse korrelieren. Insbesondere haben wir die Abhängigkeit der Farbe und der Sternentstehungsrate



von der Halomasse untersucht. Zunächst haben wir die Galaxienpopulation entsprechend ihrer Farbe (aus SDSS-Photometrie) und ihrer spezifischen Sternentstehungsrate (aus SDSS-Spektroskopie) in drei Typen unterteilt: Galaxien späten Typs sind definitionsgemäß blau und zeigen eine relativ aktive aktuelle Sternentstehung. Galaxien frühen Typs dagegen haben definitionsgemäß eine rote Farbe und eine relativ passive Sternentstehung. Schließlich haben wir noch eine Klasse von Galaxien mittleren Typs identifiziert, die rot sind aber dennoch eine relativ aktive Sternentstehung aufweisen. Abb. III.3.5 zeigt die Anteile der Galaxien frühen, späten und mittleren Typs als Funktion der Gruppen- (d.h. Halo-) Masse. Die Ergebnisse sind für verschiedene Helligkeitsintervalle angegeben, die durch verschiedene Strichtypen gekennzeichnet sind. Es hat uns nicht weiter überrascht festzustellen, dass der Anteil an Galaxien späten Typs mit zunehmender Halomasse abnimmt. Entsprechend nimmt der Anteil der frühen Typen mit der Halomasse zu. Dies spiegelt im Prinzip die wohlbekanntere Abhängigkeit der Galaxien von ihrer Umgebung wider, doch jetzt ausgedrückt in Form der Masse des Halos, in dem die Galaxien liegen. Neu ist allerdings das Ergebnis, dass bei vorgegebener Halomasse die Anteile der Typen nicht wesentlich von der Leuchtkraft abhängen. Dies deutet darauf hin, dass die Farbe und Sternentstehungsrate einer Galaxie sehr viel stärker von der Halomasse als von der Leuchtkraft abhängen. Die wohlbekanntere Tatsache, dass leuchtkräftigere Galaxien einen höheren Anteil an frühen Typen aufweisen, spiegelt daher nur wider, dass leuchtkräftigere Galaxien im Mittel in massereicheren Halos liegen. Man beachte auch, dass der Anteil an Galaxien mittleren Typs unabhängig von der Halomasse als auch von der Leuchtkraft ist. Dies spricht dagegen, dass es sich bei den mittleren Typen um Scheibengalaxien in Kantensicht handelt, da in diesem Falle ihre Besetzungszahlenstatistik aussehen würde wie die der späten Typen.

Abb. III.3.5: Die Anteile der Galaxien späten, frühen und mittleren Typs als Funktion der Halomasse. Dargestellt sind die Ergebnisse für Galaxien in vier Leuchtkraft-Intervallen. Die Werte in rechteckigen Klammern geben die verwendeten Bereiche von $0.1M_r - 5 \log h$ an.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Sloan Digital Sky Survey, der kurz vor seiner Vollendung steht, und verschiedenen im Gange befindlichen Durchmusterungen hochrotverschobener Galaxien sieht die Zukunft sehr vielversprechend aus. Unsere Forschungsgruppe wird weiterhin die Beziehung zwischen Galaxien und dunkler Materie mit Hilfe der verschiedenen oben vorgestellten Ansätze untersuchen, nun jedoch angewandt auf diese verschiedenen neuen Durchmusterungen. Unser ultimatives Ziel ist, ein genaues Bild darüber zu erhalten, wie Galaxien unterschiedlicher Eigenschaften über Halos unterschiedlicher Masse bei unterschiedlichen Rotverschiebungen verteilt sind. Wir werden auch untersuchen, ob Galaxieneigenschaften von anderen Halo-eigenschaften, wie zum Beispiel deren großräumiger Umgebung, abhängen. Alle diese Informationen enthalten wichtige Hinweise zur Galaxienentstehung. Wir haben vor, unsere Methodik mit Modellen zur Galaxienentstehung zu kombinieren, um so die verschiedenen beteiligten physikalischen Prozesse besser zu verstehen. Und nicht zuletzt ist, wie beschrieben, mit unserem CLF-Formalismus eine genaue und korrekte Beschreibung des Galaxien-Auswahleffekts möglich, so dass wir mit Hilfe der beobachteten Galaxienverteilung kosmologische Parameter eingrenzen können.

*(Frank C. van den Bosch,
in Zusammenarbeit mit Kollegen
von der Partnergruppe des MPIA
am Shanghai Astronomical Observatory,
der University of Massachusetts,
und der Universität Zürich)*

III.4 Das interstellare Medium in nahen Galaxien

Das interstellare Medium (ISM) in nahen Galaxien stellt am MPIA ein aktives Forschungsgebiet dar. Genaue Untersuchungen des ISM in Galaxien sind der Schlüssel zum Verständnis der Prozesse, die zur Sternentstehung führen, und zur Klärung der Frage, ob und wie sich die Eigenschaften der Sternentstehung in Abhängigkeit vom Typ und der Umgebung der Galaxien ändern. Das MPIA ist Stützpunkt des »HI Nearby Galaxy Survey« (THINGS), des bislang größten VLA-Programms zur Durchführung präzisester Beobachtungen der 21-cm-Linie des atomaren Wasserstoffs (HI) in nahen Galaxien.

Ziel von THINGS ist es, Schlüsseigenschaften in Zusammenhang mit Galaxienmorphologie, Sternentwicklung und Massenverteilung über die gesamte HUBBLE-Sequenz hinweg zu untersuchen. Die dafür ausgewählte Stichprobe von 34 Objekten in Entfernungen zwischen 3 und 10 Mpc deckt einen weiten Bereich an Sternentstehungsraten, Gesamtmassen, absoluten Leuchtkräften, Entwicklungsstadien und Metallgehalt ab. Forscher am MPIA sind auch an SINGS beteiligt, dem »SPITZER Infrared Nearby Galaxies Survey« (PI: R. Kennicutt, University of Cambridge, UK). Kombiniert mit SINGS stehen damit für eine sorgfältig ausgewählte Stichprobe von Schlüsselgalaxien erstklassische Beobachtungsdaten vom Röntgen- bis zum Radiobereich mit vergleichbarer Auflösung zur Verfügung. Daten aus THINGS dienen zur Erforschung von Fragen wie der kleinräumigen und dreidimensionalen Struktur des ISM, der Verteilung der (dunklen) Materie sowie der zu Sternentstehung führenden Prozesse. Darüber hinaus kann mit den Daten auch die Änderung jeder dieser Eigenschaften als Funktion der Galaxienumgebung untersucht werden. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Untersuchung globaler Eigenschaften des ISM in Galaxien unter Verwendung von Beobachtungsdaten aus allen Wellenlängenbereichen, vom Radio- bis zum Röntgenbereich.

Am MPIA durchgeführte Untersuchungen der Verteilung des molekularen Gases in der zentralen Kiloparsec-Region von Galaxien waren ein Thema im letzten Jahresbericht (»Brennstoff für die zentrale Kiloparsec-Region oder: Wie aktiviert man Galaxienzentren?« von Eva Schinnerer et al.) Ein weiterer Schwerpunkt sind die Untersuchungen der globalen Eigenschaften des ISM in Galaxien, durchgeführt mit Hilfe von Daten, die bei zahlreichen Wellenlängen vom Radio- bis zum Röntgenbereich gewonnen wurden.

Das interstellare Medium

Das interstellare Medium (ISM) gilt heute als eine der Hauptkomponenten einer Galaxie. Damit wird das (nicht-dunkle) Material, das zwischen der stellaren Komponente einer Galaxie verteilt ist, bezeichnet. Historisch gesehen, war Hartmann 1904 einer der ersten, die die Existenz einer solchen Materie in unserer Galaxis vorschlugen: Er hatte Absorptionslinien einiger naher Sterne untersucht und war zu dem Schluss gelangt, dass das Medium zwischen der Erde und einem speziellen Stern (δ Orionis) Gas enthält, in dem Calcium vorhanden ist. Aufgrund der Errungenschaften von Atomphysik und Quantenmechanik konnten in der Folge immer mehr Absorptionslinien in Sternspektren auf interstellares Gas längs der Sichtlinie zwischen einem Stern und der Erde zurückgeführt werden, was das Vorhandensein einer Art von ISM bestätigte.

Zudem hatten frühe Sternzählungen auf Fotoplatten bereits gezeigt, dass wahrscheinlich undurchsichtige Wolken für die dunklen Flecken verantwortlich sind, die das relativ diffus verteilte Licht der Milchstraße unterbrechen. Dieses Argument für eine Extinktion erhielt 1930 eine solide Grundlage, als Trümpler die Unstimmigkeit in der Entfernungsbestimmung von Sternhaufen in der Milchstraßenebene (spektroskopische gegen photometrische Entfernungsbestimmung) mit interstellarer Extinktion in Verbindung brachte. Er schloss, dass Sternlicht durch irgendein ISM abgeschwächt zu werden scheint. Um diese Zeit herum empfing Karl Jansky als erster Radiosignale aus dem Weltraum, die er später mit Radiostrahlung vom galaktischen Zentrum in Zusammenhang brachte. Etliche Jahre später (1937) stellte Reber fest, dass von fast allen Teilen der Galaxis Radiokontinuumstrahlung ausgeht, und vermutete als Quelle thermische frei-frei-Strahlung von interstellarem Gas mit einer Temperatur von $T = 10^4$ K und einer Elektronendichte von $n_e = 1/\text{cm}^3$.

Die Entdeckung des neutralen Wasserstoffs (HI)

Alle diese Beobachtungen führten zu einem ersten Bild, demzufolge das interstellare Medium der Galaxis schwere Elemente und Staub enthält. Intuitiv war jedoch bereits in dieser Zeit (um 1940) klar, dass Wasserstoff, das häufigste Element im Universum, wahrscheinlich der Hauptbestandteil des ISM ist. Damals war jedoch kein Strahlungsmechanismus des neutralen Wasserstoffs bekannt. Erst 1945 sagte van de Hulst vorher, dass atomarer Wasserstoff aufgrund eines Hyperfeinstruktur-Übergangs »verbotene« Strahlung bei 21 cm Wellenlänge aussenden

könnte, die sich im Radiobereich nachweisen ließe. Es dauerte acht Jahre, bis es drei unabhängigen Gruppen (in Australien, den Niederlanden und den USA) gelang, mit Hilfe von übrig gebliebenen Antennen und Radartechnik aus dem 2. Weltkrieg diese 21-cm-Strahlung aufzufangen. Diese Entdeckung war ein großer Durchbruch bei den Untersuchungen des ISM, und bereits ein Jahr später wurde eine erste Karte unserer Galaxis in der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs veröffentlicht.

Diese Beobachtungen revolutionierten die galaktische Astronomie, da HI in großen Mengen nachgewiesen wurde, nicht durch interstellaren Staub abgeschwächt wird, und seine Dopplerverschiebung Informationen über die Geschwindigkeit des emittierenden Gases liefert. Damit erhält man wichtige Informationen über die physikalischen Eigenschaften des interstellaren Gases. Darüber hinaus ist 21-cm-Strahlung (unter den meisten Umständen) optisch dünn; das bedeutet, dass

Abb. III.4.1: Das Very Large Array (VLA) des National Radio Astronomy Observatory nahe Socorro in New Mexico, USA. Das VLA ist ein Radiointerferometer, bestehend aus 27 Einzelantennen. Es ist das leistungsstärkste Radioteleskop für Untersuchungen der 21-cm-Linie des atomaren Wasserstoffs (HI). Etwa 500 Stunden VLA-Zeit waren für die in Abb. III.4.2 gezeigten HI-Karten nötig. (Bild mit freundlicher Genehmigung des NRAO/AUI)

die beobachtete HI-Säulendichte ein direktes Maß für die Gesamtmasse an neutralem Wasserstoff in einem System ist.

Die verschiedenen Phasen des ISM

Mit den ersten Messungen der Emission und Absorption des neutralen Wasserstoffs wurde klar, dass atomarer Wasserstoff in zwei verschiedenen Phasen vorliegen kann: kalt und warm. Dies führte zu den ersten Modellen der Struktur des ISM. Ein erster Versuch, die unterschiedlichen Absorptions- und Emissionsmerkmale des ISM zu erklären, wurde 1965 von Clark unternommen, der das »Rosinenpudding«-Modell einführte. Einige Jahre später erweiterten und formalisierten Field, Goldsmith und Habing diese Idee in ihrem Zwei-Phasen-Modell, demzufolge das ISM aus einer kalten und einer warmen Phase im statischen Gleichgewicht besteht. Später, Mitte der Siebzigerjahre, erkannten Cox und Smith, dass die heißen Innenbereiche alter Supernovahüllen länger als 10^6 Jahre im ISM fortbestehen müssten – so lang, dass sich die heißen Innenbereiche miteinander zu einem »Tunnel«-System aus heißem koronalem Gas ($T > 10^6$ K, benannt nach der Sonnenkorona) verbinden könnten, was zu einer Morphologie ähnlich einem Schweizer Käse führen würde. Damit war die Idee einer neuen Phase geboren, des heißen interstellaren Mediums (HIM). McKee und



Ostriker nahmen diese Vorstellung in ihr berühmtes Drei-Phasen-Modell auf, in dem sich kühle, warme und heiße Phasen des ISM in einem globalen Druckgleichgewicht befinden.

Beobachtungen bei vielen Wellenlängen

Kehren wir zu den Beobachtungen zurück, so wurden in der Folge noch zahlreiche andere Atome und Moleküle im ISM entdeckt. Anfang der Siebzigerjahre offenbarten mit Satelliten durchgeführte spektroskopische Untersuchungen im UV-Bereich Hunderte von Absorptionslinien und ermöglichten es, die Häufigkeiten schwerer Metalle im ISM zu bestimmen. Die gleichen Untersuchungen zeigten auch, dass molekularer Wasserstoff, H_2 , wie erwartet das wahrscheinlich häufigste interstellare Molekül ist. Um dieselbe Zeit gelang es Satelliten, die im fernen Infrarotbereich (FIR) des Spektrums arbeiteten, Strahlung von warmem Staub direkt nachzuweisen; zu den ersten Missionen gehört auch der IRAS-Satellit, der den gesamten Himmel im FIR beobachtete. Dem folgte später der ISO-Satellit – und heute revolutioniert das leistungsfähige Weltraumteleskop SPITZER der NASA unsere Sicht des staubigen ISM in Galaxien. Bei den ersten Weltraum-Röntgenmissionen wurde heißes ($T \sim 10^6\text{--}7$ K) Gas entdeckt, das Röntgenstrahlung aussendet. Neben anderen Entdeckungen lieferten die neu auf gekommenen Röntgen- und UV-Satelliten Beweise für die vorhergesagte heiße Phase des ISM, indem sie diffuse Röntgenstrahlung sowie OVI (λ 1032Å – 1037Å) UV-Absorptionslinien nachwies. Dies führte zu einer einschneidenden Änderung im qualitativen Verständnis des ISM. Damit ist klar, dass Beobachtungen bei vielen Wellenlängen (vom Radio- bis zum Röntgenbereich) nötig sind, um mehr über die verschiedenen Bestandteile und unterschiedlichen Phasen des ISM zu erfahren.

Die Zusammensetzung des ISM

Kurz gesagt, kann die interstellare Materie in folgende Bestandteile zerlegt werden:

- *Wasserstoff* (H_2 , HI, HII, e^-) ist der vorherrschende Bestandteil des ISM in Galaxien und stellt etwa 90% der Teilchen der gesamten interstellaren Materie, sowohl in ihrer molekularen als auch neutralen oder ionisierten Form.
- *Helium* (He) wurde wie der Wasserstoff hauptsächlich in der Nukleosynthese während des Urknalls erzeugt. Daher geht man davon aus, dass es gleichmäßig mit Wasserstoff vermischt ist. Etwa 9% der ISM-Teilchen sind Helium, was etwa 28% der Masse entspricht.
- *Andere Atome und Moleküle*: Schwerere Elemente, hauptsächlich erzeugt von massereichen Sternen, stellen nur einen geringen Anteil; so stellen z.B. C, N, O, Ne und Fe 10^{-3} bis 10^{-4} der Teilchen. Alle anderen Atome und Moleküle sind praktisch nur in Spuren vorhanden. Da jedoch für eine wirksame Kühlung

schwere Elemente benötigt werden, sind sie wichtig für die Energiebilanz des ISM. Schwere Elemente sind auch nützlich für die Erkundung der physikalischen Bedingungen (wie Druck und Temperatur) im ISM.

- *Staubteilchen*: Staubteilchen und -körner steuern größenordnungsmäßig einige Prozent der Masse einer typischen interstellaren Umgebung bei.
- *Kosmische Strahlung und Magnetfelder*: Das ISM ist von einem Magnetfeld durchzogen, das größenordnungsmäßig einige Mikrogauß stark ist und die Bewegung der kosmischen Strahlungsteilchen, hauptsächlich Protonen, einschränkt.

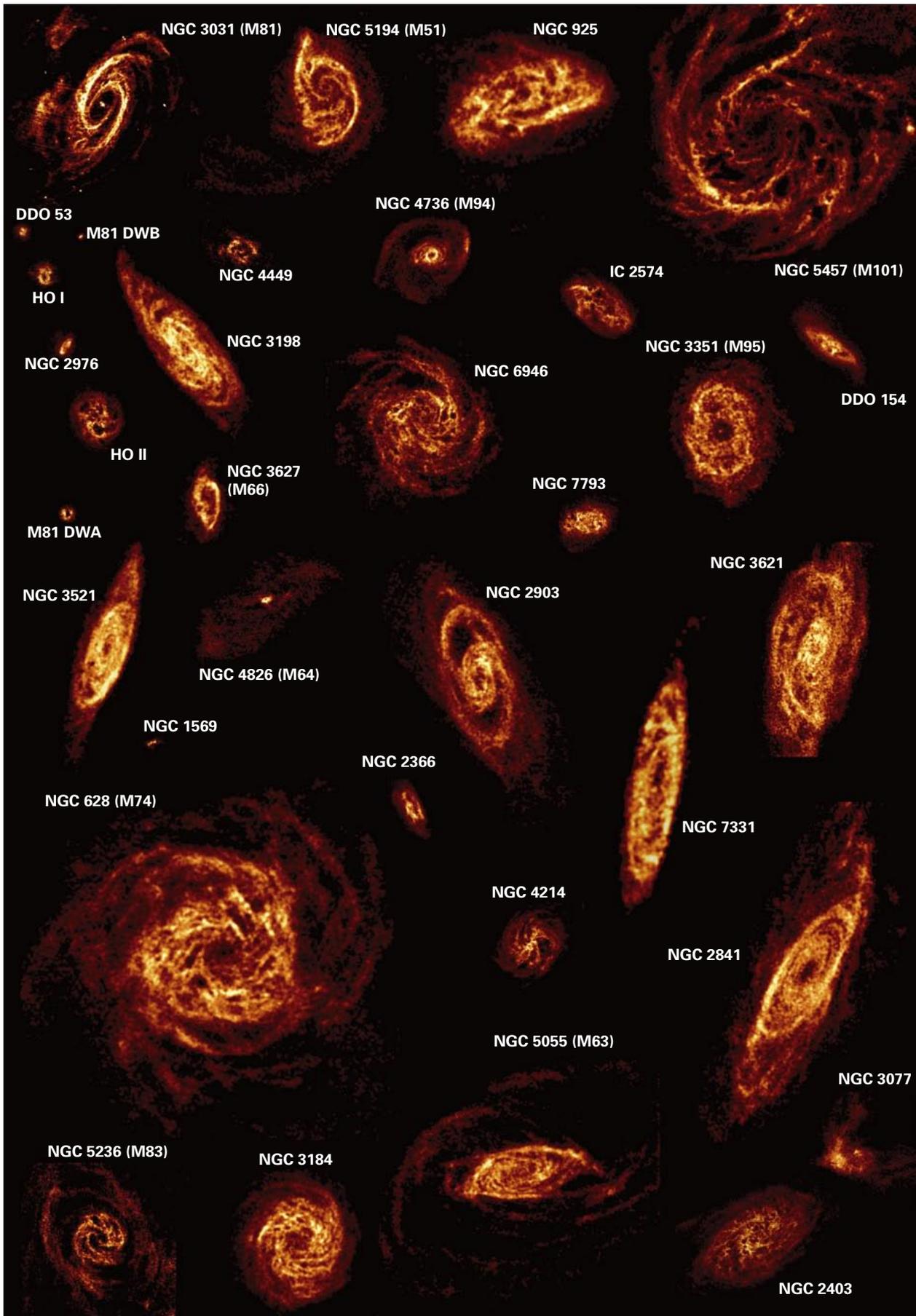
Beobachtungen des neutralen ISM

HI-Beobachtungen mit Radioteleskopen bilden einen Grundstein bei heutigen Untersuchungen des ISM. Nach der ersten HI-Kartierung der Galaxis fand eine rapide technische Entwicklung statt, und als größere Radioteleskope zur Verfügung standen, wurden auch höhere Auflösungen erzielt. So haben z.B. die mit einer Einzelantenne Mitte der Siebzigerjahre durchgeführten Galaxien-Durchmusterungen gezeigt, dass das ISM unserer Galaxis nicht gleichförmig verteilt ist sondern eine hochgradige Struktur und Komplexität aufweist (meistens in Form von großen HI-Löchern, Bögen, Schleifen und Hüllen). Dieser Zustand wurde später als »kosmisches Schaumbad«, »Schweizer Käse« oder »gewaltsames interstellares Medium« bezeichnet. Mit dem Aufkommen leistungsstarker Radio-Synthese-Teleskope wie des Very Large Array (VLA), des Australia Telescope Compact Array (ATCA) und des Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) wurde klar, dass das ISM in nahen Galaxien in ähnlicher Weise gestaltet ist.

THINGS: The HI Nearby Galaxy Survey

Untersuchungen des atomaren interstellaren Mediums (ISM) mittels Beobachtungen der 21-cm-Linie des atomaren Wasserstoffs (HI) sind entscheidend für unser Verständnis der Prozesse, die zur Sternentstehung führen, der Dynamik und Struktur des ISM sowie der Verteilung der (dunklen) Materie. Dabei werden auch bedeutende Fragen in Zusammenhang mit der Entwicklung von Galaxien berührt. Im Jahr 2003 wurde am Very Large Array (Abb. III.4.1) des Natio-

Abb. III.4.2: Integrale HI-Karten der THINGS-Galaxien. Alle Galaxien sind maßstabsgetreu dargestellt (d.h. 1 cm entspricht der gleichen physikalischen Länge). Dieses Komposit zeigt die verblüffende Vielfalt der Galaxienmorphologien, von den Zwerggalaxien *unten links* bis zu den massereicheren und größeren Spiralgalaxien. In der Mehrzahl der Fälle ist die Verteilung des atomaren Wasserstoffs geprägt durch so genannte HI-Hüllen und -Blasen.



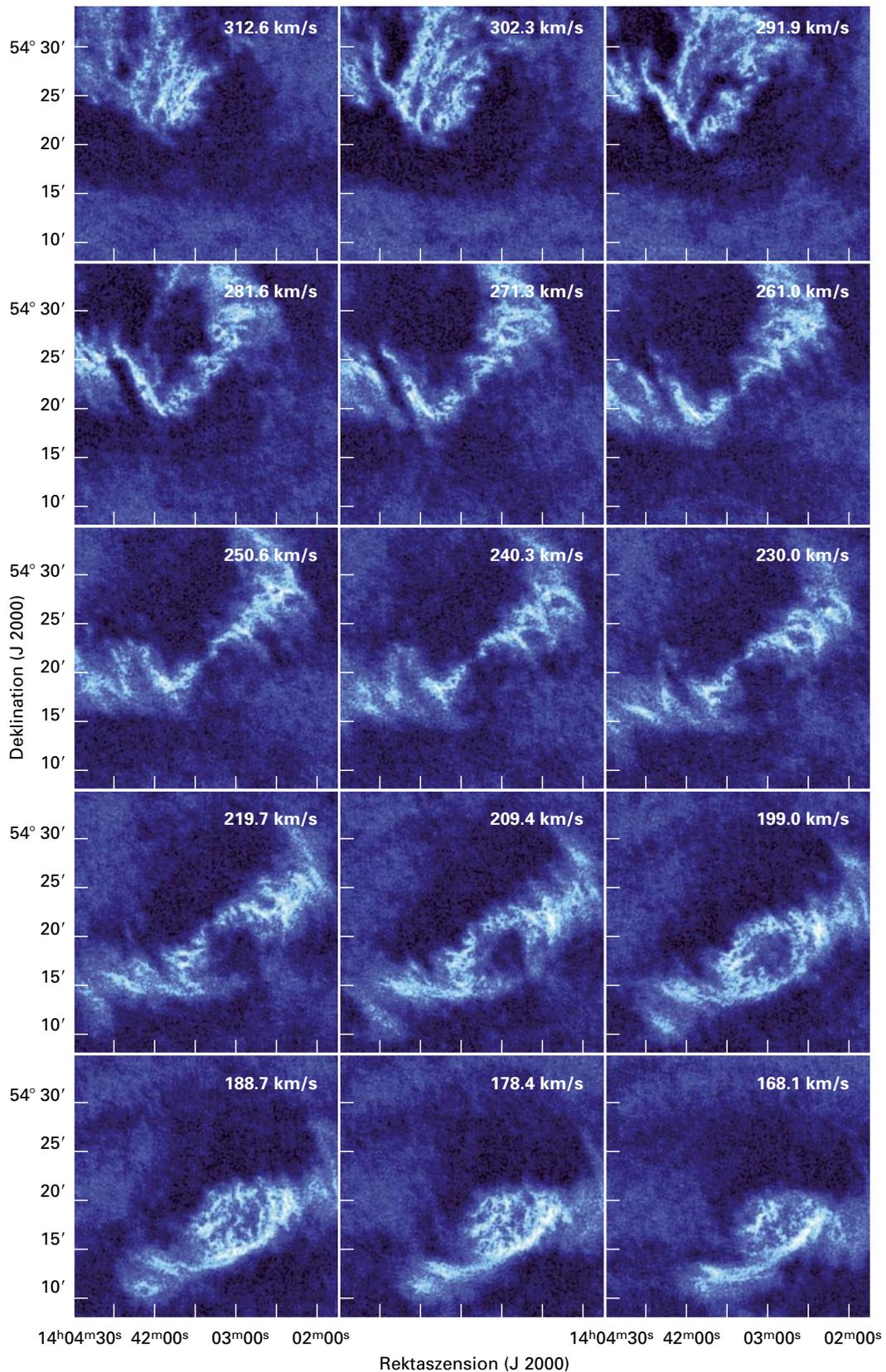


Abb. III.4.3: »Kanal-Karten« für eine der THINGS-Galaxien (M101). Jedes Diagramm zeigt HI-Strahlung bei einer bestimmten Geschwindigkeit (Geschwindigkeiten sind oben rechts in jedem Diagramm angegeben). Mit Hilfe dieser Geschwindigkeitsinformation können Karten der durchschnitt-

lichen Geschwindigkeit pro Pixel (so genannte »Geschwindigkeitsfelder«) oder der Geschwindigkeitsdispersion pro Pixel (siehe Abb. III.4.4) erstellt werden. Man beachte die Fülle an Feinstruktur im ISM in den einzelnen Kanal-Karten.

nal Radio Astronomy Observatory (NRAO) das Projekt »The HI Nearby Galaxy Survey (THINGS)« gestartet. Ziel von THINGS war es, hochwertige Beobachtungen des atomaren ISM in einer soliden Stichprobe naher Galaxien zu erhalten, die einen weiten Bereich an HUBBLE-Typen, Sternentstehungsraten, absoluten Leuchtkräften, Entwicklungsstadien und Metallgehalt überdeckt. Diese Datenbank weist eine einheitliche Empfindlichkeit auf und die räumliche und die Geschwindigkeitsauflösung liegen an der Grenze dessen, was mit dem NRAO Very Large Array erreicht werden kann.

Die meisten Galaxien in THINGS gehören zum »SPITZER Infrared Nearby Galaxy Survey (SINGS)« Legacy Project. Dieses von R. Kennicutt (Cambridge University) geleitete Projekt soll die Eigenschaften des ISM in nahen Galaxien mittels Beobachtungen bei verschiedenen Wellenlängen untersuchen. SINGS wird eine im Infrarotbereich durchgeführte Durchmusterung von fünf nahen Galaxien liefern, die sowohl aus direkten Abbildungen als auch aus Spektren besteht. Somit werden die Ergebnisse von THINGS die SINGS-Daten ergänzen.

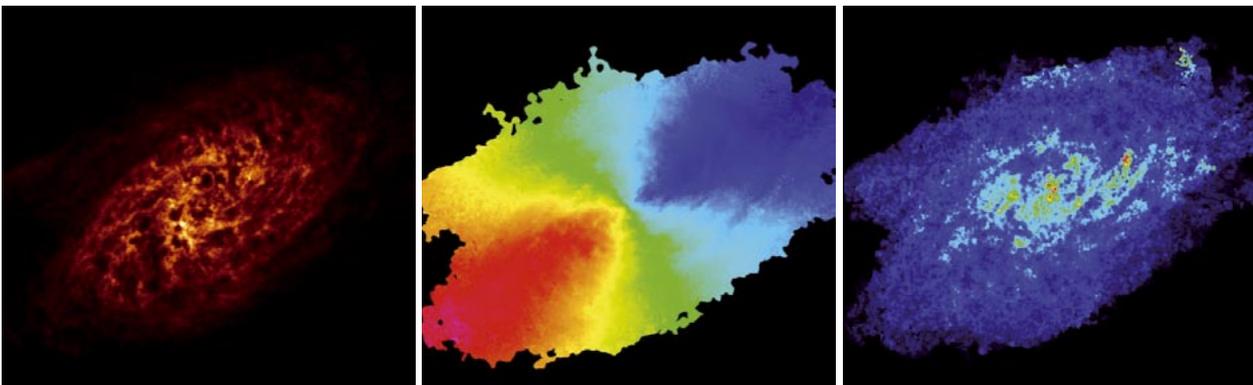
Abb. III.4.2 zeigt ein Komposit aus allen HI-Karten aller THINGS-Galaxien. In dieser Abbildung sind alle Galaxien im gleichen physikalischen Maßstab dargestellt (d.h. 1 cm entspricht derselben physikalischen Länge). Die Auflösung aller Karten in dieser Abbildung beträgt 10 Bogensekunden, was (je nach Entfernung des Objekts) linearen Abmessungen von 100 – 300 pc entspricht. Offensichtlich zeigen die Galaxien dieser Stichprobe eine verblüffende Vielfalt an Morphologien, von den Zwerggalaxien unten links bis zu den massereicheren und größeren Spiralgalaxien. In der Mehrzahl der Fälle ist die Verteilung des atomaren Wasserstoffs geprägt durch HI-Hüllen und -Blasen.

Abb. III.4.4: Sämtliche Diagramme zeigen als Beispiel NGC 2403. *Links:* Integrale HI-Säulendichtekarte (ähnlich der in Abb. III.4.2 gezeigten Karte). *Mitte:* Geschwindigkeitsfeld von NGC 2403; unterschiedliche Farben kennzeichnen unterschiedliche Geschwindigkeiten: Rottöne bezeichnen strahlendes Gas, die sich von uns weg bewegt, Blautöne Materie, die auf uns zu kommt. Diese Informationen dienen zur Ermittlung von

Zusätzlich zur hohen räumlichen Auflösung geben die THINGS-Beobachtungen auch Einblicke in die Kinematik der Systeme, da die Stärke der Dopplerverschiebung der HI-Linie die Geschwindigkeit angibt, mit der sich das Gas bewegt. Dies ist in Abb. III.4.3 veranschaulicht, wo wir die so genannten Kanal-Karten (d.h. getrennt nach Frequenzintervallen) für eine der THINGS-Galaxien (M101) zeigen. In jedem Diagramm ist daher nur die bei einer bestimmten Geschwindigkeit gemessene HI-Strahlung dargestellt (wie oben rechts in jedem Diagramm angegeben). Hieraus ist klar ersichtlich, dass unterschiedliche Teile der Galaxie unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen – die »Bewegung« von oben links nach unten rechts (mit steigender Kanal-Nummer) ist auf die Rotation der Galaxie zurückzuführen (die zurückweichende Seite ist in den ersten Kanälen zu sehen, die auf uns zu kommende Seite in den letzten Kanälen; die Systemgeschwindigkeit der Galaxie liegt bei 240 km/s). Neben dieser globalen Rotation lassen die Kanal-Karten auch eine Fülle von Feinstruktur im ISM erkennen.

Für jede der THINGS-Galaxien werden dann mit Hilfe dieser Kanal-Karten folgende Karten erstellt: 1) die integralen HI-Karten (durch einfaches Aufaddieren der in den Kanal-Karten zu sehenden Kanäle), 2) eine Karte der Durchschnittsgeschwindigkeit für jedes Pixel (so genannte Geschwindigkeitsfelder) und 3) eine Karte der Geschwindigkeitsdispersion. Als Beispiel sind in Abb. III.4.4 diese drei Karten für die Galaxie NGC 2403 wiedergegeben. Das linke Diagramm zeigt die integrale HI-Karte, auf der zahlreiche Löcher und Hüllen im ISM zu erkennen sind. Das mittlere Diagramm zeigt das Geschwindigkeitsfeld: Rottöne kennzeichnen von uns zurückweichende Strahlung, Blautöne Gas, das auf uns zu kommt (die globale Rotation dieser Galaxie ist aus

Rotationskurven und zur Untersuchung der kleinräumigen Kinematik in Galaxien. *Rechts:* Karte der Geschwindigkeitsdispersion in NGC 2403. Rottöne kennzeichnen eine hohe Dispersion im atomaren ISM, Blautöne ruhigere Gebiete. Mit Hilfe derartiger Karten wird untersucht, wie viel Energie durch Sternentstehung ins ISM eingespeist wird.



diesem Diagramm klar ersichtlich). Die Geschwindigkeitsdispersion (rechtes Diagramm) scheint in Gebieten mit Spiralarmen und Sternentstehung höher zu sein, was durch die mechanische Rückkopplung der Sterne in den Spiralarmen erklärt werden könnte. Typische Auflösungen für die THINGS-Beobachtungen sind eine räumliche Auflösung von 7 Bogensekunden und eine Geschwindigkeitsauflösung von 2.5 – 5 km/s.

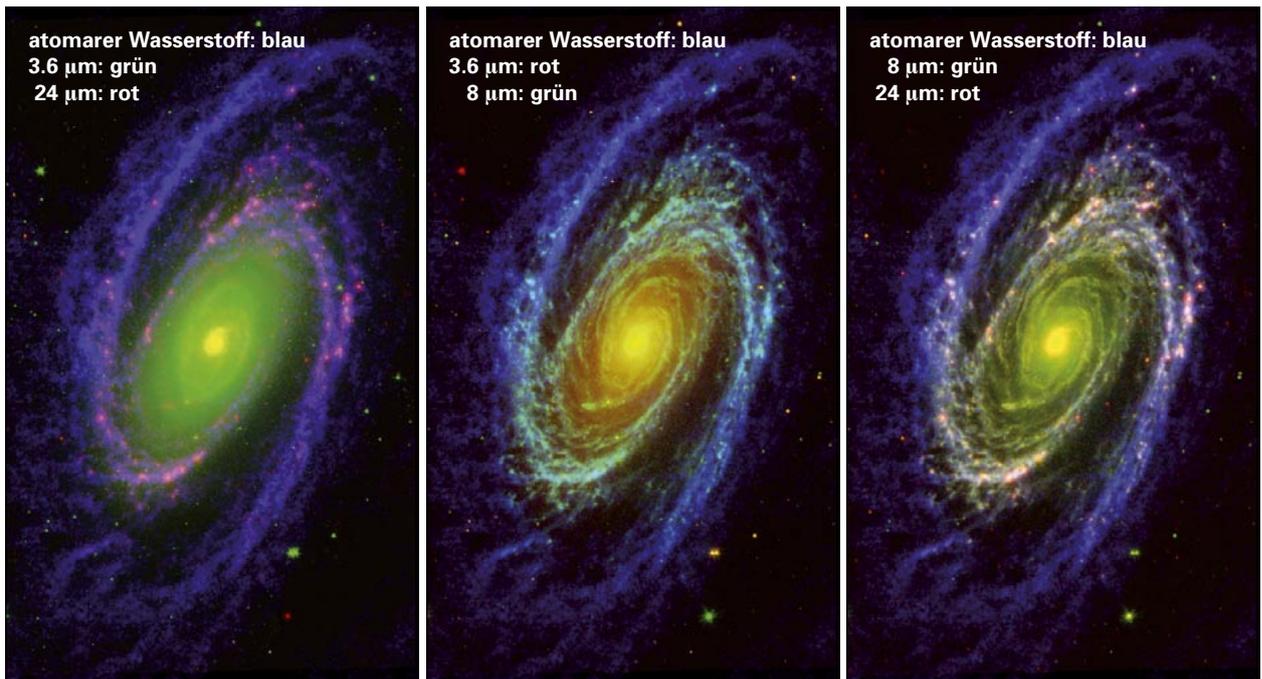
Wissenschaftlicher Hintergrund von THINGS

Wechselspiel ISM – Sternentstehung. THINGS ermöglicht Untersuchungen des Wechselspiels zwischen Sternentstehung (aufgespürt durch H α -, ferne UV-, IR- und Röntgenstrahlung) und dem umgebenden ISM bei einer Auflösung von 100 – 300 pc und über einen Bereich verschiedener HUBBLE-Typen hinweg. Auf diesen kleinen Skalen können Ort und Energieeinspeisung von Gebieten jüngster Sternentstehung sowie ihre Auswirkung auf die Struktur und Dynamik des HI-Gases erforscht werden. Mit THINGS wird eine Bestandsaufnahme von übergroßen Hüllen als Funktion vom HUBBLE-Typ möglich sein (siehe Abb. III.4.2). Die Resultate, die aus THINGS-Daten gewonnen werden, erlauben Untersuchungen, wie sich diese Strukturen bilden und wie sie wiederum sekundäre Sternentstehung auslösen können. Durch Kombination mit den Daten von

SINGS, die bei verschiedensten Wellenlängen aufgenommen werden, kann ein vollständiger Energiehaushalt des ISM abgeleitet werden. Als Beispiel zeigen wir in Abb. III.4.5 einen Vergleich von Aufnahmen der Spiralgalaxie M81, die bei vielen unterschiedlichen Wellenlängen gemacht wurden. In dieser Abbildung ist die Verteilung des atomaren Wasserstoffs in allen Diagrammen blau dargestellt. Die anderen Wellenlängenbereiche wurden mit SPITZER beobachtet (die Farben sind in jedem Diagramm erklärt). Die Strahlung bei 3.6 μ m wird von alten Sternen aus dem Bulge (zentrale Verdickung einer Galaxie) beherrscht, während die 8- μ m-Karte Strahlung von Sternen und heißem Staub sowie so genannte PAH-Emissionsmerkmale enthält. Derartige Vergleiche liefern für sämtliche THINGS/SINGS-Galaxien wichtige Anhaltspunkte über die Prozesse, die zu Sternentstehung führen. Ein weiteres Beispiel ist in Abb. III.4.6 zu sehen, wo wir ein Dreifarben-Komposit der nahen Spiralgalaxie M 101 zeigen. Die aus THINGS-Daten abgeleitete Verteilung des atomaren Wasserstoffs ist grün dargestellt. Blau kennzeichnet Strahlung, die von GALEX beobachtet wurde, einem UV-Satelliten, der aktuelle und vergangene Sternentstehung aufspürt. Rot kennzeichnet Strahlung bei 24 μ m, beobachtet vom SPITZER-Weltraumteleskop. In dieser herrscht thermische Emission von heißem Staub vor, die ihre Energie aus jungen Sternentstehungsgebieten bezieht.

Abb. III.4.5: Die Spiralgalaxie M81 bei unterschiedlichen Wellenlängenbereichen: Die aus THINGS-Daten abgeleitete Verteilung des atomaren Wasserstoffs ist in allen Diagrammen blau dargestellt. Die anderen Wellenlängenbereiche wurden mit SPITZER beobachtet (die Farben sind in jedem Diagramm erklärt). Die Strahlung bei 3.6 μ m wird von alten Sternen aus dem

Bulge (zentrale Verdickung einer Galaxie) beherrscht, während die 8- μ m-Karte Strahlung von Sternen und heißem Staub sowie so genannte PAH-Emissionsmerkmale enthält. Derartige Vergleiche liefern für sämtliche THINGS/SINGS-Galaxien wichtige Anhaltspunkte über die Prozesse, die zu Sternentstehung führen.



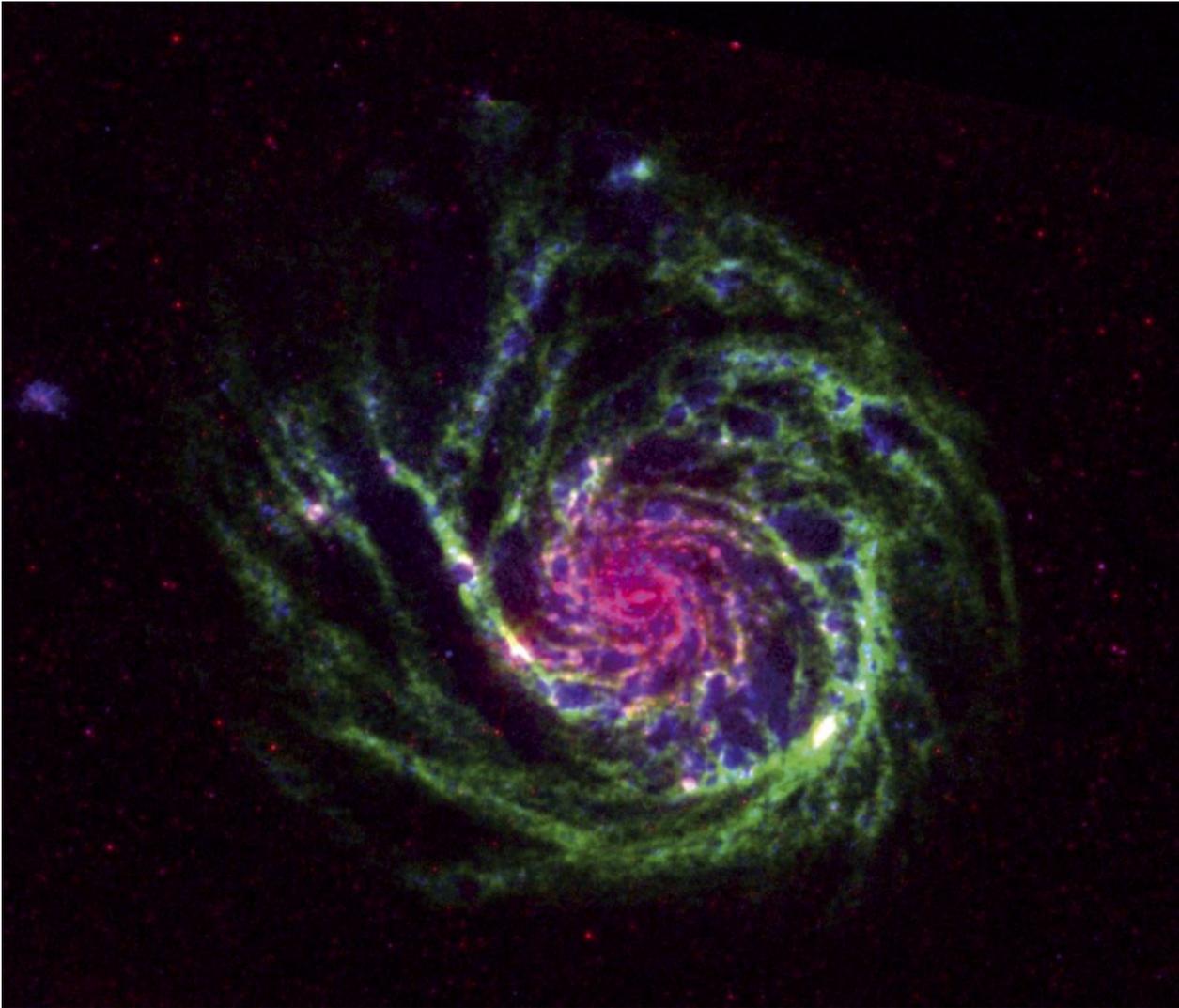


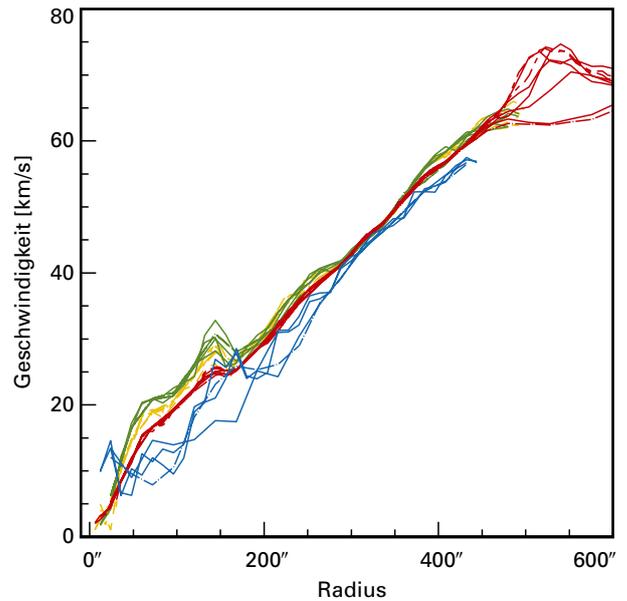
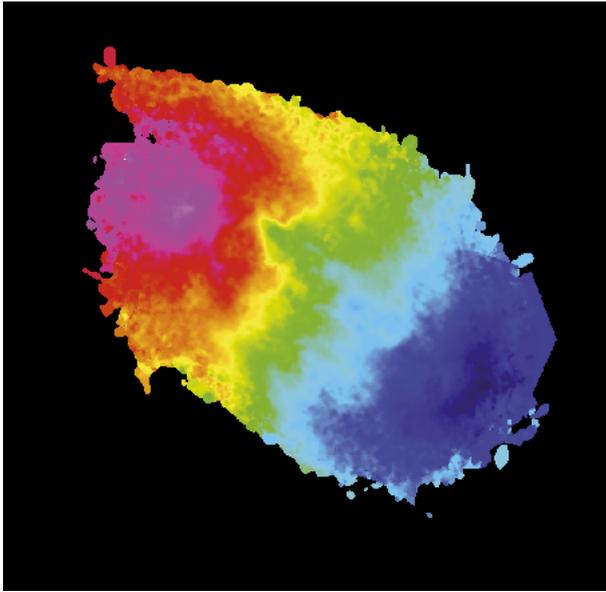
Abb. III.4.6: Dreifarben-Komposit der nahen Spiralgalaxie M 101. Die aus THINGS-Daten abgeleitete Verteilung des atomaren Wasserstoffs ist grün dargestellt. Blau kennzeichnet Strahlung, die von GALEX beobachtet wurde, einem UV-Satelliten, der aktuelle und vergangene Sternentstehung aufspürt. Rot kenn-

zeichnet Strahlung bei 24 Mikron, beobachtet mit dem SPITZER-Weltraumteleskop; in ihr herrscht Strahlung von heißem Staub vor, die ihre Energie aus jungen Sternentstehungsgebieten bezieht. (Bild Credits: Karl Gordon, Steward Observatory).

Globale Massenverteilung

Ein weiteres aktuelles Thema, das derzeit mit THINGS behandelt werden kann, dreht sich um die Frage, warum Modelle mit kalter dunkler Materie (CDM) offenbar nicht in der Lage sind, die Verteilung von dunkler Materie in Galaxien zu erklären. Numerische CDM-Simulationen führen zu Halos mit einer steil ansteigenden zentralen Dichtekonzentration (engl. cusp), wogegen Beobachtungen auf Halos mit einem Kern konstanter Dichte hinzudeuten scheinen. Dieses letztere Ergebnis, das möglicherweise ein ernstes Problem für die CDM-Kosmologie darstellt, ist aber noch mit Unsicherheiten auf der Beobachtungsseite behaftet, z.B. könnten eventuell nichtkreisförmige Bewegungen

vorherrschend. Diese Effekte können direkt anhand der Ergebnisse aus THINGS-Daten untersucht werden, z.B. indem man zweidimensionale hochaufgelöste Geschwindigkeitsfelder verwendet, um genaue Rotationskurven herzuleiten und so die Verteilung der dunklen Materie einzugrenzen. Daten mit hoher räumlicher Auflösung (100 – 300 pc) nahe am Zentrum sind besonders wichtig, da die Unstimmigkeiten am deutlichsten in den Zentralregionen sichtbar werden. Als Beispiel zeigen wir in Abb. III.4.7 die Rotationskurve der irregulären Zwerggalaxie IC 2574 (Mitglied der M81-Galaxiengruppe). Im linken Diagramm ist das Geschwindigkeitsfeld von IC 2574 dargestellt (eine integrale HI-Karte dieser Galaxie findet man in Abb. III.4.2). Mit Hilfe dieses Geschwindigkeitsfelds (und



ähnlicher weiterer bei unterschiedlichen Auflösungen) werden die Rotationsgeschwindigkeiten dieser Galaxie abgeleitet – eine solche Rotationskurve ist im rechten Diagramm abgebildet (die verschiedenen Farben bezeichnen die für unterschiedliche Auflösungen ermittelten Rotationsgeschwindigkeiten). Im Falle von IC 2574 steigt die Rotationskurve fast linear an, was darauf hindeutet, dass die Galaxie bis hinaus zu großen galaktozentrischen Entfernungen beinahe wie ein fester Körper rotiert. Dies steht in krassem Gegensatz zu den Rotationskurven massereicherer Spiralgalaxien, in denen die Rotationskurven typischerweise steil ansteigen und dann über den Großteil der Scheibe der Galaxie flach bleiben. Für alle THINGS-Galaxien sollen mit Hilfe der Rotationskurven jeweils die genaue Dynamik und der Gehalt an dunkler Materie bestimmt werden.

Zusammenfassung

Der am MPIA beheimatete »HI Nearby Galaxy Survey (THINGS)« ist das größte je am VLA durchgeführte Programm zur Beobachtung der 21-cm-Linie von HI in nahen Galaxien mit höchstmöglicher Qualität (Auflösung 7'' bzw. 5 km/s). THINGS macht sich auch Archivmaterial zu Nutze und beläuft sich auf insgesamt 500 Stunden VLA-Beobachtungszeit. Die eigentlichen THINGS-Beobachtungen begannen im September 2003 und waren im Sommer 2005 abgeschlossen. Untersucht wird eine Stichprobe von 34 Objekten bei Entfernungen zwischen 3 und 10 Mpc, die einen weiten Bereich an Sternentstehungsraten, Gesamtmassen, absoluten Leuchtkräften, Entwicklungsstadien und Metallgehalt abdecken. THINGS-Daten ergänzen SINGS, den »SPITZER

Abb. III.4.7: Dynamische Analyse einer der THINGS-Galaxien, der Zwerggalaxie IC 2574. *Links:* Geschwindigkeitsfeld von IC 2574 (vgl. Abb. III.4.2 und III.4.4). *Rechts:* Rotationskurve für IC 2574, abgeleitet aus Geschwindigkeitsfeldern ähnlich dem links gezeigten (die verschiedenen Farben beziehen sich auf unterschiedliche Auflösungen beim Ableiten der Rotationskurve). Für jeden Radius ist die kreisförmige Rotationsgeschwindigkeit von IC 2574 aufgetragen; der lineare Anstieg deutet darauf hin, dass diese Zwerggalaxie wie ein fester Körper rotiert.

Infrared Nearby Galaxies Survey«. Damit stehen für jede Galaxie erstklassige Beobachtungsdaten vom Röntgenbis zum Radiobereich mit vergleichbarer Auflösung zur Verfügung. Am MPIA werden mit Hilfe von THINGS-Daten Fragen wie die kleinräumige und dreidimensionale Struktur des ISM, die Verteilung der (dunklen) Materie sowie die Prozesse, die zu Sternentstehung führen, untersucht. Darüber hinaus ermöglicht THINGS Untersuchungen darüber, wie sich jede dieser Eigenschaften in Abhängigkeit der Galaxienumgebung ändert. Größere Fortschritte bei der Erforschung des atomaren interstellaren Mediums in Galaxien werden erst möglich sein, wenn die nächste Generation von Radioteleskopen wie das Square Kilometer Array (SKA) ihre Arbeit aufnimmt.

(Am MPIA sind an den Projekten THINGS und SINGS beteiligt:
Fabian Walter, John Cannon,
Frank Bigiel, Hélène Roussel
und Dominik Tamburro)

IV. Instrumentelle Entwicklungen

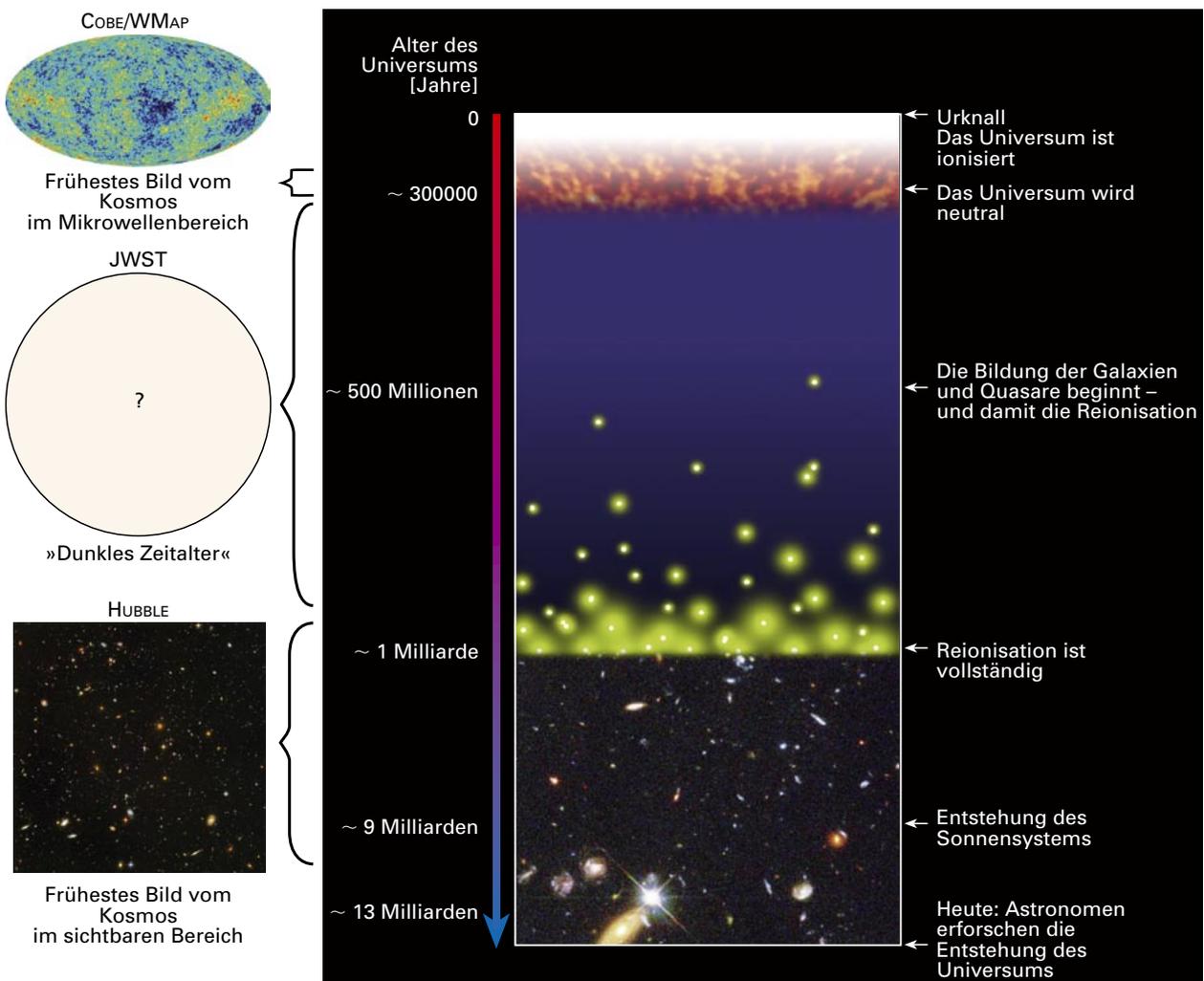
IV.1 Instrumente für das James Webb Weltraumteleskop

Im Sommer 2013 soll das James Webb Space Telescope (JWST) als Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE gestartet werden. Das 6,5-m-Teleskop wird rund 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt platziert sein und im Infraroten beobachten. Am MPIA werden die beweglichen Teile für die Instrumente NIRCAM, NIRSPEC und MIRI entwickelt.

Abb. IV.1.1: Die Entwicklung des Universums vom Urknall (oben) bis heute (unten). Aus dem Mikrowellenbereich haben wir ein Bild vom Zustand der Welt im Alter von $\sim 300\,000$ Jahren (COBE/WMAP). Die letzten ~ 12 Milliarden Jahre sind auf Bildern bodengebundener Großteleskope und vom Weltraumteleskop HUBBLE zu sehen. Dazwischen liegt das »Dunkle Zeitalter« des Kosmos, in dem die ersten Sterne entstanden. Diese Lücke soll vom JWST geschlossen werden.

HUBBLE braucht einen Nachfolger

Auch Weltraumteleskope altern: Die Solarzellen liefern im Laufe der Jahre weniger Strom, die Kreisel der Lageregelung fallen nacheinander aus, elektronische Bauteile können durch die hochenergetische kosmische Strahlung beschädigt werden, Mechanismen lassen sich irgendwann nicht mehr bewegen. Aber Weltraumteleskope veralten auch: Die technische Auslegung muss bereits einige Jahre vor dem Start eingefroren werden. Der rasche Fortschritt bei elektronischen Kameras, bei Rechnern und Speichern, in der Regelungstechnik und bei Materialien, lässt ein schon einige Jahre betriebenes Weltraumteleskop 'alt' aussehen, gemessen an dem, was heute möglich wäre – das ist allen beteiligten Entwicklern klar.



Das alles ist vorhersehbar, und deshalb begann auch schon wenige Jahre nach dem Start des Weltraumteleskops HUBBLE (HST) die Planung seines Nachfolgers, des »Next Generation Space Telescope« (NGST). Dieses neue Gerät sollte die Leistungen seines berühmten Vorgängers weit übertreffen. Es ist eine im letzten Jahrhundert vielfach bestätigte Erfahrung: Sobald eine Leistungsgröße eines astronomischen Instrumentes um das etwas 10-fache gesteigert wird, folgen Entdeckungen im Universum. Bei HUBBLE wurden Empfindlichkeit und räumliche Auflösung, verglichen mit erdgebundenen Teleskopen, um jeweils diese Größenordnung gesteigert. Damit konnten die jüngsten Sterne mit ihren Staubscheiben im Orion-Nebel und die entferntesten Galaxien bei einer Rotverschiebung von $z \sim 6$ abgebildet werden. Die Liste der Entdeckungen mit HUBBLE ist sehr viel länger. Diese vielleicht erfolgreichste »Wissenschaftsmaschine« hat die oben erwähnte Regel eindrucksvoll bestätigt.

»Erstes Licht als Ziel«

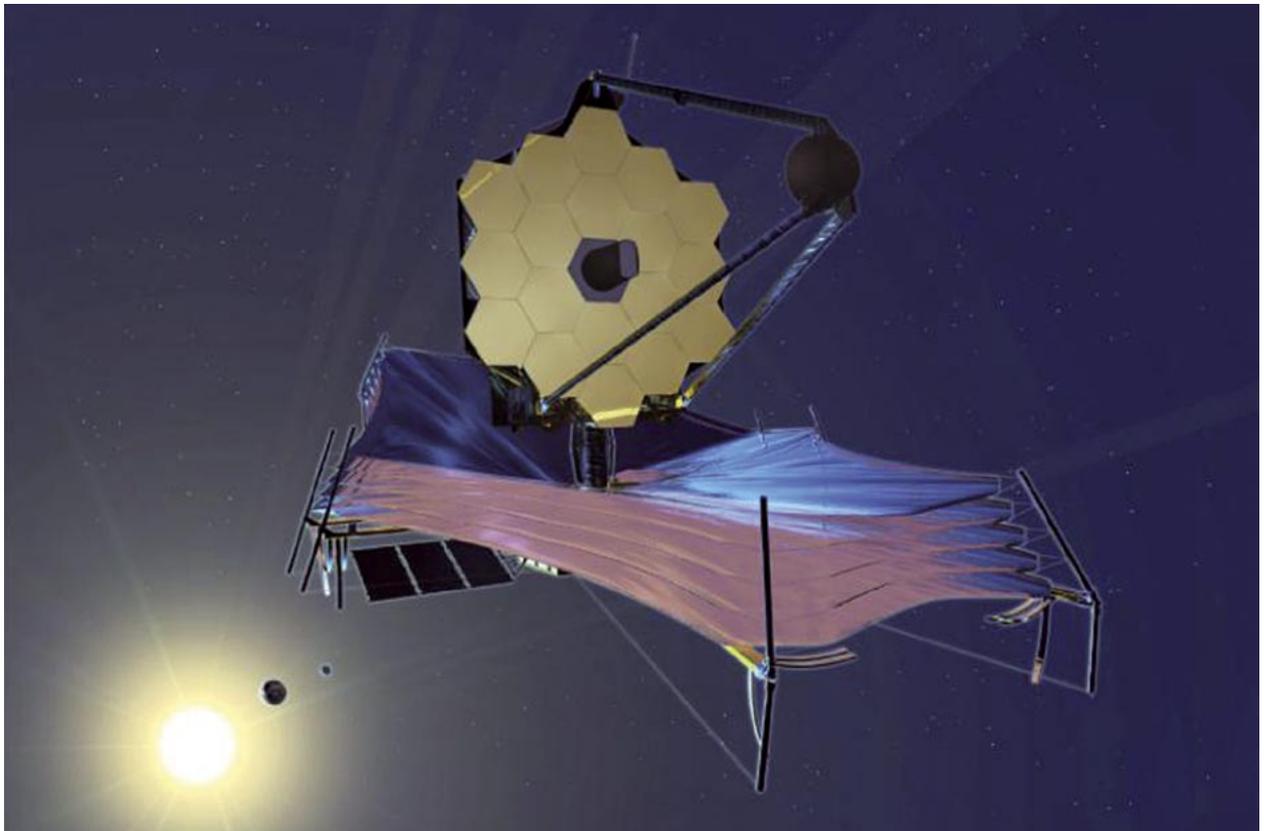
Wenn auch die Erwartung vieler unvorhersehbarer Entdeckungen eine Triebfeder bei der Entwicklung des NGST war, wurde die Aufstellung des Pflichtenheftes für seine Leistungsdaten von einer Reihe klar benennbarer wissenschaftlicher Ziele bestimmt. Das wichtigste ist die Beobachtung des »ersten Lichtes« im Universum, also der ersten Sterne und/oder Galaxien. Zwischen dem frühesten Bild des Kosmos im Alter von 300 000

Jahren nach dem Urknall (bei einer Rotverschiebung von $z \sim 1000$) und dem HUBBLE Ultra Deep Field mit hochrotverschobenen Galaxien bei $z \sim 6$, also im kosmischen Alter von einer Milliarde Jahren, liegt das bisher unbeobachtbare »Dunkle Zeitalter« des Kosmos (Abb. IV.1.1).

Während dieser Zeit müssen aus dem sich abkühlenden Feuerball des Universums die ersten Sterne entstanden sein. Sie bestanden nur aus Wasserstoff und Helium und waren vermutlich heiß ($T > 50\,000$ K) und massereich (≥ 100 Sonnenmassen). Durch ihre hohe Leuchtkraft war das Leben der ersten Sterne sehr kurz, viele explodierten als Supernovae und reicherten dabei mit den in ihrem Inneren erbrüteten schwereren Elementen (den »Metallen«, wie im Astronomen-Jargon alle Elemente schwerer als Helium heißen) das frühe Universum an. Da die ersten Sterne auch sehr heiß waren, konnten sie das dunkle neutrale Gas ionisieren.

Mit den empfindlichsten (oder »tiefsten«) Aufnahmen des Universums lassen sich heute die letzten 12 Milliarden Jahre seiner Entwicklung überblicken. Die entferntesten und damit jüngsten Galaxien, die heute bis zu einer Rotverschiebung von $z \sim 6$ beobachtet werden können,

Abb. IV.1.2: Der 6,5-m-Spiegel des JWST ist aus 18 justierbaren Einzelspiegeln aufgebaut. Der Strahlungsschild hat die Größe eines Tennisplatzes. Das JWST umkreist den Lagrangepunkt L2, im Hintergrund ist in 1,5 Millionen km Abstand die Erde mit Mond zu sehen. Nochmals 150 Millionen km weiter entfernt steht die Sonne.



sind schon sehr groß, wie das HUBBLE Ultra Deep Field eindrucksvoll belegt. Also müssen die ersten Galaxien/Quasare/Sterne noch deutlich früher entstanden sein, Theoretiker glauben bei $z \sim 8 \dots 20$, also bereits wenige 100 Millionen Jahre nach dem Urknall. Mit der Expansion des Universums vergrößern sich auch die Wellenlängen des ursprünglich im ultravioletten und sichtbaren Bereiches ausgestrahlten Lichts. Damit sind die ersten Galaxien im Sichtbaren gar nicht mehr beobachtbar. Ihre helle ultraviolette und sichtbare Strahlung ist in den Bereich des nahen ($1 \dots 5 \mu\text{m}$) und mittleren Infrarot ($5 \dots 30 \mu\text{m}$) verschoben. Wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit sehen wir die ersten Objekte jetzt im Infraroten so wie sie vor fast 13 Milliarden Jahren im Ultravioletten ausgesehen haben.

Vom Sichtbaren ins Infrarote

Aus diesem Grund wurde das Next Generation Space Telescope bereits seit 1995 als reines Infrarot-Weltraumteleskop geplant. Im Jahre 1997 erschien die begeisternde Denkschrift »Besuch in einer Zeit, als die Galaxien jung waren«. Hier wurde die wissenschaftliche und technische Machbarkeit der Mission überzeugend dargelegt.

Vier Themen sind die Richtschnur für die Entwicklung des JWST und seiner Instrumente: (1) Erstes Licht und Reionisation, (2) Entstehung und Entwicklung der

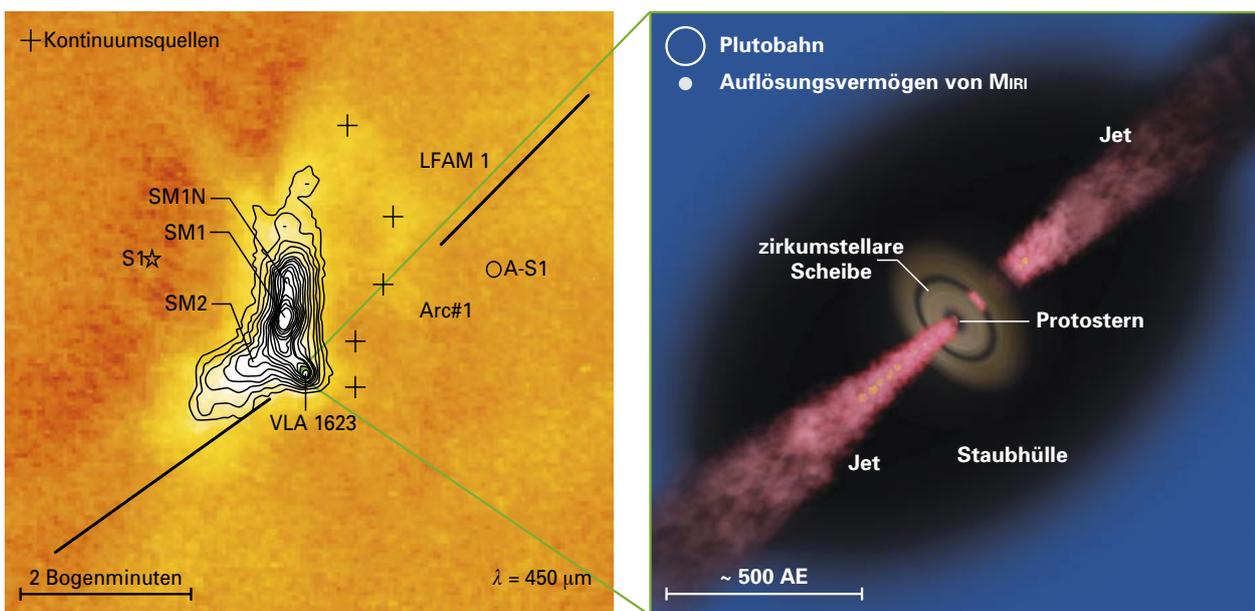
Galaxien, (3) Geburt von Sternen und protoplanetaren Systemen und (4) Planetensysteme und Entstehung des Lebens. Diese Themen wurden in eine lange Liste von genauen wissenschaftlichen Anforderungen umgesetzt, beispielsweise: »Messung der Raumdichte von Galaxien mit einer Nachweisgrenze von $1 \times 10^{-34} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ bei einer Wellenlänge von $2 \mu\text{m}$ mittels Abbildungen im Wellenlängenbereich von 1.7 bis $27 \mu\text{m}$ und Bestimmung der Dichteveränderung als Funktion des Alters und des Entwicklungszustandes (L1-1)«, oder »Messung der Spektren von mindestens 2500 Galaxien mit einer spektralen Auflösung von 100 (0.6 bis $5 \mu\text{m}$) und 1000 (1 bis $5 \mu\text{m}$) mit einer Nachweisgrenze für den Emissionlinienfluss bei $2 \mu\text{m}$ von $5.2 \times 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}$ und Bestimmung ihrer Rotverschiebung, Metallizität, Sternentstehungsrate, sowie Ionisationsgrad des Interstellaren Mediums (L1-2)« ... Diese Liste mit 40 detaillierten wissenschaftlichen Anforderungen bestimmt die genaue Auslegung der drei wissenschaftlichen Instrumente und des Teleskops, sowie die Missionsplanung.

*NIRCAM, NIRSPEC und MIRI
– die drei großen wissenschaftlichen Instrumente*

Der Detektor der Near-Infrared Camera (NIRCAM) besitzt 40 Megapixel und eignet sich für den Bereich von 0.6 bis $5 \mu\text{m}$. Die Kamera kann in mehreren Breit- und Schmalbandfiltern Felder von 4.4×2.2 Quadratbogenminuten abbilden, und sie kann als Koronagraph be-

Abb. IV.1.3: Ein Blick in das Innere der im fernen Infraroten und im submm-Bereich entdeckten Sternentstehungswolken war bisher nicht möglich. Das hohe Auflösungsvermögen und die hohe Empfindlichkeit von MIRI werden das Studium der warmen Protosterne im Inneren der kalten Wolken erlauben. In der Quelle VLA 1635 beispielsweise werden sich

mit MIRI Einzelheiten wie Staubscheiben und beginnende Planetenentstehung sowie polare Ausflüsse erkennen lassen. Das rechte Bild zeigt unsere Erwartungen nach gängigen theoretischen Modellen zusammen mit dem Auflösungsvermögen von MIRI und zum Vergleich die Plutobahn. (MIRI-Konsortium)



nutzt werden. Gleichzeitig dient sie dem Observatorium als Wellenfrontsensor, der die Ausrichtung der 18 Spiegelstücke des 6-m-Hauptspiegels misst. Marcia Rieke von der University of Arizona in Tucson leitet die Entwicklung des Instruments, das bei Lockheed-Martin gebaut wird. Das Aufspüren der frühesten Galaxien und Quasare, der fernsten Supernovae und von Objekten im Kuiper-Gürtel um die Sonne gehören zu den Entdeckungszielen. In Sternentstehungsgebieten und bei protoplanetaren Scheiben werden mit dem 6-m-Spiegel des JWST ähnlich scharfe Abbildungen im staubdurchdringenden Infrarotlicht möglich, wie wir sie vom »kleinen« HUBBLE-Spiegel aus dem Sichtbaren kennen (Abb. IV.1.3).

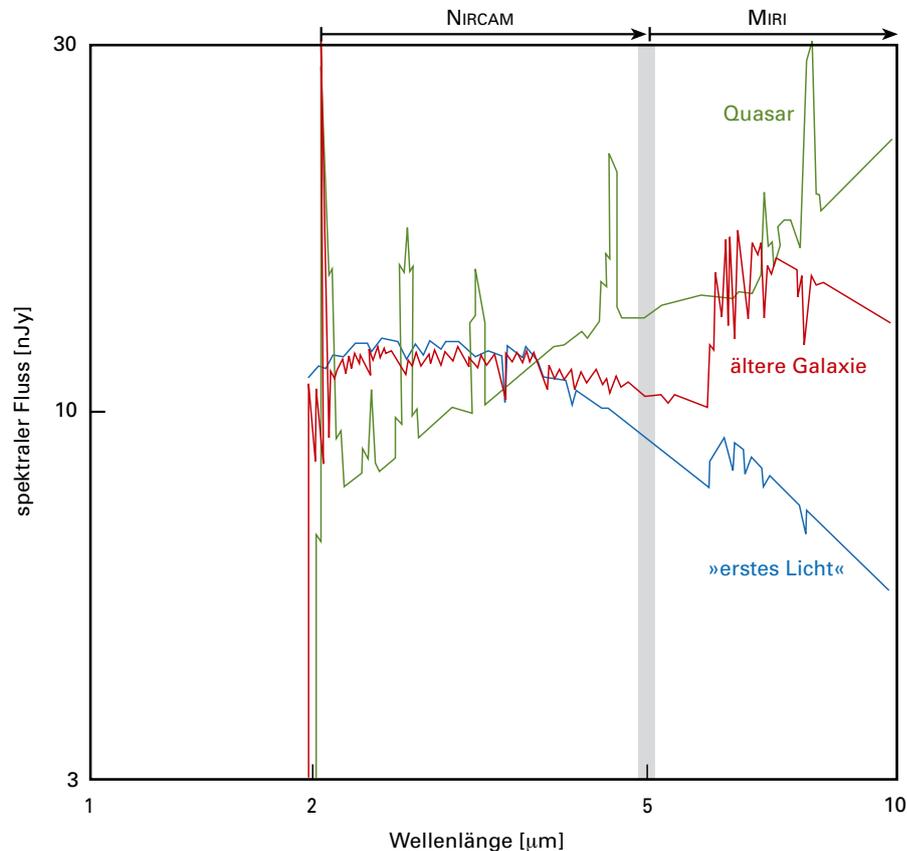
NIRSPEC ist ein Spektrometer für das nahe Infrarot mit einer Auflösung von $\lambda/\Delta\lambda \sim 100$ und 1000. Es erlaubt die gleichzeitige Spektroskopie von mehr als 100 Objekten in seinem 3×3 Quadratbogenminuten großen Feld. Für die Auswahl der interessierenden Objekte wird gegenwärtig eine Silizium-Scheibe mit kleinen elektrisch ansteuerbaren Mikroverschlüssen entwickelt (ähnlich

einem Adventskalender). Durch die geöffneten Türchen gelangt jeweils nur das Licht einer interessierenden Galaxie. Dieser Multiobjekt-Spektrograph wird von der ESA entwickelt und von ASTRIUM, Deutschland gebaut. Hierzu trägt auch das MPIA bei. Mit diesem Instrument können Rotverschiebung, Elementhäufigkeiten, Anhebungsbedingungen, Raumgeschwindigkeiten u.v.a. in Galaxien und Quasaren verschiedenen Alters untersucht werden. Auch die Reionisation des Universums durch die ersten heißen Sterne kann so studiert werden. Die Entwicklung dieses Instruments wird von einem internationalen »Science Team« der ESA gesteuert.

MIRI ist das komplizierteste der drei Instrumente. Es besteht aus einer Kamera mit Koronographen und einem Spektrometer für den Bereich des mittleren Infraroten ($5 \dots 28 \mu\text{m}$). Dieses Instrument wird von einem Konsortium europäischer Institute, darunter dem MPIA, gebaut. Lediglich Detektoren und die zugehörige Kühlmaschine kommen von der NASA. Mit MIRI werden die frühesten Objekte im Universum zweifelsfrei identifiziert werden können. Alle für das physikalische Verständnis der Objekte

Abb. IV.1.4: Berechnete Spektren von Quasaren und Galaxien im frühen Universum bei einer Rotverschiebung von $z \sim 15$. Die im Ruhesystem der Galaxien im Sichtbaren und Ultravioletten ausgesandte intensive Strahlung beobachten wir heute im nahen und mittleren Infraroten. Mit NIRCAMS großflächigen und empfindlichen Kameras für den Bereich von 2 bis $5 \mu\text{m}$ können mögliche junge Objekte identifiziert werden.

Allerdings unterscheiden sich die Spektren von »echten« ersten Galaxien und solchen nach einer Sternentstehungsperiode (Metallanreicherung \mapsto ältere Sterne) im nahen Infraroten nur geringfügig. Mit MIRI wird die genaue Klassifizierung durch die stark unterschiedlichen Spektren im Bereich von 5 bis $28 \mu\text{m}$ möglich. Im Sichtbaren Bereich bleiben diese Objekte für uns unbeobachtbar. (MIRI-Konsortium)



wichtigen diagnostischen Spektrallinien des sichtbaren Bereiches liegen bei hohen Rotverschiebungen im mittleren Infrarot. Auf den großflächigen NIRCAM-Aufnahmen werden sich Objekte finden lassen, die möglicherweise sehr jung (also hochrotverschoben) sind. Ihre sichere Identifizierung ist aber nur über Spektrallinien möglich, die in den nur mit MIRI zugänglichen Wellenlängenbereich fallen (Abb. IV.1.4). Die MIRI-Entwicklung wird von zwei Principal Investigators geleitet: Gillian Wright vom Astronomischen Technologiezentrum ATC, Edinburgh (UK) und George Rieke von der Universität von Arizona, Tucson (USA).

Neben den drei großen Instrumenten NIRCAM, NIRSPEC und MIRI wird auch die Sternsensorkamera des JWST für wissenschaftliche Untersuchungen eingesetzt. Sie erhält ein Filtrerrad für die schmalbandige Wellenlängenauswahl ($\lambda/\Delta\lambda \approx 100$) im Bereich zwischen 1.6 und 4.9 Mikrometern. Durch den viel einfacheren Strahlengang ist dieser »Tunable Filter Imager« (TFI) der Kanadischen Weltraumbehörde deutlich empfindlicher als NIRCAM und kann damit schneller auf sehr junge Galaxien mit ihren stark rotverschobenen Lyman-Alpha-Linien aufmerksam machen.

Gemeinsam ist den drei vorgestellten Fokalebene-Instrumenten für das JWST, dass sie im Kryovakuum betrieben werden müssen. Für NIRCAM und NIRSPEC reichen -240 °C aus. MIRI muss unter -260 °C gekühlt werden, damit nicht seine eigene Wärmestrahlung die kosmische Infrarotstrahlung überblendet. MIRIs Infrarotdetektoren müssen sogar bei -268 °C , also nur 5 °C über dem absoluten Temperatur-Nullpunkt betrieben werden, um den »Dunkelstrom« der Kamera hinreichend klein zu halten. Ebenfalls gemeinsam ist den Instrumenten, dass sie alle über große »optische Wechselräder« verfügen, auf deren Umfang viele Gitter, Filter, Strahlteiler, Spiegel, Prismen und Koronographenmasken angeordnet sind (Abb. IV.1.5). Durch den Wechsel dieser Elemente im Strahlengang (d.h. Drehen der Räder) werden sowohl die verschiedenen Betriebsarten der Instrumente (Spektroskopie, Abbilden, Koronographie, Eichung) als auch die einzelnen Wellenlängenbereiche ausgewählt. Obgleich jeder Weltraumtechniker danach strebt, Mechanismen wie diese Räder zu vermeiden (»...könnten ausfallen...«), sind leistungsfähige wissenschaftliche Instrumente ohne bewegte Teile nicht machbar. Für diese risikoreiche Herausforderung bei MIRI und NIRSPEC war unser Institut durch die erfolgreichen Entwicklungen bei den europäischen Weltraumteleskopen ISO und HERSCHEL gut vorbereitet.

Die Mechanismen kommen vom MPIA

Im Europäischen MIRI-Konsortium, zu dem 21 Institute beitragen, hat das MPIA seit dem Jahre 2002 die Entwicklung der beiden Gitterräder und des Filtrerrades übernommen. Die Anforderungen an diese »Mechanismen« sind hoch, unter anderen:

- höchste Zuverlässigkeit und genaueste Positionierung für hunderttausende Bewegungen
- geringste elektrische Antriebsleistung, um Erwärmung zu vermeiden
- Vibrationsfestigkeit beim Raketenstart ($\sim 40\text{ g}$)
- Betrieb sowohl im Kryovakuum als auch unter Laborbedingungen
- Betriebszeiten mindestens 10 Jahre, sicheres Anlaufen auch nach langem Stillstand
- schnelle und kostengünstige Verfügbarkeit

Die Arbeitsgruppe »Infrarot-Weltraumteleskope« des MPIA hat langjährige Erfahrungen beim Bau solcher Kryomechanismen erworben. Für das Instrument ISOPHOT des europäischen Satelliten ISO baute das Institut gemeinsam mit C. ZEISS und DORNIER drei optische Wechselräder, die während der 29-monatigen Mission bei $T \sim -270\text{ °C}$ hunderttausende von Bewegungen mit großer Genauigkeit ausgeführt haben. Für ISOPHOT und das Instrument PACS des europäischen Weltraum-Observatoriums HERSCHEL wurden Fokalebene-Chopper entwickelt, die hunderte Millionen von Bewegungen zuverlässig bei -270 °C ausführen konnten. Diese Entwicklungs- und Testerfahrung soll auf MIRI und NIRSPEC übertragen werden, wobei die Herausforderungen jetzt größer werden: Die Wechselräder für das JWST sind um ein Vielfaches größer und schwerer, die Genauigkeitsanforderungen noch höher. Insbesondere müssen die Räder wegen des »warmen« Starts des JWST im gesamten Temperaturbereich von $+20\text{ °C}$ bis -265 °C und vom Normaldruck bis Hochvakuum betreibbar sein.

Der Antrieb aller Räder für MIRI und NIRSPEC wird nach unserem bei ISOPHOT bewährten Sperrklinkenprinzip erfolgen. Die Abb. IV.1.5 zeigt als Beispiel das Filtrerrad für MIRI. Auf dem äußeren Rand werden 18 kleine Kugellager angebracht, entsprechend der Zahl der einzustellenden Positionen. Ein keilförmiges Element an einem beweglichen Hebel rastet zwischen zwei Kugellagern ein und legt so die Position des Rades mit einer Wiederholgenauigkeit von ~ 1 Bogensekunde fest.

Der zentrale Motor ist ein »Direktantrieb« (Torque-Motor) ohne Getriebe. Er wird durch einen elektrischen Puls um etwa 15° bewegt, so dass die Spitze des Rastkeiles das benachbarte Kugellager überfährt. Die genaue Positionierung kann dann stromlos mechanisch durch die Federkraft der Raste erfolgen, oder sogar sanft elektrisch gebremst. Bei diesem Antriebsprinzip ist keine Rückkopplung von einer elektrischen Positionsanzeige und auch kein Haltestrom erforderlich, da stets zuverlässig mechanisch positioniert wird. Für jeden Schritt werden je nach Radgröße kleine Bruchteile einer Wattsekunde aufgebracht. Da zwischen dem ~ 1 Sekunde dauernden Antriebs-Schritt und der langen astronomischen Messzeit (1000...10000 Sekunden) keinerlei Strom fließt, ist die mittlere elektrische Verlustleistung dieses Antriebsprinzips praktisch vernachlässigbar klein. Die Duplex-Kugellager werden zur Genauigkeitssteigerung

als integrierte Lager ausgeführt, d.h. einer der Ringe ist auch Lagerachse. Die Laufbahnen werden mit einer dünnen Schicht Molybdendisulfid (MoS₂) belegt. Sie verhindert die Kaltverschweißung im Hochvakuum und sie bietet gute Schmiereigenschaften bei tiefen Temperaturen. Als zusätzlichen Schutz erhielten diesmal alle Kugeln eine dünne Titancarbid-Beschichtung.

Aufwändige Modellphilosophie

Um dem heutigen Zeitplan gemäß im Jahre 2008 Filter- und Gitterräder höchster Qualität und Zuverlässigkeit abliefern zu können, wird der bei Weltraum-Experimenten bewährte schrittweise Entwicklungsweg verfolgt. Bereits im Jahre 2004 wurden im MPIA Prototypen der Räder aufgebaut, im Berichtsjahr 2005 folgten die Entwicklungsmodelle. 2006 und 2007 werden die Qualifikationsmodelle entstehen, an denen die volle Raumflugqualifikation (Vibrationen,

Lebensdauer,...) nachgewiesen werden muss. Im Jahre 2008 werden dann die Flugmodelle aller Räder abgeliefert, während gleichzeitig die Qualifikationsmodelle zu Flugersatzeinheiten nachgerüstet werden (Einbau neuer Kugellager u.v.a.). Nur diese aufwändige Modellphilosophie garantiert, dass auf den teuren Raumflugmissionen ausgereifte, höchst zuverlässige Technik zum Einsatz kommt. Jedes der oben angesprochenen Modelle wird monatelang unter allen geforderten Umweltbedingungen getestet, verbessert, wieder getestet und im nächsten Schritt mit immer höherwertigen (teureren) Bauteilen ausgerüstet.

Die im Berichtsjahr 2005 im MPIA aufgebauten Entwicklungsmodelle (Abb. IV.1.6) konnten bereits wesentliche Anforderungen bei Kryovakuumtests erfüllen: hohe Positionsgenauigkeit, geringer Leistungsbedarf... Aber es wurden auch unerwartete Schwächen gefunden: Die eingesetzten integrierten Duplex-Kugellager neigten zur Verschmutzung durch Mikropartikel, was ihre

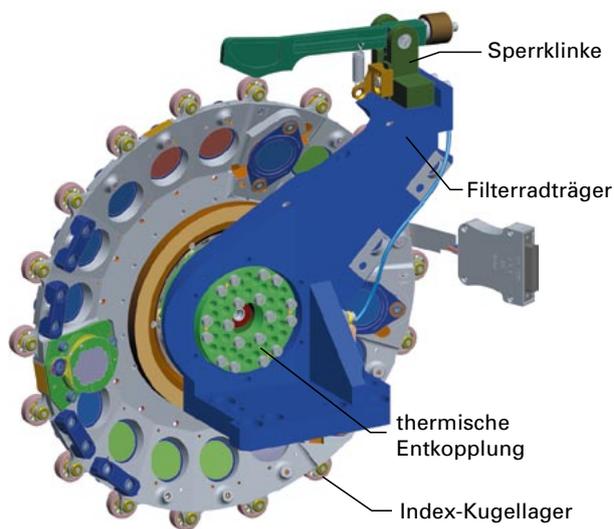


Abb. IV.1.5: Filterrad für das Mid-Infrared-Instrument (MIRI). Auf den 18 Positionen befinden sich Filter für den Wellenlängenbereich von 5 bis 28 μm und ein Prisma für empfindliche niedrig auflösende Spektroskopie. Mehrere Koronographenmasken erlauben die Suche nach extrasolaren Planeten neben einem sehr hellen Stern, der »ausgeblendet« wird. Das Rad wird mit einem zentralen Torquemotor bewegt und mit einer in einen äußeren Kugellagerkranz einrastenden Sperrklinke positioniert. (CEA, TTL, ADR, ZEISS, MPIA)

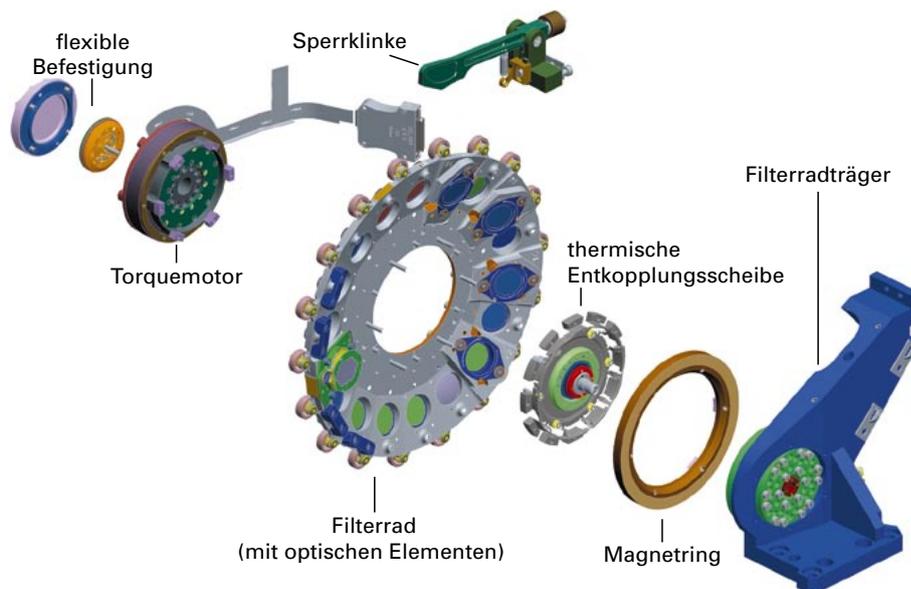




Abb. IV.1.6: Christian Schwab baut das MIRI-Gitterrad in den Testkryostaten für Untersuchungen bei -265 °C ein. Es müssen extreme Reinheitsanforderungen eingehalten werden.

Reibwerte erhöhte, eine thermische Entkopplungsscheibe zwischen den Stahlbauteilen (Kugellager, Motor) und der Aluminiumstruktur zeigte Kaltversprödung ihrer flexiblen Elemente bei -260 °C , und die TiC-Beschichtung der Kugeln widerstanden den hohen mechanischen und thermischen Belastungen nicht. So weit es der Zeitplan zulässt, werden die aufgetretenen Probleme beim gleichen Modell

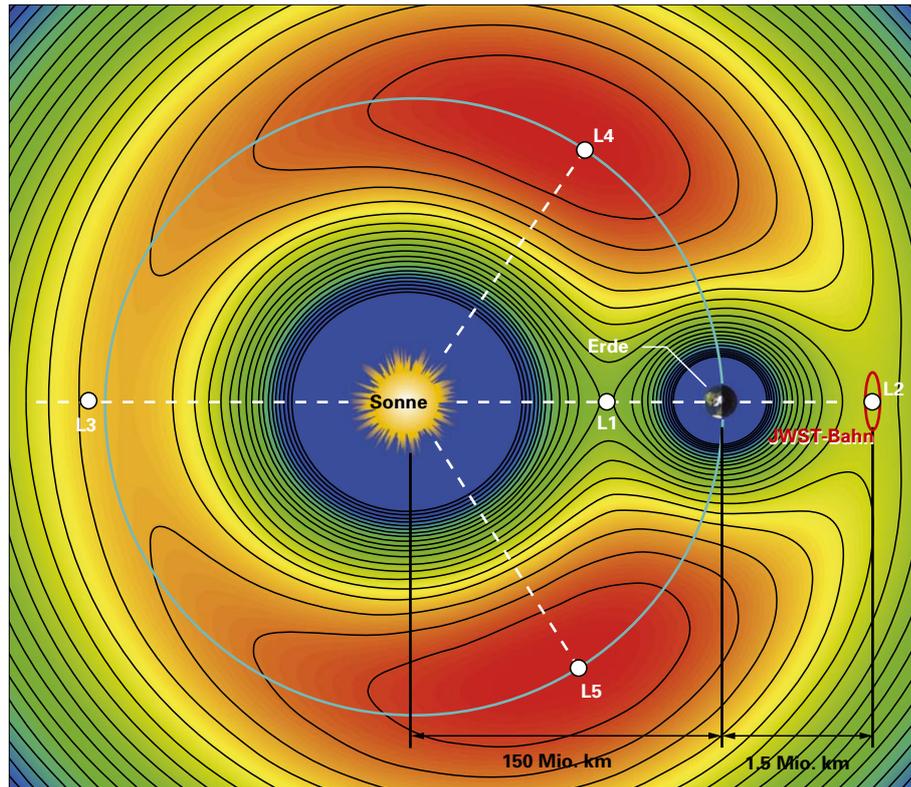
beheben, insbesondere, wenn die Verbesserungen in den technischen Werkstätten des MPIA ausgeführt werden können. Länger dauernde Nachrüstungen können dann erst im nächsten Modell eingesetzt werden; so benötigt beispielsweise der Hersteller der Kugellager fast ein Jahr, um geeignete unbeschichtete Kugeln einzupassen und um Staubschutzblenden vorzusehen.

Das MPIA hat nach einem Ausschreibungsverfahren Mitte des Jahres 2005 das Angebot der Firma C. ZEISS zum Bau der Qualifikations- und Flugmodelle der Räder für MIRI ausgewählt. Am 29. November 2005 konnte in Oberkochen ein entsprechender Vertrag unterzeichnet werden (Abb. IV.1.7). Die Mittel für diesen industriellen Festpreis-Auftrag wurden dem MPIA vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Bonn, bewilligt. Die Firma C. ZEISS hatte beim Bau des Instrumentes ISOPHOT (ISO) und des PACS-Choppers (HERSCHEL) für das MPIA in den letzten 15 Jahren hohe Kompetenz für optomechanische Geräte zum Einsatz im Kryovakuum des Weltraums bewiesen.

Zusammen mit dem Auftrag für MIRI konnte ein Vertrag zu NIRSPEC, dem europäischen Spektrometer für das JWST, unterzeichnet werden. Dabei sind die Rollen vertauscht: Das MPIA trägt als »Unterauftragnehmer« zur Entwicklung der Gitter- und Filterräder für NIRSPEC bei. In dem von C. ZEISS geführten Konsortium übernimmt das MPIA die Entwicklung der elektrischen Komponenten (Motoren, Positionssensoren,...). Auch wenn der Auftrag für NIRSPEC von C. ZEISS an das MPIA kleiner ist, als die Vereinbarung für MIRI, erwarten wir und C. ZEISS wegen vieler gemeinsamer Entwicklungsziele in beiden Instrumenten eine hohe Synergie.

Abb. IV.1.7: Die Unterzeichnung der JWST-Verträge im November 2005 bei C. ZEISS in Oberkochen. V.l.n.r.: Thomas Henning (MPIA), Dietrich Lemke (MPIA), Dr. Kötter (C. ZEISS), Dr. Wiemer (C. ZEISS)





Standort: L2

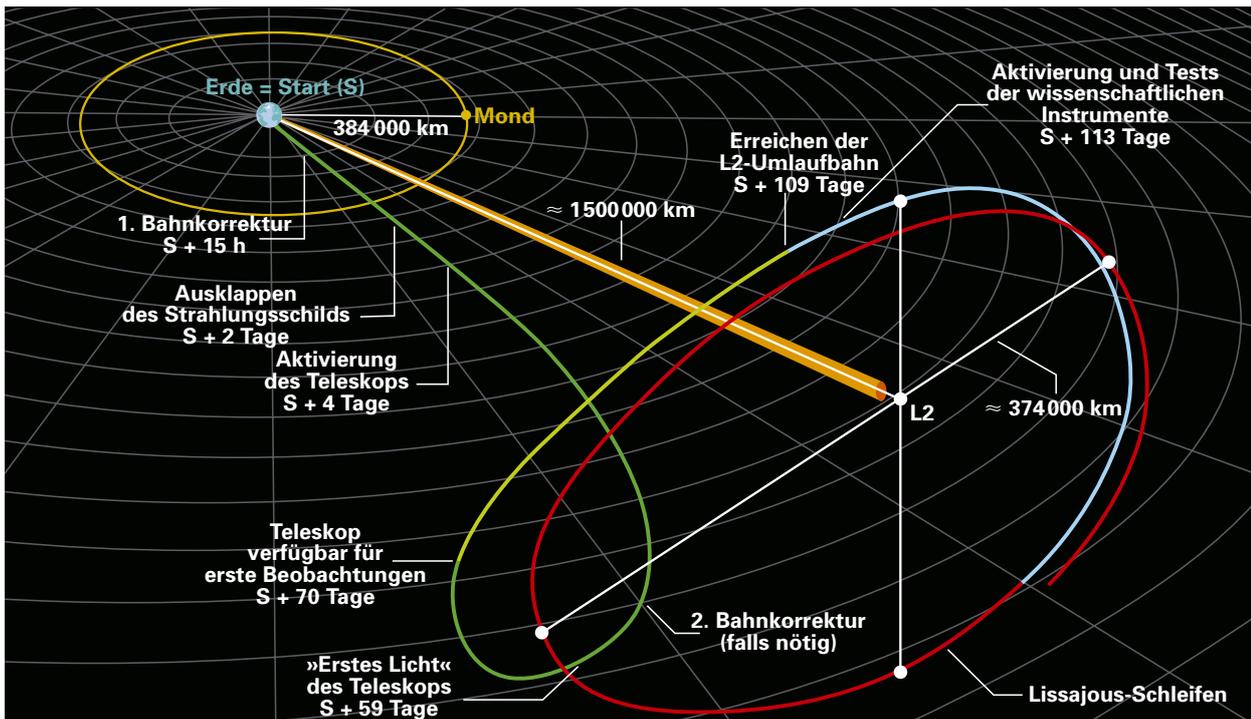
Nach dem ursprünglichen Zeitplan sollte das JWST im Jahre 2011 gestartet werden. Wegen seiner gewaltigen Größe und seiner Masse von etwa sechs Tonnen kommt dafür nur die europäische Rakete ARIANE 5 in Frage. Kurz vor und unmittelbar nach dem Start beginnen für die Heidelberger Mechanismen in den Instrumenten kritische Phasen. Bei den letzten Überprüfungen aller Instrumente auf der Startrampe werden auch die Optikräder gedreht, nun aber bei einer Temperatur von $+30\text{ °C}$ und feuchter Außenluft. Das erfordert sehr hohe Betriebsströme und kann die empfindlichen MoS₂-Schichten der Kugellager schädigen. Nach dem Abheben der Rakete werden alle aus Gewichtsgründen grazil aufgebauten Mechanismen starken Vibrationen ausgesetzt, mit Beschleunigungen von bis zum 45-fachen der Erdbeschleunigung. Erst wenn diese gefährlichen Stunden überstanden sind, beginnt der ruhige Flug durch den Weltraum und die »Wohlfühlbedingungen« für die Mechanismen stellen sich zunehmend ein: Vakuum und tiefe Temperaturen. Jetzt kann die Bodenstation das vorsichtige Einlaufen der Räder kommandieren. Dabei wird die in den MoS₂-Schichten der Kugellager gefangene Luftfeuchtigkeit allmählich entfernt und die Lagerreibung sinkt um einen Faktor 3.

Ziel der Reise ist der Lagrange-Punkt L2 (Abb. IV.1.8). Dort, in 1,5 Mio. km Abstand von der Erde in Verlängerung der Linie Sonne-Erde, »spürt« der Satellit die gemeinsame Anziehungskraft von Sonne und Erde

Abb. IV.1.8: Die Lage der Lagrange-Punkte L1, ... L5 im System Sonne-Erde (nicht maßstäblich). In L2 läuft ein Satellit mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit um die Sonne wie die Erde. Da dieser Punkt metastabil ist, umkreist das JWST den Punkt L2 in ausgedehnten Lissajous'schen Bahnen.

und läuft trotz des größeren Sonnenabstandes genauso schnell um die Sonne wie die Erde. Das heißt, von der Erde aus sehen wir JWST dann für zehn Jahre stets in antisolarer Richtung. Obwohl der Punkt L2 eine Lösung des himmelsmechanischen Dreikörper-Problems ist, wird man JWST nicht ganz genau dort stationieren. Mindestens drei Gründe sprechen dagegen: 1. L2 ist ein metastabiler Punkt, d.h., kleinste Störungen vertreiben einen Satelliten von dort (vergleichbar einem »stabil« auf der Fingerkuppe aufgestellten Bleistift...), 2. Für eine Stationierung direkt in L2 müssten Bremsmanöver ausgeführt werden, 3. Der Satellit würde Sonnenfinsternisse durch die dazwischen stehende Erde erleiden, was seine Energieversorgung stört.

In der Praxis wählt man deshalb Schleifenbahnen um L2 (Abb. IV.1.9). Diese Lissajous'schen Bewegungen um L2 können sehr große Durchmesser haben: einige Hunderttausend km in der Ekliptik und senkrecht dazu. Die Umlaufperiode um L2 kann ein halbes Jahr betragen, und die von der Erde aus gesehene Abweichung von L2 bis zu $\pm 30^\circ$. Je größer der Durchmesser dieser Schleifen um L2, desto einfacher die Bahnmanöver im Anflug und spätere Bahnkorrekturen. Begrenzend sind



aber die Streulichtanforderungen des tubuslosen JWST. Sonne und Erde würden bei großen Winkelabständen von L2 nicht mehr gleichzeitig abgedeckt. Die Erde hat von L2 aus gesehen den gleichen Winkeldurchmesser wie die Sonne, und im mittleren Infraroten ist die Erde hell!

Passive und aktive Kühlung

Schon während des Anflugs nach L2 beginnt die Entfaltung des eng in die Nutzlastspitze der ARIANE 5 zusammengeklappten JWST (Abb. IV.1.10). Mehr als 100 Mechanismen (Scharniere, Motoren, Sensoren,...) müssen aktiviert werden, um den tennisplatzgroßen mehrschichtigen Sonnenschild und das 6.5-m-Teleskop aufzuspannen. Der Sonnenschild verringert die Wärmestrahlung der Sonne um das millionenfache: Aus 300 kW einfallender Leistung werden weniger als 0.1 Watt auf der Teleskopseite. Damit kühlt sich der Hauptspiegel passiv auf -240°C ab, ausreichend tief für empfindliche Beobachtungen mit allen Instrumenten an Bord. Der Strahlungsschild besteht aus fünf Schichten Kaptonfolie, die auf der jeweils sonnenzugewandten Seite mit Aluminium bedampft ist. Damit soll möglichst viel empfangene Strahlung in den Weltraum zurück reflektiert werden. Die sonnenabgewandte Seite der Folie ist mit Silizium belegt, das sich im Infraroten als schwarzer Strahler verhält und somit die Folie kühlt. Die Wärmestrahlung entweicht durch die 15 Zentimeter breiten Spalten zwischen den Folien (Abb. IV.1.2). Das Folienpaket muss Einschlägen von Mikrometeoriten, dem Sonnenwind, der kosmischen Strahlung, extre-

Abb. IV.1.9: Der Fahrplan für den Flug des JWST zu seiner Bahn um den Lagrangepunkt L2. Nach 119 Tagen (Start + 109 Tage) ist die endgültige Bahn erreicht, wenige Tage später beginnt der Testbetrieb der Instrumente.

men Temperaturunterschieden und vielfältigen mechanischen Belastungen trotzen, um die millionenfache Strahlungsabschwächung für die gesamte Missionsdauer zu gewährleisten.

Die Kameras von MIRI müssen allerdings auf -268°C (etwa 5 K) gekühlt werden. Hierbei hat es im Jahre 2005 eine einschneidende Änderung in der Entwicklung gegeben. Bisher wurde an einem Kryostaten mit festem Wasserstoff gearbeitet. Mit dieser einfachen und erprobten Technik konnte eine gerade ausreichende Betriebstemperatur von -267°C erreicht werden. Aber der Kryostat erschien im Zuge der gewünschten Gewichtseinsparungen bald als zu schwer. Deshalb wurde jetzt eine mechanische Kühlmaschine gewählt. Die motorbetriebene erste Kompressorstufe wird auf dem Satellitenteil des JWST angeordnet und über flexible Leitungen mit dem Kühlkopf in MIRI verbunden. Grundsätzlich ergeben sich Vorteile: tiefere Temperaturen, geringere Massen, nahezu unbegrenzte Betriebszeiten. Dem stehen aber Risiken bei Zeit und Kosten für die Entwicklung und Erprobung und beim Einsatz dieser neuen Technik gerade auf der Flaggschiff-Mission ohne die beim HST gegebene Wartungsmöglichkeit gegenüber. Sollte sich diese aktive Kühlung beim JWST bewähren, wird sie wohl auf vielen künftigen Missionen eingesetzt werden.

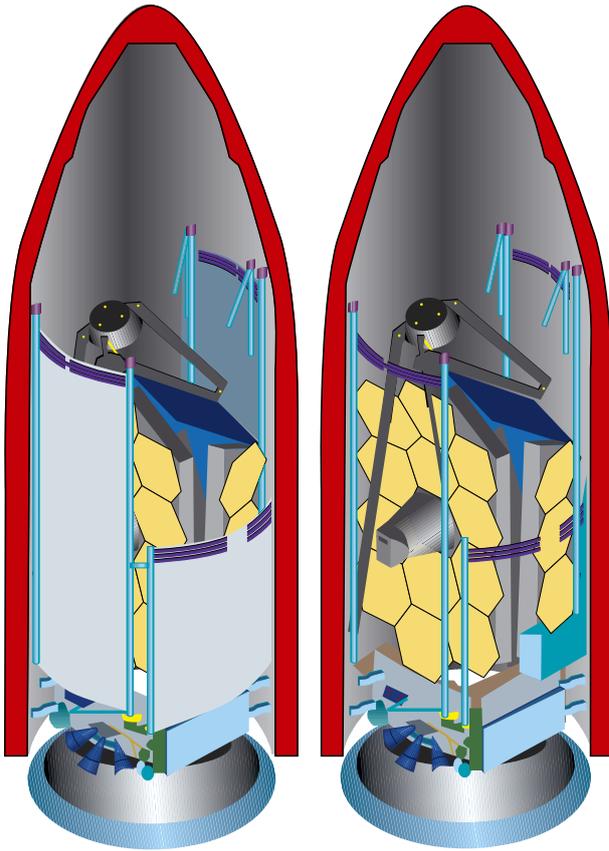


Abb. IV.1.10: Das 6,5-m-JWST-Teleskop und sein mehr als 30 m großer mehrschichtiger Strahlungsschild müssen für den Start vielfach gefaltet werden, um in der 5 m breiten Nutzlastspitze der ARIANE 5 Rakete verstaut zu werden. Zwei Tage nach dem Start, auf der Reise zu L2, beginnt die Entfaltung.

Fazit

Mit der Beteiligung an der JWST-Mission bietet sich dem MPIA die Chance interessantester technologischer Entwicklungen in der Infrarot-Instrumentierung und der Teilhabe an den aufregendsten wissenschaftlichen Forschungen nach dem Ursprung unseres Universums und der Entstehung von Planeten und Leben in unserer Heimatgalaxie. Diese Aktivitäten werden das MPIA auch in die Lage versetzen, nach etwa 2015 an den übernächsten Missionen mit noch größeren Teleskopen teilzunehmen.

(Thomas Henning (Co-PI), Dietrich Lemke (Co-PI), Stefan Brinkmann, Ulrich Grözinger, Ralf Hofferbert, Armin Huber, Ulrich Klaas, Oliver Krause, Sven Kuhlmann, Hans-Walter Rix, Armin Böhm, Monika Ebert, Bernhard Grimm, Stefan Meister, José Ramos, Ralf-Rainer Rohloff, Alexandra Bohm, Hannelore Heissler)

IV.2 Neuartige Konzepte für ein »Extremely Large Telescope«

Mit mindestens drei laufenden großen internationalen Projekten zieht langsam das Zeitalter der extrem großen Teleskope (engl. Extremely Large Telescopes, ELT) herauf. Diese bodengebundenen Teleskope mit Durchmessern zwischen 20 und 100 Metern stellen den nächsten wesentlichen Fortschritt in der Entwicklung bodengebundener Teleskope dar.

Das MPIA spielt eine führende Rolle bei der Einleitung des Zeitalters extrem großer Teleskope. Durch ihr Engagement – von der Beteiligung an politischen Gremien, über die Bewertung wissenschaftlicher Anforderungen und Ziele bis zur Konstruktion von Instrumenten und Entwicklung der Technologie – bemühen sich Wissenschaftler und Ingenieure am MPIA, dass das Institut den größtmöglichen Nutzen aus diesen gigantischen, doch äußerst präzisen Instrumenten ziehen kann.

Adaptive Optik

Eines der zentralen Probleme, die beim Bau der ELTs zu lösen sind, liegt in der Adaptiven Optik, da die wichtigste wissenschaftliche Anforderung an solche Teleskope ihre Fähigkeit betrifft, beugungsbegrenzte (und nicht Seeing-begrenzte) Bilder zu liefern.

Im Rahmen des »European Framework Program 6« (FP6) wurde 2005 eine Konstruktionsstudie für ein ELT begonnen. Zusammen mit Partnern von INAF (Bologna), der Universität Durham, Technion Haifa, ESO, der Universität Galway und dem Observatorium Lundt werden wir neue Konzepte der Wellenfrontabtastung untersuchen. Diese sind nötig, um die Beschränkungen zu überwinden, die mit derzeitigen AO-Systemen an einem ELT auftreten würden. Adaptive Optik benötigt natürliche oder künstliche Leitsterne, die hell genug sind, um die für die Korrektur der atmosphärischen Turbulenzen benötigten Informationen abzuleiten. Dies grenzt den für AO-Beobachtungen geeigneten Himmelsbereich ein. Für ein ELT ändert sich die Grenzhelligkeit eines Leitsterns nicht, da die Größe des in der Adaptiven Optik verwendeten Pupillenausschnitts von der Atmosphäre abhängt und nicht mit dem Teleskopdurchmesser skaliert. Ideen, wie man den nutzbaren Himmelsbereich mit natürlichen Leitsternen und besonders mit einem Laser-Leitstern (LGS) vergrößern könnte, werden erkundet. Laser-Leitsterne könnten den Himmelsbereich auf fast 100 Prozent erhöhen. Daher konzentriert sich die Arbeitsgruppe zur Zeit auf Konzepte für LGS. Doch LGS sind mit eigenen Problemen behaftet, die mit dem Teleskopdurchmesser eng zunehmen.

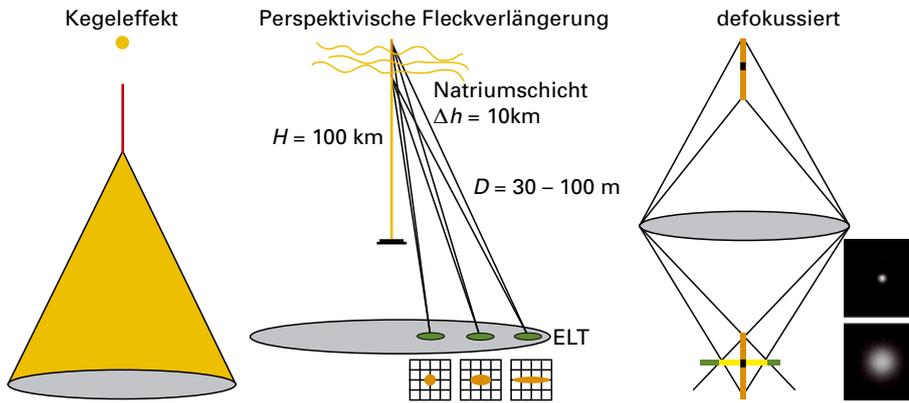


Abb. IV.2.1: Der endliche Abstand des Laser-Leitsterns und seine Ausdehnung in Blickrichtung führen zu mehreren Problemen bei einem AO-Sensor: Kegeleffekt (*links*): Der LGS sondiert nicht die volle Atmosphäre wie ein normaler Leitstern.

Fleckverlängerung (*Mitte*): Projektion des Leitsterns außerhalb der Achse führt zu einem länglichen Fleck auf der Sensorebene. Fokussierungsfehler (*rechts*): Der LGS hat eine erweiterte Tiefenschärfe im Bildraum.

Die Probleme lassen sich in folgende Kategorien unterteilen, die in Abb. IV.2.1 veranschaulicht sind:

- Kegeleffekt
- Fleckverlängerung
- Fokussierungsfehler (erweiterte Tiefenschärfe – dynamische Brennebene – differentielle Aberrationen)

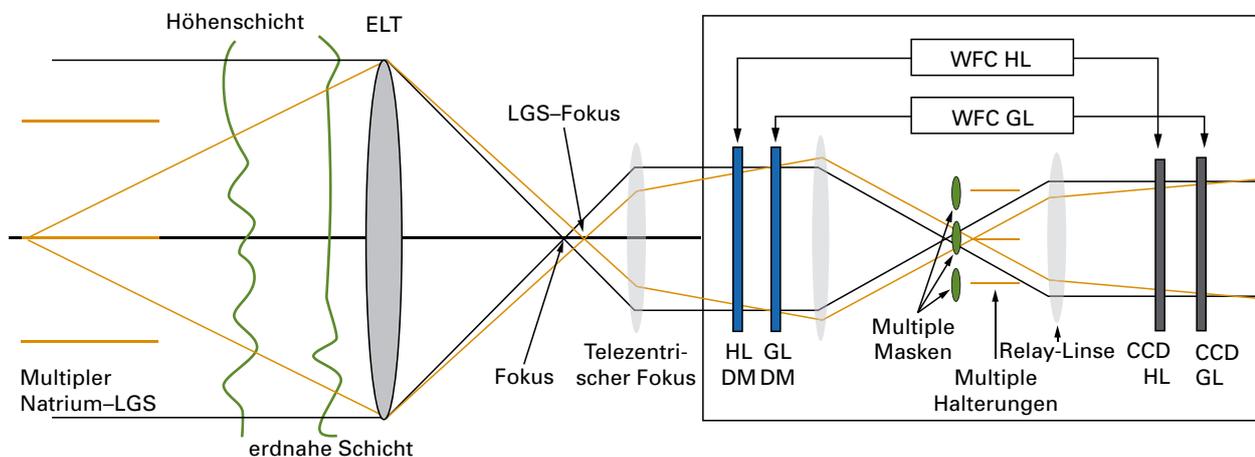
Eine Lösung, die am MPIA untersucht wird, ist der »Pseudo Infinite Guide Star Sensor (PIGS)« (»Quasiunendlicher Leitsternsensor«, siehe Abb. IV.2.2). Dieser verwendet zwei Abtastvorrichtungen: eine Maske im auf unendlich eingestellten Fokus mit ringförmigen Spalten, die die radiale Komponente der Wellenfront abtastet; und einen reflektierenden Stab, der den azimutalen Teil der Wellenfront abtastet. Der Einsatz von mehreren Sensoren und deren Verwendung

mit mehreren LGS kann das Problem des Kegeleffekts beheben. Der Sensor selbst hat kein Problem mit der Fleckverlängerung und erweiterter Tiefenschärfe; Nachfokussieren des Sensors würde auch das Problem der dynamischen Brennebene beseitigen, sodass nur noch das Problem der Teleskopaberration bleibt. Zur Zeit bauen wir im Labor ein Experiment auf, um die Idee auf eine Art zu überprüfen, in der Vielfachleitsterne verwendet werden.

Abb. IV.2.2: Der PIGS-Sensor, wie er in einem multikonjugierten adaptiven Optiksistem verwendet wird, das auf einem Schichtorientierten Ansatz beruht.

Ein ELT-Instrument für das mittlere Infrarot

In Zusammenarbeit mit der Universität Leiden, ASTRON (Dwingeloo) und ESO wurde mit Beginn des Jahres 2005 im Auftrag der ESO die Studie T-OWL gestartet, um mögliche Konzepte für ein Instrument an einem zukünftigen 100-m-Teleskop zu untersuchen. Auf der Grundlage eines zunächst zu erarbeitenden Katalogs astrophysikalischer Forschungsprojekte für den Wellenlängenbereich von 3.5 μm bis 25 μm am ELT



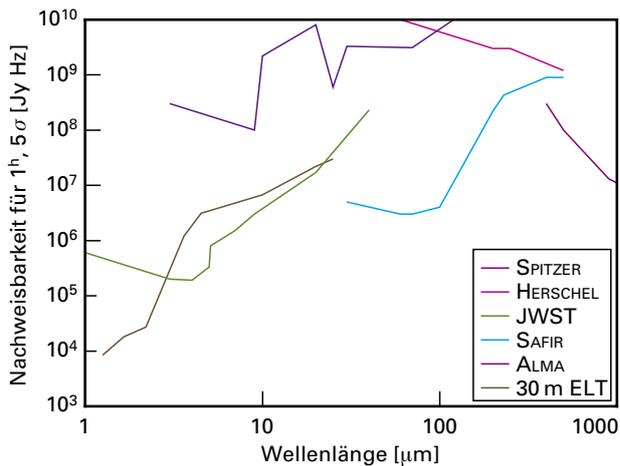


Abb. IV.2.3: Vergleich der Grenzhelligkeit bei einer Stunde Belichtungszeit (5 sigma) und des Auflösungsvermögens verschiedener Instrumente vom mittleren Infrarotbereich bis zum Submillimeter-Bereich.

wurden die notwendigen Spezifikationen eines solchen MIR-Instruments abgeleitet und ein Konzeptentwurf entwickelt. Dazu wurden zunächst die atmosphärischen Randbedingungen für verschiedene mögliche Standorte simuliert. Transmission und Emission der Atmosphäre, die im MIR-Wellenlängenbereich die Empfindlichkeit von Bodenbeobachtungen begrenzt, wurden für spektrale Auflösungen bis zu $R = 50\,000$ berechnet. Der Vergleich der daraus abgeleiteten Empfindlichkeit eines MIR-Instruments an einem 30-m-Teleskop mit anderen Instrumenten für das mittlere Infrarot – insbesondere mit MIRI (JWST) – zeigt, dass ein bodengebundenes ELT im mittleren Infraroten den satellitengestützten Instrumenten ebenbürtig, in manchen Bereichen sogar weit überlegen ist, wenn man sich auf extreme Winkelauflösung und/oder hohe spektrale Auflösung konzentriert (Abb. IV.2.3). Ein Instrument für das mittlere Infrarot am ELT muss beugungsbegrenzt arbeiten (Adaptive Optik) und wahlweise hochauflösende Spektroskopie möglichst in Kombination mit einer abbildenden Optik bieten.

Spezielle technische Fragen und Probleme wurden in der Studie T-OWL untersucht: Pupillen- und Feldrotation, atmosphärische Dispersion und deren mögliche Korrektur, Chopping, Koronographie, Polarimetrie, Detektorwahl, Datenfluss, Beobachtungsmodi und vieles mehr. Es ergaben sich keine schwerwiegenden Unverträglichkeiten mit dem OWL-Design.

Die Studie wurde wie geplant im September 2005 mit einem Bericht abgeschlossen. Seitdem läuft die EC-finanzierte Studie MIDIR zur Fortführung der T-OWL-Studie und insbesondere zur Untersuchung der Konsequenzen einer Reduktion des Hauptspiegels von 100 Metern auf 30 bis 60 Meter für die Empfindlichkeit und damit die Durchführbarkeit wissenschaftlicher Projekte und für das Instrumentierungs-Konzept.

Eine Nah-Infrarot-Kamera für das ELT

Zusammen mit Kollegen in Arcetri führten Mitarbeiter des MPIA auch eine erste Studie für eine ONIRICA genannte Nah-Infrarot-Kamera an einem ELT durch. Die Untersuchung der wissenschaftlichen Einsatzmöglichkeiten ergab, dass eine nur partielle Korrektur der Bildverbreiterung durch Seeing (bis $0.1''$) innerhalb eines großen Gesichtsfeldes ebenso wichtig sein kann, wie eine vollständige Seeing-Korrektur innerhalb eines kleinen Gesichtsfeldes.

(Wolfgang Brandner, Wolfgang Gässler, Roland Gredel, Tom Herbst, Thomas Henning, Hans-Walter Rix, Stephan Kellner, Rainer Lenzen, Eva Meyer)

IV.3 Das Projekt DARWIN

DARWIN ist ein ehrgeiziges Projekt der Europäischen Weltraumbehörde ESA mit dem ausdrücklichen Ziel, erdähnliche Planeten zu finden, ihre Atmosphären zu beschreiben und nach Leben zu suchen. Diese Mission wird in einem reichen Umfeld exoplanetarer und exobiologischer Forschung entwickelt. So hat zum Beispiel die Entdeckung von knapp 200 um andere Sterne kreisenden Planeten im Laufe des letzten Jahrzehnts die fundamentale Frage nach Leben im Universum erneut verstärkt in den Blickpunkt gerückt.

Die Beantwortung dieser Frage ist eine komplexe und schwierige Aufgabe, da Planeten wie der unsrige typischerweise 10 Milliarden Mal lichtschwächer sind als ihr Mutterstern. In den Entfernungen selbst der uns am nächsten gelegenen Sterne befänden sich solche Welten auch sehr dicht am strahlend hellen Glanz ihrer Sonnen. Die Kombination aus geringem Winkelabstand und riesigem Helligkeitskontrast schränkt die Methoden, mit denen Astronomen nach solchen Planeten suchen können, sehr stark ein.

»Nulling-Interferometrie«, eine Technik, in der das Licht des Muttersterns durch Überlagerung phasenverschobener Bilder ausgelöscht wird, bietet eine reelle Aussicht, diese Schwierigkeiten überwinden zu können. Im mittleren Infrarotbereich ($6\text{--}20\mu\text{m}$) leuchten Erden relativ hell und Sonnen relativ schwach. Es gibt auch eine Reihe starker »Bio-Marker« im mittleren Infrarot, spektrale Signaturen, die das Vorhandensein von Leben anzeigen. Das verbesserte Kontrastverhältnis und nützliche Tracer, verbunden mit der leichteren Ausrichtung und Steuerung eines Interferometers bei längeren Wellenlängen führten zum Konzept der DARWIN-Mission: ein frei fliegendes Weltrauminterferometer für das mittlere Infrarot.

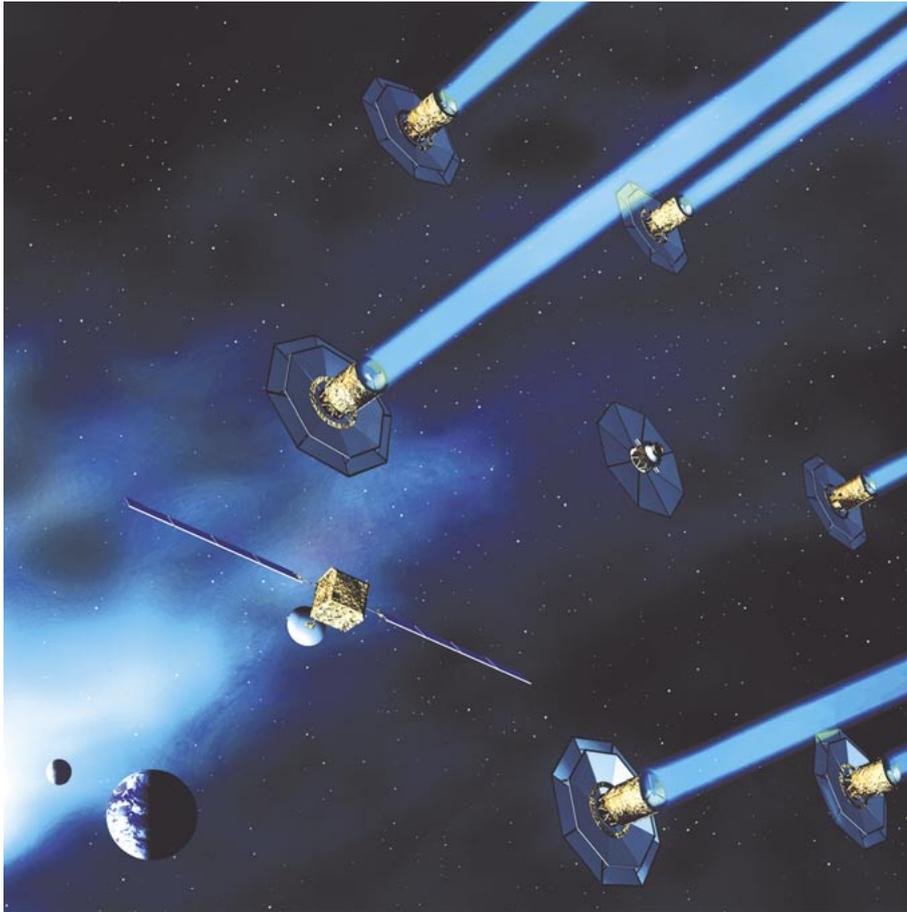


Abb. IV.3.1: Die Flotte der DARWIN-Raumfahrzeuge auf der Suche nach Anzeichen für Leben im Universum.

DARWIN wird aus drei bis sechs unabhängigen, frei fliegenden Raumfahrzeugen zweierlei Typs bestehen: mehreren Teleskop-Empfängersatelliten und einem einzelnen Strahlvereiniger. Zur Zeit laufen Konstruktionsstudien von Industrie und Forschung, in denen die optimale Anzahl, Größe und Flugkonfiguration bestimmt werden.

DARWIN ist als Große Mission im Rahmen des »ESA Cosmic Vision«-Programms beantragt. Bei hinreichender technologischer Entwicklung wird das Interferometer 2020 flugbereit sein.

Der Weg zu einer erfolgreichen DARWIN-Mission ist lang und schwierig. Doch Wissenschaftler am MPIA haben bereits eine Reihe von Kernproblemen in Angriff genommen. Insbesondere arbeitet das Institut an einer neuartigen Technik, um die nötige 180°-Phasenverschiebung zu erreichen, die das Licht des Zentralsterns

auslöschen soll. Eine deutsch-französische Kollaboration, zu der diese Arbeiten zählen, wird Ende 2006 der ESA eine Reihe solcher Techniken vorführen.

Wissenschaftler am MPIA sind intensiv an der Planung und Ausführung der DARWIN-Mission beteiligt. Tom Herbst war von 1997 bis zum Ende einer ersten industriellen Studie Anfang des neuen Jahrzehnts Mitglied der ursprünglichen »DARWIN Scientific Advisory Group« (SAG). Die ESA organisierte dieses Beratungsgremium neu als »Terrestrial Exoplanet Scientific Advisory Team (TE-SAT)«, dem sowohl Tom Herbst als auch Thomas Henning angehören. Das TE-SAT schreibt zur Zeit den formalen Antrag für DARWIN und wird zwei industrielle Systemstudien bis zu ihrer Fertigstellung Ende 2006 anleiten. Bei einem erfolgreichen Antrag wird das MPIA Anfang 2007 seine Beteiligung und Unterstützung dieser grundlegenden und höchst wichtigen Weltraummission weiter verstärken.

*(Tom Herbst, Thomas Henning,
Ralf Launhardt, David Butler)*

IV.4 Fortschritte bei LINC-NIRVANA für das LBT

LINC-NIRVANA ist ein neuartiges abbildendes Interferometer, das durch Systeme multikonjugierter adaptiver Optik gespeist wird. Das Instrument kombiniert das Licht der beiden Primärspiegel des Large Binocular Telescope (LBT) mit 8.4 m Öffnung in einer gemeinsamen Fokalebene und liefert dadurch Panoramabilder mit der Auflösung eines 23-m-Teleskops. Ein vom MPIA angeführtes Konsortium aus vier Instituten baut das Instrument. Unsere Partner sind das Istituto Nazionale di Astrofisica (Italien), die Universität Köln und das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn.

LINC-NIRVANA wird eine der Fokalstationen auf der zentralen Plattform des LBT einnehmen (s. Abb. V.1.4). Hier werden beide Strahlengänge des LBT im Inneren des Instruments vereinigt. Hier entsteht eine herunterskalierte Version der Eingangspupille des Teleskops, sodass Fizeau-Interferometrie innerhalb eines großen Bildfeldes möglich sein wird. Die so erzeugten Bilder enthalten Information bei Raumfrequenzen bis zur maximalen Ausdehnung des Teleskops entlang der Verbindungslinie der beiden Primärspiegel (22.8 Meter), und bis zu 8.4 m in der dazu senkrechten Richtung. Das LBT besitzt eine alt-azimutale Montierung, sodass die projizierte Pupille des Teleskops relativ zum Sternhimmel rotiert.

Abb. IV.4.1: Die optische Bank von LINC-NIRVANA in der Integrationshalle des MPIA.

Durch Kombination mehrfacher, bei unterschiedlichen Projektionswinkeln aufgenommener Belichtungen lassen sich Bilder mit großem Gesichtsfeld und der vollen Auflösung eines 23-m-Spiegels synthetisieren (sogenannte »Erdrotations-Synthese«).

Im Berichtsjahr hat LINC-NIRVANA den »Final Design Review« passiert. Nun laufen Zusammenbau, Integration und Tests. Zu den Höhepunkten des Jahres gehören die Fertigung der großen optischen Bank, die Anlieferung des neuartigen hybriden Kühlsystems und der Beginn umfangreicher Labortests und Verifikationen einzelner Komponenten.

Die optische Bank (Abb. IV.4.1) bot eine besonders interessante Herausforderung für die Konstruktion, da die Fokalebene des LBT etwa 2.5 m oberhalb der Instrumentenplattform liegt. Deswegen muss die optische Bank eine steife, aber leichte und Vibrationen dämpfende Referenzebene bieten, welche die beträchtliche Masse der verschiedenen Subsysteme von LINC-NIRVANA tragen kann. Die Lösung besteht in einem monolithischen Tisch aus Kohlefaser mit Aluminium-Honigwabenstruktur, der von vierzehn hohlen Kohlefaserstreben getragen wird. Ein großer Basising aus Stahl stellt die Verbindung zur Teleskopplattform her und absorbiert die durch variable Neigung des Teleskops verursachten Verbiegungen sowie durch Temperaturschwankungen verursachte Größenänderungen.

Nun, da sich die optische Bank an ihrem Bestimmungsort befindet, testet das LINC-NIRVANA-Team die einzelnen Komponenten, sobald sie von unseren Partnern aus Wissenschaft und Industrie geliefert werden. Ein solches Untersystem ist die bei



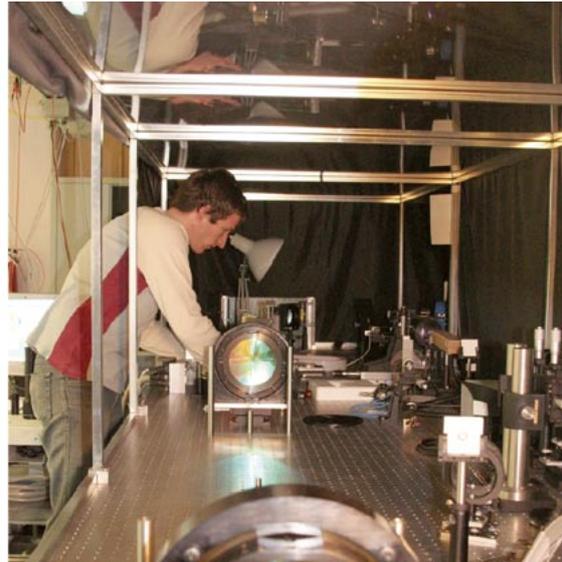


Abb. IV.4.2: (*links*) Eines der beiden warmen Linsensysteme nach dem Zusammenbau; (*rechts*) Justieren und Testen der kompletten Voroptiken auf einer großen optischen Bank.

Raumtemperatur arbeitende Voroptik, welche aus zwei Gruppen von jeweils drei Linsen auf jeder Seite des Interferometers besteht. Das Entwerfen, Bauen, und insbesondere das Ausrichten dieser Optiken stellt eine ernsthafte Herausforderung dar: Nicht nur müssen die Linsen im gesamten Wellenlängenbereich von 0.6 bis 2.5 μm beugungsbegrenzte Abbildungseigenschaften haben – auch die beiden Lichtwege müssen genau übereinstimmen, um für die Interferometrie optimale Bedingungen zu gewährleisten. Im Berichtsjahr und zu Beginn des Jahres 2006 wurde die warme Voroptik getestet und vermessen. Im Zustand optimaler Justierung übertreffen beide Linsengruppen die optischen Spezifikationen.

Der vollständige Aufbau des gesamten Instruments erfordert das schrittweise Testen und Zusammenfügen der einzelnen Komponenten. Sobald die einzelnen Untersysteme komplett sind, wird das gesamte Instrument getestet und optimiert.

Mittlerweile wird in Arizona auch der Aufbau des Teleskops selbst vorangetrieben. Wenn an beiden Fronten die Arbeit gute Fortschritte macht, wird LINC-NIRVANA bald nach der Vollendung beider adaptiven Sekundärspiegel im Herbst 2008 ans Teleskop gebracht werden. Zu diesem Zeitpunkt können das LBT und LINC-NIRVANA zusammen als ein Fizeau-Interferometer in Betrieb gehen, und so den Astronomen des MPIA als ein einzigartiges Beobachtungsinstrument zur Verfügung stehen.

Eine ausführliche Beschreibung von LINC-NIRVANA findet sich im Jahresbericht 2004 des MPIA auf S. 79 – 91.

(*H. Baumeister, J. Berwein, P. Bizenberger, A. Böhm, J.L. Borelli, F. Briegel, F. De Bonis, M. Dörsam, S. Egner, R. Friedlein, W. Gässler, B. Grimm, S. Hanke, T. Herbst (PI), F. Kittmann, M. Kürster (PM), L. Labadie, W. Laun, U. Mall, L. Mohr, N. Münch, V. Naranjo, A. Pavlov, D. Reinmann, H.-W. Rix, R. Soci, E. Schinnerer, C. Storz, V. Volchkov.*

Beteiligte Institute:

INAF, I. Physikalisches Institut der Universität Köln, MPI für Radioastronomie, Bonn)

IV.5 LUCIFER I+II – zwei Spektrographen für das LBT

LUCIFER besteht aus zwei bildgebenden Spektrographen für den Einsatz am Large Binocular Telescope (LBT). Es wird gemeinsam von fünf Instituten entwickelt; der Landessternwarte Heidelberg, dem MPIA, dem MPI für extraterrestrische Physik in Garching, dem Astronomischen Institut der Universität Bochum und der Fachoberschule für Technik und Gestaltung, Mannheim.

Der Bau der zwei Infrarot-Kamera/Spektrographen-Systeme LUCIFER I und II schreitet weiter voran: Im Jahr 2005 wurden die beiden Kryostate fertiggestellt, getestet und an das MPIA geliefert. Anschließend wurde ein Kryostat zum Einbau in die gekühlte Einheit für Multiobjektspektroskopie an das Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching transportiert. Zwei Hilfskryostaten zum Austausch der Maskenmagazine sind am MPE fertiggestellt, so dass auch der Prozess des Magazinwechsels getestet und optimiert werden kann.



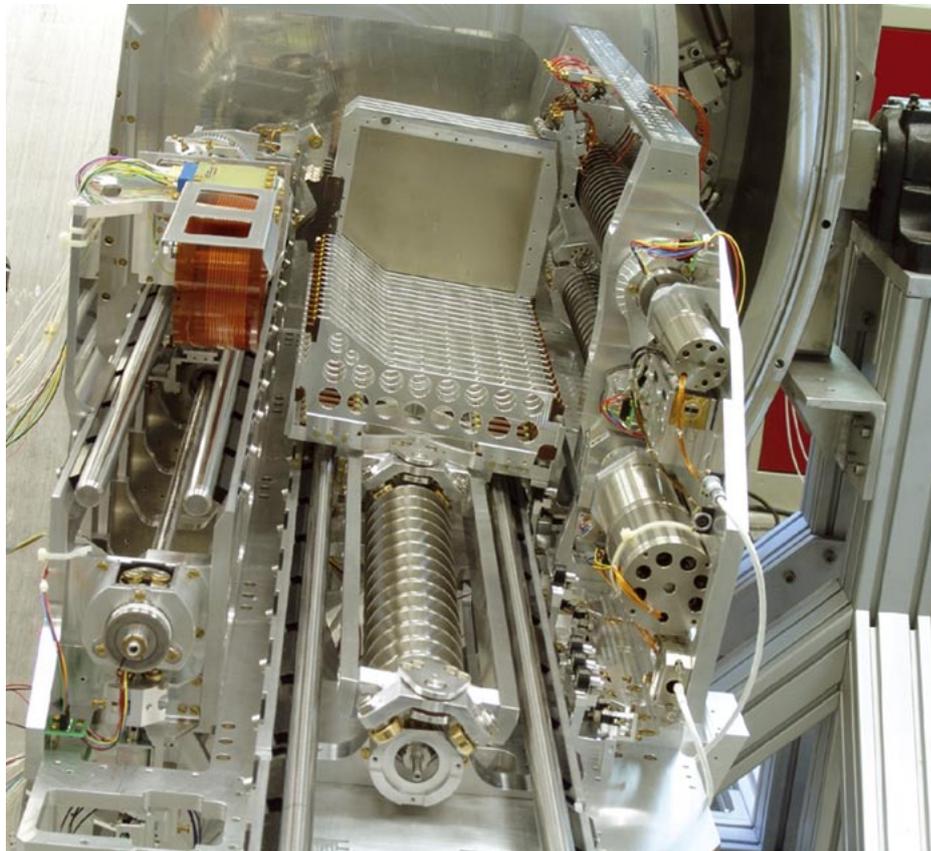
Abb. IV.5.1: LUCIFER I und II in der staubfreien Experimentierhalle am MPIA. Im Zentrum des Bildes steht ein vollständig zusammengebauter Kryostat für LUCIFER I während der ersten Abkühltests. Halb verdeckt dahinter und im Vordergrund Teile des zweiten Kryostaten während der Integration.

Abb. IV.5.2: Die MOS-Einheit während der Tests am MPE in Garching vor dem Einbau in den Kryostaten. Vorne ist der Schneckenantrieb mit den beiden Maskenmagazinen zu sehen, links davon der Wechselroboter, rechts die Festhaltemik.

LUCIFER I wird gegenwärtig am MPIA integriert. Die kalte Struktur wurde eingebaut und bei tiefen Temperaturen getestet. Es folgen nach und nach alle optomechanischen Komponenten. Im September 2005 wurde der Teleskopsimulator geliefert und in der Experimentierhalle installiert. Hier werden demnächst Durchbiegetests durchgeführt und die Funktionsfähigkeit für unterschiedlichste Teleskoppositionen getestet.

Im Frühjahr und Sommer 2006 wird LUCIFER I vollständig integriert werden, als Auslieferungstermin ist Frühling 2007 vorgesehen. Die Fertigstellung von LUCIFER II wird etwa ein Jahr später folgen.

*(Bernhard Grimm, Werner Laun,
Rainer Lenzen, Ralf-Rainer Rohloff.
Partner: Landessternwarte Heidelberg,
MPI für Extraterrestrische Physik, Garching,
Astronomisches Institut der Universität Bochum,
Fachhochschule für Technik
und Gestaltung, Mannheim)*



IV.6 Differentielle Verzögerungsstrecken für PRIMA am VLTI

Schon in wenigen Jahren wird das hochpräzise Astrometrie-Instrument PRIMA (Phase Referenced Imaging and Microarcsecond Astrometry) am Very Large Telescope Interferometer (VLTI) der Europäischen Südsternwarte verfügbar sein.

PRIMA wird mit differentiellen Verzögerungsstrecken (engl. differential delay lines, DDL) ausgerüstet sein, die hochpräzise astrometrische Messungen mit einer Genauigkeit von 10 Mikrobogensekunden erlauben. Damit wird es möglich sein, extrasolare Planeten auf astrometrischem Wege nachzuweisen, was eine Ergänzung zur Radialgeschwindigkeitsmethode darstellt. Insbesondere kann mit Hilfe dieses präzisen Astrometrieverfahrens nach Planeten um Sterne gesucht werden, für die Radialgeschwindigkeitsmessungen ungeeignet sind. Es ermöglicht eine Charakterisierung extrasolarer Planetensysteme, da mit dieser Technik die Massen der Planeten bestimmt werden können.

Bei astrometrischen Beobachtungen mit PRIMA werden zwei Sterne gleichzeitig innerhalb eines größeren Gesichtsfelds (Durchmesser: 1 Bogenminute) beobachtet. Wird eines der beiden Objekte als Referenzstern benutzt, können für das andere Objekt Störungen durch atmosphärische Turbulenz in Echtzeit kompensiert werden. Dies führt zu einer erhöhten Winkelauflösung und größeren Empfindlichkeit.

Das MPIA Heidelberg sowie die Sternwarten Genf und Leiden bilden ein Konsortium, das mit der ESO eine Vereinbarung über den Bau und die Lieferung der differentiellen Verzögerungsstrecken für PRIMA getroffen hat. Anschließend wird es dann im nahinfraroten K-Band

Abb. IV.6.1: Ergebnis einer Finite-Elemente-Berechnung der Verformung unter Gravitationskräften und Kräften hervorgerufen durch die magnetische Montierung. Die maximale Verformung beträgt 149 nm (rot).

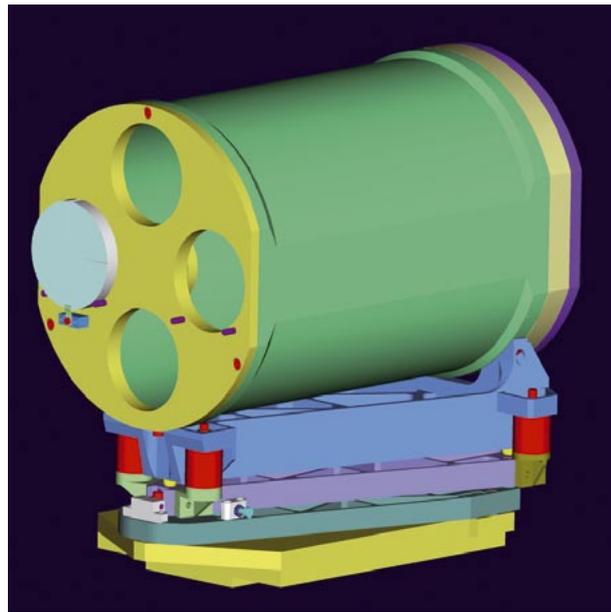
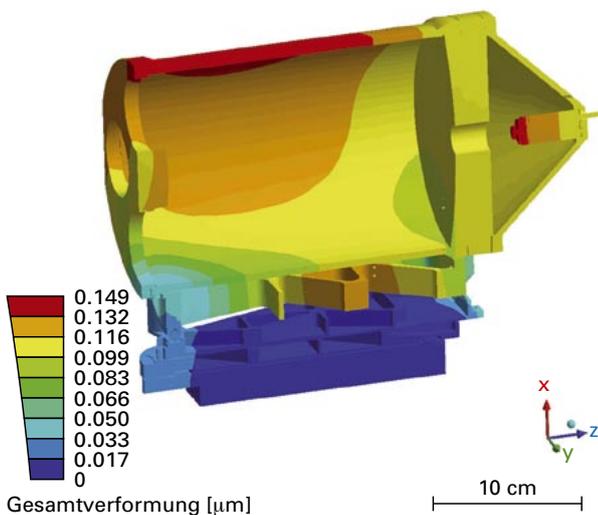


Abb. IV.6.2: Optik der PRIMA-DDL auf einer beweglichen Montierung und Grundplatten für die Justierung.

unter Verwendung der Hilfsteleskope ein astrometrisches Planetensuchprogramm am VLTI durchführen.

Hauptaufgabe des MPIA beim DDL-Projekt ist die Entwicklung der optomechanischen Komponenten, einer Art hochpräzisen, beweglichen Katzenaugenteleskops mit 20 cm Öffnung. In Verbindung mit einem linearen Bewegungsmechanismus und im Vakuum untergebracht, werden die Verzögerungsstrecken optische Wegunterschiede von bis zu 12 cm auf Nanometer genau ausgleichen; das entspricht einer Genauigkeit von $1:10^8$.

Neben diesem Instrumentierungsprojekt ist das MPIA auch an der Entwicklung der astrometrischen Betriebssoftware (AOS) sowie an wissenschaftlichen Vorbereitungsprogrammen für die astrometrischen Beobachtungen beteiligt. Das MPIA ist leitender Partner bei den vorbereitenden Beobachtungen für das Planetensuchprojekt mit PRIMA.

Die PRIMA-DDL- und AOS-Projekte haben das »Preliminary Design Review« (vorläufige Konstruktionsüberprüfung), das im Juni 2005 bei der ESO in Garching stattfand, erfolgreich bestanden. Das »Final Design Review« (abschließende Überprüfung) ist für Juli 2006 geplant.

(Harald Baumeister, Peter Bizenberger,
Uwe Graser, Thomas Henning (PI),
Ralf Launhardt (Projekt Wissenschaftler,
PM Optomechanik),
Ralf-Rainer Rohloff,
Johny Setiawan, Karl Wagner.
Partner: Observatoire de Geneve,
Sterrewacht Leiden)

IV.7 SPHERE – Suche nach Exoplaneten am VLT

SPHERE, »Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research«, ist ein Projekt zur direkten Abbildung extrasolarer Planeten am VLT der ESO. Das Projekt ging aus dem Zusammenschluss von CHEOPS und »Planet Finder« hervor, zwei konkurrierenden Machbarkeitsstudien für ein entsprechendes VLT-Instrument.

Nachdem das vom MPIA geführte CHEOPS-Konsortium den Wettbewerb offiziell verloren hatte, entschied das wissenschaftlich-technische Beratungskomitee der ESO, dass beide Projekte vereint werden sollten, weil wesentliche Teile von CHEOPS dem von LAOG (Grenoble) vorgelegten Vorschlag überlegen seien. Das MPIA ist nunmehr Co-PI-Institut des SPHERE-Konsortiums, welches insgesamt 12 europäische Institute einschließlich der ESO umfasst. Der offizielle Beginn der Phase B für SPHERE wird jetzt für März 2006 erwartet.

Wie bei CHEOPS wird im Rahmen von SPHERE ein Beobachtungsprogramm entwickelt und aufgrund von Modellen zur Planetenentstehung, der räumlichen Verteilung naher Sterne sowie deren Altersstruktur, Metallizität usw. optimiert, das zur direkten Abbildung von extrasolaren Gasplaneten in unterschiedlichen Altersstufen (10^7 Jahre, 10^8 Jahre, mehr als 10^9 Jahre) führen soll. Das Instrumentenkonzept beinhaltet weiterhin ein »extremes« System Adaptiver Optik (XAO) und nunmehr drei differenziell abbildende Instrumente: das differenzielle Polarimeter ZIMPOL, einen 3D-Spektrographen für das nahe Infrarot (beide aus dem CHEOPS-Konzept), sowie eine zusätzliche differenziell abbildende NIR-Kamera mit Spektrographen und Polarimeter aus dem LAOG-Vorschlag. Das gesamte Instrument wird zum Zwecke höchster Stabilität fest auf der Nasmyth-Plattform des VLT montiert werden.

Die Phase B des Projektes soll zwölf Monate dauern und mit der vorläufigen Designbegutachtung enden. Phase C, bis zur endgültigen Designbegutachtung, soll ebenfalls zwölf Monate dauern, für Herstellung, Beschaffung und Integration der einzelnen Komponenten sind insgesamt 18 Monate vorgesehen. »First Light« ist für Mitte 2010 geplant.

(Markus Feldt)

IV.8 LAIWO – Suche nach Exoplaneten am Wise-Observatorium

LAIWO (Large Area Imager for the WISE Observatory) ist eine optische CCD-Kamera für die photometrische Suche nach extrasolaren Jupiter-ähnlichen Planeten mit Hilfe der Durchgangsmethode. Die Kamera soll am 1-m-Teleskop des Wise-Observatoriums (Abb. IV.8.1) in der Negev-Wüste in Israel betrieben werden. Das Gesichtsfeld beträgt ein Quadratgrad bei einer Auflösung von 0.7 Bogensekunden pro Pixel.

Das MPIA, die Universität Tel Aviv und die Universitätssternwarte Göttingen haben das Suchprogramm »Giant Transiting Planets Observations« (Durchgangsbeobachtungen von Riesenplaneten) ins Leben gerufen, das vom MPIA und der Deutsch-Israelischen Stiftung finanziert wird. Ziel des Forschungsprojekts ist, mit Hilfe der Durchgangsmethode extrasolare Jupiter-große Planeten um Sterne mit Helligkeiten von $I = 14-15$ mag nachzuweisen. Die Methode beruht auf dem vorübergehenden Helligkeitsabfall des Muttersterns, der von dem Planeten umkreist wird. Ist das Planetensystem günstig zur Sichtlinie orientiert, so zieht der Planet einmal pro Umlauf zwischen seinem Mutterstern und dem Beobachter vorüber. Dadurch kommt es zu einer Bedeckung (oder Durchgang, engl. Transit), die ein Absenken der Lichtkurve bewirkt. Für Jupiter-große Planeten, die einen Stern von der Größe der Sonne bedecken, beträgt der erwartete Helligkeitsabfall oder die Transittiefe etwa 1 Prozent. Ist es möglich, drei oder mehr Transits zu messen, die eindeutig ein und demselben Planeten zuzuordnen sind, kann man die Bahnperiode, den Radius des Planeten und den Neigungswinkel seiner Bahnebene bestimmen.

Zur Zeit wird LAIWO am MPIA gebaut. Die Kamera wird mit vier CCDs vom Typ Lockheed-486 mit 4000×4000 $15 \mu\text{m}$ großen Pixeln ausgestattet sein (Abb. IV.8.2). Die CCDs werden von der Vorderseite beleuchtet

Abb. IV.8.1: Das 1-m-Teleskop des Wise-Observatoriums in Israel.



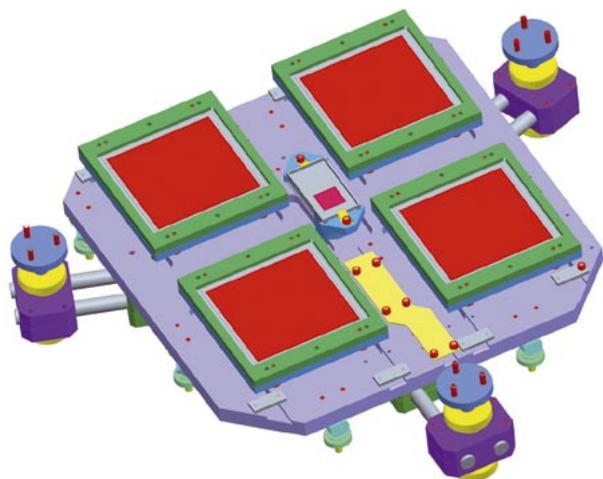


Abb. IV.8.2: Die Detektorgruppe.

und haben im Wellenlängenbereich zwischen 600 und 850 μm eine Quantenausbeute von etwa 40 Prozent sowie ein Ausleserauschen unter 5 Elektronen. Im Zentrum des Mosaiks wird ein CCD für die Nachführung sitzen: ein e2V CCD47-20, $1\text{K} \times 1\text{K}$ »frame transfer device« mit einer Pixelgröße von 13 μm (ein zweigeteiltes Spezial-CCD, das eine Integration parallel zum Auslesen des vorherigen Bildes erlaubt). Die Kamera wird am 1-m-Teleskop des Wise-Observatoriums montiert werden. Das Gesichtsfeld beträgt ein Quadratgrad bei einer Auflösung von 0.7 Bogensekunden.

Die Filter B, V, R, I und z' sind auf einem Schieber in einer Ladeschublade untergebracht. Gleichzeitig können drei verschiedene Filtersätze auf dem Schieber montiert werden. Jeder Satz enthält fünf Filter, vier für die Kamera-CCDs und eins für das Nachführ-CCD.

Die Beobachtungsstrategie sieht vor, drei Felder fortwährend so lange zu überwachen, bis pro Feld 3000 Bilder erfasst sind. Wir können damit rechnen, drei Jahre lang mehr als 200 Nächte pro Jahr bewilligt zu bekommen. Damit wird eine Himmelsüberdeckung von etwa 27–30 Quadratgrad möglich ein. Die Beobachtungen sollen mit dem 1.2-m-Monet-Teleskop in Texas, USA, koordiniert werden, das von der Göttinger Sternwarte betrieben wird. Für die Dauer der dreijährigen Kampagne werden etwa 15 Planetendurchgänge erwartet. Das Projekt soll im Sommer/Herbst 2006 starten.

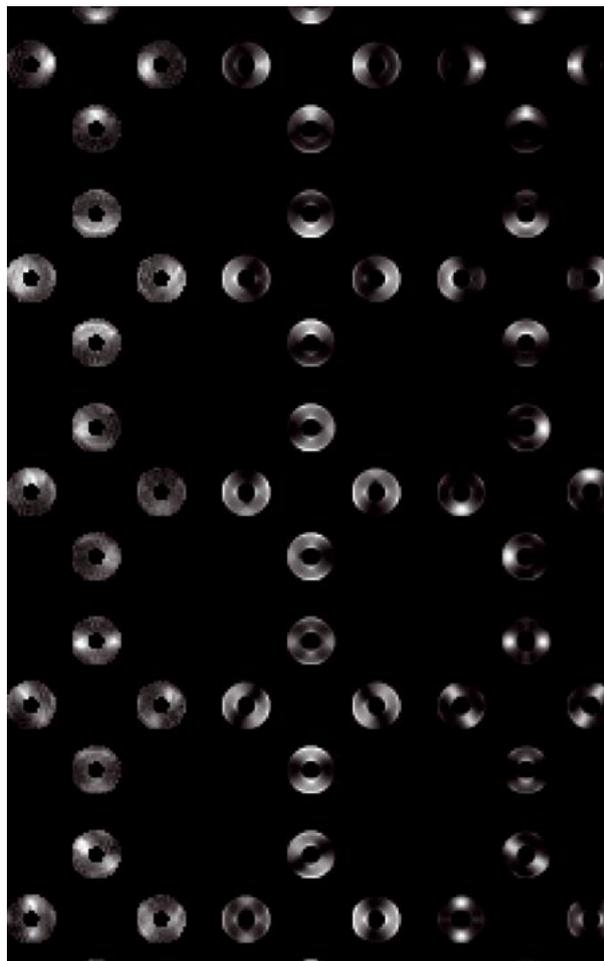
(Cristina Afonso (PI), Thomas Henning (Co-PI),
Karl-Heinz Marien, Harald Baumeister,
Armin Boehm, Florian Briegel,
Bernhard Grimm, Ralf Klein,
Ralf-Rainer Rohloff, Karl Zimmermann.
Partner: Wise Observatorium, Israel
und Universitätssternwarte Göttingen)

IV.9 PYRAMIR – ein neuer Wellenfrontsensor für ALFA

PYRAMIR (Pyramiden-Infrarot-Wellenfrontsensor) ist ein neuartiger Wellenfrontsensor, der im nahen Infrarot arbeitet. Das Gerät ist für die Adaptive Optik ALFA bestimmt und wird dort den im Sichtbaren arbeitenden Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor ergänzen.

PYRAMIR wird weltweit der erste Pyramiden-Wellenfrontsensor sein, der am Himmel unter echter Atmosphäre in einem Spektralbereich arbeitet, wo die AO-Korrektur hochwirksam ist. Nur unter diesen Bedingungen kann laut einer Vorhersage von S. Esposito et al. der Empfindlichkeitsvorteil von bis zu 1.5 Magnituden bei der Leitsternhelligkeit gegenüber einem Shack-Hartmann-Sensor voll ausgespielt werden.

Abb. IV.9.1: Detektorbilder von PYRAMIR. Abgebildet ist die Sensorantwort auf die grundlegenden optischen Aberrationen, die während des Kalibrationsverfahrens an den verformbaren Spiegel angelegt wurden. *Links* die tatsächlichen Detektorbilder, in der *Mitte* und *rechts* zum Vergleich Simulationen mit unterschiedlichen Aberrationen (75 nm RMS und 480 nm RMS). Man erkennt, dass die reale Kalibrationsamplitude eher 480 nm RMS entspricht.



Die Integration des Sensors ist mittlerweile abgeschlossen. Zwischenzeitliche Probleme mit Justage und Ausrichtung insbesondere des Detektorhalteblocks konnten Ende 2005 überwunden werden. Bis zum Jahresende 2005 versah PYRAMIR im AO-Labor des MPIA seinen Dienst und wurde eingehend auf alle Funktionen im Bereich Elektronik, Motoren, Temperatur- und Drucksensoren sowie Optik getestet. Diese Tests wurden erfolgreich abgeschlossen und PYRAMIR anschließend zur Labor-Integration in das ALFA-System zum Calar Alto versandt. Hier erfolgte die erste Kalibrierung mit einem vollständigen Modensatz (Abb. IV.9.1). »Erstes Licht« am Nachthimmel wird für PYRAMIR voraussichtlich im April 2006 stattfinden.

(Markus Feldt, Diethard Peter, Miwa Goto, Thomas Henning, Stefan Hippler, Karl Wagner, Harald Baumeister, Peter Bizenberger, Ulich Mall, Ralf-Rainer Rohloff, Udo Neumann, Clemens Storz)

IV.10 Verbesserung des Seeing am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto

Obwohl die optische Konstruktion des 3.5-m-Teleskops auf dem Calar Alto hervorragend ist, war die Qualität der während der letzten 20 Jahre erhaltenen Bilder selten besser als eine Bogensekunde – trotz verschiedener Anstrengungen, tagsüber die thermische Stabilität der Teleskopkuppel und des Spiegels zu kontrollieren, z.B. durch aktive Kühlung des Kuppelbodens und der Spiegelzelle. Die Bildqualität konnte nun in wenigen einfachen Schritten wesentlich verbessert werden. Heute wird eine Bildschärfe von 0.7 Bogensekunden im Optischen häufig erreicht.

In einem ersten Schritt auf dem Weg zur Verbesserung der Bildschärfe am 3.5-m-Teleskop war eine genaue quantitative Bestimmung des örtlichen Seeing erforderlich. Dazu wurde im Jahr 2000 ein differentieller Bildbewegungs-Monitor (engl. differential image motion monitor, DIMM) von einer kommerziellen Firma erworben. Nachdem das Seeing nur für einige Monate außerhalb des Gebäudes des 3.5-m-Teleskops gemessen worden war, stellte sich heraus, dass das mit DIMM gemessene Seeing deutlich unter einer Bogensekunde und fast eine halbe Bogensekunde unter der durchschnittlichen Bildqualität am Teleskop lag. Eine zweiwöchige Kampagne auf dem Calar Alto mit dem Generalised Seeing Monitor (GSM) der Universität Nizza bestätigte die mit DIMM durchgeführten Messungen und zeigte, dass verstärkte Anstrengungen nötig waren, um die Effekte zu beseitigen, die das lokale Seeing am 3.5-m-Teleskop verschlechterten.

Zu allererst wurden 16 Lüftungsfenster mit einer Gesamtfläche von rund 30 m² in die Kuppel des 3.5-m-Teleskops geschnitten. Diese Maßnahme war vergleichbar

mit ähnlichen Bemühungen an anderen Teleskopen, z.B. dem UKIRT. Die zusätzlichen Öffnungen führten zu einer sehr wirkungsvollen Belüftung der Kuppel am Anfang der Nacht. Diese wird noch verstärkt durch zusätzliche Abzugsgebläse, die an den Türen zum Catwalk installiert wurden. Eine aktive Belüftung des Spiegels mit Hilfe von Ventilatoren, die direkt am Rand der Spiegelzelle angebracht wurden, war weniger erfolgreich. Generell führten Spiegelventilatoren zu einer Verschlechterung des Seeing, so dass sie nicht länger benutzt wurden.

Zur Erhöhung der thermischen Stabilität des 3.5-m-Teleskopgebäudes wurden zusätzliche Maßnahmen getroffen. Im Gebäude waren etliche Elektroniklabors untergebracht, weswegen das Gebäude tagsüber und teilweise auch während der Nacht häufig betreten wurde. Diese Labors wurden verlegt. Anschließend wurde die Heizung des Teleskopgebäudes so weit abgesenkt, dass im Winter keine Leitungen einfrieren, im Übrigen aber die abgegebene Energie minimal ist.

Beobachtungen mit dem adaptiven Optiksistem ALFA deuteten auf eine starke Neigung der Wellenfront hin, und Beobachtungen mit der Primärfokuskamera LAICA zeigten, dass die im Primärfokus aufgenommenen Bilder unter einer starken Dezentrierkoma litten. Eine Dezentrierkoma war bei abbildenden Instrumenten im Ritchey-Chrétien-Fokus, wie MOSCA, nicht zu sehen. Die Quelle dieses Abbildungsfehlers war uns nicht klar, hauptsächlich, weil wir die Spiegelzelle für wartungsfrei hielten, wie von C. ZEISS behauptet. Das passive System der axialen Spiegelunterstützung besteht aus 27 hydraulischen Stempeln, die in drei Sektoren angeordnet, aber miteinander verbunden sind. Die Ursache für den Bildfehler konnte nicht gefunden werden, sodass als letzte denkbare Möglichkeit eine Fehlfunktion der Spiegelzelle blieb. Tatsächlich stellte sich heraus, dass ein Ölleck zu einer Neigung des Hauptspiegels um 0.035 Grad geführt hatte. Dies wurde durch die Zugabe von 0.5 Litern Hydrauliköl korrigiert. Die Neigung des Spiegels war die Hauptursache für den mit ALFA und LAICA beobachteten Abbildungsfehler, und seit die korrigierende Wartung an der Spiegelzelle vorgenommen wurde, ist der Großteil des statischen Abbildungsfehlers verschwunden.

Zu den weiteren Maßnahmen zur Minimierung lokaler Temperatureffekte zählten die Aufstellung gekühlter Schränke für die Instrumentenelektronik, die sich in der Nähe des Teleskops befindet, die Installation von Bewegungsmeldern und Zeitschaltern für alle Lichtschalter, und nicht zuletzt ein Wechsel zur blockweisen Planung für den Einsatz der Instrumente, wodurch der Zutritt zum Teleskop-Stockwerk aufgrund von Arbeiten am Tage minimiert wird. In naher Zukunft, nach erfolgreicher Beendigung der Aufrüstung des 3.5-m-Teleskops, wird der direkt neben dem Teleskop gelegene 3.5-m-Kontrollraum in einen gemeinsamen Kontrollraum für das 3.5-m- und 2.2-m-Teleskop verlegt werden. Dieser wird bereits für Beobachtungen am 2.2-m-Teleskop genutzt.

(Roland Gredel)

IV.11 PACS – Ferninfrarot-Kamera und Spektrometer für das Weltraumteleskop HERSCHEL

An der Entwicklung des PACS-Instruments, einer Kamera und einem Spektrometer für den Wellenlängenbereich 60 ... 210 μm , ist das MPIA in einem Konsortium von 15 europäischen Instituten mit einem Anteil von 15 Prozent beteiligt.

Die wichtigsten Beiträge aus Heidelberg sind der Fokalebene-Chopper, die Charakterisierung der großen Ge:Ga-Spektrometer-Kameras und ihrer $-270\text{ }^\circ\text{C}$ kalten Ausleseelektronik, die Untersuchung und Vermeidung von Strahlenschäden an diesen Komponenten und die Kalibration des Instruments vor und während des Fluges.

Bereits im Juni 2005 konnte das MPIA den Fokalebene-Chopper als einen der ersten Beiträge des Konsortiums zum Flugmodell des PACS an das für das Gesamtinstrument verantwortliche MPE Garching liefern. Der von CARL ZEISS gefertigte Chopper ist eine Weiterentwicklung eines im MPIA entworfenen und erprobten Prototyps. Er ist von hervorragender Qualität und übertrifft viele der technischen Anforderungen. Bei CARL ZEISS wurde im Sommer 2005 der Bau der Flugsatzeinheit des Choppers begonnen, die nochmals bessere Leistungen verspricht.

Bei den Charakterisierungen der 16×25 Pixel-Ge:Ga-Kameras für das Flugmodell ergaben sich unerwartet viele Ausfälle. Das MPIA hat sich an mehrmonatigen Versuchsreihen zur Aufklärung der Fehlfunktionen beteiligt. Dazu mussten wir mit den umfangreichen Testeinrichtungen des MPIA zum Hersteller der Kameras umziehen. Im Ergebnis konnten für die hohen Ausfallraten zwei Hauptursachen bestimmt werden: 1. Zerstörung von elektronischen Verstärker- und Auslese-Stufen durch elektrostatische Entladungen und 2. schlechte Kontaktierung der dünnen Zuleitungsdrähte aus Stahl, die wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit eingesetzt werden. Zur Vermeidung der elektrostatischen Probleme musste in allen beteiligten Instituten und Firmen die Handhabung der Bauteile sehr sorgfältig geregelt werden (Luftfeuchte, Erdungen, Schutzschaltungen...). Mit den neuen Verfahren stieg die Erfolgsrate bei den Detektor/Ausleseelektronik-Tests steil an und bis zum Jahresende konnten die meisten Kameramodule vollständig charakterisiert beim Hersteller ASTEQ für den Zusammenbau der Kameras abgeliefert werden. Bedingt durch die unerwartet hohe Auslastung mit den Ge:Ga-Spektrometer-Kameras mussten die Strahlungstests mit Gamma-Quellen zur Simulation des optimalen Betriebs im Lagrangepunkt L2 im Berichtsjahr etwas zurückstehen.

Nachdem die Arbeiten für das eigentliche Instrument am MPIA ihrem Ende entgegen gehen, streben Tests und die Entwicklung des Bodenobservatoriums ihren Höhepunkten zu. Heidelberger Wissenschaftler nahmen

an den Kalttests des Qualifikationsmodells von PACS und an den Integrated Module Tests aller drei HERSCHEL-Instrumente teil. Dazu wurden Testverfahren entworfen und anschließend eine umfangreiche Datenauswertung betrieben. Naturgemäß lagen die Schwerpunkte der Heidelberger Beiträge bei Detektoren, Chopper und Kalibration. Bedingt durch noch nicht ganz ausgeiferte Entwicklungen von Untersystemen und ihren gegenseitigen Schnittstellen aus dem 15 Institute umfassenden PACS-Konsortium haben alle diese Tests und Nachbesserungen deutlich mehr Zeit in Anspruch genommen als ursprünglich geplant.

Darüber hinaus trägt das MPIA zur Erstellung der wissenschaftlichen Beobachtungsschablonen für künftige Nutzer des HERSCHEL-Observatoriums bei und hat eine führende Rolle bei der Entwicklung der interaktiven Datenanalyse für PACS übernommen.

Der Start des Ferninfrarot-Weltraumobservatoriums HERSCHEL wurde um fast ein Jahr auf Frühjahr 2008 verschoben. Ursache dafür sind mehrere technische Schwierigkeiten, die in der Endphase der Entwicklung dieses bisher größten Weltraum-Observatoriums aufgetreten sind. Der neuartige 3,5-m-Hauptspiegel aus

Abb. IV.11.1: Sieben Detektorzeilen mit je 16 Pixeln einer Kamera für den PACS-Spektrometerteil. Sichtbar sind die Lichttrichter vor den Ge:Ga Pixeln. Beide Kameras haben je 25 solcher Module. Diese Detektormodule werden am MPIA bei Temperaturen von unter $-270\text{ }^\circ\text{C}$ bezüglich Empfindlichkeit, Rauschen, Dunkelstrom usw. ausführlich charakterisiert.

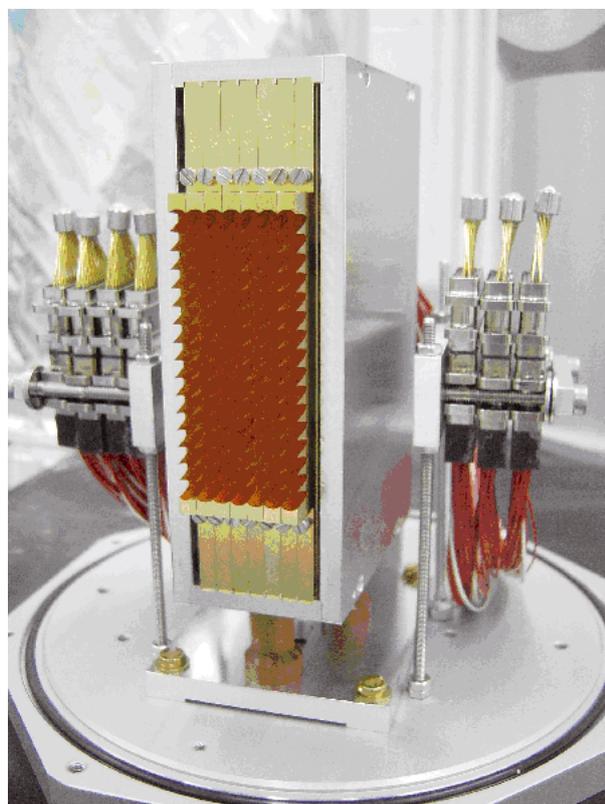




Abb. IV.11.2: Die Doktorandin Jutta Stegmaier bereitet den Test von Detektormodulen (wie in Abb. IV.11.1) im Flüssig-Helium-Kryostaten des MPIA vor.

Siliziumkarbid zeigte stärkere Fokusänderungen bei der Abkühlung auf -200°C , und die drei wissenschaftlichen Instrumente benötigen mehr Zeit, insbesondere für die Optimierung ihrer höchst empfindlichen Detektorsysteme.

*(Dietrich Lemke, Stephan Birkmann,
Helmut Dannerbauer, Ulrich Grözinger,
Thomas Henning, Ralph Hofferbert,
Ulrich Klaas, Jürgen Schreiber,
Jutta Stegmaier, Manfred Stickel)*

IV.12 PIA – Ein Großrechner für das MPIA

Seit September 2005 glühen in Garching 264 Prozessoren und ein leistungsfähiges Netzwerk exklusiv für das MPIA. Mit diesem neuen Superrechner steht den Astronomen am MPIA nun eine nie zuvor gehabte Rechenleistung zur Verfügung. Mit einer Gesamtrechenleistung von 1.1 Teraflop, das sind 1100 Milliarden Rechenschritte pro Sekunde, verfehlen wir nur knapp die Top-500-Liste der weltweit schnellsten Superrechner.

Gemeinsam stellten Hubert Klahr und Rachel Somerville, die Leiter der beiden Theoriegruppen am MPIA, und Walter Rauh, der Leiter der EVD-Gruppe, die Spezifikationen für diesen Rechner auf und es gelang ihnen, die Anlage vom Beratenden Ausschuss Rechner der Max-Planck-Gesellschaft (BAR) genehmigen und großenteils finanzieren zu lassen. Erste wissenschaftliche Ergebnisse, die auf diesem Rechner gewonnen wurden, sind bereits veröffentlicht.

Die Vorgeschichte

Seit Übergabe der Rechanlage Origin 2000 an das Max-Planck-Rechenzentrum in Garching war ein 24-Prozessoren-Beowulfcluster namens Beehive mit relativ langsamen Ethernet-Verbindungen der leistungsfähigste Rechner der Theoretiker am MPIA. Im Sommer 2004 gelang es Stefan Hippler gemeinsam mit Walter Rauh und Hubert Klahr, einen modernen 16 Prozessor Opteron Cluster über den BAR anzuschaffen. Dieser Mini-Cluster besteht aus vier modernen Opteron-Quadboards mit schnellen Infiniband-Verbindungen. Allerdings waren diese Rechenressourcen schon bald bei weitem nicht mehr ausreichend, und die Forscher am MPIA mussten auf externe Rechenkapazitäten ausweichen. Vor allem die Simulation der Turbulenz in protoplanetaren Akkretionscheiben ist rechnerisch sehr aufwendig. Hier geht es darum, den Einfluss der Turbulenz auf die Entstehung von Planeten zu untersuchen (siehe auch Kap. II.4: Planetesimale aus Gravitationsinstabilitäten, S. 27). Die Nutzung externer Rechenkapazitäten ist jedoch mit engen Restriktionen der Rechenzeit verbunden, bedeutet niedrige Priorität im Vergleich zu den anderen Nutzern und ist vom guten Willen der Betreiber der Rechanlagen abhängig.

Im Frühjahr 2005 kam Rachel Somerville als Leiterin der Theoriegruppe im Bereich Galaxien und Kosmologie ans MPIA. Für ihre Simulationen der Galaxienentwicklung ist sie ebenfalls auf die Nutzung von Großrechnern angewiesen. So schlossen sich die Theoriegruppen zu einer strategischen Allianz zusammen und man beantragte beim BAR gemeinsam ein Cluster aus 256 Prozessoren. Am 1. Juli 2005 verteidigten Walter Rauh und Hubert Klahr erfolgreich den Antrag auf einer Sitzung des BAR in München. Dem Antrag wurde in vollem Umfang stattgegeben und der BAR sagte sogar zu, zwei Drittel der Kosten zu übernehmen. Die Beschaffung ging zügig vonstatten, bereits am 1. September wurde der PIA-Cluster den Theoriegruppen des MPIA übergeben.

Technische Daten

Zur Vereinfachung der Logistik entschieden wir uns für eine Aufstellung des Rechners beim Rechenzentrum der Max-Planck-Gesellschaft in Garching. Dort gibt es genug freien Platz, Strom- und Kühlkapazitäten und Spezialisten für diese Form der Hardware – alles Rahmenbedingungen, die man am MPIA in Heidelberg erst unter erheblichem Aufwand hätte schaffen müssen. Bei den modernen Internetverbindungen ist es ohnehin kaum mehr festzustellen, ob der Rechner, auf dem man gerade arbeitet, im Nebenzimmer oder in Garching steht.

PIA selbst ist ein Cluster mit 128×2.6 GHz Doppel-Opteron-Rechnern von SUN (V20z), die zur schnellen Interkommunikation über einen 144-port Infiniband-Switch von Mellanox (MTS 14400) Informationen aus-



Abb. IV.12.1: Der PIA-Cluster des MPIA kurz nach seiner Inbetriebnahme am Rechenzentrum der Max-Planck-Gesellschaft in Garching. Der mittlere Schrank enthält unten den 144-port Infiniband switch von Mellanox und oben die beiden V40z Zugangsrechner mit den den FC-RAID-Systemen. Die vier anderen Schränke beherbergen jeweils 32 Rechnerknoten (V20z).

tauschen können. Jeder Knoten verfügt über 4 Gigabyte Hauptspeicher und 2×73 GigaByte Festplatten. Zur Speicherung der umfangreichen Simulationsergebnisse stehen insgesamt ca. 10 Terabyte auf zwei »fibre channel«-RAID-Systemen zur Verfügung, die an die beiden Zugangsrechner (V40z) mit je vier AMD Opteron 848 Prozessoren (2.2 GHz) und 8 GB Hauptspeicher angeschlossen sind.

Erste Ergebnisse

Da in den Theoriegruppen schon fertige Programme für PIA vorlagen, konnten wir sofort mit Produktionsläufen beginnen. Die ersten Veröffentlichungen, die gänzlich auf mit PIA gewonnenen Daten beruhen, sind bereits im Druck beim *Astrophysical Journal*, und weitere sind eingereicht. Mittlerweile hat PIA zehn aktive Nutzer, was einerseits eine gute Auslastung der Kapazitäten bedeutet, andererseits aber einen kurzfristigen Zugriff auf die enorme Rechenleistung der Anlage gerade noch zulässt. PIA ist somit einer der wichtigsten Mitarbeiter in den Theoriegruppen des MPIA.

*(Hubert Klahr, Walter Rauh,
Rachel Somerville)*

V Menschen und Ereignisse

V.1 Erstes Licht für das Large Binocular Telescope

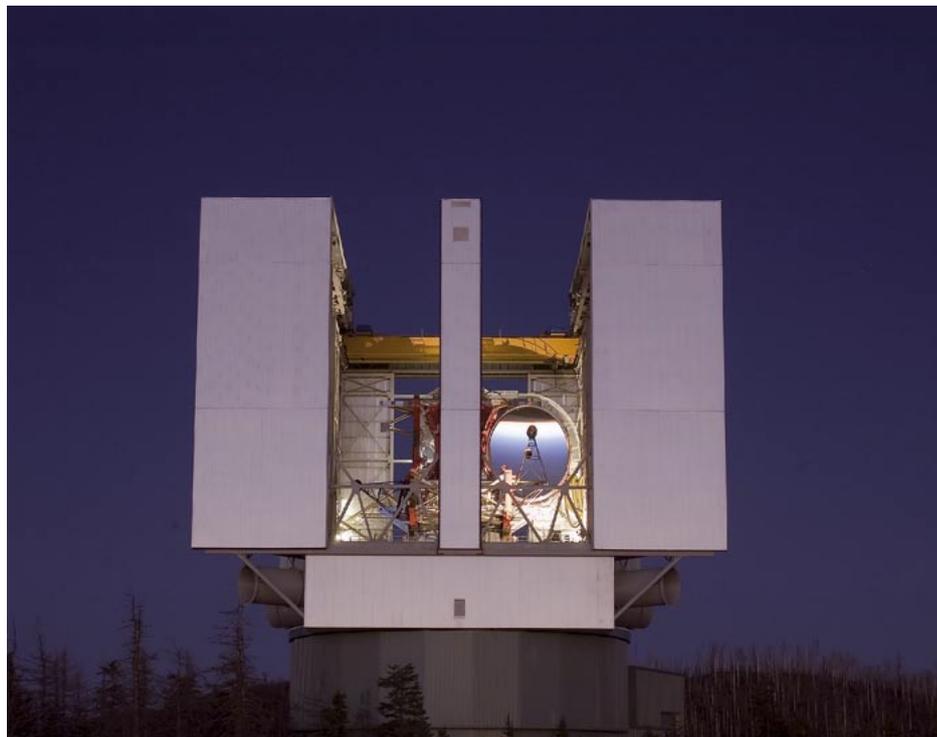
Am 12. Oktober 2005 gelangen mit dem Large Binocular Telescope (LBT) die ersten astronomischen Aufnahmen. Dieses »First Light« war ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur Inbetriebnahme des größten Einzelteleskops der Welt, an dessen Bau und Entwicklung fünf deutsche Institute unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für Astronomie maßgeblich beteiligt sind. Das LBT wird völlig neue Möglichkeiten für die Erforschung von Planeten außerhalb des Sonnensystems oder für die Untersuchung des fernsten, und damit jüngsten Universums eröffnen.

Das LBT auf dem 3190 Meter hohen Mount Graham in Arizona ist eines der herausragenden wissenschaftlich-technischen Projekte der modernen astronomischen Forschung. Das Teleskop verfügt über zwei Hauptspiegel mit jeweils 8,4 Metern Durchmesser, die auf einer gemeinsamen Montierung installiert sind und gleichzeitig auf ferne Himmelskörper ausgerichtet werden können. Durch die Vereinigung der Strahlengänge der beiden Einzelspiegel sammelt das LBT so viel Licht wie ein Teleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 11,8 Metern. Damit wird das LBT das Weltraumteleskop HUBBLE an Lichtstärke um den Faktor 24 übertreffen.

Von noch größerer Bedeutung ist jedoch, dass das LBT dabei auch die Auflösung eines Einzelteleskops von 22,8 Metern Öffnung erreichen soll. Dieses ehrgeizige Ziel kann nur durch die Verwendung Adaptiver Optik in Kombination mit Fizeau-Interferometrie erreicht werden. Noch sind einige der dafür notwendigen Komponenten des LBT in der Entwicklung. Dazu zählen unter anderem die extrem dünnen adaptiven Sekundärspiegel und das Instrument LINC-NIRVANA, das für die interferometrische Kombination der beiden Strahlengänge sorgen soll. Bei Bau und Entwicklung dieses zentralen Bausteins des LBT spielt das MPIA die führende Rolle (s. Kap. IV.4).

Startschuss für das First Light war die Montage des ersten Hauptspiegels in die Teleskopkonstruktion. Am 12. Oktober 2005 wurde das Teleskop auf die 24 Millionen Lichtjahre entfernte Spiralgalaxie NGC 891 im Sternbild Andromeda eingestellt. Die ersten Bilder hoher Qualität entstanden im Primärfokus des Teleskops mit Hilfe der Large Binocular Camera (LBC) durch ein Blaufilter hindurch (eine Version für den roten Spektralbereich ist im

Abb. V.1.1: Noch einäugig: Das LBT auf dem Mount Graham.



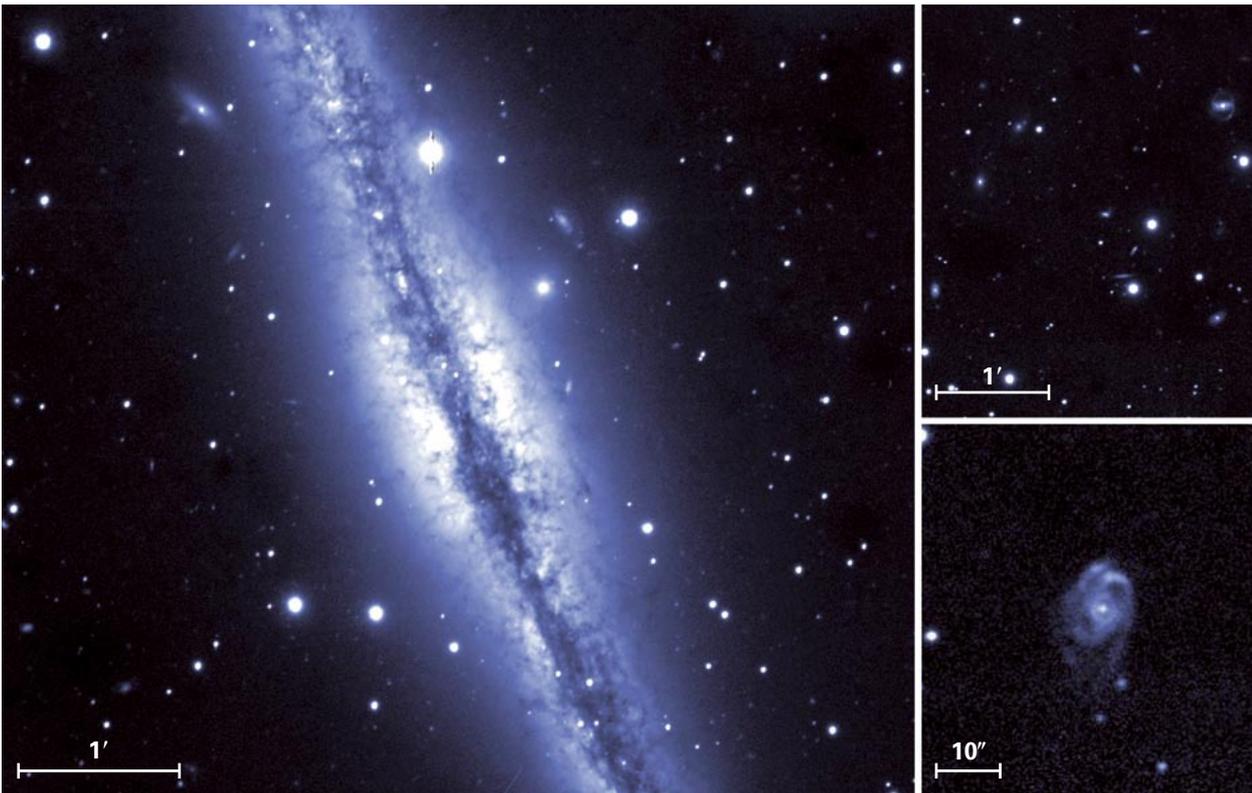


Abb. V.1.2: Die erste Aufnahme des LBT vom 12. Oktober 2005 zeigt die 24 Millionen Lichtjahre entfernte Spiralgalaxie NGC 891. Die Detailaufnahmen zeigen den zentralen Teil (*links*), ein weit hinter NGC 891 liegendes Objekt (im Gesamtbild direkt am unteren Rand in der Mitte) (*rechts unten*), sowie einen Galaxienhaufen, im Gesamtbild etwas weiter rechts (*rechts oben*).

Bau). Die LBC, deren Herzstück vier CCD-Detektoren mit jeweils 2046×4608 Pixeln bilden, haben die italienischen Partner des Projekts beigesteuert.

Mehrere Aufnahmen mit insgesamt fünf Minuten Belichtungszeit wurden zu dem in Abb. V.1.2 gezeigten Bild mit 0.8 Bogensekunden Seeing kombiniert. Deutlich ist der für Spiralgalaxien typische interstellare Staub entlang der Scheibe zu erkennen. Er bildet zusammen mit dem Gas das Material für die Entstehung neuer Sterne und Planeten.

Trotz der kurzen Belichtungszeit und auch ohne Verwendung der Adaptiven Optik zeigt das Bild eine Fülle von Details im Zentralbereich der Galaxie, aber auch in den übrigen Bereichen des mit 30 Bogenminuten sehr großen Gesichtsfeldes (siehe Ausschnittsvergrößerungen von Abb. V.1.2).

Die LBC-Kamera ist das erste einer ganzen Reihe von High-Tech-Instrumenten, mit denen das LBT ausgestattet sein wird.

Abb. V.1.3: Gespannt verfolgen die italienischen Astronomen im Kontrollraum des LBT die ersten Aufnahmen mit dem LBT.

Der deutsche Beitrag zum LBT

Unter der koordinierenden Leitung des MPIA sind fünf deutsche Institute am LBT beteiligt und bilden die LBT-Beteiligungsgesellschaft (LBTB). Neben dem MPIA sind das die Max-Planck-Institute für Extraterrestrische Physik (MPE) in Garching und für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn sowie das Astrophysikalische Institut Potsdam (AIP) und die Landessternwarte Heidelberg



(LSW, Teil des Zentrums für Astronomie, Heidelberg). Vor allem durch die Entwicklung und den Bau der Instrumente sichern sich die deutschen Partner 25 Prozent der Beobachtungszeit. Die übrige Zeit verteilt sich auf Italien (ebenfalls 25 Prozent) und eine Reihe von Instituten in den USA.

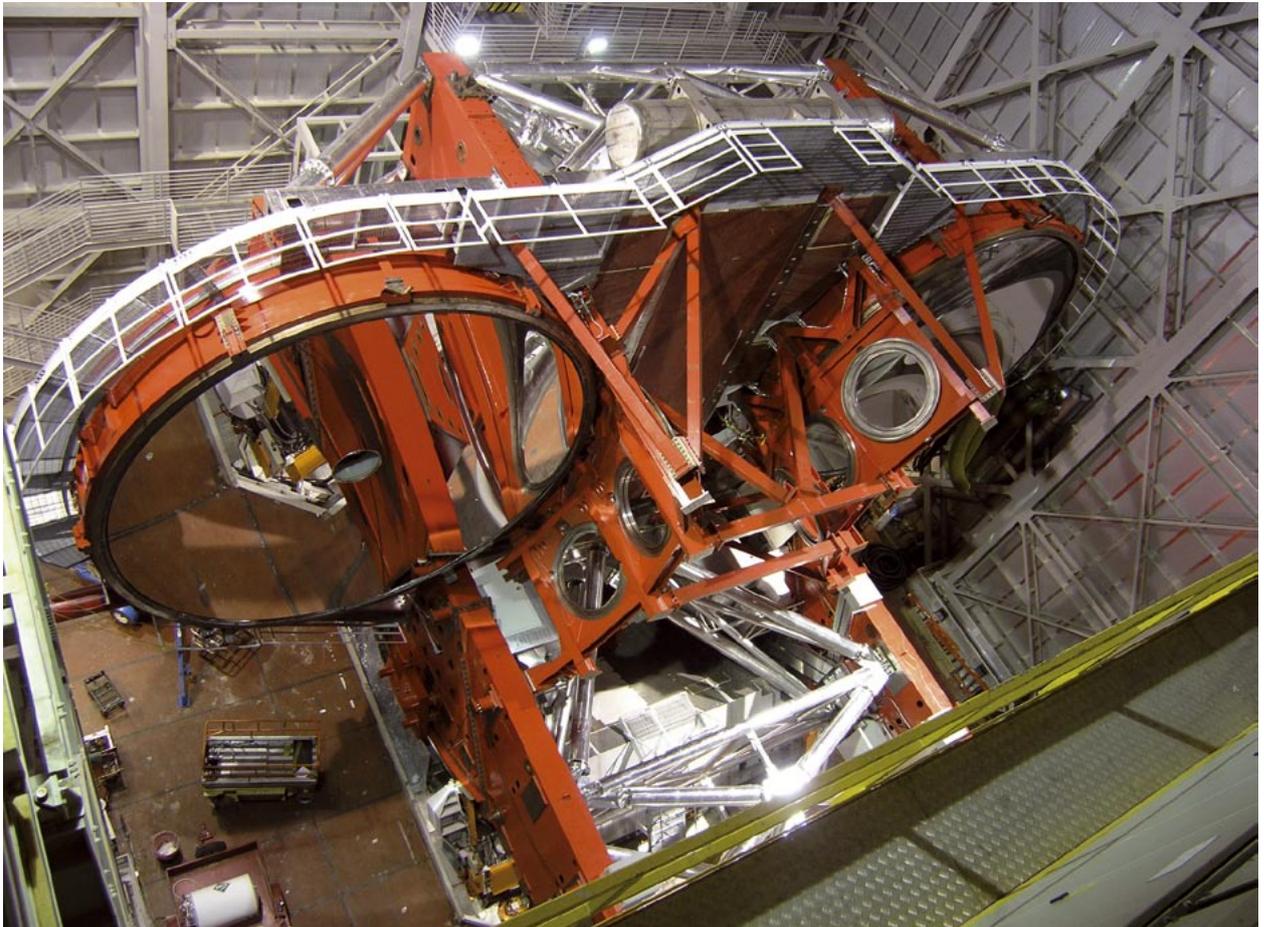
So bauen Wissenschaftler, Techniker und Elektroniker der LBT-Beteiligungsgesellschaft unter der Leitung der LSW die Kombi-Instrumente LUCIFER 1 und 2, mit denen sowohl Bilder als auch Spektren der Himmelsobjekte im nahen Infrarot gewonnen werden können (siehe Kap. IV.5). Dieses Instrument eignet sich hervorragend zur Untersuchung weit entfernter und damit sehr lichtschwacher Galaxien. PEPSI, für das das AIP hauptverantwortlich ist, ist hingegen ein hochauflösender Echelle-Spektrograph, der sich z.B. hervorragend zur Untersuchung der Struktur und Dynamik von Sternoberflächen eignet. Auch die so genannte AGW-Einheit wird unter Leitung des AIP innerhalb der LBTB gebaut. AGW steht für Acquisition, Guiding and Wavefront Sensing. Es handelt sich um Komponenten, die sowohl für die exakte Nachführung des Teleskops, als auch für die adaptive Korrektur der Spiegel sorgen.

Damit am Ende auch die volle Leistungsfähigkeit des LBT und seiner Instrumente zur Verfügung steht, wird LINC-NIRVANA gebaut (siehe Kap. IV.4). Dieses in Zusammenarbeit mit den italienischen Partnern entwickelte Instrument bildet das Herzstück des LBT, denn es wird die Lichtbündel der beiden Hauptspiegel in einer gemeinsamen Brennebene zusammenzuführen und die durch die Erdatmosphäre verursachten Bildstörungen korrigieren. Dabei werden an die optischen, elektronischen und mechanischen Komponenten höchste Ansprüche gestellt, da Teile von LINC-NIRVANA für den Einsatz im nahen Infrarot auf minus 196 Grad Celsius gekühlt werden müssen. Auf dem Gebiet dieser Kryotechnologie haben sich die Wissenschaftler und Techniker am MPIA – nicht zuletzt im Rahmen ihrer Beteiligung an großen wissenschaftlichen Weltraumobservatorien wie Iso – eine hervorragende Kompetenz erworben.

Auch wenn zur Zeit noch einige wichtige Komponenten fehlen: Die eindrucksvollen ersten Bilder belegen, dass sich die aufwändigen Planungs-, Entwicklungs- und Baumaßnahmen gelohnt haben und das 120-Millionen-Dollar-Projekt auf dem besten Wege ist, das leistungsfähigste Einzelteleskop der Erde zu werden.

Abb. V.1.4: Am 18. Januar 2006 wurde erstmals der zweite Hauptspiegel installiert (*links*).

(Thomas Henning, Klaus Jäger)



V.2 Tag der offenen Tür am MPIA

Am 25. September 2005 veranstaltete das Max-Planck-Institut für Astronomie erstmals wieder seit acht Jahren einen Tag der offenen Tür. Bei phantastischem Wetter hatten mehr als 5000 Besucher – auch dank der Unterstützung durch die örtlichen Verkehrsbetriebe und Behörden – den Weg auf den Königstuhl gefunden, um sich über die wissenschaftlichen Projekte des MPIA zu informieren. Auch für die jüngsten Besucher gab es ein informatives und unterhaltsames Programm.

»Gott sei Dank hat das Wetter mitgespielt«. Diesen und ähnliche Kommentare konnte man von den Mitarbeitern des MPIA in den Tagen nach der Veranstaltung öfters hören, denn der Andrang war so groß, dass einige Bereiche des Instituts zeitweise hoffnungslos überfüllt waren und mancher Gast sich gelegentlich in Geduld üben musste. Bei dem sonnigen Wetter konnte jedoch auch das Außengelände ausgiebig genutzt werden, was sicherlich eine wesentliche Erleichterung war. Insgesamt waren im Institut und auf dem Freigelände 35 Stationen zu besichtigen, über deren Standort und Inhalte sich die Besucher vorab durch ein ausführliches Begleitheft informieren konnten.

Bereits vor dem Eingangsbereich des MPIA stießen die Gäste auf zwei Begriffe, die bei vielen Stationen immer wieder eine wichtige Rolle spielten: LBT und Weltraumastronomie. Zwei blau gekennzeichnete kreisrunde Flächen mit je 8,4 Metern Durchmesser demonstrierten die Originalgröße der Hauptspiegel des Large Binocular Telescope, und mit einem fast 6 Meter hohen Modell der ARIANE 5 wurde eines der wichtigen Transportmittel vorgestellt, mit denen Weltraumobservatorien ins All befördert werden.

In der Experimentier- und Montagehalle, im Reinraum und im Infrarot-Weltraumlabor wurden den Besuchern ausführliche Informationen zu den Beteiligungen des MPIA an vergangenen oder zukünftigen Projekten wie ISO, HERSCHEL, dem James Webb Space Telescope und dem LBT präsentiert. Hier erwarteten die Gäste sowohl eindrucksvolle Exponate wie etwa Teile von LINC-NIRVANA, als auch wichtige Hintergrundinformationen zu den technisch-wissenschaftlichen Herausforderungen.

Ob Konstruktion und CAD, der Bau von Steuer- und Regelelektroniken, die Funktionsweise von Detektoren oder CCD-Messsystemen – die gesamte Palette an Aktivitäten wurde vorgestellt, die zur Entwicklung und zum Bau astronomischer Instrumente und zur Auswertung wissenschaftlicher Daten notwendig sind. Dazu zählte auch die feinmechanische Werkstatt, in der rechnergesteuerte CNC-Maschinen in Aktion zu sehen waren. Spezielle Vorführungen dienten dazu, den Besuchern die besonderen Herausforderungen der bodengebundenen und



Abb. V.2.1: Reger Betrieb vor dem Haupteingang des MPIA, das ein fast sechs Meter hohes Modell der ARIANE 5 zierte.

weltraumgestützten Infrarotastronomie (inklusive einer »Kälteshow«) oder die Prinzipien der Adaptiven Optik und der Interferometrie zu demonstrieren. Ein Highlight war eine Live-Schaltung in die Kuppel des 3,5-m-Teleskops auf dem Calar Alto. Auf diese Weise konnte ein echtes Großteleskop in Aktion gezeigt werden. Darüber hinaus veranschaulichten große Modelle der Calar-Alto-Teleskope und des LBT die Grundprinzipien moderner Observatorien.

Mit Hilfe von Workstations erläuterten Mitarbeiter des Instituts, wie man die digitale Bildverarbeitung zur Auswertung astronomischer Daten nutzt. Hierbei konnten die Astronomen insbesondere den jüngeren Besuchern den Unterschied zwischen wissenschaftlicher

Abb. V.2.2: Jung und alt auf Stippvisite in der Feinwerktechnik des MPIA.





Abb. V.2.3: Stefan Hanke erläutert Besuchern im LBT-Labor die Prinzipien der Interferometrie.

Bildverarbeitung und der »Verschönerung« von Bildern im heimischen Computer mittels Photoshop klarmachen. Nicht nur im Rechenzentrum wurde die Bedeutung von Hochleistungsrechnern und deren Vernetzung erläutert. An verschiedenen Stellen konnte die wichtige Rolle des Computers in der heutigen Spitzenforschung in Theorie (Simulationen) und Beobachtung (Datenanalyse) vermittelt werden.

In verschiedenen Bereichen hatten die Gäste die Möglichkeit, sich über die astronomischen Hintergründe zu informieren. So wurde zum Beispiel die Bedeutung von Vielfarben-Durchmusterungen für die Analyse der großräumigen Struktur des Universums dargestellt, und die zahlreichen attraktiven astronomischen Motive an den Wänden des Instituts waren immer wieder Auslöser für Gespräche zwischen Besuchern und Institutsmitarbeitern. Zusätzlich zur Vorstellung konkreter Projekte des MPIA in den Bereichen Stern- und Planetenentstehung oder Galaxien und Kosmologie wurden auch astronomische Grundlagen vermittelt. Neben Filmvorführungen und einer ganztägigen Vortragsreihe hatten die Besucher die Möglichkeit, anhand dreier Planetenwege etwas über unsere unmittelbare kosmische Heimat zu erfahren. Einer der Planetenwege war auch Teil des vielseitigen Kinderprogramms, in dem drinnen wie draußen spielerisch Begriffe aus Astronomie und Physik erläutert wurden. Neben einfachen physikalischen Experimenten und der Vorstellung des Sternenhimmels mittels einer Planetariumssoftware wurden auch Wasserraketen gebaut und gestartet oder einfache Sonnenbeobachtungen an Amateurteleskopen durchgeführt. Einen Einblick in die Funktionsweise eines professionellen Teleskops konnten die Besucher schließlich am 70-cm-Teleskop in der Ostkuppel des Elsässer-Labors gewinnen.

Im Elsässer-Labor bestand außerdem die Gelegenheit, sich über die Arbeit der Redaktion der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« zu informieren. Darüber hinaus konnten sich Lesehungrige mit astronomischen Büchern und Zeitschriften versorgen oder im Gespräch mit Mitarbeitern des Instituts mehr darüber erfahren, welche Ausbildungsplätze und Praktika am MPIA angeboten werden und welchen Weg man einschlagen muss, um

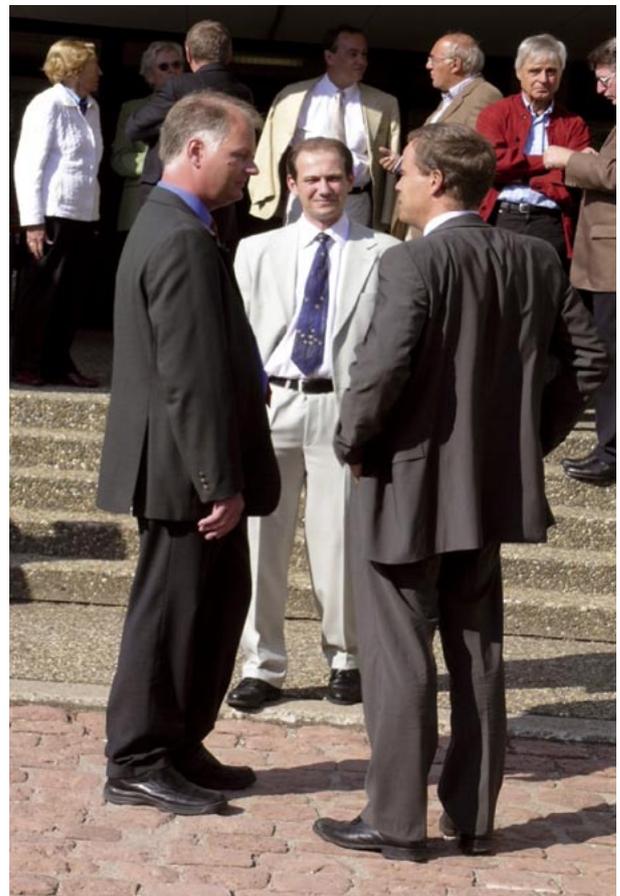
Astronom zu werden. Für viele Besucher mag es überraschend gewesen sein, dass das MPIA eben nicht nur eine Ausbildungsstätte für Physik-Studenten ist, sondern auch Lehrstellen für handwerkliche, technische und verwaltungsnahen Bereiche anbietet. Bei einem Astro-Quiz konnten die Besucher schließlich ihr astronomisches Wissen unter Beweis stellen und attraktive Preise gewinnen. Allein daran haben sich rund 400 Besucher beteiligt.

Doch nicht nur ihren geistigen Hunger konnten die Besucher befriedigen. Auch für das leibliche Wohl unserer Gäste wurde mit reichlich Würstchen, Kuchen und Getränken gesorgt.

Der Tag der offenen Tür hatte schon im Vorfeld gut begonnen. Zwei Tage zuvor konnten wir in einer Sonderführung 30 geladenen Gästen aus dem gesellschaftlichen und politischen Umfeld einige Höhepunkte präsentieren. Diese Gäste waren ebenso begeistert wie die Besucher der Hauptveranstaltung. Nach diesen guten Erfahrungen ist man sich deshalb im Institut einig, dass – trotz des großen Aufwandes – bis zum nächsten Tag der offenen Tür nicht wieder acht Jahre vergehen sollten.

(Klaus Jäger)

Abb. V.2.4: Begrüßung prominenter Gäste zur Sonderführung vor dem Haupteingang des MPIA durch Mathias Voss und Klaus Jäger. *Rechts:* Eckart Würzner, Umweltbürgermeister von Heidelberg.



V.3 Weitere Ereignisse und Aktivitäten

Der Spanische Prinz auf dem Calar Alto

Am 28. September 1979 war das damals bereits mit dem 1.2-m- und 2.2-m-Teleskop ausgestattete Calar-Alto-Observatorium offiziell durch den spanischen König Juan Carlos I. eröffnet worden. Anlässlich des 25-jährigen Bestehens des Deutsch-Spanischen Astronomischen Zentrums (DSAZ/CAHA), vor allem aber auch in Würdigung einer neuen vertraglichen Kooperation zwischen den spanischen und deutschen Partnern, hatte das Observatorium am 29. Juni 2005 erneut hohen Besuch. Diesmal machte sich der Sohn des spanischen Königs, der Prinz von Asturien, Felipe de Borbon, auf den Weg zum 2168 m hohen Gipfel der Sierra de Los Filabres.

Bei der Zeremonie in der Kuppel des 3,5-m-Teleskops überraschte Prinz Felipe nicht nur die Gäste, sondern auch seine im Vorfeld streng auf eine korrekte Einhaltung des Protokolls bedachten Mitarbeiter mit einer so nicht vorgesehenen abschließenden Rede. Der spanische Kronprinz begrüßte die Gäste und die Mitarbeiter des Observatoriums und bekräftigte vor

Abb. V.3.1: Der Prinz von Asturien (*links*) bei seinem Besuch auf dem Calar Alto, begrüßt vom Alterspräsidenten der MPG, Hans Zacher.

allem die Unterstützung der Forschung durch das spanische Königshaus. Besonders drückte Prinz Felipe seine Verbundenheit zur Astronomie aus. Dies war offensichtlich nicht nur eine Höflichkeitsformel – vielmehr zeigte sich der Prinz in Sachen Astronomie gut informiert, er befasst sich offenbar auch privat gern mit der Himmelsforschung.

Im Vordergrund der Veranstaltung stand die neue vertragliche Vereinbarung zwischen dem Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) und der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) zum weiteren Betrieb des Observatoriums. Auf einer 50-Prozent-Basis teilen sich die beiden Institutionen Betrieb und Nutzung des CAHA auch für die nächsten Jahre. Damit ist eines der größten Projekte der wissenschaftlichen Zusammenarbeit zwischen Deutschland und Spanien entstanden.

An der feierlichen Veranstaltung nahmen außer dem Prinzen unter anderen der Präsident der CSIC, Carlos Martinez Alonso, MPG-Alterspräsident Hans Zacher, Vertreter der lokalen Politik und die Direktoren des IAA, des MPIA und des Calar Alto, Jose Carlos del Toro, Thomas Henning und Roland Gredel teil. Das Ereignis stieß in Spanien auf große Beachtung bei den Medien, was sich auch in der großen Anzahl der Journalisten vor Ort äußerte.



External Retreats und Internal Symposium

Am 25. April trafen sich etwa 25 leitende Mitarbeiter des MPIA auf Schloss Hirschhorn zu einem zweitägigen »External Retreat«, einer Art Klausurtagung.

Die Wahl eines Ortes außerhalb des MPIA war für dieses Vorhaben mit Bedacht erfolgt, um eine vertiefte Diskussion über wichtige Angelegenheiten des Instituts einmal ohne Ablenkungen durch das Alltagsgeschäft durchführen zu können. In einem straffen zweitägigen Programm wurden wissenschaftliche Projekte und Ziele, die Lehre, instrumentelle Entwicklungen, aber auch organisatorische Strukturen thematisiert. Die verschiedenen Aspekte der Institutsarbeit wurden zunächst in einer Art Statusbericht beleuchtet. Ziel der intensiven Diskussionen war dann, Strategien für die unmittelbare, aber auch für die langfristige Zukunft zu entwickeln und Entscheidungen auf den Weg zu bringen. Am Ende brachte die produktive, für alle Teilnehmer sehr nützliche Veranstaltung eine detaillierte »Action item«-Liste hervor.

Abb. V.3.2: Eine gelungene Veranstaltung war das Interne Symposium, zu dem sich aber auch Gäste aus den anderen astronomischen Instituten Heidelbergs am MPIA einfanden.

Eine solche Klausurtagung hat den Vorteil, dass sich die Beteiligten aus den unterschiedlichen Bereichen gegenseitig auf dem Laufenden halten können. Zumindest hinsichtlich dieses informativen Charakters verfolgte das am 8. und 9. Dezember im Hörsaal des MPIA abgehaltene »Internal Symposium« das gleiche Ziel. In etwa 30 Vorträgen stellten Doktoranden, Postdocs und Staff-Mitglieder ihre wissenschaftlichen Projekte vor. Es war ein buntes Programm – im wahrsten Sinne des Wortes, denn es wurde von Anfang an bewusst darauf geachtet, keine Themenblöcke zu bilden. Und so war die gesamte Bandbreite der Hauptarbeitsgebiete des MPIA – Stern- und Planetenentstehung, Galaxien und Kosmologie, Instrumentierung, Theorie und Beobachtung – jederzeit präsent.

Die Bezeichnung »intern« bezog sich im Übrigen nur auf die Vortragenden. Das Symposium war durchaus offen für Besucher aus den anderen astronomischen Instituten Heidelbergs und wurde dementsprechend auch angekündigt. Und so nahmen auch einige Kollegen aus den Nachbarinstituten die Gelegenheit wahr, an dieser Veranstaltung teilzunehmen.



Sitzung des Kuratoriums

Am 15. September fand im Multifunktionsraum des Instituts die alljährliche Sitzung des Kuratoriums des MPIA statt. Diesmal konnten wir neben den Kuratoriumsmitgliedern Hermann-Friedrich Wagner (Vorsitz), Klaus Tschira, Ranga Yogeshwar und Mathias Schenek (i.V. von Wolfgang Fröhlich) auch den stellvertretenden Generalsekretär der MPG, Hardo Braun, und den MPG-Institutsbetreuer Christoph Ettl begrüßen.

Das Kuratorium hat unter anderem die Aufgabe, dem MPIA unterstützend zur Seite zu stehen, wenn es um Verbindungen oder den Kontakt zur Öffentlichkeit und Politik, zum gesellschaftlichen Umfeld oder zu fördernden Institutionen geht. Es hat beratende Funktion und kann sich auch direkt mit der Leitung der MPG in Verbindung setzen.

Auch diesmal wurde das Kuratorium in mehreren Vorträgen über den Stand aktueller Forschungs- und Instrumentierungsprojekte informiert und es wurden ihm zukünftige Perspektiven vorgestellt. Es wurden auch Konzepte zur Diskussion gestellt, die eine verstärkte Außenwirkung des Instituts in der Öffentlichkeit zum Ziel haben. Seitens der MPG wurde das Kuratorium über die Haushaltslage informiert.

Nach anregenden Diskussionen stellte der Vorsitzende, Herr Wagner, zusammenfassend fest, dass das Kuratorium die vorgestellten neuen Ideen zur Zukunft des MPIA unterstützen wird und den Bericht zur Haushaltslage positiv beurteilt. Das Kuratorium begrüßte insbesondere auch die erfolgreiche Umsetzung der Baumaßnahmen zur Erweiterung des MPIA. Das Kuratorium empfahl zudem, dass sich das MPIA in die Diskussion um ein Extremely Large Telescope (ELT) stärker einbringen sollte. Außerdem sollte es die genauen logistischen Randbedingungen für sein weiteres Engagement im Zusammenhang mit der Errichtung einer Beobachtungsstation in der Antarktis prüfen. Weiterhin wird man die Bestrebungen in Sachen Öffentlichkeitsarbeit unterstützen – insbesondere würde man eine Ausweitung der vorgestellten Konzepte begrüßen.

So wünscht sich das Kuratorium in Bezug auf das bereits laufende und als sehr erfolgreich beurteilte Projekt »Wissenschaft in die Schulen!«, das sich zunächst auf den Physikunterricht in der Oberstufe bezieht, eine Ausweitung auf jüngere Zielgruppen (Mittelstufe). Hinsichtlich des »Virtual Astro Lab«, der Idee eines öffentlichen Raumes zur multimedialen Präsentation von Wissenschaft, würde das Kuratorium eine Ausweitung des Konzeptes in Richtung anderer Forschungszweige sehr begrüßen.

Neues zur Theoriegruppe in der Abteilung Galaxien und Kosmologie

Die Theoriegruppe in der von Hans-Walter Rix geleiteten Abteilung Galaxien und Kosmologie beschäftigt sich auf der Basis analytischer und semi-analytischer Modelle, N-Körper-Simulationen und hydrodynamischer Simulationen mit Fragen der Entstehung und Entwicklung von Galaxien und der Deutung ihrer beobachteten Eigenschaften. Seit Anfang dieses Jahres wird die Arbeitsgruppe von Rachel Somerville geführt. Sie arbeitete zuvor am Space Telescope Science Institute in Baltimore und an den Universitäten in Michigan, Cambridge (UK) und Jerusalem. Daneben leitet in enger Zusammenarbeit mit Frau Somerville seit Herbst 2005 Frank C. van den Bosch eine von der MPG geförderte, unabhängige Nachwuchsgruppe. Frank van den Bosch war zuvor in Leiden, Washington, am MPA in Garching und an der ETH in Zürich tätig.

Zu den wichtigen Themen der Theoriegruppe zählt der Vergleich der theoretisch vorhergesagten Morphologie, Strukturparameter und Merger-Raten von Galaxien mit den tatsächlichen Beobachtungen aus tiefen Surveys wie etwa GOODS oder GEMS. Dies stellt eine wichtige Verknüpfung zu den Beobachtungen der Abteilung Galaxien und Kosmologie dar, weil dort auch die Daten tiefer Surveys untersucht werden. Ähnliches gilt für Fragestellungen zur Dunklen Materie oder der Co-Evolution von Schwarzen Löchern und Galaxien.

(Klaus Jäger)

V.4 International Max Planck Research School in Heidelberg

Seit dem Jahr 2000 baut die Max-Planck-Gesellschaft zusammen mit Universitäten überall in Deutschland ein Netzwerk von Graduiertenschulen zur Förderung besonders begabter deutscher und ausländischer Nachwuchswissenschaftler auf. In den »International Max Planck Research Schools« (IMPRS) finden Studenten nach ihrem ersten berufsqualifizierenden Abschluss eine strukturierte wissenschaftliche Ausbildung, die, kombiniert mit hervorragenden Forschungsmöglichkeiten, zur Promotion führt. Im Jahr 2005 wurde mit dem Aufbau der »IMPRS for Astronomy and Cosmic Physics at the University of Heidelberg« begonnen. Die Koordination hat das MPA übernommen.

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ist von elementarer Bedeutung für die Zukunft von Wissenschaft, Forschung und Innovation in Deutschland. Die Max-Planck-Gesellschaft baut deshalb, gemeinsam mit Universitäten in Deutschland ein Netzwerk von Graduiertenschulen auf. Im Jahr 2005 gab es 37 dieser Einrichtungen, verteilt auf alle Disziplinen, an denen im Wintersemester 2004/2005 insgesamt etwa 1500 Doktoranden, davon 40 % Frauen, eingeschrieben waren.

Abb. V.4.1: Das IMPRS-Poster, das an zahlreiche Institute und Universitäten verschickt wurde.

International Max Planck Research School (IMPRS) for
Astronomy & Cosmic Physics at the University of Heidelberg

International PhD program 2006 in Astronomy and Astrophysics

IMPRS Heidelberg offers several fellowships for a three-year doctoral program on a wide range of up-to-date research topics in astronomy and astrophysics. The school is located in Heidelberg (Germany), one of the most beautiful old university towns in Europe.

IMPRS Heidelberg consists of the following institutes:

- Max Planck Institute for Astronomy
- Max Planck Institute for Nuclear Physics
- Astronomisches Rechen-Institut
- Institute for Theoretical Astrophysics
- Landessternwarte Heidelberg

We provide excellent research and training facilities to prepare for a successful career in astronomy or space science. We invite highly qualified and motivated national and international students to apply.

Deadline is December 15, 2005

For further information: <http://www.mpa.de/imprs-hd>
imprs-hd@mpia.de

IMPRS for Astronomy and Cosmic Physics, Max Planck Institute for Astronomy, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg, Germany



Abb. V.4.2: Hans-Walter Rix bei der Einführungsvorlesung für die IMPRS-Studenten.

Die IMPRS for Astronomy and Cosmic Physics at the University of Heidelberg (kurz IMPRS-HD) ist eine gemeinsame Initiative des MPIA, des MPI für Kernphysik und der drei Institute des Zentrums für Astronomie an der Universität Heidelberg (Institut für theoretische Astrophysik, Astronomisches Rechen-Institut, Landessternwarte). Wissenschaftlicher Koordinator der IMPRS-HD ist Christian Fendt am MPIA, die Sprecher sind Hans-Walter Rix (MPIA) und Wolfgang Duschl (Institut für Theoretische Astrophysik).

Ende des Jahres 2004 wurden erstmals Stipendien für die Teilnahme an den IMPRS international ausgeschrieben, in Verbindung mit einer breit angelegten Kampagne zur Bekanntmachung dieser neuen Möglichkeit unter den Studenten in deren Heimatländern. So wurden beispielsweise alle Mitglieder der American Astronomical Society per Email benachrichtigt und es wurden Poster verschickt: 350 Exemplare gingen weltweit an alle astronomischen Institute, hinzu kamen alle Physikalischen Institute in Deutschland. Weiterhin wurde eine Homepage eingerichtet, in der alle wichtigen Informationen zu finden sind und auf der sich Bewerber anmelden können (www.mpia.de/imprs-hd).

Aus den eingehenden Bewerbungen wählen die Wissenschaftler der beteiligten Institute ihre Doktoranden nach Qualifikation und Eignung für das jeweilige Forschungsgebiet aus. Für das Semester 2005/2006 bewarben sich bei der IMPRS-HD bereits mehr als 80 Kandidaten, unter denen 17 hochqualifizierte Studenten nach einem Besuch in Heidelberg und einem Aufnahmegespräch zugelassen werden konnten. Wenn sich die Heidelberger IMPRS erst einmal herumgesprochen hat, wird es weit mehr Bewerber geben. Für das Semester 2006/2007 waren 2005 bereits mehr als hundert Bewerbungen eingegangen.

Ein Ziel der IMPRS ist es, ausländischen Studenten die Möglichkeit zugeben, sich mit der deutschen Forschungslandschaft vertraut zu machen. Dies ebnet zum einen den Weg für eine spätere Tätigkeit an deutschen Forschungsinstituten, zum anderen entsteht so ein weltweites Netz von in Deutschland ausgebildeten Astronomen und Astrophysikern. Beides trägt langfristig –

so die Hoffnung – zur Stärkung des Wissenschaftsstandorts Deutschland bei.

Ein Teil der begehrten Plätze wird mit herausragenden deutschen Studenten besetzt. Im Jahr 2005 betrug der Ausländeranteil etwa 80%. Als positiver Nebeneffekt der internationalen Rekrutierung von IMPRS-Doktoranden ist der relativ hohe Frauenanteil von fast 50% zu nennen.

Das Ausbildungsprogramm der IMPRS ist ganz bewusst stärker strukturiert als das in Deutschland übliche freie Promotionsstudium. So müssen die Studenten den Vorlesungen, Seminaren und Übungen eines strukturierten Lehrplans folgen und Prüfungen ablegen. Die ersten Erfahrungen zeigen, dass die IMPRS-Teilnehmer diese strukturierte Arbeitsweise durchaus schätzen. Zum einen erhalten sie in den durchweg englischsprachigen Vorlesungen eine erstklassige Ausbildung, zum anderen bildet sich in der Gruppe ein starker sozialer Zusammenhalt aus, was sich bereits zum Beispiel in gemeinsamen Reisen und privaten Veranstaltungen ausgedrückt hat. Zusätzlich zum fachspezifischen Lehrprogramm bietet die IMPRS auch eine Ausbildung in Schlüsselqualifikationen (soft skills), bei denen externe Trainer zum Beispiel in Präsentationstechniken und Bewerbungsstrategien schulen.

Insgesamt sollen die IMPRS-Studenten eine fundierte Ausbildung in Astronomie und Astrophysik erhalten, an einem der Heidelberger Institute promovieren, und sich damit als international konkurrenzfähige Postdoc-Kandidaten qualifizieren. Zur finanziellen Unterstützung gehört ein Doktorandenstipendium sowie ein Arbeitsplatz am Institut. Zusätzlich sind finanzielle Mittel für die Teilnahme an Sommerschulen und internationalen Tagungen vorhanden. Das Regelstudium ist auf fünf Semester angesetzt, die Promotion sollte in durchschnittlich drei Jahren erreicht sein. Mit der Promotionsurkunde der Universität Heidelberg verleiht die IMPRS am Ende ein Zertifikat über die erfolgreiche Teilnahme am zusätzlichen IMPRS-Programm.

Heidelberg bietet für diese IMPRS eine sehr geeignete Umgebung, denn die beteiligten Institute decken fast alle Bereiche moderner astrophysikalischer Forschung ab. Tatsächlich ist die Universität Heidelberg, gemessen an den jährlich vergebenen Promotionen, die größte Universität Deutschlands im Bereich Astronomie/Astrophysik. Mehr als 30 Dozenten und weitere 200 wissenschaftliche Mitarbeiter sind an den Heidelberger Instituten angestellt. Das MPIA trägt insbesondere zu folgenden Bereichen bei: Planeten- und Sternentstehung, extrasolare Planeten, stellare Objekte, Entwicklung und Dynamik von Galaxien, aktive galaktische Kerne, Gravitationslinsen, Kosmologie, Strukturbildung, Dunkle Materie sowie die Entwicklung erdgebundener und weltraumgestützter Beobachtungsinstrumente.

Das IMPRS-Programm wurde von der MPG zunächst auf sechs Jahre befristet. Die Heidelberger Astronomen hoffen aber auf eine Verlängerung, denn es hat sich gezeigt, dass auf diese Weise hervorragende Studenten zu uns kommen.

(Christian Fendt)

V.5 Ringberg-Tagung »Entfernte Galaxienhaufen«

Galaxienhaufen sind die massereichsten gravitativ gebundenen Gebilde im Universum, die wir kennen. Damit spielen sie eine Schlüsselrolle in unserem Bemühen, die Bildung großräumiger Strukturen sowie die Entwicklung von Galaxien zu verstehen. Wenn wir immer entferntere Objekte beobachten, schauen wir auch zurück in der Zeit, und somit ist die Untersuchung der am weitesten entfernten Haufen für das Verständnis ihrer Entwicklung besonders wichtig. Hermann-Josef Röser vom MPIA und Hans Böhringer vom MPI für extraterrestrische Physik organisierten auf Schloss Ringberg, der Tagungsstätte der Max-Planck-Gesellschaft, einen speziellen Workshop zum Thema »Entfernte Galaxienhaufen«. Fast 60 Wissenschaftler aus Europa, den USA und Kanada fanden sich vom 24. bis 28. Oktober 2005 auf Ringberg ein, um in zehn Übersichts- und 35 Kurzvorträgen ihre Arbeiten zu diskutieren, in denen Galaxienhaufen über alle Wellenlängenbereiche hinweg sowohl in der Theorie als auch durch Beobachtung erforscht wurden. Am Ende fassten zwei Redner die Ergebnisse dieses anregenden Workshops zusammen.

Der Workshop begann mit einem Übersichtsvortrag von Simon White (MPI für Astrophysik, Garching), der die Entwicklung von Galaxienhaufen in einen kosmologischen Kontext stellte. Anschließend diskutierte Alan Dressler (Carnegie Observatories) die Haufen als Laboratorien zur Untersuchung der Entwicklung

von Galaxien. Michael Balogh (Waterloo, Kanada) und Andrea Biviano (Triest) gaben einen Überblick über den Einfluss der Umgebung von Galaxien auf deren Entwicklung sowie die aus optischen Beobachtungen abgeleitete Struktur der Haufen.

Optisch sichtbare Galaxien sind nicht die einzigen Bestandteile von Galaxienhaufen. Der Raum zwischen ihnen ist erfüllt von Plasma, das mehrere zehn bis hundert Millionen Grad heiß ist und deshalb Röntgenstrahlung aussendet.

Untersuchungen dieses Plasmas und seiner zeitlichen Entwicklung liefern ebenfalls wichtige Erkenntnisse über die kosmologische Entwicklung von Haufen. So wurde das Thema der Haufenstruktur von Monique Arnaud (Paris) fortgeführt, indem sie selbige auf der Grundlage von Untersuchungen dieses heißen Plasmas im Röntgenbereich diskutierte. Durch den Sunyaev-Seldovic-Effekt hinterlässt das Plasma auch seinen Abdruck in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Daher ist dieser SZ-Effekt von Bedeutung beim Auffinden von Haufen anhand der von ihnen verursachten Störung im glatten Mikrowellenhintergrund. Durchmusterungen im Millimeter-Wellenlängenbereich nach dem SZ-Effekt sollten in Bälde zahlreiche entfernte Haufen ausfindig machen, da der Effekt im Wesentlichen unabhängig von der Entfernung des Haufens ist. Joe Mohr (Illinois) machte uns mit den neuesten Untersuchungen der Haufenstruktur auf der Grundlage des SZ-Effekts bekannt. Ein Überblick über die Physik des heißen Intrahaufen-Mediums von Stefano Borgani (Triest) beendete den ersten Teil des Workshops.

Abb. V.5.1: Das milde Herbstwetter erlaubte auch Diskussionen auf der Terrasse von Schloss Ringberg.





Abb. V.5.2: Einige der Teilnehmer erklommen den Gipfel des Wallbergs und genossen das herrliche Alpenpanorama.

Traditionsgemäß fand unser Workshop-Ausflug am Mittwoch Nachmittag statt. Die meisten Teilnehmer wanderten, joggen oder fuhren mit der Seilbahn auf den Wallberg, wo wir einen fantastischen Blick über die Alpen genossen.

Der zweite Teil des Workshops war der Suche nach entfernten Galaxienhaufen in verschiedenen Spektralbereichen und den theoretischen Modellrechnungen gewidmet. Howard Yee (Toronto) gab einen Überblick über die optische Suche, dem herkömmlichen Wellenlängenbereich beim Auffinden von Haufen. Doch seitdem auch empfindliche Röntgen-Weltraumobservatorien zur Verfügung stehen, erlangte die Suche in diesem Spektralbereich eine ebenso große Bedeutung, wie Chris Mullis (Michigan) in seinem Übersichtsvortrag berichtete. Er hatte gerade erst den Rekordhalter mit der höchsten Rotverschiebung entdeckt, einen Haufen bei $z = 1.4$. Wir sehen diesen Haufen so wie er war, als das Universum nur ein Drittel so alt war wie heute! Doch dieser Rekord sollte nicht lange halten: Noch während des Workshops berichtete Adam Stanford von einem Kandidaten, der als Gegenstück einer Röntgenquelle bei einer Rotverschiebung von 1.45 gefunden worden war, und Peter Eisenhardt vermeldete einen beim SWIRE-Survey mit dem Infrarot-Weltraumteleskop SPITZER bei $z = 1.41$ entdeckten Haufen. Wie bereits erwähnt, gewinnen Durchmusterungen auf der Grundlage des Sunyaev-Zeldovic-Effekts zunehmend an Bedeutung. Clem Pryke (Chicago) informierte uns hier über den neuesten Stand der Dinge und die entsprechenden Erwartungen. Die letzte Sitzung am Freitag Morgen war der Theorie und Modellrechnungen gewidmet, bevor

Abb. V.5.3: Gruppenphoto vor Schloss Ringberg bei strahlendem Sonnenschein.



Bianca Poggianti (Padua) und Hans Böhringer (MPE Garching) die Vorträge und Ergebnisse, die wir im Laufe dieser Woche gehört hatten, in ansprechender Weise zusammenfassten.

Neben Hermann-Josef Röser und Hans Böhringer gehörten Frank Bertoldi (Universität Bonn), Stefano Borgani (Universität Triest), Patrick Henry (University of Hawaii), Piero Rosati (Eso) und Howard Yee (University of Toronto) dem wissenschaftlichen Organisationskomitee an. Auf unserer Webseite (www.mpia.de/ringberg-clusters) findet man eine Liste aller Teilnehmer, sämtliche Vorträge in elektronischer Form sowie eine Fotogalerie mit Eindrücken vom Workshop und einer wunderschönen Herbstwoche im Kreuther Tal.

(Hermann-Josef Röser)

V.6 Die Wilhelm und Else Heraeus-Physikschule »Extrasolar Planetary Systems«

Vom 17. bis 21. Oktober 2005 fand im Physikzentrum Bad Honnef eine Wilhelm und Else Heraeus-Physikschule zum Thema extrasolare Planetensysteme statt. Die Veranstaltung stieß auf reges Interesse: Insgesamt waren 64 Teilnehmer aus 13 Ländern angereist. Das ist um so erstaunlicher, als es sich fast ausschließlich um Doktoranden handelte. Dieser rege Zuspruch verdeutlicht nicht nur das Interesse an diesem spannenden Forschungsgebiet, sondern belegt auch die wachsende internationale Bedeutung der Forschung in Deutschland. Organisiert hatten diese Heraeus-Physikschule Sebastian Wolf und Thomas Henning (beide MPIA) sowie Willy Kley (Universität Tübingen) und Joachim Wambsganss (Astronomisches Recheninstitut und Universität Heidelberg).

Die Bildung und Entwicklung von Planetensystemen und ihre Beziehung zur Entstehung von Leben gehören zu den faszinierendsten Problemen der modernen Astrophysik. Seit der Entdeckung des ersten extrasolaren Planeten vor zehn Jahren befindet sich dieses Arbeitsfeld in einer stürmischen Entwicklungsphase. Heute sind bereits mehr als 180 extrasolare Planetenkandidaten bekannt, wobei der kleinste Vertreter nur noch rund sechsmal massereicher ist als die Erde. Diese Themen bilden einen Schwerpunkt der Forschung am MPIA.

Vermutlich weil die gegenwärtigen Entdeckungsstrategien mit Auswahleffekten behaftet sind, unterscheiden

sich die neu entdeckten »Welten« zum Teil dramatisch von den Planeten in unserem Sonnensystem. So gibt es jupiterartige Planeten, die auf sehr engen Bahnen ihren Zentralsterne umkreisen. Man nennt sie heiße Jupiter. Es wurden auch Objekte gefunden, die auf Bahnen mit ungewöhnlich starken Exzentrizitäten bis zu $e = 0.9$ laufen. In unserem Sonnensystem besitzt die Merkurbahn mit $e = 0.2$ die größte Exzentrizität. Diese Entdeckungen zeigen, dass Theorien zur Entstehung von Planetensystemen, die an unserem eigenen Sonnensystem geeicht wurden, revidiert werden müssen. Neue Forschungsergebnisse auf diesem Feld legen nahe, dass die Wechselwirkung zwischen den Planeten einerseits und zwischen den Planeten und der protoplanetaren Scheibe andererseits entscheidenden Einfluss auf die sich entwickelnde Struktur der Planetensysteme haben.

Neben der Entdeckung extrasolarer Planeten gelang bereits auch die räumlich hochaufgelöste Abbildung protoplanetarer Scheiben – der Äquivalente des Sonnennebels. Mit Hilfe moderner astronomischer Beobachtungsverfahren, wie der Adaptiven Optik und der Infrarot- und Millimeterinterferometrie, sind wir heute in der Lage, die physikalische und chemische Struktur dieser Scheiben und damit den Entstehungsort von Planetensystemen aufzuklären.

Abb. V.6.1: Ein würdiger Tagungsort: Das historische Gebäude des Physikzentrums Bad Honnef.





Abb. V.6.2: Gruppenphoto von einigen der Teilnehmer vor dem Portal des Physikzentrums Bad Honnef.

Die »klassische« Entdeckungsmethode extrasolarer Planeten ist das Radialgeschwindigkeitsverfahren. Doch mittlerweile sind auch andere Methoden erfolgreich, wie das Transitverfahren und der Mikro-Gravitationslinseneffekt. Eines der Fernziele besteht aber darin, die Atmosphären dieser Himmelskörper spektroskopisch zu untersuchen und vielleicht Hinweise für Leben auf erdähnlichen Planeten zu finden. Dieses Forschungsziel ist Bestandteil der Instrumentierungsprogramme für die Klasse der bereits arbeitenden 10-m-Teleskope und für das Extremely Large Telescope sowie die Cornerstone-Missionen der Europäischen Raumfahrtorganisation ESA.

Diese Aktivitäten machen es notwendig, eine neue Generation von Wissenschaftlern umfassend auf dieses Thema vorzubereiten. Das war das Ziel der Veranstaltung im Physikzentrum Bad Honnef. Die 64 Teilnehmer kamen nicht nur aus Deutschland, sondern vorwiegend aus West- und Osteuropa, aber auch Studenten aus Argentinien und Australien waren angereist.

Insgesamt 17 Astrophysiker, Geophysiker, Experimentalphysiker und Mineralogen aus deutschen Instituten gaben einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand und einen Ausblick auf die voraussichtliche zukünftige Entwicklung. Vom MPIA gab Thomas Henning einen einführenden Vortrag über die noch junge Historie der Erforschung extrasolarer Planeten und erklärte später die heute diskutierten Szenarien der Planetenentstehung. Hubert Klahr erläuterte die numerischen Methoden zur Modellierung der Planetenentstehung, während Martin Kürster die Möglichkeiten der Radialgeschwindigkeitsmethode zum Nachweis der unsichtbaren Sternbegleiter erörterte. Sebastian Wolf berichtete schließlich über bisherige Ergebnisse bei der Beobachtung und Modellierung

protoplanetarer Scheiben. Alle Vorträge überdeckten Theorie und Beobachtung sowie Historie und Zukunft. Auch die interdisziplinär angelegte Astrobiologie kam zum Zuge.

Ein besonderer Vorteil für die Teilnehmer dieser Physikschule bestand darin, nicht nur während der Vorlesungen Fragen stellen und Diskussionen anregen zu können, sondern die Vortragenden die gesamte Woche über bis in die späten Abendstunden hinein für sich »verfügbar« zu haben. Das bot reichlich Zeit für wissenschaftliche und informelle Gespräche. Eine E-mail, die uns wenige Tage nach Abschluss der Physikschule erreichte, fasst die allgemeine Stimmung und positive Einschätzung der Teilnehmer beispielhaft zusammen: »Many thanks for this very fruitful workshop! I've really enjoyed the contents and the discussions with the speakers. B. O. Demory (Observatoire de Geneve)«.

Alle Vorlesungen sind unter www.mpia.de/EXTRA2005 im Internet abrufbar.

(Sebastian Wolf)

Abb. V.6.3: Die Heraeus-Physikschüler bei einem der Vorträge.



V.7 Zwei neue Nachwuchsgruppen am Institut

Im Berichtsjahr nahm unter der Leitung von Henrik Beuther die dritte Emmy-Noether-Gruppe am MPIA ihre Arbeit auf; und Frank van den Bosch begann mit dem Aufbau einer Theoriegruppe im Rahmen des Nachwuchsgruppen-Programms der Max-Planck-Gesellschaft.

Henrik Beuther: Die Entstehung massereicher Sterne

In ihrem Emmy-Noether-Programm fördert die Deutsche Forschungsgemeinschaft junge, promovierte Nachwuchswissenschaftler und gibt ihnen die Möglichkeit, eigene Nachwuchsgruppen aufzubauen. Nachdem bereits im Jahr 2004 zwei derartige Gruppen unter der Leitung von Sebastian Wolf (Protoplanetare Scheiben) und Coryn Bailer-Jones (Entstehung und Eigenschaften substellarer Objekte) ihre Arbeit aufgenommen hatten, startete im September 2005 unter der Leitung von Henrik Beuther die dritte Emmy-Noether-Gruppe am MPIA.

Henrik Beuther studierte an der Universität Köln Physik und promovierte am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Anschließend arbeitete er dort

für ein Jahr als Postdoc, sowie einige Jahre am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (Cambridge, USA). Seine Arbeitsgruppe am MPIA wird vorwiegend die Frühphasen der Entstehung massereicher Sterne studieren. Hier sind noch viele Fragen offen. Beispielsweise ist immer noch unklar, ob die massereichsten Sterne durch ähnliche Akkretionsvorgänge wie massearme Sterne entstehen, oder ob dabei andere Prozesse, wie das Verschmelzen von Protosternen, wichtig sind. Henrik Beuther will mit seiner Gruppe das Problem der Entstehung massereicher Sterne aus verschiedenen Richtungen angehen und sein Augenmerk auf folgende Punkte richten: Welche Eigenschaften haben massereiche Akkretionsscheiben, welchen Einfluss hat die anfängliche Fragmentation massereicher Sternentstehungsregionen was für eine Staub- und Gaschemie spielt sich in den Sternentstehungsgebieten ab, und welche Rolle spielen Ausfluss und Einfall von Gas?

Da massereiche Sterne in Sternhaufen entstehen und diese meist weit entfernt sind, ist für ihre Beobachtung eine hohe räumliche Auflösung erforderlich. Gleichzeitig emittieren diese Gebiete intensive Strahlung im Millimeter- und Submillimeterbereich. Dementsprechend will Henrik Beuther sich auf interferometrische Beobachtungen bei diesen Wellenlängen konzentrieren. Etwa ab 2010 wird dies mit den ersten Teleskopen des Atacama Large Millimeter Array (ALMA) möglich sein. Henrik Beuther hat Erfahrung mit Beobachtungen dieser Art, weil er bereits mit anderen Interferometern, insbesondere dem Submillimeter-Array (SMA) auf Mauna Kea, Hawaii und dem Interferometer auf dem Plateau de Bure in Frankreich gearbeitet hat. Seine Gruppe wird somit auch weiterhin mit den schon existierenden Interferometern wichtige Expertise erlangen, um die großen Kapazitäten von ALMA später wirksam nutzen zu können.

Der Aufbau seiner Gruppe geht zügig voran: Ein Doktorand aus Argentinien und eine Doktorandin aus den USA haben bereits zugesagt und werden im Sommer 2006 ans MPIA kommen. Sie sollen sich vornehmlich mit zwei Projekten befassen. Das eine betrifft die Beobachtung massereicher Akkretionsscheiben mit dem SMA und anderen Interferometern. Das andere bezieht sich auf die Fragmentation massereicher Sternentstehungsregionen. Weitere Projekte sind in Vorbereitung.



Abb. V.7.1: Henrik Beuther vor der Kulisse des Königstuhls.

Frank van den Bosch: Theoretische Kosmologie und Evolution der Galaxien

Die Abteilung Galaxien und Kosmologie des Instituts hat 2005 mit Frank van den Bosch einen neuen kompetenten Mitarbeiter gewinnen können. Er leitet eine unabhängige Forschungsgruppe, die sich mit der Entwicklung von Galaxien beschäftigt wird. Der Leiter einer solchen Gruppe hat keine Lehrverpflichtungen, und eine garantierte finanzielle Unterstützung über mindestens fünf Jahre verschafft ihm die Möglichkeit, seine gesamte Zeit der Forschung zu widmen. Dies waren die ausschlaggebenden Gründe für van den Bosch, sich auf die Position zu bewerben. Gleichzeitig ist das MPIA für ihn die ideale Wirkungsstätte: Das Institut ist am Sloan Digital Sky Survey und anderen Galaxiendurchmusterungen beteiligt und verfügt über große, moderne Beowulf-Supercomputer. Darüber hinaus garantiert die Existenz weiterer Theoriegruppen einen regen wissenschaftlichen Austausch.

Van den Bosch kann bereits auf eine breite Erfahrung verweisen. Im Jahr 1997 promovierte er an der Sternwarte Leiden und ging anschließend als Hubble Fellow an die University of Washington. Es folgten Aufenthalte am MPI für Astrophysik (Garching) und an der ETH Zürich, bevor er ans MPIA kam. Hier will er sich auf verschiedene Aspekte der Kosmologie konzentrieren.

Zum einen beschäftigt er sich mit der Struktur und Entstehung von Scheibengalaxien. In diesen Sternsystemen kreisen Sterne und Gas um das Zentrum. Daher liegt ein Schlüssel zum Verständnis dieser Systeme in der Frage, auf welche Weise der Drehimpuls zustande kam und wodurch er beeinflusst wird. Aus einer Kombination von

analytischen Methoden und numerischen Rechnungen will van den Bosch mit seiner Gruppe diese Fragen angehen. Die Relationen zwischen Größe und Leuchtkraft sowie zwischen Geschwindigkeit und Leuchtkraft könnten hierbei zentrale Rollen spielen.

Ein anderer Schwerpunkt seiner Forschung ist der Zusammenhang zwischen Galaxien und Halos aus Dunkler Materie. Dazu hat van den Bosch eine neue statistische Methode entwickelt, die auf den Eigenschaften des Galaxien-Clustering beruht. Die sich daraus ergebenden Modelle für den Zusammenhang zwischen der Dunklen Materie und den Galaxien (auch Galaxy-Dark Matter Connection genannt) liefern starke Randbedingungen für die Theorie der Galaxienentstehung. Dieselbe Technik liefert auch starke Einschränkungen für die Werte kosmologischer Parameter, wie etwa der Materiedichte im Universum. In den kommenden Jahren will van den Bosch diese und ähnliche Techniken verbessern und auf große Rotverschiebungsdurchmusterungen, wie den 2dF Galaxy Redshift Survey und den Sloan Digital Sky Survey, anwenden.

In einem dritten Schwerpunkt beschäftigt sich van den Bosch mit der Entstehung und der Struktur von Halos aus Dunkler Materie. Dabei verwendet er eine Kombination aus numerischen Simulationen und semi-analytischen Verfahren.

Auch van den Bosch's Arbeitsgruppe wächst schnell: Die »Rekrutierung« junger Wissenschaftler ließ nicht lange auf sich warten: Bereits Mitte 2006 wird seine Gruppe aus zwei Postdocs und zwei Doktoranden bestehen.

Abb. V.7.2: Frank van den Bosch.



V.8 Preise für Nachwuchswissenschaftler

Wissenschaftliche Preise haben unterschiedliche Funktionen. Sie bestärken den Geehrten in seiner Arbeit und verleihen ihm Zutrauen in die Zukunft. Gleichzeitig sind sie oft ein wichtiges Fördermittel, um Studenten und Post-Docs aus dem In- und Ausland die Arbeit an einem Institut zu ermöglichen. Das Jahr 2005 war auch in dieser Hinsicht für das MPIA sehr erfreulich. Sebastian Wolf erhielt den Heinz-Maier-Leibnitz-Preis, Elena Masciadri erhielt den Marie Curie Excellence Grant, und die Ernst-Patzer-Preise für Nachwuchswissenschaftler am MPIA gingen an Marco Barden, Anders Johansen und Jorge Penarrubia.

Heinz-Maier-Leibnitz-Preis für Sebastian Wolf

Der Heinz-Maier-Leibnitz-Preis wird seit 1977 an junge Wissenschaftler in Anerkennung herausragender Leistungen vergeben. Er gilt als die höchste Auszeichnung für junge Wissenschaftler in Deutschland, ist mit 16000 Euro dotiert und soll die Preisträger darin unterstützen, ihre wissenschaftliche Laufbahn weiter zu verfolgen. Die Mittel für den Preis stellt das Bundesministerium für Bildung und Forschung zur Verfügung, die Verleihung fand im Jahr 2005 am 6. Juni in Bonn statt.

Die Jury würdigte Wolfs bedeutende Arbeiten zur Modellierung und Untersuchung protoplanetarer Scheiben auf dem Gebiet der Planeten- und Sternentstehung. Sie betonte insbesondere, dass sich seine Arbeiten durch ihre Originalität und ein hohes Niveau der physikalisch-mathematischen Durchdringung der komplexen Problemstellungen auszeichnen.

Sebastian Wolf studierte an der Universität Jena Physik und kam nach Forschungsaufenthalten an mehreren Instituten, wie der Europäischen Südsternwarte (Eso) und dem California Institute of Technology in Pasadena, im Jahr 2002 zum MPIA. Seit 2004 leitet er hier eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe, die sich der Entwicklung von zirkumstellaren Staubscheiben zu Planetensystemen widmet (s. Jahresbericht 2004, S. 111).

Sebastian Wolf befasst sich mit der komplexen Frage, wie Planeten entstehen. Seine Arbeitsweise beruht auf einer Kombination von numerischen Simulationen einerseits und astronomischen Beobachtungen andererseits.

Abb. V.8.1: Ernst-Ludwig Winnacker, Präsident der DFG, verleiht Sebastian Wolf den Heinz-Maier-Leibnitz-Preis (Foto: DFG)





Abb. V.8.2: Sebastian Wolf bei seinem Vortrag über protoplanetare Scheiben (Bild: DFG)

Für die Untersuchung der Staubkomponente in einer protoplanetaren Scheibe hat er ein Simulationsprogramm entwickelt, das erstmals den Transport von Strahlung in den Staubscheiben um junge Sterne in drei Raumdimensionen nachzuvollziehen erlaubt. Diese Simulationen ermöglichen es, Vorhersagen für Beobachtungsgrößen zu machen, die unter anderem das Wachstum von Staub zu Planetesimalen und später zu Planeten widerspiegeln. Solche Beobachtungsgrößen können Spektren, Bilder, Polarisationskarten oder interferometrische Daten zirkumstellarer Scheiben sein. Diese Größen lassen sich durch Beobachtungen überprüfen.

Eine solche Vorhersage ist beispielsweise, dass junge massereiche Planeten durch den warmen, dichten Staub in ihrer Umgebung und durch Lücken nachweisbar sind, die sie entlang ihrer Umlaufbahn in einer Gasscheibe um den Stern hinterlassen. Für solche Beobachtungen wird das in wenigen Jahren in Betrieb gehende Atacama Large Millimeter Array (ALMA) in der chilenischen Atacama-Wüste zum Einsatz kommen können. Auch den Fragen, wie unterschiedlich geformte Staubkörner, klumpige räumliche Verteilungen des Staubes, Staubgröße und chemische Zusammensetzung der Partikel das Erscheinungsbild protoplanetarer Scheiben beeinflussen können, ging Wolf im Rahmen dieser Simulationen nach.

Schon jetzt ermöglichen Beobachtungen protoplanetarer Scheiben einen Einblick in die ersten Schritte der Planetenentstehung. So konnte Wolf unter Zuhilfenahme

der entwickelten numerischen Simulationen erstmals zeigen, dass das Staubkornwachstum in einer prominenten protoplanetaren Scheibe – um den »Butterfly Star« – schneller als in der zirkumstellaren Hülle dieses Objektes verläuft. Die Staubkörner in der zirkumstellaren Scheibe sind bereits 100- bis 1000-mal so groß wie die in der umgebenden dünnen Hülle, in der offenbar noch die ursprüngliche Staubpopulation vorliegt. Dieses Ergebnis untermauert die theoretischen Vorhersagen und basiert auf hochauflösenden Bildern, die in verschiedenen Wellenlängenbereichen mit unterschiedlichen Teleskopen gewonnen wurden, etwa mit dem Weltraumteleskop HUBBLE und dem Radioobservatorium in Owens Valley, Kalifornien.

Bei der Preisverleihung ist es Brauch, dass einer der Preisträger – im Jahr 2005 waren es sechs – einen wissenschaftlichen Vortrag über sein Thema hält. Als besondere Anerkennung ist es zu werten, dass Sebastian Wolf für diese Aufgabe ausgewählt wurde. Sein Thema: »Können wir die Entstehung von Planeten beobachten?« Auch dies belegt die Attraktivität der Astronomie in der allgemeinen Forschungslandschaft.

Marie Curie Excellence Grant für Elena Masciadri

Elena Masciadri kam ans MPIA, als die Machbarkeitsstudie des PLANET FINDER-Projekts lief, eines hochentwickelten Instruments der zweiten Generation für das VLT. Während ihres Aufenthalts am MPIA konzentrierte sie sich auf zwei Themen. Zum einen unterstützte sie das PLANET-FINDER-Projekt auf der instrumentellen Seite. Insbesondere führte sie eine Untersuchung über die Szintillationseffekte durch, die auf das Instrument einwirken. Diese Untersuchung war wichtig, um diese Effekte zu quantifizieren, das Konzept des PLANET FINDER zu optimieren und die Anzahl der verformbaren Spiegel zu bestimmen, die benötigt werden, um die durch atmosphärische Turbulenzen hervorgerufenen Störungen der Wellenfront zu korrigieren.

Zum anderen führte sie Durchmusterungen durch, um mittels Direktaufnahmen nach extrasolaren Planeten und Braunen Zwergen zu suchen, die um nahe junge Sterne kreisen. Dazu verwendete sie Abbildungstechniken mit hohem Kontrast, wobei sie die an einem der VLT-Teleskope installierte Hochleistungs-Infrarotkamera NACO sowie das neueste SDI/NACO-Instrument benutzte. Letzteres beruht auf der sogenannten simultanen differentiellen Abbildungstechnik (simultaneous differential imaging), welche zum einen die Reduzierung des Speckle-Rauschens bei Abständen kleiner als eine Bogensekunde zum Ziel hat. Zum anderen soll es methanreiche schwache Objekte finden, wie sie die meisten der jungen massereichen Planeten darstellen, die möglicherweise junge (100–200 Millionen Jahre alte), nahe Sterne umkreisen. Damit handelt es sich um eine Technik, die unsere Fähigkeit erheblich verbessern kann,

lichtschwache Objekte mit einem Helligkeitskontrast von 9 bis 11 mag im H-Band bei einem Abstand von 0.5 Bogensekunden vom Zentralstern noch zu finden. Diese Werte entsprechen Planeten mit Massen von größenordnungsmäßig 3 bis 10 Jupitermassen und einem Alter von 1 bis 200 Millionen Jahren.



Abb. V.8.3: Elena Masciadri in ihrem Büro in Arcetri bei Florenz.

Diese Untersuchungen erlaubten es Elena, die Modelle zur Planetenentstehung stark einzuschränken. Ihr Interesse galt auch möglichen alternativen Techniken der Bildverarbeitung wie der Wavelet-Technik, deren Ziel eine automatische Entdeckung von Planeten auf tiefen Aufnahmen ist. Zudem untersuchte sie die Möglichkeiten, Abströmungen von sehr massearmen Sternen und Braunen Zwergen nachzuweisen. Dieses Thema ist interessant, da der Nachweis solcher Abströmungen Licht auf die Entstehungsmechanismen Brauner Zwerge werfen könnte

Die Marie Curie Excellence Grants sind Bestandteil der Marie Curie Actions zur Förderung hervorragender Leistungen. Das Projekt wird in Verbindung mit einem Institut durchgeführt, in diesem Falle dem Osservatorio Astrofisico die Arcetri in Florenz. Das Projekt konzentriert sich auf ein Thema, das Elenas Ansicht nach von strategischer Bedeutung für die bodengebundene Astronomie ist: die Charakterisierung der lokalen Turbulenz.

Die europäischen Geldmittel geben ihr die Möglichkeit, ein unabhängiges Forschungsteam zu bilden, das an einem strategischen, interdisziplinären Thema an der Grenze zwischen Astrophysik und Atmosphärenphysik arbeiten wird. Endziel des Projekts ist die Errichtung eines automatischen Systems für 3D-Simulationen und Vorhersagen der optischen Turbulenz (OT) über astronomischen Beobachtungsstandorten. Die Vorhersage der OT ist sehr wichtig, damit Astronomen im Voraus die räumliche und zeitliche Verteilung der OT über einem Teleskop kennen und so planen können, welche wissenschaftlichen Programme ausgeführt werden sollen (sogenannte flexible Planung). Die Simulation der OT kann auch eine entscheidende Rolle bei der Auswahl astronomischer Standorte und der Optimierung der Methode der adaptiven Optik spielen.

Die in die bodengebundene Astronomie investierten Geldmittel sind enorm, und nur durch ein effizientes Teleskop-Management kann die bodengebundene Astronomie gegenüber der Weltraum-Astronomie konkurrenzfähig bleiben. Die in diesem Projekt vorgeschlagene Technik kann zur Zeit als einzige eine Lösung für dieses spezielle Bedürfnis der Astrophysik bieten und zudem Europa eine führende Rolle auf diesem Gebiet sichern. Überdies wird es die vorgeschlagene Technik auch erlauben, neue Erkenntnisse über die Bildungs- und Entwicklungsmechanismen der optischen Turbulenz zu gewinnen, die durch andere Methoden nicht möglich sind.

Das langfristige Ziel ist, eine Kerngruppe von Wissenschaftlern zu bilden, deren Spezialgebiet die Auswirkung von Turbulenz auf die Ausbreitung von Wellenfronten bei astronomischen Anwendungen ist. Diese Gruppe soll sich anderen italienischen Gruppen anschließen, die auf dem Gebiet hoher Winkelauflösungsmethoden arbeiten (AO, Interferometrie u.s.w.) und bereits international bekannt sind. So soll die nationale Tradition auf diesem Gebiet gestärkt, sowie die Grundlagen für ein »Europäisches Zentrum für hohe Winkelauflösungs-Techniken« geschaffen werden.

Angesichts der Tatsache, dass sich das Projekt zum Teil auf den Mt. Graham konzentrieren wird, haben die LBT-Beteiligungsgesellschaft und damit auch das MPIA Interesse an Elena Masciadris Arbeit. Mt. Graham wird das erste Zielobjekt für die Realisierung des Vorhersage-Systems sein. Sämtliche Projekte in Zusammenhang mit dem LBT, insbesondere jene, deren Leistungsfähigkeit kritisch von der Turbulenz abhängt (wie LINC/NIRVANA), könnten von diesen Untersuchungen profitieren. Das Ziel der Vorhersage ist sehr ehrgeizig, der Weg dahin wird lang und schwierig sein, doch Masciadri glaubt, dass der letztendliche Nutzen die Anstrengungen wert sein wird. Daher ist es für alle in der »Heimat des LBT« von Interesse, sich gegenseitig über die Fortschritte der eigenen Arbeiten auf dem Laufenden zu halten, um den größtmöglichen Nutzen aus diesem Projekt ziehen zu können.

Ernst-Patzer-Preis für Marco Barden, Anders Johansen und Jorge Penarrubia

Der Ernst-Patzer-Preis zur Förderung von Nachwuchswissenschaftlern 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 finanziell 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 Wissenschaftler/innen des MPIA sowie einem externen Wissenschaftler zusammensetzt. Die drei Preisträger erhielten jeweils 2000 Euro.

Marco Barden erhielt den Preis für eine hervorragende Veröffentlichung über die Entwicklung von Scheibengalaxien. In seiner umfassenden Untersuchung analysierte er Bilder des Weltraumteleskops HUBBLE, die im Rahmen des GEMS-Projekts (Galaxy Evolution from Morphologies and SEDs) erstellt wurden. Diese kombinierte er mit Daten der am MPIA durchgeführten Galaxiendurchmusterung COMBO 17. Durch eine präzise Bestimmung der mittleren Objektgröße aus 5700 Galaxien war es ihm möglich, die Entwicklung von Scheibengalaxien von der Rotverschiebung $z=1$ (vor ca. sieben Milliarden Jahren) bis in die Gegenwart zu ermitteln. Das entspricht etwa dem halben Weltalter. Ein wesentliches Ergebnis von Bardens Untersuchung besteht darin, dass sich die Flächenhelligkeit der Galaxien als Folge der Alterung ihrer Sternpopulationen kontinuierlich ändert. Im Gegensatz dazu bleibt die stellare Flächendichte über den selben Zeitraum etwa kon-

stant. Da die stellare Masse von Galaxien aufgrund der Neubildung von Sternen mit der Zeit zunimmt, konnte gefolgert werden, dass Scheibengalaxien im Mittel von innen nach außen wachsen.

Anders Johansen wurde für seine Computersimulationen turbulenter Vorgänge in protoplanetaren Scheiben ausgezeichnet. Nach derzeitigen Theorien sinken in der ersten Phase der Entstehung einer protoplanetaren Scheibe Staubteilchen in die Mittelebene ab und sammeln sich dort an. Diesen Vorgang beeinflusst eine Fülle physikalischer Vorgänge, die bislang nicht vollständig numerisch behandelt werden können. Johansen hat in seinen Modellen erstmals detailliert den Einfluss von Turbulenz untersucht, die durch die so genannte magnetorotationelle Instabilität ausgelöst werden können. Ein wichtiges Ergebnis war, dass Turbulenz nicht, wie häufig vermutet, die Entstehung von Staubkörnern und Planetesimalen behindert, sondern sie sogar fördern kann (s. Kapitel II.4 in diesem Jahresbericht).

Jorge Penarrubia wurde für seine theoretischen Untersuchungen des Monoceros- Sternstroms ausgezeichnet. Hierbei stützte er sich auf Daten des Sloan Digital Sky Survey, in dem sich eine ringförmige Struktur aus Sternen abzeichnete, die sich über etwa 100 Grad am Himmel erstreckt. Es handelt sich um einen Gezeitenstrom von Sternen, die aus einer Zwerggalaxie herausgerissen wurden, während diese mit dem Milchstraßensystem verschmolz. Penarrubia konstruierte aus allen verfügbaren Beobachtungsdaten ein umfangreiches Modell dieses so genannten Monoceros-Stroms und konnte damit auch Aussagen über die vermutete Zugehörigkeit von Kugelsternhaufen und anderen Sterngruppierungen zu diesem Gezeitenstrom erhalten (s. Jahresbericht 2004, S. 29).

Abb. V.8.4: Wurden mit dem Ernst-Patzer-Preis ausgezeichnet: Marco Barden, Anders Johansen und Jorge Penarrubia (v.l.n.r.)



V.9 Der Girls' Day – Mädchen zu Gast am MPIA

Zum fünften Mal fand in ganz Deutschland am 28. April der Girls' Day oder Mädchen-Zukunftstag statt. Er gibt Schülerinnen der Klassen 5 bis 10 Einblick in Berufsfelder, die Mädchen im Prozess der Berufsorientierung nur selten in Betracht ziehen. In erster Linie bieten technische Unternehmen und Abteilungen sowie Hochschulen, Forschungszentren und ähnliche Einrichtungen an diesem Tag Veranstaltungen an. Den Weg auf den Königstuhl fanden 60 neugierige Mädchen. Mit viel Engagement versuchten die Mitarbeiter des Instituts ihnen die Frage zu beantworten: »Wie macht man eigentlich Astronomie?«

Bundesweit brachte der Girls' Day einen neuen Teilnahmerecord. Insgesamt fast 7000 Unternehmen und Organisationen hatten sich mit nahezu 130000 Plätzen auf der Homepage www.girls-day.de eingetragen. Im MPIA hatten die Mädchen unter Eva Schinnerers Regie Gelegenheit, sowohl die Technik in den Werkstätten zu besichtigen als auch etwas über die Arbeit der Astronomen zu erfahren.

Insgesamt bemühten sich 50 Mitarbeiter des Instituts an 16 Stationen, die Faszination von Forschung und Technik zu vermitteln. So gab Klaus Meisenheimer den Mädchen Einblick in die Erforschung der Galaxien und zeigte ihnen die faszinierenden Himmelsaufnahmen des GEMS-Projekts. Anhand eines Spiels brachten andere Kollegen den jungen Gästen bei, was aktive Galaxien sind und warum sich die Astronomen für diese seltsamen Himmelskörper interessieren.



Im Labor ging es beispielsweise um die Frage, wie ein Teleskop im Weltraum funktioniert. Hier gefielen den Mädchen am besten Jutta Stegmaiers Erklärungen zu den tiefen Temperaturen. Sie ist Doktorandin in der Gruppe, die Instrumente für das zukünftige Weltraumteleskop HERSCHEL entwickelt. Ein richtiges Teleskop gab es auch zu sehen: Ernest Krmpotic und Stefan Birkmann erklärten die Funktionsweise des 70-cm-Teleskops.

Auch der Besuch des Elektronik-Labors erwies sich als Knüller, weil die Mädchen dort unter der Anleitung und Aufsicht von Frank Whrel selbst löten durften. In der Konstruktion konnten sie dann unter der Leitung von Monika Ebert die CAD-Software benutzen, was sich ebenfalls als Magnet für die wissbegierigen jungen Damen erwies. Ein weiteres Highlight war die Nachmittagspause, in der Werner Laun mit flüssigem Stickstoff experimentierte und selbstgemachtes Eis hervorzauberte. Weitere spannende Stationen waren das Rechenzentrum, das CCD-Labor, die Feinmechanik-Werkstatt, der Versuchsaufbauten zur Interferometrie und Vieles mehr. Auch die Redaktion von »Sterne und Weltraum« engagierte sich am Girls' Day und gewährte den Interessierten einen Blick hinter die Kulissen. Vielleicht war ja die eine oder andere spätere Abonnentin mit dabei.

Den Girls' Day fördern zahlreiche Institutionen, unter anderem die beiden Bundesministerien für Bildung und Forschung sowie für Familie, Senioren, Frauen und Jugend. Auch im Jahr 2006 wird das MPIA für neugierige Nachwuchswissenschaftlerinnen seine Tore wieder öffnen.

(Eva Schinnerer)

Abb. V.9.1: Axel M. Quetz (*links*) und Ernest Krmpotic (*unten*) beantworten die Fragen der Girls.



V.10 Das Projekt »Wissenschaft in die Schulen!«

Seit Anfang des Jahres 2005 läuft unser Schulprojekt mit Volldampf, Anfang Juni gab es in der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen eine festliche Auftaktveranstaltung: 38 engagierte Lehrer spielten zeitweise die Rolle der Schüler und testeten die Brauchbarkeit unseres Angebots in der Praxis.

Der Grundgedanke unseres Schulprojektes ist: Wir wollen die Motivation und Begeisterung, die unsere Leser beim Studium von »Sterne und Weltraum« verspüren, für den Schulunterricht nutzbar machen. Das können wir keinesfalls durch eine »Verschulung« der Zeitschrift erreichen. Vielmehr müssen wir der Zeitschrift ihren freien und unterhaltsamen Charakter lassen, und zusätzlich den Lehrern und Schülern zu ausgewählten, in SuW behandelten Themen gebrauchsfertiges didaktisches Material anbieten, das eine für den Unterricht geeignete Behandlung unserer spannenden Themen erlaubt. Dieses Material stellen wir monatlich auf unserer Internet-Plattform für jedermann zur Verfügung.

Für dieses Konzept konnten wir die Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen begeistern. Dort widmet sich nun, dank großzügiger Unterstützung durch die Klaus Tschira Stiftung gGmbH, der erfahrene Physik- und Astronomiedidaktiker Olaf Fischer mit ganzer Kraft der monatlichen Erstellung des didaktischen Materials. Dabei sollen nicht nur die an

wenigen Schulen aktiven, extremen Astronomie-Fans bedacht werden. Vielmehr eignet sich das Material bereits jetzt für den Einsatz im Physik-Unterricht in der Oberstufe allgemein. Und bald soll auch das neue Fach »Naturwissenschaften und Technik« (NWT) ab der Mittelstufe bedient werden: Die Vielseitigkeit der Astronomie macht das durchaus möglich.

Olaf Fischer testet seine monatlich neu erstellten Materialien, indem er als Gastlehrer im Lehrzentrum Astronomie am Helmholtz-Gymnasium in Heidelberg unterrichtet. Und einmal im Quartal findet in der Landesakademie in Donaueschingen eine Lehrerfortbildung statt.

Die erste Veranstaltung dieser Art gab es vom 9. – 11. Juni: 38 eingeladene Lehrerinnen und Lehrer trafen sich in Donaueschingen mit Olaf Fischer und der gesamten SuW-Redaktion. Nach einer festlichen Begrüßung durch die Honoratioren und einer engagierten Ansprache von Dr. h.c. Klaus Tschira, der sich als Astronomiebegeisterter auswies und der fundierten naturwissenschaftlichen Ausbildung unserer Jugend höchstes Gewicht beimaß, wurden die in SuW behandelten Themen des ersten Halbjahres 2005 durchgenommen: Landung auf

Abb. V.10.1: Lehrer erproben in der Landesakademie Donaueschingen didaktische Materialien aus dem Schulprojekt von SuW. (Bild: Siegfried Zedler)



Titan, Auswertung von HUBBLE-Bildern, Supernovae und radioaktiver Zerfall, Planetenentstehung und Staubexperimente auf der Internationalen Raumstation ... Die Lehrerinnen und Lehrer waren begeistert und konnten bestätigen, dass sich mit dem dargebotenen Material spannender Physik-Unterricht gestalten lässt. Und abends wurde vom Garten der Akademie aus beobachtet, was der sommerliche Himmel zu bieten hat.

Es ist noch viel zu tun.

Gewiss gibt es für alle Beteiligten noch viel zu tun. Wir sind angewiesen auf den lebendigen Erfahrungsaustausch mit den Lehrern und Schülern, um unser Angebot möglichst präzise auf die Lehrpläne für Physik in der Oberstufe auszurichten. Und wir müssen unser Angebot unbedingt auf die Mittelstufe erweitern: Die Lehrerinnen und Lehrer waren alle fest davon überzeugt, dass das Interesse der Jugendlichen für die »harten« Naturwissenschaften sich in den meisten Fällen bereits in der Mittelstufe festigt – oder erlischt.

Es ist also wichtig, schon früh den Unterricht vielseitig und interessant zu gestalten, etwa indem man Beispiele und Anwendungen aus der astronomischen Forschung oder aus der Beobachtungspraxis holt. Diese didaktische Transformationsarbeit kann nicht jeder Lehrer von neuem leisten. Das Internet macht's aber möglich, dass sie nur einmal und in optimaler Weise geschieht, um sofort allen Interessierten zur Verfügung zu stehen.

Ein wesentlicher Aspekt des Projekts liegt in der starken Motivation, die für die Schüler von unserer Zeitschrift ausgeht. Diese Motivation kommt dem Unterricht zugute, in dem die auf die Inhalte der Zeitschrift abgestimmten didaktischen Materialien eingesetzt werden. Deshalb ist es erstrebenswert, dass die Lehrer und Schüler nicht nur das didaktische Material aus dem Internet verwenden, sondern auch über einen Klassensatz unserer Zeitschrift verfügen. Das didaktische Material steht unter: <http://www.wissenschaftschulen.de> zur freien Verfügung.

(Jakob Staude)

V.11 Der Hanno und Ruth Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik

Auf der Jahrestagung 2005 der Astronomischen Gesellschaft in Köln wurde der neu gestiftete Preis erstmals vergeben. Erster Preisträger ist Thomas Bürke.

Herr und Frau Roelin aus Essen hatten sich bereits jahrelang um eine angemessene Realisierung ihres Stiftungsgedankens bemüht, als der Zufall sie mit dem Unterzeichneten in Verbindung brachte. Weil sie der Arbeit der Astronomen und Kosmologen und deren Ergebnissen einen hohen kulturellen Wert beimessen, wollten sie einen ansehnlichen Preis stiften, um Wissenschaftler oder Wissenschaftspublizisten auszuzeichnen, die neue Erkenntnisse aus der Astronomie, Weltraumforschung und Kosmologie einer breiteren Öffentlichkeit besonders erfolgreich vermittelt haben. Es sollten auch in didaktisch-pädagogischer Absicht verfasste Darstellungen ausgezeichnet, und Publikationen aller Art (Druck, Rundfunk, Fernsehen, Internet ...) zum Wettbewerb zugelassen werden.

Dieser für die astronomische Community so ehrenvolle Stiftungsgedanke durfte nicht den gängigen wirtschaftlichen Kriterien zum Opfer fallen. Dazu war es erforderlich, die kongeniale Mitarbeit mehrerer Stellen zu gewinnen. Die schließlich gefundene Lösung beinhaltet die kostenfreie Verwaltung des Stiftungskapitals

durch die Max-Planck-Gesellschaft. Der Preis wird vom Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg vergeben, dazu wird jeweils eine Jury einberufen, die teils aus Wissenschaftlern, teils aus Wissenschaftspublizisten zusammengesetzt ist. Die Preisverleihung geschieht auf der Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, die damit dem Preis die nötige Publikumswirksamkeit verschafft. Die bei der Arbeit der Jury entstehenden Unkosten trägt der Verlag Spektrum der Wissenschaft. Auf diese Weise konnte für die erste Preisverleihung im Jahr 2005 ein Preisgeld von 3000 Euro bereitgestellt werden. Der Preis soll etwa alle zwei Jahre vergeben werden.

Der erste Preisträger

Auf die Ausschreibung des Preises Anfang des Jahres 2005 hin trafen mehr als zwanzig Bewerbungen ein. Die Jury einigte sich darauf, den ersten Hanno und Ruth Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik an Thomas Bürke zu vergeben. Bürke (48) wurde nach Abschluss seines Studiums der Physik, Promotion in Astronomie, sowie weiteren Jahren der aktiven astronomischen Forschung, Redakteur bei den Physikalischen Blättern. Seit 1990 ist er Redakteur der Zeitschrift Physik in unserer Zeit. Schwerpunkt seiner Arbeit ist aber die



Darstellung astronomischer Themen als freier Journalist und Buchautor.

Für den Hanno und Ruth Roelin-Preis 2005 hatte sich Thomas Bürke einerseits mit seinem Buch »Albert Einstein«, andererseits mit seinen umfassenden Darstellungen aktueller astronomischer Themen aus den Jahren 2004/2005 in der Süddeutschen Zeitung, der Welt, der Berliner Zeitung, sowie in Spektrum der Wissenschaft und Bild der Wissenschaft beworben.

Zu »Albert Einstein« (dtv portrait, München 2004; 3. Aufl.) äußerte sich SuW bereits so: »Das Buch ist eine lebendige Biographie, in der Bürke es mit großem Geschick versteht, Einsteins Leben, sein wissenschaftliches Denken und die turbulenten Umstände seiner Zeit miteinander in Bezug zu setzen. Einsteins Entdeckungen werden anschaulich geschildert und in den Kontext der zeitgenössischen Physik gestellt. Die astronomischen Bezüge, insbesondere in der Kosmologie, kommen ausführlich zur Geltung. Dabei bleibt $E = m c^2$ die einzige Formel im ganzen Buch – und auch sie wird anschaulich erklärt!« (SuW 4/2004, S. 96). Diese Meinung teilte die Jury uneingeschränkt.

Thomas Bürkes Berichterstattung in überregionalen Tageszeitungen und Zeitschriften überzeugte die Jury mit dem breiten Spektrum der behandelten Themen aus

Abb. V.11.1: Auf der Jahrestagung 2005 der Astronomischen Gesellschaft in Köln. Von links nach rechts: die Stifter Frau Ruth und Herr Hanno Roelin, Joachim Krautter (Präsident der AG), Jakob Staude und Thomas Bürke, der erste Preisträger. (Bild: Tobias Roelin)

Astronomie und Weltraumforschung und mit der sorgfältigen Erläuterung komplexer Zusammenhänge und Hintergründe. Dabei behält Bürke den Unterhaltungswert seiner Texte sehr wohl im Auge.

Die Jury kam zum Ergebnis, dass sowohl Bürkes eingereichte aktuelle Arbeiten, als auch sein langjähriges Wirken dem Stiftungsgedanken bestens entsprechen. Die astronomische Community kann den Stiftern und dem Preisträger gleichermaßen dankbar sein!

Die zweite Runde des Hanno und Ruth Roelin-Preises für Wissenschaftspublizistik wird Anfang 2007 eingeläutet. Die bei der ersten Runde bereits lebhaft und qualitätsvolle Beteiligung verspricht dem Preis eine erfolgreiche Zukunft.

(Jakob Staude)

V.12 Abschiedskolloquium für Immo Appenzeller

Vom 30. Juni bis 1. Juli fand im Hörsaal des MPIA das Abschiedskolloquium zu Ehren von Immo Appenzeller, dem Direktor der Landessternwarte Heidelberg (LSW), statt. Dass der wissenschaftliche Teil dieser von der LSW ausgerichteten Veranstaltung im MPIA präsentiert wurde, ist kein Zufall: Der Geehrte hat selbst wesentlich dazu beigetragen, dass die beiden astronomischen Institute auf dem Königstuhl seit langem eine enge Zusammenarbeit verbindet. Von 1998 bis 2000 war Appenzeller kommissarischer geschäftsführender Direktor des MPIA.

»From T Tauri Stars to the Edge of the Universe« – unter diesem vielsagenden Titel stand das Kolloquium anlässlich des bevorstehenden Ruhestandes von Immo Appenzeller, zu dem knapp hundert geladene Gäste, darunter auch die 22 Vortragenden, auf dem Königstuhl zusammengekommen waren. Vielsagend ist der Titel deshalb, weil er die enorme Bandbreite der wissenschaftlichen Themen ausdrückt, mit denen sich Appenzeller im Laufe seiner Arbeit als Astrophysiker beschäftigt hat. Diese wissenschaftliche Themenvielfalt stand – neben zahlreichen persönlichen Worten – auch im Vordergrund der Vorträge.

Am Beginn seiner wissenschaftlichen Karriere beschäftigte sich Appenzeller in Göttingen vor allem mit Sternen. Später wandte er sich zunehmend auch extragalaktischen Fragestellungen zu. Neben der Tatsache, dass er sich mit »seinen« astronomischen Objekten sowohl in der Theorie als auch beobachtend auseinandergesetzt hat, wurde auf der Veranstaltung auch sein intensives Engagement im Instrumentenbau hervorgehoben. Besonders bekannt aus der jüngeren Zeit ist in diesem Zusammenhang der Bau von FORS 1 und FORS 2 (FORS: Focal Reducer and Spectrograph) für das ESO-

Abb. V.12.1: Zahlreiche Gäste kamen zum Kolloquium für Immo Appenzeller (*vorne links*) in den Hörsaal des MPIA.



Abb. V.12.2: Immo Appenzeller mit einem besonderen Präsent, das auf sein zweites großes Interesse neben den Sternen anspielt: Kakteen.

VLT. Dieses unter ESO-Kontrakt von der LSW und den Universitätssternwarten Göttingen und München gebaute Instrument lieferte von Beginn an ausgezeichnete Bilder und Spektren und wird gern als das Arbeitspferd des VLT bezeichnet. Immo Appenzeller leitete das Projekt als PI und engagierte sich in der wissenschaftlichen Nutzung des Instruments nach der Inbetriebnahme. Ein Beispiel für diese Arbeiten ist das FORS Deep Field.

Gegenwärtig ist sein Name auch mit dem Bau der Instrumente LUCIFER 1 und 2 (LBT NIR spectroscopic Utility with Camera and Integral Field Unit for Extragalactic Research) für das Large Binocular Telescope (LBT) verknüpft. Immo Appenzeller ist Co-PI dieses von der LSW in Zusammenarbeit mit vier weiteren Instituten gebauten Instrumentes, das Spektren und Bilder im nahen Infrarot liefern soll. Zu den Partnern zählt auch das MPIA: Das Projekt ist eines der Beispiele für die enge wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen den beiden Instituten auf dem Königstuhl.

Von 1975 bis 2005 hat Immo Appenzeller die Geschicke der Landessternwarte geleitet, am 30. September trat er seinen Ruhestand an. Das Kolloquium im Vorfeld bildete nicht nur einen angemessenen wissenschaftlichen Rahmen. Mit dem Barbecue auf dem Gelände der LSW am Abend des ersten Tages hatte es auch einen gesellschaftlichen Höhepunkt, an den sich alle Teilnehmer sicher gerne erinnern werden.

(Klaus Jäger, Jochen Heidt)

V.13 Vier Jahrzehnte auf dem Königstuhl

Ein Gespräch mit Christoph Leinert und Dietrich Lemke

Am 1. Dezember fand im Hörsaal des MPIA ein Festkolloquium unter dem Titel »Frontiers of Infrared Astronomy« statt. Anlass war die bevorstehende Emeritierung von Christoph Leinert und Dietrich Lemke, die beide am MPIA seit seiner Entstehung eine Schlüsselrolle gespielt und zum internationalen Ruf des Instituts beigetragen haben. Mit Leinert und Lemke haben die beiden letzten Astronomen das Institut verlassen, die alle Phasen des MPIA seit dessen Gründung miterlebt und seine Entwicklung mit geprägt haben. In diesem Gespräch erzählen sie von dem Pioniergeist, der anfänglich auf dem Königstuhl herrschte, von dem Aufstieg des Instituts zu einer international orientierten wissenschaftlichen Forschungseinrichtung, und von ihren Vorstellungen von der zukünftigen Ausrichtung des MPIA.

Sie kamen zu Beginn der 1960er Jahre auf den Königstuhl und gingen zunächst an die Landessternwarte. Das MPIA gab es damals noch nicht. Wie war damals die Situation für Astronomiestudenten wie Sie?

Leinert: Als ich 1962 während meines Physikstudiums nach Heidelberg kam, war ich schon an einem Übergang in die Astronomie interessiert. Die Landessternwarte lernte ich bei einem Praktikum näher kennen, bei dem der frisch angeschaffte Schmidt-Spiegel mit Hilfe einer Hartmann-Blende justiert werden musste. Dann bot mir der Direktor Hans Elsässer eine Diplomarbeit an: ein neu entwickeltes Polarimeter sollte gründlich getestet und am Bruce-Teleskop der Landessternwarte für Messungen der interstellaren Polarisation eingesetzt werden. Das war eine vielseitige Aufgabe an einem damals modernen Gerät, und es wurde mein Einstieg in die beobachtende Astronomie. Die Beobachtungsbedingungen waren aus heutiger Sicht etwas abenteuerlich: So musste die Kuppel mit Muskelkraft geöffnet und bewegt werden – das Rumpeln habe ich noch heute im Ohr – und das Trockeneis, das Kühlmittel für den lichtempfindlichen Photomultiplier, musste erst zur Zerkleinerung durch einen Fleischwolf gedreht werden. Aber die Stimmung unter den Studenten war gut und die Zuversicht groß, dass wir Wissenswertes zur astronomischen Forschung beitragen würden.

Lemke: Bei mir war es etwas anders. Ich hatte mein Diplom in der Kernphysik gemacht und wollte gar nicht unbedingt in die Astronomie gehen. Dann habe ich aber bei Elsässer eine Vorlesung über Astrophysik gehört, die ganz anders war als alle, die ich vorher gehört hatte. Die

anderen Dozenten hatten mehr oder weniger klassische Astronomie gelehrt. Elsässer brachte hier plötzlich sehr viel Physik mit hinein. Das hat mich fasziniert, weswegen ich mich bei ihm 1965 als Doktorand beworben habe. Die Doktorarbeit war dann auch etwas ganz Physikalisches. Es ging darum, Synchrotronstrahlung vom DESY als Eichquelle für UV-Raketexperimente zu verwenden.

Leinert: Wir Doktoranden – wir waren etwa ein halbes Dutzend – haben uns damals eigentlich als Laborphysiker gefühlt. Wir bemühten uns, schwache Lichtquellen genau zu eichen oder Blendensysteme zu bauen, die störendes Streulicht um viele Größenordnungen unterdrückten. Das waren wichtige Vorarbeiten für spätere Beobachtungen. Aber nur einer, Thorsten Neckel, hat in größerem Umfang wirklich astronomische Beobachtungen durchgeführt.

Lemke: Gerade weil das Institut so physikartig war, bin ich überhaupt dort geblieben. Alle Experimente dienten als Einstieg in die Astronomie mit Raketen und später mit Ballons und Satelliten. Elsässer ist damals sehr früh auf diesen Zug aufgesprungen. Er hat mir dann auch die Projektleitung für den Bau des Ballontelekops THISBE angeboten. Das fand ich außerordentlich reizvoll, obwohl mein Wissensstand dazu nahe bei null lag. Sofort begannen wir, einige Institute im Ausland zu besuchen, die erste Ballonflüge durchgeführt hatten. Und zwei Jahre später flog dann unser eigenes Instrument ...

Warum war Elsässer so weitsichtig, die extraterrestrische Astronomie so früh zu fördern?

Lemke: Was die extraterrestrische Forschung, insbesondere im Infraroten, anbelangt, so war Elsässer sehr

Abb. V.13.1: Thomas Henning (*links*) spricht Dietrich Lemke zum Abschluss des Kolloquiums seinen Dank aus.





Abb. V.13.2: Hans-Walter Rix (*links*) spricht Christoph Leinert zum Abschluss des Kolloquiums seinen Dank aus.

weitsichtig. Das ist ihm sehr hoch anzurechnen, was Steve Beckwith übrigens später einmal besonders betont hat. Ein wichtiger Faktor war aber auch, dass damals in Deutschland für die Weltraumforschung Geld vorhanden war. Ein Teil des Institutsbaus ist aus solchen Fördermitteln finanziert worden.

Hat THISBE von Anfang an funktioniert?

Lemke: Nein, aber wir mussten ja auch absolutes technisches Neuland betreten. Ein Teleskop, das in der Stratosphäre schwebt und bei minus 70 Grad Celsius und einem hundertstel des Normaldrucks arbeitet, hatten wir noch nie gebaut. Bei dem ersten Flug vom Emsland aus hat dann auch nicht viel funktioniert. Viele bewegliche Teile hatten praktisch versagt, nur die Elektronik war gelaufen. Wir mussten dann erst einmal einen langen Lernprozess durchmachen und haben zahlreiche Komponenten in Vakuum-Kältekammern getestet. Heute nennen wir das Qualitätssicherung. Und es hat natürlich auch viel Spaß gemacht, mit dem kleinen Team von Studenten und Technikern zu Ballonstarts nach Texas zu fahren. Damals konnte man alles noch selbst machen. In heutigen Satellitenexperimenten ist man weitgehend fremdbestimmt und ein kleines Rädchen in einer riesigen Maschinerie. Heute ist die Faszination anders: Man arbeitet in internationalen Teams an weltweit einzigartigen Projekten mit aufregenden wissenschaftlichen Zielen.

Übrigens wurde THISBE noch mit Lochstreifen betrieben, und die Daten wurden auf Lochkarten gespeichert. Da lief man immer mit großen Kartons herum, in denen die IBM-Lochkarten gestapelt waren. Gerechnet wurde zum Teil noch mit mechanischen Rechenmaschinen, die man mit einer Kurbel bediente. Die Empfänger wurden aus Röhren aufgebaut, Löcher in die Chassis gebohrt, und so weiter. Das ist heute unvorstellbar. Und dann kam die Halbleiterelektronik auf. Auf THISBE haben wir die ersten integrierten Schaltungen geflogen. Das war damals ganz neu.

Im Laufe der Jahrzehnte sind wir dann Zeitzeugen einer technischen Revolution geworden. Es wurden neue Materialien, elektronische Rechner, schnelle Regeltechnik und vor allem auch die Kryotechnik entwickelt. Und ganz beeindruckend war für mich das parallele Öffnen immer neuer Spektralbereiche durch Weltraumteleskope. Wir hatten das Glück, dass sich dieses »Goldene Zeitalter der Astronomie« weitgehend mit unserem Berufsleben überlappte.

Hat Sie diese Aufgabe, THISBE zu bauen, nur aus physikalischen und technischen Gründen interessiert, oder auch aus astronomischen?

Lemke: Ich war an den astronomischen Fragestellungen genauso interessiert. Elsässer hatte sich mit dem Zodiakallicht beschäftigt und wollte dieses nun auch im Infraroten und im mittleren UV beobachten. Fernziel war die Trennung des Zodiakallichtes von den anderen Komponenten der Nachthimmelselligkeit, wozu THISBE beitragen konnte. – Absolut faszinierend war es für mich dann, mit bodengebundenen Teleskopen die leuchtenden Gasnebel, wie den Orion-Nebel, im mittleren Infraroten zu beobachten und neben der gewaltigen flächenhaften Abstrahlung eingebettete Punktquellen aufzuspüren. Damals begann ja praktisch die Beobachtung von Sternentstehung in Gas- und Staubwolken. Heute ist das eines der Hauptarbeitsgebiete des MPIA.

Das lief alles noch an der Landessternwarte. Wie haben Sie dann die Gründung des MPIA im Gedächtnis?

Lemke: Elsässer hat mich zum 1. Februar 1969 eingestellt, zusammen mit sieben weiteren Mitarbeitern, zu denen auch Thorsten Neckel, Joachim Hermann, Josef Solf, Elsässers Sekretärin Traudl Filsinger und Bodo Schwarze, Wolfgang Hormuth und Franz Pihale aus den Werkstätten gehörten. Zu diesem Zeitpunkt bestand das Institut also aus neun Personen. Anfangs haben einige MPIAler auf dem Gelände der Landessternwarte in einer Baracke gearbeitet, und erst 1975 sind wir in das neue Gebäude umgezogen.

Parallel dazu verlief dann die Entwicklung von HELIOS.

Leinert: Die deutsche Beteiligung an dieser Raumsonde ist das Resultat eines Treffens zwischen Bundeskanzler Ludwig Erhard und dem amerikanischen Präsidenten Lyndon B. Johnson im Jahr 1965. Mit der Frage, welche Art von Instrumenten Deutschland beisteuern sollte, hat man dann Ludwig Biermann beauftragt, der damals der renommierteste Astronom bei uns war. Er hat natürlich Untersuchungen des von ihm selbst entdeckten Sonnenwindes, aber auch des interplanetaren Staubes vorgeschlagen. Für ihn war Hans Elsässer der Spezialist auf diesem Gebiet, der dann auch das Projekt Zodiakallicht-Photometer zunächst an die Landessternwarte und dann ans MPIA holte.



Abb. V.13.3: Christoph Leinert und Dietrich Lemke am Abschluss des festlichen Kolloquiums.

Das war Deutschlands erste Beteiligung an einer interplanetaren Raumsonde und technologisch mindestens ein doppelter Schritt voran, und damit für uns alle absolutes Neuland. Es war ein junges Projekt, das in vielen Bereichen mit großer Begeisterung von Berufsanfängern betrieben wurde. Ich erhielt die Projektleitung für das Photometer, obwohl ich noch nicht einmal promoviert war. Das war ein Millionenprojekt – heute wäre so etwas undenkbar. Aber es war damals in vielerlei Hinsicht eine andere Zeit als heute. Publizieren zum Beispiel war nicht so wichtig, wenn nur die Arbeiten am Projekt gut vorangingen. Fünf Jahre nach meiner Promotion hatte ich immer noch keine Veröffentlichung in einer referierten Zeitschrift. Das muss man sich einmal vorstellen! Technisch war unser Instrument auf aktuellem Stand und auch erfolgreich. Wir haben damals zum ersten Mal in der Weltraumastronomie Kohlenfaserkunststoff verwendet.

Wie schätzen Sie Elsässers Entscheidungen von damals heute ein?

Leinert: Mit der Beteiligung an HELIOS hat Elsässer viel Fördergeld und Doktoranden ans Institut geholt. Das war für die Entwicklung des MPIA sicher wichtig. Er hat dann aber auch sehr rasch und ohne Rücksprache mit uns eine Beteiligung an Nachfolgeprojekten strikt abgelehnt, obwohl mit ULYSSES – das war eine Raumsonde, die über die Pole der Sonne flog – eine reizvolle Möglichkeit bestanden hätte. Nach seiner Meinung war das wissenschaftliche Problem mit HELIOS im wesentlichen erledigt, oder jedenfalls als Schwerpunkt der Institutsarbeit nicht mehr geeignet.

War dieses Verhalten typisch für Elsässers Institutsführung?

Lemke: Viele Entscheidungen hat er selbst getroffen. Jeder Reisekostenantrag und jede Anschaffung hat er

abgezeichnet. Die einzelnen Arbeitsgruppen hatten administrativ wenig Entscheidungsfreiheit. Was mir immer gefehlt hat, war eine weite Öffnung des Instituts für Gäste aus dem Ausland. Das MPIA wurde anfangs im Ausland nur sehr langsam bekannter. Das Gleiche galt übrigens auch für den Calar Alto. Das Observatorium wurde von uns aufgebaut und fast im Alleingang betrieben: eine faszinierende Leistung, aber es fanden sich dort nach meiner Ansicht einfach zu wenig internationale Kollegen ein.

Heute ist das MPIA im Ausland sehr wohl ein Begriff. Was hat diese Wende Ihrer Meinung nach eingeleitet?

Leinert: Trotz dieser Kritik sehe ich die Fertigstellung des Calar-Alto-Observatoriums als Beginn der neuen Ära. Dadurch sind wir in der Astronomie respektabel geworden. Ich denke dabei an die Entdeckung der Jets junger Sterne durch Mundt und Fried, an Solfs erfolgreiche Einführung dessen, was man heute vornehm Spektrometrie nennt, und anderes mehr. Ein nächster wichtiger Schritt war dann die Berufung von Guido Münch zum zweiten Direktor. Damit kam ein international bekannter und renommierter Astronom ans MPIA, der die Aufmerksamkeit der internationalen Gemeinschaft auf das Institut zog. Voraussetzung für diese Berufung war aber der Calar Alto gewesen.

Lemke: Guido Münch hat zweifellos bedeutend zum Ruf des Institutes beigetragen. In den USA wurde man gelegentlich gefragt, ob man aus Guidos Institut kommt... Dennoch, der Calar Alto ist nach meiner Ansicht bis heute international nicht hinreichend bekannt



geworden, wohingegen die Teleskope der Eso in aller Munde sind. Ich habe Zweifel, ob es bei der zunehmenden Europäisierung sinnvoll war und ist, ein eigenes oder nationales Observatorium zu betreiben. Diese »Dienstleistung« bindet viele Kräfte und Mittel des Institutes. Hier haben unsere Direktoren mit der stärkeren Beteiligung Spaniens eine erfreuliche Neuausrichtung eingeleitet.

Und dann kam als weiterer Schritt die Berufung von Steven Beckwith.

Leinert: Ja, Beckwith hat alles umgekrempelt, und mit ihm hat sich das Institut weiter geöffnet. Er hat uns förmlich gezwungen, internationaler zu agieren!

Lemke: Beckwith war ein großer Glücksfall für das MPIA. Seine Ankunft markiert den Übergang vom Leitungsstil durch Einzelpersonen, typisch bis in die 60er und 70er Jahre, zu einer kollegialen Leitung und der Übertragung von Verantwortung an die Arbeitsgruppen. Diesen auch stark wettbewerbsorientierten Arbeitsstil hatten wir schon in unserer Postdoc-Zeit in den USA kennen gelernt. Mit ihm kamen viele Gäste aus dem Ausland. Beckwith hat ein wissenschaftliches Beratungskomitee fest etabliert. Alle Themen wurden nun ganz offen diskutiert und auch zügig entschieden. Die Verantwortung für Budgets zum Beispiel wurde auf die Gruppenleiter übertragen. Mit Steve begann wirklich eine neue, demokratische Ära. Heute wird dieser Stil von beiden Direktoren konsequent fortgesetzt.

Leinert: Beckwith war auch sehr daran interessiert, technische Probleme zügig zu lösen. Wenn es sich abzeichnete, dass wir in unseren eigenen Werkstätten nicht schnell genug vorankamen, hat er nicht gezögert, die Aufträge

Abb. V.13.4: Hans-Walter Rix umrahmt von den beiden Emeriti, die jeweils gerade »First Light« für ein vom Institut überreichtes »Small Binocular Telescope« vermelden.

nach außen zu vergeben. Zu Elsässers Zeiten wäre das so nie praktiziert worden.

Verlief der Übergang schmerzfrei?

Leinert: Nein. Ich erinnere mich noch, dass Beckwith in seiner Antrittsrede sagte, der Calar Alto sei angesichts der großen Teleskope bei der Eso und anderswo nicht mehr wettbewerbsfähig. Das war natürlich ein schwerer Schlag für uns alle.

Lemke: Aber nicht ganz falsch. Nach dem verdienstvollen Aufbau des Calar Alto hatte sich Elsässer sehr auf sein Observatorium konzentriert. Es fehlten Pläne für die Erweiterung und die Internationalisierung. In den 80er Jahren war er kein Befürworter eines Deutschen Großteleskops, obwohl das Ministerium anscheinend nicht abgeneigt war, dieses Projekt zu fördern.

Leinert: Ja, damals hat auch die Weiterentwicklung des Calar Alto stagniert. Andererseits haben wir noch zu Elsässers Zeiten mit dem Bau von Großinstrumenten für Eso, wie CONICA angefangen. Das muss so um 1989 herum gewesen sein. Und dann hörte ich davon, dass am VLT ein Infrarot-Interferometer gebaut werden sollte. Dafür habe ich mich sehr interessiert, weil ich an die Zukunft dieser Technik glaubte und hoffte, dort meine Erfahrungen aus der Speckle-Technik einfließen lassen zu können. Elsässer war durchaus offen für diese Möglichkeit. Steve Beckwith hat dieses Projekt MIRA dann ganz stark unterstützt und gefördert.

Wohin sollte das Institut Ihrer Meinung nach steuern?

Lemke: Gegenwärtig geht das Institut ja einen ausgezeichneten Weg, wir wachsen zu einem sehr großen internationalen Institut heran. – Ich bin ein ganz starker Befürworter von Beteiligungen an Projekten der ESA und Eso. Diese beiden Organisationen sind ein Segen für die Wissenschaft und wirklich mächtige Instrumente in Europa. Dort werden Projekte mit großer Zuverlässigkeit und Transparenz durchgezogen. Die Dienstleistung eines professionellen Betriebes großer Teleskope am Boden und im Weltraum ist für Astronomen der Mitgliedsländer frei. Und Deutschland ist ein gewichtiger Beitragszahler für beide Organisationen. Wir bauen Instrumente für diese Observatorien und erhalten Garantiezeit. Unser Institut mit seinen hervorragenden technischen Abteilungen kann und sollte auch immer wieder mal die Führung eines solchen Instrumenten-Konsortiums übernehmen. Das ist gelegentlich anders bei entsprechenden Einrichtungen in den USA, wo große Projekte, die jahrelang gefördert wurden, plötzlich zur Disposition stehen, weil sich politische Interessen verlagert haben. Ein Beispiel, das uns selbst betroffen hat, war das Infrarotteleskop GIRL, aktuell sieht man es an dem Infrarotflugzeug SOFIA. Nachdem dort weit mehr als hundert Millionen Dollar hineingesteckt worden sind, steht das Projekt jetzt möglicherweise vor dem Abbruch, weil plötzlich kein Geld mehr für den laufenden Betrieb vorhanden sein soll. Dabei waren die hohen Betriebskosten von Anfang an klar.



Leinert: Bei der heutigen allgemeinen Lage sehe ich das ähnlich. Aber in den 70er und 80er Jahren war es für uns schon ein großer Vorteil, einen privilegierten Zugang zu den großen Teleskopen auf dem Calar Alto zu haben. Dort konnten wir unsere Ideen und Instrumente testen und verbessern, und wegen dieser Möglichkeiten sind auch viele Doktoranden an unser Institut gekommen. Selbst ein so erfolgreicher Astronom wie Reinhard Genzel hat mir damals gesagt, er würde uns um diese Möglichkeit beneiden. Heute haben wir eine ganz andere Situation, da kommt es eher darauf an, an der Entwicklung von Instrumenten für die großen Observatorien beteiligt zu sein, am Boden wie im Weltraum.

Wie sehen Sie die Aussichten beim LBT, dem James Webb Space Telescope, einem möglichen Observatorium in der Antarktis und einem Extremely Large Telescope?

Lemke: Beim LBT könnten einige Schwierigkeiten auf uns zukommen, wie wir sie beim Calar Alto hatten: Die hohen jährlichen Betriebskosten können eines Tages problematisch werden, da sie von verschiedenen Instituten im In- und Ausland gemeinsam aufgebracht werden müssen. Deswegen bin ich – wie schon gesagt – ganz stark für internationale Beteiligungen bei starken Partnern, wie wir es mit Iso bei der ESA gemacht haben. Und in ähnlicher Form wird es voraussichtlich mit MIRI und NIRSPEC auf dem James Webb Space Telescope von ESA/NASA laufen.

Ein Observatorium in der Antarktis sollte man unbedingt weiter verfolgen, aber es gibt noch eine Fülle ungeklärter Fragen. Wie zum Beispiel kann ich Instrumente in etwa 30 Meter Höhe über einem Eisschild für lange Zeit stabil aufstellen? Was bewirkt die Aurora und wie ist das Seeing wirklich? Interessant ist der Standort gewiss – aber ob wir dabei wirklich schon in der Erkundungsphase mitmachen müssen?

Leinert: Das ELT wird aller Voraussicht nach in vielleicht 15 bis 20 Jahren kommen. Die Amerikaner arbeiten ernsthaft an einem nationalen 30-m-Teleskop, und zu Recht betreiben die Europäer die Entwicklung eines Teleskops ähnlicher Größe. Der Beitrag unseres Instituts zu so einem riesigen Projekt kann nur klein sein. Eine Mitarbeit in der Definitionsphase, wie jetzt für das geplante Infrarotinstrument TOWL, kann sich später sehr wohl

Abb. V.13.5: Dietrich Lemke arbeitete während des Jahres 1972 als Research Associate am Lunar and Planetary Laboratory der Universität von Arizona, Tucson, USA. Mit dem dort von Frank J. Low erfundenen heliumgekühlten Bolometer gelangen am 28-inch-Teleskop auf den Catalina-Bergen wichtige Messungen an HII-Regionen in dem vom Boden aus schwer zugänglichen 20- μm -Bereich. Die nach heutigen Maßstäben einfache technische Ausstattung des Observatoriums war damals am Beginn der Infrarot-Astronomie die weltweit leistungsfähigste. Jede Beobachtungsnacht erforderte 12 Stunden unter freiem Himmel.



auszahlen, wenn es um eine einflussreiche Beteiligung am Bau oder um bessere Möglichkeiten bei der Nutzung geht. Das sind schwierige Entscheidungen, für die ich den Direktoren eine glückliche Hand wünsche. Jedenfalls hat sich am Beispiel der Himmelsdurchmusterung SDSS gezeigt, dass auch bei einer kleinen Beteiligung an einem großen Projekt das Ergebnis für unser Institut sehr befriedigend sein kann. Längerfristig muss man sich fragen, ob immer größere Teleskope der richtige und einzige Weg in die Zukunft der optischen Astronomie sind. Vielleicht sollte man wie die Radioastronomen auf interferometrische Anordnungen setzen, etwa indem man ein Dutzend 10-m-Teleskope, die über einen kilometergroßen Bereich verteilt sind, zusammenschaltet.

Der ehemalige Ministerialdirigent im Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hermann-Friedrich Wagner, hat in einem Interview (siehe den nachfolgenden Abschnitt) geraten, am MPIA einen dritten Direktor einzustellen. Wie sehen Sie das?

Lemke: Ich würde das auch gutheißen. Andere Max-Planck-Institute vergleichbarer Größe haben tatsächlich drei oder vier Direktoren. Für uns wäre es wichtig, eine dritte Person zu haben, die als Bindeglied zwischen den Arbeitsgebieten von Henning (Stern- und Planetenentstehung) und Rix (Galaxien und Kosmologie)

Abb. V.13.5: Christoph Leinert inmitten von Kollegen im Kontrollzentrum der DFVLR (heute DLR) in Oberpfaffenhofen kurz nach dem Start von HELIOS B im Januar 1976. (Bild: Norbert Salm)

fungiert. Das könnte ein verbindendes wissenschaftliches Thema sein, aber auch Spitzentechnologie in der astrophysikalischen Instrumentierung, beispielsweise Interferometrie, Infrarot, Wide Field Imaging, Adaptive Optik betreffen.

Herr Leinert und Herr Lemke, wir danken Ihnen für dieses Gespräch.

Leinert, Lemke: Wir möchten dieses Gespräch allerdings nicht beenden, ohne unsere Freude darüber auszudrücken, dass wir auch nach unserer Pensionierung noch ein (jetzt gemeinsames) Zimmer im Institut zur Verfügung haben. Hier können wir noch unabgeschlossene Arbeiten fortsetzen und unseren Nachfolgern mit Rat zur Seite stehen – wenn sie es wollen.

*(Das Gespräch führten
Thomas Bührke und Jakob Staude)*

V.14 Wo steht das MPIA in unserer Forschungslandschaft?

Ein Gespräch mit Hermann-Friedrich Wagner, ehemals Ministerialdirigent im Bundesministerium für Bildung und Forschung und seit 2003 Vorsitzender des Kuratoriums am MPIA

Hermann-Friedrich Wagners Verbindung zur Astronomie besteht seit gut einem halben Jahrhundert. Er baute mit zwölf Jahren sein erstes Teleskop, begann 1960 sein Studium der Physik und Astronomie an der Universität Tübingen, und hörte dort die Vorlesungen bei Heinrich Siedentopf. Dabei lernte er auch Hans Elsässer kennen, den späteren Gründungsdirektor des MPIA, der sich 1959 bei Siedentopf habilitiert hatte. Dann wechselte er jedoch in das boomende Gebiet der Kernphysik, worin er 1969 in Bonn promovierte. Von 1970 bis 1972 hatte er eine Professur für Physik an der Universität Kabul inne, danach arbeitete er zunächst für das Bundesministerium für Entwicklungshilfe und wenig später im Bundesministerium für Bildung und Forschung, wo er lange Zeit für die Großforschungszentren und die Energieforschung tätig war und von 1998 bis 2005 die Zuständigkeit für die Vergabe von Geldern für die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung übernahm. Herr Wagner äußert sich in diesem Gespräch zur Stellung des MPIA im nationalen und internationalen Umfeld und schildert seine Einschätzung der Zukunftsaussichten der astronomischen Forschung einerseits und der Chancen der Astronomen auf dem Arbeitsmarkt eines High-Tech-Landes wie Deutschland andererseits.

Seit wann kennen Sie den Königstuhl?

HFW: Auf den Königstuhl kam ich erstmals 1962, weil Siedentopf uns Studenten dorthin eingeladen hatte. Damals war vom MPIA und seinen Großteleskopen noch keine Rede (die Gründung des Instituts wurde erst 1967 beschlossen), aber Hans Elsässer war gerade zum Direktor der Landessternwarte berufen worden.

Sie haben sich dann auch gegen eine Promotion in Astronomie entschlossen. Warum?

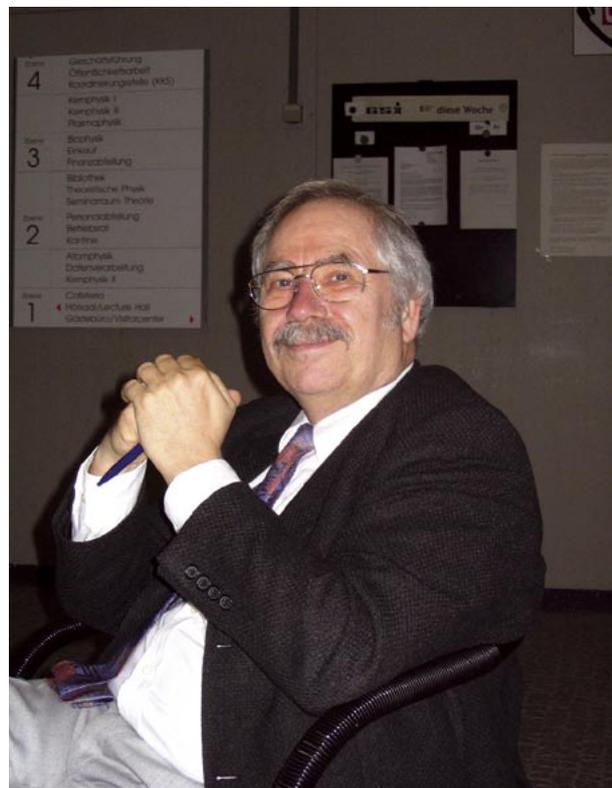
HFW: Ausschlaggebend war für mich damals ein einziges Argument: Ich hielt die Berufsaussichten der Astronomen für sehr schlecht und ging deswegen zu den Kernphysikern, obwohl mich auch eine Promotion bei Herrn Priester in Bonn sehr gelockt hatte. Das größte Teleskop der Bundesrepublik war der 1-Meter-Reflektor in Hamburg-Bergedorf (Baujahr 1910!), und von Weltraumastronomie träumten erst die wenigsten. Ich erinnere mich sogar noch genau, wie Siedentopf uns haarklein bewies, warum es nie möglich sein würde, Weltraumteleskope zu bauen. Er war der festen Überzeugung, dass man die Signale nicht mit ausrei-

chender Schärfe empfangen könne. »Datenempfang vom Mars können Sie vergessen«, meinte er. Wie sehr sich Siedentopf in diesem Punkt geirrt hat, ist heute offensichtlich.

Und wie sehen Sie Ihre Entscheidung aus heutiger Sicht?

HFW: Damals ahnte ich nicht, welche stürmische Entwicklung der Astronomie in unserem Lande bevorstand. Wer heute noch so denkt, wie ich damals, unterliegt einem großen Irrtum. Junge Astrophysiker erhalten im Allgemeinen eine hervorragende Ausbildung im High-Tech- und IT-Bereich, also genau in den Gebieten, die heute überall gefragt sind. Damals dachte ich, Astronomie sei just for fun. Die heutige Astrophysik ist for fun und für eine hervorragende Berufsaussicht – das ist ihr großer Vorteil. Festkörperphysiker sind meiner Meinung nach zu stark auf einen engen Bereich fixiert und werden später vielleicht bei Siemens auch Festkörperphysik machen können. Aber Astrophysikerinnen und Astrophysiker haben eine breite Ausbildung und können alles Mögliche tun.

Abb. V.14.1: Hermann-Friedrich Wagner, Vorsitzender des Kuratoriums am MPIA.



Wie würden Sie die heutige Astrophysik im Reigen anderer physikalischer Forschungsgebiete einordnen?

HFW: Die Astrophysik ist für mich das interessanteste Gebiet überhaupt. In welcher Forschungsbranche gibt es denn mehr Aufregung als hier?

Unterstützen Sie auch den Bau neuer Großteleskope?

HFW: Unbedingt. Teleskope waren für mich schon immer »Entdeckungsmaschinen«. Wenn Sie ein Teleskop haben, das leistungsfähiger ist als seine Vorgänger, werden Sie damit immer etwas Neues finden. Sie können nie sicher sein, was es sein wird, aber auf irgendetwas Neues stoßen Sie immer. Das ist für mich das Faszinierende. Im Vergleich dazu ist ein Großbeschleuniger wie der LHC des CERN eine »dedicated facility«, mit der Sie gezielt nach etwas ganz Speziellstem suchen, so als würden Sie den Seeweg nach Indien suchen. Deshalb habe ich von Anfang an das LBT unterstützt, oder jetzt den neuen Röntgenlaser X-FEL bei DESY.

An solchen Observatorien wird dann ja auch eine große Zahl von jungen Leuten ausgebildet.

HFW: Genau. Da kommen nur Leute hin, die eine gewisse Abenteuerlust haben, und die wirklich gut sind. Die werden bestens trainiert – und das ist genau das, was die deutsche Industrie benötigt.

Also weiterhin Geld für Großobservatorien wie das LBT?

HFW: Unbedingt. Der harte Konkurrenzkampf an einer solchen Institution sorgt dafür, dass nur die besten Studentinnen und Studenten dorthin gelangen. Nicht alle von ihnen werden in der Forschung bleiben, aber die übrigen werden keine Probleme haben, einen Job zu finden – da bin ich mir sicher. Ich sehe solche Einrichtungen als Magneten für die zukünftige Forscher-Elite in Deutschland, um es einmal drastisch auszudrücken. Das muss für die öffentliche Hand der wesentliche Grund sein, diese Projekte zu fördern.

Ist diese Ansicht auch unter Ihren ehemaligen Kollegen im Ministerium verbreitet?

HFW: Ja, ich denke schon. Und ich habe das auch immer wieder betont.

Und wie sieht man in der Politik grundsätzlich die Förderung von angewandter Forschung gegenüber der Grundlagenforschung?

HFW: Wir haben Milliarden von Mark und Euro in unterschiedliche Bereiche der angewandten Forschung gepumpt, zum Beispiel in die Energieforschung oder in die IT-Branche. Was dabei herausgekommen ist, war im Verhältnis zum Aufwand an Steuergeldern gemessen am tatsächlichen industriellen Erfolg meiner Erfahrung nach eher enttäuschend. Dagegen haben wir mit anspruchsvollen Geräten in der Grundlagenforschung immer sehr erfolgreich die zukünftige Generation von guten High-

Tech- und IT-Leuten gefördert, und die braucht unser Land. Auch aus diesem Grund hat Frau Bulmahn sehr weitsichtig zum Beispiel die beiden Großprojekte FAIR (den neuen Beschleuniger an der GSI in Darmstadt) und X-FEL genehmigt. Wichtig ist dabei übrigens auch der Kopf des Projektes. Wenn ich früher gesehen habe, dass der Antragsteller eines Projektes das Gerät unbedingt wollte und sich als fähige Führungsperson erwies, dann hatte er gleich gute Karten. Sie müssen etwas wirklich wollen, um es zu erreichen. Das ist ein wichtiges Förderkriterium. Halbherziges Lavieren führt nicht zum Ziel. Es werden Gelder sehr oft eher nach Köpfen als nach Projekten vergeben.

Wo positionieren Sie das MPIA in der nationalen und internationalen Forschungslandschaft?

HFW: Das MPIA verbindet exzellente Wissenschaft vorbildlich mit ambitionierter technologischer Entwicklung, die das Feld ja vorantreibt. Dazu sehe ich, dass das Institut den größten deutschen Anteil an dem bald leistungsstärksten Teleskop der Welt, dem LBT, hat. Das verleiht dem MPIA eine sehr starke Stellung. Gleichzeitig hat das Institut hervorragende Werkstätten. Und der Ruf des MPIA und seiner exzellenten wissenschaftlichen Arbeit – das kann ich aus meiner Erfahrung sagen – ist sehr gut. Aber Sie haben leider meiner Erfahrung mit Forschungseinrichtungen nach zu wenig Personal, um das Potenzial voll auszuschöpfen.

Mehr Personal fordert fast jedes Institut. Was bräuchte das MPIA Ihrer Meinung nach vor allem?

HFW: Für seine langfristige, strategische Stärkung bräuchte das Institut vor allem einen dritten Direktor. Es wäre schade, wenn die beiden jetzigen Direktoren, die voll in der Forschung involviert sind, sich durch die Verwaltung aufreiben würden. Und dann würde ich bei gleicher Qualifikation ausdrücklich für eine Direktorin plädieren.

Warum eine Frau?

HFW: Zum einen besteht die Menschheit zu gut 50 % aus Frauen, deren Potenzial für die Naturwissenschaften einen unschätzbaren Wert darstellt, und die deshalb einen viel besseren Zugang zur Forschung, auch in leitender Position, haben müssen als bisher. Zum anderen haben Frauen eine andere, komplementäre Denkweise und einen anderen Führungsstil als Männer, so dass eine Symbiose in der Leitung des MPIA dem Institut große Vorteile bringen könnte. Deutschland hat viel zu wenige Frauen in Führungspositionen. Das MPIA könnte deshalb auch auf diesem Gebiet ein Beispiel geben!

Wo sehen Sie besondere Chancen für das MPIA?

HFW: Aufgrund seiner Erfahrung auf beiden Gebieten hat das MPIA eine gute Chance, sich in der Debatte um erdgebundene gegen weltraumgestützte Astronomie in Position zu bringen. Ich bin ein großer Verfechter

der erdgebundenen Observatorien, weil sie aus meiner Sicht billiger und vielseitiger sind. Das betrifft das gewaltige Potenzial des LBT und sollte beim ELT (dem von der Eso geplanten Extremely Large Telescope) und den anderen Teleskopen der nächsten Generation ebenfalls zum Tragen kommen. Mit seinem großen Know-how, beispielsweise auf dem Gebiet der Adaptiven Optik und der Interferometrie, kann das MPIA bei den Teleskopen der 30- bis 100-Meter-Klasse zweifellos eine bedeutende Rolle spielen. Aber auch die maßgebliche Beteiligung des MPIA an der Instrumentierung der Flugschiffmission JWST zeigt, wie hoch das am Institut erarbeitete Know-how international eingeschätzt wird. Dies soll jedoch nicht den Eindruck vermitteln, als wäre ich ein Gegner der Weltraumastronomie. Ich erwarte aber, dass der Konkurrenzkampf zwischen beiden Beobachtungsarten in Zukunft immer härter werden wird, und dass deshalb das Preis-Leistungs-Verhältnis bei Investition und Betrieb eine ganz wesentliche Rolle spielen wird. Und da sehe ich aus meiner Perspektive angesichts der technischen Entwicklungen Vorteile bei der erdgebundenen Astronomie.

Gibt es auch Gefahren?

HFW: Selbstverständlich besteht prinzipiell immer die Gefahr, dass möglicherweise in der Verwaltung der Max-Planck-Gesellschaft nicht klar gesehen wird, welches Entdeckungs- und Ausbildungspotenzial in der astrophysikalischen Forschung steckt. Damit besteht auch die Gefahr, dass zwei oder mehrere der astronomisch ausge-

richtete MPIs irgendwann einmal zusammengelegt werden. Ich würde das als großen Fehler ansehen, weil auch die anderen MPIs in Bonn, Garching und Katlenburg-Lindau exzellent sind und sich gegenseitig hervorragend ergänzen. Zum Glück ist die Generalverwaltung der MPG im Kuratorium sehr hochrangig vertreten, so dass diese Probleme dort ohne Vorbehalt diskutiert werden können. Ich würde auch eine engere Abstimmung der Kuratorien dieser Institute untereinander sehr begrüßen.

Sehen Sie langfristig eine Existenzgefährdung für das MPIA?

HFW: Auf keinen Fall. Das Institut hat ein großes Potenzial, und das muss es voll ausschöpfen. Die MPIs leben ja auch davon, dass sie sich einem stetigen Wandel unterziehen. Stillstand ist wissenschaftlicher Tod. Ich sehe aber eine unglaubliche Dynamik am MPIA. Und – wie gesagt – diese Dynamik könnte mit einem dritten, hoffentlich weiblichen Direktor noch einmal einen starken Schub erhalten.

Sie sind Vorsitzender des Global Science Forums der OECD in Paris, das sich unter anderem auch um eine Koordinierung und eine Kooperation in der weltraum- und erdgebundenen Astronomie bemüht. Können Sie diese Problematik kurz erläutern?

HFW: Weltraumteleskope haben ohne Frage in bestimmten Bereichen ihre Berechtigung. Aber die Aktivitäten im Weltraum und am Boden müssen besser miteinander koordiniert werden. Ich kann mir nicht vorstellen, dass Eso und Esa zukünftig weiterhin nebeneinander existieren können, ohne sich besser abzusprechen. Das ist aber nur meine persönliche

Abb. V.14.2: Im Gespräch: Jakob Staude (*links*) und Hermann-Friedrich Wagner.



Meinung. Ein Anzeichen dafür sehe ich darin, dass die »Weltraumastronomen« an einer Koordinierung offensichtlich wenig Interesse haben, denn ESA und NASA haben an den Astro-Workshops 2003/2004 des Global Science Forums nicht teilgenommen, in denen eine Art Roadmap über die nächsten 20 Jahre für die Großgeräte der Astronomie erarbeitet wurde. Eine ähnliche Aktivität in der Hochenergiephysik hatte 2004 zum Beispiel großen Einfluss auf die Initiierung der weltweiten Arbeiten zum Linear Collider.

Eine Gruppe deutscher Astrophysiker unter der Leitung von Günther Hasinger hat kürzlich einen »Brandbrief« an das Ministerium geschrieben. Anlass waren die schwindenden nationalen Mittel für die extraterrestrische Forschung. Wie stehen Sie dazu?

HFW: Ich stimme Herrn Hasinger da voll zu. Deutschland ist der größte Beitragszahler bei ESA und finanziert somit zu einem ganz erheblichen Teil die europäischen Projekte mit. Gleichzeitig fehlen unseren Forschern aber die nationalen Mittel, um sich zum Beispiel mit Instrumenten an diesen Projekten zu beteiligen, oder um Wissenschaftler einzustellen, welche die gewonnenen Daten auswerten könnten. Deutschland bezahlt also die Saat, kann sich aber am Einfahren der Ernte nicht hinreichend beteiligen.

Wo liegt das Versäumnis?

HFW: Von Versäumnissen kann man hier nicht sprechen. Die öffentlichen Mittel für die Forschung sind nun mal begrenzt. Das ist in anderen Ländern ähnlich, wobei wir jedoch den Vorteil haben, dass bei uns Wissenschaft und Forschung oben auf der politischen Werteskala stehen. Aber die Politik muss Prioritäten setzen, wie sie die Gelder einsetzen will. In diesem Fall sind sie leider nicht zum Vorteil für die extraterrestrische Forschung ausgefallen. Ich denke, man muss das politische Primat anerkennen, ohne das Ergebnis jedoch von der Sache her zu akzeptieren. Die Holländer beispielsweise haben da anders entschieden.

Noch einmal zurück zum MPIA. Wie präsentiert sich das Institut Ihrer Ansicht nach in der Öffentlichkeit?

HFW: Das ist ein Aspekt, den man in der Tat niemals unterschätzen sollte. Ein Top-Institut muss seine wissenschaftlichen Ergebnisse so aufbereiten, dass auch die Menschen auf der Straße das verstehen. Und ich

finde es großartig, dass das MPIA die Fortbildung von Lehrern fördert und mit »Sterne und Weltraum« den Physikunterricht in den Schulen unterstützt. Das wiegt wesentlich schwerer als die normale Öffentlichkeitsarbeit eines Instituts oder einer Universität.

Haben Artikel in »Sterne und Weltraum« hin und wieder auch zu Ihrer eigenen Meinungsbildung im Ministerium und damit vielleicht zur Unterstützung von Projekten beigetragen?

HFW: »Sterne und Weltraum« gehörte bei mir und bei vielen meiner Kollegen zur Standardlektüre. Und es gab sehr viele Beiträge, aus denen ich viel gelernt habe, und die deshalb meine Entscheidungen mit beeinflusst haben. Das ist schon eine tolle Zeitschrift. Ich bin Leser seit 1974.

Wie sehen Sie Ihre Aufgabe als Vorsitzender des Kuratoriums?

HFW: Das Kuratorium hat zwar keinen direkten Einfluss auf die Forschungsrichtung oder den personellen Bestand des Instituts. Ich sehe aber das Kuratorium als Mittler zwischen dem Institut auf der einen, und Wirtschaft, Medien und Politik auf der anderen Seite. Ich bin wirklich sehr stolz auf diese Position und bereite mich immer, wie auch meine Kollegen, ausführlich auf die Sitzungen vor. Unsere Einflussnahme besteht wohl in erster Linie darin, intelligente Fragen aus den unterschiedlichen Bereichen, die wir vertreten, zu stellen, und damit zu einer weiterführenden Diskussion anzuregen. Deshalb bin ich ja auch so froh über die sehr aktive Beteiligung der MPG-Verwaltung im Kuratorium.

Und wie kommen Sie zu intelligenten Fragen?

HFW: Ich sammle das ganze Jahr über alle Artikel und Informationen, die irgendwo über das Institut im Internet, in Zeitungen und Zeitschriften erschienen sind, oder die ich auf Konferenzen bekomme. Und natürlich arbeite ich den Jahresbericht genau durch!

Herr Wagner, wir danken Ihnen für dieses Gespräch.

*(Die Fragen stellten
Thomas Bührke und Jakob Staude)*

Personal

Direktoren: Henning (Geschäftsführung), Rix

Wissenschaftlicher Referent: Jäger

Öffentlichkeitsarbeit (Leitung): Staude

Verwaltung (Leitung): Voss

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Afonso (ab 15.9.), Bailer-Jones, Barden, Bell, Beuther (ab 15.9.), Brandner, Butler, Cannon, Dannerbauer, De Bonis (ab 19.7.), De Jong (ab 1.8.), Dullemond, Feldt, Fendt, Fernandez, Fried, Fujita (ab 15.9.), Gässler, Graser, Herbst, Hippelein, Hippler, Hinz (ab 5.12.), Hofferbert, Huisken, Jäger (ab 17.5.), Jahnke (ab 16.9.), Klaas, Klahr, Kornet, Krasnokutski (bis 30.4.) Krause (ab 15.9.), Kürster, Kuhlmann, Launhardt, Leinert, Lemke, Lenzen, Marien, Mehlert, Masciadri (1.9. bis 30.11.), Meisenheimer, Mundt, Przygodda (bis 31.1.), Pitz, Re Fiorentin (ab 1.10.), Rockenfeller (15.8. bis 14.12.), Röser, Sakelliou (ab 1.3.), Schinnerer, Schreiber, Setiawan, Semenov, Soci (bis 31.7.), Somerville (ab 6.6.), Staude, Steinacker (bis 30.11.), Stickel, Stolte (ab 1.10.), Tapken, van den Bosch (ab 1.9.), Walcher (bis 15.3.), Walter, Wolf R. (Freistellung Altersteilzeit ab 15.11.2004), Wolf, S.

Doktoranden: Arold (ab 1.10.), Berton, Bigiel (ab 1.3.), Birkmann, Borelli (ab 1.10.), Boudreault (ab 1.10.), Brauer (ab 1.4.), Carmona (ab 1.11.), Chen, Debieu, Dib (bis 14.5.), Dziourkevitch (bis 5.7.), D'Souza (bis 31.3.), Egner, Falter, Fujita (ab 15.9.), Franco Rico (ab 1.4.), Györyova (bis 31.1.), Haan (ab 1.10.), Hanke, Häußler, Heinzeller (ab 1.9.), Hennemann (ab 5.9.), Janson (ab 1.8.) Johansen, Keil, Kellner, Klement (ab 1.8.), Kovacs (bis 30.4.), Krmptic, Linz (bis 31.7.), Llamas Jansa (bis 31.3.), Mignone (1.12.), Neumayer, Nicol (ab 1.9.), Peter, Puga (bis 31.1.), Quanz, Ratzka, Riechers, Roccatagliata (ab 18.8.), Rodler, Rodmann (bis 15.9.), Rodriguez (ab 1.7.), Schartmann, Schegerer, Schütz (bis 28.2.), Smolicic, Stegmaier, Stumpf, Tam (1.10.), Tamburro, Tristram, Umbreit (bis 31.3.), Zub (1.10.), Zatloukal (ab 15.9.)

Diplomanden und studentische Hilfskräfte: Geißler (bis 30.9.), Hormuth, Kerzendorf (1.7. bis 30.9.), Kitzing (bis 31.10.), Kuposov, Meyer (ab 1.11.), Moster (ab 1.5.), Rockenfeller (bis 30.6.), Schmidt, J., Schmidt, T. (ab 15.11.), Stilz (ab 10.10.); Volchkov (ab 21.2.), Weise

Diplomanden/Master Studenten (FH): Dörsam (14.3. bis 13.9.), Eggert (ab 1.3.), Rehbein (ab 19.9.)

Wissenschaftliche Dienste: Berwein (ab 1.7.), Bizenberger, Grözinger, Huber, Kittmann (ab 1.9.), Laun, Leibold, Naranjo, Neumann, Pavlov, Quetz, Schmelmer

Rechner, Datenverarbeitung: Briegel, Hiller, Rauh, Richter, Storz, Tremmel, Zimmermann

Elektronik: Alter, Becker (bis 30.11.), Ehret, Grimm, Klein, Lehmitz (ab 1.4.), Mall, Mohr, Ramos, Ridinger, Salm (bis 30.6.), Wagner, Westermann, Wrhel

Feinwerktechnik: Böhm, Heitz, Maurer (ab 27.2.), Meister, Meixner, Morr, Pihale (bis 30.4.), Sauer F. (ab 27.2.), Sauer W.

Konstruktion: Baumeister, Ebert, Münch, Rohloff, Rosenberger (bis 8.5.)

Fotolabor: Anders-Öczcan

Grafikabteilung: Meißner, Müllerthann (ab 27.6.), Weckauf (bis 30.11.)

Bibliothek: Dueck

Verwaltung: Apfel, Gieser, Heißler, Hölscher, Kellermann, Ollenhauer (ab 15.11.), Papousado, Schleich, Voss, Zähringer

Sekretariat: Bohm, Janssen-Bennynck, Koltes-Al-Zoubi, Seifert

Technischer Dienst und Kantine: Behnke, Herz, Jung, Lang, Nauß, Witzel B., Witzel F., Zergiebel

Auszubildende: Baumgärtner, Euler, Finzer (ab 1.9.), Gärtner, Maurer (bis 26.2.), Müllerthann (bis 26.6.), Resnikschek, Sauer. F. (bis 26.2.), Schewtschenko, Schmitt, Stadler

Freie Mitarbeiter: Th. Bürke

Stipendiaten: Afonso (bis 31. 8.), van Boekel (ab 15.1., Bouwman, Coleman (ab 1.10.), De Bonis (bis 18.7.), Dziourkevitch (ab 6.7.), Goldmann, Gouliermis, Goto, Heymans (bis 1.7.), Jester (ab 1.10.), Kasper (1.2. bis 30.4.), Khanzadyan (bis 30.11.), Knudsen, Krasnokutski (1.5. bis 30.6.), Labadie (ab 21.11.), Linz (ab 1.8.), Masciadri (bis 31.8.), Mosoni (bis 31.1.), Pasquali (ab 1.10.), Pavlyuchenkov (ab 12.9.), Penarubbia, Prieto, Roussel (ab 1.10.), Sicilia Aguilar (ab 1.9.), Staicu (1.2. bis 31.12.), Swain (ab 1.9.), Tisserand (1.2. bis 31.5.), Trujillo (bis 31.8.), Umbreit (15.7. bis 31.12.), Weldrake (ab 1.6.), Zheng (ab 30.7.2004), Zucker (bis 31.10.)

Wissenschaftliche Gäste: Zinchenko, Novgorod (Januar), Naab, München (Januar), Maoz, Tel Aviv (Januar), Somerville, STSci (Januar-Februar), Klessen, AIP (Januar-Februar),

Cappellari, Leiden (Februar), Maier, Zürich (Februar), Dolag, MPA Ottobrunn, (Februar), Tisserand, CEA/DAPNIA/SPP, Paris (Februar), Brosch, Wise Observatory, Tel Aviv (Februar), Mazeh, Wise Observatory, Tel Aviv (Februar), Sicilia-Aguilar, CFA Harvard (Februar), Balbus, Ecole Normale Supérieure (Februar), Croton, MPA Ottobrunn (Februar), Meijer, Univ. Amsterdam (Februar), Ligori, INAF Torino (Februar), MacArthur, British Columbia (Februar), De Jong, Groningen (Februar), Fujita, Univ. of California (Februar), Pontappidan, Leiden (Februar), Yaitskova, ESO Garching (Februar), Fan, Steward Observatory (Februar), Krause, Steward Observatory (Februar), Navarro, British Columbia (Februar), Scoville, California Institute of Technology (März), Jester, Fermi Lab (März), Tsalmantza, Univ. of Athens (März), Beaulieu, CNRS Paris (März), Mokler, MPE Garching (März), Voshchinnikov, Sobolev Astron. Inst., St. Petersburg (März), Botzler, Univ. sternwarte München (März), Maier, Univ. Zürich (März), Tisserand, CEA/DAPNIA/SPP, Paris (April), Kiss, Budapest (April), Abraham, Budapest (April), Kospal, Budapest (April), Carmona, ESO Garching (April), King, Frankfurt (April), Boersma, Groningen (April), Somerville, STScI (April), Swain, Grenoble (April), Lahouis, SRON Groningen (April – Juni), Smith, Armagh Observatory (Mai), Günther, Tübingen (Mai), Lawson, New South Wales (Mai), Waters, Amsterdam (Mai), Schmid, ETH Zürich (Mai), Gratton, Padova (Mai), Turatto, Padova (Mai), Pascucci, Steward Observatory, (Mai), Allard, Lyon (Mai), David, Lyon (Mai), Labadie, Grenoble (Mai), Oka, Chicago (Juni), Stuart, Univ. of Canterbury, New Zealand (Juni), De Jelte, Groningen (Juni), Collioud-Marichalot, Observatoire de Cote d'Azur (Juni), Wilhelm, Ohio (Juni), Vasyunin, Ural State University (Juni), Swain, Grenoble (Juni), Le Roux, Arcetri (Juni), Bondi, IRA (Juni), Walker, Rutherford Appleton Laboratory (Juni), Ciliegi, Bologna (Juni), Abel, FH Hannover (Juni), Roccatagliata, ESO (Juni), Fedele, ESO (Juni), Toergensen, Lund (Juni), Stecklum, Tautenburg (Juni), Westra, Stromlo (Juni), Wolf, Oxford (Juni), Madau, Univ. of California (Juli), Osmer, Ohio (Juli), van den Bosch, ETH Zürich (Juli), Pasquali, ETH Zürich (Juli), Schiminovich, Columbia Univ. (Juli), Kodama (Juli), Peng, STScI (Juli), De Jong (Juli), Theverin, Nice (Juli), Smith, Armagh Observatory (Juli), Kiss, Konkoly Observatory (Juli), Abraham, Konkoly (Juli), Coleman, Mount Stromlo (Juli), Hartung, ESO Chile (August), Barrado y Navascues, LAFF-INTA, Madrid (August), Pelegrina, I.E.S. Marmaria (August), Blain, California Inst. of Technology (August), Lawson, UNSW, Canberra (August), Mazeh, Wise Observatory (August), Reiners, Univ. of California (August), Shields, Ohio University (August), Higuchi, Nat. Astron. Obs. Japan (Sept.), Natta, Arcetri (Sept.), Beckwith, STScI (Sept.), Wang, Purple Mountain Obs. (Sept.), Tamuz, Wise Observatory (Sept.), Mosoni, Konkoly Observatry (Sept.), Trager, Groningen (Sept.), Dole, Inst. d'Astrophysique Spatiale (Sept.), Wiebe, Russian Academy Moscow (Okt.), Wunsch, NCAC, Warsaw (Okt.), Martin, Univ. California (Okt.), Takami, Subaru Telescope (Okt.), Toft, Yale (Okt.), Tsalmantza, Athens (Okt.), Livanou, Athens (Okt.), Dutton, ETH Zürich (Okt.), Maulbetsch, AIP (Nov.), Lo Curto, ESO,

Santiago (Nov.), Mizuno, NSSTC (Nov.), Nishikawa, NSSTC (Nov.), Ellis, CalTech, Pasadena (Nov.), Di Folco, Genf (Nov.), Lawson, New South Wales (Nov.), Beckwith, STScI (Nov.), Tolstoy, Groningen (Nov.), Toth (Dez.), Vasyunin, Ural State University (Dez.), Wooden, NASA (Dez.), Posch, Wien (Dez.), Hübener, Göttingen (Dez.)

Praktikanten: Brenner (ab 1.10.), Dieminger (11.7. bis 2.9.), Friedlein (1.4. bis 30.9.), Häcker (1.3. bis 31.3.), Hauck (1.8. bis 15.9.), Hinum (18.4. bis 13.5.), König (ab 1.9.), Kordell (bis 28.2.), Reymann (1.8. bis 31.8.) Wagenblaß (bis 28.2.); Zechmeister (1.9. bis 30.9.)

Calar Alto, Almeria/Spainien

Lokale Leitung: Gredel

Astronomie, Koordination: Thiele

Astronomie, Nachtassistenten: Aceituno, Aguirre, Alises, Cardiel, Guijarro, Hoyo, Pedraz, Sánchez

Teleskoptechnik, EDV: Benitez, Capel, De Guindos, De Juan, Garcia, Helmling, Henschke, Hernandez L., Hernández R., Raul López, Marín, Morante, Müller, W., Nuñez, Parejo, Usero

Technischer Dienst, Hausdienst: Aguila, A., Aguila M., Ariza, Barbero, Barón, Carreño, Corral, Domínguez, Gómez, Góngora, Klee, Rosario López, Márquez, Martínez, Romero, Sánchez, Tapia

Verwaltung, Sekretariat: Hernández M., Hernández M.J., López M.I., Wagner M.

Arbeitsgruppen

Abteilung Planeten- und Sternentstehung

Direktor: Thomas Henning

Infrarot-Weltraumstronomie

Dietrich Lemke/Oliver Krause, Stephan Birkmann, Helmut Dannerbauer, Ulrich Grözinger, Martin Hennemann, Jörn Hinz, Ralph Hofferbert, Armin Huber, Ulrich Klaas, Ernest Krmpotic, Sven Kuhlmann, Jürgen Schreiber, Jutta Stegmaier, Manfred Stickel

Sternentstehung

Christoph Leinert, Aurora Aguilar Sicilia, Jeroen Bowman, David Butler, Andrés Carmona, Xuepeng Chen, Markus Feldt, Miwa Goto, Tigran Khazadryan, Ralf Launhardt, Rainer Lenzen, Hendrik Linz, Yaroslav Pavlyuchenkov, Diethard Peter, Elena Puga, Sascha Quanz, Thorsten Ratzka, Veronica Roccatagliata, Oliver Schütz, Dmitri Semenov, Mark Swain, Patrick Tisserand, Roy van Boekel

Braune Zwerge, Exoplaneten

Reinhard Mundt, Cristina Afonso, Alessandro Berton, Wolfgang Brandner, Matilde Fernandez, Kerstin Geißler, Bertrand Goldmann, Markus Janson, Elena Masciadri, Boris Rockenfeller, Florian Rodler, Jens Rodmann, Victoria Rodriguez Ledesma, Johnny Setiawan, Andrea Stolte, David Wel Drake

Theorie

Hubertus Klahr, Frithjof Brauer, Cornelis Dullemond, Natalia Dziourkevitch, Anders Johansen, Bernhard Keil, Stefan Umbreit

Laborastrophysik

Friedrich Huisken, Marco Arold, Olivier Debieu, Isabel Llamas Jansa, Serge Krasnokutski, Angela Staicu

Interferometriezentrum FRINGE

Thomas Henning, Uwe Graser, Ralf Launhardt, Frank Przygodda, Thorsten Ratzka, Jürgen Steinacker

Adaptive Optik

Wolfgang Brandner, Alessandro Berton, David Butler, Fulvio De Bonis, Markus Feldt, Dimitrios Gouliermis, Stefan Hippler, Felix Hormuth, Stefan Kellner, Elena Masciadri, Micaela Stumpf

Emmy-Noether-Gruppe I: »Die Entwicklung zirkumstellarer Staubscheiben zu Planetensystemen«

Sebastian Wolf, Kacper Kornek, Alexander Schegerer

Emmy-Noether-Gruppe II: »Eigenschaften und Entstehung sub-stellarer Objekte«

Coryn Bailer-Jones, Steve Boudreault, Paola Re Fiorentin

Emmy-Noether-Gruppe III: »Die Entstehung massereicher Sterne«

Hendrik Beuther

Abteilung Galaxien und Kosmologie

Direktor: Hans-Walter Rix

Struktur und Dynamik von Galaxien und des Milchstraßensystems

Hans-Walter Rix, Eva Schinnerer, Knud Jahnke, Matthew Coleman, Ignacio Trujillo, Carl Jakob Walcher, Richard D'Souza, Sebastian Haan, Nadine Neumayer, Dan Zucker, David Butler, Jelte de Jong, Domenico Tamburro, Rainer Klement

Sternpopulationen und Sternentstehung

Fabian Walter, Thomas Herbst, John Cannon, Kirsten Kraiberg Knudsen, Hélène Roussel, Frank Bigiel, Sami Dib, Dominik Riechers

Galaxienentwicklung und Kosmologie

Eric Bell, Klaus Meisenheimer, Hans-Walter Rix, Marco Barden, Dörte Mehlert, Catherine Heymans, Siegfried Falter, Zuzana Gy  ryva, Isabel Franco, Anna Pasquali, Sergey Koposov

Aktive Galaxienkerne

Klaus Meisenheimer, Nadine Neumayer, Almudena Prieto, Hélène Nicol, Marc Schartmann, Konrad Tristram, Michael Zatloukal, Vernesa Smolcic, Christian Fendt

Tiefe Durchmusterungen

Klaus Meisenheimer, Hermann-Josef Röser, Hans Hippelein, Irini Sakelliou, Zoltan Kovacs, Siegfried Falter, Boris Häußler, Knud Jahnke

Theorie – Galaxienentstehung und großräumige Struktur

Rachel Somerville, Akimi Fujita, Jorge Penarrubia, Frank van den Bosch

Instrumentierung

Thomas Herbst, Hermann-Josef Röser, Josef Fried, Wolfgang G  ssler, Lucas Labadie, Martin Kürster, Stefan Hanke, Roberto Soci, Sebastian Egner, Eva Meyer

Zusammenarbeit mit Firmen

- 4D electronic, Bretten
 ABB, Alzenau/Heidelberg
 Adolf Pfeiffer, Mannheim
 ADR, Paris
 Agilent Technologies, Böblingen
 Almet-AMB, Mannheim
 Althen, Kelkheim
 America II, Mönchengladbach
 Amphenol-Tuchel Electronics, Heilbronn
 Angst+Pfister, Mörfelden
 APE Elektronik, Kuppenheim
 API Portescap Deutschland, Pforzheim
 Arthur Henninger, Karlsruhe
 asknet AG
 Auer Paul GmbH, Mannheim
 August Krempel Soehne GmbH, Vaihingen/Enz
 AVNET EMG, Braunschweig
 bacuplast GmbH
 Baier, Digitaldruck, Heidelberg
 Barth, Leimen
 Bectronic GmbH, Derschen
 Best Power Technology, Erlangen
 Best Ventil und Fitting GmbH, Karlsruhe
 Beta Layout, Arbergen
 Bieri Engineering GmbH, Winterthur
 Binder Elektronik, Sinsheim
 Binder Magnete, Villingen-Schwenningen
 Blaessinger, Stuttgart
 BOC Edwards GmbH, Kirchheim/München
 Bohnenstiel, Heidelberg
 Böllhoff GmbH, Winnenden
 Börsig, Neckarsulm
 Brüel & Kjaer Vibro, Darmstadt
 Bubbenzer Bremsen, Kirchen-Wehrbach
 Bürklin OHG, München
 C&K Components, Neuried b. München
 CAP CNC + Coating Technik, Zell. a. H.
 CAB, Karlsruhe
 Cadillac-Plastic, Viernheim
 CAMCenter GmbH
 Carl Roth, Karlsruhe
 Carl Zeiss, Oberkochen
 Caspar Gleidlager GmbH
 CEF, Heidelberg
 Cherry Mikroschalter, Auerbach
 Christiani, Konstanz
 Coating-Plast, Schriesheim
 Com Pro, Stuttgart
 Compumess Electronic, Unterschleissheim
 Comtronic, Heiligkreuzsteinach
 Conrad Electronic, Hirschau
 Cryophysics, Darmstadt
 Dannewitz, Linsengericht
 Dastex Reinraumzubehör GmbH, Muggensturm
 Datel, München
 db electronic Daniel Böck GmbH, Waldshut-Tiengen
 Dell-Computer GmbH
 Delta-V, Wuppertal
 Deltron Components GmbH, Neuried b. München
 Deti, Meckesheim
 Digi-Key, Enschede
 Diconite UTE Pohl GmbH
 DMG-Service, Pfronten
 DPV Elektronik, Eppingen
 Dr. Johannes Heidenhain, Traunreut
 Dürkes & Obermayer, Heidelberg
 Dyna Systems NCH, Mörfelden-Walldorf
 Ebara Pumpen, Dietzenbach
 EBJ, Ladenburg
 EBV-Elektronik, Frankfurt/M.
 EBV-Elektronik, Leonberg
 EBV-Elektronik, Wiesbaden-Nordenstadt
 EC Motion, Mönchengladbach
 EC-Motion, Erkelenz
 Edsyn Europa, Kreuzwertheim
 EFH, Neidenstein
 Eldon, Büttelborn
 electronic sensor+resistor, Ottobrunn
 Elna Transformatoren, Sandhausen
 elspec, Geretsried
 ELV Elektronik, Leer
 Erni, Adelberg
 eurodis Enatechnik, Quickborn
 Europa-Lehrmittel, Verlag
 EWF, Eppingen
 Faber Industrietechnik GmbH, Mannheim
 Fairchild Imaging, USA-Milpitas
 Farben Specht, Bammental
 Farnell in One, Deisenhofen
 Farnell Electronic Services, Möglingen
 FCT Electronic, München
 Fels Spedition, Heidelberg
 Fisba, St. Gallen
 Fischer Elektronik, Lüdenscheid
 Fluke Deutschland, Fellbach
 FPS-Werkzeugmaschinen GmbH, Otterfing
 Frank GmbH
 Franke, Aalen
 Freseman Andreas
 Fritz Faulhaber, Schönaich
 Future Electronics Deutschland, Unterföhring
 GAD GmbH
 Ganter, Walldorf
 Garlock GmbH, Neuss
 Geier Metall-u. Stahlhandel, Mannheim
 Genoma Normteile, Hameln
 Gerwah Präzision GmbH
 GGP-Schaltungen, Osterode am Harz
 Glenair Electric, Oberursel
 GLT, Pforzheim
 Göbel, Horst, Ludwigshafen
 Goodfellow
 Gould Nicolet Meßtechnik, Dietzenbach
 Grandpair, Heidelberg
 Gresham Powertrade, Landsberg
 Grulms-Pneumatik, Grünstadt
 GRW, Würzburg
 Gudeco Elektronik, Neu-Anspach
 Gummi Körner, Eppelheim
 Gummi-Plast Schild, Gernsheim
 Gutekunst, Pfalzgrafenweiler
 Häcker, Weinsberg
 Häfele Leiterplattentechnik, Schießheim
 Hahn u. Kolb GmbH
 Hans Buerklin Dr., München
 Harting Elektronik, Minden
 HCK-Messzubehör, Essen
 Heidenhain Dr. Johannes GmbH, Traunreut
 Helukabel GmbH, Hemmingen
 Hilger und Kern, Mannheim
 HKi GmbH, Weinheim
 Hilma-Römheld GmbH, Hilchenbach
 Helukabel, Hemmingen
 Hema, Mannheim
 Heräus, Hanau
 Herz, Leister Geräte, Neuwied
 Hewlett-Packard Direkt, Böblingen
 Hitex Development Tools, Karlsruhe
 HM Industrieservice, Waghäusel
 Hommel-Hercules Werkzeughandel, Viernheim
 Hormuth, Heidelberg
 Horst Göbel, Ludwigshafen
 Horst Pfau, Mannheim
 Hoschar Systemelektronik, Karlsruhe

HOT Electronic, Taufkirchen	Niedergesess, Sandhausen	Schaffner Elektronik, Karlsruhe
HTF Elektro, Mannheim	Nies Electronic, Frankfurt	Schlossmacher Ingenieurbüro
Huber + Suhner, Taufkirchen	Noor, Viernheim	Schrauben-Jäger AG
IBF Mikroelektronik, Oldenburg	Oberhausen, Ketsch	Schwab Holz-Zentrum
Infrared Labs, Tucson, USA	Olympus, Hamburg	Schulz Bürozentrum GmbH
Inkos, Reute/Breisgau	Otto Faber, Mannheim	Schuricht, Fellbach-Schmidlen
Invent GmbH	Otto Ganter, Furtwangen	Schweizer Elektroisierungsstoffe, Mannheim
iSystem, Dachau	Orglmeister	SCT Servo Control Technology, Taunusstein
Jacobi Eloxal, Altlußheim	Parametric Technology, Muenchen	SE Spezial-Electronic, Bückeburg
Jarmyn, Limburg	Parcom, CH-Flurlingen	Seifert mtm Systems, Ennepetal
Ingenieurbüro Steinbach, Jena	pbe Electronic, Elmshorn	Senior Berghöfer, Kassel
Joisten+Kettenbaum, Bergisch Gladbach	PCE Group oHG	Siemens IC-Center, Mannheim
Kaiser + Kraft GmbH	Pfeiffer Adolf GmbH, Mannheim	Sinus Elektronik, Untereisesheim
Kaufmann, Crailsheim	Pfeiffer Vacuum GmbH, Asslar	SolidLine AG
Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH, Amberg	Pfister Büro	Spaeter, Viernheim
Kniel, Karlsruhe	Phoenix Contact GmbH & Co, Blomberg	Spindler & Hoyer, Göttingen
Knürr, München	Physik Instrumente, Waldbronn	Spoerle Electronic, Dreieich
Kremer Pigmente, Aichstetten	Phytec Messtechnik, Mainz	Stahlschlüssel Wegst GmbH
Kurt Norr & Co	Phytron-Elektronik, Gröbenzell	Steinbach M. Ingenieurbüro
KVT Canespa, Langenhagen	Pink Vakuumtechnik GmbH, Wertheim	Straschu Leiterplatten, Oldenburg
Laflo Reinraumtechnik GmbH	Plastipol & Co., Runkel	Suco-Scheuffele, Bietigheim-Bissingen
Lambda Electronics, Achern	Prout Services+Hardware GmbH	Tafelmaier, Rosenheim
Laser Components	PSI Tronix, Tulare, California, USA	Tautz GmbH
Layher, Güglingen	Pühl A. GmbH	Tandler, Brauen
Lemo Elektronik, München	Radiall, Rödermark	Teldix GmbH
Leybold Vacuum GmbH, Köln	Rala, Ludwigshafen	Telemeter Electronic, Donauwörth
Linde AG, Wiesbaden	Rau-Meßtechnik, Kelkheim	THK, Düsseldorf
Lineartechnik Korb, Korb	Räder Gangl, München	Thorlabs, Gruenberg
LPKF CAD/CAM Systeme, Garbsen	Reeg, Wiesloch	ThyssenKrupp Schulte
LWS-Technik GmbH & Co.	Regional Electronic Distribution, Rodgau-Jügesheim	TMS Test- und Meßsysteme, Herxheim/ Hayna
Machery-Nagel, Düren	Reichelt Elektronik, Sande	Tower Electronic Components, Schriesheim
Macrotron, München	Reinhold Halbeck, Offenhausen	Trivit AG
Mädler, Stuttgart	Reith, Mannheim	TS-Optoelectronic, München
Mankiewicz, Hamburg	Retronic, Ronneburg	TWK-Elektronik, Karlsruhe
Martor KG, Solingen	Rexel Deutschland HTF, Mannheim	Vacuumschmelze, Hanau
Matsuo Electronics Europe, Eschborn	Rexim, Maulbronn	VBE Baustoff+Eisen, Heidelberg
Matsushita Automation, Holzkirchen	Riegler & Co. kG	Varian Deutschland GmbH, Darmstadt
Maxim Ges. f. elektronische integrierte Bausteine, Planegg	Riekert & Sprenger, Wertheim	Vereinigte Baustoff-und Eisen GmbH
Menges electronic, Dortmund	Rittal + Co., Herborn	Vero Electronics, Bremen
Mentor, Erkrath	Roland Häfele Leiterplattentechnik, Schriesheim	Vision Engineering, Emmering
Metrofunkkabel-Union, Berlin	Roth Carl GmbH, Karlsruhe	W. & W. Schenk, Maulbronn
Micro Epsilon, Ortenburg	RRG Industrietechnik GmbH, Mülheim	Werner Curt GmbH&Co. Heidelberg
Mitsubishi-Electric, Weiterstadt	RS Components, Mörfelden-Walldorf	Wietholt Heinrich GmbH
Mitutoyo Messgeräte, Neuss	RSP-GmbH, Mannheim	Wika, Klingenberg
Möller-Wedel Optical, Wedel	Rudolf, Heidelberg	Witter GmbH, Heidelberg
Moll, Bleche und Verarbeitung, Hirschberg	Rufenach Vertriebs-GmbH, Heidelberg	Wikotec, Bramsche WMM, Andechs
Mönninghoff, Bochum	Rütgers, Mannheim	Wilhelm Gassert, Schriesheim
MSC Vertriebs-GmbH, Stutensee	Rufenach Vertriebs-GmbH, Heidelberg	Witzenmann GmbH, Pforzheim
MTS Systemtechnik GmbH, Mertingen	Sasco Holz, Dreieich	WS CAD Electronik, Berk Kirchen
MTI, Baden-Baden	Sauter-Cumulus GmbH	Würth Elektronik GmbH & CO., Künzelsau
Munz, Lohmar	Sartorius, Ratingen	Yamaichi Electronics, München
Nanotec, Finsing	Sasco, Putzbrunn	
Newport, Darmstadt	Scantec, Germering	
Nickel Schalt- und Meßgeräte, Villingen-Schwenningen	Scantec, Planegg	

Lehrveranstaltungen

Wintersemester 2004/2005

- J. Fried: Galaxien (Vorlesung, mit B. Fuchs, ARI)
 Th. Henning: Protostellare Scheiben (Vorlesung), Physics of Star Formation (Seminar)
 K. Meisenheimer: Radio Galaxies and Quasars (Seminar, mit J. G. Kirk, MPIK, S. Wagner, LSW)
 Ch. Leinert, H.–J. Röser: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, I (Vorlesung)
 D. Lemke: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, III (Seminar, mit M. Bartelmann, H.–P. Gail, ITA, J. Heidt, LSW)

Wintersemester 2005/2006

- C. Dullemond: The Formation of Stars and Planets (Vorlesung)
 M. Fendt, K. Meisenheimer, H.–W. Rix: Current Research Topics in Astrophysics (IMPRS-Seminar, mit W. Duschl, ITA)
 J. Fried: Galaxies (Vorlesung mit Übungen, mit B. Fuchs, ARI)

Sommersemester 2005

- Th. Henning, C. Bailer-Jones: From Brown Dwarfs to Giant Planets (Vorlesung); Physics of Star Formation (Seminar)
 R. Mundt: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, III (Seminar, mit M. Bartelmann, ITA, J. Krautter, LSW)
 Ch. Leinert, H.–J. Röser: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, II (Vorlesung)
 H.–W. Rix: Evolution of Galaxies, Stellar Dynamics, Interstellar Matter (Seminar, mit A. Just, R. Spurzem, ARI, H.–P. Gail, ITA); Gravitational Lenses (Seminar, mit M. Bartelmann, ITA, J. Wambsganss, ARI)

- H.–W. Rix: Introduction to Astronomy and Astrophysics I/II (IMPRS-Vorlesung mit Übungen, mit A. Just, R. Spurzem, ARI)
 H.–J. Röser, M. Stickle: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, III (Seminar, mit J. Wambsganss, ARI)
 S. Wolf, Th. Henning: Protoplanetary Disks (Vorlesung)

Tagungen, Vorträge

Veranstaltete Tagungen

Vom Institut veranstaltete Tagungen

- C. Afonso: Microlensing Workshop, 5.–6. November
 C. A. L. Bailer-Jones: GAIA »Data Analysis Coordination Committee« meeting, MPIA, 6.–7. Oktober
 H. Dannerbauer, U. Klaas, J. Schreiber: PACS Instrument Control Centre Team Meeting # 22, MPIA Heidelberg, 25.–26. Juli
 Ch. Fendt: MPIA Internal Symposium, 8.–9. Dezember
 W. Gässler, T. Herbst: Ringberg Workshop »Instrumentation for Extremely Large Telescopes«, Ringberg Castle, 25.–29. Juli
 R. Gredel: NEON Summer School, Calar Alto, 7.–20. August
 K. Jäger: Kolloquium »From T Tauri Stars to the Edge of the Universe«, zu Ehren von Prof. Immo Appenzeller, Heidelberg, 30. Juni–1. Juli (mit Jochen Heidt); Kuratoriums-Kolloquium, Heidelberg, September 15; Kolloquium »Frontiers of Infrared Astronomy« zu Ehren von Prof. Dietrich Lemke and Prof. Christoph Leinert, Heidelberg, 1. Dezember
 H.–J. Röser: Ringberg Workshop »Distant Clusters of Galaxies«, 23.–28. Oktober
 S. Wolf: Wilhelm und Else Heraeus Physics School »Extrasolar Planetary Systems«, Bad Honnef, 17.–21. Oktober; 2nd Annual Internal MPIA Symposium (8.–9. Dezember)

- J. Setiawan: PSF Group Workshop, Buchenbach/Schwarzwald, Mai (LOC, mit A. Schegerer, D. Peter; SOC: T. Khanzadyan, J. Rodmann, B. Goldman); MPIA External Retreat, Schloss Hirschhorn, 25.–26. April
 N. Neumayer und Micaela Stumpf: Second MPIA Student Workshop, Oberau, 5.–9. März

Andere veranstaltete Tagungen

- Ch. Fendt: »Ultra-Relativistic Jets in Astrophysics–Observations, Theory, Simulations«, Banff, Canada, 11.–15. Juli (Mitglied des SOC)
 W. Gässler: Projekt-Meeting für LINC-NIRVANA, T-OWL, ONERICA, FP6–ELT-DS Novel Concepts in AO for ELT
 R. Gredel: Jornadas de Astronomia de Almeria, 6.–10. Juni; »25 anos mirando al cielo«, El Ejido, Spain, 7.–20. November
 M. Kürster: LINC-NIRVANA Final Design Review, 21.–22. Juli; LINC-NIRVANA team visit to LBT, 28. November–1. Dezember
 Th. Henning: European Interferometry Initiative Meeting, Prag, 9. September
 E. Schinnerer: Meeting on LINC/NIRVANA science cases, Bonn, 7. Dezember
 S. Wolf, Th. Henning: Heraeus Physics School »Extrasolar Planetary Systems«, Bad Honnef, 17.–21. Oktober

Teilnahme an Tagungen, Wissenschaftliche Vorträge und Poster

- C. Afonso: Launch Conference of the International Year of Physics, Paris, UNESCO Headquarters, 13.–15. Januar; PSF Workshop, Buchenbach, Mai 30.–Juni 2. (Vortrag); XVENAA Conference, Lissabon, 28. Juni–3. Juli (Vortrag); IAU Colloquium 200, »Direct Imaging of Exoplanets«, Nizza, 3.–7. Oktober (Poster); Protostars and Planets, V, Hawaii, Oktober 24.–28. (Poster); Microlensing Workshop, MPIA, November 5.–6. (Vortrag)
- C. A. L. Bailer-Jones: Brown dwarfs and the Gaia Galactic survey mission, University of Erlangen-Nürnberg, Januar (eingeladener Vortrag); GAIA Science Team meeting, ESTEC (Netherlands), April 13–14; GAIA Classification working group meeting, Barcelona, April 27–28; Brown dwarfs and the GAIA Galactic survey mission, University of Potsdam, May (invited talk); Mapping the universe in six dimensions, Astronomisches Institut der Universität Basel, Switzerland, July (invited talk); GAIA Data Analysis Coordination Committee meeting, MPIA, October 6–7; The impact of GAIA on the future of astrophysics, University of Potsdam, October (invited talk); The GAIA challenge, Strasbourg Astronomical Observatory, France, November (invited talk);
- M. Barden: Ringberg meeting »The Role of Wide and Deep Multi-wavelength Surveys in Understanding Galaxy Evolution«, 29. März–1. April (eingeladener Vortrag); Symposium »The Origin of the HUBBLE Sequence«, Vulcano Island, Italien, 6.–12. Juni (eingeladener Vortrag)
- A. Berton: Workshop on Adaptive Optics-assisted Integral-Field Spectroscopy, La Palma, 9.–11. Mai (Vortrag); IAU Colloquium 200 »Direct Imaging of Exoplanets: Science and Techniques«, Villefranche sur Mer, 3.–7. Oktober (Poster); Heraeus Physics School »Extrasolar Planetary Systems«, Bad Honnef, 17.–21. Oktober; IAU Symposium 232 »The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes, Kapstadt, 14.–18. November (Vortrag)
- S. Birkmann: IAU Symposium 227 »Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics«, Catania, 16.–20. Mai (Poster)
- W. Brandner: IAU Symposium 227 »Massive Star Formation«, Catania, 16.–20. Mai (Poster); 2nd NAHUAL Workshop, Segovia, Juni (Vortrag); »From T Tauri Stars to the Edge of the Universe«, Heidelberg, Juni; »Protostars and Planets, V«, Hawaii, 24.–28. Oktober (Poster); Brown Dwarf Workshop, Hawaii, Oktober
- J. M. Cannon: AAS Meeting 205, San Diego, CA, Januar (Poster); STScI Mini-Workshop »Galactic Flows: The Galaxy/IGM Ecosystem«, Baltimore, MD, März (Poster); IAU Symposium 227 »Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics«, Acireale, Italien, Mai (Poster); AAS Meeting 206, Minneapolis, MN, Mai; »Infrared Diagnostics of Galaxy Evolution«, SPITZER Science Center conference, Pasadena, CA, November
- A. Carmona Gonzalez: »Photochimie des disques protoplanétaires et la interaction gas-poussière«, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Januar (Poster); Kobe International School of Planetary Sciences »Origin of Planetary Systems«, Hawaii, 11.–17. Juli (Poster); First External PSF Group Meeting, Buchenbach, Mai, 30.–Juni 2. (Poster); Workshop in Planet Formation, Kobe, 18.–19. Juli (Vortrag); IRAM Summer School »Millimeter Wavelengths Techniques and Applications«, Pradollano, Spain, 30. September – 7. Oktober (Poster); »Protostars and Planets, V«, Hawaii, 24.–28. Oktober (Poster)
- H. Dannerbauer: Workshop »The role of wide and deep multi-wavelength surveys in understanding galaxy evolution«, Ringberg, 29. März – 1. April (Vortrag); Annual Meeting of the Astronomische Gesellschaft, Köln, 29.–30. September (Poster); The SPITZER Science Center 2005 Conference: Infrared Diagnostics of Galaxy Evolution, Pasadena, 14.–16. November (Vortrag)
- R. Gredel: Kolloquiumsvortrag, Universität Jena, 4. Februar; Kolloquiumsvortrag, MPI for Solar System Research, Katlenburg-Lindau, 4. Mai; Kolloquiumsvortrag, Universidad de Chile, 13. Juni; IAU Symposium 232, »The scientific requirements of ELTs«, Kapstadt, 14.–18. November
- C. Dullemond: Meeting »From Disks to Planets«, Pasadena, März 2005 (eingeladener Review); Meeting »Star Formation«, NASA-Ames, Juli (eingeladener Vortrag); »Protostars and Planets, V«, Hawaii, Oktober (eingeladener Review, mit Hollenbach, Kamp, and D'Alessio)
- S. Falter: 2. MPIA Students Workshop (Vortrag); Ringberg Workshop »Distant Clusters of Galaxies«, 24.–28. Oktober (Vortrag)
- Ch. Fendt: Workshop »JETSET-kickoff meeting, node Heidelberg«, Heidelberg, 2. März (Vortrag); Kolloquiumsvortrag, ITA, Heidelberg, 8. Juni; International Conference »Ultra-Relativistic Jets in Astrophysics – Observations, theory, simulations«, Banff, Canada, 11.–15. Juli (Eingeladener conference Summary; zwei Poster); Workshop »JETSET-kickoff meeting, node Grenoble«, Grenoble, 17.–20. Juli (Vortrag); Workshop »PPV review team meeting«, Kopenhagen, 21.–23. August; »Protostars and Planets, V«, Hawaii, 24.–28. Oktober (Review Vortrag team member; Poster); MPIA Internal Symposium, Heidelberg, 8.–9. Dezember (Vortrag)
- M. Fernandez: »Protostars and Planets, V«, Hawaii, Oktober 24.–28. (Poster)
- W. Gässler: Conference on Multiconjugated Adaptive Optics, Paris, 13.–16. März (eingeladener Vortrag)
- D. Gouliermis: IAU Symposium 227, »Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics«, Acireale, 16.–20. Mai (Poster); Planet and Star Formation Group Workshop, Buchenbach, 30. Mai – 2. Juni (Vortrag); IAU Symposium 232 »The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes«, Kapstadt, 14.–18. November (Vortrag); »Stellar Associations of the Large Magellanic Cloud – A laboratory for the Initial Mass Function«, Potsdam, AIP, 21. September (eingeladenes Seminar)
- S. Hanke: MPIA Student Workshop, Oberau, Austria, März (Vortrag)

- B. Häußler: Winter school »Surveying the Universe – Spectroscopic and Imaging Surveys for Cosmology«, Obergurgl, 12.–19. Februar (Poster); GEMS meeting, Baltimore, 17.–19. März (Vortrag); Tagung »The Role of Wide and Deep Multi-wavelength Surveys in Understanding Galaxy Evolution«, Ringberg, 29. März – 1. April (Poster); SISCO meeting, Edinburgh, 14.–17. September; GEMS meeting, Heidelberg, 7.–11. November (zwei Vorträge)
- Th. Henning: Meeting »MIRI Consortium Science Team«, Zürich, 6. Januar (eingeladener Vortrag); Universität Braunschweig, 1. Februar (Kolloquiumsvortrag); Universität Tübingen, 2. Februar (Kolloquiumsvortrag); Meeting »From Young Disks to Planets: New Observations, Models and Theories«, Pasadena, 7.–10. März (eingeladener Vortrag); meeting »The Power of Optical/IR Interferometry: Recent Scientific Results and 2nd Generation VLTI Instrumentation«, Garching, 4.–8. April (eingeladener Vortrag); »8th Conference on Electromagnetics and Light Scattering by Nonspherical Particles«, Salobreña, Granada, 16.–20. Mai (eingeladener Vortrag); Oort Workshop on Protoplanetary Disk Evolution, Leiden, 7.–8. Juli (eingeladener Vortrag); Sapporo University, 6.–10. August (Astronomisches Kolloquium); IAU Symposium 231 »Astrochemistry throughout the Universe: Recent Successes and Current Challenges«, Asilomar, USA, 29. August – 9. September (eingeladener Vortrag); Heraeus Physics School »Extrasolar Planetary Systems«, Bad Honnef, 17.–21. Oktober (zwei Vorträge); »Protostars and Planets, V«, Hawaii, 24.–28. Oktober (eingeladener Vortrag); »Planets Network Meeting«, Leiden, 14.–18. November (eingeladener Vortrag)
- T. Herbst: JENAM 2005 »Distant Worlds«, Lüttich, 4.–7. Juli; »Instrumentation for Extremely Large Telescopes«, Schloss Ringberg, 25.–29. Juli; »The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes«, Kapstadt, 14.–18. November; Dome C Meeting, MPIA, 11. April; JENAM 2005, Lüttich, 7. Juli (eingeladener Vortrag); MPIA Kuratorium, 15. September (instrumentation progress report); LINC-NIRVANA Post-FDR Update, presentation to LBT Observatory Staff, 29. September; LINC-NIRVANA Project Overview and LBT Issues, Presentation to LN Consortium Meeting, 27. Oktober; LBT Telescope and Instrument Status Report, LBTB Meeting (vorgetragen von K. Jäger), 15. November; LINC-NIRVANA Update of the Science Case, Vortrag vor LN Consortium Meeting, 15. November; LINC-NIRVANA Project Overview, Vortrag vor LBT Observatory Staff, 28. November; LINC-NIRVANA Update of the Science Case, Presentation at LN Science Team Meeting, 7. Dezember
- S. Hippler: Design Review Meeting »Rayleigh laser beacon for the 4.2m William HERSCHEL Telescope« of the Isaac Newton Group on La Palma, 27.–28. Januar; Kolloquiumsvortrag »Adaptive Optics in Astronomy – Current trends and future prospects« am Institut für Technische Physik, DLR, Stuttgart, 14. September; OWL conceptual design review meeting, ESO, Garching, 2. November
- R. Hofferbert: European Space Mechanisms and Tribology Symposium, Luzern, 21.–23. September (Vortrag)
- K. Jäger: Dritte Münchener Runde der CPTS, München, 11.–12. Juli; Annual Meeting of the Astronomische Gesellschaft, Köln, 26.–30. September
- A. Johansen: meeting »Principles of Magnetohydrodynamics«, Leiden, März (eingeladener Vortrag); »Pencil Code Workshop«, Copenhagen, Juni (Vortrag); conference »Protostars and Planets, V«, Hawaii, 24.–28. Oktober (zwei Poster); PLANET network meeting, Leiden, November (Vortrag)
- J. de Jong: SDSS collaboration meeting, Portsmouth, 18.–21. Juni; Universitätssternwarte München, 11. Oktober (Kolloquiumsvortrag); Institut für Astrophysik, Universität Göttingen, 10. November (Kolloquiumsvortrag); Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, 19. Dezember (Kolloquiumsvortrag)
- K. Kornet: IAU Colloquium 200, »Direct Imaging of Exoplanets: Science and Techniques« (Vortrag); 79th Annual Scientific Meeting of the Astronomische Gesellschaft, Splinter Meeting: Formation of brown dwarfs (Vortrag); PLANET School and Network meeting, Leiden (Vortrag); Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Warschau (Kolloquiumsvortrag)
- H. Klahr: Bad Honnef, Heraeus Sommerschule (Vorlesung); Annual Meeting of the AG (Vortrag); »Disks to Planets« meeting in Pasadena (Vortrag); Aspen Conference on Planet Formation and Detection (Vortrag); Protostars and Planets, V, Hawaii (sieben Poster); Protoplanetary disk Evolution, Leiden (eingeladener Vortrag)
- U. Klaas: »FIR Spectroscopy – 10 Years After«, Abingdon, Oxon U.K., 10.–11. Oktober
- K. Kraiberg Knudsen: Workshop »Legacy Surveys with the James Clerk Maxwell Telescope«, Leiden, 24.–26. Januar; Kapteyn Institute, Groningen, 7. Februar (Kolloquiumsvortrag); Laboratoire d'Astrophysique de Marseille OAMP, 18. Februar (Kolloquiumsvortrag); Workshop »The role of wide and deep multi-wavelength surveys in understanding galaxy evolution«, Ringberg, 29. März – 1. April (Vortrag); Workshop »Science Requirements for a Far-Infrared Mission«, Leiden, 17.–19. Oktober; Workshop »The study of Near-IR selected high redshift galaxies«, Leiden, 2.–4. November (Vortrag); »The SPITZER Science Center 2005 Conference: Infrared Diagnostics of Galaxy Evolution«, Pasadena, CA, 14.–16. November (Poster)
- E. Krmpotic: Annual Meeting of the Astronomische Gesellschaft, Köln, 26.–30. September (Poster); Summer School »Millimeter Wave Observing Techniques and Applications«, Pradollano, Spanien, 30. September – 7. Oktober (Vortrag)
- J. Kurk: meeting »Open Questions in Cosmology: the First Billion Years«, Garching, 22.–26. August; meeting »IR Diagnostics of Galaxy Evolution«, SPITZER Science Center, Pasadena, CA, 14.–16. November (Vortrag)
- M. Kürster: »From T Tauri stars to the Edge of the Universe«, 30. Juni–1. Juli; MPIA Internal Symposium, 8.–9. Dezember (Vortrag)

- Ch. Leinert: Workshop »The power of optical/infrared interferometry: recent results and 2nd generation instruments«, ESO, Garching, April (Vortrag); »Protostars and Planets, V«, Hawaii, Oktober (eingeladener Vortrag, Co-Autor)
- D. Lemke: JWST-MIRI Science Team Meeting, ETH Zürich, 6. Januar; Technische Universität Dresden, 10.–12. Januar (Kolloquiumsvortrag); Moon Workshop, Bremen, 22.–24. März (Vortrag); SPIE Conference »Remote Sensing«, San Diego, 1.–5. August (Vortrag); Symposium »To Moon and Beyond«, Bremen, 15.–16. September (Vortrag); Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Köln, 26.–30. September (Vortrag)
- R. Lenzen: LUCIFER progress meeting, MPE, Garching; 26. Januar; ESO TOWL, Garching, 10. März (eingeladener Vortrag); PILOT meeting (Antarctica), Heidelberg, 11. April; NAHUAL, Segovia, 16.–17. Juni; Ringberg meeting on Extremely Large Telescopes, 25.–29. Juni (eingeladener Vortrag); ELT Small Studies kick-off meeting, Leiden, 21. September; IAU Symposium 232, Kapstadt, 14.–18. November (Vortrag)
- H. Linz: IAU Symposium 227 »Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics«, Acireale, Italien, 16.–20. Mai (Poster)
- E. Masciadri: Site Workshop III, Vancouver, Juni (eingeladener Vortrag); Site testing workshop TMT III, Vancouver, Juli (Vortrag); Arcetri Specialistic Seminar (eingeladener Vortrag); IAU Colloquium »Direct imaging of exoplanets: science and techniques«, Nizza, Oktober (Vortrag)
- K. Meisenheimer: Workshop »The power of optical/NIR Interferometry«, ESO Garching, 4.–8. April (eingeladener Vortrag); »Relativistic Astrophysics and Cosmology – Einsteins Legacy«, München, 7.–11. November (Vortrag)
- N. Neumayer: Japanese-German Symposium, Regensburg, 18.–22. Juli (Vortrag)
- A. Pasquali: meeting »The Study of Near-IR Selected High Redshift Galaxies«, Leiden, 31. Oktober – 4. November (eingeladener Vortrag)
- S. P. Quanz: ESO Workshop »The Power of Optical/IR Interferometry: Recent Scientific Results and 2nd Generation VLTI Instrumentation«, Garching, 4.–8. April (Vortrag); »Protostars and Planets, V«, Hawaii, 24.–28. Oktober (Poster); PLANET Network Meeting, Leiden, 14.–18. November (Vortrag)
- Th. Ratzka: ESO Workshop »The Power of Optical/IR Interferometry: Recent Scientific Results and 2nd Generation VLTI Instrumentation«, April (Poster); Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Köln, September (Vortrag)
- H.–W. Rix: NIRSPEC IST-Meeting, Florenz, 8.–9. Februar (eingeladener Vortrag); GEMS Workshop, Baltimore, 17.–19. März; Ringberg Workshop »The Role of Wide and Deep Multi-Wavelength Surveys in Understanding Galaxy Evolution«, 28. März – 1. April; New York University, April 28.–29. (zwei Kolloquiumsvorträge); 2005 SPITZER Lectures, Princeton University, 1.–13. Mai (fünf Vorlesungen); ESO OPC-Meeting, 30. Mai (Vortrag); JWST SWG-Meeting, Edinburgh, UK, 14.–15. Juni (Vortrag); SDSS-Meeting, Portsmouth, UK, 18.–20. Juni (Vortrag); Symposium »From T Tauri Stars to the Edge of the Universe«, Landessternwarte Heidelberg, 30. Juni–1. Juli (Vortrag); Ringberg Workshop »Instrumentation for Extremely Large Telescopes«, 25.–29. Juli; Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 9. August (Kolloquiumsvortrag); Conference »Nearly Normal Galaxies in a Λ CDM Universe«, UC Santa Cruz, 8.–12. August (eingeladener Vortrag); ESF Exploratory Workshop »Modelling the Galaxy«, Oxford, 6.–9. September (Vortrag) Crafoord Prize Symposium »Structure of the Universe and the Future of Cosmology«, Stockholm, 20.–21. September (eingeladener Vortrag); FIRES Workshop »The study of Near-IR selected high redshift galaxies«, Leiden, 31. Oktober – 4. November (Vortrag)
- F. Rodler: MPIA Student Workshop, Oberau (Austria), März (Vortrag); PSF Meeting, Buchenbach, Juni (Vortrag); Astrodynamical Seminar, Vienna, Juni (Vortrag)
- H.–J. Röser: NEON Summerschool at Calar Alto, August (Vortrag)
- H. Roussel: meeting »Infrared Diagnostics of Galaxy Evolution«, SPITZER Science Center, Pasadena, 14.–16. November (Poster); Institut d'Astrophysique de Paris, Dezember (eingeladener Vortrag); Service d'Astrophysique, CEA, Saclay, Dezember (eingeladener Vortrag)
- M. Schartmann: Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Köln, 26. September – 1. Oktober; Meeting »Relativistic Astrophysics and Cosmology – Einsteins Legacy«, München, November 7.–11.
- E. Schinnerer: 205th Meeting of the American Astronomical Society, San Diego, CA, Januar (Vortrag); SISCO winter-school »Surveying the Universe«, Obergurgl, Österreich, 12.–19. Februar (Vorlesung); MPIA Ringberg meeting, 29. März – 1. April (eingeladener Vortrag); USM München, 9. Mai (Kolloquiumsvortrag); COSMOS team meeting, Kyoto, 22.–27. Mai; AG Tagung, Köln, 25.–29. September (Vortrag); Workshop »Infrared diagnostics of Galaxy Evolution«, Pasadena, CA, 14.–16. November (Poster)
- D. Semenov: MPIA Mini-workshop »Magnetic Fields in Disks«, Heidelberg, 25. Januar (Vortrag); Sterrewacht Leiden, Januar 27 (Kolloquiumsvortrag); First External PSF Group Meeting, Buchenbach, 30. Mai – 2. Juni (Vortrag); »Interstellar Reactions: From Gas Phase to Solids«, Pillnitz bei Dresden, 5.–9. Juni (Vortrag); IAU Symposium 231 »Astrochemistry throughout the Universe: Recent Successes and Current Challenges«, Asilomar, USA, 29. August – 3. September (drei Poster); Protostars and Planets, V, Hawaii, 24.–28. Oktober (Poster); PLANET network meeting, SPITZER School, Leiden, 14.–18. November (Vortrag); MPIA Internal Symposium, 8.–9. Dezember (Vortrag)
- O. Schütz: Cerro Tololo International Observatory, La Serena, Chile, 25. Februar (eingeladener Vortrag)
- J. Setiawan: Workshop »The Power of optical/IR Interferometry«, Garching, 4.–8. April (Poster, mit R. Launhardt); PSF group Workshop, Buchenbach/Schwarzwald, Mai (Vortrag); Workshop »Stellar Pulsation and Evolutions«, Rome, 19.–24. Juni (Vortrag); Kiepenheuer-Institut für

- Sonnenphysik, Freiburg, 7. Juli (Kolloquiumsvortrag); Asia Pacific Regional IAU Meeting, Bali, 26.–29. Juli (Vortrag); International Conference on Instrumentation, Communication and Information Technology, Bandung, Indonesia, 3.–5. August (eingeladener Vortrag)
- A. Sicilia Aguilar: PLANET Network Meeting, Leiden, 14.–18. November (Vortrag)
- J. Staudt: MNU-Tagung der Pädagogischen Hochschule, Freiburg, 25. November (eingeladener Vortrag)
- J. Stegmaier: Alpbach Summerschool, Alpbach, 19.–28. Juli (Vortrag); Annual Meeting of the Astronomische Gesellschaft, Köln, 26.–30. September (Vortrag); Frontiers in Astroparticle Physics, Vienna, 25.–27. November
- J. Steinacker: Workshop Series »Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics«, 4th IPAM Workshop »Transfer Phenomena«, Los Angeles, 18. Mai; Protostars and Planets, V, Hawaii, 24.–28. Oktober (Poster)
- M. Sticker: ADASS XV, El Escorial, Spain, 2.–5. Oktober (Vortrag); Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Köln, 26.–30. September (Vorträge, Poster); EXTRA-HOT, Workshop on the Preparation of HERSCHEL Open-Time Key Projects, Leiden, 20.–21. Oktober; AIRUB Bochum, November (Kolloquiumsvortrag)
- M. Stumpf: 2005 Aspen Winter Conference on Astrophysics »Planet Formation and Detection«, Aspen, 5.–11. Februar (Poster); Protostars and Planets V, Hawaii, 23.–28. Oktober (Poster); PPV Brown Dwarf Workshop, Hawaii, 29. Oktober (Poster)
- M. Swain: meeting on »Astronomy in Antarctica«, Nizza Villafranca (Poster)
- Ch. Tapken: Japanisch-Deutsches Symposium »The Formation and Co-Evolution of Black Holes and Galaxies«, Regensburg, 18.–22. Juli (Vortrag); Ringberg Workshop »The role of wide and deep multi-wavelength surveys in understanding galaxy evolution«, Schloss Ringberg Castle, 29. März – 1. April
- R. Van Boekel: »From disks to planets«, Pasadena, 7.–10. März (Vortrag); Protostars and Planets, V, Hawaii 24.–28. Oktober (Poster); SPITZER School/PLANET Network Meeting, Leiden, 14.–18. November (eingeladener Vortrag); MPI für Radioastronomie, Bonn, 22. Juni (Kolloquiumsvortrag)
- F. Van den Bosch: Workshop on Dark Matter Substructure, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 14.–18. November (eingeladener Vortrag); Massachusetts Institute of Technology, 18. November (Kolloquiumsvortrag); University of Massachusetts, Amherst, USA (Kolloquiumsvortrag)
- F. Walter: Meeting of the Bonn/Bochum Graduiertenkolleg, Bad Honnef, 12.–13. Januar (eingeladener Vortrag); Heidelberg, 25. Januar (Kolloquiumsvortrag); Basel, 1. Februar (Kolloquiumsvortrag); Göttingen, 10. Februar (Kolloquiumsvortrag); Winterschool in Obergurgl, Februar 14.–18. (Vorlesung); Workshop »Submillimeter Astronomy in the Era of the SMA«, Cambridge, USA, Juni 13.–16. (eingeladener Vortrag); Department of Astrophysics, American Museum of Natural History, NYC, Juni 20 (Kolloquiumsvortrag); Workshop »Open Questions in Cosmology«, Garching, August 22.–26. (eingeladener Vortrag); DFG Schwerpunkt meeting, Kloster Irsee, 5. September; Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Köln, 28.–29. September (Vortrag); Workshop »FIRM: Far Infrared Mission«, Leiden, 16.–18. Oktober (eingeladener Vortrag); Workshop »SPITZER Galaxy Evolution«, Pasadena, 14.–16. November (Poster, mit John Cannon)
- S. Wolf: Wilhelm und Else Heraeus Physics School »Extrasolar Planetary Systems«, Bad Honnef, 17.–21. Oktober (eingeladener Vortrag); IAU Symposium 200, »Direct Imaging of Exoplanets – Science and Techniques«, Oktober 3.–7. (Vortrag); Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft, Köln, 29. September – 1. Oktober (Vortrag); Workshop »Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics. IV: Transfer Phenomena«, Institute for Pure and Applied Mathematics (IPAM), University of California at Los Angeles, 16.–20. Mai (eingeladener Vortrag); ESO Workshop »The Power of Optical/Infrared Interferometry: Recent Scientific Results and Second Generation VLTI Instrumentation«, Garching, 4.–8. April (Vortrag); 2nd Heidelberg/Tübingen Workshop on Astrophysical Fluid Dynamics, MPIA, Heidelberg, 24.–28. Oktober; »Protostars and Planets, V«, Hawaii, 24.–28. Oktober (Posters); »Protostars and Planets, V«, Brown Dwarfs Workshop, Hawaii, 29. Oktober (Poster)

Vorlesungsreihen

- H.–W. Rix hielt auf Einladung der Universität Princeton als »2005 SPITZER Lecturer« eine fünfteilige Vorlesungsreihe zum Thema »Die Entwicklung der Galaxien beobachten«.

Populärwissenschaftliche Vorträge

- A. Carmona Gonzalez: »El Sistema Solar y la formación de sistemas planetarios«, Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, 12. Mai
- R. Gredel: Almería, Juni 7 (Vortrag); El Ejido, 7. November
- B. Häußler: MPIA, Tag der offenen Tür, 25. September
- M. Hennemann: Arbeitskreis Astronomie, Studium Generale Universität Stuttgart, 7. Dezember (Vortrag »Mikrowellenhintergrund und Topologie«)
- T. Herbst: »Building LBT, the Large Binocular Telescope«, MPIA, Jugendakademie, 17. Juni, und Kinder-Akademie Mannheim, 13. Dezember

- K. Jäger: »Happy Birthday HUBBLE – 15 Jahre Weltraumteleskop HUBBLE«, Fachhochschule Göttingen, 28. April; MPIA, Tag der offenen Tür, 25. September
- K. Kornet: Summer Camp of Almukantar Astronomy Club (Vorlesungen)
- D. Lemke: »Der Orionnebulosa«, Sternfreunde Nordenham, 28. April; »Sind wir allein im Universum?«, TU Darmstadt, 15. Juni
- K. Meisenheimer: »Wie es Licht ward im Universum«, Rüsselsheimer Sternfreunde, 25. November
- S. P. Quanz: »Ursprung und Entwicklung der chemischen Elemente«, Unterricht an der Anne-Frank-Schule Eschwege, 21. März; »Unser Sonnensystem – Eine Reise zu den neun(?) Planeten«, MPIA, Tag der offenen Tür, 25. September
- A. M. Quetz: »Entstehung von Planetensystemen«. Lehrerkonferenz Donaueschingen, 7. Juni »Entstehung von Planetensystemen«, Kino »Roxy«, Neustadt/Weinstraße, 28. Juni
- H. – W. Rix: Ausstellung »Das Halbe Universum unter dem Odeonsplatz«, München, 22. Februar (Eröffnungsrede); »100 Jahre Sternwarte Regensburg« 25. Mai
- H. – J. Röser: »Die Suche nach den Uralaxien«, Volkssternwarte Darmstadt, 26. November
- J. Setiawan: Institute of Indonesian Scientific Agency, Jakarta, 10. August (Vortrag)
- S. Wolf: Eingeladener Vortrag über Forschungen zur Entstehung der Planeten aus Anlass der Verleihung des Heinz Maier-Leibnitz Preises, DFG, Bad Honnef, 6. Juni
- Am 25. September veranstaltete das MPIA einen Tag der offenen Tür mit zahlreichen Vorträgen (B. Häußler, S. Hippler, K. Jäger, K. Jahnke, H. Klahr, S. P. Quanz, J. Rodmann, J. Setiawan, J. Steinacker)

Mitarbeit in Gremien

- C. A. L. Bailer-Jones: Co-chair of the GAIA Data Analysis Coordination Committee; Mitglied des GAIA Science Teams; Leiter der GAIA Classification Working Group; Mitglied des Scientific Organizing Committee of Commission 45 (Stellar Classification) der International Astronomical Union
- M. Basken: Mitglied des CAHA program committee
- E. Bell: Mitglied des ESO Time Allocation Committee
- R. Gredel: Mitglied des Calar Alto Programmkomitees; Mitglied des Working Group for a Law against Light Pollution, Junta de Andalucia; Enhancement activities, Padova, 23.–24. Mai; Telescope directors review of access office, IAC, 31. August; National Observatory of Athens Review, Athen, Juli und November; Telescope directors forum, Paris, 14.–15. September; Opticon Executive Committee meeting, Leiden, 20. September; Opticon board meeting, Rom, 27.–28. Oktober
- Th. Henning: Mitglied des ESO's Scientific and Technical Committee; Mitglied des ESO's Strategic Planning Group; Mitglied des ESA's Astronomy Working Group; Mitglied des SOFIA Science Council; Mitglied des European ALMA Board; Vorsitzender des Deutschen zentrums für Interferometrie (FRINGE); Präsident des Science Council of the European Interferometry Initiative; Vorsitzender der LBT Beteiligungsgesellschaft; Mitglied des Board of Directors of the LBT Corporation; Mitglied des Executive Committee of the CAHA; Mitglied der Berufungskommission für die C3 Professur am ITA der Universität Heidelberg; Mitglied des DLR Review Panels »Extraterrestric Basic Research«; Stellvertretender Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik, Freiburg; Co-Investigator der Infrarot-Instrumente FIFI-LS (SOFIA), PACS (HERSCHEL), MIRI (JWST), Cheops (VLT), Prisma (VLTI); Mitglied der Astronomical Society und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft; Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina
- T. Herbst: LBT Science and Technical Committee: Mitglied seit 1997, Vorsitzender von September 2000 bis September 2005; Mitglied des ESA DARWIN Terrestrial Exoplanet Science Advisory Team; Mitglied des DARWIN GENIE Teams; Mitglied des Eso Working Group »Instrumentation for ELTs« Mitglied des Wissenschaftlichen beratungskomitees am MPIA; Mitglied des Rechnerausschusses am MPIA
- S. Hippler: Mitglied des Review Panels »Rayleigh laser beacon for the 4.2m William HERSCHEL Telescope (WHT)« des Isaac Newton Group, La Palma
- K. Jäger: Koordinator der Öffentlichkeitsarbeit des LBT-B in Deutschland
- U. Klaas: Mitglied des ISO Active Archive Phase Coordination Committee; Mitglied des HERSCHEL Calibration Steering Group, Mitglied des Bibliotheksausschusses am MPIA
- M. Kürster: Mitglied des IAU Working Group »Extrasolar Planets«
- D. Lemke: Berater des MIRI Steering Committee; Mitglied des LBT Tiger Team for the Evaluation of Financial and Scientific Status of the LBT, Tucson, Arizona, August/September
- H. – W. Rix: Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats des AIP, Potsdam; Mitglied des Kuratoriums des AIP; Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats des Astronomisches Rechen-Instituts (ARI), Heidelberg; Mitglied des ESO Visiting Committee; Mitglied des Board of the Large Binocular Telescope Corporation (LBT) und des Board of the Large Binocular Telescope

Beteiligungsgesellschaft (LBTB); Mitglied des Board of OPTICOM; Mitglied des HST Time Allocation Committee (TAC); Mitglied des JWST/NIRSPEC Science Team; Mitglied im BMBF-Gutachterausschuss »Astrophysik und Astroteilchenphysik«; Mitglied des DFG Emmy-Noether Panels; Mitglied der DFG Fachkollegien

H.–J. Röser: Sekretär des Calar Alto time allocation committee (bis Frühjahr 2005); Vergabe der MPG-Beobachtungszeit am ESO/MPG-2.2-m-Teleskop auf La Silla (mit Rainer Lenzen)

J. Staude: Mitglied der Jury im Bundeswettbewerb »Jugend forscht«

Weitere Aktivitäten am Institut

Der Girls' Day am MPIA (28. April) wurde organisiert von Eva Schinnerer und durchgeführt mit der Unterstützung von Cristina Afonso, Stefan Birkmann, Josef Fried, Stefan Hanke, Stefan Hippler, Ernest Krmpotic, Florian Rodler, Jutta Stegmaier, und Micaela Stumpf

Die Mini-Forschungsprojekte für Studenten jüngerer Semester am MPIA wurden organisiert von Sebastian Wolf und durchgeführt von Wolfgang Brandner, Dmitry Semenov und Johnny Setiawan

Versuche für das Physikalische Fortgeschrittenenpraktikum der Universität Heidelberg wurden betreut von Stephan Birkmann, Siegfried Falter, Ernest Krmpotic, Sascha P. Quanz, Marc Schartmann, und Konrad Tristram

Schülerpraktika im Rahmen der Berufs-Orientierung an Gymnasien (BOGy) wurden organisiert von Klaus Meisenheimer und durchgeführt vom 31. Januar bis 4. März, sowie vom 24.–28. Oktober mit der Unterstützung von Nadine Neumayer, Marc Schartmann,

Jutta Stegmaier und Stefan Birkmann (MPIA), Michael Biermann und Holger Mandel (LSW), und Ulrich Bastian (ARI)

Im Laufe des Jahres wurden insgesamt 550 Besucher in 20 Gruppen durch das MPIA geführt (Axel M. Quetz, Stephan Kellner, Stephan Birkmann und andere)

Cornelis Dullemond assistierte Prof. M. Bartelmann, ITA bei seiner Vorlesung »Electrodynamik«

Boris Häussler beteiligte sich an der Lehrerfortbildung die vom 19.–23. September an der Landessternwarte Heidelberg durchgeführt wurde.

Eva Schinnerer war Gleichstellungsbeauftragte am MPIA Jakob Staude, unterstützt von Axel M. Quetz, gestaltete den 44. Jahrgang der Zeitschrift »Sterne und Weltraum«

Jürgen Steinacker war im Juni Gastprofessor am Observatoire de Bordeaux und ist seit Dezember lokaler Koordinator des AstroGrid-D-Knoten Heidelberg, an dem die Institute ARI, ITA und MPIA beteiligt sind.

Veröffentlichungen

In Zeitschriften mit Referierungssystem

Abazajian, K., J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, S. S. Allam, K. S. J. Anderson, S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, I. K. Baldry, S. Bastian, A. Berlind, M. Bernardi, M. R. Blanton, J. J. Bochanski, Jr., W. N. Boroski, H. J. Brewington, J. W. Briggs, J. Brinkmann, R. J. Brunner, T. Budavári, L. N. Carey, F. J. Castander, A. J. Connolly, K. R. Covey, I. Csabai, 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, P. B. Hall, M. Hamabe, D. Harbeck, F. H. Harris, H. C. Harris, M. Harvanek, S. L. Hawley, J. Hayes, T. M. Heckman, J. S. Hendry, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, C. J. Hogan, D. W. Hogg, D. J. Holmgren, J. A. Holtzman, S.-i. Ichikawa, T. Ichikawa, Z. Ivezić, 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, D. Q. Lamb, H. Lampeitl, B. C. Lee, H. Lin, D. C. Long, J. Loveday, R. H. Lupton, E. Mannery, B. Margon, D. Martínez-Delgado, T. Matsubara, P. M. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, B. Ménard, J. A. Munn, T. Nash, E. H. Neilsen, Jr., H. J. Newberg, P. R. Newman, R. C. Nichol, T. Nicinski, M. Nieto-Santisteban, A. Nitta, S. Okamura, W. O'Mullane, R. Owen, N. Padmanabhan, G. Pauls, J. Peoples, J. R. Pier, A. C. Pope, D. Pourbaix, T. R. Quinn, M. J. Raddick, G. T. Richards, M. W. Richmond, H.–W. Rix, C. M. Rockosi, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, J. Schroeder, R. Scranton, M. Sekiguchi, E. Sheldon, K. Shimasaku, N. M. Silvestri, J. A. Smith, V. Smolcic, S. A. Snedden, A. Stebbins, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, P. Szkody, G. P. Szokoly, M. Tegmark, L. Teodoro, A. R. Thakar, C. Tremonti, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. E. Vanden Berk,

- J. Vandenberg, M. S. Vogeley, W. Voges, N. P. Vogt, L. M. Walkowicz, S.-i. Wang, D. H. Weinberg, A. A. West, S. D. M. White, B. C. Wilhite, Y. Xu, B. Yanny, N. Yasuda, C.-W. Yip, D. R. Yocum, D. G. York, I. Zehavi, S. Zibetti, D. B. Zucker: The Third Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *The Astronomical Journal* 129, 1755–1759 (2005)
- Allen, P. D., L. A. Moustakas, G. Dalton, E. MacDonald, C. Blake, L. Clewley, C. Heymans, G. Wegner: The Oxford-Dartmouth Thirty Degree Survey – II. Clustering of bright Lyman break galaxies: Strong luminosity-dependent bias at $z=4$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 360, 1244–1256 (2005)
- Apai, D., H. Linz, T. Henning, B. Stecklum: Infrared portrait of the nearby massive star-forming region IRAS 09002-4732. *Astronomy and Astrophysics* 434, 987–1003 (2005)
- Apai, D., H. Linz, T. Henning, B. Stecklum: Near-IR sources around IRAS 09002–4732. *VIZIER Online Data Catalog* 343, 40987 (2005)
- Apai, D., I. Pascucci, J. Bouwman, A. Natta, T. Henning, C. P. Dullemond: The onset of planet formation in brown dwarf disks. *Science* 310, 834–836 (2005)
- Apai, D., L. V. Tóth, T. Henning, R. Vavrek, Z. Kovács, D. Lemke: HST/NICMOS observations of a proto-brown dwarf candidate. *Astronomy and Astrophysics* 433, L33–L36 (2005)
- Araya, E., P. Hofner, S. Kurtz, H. Linz, L. Olmi, M. Sewilo, C. Watson, E. Churchwell: Discovery of an H_2CO 6 centimeter maser in IRAS 18566+0408. *The Astrophysical Journal* 618, 339–343 (2005)
- Bacon, D. J., A. N. Taylor, M. L. Brown, M. E. Gray, C. Wolf, K. Meisenheimer, S. Dye, L. Wisotzki, A. Borch, M. Kleinheinrich: Evolution of the dark matter distribution with three-dimensional weak lensing. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 363, 723–733 (2005)
- Barden, M., H.-W. Rix, R. S. Somerville, E. F. Bell, B. Häußler, C. Y. Peng, A. Borch, S. V. W. Beckwith, J. A. R. Caldwell, C. Heymans, K. Jahnke, S. Jogee, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, S. F. Sánchez, L. Wisotzki, C. Wolf: GEMS: The surface brightness and surface mass density evolution of disk galaxies. *The Astrophysical Journal* 635, 959–981 (2005)
- Bell, E. F., C. Papovich, C. Wolf, E. Le Floch, J. A. R. Caldwell, M. Barden, E. Egami, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, P. G. Pérez-González, G. H. Rieke, M. J. Rieke, J. R. Rigby, H.-W. Rix: Toward an understanding of the rapid decline of the cosmic star formation rate. *The Astrophysical Journal* 625, 23–36 (2005)
- Beuther, H., T. K. Sridharan, M. Saito: Caught in the Act: The onset of massive star formation. *The Astrophysical Journal* 634, L185–L188 (2005)
- Bihain, G., R. Rebolo, V. J. S. Béjar, J. A. Caballero, C. A. L. Bailer-Jones, R. Mundt: Proper motion Pleiades candidate L-type brown dwarfs. *Astronomische Nachrichten* 326, 1057–1058 (2005)
- Boudet, N., H. Mutschke, C. Nayral, C. Jäger, J.-P. Bernard, T. Henning, C. Meny: Temperature dependence of the submillimeter absorption coefficient of amorphous silicate grains. *The Astrophysical Journal* 633, 272–281 (2005)
- Bouy, H., E. Martín, W. Brandner, J. Bouvier: Ultracool dwarf binaries. *Astronomische Nachrichten* 326, 969–973 (2005)
- Bouy, H., E. L. Martín, W. Brandner, J. Bouvier: A possible third component in the L dwarf binary system DENIS-P J020529.0-115925 discovered with the HUBBLE Space Telescope. *The Astronomical Journal* 129, 511–517 (2005)
- Butler, D. J., D. Martínez-Delgado: On the stellar populations in NGC 185 and NGC 205 and the nuclear star cluster in NGC 205 from HUBBLE Space Telescope observations. *The Astronomical Journal* 129, 2217–2231 (2005)
- Calzetti, D., R. C. Kennicutt, Jr., L. Bianchi, D. A. Thilker, D. A. Dale, C. W. Engelbracht, C. Leitherer, M. J. Meyer, M. L. Sosey, M. Mutchler, M. W. Regan, M. D. Thornley, L. Armus, G. J. Bendo, S. Boissier, A. Boselli, B. T. Draine, K. D. Gordon, G. Helou, D. J. Hollenbach, L. Kewley, B. F. Madore, D. C. Martin, E. J. Murphy, G. H. Rieke, M. J. Rieke, H. Roussel, K. Sheth, J. D. Smith, F. Walter, B. A. White, S. Yi, N. Z. Scoville, M. Polletta, D. Lindler: Star formation in NGC 5194 (M51a): The panchromatic view from GALEX to SPITZER. *The Astrophysical Journal* 633, 871–893 (2005)
- 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 Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Spectroscopy. *The Astrophysical Journal* 618, 247–258 (2005)
- Cannon, J. M., 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., E. J. Murphy, M. D. Thornley, L. Armus, D. J. Hollenbach, C. Leitherer, M. W. Regan, H. Roussel, K. Sheth: SPITZER observations of the supergiant shell region in IC 2574. *The Astrophysical Journal* 630, L37–L40 (2005)
- Cannon, J. M., F. Walter, E. D. Skillman, L. van Zee: The nature of radio continuum emission at very low metallicity: Very large array observations of I Zw 18. *The Astrophysical Journal* 621, L21–L24 (2005)
- Carilli, C. L., P. Solomon, P. Vanden Bout, F. Walter, A. Beelen, P. Cox, F. Bertoldi, K. M. Menten, K. G. Isaak, C. J. Chandler, A. Omont: A search for dense molecular gas in high-redshift infrared-luminous galaxies. *The Astrophysical Journal* 618, 586–591 (2005)
- Carmona, A., M. E. van den Ancker, W.-F. Thi, M. Goto, T. Henning: Upper limits on CO 4.7 mm emission from disks around five Herbig Ae/Be stars. *Astronomy and Astrophysics* 436, 977–982 (2005)
- Carpenter, J. M., S. Wolf, K. Schreyer, R. Launhardt, T. Henning: Evolution of cold circumstellar dust

- around solar-type stars. *The Astronomical Journal* 129, 1049–1062 (2005)
- Chesneau, O., A. Meilland, T. Rivinius, P. Stee, S. Jankov, A. Domiciano de Souza, U. Graser, T. Herbst, E. Janot-Pacheco, R. Koehler, C. Leinert, S. Morel, F. Paresce, A. Richichi, S. Robbe-Dubois: First VLTI/MIDI observations of a Be star: Alpha Arae. *Astronomy and Astrophysics* 435, 275–287 (2005)
- Chesneau, O., M. Min, T. Herbst, L. B. F. M. Waters, D. J. Hillier, C. Leinert, A. de Koter, I. Pascucci, W. Jaffe, R. Köhler, C. Alvarez, R. van Boekel, W. Brandner, U. Graser, A. M. Lagrange, R. Lenzen, S. Morel, M. Schöller: The sub-arcsecond dusty environment of Eta Carinae. *Astronomy and Astrophysics* 435, 1043–1061 (2005)
- Chesneau, O., T. Verhoelst, B. Lopez, L. B. F. M. Waters, C. Leinert, W. Jaffe, R. Köhler, A. de Koter, C. Dijkstra: The mid-IR spatially resolved environment of OH 26.5+0.6 at maximum luminosity. *Astronomy and Astrophysics* 435, 563–574 (2005)
- Clément, D., H. Mutschke, R. Klein, C. Jäger, J. Dorschner, E. Sturm, T. Henning: Detection of silicon nitride particles in extreme carbon stars. *The Astrophysical Journal* 621, 985–990 (2005)
- Close, L. M., R. Lenzen, J. C. Guirado, E. L. Nielsen, E. E. Mamajek, W. Brandner, M. Hartung, C. Lidman, B. Biller: A dynamical calibration of the mass-luminosity relation at very low stellar masses and young ages. *Nature* 433, 286–289 (2005)
- Contursi, A., E. Sturm, D. Lutz, A. Verma, R. Genzel, M. Lehnert, A. Poglitsch, L. Tacconi, U. Klaas, M. Stickle, H. Hippelein, D. Lemke, E. Krmpotic, H. Dannerbauer, J. Schreiber, E. Schinnerer, F. Walter, S. Madden, M. Sauvage, M. Haas: Study of local infrared bright galaxies with HERSCHEL-PACS. *Astronomische Nachrichten* 326, 523–524 (2005)
- Dale, D. A., G. J. Bendo, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, M. W. Regan, L. Armus, J. M. Cannon, D. Calzetti, B. T. Draine, G. Helou, R. D. Joseph, R. C. Kennicutt, A. Li, E. J. Murphy, H. Roussel, F. Walter, H. M. Hanson, D. J. Hollenbach, T. H. Jarrett, L. J. Kewley, C. A. Lamanna, C. Leitherer, M. J. Meyer, G. H. Rieke, M. J. Rieke, K. Sheth, J. D. T. Smith, M. D. Thornley: Infrared spectral energy distributions of nearby Galaxies. *The Astrophysical Journal* 633, 857–870 (2005)
- Dannerbauer, H., D. Rigopoulou, D. Lutz, R. Genzel, E. Sturm, A. F. M. Moorwood: Follow-up near-infrared spectroscopy of ultraluminous infrared galaxies observed by ISO. *Astronomy and Astrophysics* 441, 999–1010 (2005)
- Del Popolo, A., N. Hiotelis, J. Peñarrubia: A theoretical study of the luminosity-temperature relation for clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal* 628, 76–88 (2005)
- Dib, S., A. Burkert: On the origin of the H I holes in the interstellar medium of dwarf irregular galaxies. *The Astrophysical Journal* 630, 238–249 (2005)
- Dinescu, D. I., D. Martínez-Delgado, T. M. Girard, J. Peñarrubia, H.–W. Rix, D. Butler, W. F. van Altena: Absolute proper motion of the Canis Major dwarf galaxy candidate. *The Astrophysical Journal* 631, L49–L52 (2005)
- Eisner, J. A., L. A. Hillenbrand, J. M. Carpenter, S. Wolf: Constraining the evolutionary stage of class I protostars: Multiwavelength observations and modeling. *The Astrophysical Journal* 635, 396–421 (2005)
- 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* 1084 (2005)
- Fernández, M., F. Comerón: Mass loss at the lowest stellar masses. *Astronomy and Astrophysics* 440, 1119–1126 (2005)
- Garavini, G., G. Aldering, A. Amadon, R. Amanullah, P. Astier, C. Bolland, G. Blanc, A. Conley, T. Dahlén, S. E. Deustua, R. Ellis, S. Fabbro, V. Fadeyev, X. Fan, G. Folatelli, B. Frye, E. L. Gates, R. Gibbons, G. Goldhaber, B. Goldman, A. Goobar, D. E. Groom, J. Haissinski, D. Hardin, I. Hook, D. A. Howell, S. Kent, A. G. Kim, R. A. Knop, M. Kowalski, N. Kuznetsova, B. C. Lee, C. Lidman, J. Mendez, G. J. Miller, M. Moniez, M. Mouchet, A. Mourão, H. Newberg, S. Nobili, P. E. Nugent, R. Pain, O. Perdureau, S. Perlmutter, R. Quimby, N. Regnault, J. Rich, G. T. Richards, P. Ruiz-Lapuente, B. E. Schaefer, K. Schahmanche, E. Smith, A. L. Spadafora, V. Stanishev, R. C. Thomas, N. A. Walton, L. Wang, W. M. Wood-Vasey: Spectroscopic observations and analysis of the unusual type Ia SN 1999ac. *The Astronomical Journal* 130, 2278–2292 (2005)
- García-Burillo, S., F. Combes, E. Schinnerer, F. Boone, L. K. Hunt: Molecular gas in Nuclei of Galaxies (NUGA). IV. Gravitational torques and AGN feeding. *Astronomy and Astrophysics* 441, 1011–1030 (2005)
- Garrett, M. A., K. K. Knudsen, P. P. van der Werf: Gravitationally lensed radio emission associated with SMM J16359+6612, a multiply imaged submillimeter galaxy behind A 2218. *Astronomy and Astrophysics* 431, L21–L24 (2005)
- Gentile, G., A. Burkert, P. Salucci, U. Klein, F. Walter: The dwarf galaxy DDO 47 as a dark matter laboratory: Testing cusps hiding in triaxial halos. *The Astrophysical Journal* 634, L145–L148 (2005)
- Goldman, B.: Ultra-cool dwarf variability. *Astronomische Nachrichten* 326, 1059–1064 (2005)
- González Hernández, J. I., R. Rebolo, J. Peñarrubia, J. Casares, G. Israelian: On the kinematics of the neutron star low mass X-ray binary Cen X-4. *Astronomy and Astrophysics* 435, 1185–1190 (2005)
- Gouliermis, D., W. Brandner, T. Henning: The initial mass function toward the low-mass end in the Large Magellanic Cloud with HUBBLE Space Telescope WFPC2 observations. *The Astrophysical Journal* 623, 846–859 (2005)

- Guenther, E. W., E. Covino, J. M. Alcalá, M. Esposito, R. Mundt: BS Indi: An enigmatic object in the Tucana association. *Astronomy and Astrophysics* 433, 629–634 (2005)
- Haas, M., R. Chini, U. Klaas: Exceptional H₂ emission in the Antennae galaxies: Pre-starburst shocks from the galaxy collision. *Astronomy and Astrophysics* 433, L17–L20 (2005)
- Hamilton, C. M., W. Herbst, F. J. Vrba, M. A. Ibrahimov, R. Mundt, C. A. L. Bailer-Jones, A. V. Filippenko, W. Li, V. J. S. Béjar, P. Abraham, M. Kun, A. Moór, J. Benko, S. Csizmadia, D. L. DePoy, R. W. Pogge, J. L. Marshall: The disappearing act of KH 15D: Photometric results from 1995 to 2004. *The Astronomical Journal* 130, 1896–1915 (2005)
- Hammer, F., H. Flores, D. Elbaz, X. Z. Zheng, Y. C. Liang, C. Cesarsky: Did most present-day spirals form during the last 8 Gyr? A formation history with violent episodes revealed by panchromatic observations. *Astronomy and Astrophysics* 430, 115–128 (2005)
- Harbeck, D., J. S. Gallagher, E. K. Grebel, A. Koch, D. B. Zucker: Andromeda IX: Properties of the faintest M31 dwarf satellite galaxy. *The Astrophysical Journal* 623, 159–163 (2005)
- Hardcastle, M. J., I. Sakelliou, D. M. Worrall: A CHANDRA and XMM-Newton study of the wide-angle tail radio galaxy 3C465. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 359, 1007–1021 (2005)
- Herbst, W., R. Mundt: Rotational evolution of solar-like stars in clusters from pre-main sequence to main sequence: Empirical results. *The Astrophysical Journal* 633, 967–985 (2005)
- Heymans, C., M. L. Brown, M. Barden, J. A. R. Caldwell, K. Jahnke, C. Y. Peng, H.–W. Rix, A. Taylor, S. V. W. Beckwith, E. F. Bell, A. Borch, B. Häußler, S. Jogee, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, S. F. Sánchez, R. Somerville, L. Wisotzki, C. Wolf: Cosmological weak lensing with the HST GEMS survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 361, 160–176 (2005)
- Holden, B. P., A. van der Wel, M. Franx, G. D. Illingworth, J. P. Blakeslee, P. van Dokkum, H. Ford, D. Magee, M. Postman, H.–W. Rix, P. Rosati: The fundamental plane of cluster elliptical galaxies at $z = 1.25$. *The Astrophysical Journal* 620, L83–L86 (2005)
- Hollenbach, D., U. Gorti, M. Meyer, J. S. Kim, P. Morris, J. Najita, I. Pascucci, J. Carpenter, J. Rodmann, T. Brooke, L. Hillenbrand, E. Mamajek, D. Padgett, D. Soderblom, S. Wolf, J. Lunine: Formation and evolution of planetary systems: Upper limits to the gas mass in HD 105. *The Astrophysical Journal* 631, 1180–1190 (2005)
- Horesh, A., E. O. Ofek, D. Maoz, M. Bartelmann, M. Meneghetti, H.–W. Rix: The lensed arc production efficiency of galaxy clusters: A comparison of matched observed and simulated samples. *The Astrophysical Journal* 633, 768–780 (2005)
- Inada, N., M. Oguri, C. R. Keeton, D. J. Eisenstein, F. J. Castander, K. Chiu, P. B. Hall, J. F. Hennawi, D. E. Johnston, B. Pindor, G. T. Richards, H.–W. R. Rix, D. P. Schneider, W. Zheng: Discovery of a fifth image of the large separation gravitationally lensed quasar SDSS J1004+4112. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 57, L7–L10 (2005)
- Jester, S., H.–J. Röser, K. Meisenheimer, R. Perley: The radio-ultraviolet spectral energy distribution of the jet in 3C 273. *Astronomy and Astrophysics* 431, 477–502 (2005)
- Jimenez-Munt, I., D. Garcia-Castellanos, M. Fernandez: Thin-sheet modelling of lithospheric deformation and surface mass transport. *Tectonophysics* 407, 239–255 (2005)
- Johansen, A., H. Klahr: Dust diffusion in protoplanetary disks by magnetorotational turbulence. *The Astrophysical Journal* 634, 1353–1371 (2005)
- Jørgensen, J. K., F. Lahuis, F. L. Schöier, E. F. van Dishoeck, G. A. Blake, A. C. A. Boogert, C. P. Dullemond, N. J. Evans, II, J. E. Kessler-Silacci, K. M. Pontoppidan: Protostellar holes: SPITZER Space Telescope Observations of the protostellar binary IRAS 16293–2422. *The Astrophysical Journal* 631, L77–L80 (2005)
- Just, A., J. Peñarrubia: Large scale inhomogeneity and local dynamical friction. *Astronomy and Astrophysics* 431, 861–877 (2005)
- Kim, J. S., D. C. Hines, D. E. Backman, L. A. Hillenbrand, M. R. Meyer, J. Rodmann, A. Moro-Martín, J. M. Carpenter, M. D. Silverstone, J. Bouwman, E. E. Mamajek, S. Wolf, R. Malhotra, I. Pascucci, J. Najita, D. L. Padgett, T. Henning, T. Y. Brooke, M. Cohen, S. E. Strom, E. B. Stobie, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, K. Misselt, J. E. Morrison, J. Muzerolle, K. Y. L. Su: Formation and evolution of planetary systems: Cold outer disks associated with sun-like stars. *The Astrophysical Journal* 632, 659–669 (2005)
- Kiss, C., U. Klaas, D. Lemke: Determination of confusion noise for far-infrared measurements. *Astronomy and Astrophysics* 430, 343–353 (2005)
- Klahr, H., D. N. C. Lin: Dust distribution in gas disks. II. Self-induced ring formation through a clumping instability. *The Astrophysical Journal* 632, 1113–1121 (2005)
- Klein, R., B. Posselt, K. Schreyer, J. Forbrich, T. Henning: A millimeter continuum survey for massive protoclusters in the outer galaxy. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 161, 361–393 (2005)
- Kleinheinrich, M., H.–W. Rix, T. Erben, P. Schneider, C. Wolf, M. Schirmer, K. Meisenheimer, A. Borch, S. Dye, Z. Kovacs, L. Wisotzki: The influence of redshift information on galaxy-galaxy lensing measurements. *Astronomy and Astrophysics* 439, 513–520 (2005)
- Kniazev, A. Y., E. K. Grebel, S. A. Pustilnik, A. G. Pramskij, D. B. Zucker: Spectrophotometry of sextans A and B: Chemical abundances of H II regions and planetary nebulae. *The Astronomical Journal* 130, 1558–1573 (2005)
- Knudsen, K. K., P. van der Werf, M. Franx, N. M. Förster Schreiber, P. G. van Dokkum, G. D. Illingworth, I. Labbé,

- A. Moorwood, H.-W. Rix, G. Rudnick: Submillimeter observations of distant galaxies: Uncovering the 1 mJy 850 μm population. *The Astrophysical Journal* 632, L9–L12 (2005)
- Krasnokutski, S., G. Rouillé, F. Huisken: Electronic spectroscopy of anthracene molecules trapped in helium nanodroplets. *Chemical Physics Letters* 406, 386–392 (2005)
- Krause, O., G. H. Rieke, S. M. Birkmann, E. Le Floch, K. D. Gordon, E. Egami, J. Biegging, J. P. Hughes, E. T. Young, J. L. Hinz, S. P. Quanz, D. C. Hines: Infrared echoes near the Supernova remnant Cassiopeia A. *Science* 308, 1604–1606 (2005)
- Krips, M., A. Eckart, R. Neri, J. U. Pott, S. Leon, F. Combes, S. García-Burillo, L. K. Hunt, A. J. Baker, L. J. Tacconi, P. Englmaier, E. Schinnerer, F. Boone: Molecular gas in NUCLEI of GALAXIES (NUGA). III. The warped LINER NGC 3718. *Astronomy and Astrophysics* 442, 479–493 (2005)
- Krmpotic, E., U. Klaas, D. Lemke: Dust condensations and molecular clouds in interacting spirals. *Astronomische Nachrichten* 326, 497–498 (2005)
- Kubas, D., A. Cassan, J. P. Beaulieu, C. Coutures, M. Dominik, M. D. Albrow, S. Brilliant, J. A. R. Caldwell, D. Dominis, J. Donatowicz, C. Fendt, P. Fouqué, U. G. Jørgensen, J. Greenhill, K. Hill, J. Heinmüller, K. Horne, S. Kane, J. B. Marquette, R. Martin, J. Menzies, K. R. Pollard, K. C. Sahu, C. Vinter, J. Wambsganss, R. Watson, A. Williams, C. Thurl: Full characterization of binary-lens event OGLE-2002-BLG-069 from PLANET observations. *Astronomy and Astrophysics* 435, 941–948 (2005)
- Labbé, I., J. Huang, M. Franx, G. Rudnick, P. Barmby, E. Daddi, P. G. van Dokkum, G. G. Fazio, N. M. F. Schreiber, A. F. M. Moorwood, H.-W. Rix, H. Röttgering, I. Trujillo, P. van der Werf: IRAC mid-infrared imaging of the HUBBLE Deep Field-South: Star formation histories and stellar masses of red galaxies at $z > 2$. *The Astrophysical Journal* 624, L81–L84 (2005)
- Lamm, M. H., R. Mundt, C. A. L. Bailer-Jones, W. Herbst: Rotational evolution of low mass stars: The case of NGC 2264. *Astronomy and Astrophysics* 430, 1005–1026 (2005)
- Le Floch, E., C. Papovich, H. Dole, E. F. Bell, G. Lagache, G. H. Rieke, E. Egami, P. G. Pérez-González, A. Alonso-Herrero, M. J. Rieke, M. Blaylock, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, D. C. Hines, K. A. Misselt, J. E. Morrison, J. Mould: Infrared luminosity functions from the CHANDRA Deep Field-South: The SPITZER view on the history of dusty star formation at $0 < z < 1$. *The Astrophysical Journal* 632, 169–190 (2005)
- Lehtinen, K., K. Mattila, D. Lemke: A cold globule with a class 0/I embedded source. *Astronomy and Astrophysics* 437, 159–168 (2005)
- Linz, H., B. Stecklum, T. Henning, P. Hofner, B. Brandl: The G9.62+0.19-F hot molecular core. The infrared view on very young massive stars. *Astronomy and Astrophysics* 429, 903–921 (2005)
- López Martí, B., J. Eisloffel, R. Mundt: Very low-mass members of the Lupus 3 cloud. *Astronomy and Astrophysics* 440, 139–149 (2005)
- López Martí, B., J. Eisloffel, R. Mundt: The very low-mass population of the Corona Australis and Chamaeleon II star forming regions. *Astronomy and Astrophysics* 444, 175–186 (2005)
- Maiolino, R., P. Cox, P. Caselli, A. Beelen, F. Bertoldi, C. L. Carilli, M. J. Kaufman, K. M. Menten, T. Nagao, A. Omont, A. Weiß, C. M. Walmsley, F. Walter: First detection of [CII]158 μm at high redshift: Vigorous star formation in the early Universe. *Astronomy and Astrophysics* 440, L51–L54 (2005)
- Martínez-Delgado, D., D. J. Butler, H.-W. Rix, Y. I. Franco, J. Peñarrubia, E. J. Alfaro, D. I. Dinescu: The closest view of a dwarf galaxy: New evidence on the nature of the Canis Major overdensity. *The Astrophysical Journal* 633, 205–209 (2005)
- Masciadri, E., R. Mundt, T. Henning, C. Alvarez, D. Barrado y Navascués: A search for hot massive extrasolar planets around nearby young stars with the adaptive optics system NACO. *The Astrophysical Journal* 625, 1004–1018 (2005)
- Mauerhan, J. C., M. Morris, F. Walter, F. K. Baganoff: Intraday variability of Sagittarius A* at 3 millimeters. *The Astrophysical Journal* 623, L25–L28 (2005)
- McIntosh, D. H., E. F. Bell, H.-W. Rix, C. Wolf, C. Heymans, C. Y. Peng, R. S. Somerville, M. Barden, S. V. W. Beckwith, A. Borch, J. A. R. Caldwell, B. Häußler, K. Jahnke, S. Jogee, K. Meisenheimer, S. F. Sánchez, L. Wisotzki: The evolution of early-type red galaxies with the GEMS survey: Luminosity-size and stellar mass-size relations since $z = 1$. *The Astrophysical Journal* 632, 191–209 (2005)
- McIntosh, D. H., A. I. Zabludoff, H.-W. Rix, N. Caldwell: Testing the universality of the (U-V) color-magnitude relations for nearby clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal* 619, 193–217 (2005)
- Metchev, S. A., J. A. Eisner, L. A. Hillenbrand, S. Wolf: Adaptive optics imaging of the AU Microscopii circumstellar disk: Evidence for dynamical evolution. *The Astrophysical Journal* 622, 451–462 (2005)
- Miller, C. J., R. C. Nichol, D. Reichart, R. H. Wechsler, A. E. Evrard, J. Annis, T. A. McKay, N. A. Bahcall, M. Bernardi, H. Boehringer, A. J. Connolly, T. Goto, A. Kniazev, D. Lamb, M. Postman, D. P. Schneider, R. K. Sheth, W. Voges: The C4 clustering algorithm: Clusters of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *The Astronomical Journal* 130, 968–1001 (2005)
- Moro-Martín, A., S. Wolf, R. Malhotra: Signatures of planets in spatially unresolved debris disks. *The Astrophysical Journal* 621, 1079–1097 (2005)
- Nielsen, E. L., L. M. Close, J. C. Guirado, B. A. Biller, R. Lenzen, W. Brandner, M. Hartung, C. Lidman: AB Doradus C: age, spectral type, orbit, and comparison to evolutionary models. *Astronomische Nachrichten* 326, 1033–1039 (2005)

- O'Toole, S. J., U. Heber, C. S. Jeffery, S. Dreizler, S. L. Schuh, V. M. Woolf, S. Falter, E. M. Green, B.-Q. For, E. A. Hyde, H. Kjeldsen, T. Mauch, B. A. White: The MultiSite Spectroscopic Telescope campaign: 2 m spectroscopy of the V361 Hya variable PG 1605+072. *Astronomy and Astrophysics* 440, 667–674 (2005)
- Oguri, M., N. Inada, J. F. Hennawi, G. T. Richards, D. E. Johnston, J. A. Frieman, B. Pindor, M. A. Strauss, R. J. Brunner, R. H. Becker, F. J. Castander, M. D. Gregg, P. B. Hall, H.–W. Rix, D. P. Schneider, N. A. Bahcall, J. Brinkmann, D. G. York: Discovery of two gravitationally lensed quasars with image separations of 3" from the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal* 622, 106–115 (2005)
- Ohnaka, K., J. Bergeat, T. Driebe, U. Graser, K.-H. Hofmann, R. Köhler, C. Leinert, B. Lopez, F. Malbet, S. Morel, F. Paresce, G. Perrin, T. Preibisch, A. Richichi, D. Schertl, M. Schöller, H. Sol, G. Weigelt, M. Wittkowski: Mid-infrared interferometry of the Mira variable RR Sco with the VLTI MIDI instrument. *Astronomy and Astrophysics* 429, 1057–1067 (2005)
- Ott, J., F. Walter, E. Brinks: A CHANDRA X-ray survey of nearby dwarf starburst galaxies – II. Starburst properties and outflows. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 358, 1453–1471 (2005)
- Ott, J., F. Walter, E. Brinks: A CHANDRA X-ray survey of nearby dwarf starburst galaxies – I. Data reduction and results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 358, 1423–1452 (2005)
- Ott, J., A. Weiss, C. Henkel, F. Walter: The temperature distribution of dense molecular gas in the center of NGC 253. *The Astrophysical Journal* 629, 767–780 (2005)
- Paduszynski, T., P. Sprunger, R. T. de Souza, S. Hudan, A. Alexander, B. Davin, G. Fleener, A. McIntosh, C. Metelko, R. Moore, N. Peters, J. Poehlman, J. Gauthier, F. Grenier, R. Roy, D. Theriault, E. Bell, J. Garey, J. Iglie, A. L. Keksis, S. Parketon, C. Richers, D. V. Shetty, S. N. Soisson, G. A. Soulioutis, B. Stein, S. J. Yennello: Resolving multiple particles in a highly segmented silicon array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 547, 464–479 (2005)
- Pantin, E., J. Bouwman, P. O. Lagage: An emission ring at 20.5 μm around the HAEBE star AB Aurigae: Unveiling the disk structure. *Astronomy and Astrophysics* 437, 525–530 (2005)
- Peñarrubia, J., A. J. Benson: Effects of dynamical evolution on the distribution of substructures. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 364, 977–989 (2005)
- Peñarrubia, J., D. Martínez-Delgado, H. W. Rix, M. A. Gómez-Flechoso, J. Munn, H. Newberg, E. F. Bell, B. Yanny, D. Zucker, E. K. Grebel: A comprehensive model for the Monoceros tidal stream. *The Astrophysical Journal* 626, 128–144 (2005)
- Pfalzner, S., S. Umbreit, T. Henning: Disk-disk encounters between low-mass protoplanetary accretion disks. *The Astrophysical Journal* 629, 526–534 (2005)
- Phleps, S., S. Drepper, K. Meisenheimer, B. Fuchs: Galactic structure from the Calar Alto Deep Imaging Survey (CADIS). *Astronomy and Astrophysics* 443, 929–943 (2005)
- Pizagno, J., F. Prada, D. H. Weinberg, H.–W. Rix, D. Harbeck, E. K. Grebel, E. F. Bell, J. Brinkmann, J. Holtzman, A. West: Dark matter and stellar mass in the luminous regions of disk galaxies. *The Astrophysical Journal* 633, 844–856 (2005)
- Poindexter, S., C. Afonso, D. P. Bennett, J.-F. Glicenstein, A. Gould, M. K. Szymanski, A. Udalski: Systematic analysis of 22 microlensing parallax candidates. *The Astrophysical Journal* 633, 914–930 (2005)
- Ratzka, T., R. Köhler, C. Leinert: A multiplicity survey of the Γ Ophiuchi molecular clouds. *Astronomy and Astrophysics* 437, 611–626 (2005)
- Rawlings, M. G., M. Juvela, K. Mattila, K. Lehtinen, D. Lemke: ISO observations of 3–200 μm emission by three dust populations in an isolated local translucent cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 356, 810–828 (2005)
- Riechers, D., Y. Balega, T. Driebe, K.-H. Hofmann, A. B. Men'shchikov, V. I. Shenavrin, G. Weigelt: A quasi-time-dependent radiative transfer model of OH 104.9+2.4. *Astronomy and Astrophysics* 436, 925–931 (2005)
- Rix, H.–W.: Deep optical surveys. *Sedimentary Geology* 44 (2005)
- Robberto, M., S. V. W. Beckwith, N. Panagia, S. G. Patel, T. M. Herbst, S. Ligi, A. Custo, P. Boccacci, M. Bertero: The Orion Nebula in the mid-infrared. *The Astronomical Journal* 129, 1534–1563 (2005)
- Sakelliou, I., D. M. Acreman, M. J. Hardcastle, M. R. Merrifield, T. J. Ponman, I. R. Stevens: The cool wake around 4C 34.16 as seen by XMM-Newton. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 360, 1069–1076 (2005)
- Sarzi, M., H.–W. Rix, J. C. Shields, L. C. Ho, A. J. Barth, G. Rudnick, A. V. Filippenko, W. L. W. Sargent: The stellar populations in the central Parsecs of galactic bulges. *The Astrophysical Journal* 628, 169–186 (2005)
- Schartmann, M., K. Meisenheimer, M. Camenzind, S. Wolf, T. Henning: Towards a physical model of dust tori in Active Galactic Nuclei. Radiative transfer calculations for a hydrostatic torus model. *Astronomy and Astrophysics* 437, 861–881 (2005)
- Schütz, O., G. Meeus, M. F. Sterzik: Mid-IR observations of circumstellar disks. II. Vega-type stars and a post-main sequence object. *Astronomy and Astrophysics* 431, 175–182 (2005)
- Schütz, O., G. Meeus, M. F. Sterzik: Mid-IR observations of circumstellar disks. I. Pre-main sequence objects. *Astronomy and Astrophysics* 431, 165–174 (2005)
- Semenov, D., Y. Pavlyuchenkov, K. Schreyer, T. Henning, C. Dullemond, A. Bacmann: Millimeter observations and modeling of the AB Aurigae system. *The Astrophysical Journal* 621, 853–874 (2005)
- Semenov, D. V., E. Nippolainen, A. A. Kamshilin: Fast distance measurements by use of dynamic speckles. *Optics Letters* 30, 248–250 (2005)

- Setiawan, J., J. Rodmann, L. da Silva, A. P. Hatzes, L. Pasquini, O. von der Lühse, J. R. de Medeiros, M. P. Döllinger, L. Girardi: A substellar companion around the intermediate-mass giant star HD 11977. *Astronomy and Astrophysics* 437, L31–L34 (2005)
- Shkolnik, E., G. A. H. Walker, D. A. Bohlender, P.-G. Gu, M. Kürster: Hot Jupiters and hot spots: The short- and long-term chromospheric activity on stars with giant planets. *The Astrophysical Journal* 622, 1075–1090 (2005)
- Sridharan, T. K., H. Beuther, M. Saito, F. Wyrowski, P. Schilke: High-mass starless cores. *The Astrophysical Journal* 634, L57–L60 (2005)
- Stauffer, J. R., L. M. Rebull, J. Carpenter, L. Hillenbrand, D. Backman, M. Meyer, J. S. Kim, M. Silverstone, E. Young, D. C. Hines, D. R. Soderblom, E. Mamajek, P. Morris, J. Bouwman, S. E. Strom: SPITZER Space Telescope observations of G dwarfs in the Pleiades: Circumstellar debris disks at 100 Myr age. *The Astronomical Journal* 130, 1834–1844 (2005)
- Stegmaier, J. M., D. Lemke, U. Groezinger, S. M. Birkmann: Characterization of high- and low-stressed Ge:Ga array cameras for HERSCHEL's PACS instrument. *Astronomische Nachrichten* 326, 586–587 (2005)
- Steinacker, J., A. Bacmann, T. Henning, R. Klessen, M. Sticker: 3D continuum radiative transfer in complex dust configurations. II. 3D structure of the dense molecular cloud core ρ Oph D. *Astronomy and Astrophysics* 434, 167–180 (2005)
- Sticker, M., D. Barnes, O. Krause: Extended very cold dust in the interacting HI ring galaxy pair NGC 2293 / 2292. *Astronomy and Astrophysics* 443, 373–381 (2005)
- Stolte, A., W. Brandner, E. K. Grebel, R. Lenzen, A.-M. Lagrange: The Arches cluster: Evidence for a truncated mass function? *The Astrophysical Journal* 628, L113–L117 (2005)
- Thommes, E., K. Meisenheimer: The expected abundance of Lyman- α emitting primeval galaxies. I. General model predictions. *Astronomy and Astrophysics* 430, 877–891 (2005)
- Trujillo, I., M. Pohlen: Stellar disk truncations at high z : Probing inside-out galaxy formation. *The Astrophysical Journal* 630, L17–L20 (2005)
- Umbreit, S., A. Burkert, T. Henning, S. Mikkola, R. Spurzem: The decay of accreting triple systems as brown dwarf formation scenario. *The Astrophysical Journal* 623, 940–951 (2005)
- van Boekel, R., C. P. Dullemond, C. Dominik: Flaring and self-shadowed disks around Herbig Ae stars: simulations for 10 μ m interferometers. *Astronomy and Astrophysics* 441, 563–571 (2005)
- van Boekel, R., M. Min, L. B. F. M. Waters, A. de Koter, C. Dominik, M. E. van den Ancker, J. Bouwman: A 10 μ m spectroscopic survey of Herbig Ae star disks: Grain growth and crystallization. *Astronomy and Astrophysics* 437, 189–208 (2005)
- van der Wel, A., M. Franx, P. G. van Dokkum, H.-W. Rix, G. D. Illingworth, P. Rosati: Mass-to-light ratios of field early-type galaxies at $z \sim 1$ from ultradeep spectroscopy: Evidence for mass-dependent evolution. *The Astrophysical Journal* 631, 145–162 (2005)
- Verma, A., V. Charmandaris, U. Klaas, D. Lutz, M. Haas: Obscured activity: AGN, quasars, starbursts and ULIGs observed by the Infrared Space Observatory. *Space Science Reviews* 119, 355–407 (2005)
- Voigt, F., R. Brüggemann, T. Unold, F. Huisken, G. H. Bauer: Porous thin films grown from size-selected silicon nanocrystals. *Materials Science and Engineering: C* 25, 549–866 (2005)
- Voshchinnikov, N. V., V. B. Il'in, T. Henning: Modelling the optical properties of composite and porous interstellar grains. *Astronomy and Astrophysics* 429, 371–381 (2005)
- Walcher, C. J., R. P. van der Marel, D. McLaughlin, H.-W. Rix, T. Böker, N. Häring, L. C. Ho, M. Sarzi, J. C. Shields: Masses of star clusters in the nuclei of bulgeless spiral galaxies. *The Astrophysical Journal* 618, 237–246 (2005)
- Walter, F., E. D. Skillman, E. Brinks: VLA imaging of the intriguing H I cloud HIJASS J1021+6842 in the M81 Group. *The Astrophysical Journal* 627, L105–L108 (2005)
- Wang, H., B. Stecklum, T. Henning: New Herbig-Haro objects in the L1617 and L1646 dark clouds. *Astronomy and Astrophysics* 437, 169–175 (2005)
- Weiß, A., D. Downes, C. Henkel, F. Walter: Atomic carbon at redshift ~ 2.5 . *Astronomy and Astrophysics* 429, L25–L28 (2005)
- Weiß, A., D. Downes, F. Walter, C. Henkel: Multiple CO lines in SMM J16359+6612 – further evidence for a merger. *Astronomy and Astrophysics* 440, L45–L49 (2005)
- Weiß, A., F. Walter, N. Z. Scoville: The spectral energy distribution of CO lines in M 82. *Astronomy and Astrophysics* 438, 533–544 (2005)
- Westra, E., D. H. Jones, C. E. Lidman, R. M. Athreya, K. Meisenheimer, C. Wolf, T. Szeifert, E. Pompei, L. Vanzì: The Wide Field Imager Lyman-Alpha search (WFIAS) for galaxies at redshift ~ 5.7 . I. A spatially compact Ly α emitting galaxy at redshift 5.721. *Astronomy and Astrophysics* 430, L21–L24 (2005)
- Willemsen, P. G., M. Hilker, A. Kayser, C. A. L. Bailer-Jones: Analysis of medium resolution spectra by automated methods – Application to M 55 and omega Centauri. *Astronomy and Astrophysics* 436, 379–390 (2005)
- Wolf, C., E. F. Bell, D. H. McIntosh, H.-W. Rix, M. Barden, S. V. W. Beckwith, A. Borch, J. A. R. Caldwell, B. Häussler, C. Heymans, K. Jahnke, S. Jogee, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, S. F. Sánchez, R. S. Somerville, L. Wisotzki: GEMS: Which galaxies dominate the $z \sim 0.7$ ultraviolet luminosity density? *The Astrophysical Journal* 630, 771–783 (2005)
- Wolf, C., M. E. Gray, K. Meisenheimer: Red-sequence galaxies with young stars and dust: the cluster Abell 901/902

- seen with COMBO-17. *Astronomy and Astrophysics* 443, 435–449 (2005)
- Wolf, S., G. D'Angelo: On the observability of giant protoplanets in circumstellar disks. *The Astrophysical Journal* 619, 1114–1122 (2005)
- Wolf, S., L. A. Hillenbrand: Debris disk radiative transfer simulation tool (DDS). *Computer Physics Communications* 171, 208–218 (2005)
- Wünsch, R., H. Klahr, M. Różyczka: Two-dimensional models of layered protoplanetary discs – I. The ring instability. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 362, 361–368 (2005)
- Zheng, X. Z., F. Hammer, H. Flores, F. Assémat, A. Rawat: HST/WFPC2 morphologies and bar structures of field galaxies at $0.4 < z < 1$. *Astronomy and Astrophysics* 435, 507–519 (2005)
- Ziad, A., R. Gredel, J. Aceituno, J. Borgnino, F. Hoyo, A. Irbah, F. Martin, U. Thiele, S. Pedraz: A site-testing campaign at the Calar Alto Observatory with GSM and DIMM instruments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 362, 455–459 (2005)

Tagungsberichte und Bücher

- Brandner, W. and M. E. Kasper (Hrsg.): *Science with Adaptive Optics*. ESO Astrophysics Symposia. Springer, Berlin, 387 (2005)

Eingeladene Beiträge und Übersichtsartikel

- 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, 387p
- 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. Sōma, 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)

Tagungsbeiträge

- Bailer-Jones, C. A. L.: Microarcsecond astronomy with GAIA: The solar system, the galaxy and beyond. In: *Transits of Venus: New views of the solar system and galaxy*, (Ed.) D. W. Kurtz. *IAU Colloquium 196*, Cambridge Univ. Pr., 429–443 (2005)
- Bailer-Jones, C. A. L.: Design of the GAIA Photometric Systems for stellar parametrization using a population-based optimizer. In: *The Three-Dimensional Universe with GAIA*, (Eds.) C. Turon, K. S. O'Flaherty, M. A. C. Perryman. *ESA SP – 576*, ESA, 421–425 (2005)
- Bailer-Jones, C. A. L.: Object classification and the determination of stellar parameters. In: *The Three-Dimensional Universe with GAIA*, (Eds.) C. Turon, K. S. O'Flaherty, M. A. C. Perryman. *ESA SP – 576*, ESA, 393–400 (2005)
- Birkle, K., M. Busch, F. Hormuth, M. Kretlow: Minor Planet Observations. In: *Minor Planet Observations*, 5435, (2005)
- Birkle, K., F. Lahulla, J. Garcia, M. Busch, F. Hormuth, M. Kretlow: Minor Planet Observations [493 Calar Alto]. *Minor Planet Circulars* 5497, (2005)

- Boone, F., F. Combes, S. García-Burillo, A. J. Baker, L. Hunt, S. Léon, E. Schinnerer, R. Neri, L. J. Tacconi, P. Englmaier, A. Eckart: The molecular gas in the nuclear region of NGC 4569. In: *The evolution of starbursts*, (Eds.) E. Hüttemeister, E. Manthey, D. Bomans, K. Weis. AIP Conference Proceedings 783, AIP, 161–164 (2005)
- Bouy, H., W. Brandner: High angular resolution observations of binary brown dwarfs. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 174–176 (2005)
- Brandner, W.: Halo mass function. In: *The Initial Mass Function 50 Years Later*, (Eds.) E. Corbelli, F. Palla, H. Zinnecker. Astrophysics and Space Science Library 327, 101–106 (2005)
- Castro-Tirado, A. J., J. Gorosabel, A. de Ugarte Postigo, S. Guziy, M. Jelinek, M. Karrer, H.–J. Roeser, N. Elias-Rosa, O. Bogdanov, A. Aguirre: GRB 050724: optical and near-IR observations. GRB Circular Network 3673, 1 (2005)
- Cavadore, C., E. W. Elst, C.-I. Lagerkvist, A. Boattini, H. Boehnhardt, R. Behrend, F. Hormuth, A. Fitzsimmons, R. Gauderon, B. Pernier, B.-O. Demory, D. Deluz, P. Royer, C. Vuissoz, S. Berthet, M. Cherix, H.–J. Roeser, H. Hippelein, S. Falter, C. Wolf, E. Bell, G. Bourban, S. Fornasier, E. Dotto, M. Marmier, H. Scholl: Minor Planet Observations [809 European Southern Observatory, La Silla]. *Minor Planet Circulars* 5435, (2005)
- Chesneau, O., M. Min, T. Herbst, L. B. F. M. Waters, C. Leinert, D. J. Hillier: The sub-arcsecond dusty environment of Eta Carinae. In: *The Fate of the Most Massive Stars*, (Eds.) R. Humphreys, K. Stanek. ASP Conf. Ser. 332, ASP, 165 (2005)
- Chesneau, O., L. B. F. M. Waters, C. Leinert, P. Stee, A. Meilland, R. van Boekel, M. Min: The Mid-IR interferometer VLTI/MIDI and the study of hot star disks. In: *The Nature and Evolution of Disks Around Hot Stars*, (Eds.) R. Ignace, K. Gayley. ASP Conf. Ser. 337, ASP, 225–230 (2005)
- Close, L. M., R. Lenzen, B. Biller, W. Brandner, M. Hartung: Selected examples of solar and extra-solar planetary science with AO. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 136–1145 (2005)
- Correia, S., T. Ratzka, M. Sterzik, H. Zinnecker: A VLT/NACO survey for triple systems among visual pre-main-sequence binaries. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 183–188 (2005)
- Cox, P., A. Beelen, F. Bertoldi, A. Omont, C. L. Carilli, F. Walter: Gas and dust in high redshift quasars. In: *The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 115–120 (2005)
- Dannerbauer, H., M. D. Lehnert, D. Lutz, L. Tacconi, F. Bertoldi, C. Carilli, R. Genzel, K. M. Menten: The faint counterparts of MAMBO 1.2mm sources near the NTT Deep Field. In: *Proceedings of the Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA Publications Division, 277–278 (2005)
- de Koter, A., M. Min, R. van Boekel, O. Chesneau: The Solid State Composition and Mass of the Homunculus of eta Carinae. In: *The Fate of the Most Massive Stars*, (Eds.) R. Humphreys, K. Stanek. ASP Conf. Ser. 332, ASP, 323–316 (2005)
- de Ugarte Postigo, A., J. Gorosabel, A. J. Castro-Tirado, M. Jelinek, S. Guziy, H.–J. Roeser, A. Aguirre, S. Pedraz, O. Bogdanov: GRB 050724: j-band observations. GRB Circular Network 3680, 1 (2005)
- Dziourkevitch, N.: The dispersion and symmetry characteristic of MRI-driven turbulence in ISM. In: *The Magnetized Plasma in Galaxy Evolution*, (Eds.) K. Chyzy, K. Otmianowska-Mazur, M. Soida, R.-J. Dettmar. Jagiellonian University, 74–79 (2005)
- Friedrich, S., H. Zinnecker, W. Brandner, S. Correia, M. McCaughrean: A NICMOS Direct Imaging Search for Giant Planets around the Single White Dwarfs in the Hyades. In: *14th European Workshop on White Dwarfs*, (Eds.) D. Koester, S. Moehler. ASP Conf. Ser. 334, ASP, 431–434 (2005)
- García-Burillo, S., F. Combes, E. Schinnerer, F. Boone, L. K. Hunt: How to feed AGN: The NUGA view. In: *The Evolution of Starbursts*, (Eds.) E. Hüttemeister, E. Manthey, D. Bomans, K. Weis. AIP Conference Proceedings 783, AIP, 196–202 (2005)
- Goto, M., W. Gässler, Y. Hayano, M. Iye, Y. Kamata, T. Kanzawa, N. Kobayashi, Y. Minowa, D. J. Saint-Jacques, H. Takami, N. Takato, H. Terada: Spatially resolved spectroscopy of proto-planetary nebulae. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 264–269 (2005)
- Gouliermis, D., W. Brandner, T. Henning: Stellar associations in the LMC. Best tracers of the initial mass function. In: *The Initial Mass Function 50 Years Later*, (Eds.) E. Corbelli, F. Palla, H. Zinnecker. Astrophysics and Space Science Library 327, Springer, 199–200 (2005)
- Haas, M., R. Chini, U. Klaas: The Antennae – a ULIRG in the making. In: *The Evolution of Starbursts*, (Eds.) E. Hüttemeister, E. Manthey, D. Bomans, K. Weis. AIP Conference Proceedings 783, AIP, 355–360 (2005)
- Hammer, F., H. Flores, X. Zheng, Y. Liang: A recent rebuilding of most spirals? In: *Starbursts: From 30 Doradus to Lyman Break Galaxies*, (Eds.) R. de Grijs, R. M. González Delgado. Astrophysics and Space Science Library 329, Springer, 273–278 (2005)
- Häring, N., H. W. Rix, M. Hartung, A. Prieto, R. Lenzen, K. Meisenheimer: The nucleus of Centaurus A with NACO. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 311–314 (2005)
- Heymans, C., M. L. Brown, M. Barden, J. Caldwell, B. Häußler, K. Jahnke, H.–W. Rix, S. Beckwith, E. F. Bell, A. Borch, S. Jogee, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, C. Peng, S. Sánchez, R. Somerville, A. N. Taylor, L.

- Wisotzki, C. Wolf: Weak lensing studies from space with GEMS. *New Astronomy Review* 49, 392–395 (2005)
- Heymans, C., M. L. Brown, M. Barden, J. A. R. Caldwell, K. Jahnke, H.–W. Rix, A. N. Taylor, S. Beckwith, E. Bell, A. Borch, B. Häußler, S. Jogee, D. H. McIntosh, K. Meisenheimer, C. Peng, S. F. Sánchez, R. Somerville, L. Wisotzki, C. Wolf: Weak Lensing Results from GEMS. In: *Impact of Gravitational Lensing on Cosmology*, (Eds.) Y. Mellier, G. Meylan. *Proceedings of IAU Symposium 225*, Cambridge Univ. Pr., 43–48 (2005)
- Hofferbert, R., D. Lemke, A. Böhm, F. de Bonis, M. Ebert, U. Grözinger, T. Henning, A. Huber, S. Kuhlmann, J. Ramos, R.-R. Rohloff: Development and test programme of the wheel mechanisms for the mid infra-red instrument (MIRI) of the James Webb Space Telescope (JWST). In: *European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, (Ed.) B. Warmbein. *ESA SP – 591*, ESA Publications Division, 107–116 (2005)
- Huélamo, N., W. Brandner: Dual imaging observations observations of circumstellar matter. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. *ESO Astrophysics Symposia Springer*, 206–210 (2005)
- Kaempf, T. A., P. G. Willemsen, C. A. L. Bailer-Jones: Automatic parametrization of GAIA astrometrically unresolved binary stars. In: *The Three-Dimensional Universe with GAIA*, (Eds.) C. Turon, K. O’Flaherty, M. A. C. Perryman. *ESA SP – 576*, ESA, 441–444 (2005)
- Kellner, S., R. Ragazzoni, W. Gässler, E. Diolaiti, J. Farinato, C. Adriciacio, R. Meyers, T. Morris, A. Ghedina: PIGS – a new wavefront sensor concept for ELTs. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. *ESO Astrophysics Symposia Springer*, 31–34 (2005)
- Kleinheinrich, M., H.–W. Rix, P. Schneider, T. Erben, K. Meisenheimer, C. Wolf, M. Schirmer: Galaxy-galaxy lensing studies from COMBO-17. In: *Impact of Gravitational Lensing on Cosmology*, (Eds.) Y. Mellier, G. Meylan. *Proceedings of IAU Symposium 225*, Cambridge Univ. Pr., 249–254 (2005)
- Köhler, R., M. Petr-Gotzens, M. J. McCaughrean, J. Bouvier, G. Duchene, A. Quirrenbach: An adaptive optics search for binaries in the Orion nebula cluster. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. *Springer*, 197–202 (2005)
- Krause, M., A. Löhner, C. Fendt, N. Neininger: The magnetic field along the jet of NGC 4258 and its interaction with molecular gas. In: *The Magnetized Plasma in Galaxy Evolution*, (Eds.) K. Chyzy, K. Otmianowska-Mazur, M. Soida, R.-J. Dettmar. *Jagiellonian University*, 217–222 (2005)
- Lara, L. M., H. Boehnhardt, R. Gredel, P. J. Gutierrez, J. L. Ortiz, R. Rodrigo, M. Jesus Vidal-Nunez: Comet 9P/Tempel. *International Astronomical Union Circular* 8532, 2 (2005)
- Launhardt, R.: Differential astrometry and astrometric planet searches with the VLTI. *Astronomische Nachrichten* 326, 563–564 (2005)
- Launhardt, R., T. Henning, D. Queloz, A. Quirrenbach, E. J. Bakker, H. Baumeister, P. Bizenberger, H. Bleuler, R. Dändliker, F. Delplancke, F. Derie, M. Fleury, A. Glindemann, D. Gillet, H. Hanenburg, W. Jaffe, J. A. de Jong, R. Köhler, C. Maire, R. J. Mathar, Y. Michellod, P. Müllhaupt, K. Murakawa, F. Pepe, R. S. Le Poole, J. Pragt, S. Reffert, L. Sache, O. Scherler, D. Ségransan, J. Setiawan, D. Sosnowska, R. N. Tubbs, L. Venema, K. Wagner, L. Weber, R. Wüthrich: Towards high-precision ground-based astrometry: Differential delay lines for PRIMA@VLTI. In: *Astrometry in the Age of the Next Generation of Large Telescopes*, (Eds.) P. K. Seidelmann, A. K. B. Monet. *ASP Conf. Ser. 338*, ASP, 167–175 (2005)
- Le Floch, E., C. Papovich, H. Dole, E. Egami, P. Pérez-González, G. Rieke, M. Rieke, E. Bell: Evolution of the IR energy density and SFH up to $z = 1$: First results from MIPS. In: *Starbursts: From 30 Doradus to Lyman Break Galaxies*, (Eds.) R. de Grijs, R. M. González Delgado. *Astrophysics and Space Science Library* 329, Springer, 279–282 (2005)
- Lehtinen, K., K. Mattila, D. Lemke: A comparative study of two globules from optical to far-infrared wavelengths. In: *The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. *ESA SP – 577*, ESA, 379–380 (2005)
- Lemke, D., U. Grözinger, R. Hofferbert, U. Klaas, A. Böhm, R.-R. Rohloff: Lessons learnt and implemented: from ISO- to HERSCHEL- and JWST-instrumentation. In: *Infrared Spaceborne Remote Sensing 2005*, (Ed.) M. Strojnik. *SPIE 5883*, SPIE, 1–11 (2005)
- Lenzen, R.: NAOS-CONICA observational capabilities. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. *ESO Astrophysics Symposia Springer*, 42–45 (2005)
- Lenzen, R., L. M. Close, W. Brandner, M. Hartung, B. Biller: NACO-SDI: A novel simultaneous differential imager for the direct imaging of giant extra-solar planets. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. *ESO Astrophysics Symposia Springer*, 46–52 (2005)
- Marco, O., A. Prieto: Tracing the coronal line region in AGN with VLT/NACO: The very first results. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. *ESO Astrophysics Symposia Springer*, 315–320 (2005)
- Masciadri, E., R. Mundt, C. Alvarez, T. Henning, W. Brandner, D. Barrado y Navascués, R. Neuhauser: Hot massive planets around nearby young stars – A search with NACO at the VLT. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. *ESO Astrophysics Symposia Springer*, 146–151 (2005)
- Moro-Martín, A., M. R. Meyer, L. A. Hillenbrand, D. E. Backman, S. V. W. Beckwith, J. Bouwman, T. Y. Brooke, J. M. Carpenter, M. Cohen, U. Gorti, T. Henning, D. C. Hines, D. Hollenbach, J. S. Kim, J. Lunine, R. Malhotra, E. E. Mamajek, S. Metchev, P. Morris, J. Najita, D. L. Padgett, J. Rodmann, M. D. Silverstone, D.

- R. Soderblom, J. R. Stauffer, E. B. Stobie, S. E. Strom, D. M. Watson, S. J. Weidenschilling, S. Wolf, E. Young: The formation and evolution of planetary systems: First results from a Spitzer legacy science program. In: *The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 469–470 (2005)
- Moro-Martín, A., S. Wolf, R. Malhotra, G. H. Rieke: Signatures of planets in debris disks. In: *The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 163–166 (2005)
- Mugrauer, M., R. Neuhäuser, E. Guenther, W. Brandner, J. Alves, M. Ammler: Search for sub-stellar companions using AO – First results obtained with NAOS-CONICA. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 158–160 (2005)
- Ott, J., A. Weiß, C. Henkel, F. Walter: The Temperature Distribution of Dense Molecular Gas in Starburst Cores. In: *The Evolution of Starbursts*, (Eds.) E. Hüttemeister, E. Manthey, D. Bomans, K. Weis. AIP Conference Proceedings 783, American Institute of Physics, 141–147 (2005)
- Poglitsch, A., C. Waelkens, O. H. Bauer, J. Cepa, T. Henning, C. van Hoof, R. Katterloher, F. Kerschbaum, D. Lemke, E. Renotte, L. Rodriguez, P. Royer, P. Saraceno: The Photodetector Array Camera & Spectrometer (PACS) for the HERSCHEL Space Observatory. In: *The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 11–16 (2005)
- Puga, E., M. Feldt, C. Alvarez, T. Henning, B. Stecklum: AO-assisted observations of ultra-compact H II regions. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 236–241 (2005)
- Pyo, T.-S., M. Hayashi, N. Kobayashi, A. T. Tokunaga, H. Terada, M. Goto, H. Takami, N. Takato, W. Gässler, S. Oya, Y. Hayano, Y. Kamata, Y. Minowa, T. Usada, M. Iye, Y. Yamashita: The structure of the young stellar outflows revealed by high angular resolution [Fe II] λ 1.644 μ m. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. Springer, 242–247 (2005)
- Ragazzoni, R., C. Arcidiacono, G. Bono, M. Busso, E. Diolaiti, J. Farinato, A. Moore, A. Riccardi, P. Salinari, R. Soci, G. Tosti, E. Vernet: An adaptive 2 m class telescope for a microlensing search from Antarctica. In: *Dome C Astronomy and Astrophysics Meeting*, (Eds.) M. Giard, F. Casoli, F. Paletou. EAS Publications Series 14, EDP Sciences, 161–167 (2005)
- Ratzka, T., C. Leinert: Interferometric observations of infrared companions with MIDI. *Astronomische Nachrichten* 326, 570–571 (2005)
- Reffert, S., R. Launhardt, S. Hekker, T. Henning, D. Queloz, A. Quirrenbach, D. Ségransan, J. Setiawan: Choosing suitable target, reference and calibration stars for the PRIMA astrometric planet search. In: *Astrometry in the Age of the Next Generation of Large Telescopes*, (Eds.) P. K. Seidelmann, A. K. B. Monet. ASP Conf. Ser. 338, ASP, 81–89 (2005)
- Schartmann, M., K. Meisenheimer, M. Camenzind, S. Wolf, T. Henning: Towards a physical model of dust tori in Active Galactic Nuclei. In: *The Spectral Energy Distributions of Gas-Rich Galaxies: Confronting Models with Data*, (Eds.) C. C. Popescu, R. J. Tuffs. AIP Conference Proceedings 761, AIP, 277–281 (2005)
- Scheegerer, A., S. Wolf, T. Ratzka: Evolution and radial distribution of dust in the inner 1–10A.U. of circumstellar disks around low-mass young stellar objects. *Astronomische Nachrichten* 326, 571–572 (2005)
- Schinnerer, E., T. Böker, D. S. Meier, U. Lisenfeld, E. Emsellem: Fueling nuclear star clusters: Gas dynamics in the central 100pc. In: *The Evolution of Starbursts*, (Eds.) E. Hüttemeister, E. Manthey, D. Bomans, K. Weis. AIP Conference Proceedings 783, AIP, 209–215 (2005)
- Schinnerer, E., N. Z. Scoville, C. L. Carilli: The COSMOS survey from the radio perspective. In: *The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 107–110 (2005)
- Schinnerer, E., A. Weiss, S. Aalto, N. Z. Scoville, M. P. Rupen, R. C. Kennicutt, R. Beck: Star Clusters in M51: Connection between Molecular Gas Stars and Dust. In: *Starbursts: From 30 Doradus to Lyman Break Galaxies*, (Eds.) R. de Grijs, R. M. González Delgado. Astrophysics and Space Science Library 329, Springer, 251–254 (2005)
- Schütz, O., M. Sterzik: Correcting the chromatic and airmass dependent extinction for TIMM2 spectra. In: *High resolution infrared spectroscopy in astronomy*, (Eds.) H. U. Kaeufl, R. Siebenmorgen, A. Moorwood. ESO Astrophysics Symposia Series Springer, 104–108 (2005)
- Smart, R. L., C. A. L. Bailer-Jones, H. R. A. Jones: Parallaxes of L and T dwarfs. In: *Transits of Venus: New Views of the Solar System and Galaxy*, (Ed.) D. W. Kurtz. Proceedings of IAU Colloquium 196, Cambridge Univ. Pr., 420–426 (2005)
- Staguhn, J. G., E. Schinnerer, A. Eckart, J. Scharwächter: Sub-arcsecond multi-transition molecular line observations of the nearby QSO I ZW 1. In: *The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA*, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 331–332 (2005)
- Stolte, A., W. Brandner: Resolving the arches starburst cluster in the galactic center with NAOS-CONICA. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 248–250 (2005)
- Tristram, K. R. W., M. A. Prieto: Point spread function analysis of the NACO instrument at the VLT. In: *Science with Adaptive Optics*, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 79–82 (2005)
- Walter, F.: Resolved molecular gas emission in J1148+5251: Fueling a starburst at $z=6.4$. In: *The Evolution of Starbursts*, (Eds.) E. Hüttemeister, E. Manthey, D. Bomans, K. Weis. AIP Conference Proceedings 783, AIP, 394–400 (2005)

- Walter, F.: Resolved molecular gas emission in a QSO host galaxy at $z = 6.4$. In: Starbursts: From 30 Doradus to Lyman Break Galaxies, (Eds.) R. de Grijs, R. M. González Delgado. Astrophysics and Space Science Library 329, Springer, 327–330 (2005)
- Walter, F.: Star formation triggered by interactions. In: The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 99–104 (2005)
- Walter, F., E. Brinks, W. J. G. de Blok, M. D. Thornley, R. C. Kennicutt: First Results from THINGS: The HI Nearby Galaxy Survey. In: Extra-Planar Gas, (Ed.) R. Braun. ASP Conf. Ser. 331, ASP, 269–274 (2005)
- Weghorn, H., R. Lenzen, W. Brandner, M. Hartung: Correlation image processing of diagnostic raw data collected with NAOS-CONICA. In: Science with Adaptive Optics, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 83–85 (2005)
- Wehner, M. M., A.-F. Teutu-Kengne, D. Brkovic, T. Henning, D. Klee, R. Poprawe, G. Jakse: Microsurgical anastomosis of sperm duct by laser tissue soldering. In: Photonic Therapeutics and Diagnostics, (Eds.) L. Bartels, L. Bass, W. de Riese, K. Gregory, H. Hirschberg, A. Katzir, N. Kollias, S. Madsen, M. R., K. McNally-Heintzelman, L. Tate, T. E., B. Jet-Fei Wong. SPIE 5686, SPIE, 226–233 (2005)
- Weiß, A., D. Downes, C. Henkel, F. Walter: CO and CI at redshift 2.5. In: The Evolution of Starbursts, (Eds.) E. Hüttemeister, E. Manthey, D. Bomans, K. Weis. AIP Conference Proceedings 783, AIP, 401–407 (2005)
- Weiß, A., S. Hippler, M. Feldt: Wide-field post-processing of adaptive optics images. In: Science with Adaptive Optics, (Eds.) W. Brandner, M. E. Kasper. ESO Astrophysics Symposia Springer, 87–93 (2005)
- Willemsen, P. G., T. A. Kaempf, C. A. L. Bailer-Jones, K. S. de Boer: Automated Identification of Unresolved Binaries using Medium Band Photometry. In: The Three-Dimensional Universe with GAIA, (Eds.) C. Turon, K. O’Flaherty, M. A. C. Perryman. ESA SP – 576, ESA, 479? (2005)
- Wolf, S., G. D’Angelo: Searching for giant planets in young circumstellar disks. In: The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 167–170 (2005)
- Wolf, S., H. Klahr: Observing early stages of planet formation with ALMA: large-scale vortices in protoplanetary disks. In: The Dusty and Molecular Universe: A Prelude to HERSCHEL and ALMA, (Ed.) A. Wilson. ESA SP – 577, ESA, 473–474 (2005)

Doktorarbeiten

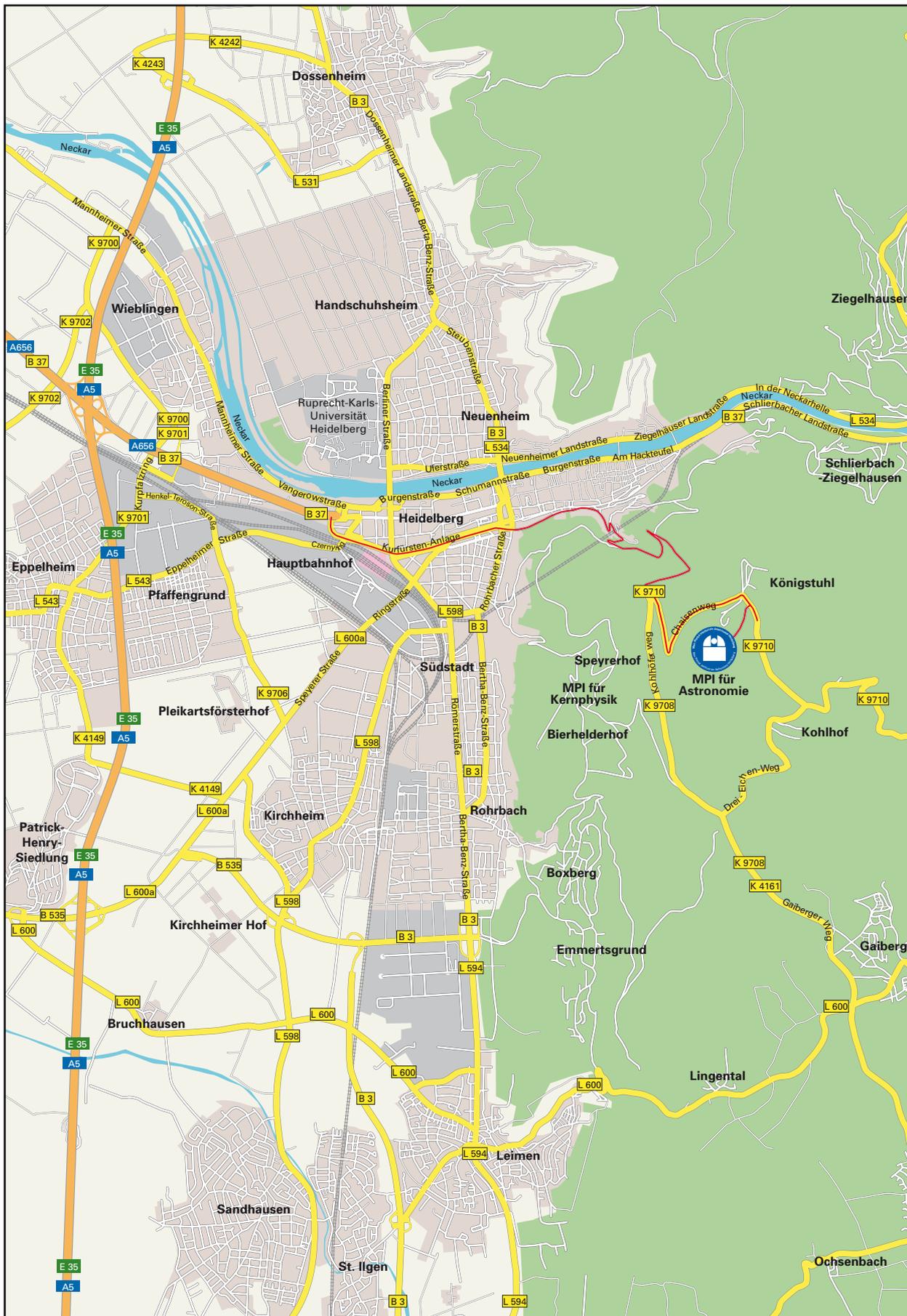
- Costa, J.: Development of a new infrared pyramid wavefront sensor. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005
- Dib, S.: Turbulence and structure formation in the interstellar medium. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005
- Kellner, S.: Novel adaptive optics concepts: Wavefront sensing with sodium laser guide stars at extremely large telescopes and simultaneous differential imaging. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005
- Linz, H.: Regions of massive star formation: Structure and stellar populations. Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2005
- Ratzka, T.: High spatial resolution observations of young stellar binaries. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005
- Schütz, O.: High-resolution studies of protoplanetary disks. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005
- Semenov, D.: Dust and gas in protoplanetary disks. Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2005
- Umbreit, S.: The theory of the formation of brown dwarfs. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005
- Walcher, J.: The nuclei of bulge-less galaxies. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005
- Wetzstein, M.: Simulations of the formation of tidal dwarf galaxies. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005

Diplomarbeiten

- Eggert, S.: Entwicklung einer Elektronikarte für die analoge Verstärkung, Digitalisierung und Übertragung von Signalen astronomischer Detektoren. FH Hannover Hannover, 2005
- Geißler, K.: High contrast imaging survey for exoplanets with Adaptive Optics. Ruprecht-Karls Universität Heidelberg, 2005
- Rockenfeller, B.: Variability of ultra cool dwarfs. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005

Populärwissenschaftliche Schriften

- Birkmann, S., S. Quanz: »Toter« Stern erzeugt kosmisches Feuerwerk. *Sterne und Weltraum* 44,9, 22–23 (2005)
- Dannerbauer, H.: Phase raschen Wachstums Schwarzer Löcher entdeckt. *Sterne und Weltraum* 44,10, 20–21 (2005)
- Dannerbauer, H.: Massereiche, entwickelte Galaxien im jungen Universum entdeckt. *Sterne und Weltraum* 44,4, 20–21 (2005)
- Davies, R., S. Hippler, R. Ragazzoni: Künstliche Sterne und grosse Gesichtsfelder. Adaptive Optik in der Astronomie Teil II. *Sterne und Weltraum* 44,4, 34–45 (2005)
- Hippler, S.: Adaptive Optik: Der scharfe Blick ins All und ins Auge. *Physik in unserer Zeit* 36, 24 (2005)
- Hoeppe, G., M. Barden, T. Bürke, B. Häussler, H.–W. Rix: HUBBLE in der Unterwelt. Die Ausstellung »Das halbe Universum« in München. *Sterne und Weltraum* 44,7, 50–55 (2005)
- Leinert, C., U. Graser: Interferometrie an Großteleskopen. Teil 2: Inbetriebnahme von MIDI und erste Ergebnisse. *Sterne und Weltraum* 44,2, 34–43 (2005)
- Lemke, D.: Das James Webb Space Telescope. *Sterne und Weltraum* 44,7, 34–35 (2005)
- Lemke, D.: Zurück zum Mond! *Sterne und Weltraum* 44,6, 24–30 (2005)
- Lenzen, R., W. Brandner: Lichtschwach, aber gewichtig. *Spektrum der Wissenschaft* 2005,5, 23–26 (2005)
- Pott, J.-U., A. Eckart, A. Glindemann, T. Viehmann, R. Schoedel, C. Straubmeier, C. Leinert, M. Feldt, R. Genzel, M. Robberto: VLTI observations of IRS 3 : The brightest compact MIR source at the Galactic Centre. *The Messenger* 119, 43–44 (2005)
- Rodler, F.: Überraschend schwerer Zwerg. *Sterne und Weltraum* 44,5, 19–20 (2005)
- Schreiber, J.: SINFONI beobachtet das Universum in 3D. *Sterne und Weltraum* 44,1, 20–21 (2005)
- Wittkowski, M., F. Paresce, O. Chesneau, P. Kervella, A. Meilland, K. Meisenheimer, K. Ohnaka: Recent astrophysical results from the VLTI. *The Messenger* 119, 36–42 (2005)



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 anwendungs offene Grundlagenforschung. Bei einem Jahresetat von rund 1.4 Milliarden Euro im Jahr 2005 beschäftigt sie rund 12 400 Mitarbeiter, von denen etwa 4300 Wissenschaftler sind. Zusätzlich forschen im Jahresverlauf rund 11 000 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